

# 我国城镇污水厂施行准Ⅳ类排放标准的 生命周期环境影响评价研究



## 重庆大学硕士学位论文

(学术学位)

学生姓名：杨禅宇

指导教师：姜文超 副教授

学科门类：工 学

学科名称：市政工程

研究方向：山地城镇排水设施建设

及高效运行技术

答辩委员会主席：万巧玲 教授级高工

授位时间：2020年7月

**Life Cycle Environmental Impact  
Assessment on Implementation of Category  
IV Equivalent Wastewater Treatment Plant  
Effluent Standard in China**



A Thesis Submitted to Chongqing University  
In Partial fulfillment of the requirement for the  
Master's Degree of Engineering

**By**

**Chanyu Yang**

**Supervised by Associate Prof. Wenchao Jiang**

**July , 2020**

## 摘 要

制定水污染物排放标准是水污染控制工作的重要基础之一。近年来,我国不少地方为了实现水污染行动计划的目标要求,陆续发布了地方污水厂准IV类污染物排放标准,引发了行业领域的广泛讨论和争议。总体来看,现有争议主要侧重于准IV类提标改造在水环境治理上的必要性与效果以及在技术上的可行性、手段及影响,而由于实施新标准所带来的全社会生命周期环境影响尚未得到重视和研究。准IV类标准提标改造固然会带来本地水环境改善效果,但可能由于新政策的制定与推行、增加新设施与新材料、增加运行能耗与药剂而为全社会带来多方面的生命周期环境影响,必须加以关注。论文旨在采用生命周期评价方法(Life Cycle Assessment, LCA),从标准制定及实施过程和污水厂提标改造本身的生命周期环境影响两方面,对我国实施准IV类排放标准的生命周期环境影响进行研究和分析,以识别产生环境影响的重要环节,获得政策制定的环境影响,为实施新排放标准提供生命周期环境影响视角上的观点和依据。

论文通过文献综述分析总结了目前准IV类污水处理标准的有关讨论,基于ISO 14040、ISO 14044 生命周期方法框架,针对准IV类标准的制定过程(子系统1)、执行准IV类标准的污水厂升级改造(子系统2)进行生命周期环境影响评估。分别以一份准IV类污水厂污染物排放标准、1m<sup>3</sup>处理水为功能单元。对子系统1,划分室内和室外活动进行清单分析,对于前者,主要通过文献和设计资料确定数据清单,对于后者,主要通过百度地图开放平台获取信息、ArcGIS 进行数据预处理、Python 3.7 计算距离矩阵并设计蚁群优化算法实现交通路径优化,来确定数据清单。对于子系统2,在现有文献工程案例数据的基础上,结合设计手册、设计标准、工程概预算手册等资料完善子系统2数据清单。采用 GaBi Education 9.1 软件、CML 2001 方法评价生命周期环境影响,选择非生物资源消耗、非生物化石燃料消耗、酸化、富营养化、淡水生态毒性、全球变暖、排除生物源碳的全球变暖、人类毒性、海洋生态毒性、臭氧层消耗、光化学臭氧生成潜能、陆地生态毒性作为评价类别,进行分类、特征化和归一化,量化、对比和识别环境影响及其重要性程度。通过对出行方式、参会人数、准IV类污水厂升级改造的不确定性分析,综合考虑这些条件变化时系统环境负荷的变化特点。

研究结果表明:

(1) 对于准IV类标准的制定过程生命周期内,海洋生态毒性是最主要的环境影响类别,其次是非生物化石燃料消耗,其中技术审查、专题研讨和培训的室内活动、以及环境从业人员从事与准IV类标准相关工作的过程中对这些影响类别贡

献较大,两个对应类别的潜能值分别约为  $6.33E+11$  kg DCB eq.和  $3.35E+10$  MJ,该子系统的臭氧层消耗潜能和非生物资源消耗潜能相对较小,最小值分别对应为学术会议相关的室内活动  $8.82E-09$  kg R11 eq.、编制人员日常工作室内活动  $2.67E-01$  kg Sb eq.;(2)执行准IV类标准的污水厂升级改造生命周期内,运行阶段的环境负荷远大于建设阶段;建设阶段对臭氧层消耗、运行阶段对富营养化产生了环境效益,分别减少  $5.86E-11$  kg R11 eq.以及  $2.24E-02$  kg Phosphate eq.;运行阶段全球变暖潜能值最大,约为  $3.01E+03$  kg CO<sub>2</sub> eq.;人类毒性是建设阶段是最重要的环境影响类别;全球变暖是运行阶段最重要的环境影响类别,且是污水厂生命周期中环境影响最大的部分。(3)在系统整体生命周期内,升级改造及运行准IV类污水厂的环境影响远大于标准制定的环境影响,特征化结果在量级上相差约为  $10^2\sim 10^5$ 。两个子系统造成主要环境影响负荷的类别也各不相同,分别是海洋生态毒性和全球变暖;归一化结果可知,全球变暖是系统整体最重要的影响类别,归一化值约为  $4.9E+02$ 。(4)准IV类标准的制定过程生命周期内,出行方式的变化对环境负荷的波动较大;短途旅行时,采用高铁替代普通火车造成的环境负荷相对较小但不明显;长距离运输时采用高铁替代飞机对环境负荷的主导影响类别发生变化,长途出行时采用飞机出行对非生物化石燃料消耗、富营养化、淡水生态毒性、全球变暖、人类毒性造成较大环境负荷,而采用高铁出行时主要影响类别与飞机不同,主要影响海洋生态毒性、臭氧层消耗和陆地生态毒性;采用高铁作为主要出行方式时相比起飞机可能更能减少环境足迹。分析参会人员不确定性可知,环境影响负荷变化随与会人数的增加而增加,与会人数的改变主要影响的是学术会议议程及论文集的制作、参会用的环保袋、会议室能耗、与会者住宿;升级改造的污水厂处理规模对准IV类标准的制定过程无明显影响。(5)对于执行准IV类标准的污水厂升级改造生命周期,出行方式、参会人员人数的变化对污水厂的升级改造无直接影响;除了富营养化和臭氧层消耗外,随着提标升级改造污水厂处理规模的不断增加,其他环境影响潜能不断增加,而富营养化和与臭氧层消耗趋势相反,表明污水处理厂基于准IV类标准提标改造的建设和运行能减轻水体富营养化和臭氧层消耗的负担的同时,但也产生了其他环境问题;(6)对两个子系统综合分析可知,当全国的准IV污水厂日处理规模约为  $1012.4$  万  $m^3/d$  时,两个子系统造成的富营养化和臭氧层消耗潜能数值上接近,污水厂对环境污染的削减效益不明显。

**关键词:** 生命周期评价; 准IV类标准; 城镇污水厂; 提标改造; 环境影响

## Abstract

The establishment of discharge standards for water pollutants is one of the important issues for water pollution control. In recent years, many places in China launched local sewage treatment plant Category IV Equivalent pollutant discharge standards to achieve the goal of water pollution control action plan, which triggered extensive discussions and debates in the this industry. Overall, main controversies tended to be the trade-off between necessity of water environment management, technical feasibility, techniques and impacts caused by upgrading wastewater treatment plant for implementation of Category IV Equivalent standard, however the whole social life cycle environmental impact caused by implementation of Category IV Equivalent standard has not been brought into focus and studied. It is no doubt that Upgrading wastewater treatment plant for implementing Category IV Equivalent standard could improve the water environment, but it may bring about life cycle environmental impact due to new policy formulation and implementation, equipping new facilities and new materials, increasing energy and reagents. This thesis aimed at using Life Cycle Assessment (LCA), from the aspects of standard formulation and implementation process, as well as upgrading wastewater treatment plants, to analyse life cycle environmental impact of implementation of Category IV Equivalent effluent standard in our country, in order to identify the important component and to obtain environmental impact of policy making, so as to provide reference from the prospective of life cycle environmental impact for implementing Category IV Equivalent effluent standard.

The thesis summarised and analysed the state-of-art environmental sustainability issues concerning Category IV Equivalent wastewater treatment effluent standard through literature review. On the basis of the ISO 14040 and ISO 14044 life cycle methodology framework, life cycle environmental impact of the Category IV Equivalent standard making procedures (subsystem 1) and upgrading wastewater treatment plants in compliance with Category IV Equivalent standard (subsystem 2) were evaluated. Functional units of these subsystems were considered to be one Category IV Equivalent effluent standard and 1m<sup>3</sup> of treated water. For subsystem 1, activities were divided into indoor and outdoor for inventory analysis, of which the former was mainly collected through the literatures and design manual, and the latter

were collected via information from the Baidu map open source platform, data preprocessing by ArcGIS, calculation of the geographical distance matrix and design of ant colony optimisation algorithm to achieve optimal traffic route by Python 3.7. For Subsystem 2, existing data from literature in combination with design manual, design standards, engineering budget manual and other materials was to complete the Subsystem 2 data inventory. Life cycle environmental impact were analysed via GaBi Education 9.1 with CML 2001 methodology. Abiotic Depletion (non fossil), Abiotic Depletion (fossil), Acidification Potential, Eutrophication, Freshwater Aquatic Ecotoxicity, Global Warming, Global Warming (excluding biogenic carbon), Human Toxicity, Marine Aquatic Ecotoxicity, Ozone Layer Depletion, Photochem. Ozone Creation, Terrestrial Ecotoxicity were selected as impact categories for classification, characterization and normalization, to quantify, compare and identify environmental impact and their significance. Uncertainty of travel mode, number of participants, and treatment scales of upgraded Category IV Equivalent wastewater treatment plants were examined for comprehensively studying the variation of the system environmental burden when these conditions change.

The results indicated that: (1) in the life cycle of Category IV Equivalent making process, Marine Aquatic Ecotoxicity was the one of the major environmental impact categories, followed by Abiotic Depletion (fossil). Indoor activities concerning technical review, workshops and training, and environmental practioners' related works for Category IV Equivalent standard contributed to mostly these impact categories with potential about  $6.33E+11$  kg DCB eq. and  $3.35E+10$  MJ respectively. The potentials of Ozone Layer Depletion and Abiotic Depletion (non fossil) in this subsystem were relatively small, with which were  $8.82E-09$ kg R11 eq., and  $2.67E-01$ kg Sb eq., respectively. (2) Within the life cycle of upgrading sewage treatment plants for implementing Category IV Equivalent standard, the environmental load in the operation phase was much higher than that in the construction phase. The construction and operation phase enabled environmental benefits for Ozone Layer Depletion and Eutrophication respectively, which reduced by  $5.86E-11$  kg R11 eq., and  $2.24E-02$  kg Phosphate eq., respectively. Global warming potential was the largest in the operation stage, with a potential of  $3.01E+03$  kg CO<sub>2</sub> eq. Human toxicity was the most significant environmental impact category in the construction phase. Global warming was the most important environmental impact category in the operation stage as well as in the life cycle of upgrading sewage treatment plant. (3) Within the life cycle of the overall

system, the environmental impact of upgrading sewage plants for implementing Category IV Equivalent standard was far greater than that of Category IV Equivalent standard making process, and the difference in magnitude of the characterisation results were about  $10^2\sim 10^5$ ; The two subsystems also have different dominant categories, namely Marine Aquatic Ecotoxicity and Global Warming respectively. The normalised result showed that Global Warming was the most significant category of the overall system, with a normalized value of about  $4.9E+02$ . (4) Within the life cycle of the formulation process of Category IV Equivalent standard, the change of travel mode caused great fluctuation on environmental load; For short trips, the environmental load caused by high-speed trains was relatively smaller but not obvious, compared to that by regular trains. Transport over long distances using high speed railway instead of plane resulted in shift of dominant environment load, long distance travel by airplane travel caused greater impacts on Abiotic Depletion (fossil), Eutrophication, Freshwater Aquatic Ecotoxicity, Global Warming, Human Toxicity, while using high-speed railway, unlike planes, it mainly affected Marine Aquatic Ecotoxicity, Ozone Layer Depletion and Terrestrial Ecotoxicity Potential. Adopting high-speed railway as the main mode of travel may reduced more environmental footprint compared to that by aircraft. By analysing the uncertainty of participants, it could be seen that the change of environmental impact load increased with the number of participants increased. The change of the number of participants mainly affects the production of printing materials for the conference program and proceedings of the academic conference, the bags used in the conference, energy consumption of the conference room and overnight stay of participants. No obvious influence on the process of Category IV Equivalent standard making by changing treatment scale of the upgraded sewage treatment plant implementing Category IV Equivalent standard. (5) For the life cycle of upgrading sewage treatment plants that implement Category IV Equivalent standard, changes in travel mode and number of participants had no direct impact on upgrading such sewage treatment plants. In addition to Eutrophication and Ozone Layer Depletion, as the treatment scale of sewage treatment plant increased, potentials of other environmental impacts increased, while these two categories behaved oppositely, indicating that constructing and operating sewage treatment plants with Category IV Equivalent standard could reduce burden of the Eutrophication and Ozone Layer Depletion at the same time, but was also associated with other environmental problems. (6) The comprehensive analysis of the two subsystems shows that when the daily treatment

scale equivalent of sewage treatment plants with Category IV Equivalent standard was about 10,124,000 m<sup>3</sup>/d, the eutrophication and ozone layer depletion potential caused by the two subsystems were close to each other, indicating that the elimination benefit of sewage treatment plant to environmental pollution was not obvious.

**Keywords:** Life Cycle Assessment; Category IV Equivalent Standard; Municipal Wastewater Plant; Upgrading and Reconstruction; Environmental Impact

## 目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
插图清单.....	XI
附表清单.....	XIII
<b>1 绪 论</b> .....	1
<b>1.1 研究背景</b> .....	1
<b>1.2 文献综述</b> .....	8
1.2.1 生命周期评价历史与发展.....	8
1.2.2 生命周期评价相关概念及定义.....	11
1.2.3 生命周期评价技术标准.....	11
1.2.4 生命周期评价方法.....	12
1.2.5 生命周期评价软件.....	13
1.2.6 生命周期评价框架.....	14
1.2.7 生命周期评价在污水处理领域的应用.....	16
<b>1.3 研究目的和主要内容</b> .....	22
1.3.1 研究目的.....	22
1.3.2 主要研究内容及技术路线.....	23
<b>2 研究范围</b> .....	27
<b>2.1 引 言</b> .....	27
<b>2.2 产品系统</b> .....	27
<b>2.3 产品系统的功能</b> .....	27
2.3.1 子系统 1: 城镇污水处理厂准IV类污染物排放标准的制定.....	27
2.3.2 子系统 2: 城镇污水处理厂基于准IV类标准的提标改造.....	28
<b>2.4 功能单元</b> .....	29
<b>2.5 系统边界</b> .....	29
2.5.1 子系统 1: 城镇污水处理厂准IV类污染物排放标准的制定.....	29
2.5.2 子系统 2: 城镇污水处理厂基于准IV类标准的提标改造.....	34
<b>2.6 分配程序</b> .....	40
<b>2.7 LCIA 方法论和影响类别</b> .....	40
<b>2.8 结果解释方法</b> .....	41
<b>2.9 数据质量要求</b> .....	41

2.10 假 设 .....	42
2.11 价值选择和选择性要素 .....	42
<b>3 清单分析 .....</b>	<b>43</b>
3.1 引 言 .....	43
3.2 室外活动清单数据收集——蚁群优化 .....	43
3.2.1 蚁群优化简介 .....	43
3.2.2 蚁群优化元启发式算法 .....	44
3.2.3 蚁群优化算法 .....	47
3.2.4 蚁群优化在环境工程领域的应用 .....	48
3.3 子系统 1 清单分析 .....	49
3.3.1 室内活动前景数据清单分析 .....	50
3.3.2 室外活动前景数据清单分析 .....	54
3.4 子系统 2 清单分析 .....	58
3.4.1 建设阶段前景数据清单分析 .....	59
3.4.2 建设阶段背景数据清单分析 .....	60
3.4.3 运行阶段前景数据清单分析 .....	60
3.4.4 运行阶段背景数据清单分析 .....	63
<b>4 影响评价 .....</b>	<b>65</b>
4.1 引 言 .....	65
4.2 子系统 1 生命周期影响评价 .....	65
4.3 系统 2 生命周期影响评价 .....	70
4.4 系统整体生命周期影响评价 .....	74
<b>5 结果解释与讨论 .....</b>	<b>79</b>
5.1 引 言 .....	79
5.2 不确定性分析 .....	79
5.2.1 出行方式不确定性 (U1) .....	79
5.2.2 参会人数不确定性 (U2) .....	80
5.2.3 准IV类污水处理厂升级改造不确定性 (U3) .....	81
5.2.4 不确定性分析结果 .....	81
<b>6 结论和建议 .....</b>	<b>89</b>
6.1 结 论 .....	89
6.2 建 议 .....	90
参考文献 .....	93
附 录 .....	107

A. 作者在攻读硕士学位期间发表的论文目录.....	107
B. 学位论文数据集:.....	107
致 谢.....	109

## 插图清单

图 1.1 LCA 一般方法论框架 .....	10
图 1.2 影响评价方法结构概述 .....	16
图 1.3 技术路线图 .....	25
图 2.1 系统边界图 .....	29
图 2.2 环境质量标准、污染物排放（控制）标准制修订工作流程图.....	32
图 2.3 污水二级处理工艺对比 .....	34
图 2.4 污水厂提标升级改造前工艺流程图 .....	36
图 2.5 污水厂提标升级改造后工艺流程图 .....	37
图 3.1 一只蚂蚁在城市 $i$ 处通过随机机制选择下一个城市进行访问:如果城市 $j$ 之前没有被访问过, 可以以与两个城市的连接线 $(i, j)$ 上的信息素相关的概率进行选择 .....	44
图 3.2 该例子为含四个城市 TSP 构造图, 其中解决方案组件与 (a) 图的边或 (b) 图的顶点相关联.....	45
图 3.3 蚁群算法路线优化计算结果 ( $m=2, \alpha=1, \beta=1, \rho=0.95$ ) .....	55
图 3.4 研讨会参会人员占比情况 .....	56
图 4.1 子系统 1 特征化结果 .....	67
图 4.2 子系统 1 归一化结果 .....	69
图 4.3 子系统 2 特征化结果 .....	71
图 4.4 子系统 2 归一化结果 .....	73
图 4.5 S1 和 S2 特征化结果.....	75
图 4.6 S1 和 S2 归一化结果.....	77
图 5.1 子系统 1 不确定性分析结果 .....	86
图 5.2 子系统 2 不确定性分析结果 .....	87
图 5.3 子系统 1 和子系统 2 不确定性综合分析结果 .....	88

## 附表清单

表 1.1 各省、流域污水厂污染物排放地方标准与国家标准对比 (单位:mg/L) .....	5
表 1.2 全国规模以上城镇污水处理厂执行排放标准情况 (截至 2017 年) .....	7
表 1.3 与 LCA 相关的 ISO14000 标准家族其他成员一览表 .....	12
表 1.4 LCA 主流软件工具简介 .....	13
表 2.1 国家标准制定程序的阶段 .....	30
表 2.2 2013 年全国投运的 4136 座城镇污水处理设施日处理能力统计 .....	34
表 2.3 污水厂设计进出水对比 (单位: mg/L) .....	36
表 2.4 污水厂提标改造后新建、改造构筑物一览表 .....	38
表 3.1 编制组工作人员、技术审查会及专题研讨会、准IV类标准培训会、环保从业人员生命 周期清单分析 .....	51
表 3.2 学术研讨会永久组委会生命周期清单分析 .....	51
表 3.3 学术研讨会地方组委会生命周期清单分析 .....	52
表 3.4 学术研讨会会务工作及网络维护生命周期清单分析 .....	53
表 3.5 学术研讨会会议材料生命周期清单分析 .....	53
表 3.6 学术研讨会会议室生命周期清单 .....	53
表 3.7 与会者住宿生命周期清单 .....	54
表 3.8 参会人员出行情况 (往返) .....	57
表 3.9 实地调研和与会人员产生的交通输入清单 .....	57
表 3.10 子系统 1 背景数据清单数据 .....	57
表 3.11 污水厂提标改造建设阶段主要构筑物清单分析 .....	59
表 3.12 污水厂提标改造建设阶段背景数据使用情况 .....	60
表 3.13 污水厂升级改造后运行阶段输入输出清单分析 .....	61
表 3.14 运行阶段背景数据使用情况 .....	63
表 4.1 子系统 1 特征化结果 .....	68
表 4.2 子系统 1 归一化结果 .....	70
表 4.3 子系统 2 特征化结果 .....	72
表 4.4 子系统 2 归一化结果 .....	73
表 4.5 S1 和 S2 特征化结果 .....	76
表 4.6 S1 和 S2 归一化结果 .....	78
表 5.1 出行方式不确定性情景分析 .....	79
表 5.2 参会人数不确定性情景分析 .....	81

表 5.3 准IV类污水处理厂升级改造不确定性情景分析 .....	81
表 5.4 子系统 1 不确定性分析特征化结果统计量 .....	83
表 5.5 子系统 1 不确定性分析归一化结果统计量 .....	83
表 5.6 子系统 2 不确定性分析特征化结果统计量 .....	84
表 5.7 子系统 2 不确定性分析归一化结果统计量 .....	84
表 5.8 子系统 1 和子系统 2 不确定性综合分析特征化结果统计量 .....	85
表 5.9 子系统 1 和子系统 2 不确定性综合分析归一化结果统计量 .....	85

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景

中国幅员辽阔，地形地貌复杂，气候特征各异，水资源分布不均匀。纵观全国，水资源状况呈现东南较丰沛、西北较匮乏的特点。同时，我国人口众多致使人均水资源占有量较低，因此我国水资源极其贫乏，是全球 13 个缺水国家之一，目前全国 600 多个城市中大约二分之一的城市存在用水问题。在现代化建设过程中，我国长期采用传统的经济发展模式，其通常是高投入和高消耗的模式，对环境的破坏非常严重。再者，对水污染宏观调控不到位、对城市水环境系统缺乏统一的规划、工业超标排放废水、污废水处理设施建设和水处理技术滞后，以及缺乏技术平台以全面支撑水环境的控制和管理，致使我国的水环境和水污染问题不容乐观，对人民的生产、生活和经济的发展造成不利影响。水污染降低了水体的使用功能，加剧了水资源短缺，对我国可持续发展战略的实施带来了负面影响<sup>[1]</sup>。我国 75% 的湖泊呈现不同程度的富营养化现象；90% 的城市水域污染严重，其中位于南方地区的城市缺水量由于水污染导致的缺水量占总缺水量的 60~70%；地下水调查获悉，我国 118 个大中城市中有 115 个城市地下水受到污染，其中重度污染约占 40%。近年来，环境污染问题成为社会热点，越来越多人关注低碳经济和环境保护理论，环境保护的工作需要社会各界的积极参与<sup>[2]</sup>。

水污染控制工作离不开水污染物排放标准，后者是前者的重要基础，也是国家污染物排放标准体系的重要组成部分<sup>[3]</sup>，其以接纳水体的水质要求为依据，并考量社会经济条件、生态环境状况、污染治理技术等条件，对排放到水环境中有害因素作出限制性技术规定。水污染物排放标准与水环境质量标准、水污染物环境监测规范共同构成了我国的水环境保护标准体系<sup>[4]</sup>。水污染物排放标准有利于点源水污染物的控制和水质保护，是国家进行环境管理的重要手段，也是国家环境保护法律体系的重要组成部分<sup>[5]</sup>。截止 2014 年，我国共有 59 项国家水污染物排放标准，包括 1 项综合型水污染物排放标准和 58 项行业型水污染物排放标准。行业型水污染物排放标准涉及了包括造纸、纺织、钢铁、化学原料及化学品制造、制药、农副食品加工、畜禽养殖、城镇污水处理厂等水污染物排放管理重点行业，覆盖工业、农业、生活等主要水污染物排放源，在减少水污染物排放与控制水体污染物总量、水环境质量改善、防范水环境风险等方面扮演重要角色<sup>[4]</sup>。

我国现行污水排放标准分为《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）、《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）和工业行业污染物排放标准三类<sup>[6]</sup>。中国水污染物排放标准的发展，大致经历了四个阶段：第一阶段是工业“三废”

排放试行标准（GB J4-73）的发布和实施阶段，开启了全国部分地区及行业的水污染治理工作；随后是行业水污染物排放标准的起步阶段，中国行业水污染物排放标准体初步形成；然后是污水综合排放标准与行业水污染物排放标准并行阶段，对两套标准进行了多次修订；当今是加强与完善行业水污染物排放标准体系阶段，逐步扭转综合排放标准与行业水污染物排放标准并行的局面，将其调整为行业水污染物排放标准为主，综合排放标准为辅的态势<sup>[3, 5]</sup>。上世纪 80 年代至 90 年代，我国处于水污染物排放标准发展的第三阶段，1988 年发布了《污水综合排放标准》（GB 8978-1988），随后将该标准修订为 GB 8978-1996 标准。在这段时间里，城市生活污水污染问题伴随着社会进步和工业发展愈演愈烈，重要工业部门的有机污染也不容乐观。控制水环境污染以及实现污水资源化的目标，催化我国城镇污水处理厂的建设，加速污水厂的发展。通过制定标准来强化城镇污水处理厂的管理，是污水厂大规模建设背景下的必然要求，其目的是促进和规范城镇污水处理厂的建设。2003 年以前，管理城市污水处理厂所采用的标准为 GB 8978-1996，其主要围绕工业废水作出规定，对城市污水处理厂尚缺针对性，相当一部分标准值范围较宽，且个别指标的实现存在技术上和经济上的困难。同时，新的环境标准体系要求下，污染物排放标准逐步呈现行业标准为主、综合标准为辅的态势，而行业标准包括不同污染介质的排放，其中污泥处置问题和废气排放问题值得关注。其一，污泥处置问题伴随着城镇污水处理厂建设的加快而愈发明显，然而本世纪初期，我国不到四分之一的污水处理设施设有污泥稳定处理措施，污泥消化池大部分情况下并没有正常运行。部分地方的污泥甚至并没有得到合理的处理处置便直接排放，造成了二次污染。因此为实现污泥的稳定化、减量化、资源化，需要制定标准以加强控制。其二，城镇污水厂臭气排放问题尚未得到有效控制，其对周围环境产生影响，由此引发的诉讼时有发生，因此臭气排放问题对制定具有针对性特定项目的污水处理厂排放标准提出诉求，以遏制臭气的排放。此外，城镇污水处理厂进出水中含有大量的粪大肠菌和致病菌，问题突出，但污水厂生物性污染的控制指标在当时尚未引起重视。地表水监测数据表明，城区河道的粪大肠菌群数项目指标往往超过地表水三类水体标准，其已成为我国地表水体超标的主要项目之一。为防止生物性污染和疾病的传播，必须控制其生物性污染，因此城镇污水处理厂出水必须进行消毒处理<sup>[7]</sup>。基于此，2001 年《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918 -2002）由国家环境保护总局科技标准司提出，2002 年 12 月 27 日由国家环境保护总局和国家技术监督检验总局批准发布，2003 年 7 月 1 日正式实施，该标准顺应了新的环境标准体系要求，其考虑了污泥和废气污染物的排放，以及考虑了增设生物性污染等控制指标<sup>[7]</sup>。据统计<sup>[8]</sup>，直到 2018 年我国的 5370 座污水处理厂中执行的标准分为 GB18918-2002 的一级 A 标准（1A）、一

级 B 标准（1B）、二级、三级标准，及地方标准等，其中执行 1A 和 1B 的污水厂占据主导地位，其分别约占总量的 47%和 43%。

全面控制污染物排放是改善水环境质量的工作重点之一。《水污染防治行动计划》（水十条）<sup>[9]</sup>提出“强化城镇污染治理”的工作要求，其中要求敏感区域（重点湖泊、重点水库、近岸海域汇水区域）城镇污水处理设施应于 2017 年底前全面达到 1A 排放标准；建成区水体水质达不到地表水 IV 类标准的城市，新建城镇污水处理设施要执行 1A 排放标准。2015 年《城镇污水处理厂污染物排放标准》（征求意见稿）<sup>[10]</sup>发布，设置特别排放限值以满足环境敏感地区水环境管理需要。对于基本控制项目，特别排放限值作出了相关的规定，其限值总体与《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）IV 类水体水质要求相当（总氮 TN 除外），可以满足生态环境敏感区对污水处理厂排放控制的需求。此外，为满足水体富营养化控制需求，征求意见稿还对氨氮  $\text{NH}_3\text{-N}$  和总氮 TN 指标提出了相应的限值。近年来，随着各地水环境保护压力逐渐增大，全国不少地区逐渐出现提高城市污水厂排放标准至趋向于 III/IV 类水质标准的趋势<sup>[11]</sup>，由于这些标准中的 COD、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 限值中部分或全部与 GB 3838-2002 的 III、IV 类水质指标要求相当，因此业界常称其为“准 III 类”、“准 IV 类”标准。如北京、天津、巢湖流域、太湖流域等多地陆续发布准 III 类、准 IV 类标准的地方污染物排放标准和流域标准，对化学需氧量 COD、总氮 TN、总磷 TP 等指标提出了越来越高的去除要求（见表 1.1）。

为遵循这些更为严格的标准和法规，就需要对污废水处理设施进行改造<sup>[9, 12]</sup>。截至 2017 年，全国规模以上执行准 IV 类、1A 和 1B 标准的污水处理厂处理规模已分别占 3.8%、36.3%、41.9%（见表 1.2<sup>[19]</sup>）。然而，污水处理厂在不同出水标准的约束下会影响污水处理厂的能耗、成本和技术选择<sup>[13-15]</sup>。为满足更为严苛的新排放标准，强化处理工艺（如高级氧化）、前沿的处理工艺、更长的水力停留时间（HRT）通常是污水处理厂升级的设计、改造和运行所必须的做法，却不可避免地增加投资、运行成本和处理过程的环境足迹<sup>[16]</sup>。尽管在过去几年中污水处理厂 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的排放量明显下降，然而强化处理带来更高能耗，致使 2008 年至 2018 年平均能耗强度增加了 30%，污水处理厂总电耗达到 197.3 亿千瓦时<sup>[8]</sup>。虽然污水回用有利于减缓水资源稀缺态势，但目前国内这方面的实践相对于发达国家如欧洲和美国而言应用得较少<sup>[17]</sup>，2017 年再生水量仅为城市污水处理总量的 15.8%<sup>[18]</sup>，因此难以平衡运行成本带来的压力。此外，污水收集管网配套欠科学将影响污水厂的运行效率，导致不必要的物质与资源浪费。截至 2018 年，全国有 5370 个在运行中的污水处理厂，其总处理能力达到 2.01 亿立方米/天，比 2008 年水平增加了 119%。与此同时，下水道的总长度也增加了 122%，下水道的连接比例也增加到平均 93%<sup>[18]</sup>，但其与污水处理厂整体设计处理能力相比略显不足，导致污

水处理厂的运行率较低（到 2018 年仅为 86%），这表明相当一部分污水处理厂的  
处理能力没有得到充分利用。

表 1.1 各省、流域污水厂污染物排放地方标准与国家标准对比 (单位:mg/L)

Table 1.1 Comparison between National Standard and Local (Province-based or Catchment-based) Standards on Effluent of Wastewater Treatment Plants

标准名称	标准编号	类别	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N <sup>①</sup>	TN	TP
地表水环境质量标准	GB3838-2002	IV	30	6	-	1.5	1.5	0.3 (0.1 湖)
综合污水排放标准	GB 8978-1996	一级	60	20	20	15	-	-
城镇污水处理厂污染物排放标准	GB 18918-2002	一级 A	50	10	10	5 (8)	15	1   0.5
		一级 B	60	20	20	8 (15)	20	1.5   1
北京市	DB11/890-2012	新建 A	20	4	5	1 (1.5)	10	0.2
天津市	DB12/599-2015	A	30	6	5	1.5 (3)	10	0.3
上海市	DB31/ 199-2018	一级	50	10	20	1.5 (3)	10 (15)	0.3
浙江省	DB33/2169-2018	新建	30			1.5 (3)	10 (12)	0.3
云南昆明	昆明市城镇污水处理厂 主要水污染物排放限值	A	20	4		1.0 (1.5)	5 (8)	0.05
广东省 (茅洲河流域)	DB44/2130-2018	-	30			1.5	-	0.3
河北省 (大清河流域)	DB13/2795-2018	重点控制区	30	6		1.5 (2.5)	15	0.3
安徽省 (巢湖流域)	DB34/2710-2016	新建	40			2 (3)	10 (12)	0.3
江苏省 (太湖地区)	DB32/1072-2018	一、二级保护区	40			3 (5)	10 (12)	0.3
四川 (岷江、沱江流域)	DB51/2311-2016	城镇污水处理厂	30	6		1.5 (3)	10	0.3

<sup>①</sup> 对于城镇污水处理厂, 括号外数值为水温 > 12℃ 时的控制指标, 括号内数值为水温 ≤ 12℃ 时的控制指标。

标准名称	标准编号	类别	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N <sup>①</sup>	TN	TP
重庆（梁滩河流域）	DB51/963-2020	重点控制区	30			1.5（3）	15	0.3
湖南省	DB43/T 1546-2018	一级标准	30			1.5（3）	10	0.3

表 1.2 全国规模以上城镇污水处理厂执行排放标准情况（截至 2017 年）

Table 1.2 Classes of Effluent Standard Implemented by Municipal Wastewater Treatment Plants in China<sup>[19]</sup>

现行排放标准	其他	准IV类	一级 A	一级 B	二级	合计
污水厂规模 (m <sup>3</sup> /d)	481	671	6489	7500	2739	17880
比例 (%)	2.7	3.8	36.3	41.9	15.3	100

控制城镇污水处理厂水污染物排放以及保护环境都离不开城镇污水处理厂排放标准的实施。然而从政策生命周期社会成本的角度<sup>[20]</sup>，相比起污水处理设施的升级改造（根据政策要求为减少或防治污染而产生的成本，称为企业遵循成本，又称为减排成本），涉及到标准的制定和实施、进行监测、研究和确保标准被遵照执行等活动的政府规制成本常被业界忽略。标准制修订工作是重要且复杂的过程，其包括立项、开题、征求意见稿、送审稿、到报批行政审查的各个阶段，涉及到各种工作/培训/研讨的会议、文书资料编辑制作、科学研究活动等工作内容，存在着物质和能源的消耗。因此关注标准规制过程产生的环境负荷尤为必要。

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA），或称生命周期分析（Life Cycle Analysis）是量化产品系统或过程潜在环境影响的强大工具，它可以通过“从摇篮到坟墓”的方法评价水系统工程。在 20 世纪 90 年代，国际标准组织（International Organization for Standardization, ISO）14000 系列中制定了 LCA 标准，定义了其原则和框架<sup>[21]</sup>，并为 LCA 提供了要求和指南<sup>[22]</sup>。此后，LCA 在包括污水处理在内的许多领域得到了推广和应用。LCA 还在评价可持续性活动中发挥重要作用，为评价标准规制过程中产生的环境负荷提供评价工具。ISO 充分认识到可持续发展在活动行业中的重要性，于 2012 年发布了 ISO 20121<sup>[23]</sup>可持续发展活动管理的要求和指南，它适用于参与设计和交付活动的所有类型和规模的组织，并规定了相关的可持续性管理系统的要求。该标准提出了几种方法来评估一个事件的可持续性，其中之一便是 LCA。因此，LCA 是评价政策生命周期的有用工具。

综上所述，采用 LCA 进行污水处理排放标准相关环境影响的研究，可以识别在执行不同排放标准的情况下，能源和物质资源消耗、污泥和温室气体排放、水质改善的环境效益、经济效益、资源回收潜力等多方面的平衡关系，有助于设计人员和操作人员在不同条件下更容易地选择最优技术方案，以及资源回收过程等方面的可行性，同时也为决策者提供污水处理设施在执行严格的排放标准时产生不同类别的环境影响之间平衡关系提供科学的解释。LCA 同时也是评价可持续性活动事件的有用工具，可识别量化污水处理排放标准规制活动中的潜在环境影响。因此，针对我国城市污水厂可能施行准IV类标准开展 LCA 分析，将有助于科

学评估标准施行所带来的环境影响，有利于标准政策制定的科学决策。

## 1.2 文献综述

### 1.2.1 生命周期评价历史与发展

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA)，也称为生命周期评估或生命周期分析，是支持可持续发展决策的重要工具<sup>[24-26]</sup>。根据美国环境保护署的定义，LCA 是评估产品、材料、过程或活动的潜在环境影响的工具。LCA 是一种全方位的分析方法，用于评估产品系统整个生命周期中所有直接和间接的环境影响，涵盖产品系统的材料获取、生产、使用到最终处置（处置或再利用）全生命周期<sup>[27]</sup>。LCA 是一种用于比较的工具而不是绝对评价工具，因此有助于决策者在选择不同的行动方针时比较所有主要的环境影响。

至今，LCA 的历史和发展可被划分成四个阶段：1970-1990、1990-2000、2000-2010、2010-2020。

#### ① 1970-1990——生命周期评价概念化阶段

第一个现在（部分被）公认的 LCA 研究可以追溯到 1960 年代末和 1970 年代初，这段时期的环境问题，如资源和能源效率、污染控制和固体废弃物正是成为公众关心的问题<sup>[28]</sup>。LCA 在能源分析领域的研究已进行了多年<sup>[29-31]</sup>，此后研究发展扩大到包括资源需求、排放负荷、产生废物的方面。1969 年，中西部研究所 (Midwest Research Institute, MRI) 为可口可乐公司进行了一项并未发表的研究，首次对不同饮料容器的资源需求、排放负荷和废物流进行了量化。紧接着，1974 年美国环境保护署 (U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)<sup>[32]</sup>和瑞士 Basler & Hofman 进行的研究<sup>[33]</sup>，标志着当代为人们所熟知的 LCA 发展的开始。MRI 使用了资源和环境概况分析 (Resource and Environmental Profile Analysis, REPA) 这一术语来进行这类研究，它是一项基于对被调查产品“从摇篮到坟墓”生产链的系统分析。随后的一段时间里，公众对 LCA 的兴趣逐渐减退，与此同时，一些研究也并未发表，直至 20 世纪 80 年代初期，公众对 LCA 的兴趣才开始逐渐增加。1984 年瑞士联邦材料测试和研究实验室 (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, EMPA)<sup>[34]</sup>的一份报告中提出了一个 LCA 研究所需的全面数据清单，从而催化了 LCA 更为广泛的应用<sup>[28]</sup>。研究还引入了第一个影响评价方法，即用空气和水排放物的 semipolitical 排放标准值除以空气和水排放量并将这些排放量进行累加，被分别称之为空气和水的“临界量” (Critical Volumes)。

1970 年到 1990 年是 LCA 的概念化阶段，但与之相关的各种研究方法、术语和结果不尽相同，且缺乏国际科学讨论和交流平台的支撑。在 20 世纪 70 年代和 80 年代的各种 LCA 的研究方法各异，它们之间并没有一个共同的理论框架。即使

在研究对象相同的情况下，得到的结果也有很大的差异，导致 LCA 无法成为更普遍接受和应用的分析工具<sup>[35]</sup>。

② 1990-2000——生命周期标准化（规范化）阶段

上世纪 90 年代全球性的科学与合作活动显著增加，这期间举办了一些的研讨会和论坛<sup>[36-41]</sup>以及编制了一些 LCA 指南和手册<sup>[42-44]</sup>。同时，第一批科学期刊论文开始出现在《Journal of Cleaner Production》、《Environmental Science & Technology》、《International Journal of LCA》、《Resources, Conservation and Recycling》、《Journal of Industrial Ecology》等上进行发表。

环境毒理学和化学学会（Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC）在北美和欧洲的 LCA 研究分支中发挥着领导和协调作用，将 LCA 的实践者、使用者和科学家聚集在一起，合作不断改进和协调 LCA 的框架、术语和方法。SETAC 的《业务守则》（Code of Practice）<sup>[45]</sup>是这一过程的关键成果之一。同时，ISO 自 1994 年起也参与了 LCA 研究工作。鉴于 SETAC 工作组侧重于方法的发展和协调，ISO 则侧重于对 LCA 方法和程序的标准化。目前的两个国际标准为 ISO 14040: 2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework<sup>[21]</sup> 以及 ISO 14044: 2006 Environmental management - Life cycle assessment : Requirements and guidelines<sup>[22]</sup> 。

ISO 的关键成果图 1.1 的一般方法论的框架。因此，1990 年 ~ 2000 年可认为是一段通过 SETAC 的协调和 ISO 标准化进行融合的时期，为 LCA 提供了一个标准化的框架和术语、LCA 方法讨论和协调的平台。换言之，90 年代是标准化（规范化）的十年。但值得注意的是，ISO 从未考虑将 LCA 标准化方法进一步细致化，因为他们认为 LCA 的唯一方法是不存在的<sup>[21]</sup>。LCA 一般方法论框架<sup>[21]</sup>见图 1.1。

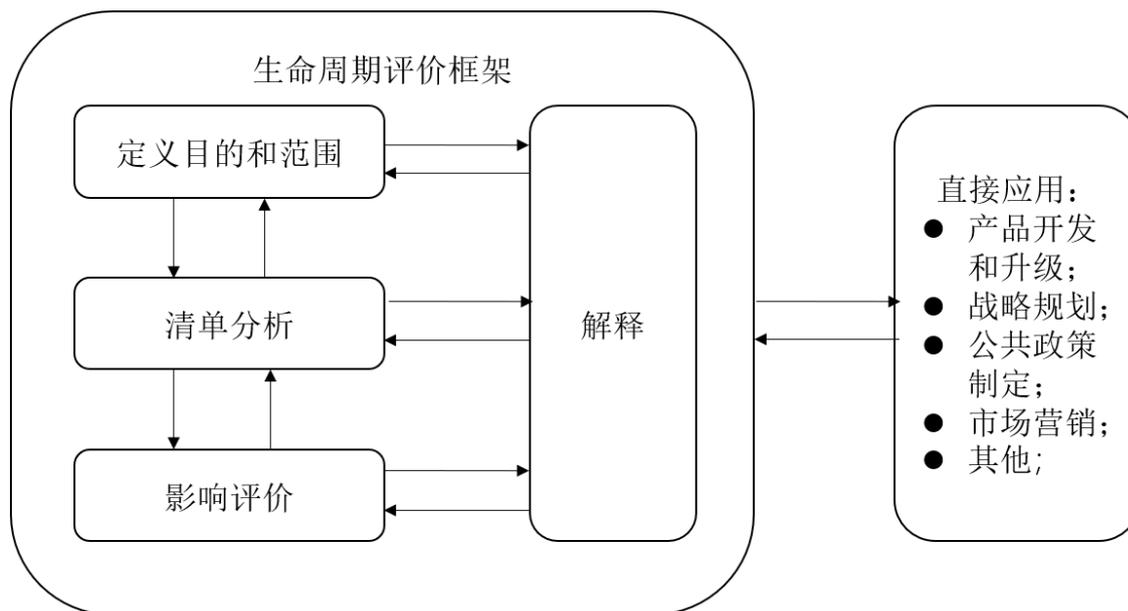


图 1.1 LCA 一般方法论框架

Figure 1.1 General LCA Methodology Framework

在此期间，LCA 也成为政策文件和立法的一部分。主要的重点是包装立法，例如欧盟<sup>[46]</sup>和 1995 年日本的包装法<sup>[47]</sup>。虽然 LCA 已经在这些基于政策的应用中证明了它的价值，但其结果的权威性方面也存在问题<sup>[48, 49]</sup>。

一些众所周知并沿用至今的生命周期影响评价方法，从这个时期发展而来，如 CML1992 环境主题方法（CML1992 Environmental Theme Approach）<sup>[50-52]</sup>、终点或损坏方法（End Point or Damage Approaches）<sup>[53, 54]</sup>，也包括现在广泛接受的多媒介方法（Multimedia Approach）<sup>[55, 56]</sup>来评估潜在的人类和生态毒性排放<sup>[57]</sup>。虽然这十年主要是 LCA 标准化的协同时期，但它也是科学审查、LCA 基础研究和探索其与现有学科联系的阶段。例如，结果的 LCA 及其相关分配方法的萌芽<sup>[58-60]</sup>。这些和其他的复杂方法标志着 LCA 在这十年的转变，这不仅是一个 LCA 研究细化的十年，而且也是 LCA 方法上再次出现分歧的时期。

### ③ 2000-2010——生命周期评价细化阶段

21 世纪初的第一个十年，人们对 LCA 的关注与日俱增。2002 年，联合国环境规划署（United Nations Environment Programme, UNEP）和 SETAC 发起了一项国际生命周期伙伴关系，称为生命周期倡议（Life Cycle Initiative）<sup>[61]</sup>。生命周期倡议的主要目标是将生命周期思想付诸实践，并通过更好的数据和指标改进 LCA，使其成为支持工具。生命周期思想在欧洲政策中的重要性也在持续增加，例如欧洲共同体委员会（欧共体委员会）（Commission of the European Communities, CEC）就综合产品政策（Integrated Product Policy, IPP）进行交流<sup>[62]</sup>。此外，生命周期

思想也被纳入专题战略，如关于可持续利用资源的专题战略<sup>[63]</sup>和关于防止和回收废物的专题战略<sup>[64]</sup>。2003年，欧盟委员会在关于 IPP 的交流会中强调了生命周期评估的重要性以及其在 IPP 的利益相关者中推广的必要性<sup>[62]</sup>。欧洲 LCA 平台于 2005 年成立<sup>[65]</sup>，旨在促进生命周期数据、方法和研究的可获性、交流和应用，以期在（欧盟）公共政策和商业领域提供可靠的决策支持。在该时期，USEPA 开始推广 LCA 的使用<sup>[66]</sup>。各种全国性的 LCA 网站也在此时期建立起来，例如，澳大利亚 LCA 网站<sup>[67]</sup>和美国 LCA 中心<sup>[68]</sup>均在 2001 年建立，而规模较小的泰国 LCA 网络<sup>[69]</sup>则是在 2000 年建立的。同时，世界各地的环境政策越来越多地考虑以生命周期为基础<sup>[70, 71]</sup>。与此同时，中国也在 2008 年发布了 GB/T24044-2008/ISO14044:2006《环境管理生命周期评价要求与指南》，实现了 LCA 在中国的标准化。

### 1.2.2 生命周期评价相关概念及定义

生命周期（Life Cycle, LC）指的是产品系统的所有环节，包括从原材料获取到废物处理的全过程<sup>[71]</sup>。生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）是一种环境评估方法，其评价对象是产品和服务，评估从原料提取到废物处理的整个生命周期范围。在生命周期清单分析（Life Cycle Inventory, LCI）阶段，以目的和范围定义为依据，建立 LCA 模型，收集数据并计算产品的环境负荷。生命周期影响评价（Life Cycle Impact Assessment, LCIA）需要评价产品的环境影响。LCIA 含有多个步骤，包括分类、特征化、加权等。功能单元（Functional Unit, FU）是所研究对象——产品或服务系统执行其对应功能的计算基础，它是 LCA 模型中与所有其他物质和能量流动都相关的参考流（Reference Flow, RF）。它也是比较型 LCA 研究中用于进行不同情景 LCA 分析的比较单位。

### 1.2.3 生命周期评价技术标准

2006 年之前，有四个 ISO 标准特别为 LCA 的应用而设计，他们分别是：

ISO 14040: Principles and framework

ISO 14041: Goal and Scope definition and inventory analysis

ISO 14042: Life Cycle Impact assessment

ISO 14043: Interpretation

2006 年之后，以上的四个标准被以下两个标准所代替：

ISO / DIS 14040 Principles and Framework

ISO / DIS 14044 Requirements and Guidelines

其中 14044 标准代替了 14041、14042 和 14043 标准。

除此之外，ISO14000 标准家族中与 LCA 相关的其他成员还包括表 1.3 中所描述的标准

表 1.3 与 LCA 相关的 ISO14000 标准家族其他成员一览表

Table 1.3 LCA-Related ISO14000 Family

标准编号	标题
ISO 14045:2012	产品系统生态效益评价——原理、要求及指南
ISO 14046	水足迹——SMES 实用指导
ISO/TS 14048:2002	生命周期评价——数据文件格式
ISO 14067:2018	产品碳足迹——量化要求及指南
ISO/TS 14071:2014	批判性评价过程和审稿人能力:ISO 14044:2006 附加要求及指南
ISO/TS 14072:2014	生命周期评价——组织生命周期评价要求及指南

### 1.2.4 生命周期评价方法

基于过程的 LCA (Process based LCA, PB-LCA) 和基于投入产出的 LCA (Input-Output LCA, IO-LCA) 分别是两种主要的 LCA 方法<sup>[72, 73]</sup>。PB-LCA 集中于对实际过程的科学分析 (即质量/物料平衡、科学特性等)。ISO 14040 标准主要涉及的是 PB-LCA 方法。IO-LCA 使用经济交易历史来跟踪给定的供应链, 加减其中的价值<sup>[74]</sup>。这个量化值可以包括资源需求, 然后可以用来从相应的数据集内插出对应的环境影响。

#### ① 基于过程的 LCA (Process based LCA, PB-LCA)

在 PB-LCA 中, 产品生产过程中给定步骤的输入 (材料和能源) 和输出 (排放和对环境的废物) 被逐项列出。基于过程的 LCA 存在可被划分成两种类型<sup>[72]</sup>: 归因型 LCA 和结果型 LCA。

##### 1) 归因型 LCA (Attributional LCA, ALCA)

归因型 LCA 侧重于描述那些与环境相关的进出生命周期及其子系统的物质流。这类描述所选系统中的污染和资源流动是由于指定系统内的特定数量的功能单元的传递而产生的。包括通过使用平均数据和按系统中使用的比例分配的整个生命周期, 例如, 通过经济价值。这是一种静态的系统评估。这是以 ISO 14000 标准家族为依据时所采用的一种 LCA 方法。

##### 2) 结果型 LCA (Consequential LCA, CLCA)

结果型 LCA 的目标是描述环境相关的流动将如何随着可能采取的决策而改变<sup>[75]</sup>。结果型 LCA 根据功能单元的输出变化导致的系统变化, 来评价污染和资源流动, 其仅包括那些受影响的流程, 使用反映变化影响的数据, 通过系统扩展来避免分配, 依赖市场数据 (边际供应商)。结果型 LCA 适合用于制定决策, 但当归因型 LCA 和结果型 LCA 的结果差异很小, 且结果型 LCA 模型不确定性超过了研究者对其的理解时, 就使用归因型 LCA。结果型 LCA 有利于增进对产品链的理解

以及识别最需要改进的流程及关系。

## ② 投入产出的 LCA (Input-Output LCA)

基于经济学的概念,经济投入产出(EIO)模型将一个行业中被其他行业消费的商品或服务联系起来<sup>[74]</sup>。EIO采用交易矩阵的形式,其行标题表示输入的部门,列标题表示输出的部门,行和列的交点值表示从行标题的部门中每输出1个价值单位所需要从列标题的部门中输入的价值单位。如果我们知道该行业与单位销售值所对应的环境排放值时,就可以将经济活动转化成为环境影响。EIO模型用于研究经济需求或经济结构的变化,从而了解经济活动如何对环境造成影响。

### 1.2.5 生命周期评价软件

目前关于LCA的软件可以分为三类<sup>[73]</sup>:通用型LCA软件,通常用于研究人员、顾问和其他LCA专家;为特定的决策者提供各种类型的专业型LCA的软件,特别是工程或建筑的设计者<sup>[76]</sup>、采购部门或环境和废物管理人员<sup>[77, 78]</sup>;定制LCA软件系统,用于特定IT环境(作为业务管理软件的接口)中明确定义的应用程序。这些通常是对通用软件或软件包进行改编后的特定的公司使用的系统,这些系统是直接根据公司的需要而编写的。目前有许多可用的多国语言的LCA软件工具<sup>[79]</sup>,目前主流软件或工具有以下几款。

表 1.4 LCA 主流软件工具简介

Table 1.4 Introduction of Mainstream LCA Software

软件名称	说明	语言界面
SimaPro 7	物质/物料流动分析	英语
	(SFA/MFA)、生命周期成本	意大利
	(LCC)、社会 LCA、环境	法国
	设计 (DfE, DfR)、生命周期	丹麦
	清单 (LCI)、生命周期可持	德国
	续性评估 (LCS)、产品管理、	西班牙语
	供应链管理、生命周期影响	希腊
	评估 (LCIA)、生命周期工	日本
	程 (LCE)、生命周期评估	荷兰
	(LCA)、生命周期管理	
	(LCM)	
GaBi ts	生命周期成本 (LCC)、社会	英语
	LCA、分解建模、生命周期	意大利
	可持续性评估 (LCS)、其他,	法国

软件名称	说明	语言界面
	请注明,生命周期影响评价 (LCIA)、生命周期管理 (LCM),物质/物料流分析 (SFA/MFA),环境设计 (DfE、DfR)、生命周期清单 (LCI)、产品管理、供应链管理、法律符合性检查、生命周期工程 (LCE)、生命周期评估 (LCA)	葡萄牙语 中国 德国 西班牙语 泰国 日本
www.eiolca.net	生命周期评估、供应链管理	英语
openLCA	可持续性评价、生命周期评价、生命周期成本、社会 LCA	英语
Umberto	物质/物料流动分析 (SFA/MFA)、生命周期成本计算 (LCC)、生命周期清单 (LCI)、生命周期可持续性评估 (LCS)、产品管理、供应链管理、生命周期影响评估 (LCIA)、生命周期工程 (LCE)、生命周期评估 (LCA)、生命周期管理 (LCM)	英语 德语

### 1.2.6 生命周期评价框架

一般地, LCA 方法论由四部分组成<sup>[22, 80]</sup>: (1) 定义研究目的和范围 (Goal and Scope); (2) 基于所有环境输入流和输出流建立产品 (或服务) 的生命周期模型, 数据收集工作常被称为生命周期清单阶段 (LCI); (3) 理解所有与环境相关的输入流和输出流, 这部分涉及到生命周期影响评价 (LCIA); (4) 结果解释。

#### ① 目的和范围

LCA 研究目的需要指明 LCA 的用途、进行研究的原因、拟传达研究结果的对象 (LCA 结果的受众)、研究结果是否拟用于向公众公开。这部分需要明确 LCA 研究的范围、被研究的各个 (或单个) 产品系统及其功能、功能单元、系统边界、分配程序、LCIA 方法和影响类型的选用、采用的解释方法、数据需求、为 LCA

研究而作出的假设、价值选择和可选要素、限制性条件、数据质量需求、批判性评论的种类（如果有话）、研究报告的类型和格式。

功能单元（FU）和参考流（RF）是各个产品 LCA 比较研究中一个特别重要的问题。在许多情况下，人们不能简单地比较产品 A 和 B，因为它们可能有不同的性能特征。例如，一个一次性牛奶盒只能使用一次，而一个可回收的牛奶瓶可以使用十次或更多。因此，一个较好的方法是比较两种不同的包装和运送 1000 升牛奶的方式。在这种情况下，人们会对 1000 个牛奶盒以及大约 100 个牛奶瓶子进行 900 次洗涤（假设每个瓶子有 9 次往返）之间进行比较，这样的情况下，两种包装容器所完成的功能（参考流）是相同的。

定义产品系统边界也是值得关注的一点，因为产品系统的相互联系往往非常复杂。再以牛奶纸盒 LCA 为例，使用的是卡车。但需要注意的是，卡车也是有生命周期的产品。生产卡车需要钢铁，生产钢铁需要煤炭，生产煤炭需要卡车……。我们不能将所有的输入和输出都追溯到一个产品系统，因此必须在系统周围定义边界。但值得注意的是，由于某些部分被排除在系统边界之外，可能评价结果会被扭曲。

## ② 生命周期清单分析（LCI）

系统边界内每一个单元过程都需要收集定性和定量数据，这些数据无论是测量的、计算的还是估计的，都会被用来量化这个单元过程的输入和输出。

数据收集是 LCA 最艰巨的任务。可用性和代表性是 LCI 数据收集的难点。根据进行 LCA 的时间和预算的可行性，可将数据类型分成两种：前景数据（Foreground Data, FD）和背景数据（Background Data, BD）。FD 具有特殊性，其指的是建模系统所需的特定数据，它通常是描述特定产品系统和特定生产系统的数据。BD 具有一般性，通常是在数据库和文献中获取，是通用的材料、能源、运输和废物管理系统的数据库。常用的国外背景数据库如瑞士 Ecoinvent、德国 GaBi 扩展数据库（GaBi Databases）、欧盟研究总署（JRC）联合欧洲各行业协会提供的生命周期文献数据库 ELCD、美国国家再生能源实验室（NREL）的 U.S. LCI 数据库、韩国 LCI 数据库（Korea LCIdatabase）等。国内基础数据库方面，首个公开发布并被广泛使用的中国生命周期基础数据库（Chinese Reference Life Cycle Database, CLCD）是由四川大学创建和亿科环境持续开发的，此外中科院生态中心、北京工业大学也有较长时间的综合性 LCI 数据库开发经验和成果。

## ③ 生命周期影响评价（LCIA）

LCIA 方法论的选择需要考虑评价结果的聚集程度，通常取决于受众的类型，以及受众对详细结果的理解能力。LCIA 包括强制性要素（如影响类别及其指标和特征化模型的选择、分类、特征化）和非强制性要素（如归一化、排序、分组、

加权)。

选择合适的影响类别是一个重要的步骤，依照研究目的进行选择。在选择影响类别的过程中，定义的终点有利于帮助确定影响类别的选择。终点应被理解为与环境有关的问题，如人类健康、物种灭绝、未来资源的可用性等。ISO 不建议使用某些终点（原因是区分影响类别和终点并不容易，例如，关于“海平面上升”是影响类别还是终点尚存在歧义），但仔细地思量和定义终点是选择影响类别的第一步，然后即可选择影响类别，只要将影响类别连接到终点的环境模型被清晰描述即可，无需定量描述这种联系。图 1.2 为影响评价方法概括性描述<sup>[80]</sup>

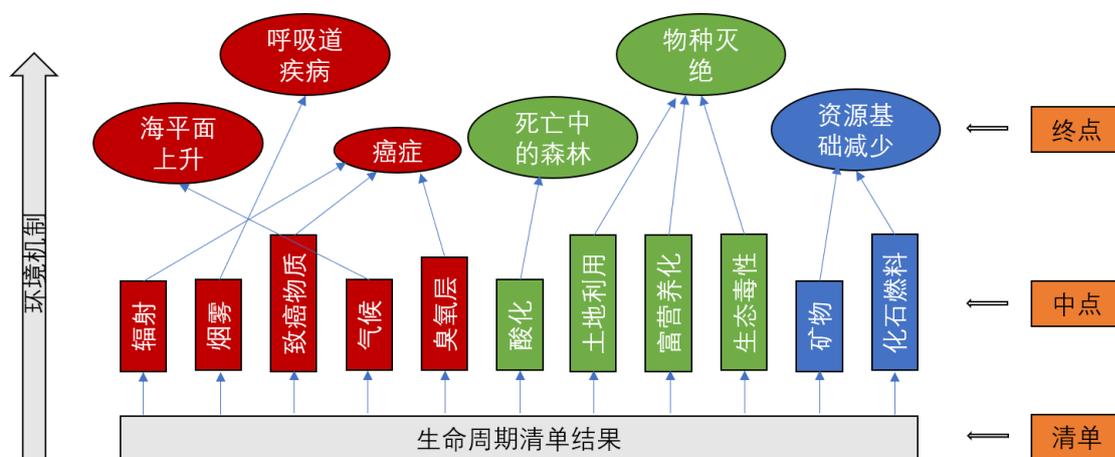


图 1.2 影响评价方法结构概述

Figure 1.2 General overview of the structure of an impact assessment method

#### ④ 结果解释 (Life Cycle Interpretation)

LCA 或 LCI 研究的生命周期解释阶段包括要素为基于 LCI 和 LCIA 结果识别重要问题（贡献分析）；评估完整性、敏感性和一致性检查；结论、局限和建议。

敏感性检验 (Sensitivity Check) 目的是通过对结果和结论的可靠性进行评价确定它们如何受到数据、分配方法或类别计算中的不确定性的影响指标的结果，等等。敏感性检查应包括敏感性分析 (Sensitivity Analysis, 考虑改变假设条件对 LCA 模型的影响) 和不确定度分析 (Uncertainty Analysis, 包括数据不确定性和模型不确定性)。在敏感性检查中，应同时考虑由研究目的和范围预先确定的问题、研究的所有其他阶段的结果、专家的判断和以往的经验。

#### 1.2.7 生命周期评价在污水处理领域的应用

生命周期评价于上世纪 90 年代应用到水技术领域。早期的生命周期评价关注城市水系统的某些环节的研究，主要是污水处理<sup>[81]</sup>和饮用水处理<sup>[82]</sup>。自 2005 年以来，LCA 研究的数量显著增加。出现了一些针对饮用水输配方面的研究，但较少

数部分研究者关注废水收集系统。在地理分布方面,超过一半的案例研究分布在欧洲,其余的分布在北美、澳大利亚、南非、中国和东南亚<sup>[83]</sup>。

对于城市污水厂而言,LCA 可用于识别不同处理规模、不同处理阶段、不同主体工艺、不同水处理和污泥处理方法的环境影响。Beavis 等人<sup>[84]</sup>将用 LCA 方法分别评价深度处理技术(UV 和加氯消毒)。他们也评价了不同污泥处理技术(好氧或厌氧消化),以此作为悉尼地方政府的决策依据。经评价,他们建议采用加氯消毒和厌氧消化。Almudena Hospido 等人<sup>[85]</sup>对西班牙加利西亚地区的人口当量分别为 12.5 万、11 万、10.7 万和 7.2 万的四个市政污水处理厂进行生命周期对比评价,通过从处理设施获取物质和能源消耗、水质和污泥特征等基础数据,采用 CML 方法进行影响评价,SimaPro 5.1 软件进行计算。他们得出不同污水处理工艺和污泥处理工艺配置对环境的影响具有明显差异;同时指出二级处理虽然能源消耗较大,但对于水体富营养化环境影响而言其结果较好。Pradip P. Kalbar 等人<sup>[86]</sup>对印度四个应用不同处理工艺的污水厂,这些厂的主体工艺分别为活性污泥工艺、序批式反应器(Sequencing Batch Reactor, SBRs)、上流式厌氧污泥床反应器+兼性好氧塘(Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactors Followed by Facultative Aerobic Lagoon, UASB-FAL)、人工湿地(Constructed Wetlands, CWs)。通过采集现场数据,用 CML2 基线 2000 方法论进行影响评价,Excel 进行环境影响计算。结果显示,SBRs 在能源消耗和全球变暖(GWP)影响方面居于首位,但从有机物和营养物去除方面的结果来看,其出水最优。由于大型植物的固碳作用,CWs 的能耗几乎可以忽略不计,全球变暖潜势为负。污水处理厂运作所需的电力生产排放、经处理污水排放至水质的排放,以及施用于土地的污泥所产生的重金属排放,是污水处理厂整体环境影响的主要因素。刘丽<sup>[87]</sup>通过分析案例污水厂改造前后的工艺参数变化,选用 CML2001 方法评价环境影响,以 GaBi 为分析工具,以执行一级 A 标准的污水处理厂为案例,分析其改造前的 AO 工艺和改造后的 A2O 工艺进行生命周期影响,对比和评估评估该厂污水处理工艺、方案,结果表明改造后的 A2O 工艺优于改造前的 AO 工艺。除了对污水厂进行工程案例研究外,也有一些研究针对不同污水处理排放标准进行情景分析,采用污水厂运行模拟方式来进行评价,如 Sheikh M. Rahman 等人<sup>[88]</sup>和 Zhang 等人<sup>[89]</sup>。非传统处理设施的环境影响也可采用 LCA,有助于因地制宜地选择污水处理设施,比如 Benetto 等人<sup>[90]</sup>用 LCA 对比非传统水处理设施和传统设施的环境影响,探究生态卫生设施(Ecological Sanitation)作为小型污水处理设施的潜力。

污水处理厂在不同出水标准的约束下会影响污水处理厂的能耗、成本和技术选择<sup>[13-15]</sup>,因此一些 LCA 的研究从污水处理排放标准的角度进行评价。Gaterell 等人<sup>[91]</sup>和 Lassaux 等人<sup>[92]</sup>的研究中采用 LCA 框架分析排放标准在保护受纳水体免

受富营养化方面的作用，结论表明提高营养去除水平更有利于生态环境。但这些研究只考虑了富营养化的潜力，而忽略了其他类别的环境影响。随后，Foley 等人<sup>[93]</sup>的研究表明，污水处理水平的提高致使更高的能源和化学消耗以及更多的污泥和温室气体排放。Sheikh M. Rahman 等人<sup>[88]</sup>研究针对美国国家污染物排放削减系统 (the United States under the National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES) 中污水处理出水排放限值的三种处理水平 (1 级: TN = 8 mg/L; TP = 1 mg/L; 2 级: TN = 3 mg/L; 采用 TP = 0.1 mg/L; 3 级: TN = 1 mg/L; TP = 0.01 mg/L) 设计 27 种典型的处理工艺配置，运用 BioWin 模拟污水厂运行阶段一级、二级处理所需能耗和化学药剂的使用，围绕脱氮除磷的主体进行 LCA，他们采用 Simapro 工具、TRACI 影响评价方法进行评价。结果表明，强化处理技术高度实现了营养物质去除并显著减少当地富营养化的潜力，而为实现这些强化处理方法 (特别是多级强化三级处理和反渗透) 而采用的化学药剂和电力，间接地增加了富营养化，同时导致其他潜在的环境和健康影响包括人类和生态毒性、全球变暖的潜力、臭氧损耗和酸化。相比起采用 1 级处理水平，平均富营养化潜在在实施 2 级处理水平后能减少了大约 70%，但实施更高级的三级工艺为 3 级处理可能仅导致生命周期富营养化潜能值净减少 15%。Wang 等人<sup>[15]</sup>考虑到为了接纳水体水质的改善而提高处理程度 (分别考虑了 GB18918-2002 的二级、1B 和 1A 标准)，采用 BioWin 进行污水厂模拟，影响评价的环节与其他 LCA 评价不同，该研究考虑化学品使用、能源消耗和温室气体排放以代表整体环境负担，而不采用环境影响类别进行表征。以增加资源消耗和温室气体排放为代价，可以实现对当地容纳水体的改善。还从不同的积极角度确定了最佳方案。Zhu 等人<sup>[16]</sup>采用 LCA 对中国 17 个污水处理厂在 3 种不同排放标准下 (GB18918-2002 的二级、1B、1A 标准) 的温室气体排放和富营养化潜能进行了评价，结果表明，随着处理水平的提高，减少污染的边际收益递减。他们认为最严格的排放标准在中国并不是最理想的，并建议监管机构重新考虑他们的水质保护策略，而不是仅仅关注点源排放者及其所需要的强化处理方法。Wang 等人<sup>[14]</sup>采用 LCA 评价确定我国寒冷地区某污水处理厂在日益严格的排放标准约束下可对环境能造成的不良后果 (分别考虑 GB 18918-2002 二级标准、1B 标准和 1A 标准)，确定主要影响因素，并提出减少对环境的负面影响的替代方案。其前景数据和背景数据分别主要来自环境工程公司及其相关供应商、Ecoinvent V2.2，影响评价方法为 CML 2002。结果表明，严格的排放水平确实会减少局部富营养化，但不能满足净环境效益。他们认为，如果处理出水不需要进一步回用时，除了水保护区、高人口密度区和对污染物较为缺乏弹性的流域外，在普通地区中具有中等处理水平的污水厂比起采用升级到更高的标准污水厂可能更为环保。杨帆<sup>[94]</sup>基于 LCA 评价污水处理厂从 GB 18918-2002 的 1B 标准升级改

造到 1A 标准的原材料获取及运输、施工建设阶段、运营阶段的生命周期环境影响,分析了污水处理厂升级改造前后的 LCI,其评价对象为重庆市李家沱污水处理厂,升级改造前后的输入与输出数据来自现场调查和实地监测,并在相同水质排放标准情况下进行了对比分析。同时,也参考设计院升级改造方案重新设计了三种升级提标工艺,即 A2O 工艺、A-A2O 工艺和 T 型氧化沟工艺。研究结果显示,该厂升级改造后对生命周期环境影响较升级改造前总体上有所提高,随着处理水平从 1B 提高到 1A,水体富营养化潜能下降了约五分之一,然而,化石燃料消耗、温室气体、大气酸化、固体废弃物空间占用、雾霾聚集、光化学烟雾随着之增加,此外,伴随着高耗能处理技术的使用,致癌和非致癌物质影响也呈现增加的态势。Zhang 等人<sup>[89]</sup>最近的研究在采用 BioWin 模拟现有典型设施的基础上,设计了与常规污水处理厂模型相结合的资源回收模拟情景。与前面的研究不同,他们一是结合了经济分析和 LCA 来评估不同进水条件和出水标准,二是除了考虑国标 1B、1A 外,还考虑了比前面两者更加严格的北京地方标准和更加宽松的欧盟标准,以此研究不同污水处理标准下的处理技术的潜在环境影响。影响评价方法为 Impact 2002+ 中点方法。结果表明,高浓度进水需要最复杂的处理工艺才能达到严格的出水标准。总影响模式很大程度上依赖于进水条件。该研究发现,当去除 1 公斤污染物时,高浓度进水与低能耗、低成本、高营养恢复潜力以及高全球变暖潜力相关。资源回收的引入提高了处理厂的整体性能,但由于低浓度进水的效益有限,不适合资源化利用。严格的排放标准限制了废水的资源回收潜力,而宽松的排放标准可以提高资源回收性能,特别是对于高浓度的进水。尽管这些研究已经考虑到了排放标准的实施对技术选择及其所带来的物质和能源消耗和环境效益的影响,但他们主要着眼于污水处理技术层面的研究,而未考虑排放标准在实施前的规制过程中也可能存在的环境影响。

与经济相关的指标也常用于与 LCA 方法结合,来进行污水处理相关的评价。黄希望等人<sup>[95]</sup>围绕 LCA,结合绿色税收为参考指标概算各环境影响指标造成的经济负担,评价某城市污水处理厂施工建设和运营维护阶段的环境影响,其主体工艺为 A2O 工艺;与此同时,基于 LCA 结果比对了采用 A2O、人工湿地(Constructed Wetland)、五阶段 Bardenpho 工艺的污水处理厂。他们的研究结果显示,生命周期内,A2O 工艺城市污水处理厂运营维护阶段的能量消耗是环境影响主要贡献者,对水体富营养化的影响较大;A2O 工艺城市污水处理厂比某湿地污水处理系统对非生物资源消耗较大,但对全球变暖、大气酸化以及光化学氧化等方面影响较小;A2O 相比五阶段 Bardenpho 工艺对水体富营养化影响较大,但对全球变暖、大气酸化、光化学氧化、非生物资源消耗等方面影响较小。Lu 等人<sup>[13]</sup>运用 LCA,并同时考虑经济因素和污水管理政策实施,研究污水厂运行成本、环境影响和污染物

排放之间的平衡关系。采用 BSM2 模型对进行污水厂运行模拟, SimaPro 8 及 Ecoinvent 数据库、Eco-indicator 99 (H) V2.10/Europe EI 99 H/A 进行影响评价。尽管其从生命周期的角度考虑了污水管理政策的概念以及排放标准修订对污水厂运行决策的影响, 然而其系统边界仍然围绕污水处理厂展开, 而并无对排放标准本身生命周期的环境影响进行分析。结果表明, 严苛的排放标准、提高污水收费以及增加水污染物超标排放的罚款等因素未必是环境友好的, 地方污水处理排放相关政策的实施需要在保护当地受纳水体的同时, 减少经济投入和环境影响。

尽管关于污水处理的 LCA 不计其数, 却鲜有学者以组织机构生命周期方法 (Organisational Life Cycle Approaches, OLCAs) 作为切入点。组织的环境足迹 (Organisational Environmental Footprint, OEF)<sup>[96]</sup>和组织 LCA (Organisational Life Cycle Assessment, O-LCA)<sup>[97]</sup>为支持决策和战略提供另一种 LCA 角度。组织、公司、公共机构等都有减少环境影响的重要责任。实施全面的计划是改善环境的首要任务, 这些计划为组织的战略和决策提供框架, 考虑技术、经济和环境的方面。OLCAs 分析整个组织, 不仅包括组织的设施, 也包括其价值链 (生命周期方法); 并考虑多个影响类别 (多影响类别方法), 有利于将环境因素整合到组织的战略和运作当中<sup>[98]</sup>。OLCAs 揭示了组织应该关注的产品及运作的所有关键点和关键环节, 可以在公司、市场等组织机构, 甚至是在经济和社会利益相关者中发挥重要作用, 突出整个组织和供应链的可持续性问题。Roberta Pedrazzani 等人<sup>[99]</sup>基于 OLCAs 的概念及方法论, 引入 2013/179/EU<sup>[96]</sup> (简称 PEF/OEF) 应用于某处理规模为 25000 m<sup>3</sup>/d 的污水处理厂进行实例分析, 其主体工艺采用活性污泥法, 出水水质遵循欧洲标准 EEC/271/91 (TSS= 35 mg/L、BOD<sub>5</sub>= 25 mg/L、COD= 125 mg/L、TN= 15 mg/L、TP= 2 mg/L、E. coli= 5000 UFC/100 mL)。采用由联合国环境规划署 (United Nations Environment Program, UNEP) - SETAC LCA 计划 (UNEP-SETAC LCA Initiative) 开发 USEtox 对化学物质排放的人类毒性和淡水毒性影响进行特征化。采用 Simapro 8.2.0 进行评价, 同时考虑 Simapro 分析软件中内置的环境影响类别和 PEF/OEF 中所规定影响类别的异同, 使得评价类别保持一致性。数据收集主要来自现场监测。

标准规制活动的可持续性值得商榷, 其与组织机构、产品、事件可持续性以及 LCA 的概念密不可分。该过程重要且复杂, 包括立项、开题、征求意见稿、送审稿、到报批行政审查的各个阶段, 涉及到多个组织机构的参与、各种工作/培训/研讨的会议、文书资料编辑制作、科学研究活动等工作内容, 存在着物质和能源的消耗。以 GB 18918-2002 为例, 其规制活动产生的环境影响的环节主要为: 向全社会公开征集意见; 在重点水污染物排放标准制修订过程中开展相关研究; 对各类典型污水处理厂进行现场考察与调研; 广泛收集分析国内外污水处理厂相关

法律法规、政策、标准，与正在制修订的《地表水环境质量标准》、《污水综合排放标准》以及各行业水污染物排放标准进行比较研究；编制组召开多次专题研讨会，针对工业园区管理、污泥处理处置、重点地区水环境保护等问题广泛咨询专家和相关方面的意见<sup>[10]</sup>。从政策生命周期的角度，此部分涉及到政府规制的投入，即政府制定政策、实施政策、进行监测、研究和确保政策被遵行的投入<sup>[20]</sup>。尽管有研究已经从生命周期的角度考虑了污水管理政策的概念以及排放标准修订对污水厂运行决策的影响<sup>[13, 100]</sup>，然而其系统边界仍然围绕污水处理厂展开，而并无将排放标准的规制活动纳入评价系统内。若在 LCA 系统边界中包含污水厂及其相关污水处理排放标准，量化标准制修订过程中造成的能源和物质消耗可能将进一步反映该系统中两部分环境影响潜能的平衡关系，从而为减少环境排放污染物、不必要的能源和物质消耗提供另一种新的评价角度。

例如会议，是知识共享、交流活动、科学辩论以及新项目、提出想法和解决方案的重要的方式<sup>[101-103]</sup>，但事实上，会议的与会人数、规模和范围不断扩大，存在一定铺张浪费<sup>[104]</sup>。考虑到事件的可持续性，一个事件对资源和能源的消耗常常被人们忽视，其给环境带来了巨大的负担<sup>[105, 106]</sup>。近二十年来，人们对减少会议和事件的环境影响和对执行可持续会议和事件管理的需求不断增加<sup>[107-113]</sup>。多个环境机构、组织和高校出版了关于可持续会议和事件的手册和指南<sup>[114-120]</sup>。ISO 也认识到活动行业可持续性的重要性，并发布了 ISO 20121 (2012)<sup>[23]</sup>，对可持续项目管理提出要求并进行指导。它适用于所有类型及规模的参与设计和交付事件的组织机构，并提出了可持续性管理系统的相关要求。ISO 20121 标准提出了几种方法来评估一个事件的可持续性，LCA 是其中之一。Roland Hischier 等人<sup>[105]</sup> 作为第 15 届国际环境信息研讨会的主办方（瑞士联邦材料测试和研究实验室，EMPA），使用 LCA 评估减少会议环境影响的不同措施的有效性。措施包括减少与会者所需的开会材料；减少纸本会议集，并以 CD ROM 代替；召开网络虚拟会议，这意味着不涉及交通能耗产生。他们从会议组织机构、会议材料及与会者活动三方面分析并确定系统边界，以三天的会议为功能单元，清单分析依托 umberto 数据库及一些欧洲的案例，采用 Eco indicator 99 方法进行影响评价。结果表明，与会者交通活动是环境影响的主要来源，其中长距离航空运输是主要部分。Antonio Boggia 等人<sup>[121]</sup>设计了一个评价可持续事件的模型。与 LCA 不同的是，其并非采用环境影响类别和影响指标，而是采用百分率或“是/否”结合多准则分析进行打分。它通过一个多准则的方法并组成一个最终的指数，该模型有 9 个指数，涵盖了与事件的环境可持续性相关的主要方面及所有阶段，即规划、组织、实施、事件后工作。该研究以 2014 年在意大利佩鲁贾大学举办的一次为期 5 天的欧洲春季夏令营为案例，得分为 638 分（满分 1000 分），说明该模型在废弃物、餐饮、内部旅行和参

与方面都有较好的管理潜力。最近, Sabrina Neugebauer 等人<sup>[122]</sup>围绕可持续发展主题进行了 LCA, 评价包括与会议准备、执行和后续行动相关的所有环境影响, 以期在从事可持续发展研究的学者之间发起一场辩论, 讨论他们在减少与日常工作活动有关的排放和环境影响方面的作用。他们将评价内容分为会议准备、会议执行及会议前后活动(与会者交通活动), 功能单元为为期三天的可持续主题会议, 采用 CML 2001 基线方法、GaBi 软件专业版、Ecoinvent 和 GaBi 数据库评价环境影响, 研究发现, 这场会议产生 455 吨二氧化碳当量, 相当于人均 0.57 吨的二氧化碳当量。碳足迹主要贡献者包括旅行活动(378 t CO<sub>2</sub>eq)、酒店住宿(39 t CO<sub>2</sub>eq)和餐饮(20 t CO<sub>2</sub>eq)。

综上, LCA 在污水处理领域中应用形式繁多, 其可以用于(不限于): (1) 识别不同处理规模、不同处理阶段、不同主体工艺、不同水处理和污泥处理方法的环境影响。(2) 基于污水处理标准排放限值进行评价。污水处理厂在不同出水标准的约束下会影响污水处理厂的能耗、成本和技术选择, 因此一些 LCA 的研究从污水处理排放标准的角度进行评价, 且有前人已经考虑到了较国标严苛的地方标准, 但并未考虑排放标准实施前的规制活动的潜在环境影响。(3) 与经济相关指标相结合进行评价。经济相关指标常与 LCA 结合进行污水处理评价, 以研究运行成本、环境影响和污染物排放之间的平衡关系。(4) 基于组织机构进行评价。组织、公司、公共机构等都有减少环境影响的重要责任, 与产品 LCA 的初始理念不同, 组织机构生命周期方法为支持决策和战略提供另一种生命周期分析角度, 考虑技术、经济和环境的方面, 其分析整个组织, 不仅包括组织的设施, 也包括其价值链(生命周期方法), 并考虑多个影响类别(多影响类别方法), 有利于将环境因素整合到组织的战略和运作当中, 但鲜有学者以此为切入点进行污水处理相关研究;(4) 评价事件可持续性。标准规制活动的可持续性与组织机构及产品的 LCA、事件可持续性的概念密不可分, 涉及到多个组织机构的参与、各种工作/培训/研讨的会议、文书资料编辑制作、科学研究活动等工作内容, 存在着物质和能源的消耗, 然而一个事件(如会议)的可持续性常常被人们忽略, 其可能带来巨大的环境负担。

## 1.3 研究目的和主要内容

### 1.3.1 研究目的

研究目的参考 ISO 14040 和 ISO 14044<sup>[21, 22]</sup>的要求编写。

#### ① 预期的应用

为探究污水处理标准制修订至具有更严格限值的标准(趋于地表水IV类标准, 简称准IV类)而导致的潜在环境影响, 以标准规制活动、污水处理厂在标准实施

后根据标准规定的排放限值而对处理设施进行提标改造为系统边界，采用新的 LCA 评价角度和创新的清单分析方法，对评估该系统的生命周期环境影响，量化排放标准规制活动、提标改造的污水厂的环境影响，并对比其大小和平衡关系，识别重要的影响类别以及产生较大环境影响的环节，为决策者提供研究依据。

### ② 进行研究的原因

如前述，目前全国多个地区的城镇污水处理盲目提高至 III/IV 类水质标准的趋势较为明显，为遵循更加严格的排放标准而对污水处理厂进行新建或提标升级改造，在一定程度上减少环境污染的同时，也增加了处理成本，造成不必要的物质和资源浪费。

基于污水处理排放标准的生命周期评价，可以识别在执行不同排放标准的情况下，能源和物质资源消耗、污泥和温室气体排放、水质改善的环境效益、经济效益、资源回收潜力等多方面的平衡关系，有助于设计人员和操作人员在不同条件下更容易地选择最优技术方案，以及资源回收过程等方面的可行性，同时也为决策者提供污水处理设施在执行严格的排放标准时所产生的不同类别的环境影响之间平衡关系提供科学的解释。然而，尚未有研究考虑污水处理排放标准文件在制定过程中可能产生的生命周期环境影响。污水处理排放标准规制过程的工作内容，涉及到各种工作/培训/研讨的会议、文书资料编辑制作、科学研究活动等工作内容，从生命周期评价的角度，这些活动可能存在着多种物质和能源的消耗（如交通运输、建筑能耗）。

考虑在 LCA 系统边界中包含污水厂及其相关污水处理排放标准，量化标准制修订过程中造成的能源和物质消耗可能将进一步反映该系统中两者所产生的环境影响的平衡关系，从而为减少环境排放污染物、不必要的能源和物质消耗提供另一种新的评价角度。

### ③ 预期的受众

本研究预期的受众为与该标准相关的国务院相关部委，科研院所，各省、自治区、直辖市环境保护厅（局），解放军环境保护局，各环境保护重点城市环境保护局，环境保护部各派出机构，直属单位，机关各部门等。

### ④ 本研究结果不作为对公众公开的比较性断言

## 1.3.2 主要研究内容及技术路线

本研究课题将污水处理厂排放标准的制定，及其为符合新的准 IV 类标准排放限值的升级改造污水厂的看成一个产品系统，即将污水处理厂排放标准的制定程序以及为遵循新排放标准而对污水处理厂进行升级改造作为一个整体研究对象，该产品系统涉及两个子系统，分别是污水处理厂污染物排放标准制定生命周期（子系统 1），以及污水厂升级改造生命周期（子系统 2）。本文关注产品系统整

体的潜在环境影响，探究两个子系统的环境影响的潜在关系和大小，同时识别各个子系统内部的环境影响重要问题，为环境标准及其相关工程建设的绿色发展提供参考。

### ① 研究内容

本文的研究内容主要包括以下几点：

1) 以准IV类城镇污水处理厂污染物排放标准为分析对象，基于其制定过程相关活动（子系统1）及其涉及的污水处理厂的提标升级改造（子系统2）作为一个产品系统整体，建立生命周期评价基本框架，确定各个阶段能量和物质的消耗，量化与识别该系统潜在环境影响的重要环节。

2) 分析出行方式、参会人数、准IV类污水处理厂升级改造的不确定性，以反映不同情景下对系统环境影响波动变化的影响。

3) 根据分析结果，为准IV类城镇污水处理厂污染物排放标准的制定和实施提供建议。

### ② 研究技术路线

根据上述研究内容，本文技术路线如下。首先是对现有关于污水处理处理领域的 LCA 文献进行总结和评论，确定研究内容。然后基于 LCA 方法论建立评价体系，确定系统功能、功能单元、系统边界、评价阶段等。随后进行生命周期各个阶段的前景和背景数据清单收集、分析。采用 GaBi Education 9.1 进行环境影响分类、特征化、归一化。最终对 LCA 结果进行解释，得出结论和建议。

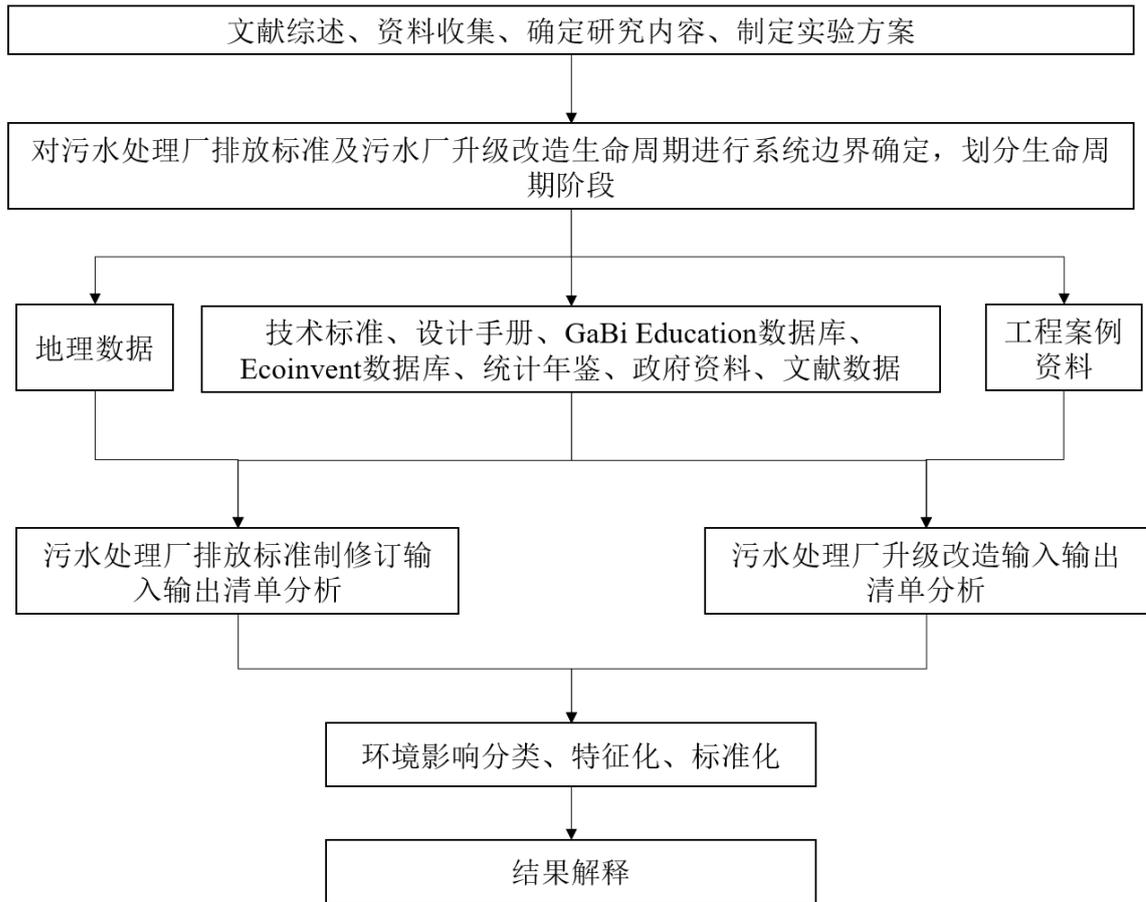


图 1.3 技术路线图

Figure 1.3 Methodology Framework



## 2 研究范围

### 2.1 引言

根据前述分析，考虑采用工艺的相似性，本文不具体区分各地准IV类标准的细微差别，本文鉴于对文献<sup>[10, 11]</sup>的理解，将准IV类标准界定为：城镇污水厂准IV类污染物排放标准（简称准IV类标准）为COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP排放限值部分或全部低于GB 18918-2002中一级A标准，且达到甚至低于GB 3838-2002中IV类水体水质限值的标准。笔者清楚对于国内现有准IV类提标改造案例的清单及生命周期环境影响会存在一定的细微差别，但从实施方便的技术角度，在后面的分析评价中，也暂忽略各具体案例清单上的细微差别。

本章将定义城镇污水厂准IV类提标的产品系统及其功能、描述功能单元、确定系统边界，并对LCA分配程序、LCIA方法论和影响类别、结果解释方法、数据质量要求、作出的假设、价值选择和选择性要素进行详细说明。

### 2.2 产品系统

城镇污水处理厂污染物排放标准制定及该标准所规定的城镇污水处理厂，即子系统包括：

#### ① 子系统 1：城镇污水处理厂准IV类污染物排放标准的制定

城镇污水厂准IV类标准制订包括该标准的预阶段、立项、起草、征求意见、审查、批准、出版阶段、复审（确认，修改，修订）的阶段，但废止阶段不考虑在本次研究中。涉及到的活动主要包括编制工作、准IV类的技术审查、宣传、培训、学术研讨、从业人员相关工作等；

#### ② 子系统 2：城镇污水处理厂基于准IV类标准的提标改造

该系统考虑准IV类标准实施后，城镇污水厂根据该标准进行提标改造，并执行准IV类标准运行污水厂。

### 2.3 产品系统的功能

#### 2.3.1 子系统 1：城镇污水处理厂准IV类污染物排放标准的制定

从制定主体上看，本文研究的标准属于国家标准<sup>[123, 124]</sup>。国家环境标准（强制性标准编码为“GB”，推荐性标准编码“GB/T”）。我国《环境保护法》第九条中提到“国务院环境保护行政主管部门制定国家环境质量标准。”国家环境标准的制定、编号以及发布是由国务院环境保护行政主管部门单独或与国务院标准化行政主管部门共同完成。此文件的具体内容主要旨在针对全国范围内普遍性、一般性

存在的环境问题，全面、综合地考量全国范围的平均水平以及一般要求，规定普适的、应用于全国的统一性控制指标和详细数值，以此为依据开展环境保护相关工作。在整个环境标准体系中，国家环境标准占据着环境标准体系中的主导地位，其反映整个国家环境政策的具体目标要求，覆盖面涉及全国范围。

从环境标准的内容上看，本文研究的标准属于污染物排放标准，但同时以环境质量标准为基础和前提<sup>[123, 124]</sup>。污染物排放标准作为控制性标准，是在了解现有环境、经济和技术现状的基础上，对排放到环境中的污染物所被允许的最大限值作出规定，其多以对浓度的控制来规定污染物的排放标准，以实现环境目标。如《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）为污染物排放标准。环境质量标准是在综合考虑经济、技术现状的基础上，对有害物质、因素在特定时间空间范围内所被允许的最高含量值作出限制性规定，从而在保障人体健康与社会物质财富以及保护自然环境的同时，促进生态良性循环。环境质量标准是国家环境政策目标的体现，为制定污染物排放标准奠基，也为评价环境质量状况提供重要依据<sup>[125]</sup>，是环境保护标准的基本原则以及环境标准工作的目标指向。如《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）为环境质量标准，其为 GB 18918-2002 的制定奠定基础。

“准IV类”的概念目前在业界尚为清晰，因此本文根据以下的研究背景明确“准IV类”的概念。其一是2015年发布的《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）（征求意见稿）<sup>[10]</sup>，其为满足环境敏感地区水环境管理需要，设置特别排放限值。特别排放限值对基本控制项目作出了规定，其限值总体与《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）IV类水体水质要求相当（总氮除外）。其二是近年来随着各地水环境保护压力逐渐增大，全国不少地区逐渐出现提高城市污水厂排放标准至趋向于III/IV类水质标准的趋势<sup>[11]</sup>，这些标准中的COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP限值中部分或全部与GB 3838-2002的III、IV类水质指标要求相当。因此，本文中指代的城镇污水厂准IV类污染物排放标准（简称准IV类标准）为COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP排放限值部分或全部低于GB 18918-2002中一级A标准，且达到甚至低于GB 3838-2002中IV类水体水质限值的标准。国家标准制定程序包括预阶段、立项、起草、征求意见、审查、批准、出版、复审和废止的11个阶段<sup>[126, 127]</sup>。其中由于废止阶段存在不确定性，因此不考虑在本研究中。

### 2.3.2 子系统2：城镇污水处理厂基于准IV类标准的提标改造

污水处理厂简称城镇污水厂，是为使城市污水达到排入某一水体或再次使用的水质要求，对其进行人工强化处理的过程的场所。

污水厂处理技术的选择一定程度上受到污染物排放标准的影响，因此本文考虑准IV类标准实施后对现有污水厂进行提标升级的环境影响进行评价。

## 2.4 功能单元

子系统 1：一份城镇污水厂准IV类污染物排放标准。

子系统 2：城镇污水处理厂处理  $1\text{m}^3$  污水<sup>[89, 128, 129]</sup>

## 2.5 系统边界

本研究的产品系统为包括两个子系统：1) 城镇污水处理厂准IV类污染物排放标准的制定；2) 城镇污水处理厂基于准IV类标准的提标改造。系统边界图见图 2.1

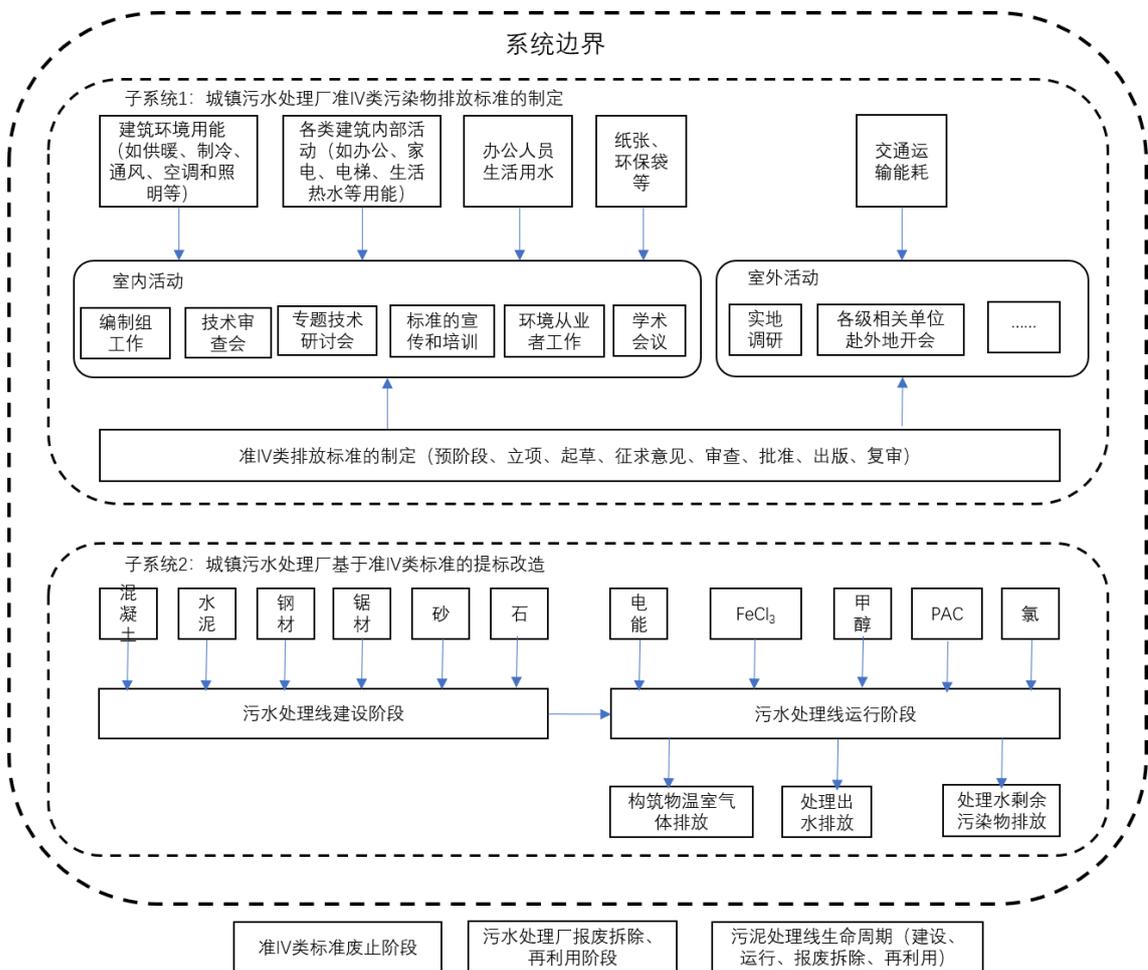


图 2.1 系统边界图

Figure 2.1 System Boundary

### 2.5.1 子系统 1：城镇污水处理厂准IV类污染物排放标准的制定

#### ① 标准制定程序及阶段的确定

国家标准制定程序包括预阶段、立项、起草、征求意见、审查、批准、出版、复审和废止的 11 个阶段<sup>[126, 127]</sup>。从排放标准制定计划启动（立项阶段）<sup>[130]</sup>到完成

标准草案（征求意见稿阶段）<sup>[131]</sup>约为 5 年的时间，因此完成草案的时间周期定为 60 个月<sup>[126]</sup>。此外，由于信息可获性限制，送审阶段到报批行政审查阶段假定为 5 年。因此子系统 1 的生命周期时间期限定为 10 年。表 2.1 为国家标准制定程序的各个阶段<sup>[126]</sup>。

表 2.1 国家标准制定程序的阶段

Table 2.1 Stages for National Standards Making Procedure

阶段代 码	阶段名称	阶段任务	阶段成果 <sup>①</sup>	完成周期 月	WTO 对应阶 段 <sup>②</sup>
00	预阶段	提出新工作项目建 议	PWI		
10	立项阶段	提出新工作项目	NP	3	I
20	起草阶段	提出标准草案征求 意见稿	WD	10	II
30	征求意见 阶段	提出标准草案送审 稿	CD	5	III
40	审查阶段	提出标准草案报批 稿	DS	5	III
50	批准阶段	提供标准草案出版 稿	FDS	8	IV
60	出版阶段	提供标准草案出版 物	GB, GB/T, GB/Z	3	IV
90	复审阶段	定期复审	确认, 修改, 修订	60	V
95	废止阶段		废止		

对于排放标准而言，该标准从 00~60 阶段被认为是该标准从已经决定制定标

① 阶段成果代号缩略语：PWI, Preliminary Work Item 新工作项目建议；NP, New work item proposal 新工作项目；WD, Working draft (s) 标准草案征求意见稿；CD, Committee draft (s) 标准草案送审稿；DS, Draft standard 标准草案报批稿；FDS, Final draft standard 标准出版稿；GB 强制性国家标准；GB/T 推荐性国家标准；GB/Z 国家标准化指导性技术文件

② 阶段成果代号缩略语：PWI, Preliminary Work Item 新工作项目建议；NP, New work item proposal 新工作项目；WD, Working draft (s) 标准草案征求意见稿；CD, Committee draft (s) 标准草案送审稿；DS, Draft standard 标准草案报批稿；FDS, Final draft standard 标准出版稿；GB 强制性国家标准；GB/T 推荐性国家标准；GB/Z 国家标准化指导性技术文件

准，但技术工作（符合新标准的污水厂建设，以及对原有污水厂的技术改造已达到新标准的要求）还未开始的阶段到标准开始实施的这段时期。该时期被理解为是为满足日益严格的水环境质量改善要求而提出新的准IV类污染物排放标准。该标准的复审阶段（90）属于排放标准在已经实施的前提下进行定期复审，完成确定、修改、修订的阶段性成果。以 GB18918 -2002 为例，其在已经被实施的前提下进行标准的修订过程。2006 年，国家环保总局发布公告 2006 年 第 21 号“关于发布《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）修改单的公告”指出第 4.1.2.2 条修改为：城镇污水处理厂出水排入国家和省确定的重点流域及湖泊、水库等封闭、半封闭水域时，执行一级标准的 A 标准，排入 GB3838-2002 地表水 III 类功能水域（划定的饮用水源保护区和游泳区除外）、GB3097 海水二类功能水域时，执行一级标准的 B 标准<sup>[132]</sup>。2015 年，环境保护部办公厅发布环办函（2015）1782 号政府公文，旨在修订国家环境保护标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002），并就标准的征求意见稿向相关单位广泛征求意见<sup>[131]</sup>。这两份公文中所涉及的工作可被理解为标准复审阶段的修改、修订工作。因此本文的研究考虑 00~90 为准IV类标准的生命周期。

废止阶段（阶段代码为 95）缺乏文献依据支撑，因此不考虑该阶段的环境影响。

## ② 国家环境保护标准制修订工作程序

立项阶段：编制项目计划的初步方案；确定项目承担单位和项目经费，形成项目计划；下达项目计划任务。

开题阶段：项目承担单位成立编制组，编制开题论证报告；项目开题论证，确定技术路线和工作方案。

征求意见稿阶段：编制标准征求意见稿及编制说明；对标准征求意见稿及编制说明进行技术审查；公布标准征求意见稿，向有关单位及社会公众征求意见；

送审稿阶段：汇总处理意见，编制标准送审稿及编制说明；对标准送审稿及编制说明进行技术审查。

报批行政审查阶段：编制标准报批稿及编制说明；对标准进行行政审查；环境质量标准和污染物排放（控制）标准的行政审查包括司务会、部长专题会和部常务会审查；其他标准行政审查主要为司务会审查，若为重大标准应经部长专题会审查；标准批准（编号）、发布；标准正式文本出版；项目文件材料归档；标准编制人员工作证书发放；标准的宣传、培训。

标准制修订工作流程如图 2.2 所示<sup>[133]</sup>。

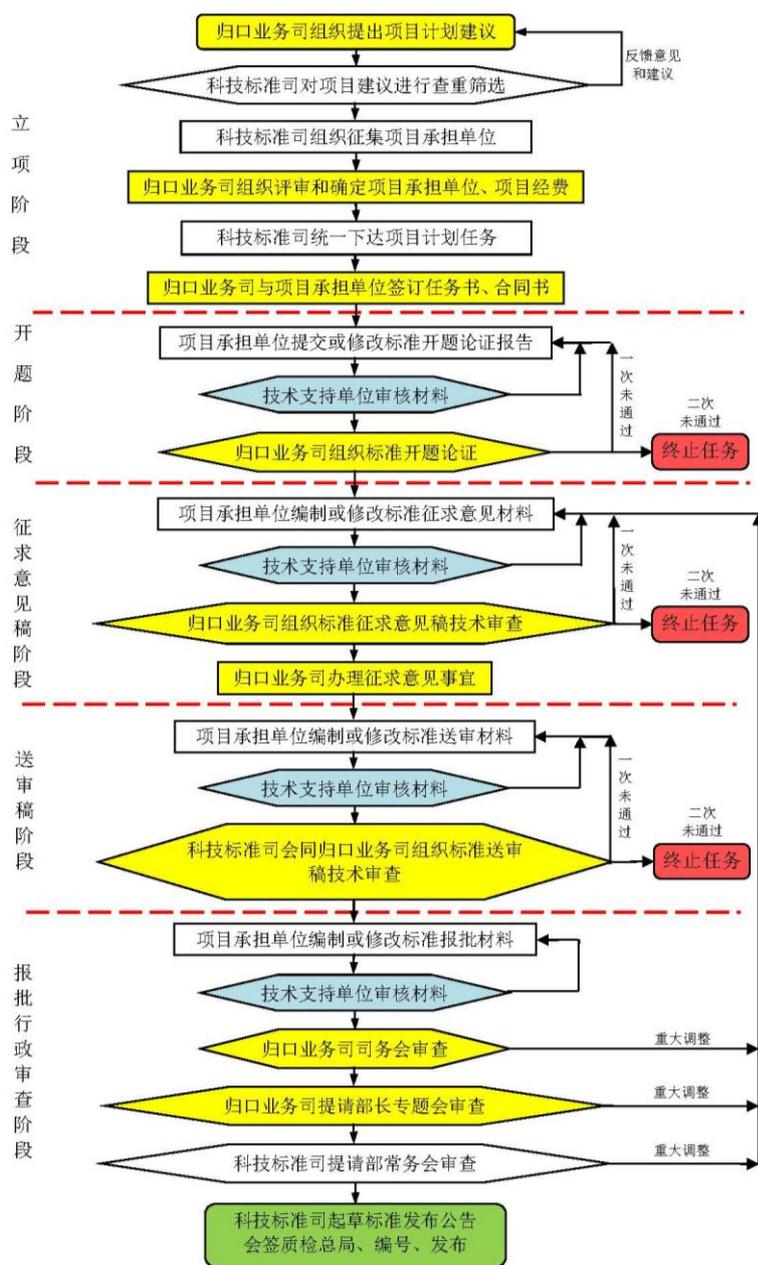


图 2.2 环境质量标准、污染物排放（控制）标准制修订工作流程图

Figure 2.2 Workflow of Making and Amending Procedures for Environmental Quality Standard and Pollutant Discharge (Control) Standard

③ 国家环境保护标准制修订工作具体要求<sup>[127, 133]</sup>

标准制修订工作涉及到标准起草、征求意见、审查和报批、发布和备案。

对于标准起草工作，经标准化技术委员会及分标委确认的标准起草单位应当制定标准工作计划，成立标准起草小组，并确定专门人员负责标准的起草工作。标准起草单位系统地收集和整理国内外有关标准及规范、规程、文献等资料，及

时掌握相关标准的现状、发展趋势和动态信息。标准草案完成后经过一定的流程形成送审稿。

征求意见工作，标准起草单位在完成标准起草工作后，经审查同意后，起草单位将标准征求意见稿、标准编制说明及有关附件寄送给部分委员和相关单位专家征求意见。必要时，可通过适当方式向社会征求意见。征求意见的专家应当涵盖相关科研、生产、使用、检测检验、培训、监管监察等领域。

审查和报批工作，标准起草单位将完善后的标准送审稿、标准编制说明、意见汇总处理表和其他有关附件送分标委秘书处。强制性国家标准的审查，必须采用会议审查。通过审查的标准，由标准起草单位根据审议意见进行修改，形成标准报批稿，连同标准编制说明、意见汇总处理表和其他有关附件一式三份送分标委秘书处。采用国际标准或者国外先进标准的，应附有该标准的原文或者译文一式二份。标准起草单位提供上述资料时，并同时提供电子文稿。

发布和备案，对于国家标准而言是由国家标准委统一编号、发布。

#### ④ 城市污水处理厂准IV污染物排放标准制修订主要工作内容

参考 GB 18918-2002 的制修订工作<sup>[131]</sup>，本研究中准IV类标准的制修订工作内容主要有征集意见、开展研究、现场考察和调研、专题研讨会等。

一是环保部（现生态环境部）就标准的制修订向全社会公开征集意见。征集的单位，主要包括国务院相关部委（发改委、教育部、科技部、工信部、国土资源部、住建部、交通部、铁道部、水利部、农业部、卫生部、质检总局），科研院所（中国科学院、中国工程院、高等院校），各省、自治区、直辖市环境保护厅（局），解放军环境保护局，各环境保护重点城市环境保护局，环境保护部各派出机构，直属单位，机关各部门等。

二是在重点水污染物排放标准制修订过程中开展相关研究。编制组一般有承担或参与钢铁、有色、制药、合成氨、纺织、制革等水污染防治重点行业排放标准编制工作的经验。在这些标准编制过程中，结合我国水污染物排放标准体系的优化与完善，对水污染物间接排放监管、工业园区污水处理厂等管理现状进行大量的调研，对水污染物排放管理及标准体系设置开展了深入研究，识别问题，为准IV类污染物排放标准的制修订奠定基础。

三是现场考察与调研各类典型污水处理厂。结合相关科研及标准的编制工作，编制组赴工业园（综合型和行业型包括电镀园区、纺织园区、制革园区等），以及全国多个省市地区的城镇污水处理厂进行了实地调研，选取了典型污水处理厂进行污水和污泥的实测分析，了解各类污水处理厂管理和运行情况。在地方环保部门、环保督查中心的协助下，收集全国城镇污水处理厂排污数据，进行系统的统计分析，总结提炼污水处理厂运行及排污现状。

编制组广泛收集分析国内外污水处理厂相关法律法规、政策、标准，与正在制修订的《地表水环境质量标准》、《污水综合排放标准》以及各行业水污染物排放标准进行比较研究，多次召开专题研讨会，针对工业园区管理、污泥处理处置、重点地区水环境保护等问题广泛咨询专家和相关方面的意见。

### 2.5.2 子系统 2：城镇污水处理厂基于准 IV 类标准的提标改造

根据 2013 年全国投运的 4136 座城镇污水处理设施进行分析<sup>[10, 134]</sup>（见表 2.2），从规模上划分，我国污水厂根据规模划分情况如表 2.2 所示。从处理工艺来看（见图 2.3<sup>[17]</sup>），氧化沟（Oxidation Ditch, OD）、厌氧-缺氧-好氧工艺（Anaerobic-Anoxic-Oxic, AAO）、序批式活性污泥法（Sequencing batch reactor activated sludge process, SBR）、缺氧-好氧工艺（Anoxic-Oxic, AO）、活性污泥法、生物膜法这 6 种工艺约占我国城镇污水处理厂数量的 88%，污水处理量占 86%<sup>[17]</sup>，占据主导地位。其中 AAO 和氧化沟是我国采用的主要工艺，约 50%的污水处理厂采用了 AAO 工艺和 OD 工艺，分别占污水厂总量的 31%和 21%。选择这两种技术通常是由于它们的工艺特性和处理能力良好，且它们在日常操作中相对稳定和易于管理<sup>[17]</sup>。此外，总处理规模的四分之一采用传统活性污泥法和 SBR 法处理，28%采用其他工艺处理（AO、生物膜、化学和物理化学等）。

表 2.2 2013 年全国投运的 4136 座城镇污水处理设施日处理能力统计

Table 2.2 Treatment Capacities of the 4136 Operating Municipal Wastewater Treatment Plants in China (By The End of 2013)

日处理能力（万吨）	≥10	1~10	<1
占比（%）	10.0	67.6	22.4

污水处理工艺对比（%）

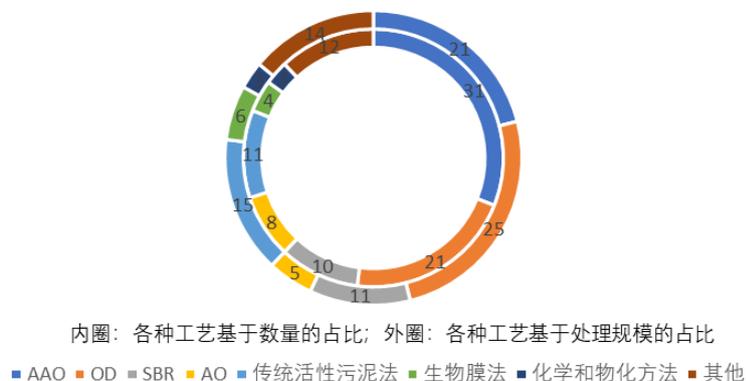


图 2.3 污水二级处理工艺对比

Figure 2.3 Comparison of Wastewater Secondary Treatment Processes

由于关于准IV类标准污水厂提标改造案例可获性有限,因此本文在参考现有的准IV类标准提标改造实践的文献案例的基础上,对于案例中缺乏的LCA研究所需信息,将基于设计手册、设计规范、文献资料等作出合理假设并进行二次设计,第2.9节中也涉及到该部分的具体描述。案例为南方污水处理厂<sup>[135,136]</sup>,运行年限考虑为20年<sup>[88]</sup>。

本文中的城镇污水厂生命周期包括与污水厂相关的原材料获取、建设、运行的阶段,而报废拆除、资源回收利用的阶段不考虑在本文的LCA研究中<sup>[88,94]</sup>。

本研究子系统2的LCA模型中所包括的处理单元包括预处理、初级处理、二级处理和深度处理。系统边界为污水处理工艺线和污泥处理工艺线,功能单元为1 m<sup>3</sup>处理水。本研究考虑建设和运行阶段,而污水厂运行维护和运行20年后停运的阶段排除在外。此外,污泥处理工艺线也被排除在本研究外,原因主要为两点:首先,与其他污水处理厂处理方法相比,污泥处理和处置设施对富营养化(<5%)、酸化(<20%)和全球变暖(10–20%)的影响较小<sup>[85,139-141]</sup>。再者,一些早期的LCA研究中关于污泥处理和处置的环境影响的范围值存在非常大的差异<sup>[85,93,140-142]</sup>。与此同时,污泥处理高度依赖于当地的污泥管理因素,包括污泥脱水程度、污泥被运送到最终处理点的交通运输距离、焚烧/填埋/土地利用的污泥管理实践,以及当地气候等因素。相比之下,污水处理厂的运行对于选址和当地废弃物管理的依赖性较少。此外,根据Opher等人的研究<sup>[143]</sup>,他们提出了减少污水处理厂LCA研究的清单数据要求的方法,同时建议在LCA比较分析中省略污泥处理设施的环节。因此本研究不考虑污泥处理工艺线的评价。

污水厂具体情况描述如下。

南方某污水厂位于工业园区,该厂所属地区为环境敏感区域,规划服务面积约93.2km<sup>2</sup>,远期服务人口约45.3万人,远期总规模24万m<sup>3</sup>/d。提标改造前污水厂出水执行GB 18918-2002一级B,一期(规模1.5×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d)、二期(规模4.5×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d)、三期(规模6×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d)分别投运于1999年底、2004年底、2009年底,污水厂占地约29×10<sup>3</sup>m<sup>2</sup>。

2017年,该厂进水主要来自服务范围内生活污水及厂区周边工业园区工业废水,其所处区域属饮用水水源重要保护区,生态环境定位较高,相关管理部门因此要求其提标改造至污水厂出水水质达到准IV类标准。该厂提标扩建至规模为18×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d,最终规模按24×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d控制。

设计进出水对比见表2.3,提标前后工艺流程图见图2.4、图2.5,提标改造后构筑物情况见表2.4。

表 2.3 污水厂设计进出水对比 (单位: mg/L)

Table 2.3 Design Influent and Effluent of WWTP1 (Unit: mg/L)

基本控制项目	设计进水	设计出水	
		改造前 GB 18918-2002 一级 B	改造后 准 GB 3838-2002 IV 类
化学需氧量 (COD)	520	60	50
生化需氧量 (BOD <sub>5</sub> )	240	20	6
悬浮物 (SS)	251	20	5
氨氮 (NH <sub>3</sub> -N, 以 N 计) <sup>①</sup>	29	8 (15)	1.5 (3)
总氮 (TN, 以 N 计)	35	20	10
总磷 (TP, 以 P 计)	6.7	1.5 (2005 年 12 月 31 日前建设的)	1.0 (2006 年 1 月 1 日起建设的) 0.3

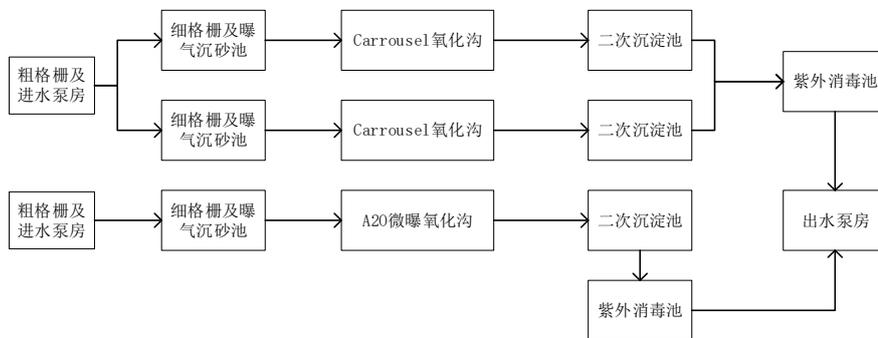


图 2.4 污水厂提标升级改造前工艺流程图

Figure 2.4 Process flow chart of Wastewater Treatment Plant before Upgrading and Reconstruction

<sup>①</sup> 水温不大于 12 摄氏度时, NH<sub>3</sub>-N 质量浓度遵循括号里的值

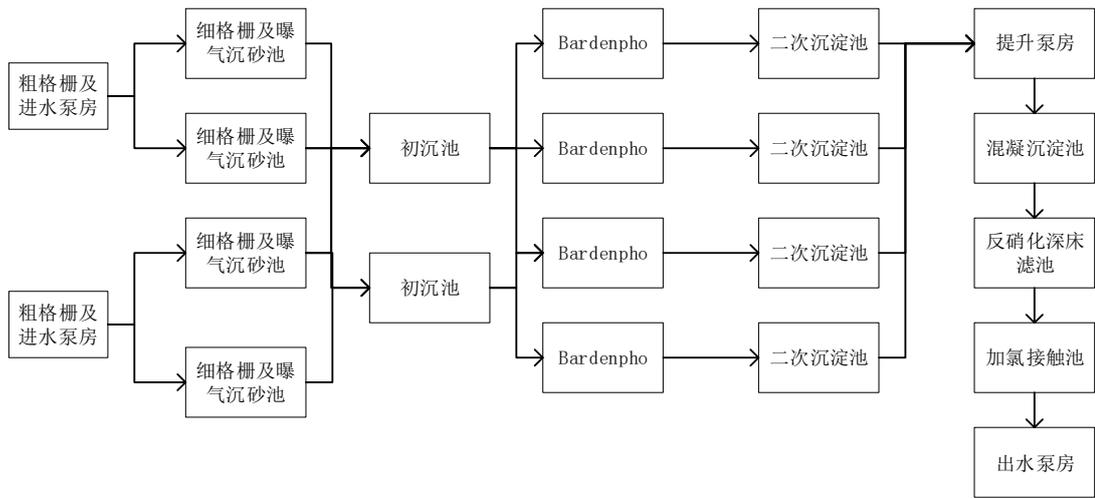


图 2.5 污水厂提标升级改造后工艺流程图

Figure 2.5 Process flow chart of Wastewater Treatment Plant after Upgrading and Reconstruction

表 2.4 污水厂提标改造后新建、改造构筑物一览表

Table 2.4 List of New-Built Structures After Upgrading and Reconstruction of Wastewater Treatment Plant

序号	名称	平面尺寸	数量	备注
1.	Carrousel 2000 氧化沟	96 × 20	1	改造成 Bardenpho, 重新分格; 一期 (1999 年) 1.5 万 m <sup>3</sup> /d; 六套曝气机, 充氧能力 16~81kgO <sub>2</sub> /h, 功率 45kW; 六台潜水推进器, 功率 4kW; 溶解氧测定仪 8 个
2.	二次沉淀池	φ 38.7	1	更换设备; 一期 (1999 年) 1.5 万 m <sup>3</sup> /d;
3.	Carrousel 2000 氧化沟	145 × 20	2	改造成 Bardenpho, 重新分格; 二期 (2004 年) 4.5 万 m <sup>3</sup> /d, 单池 2.25 万 m <sup>3</sup> /d; 12 套曝气机, 充氧能力 11~56kgO <sub>2</sub> /h, 功率 30kW; 12 台潜水推进器, 功率 4kW; 溶解氧测定仪 8 个
4.	二次沉淀池	φ 40.1	3	更换设备; 二期 (2004 年) 4.5 万 m <sup>3</sup> /d
5.	粗格栅及进水泵房	16.35 × 19	1	增加设备; 三期 (2009 年) 土建 18 万 m <sup>3</sup> /d 近期建成, 设备分期安装; 栅槽尺寸 11.30 × 5.59, 两套格栅除污机 HF1250, 功率 1.5~3kW; 8 套 8PWL 污水泵, 流量 350~650 m <sup>3</sup> /h, 扬程 15.5~9.5m, 功率 23~33kW
6.	A2/O 微曝氧化沟	78.3 × 50.4	2	改造成 Bardenpho, 重新分格; 三期 (2009 年), 6 万 m <sup>3</sup> /d; 8 台水下曝气机, 充氧能力 24~36kgO <sub>2</sub> /h, 功率 22kW; 4 台内回流泵, 流量 732.1~1287 m <sup>3</sup> /h, 扬程 10.4~4.2 m, 功率 37kW; 厌氧和缺氧的每格中各设置 1 台潜污搅拌机, 功率 3kW;
7.	二次沉淀池	φ 40	2	更换设备; 三期 (2009 年), 6 万 m <sup>3</sup> /d;
8.	出水泵房	29.5 × 11.0	1	增加设备; 三期, 土建 24 万 m <sup>3</sup> /d; 8 台出水泵, 流量 335.2~676 m <sup>3</sup> /h, 扬程 25.1~18 m, 55kW
9.	细格栅及曝气沉砂池	32.5 × 18	1	新建; 四期 (2017 年), 土建 24 万 m <sup>3</sup> /d; 4 套格栅除污机, 功率 1.5~3kW; 总供气量 2800 m <sup>3</sup> /h, 6 套 220-TR 泵式水下曝气机, 功率 22kW; 旋流输砂机两套
10.	初次沉淀池	145 × 24	2	新建; 四期 (2017 年), 单池 12 万 m <sup>3</sup> /d; 沉砂池与初沉池合建; 平流沉淀池 24 格, 单格宽 6m
11.	改良 Bardenpho	95 × 75	1	新建; 四期 (2017 年), 土建 6 万 m <sup>3</sup> /d; 8 台水下曝气机, 充氧能力 24~36kgO <sub>2</sub> /h, 功率 22kW; 4 台内回流泵, 流量 732.1~1287 m <sup>3</sup> /h, 扬程 10.4~4.2 m, 功率 37kW; 厌氧和缺氧的每格中各设置 1 台潜污搅拌机, 功率 3kW;

## 2 研究范围

序号	名称	平面尺寸	数量	备注
				FeCl <sub>3</sub> 投加量 24mg/L, 甲醇投加量 0.014kg/d.m <sup>3</sup>
12.	二次沉淀池	φ 40	2	新建; 四期 (2017 年), 单池 3 万 m <sup>3</sup> /d
13.	剩余污泥及回流污泥泵房	12×10	1	新建; 四期 (2017 年), 土建规模 12 万 m <sup>3</sup> /d; 2 台回流污泥泵, 流量 347.4~675.9 m <sup>3</sup> /h, 扬程 15.1~8.3 m, 功率 30kW; 4 台剩余污泥泵, 流量 6.9~14.5m <sup>3</sup> /h, 扬程 18.9~16.8m, 功率 1.5kW
14.	二泵房	29.5×11.0	1	新建; 四期 (2017 年), 土建 24 万 m <sup>3</sup> /d; 泵 4 用 2 备, 流量 1105.3~1926 m <sup>3</sup> /h, 扬程 12.9~4.9 m, 75kW
15.	混凝沉淀池		1	新建; 四期 (2017 年), 土建 24 万 m <sup>3</sup> /d; 机械混合池、絮凝池和沉淀池组成, 2 组; 混合池 2 座, 单池平面尺寸 3×10, 有效水深 2.5m; 絮凝池共 4 座, 平面总尺寸 16m×24m, 絮凝时间 36min; 沉淀池共 4 座, 平面尺寸 16m×38m; PAC 投加量 38.5gPAC/gTP
16.	反硝化深床滤池		1	新建; 四期 (2017 年), 土建 24 万 m <sup>3</sup> /d; 共 12 格, 单格过滤面积平面尺寸 50m×4m; 滤池砂层厚度 1.8m, 采用粒径 2~3mm 石英砂, 承托层厚度 0.4m, 采用粒径 3~38mm 天然鹅卵石, 承托层下面布水布气系统; 过滤平均滤速 5.2m/h, 最大强制滤速 7.5m/h, 过滤水头损失 2m; 反冲洗周期 48h, 反冲洗过程, 气冲 3~5min, 气水混冲 15min, 单独水冲 5min, 反冲洗水洗强度 14.7 m <sup>3</sup> / (m <sup>2</sup> .h), 反冲洗气洗强度 91.4 m <sup>3</sup> / (m <sup>2</sup> .h) ; 反冲洗水泵 2 用 1 备, 流量 972~1476 m <sup>3</sup> /h, 扬程 50~37 m, 功率 164~189kW; 反冲洗鼓风机 4 用 2 备, 供气量 80m <sup>3</sup> /min, 功率 155kW; 甲醇投药量 3.2kg/kgNO <sub>3</sub> -N
17.	加氯接触池		1	新建; 四期 (2017 年), 土建 24 万 m <sup>3</sup> /d; 共 6 个廊道, 单廊道尺寸 4×52.08; 投氯气量 10 mg/L

## 2.6 分配程序

子系统 2 建设阶段,对于需要基于准IV类标准进行改扩建的现有污水厂,考虑扩展产品系统的方式<sup>[22]</sup>,其建设所需的物质和能耗的输入不区分准IV类标准实行前后的输入,将其全部纳入到标准实施后的输入。

子系统 2 运行阶段输入的能源与物质按照一级、二级、三级处理进行分配,其中一级处理包括格栅、沉砂池、初级沉淀池、一级强化处理;二级处理包括生化处理单元、二沉池;深度处理包括混凝沉淀、过滤等工艺<sup>[144]</sup>,二泵房(中间提升泵房)产生的能耗归为深度处理。此外,若污水厂不涉及深度处理,则污水消毒处理单元的能源和物耗包含在二级处理中,否则,包含在深度处理中。涉及到污水出厂内多条处理支路共用一座处理构筑物的情况时,则该处理构筑物所产生的能耗物耗按照对应支路的生物处理单元设计规模进行能耗和物耗分配。

## 2.7 LCIA 方法论和影响类别

本研究采用莱顿大学(Leiden University)环境科学中心(Centre of Environment Science) CML 方法用于量化环境影响潜能值<sup>[85, 140]</sup>。本研究中 LCA 对比分析所考虑的环境影响类别为非生物资源消耗(Abiotic Depletion, ADP elements [kg Sb eq.])、非生物化石燃料消耗(Abiotic Depletion, ADP fossil [MJ])、酸化(Acidification Potential, AP[kg SO<sub>2</sub> eq.])、富营养化(Eutrophication Potential, EP [kg Phosphate eq.])、淡水生态毒性(Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot., FAETP inf. [kg DCB eq.])、全球变暖(Global Warming Potential, GWP 100 years [kg CO<sub>2</sub> eq.])、排除生物源碳的全球变暖(Global Warming Potential, GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO<sub>2</sub> eq.])、人类毒性(Human Toxicity Potential, HTP inf. [kg DCB eq.])、海洋生态毒性(Marine Aquatic Ecotoxicity Pot., MAETP inf. [kg DCB eq.])、臭氧层消耗(Ozone Layer Depletion Potential, ODP, steady state [kg R11 eq.])、光化学臭氧生成潜能(Photochem. Ozone Creation Potential, POCP [kg Ethene eq.])、陆地生态毒性(Terrestrial Ecotoxicity Potential, TETP inf. [kg DCB eq.])。

本研究根据 ISO 14044 的要求,考虑在 LCIA 环节将 LCI 结果分配到以上的影响类别(Classification, 归类),以及计算影响类别指标结果(Characterisation, 特征化),这是强制性要求。同时考虑进行该标准中所指明的其中一种可选择性要素,即对影响类别指标结果采用参考信息计算指标量级(Normalisation, 归一化),由于情景分析所采用的污水厂是基于不同地方和不同处理工艺,考虑到区域差异和影响,因此归一化所采用的参考信息为全球数据。

## 2.8 结果解释方法

本研究中将识别产品系统（排放标准制定+城镇污水处理厂升级改造）的 LCI 和 LCIA 结果中的重要环节，评价产品系统的完整性、敏感性、一致性，同时得出结论、限制性因素，并提出合理化建议。

## 2.9 数据质量要求

### ① 时间要求

考虑到与遵循一级 B 污水处理厂的建设相关的标准 GB 8978-1996 于 1998 年开始实施，因此采集 1998 年以后的数据

### ② 地理要求

本研究范围为中国大陆地区

### ③ 技术要求

由于文献案例中对工程描述的侧重点与本文的 LCA 研究侧重点不尽相同，因此对于案例中缺乏的 LCA 研究所需信息，将基于设计手册、设计规范、文献资料等作出合理假设。污水处理厂构筑物设计、建造、运行相关的参考信息为：《给水排水设计手册》的第 5 册城镇排水、第 9 册专用机械、第 11 册常用设备；《污水处理厂工艺设计手册》<sup>[145]</sup>；《环境工程专业毕业设计指南》<sup>[146]</sup>；《市政工程投资估算指标》第四册排水；《给水排水工程概预算与经济评价手册》；《全国统一市政工程预算定额》的第一册通用项目、第六册排水工程。若上述资料缺乏所需信息，则参考：《给水排水设计手册》第 3 册城镇给水、《市政工程投资估算指标》第三册给水。

本研究涉及的计算机应用为 GaBi（LCA 建模），Anaconda（构筑物计算、数据分析、地理信息获取、算法程序设计），Microsoft Office（数据分析及计算）。

### ④ 数据代表性

子系统 1 的信息主要基于政府相关文件，子系统 2 参考国内现有工程案例案例的设计参数进行取值。

### ⑤ 数据一致性

建设阶段的材料消耗主要考虑混凝土、水泥、钢筋、砂、石。运行阶段处理构筑物温室气体排放主要考虑 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O。LCIA 对比分析主要考虑环境影响类别为 LCA 对比分析所考虑的环境影响类别为非生物资源消耗（Abiotic Depletion，ADP elements [kg Sb eq.]）、非生物化石燃料消耗（Abiotic Depletion，ADP fossil [MJ]）、酸化（Acidification Potential，AP[kg SO<sub>2</sub> eq.]）、富营养化（Eutrophication Potential，EP [kg Phosphate eq.]）、淡水生态毒性（Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.，FAETP inf. [kg DCB eq.]）、全球变暖（Global Warming

Potential, GWP 100 years [kg CO<sub>2</sub> eq.]、排除生物源碳的全球变暖 (Global Warming Potential , GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO<sub>2</sub> eq.] )、人类毒性 (Human Toxicity Potential , HTP inf. [kg DCB eq.] )、海洋生态毒性 (Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. , MAETP inf. [kg DCB eq.] )、臭氧层消耗 (Ozone Layer Depletion Potential , ODP, steady state [kg R11 eq.] )、光化学臭氧生成潜能 (Photochem. Ozone Creation Potential , POCP [kg Ethene eq.] )、陆地生态毒性 (Terrestrial Ecotoxicity Potential , TETP inf. [kg DCB eq.] )。

#### ⑥ 数据再重复性

本文主要数据来自政府相关文件、统计年鉴、以及公开发布的工程设计、投资估算资料，因此可再重现。

#### ⑦ 数据源

前景数据：政府相关文件、《关于公布 2014 年全国城镇污水处理设施名单的公告》、《中国城乡建设统计年鉴 2017》、以及前述第 3 点所提及的资料。

背景数据：GaBi Education 数据库、Ecoinvent 数据库

#### ⑧ 不确定性

排放标准制修订程序环境影响的不确定性 (会议次数、出行方式、参会人数)、准IV类污水处理厂升级改造不确定性。

## 2.10 假设

对于子系统 1，本研究假设子系统 1 制定过程中，相关活动的能源和物质消耗为定值，不随气候、温度、人为因素的变化而波动。子系统 2 假设在该标准实施后，对全国范围内部分现有污水处理厂基于该新排放标准进行提标升级改造，并新建部分污水厂。子系统 2 假设进出水水质、处理构筑物处理能力不随环境变化而波动，仅受污染物排放标准的制约。

## 2.11 价值选择和选择性要素

本研究主要基于国内数据进行取值，若现有国内资料无可获数据时，考虑采用其他国家、地区的数据或采用通用值。

## 3 清单分析

### 3.1 引言

LCA 清单分析方面, 数据获取渠道多样, 比如各类统计年鉴和报表、正式出版发行的文献、发表的相关论文中的实验室检测数据、环境数据资料、可行性研究及验收资料等。本文将子系统 1 的前景数据清单分析分为室内和室外活动, 其中室外活动涉及到对若干代表性污水处理设施进行实地调研的活动, 存在一定的交通能源消耗, 对于此, 本章考虑采用群体智能算法——蚁群优化作为该部分清单数据收集的方法, 先对其进行简要介绍, 再对本章清单分析展开全面论述。

### 3.2 室外活动清单数据收集——蚁群优化

#### 3.2.1 蚁群优化简介

群体智能的诞生是学者从昆虫和其他动物的社会行为中得到启发, 其以一种较为新颖方式解决问题<sup>[147]</sup>。群体智能算法是由简单的、通过自我组织进行合作的个体组成的, 即没有任何形式的中央控制。特别是蚂蚁种群, 其激发了许多方法和技术的发展, 其中研究最广且最成功的通用目标优化技术, 是称为蚁群优化 (Ant colony optimization, ACO)<sup>[148-150]</sup>。Deneubourg 等人<sup>[151]</sup>提出的解释蚂蚁觅食行为的模型是 ACO 发展的主要灵感来源。这些蚂蚁在地面上投放信息素, 以标记一些对其觅食有利的路径, 便于跟随其后的种群中其他成员寻求捷径进行觅食。蚁群优化利用了一种相似的机制求解优化问题。

在蚁群算法中, 许多人为假定的蚂蚁 (Artificial Ants, AA) 为优化问题构建解决方案, 并通过与真实世界中蚁群相似的通信方式交换关于这些解决方案的信息。迄今为止, 已经有不少的蚁群优化算法问世。90 年代早期, 第一个的 ACO 算法称为蚂蚁系统 (Ant System) 诞生<sup>[148]</sup>。

旅行销售商人问题 (Traveling Salesman Problem) 是通用 ACO 算法最众所周知的应用。在旅行销售商人问题中, 给定了一些城市, 每个城市之间的距离已知。其目标是找到最短的路线, 只允许每个城市被访问一次。在更正式的术语中, 目标是在一个全连通图上找到一个最小长度的哈密顿环。

在 ACO 中, 这个问题是通过模拟大量人为假定的蚂蚁 (AA) 在一个图形上移动来解决的, 这个图形本身根据这个问题的要求进行了编码, 即每个节点代表一个城市, 两个节点之间的连线 (每条边) 代表两个城市之间的一条连接。一个称为信息素 (Pheromone) 的变量与每条边相关联, AA 可以读取和修改它。ACO 是一种迭代算法。在每次迭代中, 都要考虑许多人为假定的蚂蚁。它们中的每一

个都通过在图上从一个节点走到另一个节点来构建一个解决方案，而且前提是不访问它此前已经访问过的节点。每一步长下解决方案的构建，以及一只蚂蚁选择随后访问的节点是以随机访问机制为依据，同时也受到信息素的影响：当一只 AA 处于某个顶点时，它将访问的下一个节点，同时将在此前未访问的节点集合中随机选择（参见图 3.1<sup>[152]</sup>）。具体而言，如果  $j$  顶点此前没有被访问过，它可以按照一定概率被选择，此概率与两个节点的连接  $(i, j)$  相关的信息素成正比。

在迭代结束时，根据蚂蚁构建的解的质量好坏，对信息素值进行修改，以便在之后的迭代中对其他蚂蚁产生影响，从而构建与之前构建的最优解相似的解。

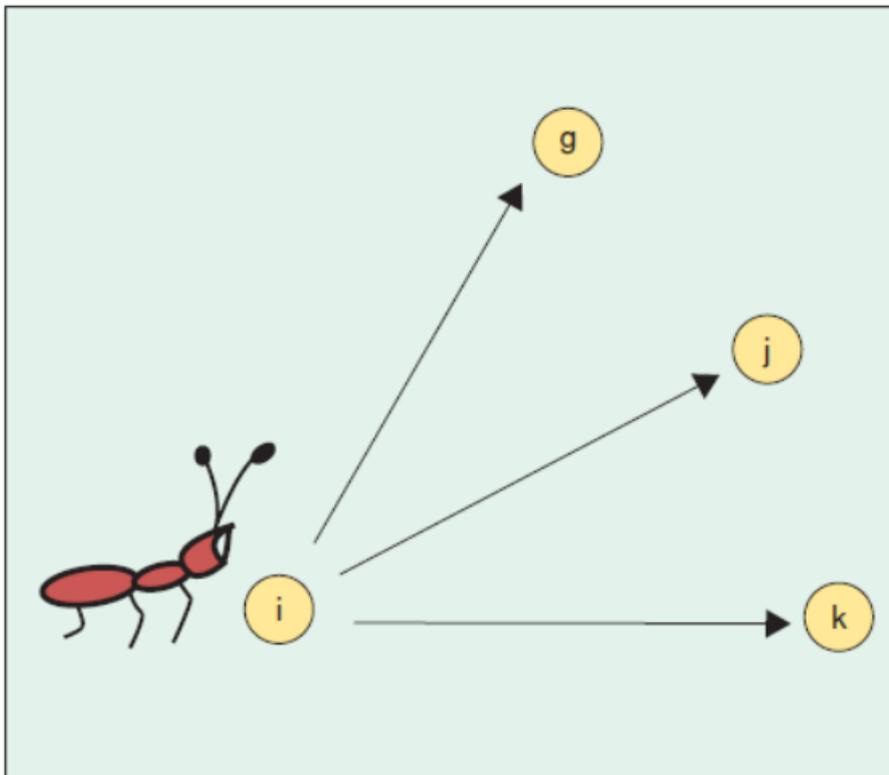


图 3.1 一只蚂蚁在城市  $i$  处通过随机机制选择下一个城市进行访问:如果城市  $j$  之前没有被访问过，可以以与两个城市的连接线  $(i, j)$  上的信息素相关的概率进行选择

Figure 3.1 An ant in city  $i$  chooses the next city to visit via a stochastic mechanism: if  $j$  has not been previously visited, it can be selected with a probability that is proportional to the pheromone associated with edge  $(i, j)$ .

### 3.2.2 蚁群优化元启发式算法

Dorigo 等人<sup>[153, 154]</sup>将 ACO 问题形式化为元启发式以解决组合优化问题。元启发式方法是一组算法概念，可用于定义适用于多种不同问题的启发式方法。换言之，元启发式是一种通用的算法框架，它可以应用于不同的优化问题，只需要稍

作修改。为了将蚁群算法应用于给定的组合优化问题，需要一个适当的模型。

一个组合优化问题的模型  $P = (S, \Omega, f)$  有以下元素组成：

- 一个搜索空间  $S$ ，其定义在一个离散决策变量  $X_i, i = 1, \dots, n$  的有限集上；
- 一个集合  $\Omega$ ，其由变量的约束条件组成；
- 一个目标方程  $f: S \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ ，使其达到最小

通用变量  $X_i$  从  $D_i \{v_i^1, \dots, v_i^{D_i}\}$  上取值。一个可行解  $s \in S$  是一个对满足所有  $\Omega$  中约束条件的变量的完整赋值。一个解  $s^* \in S$  被称为总体最优解，当且仅当： $f(s^*) \leq f(s) \forall s \in S$

组合优化问题模型用于定义 ACO 算法的信息素模型。一个信息素值与每一个可能的解决方案组件相关联；也就是说，与每一个可能的变量赋值相关联。在形式上，信息素值  $\tau_{ij}$  与解决方案组件  $c_{ij}$  相关联，由赋值  $X_i = v_i^j$  组成。所有可能的解决方案的集合用  $C$  表示。

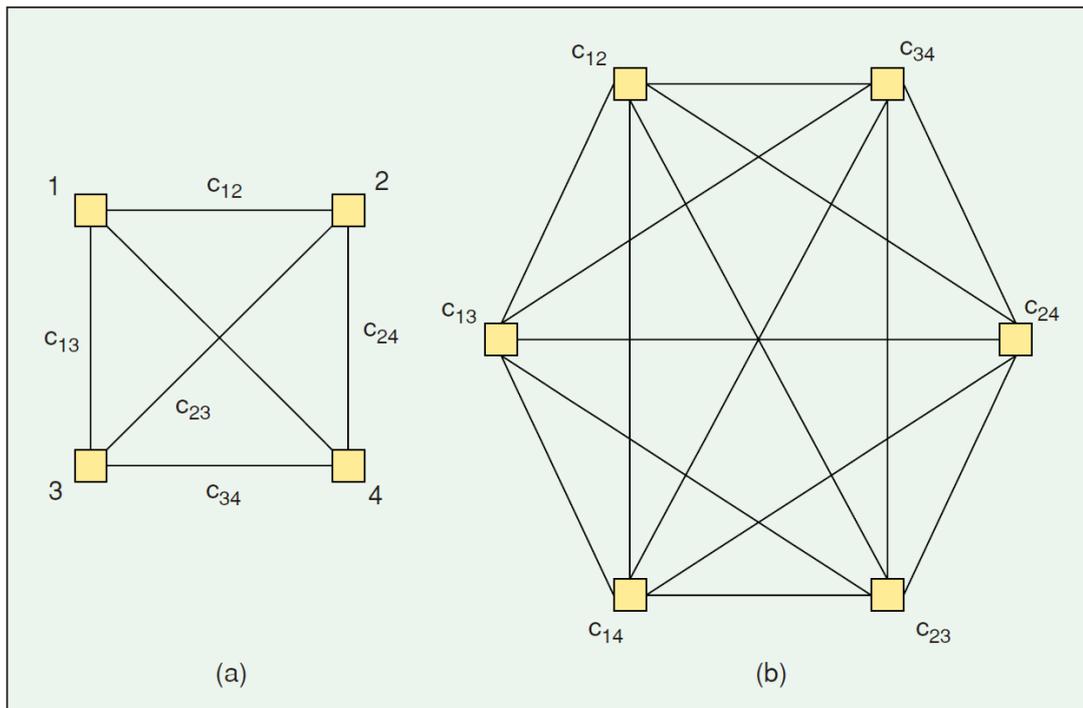


图 3.2 该例子为含四个城市 TSP 构造图，其中解决方案组件与 (a) 图的边或 (b) 图的顶点相关联

Figure 3.2 Example of possible construction graphs for a four-city TSP where components are associated with (a) the edges or with (b) the vertices of the graph.

在蚁群算法中，人工蚂蚁通过遍历完全连通构造图  $GC (V, E)$  来构建一个解，其中  $V$  是节点集合， $E$  是边集合。这个图可以通过两种方式从  $C$  集合中得到：用

节点或边来表示解。AA 沿着图中的边从一个节点移动到另一个节点，逐步构建一个局部解。此外，蚂蚁会分泌一定量的信息素投放到这些解上；也就是说，要么投在它们所经过的节点上，要么在它们所经过的边上。信息素的投放量  $\Delta \tau$  可能取决于发现的解决方案的质量。后续的 AA 利用信息素信息作为参考，在搜索空间中寻找理想的区域。

在旅行商人问题中，一个解决方案可以通过  $n$  个变量的一个集合来表示，其中  $n$  是城市的数量。其中的每一个变量都与一个城市相关。变量  $X_i$  表示在访问城市  $i$  后将访问的下一个城市。在此，解决方案组件是一些按照给定顺序被先后访问的城市配对：解决方案组件  $c_{ij} = (i, j)$  表明该解决方案规定城市  $j$  应在访问城市  $i$  之后被立即访问。在这种情况下，构建的图形是以城市为节点的原始的旅行商人问题图形，并且图形的各条边为解决方案组件（图 3.2 (a)）。因此，蚂蚁在图形的那些边上投放信息素。此外，构建图也可以通过将解决方案组件表示为节点，并在顶点上放置信息素来获得，但相比以前一种方法而言代表性较差（图 3.2 (b)）。图 3.2 是两种定义旅行推销员问题的方法示意图，该图中含有四个城市。

蚁群算法的元启发式算法如下所示。初始化之后，元启发式方法迭代分为三个阶段：在每次迭代，由一些蚂蚁构造若干个解决方案；然后通过本地搜索改进这些解决方案（这一步是可选要素），最后更新信息素。以下是对这三个阶段的更详细的描述：

#### ① 构造蚂蚁解决方案

一组  $m$  只人为假定的蚂蚁从一个可用的解决方案组件有限集的元素中构造解  $C = \{c_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, |D_i|\}$ 。解决方案的构造从一个空的局部解决方案  $s_p = \emptyset$  开始。在每个构造步骤，局部解决方案  $s_p$  的扩大是通过从集合  $N(s_p) \subseteq C$  中添加一个可行的解决方案组件，集合  $N(s_p) \subseteq C$  被定义为一个组件的集合，集合里面的这些组件可以被添加到当前的局部解决方案  $s_p$  中且不违背任何在  $\Omega$  集合中的约束条件。构造解决方案的过程可以看作是在构造图  $G_C = (V, E)$  上行走的过程。

从  $N(s_p)$  中选择解决方案组件是通过随机机制引导，这种机制因信息素及其相关的  $N(s_p)$  中各个元素而有偏差。随机选择解决方案组件的规则在不同的 ACO 算法中不同，但这些规则的灵感来源于真实蚂蚁的行为的模型方程见。Deneubourg 等人<sup>[151]</sup>建立了观察行为的模型：假设在给定时刻  $m_1$  蚂蚁使用了第 1 座桥， $m_2$  使用了第 2 座桥，蚂蚁选择第 1 座桥的概率  $p_1$  为：

$$p_1 = \frac{(m_1 + k)^h}{(m_1 + k)^h + (m_2 + k)^h} \quad (3-1)$$

其中参数  $k$  和  $h$  实验拟合数据，显然， $p_2 = 1 - p_1$ 。蒙特卡罗模拟结果表明， $k$

$\approx 20$  和  $h \approx 2$  的拟合度很好<sup>[155]</sup>。

### ② 采用本地搜索

一旦建立了解决方案，在更新信息素之前，通常会对蚂蚁通过局部搜索得到的解决方案进行改进。这个阶段，是具有高度问题特异性，是可选操作。

### ③ 更新信息素

信息素更新的目的是增加那些与较理想的解决方案相关的信息素值，减少与不理想的解决方案相关的信息素值。通常的做法是两个步骤：（1）通过信息素蒸发减少所有的信息素值，（2）通过增加与选定的一组令人满意的解决方案相关的信息素水平。

## 3.2.3 蚁群优化算法

蚂蚁系统（Ant System）是第一个 ACO 算法<sup>[149, 150, 156]</sup>。它的主要特征是在每次迭代中，构建了解决方案的  $m$  只蚂蚁都会更新信息素值。与城市  $i$  和城市  $j$  两个顶点的连线（可理解为连接两地的交通路线）相关的信息素  $\tau_{ij}$ ，以如下形式进行更新：

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}^k + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (3-2)$$

$\rho$  是信息素挥发速率， $m$  是蚂蚁的数目， $\Delta \tau_{ij}^k$  是第  $k$  只蚂蚁在连线  $(i, j)$  上投放的信息素

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{如果第 } k \text{ 只蚂蚁决定选择连线}(i, j), \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3-3)$$

$Q$  在此是常数， $L_k$  第  $k$  只蚂蚁旅行的距离。

在求解过程中，蚂蚁通过随机机制选择要访问的城市。当第  $k$  只蚂蚁在城市  $i$  处，并且已经构造了部分的解决方案  $s^p$ ，那么到城市  $j$  的概率为：

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{c_{il} \in N(s^p)} \tau_{il}^\alpha \cdot \eta_{il}^\beta}, & \text{如果 } c_{ij} \in N(s^p) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3-4)$$

其中  $N(s^p)$  为可行要素集合，即在连线  $(i, 1)$  中， $1$  节点是一个未被第  $k$  只蚂蚁访问的城市。参数  $\alpha$  和  $\beta$  控制信息素和启发式信息的相对重要性  $\eta_{ij}$ ， $\eta_{ij}$  是由一下公式进行构建的：

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (3-5)$$

其中  $d_{ij}$  是城市  $i$  和  $j$  之间的距离。

基于上述计算原理,考虑将多个与标准制修订相关的调研城市作为节点,城市间的连线作为边,应用ACO算法进行多次迭代,计算最小长度的哈密顿环,为后面章节LCA研究子系统1的清单分析提供前景数据获取方法。

### 3.2.4 蚁群优化在环境工程领域的应用

ACO在本世纪初期开始应用于排水工程方面。在污水处理厂研究方面,Schluter等人<sup>[157]</sup>将扩展的ACO用于对污水厂集成过程和控制系统的的设计。Rao等人<sup>[158]</sup>采用基于ACO的创新优化方法,结合ACO和反演模拟(Inverse Modelling),来反推实验室规模的固定床厌氧反应器的生物膜模型的动力学参数和膜厚参数。结果体现了数学模型的严谨性、动力学模型和膜厚模型的形式、以及生物膜工艺中用于准确地确定动力学和膜厚参数的填料类型,从而确保生物膜反应器模型可靠的预测性能。Verdaguer等人<sup>[159]</sup>提出了一种新的方法来解决具有高浓度工业废水输入的废水系统由于进水量和/或污染物负荷超出系统处理能力而造成的临时超载问题,使用一个组合优化过程与多个约束条件。其所采用的元启发式方法是ACO,该方法采用两种不同的算法和不同的信息素路径更新过程进行实现。结果表明,即使工业废水的污染物浓度有很大的波动的情况下,ACO的应用是可行的。

除了污水处理厂的应用外,ACO还应用于排水管网系统、低影响开发、初期雨水冲刷。Moeini等人<sup>[160]</sup>利用蚁群优化算法的增量解构建能力,对排水管网进行了有效的布局和管径优化。污水管网的布置和管道尺寸优化需要对管道位置、管径和管坡进行最优确定,这是一个高度约束的混合整数非线性规划(Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP)问题,对于现代启发式搜索方法是一种挑战。他们提出了一种基于树生长算法(Tree Growing Algorithm, TGA)的污水管网ACO算法,用于同时确定管网的布置和管径。该方法基于一个假设,即包含所有可能的网络链接的基本布局是可用的。TGA算法以增量的方式从基本布局中构造可行的树状布局,而约束的ACO算法用于优化确定所构造布局的覆盖深度。在暴雨期间,合流污水处理系统的初期雨水冲刷效应往往导致污水处理的溢流和超载,从而降低了污水处理的效率,并且其所产生的污染物致使受纳水体水质质量变差。使用雨水收集池是减轻这种影响的一种广泛使用的方法。然而,当这些收集池排空时,其污染物负荷的管理存在困难。Verdaguer等人<sup>[161]</sup>针对污水处理的特点,提出了一种实时满足处理要求的新方法。该方法是基于ACO,以获得一个较理想的顺序排放雨水的雨水收集池。排放水的顺序考虑了雨水的体积及其污染物的浓度,包括悬浮固体、生物需氧量和化学需氧量、总氮和总磷。蚁群优化算法成功地应用于一个案例研究,全面减少了雨水收集池中污染物负荷。该算法适用于不同的场景、基础设施和下水道系统的控制器。确定低影响开发(LID)设施的规模、类型和位置是LID实践的基础,Hou等人<sup>[162]</sup>首先利用地理信息系统技术计算当地可

利用雨水量,从得到 LID 设施尺寸。然后计算不同土地利用类型的可利用雨水量,根据潜在的设施的性能确定 LID 设施的类型。然后,使用 p-中值模型和蚁群算法获得 LID 设施的空间最优位置。对主要的径流污染物(如悬浮固体、总磷、COD<sub>Cr</sub>和氨氮)进行采样、插值、归一化和空间覆盖,以确定严重污染区域并调整 LID 设施进行雨水净化。他们的研究还将蚁群算法的性能与遗传算法进行了比较。科学地确定 LID 实践的规模、类型和位置可以有效地指导从业者和利益相关者构建 LID。

在生命周期评价研究方面,由于交通运输是环境废气排放的来源之一,ACO 的研究关注如何获得最优路线或趋于最优路线。水运方面,Gue 等人<sup>[163]</sup>在对生物燃料进行生命周期评价的过程中,提出一种蚁群最优化方法来确定菲律宾不同港口之间的最佳路径,以减少运输生物燃料所用船舶的行驶距离,降低运输过程中的能源消耗和环境影响。陆地运输方面,在城市中,很大一部分空气污染来自公路运输。更短的运输距离和更少的燃料消耗从逻辑上讲会导致更少的温室气体或颗粒物的排放,从而减轻环境负担,适当选择交通运输的逻辑序列可能对环境有很大的影响。然而,通常情况下城市中取货和送货服务的物流顺序通常是根据决策者的经验和直觉判断来确定的。因此,Ng 等人<sup>[164]</sup>尝试将简化的 LCA 与蚁群优化算法相结合,支持同时评估多个决策标准,并确定最优或近似最优的车辆路径选择顺序。除了交通运输方面的优化,ACO 还应用于绿色产品的生命周期评价。生态设计策略(ecodesign strategies)为发展绿色产品提供总体设计方向。目前被采用的策略如选择生态材料、减少包装尺寸、优化能源使用、或取消有毒物质的使用,决策者可能会使用一些定性生态设计技术来评估他们的设计,以进一步提高他们的设计的环保性能。LCA 是一种公认的定量评价产品环境影响的方法。LCA 的结果在某种程度上,可以帮助设计师了解他们的设计选择所产生的潜在环境影响。然而,关于如何重新设计他们的产品以进一步减少对环境影响,能够提供的信息非常有限。因此,Ng<sup>[165]</sup>提出了一种方法,以寻求最佳的产品组装顺序,以降低整体环境的影响。他用一个简化的 LCA 来量化设计方案的环境影响,并在此基础上利用蚁群算法识别出环境影响值最低的装配序列。

基于蚁群算法在 LCA 中应用潜力,本文尝试采用该方法,为评价污染物排放标准制定活动的生命周期环境影响采集交通运输方面的清单数据。

### 3.3 子系统 1 清单分析

子系统 1 清单数据涉及排放标准制定生命周期的输入输出,如 2.5.1 节所述,子系统 1 的生命周期时间期限定为 10 年。

标准制定活动过程中所产生的环境影响主要来源于室内活动(如编制工作、

技术审查会、专题技术研讨会、标准的宣传和培训、学术研讨会、环境从业人员相关工作等), 以及因制修订工作的需要的室外活动(如实地调研)和与会者参加会议所产生的能源和物质消耗。

### 3.3.1 室内活动前景数据清单分析

对于室内活动而言, 涉及到的人群主要包括政府相关部门、编制组工作人员、环保专家、环境行业从业人员等, 涉及的活动包括准IV类标准制修订的日常办公、技术审查会及专题研讨会、准IV类标准宣传培训班、以及围绕准IV标准召开的学术研讨会等。

对于编制组工作人员日常办公, 建筑能耗为建筑使用过程中由外部输入的能源, 包括建筑环境的用能(如供暖、制冷、通风、空调和照明等)和各类建筑内活动如办公、家电、电梯、生活热水等的用能。办公活动前景数据清单分析参考《办公建筑设计规范》(JGJ67-2006)和《民用建筑能耗标准》(GBT 51161-2016), 根据编制组所在单位办公人员情况(基准值: 700 人)确定所需办公总面积(每人办公面积按  $5 \text{ m}^2$ ), 建筑能耗设计定为  $50 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ ; 水耗按照《建筑给水排水设计标准》(GB50015-2019)办公楼用水定额  $50 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{班} \cdot \text{d})$ ; 纸张消耗按  $1131 \text{ 张 A4 纸}/(\text{人} \cdot \text{a})$  [166], A4 纸为  $4.37 \text{ g}/\text{张}$ 。

对于准IV类标准制修订的技术审查会及专题研讨会(参会人数约 20 人 [167]), 会议室规模根据《办公建筑设计规范》(JGJ67-2006), 小、中型会议室分别为  $30 \text{ m}^2$ 、 $60 \text{ m}^2$ (后者作为基准值)计算, 会议次数按 20 次考虑。对于准IV标准宣传培训班(参会人数约 90~120(后者作为基准值)人 [168, 169]), 培训教室根据《中小学校建筑设计规范》(GBJ 99-86)按合班教室设计确定为  $234 \text{ m}^2$ , 培训次数参考住建部其他类似的政策发布前举办的宣贯培训班 [170], 定为 11 次(其中初次发布前举办 5 期; 发布后假设对标准进行 2 次修订, 每次修订举办 3 期培训), 培训班一般为期 2 天, 每天培训时间按 8h 确定。技术审查会、专题研讨会、宣传培训班所需纸本材料取  $16000 \text{ g}$  再生纸/次会议(2h/次会议) [105], 建筑能耗设计定为  $50 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a} \approx 0.006 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{h}$ 。对于环保从业人员, 据国家统计局数据获悉 2018 年约为 353.2 万人, 假设其每周约 5h 从事与准IV类标准相关的工作(主要为电脑的使用)。

表 3.1 编制组工作人员、技术审查会及专题研讨会、准IV类标准培训会、环保从业人员生命周期清单分析

Table 3.1 Life Cycle Inventory of policy makers

活动	说明	数值	单位
编制组工作人员日常办公活动输入	能耗	175000	kWh/a
	水耗	12775	m <sup>3</sup> /a
	纸张	3459.73	kg/a
编制组工作人员日常办公活动输入	COD	7154	kg/a
	BOD <sub>5</sub>	14563.5	kg/a
	SS	10986.5	kg/a
	TN	4066	kg/a
	TP	306.6	kg/a
技术审查会及专题研讨会	能耗, 参会人数: 20 人, 会议室规模: 中型(60m <sup>2</sup> ), 会议次数: 20 次	12	kWh
	纸张	320	kg
技术标准培训会	能耗, 参会人数: 120 人, 培训教室面积: 234 m <sup>2</sup> , 会议次数: 11 次 (16h/次)	205.92	kWh
	纸张	176	kg
环保从业人员从事与准IV类标准相关工作	电脑使用, 145W	4E+9	kWh

对于学术研讨会室内活动而言, 涉及到会议的筹备 (包括组委会工作、网页维护、会务工作、材料) 及执行 (包括会场能耗、酒店住宿) [105, 122], 清单分析见下表。参照某会务网站上关于海绵城市相关会议的举办情况 [171], 从 2015 年~2020 年共举办 38 场大型会议, 因此假设每年 8 场会议, 共举办 5 年。见表 3.2~表 3.7

表 3.2 学术研讨会永久组委会生命周期清单分析

Table 3.2 Life Cycle Inventory for the permanent conference committee of academic conference.

活动	说明	数值 <sup>[122]</sup>	单位
电脑使用	手提电脑, 68% 工作模式	112.00	h
	手提电脑, 23% 工作模式	112.00	h
	手提电脑, 待机/睡眠模式	112.00	h
印刷材料	纸, 再生	1.05	kg

活动	说明	数值 <sup>[122]</sup>	单位
	印刷机运行, 镭射, 黑白印刷	1.05	kg
纸质废弃物	废弃纸张	1.05	kg
酒店住宿	电能消耗	198.14	kWh
	热能消耗 <sup>①</sup>	464.63	kWh
	生活用水/污水排放	3906.00	l
	产生废弃物/垃圾	14.00	kg

表 3.3 学术研讨会地方组委会生命周期清单分析

Table 3.3 Life Cycle Inventory for the local conference committee of academic conference

活动	说明	数值 <sup>[122]</sup>	单位
电脑使用	手提电脑, 68% 工作模式	160.00	h
	手提电脑, 23% 工作模式	160.00	h
	手提电脑, 待机/睡眠模式	160.00	h
印刷材料, 摘要审核过程	纸, 再生	5.63	kg
	印刷机运行, 镭射, 黑白印刷	5.63	kg
印刷材料, 会议	纸, 再生	2.40	kg
	印刷机运行, 镭射, 黑白印刷	2.40	kg
纸质废弃物	废弃纸张	8.03	kg

<sup>①</sup> 热能消耗: 取决于学术研讨会举办的地区和季节。若为北方且为冬季, 则考虑供热消耗; 否则不考虑供热。

表 3.4 学术研讨会会务工作及网络维护生命周期清单分析

Table 3.4 Life Cycle Assessment for the secretariat and webside maintenance of academic conference

活动	说明	数值 <sup>[105]</sup>	单位
会务工作	电脑使用, 电脑功率 145W	832	h
	打印机使用, 打印机功率 28W (待机模式)	416	h
网络维护	电脑使用, 电脑功率 145W	500	h

表 3.5 学术研讨会会议材料生命周期清单分析

Table 3.5 Life Cycle Inventory for the conference materials of academic conference

活动	说明	数值 <sup>[122]</sup>	单位
会议议程	纸张, 光面	386.39	kg
	印刷机运行, 镭射, 彩色印刷	386.39	kg
论文集	纸张, 光面	3407.29	kg
	印刷机运行, 镭射, 彩色印刷	3407.29	kg
环保袋	黄麻织物生产	79.69	kg

表 3.6 学术研讨会会议室生命周期清单

Table 3.6 Life Cycle Inventory of conference meeting rooms of academic conference

活动	说明	数值 <sup>[122]</sup>	单位
电能消耗		25163.75	kWh
热能消耗 <sup>①</sup>		5816.88	kWh

<sup>①</sup> 热能消耗: 取决于学术研讨会举办的地区和季节。若为北方且为冬季, 则考虑供热消耗; 否则不考虑供热。

表 3.7 与会者住宿生命周期清单

Table 3.7 Life Cycle Inventory of overnight stay of participants

活动	数值 <sup>[122]</sup>	单位
电能消耗	41131.25	kWh/night
热能消耗	96451.25	kWh/night
水耗/污水处理	810843.75	l/night
废弃物	2906.25	kg/night

### 3.3.2 室外活动前景数据清单分析

#### ① 实地调研

对于办公区外的实地调研活动，参照 2015 年的《城镇污水处理厂污染物排放标准》（征求意见稿）的编制说明，编制组赴工业园区（综合型和行业型涵盖电镀园区、纺织园区、制革园区等），以及实地调研了全国范围内多个省市地区的城镇污水处理厂（上海、浙江、河北、天津、辽宁、山东、广东、重庆等）。与此同时，开展 15 家典型污水处理厂实测分析。因此该部分前景数据分析，涉及到基于地理信息的路径优化问题，因此该部分考虑采用 ACO。

具体步骤如下：

- 1) 数据收集，通过百度地图开放平台拾取调研目的地城市的地理位置信息（假定调研城市为北京、石家庄、天津、上海、杭州、武汉、长沙、广州、南宁、重庆、贵阳、西安、兰州、沈阳、呼和浩特）；
- 2) 数据预处理，ArcGIS 进行坐标系转化，初始地理坐标系：中国国测局地理坐标（GCJ-02），转化后投影坐标系：Krasovsky\_1940\_Albers；
- 3) 计算调研区之间的地理距离矩阵；
- 4) ACO 程序设计及最优路径生成，通过 Python 3.7 进行程序设计，ACO 经过 500 次迭代得出调研活动最优路径及距离，最终确定调研交通所产生的能耗前景数据，假定调研组工作人员为 20 人。

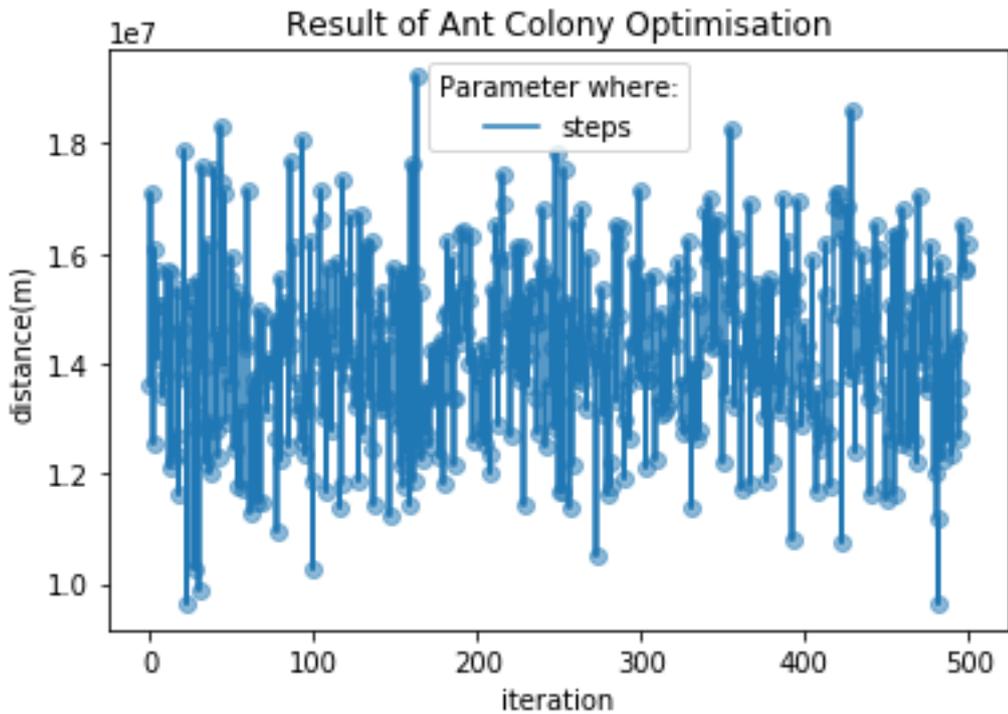


图 3.3 蚁群算法路线优化计算结果 ( $m=2$ ,  $\alpha=1$ ,  $\beta=1$ ,  $\rho=0.95$ )

Figure 3.3 Result of Ant Colony Optimisation ( $m=2$ ,  $\alpha=1$ ,  $\beta=1$ ,  $\rho=0.95$ )

## ② 相关单位赴外地参加学术研讨会

参考“2019年中国污水处理厂提标改造（污水处理提质增效）高级研讨会”<sup>[172]</sup>由于缺乏主办方的确切数据，因此本文根据该网站所列出的参会单位估计全国各地的参会人员比例，总人数假定为1000人。各地参会人员估计情况汇总如图3.4<sup>[172]</sup>所示。考虑到某些单位存在多个分属机构，因此本文假定这些单位的参会人员都来自对应单位的总部所在地。分析可知，与会单位中参会人数最多的前三位是北京（约16%）、上海（约9.5%）、天津（约9%）。

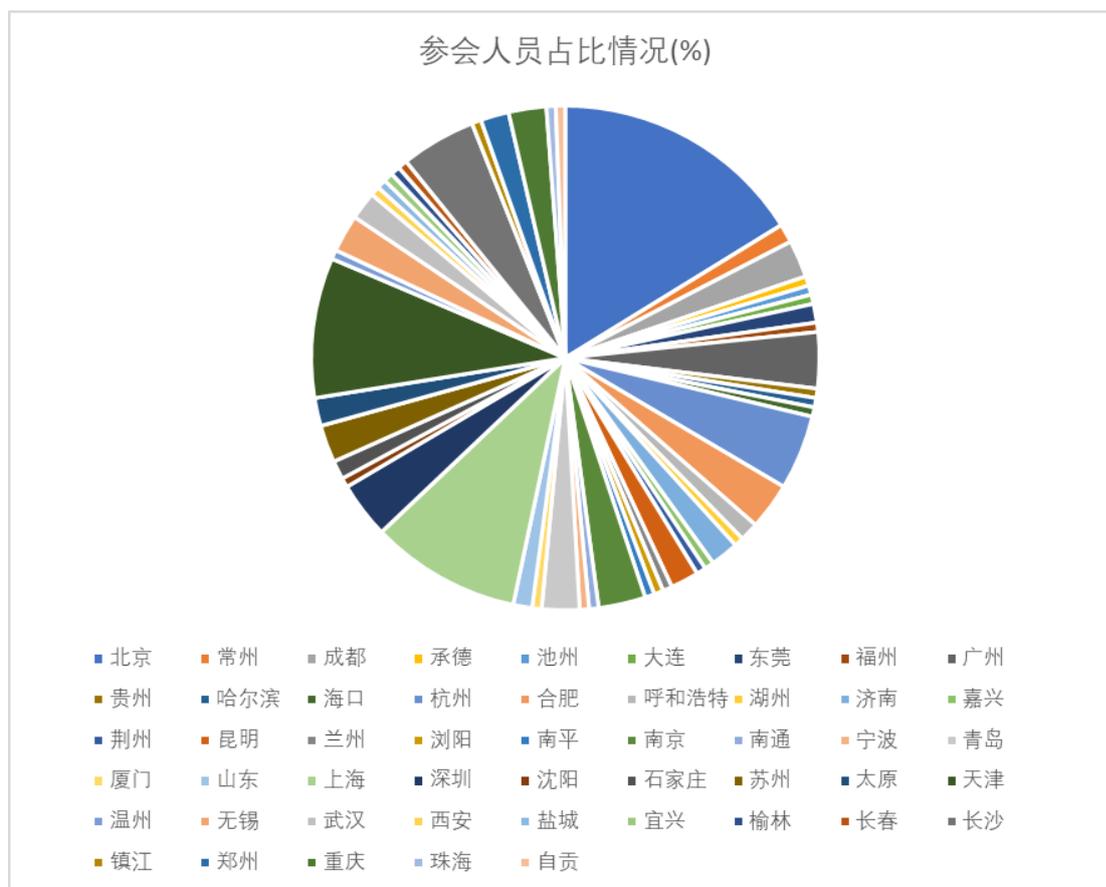


图 3.4 研讨会参会人员占比情况

Figure 3.4 The proportion of seminar participants

出行所采用的交通工具考虑为飞机、火车（包括高速和普通火车）、汽车。各地位置信息从百度地图开放平台中获取，由于基于交通路线的距离数据不可获，因此运输距离只考虑从出发城市到目的地城市的直线距离，不考虑线路不同所带来的距离上的差异，清单数据获取方法参考本节①小点的 1)~3)。与此同时，不考虑与会人员从住所到机场、火车站、车站的距离，由于不确定性较大<sup>[122]</sup>。考虑到出行便利性，假定出发城市距离目的地城市距离 $\leq 200\text{km}$ 的与会者采用火车或汽车的出行方式（假定选择两种方式各占 50%），距离 $> 200\text{km}$ 的与会者采用飞机或火车的出行方式（假定选择两种方式各占 50%）<sup>[122]</sup>。

表 3.8 参会人员出行情况 (往返)

类别	总运输距离 (pkm)	飞机 (pkm)	火车 (pkm)	汽车 (pkm)	说明
>200km	1651501.90	825750.95	825750.95		50%飞机,50%火车 (高速)
≤200km	60302.36		30151.18	30151.18	50%火车,50%汽车 (普通)

表 3.9 实地调研和与会人员产生的交通输入清单

活动	说明	数值	单位
室外活动能耗	实地调研, 交通 (飞机)	9257	km/次
	参加学术研讨会, 交通 (飞机)	825750.95	pkm/次
	参加学术研讨会, 交通 (高速火车)	825750.95	pkm/次
	参加学术研讨会, 交通 (普通火车)	30151.18	pkm/次
	参加学术研讨会, 交通 (汽车)	30151.18	pkm/次

表 3.10 子系统 1 背景数据清单数据

应用情况	数据来源	名称
室内	GaBi ts Education Database	CN: Electricity grid mix (production mix) ts <Mfg>
	Ecoinvent	EU-28: Tap water from surface water ts
	Ecoinvent	EU-28: Heat ts
	Ecoinvent	paper production, woodfree, coated, at integrated mill <u-so>
室外	Ecoinvent	transport, passenger, aircraft, intercontinental
	Ecoinvent	transport, passenger train, high-speed
	Ecoinvent	transport, passenger train
能源消耗	Ecoinvent	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5
	Ecoinvent	CN: Petroleum coke at refinery ts
	Ecoinvent	CN: Natural gas mix ts
	Ecoinvent	CN: Kerosene / Jet A1 at refinery ts

应用情况	数据来源	名称
	Ecoinvent	CN: Diesel mix at refinery ts
	Ecoinvent	CN: Electricity grid mix (production mix) ts <Mfg>

### 3.4 子系统 2 清单分析

该子系统清单分析基于污水处理厂系统边界内主要处理构筑物的建设和改造情况确定前景清单数据，建筑材料消耗参考《市政工程投资估算指标》第四册排水；《给水排水工程概预算与经济评价手册》；《全国统一市政工程预算定额》的第一册通用项目、第六册排水工程。若上述资料缺乏所需信息，则参考《市政工程投资估算指标》第三册给水。

### 3.4.1 建设阶段前景数据清单分析

建设阶段前景数据分析考虑建设（包括新建和改扩建）的物质消耗，主要考虑混凝土、水泥、钢材、锯材、中砂和碎石。三个情景案例的前景数据清单分析如下。根据 2.5.2 节污水厂实施情况得到的前景清单数据见表 3.11。

表 3.11 污水厂提标改造建设阶段主要构筑物清单分析

Table 3.11 Life Cycle Inventory Analysis of Main Structures in Construction Phase of Wastewater Treatment Plant

	细格栅									
	曝气沉砂池	初沉池	改良 Bardenpho 生化池	二沉池	回流污泥及剩余污泥泵房	二泵房	混凝沉淀池	深床滤池	加氯接触池	
数量	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1
商品混凝土 C30 (m <sup>3</sup> )	4230.21	1404.72	5019.46	2941.55	626.74	530.18		3021.98	3021.22	
水泥 (综合) (t)	75.60	163.33	0.01	0.06	30.73	19.11	1231.93	97.95	91.63	
钢材 (t)	505.58	179.09	705.36	361.00	59.97	60.69	622.98	396.75	420.34	
锯材 (t)	14.59	8.92	20.13	18.87		0.77	19.42	12.78	9.79	
中砂/砂 (t)	250.96	323.57	294.01	252.66		109.14	2371.91	686.37	301.78	
碎 (砾) 石 (t)	341.50	550.51				32.05	5054.99	446.43	417.63	

### 3.4.2 建设阶段背景数据清单分析

背景数据清单主要采用 GaBi ts 教育版数据库（Education Database）以及部分采用 Ecoinvent 的数据条。采用的背景数据具体情况如表 3.12 所示。

表 3.12 污水厂提标改造建设阶段背景数据使用情况

Table 3.12 Background data used in WWTP Construction Phase

应用情况	数据来源	名称
商品混凝土 C30	GaBi ts Education Database	Concrete C30/37 (Ready-mix concrete)
水泥（综合）	GaBi ts Education Database	Portland cement, at plant
钢材	GaBi ts Education Database	Steel rebar
锯材	GaBi ts Education Database	Timber pine (40% H2O content)
中砂/砂	GaBi ts Education Database	Sand 0/2
碎（砾）石	GaBi ts Education Database	Gravel 2/32

### 3.4.3 运行阶段前景数据清单分析

子系统 2 运行阶段输入的能源与物质按照一级、二级、三级处理进行分配，其中一级处理包括格栅、沉砂池、初级沉淀池、一级强化处理；二级处理包括生化处理单元、二沉池；深度处理包括混凝沉淀、过滤等工艺<sup>[144]</sup>，二泵房（中间提升泵房）产生的能耗归为深度处理。此外，若污水厂不涉及深度处理，则污水消毒处理单元的能源和物耗包含在二级处理中，否则，包含在深度处理中。涉及到污水出厂内多条处理支路共用一座处理构筑物的情况时，则该处理构筑物所产生的能耗物耗按照对应支路的生物处理单元设计规模进行能耗和物耗分配。电能的计算根据处理构筑物的主要设备耗能及其工作时间计算得出，见 2.5.2 节。

污水厂升级改造后的工艺中投药量，二级处理分别为  $\text{FeCl}_3 = 24\text{mg/L}^{[93]}$ 、甲醇 =  $0.014 \text{ kg/d.m}^{3[93]}$ ；三级处理分别为甲醇 =  $3.2\text{kg/kgNO}_3\text{-N}^{[144]}$ 、 $\text{PAC}=38.5\text{gPAC/去除 gTP}^{[174]}$ 、氯气 =  $10\text{mg/L}^{[144]}$ 。升级后二级处理构筑物 Bardenpho 的温室气体排放量分别为  $\text{CO}_2=4.429 \text{ kg CO}_2/\text{kg BOD}$ 、 $\text{CH}_4=0.045\text{kg CH}_4/\text{kg BOD}$ 、 $\text{N}_2\text{O}=0.097 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{kg TN}^{[175]}$ 。

表 3.13 污水厂升级改造后运行阶段输入输出清单分析

Table 3.13 Input Life Cycle Inventory Analysis of Wastewater Treatment Plant after Upgrading and Reconstruction in Operation Phase

	单位	进水口	一级处理	二级处理	三级处理	尾水排放
	COD	kg/d	31200			
	BOD5	kg/d	14400			
	SS	kg/d	15060			
输入	NH3-N	kg/d	1740			
	TN	kg/d	2100			
	TP	kg/d	402			
	电能	kWh/d	5808	9504	8131	
	$\text{FeCl}_3$	kg/d		1440.00 <sup>[93]</sup>		

	单位	进水口	一级处理	二级处理	三级处理	尾水排放
	甲醇	kg/d		853.20 <sup>[93]</sup>	1344.00 <sup>[144]</sup>	
	PAC	kg/d			773.85 <sup>[174]</sup>	
	氯气	kg/d			600.00 <sup>[144]</sup>	
	COD	kg/d				3000
	BOD <sub>5</sub>	kg/d				360
	SS	kg/d				300
	NH <sub>3</sub> -N	kg/d				90
输出	TN	kg/d				600
	TP	kg/d				18
	CO <sub>2</sub>	kg/d		2232.09 <sup>[175]</sup>		
	CH <sub>4</sub>	kg/d		22.61 <sup>[175]</sup>		
	N <sub>2</sub> O	kg/d		40.72 <sup>[175]</sup>		

### 3.4.4 运行阶段背景数据清单分析

背景数据清单主要采用 GaBi ts 教育版数据库（Education Database）以及部分采用 Ecoinvent 的数据条。采用的背景数据具体情况如表 3.14 所示。

表 3.14 运行阶段背景数据使用情况

Table 3.14 Background Data used in WWTP Operation Phase

应用情况	数据来源	名称	类型
电能	GaBi ts Education Database	Electricity grid mix (production mix)	Plan
FeCl <sub>3</sub>	ecoinvent	iron (III) chloride production, without water, in 12% iron solution state	Process
甲醇	GaBi ts Education Database	RNA: Methanol, at plant USLCI <u-so>	Process
PAC	INCOPA <sup>[177]</sup>	Polyaluminium chloride production	Process
氯气	GaBi ts Education Database	Chlorine	Process



## 4 影响评价

### 4.1 引言

本研究采用莱顿大学(Leiden University)环境科学中心(Centre of Environment Science) CML 方法用于量化环境影响潜能值<sup>[85, 140]</sup>。非生物资源消耗(Abiotic Depletion, ADP elements [kg Sb eq.])、非生物化石燃料消耗(Abiotic Depletion, ADP fossil [MJ])、酸化(Acidification Potential, AP[kg SO<sub>2</sub> eq.])、富营养化(Eutrophication Potential, EP [kg Phosphate eq.])、淡水生态毒性(Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot., FAETP inf. [kg DCB eq.])、全球变暖(Global Warming Potential, GWP 100 years [kg CO<sub>2</sub> eq.])、排除生物源碳的全球变暖(Global Warming Potential, GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO<sub>2</sub> eq.])、人类毒性(Human Toxicity Potential, HTP inf. [kg DCB eq.])、海洋生态毒性(Marine Aquatic Ecotoxicity Pot., MAETP inf. [kg DCB eq.])、臭氧层消耗(Ozone Layer Depletion Potential, ODP, steady state [kg R11 eq.])、光化学臭氧生成潜能(Photochem. Ozone Creation Potential, POCP [kg Ethene eq.])、陆地生态毒性(Terrestrial Ecotoxicity Potential, TETP inf. [kg DCB eq.])。

本研究根据 ISO 14044 的要求,考虑在 LCIA 环节将 LCI 结果分配到以上的影响类别(Classification, 归类),以及计算影响类别指标结果(Characterisation, 特征化),这是强制性要求。同时考虑进行该标准中所指明的其中一种可选择性要素,即对影响类别指标结果采用参考信息计算指标量级(Normalisation, 归一化),由于 GaBi Education 软件中内置归一化参考量缺乏中国数据,因此本文所采用的参考量为 1 年的全球影响量(2000 年)。标准化的影响指标结果是无量纲,可以比较不同的影响类别的相对性影响程度<sup>[178]</sup>。

### 4.2 子系统 1 生命周期影响评价

子系统 1 的 LCIA 包括排放标准制定生命周期内所产生的环境影响分析,从学术会议室内活动、调研及与会产生的交通能耗、标准编制人员日常室内办公活动、以技术审查、专题研讨、培训班和环保从业人员的相关工作的室内活动四个方面进行分析。由于各个环境影响类别在数值上量级相差较大,因此采用对数坐标系画图,对于影响潜能值为负值的个别数据,参看特征化和归一化表格。

从特征化结果分析可知,MAETP 是造成环境影响的主要原因,其次是 ADP fossil,其中技术审查、专题研讨和培训班室内活动、以及环境从业人员从事与准 IV 类标准相关工作的过程中对此影响类别贡献较多,两个对应类别的潜能值分别

约为  $6.33\text{E}+11$  kg DCB eq.和  $3.35\text{E}+10$  MJ, 主要是由于从业人员较多、环境足迹基数较大导致。子系统 1 产生的 ODP, steady state 和 ADP elements 相对较小, 最小值分别对应为学术会议相关的室内活动  $8.82\text{E}-09$  kg R11 eq.、编制人员日常工作室室内活动  $2.67\text{E}-01$  kg Sb eq.。特征化结果如图 4.1 和表 4.1 所示。归一化结果反映的是各个影响类别的重要性程度, 其为无量纲, 其结果和特征化结果类似, 见图 4.2 和表 4.2。

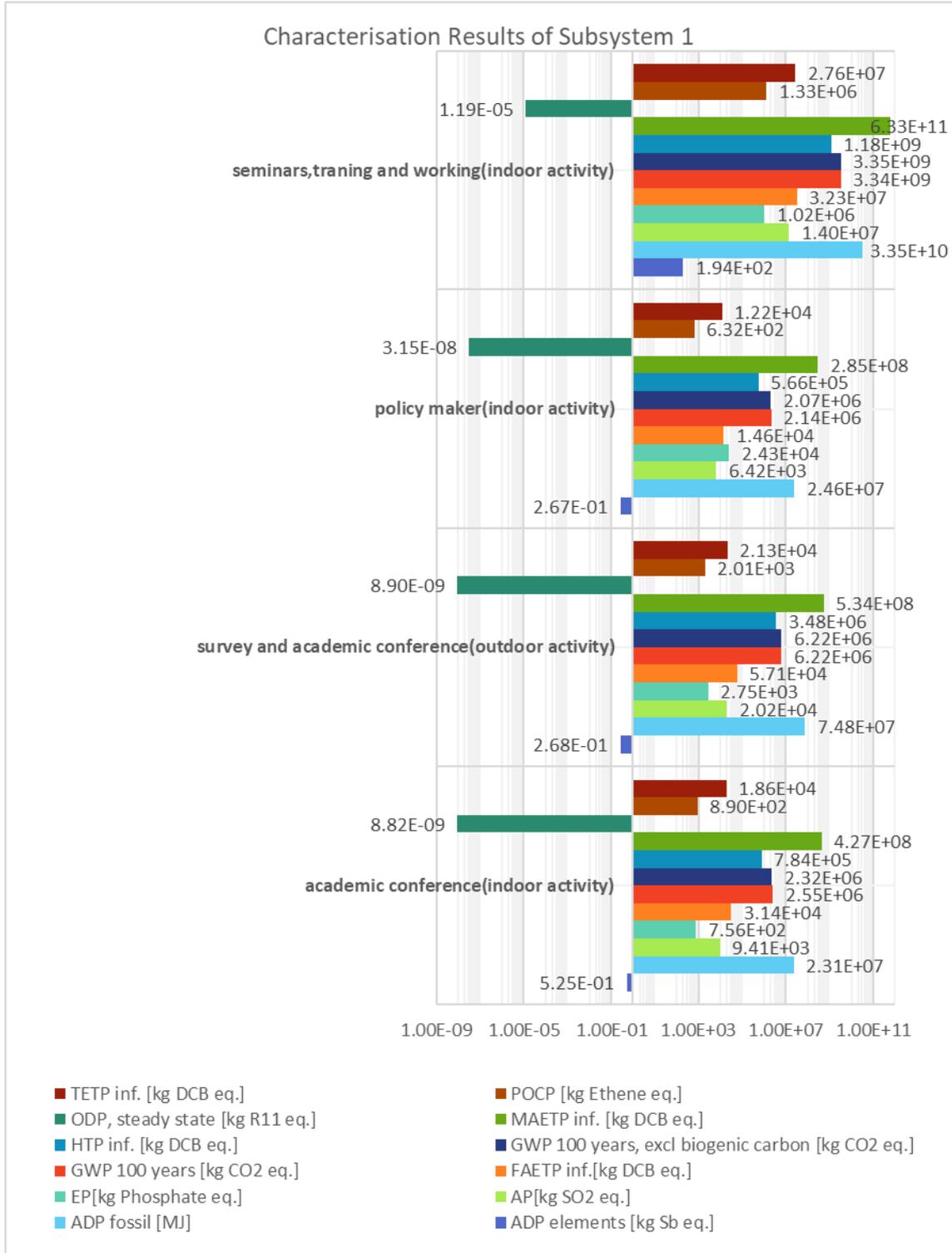


图 4.1 子系统 1 特征化结果

Figure 4.1 Characterisation Results of Subsystem 1

表 4.1 子系统 1 特征化结果

Table 4.1 Characterisation Results of Subsystem 1

	academic conference(ind oor activity)	survey and academic conference(outdoor activity)	policy maker(indo or activity)	seminars,training and working(indoor activity)
ADP elements [kg Sb eq.]	5.25E-01	2.68E-01	2.67E-01	1.94E+02
ADP fossil [MJ]	2.31E+07	7.48E+07	2.46E+07	3.35E+10
AP[kg SO <sub>2</sub> eq.]	9.41E+03	2.02E+04	6.42E+03	1.40E+07
EP[kg Phosphate eq.]	7.56E+02	2.75E+03	2.43E+04	1.02E+06
FAETP inf.[kg DCB eq.]	3.14E+04	5.71E+04	1.46E+04	3.23E+07
GWP 100 years [kg CO <sub>2</sub> eq.]	2.55E+06	6.22E+06	2.14E+06	3.34E+09
GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO <sub>2</sub> eq.]	2.32E+06	6.22E+06	2.07E+06	3.35E+09
HTP inf. [kg DCB eq.]	7.84E+05	3.48E+06	5.66E+05	1.18E+09
MAETP inf. [kg DCB eq.]	4.27E+08	5.34E+08	2.85E+08	6.33E+11
ODP, steady state [kg R11 eq.]	8.82E-09	8.90E-09	3.15E-08	1.19E-05
POCP [kg Ethene eq.]	8.90E+02	2.01E+03	6.32E+02	1.33E+06
TETP inf. [kg DCB eq.]	1.86E+04	2.13E+04	1.22E+04	2.76E+07

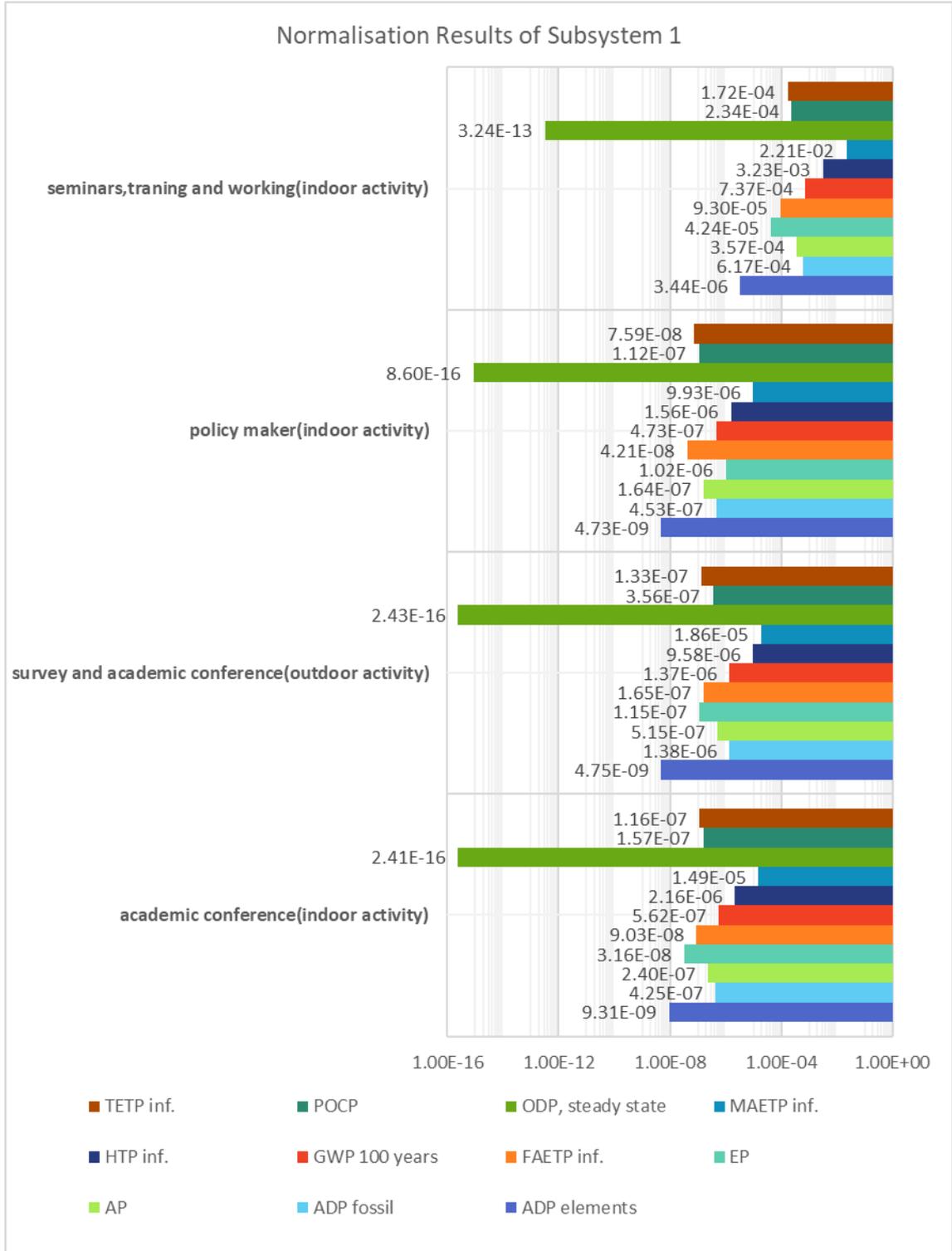


图 4.2 子系统 1 归一化结果

Figure 4.2 Normalisation Results of Subsystem 1

表 4.2 子系统 1 归一化结果

Table 4.2 Normalisation Results of Subsystem 1

	academic conference(indoor activity)	survey and academic conference(outdoor activity)	policy maker(indoor activity)	seminars,training and working(indoor activity)
ADP elements	9.31E-09	4.75E-09	4.73E-09	3.44E-06
ADP fossil	4.25E-07	1.38E-06	4.53E-07	6.17E-04
AP	2.40E-07	5.15E-07	1.64E-07	3.57E-04
EP	3.16E-08	1.15E-07	1.02E-06	4.24E-05
FAETP inf.	9.03E-08	1.65E-07	4.21E-08	9.30E-05
GWP 100 years	5.62E-07	1.37E-06	4.73E-07	7.37E-04
HTP inf.	2.16E-06	9.58E-06	1.56E-06	3.23E-03
MAETP inf.	1.49E-05	1.86E-05	9.93E-06	2.21E-02
ODP, steady state	2.41E-16	2.43E-16	8.60E-16	3.24E-13
POCP	1.57E-07	3.56E-07	1.12E-07	2.34E-04
TETP inf.	1.16E-07	1.33E-07	7.59E-08	1.72E-04

### 4.3 系统 2 生命周期影响评价

子系统 2 的 LCIA 包括对污水厂基于准 IV 类进行提标改造的建设和运行阶段的分析。

对比建设阶段和升级改造后运行阶段的环境影响可知，运行阶段的环境负荷远大于建设阶段，这与 Sheikh M. Rahman 等人<sup>[88]</sup>得到的发现相似，建设阶段的材料平均到 20 年的生命周期里之后的得到的值相对于运行阶段要小得多。运行阶段全球变暖潜能值最大，约为  $3.01E+03 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.}$ 。由于建设阶段 ODP, steady state 和运行阶段 EP 是负值（表示产生了环境效益），数值分别为  $-5.86E-11 \text{ kg R11 eq.}$  以及  $-2.24E-02 \text{ kg Phosphate eq.}$ ，其无法在对数坐标系中体现，因此需结合 S2 特征化结果表 4.3 进行分析。

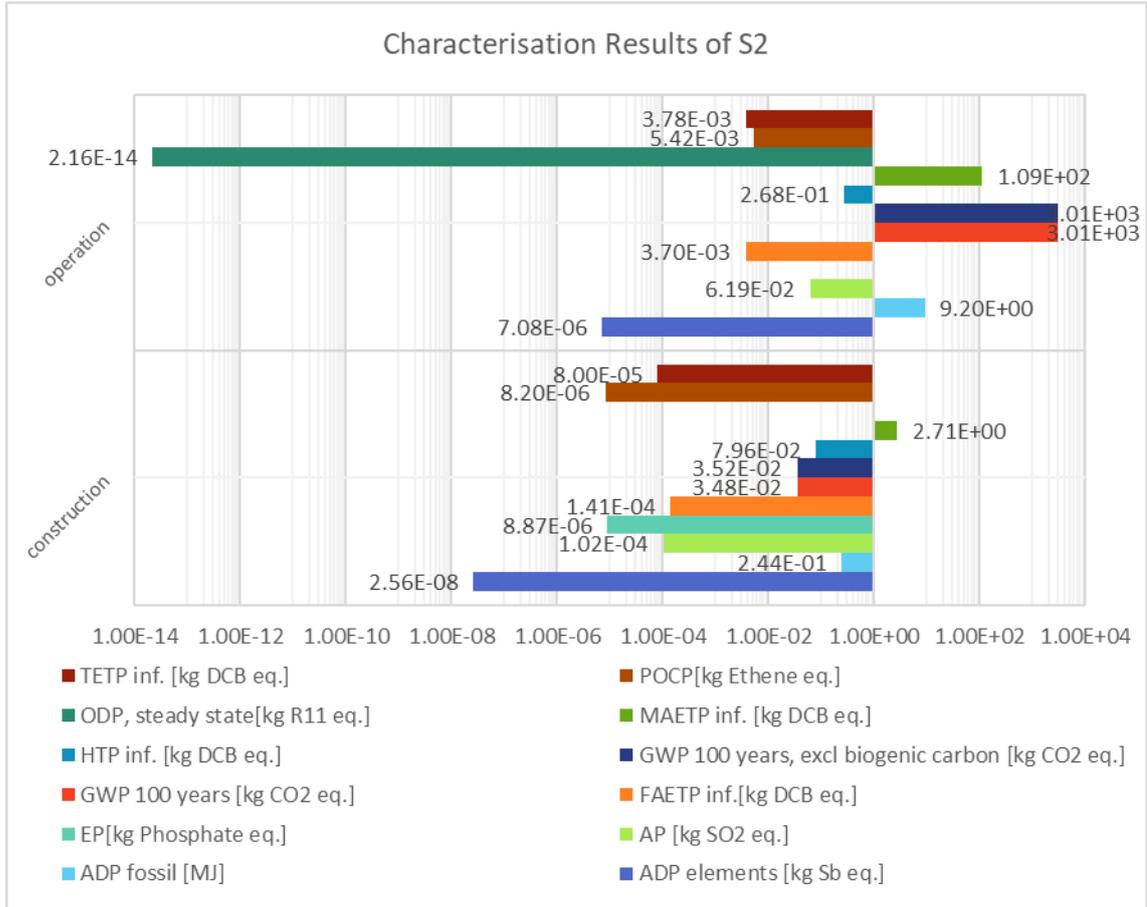


图 4.3 子系统 2 特征化结果

Figure 4.3 Characterisation Results of Subsystem 1

表 4.3 子系统 2 特征化结果

Table 4.3 Characterisation Results of Subsystem 1

	construction	operation
ADP elements [kg Sb eq.]	2.56E-08	7.08E-06
ADP fossil [MJ]	2.44E-01	9.20E+00
AP [kg SO <sub>2</sub> eq.]	1.02E-04	6.19E-02
EP[kg Phosphate eq.]	8.87E-06	-2.24E-02
FAETP inf.[kg DCB eq.]	1.41E-04	3.70E-03
GWP 100 years [kg CO <sub>2</sub> eq.]	3.48E-02	3.01E+03
GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO <sub>2</sub> eq.]	3.52E-02	3.01E+03
HTP inf. [kg DCB eq.]	7.96E-02	2.68E-01
MAETP inf. [kg DCB eq.]	2.71E+00	1.09E+02
ODP, steady state[kg R11 eq.]	-5.86E-11	2.16E-14
POCP[kg Ethene eq.]	8.20E-06	5.42E-03
TETP inf. [kg DCB eq.]	8.00E-05	3.78E-03

归一化结果可知，对于建设阶段，HTP inf.是最重要的环境影响类别。对于运行阶段，温室气体排放是最重要的环境影响类别，且是污水厂生命周期中环境影响最大的部分。

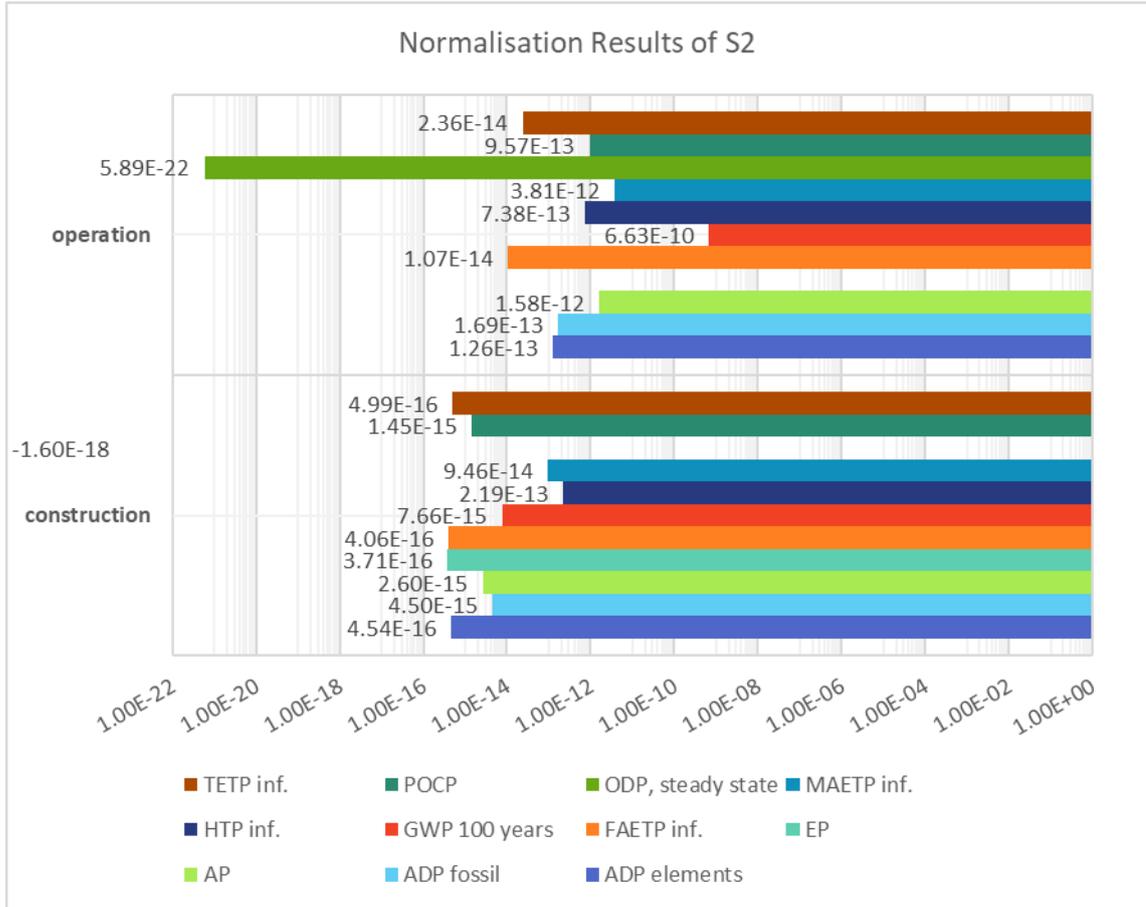


图 4.4 子系统 2 归一化结果

Figure 4.4 Charaterisation Results of S2

表 4.4 子系统 2 归一化结果

Table 4.4 Charaterisation Results of S2

	construction	operation
ADP elements	4.54E-16	1.26E-13
ADP fossil	4.50E-15	1.69E-13
AP	2.60E-15	1.58E-12
EP	3.71E-16	-9.34E-13
FAETP inf.	4.06E-16	1.07E-14
GWP 100 years	7.66E-15	6.63E-10
HTP inf.	2.19E-13	7.38E-13
MAETP inf.	9.46E-14	3.81E-12
ODP, steady state	-1.60E-18	5.89E-22
POCP	1.45E-15	9.57E-13
TETP inf.	4.99E-16	2.36E-14

#### 4.4 系统整体生命周期影响评价

为整合分析子系统 1 和 2 的潜在环境影响进行分析, 研究制定出一份准IV类排放标准和为达到这份准IV类标准而提标升级改造污水厂给环境带来的潜在负荷需要对子系统 2 基于功能单元(处理  $1\text{m}^3$  污水)进行放大处理。根据《2018 年城乡建设统计年鉴》可知, 我国城镇污水处理能力约为 20248 万立方米/日, 假设全国有 50%日处理能力当量的污水厂将根据子系统 1 的准IV类标准制定进行相应程度的提标升级改造, 计算得出生命周期 20 年内总处理水量为  $7.39\text{E}+11 \text{ m}^3$  时, 所带来的环境影响潜能, 因此本节中的子系统 2 的环境影响不再是如第 4.3 节所得出的单位 FU 的环境影响。计算结果用对数坐标系条形图表示, 由于子系统 2 EP 和 ODP, steady state 为负值, 因此只在特征化和归一化结果表格表 4.5 和表 4.6 中体现。

特征化结果可知, 在系统生命周期内, 升级改造及运行准IV类污水厂的环境影响远大于标准制定的环境影响, 特征化结果量级上相差约为  $10^2\sim 10^5$ 。两个子系统造成主要环境影响负荷的类别也各不相同, 与 4.2 和 4.3 节的结果类似, 分别是 MAETP 和 GWP。归一化结果可知, GWP 是系统整体最重要的影响类别, 归一化值约为  $4.9\text{E}+02$ 。

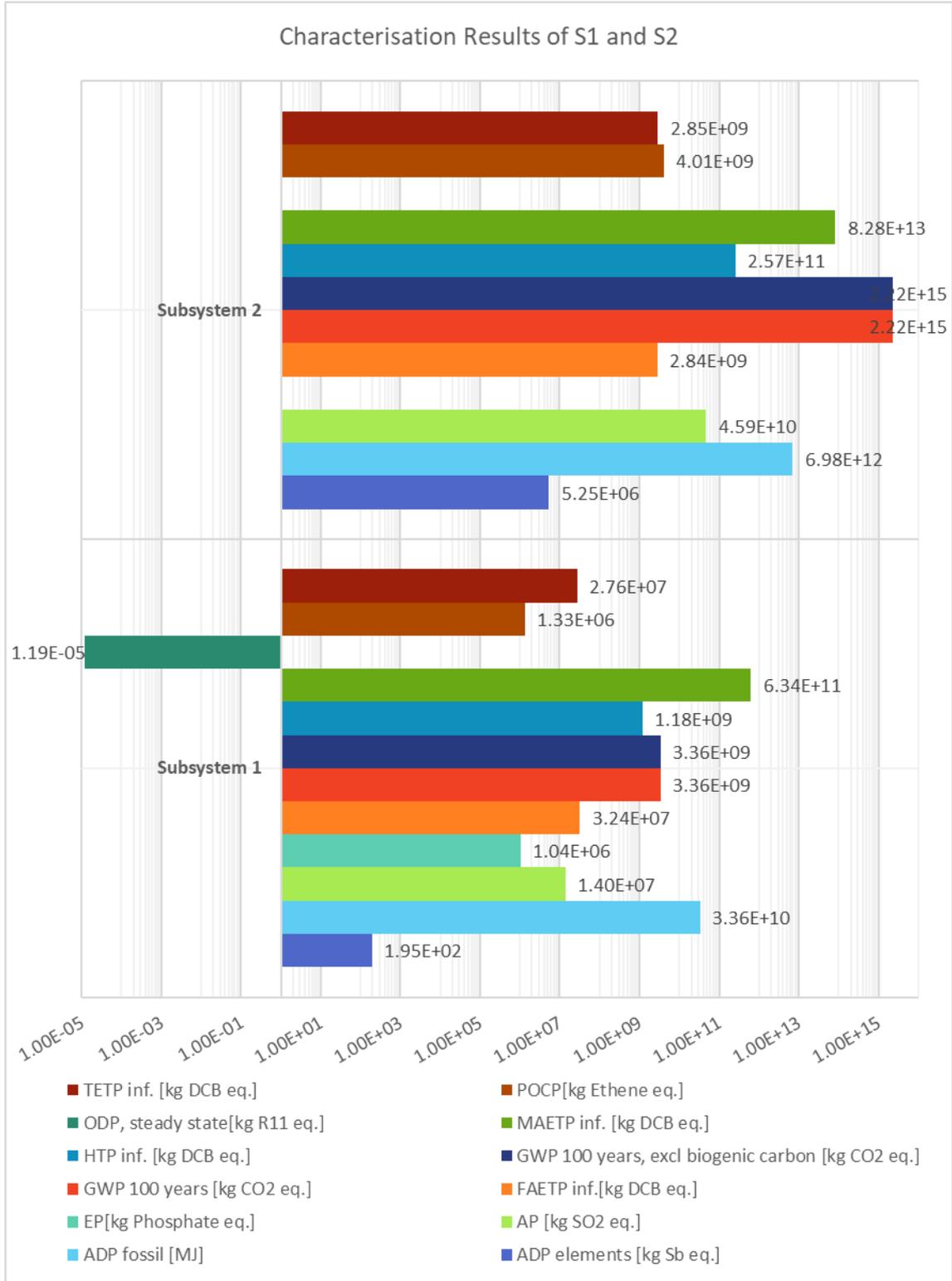


图 4.5 S1 和 S2 特征化结果

Figure 4.5 Characterisation Results of S1 and S2

表 4.5 S1 和 S2 特征化结果

Table 4.5 Characterisation Results of S1 and S2

	Subsystem 1	Subsystem 2
ADP elements [kg Sb eq.]	1.95E+02	5.25E+06
ADP fossil [MJ]	3.36E+10	6.98E+12
AP [kg SO <sub>2</sub> eq.]	1.40E+07	4.59E+10
EP[kg Phosphate eq.]	1.04E+06	-1.65E+10
FAETP inf.[kg DCB eq.]	3.24E+07	2.84E+09
GWP 100 years [kg CO <sub>2</sub> eq.]	3.36E+09	2.22E+15
GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO <sub>2</sub> eq.]	3.36E+09	2.22E+15
HTP inf. [kg DCB eq.]	1.18E+09	2.57E+11
MAETP inf. [kg DCB eq.]	6.34E+11	8.28E+13
ODP, steady state[kg R11 eq.]	1.19E-05	-4.33E+01
POCP[kg Ethene eq.]	1.33E+06	4.01E+09
TETP inf. [kg DCB eq.]	2.76E+07	2.85E+09

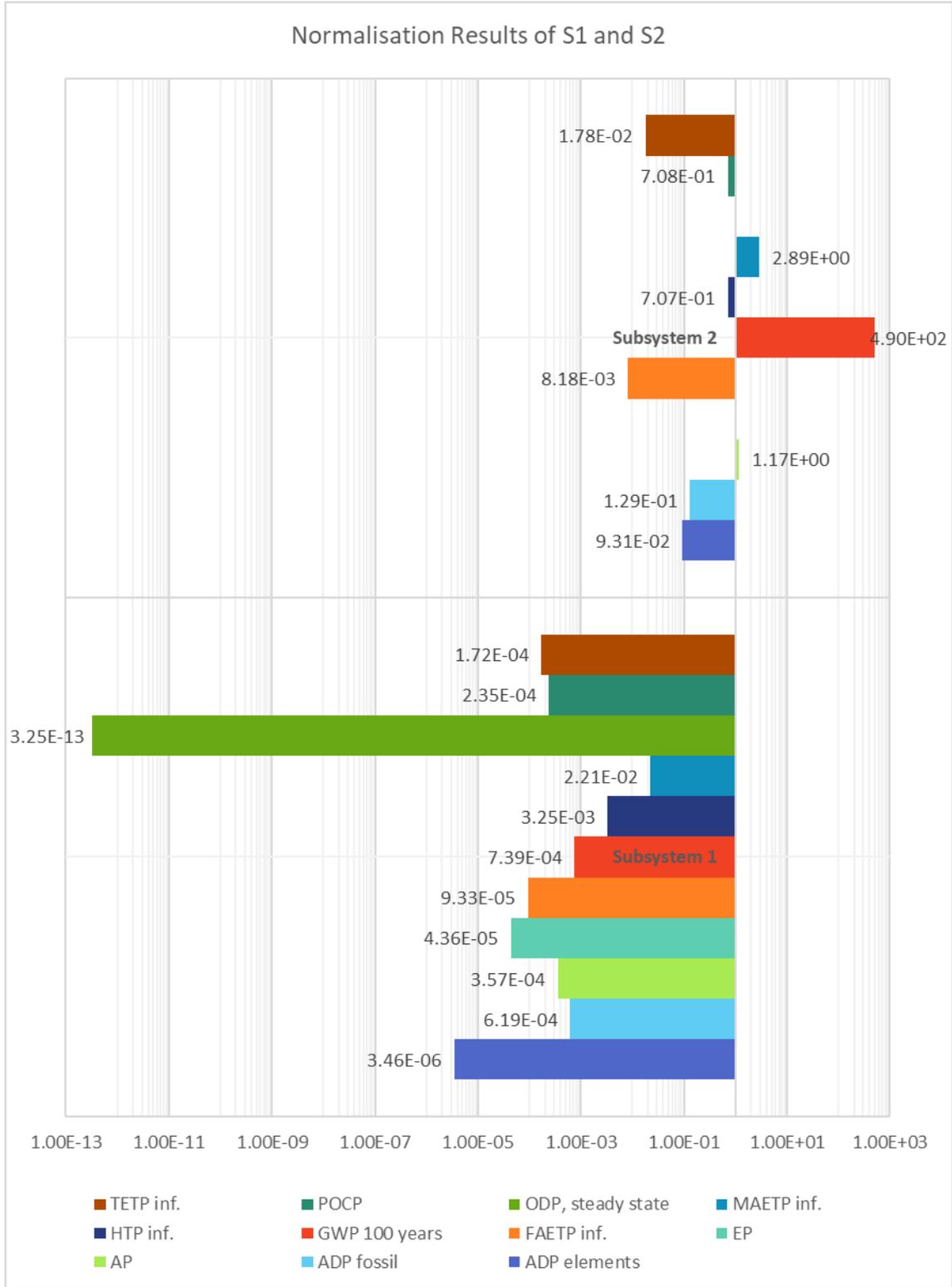


图 4.6 S1 和 S2 归一化结果

Figure 4.6 Normalisation Results of S1 and S2

表 4.6 S1 和 S2 归一化结果

Table 4.6 Normalisation Results of S1 and S2

	Subsystem 1	Subsystem 2
ADP elements	3.46E-06	9.31E-02
ADP fossil	6.19E-04	1.29E-01
AP	3.57E-04	1.17E+00
EP	4.36E-05	-6.90E-01
FAETP inf.	9.33E-05	8.18E-03
GWP 100 years	7.39E-04	4.90E+02
HTP inf.	3.25E-03	7.07E-01
MAETP inf.	2.21E-02	2.89E+00
ODP, steady state	3.25E-13	-1.18E-06
POCP	2.35E-04	7.08E-01
TETP inf.	1.72E-04	1.78E-02

## 5 结果解释与讨论

### 5.1 引言

本章将对准IV类标准生命周期产品系统进行敏感性检验。敏感性检验 (Sensitivity Check) 的目的是通过对结果和结论的可靠性进行评价确定它们如何受到数据、分配方法或类别计算中的不确定性的影响指标的结果,等等。敏感性检查应包括敏感性分析(Sensitivity Analysis, 考虑改变假设条件对 LCA 模型的影响) 和不确定度分析 (Uncertainty Analysis, 包括数据不确定性和模型不确定性)。基于此, 不确定性分析着重考虑子系统 1 的不确定性, 探究出行方式、参会人数、以及准IV类污水厂升级改造的不同所带来的影响。

### 5.2 不确定性分析

#### 5.2.1 出行方式不确定性 (U1)

与会者的出行方式, 即交通工具的选择可能导致环境负荷的变化<sup>[105, 122]</sup>。此外, 飞速发展的高铁近年来成为人们偏好的出行方式, 截至 2018 年我国已基本实现高铁的“公交化”。据了解, 到 2020 年, 首都与大部分省会城市将做到 2-8 小时通达, 与相邻大中城市 1-4 小时快速联系, 周边城市 0.5-2 小时内便捷通勤<sup>[179]</sup>, 便利的出行方式有利于节约人们的时间成本。

因此本节探讨采用不同出行方式 (飞机、火车、汽车) 如何影响环境负荷的变化, 且特别关注选择高铁代替普通火车作为出行方式所带来的环境成本。本节考虑七种情景, 具体描述及情景编码如下。

表 5.1 出行方式不确定性情景分析

Table 5.1 Uncertainty Analysis of Travel Mode

情景	描述	编码	
		子系统 1	子系统 2
基准	>200km: 50%飞机 50% 高铁、动车; ≤200km: 50%普通火车 50%汽车	U1-B-sub1	U1-B-sub2
	>200km: 50%飞机, 50% 1 高铁、动车; ≤200km: 50%高铁、动车, 50%汽	U1-0.5P0.5HS-0.5HS0.5C-sub1	U1-0.5P0.5HS-0.5HS0.5C-sub2

情景	描述	编码	
		子系统 1	子系统 2
	车		
2	>200km: 100%飞机; ≤ 200km: 50%高铁、动车, 50%汽车	U1-1P0HS-0.5HS0.5C-sub1	U1-1P0HS-0.5HS0.5C-sub2
3	>200km: 80%飞机, 20% 高铁、动车; ≤200km: 50%高铁、动车, 50%汽 车	U1-0.8P0.2HS-0.5HS0.5C-sub1	U1-0.8P0.2HS-0.5HS0.5C-sub2
4	>200km: 80%飞机, 20% 高铁、动车; ≤200km: 80%高铁、动车, 20%汽 车	U1-0.8P0.2HS-0.8HS0.2C-sub1	U1-0.8P0.2HS-0.8HS0.2C-sub2
5	>200km: 100%飞机; ≤ 200km: 80%高铁、动车, 20%汽车	U1-1P0HS-0.8HS0.2C-sub1	U1-1P0HS-0.8HS0.2C-sub2
6	>200km: 100%高铁; ≤ 200km: 80%高铁、动车, 20%汽车	U1-0P1HS-0.8HS0.2C-sub1	U1-0P1HS-0.8HS0.2C-sub2
7	>200km: 100%高铁; ≤ 200km: 50%高铁、动车, 50%汽车	U1-0P1HS-0.5HS0.5C-sub1	U1-0P1HS-0.5HS0.5C-sub2

### 5.2.2 参会人数不确定性 (U2)

与会者的多少会影响环境负荷的大小, 因此本节考虑不同会议规模所产生的环境负荷。特别地, 本节的分析假设生命周期内所有会议的规模都是一样的, 即与会者数量恒定不变, 不因会议的不同而波动变化。考虑三种情景, 具体描述及情景编码如下。

表 5.2 参会人数不确定性情景分析

Table 5.2 Uncertainty Analysis of Number of Participants

情景	描述	编码	
		子系统 1	子系统 2
基准	1000 人	U2-B-sub1	U2-B-sub2
少	600 人 <sup>[180]</sup>	U2-L-sub1	U2-L-sub2
中	800 人 <sup>[122]</sup>	U2-M1-sub1	U2-M1-sub2
多	1800 人 <sup>[122]</sup>	U2-H-sub1	U2-H-sub2

### 5.2.3 准IV类污水处理厂升级改造不确定性 (U3)

鉴于一些地方标准的出水指标已高于 GB 18918-2002 1A 甚至趋于准IV类水质并已经开展相关的污水厂提标改造工作, 然而近年来业界对此尚存一定的争议<sup>[11, 19]</sup>。同时, 本文在第四章的 LCIA 中假设全国将有日处理能力为 10124 万立方米/日当量的污水厂基于准IV类标准进行提标升级改造, 此假设存在不确定性, 因此本节考虑一下几种情景重新计算环境影响潜能值。具体描述及情景编码如下。

表 5.3 准IV类污水处理厂升级改造不确定性情景分析

Table 5.3 Uncertainty Analysis of Upgrading and Reconstruction of Wastewater Treatment Plants in Compliance with Category IV equivalent Standard

情景	描述 占日处理能力的比例 <sup>①</sup>	编码	
		子系统 1	子系统 2
基准	50%	U3-B-sub1	U3-B-sub2
少	5%	U3-L-sub1	U3-L-sub2
中 1	20%	U3-M1-sub1	U3-M1-sub2
中 2	35%	U3-M2-sub1	U3-M2-sub2

### 5.2.4 不确定性分析结果

不确定性分析结果采用热力图的方式表征和识别在不同情景模式下特定影响类别指标的相对大小。由于各个影响类别的特征化数值在量级上存在较大的差异且其单位各不相同, 不利于图形的绘制, 因此本节采用归一化后数值(无量纲), 并对归一化值进行缩放(scaling), 最后得出热力图。缩放方法如下。

<sup>①</sup> 根据《2018年城乡建设统计年鉴》可知, 我国城镇污水处理能力约为 20248 万立方米/日

$$x_{IC}' = \frac{x_{IC} - \min(x_{IC})}{\max(x_{IC}) - \min(x_{IC})} \quad (5-1)$$

其中，IC 为环境影响类别， $\max(x_{IC})$ 为最大值， $\min(x_{IC})$ 为最小值。

不确定性分析结果见图 5.1~图 5.3 表示，色彩变化幅度表示影响类别指标随情景变化而变化的幅度，墨绿色为最低，红色为最高，白色为中值。

子系统 1 和 2 的归一化后的统计量见表 5.4~表 5.9。通过统计量及缩放后系数可以计算得出不同影响类别、不同情景模式下的环境影响归一化数值。

通过子系统 1 热力图分析可知（图 5.1），总体上看，出行方式的变化对环境负荷的波动较大。对比 U1-B 和 U1-0.5P0.5HS-0.5HS0.5 可知，短途旅行时，采用高铁替代普通火车造成的环境负荷相对较小但不明显。从 U1-1P0HS-0.5HS0.5C 到 U1-0P1HS-0.5HS0.5C 对比得出，长距离运输时采用高铁替代飞机对环境负荷的主导影响类别发生变化，长途出行时采用飞机出行对 ADP fossil、EP、FAETP、GWP 100 years、HTP inf.产生较大负荷，而采用高铁出行时主要影响类别与飞机不同，主要影响 MAETP inf.、ODP, steady state 和 TETP inf.；从 U1-1P0HS-0.5HS0.5C 到 U1-1P0HS-0.8HS0.2C 可知，采用高铁作为主要出行方式时相比起飞机可能更能减少环境足迹。从 U2 情景分析可知，环境影响负荷变化随与会人数的增加而增加，与会人数的改变主要影响的是学术会议议程及论文集的制作、参会用的环保袋、会议室能耗、与会者住宿。U3 对子系统 1 无明显影响。

通过子系统 2 热力图分析可知（图 5.2），总体上看，U1~U2 的情景变化对子系统 2 无明显影响，表明出行方式、参会人员人数的变化对污水厂的升级改造无直接影响；除了 EP 和 ODP, steady state 外，U3 最高值为基准情景出现在 U3-B-sub2（全国 50%日处理能力当量的污水厂），最低值为 U3-L-sub2（全国 5%日处理能力当量的污水厂），随着提标升级改造污水厂的不断增加，这些环境影响潜能不断增加，而 EP 和 ODP, steady state 与之趋势相反，表明污水处理厂基于准IV类标准提标改造的建设和运行能减轻水体富营养化和臭氧层消耗的负担的同时，但也带来了其他环境问题。

通过两个子系统综合分析可知（图 5.3），总体上看，S2 产生的环境影响远大于 S1，但 U3-L 情境下，尤其是 EP，两个子系统的系数较为接近，表明即准IV类标准制定过程中产生的 EP 和 ODP, steady state 与准IV污水厂日处理规模约为 1012.4 万  $\text{m}^3/\text{d}$  情景时所产生的 EP 和 ODP, steady state 数值上接近，污水厂对环境污染的削减效益不明显。

表 5.4 子系统 1 不确定性分析特征化结果统计量

Table 5.4 Statistics of Subsystem 1 Uncertainty Analysis Characterisation Result

	max	min	mean
ADP elements [kg Sb eq.]	1.9546E+02	1.9483E+02	1.9504E+02
ADP fossil [MJ]	3.3617E+10	3.3569E+10	3.3595E+10
AP [kg SO <sub>2</sub> eq.]	1.4012E+07	1.4000E+07	1.4004E+07
EP[kg Phosphate eq.]	1.0450E+06	1.0425E+06	1.0439E+06
FAETP inf.[kg DCB eq.]	3.2417E+07	3.2379E+07	3.2393E+07
GWP 100 years [kg CO <sub>2</sub> eq.]	3.3575E+09	3.3542E+09	3.3555E+09
GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO <sub>2</sub> eq.]	3.3590E+09	3.3559E+09	3.3572E+09
HTP inf. [kg DCB eq.]	1.1817E+09	1.1782E+09	1.1801E+09
MAETP inf. [kg DCB eq.]	6.3459E+11	6.3383E+11	6.3419E+11
ODP, steady state[kg R11 eq.]	1.1910E-05	1.1894E-05	1.1902E-05
POCP[kg Ethene eq.]	1.3298E+06	1.3287E+06	1.3291E+06
TETP inf. [kg DCB eq.]	2.7626E+07	2.7589E+07	2.7606E+07

表 5.5 子系统 1 不确定性分析归一化结果统计量

Table 5.5 Statistics of Subsystem 1 Uncertainty Analysis Normalisation Result

	max	min	mean
ADP elements	3.4652E-06	3.4541E-06	3.4579E-06
ADP fossil	6.1925E-04	6.1837E-04	6.1886E-04
AP	3.5762E-04	3.5733E-04	3.5743E-04
EP	4.3652E-05	4.3549E-05	4.3605E-05
FAETP inf.	9.3404E-05	9.3296E-05	9.3335E-05
GWP 100 years	7.3991E-04	7.3919E-04	7.3949E-04
HTP inf.	3.2520E-03	3.2423E-03	3.2476E-03
MAETP inf.	2.2129E-02	2.2103E-02	2.2115E-02
ODP, steady state	3.2530E-13	3.2486E-13	3.2507E-13
POCP	2.3488E-04	2.3469E-04	2.3476E-04
TETP inf.	1.7235E-04	1.7212E-04	1.7222E-04

表 5.6 子系统 2 不确定性分析特征化结果统计量

Table 5.6 Statistics of Subsystem 2 Uncertainty Analysis Characterisation Result

	max	min	mean
ADP elements [kg Sb eq.]	5.2534E+06	5.2534E+05	4.6624E+06
ADP fossil [MJ]	6.9792E+12	6.9792E+11	6.1941E+12
AP [kg SO <sub>2</sub> eq.]	4.5852E+10	4.5852E+09	4.0694E+10
EP[kg Phosphate eq.]	-1.6524E+09	-1.6524E+10	-1.4665E+10
FAETP inf.[kg DCB eq.]	2.8378E+09	2.8378E+08	2.5185E+09
GWP 100 years [kg CO <sub>2</sub> eq.]	2.2250E+15	2.2250E+14	1.9747E+15
GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO <sub>2</sub> eq.]	2.2250E+15	2.2250E+14	1.9747E+15
HTP inf. [kg DCB eq.]	2.5707E+11	2.5707E+10	2.2815E+11
MAETP inf. [kg DCB eq.]	8.2793E+13	8.2793E+12	7.3479E+13
ODP, steady state[kg R11 eq.]	-4.3312E+00	-4.3312E+01	-3.8439E+01
POCP[kg Ethene eq.]	4.0107E+09	4.0107E+08	3.5595E+09
TETP inf. [kg DCB eq.]	2.8491E+09	2.8491E+08	2.5285E+09

表 5.7 子系统 2 不确定性分析归一化结果统计量

Table 5.7 Statistics of Subsystem 2 Uncertainty Analysis Normalisation Result

	max	min	mean
ADP elements	9.3136E-02	9.3136E-03	8.2658E-02
ADP fossil	1.2856E-01	1.2856E-02	1.1410E-01
AP	1.1703E+00	1.1703E-01	1.0386E+00
EP	-6.9024E-02	-6.9024E-01	-6.1259E-01
FAETP inf.	8.1766E-03	8.1766E-04	7.2568E-03
GWP 100 years	4.9034E+02	4.9034E+01	4.3518E+02
HTP inf.	7.0745E-01	7.0745E-02	6.2786E-01
MAETP inf.	2.8871E+00	2.8871E-01	2.5623E+00
ODP, steady state	-1.1830E-07	-1.1830E-06	-1.0499E-06
POCP	7.0842E-01	7.0842E-02	6.2872E-01
TETP inf.	1.7774E-02	1.7774E-03	1.5774E-02

表 5.8 子系统 1 和子系统 2 不确定性综合分析特征化结果统计量

Table 5.8 Statistics of Subsystem 1 and Subsystem 2 Uncertainty Analysis Characterisation Result

	max	min	mean
ADP elements [kg Sb eq.]	5.2534E+06	1.9483E+02	2.3313E+06
ADP fossil [MJ]	6.9792E+12	3.3569E+10	3.1138E+12
AP [kg SO <sub>2</sub> eq.]	4.5852E+10	1.4000E+07	2.0354E+10
EP[kg Phosphate eq.]	1.0450E+06	-1.6524E+10	-7.3319E+09
FAETP inf.[kg DCB eq.]	2.8378E+09	3.2379E+07	1.2755E+09
GWP 100 years [kg CO <sub>2</sub> eq.]	2.2250E+15	3.3542E+09	9.8734E+14
GWP 100 years, excl biogenic carbon [kg CO <sub>2</sub> eq.]	2.2250E+15	3.3559E+09	9.8734E+14
HTP inf. [kg DCB eq.]	2.5707E+11	1.1782E+09	1.1467E+11
MAETP inf. [kg DCB eq.]	8.2793E+13	6.3383E+11	3.7056E+13
ODP, steady state[kg R11 eq.]	1.1910E-05	-4.3312E+01	-1.9220E+01
POCP[kg Ethene eq.]	4.0107E+09	1.3287E+06	1.7804E+09
TETP inf. [kg DCB eq.]	2.8491E+09	2.7589E+07	1.2781E+09

表 5.9 子系统 1 和子系统 2 不确定性综合分析归一化结果统计量

Table 5.9 Statistics of Subsystem 1 and Subsystem 2 Uncertainty Analysis Normalisation Result

	max	min	ave
ADP elements	9.3136E-02	3.4541E-06	4.1331E-02
ADP fossil	1.2856E-01	6.1837E-04	5.7360E-02
AP	1.1703E+00	3.5733E-04	5.1949E-01
EP	4.3652E-05	-6.9024E-01	-3.0627E-01
FAETP inf.	8.1766E-03	9.3296E-05	3.6750E-03
GWP 100 years	4.9034E+02	7.3919E-04	2.1759E+02
HTP inf.	7.0745E-01	3.2423E-03	3.1555E-01
MAETP inf.	2.8871E+00	2.2103E-02	1.2922E+00
ODP, steady state	3.2530E-13	-1.1830E-06	-5.2494E-07
POCP	7.0842E-01	2.3469E-04	3.1448E-01
TETP inf.	1.7774E-02	1.7212E-04	7.9733E-03

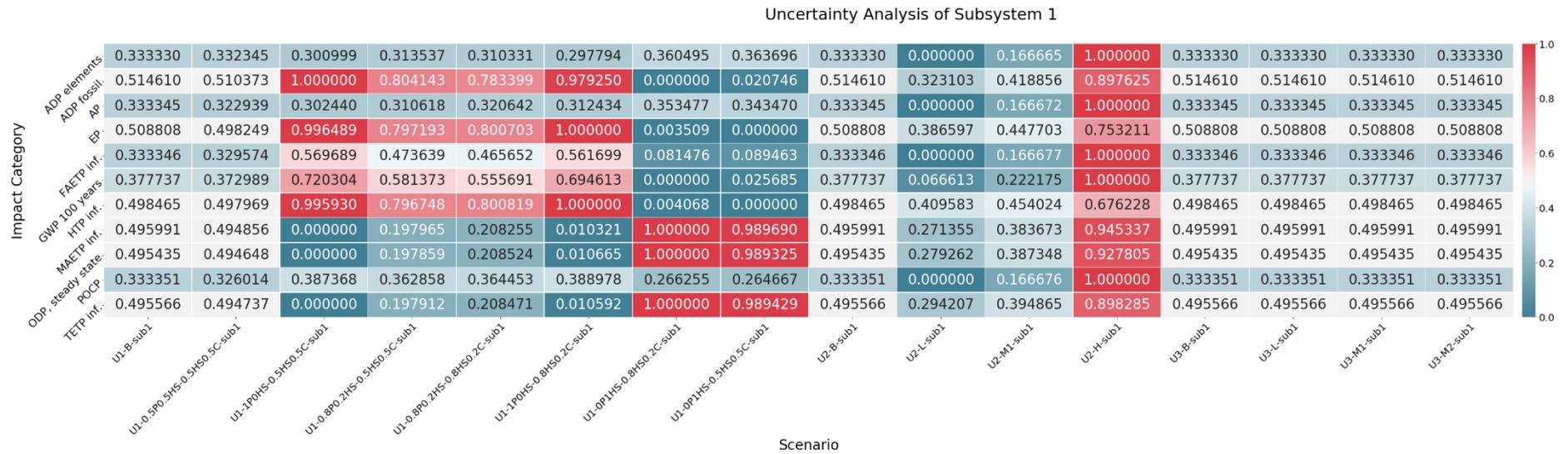


图 5.1 子系统 1 不确定性分析结果

Figure 5.1 Uncertainty Analysis Results of Subsystem 1

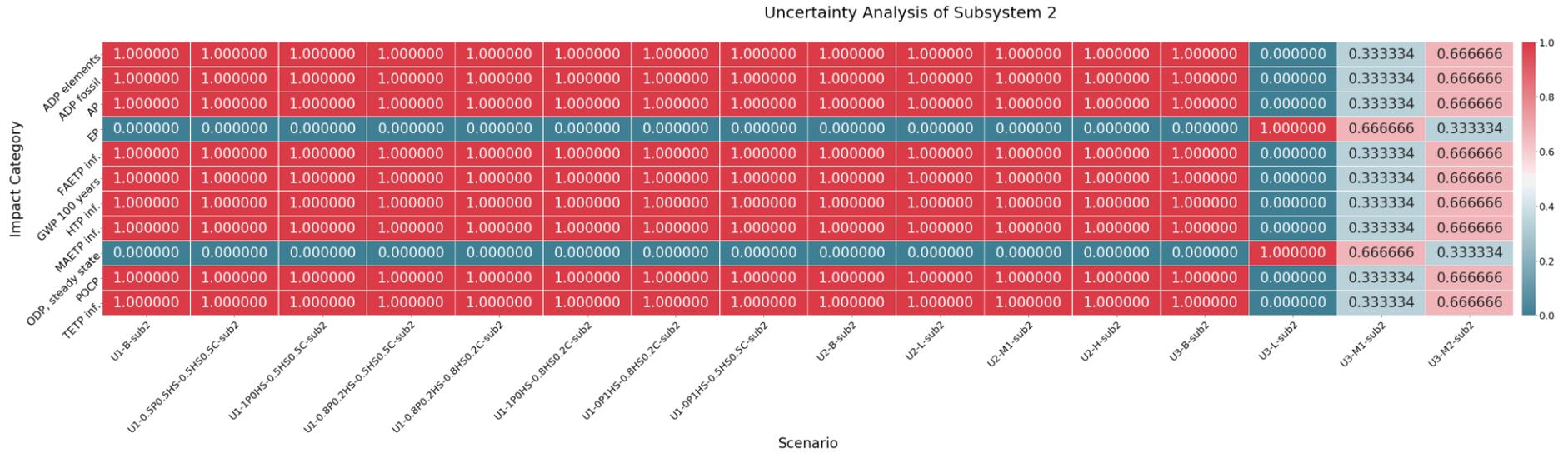


图 5.2 子系统 2 不确定性分析结果

Figure 5.2 Uncertainty Analysis Results of Subsystem 2



## 6 结论和建议

### 6.1 结论

生命周期评价 (LCA), 是支持可持续发展决策的主要工具。本文通过文献综述分析总结目前准IV类污水处理标准的环境可持续性问题, 基于 ISO 14040、ISO 14044 生命周期方法框架, 针对准IV类标准的制定程序、执行准IV类标准的污水厂升级改造进行生命周期环境影响评估。首先定义产品系统功能及系统边界, 确定评价范围为准IV类标准制定程序 (子系统 1)、执行准IV类标准的污水厂提标升级改造 (子系统 2)。然后进行清单分析, 对子系统 1 划分室内和室外活动, 对前者, 主要通过文献和设计资料确定; 对后者, 通过百度地图开放平台获取信息、ArcGIS 进行数据预处理、Python 3.7 计算距离矩阵并设计蚁群优化算法实现路径优化, 从而确定室外活动数据清单。对子系统 2, 在现有文献工程案例的基础上, 结合设计手册、设计标准、工程概预算手册等资料完善子系统 2 数据清单。随后采用 GaBi Education 9.1 进行生命周期环境影响评价, 进行分类、特征化和归一化。最后对结果进行解释, 分析出行方式、参会人数、准IV类污水厂升级改造的不确定性。本文主要结论如下。

子系统 1 特征化和归一化结果分析可知, 海洋生态毒性是造成环境影响的主要原因, 其次是非生物化石燃料消耗, 其中技术审查、专题研讨和培训班室内活动、以及环境从业人员从事与准IV类标准相关工作的过程中对此影响类别贡献较多, 两个对应类别的潜能值分别约为  $6.33E+11$  kg DCB eq.和  $3.35E+10$  MJ, 主要是由于从业人员较多、环境足迹基数较大导致。子系统 1 产生的臭氧层消耗潜能和非生物资源消耗潜能相对较小, 最小值分别对应为学术会议相关的室内活动  $8.82E-09$  kg R11 eq.、编制人员日常工作室内活动  $2.67E-01$  kg Sb eq.。

对比子系统 2 的建设阶段和升级改造后运行阶段的环境影响可知, 运行阶段的环境负荷远大于建设阶段。建设阶段对臭氧层消耗、运行阶段对富营养化产生了环境效益, 分别减少  $5.86E-11$  kg R11 eq.以及  $2.24E-02$  kg Phosphate eq.。运行阶段全球变暖潜能值最大, 约为  $3.01E+03$  kg CO<sub>2</sub> eq.。归一化结果可知, 人类毒性是建设阶段是最重要的环境影响类别。全球变暖是运行阶段最重要的环境影响类别, 且是污水厂生命周期中环境影响最大的部分。

对子系统 1 和 2 结合成整体进行分析, 特征化结果可知, 在系统生命周期内, 升级改造及运行准IV类污水厂的环境影响远大于标准制定的环境影响, 特征化结果在量级上相差约为  $10^2 \sim 10^5$ 。两个子系统造成主要环境影响负荷的类别也各不相同, 分别是海洋生态毒性和全球变暖。归一化结果可知, 全球变暖是系统整体最

重要的影响类别，归一化值约为  $4.9E+02$ 。

通过分析出行方式、参会人数和处理规模不确定性得出，对于子系统 1，出行方式的变化对环境负荷的波动较大。短途旅行时，采用高铁替代普通火车造成的环境负荷相对较小但不明显。长距离运输时采用高铁替代飞机对环境负荷的主导影响类别发生变化，长途出行时采用飞机出行对非生物化石燃料消耗、富营养化、淡水生态毒性、全球变暖、人类毒性造成较大环境负荷，而采用高铁出行时主要影响类别与飞机不同，主要影响海洋生态毒性、臭氧层消耗和陆地生态毒性；采用高铁作为主要出行方式时相比起飞机可能更能减少环境足迹。分析参会人员不确定性可知，环境影响负荷变化随与会人数的增加而增加，与会人数的改变主要影响的是学术会议议程及论文集的制作、参会用的环保袋、会议室能耗、与会者住宿。升级改造的污水厂处理规模对子系统 1 无明显影响。对子系统 2，出行方式、参会人员人数的变化对污水厂的升级改造无直接影响；除了富营养化和臭氧层消耗外，随着提标升级改造污水厂处理规模的不断增加，其他环境影响潜能不断增加，而富营养化和与臭氧层消耗趋势相反，表明污水处理厂基于准IV类标准提标改造的建设和运行能减轻水体富营养化和臭氧层消耗的负担的同时，但也带来了其他环境问题。对两个子系统综合分析可知，子系统 2 产生的环境影响远大于子系统 1；准IV污水厂日处理规模约为  $1012.4$  万  $m^3/d$  时，两个子系统造成的富营养化和臭氧层消耗潜能数值上接近，污水厂对环境污染的削减效益不明显。

## 6.2 建议

基于本文的分析结果，对今后的工作提出以下几点建议。

建议因地制宜地按需在局部地区施行准IV类标准。综合考虑管网现状和接纳水体水环境容量，对于脆弱水体可考虑采用准IV类标准，而对于无富营养化之虞的一般水体可不考虑，从而避免造成不必要的资源浪费和环境破坏。

关于准IV类标准制定的生命周期，由于缺乏会议主办方、编制单位等部门提供的一手数据资料，因此大部分数据来自前人研究经验（文献数据）、建筑和能耗标准中规定的设计参数、开放平台数据，尽管这些资料能较为合理地间接反映标准制定过程的环境影响，但仍存在不确定性。为进一步完善制定标准过程中的生命周期环境影响评价，建议有针对性地通过调研、问卷调查等传统方式，并结合传感器、闭路电视摄像头（CCTV）、GPS、公众科学等创新方式，全面地进行清单分析，为准IV类标准的生命周期环境影响评价提供更为科学的依据。

准IV类标准制定方面，本文未考虑市内交通的影响，但由于这类交通为编制人员、从业人员日常工作必要的通勤方式，建议考虑该类影响。交通运输距离的获取方面，由于城市间交通路线距离信息不可获，因此本文考虑城市间直线距离，

建议条件允许的情况下,考虑交通路线距离信息。会议方面,本文主要考虑线下会议,但鉴于新冠肺炎疫情下,线上会议成为工作常态,建议对比分析线上和线下会议的生命周期环境影响。

关于准IV类污水厂提标改造生命周期,由于准IV类污水厂的工程案例较少且对于设计方、施工方和管理运行方而言,这些数据存在一定隐私性、难获取,对清单分析造成一定的困难。因此本文的做法是结合文献可获的工程案例,在文献原有数据的基础上,结合设计手册、设计标准、工程投资估算指标手册进行二次设计,最终确定数据清单。特别地,本文对运行阶段建立模型的时候对物料、能耗、环境效益等都假设为恒定值,一定程度上可能缺乏真实性。由于污水厂运行是污水厂产生环境影响的重要环节,因此今后的工作建议采用污水厂仿真模拟的方式,在一定程度上保证数据真实性的同时,为进一步研究环境负荷和效益如何权衡与优化提供更多便利。

本文两个子系统执行的功能不同,因此有两个功能单元,分别为一份准IV类污水处理排放标准、 $1\text{m}^3$ 处理水,在整合两个子系统并对其对比分析时,基于一份准IV类标准的实施将导致多少个污水厂的提标改造的考虑,对后者每功能单元的环境影响乘以处理水量进行放大处理。但由于实际执行准IV类污水厂提标改造的数目、处理规模、运行现状等存在一定的不确定性,本文建议今后应关注和开展这类污水厂的基础情况调查研究。

本文研究生命周期环境影响评价所采用的软件是 GaBi Education 9.1,在研究过程中对比课题组以前的基于 Simapro 教育版的生命周期评价研究发现,两种软件教育版的用户友好程度各有侧重。例如,前者内置数据库能满足 LCA 的基本需求,但如果需要一些具有地域特征的背景数据,如 China LCI,对于教育版而言无法直接导入外置的数据库,需要手动设置,而后者的教育版软件可直接导入。再比如,不确定性分析方面,前者可采用蒙特卡洛方法,而后者不能。由于教育版 LCA 软件的受众主要是非博士学生,其受众群体规模较大,因此本文建议在进 LCA 时应查阅相关文献,并结合自己的研究偏好、用户习惯综合对比多种 LCA 软件进行选择。



## 参考文献

- [1] 高洁. 浅谈水污染控制的问题及解决方法 [J]. 建筑工程技术与设计, 2014, (21): 961-.
- [2] 冯薪霖, 周芙蓉, 杨洪. 我国水环境及水污染控制问题 [J]. 中国新技术新产品, 2014, (22): 132.
- [3] 冉丹, 李燕群, 张丹, 杨坪, 但德忠. 论中国水污染物排放标准的现状及特点 [J]. 环境科学与管理, 2012, 37 (12): 38-42.
- [4] 周羽化, 武雪芳. 中国水污染物排放标准 40 余年发展与思考[C]. 9.
- [5] 李义松, 刘金雁. 论中国水污染物排放标准体系与完善建议 [J]. 环境保护, 2016, 44 (21): 48-51.
- [6] 马中, 周芳. 基于环境质量要求的污水排放标准和水价标准亟待建立 [J]. 环境保护, 2013, 41 (06): 42-4.
- [7] 马世豪, 何星海. 《城镇污水处理厂污染物排放标准》浅释 [J]. 给水排水, 2003, (09): 89-94.
- [8] LU J-Y, WANG X-M, LIU H-Q, YU H-Q, LI W-W. Optimizing operation of municipal wastewater treatment plants in China: The remaining barriers and future implications [J]. *Environment International*, 2019, 129 273-8.
- [9] 国务院 . 国务院 关于 印发 水 污 染 防 治 行 动 计 划 的 通 知 [EB/OL].[http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm), 2015.
- [10] 《城镇污水处理厂污染物排放标准》编制组. 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(征求意见稿)编制说明 [J/OL].[http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201511/t20151111\\_316837.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201511/t20151111_316837.htm), 2015.
- [11] 彭永臻. 应尽快遏制城市污水处理排放标准盲目提高至地表水质Ⅳ类或Ⅲ类的趋势——在《水污染防治法》实施情况专家评估座谈会上的发言摘 [J]. 中国给水排水, 2019, 35 (08): 12-4.
- [12] JIN L, ZHANG G, TIAN H. Current state of sewage treatment in China [J]. *Water Research*, 2014, 66 85-98.
- [13] LU B, DU X, HUANG S. The economic and environmental implications of wastewater management policy in China: From the LCA perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142 3544-57.
- [14] WANG X-H, WANG X, HUPPES G, HEIJUNGS R, REN N-Q. Environmental implications of increasingly stringent sewage discharge standards in municipal wastewater treatment plants: case study of a cool area of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 94

- 278-83.
- [15] WANG X, LIU J, REN N-Q, DUAN Z. Environmental profile of typical anaerobic/anoxic/oxic wastewater treatment systems meeting increasingly stringent treatment standards from a life cycle perspective [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 126 31-40.
- [16] ZHU L, LIU B, WANG F, BI J. Raising discharge standards leads to environmental problem shifting in China [J]. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2013, 68 2605-12.
- [17] ZHANG Q H, YANG W N, NGO H H, GUO W S, JIN P K, DZAKPASU M, YANG S J, WANG Q, WANG X C, AO D. Current status of urban wastewater treatment plants in China [J]. *Environment International*, 2016, 92-93 11-22.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2017 年城乡建设统计年鉴 [M/OL].<http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/index.html>, 2017.
- [19] 陈玮, 徐慧纬, 高伟, 赵晔, 程彩霞, 张晓亮, 梁雨雯. 基于产污系数法测算城镇污水处理系统的主要污染物削减效能提升潜力 [J]. *给水排水*, 2018, 54 (07): 24-9.
- [20] 李红祥, 徐鹤, 董战峰, 葛察忠, 翁青青. 环境政策实施的成本效益分析框架研究 [J]. *环境保护*, 2017, 45 (04): 54-8.
- [21] ISO 14040:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework[S].Geneva Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- [22] ISO 14044:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines[S].Geneva Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- [23] ISO 20121:2012 Event sustainability management systems — Requirements with guidance for use[S]. 2012.
- [24] MURALIKRISHNA I V, MANICKAM V. Chapter Five - Life Cycle Assessment [M]//MURALIKRISHNA I V, MANICKAM V. *Environmental Management*. Butterworth-Heinemann. 2017: 57-75.
- [25] CURRAN M A. Life-Cycle Assessment [M]//JØRGENSEN S E, FATH B D. *Encyclopedia of Ecology*. Oxford: Academic Press. 2008: 2168-74.
- [26] GUINÉE J B, HEIJUNGS R, HUPPES G, ZAMAGNI A, MASONI P, BUONAMICIR, EKVALL T, RYDBERG T. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45 (1): 90-6.
- [27] BRUSSEAU M L, PEPPER I L, GERBA C P. Preface [M]//BRUSSEAU M L, PEPPER I L, GERBA C P. *Environmental and Pollution Science (Third Edition)*. AcademicPress. 2019: xxi.
- [28] ASSIES J A. Introduction paper to SETAC-Europe workshop on environmental life cycle

- analysis of products [M]//LEIDEN. Life-Cycle Assessment, Proceedings of a SETAC-Europe workshop on Environmental Life Cycle Assessment of Products. Brussels, Belgium: SETAC-Europe. 1992.
- [29] SUNDSTROM G. Investigation of energy requirements from raw material to garbage treatment for four Swedish beer and packaging alternatives [J]. 1971,
- [30] BOUSTEAD I. Resource implications with particular reference to energy requirements for glass and plastic milk bottles [J]. *Int J Dairy Technol*, 1974, 27 (3): 159–65.
- [31] IFIAS. Energy analysis workshop on methodology and conventions[C].
- [32] HUNT R G, FRANKLIN W E, WELCH R O, CROSS J A, WOODAL A E. Resource and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives [J/OL], 1974.
- [33] B&H. Studie Umwelt und Volkswirtschaft, Vergleich der Umweltbelastung von Behältern aus PVC, Glas, Blech und Karton [J/OL], 1974.
- [34] BUWAL. Ökobilanzen von Packstoffen, Schriftenreihe Umweltschutz, No. 24 [J/OL], 1984.
- [35] GUINÉE J B, UDO DE HAES H A, HUPPES G. Quantitative life cycle assessment of products: 1:Goal definition and inventory [J]. *Journal of Cleaner Production*, 1993,1 (1): 3-13.
- [36] FAVA J A, DENISON R, JONES B, CURRAN M A, VIGON B, SELKE S, BARNUM J, EDS. A Technical Framework for Life-Cycle Assessments [M]. Washington, DC, 1991:
- [37] WWF, CF. Product Life Assessments: Policy issues and implications [M]. Washington, DC: World Wildlife Fund and The Conservation Foundation, 1990:
- [38] SMET B D. Life-cycle analysis for packaging environmental assessment[C]. Procter & Gamble Technical Center: Leuven, Belgium, 1990
- [39] SETAC-EUROPE. Life-Cycle Assessment[C]. Brussels, Belgium, 1991
- [40] FAVA J A, CONSOLI F, DENISON R, DICKSON K, MOHIN T, VIGON B, A Conceptual Framework for Life-Cycle Impact Assessment [R]. Pensacola, FL, 1993.
- [41] SETAC-EUROPE. Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA under the Auspices of SETAC-Europe[C]. Brussels, Belgium, 1994
- [42] MINISTERS N C O. Product Life Cycle Assessment - Principles and Methodology [M]//MINISTERS N C O. Copenhagen, Denmark. 1992.
- [43] HEIJUNGS R, GUINÉE J B, HUPPES G, LANKREIJER R M, UDO DE HAES H A, WEGENER SLEESWIJK A, ANSEMS A M M, EGGELS P G, DUIN R, VAN GOEDE H P D. Environmental life cycle assessment of products. Guide & Backgrounds [M]//CENTRE OF ENVIRONMENTAL SCIENCE L U. Leiden, The Netherlands. 1992.
- [44] VIGON B W, TOLLE D A, CORNABY B W, LATHAM H C, HARRISON C L, BOGUSKI

- T L, HUNT R G, SELLERS J D. Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles; EPA/600/R-92/245 [M]//AGENCY E P. Washington, DC. 1993.
- [45] CONSOLI F, ALLEN D, BOUSTEAD I, OUDE N, DE FAVA J, FRANKLIN W, QUAY B, PARRISH R, PERRIMAN R, POSTLETHWAITE D, SEGUIN J, VIGON B. Guidelines for Life-Cycle Assessment: A ‘Code of Practice’ [M/OL], 1993.
- [46] Directive 94/62/EC Directive 94/62/EC on Packaging and Packaging Waste[S]. 1994.
- [47] HUNKELER D, YASUI I, YAMAMOTO R. LCA in Japan: policy and progress [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1998, 3 (3): 124-30.
- [48] OWENS J W. Life-Cycle Assessment: Constraints on Moving from Inventory to Impact Assessment [J]. Journal of Industrial Ecology, 1997, 1 (1): 37-49.
- [49] ARNOLD F S. Why environmental life cycle assessment doesn’t work [J]. J EnvironLaw Pract, 1995, 2 (5): 4–14.
- [50] HAUSCHILD M Z, WENZEL, HENRIK. Environmental Assessment of Products Volume 2: Scientific Background [M]. Environmental Assessment of Products. London, U.K: Chapman & Hall. 1998.
- [51] WENZEL H, HAUSCHILD, MICHAEL Z., ALTING, L. . Environmental Assessment of Products Volume 1 Methodology, Tools and Case Studies in Product Development [M]. Environmental Assessment of Products. London, U.K.: Chapman & Hall. 1998.
- [52] HEIJUNGS R, GUINÉE J, HUPPES G, LANKREIJER R M, HAES H A, WEGENER SLEESWIJK A, ANSEMS A M M, EGGELS P G, VAN DUIN R, GOEDE H P. Environmental Life Cycle Assessment of Products—Guide and Backgrounds [J]. 1992.
- [53] HOFSTETTER P. Perspectives in Life Cycle Impact Assessment: A Structured Approach to Combine Models of the Technosphere, Ecosphere, and Valuesphere [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2000, 5
- [54] GOEDKOOP M, SPRIENSMA R. The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for life cycle Impact assessment [M/OL].[https://www.pre-sustainability.com/download/EI\\_99\\_annexe\\_v3.pdf](https://www.pre-sustainability.com/download/EI_99_annexe_v3.pdf), 1999.
- [55] HAUSCHILD M Z, HUIJBREGTS M, JOLLIET O, MACLEOD M, MARGNI M, VAN DE MEENT D, ROSENBAUM R K, MCKONE T E. Building a Model Based on Scientific Consensus for Life Cycle Impact Assessment of Chemicals: The Search for Harmony and Parsimony [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42 (19):7032-7.
- [56] ROSENBAUM R K, BACHMANN T M, GOLD L S, HUIJBREGTS M A J, JOLLIET O, JURASKE R, KOEHLER A, LARSEN H F, MACLEOD M, MARGNI M, MCKONE T E, PAYET J, SCHUHMACHER M, VAN DE MEENT D, HAUSCHILD M Z. USEtox—the

- UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13 (7): 532.
- [57] GUINÉE J, HEIJUNGS R. A proposal for the classification of toxic substances within the framework of life cycle assessment of products [J]. *Chemosphere*, 1993, 26 (10): 1925-44.
- [58] WEIDEMA B P, FREES N, NIELSEN A-M. Marginal production technologies for life cycle inventories [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1999, 4 (1): 48-56.
- [59] EKVALL T. A market-based approach to allocation at open-loop recycling [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, 29 (1): 91-109.
- [60] WEIDEMA B. Avoiding Co-Product Allocation in Life-Cycle Assessment [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4 (3): 11-33.
- [61] UN. UN Environment Programme Life Cycle Initiative website [J/OL].<https://www.unenvironment.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/life-cycle-initiative>, 2020.
- [62] COM. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament - Integrated Product Policy - Building on Environmental Life-Cycle Thinking [J/OL].<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52003DC0302>, 2003.
- [63] COM. Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources [J/OL].<https://ec.europa.eu/environment/archives/natres/index.htm>, 2005.
- [64] COM. Taking sustainable use of resources forward: A Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste [J/OL], 2005.
- [65] EC. European Commission - Joint Research Centre Life Cycle Thinking and Assessment Website [EB/OL].<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/>, 2020.
- [66] EPA U. U.S. Environmental Protection Agency Life-Cycle Assessment Research [EB/OL].[https://search.epa.gov/epasearch/?querytext=life+cycle+assessment&areaname=&reacontacts=&areasearchurl=&typeofsearch=epa&result\\_template=2col.ftl#/](https://search.epa.gov/epasearch/?querytext=life+cycle+assessment&areaname=&reacontacts=&areasearchurl=&typeofsearch=epa&result_template=2col.ftl#/), 2020.
- [67] ALCAS. The Australian Life Cycle Assessment Society (ALCAS) [EB/OL].<http://www.alcas.asn.au/>, 2020.
- [68] ACLCA. ACLCA American Center for Life Cycle Assessment Website [EB/OL].<https://aclca.org/>, 2020.
- [69] NETWORK T L. Thai LCA Network Website [EB/OL].<http://thailca.com/>, 2020.
- [70] PUBLIC LAW 110-140—DEC. 19, 2007 Energy independence and security act of 2007[S]. 2007.
- [71] EPA U. Lifecycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions under the Renewable Fuel Standard

- [EB/OL].<https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/lifecycle-analysis-greenhouse-gas-emissions-under-renewable-fuel>, 2020.
- [72] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL T, GUINÉE J, HEIJUNGS R, HELLWEG S, KOEHLER A, PENNINGTON D, SUH S. Recent developments in Life Cycle Assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91 (1): 1-21.
- [73] REBITZER G, EKVALL T, FRISCHKNECHT R, HUNKELER D, NORRIS G, RYDBERG T, SCHMIDT W P, SUH S, WEIDEMA B P, PENNINGTON D W. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications [J]. *Environment International*, 2004, 30 (5): 701-20.
- [74] HENDRICKSON C, HORVATH A, JOSHI S, LAVE L. Peer Reviewed: Economic Input–Output Models for Environmental Life-Cycle Assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32 (7): 184A-91A.
- [75] CURRAN M A, MANN M, NORRIS G. The international workshop on electricity data for life cycle inventories [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13 (8): 853-62.
- [76] LIPPIATT B C, BOYLES A S. Using BEES to select cost-effective green products [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2001, 6 (2): 76-80.
- [77] MCDOUGALL F, WHITE P, FRANKE M, HINDLE P. Integrated solid waste management—a life cycle inventory [M]. Oxford: Blackwell, 2001:
- [78] THORNELOE\* S A, WEITZ K. HOLISTIC APPROACH TO ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE [M]. 9th International Waste Management and Landfill Conference. Sardinia, Italy. 2003.
- [79] EU. European Platform on Life Cycle Assessment-Resources Directory [EB/OL]. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ResourceDirectory/index.xhtml>. 2020
- [80] CONSULTANTS P. Introduction to LCA with SimaPro 7 [M]. The Netherlands: PRé Consultants, 2008:
- [81] EMMERSON R H C, MORSE G K, LESTER J N, EDGE D R. The Life-Cycle Analysis of Small-Scale Sewage-Treatment Processes [J]. *Water and Environment Journal*, 1995, 9 (3): 317-25.
- [82] SOMBEKKE H D M, VOORHOEVE D K, HIEMSTRA P. Environmental impact assessment of groundwater treatment with nanofiltration [J]. *Desalination*, 1997, 113 (2): 293-6.
- [83] LOUBET P, ROUX P, LOISEAU E, BELLON-MAUREL V. Life cycle assessments of urban water systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature [J]. *Water Research*, 2014, 67 187-202.

- [84] BEAVIS P, LUNDIE S. Integrated environmental assessment of tertiary and residuals treatment - LCA in the wastewater industry [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 47 (7-8): 109-16.
- [85] HOSPIDO A, MOREIRA M T, FEIJOO G. A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain) [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13 (1): 57-64.
- [86] KALBAR P P, KARMAKAR S, ASOLEKAR S R. Assessment of wastewater treatment technologies: life cycle approach [J]. *Water and Environment Journal*, 2013, 27 (2):261-8.
- [87] 刘丽. 基于 LCA 的 AAO 与 AO 污水处理工艺比较 [D]: 大连理工大学, 2015.
- [88] RAHMAN S M, ECKELMAN M J, ONNIS-HAYDEN A, GU A Z. Life-Cycle Assessment of Advanced Nutrient Removal Technologies for Wastewater Treatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50 (6): 3020-30.
- [89] ZHANG Y, ZHANG C, QIU Y, LI B, PANG H, XUE Y, LIU Y, YUAN Z, HUANG X. Wastewater treatment technology selection under various influent conditions and effluent standards based on life cycle assessment [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 154 104562.
- [90] BENETTO E, NGUYEN D, LOHMANN T, SCHMITT B, SCHOSSELER P. Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment [J]. *Science of The Total Environment*, 2009, 407 (5): 1506-16.
- [91] GATERELL M R, GRIFFIN P, LESTER J N. Evaluation of Environmental Burdens Associated with Sewage Treatment Processes Using Life Cycle Assessment Techniques[J]. *Environmental Technology*, 2005, 26 (3): 231-50.
- [92] LASSAUX S, RENZONI R, GERMAIN A. Life cycle assessment of water from the pumping station to the wastewater treatment plant [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12 (2): 118-26.
- [93] FOLEY J, DE HAAS D, HARTLEY K, LANT P. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 2010, 44 (5): 1654-66.
- [94] 杨帆. 重庆市城市污水处理厂升级改造的环境影响评价 [D]: 重庆大学, 2014.
- [95] 黄希望, 罗小勇, 李轶, 王大伟. 污水处理厂生命周期评价及不同工艺污水处理系统的环境影响比较分析 [J]. *水资源保护*, 2014, 30 (01): 90-4.
- [96] EC. Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations [J/OL]. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:124:FULL:EN:PDF>, 2013.

- [97] ISO/TS 14072. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines for Organizational Life Cycle Assessment[S].Geneva: International Organization for Standardization., 2014.
- [98] MARTÍNEZ-BLANCO J, INABA A, FINKBEINER M. Life Cycle Assessment of Organizations [M]. 2016: 333-94.
- [99] PEDRAZZANI R, CAVALLOTTI I, BOLLATI E, FERRERI M, BERTANZA G. The role of bioassays in the evaluation of ecotoxicological aspects within the PEF/OEF protocols: The case of WWTPs [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 147742-8.
- [100] 杜细源. 排放标准修订对污水处理厂运营决策的影响研究 [D]: 清华大学, 2015.
- [101] BOSSDORF O, PAREPA M, FISCHER M. Climate-neutral ecology conferences: just do it! [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25 (2): 61.
- [102] HALL E. Alternative futures for academic conferences: a response to Bonnett [J]. *Area*, 2007, 39 (1): 125-9.
- [103] ARCESE G, TRAVERSO M, SKJERVEN A. International Sustainable Development Research Society (ISDRS), “ACTIONS FOR A SUSTAINABLE WORLD: FROM THEORY TO PRACTICE”, 13-15 June 2018, Messina, Italy Track: Gender, Inclusivity and Human Rights [M], 2018:
- [104] LESTER B. Greening the Meeting [J]. *Science*, 2007, 318 (5847): 36-8.
- [105] HISCHIER R, HILTY L. Environmental impacts of an international conference [J]. *Environ Impact Assess Rev*, 2002, 22 (5): 543-57.
- [106] HOLDEN M H, BUTT N, CHAUVENET A, PLEIN M, STRINGER M, CHADÈS I. Academic conferences urgently need environmental policies [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1 (9): 1211-2.
- [107] BIGGIN A. Scientific bodies must take own action on emissions [J]. *Nature*, 2007, 448 (7155): 749-.
- [108] BONNETT A. The need for sustainable conferences [J]. *Area*, 2006, 38 (3): 229-30.
- [109] DRAPER J, DAWSON M, CASEY E. An Exploratory Study of the Importance of Sustainable Practices in the Meeting and Convention Site Selection Process [J]. *Journal of Convention & Event Tourism*, 2011, 12 (3): 153-78.
- [110] GRÉMILLET D. Paradox of flying to meetings to protect the environment [J]. *Nature*, 2008, 455 (7217): 1175-.
- [111] ORSI F. Cutting the carbon emission of international conferences: is decentralization an option? [J]. *Journal of Transport Geography*, 2012, 24 462-6.
- [112] REAY D S. Virtual solution to carbon cost of conferences [J]. *Nature*, 2003, 424 (6946):

- 251-.
- [113] YOUNG S N. Rethinking scientific meetings: an imperative in an era of climate change [J]. *J Psychiatry Neurosci*, 2009, 34 (5): 341-2.
- [114] EPA O. Sustainable Events: Ideas for Incorporating Environmentally Friendly Practices into Meetings and Events [J/OL].<https://www.epa.ohio.gov/Portals/41/recycling/Sustainable%20Events%20Guide%20March%202014.pdf>, 2014.
- [115] CIC, Green Meetings Report [R], 2004.
- [116] DIVISION E C E A. Environment Canada's Green Meeting Guide [J/OL].[https://www.uab.cat/Document/718/434/Green\\_Meeting\\_Guide\\_07.pdf](https://www.uab.cat/Document/718/434/Green_Meeting_Guide_07.pdf), 2007.
- [117] FÄILTE I. A guide to running green meetings and events [J/OL].[https://www.failteireland.ie/FailteIreland/media/WebsiteStructure/Documents/2\\_Develop\\_Your\\_Business/1\\_StartGrow\\_Your\\_Business/Guide-to-Running-Green-Meetings-and-Events-OBT-12LTB-GME-G1-11-12-3.pdf](https://www.failteireland.ie/FailteIreland/media/WebsiteStructure/Documents/2_Develop_Your_Business/1_StartGrow_Your_Business/Guide-to-Running-Green-Meetings-and-Events-OBT-12LTB-GME-G1-11-12-3.pdf).
- [118] GIZ. Guide – Sustainable Event Management [J/OL].<https://reporting.giz.de/wp-content/uploads/sites/8/2019/03/GIZ-Guide-to-Sustainable-Event-Management.pdf>, 2018.
- [119] UNEP. Green Meeting Guide - Roll Out the Green Carpet for Your Participants [J/OL].[http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7834/-Green%20Meeting%20Guide%202009\\_%20Roll%20out%20the%20Green%20Carpet%20for%20your%20Participants-20094067.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7834/-Green%20Meeting%20Guide%202009_%20Roll%20out%20the%20Green%20Carpet%20for%20your%20Participants-20094067.pdf?sequence=3&isAllowed=y), 2009.
- [120] CAMPUS U O S. Sustainable Meetings, Conferences and Events [J/OL].[https://sustainability.usask.ca/documents/Sustainable\\_Conference\\_Guide\\_2014.pdf](https://sustainability.usask.ca/documents/Sustainable_Conference_Guide_2014.pdf), 2014.
- [121] BOGGIA A, MASSEI G, PAOLOTTI L, ROCCHI L, SCHIAVI F. A model for measuring the environmental sustainability of events [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206 836-45.
- [122] NEUGEBAUER S, BOLZ M, MANKAA R, TRAVERSO M. How sustainable are sustainability conferences? – Comprehensive Life Cycle Assessment of an international conference series in Europe [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242 118516.
- [123] 张悦. 环境标准制定的法律问题研究 [D]: 中国矿业大学, 2014.
- [124] 王阳. 环境标准制定问题研究 [D]: 山东科技大学, 2007.
- [125] 李爱军, 李慧玲. 环境与资源保护法 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008:
- [126] GBT 16733-1997. 国家标准制定程序的阶段划分及代码[S]. 1997.
- [127] 钟铨章. 申报和制定国家标准 行业标准、地方标准的流程步骤 [J]. *中国军转民*, 2018, (07): 57-9.
- [128] LONGO S, D'ANTONI B M, BONGARDS M, CHAPARRO A, CRONRATH A, FATONE F,

- LEMA J M, MAURICIO-IGLESIAS M, SOARES A, HOSPIDO A. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement [J]. *Applied Energy*, 2016, 179 1251-68.
- [129] SABEEN A H, NOOR Z Z, NGADI N, ALMURAISSY S, RAHEEM A B. Quantification of environmental impacts of domestic wastewater treatment using life cycle assessment: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190 221-33.
- [130] 中华人民共和国环境保护部, 2010 中国环境状况公报 [R]: 中华人民共和国环境保护部, 2010.
- [131] 环境保护部办公厅. 关于征求国家环境保护标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(征求意见稿) 意见的函 [EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201511/t20151111\\_316837.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201511/t20151111_316837.htm), 2015.
- [132] 国家环保总局. 关于发布《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 修改单的公告 [EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/gg/200910/t20091021\\_171628.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/gg/200910/t20091021_171628.htm), 2006.
- [133] 中华人民共和国生态环境部. 国家环境保护标准制修订工作管理办法 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201703/W020170301384596347599.pdf>, 2017.
- [134] 中华人民共和国生态环境部. 关于公布 2013 年全国城镇污水处理设施名单的公告 [EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201404/t20140415\\_270550.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201404/t20140415_270550.htm), 2014.
- [135] 马小杰, 段国华, 王建军. 执行 GB 18978 准IV类地表水的污水处理工艺 [J]. *水处理技术*, 2017, 43 (12): 131-4.
- [136] 谢勇. 青浦第二污水厂运行现状及三期工程设计与运行 [J]. *城市道桥与防洪*, 2012, (09): 145-8+334.
- [137] 王松, 王拓. 准IV类水排放标准——东营五六干合排污水处理厂工程设计 [J]. *天津建设科技*, 2019, 29 (S1): 113-5.
- [138] 乐华斌, 赖辉辉. 厌氧/二级 AO+高效沉淀/反硝化深床滤池工艺用于污水厂准IV类提标扩建 [J]. *广东化工*, 2018, 45 (11): 211-2+25.
- [139] GALLEGO A, HOSPIDO A, MOREIRA M T, FEIJOO G. Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52 (6): 931-40.
- [140] HOSPIDO A, MOREIRA M T, FERNÁNDEZ-COUTO M, FEIJOO G. Environmental performance of a municipal wastewater treatment plant [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004, 9 (4): 261.
- [141] RENZONI R, GERMAIN A. Life Cycle Assessment of Water: From the pumping station to the wastewater treatment plant (9 pp) [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*,

- 2007, 12 (2): 118-26.
- [142] BRAVO L, FERRER I. Life Cycle Assessment of an intensive sewage treatment plant in Barcelona (Spain) with focus on energy aspects [J]. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2011, 64 440-7.
- [143] OPPER T, FRIEDLER E. Reducing inventory data requirements for scenario representation in comparative life cycle assessment (LCA), demonstrated on the urban wastewater system [J]. *Urban Water Journal*, 2015, 1-14.
- [144] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 给水排水设计手册第三版第 5 册城镇排水 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 848.
- [145] 高俊发, 王社平. 污水处理厂工艺设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003:
- [146] 柴晓利, 冯沧, 党小庆. 环境工程专业毕业设计指南 [M]: 化学工业出版社, 2008:
- [147] BONABEAU E, DORIGO M, THERAULAZ G. *Swarm Intelligence : From Natural to Artificial Systems* / E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz [J]. 2001,
- [148] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Positive Feedback as a Search Strategy [J]. *Tech rep*, 91-016, Dip Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1999,
- [149] M. DORIGO. *Optimization, learning and natural algorithms (in italian)* [D]. Italy: Politecnico di Milano, 1992.
- [150] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 1996, 26 (1): 29-41.
- [151] DENEUBOURG J L, ARON S, GOSS S, PASTEELS J M. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant [J]. *Journal of Insect Behavior*, 1990, 3 (2): 159-68.
- [152] DORIGO M, BIRATTARI M, STÜTZLE T. Ant Colony Optimization: Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique [J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, 1 28-39.
- [153] DORIGO M, CARO G D. Ant colony optimization: a new meta-heuristic[C]. 1470-7 Vol. 2.
- [154] DORIGO M, CARO G D, GAMBARDELLA L M. Ant Algorithms for Discrete Optimization [J]. *Artificial Life*, 1999, 5 (2): 137-72.
- [155] PASTEELS J M, DENEUBOURG J L, GOSS S. Self-organization mechanisms in ant societies (I): Trail recruitment to newly discovered food sources [J]. *Experientia Supplementum*, 1987, 54
- [156] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Dipartimento Di Elettronica - Politecnico Di Milano [J]. 1999,

- [157] SCHLUTER M, EGEA J A, ANTELO L T, ALONSO A A, BANGA J R. An Extended Ant Colony Optimization Algorithm for Integrated Process and Control System Design [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48 (14): 6723-38.
- [158] RAO K R, SRINIVASAN T, VENKATESWARLU C. Mathematical and kinetic modeling of biofilm reactor based on ant colony optimization [J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45 (6): 961-72.
- [159] VERDAGUER M, CLARA N, POCH M. Ant colony optimization-based method for managing industrial influents in wastewater systems [J]. *Aiche J*, 2012, 58 (10): 3070-9.
- [160] MOEINI R, AFSHAR M H. Constrained Ant Colony Optimisation Algorithm for the layout and size optimisation of sanitary sewer networks [J]. *Urban Water Journal*, 2013, 10 (3): 154-73.
- [161] VERDAGUER M, CLARA N, GUTIERREZ O, POCH M. Application of Ant-Colony -Optimization algorithm for improved management of first flush effects in urban wastewater systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 485: 143-52.
- [162] HOU J, HO B, SUN S. Spatial Optimization of Low-Impact Development Facilities Based on a p-Median Model and an Ant Colony Optimization [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2019, 24 (12):
- [163] GUE I H V, FELIX C, MAYOL A P, UBANDO A T, IEEE. Application of Ant Colony Optimization on Transport Route of Algal Biofuels in the Philippines [M]. New York: Ieee, 2015:
- [164] NG C Y, LAM S S, SAMUEL C P M. Logistic sequencing for improving environmental performance using ant colony optimization [J]. *Environ Impact Assess Rev*, 2019, 77: 182-90.
- [165] NG C Y. Green product design and development using life cycle assessment and ant colony optimization [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2018, 95 (5-8): 3101-9.
- [166] 吴欣, 刘熠娜, 任宜欣, 臧爽. 高校碳足迹指标体系核算及减排策略研究: 以西北大学为例 [J]. *环境科学与技术*, 2019, 42 (S1): 187-93.
- [167] 王塘. 《建筑防腐蚀工程施工及验收规范》有关涂料内容修订的专题研讨会纪实 [J]. *腐蚀与防护*, 1999, (12): 564-5.
- [168] 苏琼. 《检测和校准实验室能力的通用要求》GB/T15481-2000(ISO/IEC17025)标准宣培训会议纪要 [J]. *中国标准化*, 2001, 000 (10): 4.
- [169] 亚洲环保. 关于举办城镇排水与污水处理行业高级研修班的通知 [EB/OL]. [https://www.sohu.com/a/317005076\\_120067896](https://www.sohu.com/a/317005076_120067896), 2019.
- [170] 中华人民共和国住房和城乡建设部城市建设司, 中华人民共和国住房和城乡建设部法规司, 中华人民共和国住房和城乡建设部人事司. 关于举办《城镇排水与污水处理条例》

- 宣贯培训班的通知 [J/OL].[http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201310/t20131021\\_215922.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201310/t20131021_215922.html), 2013.
- [171] 活动家. 海绵城市大会 [EB/OL].<https://www.huodongjia.com/tag/11631/>, 2020.
- [172] 亚洲环保. 2019 年中国污水处理厂提标改造（污水处理提质增效）高级研讨会 [EB/OL].<http://www.asia-ep.net/newsshow.php?cid=10&id=2811>, 2019.
- [173] YAN X, LI L, LIU J. Characteristics of greenhouse gas emission in three full-scale wastewater treatment processes [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26 (2): 256-63.
- [174] WANG D, GUO F, WU Y, LI Z, WU G. Technical, economic and environmental assessment of coagulation/filtration tertiary treatment processes in full-scale wastewater treatment plants [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170 1185-94.
- [175] KYUNG D, KIM M, CHANG J, LEE W. Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 95 117-23.
- [176] BAO Z, SUN S, SUN D. Assessment of greenhouse gas emission from A/O and SBR wastewater treatment plants in Beijing, China [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 108 108-14.
- [177] INCOPA. Life Cycle Analysis of Leading Coagulants: Executive Summary [J/OL].[https://www.incopa.org/wp-content/uploads/2019/02/INCOPA\\_LCA\\_Executive\\_Summary\\_web.pdf](https://www.incopa.org/wp-content/uploads/2019/02/INCOPA_LCA_Executive_Summary_web.pdf), 2014.
- [178] INTERNATIONAL P. GaBi Education-Handbook for Life Cycle Assessment (LCA) : Using the GaBi Education Software Package [M/OL].[http://www.gabi-software.com/fileadmin/gabi/tutorials/Paperclip\\_Tutorial\\_Handbook\\_4.4.pdf](http://www.gabi-software.com/fileadmin/gabi/tutorials/Paperclip_Tutorial_Handbook_4.4.pdf), 2009.
- [179] 李天鹏. 高铁出行已经成为人们的主要出行方式 [J/OL].<https://www.chnrailway.com/html/20191009/1887088.shtml>, 2019.
- [180] CALDERYS. 61st International Colloquium on Refractories 2018 [EB/OL].<https://www.calderys.com/events/61st-international-colloquium-on-refractories-2018>, 2018.



## 附 录

## A. 作者在攻读硕士学位期间发表的论文目录

- [1] Chanyu Yang, Wenchao Jiang, Na Jian. Life Cycle Environmental Impact Assessment of Three Urban Drainage Systems for Non-Point Source Pollution Control [J]. Journal of Coastal Research. 2020. (Accepted)
- [2] Chanyu Yang, Fiachra O' Loughlin. Flow Prediction using Remotely Sensed Soil Moisture in Irish Catchments [J]. Water. 2020. (In revisions)

## B. 学位论文数据集:

关键词		密级	中图分类号
生命周期评价; 准IV类标准; 城镇污水厂; 提标改造; 环境影响		公开	TU
学位授予单位名称	学位授予单位代码	学位类别	学位级别
重庆大学	10611	学术学位	硕士
论文题名		并列题名	论文语种
我国城镇污水厂施行准IV类排放标准的 生命周期环境影响评价研究		无	中文
作者姓名	杨禅宇	学号	20171702038t
培养单位名称		培养单位代码	
重庆大学		10611	
学科专业	研究方向	学制	学位授予年
市政工程	山地城镇排水设施建 设及高效运行技术	3 年	2020 年
论文提交日期	2020.07	论文总页数	128
导师姓名	姜文超	职称	副教授
答辩委员会主席		万巧玲 教授级高工	
电子版论文提交格式			
文本 (√) 图像 ( ) 视频 ( ) 音频 ( ) 多媒体 ( ) 其他 ( )			



## 致 谢

在这三年的硕士研究生学习期间，首先，感谢重庆大学和爱尔兰都柏林大学对我的联合培养，让我在强化科研训练和丰富课程学习的同时，有更多国际交流机会，以及提升英语能力的机会。同时，感谢学院、课题组给我创造了一个良好的学术平台。

然后，衷心感谢导师姜文超对我的谆谆教诲。其科研思维独到、学术作风严谨、人生阅历丰富，让我在学习的过程中获益良多。从论文选题、方法框架设计、结果分析到论文撰写与修改，姜老师都不厌其烦地为我指点迷津，让我对生命周期分析有了更加全面和深入的理解，也对污水处理厂污染物排放标准的制定工作有了更多的认识。

同时，要感谢我的同窗杨希和陈琴，在这三年里对我给予的帮助和支持。感谢师兄杨帆，师姐建娜、刘秋虹，在生命周期分析方法上予以支持、帮助和鼓励。感谢师兄许雨桐、黄常，师姐漆露、孔焯、陈卫佳，师弟张卓群、梁鸿博、李剑秋、辜宇，师妹周艳妮，在工作、学习、生活上给予的帮助。感谢舍友张雨诗、黎治平、蔡芳芳，在论文撰写期间给予的支持、关心和鼓励。

最后，感谢我的父母。在外求学奔走于粤渝两地之间的我，从此故乡只有冬夏，再无春秋。你们在精神上和物质上给予的关心、支持和鼓励，便是我一路向前的铠甲。

衷心感谢所有关心、支持、帮助我的老师、同学、家人、朋友们。

此致

**杨禅宇**

二〇二〇年七月 于重庆

