

文章编号:1671-1556(2019)06-0122-06

地下土壤渗滤系统处理农村生活污水的生命周期评价

吕慧瑜^{1,2},高生旺¹,黄秋霖³,王丽君¹,夏训峰¹

(1.中国环境科学研究院,北京 100012;2.北京化工大学,北京 100029;
3.苍南县建筑设计研究院,浙江 温州 325800)

摘要:利用 ebalance ECER 软件,对地下土壤渗滤系统进行生命周期评价,对比分析其生命周期各个过程中非生物资源耗竭、酸化、富营养化、全球变暖和固体废物等主要环境影响类型,并确定了主要的环境影响类型和造成环境影响的关键环节。结果表明:富营养化和全球变暖是地下土壤渗滤系统环境影响的主要类型,分别占地下土壤渗滤系统环境影响总值的 75.9%和 13.5%;地下土壤渗滤系统环境影响大小的顺序依次为富营养化、全球变暖、酸化、固体废物和非生物资源耗竭。通过对地下土壤渗滤系统的研究,可为农村污水处理工艺的生命周期评价提供数据支持,并推动农村生活污水处理的可持续发展。

关键词:地下土壤渗滤系统;农村生活污水;生命周期评价;环境影响评价

中图分类号:X820.3 **文献标识码:**A **DOI:**10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2019.06.018

Life Cycle Assessment of Subsurface Soil Infiltration System in Rural Domestic Sewage Treatment

LYU Huiyu^{1,2},GAO Shengwang¹,HUANG Qiulin³,WANG Lijun¹,XIA Xunfeng¹

(1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences,Beijing 100029,China;
2.Beijing University of Chemical Technology,Beijing 100012,China;3.Cangnan County
Architectural Design and Research Institute,Wenzhou 325800,China)

Abstract: This paper presents Life Cycle Assessment (LCA) of the subsurface soil infiltration system (SSIS) using ebalance ECER and evaluates the environmental impact potentials during each process of the system. The paper analyzes and compares the main environmental impact types such as Abiotic Depletion (ADP), Acidification Potential (AP), Eutrophication Potential (EP), Global Warming Potential (GWP) and solid waste in each process of life cycle, and identifies the main types of environmental impacts and the key links that cause the environmental impacts. The results show that compared to other environmental impact potentials, the EP and GWP potentials are the main influenced types, which account for 75.9% and 13.5% respectively. Regarding the extent of environmental impacts of subsurface soil infiltration system, these parameters can be ordered as EP, GWP, AP, Solid Waste and ADP. Compared to other stages, septic-tank exerts the most destructive influence on the environment with the contribution proportion of 83%. Due to the consumption of resources and transport capacity, the highest ADP, AP and GWP values are generated during septic-tank stage. Sewage collection stage has the highest Waste Solids value. The paper studies the LCA of SIS, which provides data for LCA of rural sewage treatment technology and promotes the sustainable development of rural sewage treatment.

Key words: subsurface soil infiltration system; rural domestic sewage; Life Cycle Assessment; environmental impact assessment

长期以来,生活污水的治理主要集中在城市人口密集地区,而多数农村地区因无管网覆盖而难以

收稿日期:2018-06-17 修回日期:2019-11-08

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2015ZX07103-007)

作者简介:吕慧瑜(1994—),女,硕士,主要研究方向为污水处理技术的生命周期评价。E-mail:1533619292@qq.com

收集,一般经过简易三格化粪池处理后直接排入周边水体,对水环境造成了严重的污染,影响了农村居民的身体与健康与经济发展^[1-3]。

地下土壤渗滤系统是一种基于生态学原理的分散式污水处理技术,具有出水水质稳定、受季节影响小、运行费用低等优点^[4-5]。该污水处理系统在运行过程中可降低原水中的污染物,但其从建设到运行的生命周期过程中也会消耗资源、能源并排放污染物。传统上对污水处理技术的评价多考虑其技术经济因素,而没有加入环境因素的考量,忽略了污水处理设施在建设和运行期间直接和间接的环境排放负面影响。因此,污水处理技术自身建设和运行产生的环境影响也应当作为技术评估的重要内容。

生命周期评价(Life Cycle Assessment,简称LCA)是从生命周期视角对产品进行环境影响评价的一种环境管理工具。LCA在国内外已经得到了广泛的应用,取得了很多成果。目前,已有学者对污水生态处理技术进行了生命周期评价及其对比研究,如Valerie等^[6]对垂直流和水平流人工湿地进行了生命周期对比研究,结果表明垂直流人工湿地总的环境较小;Zhao等^[7]对比分析了天津垂直流和水平流人工湿地的温室气体排放;赵玉峰^[8]采用LCA方法对表面流人工湿地等面源污染治理技术的环境影响进行了生命周期评价。但上述这些研究都没有把污泥处理分析加入LCA到研究中。为此,本文将系统运行期间的直接污染物排放以及废弃物和污泥的处理分析加入地下土壤渗滤系统的生命周期评价研究中,对比分析了生命周期各个过程中非生物资源耗竭、酸化、富营养化、全球变暖和固体废物等环境影响类型,并确定了主要的环境影响类型和造成环境影响的关键环节,形成对地下土壤渗滤系统完整的生命周期评价研究。

1 地下土壤渗滤系统生命周期评价

1.1 目标与范围定义

本文以上海市某村庄的污水处理系统——地下土壤渗滤系统作为研究对象^[2,9],该地下土壤渗滤处理系统的工艺流程为:生活污水→化粪池→格栅→调节池→地下渗滤场→出水排放→污泥处理。根据国内现有的数据资料,本文利用 ebalance ECER 软件对地下土壤渗滤系统进行生命周期评价,目的在于分析地下土壤渗滤处理技术的环境影响类型及其水平,确定其造成环境影响的关键环节,为农村生活污水生态处理技术的生命周期评价提供数据支

持,为农村污水处理技术的进一步改善提供科学依据。

本次LCA研究的功能单元为处理 1 m^3 生活污水,研究范围界定为地下土壤渗滤系统的建设阶段和运行阶段,废弃阶段暂不考虑。该系统边界主要为污水处理设施的建设、污水处理及副产品的处理过程,包括污水处理设施的建设、污水的处理、废弃物和污泥的处理及出水排放,见图1。其整个污水处理系统设计处理水量为 $100\text{ m}^3/\text{d}$,生命周期设定为20年。

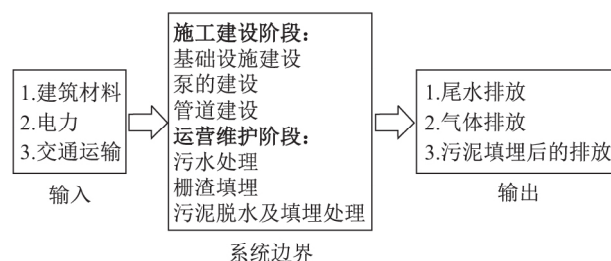


图1 地下土壤渗滤系统边界

Fig.1 Boundary of subsurface soil infiltration system

1.2 地下土壤渗滤系统清单数据分析

LCA研究的范围主要包括污水处理系统的建设阶段和运行阶段,建设阶段考虑产品的生产和运输过程,运行阶段考虑电力消耗和环境排放以及废弃物和污泥处理过程的电耗和污染物排放。数据来源主要为:原材料开采、生产过程、运输、电力生产数据来自中国生命周期参考数据库(CLCD)^[10];运行过程中温室气体的排放数据主要参考IPCC指南和相关文献的研究成果^[11-13];栅渣和污泥处理的能耗及其污染物排放数据参考曹秀芹等^[3]和刘夏璐等^[10]的研究成果。

地下土壤渗滤系统的建筑材料主要包括砖块、混凝土、砂、碎石、聚氯乙烯薄膜、水泥、黏土、炉渣和土工布等。本研究不将工业废弃物炉渣作为资源消耗,这里只考虑运输这些废弃物的能源消耗及排放^[14]。水泥、混凝土、砖块、砂、碎石、黏土、聚氯乙烯薄膜和土工布等材料生产过程中污染物排放数据以及运输、电力生产的数据均来自CLCD。假定所有原材料和最终产品均由 10 t 载重柴油汽车运输,最终产品的平均运输距离为 100 km ,栅渣和污泥外运处置的运输距离为 50 km 。其中,污泥浓缩脱水后和栅渣外运进行填埋处置。

地下土壤渗滤系统的能源消耗主要包括柴油消耗和电耗。其中,电力主要用于土壤渗滤场的格栅和水泵的运行;柴油用于土方开挖以及原材料、建筑材料、栅渣和污泥的运输^[15]。

本文考虑的直接排放的环境污染物主要有 CH_4 和 N_2O 。其中, CH_4 主要来自于化粪池中粪便的消化和土壤渗滤场的排放; N_2O 主要来自于土壤渗滤场的排放。化粪池的处理效率为 50%, CH_4 的排放量采用 IPCC 的 CH_4 排放因子进行计算^[11]:

CH_4 排放因子 (EF) = 最大 CH_4 产生能力 (Bo) $\times$ CH_4 转换因子 (MCF) (1)

化粪池的 Bo 取值为 $0.6 \text{ kgCH}_4/\text{kgBOD}$, MCF 取值为 0.1 (定期掏空), 因此 CH_4 排放因子为

$0.06^{[12]}$ 。根据污水中的有机物含量和排放因子, 计算出化粪池 CH_4 的单位排放量为 0.012 kg/d 。地下土壤渗滤系统的进水中, 有 $0.8\% \sim 1.3\%$ 的 BOD 转换成 CH_4 气体, 有 $2.4\% \sim 3.7\%$ 的总氮转换成 N_2O 气体^[13]。

地下土壤渗滤系统输入与输出的能量和物质见表 1。由整个系统的输入与输出的能量和物质数据, 可以得到地下土壤渗滤系统以功能单位为依据的生命周期清单表, 见表 2。

表 1 地下土壤渗滤系统输入与输出的能量和物质

Table 1 Energy and matter input and output from subsurface soil infiltration system

项目	水质指标					能源消耗		建筑材料			日湿污泥产量/ m^3/h	污泥脱水耗电/ $[(\text{kW} \cdot \text{h})/(\text{tDM})^{-1}]$	污泥填埋温室气体排放量/ $(\text{kgCH}_4 \cdot \text{m}^{-3} \text{ 湿污泥})$
	$\text{COD}_{\text{Cr}}/$ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{BOD}_5/$ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{SS}/$ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NH}_3\text{-N}/$ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{TP}/$ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	日电耗量/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$	混凝土/ m^3	PVC 管/ m	卵石/ m^3	粗砂/ m^3			
输入值	350	200	150	30	5	12	113.15	2 500	912.5	1 467.5			
输出值	25	15	15	6	0.6						0.2	12	19.7

表 2 地下土壤渗滤系统的生命周期清单表

Table 2 Life cycle inventory of the energy and matter input and output from subsurface soil infiltration system

输入值												输出值					
砖块	混凝土	水泥砂浆	钢筋	PVC	砂	不锈钢	铸铁	电耗	碎石	土壤	土工布	CH ₄	N ₂ O	COD	氨氮	总磷	
0.425	0.372	0.241	0.002 62	0.051 9	2.251	0.000 192	0.000 082 2	0.090 3	1.598	0.726	0.001 40	0.011 0	0.001 2	0.02	0.003	0.001	

注:表中除电耗单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 外,其他单位均为 kg/m^3 。

1.3 地下土壤渗滤系统生命周期的环境影响评价

1.3.1 环境影响的分类

针对地下土壤渗滤系统,本文主要考虑的环境影响类型有非生物资源耗竭(ADP)、酸化(AP)、富营养化(EP)、全球变暖(GWP)和固体废物(Solid Waste)。根据 ebalance ECER 软件中内置的分类原则,对地下土壤渗滤系统的原材料消耗、能源消耗和环境排放物质清单进行了分类,归纳出不同的环境影响类型,见表 3。

表 3 地下土壤渗滤系统环境影响的分类

Table 3 Classification for the environmental impact of subsurface soil infiltration system

环境影响类型	相关环境负荷项目	环境影响参照物	归一化标准/ $[\text{kg} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}]$
非生物资源耗竭(ADP)	矿物消耗	1 kg 原油	3.270×10^{11}
酸化(AP)	$\text{SO}_2, \text{NO}_x, \text{HCl}, \text{HF}, \text{NH}_4^+$	1 kg SO_2	3.160×10^{10}
富营养化(EP)	$\text{PO}_4^{3-}, \text{NO}_x, \text{硝酸盐}, \text{NH}_4^+$	1 kg PO_4^{3-}	5.510×10^8
全球变暖(GWP)	$\text{CO}_2, \text{N}_2\text{O}, \text{CH}_4, \text{CFCs}$	1 kg CO_2	6.350×10^{12}
固体废物(Solid Waste)	废物	1 kg 废物	1.340×10^{12}

1.3.2 环境影响的特征化分析

根据 ebalance ECER 软件中内置的特征化模型,对地下土壤渗滤系统生命周期的环境影响进行特征化分析,其结果见表 4。

表 4 地下土壤渗滤系统生命周期的环境影响特征化分析结果(单位: kg/m^3)

Table 4 Characterization of the life cycle environmental impact of subsurface soil infiltration system (unit: kg/m^3)

过程	ADP	AP	EP	GWP	Waste Solids
化粪池	2.21×10^{-7}	1.09×10^{-3}	1.29×10^{-4}	3.60×10^{-1}	1.28×10^{-2}
格栅	1.60×10^{-8}	9.77×10^{-5}	6.87×10^{-6}	1.86×10^{-2}	4.20×10^{-3}
调节池	6.64×10^{-8}	4.86×10^{-4}	3.43×10^{-5}	9.24×10^{-2}	1.85×10^{-2}
地下渗滤场	6.61×10^{-7}	2.60×10^{-3}	6.62×10^{-4}	6.02×10^{-1}	1.75×10^{-2}
出水排放	0	0	5.28×10^{-3}	0	0
污泥处理	7.79×10^{-9}	5.76×10^{-5}	9.82×10^{-6}	7.70×10^{-2}	1.19×10^{-4}
总值	9.72×10^{-7}	4.32×10^{-3}	6.12×10^{-3}	1.15	5.32×10^{-2}

1.3.3 环境影响的归一化处理

利用 ebalance ECER 软件中特有的 CN-2005 归一化模型,对地下土壤渗滤系统生命周期的环境影响特征化分析结果进行归一化处理,其结果见表 5。

表 5 地下土壤渗滤系统生命周期的环境影响归一化分析结果

Table 5 Nomalization of the life cycle environmental impact of subsurface soil infiltration system

过程	ADP	AP	EP	GWP	Waste Solids
化粪池	1.10×10^{-15}	1.61×10^{-14}	1.64×10^{-14}	4.33×10^{-14}	9.55×10^{-15}
格栅	7.97×10^{-17}	1.44×10^{-15}	8.72×10^{-16}	2.24×10^{-15}	3.13×10^{-15}
调节池	3.31×10^{-16}	7.19×10^{-15}	4.36×10^{-15}	1.11×10^{-14}	1.38×10^{-14}
地下渗滤场	3.29×10^{-15}	3.84×10^{-14}	8.40×10^{-14}	7.25×10^{-14}	1.31×10^{-14}
出水排放	0	0	6.70×10^{-13}	0	0
污泥处理	3.88×10^{-17}	8.51×10^{-16}	1.25×10^{-15}	9.27×10^{-15}	8.86×10^{-17}
总值	4.84×10^{-15}	6.39×10^{-14}	7.77×10^{-13}	1.39×10^{-13}	3.97×10^{-14}

2 评价结果分析

2.1 地下土壤渗滤系统生命周期的环境影响分析

根据表 5 的归一化分析结果,可得出地下土壤渗滤系统生命周期的环境影响归一化值,见图 2。

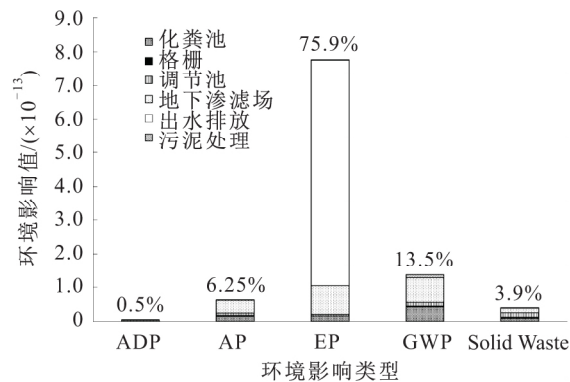


图 2 地下土壤渗滤系统生命周期的环境影响归一化值
Fig.2 Normalization of the life cycle impact assessment of subsurface soil infiltration system

由图 2 可见,地下土壤渗滤系统生命周期的环境影响归一化值大小依次为富营养化、全球变暖、酸化、固体废物和非生物资源耗竭。其中,富营养化是地下土壤渗滤系统环境影响的主要类型,占环境影响总值的75.9%;全球变暖次之,占环境影响总值的13.5%;酸化占环境影响总值的6.2%;固体废物占环境影响总值的3.9%;非生物资源耗竭的环境影响归一化值最小。

富营养化是地下土壤渗滤系统环境影响最主要的类型,它的环境负荷绝大部分来自出水排放,而出水中含有的氮、磷造成了富营养化影响,因此可通过优化地下土壤渗滤系统设计的方式来改善出水水质;全球变暖的环境影响主要来源于地下渗滤场、化粪池的温室气体排放,化粪池厌氧反应释放了大量

的CH₄,而地下渗滤场运行时产生了CH₄和N₂O温室气体;酸化的环境影响主要来自建筑材料的生产过程、柴油货车运输过程中排放的SO₂和NO_x;固体废物的环境影响主要来源于化粪池、调节池和地下渗滤场。

对地下土壤渗滤系统各部分(包括污水收集阶段和处理出水排放阶段)的环境影响值和环境影响比例绘图,其结果见图 3 和图 4。

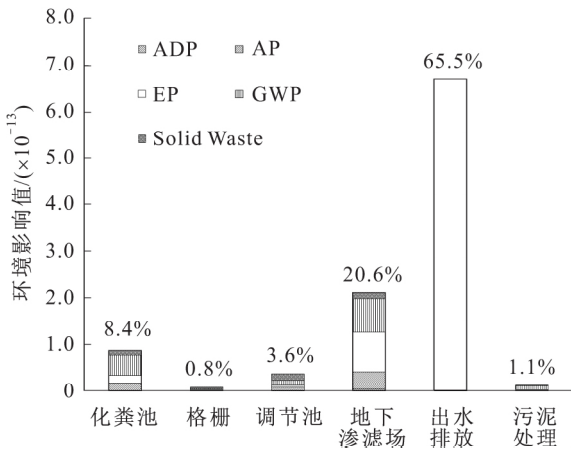


图 3 地下土壤渗滤系统各部分的环境影响值
Fig.3 Environmental impact value of various parts in subsurface soil infiltration system

由图 3 可见,地下土壤渗滤系统出水排放部分的环境影响值最大,占地下土壤渗滤系统环境影响总值的65.5%;地下渗滤场次之,占环境影响总值的20.6%;化粪池的环境影响再次之,占环境影响总值的8.4%;其他部分的环境影响较小,占环境影响总值的6%左右。

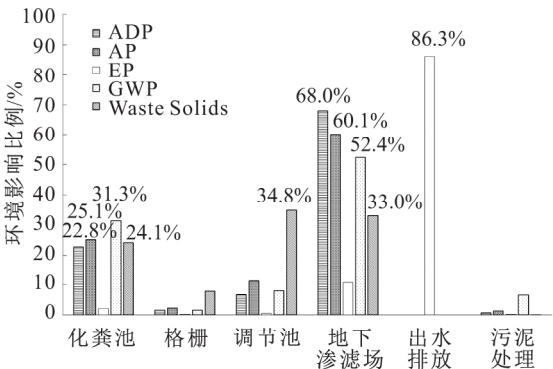


图 4 地下土壤渗滤系统各部分的环境影响比例
Fig.4 Environmental impact potential proportion of various parts in subsurface soil infiltration system

由图 4 可见,地下土壤渗滤系统出水排放部分

具有富营养化的环境影响比例最大值,占富营养化环境影响总值的 86.3%,这是由于出水中的氮、磷造成了富营养化影响;地下渗滤场的非生物资源耗竭、酸化、全球变暖的环境影响比例均为各部分环境影响比例的最大值,分别占各环境影响类型总值的 68.0%、60.1%、52.4%,这是由于地下渗滤场面积较大,土方开挖时挖掘机所需的能源消耗较多且需要大量填料,而建筑材料的运输过程消耗柴油并排放大量的污染物,因此造成非生物资源耗竭和酸化的环境影响较大,另外地下渗滤场运行时排放的温室气体 N_2O 和 CH_4 虽然排放量不大,但温室效应明显;固体废物的影响主要来源于调节池水泵的电耗和地下渗滤场发电过程中产生的废弃物。

表 6 地下土壤渗滤系统各部分的主要原材料、运输、电力清单数据的敏感度分析

Table 6 Sensitivity analysis on raw materials, transport, and electricity inventory of various parts in subsurface soil infiltration system

清单数据	S_{mn}				
	ADP	AP	EP	GWP	Waste Solids
砖块投入	0.058 303 748	0.130 711 004	0.005 757 374	0.077 005 064	0.061 960 144
混凝土投入	0.042 114 122	0.035 065 691	0.002 928 805	0.044 759 983	-0.140 534 367
PVC 投入	0.031 541 322	0.038 821 367	0.001 618 122	0.032 470 872	0.288 602 546
运输投入	0.420 370 467	0.551 887 512	0.063 126 812	0.093 520 713	0.012 075 752
电耗投入	0.066 412 628	0.141 884 686	0.005 895 587	0.092 423 505	0.391 786 100
钢筋投入	0.089 198 855	0.007 4271 69	0.000 444 263	0.006 161 840	0.298 789 605

由表 6 可知,运输投入对 LCA 结果的影响最大,要减小地下土壤渗滤系统各环境影响指标的影响值,就要减少运输距离、柴油消耗或排放;运输投入是影响 ADP、AP、EP、GWP 指标最关键的清单数据,钢筋投入对 ADP 指标也有部分影响,电耗投入是影响固体废物的指标最关键的清单数据,而混凝土投入和砖块投入对各环境影响指标的影响相对较小。

2.3 改进建议

(1) 通过优化地下土壤渗滤系统的设计来提高系统的处理效率,改善出水水质。在应用地下土壤渗滤系统来去除污染物时,基质具有重要的作用价值,所以通过改良系统中的基质可以提升渗透速率,进而增强水力负荷;另一个提高系统处理效率的方法是改进系统填料的类型和设置^[17],这是当前解决地下土壤渗滤系统处理效率不高的重要手段。

(2) 减少温室气体排放是减小全球变暖潜值的主要措施。在保证化粪池中粪便消化时间的情况下,适当缩短化粪池掏空的周期,可以减少化粪池 CH_4 的排放;通过对地下土壤渗滤场进行通风,增大渗滤系统的 ORP 值,可减少渗滤系统 CH_4 和

2.2 地下土壤渗滤系统清单数据的敏感度分析

敏感度分析是定量分析数学模型输入变量对输出结果影响程度的方法^[16]。分析清单数据(清单数据可反映单位变化率引起的指标变化率)对各指标的灵敏度,可辨识最有效的改进点。敏感度定义为

$$S_{mn} = (\Delta O_m / O_m) / (\Delta I_n / I_n) \quad (2)$$

式中: S_{mn} 为 I_n 对 O_m 的敏感度; O_m 为第 m 种未达标的 LCA 结果指标值; $\Delta O_m / O_m$ 为未达标指标值变化率; I_n 为第 n 种过程清单数据值; $\Delta I_n / I_n$ 为清单数据值变化率。

根据生命周期环境影响评价结果对地下土壤渗滤系统各部分的主要原材料、运输、电力清单数据进行敏感度分析,其结果见表 6。

N_2O 的排放^[13]。

(3) 合理选用运输的渠道和能源,降低运输能耗和环境排放。根据以往交通运输业完成单位换算周转量的碳排放量数据来看,铁路运输的单位换算周转量的碳排放量为 0.021 7 kg/(t·km),公路运输为 0.121 8 kg/(t·km),水路运输为 0.011 5 kg/(t·km)^[18],因此部分路段可以考虑采用铁路运输的方式。

(4) 目前关于污水泵采取的节能技术措施主要包括^[19]:科学设置水泵的运行台数,合理调节水泵的运行工况;应用水泵的变频调速技术和优化组合控制技术;对水泵采用变角变速调节和削切叶轮直径;对泵壳和泵轮进行表面处理及抗腐蚀处理。

3 结 论

(1) 地下土壤渗滤系统处理 1 m³ 农村生活污水的非生物资源耗竭、酸化、富营养化、全球变暖和固体废物环境影响归一化值分别为 4.84×10^{-15} 、 6.39×10^{-14} 、 7.77×10^{-13} 、 1.39×10^{-13} 和 3.97×10^{-14} ,富营养化和全球变暖是地下土壤渗滤系统环

境影响的主要类型。

(2) 整个地下土壤渗滤系统中,出水排放的环境影响值最大,且由于出水中的氮磷排放,其环境影响表现为富营养化。地下渗滤场的环境影响值次之,这是由于建设期的能源和建筑材料的消耗、建筑产品运输过程中柴油消耗和环境排放,以及运行时的温室气体排放,其非生物资源耗竭、酸化、全球变暖和固体废物的环境影响值为地下土壤渗滤系统各部分环境影响的最高值。

(3) 从环保角度出发,地下土壤渗滤系统的主要环境影响类型为富营养化和全球变暖,主要影响因素为出水排放。因此,应着重考虑优化地下土壤渗滤系统的设计,改善出水水质;同时,采取措施减少化粪池和地下土壤渗滤场的温室气体排放,共同达到减小地下土壤渗滤系统处理生活污水的环境负荷的目的。

(4) 地下土壤渗滤系统各部分的主要原材料、运输、电力清单数据的敏感度分析表明:运输投入是影响酸化、富营养化指标的最关键的清单数据,砖块投入是影响全球变暖指标的关键清单数据,而电耗投入是影响固体废物指标的最关键的清单数据。因此,减少运输中柴油消耗和环境排放,以及减少砖块和电耗投入是降低地下土壤渗滤系统环境负荷的主要切入点。

参考文献:

- [1] 刘洪喜.农村生活污水处理技术的探讨[J].污染防治技术,2009,22(3):30-31,78.
- [2] 闫亚男,张列宇,席北斗,等.改良化粪池/地下土壤渗滤系统处理农村生活污水[J].中国给水排水,2011,27(10):69-72.
- [3] 曹秀芹,张楠,吕小凡.基于能值分析的农村污水处理工艺可持续性评价[J].环境工程学报,2015,9(11):5447-5454.
- [4] 李晓东,安乐,晁雷,等.地下渗滤系统存在的问题及解决方法[J].江苏农业科学,2014,42(1):351-353.
- [5] 杨余维,谢可军,赵婷,等.植物-土壤渗滤法对农村生活污水的处理工艺研究[J].安全与环境工程,2009,16(01):51-53,57.
- [6] Valerie J F,James R M,John S G.Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions[J].Water Res.,2011,45(5):2073-2081.
- [7] Zhao X H,Liu L.A comparative estimate of life cycle greenhouse gas emissions from two types of constructed wetland in Tianjin, China[J].Desalin Water Treat,2013,51:2280-2293.
- [8] 赵玉峰.湖泊富营养化技术的生命周期评价[D].天津:天津大学,2014.
- [9] 郑展望,徐魁,周联友.土壤毛管渗滤系统在浙江湖州某区新农村示范工程中的应用[J].污染防治技术,2007,20(3):64-67.
- [10] 刘夏璐,王洪涛,陈建,等.中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J].环境科学学报,2010,30(10):2136-2144.
- [11] Eeeleston S,Buendia L,Miwa K,et al.2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R].Hayama,Kangawa;Japan,Intergovernmental Panel on Climate Change,2006.
- [12] 潘涛.人工湿地减排温室气体估算研究[D].南京:南京大学,2009.
- [13] Kong H N,Kimochi Y,Mizuochi M,et al.Study of the characteristics of CH₄ and N₂O emission and methods of controlling their emission in the soil-trench wastewater treatment process [J].Science of the Total Environment,2002,290(1/2/3):59-67.
- [14] 姜睿,王洪涛,张浩,等.中国水泥生产工艺的生命周期对比分析及建议[J].环境科学学报,2010,30(11):2361-2368.
- [15] 徐小宁,陈郁,张树深,等.复合硅酸盐水泥的生命周期评价[J].环境科学学报,2013,33(9):2632-2638.
- [16] 黄娜,王洪涛,范辞冬.基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J].环境科学学报,2012,32(6):1529-1536.
- [17] 黄锦楼,陈琴,许连煌.人工湿地在应用中存在的问题及解决措施[J].环境科学,2013,34(1):401-408.
- [18] 解天荣,王静.交通运输业碳排放量比较研究[J].政策论坛,2011(8):20-24.
- [19] 刘娜娜.城镇污水处理厂能耗分析及节能措施研究[D].邯郸:河北工程大学,2013.

通讯作者:王丽君(1986—),女,工程师,主要从事农村生活污水治理等方面的研究。E-mail:wanglijun.qq@163.com