

分类号 TU  
UDC 624

学校代码 10590  
密 级 公开

# 深圳大学硕士学位论文

基于 LCA 的城市交通基础设施环境  
影响分析研究——以深圳为例

学位申请人姓名 毛睿昌

专 业 名 称 管理科学与工程（工学）

学院（系、所） 土木工程学院

指导教师姓名 段华波 副教授



## 摘 要

城市是温室气体排放的主要来源，产生的二氧化碳当量占全球总量的 70%。城市建设过程造成的环境问题已逐步成为城市环境治理的难题和国内外政府着力解决的热点领域。城市交通基础设施作为城市建设的重要组成部分，在促进社会经济发展的同时，消耗了大量资源和能源，造成了一系列城市环境问题。深圳是国家低碳城市、国家生态城市和首批国家低碳交通运输体系试点城市，成立三十年来，综合交通网络规模不断扩大，网络布局 and 结构不断完善，分析深圳市交通基础设施建设领域的碳排放，对于低碳城市建设和碳减排政策的制定具有重要意义。

本研究通过交通工程施工现场实测与调研，获得工程材料、能源消耗等基础数据，结合政府统计数据，以及生命周期评价软件，对交通基础设施生命周期各阶段（建设材料消耗、施工建设、维护、拆除）进行资源能源消耗清单分析，构建了包括道路、地铁和桥梁在内的交通基础设施的生命周期碳排放模型，运用该模型系统核算了深圳市交通基础设施总碳排放量，评价了各交通类型碳排放贡献及影响因素。

研究结果表明，深圳市每公里高速公路全生命周期阶段产生约 2,700 吨二氧化碳当量，其中建设材料的影响最大，占总排放量的 63%。每公里城市公路（按一到四级划分）全生命周期碳排放在 1,000~ 2,000 吨，略低于高速公路的环境影响。此外，每公里城市公路桥梁全生命周期碳排放约为 3,200t；每公里地铁全生命周期碳排放达到 80,000 吨，其中材料消耗的碳排放占地铁建设生命周期碳排放的 90% 以上。

此外，本文从深圳市的角度，基于每年交通基础设施建设量，从宏观层次上构建了交通基础设施碳排放清单分析模型，核算了深圳市交通基础设施年度碳排放。结果表明，深圳市年度交通基础设施建设碳排放约 200 万吨，其中地铁工程

建设产生的碳排放约占碳排放总量的 80%。此外,结合深圳市城市更新“十三五”规划中有关交通建设里程的数据,预计未来五年(2016 年到 2020 年)交通基础设施领域碳排放总量接近 1,000 万吨。面对深圳市交通基础设施领域的节能减排的压力,提出选用节能减排优势较大的沥青路面作为道路路面形式、大力发展材料低碳生产技术、出台相应绿色交通建设规范进行引导、推进交通工程建设废弃物利用等建议。

本研究是对深圳市交通基础设施领域生命周期环境影响的初步探索,创建基于精简型生命周期理论方法的碳排放核算模型,建立相应的核算与评价方法学,进而对城市尺度的深圳市交通基础设施领域碳排放进行科学合理的测度,对于城市尺度的交通工程碳排放的核算,以及交通领域生命周期节能减排研究具有指导意义。

**关键词:** 道路; 地铁; 桥梁; 生命周期评价; 碳排放

## Abstract

Urban is a major source of greenhouse gases (GHG) which emits more than 70% CO<sub>2</sub> equivalent. The environmental impacts during urban construction have been the puzzles of environmental governance and the focus fields in abroad and China. Urban transport infrastructure, as one of the most important infrastructure, provided convenience services to the resident as well as consumed a large amount of resources and energy, emitted GHG. Shenzhen, as the national low carbon city, national ecological city and the first pilot city of low-carbon transportation ,has formed integrated traffic network and assess the environmental impacts of transport infrastructure in Shenzhen is significant to the development of low carbon city and energy saving.

This study tries to assessing the environmental impacts of urban transport infrastructure via life cycle assessment based on field surveys, LCA software and statistic data. The accounting model of carbon emissions in transport infrastructure sector was established and the scope and system boundary was defined and the whole life cycle was separated into 4 stages: materials using; construction; repair and demolition. Inventory analysis was conducted of different transport infrastructure (including roads, metro and bridges) to quantify the life cycle carbon emissions based on the accounting model. Shenzhen was selected as a case study to quantify and forecast the annual carbon emissions in urban transport infrastructure sector. And the emission factors of which could be having an enormous influence and contribution were analyzed.

The calculations results of 1 km Shenzhen transportation infrastructure show that the carbon emissions 1 km expressway was more than 2.7 thousand tons and that the

most GHG was discharged in the material using stage. The carbon emissions of 1 km first class road to fourth class road were between 1 to 2 thousand tons which were lower than expressway. The carbon emissions of 1 km bridge was 3.2 thousand tons and 1 km metro was around 80 thousand tons and where the material using stage contributed more than 90% to the whole life cycle carbon emissions.

In the view of Shenzhen, the calculating model was established based on the previous calculating data of 1 km different transport infrastructure. The annual carbon emissions from the year of 2006 to 2013 in urban transport infrastructure of Shenzhen were calculated. The annual carbon emissions were around 2 million tons in a stable state most of which was resulted from the construction of metro, accounting for 80% of the total annual carbon emissions. According to the 13th Five Year Plan of urban metabolism in Shenzhen, the total carbon emission in transport infrastructure part will reach 10 million tons from 2016 to 2020. Based on this result, suggestions in materials manufacturing technique, transport infrastructure planning and pavement structure type selection were raised.

To summarize, this study is a preliminary research in the life cycle environmental impacts of transport infrastructure in Shenzhen. A streamlined life cycle assessment method was built for quantifying the life cycle carbon emissions for transport infrastructure in Shenzhen and the result obtained provide an sufficient dimensioning of carbon emission in transport infrastructure and this study can provide suggestions in energy saving and can be considered as an opportunity for research and study of other cities' carbon emissions of transport infrastructure in China.

**Key word:** Road; Metro; Bridge; Life cycle assessment; Carbon emissions

# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.2.1 国外研究综述.....	3
1.2.2 国内研究综述.....	7
1.3 问题的提出 .....	10
1.4 主要内容及技术路线 .....	10
1.4.1 主要研究内容.....	10
1.4.2 研究方法与数据来源.....	12
1.4.3 技术路线.....	12
第二章 生命周期环境影响评价方法.....	14
2.1 生命周期分析用于城市交通基础设施分析评价的可行性 ..	14
2.2 生命周期分析类型的选择 .....	15

2.2.1 基于过程的生命周期分析法.....	15
2.2.2 基于投入产出的生命周期分析法.....	16
2.2.3 混合型生命周期分析方法.....	17
2.2.4 LCA 方法的选择.....	18
2.3 本章小结.....	20
第三章 生命周期环境影响评价步骤.....	22
3.1 目的与范围.....	22
3.1.1 研究目的.....	22
3.1.2 研究范围.....	22
3.2 清单分析.....	26
3.2.1 数据类型.....	26
3.2.2 碳排放计算模型.....	27
3.3 影响评价与结果解释.....	29
3.4 本章小结.....	29
第四章 交通基础设施碳排放过程清单分析.....	30
4.1 能源的清单分析.....	30
4.2 运输过程的清单分析.....	32
4.3 建设材料的清单分析.....	33

4.4 本章小结 .....	37
第五章 深圳市交通基础设施生命周期碳排放分析 .....	38
5.1 生命周期各阶段碳排放计算方法 .....	38
5.1.1 建设材料消耗阶段碳排放计算 .....	38
5.1.2 施工建设阶段碳排放计算 .....	44
5.1.3 维护阶段碳排放计算 .....	45
5.1.4 拆除阶段碳排放计算 .....	47
5.2 交通基础设施生命周期碳排放核算 .....	48
5.2.1 道路生命周期碳排放核算 .....	48
5.2.2 地铁生命周期碳排放核算 .....	51
5.2.3 桥梁生命周期碳排放核算 .....	53
5.3 深圳市年度交通基础设施碳排放计算 .....	53
5.3.1 深圳市年度基础设施建设情况 .....	54
5.3.2 深圳市年度交通基础设施碳排放量 .....	56
5.4 深圳市交通基础设施碳排放预测 .....	59
5.5 深圳市交通基础设施节能减排建议 .....	60
5.6 本章小结 .....	61
第六章 结论与建议 .....	63

6.1 结论 .....	63
6.2 创新点 .....	64
6.3 展望 .....	64
参 考 文 献.....	66
附 录.....	70
致 谢.....	76
攻读硕士学位期间的研究成果.....	77

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

城市建设环境（包括建筑、基础设施等）在提供便利服务的同时，也在工程建造、使用、拆除等生命周期阶段消耗大量资源、能源并排放温室气体。温室气体的排放造成环境污染、全球气候变暖等一系列问题，给自然环境和人类健康带来了严重的危害。上个世纪 90 年代仅十年时间，全球气温已上升大约 0.5 摄氏度，据全球政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）预测，到 2100 年，全球气温估计将上升大约 1.4 至 5.8 摄氏度，给人类生存环境带来巨大变化<sup>[1]</sup>。从 1970 到 2004 年间，全球二氧化碳(CO<sub>2</sub>)年排放量从 210 亿吨增加到 380 亿吨，增加大约 80%，其中 CO<sub>2</sub> 贡献了大约 77% 的全球温室气体排放(甲烷占 14.3%，氮氧化物占 7.9%，氟化物占 1.1%)<sup>[2]</sup>。化石能源燃烧和工业生产占到了全部温室气体排放的 78%，是造成温室效应的重要原因<sup>[3]</sup>。因此，遏制全球环境进一步恶化、应对气候变暖，是当今全球各国面临的重大问题和挑战。

如今，全球城市人口已经达到总人口的一半以上，城市，作为财富和创造力的中心，人口密度大，经济发达，工业集中，被视为全球温室气体排放的主要排放源。同时，城市人群的生活方式和能源消耗方式带来了更多的碳排放。与此同时，城市建设与交通等造成城市大气环境问题已逐步成为城市环境治理的难题，与其相关的主题也成为国内外政府着力解决的热点领域。因此，在应对全球气候变暖过程中，城市需扮演重要角色<sup>[4]</sup>。

城市对内交通基础设施（本文简称为城市交通基础设施，包括道路、桥梁、隧道、地铁、轻轨高架、公共交通、停车场、轮渡等）是重要的公共资源，促进了城市的发展和人民生活的便利，同时也排放了大量温室气体，给生态环境造成了一定程度的破坏。根据 IPCC 第五次会议报告显示，2010 年全球建设领域排放温室气体超过 90 亿吨，占全球温室气体排放的 32%<sup>[5]</sup>。中国交通运输部发布的“十三五”规划中，到 2020 年，我国公路通车里程将达到 457 万公里，新增 7 万余公里<sup>[6]</sup>，随着城镇化水平的不断提高，若干年内交通基础设施建设还将继续。

深圳，从二十世纪八十年代人口约为 6 万人的小渔村，到 2016 年常住人口超过 1100 万，到 2020 年将达到 1480 万人。2016 年深圳市生产总值超过 1.93 万亿元，同比增长 9% 左右<sup>[7]</sup>。交通运输作为基础产业对国民经济和社会发展至关重要。深圳经济特区成立三十年来，综合交通网络规模不断扩大，网络布局 and 结构不断完善，运输能力显著增强，建立了与经济社会发展相适应的综合交通体系，为推动深圳工业化、现代化、城市化进程发挥了重要的支撑作用。据深圳市城市更新“十三五”规划显示，至 2020 年，深圳市将新增城市轨道交通通车里程 250 公里，新增公交专用道里程 200 公里，进一步推进东部重大交通基础设施建设，建成轨道交通三期工程，加快轨道交通四期工程规划<sup>[8]</sup>。

在可持续发展的要求下，研究城市交通基础设施生命周期的环境影响，提出相应的温室气体节能减排策略具有重要意义。中国政府 2009 年向国际社会宣布：截止到 2020 年，我国单位碳排放强度（CO<sub>2</sub>/per GDP）相比于 2005 年，要下降 40% 到 45% 左右，2030 年左右，国家碳排放量达到峰值。按照规定，“十三五”期间，包括广东省在内的北京、天津、上海、江苏等省市碳排放强度必须至少下降 20.5%<sup>[9]</sup>。深圳市是国家低碳城市、国家生态城市和首批国家低碳交通运输体系试点城市，随着减排力度加大，碳排放总量增幅将会收窄，并逐步趋于稳定。近年来，深圳市交委综合运用了“空间减碳、方式减碳、技术减碳、管理减碳”等四大策略系统推进低碳交通运输体系建设新建交通基础设施项目，以环境保护为重要指标，在保证工程质量与效益的同时，尽量减轻对环境的危害。

城市交通基础设施消耗大量水泥、沥青、钢材、碎石等高能耗材料，在施工建设阶段隧道的开挖、道路路面的铺设，沥青、混凝土等混合材料的拌合、钢筋的绑扎，工程维护阶段材料的投入和机械的使用，均会产生一定程度的环境影响。为此，我国在交通工程领域逐步开始推广节能施工技术，采用能耗低的工程施工机械；在建设材料生产领域，推广具有低碳环保特征的混合材料的使用，加大建筑废弃物的循环利用率，节约了资源，减少了温室气体排放，取得良好的社会效益。然而，仅仅采取推广节能施工技术，施工过程中进行设备节油，采用新型材料等措施，没有对交通基础设施建设全过程的温室气体排放进行定量分析，导致交通基础设施的节能减排针对性不强，出现了基础设施总体环境影响不明确、节能减排效果不明显等情况。因此，为了完善在交通基础建设过程中的环境影响

分析, 加快交通工程环境保护建设, 促进相关部门对交通建设领域节能减排问题的重视, 本研究建立了系统的交通基础设施生命周期温室气体排放评价体系与方法。

生命周期评价 (Life Cycle Analysis, LCA) 是环境影响评价的主要方法。交通基础设施建设的全过程消耗大量原材料和能源, 分析其环境影响可以借助生命周期理念, 全面考虑建设、维护、拆除阶段生命周期过程的能耗与温室气体排放。LCA 方法包括目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释四部分, 在这四个环节当中, 清单分析是最主要的工作内容, 该阶段将生命周期内所有环节可能产生环境影响的过程列到清单当中进行分析。国内外的众多学者将这种方法应用于道路的环境影响分析、和建设材料的生命周期评价。然而, 对地铁、桥梁等其他交通基础设施的环境影响评价研究相对较少, 关于交通基础设施生命周期碳排放评价体系尚未建立。

本文将 LCA 应于交通基础设施的环境影响分析评价体系中, 通过分析各交通工程在建设、维护和拆除生命过程中的材料消耗和能源使用情况及其碳排放量, 确定碳排放的排放源。采用生命周期清单分析量化的评价指标, 建立反应不同交通基础设施的碳排放总量的温室气体排放评价标准, 基于深圳市交通基础设施建设量统计数据, 结合深圳市交通基础设施的施工工艺水平、材料能源消耗、建设结构类型等实际情况, 进行碳排放分析, 探究交通基础设施碳排放量较大的阶段, 并提出相应的碳排放减量化措施, 对深圳市未来五年交通基础设施领域碳排放量进行预测, 从节能减排的角度提供指导和建议。

本论文依托深圳市科创委基础研究项目, 《深圳市交通运输业碳排放动态估算模型与优化研究》(项目编号: JCYJ20150525092941042)。

## 1.2 国内外研究现状

目前, 国内外主要运用 LCA 方法, 对能源 (石油、电力、天然气)、建筑材料的环境影响进行研究, 交通基础设施生命周期分析多集中于高速公路建设过程中的能耗和环境影响分析、道路路面能耗与建设材料碳排放的量化分析, 以及基于碳排放数据的建立评价体系等方面。

### 1.2.1 国外研究综述

### （一）城市发展与环境影响

早在 19 世纪，城市发展过程中带来的环境问题已经引起了学者的关注。Karl Marx<sup>[10]</sup> 在 1883 年第一次提出了城市代谢的理论，该理论阐明了在城市发展的过程中，物质和能量在自然和社会中不断转换所带来的环境影响，为今后研究城市发展过程中的环境影响打下基础。随后，Wolman<sup>[11]</sup>在解决美国城市空气和水不断恶化的过程中，重新定义了城市代谢理论。

从世纪九十年代起，许多国家就开展了城市发展与环境影响的相关研究工作，主要包括发展可再生能源、采用新型化石能源、发展低碳经济等。90 年代初，德国颁布《德意志联邦共和国基本法》，开始重视环境保护，制订替代燃料战略，着力开发混合动力技术和燃料电池技术，减少化石能源的消耗和环境排放<sup>[12]</sup>。1955 年，美国颁布了《空气污染控制法》（Air Pollution Control Act），这是美国第一次为空气质量立法，在交通领域业不断推进新能源汽车的使用，2009 年，加州空气资源委员会通过了零排放车辆积分法案（Zero Emission Vehicle, ZEV），该制度规定在加州销售规模超过 6 万辆的汽车厂商，其销售的环保车须达到其总销量的 2.5%<sup>[13]</sup>。

### （二）LCA 方法

国外较早地将 LCA 理论应用于环境影响分析研究中。在国际环境毒理学与化学学会（SETAC）1990 年召开的会议上，对生命周期方法进行了研讨，并首次提出了 LCA 的概念。1993 年美国国家环境保护局（EPA）出版了《生命周期评价清单分析的原则与指南》，该指南对清单分析进行详细的描述，系统地规范了生命周期清单分析的基本框架<sup>[14]</sup>。随后，在 1995 年 EPA 又出版了《生命周期分析质量评价指南》，进一步推广了生命周期方法的研究与应用，使得该方法在应用阶段有了可靠的基础和依据<sup>[15]</sup>。各种软件和数据库纷纷推出，国外商用软件和数据库包括 SimaPro、Gabi、Ecoinvent 等，国内软件较少，以 eBalance 为代表，推广了 CLCD 数据库，促进了 LCA 的在工业界和学术界的全面应用。

### （三）交通工程生命周期环境影响分析

随着生命周期分析方法在环境影响分析中的应用，很多国家开始将这种方法应用于交通基础设施领域。

Häkkinen, T. and K. Mäkelä<sup>[16]</sup>依托芬兰技术研究中心（The Research Center of

Finland, VTT) 最早将 LCA 应用于路面研究, 对芬兰两种不同材料的高速公路路面(混凝土路面和沥青路面)进行了生命周期环境影响比较。结果显示, 在生命周期的 50 年内, 沥青路面比水泥混凝土路面更加节能, 其碳排放比水泥低 40%-60%。沥青路面的环境影响很大程度上取决于沥青混合材料中的沥青含量, 沥青材料的生产占沥青高速公路生命周期总环境影响的比例较大。同时指出, 车辆的运输阶段的碳排放量比其他材料生产、建设、维护和照明等阶段的总和还要高。

Park Kwangho 等<sup>[17]</sup>使用基于投入产出的混合型生命周期方法, 分析了韩国一条高速公路生命周期各个阶段的环境影响, 该研究结合韩国能源平衡表和投入产出模型, 计算了各个阶段能源消耗和环境影响负荷。研究结果表明, 对于 1km 四车道的高速公路来说, 在 20 年的生命周期内, 需要消耗 2,676.8 吨石油当量, 其中建设材料生产阶段消耗 1,525.8 吨石油当量, 造成二氧化硫排放 62.1 吨, 氮氧化物排放 17.1 吨, 二氧化碳排放 2,438.5 吨。并且基于计算中的数据, 进行了误差分析。

Chang Brenda 等<sup>[18]</sup>对美国旧金山到阿纳海姆的一条高速铁路进行生命周期碳排放分析, 结果显示该高速铁路在建设生命周期内, 排放了 240 万吨 CO<sub>2</sub>, 其中 80% 的 CO<sub>2</sub> 排放来自材料生产, 16% 来自运输过程。仅占高速铁路全长 15% 的隧道和高架工程贡献了 60% 以上的碳排放, 其环境影响相比普通公路更加突出。

Abolhasani Saeed 等<sup>[19]</sup>采用便携式车载检测系统 (Portable Emission Measurement System PEMS) 监测了施工现场挖掘机数据, 研究了道路施工机械的温室气体排放。研究结果表明, 50% 以上的氮氧化物排放源于在施工过程, 约 29% 的操作失误导致施工机械发动机速度和发动机进气歧管内绝对压力高于正常使用状态。机械在非空闲时间 (如挖掘机运行和使用阶段) 时的排放强度是空闲时的七倍。

道路工程建设领域需要大量投资, 基于最低成本投入理论, 计算了该状态下的材料选择与投入和生命周期的环境影响。Pontarollo John 等<sup>[20]</sup>基于生命周期理论, 分析公路工程建设过程中成本与环境影响的关系, 通过分析澳大利亚和新西兰不同路面抗滑性能、宏观结构与财务投入的数据, 指出不应以最低成本为唯一标准。

White P.<sup>[21]</sup> 针对道路设计人员和政府官员设计了一个动态模拟系统,该系统为设计者提供了一个平台,当设计者根据交通工程建设的实际情况,输入不同的道路参数,如路面的宽度、长度、结构、材料等情况,该平台即可估算不同的环境影响,为决策者和设计者提供分析依据。

Daniel B. Muller 等<sup>[22]</sup> 测算了全球 2008 年基础设施的碳排放量,在 2008 年,全球基础设施存量 CO<sub>2</sub> 当量排放达到 1,220 亿吨(包括直接排放和间接排放),发达国家的基础设施碳排放水平是发展中国家的 5 倍以上,指出发展中国家基础设施领域碳排放的巨大潜力。

道路路面与车辆之间存在相互作用(Pavement Vehicle Interaction PVI),如滚动阻力等很大程度上影响了使用过程中的环境影响。Akbarian<sup>[23]</sup>等人的研究表明,三种路面状况(路面的粗糙程度、路面的质地以及路面在负载状况下的弯曲程度)一定程度上影响了车辆使用过程中的碳排放。

#### (四) 建设材料生命周期环境影响分析

面对交通基础设施在建设材料生产阶段能源消耗和环境影响较大的现状,在交通工程建设领域,比较不同材料的环境影响、使用添加剂降低建设材料的环境影响以及使用工业废料和路面再生骨料的研究逐渐增多。

根据 Vidal 等<sup>[24]</sup>的研究表明,热拌沥青混凝土和温拌沥青混合土材料在道路建设的生命周期环境影响相似,当沥青混凝土中拌入 15%的再生沥青路面骨料是,环境影响可下降 13%至 14%。

Nassar 等<sup>[25]</sup>在混凝土材料中添加大量粉煤灰,结果显示,添加粉煤灰可以提高混凝土高速公路在强度、增加防潮层的品质、提升道路的抗阻特性。提升混凝土路面的经济效益的同时,增加了道路的生命周期年限,降低了其生命周期环境影响。

Y.Huang 等<sup>[26]</sup>将 LCA 理论应用于英国伦敦希思罗机场第五航站楼的道路改造施工工程,测算了能耗和环境排放量。在改造过程中,用废弃玻璃、废弃物焚烧炉底灰和循环利用的废弃沥青混凝土骨料代替自然骨料,情景分析结果显示,未添加废弃玻璃时的环境影响最小(消耗 357 吨石油当量,排放 853 吨 CO<sub>2</sub> 当量),未添加循环利用的废弃沥青混凝土骨料时的环境影响最大(消耗 375 吨石油当量,排放 900 吨 CO<sub>2</sub> 当量)。道路在改建施工期间产生的额外能耗和环境影

响较大。

Stephen A. Cross 等人<sup>[27]</sup>采用生命周期环境分析 (Life-cycle environmental analysis, LCEA) 方法, 分析了沥青冷再生技术和传统沥青罩面修复法在道路路面维护过程中的环境影响, 揭示了生命周期环境分析理论在交通工程领域的应用潜力和局限。

Chowdhury Raja 等<sup>[28]</sup>研究将粉煤灰、煤底灰和再生骨料代替传统集料的生命周期环境影响, 该类材料的使用有利于减少温室气体、降低酸化潜力、减少毒性气体排放, 同时降低了成本。

Carpenter 等<sup>[29]</sup>研究对比了自然集料和再生材料的生命周期环境影响分析, 认为再生材料的使用降低了能源消耗和水资源的使用, 减少了空气污染、重金属污染和人体毒性污染。

国外文献综述中, 最早始于城市发展过程的环境问题的思考, 探索并采用了 LCA 方法进行分析, 在影响城市发展和环境污染严重的交通基础设施领域开展了一系列研究, 并且在交通工程环境影响较大的建筑材料领域进行不断的探索, 取得了诸多值得我国借鉴的成果。然而, 不同国家交通基础设施由于施工工艺水平、建筑材料生产工艺的差距, 能耗和环境影响差距较大, 评价体系地域性明显, 难以单纯将国外模式直接运用到我国的碳排放研究中, 需要根据我国实际能源投入和施工工艺计算碳排放水平。

## 1.2.2 国内研究综述

### (一) LCA 方法

1998 年我国引进由国际标准化组织 (ISO) 环境管理专业委员会和欧洲标准化委员会共同制定的环境管理国际标准 (ISO14040 系列标准), 并将其转化为国家标准, 颁布 GB/T24040 系列, 该系列包括了环境生命周期方法在我国环境问题分析中, 可能会面临的一系列实践与应用标准的问题<sup>[30, 31]</sup>。2014 年, 中国工程建设标准化协会颁布《建筑碳排放计量标准》, 于 2014 年 12 月 1 日开始实施, 该标准规范了建设领域碳排放数据的采集、核算和发布流程, 方法科学、数据可靠、流程清晰、操作简便, 适用于新建、改建和扩建工程的生命周期碳排放计量<sup>[32]</sup>。在国家标准不断规范的过程中, 我国在生命周期领域开展了大量研究。

杨建新等<sup>[33]</sup>在国内首先将生命周期理论应用于实践并推广, 完整地阐述了

该方法如何在学术领域应用,将国外生命周期理论与我国实际情况相结合,提出了 LCA 的理论研究模型,并将该模型应用于手机、汽车等产品,进行产品分析、评价、设计、管理等案例研究。

## (二) 建设领域的 LCA 方法探讨

在建设领域,国内外学者在建设环境评价与碳评估领域进行了一些生命周期的分析研究。

张智慧和邓超宏<sup>[34]</sup>按照 LCA 评估原理,从工程当地环境情况、资源情况、施工工艺与技术水平、施工企业资格等角度出发,将 LCA 理论模型应用于建设施工领域,提出了施工过程中的环境指标评价体系,将材料消耗和施工机械使用的投入引入建筑的生命周期,从而对施工全过程进行环境系统评价,改进了建设项目环境管理,对促进建筑业可持续发展具有一定指导作用。

申立银等<sup>[35]</sup>基于生命周期评价理论,分析了目前常用的三种建筑生命周期物化碳计算方法(基于过程法、投入产出法和混合法),从系统边界、数据特点和计算的准确性等三方面分析了这几种方法的准确性。

尚春静和张智慧<sup>[36]</sup>运用建筑生命周期评价理论分析建筑物的碳排放,建筑物的生命周期各阶段有矿石材料的开采、建设材料的生产、加工、运输、施工、使用、拆除等多个阶段。选取了北京市某一低层钢筋混凝土结构的住宅为研究对象,研究其生命周期碳排放。分析结果显示,建筑物在建设材料的投入和建筑使用阶段的碳排放较大。

天津大学杨倩苗<sup>[37]</sup>在其博士学位论文中,综合应用建筑产品 LCA 环境清单数据库、评价手册和建筑 LCA 程序,通过案例分析,评价比较了混凝土、外窗和填充外墙等不同建材的碳排放情况,指出碳排放量较大的建材,对绿色建材的使用和绿色建筑的发展有针对性地改善。

## (三) 交通建设领域生命周期环境影响评价

尚春静等<sup>[38]</sup>以煤炭消耗、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等气体的排放为研究指标,研究了高速公路路面工程、排水工程、防护工程以及路基土石方的生命周期各阶段的环境影响。结果表明,生命周期内建筑材料生产阶段贡献最大。建材生产阶段,1km 标准的高速公路能耗达 1,399.87t 标煤,占生命周期总能耗的一半以上。在 20 年的整个公路生命周期内,高速公路共消耗 2,512.89t 标煤,排放 CO<sub>2</sub> 2,198t,

SO<sub>2</sub> 52t, 氮氧化物 15t。提出改进建材生产工艺, 降低公路工程中材料的投入和使用, 优化工程机械的油耗等减少公路环境影响的有利措施。

王贤卫等<sup>[39]</sup>将高速公路生命周期界定在原材料生产、运输和机械施工 3 个阶段, 对中国西南地区某拟建高速公路上的路基、路面、桥涵和隧道工程进行碳排放计算。结果表明, 桥涵工程的碳排放最高, 其次是隧道工程, 道路工程的碳排放量较低。同时, 整条高速公路建设碳排放主要来自建设材料生产阶段, 占 89.64%; 其次是机械施工阶段, 占 9.11%, 原材料运输阶段只占总量的 1.25%。

长安大学蔺瑞玉<sup>[40]</sup>的博士论文中以沥青路面道路为研究对象, 全面分析了建设过程中的碳排放来源与碳排放量, 以及影响不同面层沥青路面结构碳排放量的主要因素, 提出计算碳排放总量的模型。结果显示, 温拌沥青材料生产工艺相对于热拌共计具有更好的环境效益。

华南理工大学潘美萍<sup>[41]</sup>的硕士学位论文将生命周期理论, 分析 1km 半幅路面高速公路的碳排放, 对于不同的路面结构, 建立了不同的生命周期能源消耗和相应的碳排放清单, 结果显示沥青混凝土高速公路路面环境影响较低。同时, 建立了计算机应用平台, 对不同路面类型的高速公路生命周期环境影响提供系统的数据基础。

我国学者的研究大多采用 LCA 理论, 研究对象包括公路建设领域的高速公路、隧道、高架桥以及相关路面材料, 评价指标以能源消耗、资源消耗和环境影响为主, 包含化石能源消耗、二氧化碳排放、二氧化硫排放、温室气体排放等。现有研究对于高速公路工程建设碳排放计算大多只考虑路面工程, 没有从整体性出发, 将道路的垫层、基层和路面工程统一作为研究对象。对于高速公路路面工程及其附属工程进行碳排放的计算, 没有在城市的角度对城市各级道路工程的碳排放总量进行分析, 缺乏各级道路碳排放水平的对比。另外, 对于包括桥梁、地铁建设在内的交通基础设施生命周期环境影响评价的研究较少。此外, 在数据方面, 我国的研究数据来源过于广泛, 没有结合实际情况, 大量使用国外的研究文献与数据库数据, 导致结论与国内实际情况不一致, 相同的研究对象分析结果差距较大, 无法进行统一对照比较。根据国内外文献综述, 主要原因有:

(1) 交通基础设施系统庞大, 进行生命周期分析时, 需要详细了解其建设过程中的每一个阶段, 搜集建设过程中的能源消耗和资源消耗量, 同时, 在城市

尺度，不同城市不同交通工程的建设量不同，所需数据量较大；

(2) 地铁建设不同于道路，耗材耗能大，相关案例和数据较为缺乏；

(3) 在建设过程中，交通基础设施工程根据不同的工程类型与结构，在材料消耗量、能源消耗量等方面具有显著不同，不同运输工具的运输会造成环境排放的差异；

(4) 在道路、桥梁维护阶段，不同工程、不同级别的工程项目维护工艺不尽相同，难以对不同交通工程的养护阶段进行碳排放量化分析。

### 1.3 问题的提出

基于上述文献分析，总的来说，交通基础设施的环境影响评价是正在发展的领域，很少有对其进行全面深入的研究。针对已有的成果以及不完善之处，提出以下研究问题：

(1) 如何合理确定交通基础设施生命周期系统边界，对生命周期阶段和关键环节进行准确定义和深入刻画，关系到能否从复杂的交通基础设施系统中分析出能够反映深圳市现行交通基础设施碳排放特征关键问题；

(2) 如何量化交通基础设施生命周期碳排放总量，甄别影响碳排放的关键因素，厘清影响因素之间的特征，正确描绘这些影响因素间的动态反馈关系，提出交通基础设施碳减排策略；

(3) 鉴于深圳市交通基础设施的复杂性，在数据收集、处理和分析过程中，如何实时、动态地将不确定性贯穿于数据管理、质量分析、模型模拟和测算、以及结果表达等多个环节，这是提升研究结果科学性和合理性的问题，能够较好地体现生命周期分析的完整性和客观性。

### 1.4 主要内容及技术路线

#### 1.4.1 主要研究内容

本文运用 LCA 理论，将研究范围界定在交通基础设施领域。交通基础设施包括道路、桥梁、隧道、地铁、轻轨高架、公共交通、停车场、轮渡等，选取对深圳市环境影响较大的道路（包括高速公路和一到四级公路）、桥梁和地铁 3 个子系统，将该交通基础设施分为建设材料消耗阶段、施工建设阶段、维护阶段

和拆除阶段（建筑材料消耗属于施工建设的一部分，该阶段材料消耗量大、环境影响突出，将其单独进行分析）。本研究以碳排放作为环境评价指标，以二氧化碳当量（CO<sub>2</sub> equivalent, CO<sub>2</sub> eq）排放为碳排放计算单位，将研究方法应用于各个子系统从建筑材料消耗到拆除的全过程，对不同类型交通基础设施的生命周期环境影响和深圳市交通基础设施领域的年度碳排放进行清单量化分析。在核算过程中，将不确定性处理贯穿于模型的创建与应用过程，通过与已有研究进行对比，提高结果的可靠性和准确度。为深圳市交通基础设施的环境影响分析提供决策依据。围绕着清单分析和碳排放量计算，本研究确定了如下主要内容：

（1）深入剖析交通基础设施的特征并进行生命周期清单分析。

首先将交通基础设施划分为道路（高速公路，一到四级公路）、桥梁和地铁等 3 个子系统。其次，收集深圳市交通基础设施各类统计资料数据、开展必要的调研并实测相关的基础数据，合理确定 3 个子系统建设过程中的特征及其主要影响因素，阐明并揭示各种影响及制约因素之间的内在作用和反馈关系，为交通基础设施碳排放清单分析动态模型的创建提供基础计算参数，同时为相关基础数据收集提供思路。最后，进行生命周期清单分析，建立符合深圳市交通基础设施领域特征的生命周期数据库。

（2）基于 LCA 方法理论构建交通基础设施的碳排放分析框架及测算方法。

基于 LCA 方法将交通基础设施领域碳排放的研究范围从传统的建设阶段拓展至整个生命周期。这种研究方法与传统研究道路建设阶段的方法相比，降低了因未兼顾维护阶段、拆除阶段而低估其环境影响的可能性。另外，在之前研究中存在数据收集不足或数据质量不高的问题。本研究在核算过程，修正基础数据和各类参数，将不确定性处理始终贯穿于模型的创建与应用过程，进而提高分析结果的可靠性和准确度。基于 LCA 理论和方法，从宏观层次构建交通基础设施的碳排放清单分析模型。

（3）对深圳市交通基础设施环境影响进行计算和预测，以碳排放进行量化评估。

深圳市出台了“十三五”城市更新规划，将本文的评估系统对深圳市未来五年交通基础设施领域的环境影响进行量化分析，借鉴国内外交通基础设施领域各类碳减排技术方案和管理政策，提出适合于深圳市交通基础设施节能减排的发展

方向。

### 1.4.2 研究方法与数据来源

本文以传统基于过程的 LCA 方法，强调数据的收集和不确定性分析，将传统生命周期模型精简，采用精简型生命周期分析方法(Streamlined LCA, SLCA)分析深圳市交通基础设施的碳排放，在核算过程中修正基础数据和各类参数，将不确定性处理始终贯穿于模型的创建与应用过程，进而提高分析结果的可靠性和准确度。从宏观层次构建交通基础设施碳排放清单分析模型，核算深圳市交通基础设施领域能源消耗和碳排放。

数据来源包括制定交通基础设施的基础数据综合调查和分析方案，收集尚未列入统计公报的各类数据信息，如各类道路的维护周期、工艺等。通过交通工程施工现场实地调研，搜集调查分析数据，包括文献资料、生命周期分析清单数据等，获得适合于交通运输行业生命周期分析数据库。其中文献资料数据主要是针对各类统计报告、年报及研究报告：如深圳市统计年鉴、深圳交通邮政统计年鉴、深圳市城市更新“十三五”等，获得深圳市交通基础设施年度建设量清单数据；从《城市轨道交通工程预算定额 GCG-103-2008》、《公路工程预算定额 JTG/TB06-02-2007》、以及收集到的深圳市典型的道路、桥梁和地铁工程的施工工程量清单案例中，获得材料运输清单数据。同时还包括各类相关的科技论文及与材料碳排放因子、资源能耗和排放相关的基础数据（如国内外 LCA 商用软件如 SimaPro、GaBi、eBalance 等，相关数据库如 Ecoinvent, CLCD），是本研究的数据基础和重点分析对象。

### 1.4.3 技术路线

本研究在数据搜集的基础上，明确交通基础设施碳排放评价边界，结合深圳市的统计数据和相关指标参数，建立交通基础设施信息量化清单分析模型，分析建设过程中建设材料消耗、施工建设、维护和拆除等阶段的碳排放特征，提出各阶段碳排放评价指标，在此基础上建立了深圳市交通基础设施碳排放评价体系与估算模型，通过计算与预测，提出节能减排措施。具体研究技术路线如图 1-1 所示。

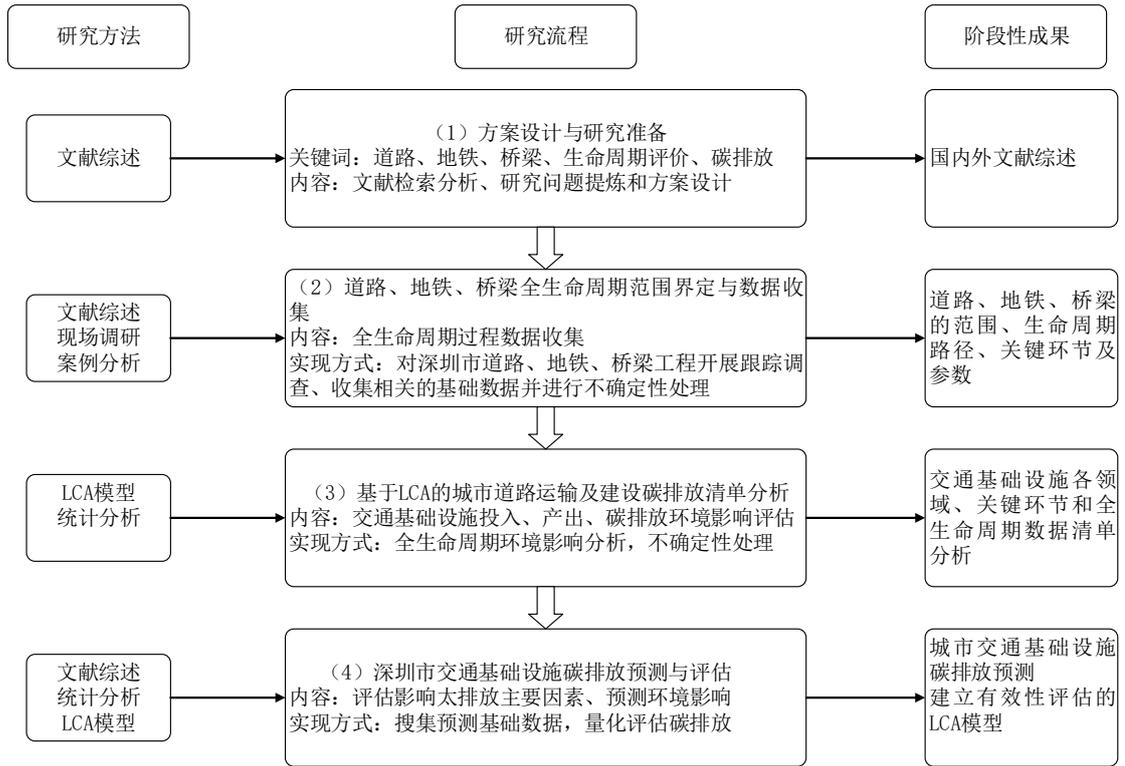


图 1-1 交通基础设施碳排放评价体系研究技术路线

## 第二章 生命周期环境影响评价方法

### 2.1 生命周期分析用于城市交通基础设施分析评价的可行性

国际环境毒理学与化学学会（SETAC）在 1993 召开了生命周期理论指导会议定义了 LCA 理论<sup>[42]</sup>。该理论是一种通过对产品、生产工艺及活动过程中因为物质与能量的投入造成了环境影响，对其环境影响进行识别与量化的环境负荷评价过程。是对评价对象能量和物质消耗及环境排放进行环境影响评价的过程；也是对评价对象改善其环境影响的机会进行识别和评估的过程。全生命周期评价包括产品生产的整个生命周期，即产品“从生到死”的全过程，包括矿石材料的开采、原材料的加工、制造、贮存、使用废弃、再循环等过程。SETAC 定义的 LCA 模型有四个阶段：定义目标和范围确定、清单分析、影响评价和改善评价，后三个阶段与定义目标与范围确定阶段相关联。如图 2-1 所示。

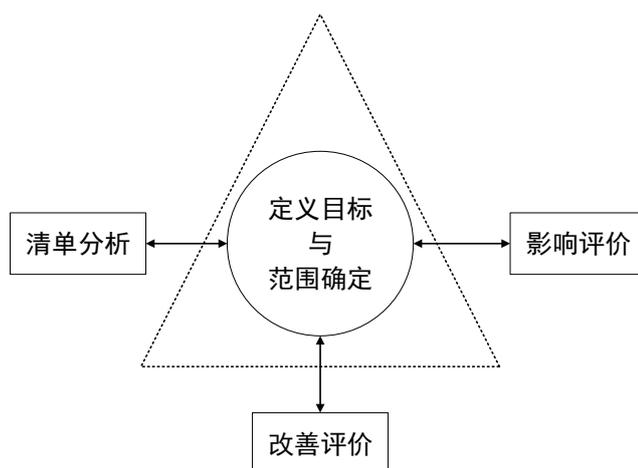


图 2-1：SETAC 生命周期评价体系

在此基础上，国际标准化组织（ISO）对 LCA 的框架不断完善，进行了新的定义<sup>[43]</sup>。在生命周期内，ISO 认为 LCA 是通过对产品系统有关环境影响的输入与输出进行汇总，得到量化结果并进行分析的过程。ISO 认为 LCA 理论框架包括定义目标与范围确定、清单分析、影响评价与结果解释四个部分。与 SETAC 框架不同的是，ISO 的定义中没有改善评价环节，而增加了结果解释部分，认为结果解释是对前三个阶段的归纳与总结，同时，前三个阶段又互相关联。ISO 细化了 LCA 的步骤，推广了生命周期评价理论在研究中的应用，如图 2-2 所示。

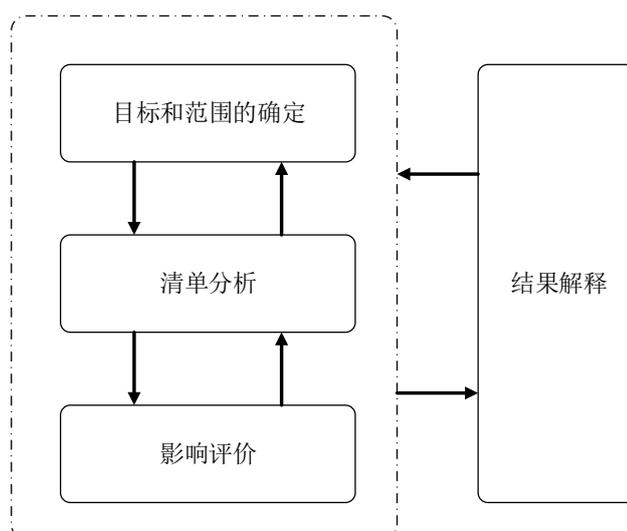


图 2-2: ISO 生命周期评价体系

将 LCA 理论应用于深圳市交通基础设施领域，把道路、桥梁、地铁作为研究对象，以估算深圳市交通基础设施的环境影响为 LCA 分析目标，通过清单分析，计算其环境影响并解释各个环节的结论，具有可操作性和合理性。

## 2.2 生命周期分析类型的选择

### 2.2.1 基于过程的生命周期分析法

基于过程的生命周期分析法（Process LCA）方法以过程清单分析为基础，将研究的总目标和研究对象分为不同的研究子系统，将各个子系统的研究分层细化，分析子系统每个过程中的清单输入与输出，将环境影响分析结果量化，“自上而下”地分析每个过程直至研究总目标，并对子系统与系统之间的内在关系进行分析研究，建立系统环境交换清单。

Process LCA 应用于交通基础设施工程领域，可将整个工程视为最终产品，并制定出包含该工程各过程的工艺流程图。应用该方法时，交通基础设施工程产成品被分解为不同工程过程的组成要素，见图 2-3。

Process LCA 的主要有 4 个步骤：

- (1) 计算工程过程  $i$  的所需资源、能源需求量， $i=0, 1, 2, \dots$ ；
- (2) 将过程  $i$  分解，计算工程过程  $i+1$  的所需资源、能源需求量；
- (3) 令  $i=i+1$ ，重复步骤 1 和步骤 2，直至所有考虑的过程；
- (4) 统计各个阶段所投入的资源、能源的数量与种类，计算其环境影响。

最终，基于过程法的计算过程见式 2-1：

$$C = \sum_{m=1}^n Q_m \times E_m \times W_m \quad (2-1)$$

其中 C 为物化碳总量； $Q_m$  为第  $m$  种资源或能源的投入量； $E_m$  为第  $m$  种资源或能源的碳排放系数； $W_m$  为第  $m$  过程的产废率。

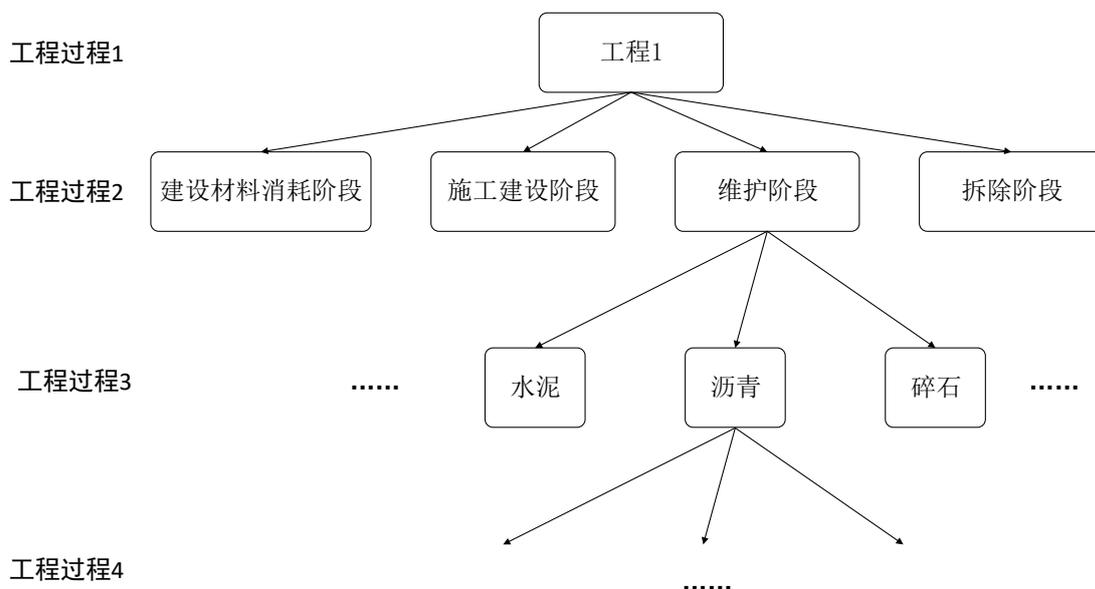


图 2-3：工程分解图

从以上工程分解图可以看出，工程分解水平越细，所要收集的数据就越多，工作量就越大。采用流程图表示 LCA 分析对象的全过程，清晰直观，便于理解，因此，Process LCA 是 LCA 分析的最传统方法，然而，对于复杂系统，随着工程水平分解更加详细，收集详尽的数据变得非常困难。一些研究将系统目标进行层次划分，分成子系统和子过程。在分层过程中，由于产品划分的不明确和各个子系统之间的互相影响，导致研究无法深入，且相关研究进行比较时出现研究系统划分不同、研究范围不一致等情况，无法进行比较分析。因此 Process LCA 多用于分析一定复杂程度系统内有限分解水平且是一次循环过程的研究<sup>[44]</sup>。很多学者在应用基于过程法时，就单个简单工艺或工程的进行评价，如沥青路面铺路过程、水泥材料生产过程，以方便获得相应的数据，进行 LCA 分析。

### 2.2.2 基于投入产出的生命周期分析法

基于投入产出的生命周期分析法 (I-OLCA) 是 Leontief<sup>[45]</sup> 最早提出的生命周期评价方法，用于研究一个国家或地区各经济活动部门之间的关系。它立足于

国民经济,通过研究各个具体部门间的经济与环境活动的投入与产出,并对二者关系进行生命周期分析。随着该方法的不断发展,后来环境领域开始运用该方法。

环境领域的 I-O LCA 分析步骤如下:

(1) 计算总产出部门总产出  $X$ , 见式 2-2:

$$X = (I - A)^{-1} \times y \quad 2-2$$

$X$  的计算需利用经济投入产出表,  $X$  矩阵中的元素为  $X_i$ , 表示  $i$  部门的总产出;  $A$  为直接消耗矩阵;  $I$  是单位矩阵;  $y$  为最终使用量。

(2) 不同部门的碳排放强度计算是 I-O LCA 分析方法的关键, 利用该部门的投入产出表和相关能源统计值可得到完全碳排放强度<sup>[45]</sup>, 见式 2-3:

$$T = f \times \left( \sum_{i=1}^n e_i \times w_i \right) \quad (2-3)$$

其中, 部门  $i$  的单位碳排放因子用  $e_i$  表示, 交通基础设施领域消耗  $i$  部门数量用  $w_i$  表示;  $f$  为交通基础设施领域的综合碳排放系数,  $T$  为交通部门的完全碳排放强度。

(3) 基于  $T$  的分析, 交通基础设施工程生命周期碳排放可以通过式 (2-4) 计算:

$$C = T \times P \quad (2-4)$$

式中  $C$  为交通基础设施的物化碳总量;  $T$  为交通部门的完全碳排放强度,  $P$  为所分析交通工程的价值。

采用 I-O LCA 分析方法时, 要以整个国家或地区的经济系统作为分析的系统边界, 以深圳市交通基础设施领域为例, 要对深圳市基础设施相关部门的投入产出表和碳排放强度进行分析, 而不能用其他国家或地区的投入产出表和相关参数, 数据整理需要做到使其划分一致。进行 I-O LCA 分析, 对于所有深圳市交通基础设施有关的部门, 需要得到相关投入产出数据表, 进行有关经济和环境排放的投入产出分析, 对于评价单个交通基础设施工程项目及其每个阶段工艺的生命评价, 该方法并不适合。

### 2.2.3 混合型生命周期分析方法

混合型生命周期分析方法 (Hybrid LCA) 是将 Process LCA 和 I-O LCA 两种

方法结合使用的 LCA 分析方法,就分析对象的不同,目前通常有两种 Hybrid LCA 分析模型,即:基于过程的 Hybrid LCA 和基于投入产出的 Hybrid LCA。该方法将 Process LCA 分析中“自上而下”的过程数据和 I-OLCA 方法中投入产出表数据相结合,兼顾了数据的完整性、特殊性、综合性,避免了单独使用一种分析方法给结果带来的不确定性,使分析结果更加准确可靠,在 LCA 分析领域,得到广泛应用。

但是,数据来源的可靠性和研究对象的复杂程度使 Hybrid LCA 评价方法运用时受到限制,应用时必须要有投入产出表作支撑,该部分数据获得较困难,因此,Hybrid LCA 方法经常应用于不强调数据准确性的复杂系统。

#### 2.2.4 LCA 方法的选择

本文以传统 Process LCA 为基础,强调数据的收集和不确定性分析,将传统生命周期模型精简,采用精简型生命周期分析方法,在核算过程中修正基础数据和各类参数,将不确定性处理始终贯穿于模型的创建与应用过程,进而提高分析结果的可靠性和准确度。从宏观层次构建交通基础设施碳排放清单分析模型,核算深圳市交通基础设施领域能源消耗和碳排放。

##### (1) 开展调查分析及数据处理方面的工作

基于精简型生命周期分析方法理论方法,本研究采用文献资料收集、问卷调查、交通工程施工现场实地调研和采样等研究手段,获取一手资料数据。其中文献资料数据主要是针对各类统计报告、年报及研究报告:如深圳市统计年鉴、深圳交通邮政统计年鉴、深圳市城市更新“十三五”等,同时还包括各类相关的科技论文及与材料碳排放因子、资源能耗和排放相关的基础数据(如国内外 LCA 分析通用商用数据库, SimaPro、GaBi、eBalance),是本研究的数据基础和重点分析对象。

##### (2) 基于精简型生命周期方法理论构建交通基础设施领域能源消耗和碳排放分析框架及测算方法

在交通基础设施环境影响分析领域,尽管国内外相关的研究较为活跃,但是鲜有针对基于清单分析特别是关注数据质量及其处理的工程领域碳排放评估方法的研究。LCA 理论与方法被广泛应用于环境管理领域,包括工程环境管理,但其应用于开发相关研究面临基础数据不足和边界范围定义模糊等问题难以得到

广泛应用<sup>[46]</sup>，相应地鉴于生命周期分析数据收集难度大、分析过程复杂其成本较高，精简型生命周期概念应运而生<sup>[47-49]</sup>，目前在国内鲜有进行精简型生命周期方法（Streamlined Life Cycle Assessment, SLCA）研究报道，更多地是采用“简化型”的 LCA 分析方法，即通过简化评估指标、减少评估过程、或降低数据清单和质量、以及静态分析等手段来实现，因而分析结果可靠度不高。而 SLCA 方法，在不影响评估指标和结果的前提下，通过数据处理、不确定性分析、动态的测算过程、以及灵活的结果表达方式，来减少数据清单收集量、大幅降低分析成本、并可保障 LCA 分析结果的可靠性和准确性（见图 2-4）。

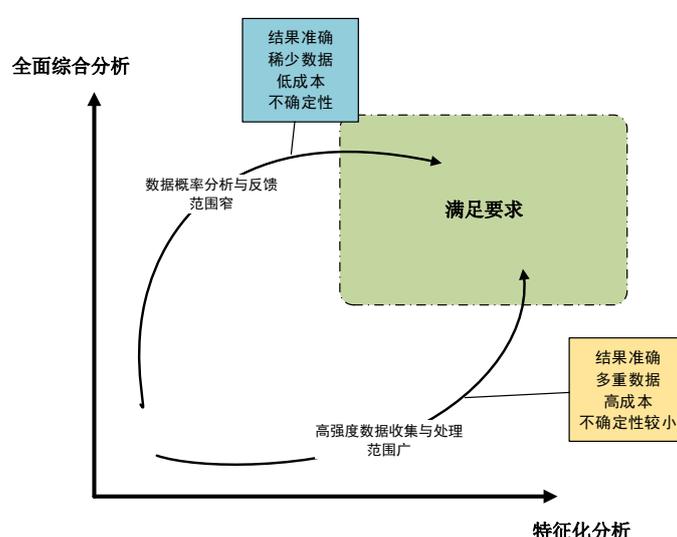


图 2-4 精简型生命周期分析理论

具体而言，SLCA 评估是一项系统且复杂的工作，需要反复核算，数据质量和分析结果在很大程度上取决于对国际经验数据的合理借鉴以及对调研获取的基础数据质量分析。本研究借助 Excel 平台进行数据管理、核算和结果表达，并辅以 Crystal Ball 软件进行蒙特卡罗模拟，对输入和输出数据的不确定性处理、敏感性分析、以及可靠性分析，将不确定性和敏感性分析纳入数据质量管理和结果分析是确保本研究顺利开展的重要保障。方法理论和模拟过程初步介绍如下：

步骤 1，对在上述研究中获取包括交通基础设施类型、建设量、施工工程量材料消耗清单、施工过程能源消耗清单等各类基础数据，进行质量综合评估并定义其不确定性。在生命周期清单分析阶段，需要大量的数据。由于交通基础设施工程项目复杂，在数据获取时，由于测量方法、测量仪器、信息传达等过程均存

在误差，导致输入数据具有不确定性。同时，在排放因子等数据的获取过程中，由于工艺水平的提高，诸多研究仍旧采用过时的数据，造成数据更新不及时等情况，如果仍旧采用该数据，无法反应研究对象的实际情况，确定时效性，同时有些研究采用当地数据平均水平，具有地理差异。以上原因造成数据质量的不足，数据质量问题严重影响了数据的不确定性。通过采用统计学思想，将不同数据指标向量化转化为一个综合的数据质量指标值 $U_i$ ，引入参数几何标准方差 $\sigma_g^2$ 表示数据质量在其总质量中所能达到的范围，见公式如下：

$$\sigma_g^2 = \exp[\sqrt{[\ln U_1]^2 + [\ln U_2]^2 + \dots + [\ln U_i]^2}] \quad (2-5)$$

步骤 2，从各类可用数据库中测算和提取与工程材料投入和能源消耗相关的单位排放量数据，并对数据进行归类处理和敏感性分析。建立数据库分类划表，并根据获取的资料信息和数据水平，确定数据分布特征（例如正态分布、均匀分布、三角分布等），并识别或假定误差范围（ $\sigma_g^2$ ）。

步骤 3，基于上述数据库的建立和不确定性处理，辅助 Crystal Ball 分析软件进行蒙特卡罗分析。输入的参数包括算术平均值 $\mu_{ar}$ ，算术标准方差 $\sigma_{ar}$ ，输出结果同样以算术平均值 $\mu_{ar}$ ，算术标准方差 $\sigma_{ar}$ 表示，同时进行敏感性分析，识别对生命周期碳排放结果不确定性或误差贡献的最主要参数或影响因素。

步骤 4，在对交通基础设施碳排放环境影响评估结果的表达过程，考虑不同的道路、桥梁路面形式及参数设置。基于不同形式分析结果的预测过程，可通过假设检验和概率统计分析方法进行准确度分析实现。

碳排放清单数据包括通基础设施 3 个子系统（道路、地铁、桥梁）的各个阶段，以及各个阶段不同过程等多个参数指标，这些参数指标共同影响分析结果，并随生命周期管理系统路径的动态变化以及模拟仿真发生变化。

### 2.3 本章小结

本章主要介绍了 LCA 理论的基本框架和评价步骤，分别介绍了三种 LCA 评价方法，即：Hybrid LCA、Process LCA 和 I-O LCA，分别阐述了三种不同 LCA 评价方法的计算方法和步骤，并提出本文采用的 SCLA 方法。SCLA 方法以传统 Process LCA 为基础，强调数据的收集和不确定性分析，将传统生命周期模型精简，运用于深圳市交通基础设施领域碳排放的核算。在采用该方法核算的过程中，

不断修正基础数据和各类参数,将不确定性处理始终贯穿于模型的创建与应用过程,进而提高了分析结果的可靠性和准确度。从宏观层次构建了交通基础设施碳排放清单分析模型,核算出总碳排放量的范围,识别出对生命周期碳排放结果不确定性或误差贡献的主要影响因素。

## 第三章 生命周期环境影响评价步骤

### 3.1 目的与范围

生命周期评价首先要确定评价的目的和范围。目的是要确定为什么要进行该项研究，范围是确定研究对象，忽略范围外的内容。LCA 的研究目的中需要明确开展研究的意义和受用对象；确定 LCA 研究范围时，必须明确研究对象的系统功能、系统边界、功能单位、研究假定等方面。进行生命周期评价时，首先需要确定适当的研究目的与范围，保证研究的深度与广度。

#### 3.1.1 研究目的

该研究以深圳市交通基础设施领域为研究对象进行生命周期环境影响分析，研究目的有以下 3 个：

(1) 通过基础数据收集，建立交通运输基础设施领域的生命周期系统数据库，创建基于 SLCA 方法的碳排放核算和环境影响评估模型，建立相应的核算与评价方法学，对深圳市交通基础设施与环境影响之间的相互关系进行探索，分析深圳市在建设交通基础设施整个生命周期过程中的资源、能源的投入及其碳排放，进行科学合理的计算。

(2) 通过比较深圳市不同交通基础设施类型的环境负荷，计算深圳市年度交通基础设施领域碳排放总量，分析生命周期各阶段的碳排放的主要来源，找出影响环境负荷的主要因子。

(3) 基于深圳市不同交通基础设施领域的环境负荷与碳排放清单核算，建立体系进行预测评估，分析预测深圳市交通基础设施领域在未来 5 年内的碳排放情况，为加快交通工程环境保护建设，促进相关部门对交通建设领域节能减排问题的重视，对决策者提供数据支持。

#### 3.1.2 研究范围

##### (一) 系统功能

包括道路、桥梁、地铁在内的城市交通基础设施，是指为社会生产和居民出行生活提供公共服务的物质工程设施，用于保证当地社会经济活动正常进行的公共服务系统。城市交通基础设施满足了大部分出行者，特别是通勤者上班、上学

和回家等出行目的，也包括外出购物、娱乐、旅游等目的<sup>[50]</sup>。就城市尺度来说，交通基础设施连接了城市的各个部分，同时也使该城市与外部可以便捷沟通，方便了物流、人流等要素的输送，使得各种重要信息、资源可以快速地在各要素之间流通，对生产要素的流动、城镇体系的发展具有决定性影响，实现全社会资源的优化配置，成为了连接不同资源的纽带，提高了人民的生活水平和城市竞争实力<sup>[51]</sup>。

## （二）系统边界

交通基础设施生命周期系统边界是包括各项交通工程，以及实现交通功能的建筑材料生产、拆除废弃物循环利用等相关过程，然而，交通基础设施除了道路、地铁、桥梁，还有包括机场、停车场、公交车站等，工程种类繁多，工艺流程复杂，出于能力、工作量、工作时间的限制，在数据整理过程中，出现数据量不完整、数据单位不统一、部分数据难以获取等问题，在研究范围上界定了系统边界，针对交通基础设施总的碳排放贡献不大的项目和过程，如停车场、公交站台、轮渡码头等，以及深圳市未涉及的项目，如轻轨线路等，将其排除在系统边界范围内，只考虑道路（包括高速公路和一到四级公路）、市内桥梁和地铁的建设 3 大子系统，将其作为交通基础设施生命周期的研究对象并将其细化，定义了系统边界（图 3-1）。

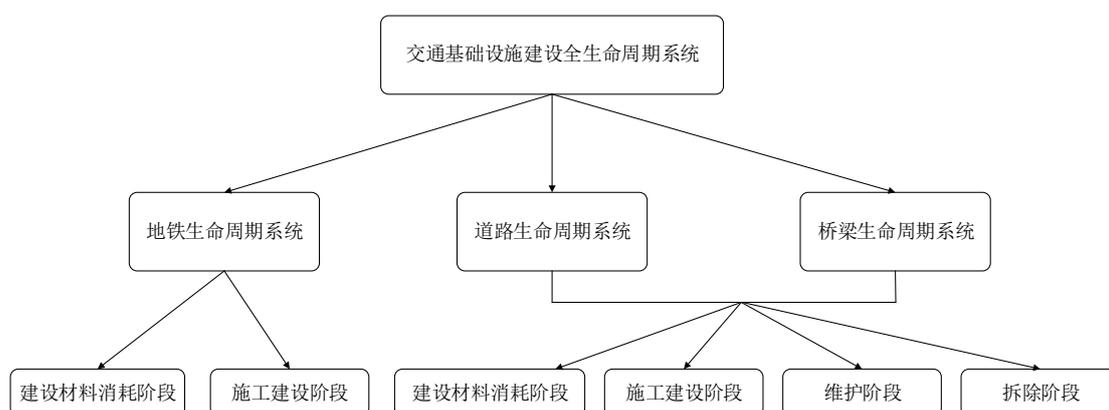


图 3-1 交通基础设施生命周期系统边界

因本文研究的是交通基础设施建设过程的生命周期，突出的是建设过程。地铁的建设过程尚未进入拆除阶段，同时，目前在深圳市地铁系统内，维护阶段的建设活动通常是日常维护地铁车站等工程，能源消耗和环境影响很小，因此地铁建设生命周期不包括维护和拆除阶段。

建筑材料消耗阶段的环境影响是指建筑材料投入交通工程之前,已经发生并产生一定环境影响的过程,包括矿石原材料的开采、加工、运输到施工现场等过程产生的环境影响总和<sup>[52]</sup>。在交通基础设施建设过程中,需投入众多建筑材料。除了钢筋、混凝土等常见耗材,还包括防水卷材、添加剂、催化剂等化工产品,全面分析所有建筑材料难度较大,因此通过分析施工工程量清单中,耗材较多的原材料,通过文献阅读与数据库数据分析,将涉及这些材料的碳排放因子进行归类汇总,并进行不确定数据分析,材料运输过程中的碳排放通过计算得到。从而计算出该材料产生的全部环境影响。建筑材料消耗阶段属于施工建设的一部分,该阶段材料消耗量大,伴随着大量化石能源的投入,产生一定程度的碳排放,其环境影响以高污染为主要特征,将其单独进行分析。

施工建设阶段主要包括地铁车站的建设、道路路面的铺筑、桥梁墩台施工、预制梁安装等过程,其碳排放主要来源于该过程中现场施工设备和机具的运行过程中,机械的使用消耗了一定的汽油、柴油、电力等能源,产生的能量消耗伴随了一定程度的环境排放。

维护阶段指道路和桥梁工程使用过程中,根据路面或结构的损坏情况,所采取的一系列维护、改造、加固措施。在各种养护、维修过程中,原材料的投入和施工机械的运行产生能源消耗和碳排放。该阶段在整个生命周期中分布时间较长,虽然每次维护过程产生的环境影响较小,但由于时间持续性,故产生的碳排放相当可观。地铁工程的日常维护多为人工维护,设计工程项目较少,顾不予考虑。

当道路、桥梁达到设计年限,结构、路面等遭到破坏,功能不能满足交通工具的通行,或者在原有交通工程上有新的建设规划,需进行拆除。拆除过程中的环境影响源于施工机械的投入对交通工程结构的破坏,以及运输机械将废弃材料运到回收处理厂的过程,该阶段未将废弃材料的循环加工利用和堆填过程中的碳排放量考虑在内。此阶段历时很短,产生的环境影响有限。地铁工程尚未到拆除阶段。

### (三) 功能单位

在进行 LCA 研究时,需确定研究对象的功能单位。功能单位是指,在对产品进行比较时,为了让不同的研究对象在同一度量基础上,具有可比性,需要人工设置的研究单位。如对不同交通工程进行分析时,可以 1km 为功能单位,而

不是 1 条道路、1 座桥梁、轨道交通 1 号线为研究对象，这样，不同道路、桥梁和地铁的功能进行时有了比较的前提，使得他们完成能够完成相同或者相类似的功能。

在确定功能单位时，必须满足的原则有两个：（1）可度量性。（2）功能单位的确定需符合研究目的和范围。

本文的研究内容主要是比较不同的交通基础设施在生命周期不同阶段，能耗和碳排放的总量与各阶段的差异，交通基础设施包括道路、桥梁、地铁 3 个子系统，道路又可以分为一级到四级等级公路和高速公路。为了能更好的反映不同类型交通基础设施生命周期的碳排放情况，利于分析比较，取 1km 标准交通工程作为 1 功能单位。在分析深圳市道路系统时，根据《广东省公路路面典型结构应用技术指南》<sup>[53]</sup>，研究对象中的高速公路为双向八车道，行车道  $8 \times 3.75\text{m}$ ，中央隔离带 2m，路面宽度 40m；一级公路为双向六车道，行车道  $6 \times 3.75\text{m}$ ，中央隔离带 2m，路面宽度 32m；二级公路为双向四车道，行车道  $4 \times 3.75\text{m}$ ，路面宽度 22m；三级公路为双向两车道，行车道  $2 \times 3.25\text{m}$ ，路面宽度为 7.5 米；四级公路为双向两车道，行车道  $2 \times 3.25\text{m}$ ，路面整体宽度为 7.0m；桥梁为双向六车道，行车道  $6 \times 3.75\text{m}$ ，中央隔离带 2m，路面宽度 32m。道路和桥梁信息见下表 3-1，地铁轨道工程建设因其特殊性和规范性，未列出详细信息，取 1km 地铁区间和 1 个地铁车站之和为 1 功能单位。输出的物质质量形式为生命周期内 1 功能单位工程建设所排放的碳排放量，表示为 t/功能单位或者 kt/功能单位。然而分析出不同交通工程的生命周期碳排放量后，对于深圳市而言，其每年不同基础设施的建设量也不尽相同，因此仅给出不同交通工程生命周期内的能耗值和碳排放量缺乏可比性，需要建立一个横向比较的平台。用每年交通基础设施的碳排放量作为评价指标可以有效反应深圳市交通基础设施领域的年度碳排放总量，可使评价结果更具说服力。因此，本文交通基础设施的生命周期环境影响分析的目的是分析深圳市不同交通工程的年碳排放量。

表 3-1 1 功能单位道路、桥梁信息

类型	宽度 (m)	车道	中央隔离带 (m)	路肩 (m)	路缘带 (m)
高速公路	40	8	2	7	1
一级公路	32	6	2	6.5	1
二级公路	22	4	0	5	0
三级公路	7.5	2	0	0.5	0
四级公路	7	2	0	0	0
桥梁	32	6	2	5	1

来源：《广东省公路路面典型结构应用技术指南》<sup>[53]</sup>

#### (四) 假设

在生命周期评价的过程中，在保证研究可靠度和客观性的前提下，为了使计算数据统一，需要对该过程中的某些参数进行一些假设，使其合乎交通领域基本情况，规范并方便计算：

(1)道路、桥梁工程的维护周期为 7 年，整个生命周期为 21 年。

(2)道路、桥梁维护施工工艺为加铺沥青混凝土面层。

(3)在建设材料消耗阶段，材料的运输过程只考虑了生产工厂到施工场地的运输距离，销售商进行转运的距离并未考虑。

(4)拆除阶段的碳排放是指在破路、运输等过程施工机械的投入和运输机械将废旧料运到回收处理厂过程，由于能源消耗产生的碳排放，该阶段未将废弃材料的循环加工利用和堆填过程中的碳排放量考虑在内。

## 3.2 清单分析

清单分析是数据收集的过程，通过对各阶段材料、能源的投入量等数据进行分类统计，并收集交通基础设施建设所需材料的碳排放因子等数据，统一到清单，进行数据处理和计算，可获得生命周期的清单。

### 3.2.1 数据类型

在清单分析过程中，数据来源与数据质量非常重要，本研究需收集的数据类型有以下 3 种：

(1) 交通基础设施建设过程材料消耗和机械能耗清单数据

这类清单数据包括在交通工程建设材料消耗过程中，需要的建设材料种类和数量；施工建设过程中所需要的机械类型，以及该机械消耗的电力、汽油、柴油等。该数据可从《城市轨道交通工程预算定额 GCG-103-2008》<sup>[54]</sup>、《公路工程预算定额 JTG/TB06-02-2007》<sup>[55]</sup>、以及实地调研收集到的深圳市典型的道路、桥梁和地铁工程的施工工程量清单案例中获得（部分工程施工工程量清单见附表 1-3）。建设材料消耗阶段的排放因子从文献、商用数据库中获得。

### （2）材料运输清单数据

这类清单数据包括，施工工程量清单中的不同类型材料，从加工车间运输到施工现场的运输距离，采用的不同类型的运输车辆（车辆耗油类型：汽油、柴油；车辆类型：大型、中型、小型），以及不同运输车辆的平均碳排放因子，通过实地调研和数据库获得。

### （3）深圳市交通基础设施年度建设量清单数据

深圳市年度道路、桥梁、地铁等年度建设量、维护量、拆除量等数据，以及道路建设类型等可从深圳市统计局发布的统计年鉴<sup>[7]</sup>、深圳城市更新“十三五”规划<sup>[8]</sup>、深圳交通邮政统计年报<sup>[56]</sup>中获取。

## 3.2.2 碳排放计算模型

交通基础设施是一个复杂的产品系统，在其生命周期每个阶段中，具有相当复杂的投入与产出，产生一系列的碳排放。图 3-2 展示了交通基础设施生命周期各阶段的清单系统的输入与输出。

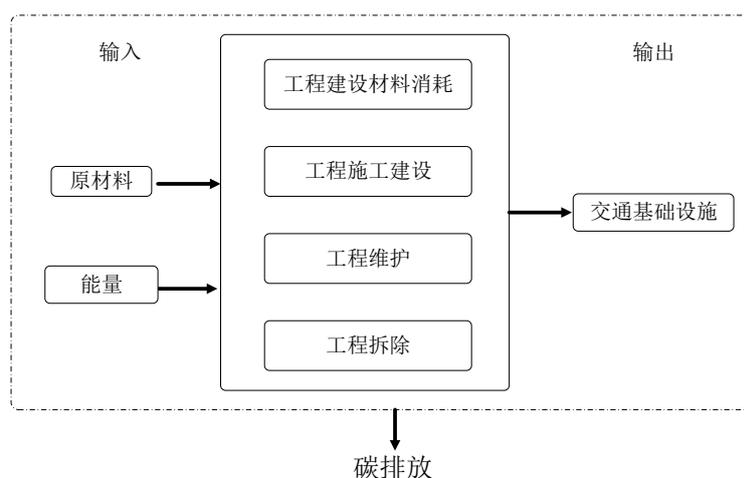


图 3-2 清单分析系统输入与输出

交通基础设施的生命周期中，材料的消耗与运输，施工机械使用等消耗了大

量能源，伴随着尾气排放，造成严重的环境污染。环境影响涉及温室效应、水体富营养化、酸化、大气污染、人体毒性危害，以及原材料开采中和废弃物填埋对土地占有与破坏等。温室气体包括二氧化碳、氮氧化物、全氟碳化物等，是指在大自然中存在的一类气体，这类气体可以吸收红外线辐射，同时将其释放到大气，造成一定程度的气候变暖<sup>[57]</sup>。因目前生命周期评价中环境影响评价部分发展尚不完善，各种环境影响因子不确定性和争议性较大，本研究的环境影响只研究温室气体的排放，以碳排放表示，CO<sub>2</sub>当量计算。

温室气体中最主要的气体是二氧化碳，其他温室气体相对于二氧化碳而言，其温室效应差别很大。根据研究，不同的温室气体均可换算成 CO<sub>2</sub> 当量的表示形式，以甲烷为例，在 100 年内，甲烷的温室效应是二氧化碳的 21 倍，即甲烷气体的全球变暖潜能值为 21。国际能源署（IEA）<sup>[58]</sup> 研究整理了不同温室气体的 CO<sub>2</sub> 当量，见附表 4。本研究按照这种方法计算不同温室气体的碳排放量。

深圳市交通基础设施生命周期个阶段均产生一定量的碳排放。本研究在分析过程中，通过实地调研，分析了不同建设生命周期阶段可能产生碳排放的过程，并细化了生命周期不同阶段可能产生碳排放的过程，其来源如表 3-2 所示：

表 3-2 碳排放来源

生命周期阶段	碳排放来源
建设材料消耗阶段	原材料开采、加工，建设材料的生产、运输整个过程中消耗的资源及生产过程中设备投入，能源消耗和材料运输到施工现场产生的碳排放。
施工建设阶段	施工机械运营过程中的碳排放。
维护阶段	维护过程中，原材料的投入和施工机械运营产生的碳排放。
拆除阶段	施工机械将原有道路、桥梁结构拆除过程中，机械产生的碳排放。

深圳市交通基础设施生命周期碳排放模型，为各阶段产生的温室气体换算成二氧化碳当量后的总和，如公式 3-1 所示：

$$Q_t = Q_m + Q_c + Q_r + Q_d \quad (3-1)$$

其中， $Q_t$ 表示不同类型交通基础设施生命周期的碳排放总量，分别  $Q_m$ 表示建设材料消耗阶段的碳排放量， $Q_c$ 为施工建设阶段的碳排放量， $Q_r$ 和  $Q_d$ 分别表示在维护阶段、拆除阶段产生的碳排放量。

### 3.3 影响评价与结果解释

在清单分析结束后，对不同交通基础设施各阶段的资源消耗、能源消耗及其碳排放量有详细的结果，影响评价的内容是结合清单分析结果，对深圳市交通基础设施造成的环境影响进行定性定量与定性评估。

结果解释是生命周期评价方法的最后阶段，通过前三个阶段的分析，识别和比较不同交通工程类型的环境影响，解释相同交通基础设施生命周期内不同阶段的碳排放量，以及不同交通工程碳排放出现的差异，指出碳排放量较大的工程种类和生命周期阶段，明确影响碳排放大小的关键因素和环节，指导绿色建材的选择、绿色施工工艺的改进，为交通基础设施领域的节能减排提供可能的方向，改善其生命周期的环境表现。

### 3.4 本章小结

根据 LCA 的评价步骤，本章定义了该研究生命周期环境影响评价的步骤，包括研究目的与范围的确定、清单分析等，确定了核算交通基础设施碳排放过程中所需要的数据类型及其来源，包括（1）交通基础设施建设过程材料消耗和机械能耗清单数据；（2）材料运输清单数据；（3）深圳市交通基础设施年度建设量清单数据。明确了碳排放的计算模型，阐述了生命周期影响评价与结果解释的内容。

## 第四章 交通基础设施碳排放过程清单分析

生命周期评价过程中第三个环节也是最为主要的环节是清单分析。交通基础设施碳排放过程的清单，包括能源、运输过程和建设材料三大类。能源的消耗包括建设材料生产阶段的能源消耗和工程施工建设、维护、拆除过程中机械投入的能源消耗，以及建设材料运输过程中的油耗。运输过程清单要厘清材料从加工车间运输到施工现场的运输距离，采用运输车辆类型，以及不同运输车辆的碳排放因子和碳排放计算过程。建设材料清单是分析文献研究数据和商用清单数据库中有关材料的碳排放因子，找出最合适深圳情况的数据，对碳排放因子进行不确定性分析。本文将这些与深圳市交通基础设施生命周期相关的投入的分析统称为过程清单分析。

深圳市交通基础设施生命周期清单模型中分析的碳排放因子，包括材料碳排放因子、能源碳排放因子、车辆运输碳排放因子等，是该研究分析的重要数据基础。本章整理了现有的国内外文献和各种数据库数据，结合深圳市交通基础设施的基本情况，归纳建立了交通基础设施的相关产品的时效清单。

### 4.1 能源的清单分析

在交通基础设施建设过程各阶段，都需要能源的投入，如建设材料生产阶段生产车间电力消耗、施工建设阶段机械的石油汽油消耗等。能源的生产是相当复杂的过程，包括煤炭的开采、能源的生产和使用等诸多环节，基于研究背景和研究基础，深入研究能源系统的碳排放清单相当困难。本文参考了大量国内外相关文献，统计并整理了相关能源清单，省略能源生命周期内各阶段的分析，将国内外已有成果分析比较，选择符合深圳市情况的能源碳排放因子，将现有研究成果应用在交通基础设施领域进行碳排放分析。

能源的生命周期范围界定在从生产到运输，截止到使用过程，该阶段产生了一定的环境影响，通过用碳排放指标量化单位质量能源的环境影响，得到相应能源的碳排放因子。各个国家在能源领域，通过统计能源消耗量和各能源部门的碳排放总量，可粗略估计不同能源的碳排放系数，精确数据则根据实验，进行基础数据搜集、建立模型并加工处理数据获得<sup>[59]</sup>。

本研究的能源清单分析参考了国家发改委能源研究所、中国工程院等机构对能源碳排放因子的测定，同时参考 IPCC 报告、美国能源部（DOE）美国能源信息署联合发布的碳排放信息等国外研究机构的数据，与 CLAC 数据库进行对比。分析结果显示，数据有一定的差异，通过对数据进行整理分析，将所有数据导入 SPSS 软件确定数据分布特征（例如正态分布、均匀分布、三角分布等），并识别或假定不同能源的误差范围（ $\sigma_g^2$ ）。基于上述数据的统计和不确定性处理，借助 Excel 平台进行数据管理、核算和结果表达，辅助 Crystal Ball 分析软件进行蒙特卡罗分析。输入的参数包括算术平均值，算术标准方差，输出结果同样以算术平均值，算术标准方差等表示，在计算总碳排放量时使用。对能源碳排放因子的统计整理如表 4-1 所示。

表 4-1 能源碳排放因子清单整理（单位：kg CO<sub>2</sub> eq/kg）

能源类型	IPCC	中国工程院	DOE/EIA	国家发展和改革委员会能源研究所	CLCD 数据库	国家环境局温室气体控制项目
煤炭	0.745	0.68	0.702	0.747	0.69	0.748
石油	0.5857	0.54	0.478	0.591	/	0.583
天然气	0.4483	0.41	0.389	0.443	0.389	0.444
电力	/	0.26	0.269	0.278	*	0.286

注：“/”表研究中未涉及该能源，“\*”表示在 CLCD 数据库中电力的碳排放量是 0.78（kg CO<sub>2</sub> eq/kwh）。

资料来源：《建筑物能源碳排放因子选择方法研究》<sup>[59]</sup>，CLCD 数据库<sup>[60]</sup>

为了适应深圳市交通基础设施领域的能源碳排放估算，通过走访相关人员等，对清单数据进行验证，将该部分能源数据导入 Crystal Ball 软件进行分布拟合，确定数据分布特征符合正态分布，建立相应的数据库分类划表，并根据获取的资料信息和数据水平，进行蒙特卡洛模拟不确定性分析，并参考国外已有基于道路运输的研究<sup>[61,62]</sup>，分析结果如下表所示：

表 4-2 能源碳排放因子

能源类型	汽油	柴油	电力	天然气	煤炭
	(kg/L)	(kg/L)	(kg/kwh)	(kg/kg)	(kg/kg)
碳排放因子	2.26	2.73	0.78	0.42	0.74

来源: Xiaofei Chen,Zijia Wang. [61] ; H. Hao,H. W. Wang,X. H. Liet al. [62]

## 4.2 运输过程的清单分析

运输过程是建设材料运送到施工现场,以及拆除过程中将废弃材料运到回收站并返回的过程,运输过程运输机械较为复杂、多变,涉及海运、铁路运输、道路运输等,通过分析深圳市交通建设项目的实际情况,本文主要考虑道路运输。不同级别的运输车辆,耗能有所差异,运输车辆能耗排放采用根据不同载重级别的货车碳排放能耗法计算。运输过程中沥青等部分混合料表面覆盖苫布,若车辆行驶速度过快,混合料自身排放的温室气体量会扩散出来,但数量较少且难以计量,因此在运输阶段不考虑该部分排放。

在计算过程中,根据不同材料的质量和运输特点和实际调研情况,钢材选用重型柴油货车运输(30t),沥青、水泥材料选用重型柴油货车运输(18t)进行运输,铝材、平板玻璃采用中型汽油货车运输(8t),黏土转采用轻型汽油货车运输(2t),其他材料采用中型柴油货车运输(10t),不同车辆类型的碳排放因子见表 4-3。

运输距离的确定是复杂的过程,首先要确定不同材料加工车间的位置和交通基础设施的施工地点,同时,在运输返回过程中,由于运输车辆空载返回,此时需要空车返回系数的修正,即实际运距 $D_{trans} = \text{单程运输距离} \times F_y$ 。根据已有研究,空载时的环境负荷是是满载时的 0.67 倍,空车返回系数 $F_y=1.67^{[63]}$ 。

表 4-3 运输车辆碳排放因子(单位: kg/t\*km)

车辆类型	重型柴油	重型柴油	重型柴油	中型汽油	轻型汽油
	货车运输	货车运输	货车运输	货车运输	货车运输
	(30t)	(18t)	(10t)	(8t)	(2t)
碳排放因子	0.0578	0.1211	0.1772	0.1034	0.2882

数据来源: CLCD 清单数据库

运输过程中的碳排放采用公式 4-1 进行计算：

$$C_{trans} = \sum_{i=1}^n E_{trans(i)} \times W_{trans(i)} \times D_{trans(i)} \quad (4-1)$$

其中， $C_{trans}$ 表示运输过程中总的碳排放， $E_{trans(i)}$ 表示运输车辆运输材料  $i$  的碳排放因子， $W_{trans(i)}$ 表示材料  $i$  的运输质量， $D_{trans(i)}$ 表示材料  $i$  的运输距离。

### 4.3 建设材料的清单分析

建设材料的碳排放清单分析是统计交通基础设施工程所需要的材料类型，如水泥、沥青、钢材等，通过分析国内外文献和数据库，得到不同材料的碳排放因子的统计表，尽量使清单数据符合深圳市材料生产水平，建立数据库分类划表，并根据获取的资料信息和数据水平，确定数据分布特征（材料数据多为平均分布），识别误差范围（ $\sigma_g^2$ ），对上述建设材料数据库进行不确定性处理，得到数据的算术平均值和算术标准方差。在缺少少量材料的碳排放数据时，如涂料、纤维等，通过调研和走访材料加工行业，统计其原材料和生产过程中的能耗，估计其碳排放因子，使得数据客观、准确，为下一阶段核算深圳市交通基础设施的碳排放做数据支撑。

#### （一）水泥

水泥是一种高能耗的建设材料，在交通基础设施建设过程中广泛运用。水泥行业在我国产量较大，在 2014 年，我国生产 24.76 亿吨水泥，占全球水泥产量的一半以上，同时水泥行业也是高污染行业，除了火电之外，碳排放量最大，约占我国碳排放总量的 11%<sup>[64]</sup>。由于我国水泥产量大，能耗高，属于能源密集型产业，对我国的环境影响巨大。然而，中国水泥材料的碳排放因子却存在很多争论。国际上和国内的一些机构均对我国水泥行业进行探究。例如荷兰环境评估署（PBL）在 2008 年测得中国水泥的碳排放因子约为 1.2 t CO<sub>2</sub> eq/t，IPCC 计算我国水泥生产工艺碳排放量达到 12.23 亿吨，远远超出 2013 年我国发布的《气候变化第二次国家信息通报》中的公布的有关水泥行业的碳排放信息<sup>[65]</sup>，该报告显示我国水泥行业碳排放总量为 4.1 亿吨，经过推算得到碳排放因子 611 kg CO<sub>2</sub> eq/t。因此，我国的实际情况与部分研究机构的估算存在差距，需考虑我国实际情

况进行估算。

在交通基础设施建设中常用硅酸盐水泥，该类型水泥耐磨性能好、高缩小、碱度较高、抗碳化能力强，并且具有较高强度。我国硅酸盐水泥的生产一般采用新型干法水泥生产线，生产过程较为复杂，包括水泥原料的制备、生料的预热和分解、水泥熟料的生产、贮藏等，若要研究水泥的碳排放因子，需对各个过程进行资源、能源投入的统计和环境影响的分析，专业性较强且工作量大。国内关于硅酸盐水泥的生命周期碳排放研究比较深入，主要参考中国科学院地理科学与资源研究所沈镭课题组研究，在其课题“水泥生产的碳排放(编号:XDA05010400)”的一系列研究中，探索出了在符合中国国情的水泥碳排放因子，通过比较研究结果<sup>[64, 66, 67]</sup>，与 CLCD 清单数据库进行对比，进行数据处理确定水泥生产过程中的碳排放清单。见表 4-4。

表 4-4 水泥碳排放因子（单位 kg CO<sub>2</sub> eq / t）

序号	水泥类型	水泥碳排放因子
1	新型干法窑水泥熟料	773.63~915.01
2	立窑水泥熟料	733.00~1,012.88
3	特种水泥熟料	517.07~1,305.20
4	大型新型干法水泥熟料	703.90
5	中型新型干法水泥熟料	729.3
6	普通硅酸盐水泥市场平均	740.6

资料来源：序号 1、2、3 来自沈镭课题组研究，3、4、5 来自 CLCD 数据库。

进行交通基础设施建设材料消耗阶段水泥材料碳排放估算时，将该部分数据嵌入 Crystal Ball 软件进行分布拟合，借助 Excel 平台进行数据管理、核算和结果表达，确定了数据分布特征，符合平均分布，使清单数据符合深圳市材料生产水平，建立数据库分类划表，并根据获取的资料信息和数据水平，进行蒙特卡洛模拟不确定性分析，为计算交通基础设施水泥材料消耗总碳排放量做数据基础。

## （二）沥青混合料

在交通基础设施，尤其是道路、桥梁路面铺设的过程中，对沥青混合料的资源依赖性很强。沥青路面具有行驶舒适、噪声低、维护简洁、视觉效果好等优点，在深圳市的道路、桥梁结构中，沥青路面是高速公路、一级公路、二级公路和桥

梁路面所采用的主要类型。在今后相当长的时期内，新建道路路面仍将以沥青路面为主。沥青混合料在生产过程中，产生温室气体排放，造成环境影响。

交通工程施工中，选用的沥青种类常有普通道路石油沥青、改性沥青、乳化沥青三种。长安大学依托在公路领域的学科优势，在沥青材料的环境影响领域碳排放领域做了诸多深入研究<sup>[68-72]</sup>，深入探究了不同沥青材料的生产过程，以及在交通基础设施工程中的应用。长安大学蔺瑞玉在其博士学位论文中，详细介绍了沥青材料生产过程中温室气体排放的来源，其中主要是源于原油的消耗和生产机械的能耗<sup>[40]</sup>。本文结合长安大学的诸多研究结果和 CLCD 清单数据库，对沥青材生产过程中的碳排放进行比较，沥青碳排放清单见表 4-5。

表 4-5 沥青碳排放因子（单位 kg CO<sub>2</sub> eq / t）

序号	沥青类型	碳排放因子
1	石油沥青	285
2	乳化沥青	221
3	改性沥青	252.46
4	煤沥青	825.2

资料来源：序号 1、2、3 来自长安大学的研究，4 来自 CLCD 数据库。

经研究发现，沥青材料涉及的种类较多，且同一种沥青产品的碳排放值较为确定，进行交通基础设施材料消耗阶段水泥材料碳排放估算时，将该部分数据直接做固定值输入 Crystal Ball 软件，建立数据库分类划表，为计算交通基础设施沥青材料消耗总碳排放量做数据基础。

### （三）钢材

在我国建筑业、交通业等领域，钢材大量使用，属于我国重要的支柱产业。在我国城镇化发展进程中，消耗了大量的钢材，同时钢铁工业也是能源密集型产业，产生大量 CO<sub>2</sub> 排放。进入 21 世纪，中国粗钢产量年增速达到 15.52%，2012 年钢产量约为 7.17 亿吨，占当年世界粗钢产量的 46% 左右。钢铁工业的快速发展带来了资源、能源和环境等一系列问题<sup>[73]</sup>。在交通基础设施领域，钢材也是重要的原材料之一。

分析钢铁产品的碳排放因子，需考虑钢铁生产全过程中可能排放出温室气体的过程，包括铁矿石和煤炭的开采和加工、进行高炉炼铁工艺、不同类型钢铁的

铸造等。在这些过程中，均产生一定的温室气体排放，需对各个过程详尽的环境影响分析，分析单位质量产品的环境投入与产出，专业性较强。

交通基础设施领域尤其是地铁建设需要消耗大量钢材，包括钢筋网片、钢筋笼和桩间、护坡钢筋网等，需对钢材进行碳排放分析。国内已有部分研究对钢铁材料碳排放深入研究，主要参考中国科学院生态环境研究中心杨建新研究员得《产品生命周期评价方法及应用》一书<sup>[33]</sup>研究了钢材生产过程中 LCI 清单（见附表 5），武汉科技大学张肖对湖南华菱湘潭钢铁有限公司钢铁生产过程的调查<sup>[74]</sup>，燕山大学梁聪智对 2009 年国家水平钢铁行业碳排放的分析<sup>[75]</sup>，并将国内的碳排放研究结果与 CLCD 清单数据库将钢铁生产过程中的生命周期碳排放进行分析，其碳排放清单见表 4-6。

表 4-6 钢铁碳排放因子（单位 kg CO<sub>2</sub> eq / t）

序号	钢铁类型	碳排放因子	来源
1	湖南华菱湘潭钢铁有限公司	2,103.87	邹安全等 <sup>[74]</sup>
2	2009 年国家平均水平	1,792	梁聪智 <sup>[75]</sup>
3	高速公路用钢	4,435.1	潘美萍 <sup>[41]</sup>
4	热轧中型型钢生产	2,655	CLCD 数据库

有表格中的整理结果可知，钢铁材料的碳排放因子差距较大，进行交通基础设施建设材料消耗阶段钢铁材料碳排放估算时，将该部分数据进行嵌入 Crystal Ball 软件进行分布拟合，确定数据分布特征符合正态分布，建立相应的数据库分类划表，并根据获取的资料信息和数据水平，进行蒙特卡洛模拟不确定性分析，为计算交通基础设施钢铁材料消耗总碳排放量做数据基础。

#### （四）其他材料

深圳市交通基础设施建设过程中，除了消耗水泥、沥青、钢筋三大耗材外，还会消耗其他一些材料，例如碎石、石灰、铝材等，按照上述碳排放因子整理思路，通过文献阅读、实地调研以及清单数据库的搜索，将交通基础设施建设过程中涉及到的所有碳排放因子进行汇总。在其他材料的碳排放因子确定后，将该部分数据输入软件，建立相应的数据库分类划表，并根据获取的资料信息和数据水平，进行蒙特卡洛模拟不确定性分析。其他材料的碳排放因子如表 4-7 所示。

表 4-7 建设耗材碳排放因子

序号	材料类型	碳排放因子	单位	来源
1	普通立窑石灰	1,331	kg CO <sub>2</sub> eq / t	CLCD 数据库
2	台湾玻璃	31.75	kg CO <sub>2</sub> eq / m <sup>2</sup>	郭誠中 <sup>[76]</sup>
3	浮法玻璃生产	1,103.62	kg CO <sub>2</sub> eq / t	陈文娟 <sup>[77]</sup>
4	浮法玻璃生产	1,071	kg CO <sub>2</sub> eq / t	CLCD 数据库
5	电解铝	22.67	t CO <sub>2</sub> eq / t	CLCD 数据库
6	2014 年我国吨铝碳排放量	15.13	t CO <sub>2</sub> eq / t	李敬 <sup>[78]</sup>
7	砂	2.79	kg CO <sub>2</sub> eq / t	CLCD 数据库
8	碎石	2.43	kg CO <sub>2</sub> eq / t	CLCD 数据库
9	碎石	2.5	kg CO <sub>2</sub> eq / t	潘美萍 <sup>[41]</sup>
10	电石法聚氯乙烯 (PVC)	7.4	t CO <sub>2</sub> eq / t	尚建选等 <sup>[79]</sup>
11	聚氯乙烯 (PVC)	8.68	t CO <sub>2</sub> eq / t	杨倩苗 <sup>[37]</sup>
12	工业用自来水	0.19	kg CO <sub>2</sub> eq / t	CLCD 数据库

#### 4.4 本章小结

本章归纳建立了交通基础设施的能源清单、运输过程清单和建设材料清单三大类，找出最合适深圳市情况的数据，对碳排放因子进行汇总。在建设材料和能源清单分析中，通过文献阅读、实地调研和 CLCD 数据库查找，归纳整理了不同材料、相关能源的碳排放因子，将该部分数据导入 Crystal Ball 软件进行分布拟合，确定数据分布特征进行蒙特卡洛模拟不确定性分析，借助 Excel 平台进行数据管理、核算和结果表达，实时、动态地将不确定性处理始终贯穿于模型的模拟和运用，得到碳排放因子的分布范围。在运输过程清单中，分析了不同交通运输工具的运输碳排放因子、运输距离的确定方法以及运输过程碳排放的计算方法。

## 第五章 深圳市交通基础设施生命周期碳排放分析

### 5.1 生命周期各阶段碳排放计算方法

深圳市交通基础设施生命周期的碳排放计算方法，是研究如何计算其建设材料消耗阶段、施工建设阶段、维护阶段和拆除阶段的碳排放量。建设材料消耗阶段属于施工建设的一部分，因该阶段材料消耗量大、环境影响突出，将其单独进行分析。生命周期清单分析的核心是计算不同交通基础设施生命周期的输入和输出，输入值为原材料消耗和能耗，输出值为碳排放量。研究过程如图 5-1 所示。

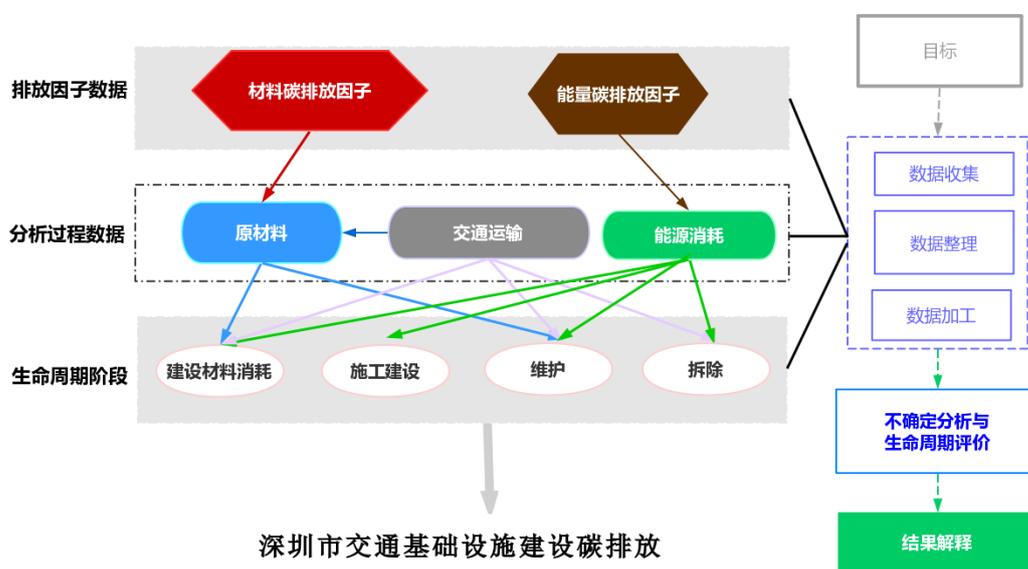


图 5-1 深圳市交通基础设施碳排放研究过程

#### 5.1.1 建设材料消耗阶段碳排放计算

深圳市交通基础设施道路建设需要消耗大量原材料，建设材料消耗阶段的碳排放是指各种筑路材料在开采、加工、生产和产品运输到施工现场所产生的碳排放。通过计算交通基础设施建设过程中的单位材料消耗量、统计和分析各种建设材料的单位耗能与碳排放系数、计算运输过程中的能量消耗与排放即可求得建设材料消耗阶段的碳排放量：



计算出高速公路建设材料生产阶段的碳排放清单，如表 5-1 所示。

表 5-1 1km 标准高速公路建设材料生产阶段碳排放量清单

材料类型	单位	消耗量	碳排放量 (t)
石油沥青	t	809.36	208.01
改性沥青	t	367.93	89.78
乳化沥青	t	72.96	14.08
砂	m <sup>3</sup>	2,685.24	7.28
矿粉	t	1,184.64	4.31
石屑	m <sup>3</sup>	1,714.15	6.23
碎石	m <sup>3</sup>	45,412.88	165.15
水泥	t	902.35	969.06
水	m <sup>3</sup>	2,674.67	0.6
碳排放总量合计(t)			1,464

同时，计算高速公路材料运输过程中的环境影响，以水泥为例，通过统计水泥产品的消耗量、生产地、运输距离等信息，采用公式 4-1 进行计算，结果如表 5-2 所示。

表 5-2 水泥产品运输阶段碳排放量清单

材料名称	水泥
生产地	深茂水泥厂
施工地址	深圳市宝安区某高速公路施工现场
建设材料重量 (t)	902.35
运输类型	重型柴油货车运输 (18t)
排放因子 (kg/t*km)	0.1211
运输距离 (km)	15.4
考虑空车返回系数运输距离 (km)	27.1
碳排放量(t)	$0.1211 \times 902.35 \times 27.1 \times (902.35 \div 18) = 149.7$

类似的，通过计算所有材料运输过程中的碳排放量，与材料生产阶段碳排放量进行加和，由此可得 1km 标准沥青路面高速公路在建设材料消耗阶段的 CO<sub>2</sub>

eq 排放是 1,743t, 其中材料生产阶段为 1,464t, 材料运输阶段为 279t。按照该方法, 得到 1km 标准一到四级公路的建设材料消耗阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放分别为 1,395t; 1,116t; 892t; 714t。

## (二) 地铁

选取深圳市地铁施工的工程量清单, 结合城市轨道交通工程预算定额, 分析地铁建设过程中建设材料的投入。地铁工程建设包括地铁车站和盾构区间两大部分, 同时地铁车站建设分为主体围护结构工程、机动车道、非机动车道、人行道、主体结构工程、主体结构防水工程、出入口、风亭等八大部分。盾构区间建设包括盾构隧道、附属联络通道及泵房、端头加固等三部分。以地铁车站中主体结构工程建设为例, 统计建设材料消耗量, 整理结果如表 5-3 所示。

表 5-3 地铁车站主体结构工程建设阶段材料消耗量清单

工程名称	材料类型	材料描述	单位	地铁	地铁	地铁
				工程 (一)	工程 (二)	工程 (三)
主体结构工程	混凝土	C20	m <sup>3</sup>	1, 145	1, 132	2, 260
	混凝土	C30	m <sup>3</sup>	47	47	49
	混凝土	C35	m <sup>3</sup>	23, 797	2, 1488	40, 937
	混凝土	C50	m <sup>3</sup>	612	667	2, 275
	钢筋	钢材总量	t	4, 654	4, 199	8, 143
	紫铜管	Φ50*4 L=2.5m	根	18	16	24
	止水板(紫铜排)	300*350*5	块	18	18	18
	铜排 TmY-50*5	接地母线铜排	m	1, 300	1, 200	1, 800
	铜排 TmY-50*5	接地网引上线	m	60	60	160
复合绝缘热缩带	JRD-4450C	m	50	50	50	

进行碳排放量分析时, 将地铁主体围护结构工程道、主体结构工程、主体结构防水工程合并为主体工程, 机动车道、非机动车道、人行道合并为车道工程, 合并后分为主体工程、行车道、地铁出入口、风亭等四大部分, 分别统计地铁建设工程中的材料投入量, 并通过平均值或中间值等数据处理, 将 1 个地铁车站的材料投入量进行统计, 以主体工程为例, 将主体工程建筑材料消耗量与建设材料

清单分析中的材料碳排放因子相乘,计算出地铁车站主体工程建设材料生产阶段的碳排放清单,统计如表 5-4 所示。

表 5-4 地铁车站主体结构建设材料碳排放量清单

地铁车站工程类型	材料投入类型	单位	数量	碳排放量 (t)
主体结构	混凝土	m <sup>3</sup>	48706	35,224
	钢材	t	9087	24,118
	砂浆	t	2612	6.34
	防水卷材	m <sup>2</sup>	10800	0.75
	铜	kg	4626	33.55
	橡胶止水带	m	6555	2.78

同时,需统计该地铁工程材料运输过程中的环境影响,以钢筋为例,通过统计钢筋产品的消耗量、生产地、运输距离等信息,采用公式 4-1 进行计算,统计结果如表 5-5 所示。

表 5-5 钢铁产品运输阶段碳排放量清单

材料名称	钢铁
生产地	深圳大友钢铁有限公司
施工地址	深圳市南山区某地铁施工现场
建设材料重量 (t)	902.35
运输类型	重型柴油货车运输 (30t)
排放因子 (kg/t*km)	0.0578
运输距离 (km)	36.21
考虑空车返回系数运输距离 (km)	60.45
碳排放量 (t)	$0.0578 \times 11961 \times 60.45 \times (11961 \div 30) = 16,662$

类似的,通过计算所有材料运输过程中的碳排放量,与地铁建设耗材生产阶段碳排放量进行加和,得到 1km 标准地铁 (1km 盾构区间和 1 地铁车站) 在建设材料消耗阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放为 79,468t,其中材料生产为 45,744t,材料运输为 33,724t。

### (三) 桥梁

按照上述方法,通过收集深圳市桥梁建设的工程量清单,在表中列出 1km 桥梁建设材料的消耗量,将建设材料消耗量与建设材料清单分析中的材料碳排放因子相乘,计算出 1km 桥梁建设材料生产阶段的碳排放清单,如表 5-6 所示。

表 5-6 1 km 标准桥梁建设材料生产阶段碳排放量清单

材料投入类型	单位	数量	碳排放量 (t)
混凝土	68.03	t	47.89
沥青	3.40	t	0.97
防水层	67.76	t	180.99
钢材	501.90	t	1,032.54
锚具(铁)	22.25	t	59.07
波纹管(铜)	43.48	t	0.33
支座(橡胶)	33.96	t	309.72
螺栓	23.32	t	61.91
立柱	21.49	t	15.13
角钢	12.50	t	33.19
铸铁	14.03	t	37.25
碎石	198.11	m <sup>3</sup>	0.67
塑料管	1132.08	m	1.43
玻璃	0.26	t	0.28
钢板网	9.70	t	25.75
碳排放总量合计 (t)			1,807

同时,需计算桥梁工程材料运输过程中的环境影响,以波纹管为例,通过统计 1km 桥梁波纹管的单位消耗量、运输车辆类型、运输距离等信息,采用公式 4-1 进行计算,统计结果如表 5-7 所示。

表 5-7 波纹管产品运输阶段碳排放量

材料名称	波纹管
生产地	深圳建锋五金厂
施工地址	深圳市福田区某桥梁施工现场
建设材料重量 (t)	43.48
运输类型	重型柴油货车运输 (10t)
排放因子 (kg/t*km)	0.1772
运输距离 (km)	32.71
考虑空车返回系数运输距离 (km)	54.63
碳排放量 (t)	$0.1772 \times 43.48 \times 54.63 \times (43.48 \div 10) = 1.8$

通过计算所有材料运输过程中的碳排放量,与地铁建设耗材生产阶段碳排放量进行加和,计算出 1km 标准桥梁建设材料消耗阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放总量为 2,169t,其中材料生产过程产生 1,807t 的 CO<sub>2</sub> eq 排放,材料运输阶段产生 362t 的 CO<sub>2</sub> eq 排放。

### 5.1.2 施工建设阶段碳排放计算

施工建设阶段是深圳市交通基础设施形成的重要阶段,通过人工和机械的使用实现。施工建设阶段碳排放的主要来源于各种不同施工机械的运行,包括自行车式平地机、盾构机、挖土机、轮胎式装载机、沥青拌和设备、沥青混合料摊铺机、自卸车、压路机、起重机使用过程中的能源消耗(汽油、柴油、电力等)。传统计算施工机械的能耗必须了解道路建设过程中各施工机械台班数以及施工机械单位台班能源消耗量。根据道路工程预算定额和工程量清单得到机械消耗台班数,通过对施工机械能源消耗量的监测得到耗能量。

$$Q_c = \sum_{i=1}^3 (F_{id} \times M_d + F_{ig} \times M_g + F_{ie} \times M_e) \quad (5-2)$$

公式(5-2)中,  $Q_c$  为施工建设阶段碳排放总量;  $i=1,2,3$  分别代表道路工程、地铁工程和桥梁工程,  $F_{id}$  为工程  $i$  消耗的柴油,  $F_{ig}$  为工程  $i$  消耗的汽油,  $F_{ie}$  为工程  $i$  消耗的电力,  $M_d$  为机柴油的碳排放系数。

本文为了简便运算,通过案例分析,统计不同交通工程整个施工建设过程中

的能源消耗量，将能源消耗量与表 4-2 中对应的能源碳排放因子相乘，计算施工建设过程中的总碳排放量。经统计，1km 标准交通基础设施施工建设阶段的能耗清单与 CO<sub>2</sub> eq 排放量如表 5-8 所示。

表 5-8 1km 标准交通基础设施施工建设阶段的能耗与碳排放量清单

工程类型	汽油 (kg)	柴油 (kg)	电力 (kwh)	碳排放量 (t)
高速公路	574	56,805	35,651	221
一级公路	359	35,503	22,282	184
二级公路	268	26,550	16,663	115
三级公路	206	20,376	12,788	86
四级公路	1,336	75,298	305,834	66
桥梁	708	70,080	43,983	227
地铁	19,820	568,050	3,694,178	4,447

### 5.1.3 维护阶段碳排放计算

交通基础设施生命周期中，只考虑道路和桥梁的维护阶段，地铁工程不考虑在内。道路、桥梁的维护包括路面维修和结构修复。与路面的维护相比，结构修复、路肩中央隔离带的修复等消耗较低，且修复期难以确定，本文只考虑路面的维护。假定城市道路、桥梁的修理期为 7 年，维护施工工艺为加铺沥青混凝土面层，维护示意图见图 5-3 所示。

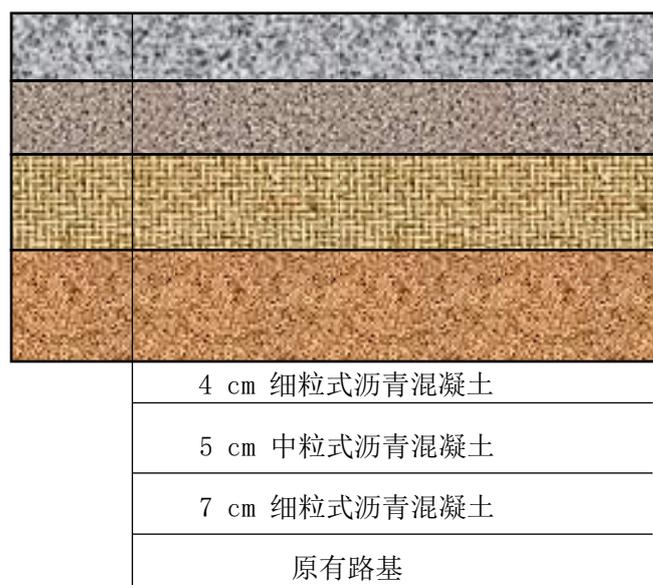


图5-3 维护路面结构示意图

通过计算道路、桥梁维护的材料消耗量以及道路工程预算定额和工程量清单，分别统计维护阶段的材料消耗量和能源消耗量，与相应材料、能源碳排放因子相乘，得到维护过程中的碳排放总量，如公式 5-1 所示。

$$Q_r = \sum_{i=1}^n q_i \times e_i + \sum_{f=1}^n F_f \times M_f \times S_f \quad (5-3)$$

公式 (5-1) 中， $Q_r$  为维护阶段碳排放量； $q_i$  为原材料的使用量； $e_i$  为原材料生产加工的碳排放系数； $i$  为各种原材料。 $F_f$  为机械  $f$  单位台班消耗能源的碳排放系数； $M_f$  为机械  $f$  的台班能源消耗量； $S_f$  为维护过程中机械  $f$  台班数； $f$  为道路维护过程中使用的各种施工机械。

以 1km 标准高速公路为例，其维护过程中的材料消耗量与碳排放量和机械投入量和碳排放量如表 5-9，表 5-10 所示。

表 5-9 1km 标准高速公路维护阶段材料消耗量与碳排放量

材料类型	单位	消耗量	碳排放量 (t)
石油沥青	t	485.6182	124.8
改性沥青	t	160.761	39.23
乳化沥青	t	43.778	8.45
碎石	m <sup>3</sup>	5,676.61	19.96
水	t	463.56	0.1
水泥	t	275.24	241.96

表 5-10 1km 标准高速公路维护阶段机械投入量及碳排放量

机械类型	柴油 (kg)	汽油 (kg)	电力 (kwh)	碳排放量 (t)
沥青拌和设备	50,637.38		20,864.82	152.11
轮胎式装载机	3,629.952			9.74
自卸车	16,538.53	230.58		45.22
沥青混合料摊铺机	789.324			2.12
沥青洒布车		78.876		0.29
洒水汽车	751.008			2.01
光轮压路机	5,354.52			14.36
自行式平地机	479.724			1.29
合计	78,180.438	309.456	20,864.82	227.14

经上述统计计算，1km 标准高速公路在维护阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放为 631 吨，其中，材料投入为 404t，机械消耗为 227t。一到四级公路维护阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放分别为 504t；315t；126t；113t，桥梁维护阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放为 523t。

#### 5.1.4 拆除阶段碳排放计算

地铁工程还尚未到达生命周期的拆除阶段，因此在该阶段只分析道路和桥梁工程。在生命周期的末尾，道路和桥梁面临拆除。一般通过履带式单斗挖掘机、破路机、机动空压机等施工机械进行拆除施工，产生大量了工程废弃物，再将这此工程废弃物运输到堆填中心处理掩埋，或是将运输到到回收厂进行循环再造。拆除过程机械的运行和材料的运输消耗的能源（汽油、柴油、电力等），是拆除阶段碳排放的主要来源。其计算过程如公式 5-2 所示。

$$Q_d = \sum_{i=1}^n (F_i \times M_i \times S_i) + C_{trans} \quad (5-4)$$

公式 5-2 中， $Q_d$  为拆除阶段碳排放总量； $F_i$  为机械  $i$  单位台班消耗能源的碳排放系数； $M_i$  为机械  $i$  的台班能源消耗量； $S_i$  为拆除过程中机械  $i$  台班数； $i$  为道路拆除过程中使用的各种施工机械， $C_{trans}$  是拆除过程中将工程废弃物运输到回收站的碳排放。

考虑到不同道路类型和桥梁拆除过程中的能源消耗和碳量排放基本一致物运输车辆的机械台班及数量也很接近，产生工程废弃物虽有差距，但相对生命周

期碳排放来说微不足道,将不同类型的道路和桥梁拆除过程碳排放进行比较意义不大。因此,通过调查一级公路拆除过程中的碳排放总量,将其统一到公路和桥梁拆除工作中。具体的拆除过程能耗和碳排放量如表 5-11 所示。

表 5-11 拆除过程能耗清单及其碳排放量

机械类型	柴油消耗 (kg)	碳排放量(t)
履带式单斗挖掘机	8614.6	66.79
破路机	20176.28	65.38
机动空压机	10385.79	28.35
运输卡车	4171.28	13.52
合计	43347.95	174.04

经上述统计计算,1km 道路和桥梁在拆除阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放约为 174 吨。

## 5.2 交通基础设施生命周期碳排放核算

基于生命周期交通基础设施的不同阶段的碳排放量的计算,进行整理,分别统计不同交通工程生命周期的碳排量。

### 5.2.1 道路生命周期碳排放核算

经过上述不同级别道路生命周期阶段碳排放量的核算,将同一级别道路不同生命周期碳排放量进行统计,得到 1km 标准道路的碳排放量如图 5-4 所示。1km 标准沥青混凝土路面高速公路生命周期 CO<sub>2</sub> eq 排放最大,为 2,769t (中间值,从 2,457t 到 2,941 吨)。1km 标准沥青混凝土路面一级公路 CO<sub>2</sub> eq 排放与高速公路相比略低,为 2,088t (从 2,294t 到 2,500t),1km 标准沥青路面二级公路约 1,754t,1km 标准水泥路面三级公路和四级公路 CO<sub>2</sub> eq 排放分别为 1,266t 和 912t。该数据是深圳市交通基础设施年度碳排放总量核算中,计算道路工程碳排放量的运算基础。

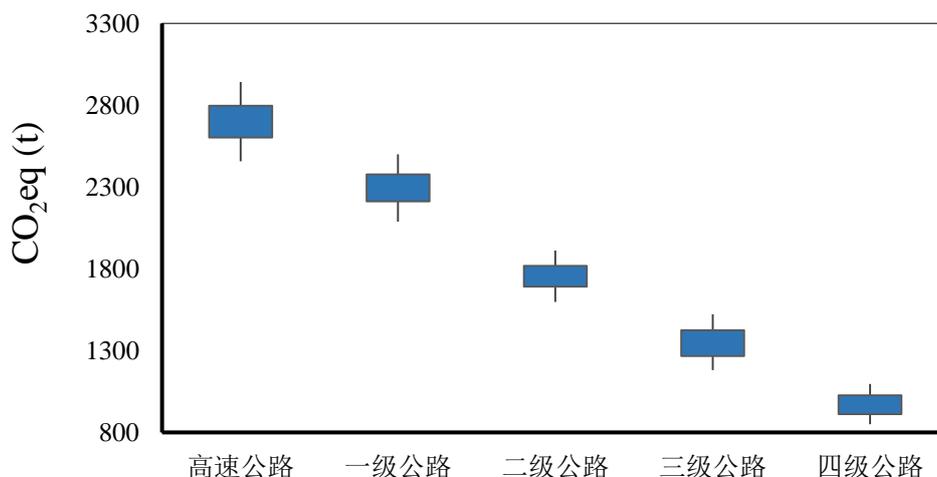


图 5-4 1km 标准道路生命周期碳排放

高速公路具有更复杂的结构、消耗更多的材料来源和机械设备，其生命周期碳排放量必然比其他等级公路大。同样地，与已有研究进行比较，1km 标准高速公路的 CO<sub>2</sub> eq 排放从 600t<sup>[80]</sup>到 3,000t<sup>[41]</sup>不等。图 5-5 显示了不同道路生命周期 1 m<sup>2</sup> 的碳排放。结果显示，1 m<sup>2</sup> 水泥路面三级公路的生命周期 CO<sub>2</sub> eq 排放最大，为 127kg/m<sup>2</sup>（平均水平，从 118 kg/m<sup>2</sup> 到 153 kg/m<sup>2</sup>），其次为 1 m<sup>2</sup> 水泥路面四级公路（91 kg/m<sup>2</sup>，从 84 kg/m<sup>2</sup> 到 109 kg/m<sup>2</sup>）。1 m<sup>2</sup> 沥青路面高速公路高速公路的 CO<sub>2</sub> eq 排放为 87 kg/m<sup>2</sup>，一级公路为 63 kg/m<sup>2</sup>，二级公路为 56 kg/m<sup>2</sup>。

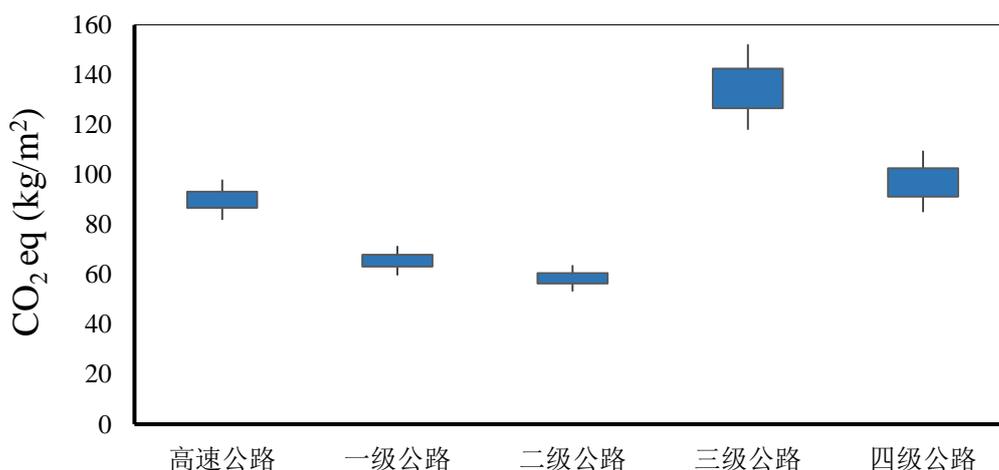


图 5-5 1m<sup>2</sup> 道路生命周期碳排放

该结论说明水泥混凝土路面比沥青路面的碳排放量更大。为了直观的比较，结合深圳市实际情况，根据之前研究数据，选择不同路面结构 1km 标准高速公路进行比较。由图 5-6 可知，1km 标准沥青混凝土路面的高速公路生命周期 CO<sub>2</sub> eq 排放为 2,769t，其中建设材料消耗阶段碳排放 1,743t，占总排放的 63%，其次是维护阶段，CO<sub>2</sub> eq 排放为 631t，占总排放的 23%，第三是施工阶段，CO<sub>2</sub> eq 排放为 221t，占总排放的 8%，最后是拆除阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放为 174t，仅占总排放的 6%。水泥混凝土路面的高速公路生命周期 CO<sub>2</sub> eq 排放为 5,383t，建设材料消耗阶段 CO<sub>2</sub> eq 排放 4,479t，占总排放的 83%，其次是维护阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放为 657t，占总排放的 11%，第三是施工阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放 226t，占总排放的 4%，最后是拆除阶段 121t，占总排放的 2%。结果表明，1km 标准沥青混凝土路面高速公路比水泥混凝土路面 CO<sub>2</sub> eq 排放减排 2,614t，占水泥混凝土路面高速公路的 48.6%，具有明显的节能减排的优势。

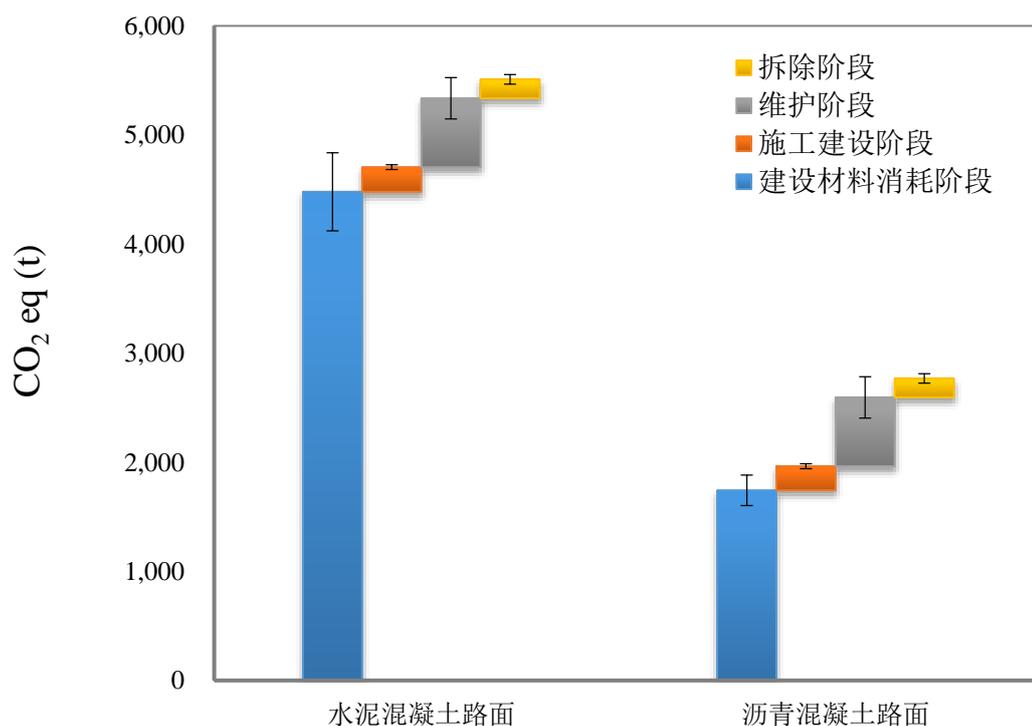


图 5-6 1km 不同路面结构高速公路生命周期碳排放比较

由图中结果，不同路面结构中，建设材料消耗化阶段始终是生命周期中碳排放量最大的部分。因此，需要对该阶段的碳排放量进行分析。以 1km 不同路面高速公路为例，表 5-12 显示了不同过程对建设材料消耗阶段碳排放的贡献。从表中结果可以看出，水泥、钢铁、交通运输、沥青等过程对建设材料消耗阶段的碳

排放量贡献较大。

表 5-12 不同路面结构高速公路建设材料消耗阶段碳排放量 (单位: t)

类型	沥青	砂	矿粉	水泥	水	钢铁	碎石	交通运输
水泥混凝土路面	1.9	14	145	3,156	12.1	753	0	397
沥青混凝土路面	312	7.08	4.32	969	0.6	0	171	279

### 5.2.2 地铁生命周期碳排放核算

经过上述地铁生命周期阶段碳排放量的核算,将地铁生命周期建设材料消耗和施工建设阶段碳排放量进行加和,得到 1km 标准地铁建设生命周期的 CO<sub>2</sub> eq 排放高达 83,915t,分别是水泥混凝土路面高速公路、沥青混凝土路面高速公路的 15 倍和 30 倍。其中建设材料消耗阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放为 79,468t,施工建设阶段为 4,447t。地铁建设过程结构复杂,施工难度大,需要消耗大量的原材料,因此建设材料消耗阶段的碳排放占地铁生命周期的主要部分。

地铁建设材料消耗阶段分为地铁车站和盾构区间两大部分,地铁车站又分为出入口、风亭、行车道、主体结构等四部分,各部分建设材料消耗的碳排放总量如图 5-7 所示。

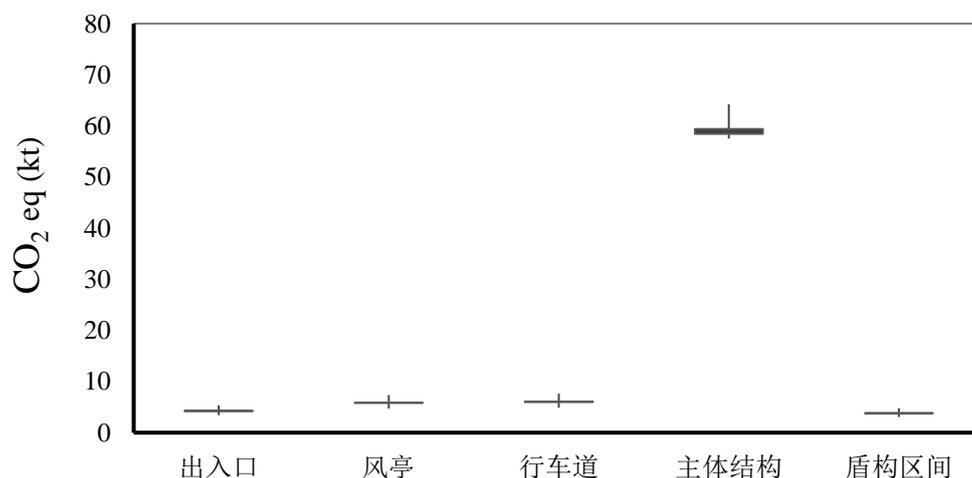


图 5-7 地铁建设材料消耗阶段各部分碳排放量

结果显示，地铁车站建设材料消耗中的主体结构 CO<sub>2</sub> eq 排放最大，约为 58,422t（平均值，最大值为 6,0371t,最小值为 57,516t）。相比主体结构，出入口、风亭、行车道、盾构区间在建设材料物消耗阶段的 CO<sub>2</sub> eq 排放略低，均在 5,000t 左右，约为主体结构的 1/10。主体结构的建设材料消耗阶段，混凝土和钢材的碳排放占总碳排放量的多数。地铁主体结构建设材料消耗阶段碳排放来源如图 5-8 所示。

地铁主体结构建设材料消耗阶段碳排放来源

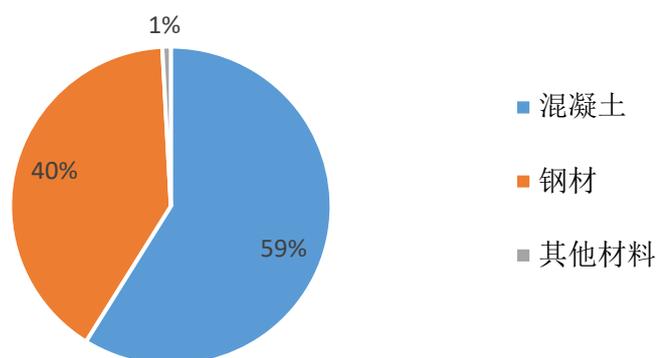


图 5-8 地铁主体结构建设材料消耗阶段碳排放来源

同济大学李晔等<sup>[81]</sup>研究了上海市生命周期轨道交的温室气体排放情况。经过对比，上海市地铁建设材料生产过程中温室排放为 83,850.95t CO<sub>2</sub>eq 建设材料运输阶段为 5,143.81t CO<sub>2</sub>eq，按照本文生命周期阶段分类标准，其建设材料消耗阶段 CO<sub>2</sub> eq 排放达到 88,994.76t，该案例中，碎石、砂、水泥、钢材的材料比重很大，本研究碳排放贡献较大的材料为混凝土和钢筋。上海市地铁建设施工建设阶段消耗 5,143.81t CO<sub>2</sub>eq 温室气体，略高于本文研究的 4,447t CO<sub>2</sub>eq。经过分析，地铁施工建设过程中消耗大量电力，本文选取中国南方电网平均电力生产的碳排放因子 0.78 kg/kwh，李晔等人的研究选取 0.82 kg/kwh 的全国平均电力生产碳排放因子。

该数据是深圳市交通基础设施年度碳排放总量核算中，计算地铁工程碳排放量的运算基础。

### 5.2.3 桥梁生命周期碳排放核算

经过上述 1km 标准桥梁工程建设生命周期各阶段碳排放量的核算，将不同阶段的碳排放量进行加和，得到 1km 标准桥梁全生命周期碳排放量，如图 5-9 所示。

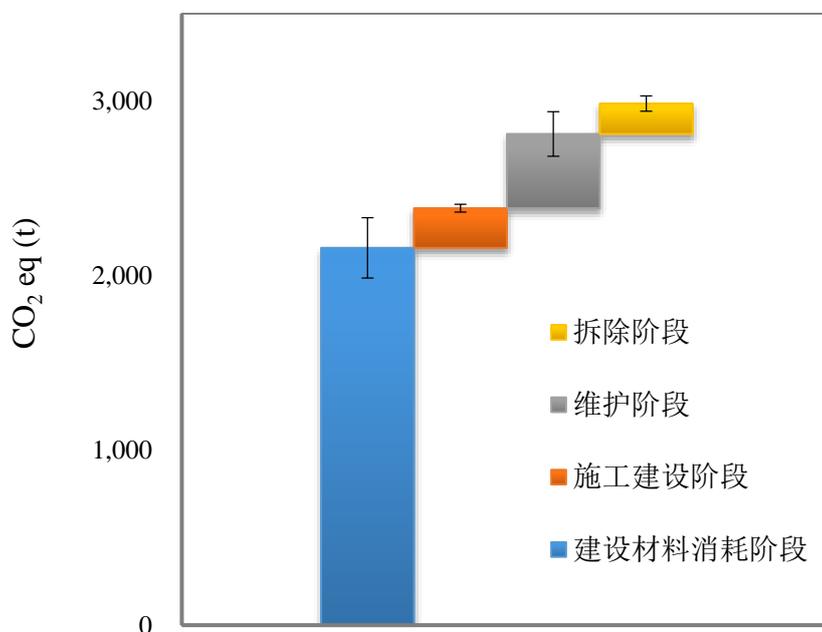


图 5-9 1km 标准桥梁生命周期碳排放量

结果显示，桥梁全生命周期的 CO<sub>2</sub> eq 排放为 3,201t（平均值，从 2,986t 到 3,324t），其中建设材料消耗阶段 CO<sub>2</sub> eq 排放为 2,169t（平均值，从 2,009t 到 2,241t），占总排放的 68%，其次是维护阶段，CO<sub>2</sub> eq 排放为 631t，占总排放的 20%，第三是施工建设阶段，CO<sub>2</sub> eq 排放 227t，总排放的 7%，最后是拆除阶段 174t，仅占总排放的 5%。

该数据是深圳市交通基础设施年度碳排放总量核算中，计算桥梁工程碳排放量的运算基础。

### 5.3 深圳市年度交通基础设施碳排放计算

通过搜集深圳市年度基础设施的建设里程、维护里程和拆除里程，结合深圳市城市不同类型交通基础设施生命周期各阶段碳排放基础数据，可计算出深圳市年度交通基础设施的碳排放总量。计算公式如式 5-3。

$$Q_{annual} = \sum_{i=1}^3 [(Q_{mi} + Q_{ci}) \times C_i + Q_{ri} \times R_i + Q_{di} \times D_i] \quad (5-3)$$

其中,  $Q_{annual}$  表示深圳市年度交通基础设施碳排放总量,  $Q_{mi}$ 、 $Q_{ci}$ 、 $Q_{ri}$  和  $Q_{di}$  表示建设材料消耗阶段、施工建设阶段、维护阶段和拆除阶段产生的碳排放量;  $C_i$ 、 $R_i$  和  $D_i$  分别表示不同类型交通基础设施的建设量、维护量和拆除量;  $i=1, 2, 3$  表示分别表示道路工程、地铁工程和桥梁工程。

### 5.3.1 深圳市年度基础设施建设情况

#### (一) 道路

根据深圳市统计局的统计数据<sup>[7]</sup>, 假定道路、桥梁依据维护周期为 7 年, 经过两次维修后, 道路、桥梁进入拆除阶段, 整个生命周期为 21 年。道路、地铁、桥梁的统计与整理计算结果如表 5-12、表 5-13、表 5-14 所示。

表 5-12 深圳市年度道路建设量 (单位: km)

年份	类型	高速公路	一级公路	二级公路	三级公路	四级公路
2006	建设里程	23.5	11.6	86.1	16	
	维护里程	19.4				
	拆除里程					47.6
2007	建设里程	52.1	7.8		9.9	4.8
	维护里程	36.2				
	拆除里程			15.4		
2008	建设里程	27.1	5.1	4.7		
	维护里程	2.1	13.5			
	拆除里程				8.7	6.3
2009	建设里程	0.3				
	维护里程	82.4	89.3			
	拆除里程	6.8	169.7	96.6	57.9	60.4
2010	建设里程			11.1		
	维护里程	124.6		82.5		
	拆除里程	0.4	12		0.4	
2011	建设里程	14.83				
	维护里程	24	241.1	41.6	14.5	
	拆除里程	49.5				
2012	建设里程	30.3				4.8
	维护里程	86	99.8	92.5	19.3	
	拆除里程		5.2	0.3	7.4	
2013	建设里程	40.4	107.1			
	维护里程	23.5	11.6	86.1	16	
	拆除里程		0.7			8.4

表 5-13 深圳市年度地铁建设量 (单位: km)

年份	站台 (个)	出口个	风亭 (个)	行车道 (条)	地铁长度 (km)
2005	3	12	6	3	7.86
2006	11	47	22	5	15.07
2007	18	76	36	8	24.59
2008	22	89	44	9	30.56
2009	24	104	48	10	31.53
2010	20	86	40	9	17.88
2011	17	77	34	8	19.12
2012	14	62	28	6	17.37
2013	18	78	36	8	23.56
2014	16	73	32	7	22.19
2015	12	51	24	5	27.49
2016	10	44	20	4	11.84

表 5-14 深圳市年度道路建设量 (单位: m)

年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
建设里程	60,904	52,283	28,070	27,087	13,356	13,413	42,897	65,872	13,890	35,986	67,502
维护里程	58,487	16,246	24,911	46,573	253,444	19,890	30,347	60,904	52,283	28,070	27,087
拆除里程	123	537	0	1445	3314	0	134	1,491	0	681	123

### 5.3.2 深圳市年度交通基础设施碳排放量

深圳市年度交通基础设施建设生命周期碳排放主要由地铁、道路、桥梁三个部分的贡献组成，如图 5-10 所示。结果表明，深圳市年度交通基础设施建设碳排放较大，近年来稳定在 200 万吨左右，其中，2009 年达到峰值 254 万吨，2006 年的排放水平较低（136 万吨），2013 年为 216 万吨。其中，深圳市交通基础设施领域生命周期碳排放主要来源于地铁工程建设，相比于地铁，道路和桥梁建设过程的碳排放约占深圳市交通基础设施碳排放总量的 20%。

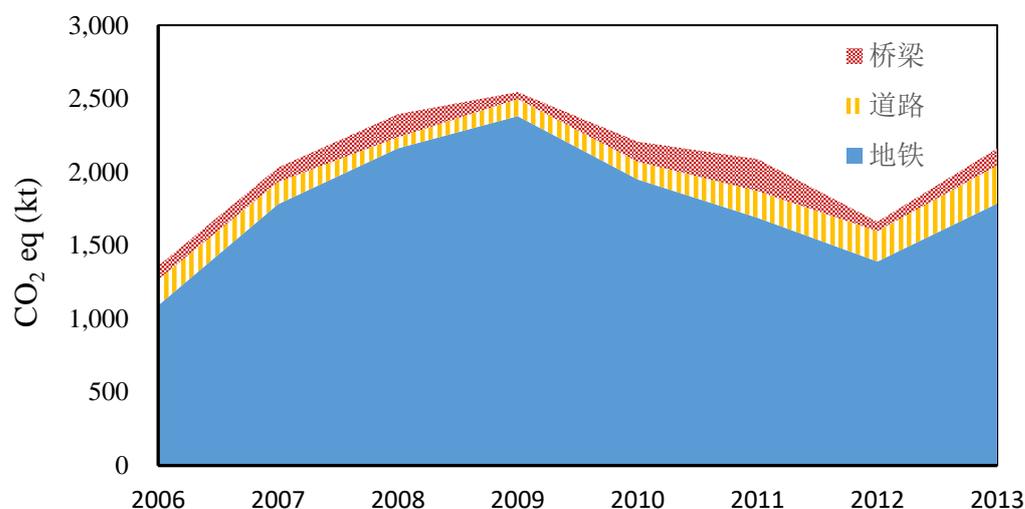


图 5-10 深圳市年度交通基础设施建设生命周期碳排放

基于统计数据和研究，将不同交通工程生命周期各阶段的碳排放量与深圳市统计数据相乘，分别得到深圳市各道路、桥梁和地铁工程年度碳排放量，深圳市道路建设生命周期年度碳排放如图 5-11 所示。

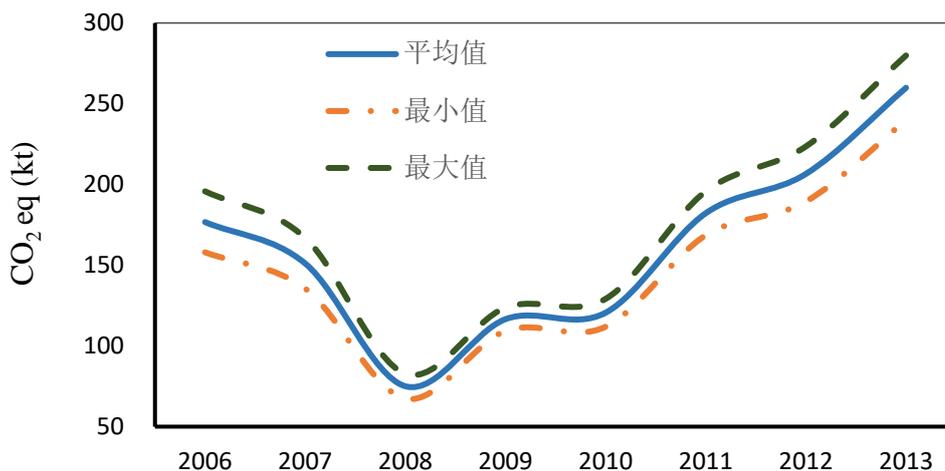


图 5-11 深圳市年度道路工程生命周期碳排放

自 2006 年到 2013 年,深圳市年度道路工程建设生命周期碳排放量呈现先下降再缓慢上升的波动趋势。2006 年深圳市道路建设生命周期年度 CO<sub>2</sub> eq 排放约为 177kt, 2008 年达到最低, 约为 82kt, 此后逐年上升, 2013 年达到 260kt (平均值, 从 240kt 到 279kt)。为了探究道路工程年度碳排放量变化趋势及其原因, 通过对道路生命周期各阶段的碳排放量进行比较, 各阶段的碳排放比例如图 5-12 所示。

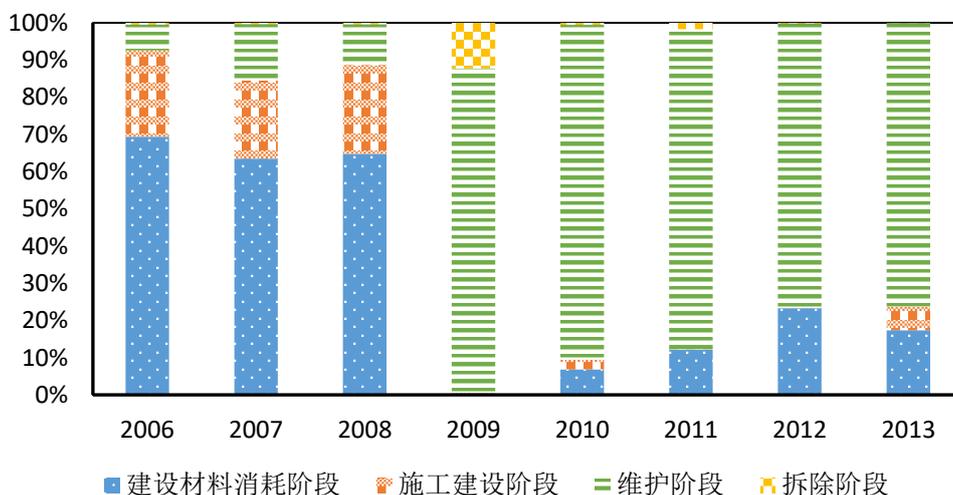


图 5-12 深圳市年度道路工程碳排放各阶段比例

深圳市道路工程年度碳排放量与建设量与维护量关系较大, 如图 5-8 建设材料消耗阶段和施工建阶段设比例, 自 2006 年到 2008 年, 工程建设阶段的碳排放占道路年度总碳排放量的主要部分, 随着维护阶段的逐年减少, 2008 年道路工

程总碳排放量达到最低值。自 2009 年至 2013 年，随着道路工程建设的不断完善，城市的道路建设量减少，然而总碳排量随着年度道路维护里程的增加，碳排放量不断上升，该趋势符合城市和道路系统发展的规律，道路工程维护阶段的环境影响需受到重视。

深圳市地铁建设生命周期年度碳排放如图 5-13 所示。

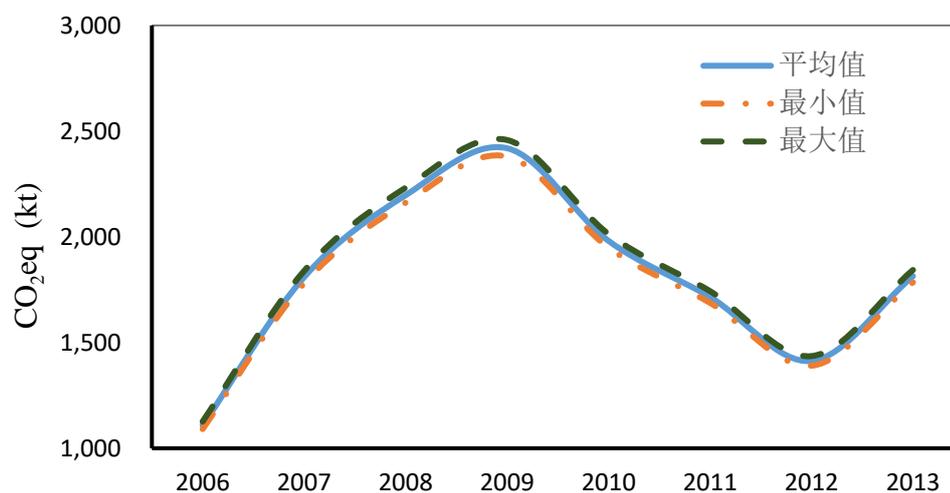


图 5-13 深圳市年度地铁工程生命周期碳排放

自 2006 到 2013 年，深圳市年度地铁工程建设生命周期碳排放量呈现先上升，下降后再缓慢上升的趋势，与深圳市五年规划的规律相关。2006 年约深圳市地铁建设生命周期年度 CO<sub>2</sub> eq 排放为 1108kt，2009 年已上升至 2,419kt，此后略微下降，2012 年达到较低值 1,435kt，2013 年达到另一个顶点 1,814kt（平均值，从 1,784kt 到 1,847kt）。按照城市发展的五年规划的规律，在五年规划末期建设量较高，例如地铁工程建设的年度碳排放峰值集中在 2008 至 2010 年、2013 至 2015 年等五年规划末期，在五年规划前期，地铁建设仍处于规划或动工准备阶段，碳排放量相对较小，例如 2006 年、2007 年、2011 年、2012 年的地铁工程年度碳排放量。同时，深圳市年度交通基础建设生命周期碳排放主要由地铁建设贡献，与地铁工程年度碳排放的变化趋势相似。

深圳市桥梁建设生命周期年度碳排放如图 5-14 所示。

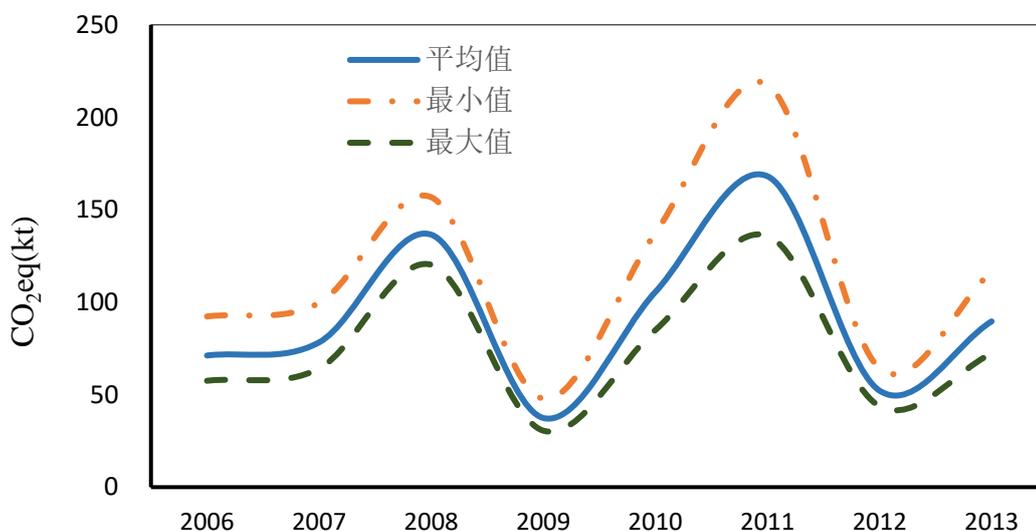


图 5-14 深圳市年度桥梁工程生命周期碳排放

自 2006 到 2013 年,深圳市年度桥梁工程建设生命周期碳排放量处于波动状态,在 2009 年为最低值 37kt,2011 年达到最高值 168kt (平均值,从 136kt 到 218kt)。由图 5-9 的波动规律可言看出,桥梁建设有周期性规律,平均三年为一个建设周期。在 2008 年、2011 年年,均出现桥梁建设碳排放的峰值,这几年中,出现大规模的桥梁建设工程项目。2006 年、2009 年和 2012 年深圳市桥梁工程年度碳排放量较小。然而,与地铁建设生命周期年度碳排放相比,碳排放较低。

#### 5.4 深圳市交通基础设施碳排放预测

2016 年 6 月,深圳市发展和改革委员会颁布了《深圳城市基础设施建设五年行动计划(2016—2020 年)》<sup>[82]</sup>,在基础设施建设领域,5 年将投 7,230 亿元,提升深圳市城市基础设施建设质量,实现特区一体化,优化深圳空间布局,提高综合承载能力,保障市民运行安全,改善人居环境,推动节能减排,促进经济社会可持续发展,把深圳建设成国际一流城市。

其中,在深圳市交通基础设施领域,2016 年到 2020 年,将投资 1,291 亿元。加快深中通道、沿江高速二期、外环高速等高速公路改扩建工程等一批重要通道建设。建成南坪快速路三期、坂银通道、坪盐通道等,经过统计,共新建高速公

路 215km，主要包括深圳外环高速、广深沿江高速等；一级公路 151km，包括环大鹏湾海岸公路等；二级公路约 70km，三级四级公路约 400km，维护里程达 560km 左右，主要包括罗芳公路立交桥改造、皇岗路路面部分下沉的改造等。

在地铁建设方面，建成轨道交通三期及其调整工程，加快轨道交通四期规划建设。其中包括轨道交通 9 号线工程西起深圳湾东至罗湖区文锦路（全长约 25.35 公里，设站 22 座，其中换乘站 10 座，）轨道交通 11 号线工程（线路全长 51.7 公里，其中地下线 39.4 公里，高架线 11 公里）、轨道交通 6 号线工程（全线长 37.6 公里，其中高架段长 24.5 公里，地下段长 13.1 公里，共设车站 20 座）、轨道交通 8 号线一期工程（全长约 12.3 公里，设 6 座车站。长约 12.3 公里，设 6 座车站）等。地铁建设长度共计约 192km，建设地铁车站 105 座。统计结果见表 5-15。

表 5-15 深圳市“十三五”（2016-2020 年）期间基础设施建设情况（km）

年份	类型	高速公路	一级公路	二级公路	三级公路	四级公路	地铁	桥梁
2016-2020 年	建设里程	215.6	151.2	70.1	257.2	345.7	192.5	171.2
	维护里程	97.9	80.4	112.8	242.7	30.5	/	47.6
	拆除里程	/	13.7	22.1	66.9	77.2	/	20.1

结合前文研究基础，将交通工程生命周期各阶段的碳排放量与深圳市城市基础设施建设五年规划进行分析，按照公式（5-3），计算结果显示深圳市交通基础设施领域在“十三五”期间（2016 年到 2020 年）CO<sub>2</sub> eq 排放总量将达到 957 万吨，年平均排放量接近 200 万吨，交通工程的环境影响将持续。深圳市 2016 年到 2020 年交通基础设施地铁建设碳排放为 775 万吨，约占碳排放总量的 81%。道路、桥梁建设为 182 万吨，约占总量的 19%。

## 5.5 深圳市交通基础设施节能减排建议

深圳市交通基础设施碳排量巨大，其中地铁建设领域碳排放占大多数。同时，交通基础设施需要消耗大量原材料和能源，建设材料消耗阶段是原材料消耗、能源消耗最为集中的阶段，环境影响最显著，其碳排放量也最大，其次是维护阶段。在建设材料消耗阶段，排放贡献较大的原材料为水泥、混凝土、钢筋、沥青混合料等。道路、桥梁的维护阶段也需要原材料的投入，合理的道路、桥梁养护维修一般具有周期性，当城市交通基础设施发展到一定程度，道路、桥梁养护阶段的

环境影响将愈加显著。根据以上研究,提出适合深圳市交通基础设施节能减排发展的几点建议:

(1) 政策方面,自 2001 年,深圳已经先后制定了一系列的节能减排、发展循环经济等促进城市低碳发展的政策措施。在节能减排方面,出台了《深圳市居住建筑节能设计标准实施细则》、《深圳市居住建筑节能设计规范》、《深圳经济特区建筑节能条例》等,以及近期出台的新能源政策《深圳新能源产业振兴发展规划(2009~2015)》及《深圳市促进新能源产业发展的若干措施》等<sup>[83]</sup>。然而在交通工程建设领域,还尚未有相关政策措施。出台绿色交通工程设计节能减排规范等对交通基础设计建设进行规范具有时代性和必要性。

(2) 规划方面,要加强深圳市交通基础设施的规划管理,在规划设计与路网建设阶段,进行绿色评估,尽可能减少路网重复,提升城市交通运输效率,为市民提供方便快捷的绿色交通系统,引导人们选择公共交通工具出行。

(3) 研究表明,沥青路面道路比水泥路面道路的环境影响更低,1km 沥青路面标准高速公路相比水泥路面节能 40% 以上,因此,道路、桥梁建设过程中选用沥青路面具有较大环境优势。

(4) 建设材料生产技术领域,大力发展材料低碳生产技术,在高能耗、高排放的水泥、钢材、碎石等原材料生产领域,采取升级节能减排技术,例如水泥行业的新型干法生产线、钢铁行业的先进轧钢技术,降低建设材料消耗阶段的碳排放量。

(5) 循环材料方面,大力发展绿色交通工程材料,推进交通工程建设废弃物的资源化利用。深圳市现有 4 个废弃物综合利用项目,已有 14 个市重点工程率先推行使用绿色再生建材产品<sup>[83]</sup>,未来应在交通基础设施领域,应推广使用该绿色再生建材产品。交通基础设施拆除阶段的废弃物推进再生利用率,将循环利用产品应用到其他工程建设。

## 5.6 本章小结

本章首先明确了交通基础设施生命周期各阶段碳排放量的计算方法,通过整合各交通类型全生命周期阶段的资源能源消耗的基础数据(包括实地调研数据、国内外 LCA 分析通用商用数据库和文献资料),建立了交通基础设施相关材料、

能耗和运输过程清单，对交通基础设施进行生命周期分析。

基于生命周期交通基础设施的不同阶段的碳排放量的计算，进行整理，将其应用到深圳市领域，分别核算了不同交通工程（道路、地铁、桥梁）全生命周期的碳排放量。结果表明，不同类型的基础设施单位碳排放量差异显著，地铁对交通基础设施全生命周期过程的单位总排放量贡献最大，高达 83,915 t/km，分别是水泥混凝土路面高速公路、桥梁、沥青混凝土路面高速公路的 15 倍、26 倍和 30 倍；不同城市等级公路的碳排放量大小依次为一级（2,088 t/km）>二级（1,754 t/km）>三级（1,266 t/km）>四级（912 t/km）。其次，通过搜集深圳市年度基础设施的建设里程、维护里程和拆除里程，结合深圳市城市不同类型交通基础设施生命周期碳排放基础数据，计算了深圳市 2006 年至 2013 年的年度交通基础设施的碳排放总量。将不同交通工程碳排放量与深圳市城市基础设施建设五年规划（2016 年至 2020 年）结合，预测在 2016 年到 2020 年，深圳市交通基础设施碳排放总量将达到 957 万吨。

最后，面对深圳市交通基础设施领域的节能减排的压力，提出选用节能减排优势较大的沥青路面作为道路路面形式、大力发展材料低碳生产技术、出台相应的绿色交通建设规范进行引导、推进交通工程建设废弃物利用等建议。

## 第六章 结论与建议

### 6.1 结论

低碳交通是低碳城市建设的保障和基础。交通基础设施领域的碳排放研究是低碳城市和低碳交通建设的理论基础。本研究基于交通基础设施生命周期各个阶段资源能源消耗的基础数据,即建设材料消耗阶段、施工建设阶段、维护阶段和拆除阶段四个阶段的数据,构建了包括道路、地铁和桥梁在内的交通基础设施的精简型生命周期碳排放模型,并运用该模型系统核算了深圳市交通基础设施总碳排放量,评价了各交通类型碳排放贡献及影响因素,主要研究结论如下:

(1) 方法上,为了克服传统 LCA 模型在复杂工程领域数据搜集、层次划分以及数据准确性等方面的缺点,运用精简型生命周期(SLCA)分析方法,在交通基础设施碳排放核算过程中通过修正基础数据和各类参数,借助 Excel 平台进行数据管理、核算和结果表达,并辅以 Crystal Ball 软件进行蒙特卡罗模拟,实时、动态地将不确定性处理始终贯穿于模型的模拟和运用,进而提高分析结果的可靠性和准确度。通过整合各交通类型全生命周期阶段的资源能源消耗的基础数据(包括实地调研数据、国内外 LCA 分析通用商用数据库和文献资料),建立了交通基础设施相关材料、能耗和运输过程清单,对交通基础设施进行生命周期分析。

(2) 经过核算,不同类型的基础设施单位碳排放量差异显著,地铁对交通基础设施全生命周期过程的单位总排放量贡献最大,高达 83,915 t/km,分别是水泥混凝土路面高速公路、桥梁、沥青混凝土路面高速公路的 15 倍、26 倍和 30 倍。其中,地铁主体结构建设 CO<sub>2</sub> eq 排放为 58,422t/km,消耗大量混凝土、钢材等高能耗材料。全生命周期各个阶段中,建设材料消耗阶段对生命周期的总碳排放量影响最大,地铁和桥梁的建设材料消耗阶段碳 CO<sub>2</sub> eq 排放分别为 79,468 t/km 和 2,169t/km,占各自总碳排放量的 94%和 67%;对水泥混凝土路面和沥青混凝土路面高速公路而言,建设材料消耗阶段碳排放量分别占生命周期总碳量的 83%(4,479 t/km)和 63%(1,743t/km),其它阶段依次为维护阶段(11%和 23%)>施工阶段(4%和 8%)>拆除阶段(2%和 6%)。各材料类型中,对建设材料消耗阶段碳排放影响最大的均是水泥、钢铁、沥青和交通运输过程。路面结构是高速

公路碳排放量的主要影响因素，即水泥混凝土路面的生命周期单位 CO<sub>2</sub> eq 排放（5,383 t/km）约是沥青混凝土路面的两倍；同时，不同等级道路的碳排放量有区别，以深圳市路面结构为例，不同等级道路的碳排放量大小依次为一级（2,088 t/km）>二级（1,754 t/km）>三级（1,266 t/km）>四级（912 t/km）。

（3）基于不同类型交通基础设施的单位碳排放量，从宏观层次上构建的交通基础设施碳排放清单分析模型，核算了深圳市交通基础设施年度碳排放。结果显示，深圳市年度交通基础设施碳排放量近年来稳定在 200 万吨左右，地铁工程建设生命周期碳排放占主要部分，约为深圳市交通基础设施年度碳排放总量的 80%。结合深圳市城市更新“十三五”规划，预计未来五年（2016 年到 2020 年）交通基础设施领域的累积碳排放量将接近 1,000 万吨。面对深圳市交通基础设施领域的节能减排的压力，提出选用节能减排优势较大的沥青路面作为道路路面形式、大力发展材料低碳生产技术、出台相应绿色交通建设规范进行引导、推进交通工程建设废弃物利用等建议。

## 6.2 创新点

（1）本研究构建了交通基础设施领域碳排放的精简型生命周期模型（SLCA），克服了传统的生命周期模型（LCA）模型数据收集难度大、分析过程复杂且其成本较高的缺点，并实时、动态地将不确定性处理始终贯穿于模型的模拟和碳排放核实，提高了 LCA 模型的可靠性和准确性，这一模型为城市交通领域的碳排放核算和评价提供了理论工具。

（2）本研究基于 SLCA 碳排放评价模型，系统核算了包括道路、桥梁、地铁在内的交通基础设施总碳排放量，评价了各交通类型碳排放贡献及影响因素，该结论为低碳城市建设和交通领域的碳减排提供了理论参考；同时该研究填补了 LCA 交通基础设施领域关于桥梁和地铁的研究空白，从宏观层次构建了交通基础设施的分析模型，丰富了碳排放基础数据的类型。

## 6.3 展望

本文在交通基础设施生命周期碳排放领域开展了一些有研究探索，以下几方面仍需要进一步深入研究：

(1) 本文建立的交通基础设施领域包括道路、地铁、桥梁三个子系统，可拓展研究包括铁路、机场、隧道、地铁、轻轨高架、公交车站、停车场、轮渡码头等在内的全部交通基础设施。

(2) 完整的交通领域生命周期过程包括运输阶段的环境影响，交通领域运输过程中的温室气体排放量较大，因此，需要拓宽相关研究，建立整个交通领域的环境影响评价体系。

(3) 本文以碳排放量为评价指标分析交通基础设施领域的环境影响，环境影响评价指标还包括固体废物、噪声、水体富营养化、酸化、大气污染、人体毒性危害等，可建立综合环境影响评价指标。

## 参 考 文 献

- [1] Jonathan Lubetsky, Bruce A. Steiner, Robert Lanza. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M], 2006
- [2] C. W. T. Ipcc. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Computational Geometry. 2007. 18 (2) : 95-123
- [3] Boden T. A, Marland G, Andres R. J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions[R]: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy , 2015
- [4] David Satterthwaite. Cities' contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions. Environ Urban 20(2):539[J]. Environment and Urbanization. 2008. 20 (2) : 539-550
- [5] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Vulnerability: Regional Aspects[M] Cambridge University Press, 2014
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 中华人民共和国交通运输“十三五”规划[R], 2015
- [7] 深圳市统计局. 2016年深圳市统计年鉴[R], 2017
- [8] 深圳市规划和国土资源委员会. 深圳市城市更新“十三五”规划[R], 2016
- [9] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知, 国发〔2016〕61号[R], 2016
- [10] K. Marx. Capital, vol. III[M]: Penguin Books, London., 1981
- [11] A. Wolman. The metabolism of cities[J]. Scientific American. 1965. 3 (213) : 179-190
- [12] 克里斯托夫默勒斯. 德国基本法: 历史与内容[M]: 中国法制出版社, 2014
- [13] M. A. Hannan, F. A. Azidin, A. Mohamed. Hybrid electric vehicles and their challenges: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2014. 29 (2014) : 135-150
- [14] B. W. Vigon. Life-cycle assessment : inventory guidelines and principles[J]. Poluição Ambiental. 1994
- [15] EPA. Guidelines for Assessing the Quality of Life-Cycle Inventory Analysis[M], 1995
- [16] T. And K. Mäkelä Häkkinen. Environmental impact of concrete and asphalt pavements in environmental adaption of concrete. Technical Research Center of Finland[J]. Research Notes. 1996:
- [17] Kwangho Park, Yongwoo Hwang, Seongwon Seo et al. Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways[J]. Journal of construction engineering and management. 2003. 129 (1) : 25-31
- [18] Saeed Abolhasani, H. Christopher Frey, Kangwook Kim et al. Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles: a case study for excavators[J]. Journal of the Air & Waste Management Association. 2008. 58 (8) : 1033-1046
- [19] Brenda Chang, Alissa Kendall. Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California' s high-speed rail system[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2011. 16 (6) : 429-434
- [20] Pontarollo John, Hooton Douglas, Byer Philip. Environmental life-cycle cost analysis of

- asphalt and concrete pavements[M], 2007
- [21]P. White. Modeling climate change impacts of pavement production and construction.[J]. Resources Conservation & Recycling. 2010. 54 (11) : 776-782
- [22]Muller Daniel B,Gang Liu,Amund N Loviket al. Carbon emissions of infrastructure development.[J]. Environmental Science & Technology. 2013. 47 (20) : 11739-11746
- [23]Mehdi Akbarian,Seyed Sina Moeini-Ardakani,Franz Josef Ulmet al. Mechanistic Approach to Pavement-Vehicle Interaction and Its Impact on Life-Cycle Assessment[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2012. 2306 (-1) : 171-179
- [24]Rosario Vidal,Enrique Moliner, Germán Martínez. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement[J]. Resources Conservation & Recycling. 2013. 74 (74) : 101-114
- [25]Roz Ud Din Nassar,Parviz Soroushian,Tewodros Ghebrab. Field investigation of high-volume fly ash pavement concrete[J]. Resources Conservation & Recycling. 2013. 73 (2) : 78-85
- [26]Yue Huang,Roger Bird,Oliver Heidrich. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements[J]. Journal of Cleaner Production. 2009. 17 (2) : 283-296
- [27]Stephen A. Cross,Warren H. Chesner,Henry G. Justus et al. Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2011. 2227 (-1) : 43-52
- [28]Raja Chowdhury,Defne Apul,Tim Fry. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction[J]. Resources Conservation & Recycling. 2010. 54 (4) : 250-255
- [29]A. C. Carpenter,K. H. Gardner,J. Fopiano et al. Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction[J]. Waste Management. 2007. 27 (10) : 1458-1464
- [30]鲍建忠. ISO14040—97 环境管理寿命周期评估原则与框架[J]. 世界标准信息. 1998 (1) : 1-7
- [31]彭小燕. ISO14040环境管理——生命周期评估——原则与框架[J]. 标准科学. 1998 (4) : 4-9
- [32]中国建筑设计研究院. 建筑碳排放计量标准[M]: 中国计划出版社, 2014
- [33]杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]: 气象出版社, 2002
- [34]张智慧, 邓超宏. 建设项目施工阶段环境影响评价研究[J]. 土木工程学报. 2003. 36 (9) : 12-18
- [35]尚春静, 张智慧. 建筑生命周期碳排放核算[J]. 工程管理学报. 2010. 24 (1) : 7-12
- [36]申立银, 陈进道, 严行等. 建筑生命周期物化碳计算方法比较分析[J]. 建筑科学. 2015. 31 (4) : 89-95
- [37]杨倩苗. 建筑产品的全生命周期环境影响定量评价[D]. 天津: 天津大学, 2009
- [38]尚春静, 张智慧, 李小冬. 高速公路生命周期能耗和大气排放研究[J]. 公路交通科技. 2010. 27 (8) : 149-154
- [39]王贤卫, 吴灵生, 杨东援. 高速公路建设CO<sub>2</sub>排放计算分析[J]. 公路交通科技. 2014 (02) : 150-158
- [40]蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014
- [41]潘美萍. 基于LCA的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011
- [42]SETAC. Guidelines for Life-Cycle Assessment: : A 'Code of Practice' from the workshop held at

- Sesimbra, Portugal, 31 March - 3 April 1993 Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).[J]. Environmental Science & Pollution Research International. 1994. 1 (1) : 55
- [43]Simone Bastianoni, Michela Marchi, Dario Caro等. The connection between 2006 IPCC GHG inventory methodology and ISO 14064-1 certification standard – A reference point for the environmental policies at sub-national scale[J]. Environmental Science & Policy, 2014, 44:97-107.
- [44]John A. Gambatese,Sathyarayanan Rajendran. Sustainable Roadway Construction: Energy Consumption and Material Waste Generation of Roadways[M], 2005: 1-13
- [45]Chung J. Liew. The dynamic variable input-output model: An advancement from the Leontief dynamic input-output model[J]. The Annals of Regional Science. 2000. 34 (4) : 591-614
- [46]刘夏璐,王洪涛,陈建等. 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
- [47]Elsa Olivetti,Siamrut Patanavanich,Randolph Kirchain. Exploring the Viability of Probabilistic Under-Specification To Streamline Life Cycle Assessment[J]. Environmental Science & Technology. 2013. 47 (10) : 5208-5216
- [48]Alba Bala, Marco Rauegi, Gabriela Benveniste等. Simplified tools for global warming potential evaluation: when 'good enough' is best. [J]. International Journal of Life Cycle Assessment. 2010. 15 (5) : 489-498
- [49]Weitz,K. A,Sharma et al. Streamlining Life-Cycle Assessment to Support Environmentally Conscious Design and Manufacturing[J]. Proceedings of Environmentally Conscious Design & Manufacturing. 1996:
- [50]姜桂艳,张春勤,吴正言等. 交通信息对出行行为的影响分析综述[J]. 武汉理工大学学报交通科学与工程版. 2012. 36 (3) : 450-453
- [51]李善同,冯杰. 我国交通基础设施建设与区域协调发展[J]. 铁道运输与经济. 2002. 24 (10) : 1-3
- [52]龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 北京: 清华大学硕士学位论文, 2004
- [53]广东省交通运输厅. 广东省公路路面典型结构应用技术指南[M], 2008
- [54]住房和城乡建设部标准定额研究所. 城市轨道交通工程预算定额[M]: 中国计划出版社, 2008
- [55]杨柏力. 公路工程预算定额[M]: 人民交通出版社, 2007
- [56]深圳市交通运输委员会,深圳市港务管理局. 深圳交通邮政统计年报[M]: 《深圳交通邮政统计年报》编委会编辑部, 2014
- [57]Keith P. Shine,Jan S. Fuglestedt,Kinfe Hailemariam et al. Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases[J]. Climatic Change. 2005. 68 (3) : 281-302
- [58]IEA. CO2 Emissions From Fuel Combustion 2012 OECD Publishing[R], 2013
- [59]张春霞,章蓓蓓,黄有亮等. 建筑物能源碳排放因子选择方法研究[J]. 建筑经济. 2010 (10) : 106-109
- [60]CLCD. IKE & SCU-ISCP (2015): Chinese core Life Cycle Database version 0.8. Available at eBalance 4.7 software. [EB/OL], www.ike-global.com
- [61]Xiaofei Chen,Zijia Wang. Low-Carbon Scenario Analysis on Urban Transport of a Metropolitan of China in 2020[J]. Journal of Industrial Engineering & Management. 2013. 5 (2) : 344-353

- [62]H. Hao,H. W. Wang,X. H. Liet al. Energy conservation and emission reduction of natural gas based alternative vehicle fuels[J]. Natural Gas Industry. 2009. 29 (4) : 96-98
- [63]王伟. 城市交通系统能源消耗与环境影响分析方法[M]: 科学出版社, 2002
- [64]魏军晓, 耿元波, 沈镭等. 中国水泥生产与碳排放现状分析[J]. 环境科学与技术. 2015. v.38 (8) : 80-86
- [65]苏伟. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]: 中国经济出版社, 2013
- [66]魏军晓, 耿元波, 沈镭等. 基于国内水泥生产现状的碳排放因子测算[J]. 中国环境科学. 2014. 34 (11) : 2970-2975
- [67]刘立涛, 张艳, 沈镭等. 水泥生产的碳排放因子研究进展[J]. 资源科学. 2014. 36 (1) : 110-119
- [68]彭波, 蔡春丽, 尹光凯等. 彭波, 蔡春丽, 尹光凯,等. 沥青路面碳排放计算方法及低碳建设技术.[J]. 中外公路. 2016 (4) : 18-22
- [69]战尧文. 沥青混合料碳排放计算模型及分级标准研究[D]. 西安: 长安大学, 2014
- [70]胡如安. 沥青混合料能耗与碳排放分析及节能减排技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2014
- [71]蔡日升. 沥青混合料能耗与碳排放量化分析体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2013
- [72]和庆. 沥青混合料碳排放计算模型与评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2013
- [73]贾国玉. 钢铁企业碳素流分析及炼铁系统碳排放优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013
- [74]张肖, 吴高明, 吴声浩等. 大型钢铁企业典型工序碳排放系数的确定方法探讨[J]. 环境科学学报. 2012. 32 (8) : 2024-2027
- [75]梁聪智. 我国钢铁行业碳足迹与碳排放影响因素分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012
- [76]郭誠中. 建築外牆材料生命週期之碳排放分析[R], 2012
- [77]陈文娟. 平板玻璃生产的生命周期评价研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007
- [78]李敬. 我国铝业生产碳排放研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2016
- [79]尚建选, 王立杰, 甘建平. 电石法和煤基乙烯法PVC碳排放分析[J]. 煤炭转化. 2011. 34 (1) : 74-77
- [80]王贤卫, 吴灵生, 杨东援. 高速公路建设CO<sub>2</sub>排放计算分析 [J]. 公路交通科技. 2014. 31 (2) : 150-158
- [81]Ye Li, Qing He, Xiao Luo et al. Calculation of life-cycle greenhouse gas emissions of urban rail transit systems: A case study of Shanghai Metro[J]. Resources Conservation & Recycling. 2016:
- [82]深圳市发展和改革委员会. 深圳城市基础设施建设五年行动计划(2016-2020年)[R], 2016
- [83]中国科学院深圳先进技术研究院. 深圳碳排放现状及应对策略研究[R], 2012

## 附录

附表 1 深圳市某地铁主体围护结构工程施工工程量清单

序号	项目名称	技术要求及项目特征	单位	数量	工程量计算规则
1	导墙土方开挖及外运	综合地质、运距自定	m <sup>3</sup>	3953	按设计图示尺寸以体积计算。注意：要扣除路面破除部分
2	导墙砼	混凝土强度等级:C20	m <sup>3</sup>	633	按设计图示尺寸以体积计算。
3	导墙钢筋制安	钢筋型号、等级：详见图纸	t	63	按设计图示尺寸以质量计算。
4	地下连续墙成槽	墙体厚度:800mm。	m <sup>3</sup>	15134	按设计图示尺寸以体积计算。
5	地下连续墙水下砼	混凝土强度等级:C35 水下砼	m <sup>3</sup>	14230	按设计图示尺寸以体积计算。
6	地下连续墙型钢接头	钢材规格型号:H 型钢	t	330	按地下连续墙深度乘以单位长度重量以质量计算。
7	地下连续墙钢筋笼制安	钢筋型号、等级：详见图纸	t	2384	按设计图示尺寸以钢筋笼、声测管及注浆管质量计算。
8	地下连续墙钢筋笼制安	钢筋型号、等级：玻璃纤维筋	t	118	按设计图示尺寸以钢筋笼、声测管及注浆管质量计算。
9	旋喷桩止水(实桩)	Φ800mm 三重管旋喷桩，抗渗系数满足设计要求。	m	3984	以米为单位计量，工程量按设计实桩长度计算。
10	旋喷桩止水(空桩)	Φ800mm 三重管旋喷桩。	m	199	以米为单位计量。
11	砼冠梁（兼做压顶梁）	混凝土强度等级:C35	m <sup>3</sup>	753	按设计图示尺寸以体积计算
12	冠梁钢筋制安	钢筋型号、等级：详见图纸	t	120	按设计图示尺寸以质量计算。
13	冠梁下微膨胀素砼填实	混凝土强度等级:C35	m <sup>3</sup>	195	按设计图示尺寸以体积计算
14	挡土墙	混凝土强度等级:C30	m <sup>3</sup>	538	按设计图示尺寸以体积计算
15	挡土墙钢筋制安	钢筋型号、等级：详见图纸	t	65	按设计图示尺寸以质量

		见图纸。			计算。
16	钢支撑制安、拆除	管径: $\Phi 609\text{mm}$ , 壁厚: 16mm, Q235B 钢。	t	1503	以钢管支撑单位质量。
17	临时立柱桩成孔	桩径: $\phi 1000\text{mm}$	m	925	按设计图示尺寸以成孔深度计算。
18	临时立柱桩水下砼	混凝土强度等级: C30	m <sup>3</sup>	393	按设计图示尺寸以体积计算
19	临时立柱桩钢筋笼制安	钢筋、钢材型号等级: 详见图纸	t	39	按设计图示尺寸以钢筋笼、声测管及注浆管以质量计算。
20	钢立柱(含钢系梁、剪刀撑)制安、拆除	材质、型号: Q235, 联系梁采用 2[40a, 立柱采用 4 $\angle$ 140x14 与缀板焊接而成。	t	160	以设计图示尺寸按质量计算
21	钢立柱	材质、型号: Q235, 联系梁采用 2[40a, 立柱采用 4 $\angle$ 140x14 与缀板焊接而成。	t	18	以设计图示尺寸按质量计算
22	砼支撑(含砼围檩、角撑、连系梁及腰梁等)	混凝土强度等级: C30	m <sup>3</sup>	1179	按设计图示尺寸以体积计算
23	砼支撑	钢筋型号、等级: 详见图纸	t	213	按设计图示尺寸以质量计算。
24	临时钢便桥	详见图纸, 含制作、安装、拆除	t	150	按设计图示尺寸以重量计算

附表 2 深圳市某地铁工程盾构隧道项目施工工程量清单

序号	项目名称	技术要求及项目特征	单位	数量	工程量计算规则
1	隧道盾构掘进	掘进	m	2293.97	以延长米为单位，按图示盾构掘进里程计算。
2	同步压浆	浆液种类：水泥砂浆，含制浆、送浆、压浆、封堵、清洗、运输。	m <sup>3</sup>	5695	以立方米为单位，按管片外径和盾构壳体最大外径所形成的充填体积计算，报价中综合考虑充盈系数，不另计量。
3	余土装车外运	包括集土坑制作、拆除；废浆处理、装卸、外运（运距自定）、弃土地地整理等工作内容。	m <sup>3</sup>	75382	以立方米为单位计量，工程量按盾构机刀盘直径乘以掘进延米。
4	预制钢筋混凝土管片	混凝土强度等级：C50	m <sup>3</sup>	14926	以立方米为单位，按图示盾构掘进里程计算。
6	管片钢筋制安	钢筋型号、等级：详见图纸	t	2537	按设计图示尺寸以质量计算。
7	特殊钢管片	材质：复合钢管片	t	44	以吨为单位，按图纸钢管片尺寸计算。
8	钢管片内钢筋混凝土填充	混凝土强度等级：微膨胀性 C35 砼	m <sup>3</sup>	15	以立方米为单位，按图示尺寸计算。
9	管片防水	三元乙丙橡胶管片密封垫	环	1529	以环为单位，按设计图示数量计算。
10	遇水膨胀橡胶	规格、型号：36mm*3mm	m	395	按图示尺寸以长度计算
13	洞门施工	洞门环梁混凝土（C40/P10）浇筑	m <sup>3</sup>	15	按设计图示洞口数量计算。

附表 3 深圳市某道路工程钢筋子目施工工程量清单

子目号	子目名称	单位	工程量
403	钢筋（材）		
403-1	基础钢筋（材）（包括灌注桩、支撑梁、地系梁、桩帽、承台、沉桩、沉井等）		
403-1-a	光圆钢筋（I 级）	kg	45921.0
403-1-b	带肋钢筋（HRB335、HRB400）	kg	503048.2
403-1-c	冷轧带肋钢筋网（不分规格）	kg	
403-1-d	钢材	kg	
403-2	下部结构钢筋		
403-2-a	光圆钢筋（I 级）	kg	49232.6
403-2-b	带肋钢筋（HRB335、HRB400）	kg	1086727.1
403-2-c	冷轧带肋钢筋网（不分规格）	kg	
403-2-d	劲性骨架	kg	
403-2-e	钢材	kg	
403-3	上部结构钢筋		
403-3-a	光圆钢筋（I 级）	kg	796393.0
403-3-b	带肋钢筋（HRB335、HRB400）	kg	2446290.6
403-3-c	冷轧带肋钢筋网（不分规格）	kg	
403-3-d	劲性骨架	kg	
403-3-e	钢板	kg	45518.1
403-3-f	钢管	kg	
403-4	附属结构钢筋		
403-4-a	光圆钢筋（I 级）	kg	158.4
403-4-b	带肋钢筋（HRB335、HRB400）	kg	612586.4
403-5	钢管护手	kg	
403-6	防落网	m	211.2

附表 4 温室气体全球变暖潜能值及产生原因

温室气体	全球变暖潜能值	产生原因	
二氧化碳 CO <sub>2</sub>	1	煤、石油等化石燃料的燃烧	
甲烷 CH <sub>4</sub>	21	有机物的微生物的发酵	
氧化亚氮 N <sub>2</sub> O	310	物质经由燃烧和尿素肥料的使用	
全氟碳化物	CF <sub>4</sub>	6,500	
	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	9,200	
	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	7,000	工业化产物，人类活动排放
	C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	7,400	
六氟化硫 SF <sub>6</sub>	23,900	工业化产物，人类活动排放	
氟氢碳化物	HFC-23	11,700	
	HFC-125	2,800	
	HFC-134a	1,300	
	HFC-143a	3,800	
	HFC-152a	140	
	HFC-227ea	2,900	工业化产物，人类活动排放
	HFC-236fa	6,300	
	HFC-4310mee	1,300	

来源：国际能源署（IEA）<sup>[57]</sup>

附表 5 1kg 普通钢材生产过程的碳排放量

碳排放来源		单位	碳排放量
能源与资源输入	能耗	kg	1.93E+00
	矿石资源	kg	6.41E+00
	水	m <sup>3</sup>	3.40E+02
大气排放输出	CO <sub>2</sub>	kg	8.20E-02
	CO	kg	1.10E-01
	CH <sub>4</sub>	kg	1.80E-02
	HC	kg	1.90E-03
	NO <sub>x</sub>	kg	1.60E-02
	SO <sub>x</sub>	kg	5.10E-02
	H <sub>2</sub> S	kg	8.70E-05
	HCL	kg	8.74E-04
水体排放输出	COD	kg	2.82E-04
	BOD	kg	5.00E-06
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	kg	9.90E-04
土壤排放输出	固体废弃物	kg	5.19E+00

来源：杨建新《产品生命周期评价方法及应用》<sup>[33]</sup>

## 致 谢

本文是在导师段华波的悉心指导下完成的，从论文的选题、具体实施到最后定稿，都离不开导师的关心和指导。三年的硕士生活总我深深体会到导师渊博的知识、严谨的治学作风、敏锐的思维方式，以及在三年的学习生活中，他对我字字句句的鼓励、鞭策和宽容，三年来我所取得的点滴进步都离不开段老师的言传身教，这些将让我终身受用，在以后的学习、工作中仍将慢慢揣摩，悉心领会。在此谨向恩师段老师致以我最崇高的敬意和诚挚的谢意，真诚祝愿段老师身体健康、工作顺利。

感谢李昇翰老师在学习、生活上多次给予的热情帮助和耐心指导，使得顺利完成学业；感谢课题组张慧师姐、于丹凤师姐、王龙师兄、吴环宇师兄给予的帮助和照顾；感谢我同窗好友高红光、贾俊韬、李扬、徐超、邝艳娟对我论文的帮助指导和三年来我们共同的经历；感谢我的师妹王晓华、郑丽娜、董丹、王慧越、张庭宁、赵思聪等对我的帮助。祝愿大家一切顺利，前程似锦。

特别感谢我的父母和家人，谢谢父母二十多年的养育之恩，无怨无悔的付出和默默支持。你们无私的爱和理解支持，是激励我在人生的道路上披荆斩棘、奋勇前行的最大动力。感谢我的女朋友罗欢在学业、情感上的支持与鼓励。在此，祝愿我的家人身体健康、幸福平安。

再次感谢所有关心和帮助过我的人，愿他们一生幸福、心想事成。

## 攻读硕士学位期间的研究成果

### 一、已发表论文

- [1] Mao R, Duan H, Gao H, et al. Characterizing the Generation and Management of a New Construction Waste in China: Glass Curtain Wall [J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 31:204-210.
- [2] Duan, H., Hu, M., Zuo, J., Zhu, J., Mao, R., & Huang, Q. (2016). Assessing the carbon footprint of the transport sector in mega cities via streamlined life cycle assessment: a case study of shenzhen, south china. International Journal of Life Cycle Assessment, 1-11.
- [3] 毛睿昌, 段华波, 高红光. 玻璃幕墙类废弃物产生特性及其管理特征研究[J]. 环境科学与技术, 2016, v. 39(S1):398-403.

### 二、参与科研课题

- [1] 深圳市科创委基础研究项目, 《深圳市交通运输业碳排放动态估算模型与优化研究》(项目编号: JCYJ20150525092941042)
- [2] 深圳市高层次人才科研启动项目, 《城市固体废弃物协同建材生产资源化处理成套技术及其有害物质环境行为研究》(项目编号: 000044)