

分类号\_\_\_\_\_ 密级\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

西華大學

# 硕士学位论文

(专业学位)

基于碳达峰目标的地铁 LCA 视角下碳排放强度与减碳潜力

研究—以成都市某地铁站为例

作者姓名：           奉凯文          

学位类别：           工程管理硕士          

学    号：           212020125600001          

校内导师：           李华东          

校外导师：           刘晓东          

完成日期：           2023年6月

Classified Index: \_\_\_\_\_

UDC: \_\_\_\_\_

**Xihua University**

**Master Degree Thesis**

**Research on Carbon Emission Intensity and  
Carbon Reduction Potential from the  
Perspective of Subway LCA Based on Carbon  
Peak Target -Take a metro station in Chengdu  
as an example**

**Candidate : Feng kai wen**

**Major : Engineering Supervision**

**Student ID: 212020125600001**

**Supervisor: A/Prof. Li hua dong**

**Senior Engineer Liu Xiao Dong**

**June, 2023**

## 摘 要

为应对全球二氧化碳不断攀升所引起的各类全球性气候问题，在第 75 届联合国大会一般性辩论上，习近平总书记首次提出了“双碳”目标。根据国际能源署估算数据显示，占城市交通碳排放量 24%左右的公共交通系统是碳排放的重要来源之一，实现公共交通碳达峰对实现“双碳”目标具有重要意义。本研究以成都市某地铁站作为研究对象，在全生命周期（Life Cycle Assessment, LCA）视角下，依据《建筑碳排放计算标准》的核算方法，测算了该地铁站建造阶段以及运营阶段的碳排放量，并以 50 年为限测算了全生命周期内地铁站的碳排放总量，然后选取长期能源替代规划系统（Long Range Energy Alternatives Planning System/ Low emission analysis platform, LEAP）作为预测模型，将全生命周期与 LEAP 进行结合，构建了成都市地铁站碳排放 LCA—LEAP 模型。在此模型的基础上，使用情景分析法分别对该地铁站建立了基准、经济、绿色以及达峰 4 种 2020 至 2035 年碳排放的未来情景，同时根据各种现行的相关减碳政策对各个情景下的参数进行调整，通过模型对地铁站 2020 至 2035 年的碳排放趋势进行预测，分析各个情景的减碳潜力，并探索各个情景的碳达峰时间以及峰值碳排放，结果显示：

（1）建造阶段碳排放贡献最大的是材料生产部门，占比达到了整个建造阶段的 85% 以上；运营阶段碳排放贡献最大的是地铁车辆部门，占比达到了整个运营阶段的 50% 以上。地铁站建成并投入运营的当年，建造阶段的碳排放量占比最大，达到了 97% 左右；全生命周期的视角下，运营阶段的碳排放量占比上升至 55% 左右。

（2）大宗固体废弃物利用率上升 5%、10%、15% 时，地铁站碳排放强度下降 2.51、7.75、14.39t/亿元，减碳系数为 0.21、0.51、0.70。清洁能源利用比重达到 20%、25%、30% 时，地铁站碳排放强度下降 2.02、4.32、6.45t/亿元，减碳系数为 0.18、0.29、0.32。大宗固体废弃物利用率上升 5%、10%、15%，同时清洁能源利用比重达到 20%、25%、30% 时，地铁站碳排放下降 2.52、7.82、14.62t/亿元，减碳系数为 0.22、0.52、0.72。

（3）基准及绿色情景设置下，地铁站碳排放持续上升无法出现峰值；经济情景设置下，地铁站碳排放在 2031 年出现了峰值；达峰情景设置下，地铁站在 2029 年实现了碳达峰。

（4）碳交易模式下，对比基准情景，经济情景、绿色情景、达峰情景从 2020 年起到 2030 年为止总共减少碳排放量 878804.94t、571808.37t、884640.77t，减碳经济效益分别为 4921.31 万元、3202.13 万元、4953.99 万元。

**关键词：**地铁；碳排放；全生命周期；LEAP 模型

## Abstract

In order to cope with all kinds of global climate problems caused by the rising global carbon dioxide, Xi Jinping put forward the goal of "dual carbon" in the general debate of the 75th United Nations General Assembly. According to estimates by the International Energy Agency, urban public transportation systems are one of the main contributors to global carbon emissions, accounting for approximately 24% of urban transportation carbon emissions. Achieving carbon peak in public transport is of great significance to achieving the "dual carbon" goal. This study takes a metro station in Chengdu as the research object. From the perspective of the Life Cycle Assessment (LCA), according to the accounting method of the Calculation Standard of Building Carbon Emissions, the carbon emissions of the metro station during the construction and operation phases are calculated, and the total carbon emissions of the metro station in the whole life cycle are calculated within 50 years, Then select the Long Range Energy Alternatives Planning System/Low emission analysis platform (LEAP) as the prediction model, combine the whole life cycle with LEAP, and build the LCA-LEAP model of carbon emissions of Chengdu metro. On the basis of this model, four future scenarios of carbon emissions from 2020 to 2035 have been established for the metro station by using the scenario analysis method, namely the baseline scenario, the economic scenario, the green scenario and the peak scenario. At the same time, the parameters under each scenario have been adjusted according to various relevant current carbon reduction policies. The carbon emission trend of the metro station from 2020 to 2035 has been predicted through the model, and the carbon peak time and peak carbon emissions of each scenario have been analyzed, then analyze the carbon reduction potential of each scenario and explore the timing and peak carbon emissions of each scenario, the results show that:

(1) The largest contributor to carbon emissions during the construction phase is the material production sector, accounting for more than 85% of the entire construction phase; The largest contributor to carbon emissions in the operation phase is the metro vehicle sector, accounting for more than 50% of the entire operation stage; In the year when the subway was completed and put into operation, the carbon emissions in the construction stage accounted for the largest proportion, reaching about 97%. From the perspective of the whole life cycle, the proportion of carbon emissions in the operation stage rises to about 55%.

(2) When the utilization rate of bulk solid waste increases by 5%, 10% and 15%, the carbon emission intensity of the subway decreases by 2.51, 7.75 and 14.39 t/100 million yuan, and the carbon reduction coefficient is 0.21, 0.51 and 0.70. When the proportion of clean energy utilization reaches 20%, 25% and 30%, the carbon emission intensity of the metro

station decreases by 2.02, 4.32, and 6.45t/100 million yuan, and the carbon reduction coefficient is 0.18, 0.29 and 0.32. When the utilization rate of bulk solid waste increases by 5%, 10% and 15%, and the proportion of clean energy utilization reaches 20%, 25% and 30%, the carbon emissions of the subway decrease by 2.52, 7.82 and 14.62 t/100 million yuan, and the carbon reduction coefficient is 0.22, 0.52 and 0.72.

(3) Under the baseline scenario and green scenario, the carbon emissions of the Chengdu Metro continue to rise, and there is no peak. Under the economic scenario, the Chengdu Metro will have a peak carbon emission in 2031; Under the peaking scenario, Chengdu Metro will achieve carbon peak in 2029.

(4) Under the carbon trading model, compared with the baseline scenario, the economic scenario, green scenario and peak scenario have reduced carbon emissions by a total of 878804.94t, 571808.37t and 884640.77t from 2020 to 2030, and the economic benefits of carbon reduction are 49.2131 million yuan, 32.0213 million yuan and 49.5399 million yuan.

**Key Words:** Metro; Carbon emissions; Life Cycle Assessment; LEAP model

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的及意义.....	3
1.2.1 研究目的.....	3
1.2.2 研究意义.....	3
1.3 国内外研究现状.....	3
1.3.1 温室气体对环境的影响的研究现状.....	3
1.3.2 建造阶段碳排放研究现状.....	4
1.3.3 运营阶段碳排放研究现状.....	5
1.3.4 全生命周期碳排放研究现状.....	5
1.3.5 LEAP 模型应用研究现状.....	7
1.3.6 国内外研究现状评述.....	9
1.4 研究内容及技术路线.....	9
1.4.1 研究边界.....	9
1.4.2 研究内容.....	10
1.4.3 创新之处.....	11
1.4.4 技术路线.....	11
2 模型选择及研究方法.....	13
2.1 模型选择.....	13
2.1.1 “自上而下”法.....	13
2.1.2 “自下而上”法.....	14
2.2 研究方法.....	15
2.2.1 全生命周期.....	15
2.2.2 长期能源替代规划系统.....	16
2.2.3 情景分析法.....	16
2.3 本章小结.....	17
3 地铁 LCA—LEAP 碳排放模型理论体系.....	18
3.1 全生命周期模型概述.....	18

3.2	全生命周期模型框架	18
3.3	地铁全生命周期碳排放计算边界	19
3.4	地铁全生命周期碳排放计算方法	19
3.4.1	建造阶段碳排放计算方法	21
3.4.2	运营阶段碳排放计算方法	22
3.4.3	全生命周期碳排放计算方法	26
3.5	LEAP 模型概述	26
3.6	LEAP 模型的构建层次	27
3.7	地铁 LCA—LEAP 模型的建立	28
3.8	本章小结	29
4	成都市地铁全生命周期碳排放分析	30
4.1	研究区域概况	30
4.1.1	产业结构概况	30
4.1.2	地铁发展概况	31
4.1.3	案例车站概况	31
4.2	成都市地铁全生命周期碳排放分析	32
4.2.1	建造阶段碳排放分析	32
4.2.2	运营阶段碳排放分析	37
4.2.3	地铁全生命周期碳排放分析	40
4.3	本章小结	41
5	基于 LEAP 模型的成都市地铁全生命周期减碳潜力分析	42
5.1	碳排放强度及减碳系数相关概念	42
5.1.1	碳排放强度	42
5.1.2	减碳系数	42
5.2	成都市地铁发展预测	42
5.2.1	成都市 GDP 发展预测	43
5.2.2	成都市地铁发展预测	44
5.3	LCA—LEAP 模型情景和参数设置	46
5.3.1	LCA—LEAP 模型情景设置	46
5.3.2	LCA—LEAP 模型参数设置	49
5.4	结果分析	50
5.5	碳交易模式下减碳经济分析	56

5.6 本章小结 .....	56
6 结论与展望 .....	57
6.1 结论 .....	57
6.2 不足与展望 .....	58
参 考 文 献 .....	59
致    谢 .....	63

# 1 绪论

## 1.1 研究背景

1980 年之后,全球年平均地表温度波动上升趋势明显<sup>[1]</sup>。2020 年与工业革命之前相比,全球平均地表温度上升指数为  $1.2 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ,因温度上升已引发了全球范围内的积雪冰川融化,冰层范围减少,冰川覆盖层下降,永久冻土解冻等一系列环境问题<sup>[2]</sup>。

数十年来,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)不断跟踪调研全球环境变化,确定了全球变暖影响最大的因素是氧化亚氮、二氧化碳以及甲烷等温室气体的排放,温室气体的排放途径主要来源于人类各种生产活动中对各种化石燃料的大规模生产以及使用<sup>[3]</sup>。为了控制全球气温提升,联合国环境规划署提出需要在 2030 前削减 130 亿吨左右的温室气体<sup>[4]</sup>。

根据美国环保署的年度估算,大气中二氧化碳的含量最多,二氧化碳对温室效应的贡献在六种温室气体中(京都议定书中规定控制的 6 种温室气体为:二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、氢氟碳化合物(HFCs)、全氟碳化合物(PFCs)、甲烷( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )、六氟化硫( $\text{SF}_6$ ))占比达 60%以上,故二氧化碳成为温室气体中控制与削减的重点。

碳排放的各类来源占比中,城市碳排放的占比超过了一半,达到了 67%左右<sup>[5]</sup>,其中交通部门能源消耗产生的碳排放约占碳排放总量的 23%,是全球第二大产生碳排放的部门<sup>[6]</sup>。城市交通碳排放量的 24%左右来自于城市的公共交通部门,故城市的公共交通部门成为了全球碳排放的重要来源和削减对象之一<sup>[7]</sup>。

联合国组织为应对全球气候变暖,于 1992 年通过了《联合国气候变化框架公约》,明确了控制削减二氧化碳等温室气体的排放,确立了“将温室气体的浓度控制在防止因人为干扰而危害气候系统的水平之下”的最终目标,发达国家在自身进行减排的同时给发展中国家提供减碳的相关技术及经济帮助,发达国家和发展中国家共同应对气候变化的“共同但有区别”的基本原则。

《京都议定书》出台于 1997 年,联合国组织在日本京都通过的议定书中明确了发达国家关于控制削减温室气体排放的具体目标,并建立了减少温室气体排放的 3 种灵活合作机制—清洁发展机制、联合履行机制和排放贸易机制。

《巴黎协定》出台于 2015 年,联合国组织在巴黎通过的协定明确并保持了发达国家以及发展中国家在气候治理中的责任以及义务的划分,为 2020 年后全球温室气体减排及应对气候变化作出了行动安排。

2020 年 9 月 22 日，在第 75 届联合国大会一般性辩论上，习近平总书记提出了中国双碳目标—二氧化碳排放承诺于 2030 年前实现碳达峰，力争 2060 年前实现碳中和。碳达峰—二氧化碳的排放在未来的某一时刻达到历史峰值，不再出现攀升，该时间点之后的二氧化碳排放逐渐下降；碳中和—指某个地区的企业或者个人在一定时间内由于各种活动所直接或间接产生的二氧化碳排放总量，通过其植树造林或者节能减排等方式吸收抵消或者抵消自身产生的二氧化碳排放量，实现二氧化碳“零排放”。

2021 年 9 月 22 日，中共中央出台《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，要求把碳达峰、碳中和纳入经济社会发展全局，加快实现产业变革、努力调整能源结构，确保如期实现碳达峰、碳中和。

2021 年 10 月 26 日，国务院正式出台《2030 年前碳达峰行动方案》，方案明确要求加快实现生产生活方式绿色变革，落实碳达峰、碳中和的“双碳”政策，确保如期实现 2030 年前碳达峰目标。

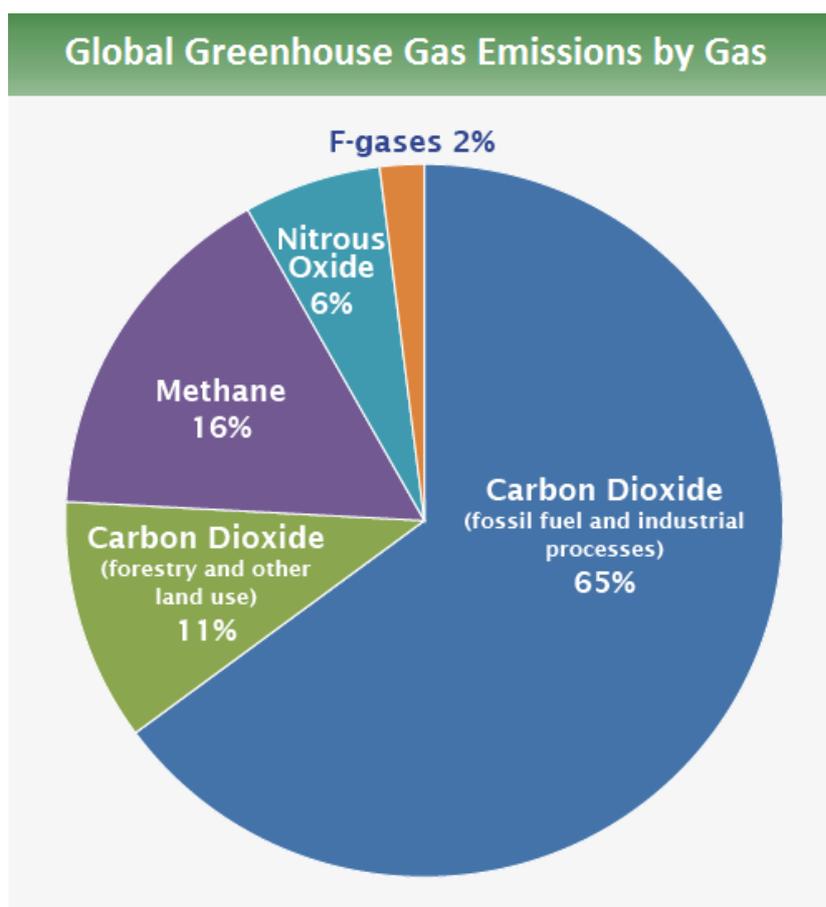


图 1.1 全球温室气体排放占比（来源：美国环保署）

Fig. 1.1 Share of global greenhouse gas emissions (Source: US Environmental Protection Agency)

## 1.2 研究目的及意义

### 1.2.1 研究目的

本文的研究目的是通过全生命周期（Life Cycle Assessment, LCA）视角对成都市地铁站的建造阶段和运维阶段进行碳排放的分类定量研究，同时结合长期能源替代规划系统（Long Range Energy Alternatives Planning System/ Low emission analysis platform, LEAP）构建成都市地铁站的 LCA—LEAP 全生命周期碳排放模型，然后通过现行的减碳政策计算分析出运用相应减碳方法后的成都市地铁站的碳排放强度及减碳潜力，并根据不同的减碳政策设置各种相应的减碳情景，分析预测哪种减碳设置情景下成都市地铁站能实现 2030 年前碳达峰的目标，同时为成都市地铁实现碳达峰提供理论依据和方法。

### 1.2.2 研究意义

#### （1）现实意义

一是削减控制二氧化碳排放的攀升能有效应对因温室气体排放而引起的全球性环境问题，公共交通系统作为碳排放的重要来源之一，实现公共交通碳达峰对应对相应的环境问题及实现“双碳”目标具有重要意义；

二是通过各种现行的减碳政策预测分析了实现碳达峰目标的方法以及各政策支撑下的地铁站碳排放强度及减碳潜力，为相应的企业或机构提供了地铁减碳的理论依据和方法。

#### （2）理论意义

一是将全生命周期理论运用至地铁领域，拓宽了地铁站减碳的应用范围，在全生命周期视角下分析了地铁站建造及运营阶段的碳排放情况，明确了地铁站减碳的重点部门；

二是通过融合全生命周期与 LEAP 模型，构建了成都市地铁站的 LCA—LEAP 全生命周期碳排放模型，为公共交通全生命周期碳排放的预测研究提供了模型支撑；

三是运用情景分析法根据不同的减碳政策设置了各种相应的减碳情景，预测分析了实现地铁碳达峰目标的方法，为实现“双碳”提供了助力。

## 1.3 国内外研究现状

### 1.3.1 温室气体对环境影响的研究现状

随着第一次工业革命的爆发，因人类活动所产生的包括 CO<sub>2</sub> 在内的温室气体呈井喷式增长，有资料显示，温度每升高 0.1℃，海平面上升约 33cm。若以目前的速度排放

CO<sub>2</sub> 等温室气体, 将出现两极冰川融化, 从而导致海平面快速上升, 以及由此引发的破坏性风暴, 将严重威胁自然条件及生存环境<sup>[1]</sup>。根据 IPCC 的评估报告, 全球地表平均温度相较于全球工业化前呈现波动上升的趋势, IPCC 通过评估报告的数据预测全球的平均温度将于 20 年内将至少提升 1.5℃, 由此将引发海平面上升, 积雪冰川融化等严重危害自然环境的极端事件<sup>[2]</sup>。联合国政府气候变化专门委员会 (IPCC) 于 2007 年在气候变化评估报告中指出: 自 1957 年起, 气候变化的主要原因源自于人为活动所排放的各类温室气体<sup>[3]</sup>。联合国环境规划署于 2016 年公布的《排放差距报告》中明确指出, 按照全球温室气体排放速度, 全球气温将于本世纪末提升 2℃, 要控制全球气温提升需要在 2030 前削减 130 亿吨左右的温室气体<sup>[4]</sup>。

2010 年, 全球城市碳排放占全球碳排放的占比约为 67%<sup>[5]</sup>。根据国际能源署估算数据显示, 2014 年全球交通部门能源消耗产生的碳排放约占全球碳排放量的 23%, 交通部门是全球第二大产生碳排放的部门<sup>[6]</sup>。城市交通碳排放量的 24% 左右来自于城市的公共交通部门, 故城市的公共交通部门成为了全球碳排放的重要来源之一<sup>[7]</sup>。

### 1.3.2 建造阶段碳排放研究现状

Seongwon Seo 等通过对澳大利亚的铝合金窗的制造过程—生产、加工和运输过程的碳排放量进行测算, 结果显示制造铝合金窗的各个过程的碳排放量占比从高到低依次为: 生产过程、加工过程、运输过程, 并提出了通过优化铝合金窗的供应链管理可以有效的降低铝合金窗制造过程中产生的碳排放<sup>[8]</sup>。Joke Anthonissen 在温拌沥青技术和再生沥青路面的评估项目中引入了环境影响因子, 在了弗兰德斯道路施工的招标过程中加入了二氧化碳评价的招标方式<sup>[9]</sup>。Moatasse Abdallah 对美国建筑碳排放进行了定量研究分析, 结果显示建筑碳排放的主要来源是使用过程中的能源消耗, 消耗能源所产生的碳排放达到了碳排放总量 39%, 在此基础上 Moatasse Abdallah 提出了一种对建筑能耗优化的模型, 该模型能够有效降低建筑能源消耗和碳排量<sup>[10]</sup>。安东通过西安市地铁四号线为例, 对站点建设期不同来源的碳排放量进行分析, 结果显示 90% 的碳排放来自于建筑材料的消耗<sup>[11]</sup>。皮膺海建立了可以用于估算地铁盾构施工过程中的碳排放定额清单数据库, 并对地铁盾构施工的碳排放进行了测算, 结果显示, 碳排放占比最大的阶段是盾构机在正常工作段掘进的阶段, 并在此基础上提出了一种有效减少施工过程中产生碳排放的新工艺<sup>[12]</sup>。贺晓彤对地铁车站建造阶段产生的碳排放进行了定性定量分析, 结果显示, 地铁车站建造过程中碳排放贡献最大的是建筑材料生产阶; 地铁车站碳排放占比最高的是地铁主体结构, 并明确了建造阶段影响车站碳排放的各种因素, 同时对减少车站建造阶段产生的碳排放提出了相应的措施<sup>[13]</sup>。

### 1.3.3 运营阶段碳排放研究现状

Fornaro 等人在圣保罗大都会区对 RA、JQ 两条不同车流量的高速公路隧道进行了实测，并对其在使用过程中的碳排放量进行了分析，结果表明，车流量更大的 RA 隧道的二氧化碳浓度明显高于 JQ 隧道的二氧化碳浓度，在此基础上提出了二氧化碳浓度直接受到车流量及车速影响<sup>[14]</sup>。Huang 等对挪威的公路隧道进行了碳排放测算，发现标准公路隧道每年至少碳排放 310 t\_CO<sub>2</sub>eq，其使用阶段碳排放主要是来源于用电<sup>[15]</sup>。Ebadi 等人对德黑兰城市中不同交通工具的碳排放进行了评估，结果表明，在城市交通中，公共轨道交通系统的人均碳排放是城市交通系统中最小的，公共轨道交通系统的人均碳排放量仅占私人汽车碳排放量的 1/806<sup>[16]</sup>。王玉明通过结合有关法规、标准及能源消耗统计资料，深入分析城市轨道交通的能源消耗组成及其影响因素，归纳并提出城市轨道交通的车辆运行及站点运行的能源消耗测算方法<sup>[17]</sup>。王环宇通过对地铁车站的照明系统、电梯系统以及通风系统建立地铁车站整体的仿真模型分析测算了地铁车站运营过程中的能源消耗及碳排放<sup>[18]</sup>。龙江英等运用 VB 程序建立了计算地铁车辆和车站能耗的模型，对地铁运营阶段碳排放进行了研究，运用相关计算公式测算分析了车站各个能耗部门的碳排放，以此为基础，分析了地铁运营期的碳排放<sup>[19]</sup>。谢鸿宇等对深圳地铁运营阶段的碳排放量进行了定量分析，将地铁运营阶段分为两个部门：地铁车站碳排放部门、地铁车辆牵引碳排放部门，从两个部门入手分析计算了地铁运营阶段的碳排放<sup>[20]</sup>。何彩虹利用指数分解模型对上海交通运输业的能源消耗及碳排放进行了研究，明确了影响交通运输行业碳排放的因子<sup>[21]</sup>。张陶新等分析计算了长株潭各城市的各类通勤方式的碳排放情况，并在此基础上明确了发展城市低碳公共交通的方向<sup>[22]</sup>。姬文哲通过对天津交通运输业不同的通勤方式所产生的碳排放进行研究分析，提出减少私人出行方式，提高公共交通出行方式能有效减少交通运输部门的碳排放<sup>[23]</sup>。

### 1.3.4 全生命周期碳排放研究现状

Chang 和 Kendall 在全生命周期视角下对加利福尼亚高速铁路的建造阶段进行了碳排放分析计算，结果发现高速铁路的隧道建设所产生的碳排放占比达到了一半以上，建造阶段所产生的碳排放主要来源于建筑材料生产部门<sup>[24,25]</sup>。Robert B. Noland 等运用全生命周期对修复道路主道所产生的碳排放进行了研究。结果表明，全生命周期内，建筑材料生产阶段对道路碳排放的贡献远大于建造物化阶段，并在此基础上，提出了通过碳排放量对建筑材料进行选取的低碳理念<sup>[26]</sup>。Li 等运用全生命周期对上海城市轨道交通系统的碳排放量进行了分析计算，结果显示，生命周期内，轨道交通系统碳排放占比最大的部门为运营部门，基于研究结果，提出了对地铁运营部门车站及车辆进行减碳的理念<sup>[27]</sup>。

郜新军通过分析优化国内外有关全生命周期视角下城市轨道交通系统碳排放定量分析的方法及模型,明确了全生命周期视角下对城市轨道交通系统碳排放贡献由大到小的部门分别是交通运营部门、建造物化部门以及材料运输部门,同时建立了城市轨道交通系统全生命周期的碳排放计算模型<sup>[28]</sup>。冯旭杰从高速铁路的全生命周期视角评价了高速铁路的能源消耗及碳排放情况,建立了适用于高速铁路建造阶段的能源消耗及碳排放的分析方法及计算模型<sup>[29]</sup>。杨馨把将全生命周期运用至建筑行业,建立了包括拆除回收阶段在内的建筑全生命周期能源消耗及碳排放测算分析模型<sup>[30]</sup>。阴世超从全生命周期源头出发,在材料生产阶段、建造物化阶段、运营维护阶段以及拆除回收阶段的框架下将规划设计阶段考虑进了全生命周期的范围之内<sup>[31]</sup>。徐建峰等通过参照建筑全生命周期碳排放核算方法计算了建造隧道所产生的碳排放量,提出了根据全生命周期的框架将隧道的能源消耗分为不同阶段不同种类进行定性定量研究分析的理念<sup>[32]</sup>。Fei 等通过全生命周期对中国南部某高速公路的碳排放进行了定量分析,结果显示能源消耗从高到低依次是建筑材料生产部门、使用运营维护部门、建造施工物化部门<sup>[33]</sup>。曾雪兰等以广佛二期地铁为研究对象,测算了广佛二期地铁的能耗情况,然后利用生命周期理论,通过量化方法从能源强度、能源利用效率、碳排放强度等方面对比了广佛二期地铁与私人载客汽车、公交车、出租车、私人摩托车 4 种客运交通工具;最后,分析广佛二期地铁对佛山市交通行业能耗和温室气体排放的影响,发现广佛一期地铁的开通不但是缓解佛山市机动车辆增长的重要方式,而且对城市交通节能减排具有重要意义<sup>[34]</sup>。粟月欢等以深圳市为研究区域,运用生命周期评价方法定量分析了地铁建设过程的资源与能源消耗强度,并选取全球变暖潜能值为度量指标,构建了地铁建设碳排放分析框架及测算方法,并基于情景分析法预估了减排潜力,发现通过推广绿色建造技术如采用再生混凝土和再生钢材,地铁建设阶段最高碳减排率可达 8.5%/年<sup>[35]</sup>。毛睿昌以深圳市交通设施建设工程为例,运用全生命周期,建立了适用于交通设施的生命周期能源消耗及碳排放评价分析模型,测算了交通设施全生命周期能源消耗的情况,结果显示生命周期视角下对城市交通设施碳排放贡献最大的部门是建筑材料<sup>[36]</sup>。郜新军通过全生命周期构建了适用于城市轨道交通系统全生命周期的碳排放计算模型,并通过轨道车辆的多车再生制动能技术从列车运行节能的角度分析了对于减少城市轨道交通系统碳排放的情况<sup>[37]</sup>。董丹通过分析城市公共交通系统能源消耗和碳排放的评价模型,建立了适用于深圳市的全生命周期视角下城市公共交通系统的能源消耗及碳排放测算分析模型,并运用清洁能源替代的方式分析了通过改变能源结构的方法所带来的减碳潜力<sup>[38]</sup>。秦骜等以在城市轨道交通系统中能耗比重达到 50%的地铁站建筑为研究对象,计算其全生命周期碳排放量,并分析其碳排放特

征和变化规律。结果表明车站建造物化阶段对地铁车站全生命周期碳排放贡献的重要程度明显高于其他类型的建筑<sup>[39]</sup>。

### 1.3.5 LEAP 模型应用研究现状

陈纬利用 LEAP 软件建立了山东省建筑能源消耗模型,通过山东省的清洁能源替代方式,结合情景分析法,设置了运用不同清洁能源的碳排放情景,并根据不同的设置情景分析预测了山东省碳达峰的情况。结果显示,运用清洁能源能有效减少城镇居住区的碳排放量,提高清洁发电比例是实现现有城镇居住区能源利用碳排放目标的必要途径<sup>[40]</sup>。陈宇光通过收集浙江省能源平衡表的相关数据,依据各类出台的减排政策措施,通过构建能源消耗和碳排放的 LEAP 模型,结合情景分析法,设置基准情景、电气化情景、节能化情景、绿电化情景展开比较研究,提出了需要按照对比情景的要求,持续推动终端部门节能降耗,深度挖掘电力部门减排潜力,稳妥提高零碳能源应用比例,在全社会开展碳达峰行动的减碳策略<sup>[41]</sup>。董蕾以四川省交通运输业为研究对象,运用 LEAP 软件构建了四川省交通运输业的能源消耗及碳排放模型,结合情景分析法,通过相关的节能技术与产业结构调整设置了四种不同的碳排放预测情景,并设置模型基准年为 2013 年,预测了到 2033 年为止的四川省交通运输业能源消耗及碳排放情况,根据研究结果提出了调整产业结构、运用节能技术等降低四川省交通运输业碳排放的策略<sup>[42]</sup>。杜涵蓓采用 Kaya 碳排放恒等式和 LEAP 模型,结合情景分析法,通过设置不同的碳排放情景,以南京某市辖区为研究对象,结合 2011—2020 年南京市能源统计数据,从碳排放影响因素和终端能源消费计算 2 个方面分析市辖区碳排放特征,预测了未来碳排放趋势和达峰时间<sup>[43]</sup>。洪竞科通过耦合自上而下式的碳排放模型和自下而上式的碳排放模型,构建了包含终端部门的综合评估模型——RICE—LEAP 模型,结合情景分析法,通过现行的减碳政策及措施设置了政策、低碳、绿色三种碳排放预测情景,动态模拟了 2020—2050 年的中国碳达峰路径及全球气候变化趋势<sup>[44]</sup>。黄莹以利用长周期能源替代计划 (LEAP) 模型对广州交通部门进行了碳排放预测研究,采用情景分析法,结合各种减排措施及相关政策,分别设定了政策、低碳、绿色三种情景,对广州交通部门在不同发展情景下的能源消耗和二氧化碳排放变化进行了预测分析,并根据研究结果对广州市低碳发展的方向与路径进行了探讨,为使城市交通实现低碳发展,建议降低私家车尤其燃油车的出行数量,提升城市公共交通出行的占比,同时提高清洁能源的利用率,促进碳排放量提早达峰<sup>[45]</sup>。赖文亭以福建省的 9 个地级市作为研究对象,基于 47 个社会经济部门以及 19 种能源的消费量来推算 9 个地级市 1997-2017 年的二氧化碳排放量,然后利用长期能源选择计划系统模型 (LEAP) 对泉州市 2018-2030 年的二氧化碳排放进行情景预测分析,最后根据研究结果提出相关节能减排建议<sup>[46]</sup>。栗树朋以沈阳市道路交通部门为研究对

象,应用长期能源替代规划系统(LEAP)模型构建了沈阳市道路交通部门能耗和排放模型,并采用情景分析法模拟了基准情景、促进公共交通情景、提高车辆燃油经济性情景、推广节能与新能源汽车情景以及综合情景下沈阳市道路交通部门 2017-2030 年的能源需求和环境排放状况,同时基于吸入因子法评估了道路交通部门排放  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  给居民带来的健康影响及相应的经济损失情况<sup>[47]</sup>。刘方舟运用 LEAP 模型及相应的二氧化碳测算方法预测了国内一特大城市的碳排放量,模型基准年设置为 2021 年,终点年份设置为 2030 年,通过设置基准及达峰情景预测了该城市的碳排放远景,分析研究了该城市碳达峰的路径,根据预测结果,清洁能源的投入使用强度将会严重影响二氧化碳的减排潜力<sup>[48]</sup>。罗薇以云南省为研究对象,构建了 LEAP—Yunnan 模型来预测分析未来云南省交通运输能源消费与污染物排放问题,并以 2016 年为基准年,预测了在 5 种不同情景下的云南省交通运输在 2016-2035 年的能源消费和污染物排放情况,相比基准情景,5 种不同情景分别减少了 39.77%、47.62%、33.64%、50.92% 和 28.68% 的排放量<sup>[49]</sup>。马海涛运用机动车燃料消耗的碳排放直接测算方法,对京津冀区域 2005—2014 年公路客运交通碳排放进行了测算和时空分析;并借助 LEAP 模型,结合情景分析法,设定了不控制、微控制和强控制的三种调控情景,预测了区域未来的公路客运交通碳排放和调控设想,结果表明两种控制情景的区域碳排放总量至 2030 年都会保持增长态势,因此区域公路客运交通的调控需要科学设计并加大力度<sup>[50]</sup>。庞可基于 LEAP 模型,结合情景分析法,根据各种现行的减碳政策及减排的措施方法构建了兰州市道路交通发展“零措施”的基准(BAU)情景以及低碳(LC)和强化低碳(ELC)这 2 个节能减排情景,模型基准年份设置为 2015 年,预测截止年份设置为 2040 年,通过模型预测分析了各项减排措施和减碳技术下能源消耗情况及而二氧化碳的减排效果,结果显示,低碳情景能源消耗和  $\text{CO}_2$  排放将于 2026 年达峰,强化低碳情景能源消耗和  $\text{CO}_2$  排放将于 2020 年达峰<sup>[51]</sup>。秦宝洋通过分析各类交通运输方式的能源消耗类型,构建 LEAP 模型框架,以严寒地区的吉林省为例预测了严寒地区城市交通部门的碳排放趋势,利用控制变量法分析不同影响因素的减排潜力,结果显示碳达峰出现在 2023—2035 年之间<sup>[52]</sup>。任梦洋通过收集广州市 2007—2019 年交通运输业终端的能源消耗数据,利用自下而上的模型测算了广州市交通运输业的能源消耗及碳排放量,根据测算结果,使用对数平均迪氏分解法计算确定了广州市交通碳排放的影响因子,根据对数平均迪氏分解法确定的广州市交通碳排放影响因子,结合长期能源可替代规划系统模型,建立了适用于广州市交通终端能源消耗及碳排放预测的 LEAP 模型,结合情景分析法,根据各种现行的减碳政策及减排的措施,预测了广州市交通运输业的能源消耗及碳排放远景,并为广州市交通运输业实现 2030 年前碳达峰的目标提出了相应的建议<sup>[53]</sup>。史丹通过研究上海市 2001—2019 年城市

交通结构与碳排放现实状况，分析了城市交通碳减排面临的突出问题，并根据能源消耗及碳排放情况结合使用灰色模型与长期能源可替代规划系统模型预测了上海城市交通碳排放趋势，结合情景分析法，根据各种现行的减碳政策及减排的措施，设定了基准、节能、优化出行方式、替换燃料动力等四种情景。结果表明，四种情景下，上海城市交通将分别于 2031 年、2029 年、2029 年、2028 年实现碳达峰，交通动力系统替换最有利于上海城市交通碳排放早日达峰<sup>[54]</sup>。宋伊迪基于 LEAP 模型构建了北京市道路移动污染源的能源与排放模型，结合情景分析法，根据各种现行的减碳政策及减排的措施，设置了基准情景、现有政策情景和优化政策情景三种情景，分析得出应重点落实推动新能源汽车发展政策，尽可能在未来降低 CNG 车辆占比，探索新型的清洁能源，实行货运“公转铁”、“公转水”，才能为道路移动源的减排带来更好的效果<sup>[55]</sup>。王力以汾渭平原中渭南市为例，采用 LEAP 模型结合使用 LMDI 分解方法，通过情景分析法，根据各种现行的减碳政策及减排的措施，设置了减少污染排放、调整能源结构、改善产业结构等多种减碳情景，预测模拟了渭南市未来的能源消耗、碳排放情形，分析对比了单种方式减排与多种方式协同减排的效果差距，并为渭南市实现 2030 年前碳达峰提供了建议<sup>[56]</sup>。

### 1.3.6 国内外研究现状评述

通过对上述国内外研究文献的梳理可以发现，全生命周期已被广泛应用于地铁部门的碳排放研究，相关能源模型也被广泛的应用于相应部门的能源消耗计算及预测，其中 LEAP 模型在能源消耗及碳排放计算与预测领域的应用已较为系统，但现阶段研究多从宏观角度出发对交通运输部门碳排放的预测进行研究，较少从能源终端消耗角度出发进行碳排放的预测研究，对于 LEAP 模型的运用大多是单独进行建模使用，较少和其他能源模型结合建模使用，故针对以上研究现状，本文创新性的提出将全生命周期与 LEAP 模型相融合的应用于地铁碳排放研究的 LCA—LEAP 地铁碳排放模型。

## 1.4 研究内容及技术路线

### 1.4.1 研究边界

全生命周期（Life Cycle Assessment, LCA），是指某种产品从原料开采，通过生产制造、使用运营最终废弃回收的整个周期，也就是从出生到死亡的整个过程。根据 ISO14040 的定义，全生命周期是一种用来对一种产品所涉及的环境因素及其可能产生的影响进行评估的一种方法，这种方法是通过通过对一种系统有关的输入与产出的存量记录，来对与这些输入与产出有关的可能的环境影响进行评估，并以全生命周期研究的目的为基础，对存量记录以及对环境影响的分析结果进行解读<sup>[36]</sup>。

地铁站的全生命周期包含了从设计之初开始的设计阶段、建造阶段、运营阶段、拆除回收阶段等几个阶段。由于设计阶段不消耗或微消耗材料及能源，不产生或微量产生碳排放，而我国又还未有过关于地铁拆除回收的经历，因此本文所指的地铁站全生命周期只包括地铁站的建造阶段及运营阶段。

#### 1.4.2 研究内容

本文是以成都市某地铁站为例，通过全生命周期视角对成都市该地铁站的建造阶段和运营阶段进行碳排放的分类定量研究，同时结合长期能源替代规划系统（Long Range Energy Alternatives Planning System/ Low emission analysis platform, LEAP）模型构建成都市地铁站的 LCA—LEAP 全生命周期碳排放模型，然后通过现行的减碳政策计算分析出运用相应减碳方法后的成都市地铁站减碳潜力，并根据不同的减碳政策设置各种相应的减碳情景，分析预测哪种减碳设置情景下成都市地铁能实现 2030 年前碳达峰的目标。

首先将建造阶段细分为以下部门进行碳排放的分析计算：

(1) 材料生产部门—通过工程量清单查询统计确定各类原材料用量，根据各类原材料的碳排放系数计算材料生产部门所产生的碳排放总量。

(2) 材料运输部门—确定建筑材料从生产地点运输到施工地点所使用的交通工具种类、数量、运输距离及交通工具所使用的燃料种类及消耗量，计算各类燃料在材料运输阶段的用量，根据各类燃料的碳排放系数计算材料运输部门的碳排放总量。

(3) 建造物化部门—通过工程量清单和相关定额统计建造阶段人员、机械的总量和建造时长确定建造物化过程所消耗的各类能源总量，再根据各类消耗能源的碳排放系数计算建造物化部门的碳排放总量。

然后将运营阶段细分为以下部门进行碳排放的分析计算：

(1) 地铁车辆部门—地铁车辆能耗用电包括车辆牵引力用电，车辆照明、车辆空调用电，车辆显示用电等，通过查阅收集相关资料确定车辆能耗情况及其所用电的发电类型，根据地铁车辆能耗情况和各发电类型的碳排放系数计算地铁车辆部门的碳排放总量。

(2) 站台照明部门—通过查阅相关设计说明结合实地调研确定地铁站台照明能耗情况及其所用电的发电类型，根据站台照明能耗情况和各发电类型的碳排放系数计算站台照明部门的碳排放总量。

(3) 站台空调部门—通过查阅相关设计说明结合实地调研确定地铁站台空调能耗情况及其所用电的发电类型，根据站台空调能耗情况和各发电类型的碳排放系数计算站台空调部门的碳排放总量。

(4) 站台电梯部门—通过查阅相关设计说明结合实地调研确定地铁站台电梯能耗情况及其所用电的发电类型,根据站台电梯能耗情况和各发电类型的碳排放系数计算站台电梯部门的碳排放总量。

最终通过建造阶段和运营阶段的研究结果构造成都市地铁站的全生命周期碳排放体系,同时结合 LEAP 模型构建成都市地铁站的 LCA—LEAP 全生命周期碳排放模型,然后通过现行的减碳政策预测分析出运用相应减碳方法后的成都市地铁站减碳潜力,并根据不同的减碳政策设置各种相应的减碳情景,探究何种政策支撑下的减碳情景能使成都市地铁实现 2030 年前碳达峰的目标,同时为成都市地铁实现碳达峰提供理论依据和方法。

#### 1.4.3 创新之处

本文的研究重点是结合全生命周期及 LEAP 模型构建成都市地铁站的 LCA—LEAP 全生命周期碳排放模型,通过对成都市地铁站的建造阶段和运维阶段进行碳排放的分类定量研究,同时结合现行的减碳政策计算分析出运用相应减碳方法后的成都市地铁站的碳排放强度及减碳潜力,并根据不同的减碳政策设置各种相应的减碳情景,分析预测哪种减碳设置情景下成都市地铁能实现 2030 年前碳达峰的目标。

本文的主要创新之处有:

1.将全生命周期理论运用至地铁领域,在全生命周期视角下将建造、运营等各个相互独立的阶段进行了统一分析,拓展了地铁减碳的应用范围;

2.建立了成都市地铁站的 LCA—LEAP 全生命周期碳排放模型,明确了在现行的各种减碳政策下实现地铁碳达峰的方法,同时分析了地铁站的碳排放强度及减碳潜力,为相应的企业或机构提供了地铁减碳的理论依据和方法,为实现“双碳”提供了助力。

#### 1.4.4 技术路线

论文根据上述研究内容和关键科学问题,从全生命周期、碳排放交叉融合的角度,以文献资料 and 实际数据为基础,拟采用全生命周期理论与 LEAP 模型相结合的方法,具体技术路线如图 1.2 所示:

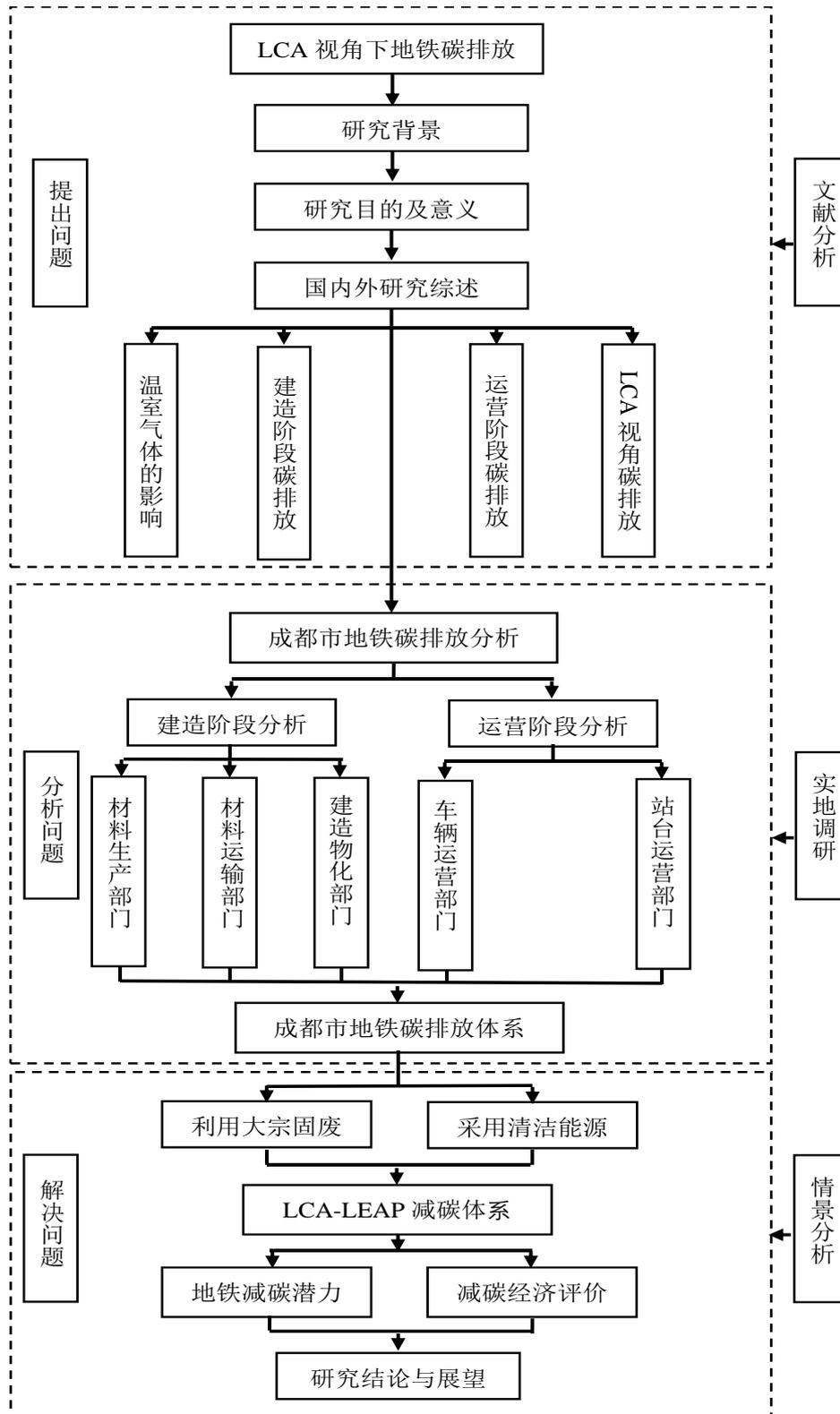


图 1.2 技术路线

Fig. 1.2 Technology roadmap

## 2 模型选择及研究方法

### 2.1 模型选择

根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》，公共交通部门的二氧化碳排放测算可以通过“自上而下”及“自下而上”两种方法进行。

#### 2.1.1 “自上而下”法

自上而下法是通过宏观层面逐步向下到终端层面的研究模型，首先要查询确定国家和地区的宏观层面范围内的交通能源消耗数据，然后通过各交通能源消耗数据进行能源消耗部门的分类，随后通过各能源消耗部门确定各消耗能源的种类及消耗量，最后通过各类消耗能源的消耗量和各类消耗能源的碳排放系数计算出二氧化碳排放量。自上而下式的预测模型包括：

宏观经济模型—从经济变化的角度对能源系统进行研究，能够反映整个国民经济系统的变化情况及其总体态势的宏观经济模型，其主要作用为：能够在多种子因素同时对总体经济指标产生影响的情况下，通过各种经济数据对系统内的各类子因素进行测算及分析，探究总体经济与系统内的各类子因素之间的相互关系，通过对经济的量化解释社会经济现象的本质，明确系统内的各类子因素与总体经济的关联强度，通过数据模型解释各类经济现象。

可计算一般均衡（CGE）模型—从经济系统内的各组成要素之间的供求关系入手，目的是为了市场达到供求平衡。可计算一般均衡模型可用于多种设置条件下评估减排措施对经济造成的影响，模型通过设置不同的措施探究何种相关措施可使经济市场达到供求平衡的状态，其内容主要包括三个层次：C（Computable），模型是可计算的，即具有可量化性；G（General），模型所描述的通常为一般的经济主体，如家庭、厂商、企业、地区等，通过对描述的主体进行最优化，明确主体内的子因素所产生的作用；E（Equilibrium），模型通过市场均衡假设，探究不同经济主体之间的供给和需求关系。

投入产出模型—投入：指从事某项经济活动过程中所消耗的物品或资源；产出：指从事某项经济活动过程中创造的各类成果。投入产出模型阐述了经济活动中各部门之间的投入与产出的平衡联系，对于一个地区或行业的多部门的投入与产出进行争辩进而编制出投入产出表并建立其数学模型，用来对经济活动进行分析和预测，主要用于探究国民经济各部门在经济活动中的综合平衡问题。

结构分解（IO-SDA）模型—基于投入产出理论，并可以对其进行结构分解分析，从而分析人口、经济、结构等因素的变化对碳排放造成的直接影响。结构分解的主要目

的,是将经济系统中的单个变量分解为相互独立变动的子变量,探究各子变量的贡献度,以此明确各子变量的重要度。

计量经济学模型—依据经济学理论,建立系统中各变量之间的数学模型,给予各变量相应的假设条件,探究当一个变量或几个变量发生变化时会对其它变量以至经济系统产生什么样的影响。

Kaya 恒等式—通过建立数学公式将政策、经济、人口等因素和碳排放联系起来从而评估碳排放所造成的影响, Kaya 恒等式的数学表达式为:  $\text{CO}_2$  排放量=人口数 $\times$ 人均 GDP $\times$ 单位 GDP 能源消耗量 $\times$ 单位能源消耗碳排放量。式中,  $\text{CO}_2$  排放量是指单位时间内的二氧化碳排放量, 人口数是指该区域内居住的人数, 人均 GDP 是指该区域内每个人的经济收入, 单位 GDP 能源消耗量是指该区域内单位经济收入产生的能源消耗量, 单位能源消耗碳排放量是指消耗单位能源所产生的二氧化碳排放量。

Tapio 模型—脱钩,指使用相应的数学方法分开两个因相互作用而紧密联系的系统, Tapio 模型基于脱钩理论,可探究二氧化碳排放与 GDP 的变化是否脱钩,分析经济变化幅度与碳排放总量变化幅度的比值,主要反映碳排放对于经济变化的敏感程度。

Rice 模型—将气候变化的过程看作经济活动的过程,将二氧化碳排放看作为自然资本,二氧化碳排放上升看作增加“负资本”,二氧化碳排放下降看作减少“负资本”,以经济增长视角分析碳排放。

### 2.1.2 “自下而上”法

自下而上法是通过能源消耗终端逐步向宏观层面递进的研究模型,首先查询确定各类消耗能源的终端,然后通过各种终端能耗工具的能耗种类划分不同类型的能耗部门,随后通过各类能耗种类的相关数据计算分析能源消耗终端的能源消耗量,最后通过各类消耗能源及能源的碳排放系数计算得到相应的二氧化碳排放量。自下而上式的预测模型包括:

长期能源替代规划系统 (LEAP) 模型—自下而上式结构的 LEAP 模型,是基于终端能源消耗、能耗强度、能耗种类等进行环境影响评价及碳排放预测分析的能源预测模型,模型以终端能源消耗、能源转换和活动强度等为数据支撑,通过建立能源消耗部门模型及相对应的设置情景来预测未来各类情景下的终端能源消耗及环境影响情况,并能通过调整设置情景的相关参数对各类能源实施方案的未来远景进行分析预测。

综合能源市场配置优化 (MARKAL) 模型—“能源的驱动来自于需求”的综合能源系统模型,基于能源需求量和碳排放排放量均满足限制条件的情况下,通过性能和成本指标来分析确定能源系统成本最优化,

MOBILE 模型—可用于以柴油、汽油等为燃料的道路机动车各类污染物排放的预测分析，核算能源消耗及排放强度，并可在新能源或清洁能源替代传统燃料的情景设置下预测分析道路机动车的减排远景。

AIM/Enduse 能源技术模型—亚太地区综合评价模型/终端技术模型 (Asia-Pacific Integrated Model/EnduseModel)，通过各经济活动中的能耗终端部门及能源供给部门构建的能源技术评价模型，以能源服务需求驱动能源技术的改变，既包含当下技术，也涵盖了未来可能会实施的技术，进而根据这些技术的特征及引起的能源消耗改变分析预测相应的终端能耗用量和碳排放量。

IPAT 模型—基于  $I=PAT$  恒等式提出的环境影响模型，其中 I 代表环境影响 (impact)，包含能源消耗、温室气体排放等；P 代表人口数量 (population)，反映为一定时间内地区人口数量的规模变化；A 代表富裕程度 (affluence)，指地区的人均国民生产总值 GDP；T 代表技术 (technology)，指新技术在环境中的进步程度。IPAT 模型用于分析反映环境、人口、经济等因素与碳排放之间的影响关系。

STIRPAT 模型—STIRPAT 模型的提出，是由于 IPAT 模型反映的是环境、人口、经济等因素与碳排放之间的单调线性关系，无法对各影响因素进行量化，为解决这一问题，提出了能量化评价各影响因素的 STIRPAT 模型，STIRPAT 模型不仅可以分析因素之间的相互影响关系，还能通过回归预测分析未来的碳排放情况。

LEAP 模型因其针对终端能源消费的全过程，从能源供应结构、能源技术水平、能源需求、能源强度等环节综合评价各种技术和政策措施对节能减排的影响，与探究城市公共交通低碳发展路径的内容和目标更为吻合，故本文的研究模型选择“自下而上”的长期能源替代规划系统 (LEAP) 模型。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 全生命周期

20 世纪 70 年代初，美国中西部资源研究所关于可口可乐的产品包装所使用的塑料瓶及玻璃瓶对于环境的影响所展开的“资源与环境状况分析”的研究结果中表明，可口可乐公司的产品包装所使用的玻璃瓶对环境的负面影响大于同样产品包装所使用的塑料瓶，该研究结果直接促使可口可乐公司将其所生产产品的包装由玻璃瓶转向使用塑料瓶。此次“资源与环境状况分析”的研究标志着全生命周期方法的开始。经过多年的研究发展，国际环境毒理学与化学会 (SETAC) 于 1990 年首次提出了全生命周期的概念，概念一经提出便获得了迅速发展，国际环境毒理学与化学会通过召开多次环境学术研讨会，促进并完善了全生命周期的相关理论框架和研究方法。1993 年，全生命周期被纳

入了由国际标准化组织（International Standard Organization, ISO）推出的环境管理标准—ISO 14000 环境管理系列标准，标志着全生命周期正式成为了一种完善的、具备可操作性的、具有指导意义的体系标准。1997 年 6 月，全生命周期的理论框架于当时颁布的 ISO 14040 标准《环境管理生命周期评价原则与框架》中被正式提出，其框架包括目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释等 4 个部分。伴随着陆续发布的系列标准，全生命周期的相关标准已趋于完善化、系统化。标准化的全生命周期作为一种完善的、系统的、科学的产品定性定量化的研究工具和管理环境的决策工具，已经被广泛应用于环境影响评估、能源消耗评估、技术创新评估、生产优化评估、政策制定等领域<sup>[57]</sup>。

### 2.2.2 长期能源替代规划系统

长期能源替代规划系统（Long Range Energy Alternatives Planning System, LEAP）模型，是斯德哥尔摩环境研究院和美国波士顿大学联合研发的一套“自下而上”的能源—环境计量方法，长期能源替代规划系统可以对终端能源消耗、能源供给方式、能源结构调整及二氧化碳排放等进行分析及预测，适用于能源—环境的定性定量研究当中，是一种能源—环境定性定量研究的分析预测方法。由于长期能源替代规划系统可以对终端能源消耗、能源供给方式、能源结构调整及二氧化碳排放等进行分析及预测，其被广泛应用于中长期能源消耗及二氧化碳排放的分析预测，同时该模型可结合情景分析法使用，根据不同的政策及技术措施模拟不同设置情景下的碳排放远景。

### 2.2.3 情景分析法

情境分析法是根据政策或者技术措施对未来可能出现的不同情景进行预测分析的一种预测方法，也被称为脚本法或前景描述法，它是在假设一种现象或一种趋势将会继续到将来的基础上，对所预测的对象可能发生的状况或导致的结果进行预测的一种方法。情境分析法一般用来对预测对象的未来发展做出各种设想或预估<sup>[58]</sup>。以不同的政策导向和措施技术为基础，通过建立多样的未来发展情景，从而对研究对象的未来发展进行预测。在遵循政策导向和措施技术不变的前提下，或未来变化趋势不大的情形下，情景分析法能够给出较为准确的预测结果。

情景分析法的建立步骤：

（1）明确主题：主题是情景分析的目的，是情景分析的对象，通过分析研究背景及研究目的，确定情景分析的主题。

（2）分析政策：各种现行的政策或措施是影响未来发展趋势的影响因素，决定了未来发展的大体方向。通过各现行政策或措施确定相应部门的发展态势及相应参数设置。

(3) 情景建立：不同的政策支撑会影响不同的未来发展情景，可以通过单一政策建立相应的未来情景，也可以结合不同的政策或措施建立综合的未来情景，如：基准情景、经济情景、绿色情景、达峰情景等。

(4) 结果分析：不同的情景建立依据不同的政策设置参数，通过分析不同设置情景的结果的评估未来发展趋势，明确实现主题所需的路径。

### 2.3 本章小结

本章对研究模型及研究方法进行了说明，首先分析了“自上而下”法及“自下而上”法的模型区别，相较于偏向研究宏观经济层面的“自上而下”模型，从终端能源种类消耗研究的“自下而上”模型与本文的研究内容及目标更为吻合，故本文选取“自下而上”的 LEAP 模型作为本文的研究模型，然后介绍了全生命周期的相关概念及 LEAP 模型的基本用途，为后续碳排放的测算及模型的构建打下了基础。

## 3 地铁站 LCA—LEAP 碳排放模型理论体系

### 3.1 全生命周期模型概述

全生命周期 (LCA), 是指某种产品从原料采集, 通过制造成品、使用运营最终报废回收的整个周期, 是产品从出生到消亡的整个生命周期。ISO14040 对全生命周期的定义为: “全生命周期是用来对一种产品整个生命周期内所涉及的环境因素及其可能产生的影响进行评估的一种方法”, 全生命周期可通过分析产品生命周期内的不同阶段对环境造成的不同影响定性研究该产品生命周期内不同阶段的改进优化权重, 可通过调整不同阶段的措施技术对产品生命周期对环境造成的相应影响进行定量分析, 完成产品的环境的影响评价<sup>[57]</sup>。

### 3.2 全生命周期模型框架

全生命周期的框架内容由 4 个部分组成, 即: 定义目标与确定范围, 清单分析, 影响评估, 结果解释。

(1) 定义目标和确定范围: 定义目标和确定范围是全生命周期的系统核心, 这一部分明确了研究目的、研究边界和研究内容等, 活动是否能对产品产生影响是界定生命周期边界的标准, 任何在生命周期内能产生影响的活动都规划于研究边界之内。

(2) 清单分析: 清单分析是一个非常重要的步骤, 任何在生命周期内能产生影响的活动都属于清单分析的范围, 针对不同的研究边界, 清单分析的对象也不同, 它通过界定的研究边界收集系统完整的数据来分析计算不同的输入量对结果产生的影响。

(3) 影响评估: 影响评估是对影响结果作出定性和定量两个方面的评估, 根据清单分析的定量结果做出环境影响的定性评估, 通过量化结果判定对环境的影响, 当系统改变不同的研究边界或者调整系统的输入量时, 影响评估的结果也会随之改变。

(4) 结果解释: 结果解释是对影响评估的结果进行分析解释, 通过影响评估的量化结果, 对系统内影响环境最大的因素进行判断, 对调整系统变量所造成的结果变化程度进行影响因子的权重解释<sup>[57]</sup>。

全生命周期的基础框架如图 3.1 所示:

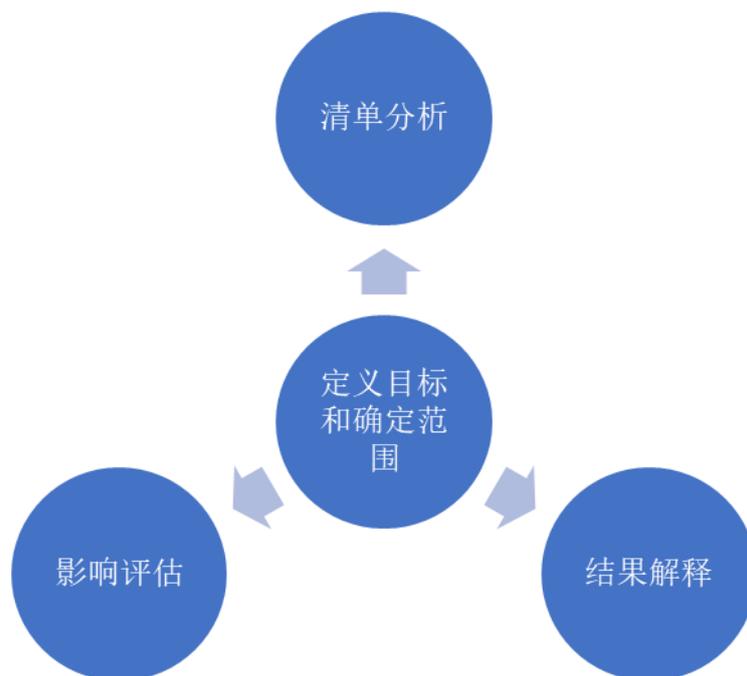


图 3.1 LCA 基础框架

Fig. 3.1 Basic framework of LCA

### 3.3 地铁站全生命周期碳排放计算边界

地铁站的全生命周期包含了从项目立项之后、开始动工之前的设计阶段；开采获取各类原材料、对各类原材料进行生产加工使其成为满足建造需求的建筑材料、通过各种运输方式将各类生产加工后的建筑材料运送至建筑工地、使用各类建筑材料进行物化建造的建造阶段；项目建成后投入运行使用的运营阶段；项目到达使用年限或无法满足正常使用需求的废弃拆除回收阶段等几个阶段。由于设计阶段所进行的工作不涉及原材料的开采生产加工、不使用各类运输工具、无生产及运营的设备工作、不消耗或微消耗材料及能源，故不产生或微量产生碳排放，而我国又还未有过关于地铁拆除回收的经历，因此本文所指的地铁站全生命周期仅包括地铁站的建造阶段及运营阶段。

### 3.4 地铁站全生命周期碳排放计算方法

根据中华人民共和国国家发展和改革委员会颁布的《城市轨道交通工程项目建设标准》及地铁站全生命周期的整个界定范围，本文将地铁站建造阶段细分为材料生产部门、材料运输部门、建造物化部门；结合《建筑碳排放计算标准》中关于建筑运营阶段碳排放的计算规定，建筑运营阶段碳排放计算范围应包括暖通空调、生活热水、照明及电梯、可再生能源、建筑碳汇系统在建筑运营期间的碳排放量，故本文将地铁站运营阶段按耗

电系统细分为站台自动扶梯部门、站台空调部门、站台照明部门、站台给排水部门、站台显示部门、列车信号部门、站台通信部门等部门，由于在地铁站运营的各个部门中站台给排水部门、站台信号部门、站台通信部门、站台监控部门等部门相较于其他部门的能源消耗量占比太小，而照明部门、空调部门、自动扶梯部门是最为主要的能耗部门，所以本文最终将地铁站运营阶段细分为地铁车辆部门、站台照明部门、站台空调部门、站台电梯部门。

地铁站全生命周期碳排放的计算路径为：将全生命周期视角地铁站碳排放分解为地铁建造阶段碳排放和地铁运营阶段碳排放；将地铁建造阶段细分为材料生产部门、材料运输部门、建造物化部门进行碳排放的分析计算；将地铁运营阶段细分为地铁车辆部门、站台照明部门、站台空调部门、站台电梯部门进行碳排放的分析计算。

地铁站全生命周期碳排放计算路径如图 3.2 所示：

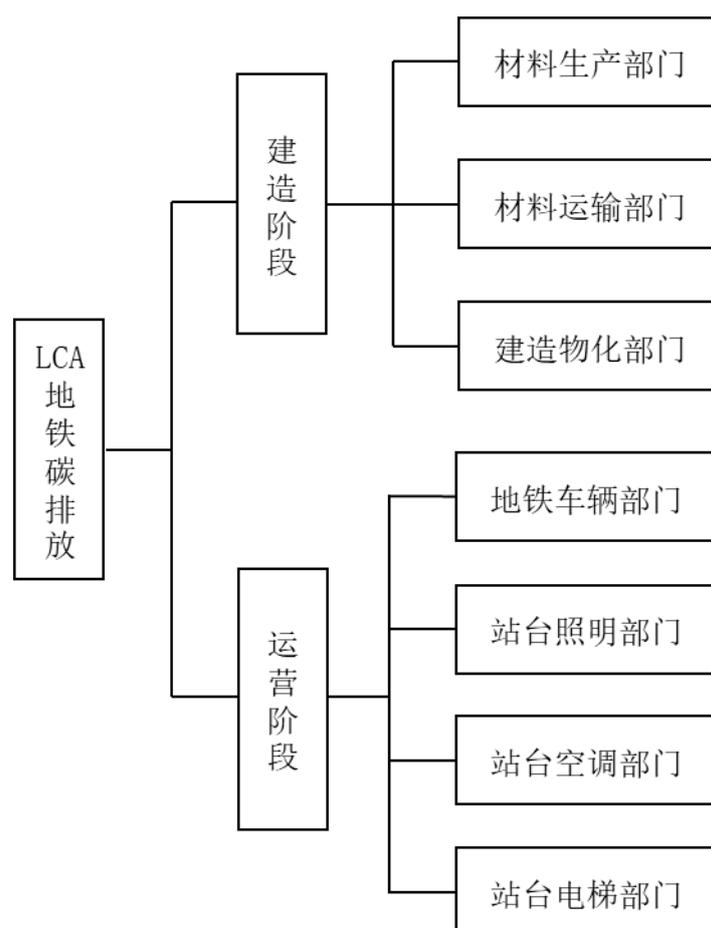


图 3.2 地铁站全生命周期碳排放计算路径

Fig. 3.2 Calculation path of metro station LCA carbon emission

### 3.4.1 建造阶段碳排放计算方法

根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》，地铁站建造阶段的碳排放计算一般是将建造过程划分为施工前建筑材料开采及加工的施工前准备阶段和施工现场进行建造的施工实施阶段，然后统计这两个阶段的碳排放总量并汇总<sup>[59]</sup>。其中施工前准备阶段的碳排放主要来自于各类建筑材料自身的排放，施工前准备阶段碳排放的计算方式为各类建筑材料的消耗量乘以相应的碳排放系数。施工实施阶段的碳排放则主要来自于施工过程中施工机械工作中消耗的能源所产生的碳排放，施工实施阶段碳排放的计算方式为施工过程中各类施工机械各类能源的消耗量乘以相应类型的能源碳排放系数。

地铁站建造阶段能源消耗的计算方法如公式(3.1)所示，

$$E_{jz} = \sum(D_n \times Q_n) + \sum(D_{i,j} \times Q_{i,j}) \quad (3.1)$$

式中， $E_{jz}$ 是地铁站建造阶段的能源消耗量， $D_n$ 是第 $n$ 类建筑材料的用量， $Q_n$ 是第 $n$ 类建筑材料的能耗， $D_{i,j}$ 是第 $i$ 种施工机械工作中第 $j$ 种能源的用量， $Q_{i,j}$ 是第 $i$ 种施工机械工作中第 $j$ 种能源的能耗。

地铁站建造阶段碳排放的计算方法如公式(3.2)所示：

$$CE_{jz} = \sum(D_n \times EF_n) + \sum(D_{i,j} \times EF_{i,j}) \quad (3.2)$$

式中， $CE_{jz}$ 是地铁站建造阶段的碳排放量， $D_n$ 是第 $n$ 类建筑材料的用量， $EF_n$ 是第 $n$ 类建筑材料的碳排放系数， $D_{i,j}$ 是第 $i$ 种施工机械工作中第 $j$ 种能源的用量， $EF_{i,j}$ 是第 $i$ 种施工机械工作中使用的第 $j$ 种能源的碳排放系数。

对于各类能源消耗的碳排放计算，根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中推荐的各种能源碳排放量计算方法进行测算。

各种能源碳排放量计算方法如公式(3.3)所示：

$$CE_{i,j} = E_{i,j} \times EF_j \quad (3.3)$$

式中， $CE_{i,j}$ 为能源消费二氧化碳排放量； $E_{i,j}$ 为第 $i$ 部门第 $j$ 种能源消费量； $EF_j$ 为第 $j$ 种能源的二氧化碳碳排放系数。

各类化石能源因其平均低位发热量、单位热值含碳量及碳氧化率各不相同，故各类化石能源的碳排放因子由该化石能源的平均低位发热量、单位热值含碳量和碳氧化率相乘分别进行计算。

各类化石能源碳排放量的计算方法如公式(3.4)所示：

$$C_{ny} = \sum FC_i \times F_i = \sum FC_i \times ALC_i \times d_i \times S_i \times 44/12 \quad (3.4)$$

式中， $C_{ny}$ 代表化石能源燃烧消耗所产生的碳排放量； $i$ 表示不同种类的化石能源(包括原煤、焦炭、原油、柴油、汽油、液化石油气及压缩天然气)； $FC_i$ 表示第 $i$ 类化石

能源的消耗量； $F_i$  表示第  $i$  类化石能源的碳排放因子； $ALC_i$  表示第  $i$  类化石能源的平均低位发热量； $d_i$  表示第  $i$  类化石能源的单位热值含碳量； $S_i$  表示第  $i$  类化石能源的碳氧化速率。

根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》，材料生产部门主要涉及建筑材料的开采及生产过程<sup>[59]</sup>，对于案例地铁站建造阶段所消耗的建筑材料总量计算根据案例地铁站的建设工程量清单进行筛选统计，所消耗的建筑材料的碳排放系数根据《建筑碳排放计算标准》中各种类建筑材料碳排放系数的推荐值进行选取，通过计算统计的建筑材料消耗量与相对应的建筑材料碳排放系数计算钢材、混凝土、水泥、砂、石等建筑材料的碳排放量，对于《建筑碳排放计算标准》中未给出的建筑材料的碳排放系数推荐值，选择采用已有研究成果的计算数值，然后根据各类建材的碳排放系数对建筑材料开采及生产过程中所产生的碳排放进行计算。

根据《建筑碳排放计算标准》，材料运输部门运输建筑材料的方式一般为公路运输，运输车辆所使用燃料类型一般为汽油或柴油。根据《建筑碳排放计算标准》附录 E 中所给出的各类重型汽油及柴油货车的运输碳排放因子，通过计算算数平均数得到各类运输车辆的运输碳排放因子的平均值为  $0.105\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$ ，该运输碳排放因子平均值与重型汽油货车运输的碳排放因子值  $0.104\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$  基本一致，故本文假设材料运输部门均采用重型汽油货车运输，碳排放因子选取各类重型汽油及柴油货车的运输碳排放因子平均值作为材料运输部门碳排放计算的碳排放因子。根据《建筑碳排放计算标准》附录 E 中给出的各类建筑材料的运输距离及运输方式，结合案例车站建材运输过程中各类建材的实际运输方式及距离，本文假设案例地铁站中各类建材的运输方式均使用重型汽油货车采取公路运输的方式对建材运输部门的碳排放量进行分析测算。

建造物化部门，由于建造物化过程的数据获取困难，可获得的数据有限，所以现有研究多采用的是基于工程量清单和施工定额的计算方法对地铁站建造物化部门的碳排放进行测算，其中建造物化过程所需的施工机具根据《城市轨道交通工程概算定额》确定，各类施工机具的工作每台班及施工机具所使用的能源种类和能源消耗量根据《全国统一施工机械台班定额》确定，然后通过《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》以及我国《建筑碳排放计算标准》中给出的主要能源碳排放因子，确定施工机具所使用的各类能源的碳排放因子，最后根据建造物化过程所消耗的各类能源总量以及各类能源的碳排放因子测算出建造物化部门的碳排放量。

### 3.4.2 运营阶段碳排放计算方法

(1) 根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》，对于公共交通工具运营阶段碳排放的计算分为以下几种<sup>[59]</sup>：

## ① 从燃油经济性角度出发

公共交通车辆燃油经济性计算一般使用公式 (3.5) 进行测算:

$$G_{k,i} = P g_c / 102 V_\gamma \quad (3.5)$$

式中,  $G_{k,i}$  代表第  $k$  类公共交通方式中第  $i$  类燃料车辆的单位公里燃料消耗量,  $P$  代表该类车辆行驶阻力功率,  $g_c$  代表该类车辆所使用燃料的燃料消耗率,  $V$  代表该类车辆的行驶速度,  $\gamma$  代表该类车辆所使用燃料的燃料密度。

其中车辆行驶阻力功率  $P$  的计算方式如公式 (3.6) 所示:

$$P = 1/\eta_\gamma (mgfV/3600 + mgiV/3600 + C_p AV^3/76140) \quad (3.6)$$

式中,  $\eta_\gamma$  代表该类车辆的发动机传动机械效率,  $m$  代表该类车辆的车身重量,  $g$  代表重力加速度,  $f$  代表滚动阻力系数,  $i$  代表行驶路段的道路坡度,  $V$  代表该类车辆的车辆行驶速度,  $C_p$  代表该类车辆的空气阻力系数,  $A$  代表该类车辆的车辆迎风面积。

对于公共交通车辆运营阶段能耗的测算, 车辆运营能耗主要通过城市居民客运周转量、不同公共交通方式的交通分担率、各类燃料车型的占比、各类车辆燃料能耗强度等数据进行测算。

城市公共交通客运周转量计算方式如公式 (3.7) 所示:

$$L = d \times p \times n \times 365 \quad (3.7)$$

式中,  $L$  代表城市公共交通客运周转量,  $d$  代表居民平均单次出行距离,  $p$  代表城市居民人口,  $n$  代表居民人均每日出行次数。

公共交通车辆运营阶段的能耗计算方式如公式 (3.8) 所示:

$$E_{yy} = \sum E_k = \sum \sum [(L \times S_k \times Q_{k,i}/F_k) \times G_{k,i} \times PE_i] \quad (3.8)$$

式中,  $E_{yy}$  代表公共交通运营阶段能耗,  $E_k$  代表第  $k$  类公共交通方式车辆运营阶段能耗,  $L$  代表城市公共交通客运周转量,  $S_k$  代表第  $k$  类公共交通方式的交通分担率,  $Q_{k,i}/F_k$  代表第  $k$  类交通方式中第  $i$  类燃料车辆占比,  $G_{k,i}$  代表第  $k$  类交通方式中第  $i$  类燃料车辆单位公里的能源消耗强度,  $PE_i$  代表第  $i$  类燃料的能源消耗量。

公共交通车辆运营阶段的碳排放计算方式如公式 (3.9) 所示:

$$CE_{yy} = \sum CE_k = \sum \sum [(L \times S_k \times Q_{k,i}/F_k) \times G_{k,i} \times EF_i] \quad (3.9)$$

式中,  $CE_{yy}$  代表公共交通运营阶段碳排放量,  $CE_k$  代表第  $k$  类公共交通方式的车辆运营阶段碳排放量,  $EF_i$  代表第  $i$  类燃料的碳排放因子。

## ② 从客运周转量角度出发

公共交通车辆运营阶段的能源消耗量计算方式如公式 (3.10) 所示:

$$ED_t = T_{i,t} \times EI_{i,t} \quad (3.10)$$

式中,  $ED_t$  代表第  $t$  年所有公共交通工具的能源消耗总和;  $T_{i,t}$  代表第  $t$  年的第  $i$  种车型的公共交通工具客(货)运周转量;  $EI_{i,t}$  代表第  $t$  年的第  $i$  种公共交通工具车型的能源强度。

对于客运周转量  $T$  的测算, 一般分为私人交通; 大众交通及货运交通。私人交通的客运周转量测算, 一般通过车辆的保有量、车辆的年平均运距和车辆的平均载客数量进行测算。

私人交通运营阶段的客运周转量计算方式如公式 (3.11) 所示:

$$T_{S_{i,t}} = Q_{i,t} \times D_{i,t} \times P_{i,t} \quad (3.11)$$

式中,  $T_{S_{i,t}}$  代表第  $t$  年第  $i$  种私人交通车型的客运周转量;  $Q_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种私人交通车型的保有量;  $D_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种私人交通车型的年均运距;  $P_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种私人交通车型的的平均载客数。

大众交通的客运周转量一般通过大众交通客运量和乘客的平均乘坐距离进行计算。

大众交通运营阶段的客运周转量计算方式如公式 (3.12) 所示:

$$T_{d_{i,t}} = V_{i,t} \times R_{i,t} \quad (3.12)$$

式中,  $T_{d_{i,t}}$  代表第  $t$  年第  $i$  种大众交通车型的客运周转量;  $V_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种大众交通车型的客运量;  $R_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种大众交通车型的乘客平均乘坐距离。

货运交通的周转量一般通过货运交通的货运量和货运车辆的平均运距进行计算。

货运交通运营阶段的货运周转量计算方式如公式 (3.13) 所示:

$$T_{h_{i,t}} = G_{i,t} \times K_{i,t} \quad (3.13)$$

式中,  $T_{h_{i,t}}$  代表第  $t$  年第  $i$  种货运交通车型的货运周转量;  $G_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种货运交通车型的货运量;  $K_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种货运交通车型的平均运距。

对于能源强度  $EI$  的测算, 一般通过不同类型运营阶段的能源消耗、使用的不同燃料的燃料密度密度及不同公共交通运营阶段终端的载客数量进行测算。

公共交通工具运营阶段能源强度的计算方式如公式 (3.14) 所示:

$$EI_{i,t} = FC_{i,t} \times \rho_{i,t} \times EC_{i,t} \times 1/PQ_{i,t} \quad (3.14)$$

式中,  $EI_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种公共交通工具车型的能源强度;  $FC_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种公共交通工具车型的单位公里能源消耗;  $\rho_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种燃料的密度;  $EC_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种燃料所含的能量;  $PQ_{i,t}$  代表第  $t$  年第  $i$  种车型的的载客数。

公共交通工具运营阶段的碳排放计算方式如公式 (3.15) 所示:

$$CE_{yy} = E_{i,t} \times EF_t \quad (3.15)$$

式中， $CE_{yy}$  代表公共交通车辆运营阶段二氧化碳排放量； $E_{i,t}$  代表第  $i$  类车辆的第  $t$  种能源消费量； $EF_t$  代表第  $t$  种能源的二氧化碳碳排放系数。

### ③ 从出行方式角度出发

出行方式的能源消费需求根据其客运或货运周转量（数量\*运距）以及单位客运或货运周转量综合能耗计算得到：

公共交通车辆运营阶段的能源消耗量计算方式如公式（3.16）所示

$$E_k = \sum(Ekm_{i,k} \times D_i \times N_i) + \sum(Ekm_{j,k} \times Q_j) \quad (3.16)$$

式中， $E_k$  代表公共交通运营阶段第  $k$  种能源的消耗需求量； $Ekm_{i,k}$  代表第  $i$  种公共交通工具百公里的第  $k$  种能源消耗量； $D_i$  代表第种公共交通工具的年运输距离； $N_i$  代表第  $i$  种公共交通工具的保有量； $i$  代表公共交通中私人交通运营阶段的客运或货运交通工具类型； $Ekm_{j,k}$  代表交通工具  $j$  运输单位客运或货运周转量消耗的第  $k$  种能源量； $Q_j$  代表交通工具  $j$  的客运或货运的周转量； $j$  代表公共交通中大众交通运营阶段的客运或货运交通工具类型。

公共交通运营阶段的碳排放量可根据公共交通工具的能源消耗量与相应消耗能源的碳排放因子计算得到。

公共交通车辆运营阶段的碳排放计算方式如公式（3.17）所示：

$$CE_{YY} = \sum E_k \times F_k \quad (3.17)$$

式中， $CE_{yy}$  代表公共交通车辆运营阶段二氧化碳排放量； $F_k$  代表第  $k$  种能源的碳排放因子。

（2）根据《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》，对于地铁站运营阶段碳排放的计算，是根据地铁站的各个主要能耗部门的电力消耗量来测算其能源消耗及碳排放<sup>[59]</sup>。地铁站的能耗部门，主要包括地铁站照明部门、地铁站空调部门以及地铁站电梯部门。

地铁站运营阶段能耗计算方式如公式（3.18）所示：

$$E_{yy} = \sum(E_e \times U_j) \quad (3.18)$$

式中， $E_{yy}$  代表地铁站运营阶段的能源消耗， $E_e$  代表电力的能耗， $U_j$  代表第  $j$  类地铁站运营阶段设备的耗电量。

地铁站运营阶段碳排放计算方式如公式（3.19）所示：

$$CE_{yy} = \sum(EF_e \times U_j) \quad (3.19)$$

式中， $CE_{yy}$  代表地铁站运营阶段的碳排放量， $EF_e$  代表电力的碳排放因子， $U_j$  代表第  $j$  类地铁站运营阶段设备的耗电量。

地铁站运营阶段的碳排放由地铁站中的各能耗部门的电力消耗组成，根据《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》以及《建筑碳排放计算标准》的相关内容，电力碳排放总量可由消耗能源所直接产生的碳排放量与电力调入所产生的间接碳排放量相加得到。

地铁站运营阶段电力碳排放计算方式如公式（3.20）所示：

$$C_e = C_{zj} + C_{jj} \quad (3.20)$$

式中， $C_e$  代表地铁站运营阶段电力碳排放量， $C_{zj}$  代表由消耗能源所直接产生的碳排放， $C_{jj}$  代表电力调入所产生的间接碳排放。

地铁站运营阶段直接产生的碳排放计算方式如公式（3.21）所示：

$$C_{zj} = \sum S_i \times F_i \quad (3.21)$$

式中， $S_i$  代表各类能源（例如原煤、焦炭、汽油、柴油等）的消耗量； $F_i$  代表各类能源的排放因子。

地铁站运营阶段间接产生的碳排放计算方式如公式（3.22）所示：

$$C_{jj} = \sum D_e \times F_e \quad (3.22)$$

式中， $D_e$  代表当地地区的电力调入量； $F_e$  代表当地地区电力排放因子。

### 3.4.3 全生命周期碳排放计算方法

按照我国《民用建筑统一设计标准》中的规定，50 年为一般建筑物的设计使用年限，假设在地铁站的生命周期内，车站的整体结构设计、建筑材料的使用、施工方式的选择等均没有发生变化的情况下，以 50 年为期限对地铁站的全生命周期碳排放情况进行预测分析。

## 3.5 LEAP 模型概述

由斯德哥尔摩环境研究所与美国波士顿大学共同开发的 LEAP 模型，是一种用于基于自下而上式分析预测未来能源消耗及环境影响的测算模型，该模型中的技术和环境数据库（TED）涵盖了包括美国能源部和国际能源署、联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）在内的数十个机构的环境数据包，该环境数据包含了相对应的消耗能源种类、各类消耗能源的碳排放因子、消耗能源的技术特征、消耗能源的相应成本及能源消耗对环境所带来的影响等，技术和环境数据库（TED）中的能源碳排放因子不仅可以从数据包中直接调用，用户也可以根据实际研究情况进行手动录入和编辑，对于数据不全的情况具有良好的包容性和灵活性<sup>[60]</sup>。

LEAP 模型可以通过模型中自带的情景管理器 Scenario 设置不同年份的多个情景进行分类研究及分析比较,不仅能通过单一政策的参数设置进行预测评估分析,也能同时设置多种政策和措施参数进行分析比较。设置参数时需要模型基准年的相应真实数据及未来年份的预测数据,可结合相应的预测方法完成模型的参数设置,并可以根据政策的走向使用模型自带的插值法或增长法等函数方法来预测评估未来的能源消耗及碳排放趋势<sup>[60]</sup>。

相较于其它能源环境评价预测模型,LEAP 模型的特点主要如下:

(1) 逻辑性强:LEAP 模型的构建一般分为四个层次,每个层次都是上一层次子部门,构建完成的模型不仅可以计算预测相应子部门的碳排放趋势,还可以通过子部门的发展情况预测上一层次的未来态势。

(2) 对于录入数据的要求较低:由于 LEAP 模型自身包含的技术和环境数据库(TED)中收录了包括美国能源部和国际能源署、联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在内的数十个机构的环境数据包,其环境数据库相对完善详细,对于数据不全的情况具有良好的包容性和灵活性,在实际数据不全的情况下可以通过模型本身的数据库进行相对简易模糊的预测分析,在对待特定数据的情况下,用户也可以根据实际研究情况自行手动录入和编辑,对于初始数据的要求较低。

(3) 使用范围较广:根据模型建立的逻辑,LEAP 模型不仅可用于宏观层面的政策或措施实施效果预测分析,如国家层面、地区层面等,也可以用于指定部门在相应政策或措施指导下的预测分析,如公共交通部门、工业部门、建设部门等<sup>[61]</sup>。

### 3.6 LEAP 模型的构建层次

LEAP 模型的建立一般分为四个层次,第一层次:总类别(部门)、第二层次:终端用能部门(子部门)、第三层次:用能设备(次子部门)、第四层次:用能类型(能源结构)。LEAP 模型的构建层次如表 3.1 所示:

表 3.1 LEAP 模型层次

Tab. 3.1 LEAP model hierarchy

第一层次	第二层次	第三层次	第四层次
部门	子部门 1	次子部门 1—1	能源种类 1
		次子部门 1—2	能源种类 2
	子部门 2	次子部门 2—1	能源种类 3
		次子部门 2—2	能源种类 4

### 3.7 地铁站 LCA—LEAP 模型的建立

本文将全生命周期（LCA）与长期能源替代规划系统（LEAP）相结合，将全生命周期的各个阶段融合至 LEAP 模型当中，建立了地铁站 LCA—LEAP 碳排放模型，全生命周期的研究边界为地铁站的建造阶段及运营阶段。地铁站 LCA—LEAP 碳排放模型一共分为四个层次，第一层次部门为全生命周期地铁碳排放；第二层次子部门分为两个部门：地铁站建造阶段、地铁站运营阶段；第三层次次子部门分别为地铁站建造阶段的材料生产部门、材料运输部门、建造物化部门，地铁站运营阶段的地铁车辆部门、站台照明部门、站台空调部门、站台电梯部门；第四层次能源结构按照各个部门的消耗能源种类分类选取，模型的基准年份设置为 2020 年，预测年份设置为 2035 年。

地铁站 LCA—LEAP 碳排放模型的构建层次如表 3.2 所示：

表 3.2 LCA—LEAP 模型层次

Tab. 3.1 LCA—LEAP model hierarchy

第一层次	第二层次	第三层次	第四层次
LCA 地铁站碳排放	地铁站建造阶段	材料生产部门	混凝土、钢材、水泥、砂、石
		材料运输部门	柴油、汽油
		建造物化部门	柴油、汽油、电力
	地铁站运营阶段	地铁车辆部门	电力
		站台照明部门	电力
		站台空调部门	电力
		站台电梯部门	电力

地铁站 LCA—LEAP 模型的建立如图 3.3 所示：

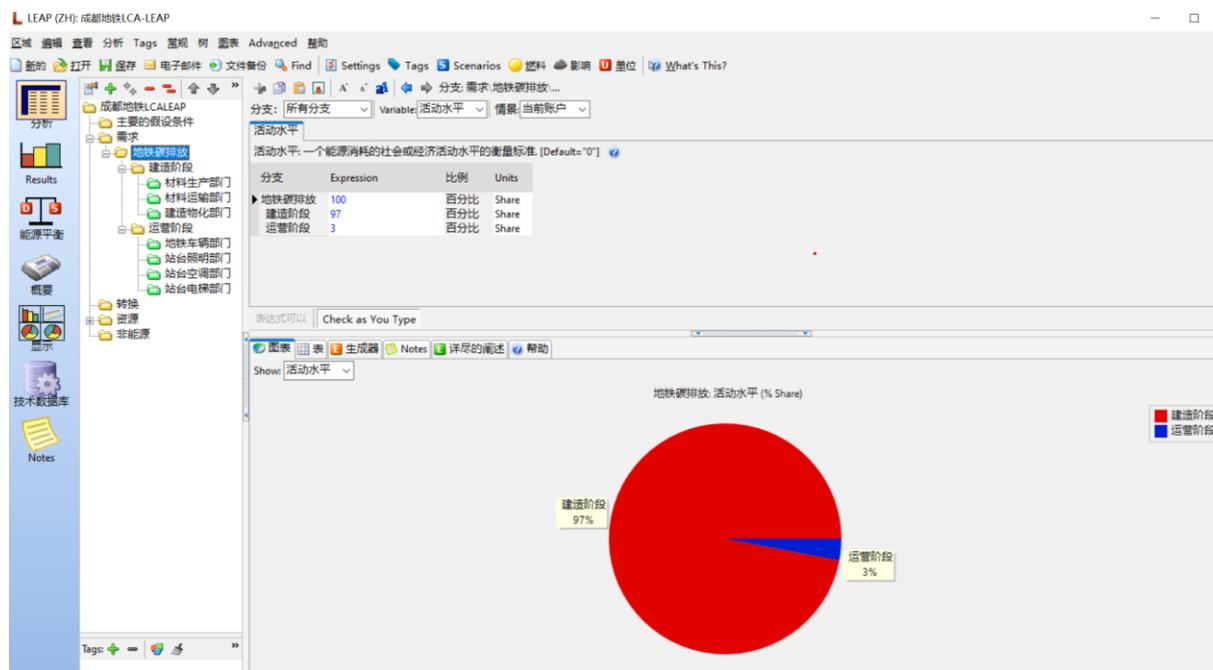


图 3.3 地铁站 LCA—LEAP 模型

Fig. 3.3 LCA—LEAP model of metro station

### 3.8 本章小结

本章界定了地铁站全生命周期碳排放的研究边界，明确了地铁站全生命周期碳排放的测算路径，梳理了地铁站建造阶段及运营阶段碳排放的计算方式，建立了地铁站 LCA—LEAP 碳排放模型，为后续地铁站全生命周期碳排放的分析预测奠定了基础并搭建了框架。

## 4 成都市地铁站全生命周期碳排放分析

### 4.1 研究区域概况

中国西南省份四川省的省会城市—成都市，位于四川盆地西部、成都平原腹地，地理位置介于东经  $102^{\circ} 54' \sim 104^{\circ} 53'$ 、北纬  $30^{\circ} 05' \sim 31^{\circ} 26'$  之间，属亚热带季风性湿润气候，日照时间短，多云、多雾、多降水，全市土地总面积 14335 平方千米，市中心城区面积 1038.79 平方千米。

#### 4.1.1 产业结构概况

根据成都统计年鉴提供的数据，成都市 2010 年—2020 年各产业结构占比及各产业增长速度整理如表 4.1 所示：

表 4.1 成都市各产业构成及增长速度

Tab. 4.1 Composition and growth rate of various industries in Chengdu

年份	三次产业结构构成 (%)			增长速度 (%)		
	第一产业	第二产业	第三产业	第一产业	第二产业	第三产业
2010	5.3	46.3	48.4	4.2	22.7	7.9
2011	4.6	46.4	49.0	3.9	21.2	9.7
2012	4.0	46.2	49.8	4.5	15.9	7.3
2013	3.6	43.1	53.3	3.4	11.9	8.3
2014	3.9	40.4	55.7	3.3	8.6	9.3
2015	3.9	39.5	56.6	3.8	7.2	9.3
2016	4.1	35.5	60.4	4.0	6.6	8.9
2017	4.1	32.3	63.6	3.7	6.7	9.4
2018	3.7	30.8	65.5	3.6	7.0	9.0
2019	3.6	30.5	65.9	2.5	6.8	8.7
2020	3.7	30.6	65.7	3.3	4.8	3.6

由表 4.1 可知，成都市的产业结构重心逐年在向第三产业转型。第一产业在产业结构中的占比逐年下降，由 2010 年的 5.3% 下降至 2020 年的 3.7%；第二产业在产业结构中的占比逐年下降，由 2010 年的 46.3% 下降至 2020 年的 30.6%；第三产业在产业结构中的占比逐年上升，由 2010 年的 48.4% 增长至 2020 年的 65.7%。由于新型冠状病毒肺炎的出现，2019 年开始成都市第三产业的增长速度受到明显影响，2020 年成都市第三产业的增长速度较 2019 年下降了 5 个百分点，第三产业在产业结构中的占比也在近十

年的增长趋势下出现了百分之 0.2 的回落，但整体产业结构的发展重心呈现逐年转向第三产业的趋势。

2020 年成都市实现地区生产总值 17716.7 亿元，较 2019 年增长 4.0%，2020 年成都市第一、第二、第三产业结构占比为 3.7：30.6：65.7。

#### 4.1.2 地铁发展概况

服务于中国四川省成都市的成都地铁，于 2010 年 9 月正式开通了第一条地铁线路—成都地铁 1 号线，根据中国城市轨道交通协会的数据，成都市是中国第十二个拥有地铁的城市。

1992 年 12 月，成都市第一次正式申报了关于成都市地铁建设的《成都市快速轨道交通第一期工程项目建议书》，不过并未申报成功，该项目建议书遭到否定。

2005 年 10 月，经过了十多年的不懈努力，成都市提出的《成都市城市快速轨道交通建设规划》通过了中华人民共和国国务院的批准，同年 11 月 11 日，随着中华人民共和国国家发展和改革委员会批复同意了《成都市地铁 1 号线一期工程可行性研究报告》，标志着成都市正式步入城市公共轨道交通的建设时期。

2010 年 9 月，经过 5 年的建设期，成都地铁 1 号线一期工程正式开通运营，成都市成为了中国第十二个拥有地铁的城市。

根据成都轨道集团提供的数据，经过数十年的发展建设，到 2020 年末，成都地铁已经开通运营了包括：1 号线、2 号线、3 号线、4 号线、5 号线、6 号线、7 号线、8 号线、9 号线、10 号线、17 号线、以及 18 号线在内的共计 12 条地铁线路，路线总共的里程数达到了 518.5 公里。

#### 4.1.3 案例车站概况

本文以成都市某地铁站为例，通过将全生命周期视角地铁站碳排放分解为地铁站建造阶段碳排放和地铁站运营阶段碳排放进行分类定量研究。

车站建造阶段各能源消耗量来源于工程量清单所提供的数据，各能源碳排放因子来源于《建筑碳排放计算标准》所规定的数值；运营阶段各部门的能源消耗来源于地铁站运营的实际数据以及《建筑碳排放计算标准》所规定的数值，各能源碳排放因子来源于《建筑碳排放计算标准》所规定的数值。

案例选取对象为成都市地铁某号线某地下岛式站台车站，车站建设长度为 230m，车站建设宽度为 24m，车站主体建筑深 27m，主体建筑面积 11040 m<sup>2</sup>，车站建设主要施工方法为顺做法、明挖法、盖挖法，隧道建设为盾构法，建设项目主要包括车站主体、地下隧道、电梯井、进出口通道及风道等。案例车站分为站厅层及站台层，地面设有 6

个乘客进出口通道，地面到站厅层共设有 8 个自动扶梯，站厅层到站台层共设有 6 个自动扶梯，案例地铁线运营时间为 6 点 30 分到 23 点 30 分，配车数量为 72 辆，车辆编组为 6 组，车辆牵引系统为阿尔斯通 OptONIX 1500，车型为城轨 B 型，案例车站距离下一个车站的距离约为 1.5km。

## 4.2 成都市地铁站全生命周期碳排放分析

### 4.2.1 建造阶段碳排放分析

#### (1) 建筑材料生产部门

建筑材料生产部门碳排放参考《建筑碳排放计算标准》中材料生产部门碳排放计算方式。

建造阶段建筑材料生产部门碳排放计算方式如公式 (4.1) 所示：

$$C_{sc} = \sum M_i F_i \quad (4.1)$$

式中， $C_{sc}$  代表建筑材料生产部门碳排放， $M_i$  代表第  $i$  种主要材料的消耗量， $F_i$  代表第  $i$  种主要材料的碳排放因子 ( $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{单位材料数量}$ )。建筑材料生产部门的建筑材料消耗量通过分析整理工程量清单计算得到，各建筑材料的碳排放因子按《建筑碳排放计算标准》所规定的数值选取。

建造阶段材料生产部门各建筑材料消耗量及碳排放量依据工程量清单提供的数据及《建筑碳排放计算标准》中所规定的数值整理如表 4.2 所示：

表 4.2 建造阶段材料生产部门各建筑材料消耗量及碳排放

Tab. 4.2 Consumption and carbon emission of building materials in material production departments during construction stage

建筑材料名称	用量	碳排放因子	碳排放量
钢材	6.75t	2582.00kg co <sub>2</sub> eq/t	17.43t
钢筋	23490.32t	2617.00kg co <sub>2</sub> eq/t	61474.15t
钢管	895162.25kg	3480.00kg co <sub>2</sub> eq/t	3115.16t
钢板	9206.55kg	2684.00kg co <sub>2</sub> eq/t	24.71t
型钢	665.21t	2655.00kg co <sub>2</sub> eq/t	1766.12t
螺纹钢	559.27t	2617.00kg co <sub>2</sub> eq/t	1463.61t
铁件	28126.51kg	2348.00kg co <sub>2</sub> eq/t	66.04t
商品混凝土 C15	2302.03m <sup>3</sup>	177.80kg co <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	409.30t
商品混凝土 C20	17823.17m <sup>3</sup>	264.70kg co <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	4717.80t
商品混凝土 C25	3739.19m <sup>3</sup>	292.70kg co <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	1094.46t
商品混凝土 C30	580.31m <sup>3</sup>	316.40kg co <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	183.61t
商品混凝土 C35	20707.90m <sup>3</sup>	362.60kg co <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	7508.68t
商品混凝土 C40	91936.27m <sup>3</sup>	410.40kg co <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	37730.65t
商品混凝土 C50	7630.63m <sup>3</sup>	464.30kg co <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	3542.89t
中砂	31999.52t	2.51kg co <sub>2</sub> eq/t	80.32t
砾石	20660.15t	2.18kg co <sub>2</sub> eq/t	45.04t
水泥 32.5	2052.41t	939.00kg co <sub>2</sub> eq/t	1927.22t
水泥 42.5	20892.79t	939.00kg co <sub>2</sub> eq/t	19618.32t
水泥 52.5	7.57t	941.00kg co <sub>2</sub> eq/t	7.12t
汇总			144792.60t

由表 4.2 可知，建造阶段材料生产部门碳排放总量为 144792.60t，其中碳排放贡献最大的为钢材类，碳排放量为 6786.18t，占比达到了 47%左右，其次为混凝土类，碳排放量为 55187.39t，占比为 38%左右，水泥类的碳排放量为 21552.66t，占比约为 15%，铁件、中砂及砾石的碳排放占比太小故忽略不计。

## (2) 建筑材料运输部门

建筑材料运输部门碳排放参考《建筑碳排放计算标准》中材料运输部门碳排放计算方式。

建造阶段建筑材料运输部门碳排放计算方式如公式 (4.2) 所示：

$$C_{ys} = \sum M_i \times D_i \times T_i \quad (4.2)$$

式中， $C_{ys}$  代表建筑材料运输部门碳排放， $M_i$  代表第  $i$  种主要材料的消耗量， $D_i$  代表第  $i$  种材料平均运输距离， $T_i$  代表第  $i$  种材料的运输方式下，单位重量运输距离的碳排放因子。各运输方式的碳排放因子按《建筑碳排放计算标准》所规定的数值选取。

根据《建筑碳排放计算标准》附录 E 中所规定的各种重型汽油及柴油货车的运输碳排放因子的算数平均值为  $0.105\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$ ，该运输碳排放因子平均值与重型汽油货车运输的碳排放因子  $0.104\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$  基本一致，故本文假设材料运输部门均采用重型汽油货车运输，碳排放因子选取各类重型汽油及柴油货车的运输碳排放因子平均值作为材料运输部门碳排放计算的碳排放因子。根据《建筑碳排放计算标准》附录 E 中给出的建材默认运输距离及运输方式，结合案例车站建材运输过程中各类建材的实际运输方式及距离，本文假设案例地铁站中各种建材的运输方式均使用重型汽油货车采取公路运输的方式对建材运输部门的碳排放量进行分析测算。

各类建筑材料运输距离设定如下：

钢材设定运输距离为 10km；

铁件设定运输距离为 10km；

混凝土采用《建筑碳排放计算标准》的默认运输距离 40km；

中砂设定运输距离为 30km；

砾石设定运输距离为 30km；

水泥设定运输距离为 20km。

建造阶段材料运输部门各建筑材料消耗量、平均运距及碳排放量如表 4.3 所示：

表 4.3 建造阶段材料运输部门碳排放

Tab. 4.3 Carbon Emission from Material Transportation Department in Construction Stage

建筑材料名称	运输距离	碳排放量
钢材	10km	26.91t
铁件	10km	0.03t
混凝土	40km	1458.77t
中砂	30km	100.80t
砾石	30km	65.08t
水泥	20km	48.20t
汇总		1699.79t

由表 4.3 可知，建造阶段材料运输部门碳排放总量为 1699.79t。其中碳排放贡献最大的为混凝土运输，碳排放量为 1458.77t，占比达到了 85%左右，第二为中砂运输，碳排放量为 100.80t，占比约为 6%，第三为砾石运输，碳排放量为 65.08t，占比约为 4%，

第四为水泥运输,碳排放量为 48.20t,占比约为 3%,第五为钢材运输,碳排放量为 26.90t,占比约为 2%,铁件运输的碳排放占比太小故忽略不计。

### (3) 建造物化部门

建造物化部门碳排放参考《建筑碳排放计算标准》中建造物化部门碳排放计算方式。建造阶段建造物化部门碳排放计算方式如公式(4.3)所示:

$$C_{wh} = \sum N_i \times F_i \quad (4.3)$$

式中,  $C_{wh}$  代表建造物化部门碳排放,  $N_i$  代表第  $i$  种能源的消耗量,  $F_i$  代表第  $i$  种能源的碳排放因子,各消耗能源的碳排放因子按《建筑碳排放计算标准》的规定取值。建造物化过程中所涉及能源消耗中的电力碳排放因子,根据《省级温室气体清单编制指南》,确定中国区域电网单位供电平均二氧化碳排放因子四川省为  $0.801 \text{ kg/kW}\cdot\text{h}$ 。

建造阶段建造物化部门各能源消耗量及碳排放量依据工程量清单提供的数据及《建筑碳排放计算标准》中所规定的数值整理如表 4.4 所示:

表 4.4 建造阶段建造物化部门碳排放

Tab. 4.4 Carbon emission from the construction sector during the construction phase

能源消耗种类	能源消耗量	碳排放因子	碳排放量
柴油	6519127.07kg	3.06kg $\text{CO}_2\text{eq/kg}$	19948.53t
汽油	160507.05kg	3.15kg $\text{CO}_2\text{eq/kg}$	505.60t
电力	1101438.94 $\text{kW}\cdot\text{h}$	0.801 $\text{kg/kW}\cdot\text{h}$	882.25t
汇总			21336.38t

由表 4.4 可知,建造阶段建造物化部门碳排放总量为 21336.38t。其中碳排放贡献最大的为柴油消耗,碳排放量为 19948.53t,占比达到了 94%左右,其次为电力消耗,碳排放量为 882.25t,占比为 4%左右,碳排放贡献最小的为汽油消耗,碳排放量为 505.60t,占比约为 2%。

地铁站建造阶段碳排放总量为材料生产部门碳排放总量与材料运输部门碳排放总量与建造物化部门碳排放总量之和,即 167828.77t。

建造阶段各部门碳排放量占比如图 4.1 所示：

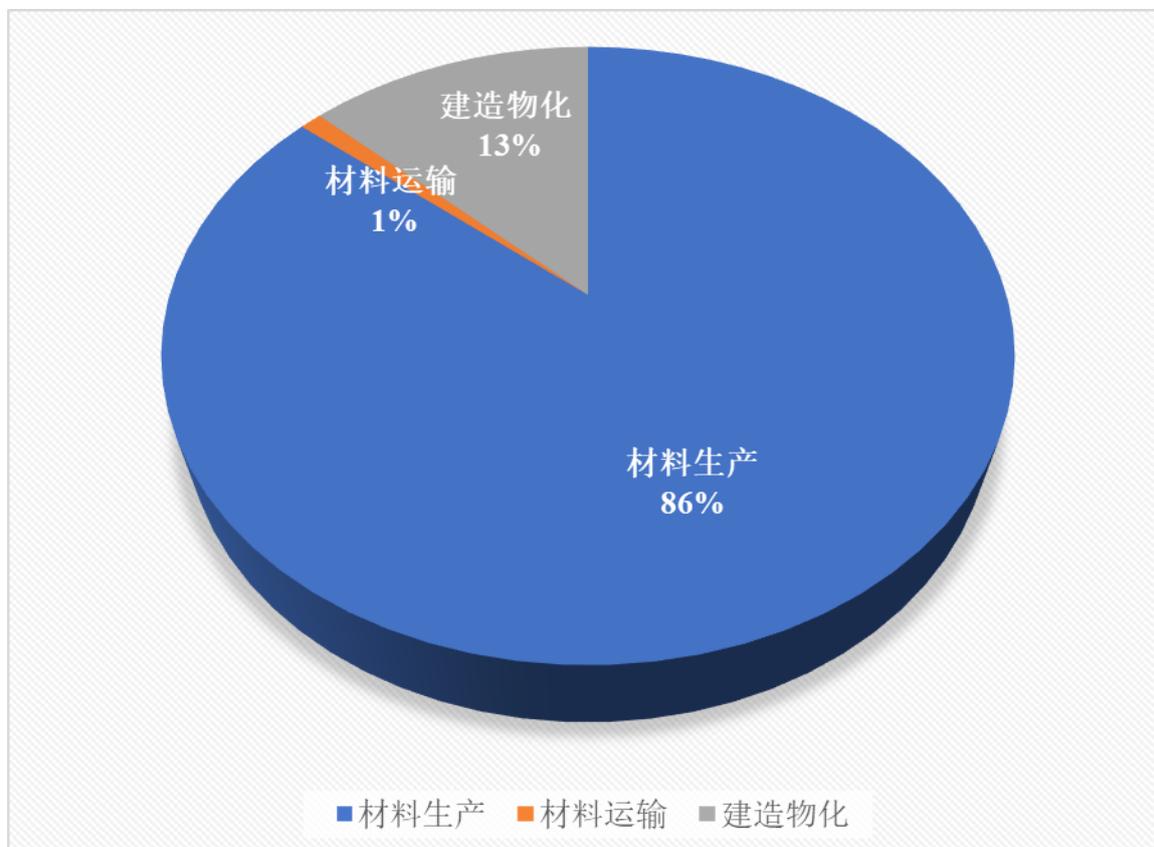


图 4.1 建造阶段各部门碳排放量占比

Fig. 4.1 Proportion of carbon emissions of various departments in construction stage

由图 4.1 可知，在建造阶段的各个部门中，碳排放贡献最大的是材料生产部门，占比达到了整个建造阶段的 86% 左右，其中材料生产部门的碳排放几乎由钢材类、混凝土类及水泥类建筑材料构成，三者的占比依次为 47%、38%、15%；其次是建造物化部门，碳排放贡献达到了 13% 左右，建造物化部门碳排放贡献最大的为柴油消耗，占比达到了 94% 左右，其次为电力消耗，占比为 4% 左右，碳排放贡献最小的为汽油消耗，占比约为 2%；碳排放贡献最小的是材料运输部门，占比为 1% 左右，材料运输部门碳排放贡献最大的为混凝土运输，占比达到了 85% 左右，第二为中砂运输，占比约为 6%，第三为砾石运输，占比约为 4%，第四为水泥运输，占比约为 3%，第五为钢材运输，占比约为 2%。根据建造阶段碳排放计算结果可知，材料生产部门的碳排放贡献占比重大，是建造阶段减碳的重点部门。

#### 4.2.2 运营阶段碳排放分析

根据《中国电力行业年度发展报告》所提供的数据，我国发电主力为火电及水电，其中火电占比约为 80%，水电约为 10%，其余为风电、光伏、核电等。由于火电占比重大，同时为方便测算，故本文运营阶段地铁站碳排放的计算路径为：假设地铁站运营阶段电力提供方式全部为火力发电，通过运营阶段电力消耗量及火力发电的碳排放因子计算运营阶段碳排放总量。

按照火力发电厂的相关数据，火电厂产生 1 度（1 千瓦时）电需要消耗约 330g 标准煤，而燃烧 1kg 标准煤产生的碳排放约为 2.62kg，故火力发电的碳排放因子约为 0.87 kg/kW·h。

##### （1）地铁车辆部门

根据《成都平原城市群轨道交通车辆信息》中所给出数据，案例地铁线的配车数量为 72 辆，车辆编组为 6 组，牵引系统为阿尔斯通 OptONIX 1500，车型为城轨 B 型，案例车站距离下一个车站的距离约为 1.5km，案例地铁线每天运营时间为 6 点 30 分到 23 点 30 分，一共 17 个小时。根据中国城市轨道交通协会《城市轨道交通年度统计分析报告》所提供的数据，城轨交通平均每车公里牵引能耗为 1.9 kW·h（1.9 度/车公里），平均每车公里用电能耗为 3.73 kW·h（3.73 度/车公里）。

根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》，地铁车辆部门的碳排放一般由三部分组成：地铁车辆空调系统、地铁车辆照明显示系统以及地铁车辆动力牵引系统<sup>[59]</sup>。

运营阶段地铁车辆部门碳排放计算方式如公式（4.4）所示：

$$CE_{cl} = M \times N \times D \times T \times F \quad (4.4)$$

式中， $CE_{cl}$  代表运营阶段地铁车辆部门碳排放， $M$  代表地铁车辆每车公里电力能耗， $N$  代表该地铁线路运营的列车数量， $D$  代表距离下一个地铁车站的距离， $T$  代表每天运营的时间， $F$  代表火力发电碳排放因子。由于各个系统的能源消耗数据收集困难，故本文采用中国城市轨道交通协会《城市轨道交通年度统计分析报告》所提供的数据，设定地铁车辆每车公里用电能耗为 3.73 kW·h。

根据公式（4.4），假设地铁线路全年无休正常运转，运营阶段地铁车辆部门的能耗为 6848.28 kW·h/天，2499622.20 kW·h/年；碳排放量为 5.96t/天，2174.67t/年。

##### （2）站台照明部门

根据《建筑碳排放计算标准》中有关照明系统能耗的计算规定，照明系统无光电控制系统时，其碳排放计算方式如公式（4.5）所示：

$$CE_{zm} = E_{zm} \times F = \left( \sum \sum P_{i,j} \times A_i \times t_{i,j} + 24 \times P_p \times A \right) \times F / 1000 \quad (4.5)$$

式中,  $CE_{zm}$  代表运营阶段地铁站台照明部门碳排放,  $E_{zm}$  代表照明系统年能耗 ( $kWh/a$ ),  $F$  代表火力发电碳排放因子,  $P_{i,j}$  代表第  $j$  日第  $i$  个房间照明功率密度值 ( $W/m^2$ ),  $A_i$  代表第  $i$  个房间的照明面积 ( $m^2$ ),  $t_{i,j}$  代表第  $j$  日第  $i$  个房间照明时间 ( $h$ ),  $P_p$  代表应急灯照明功率密度 ( $W/m^2$ ),  $A$  代表建筑面积 ( $m^2$ )。其中照明功率参数根据《城市轨道交通照明 GB/T 16275-2008》表 9—照明功率密度值中城市轨道交通各类场所照明功率密度值, 设定设备用房照明功率密度值为  $8W/m^2$ 、管理用房照明功率密度值为  $11W/m^2$ 、站台照明功率密度值为  $10W/m^2$ 、站厅照明功率密度值为  $12W/m^2$ ; 经调整后取算数平均值  $10.3W/m^2$ , 由于应急灯照明情况难以获得并且能耗较小, 故本文不考虑应急灯照明。

根据公式 (4.5), 假设地铁线路全年无休正常运转, 运营阶段地铁照明部门的能耗为  $1933.10 kW \cdot h/天$ ,  $705582.96 kW \cdot h/年$ ; 碳排放量为  $1.68t/天$ ,  $613.86t/年$ 。

### (3) 站台空调部门

根据《建筑碳排放计算标准》中有关暖通空调系统碳排放的计算规定, 暖通空调中由于制冷剂使用而产生的温室气体排放, 应按公式 (4.6) 计算:

$$C_{\gamma} = (m_{\gamma} \times GWP_{\gamma} / y_e) \times 1000 \quad (4.6)$$

式中,  $C_{\gamma}$  代表建筑使用制冷剂产生的碳排放量,  $\gamma$  代表制冷剂类型,  $m_{\gamma}$  代表设备的制冷剂充注量,  $y_e$  代表设备使用寿命,  $GWP_{\gamma}$  代表制冷剂  $\gamma$  的全球变暖潜值。由于空调制冷剂的相关数据难以获取, 故本文采用已有的研究成果对地铁站台空调部门的碳排放进行测算。根据现有研究, 室内  $15m^2$  空调制冷平均需要消耗  $160w$  电力, 每平方米的空调能源消耗量为  $160w/15m^2$ , 通过每平方米的空调能源消耗量和地铁车站的面积可计算得出地铁车站的空调能源消耗量。地铁车站的空调能耗量= $160/15 \times$ 地铁车站的面积<sup>[19]</sup>。

假设地铁线路全年无休正常运转, 运营阶段地铁空调部门的能耗为  $2001.92 kW \cdot h/天$ ,  $730700.80kW \cdot h/年$ ; 碳排放量为  $1.74t/天$ ,  $635.71t/年$ 。

### (4) 站台电梯部门

根据《建筑碳排放计算标准》中有关电梯系统能耗的计算规定, 电梯系统能耗应按公式 (4.7) 计算:

$$E_e = (3.6 \times P \times t_a \times V \times W + E_{standby} \times t_s) / 1000 \quad (4.7)$$

式中,  $E_e$  代表年电梯能耗 ( $kW \cdot h/a$ ),  $P$  代表特定能量消耗 ( $mW \cdot h/kgm$ ),  $t_a$  代表电梯年平均运行小时数 ( $h$ ),  $V$  代表电梯速度 ( $m/s$ ),  $W$  代表电梯额定载重量 ( $kg$ ),  $E_{standby}$  代表电梯待机时能耗 ( $W$ ),  $t_s$  代表电梯年平均待机小时数 ( $h$ )。由于电梯各项

数据难以获取，故本文采用已有的研究成果对地铁站台电梯部门的碳排放进行测算。地铁站台自动扶梯电功率计算公式：地铁站台自动扶梯电功率(W)=自动扶梯数\*10000<sup>[19]</sup>。

案例车站地面到站厅层一共八个自动扶梯，站厅层到站台层一共六个自动扶梯，自动扶梯宽度为 1m。假设地铁线路全年无休正常运转，运营阶段地铁电梯部门的能耗为 2380 kW·h/天，868700 kW·h/年；碳排放量为 2.07t/天，755.77t/年。地铁站运营阶段年碳排放总量为地铁车辆部门年碳排放总量与站台照明部门年碳排放总量与站台空调部门年碳排放总量与站台电梯部门年碳排放总量之和，即 4180.01t。

运营阶段各部门碳排放量占比如图 4.2 所示：

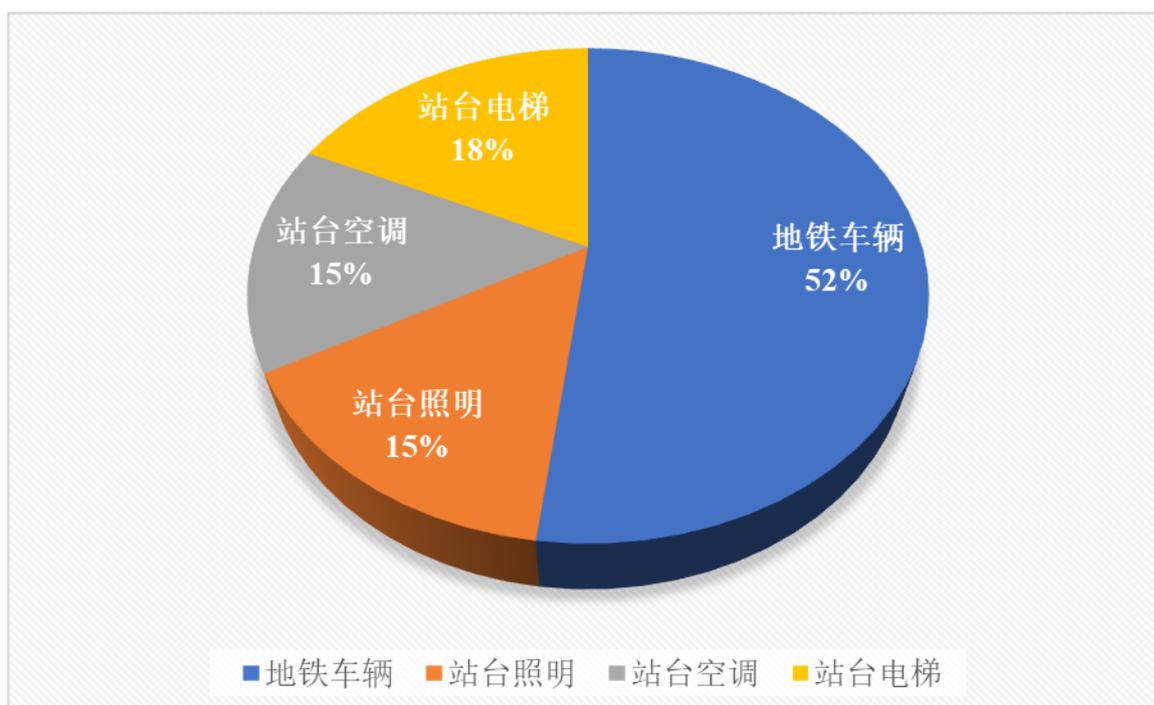


图 4.2 运营阶段各部门碳排放量占比

Fig. 4.2 Proportion of carbon emissions of various departments in operation stage

由图 4.2 可知，在运营阶段的各个部门中，碳排放贡献最大的是地铁车辆部门，占比达到了整个运营阶段的一半以上，到达了 52% 左右，其次是站台电梯部门，碳排放贡献达到了 18% 左右，站台空调和站台照明部门的碳排放贡献值较为相似，占比均为 15% 左右。根据运营阶段碳排放计算结果可知，地铁车辆部门的碳排放贡献占比最大，由于本文假设运营阶段所产生的碳排放全部来自于火电消耗，故考虑通过清洁能源替代火力发电的方式进行地铁站运营阶段的减碳研究。

### 4.2.3 地铁站全生命周期碳排放分析

按照我国《民用建筑统一设计标准》中的规定，50 年为一般建筑物的设计使用年限，假设在地铁站的生命周期内，车站的整体结构设计、建筑材料的使用、施工方式的选择等均没有发生变化的情况下，以 2020 年为基准年，以 50 年为期限对地铁站全生命周期的碳排放情况进行预测分析，结果显示：2020 年地铁站碳排放总量为 172008.78t，建造阶段为 167828.77t，运营阶段为 4180.01t；全生命周期视角下地铁站碳排放总量为 376829.16t，建造阶段为 167828.80t，运营阶段为 209000.36t。

地铁站全生命周期碳排放结果如图 4.3、图 4.4 所示。

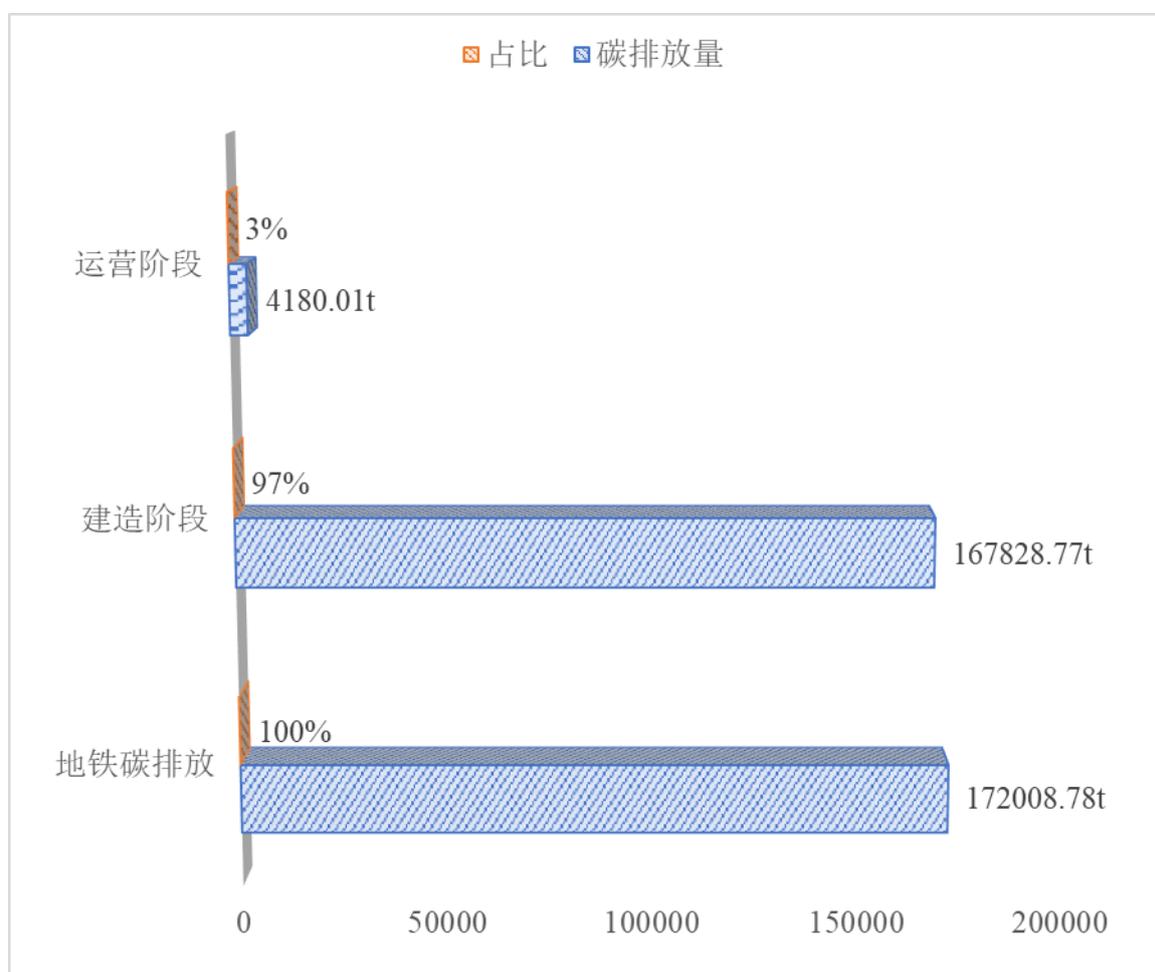


图 4.3 2020 年地铁站碳排放总量

Fig. 4.3 Total Carbon Emissions of metro station in 2020

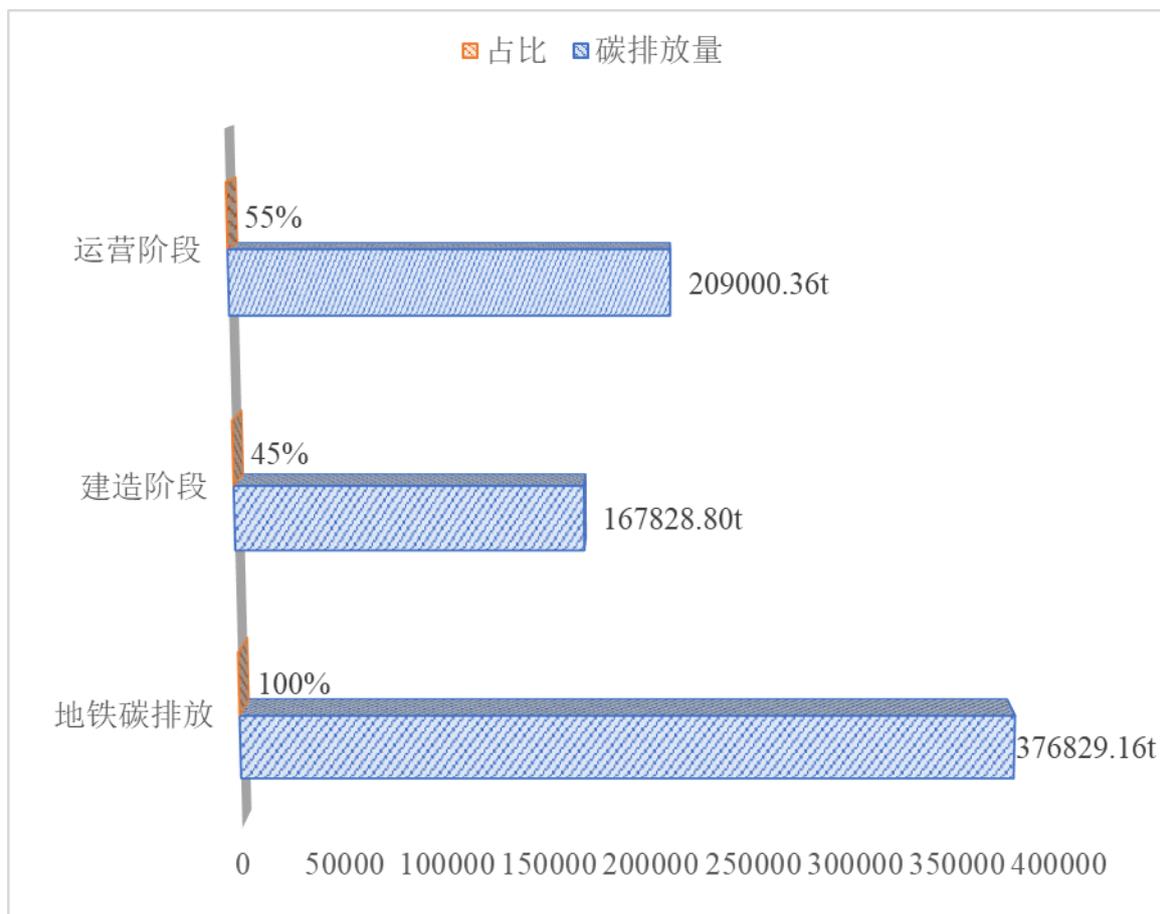


图 4.4 全生命周期地铁站碳排放总量

Fig. 4.4 Total carbon emission of metro station in the whole life cycle

通过图 4.3、图 4.4 可知，在地铁站建成并投入运营的 2020 年，建造阶段的碳排放量占比最大，达到了 97% 左右，而运营阶段的碳排放量占比仅为 3% 左右，在这一时期地铁站碳排放几乎全部来自于建造阶段。随着运营时间的增长，运营阶段的碳排放量也在不断攀升，在 50 年全生命周期的视角下，建造阶段的碳排放量占比逐步的降低，最终来到了 45% 左右，而运营阶段的碳排放量占比则超过了建造阶段的碳排放量占比，上升至了 55% 左右。通过全生命周期视角地铁站碳排放的计算结果可以得知，全生命周期视角下地铁站运营阶段的碳排放占比相较于建造阶段更大。

### 4.3 本章小结

本章对地铁站建造阶段、运营阶段的各能耗情况及碳排放因子进行了统计梳理，测算了各阶段的碳排放量及地铁站全生命周期的碳排放量，明确了全生命周期视角下地铁站建造阶段及运营阶段的碳排放占比，为后续模型预测及情景分析提供了数据支撑。

## 5 基于 LEAP 模型的成都市地铁站全生命周期减碳潜力分析

### 5.1 碳排放强度及减碳系数相关概念

#### 5.1.1 碳排放强度

碳排放强度是为了反映二氧化碳排放量的变化与经济总量变化之间的关系，是单位 GDP 所需排放的二氧化碳量，根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》，碳排放强度的计算路径为：碳排放强度=二氧化碳排放量/GDP 数值<sup>[59]</sup>，通过公式的计算结果可以解释研究对象是否处于低碳绿色的发展路径之中，公式的计算结果数值越小，代表单位 GDP 所需排放的二氧化碳量越少，同时代表了研究对象正处于低碳绿色的发展路径之中。

#### 5.1.2 减碳系数

为将减碳潜力这一理论量化，本文提出减碳系数这一概念：通过相应减碳措施实现的减碳量与无减碳措施下的碳排放量的比值即为地铁站的减碳系数。减碳系数的计算路径为：减碳系数=减碳量/碳排放量，通过减碳系数公式的计算结果可以将地铁站的减碳潜力具象化、数据化，减碳系数公式的计算结果越大，代表其减碳潜力越大。

### 5.2 成都市地铁发展预测

现有对于未来预测的研究，较多使用 BP（back propagation）神经网络、Logistic 回归分析模型、GROWTH 增长函数等方法。其中 BP 神经网络更多用于复杂非线性化的环境，Logistic 模型更适用于预测某事件发生可能性的分类问题，而 GROWTH 增长函数因其可以根据现有的数据预测未来的增长值、对于单个对象的时间预测值较为准确，与本文的研究内容更为契合，故本文选择 GROWTH 函数来预测成都市地铁未来的发展趋势。

GROWTH 函数可以根据现有的数据来对未来的指数增长值进行预测，根据现有的 x 值和 y 值，GROWTH 函数能够预测出一组新的 x 值对应的 y 值。GROWTH 函数的函数语法为：GROWTH（known\_y's,known\_x's,new\_x's,const）[GROWTH（已知的 y 值，已知的 x 值,新的 x 值,逻辑值）]。

GROWTH 函数的参数说明如表 5.1 所示：

表 5.1 GROWTH 函数的参数说明

Tab. 5.1 Parameter description of GROWTH function

y 值已知, known_y's 参数满足 指数回归拟合曲线 $y=b*m^x$	known_y's	known_x's
	单独一列	每列的独立变量
	单独一行	每行的独立变量
	任何数为零或为负数	返回错误值 #NUM!
x 值已知, known_x's 参数满足 指数回归拟合曲线 $y=b*m^x$	known_x's	known_y's
	一个变量	和 known_x's 维数相同
	多个变量	known_y's 为向量
	省略	大小与 known_x's 相同
new_x's 参数	known_y's	known_x's
	单列	和 new_x's 列数相同
	单行	和 new_x's 行数相同
const 参数	TRUE	FALSE
	常数 b 正常计算	常数 b 设为 1

### 5.2.1 成都市 GDP 发展预测

根据成都统计年鉴提供的历年数据,成都市 2010 年—2020 年 GDP 及各产业生产总值整理如表 5.2 所示:

表 5.2 成都市地区生产总值 GDP 及各产业生产总值

Tab. 5.2 Chengdu's regional GDP and GDP of various industries

年份	GDP (亿)	第一产业 (万)	第二产业 (万)	第三产业 (万)
2010	5889.46	3138863	27235591	28520167
2011	7345.32	3357402	34066194	36029611
2012	8619.6	3418895	39799224	42977927
2013	9450.66	3438612	40679083	50388924
2014	10368.43	4029207	41936432	57718703
2015	10662.31	4139863	42109286	60373953
2016	11874.07	4920178	42163620	71656932
2017	13931.39	5651766	45047309	88614791
2018	15698.94	5788437	48341605	102859384
2019	17010.66	6122191	51875696	112108733
2020	17716.67	6551691	54185033	116430032

根据表 5.2 所整理的数据,使用 GROWTH 函数对成都市未来年份的 GDP 进行预测,结果如图 5.1 所示:

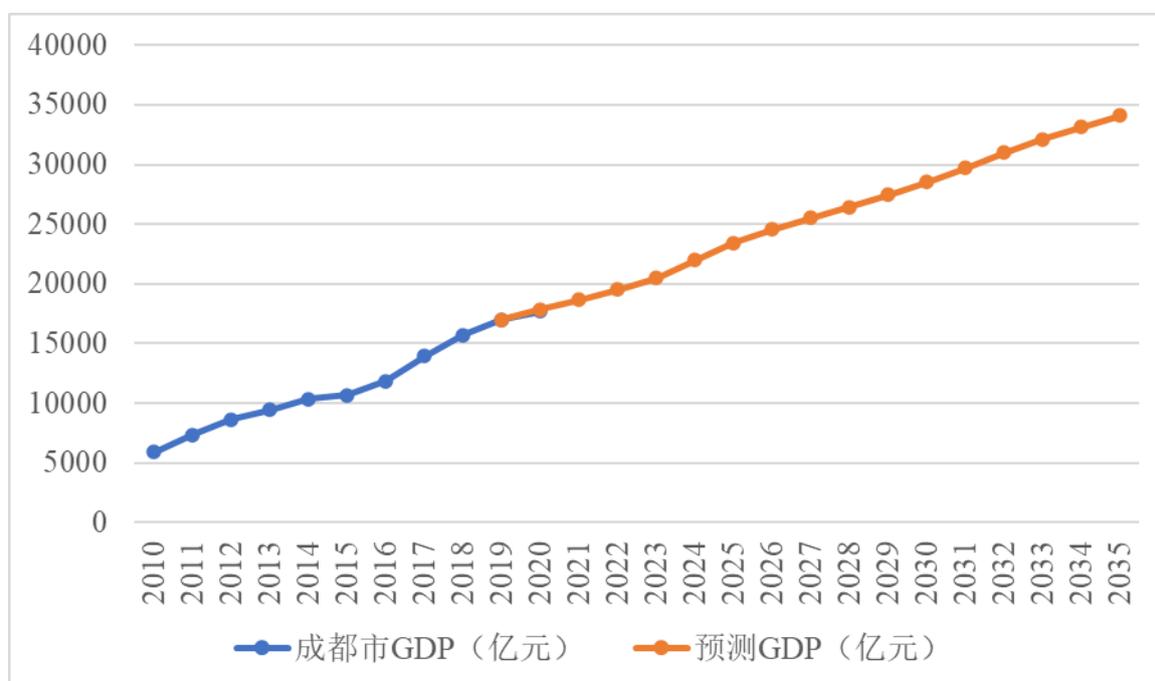


图 5.1 成都市 GDP 预测  
Fig.5.1 GDP Forecast of Chengdu

通过 GROWTH 函数从 2019 年成都市 GDP 数值开始预测到 2035 年为止,图 5.1 所示成都市 2019 年、2020 年 GDP 预测数值与真实数值拟合程度较好。由图 5.1 可知,2025 年,成都市 GDP 数值将会达到 23429.98 亿元,2030 年,成都市 GDP 数值将会达到 28540.03 亿元,到 2035 年,成都市 GDP 数值将会达到 34127.75 亿元。

### 5.2.2 成都市地铁发展预测

根据成都市各年地铁开通情况及建设里程数,统计 2010 年至 2020 年成都地铁每年新建地铁里程数及当年年末地铁总里程数如表 5.3 所示:

表 5.3 成都市地铁每年新建地铁里程数及当年年末地铁总里程数

Tab. 5.3 Annual mileage of newly built metros in Chengdu and total mileage of metros at the end of the year

年份	新建里程数（公里）	年末总里程数（公里）
2010	18.50	18.50
2011	0	18.50
2012	22.47	40.97
2013	8.74	49.71
2014	11.12	60.83
2015	27.52	88.35
2016	20.35	108.70
2017	70.69	179.39
2018	46.70	226.10
2019	76.05	302.15
2020	215.57	517.73

根据表 5.3 所整理的数据，2011 年新建地铁里程为 0km，参照 GROWTH 函数的参数说明：如果 known\_y's 中的任何数为零或为负数，那么 GROWTH 函数将返回错误值 #NUM!，无法使用 GROWTH 函数对成都市未来年份的地铁规模进行预测。

根据 2021 年成都市公布的《成都市城市轨道交通线网规划》，成都市城市轨道交通远期规划线网长度约为 1666km，由表 5.3 可知，2020 年成都市地铁的总里程数达到了 517km 左右，故本文假设成都市地铁远期规划的总长度约为  $517+1666=2183\text{km}$ 。

根据中国城市轨道交通协会提供的数据，2015—2020 年我国轨道运营里程如表 5.4 所示：

表 5.4 2015—2020 年我国城市轨道交通运营情况

Tab. 5.4 Situation of Urban Rail Transit in China from 2015 to 2020

年份	新建里程数（公里）	年末总里程数（公里）	增长速率
2015	445.0	3618.0	12%
2016	534.8	4152.8	12%
2017	880.2	5033.0	17%
2018	728.4	5761.4	13%
2019	974.8	6736.2	14%
2020	809.8	7546.0	11%

根据表 5.4 所整理的数据，2015—2020 年我国轨道运营里程平均增长速率为 13%，2020 年的增长速率为 11%，故本文保守假设成都地铁里程每年的增长速率为 10%，根据 10% 的增长速度对成都地铁 2035 年的里程数据进行预测，预测结果如图 5.2 所示：

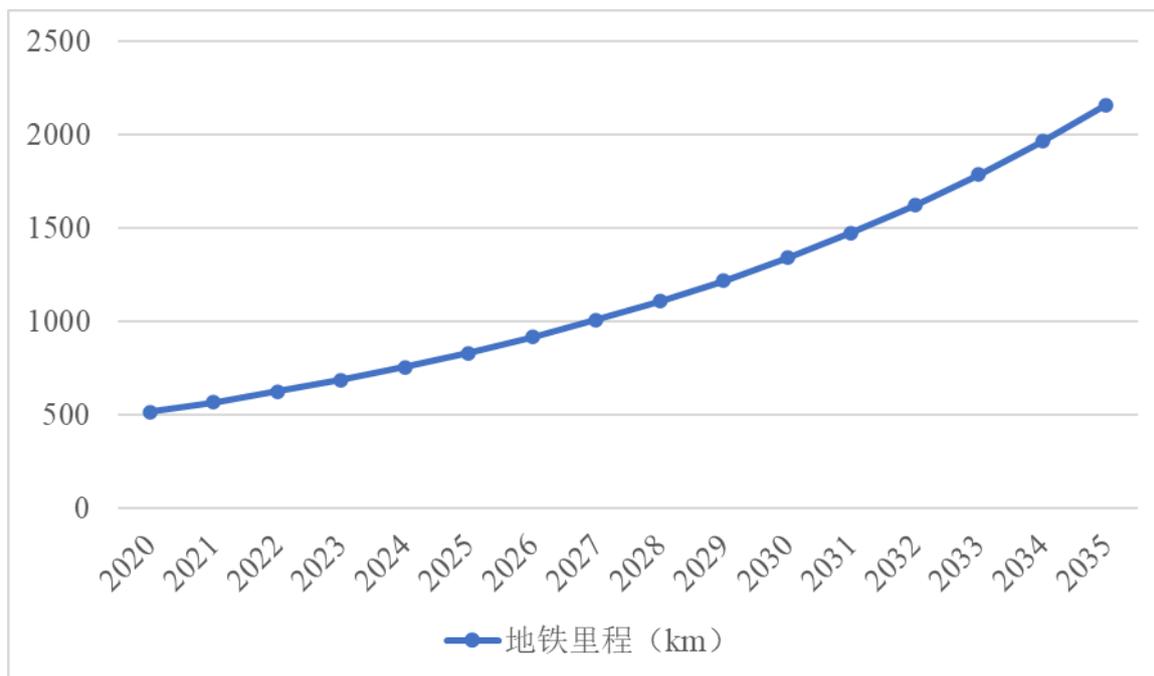


图 5.2 成都市地铁里程预测

Fig.5.2 Metro Mileage Forecast of of Chengdu

由图 5.2 可知，按照 10% 的增长速率，成都地铁 2035 年的里程数值预计将达到 2162.70km，此数据与成都市地铁远期规划的总长数据 2183km 非常接近，故本文假设成都市地铁的年增长速率为 10%。

### 5.3 LCA—LEAP 模型情景和参数设置

#### 5.3.1 LCA—LEAP 模型情景设置

根据本文第四章的研究结果，本文考虑从建造阶段的材料生产部门及运营阶段的清洁能源替代火力发电进行地铁站的全生命周期减碳潜力研究。根据相关的减碳政策文件结合地铁站全生命周期视角下的地铁站各个碳排放部门分别设置了基准情景、经济情景、绿色情景以及达峰情景等四种减碳情景，并分别分析研究在各种现行政策支持下的减碳情景的减碳潜力。

产业结构减碳相关现行政策：国务院关于印发《2030 年前碳达峰行动方案》的通知提出，到 2025 年，非化石能源消费比重达到 20% 左右，单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%，为实现碳达峰奠定坚实基础。到 2030 年，清洁能源利用持续提高，化石能源消费稳步降低，清洁

能源消耗占比达到 25% 以上，初步建立低碳清洁能源消耗体系，加速调整各产业结构，完成 2030 年碳达峰的目标<sup>[62]</sup>。

地铁站建造阶段减碳相关现行政策：《“十四五”期间大宗固体废物综合利用规划》指出，逐步建立健全大宗固废利用的行业体系标准，稳步提升大宗固废的利用效率，到 2025 年，新增大宗固废的综合利用率达到 60% 左右，大宗固废年利用量达到 40 亿吨左右；到 2030 年，大宗固废年利用量达到 45 亿吨左右，加速减少大宗固废的现有存量，努力实现 2030 年碳达峰<sup>[63]</sup>。

地铁站运营阶段减碳相关现行政策：《中共中央关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》提出，到 2025 年，绿色低碳循环发展的经济体系初步形成，重点行业能源利用效率大幅提升。单位国内生产总值能耗比 2020 年下降 13.5%；单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%；清洁能源消费占比达到 20% 左右；森林覆盖率达到 24.1%，森林蓄积量达到 180 亿立方米，为实现碳达峰、碳中和奠定坚实基础。到 2030 年，经济社会发展全面绿色转型取得显著成效，重点耗能行业能源利用效率达到国际先进水平。单位国内生产总值能耗大幅下降；单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65% 以上；非化石能源消费比重达到 25% 左右，风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上；森林覆盖率达到 25% 左右，森林蓄积量达到 190 亿立方米，二氧化碳排放量达到峰值并实现稳中有降。到 2060 年，绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建立，能源利用效率达到国际先进水平，非化石能源消费比重达到 80% 以上，碳中和目标顺利实现，生态文明建设取得丰硕成果，开创人与自然和谐共生新境界<sup>[64]</sup>。

根据建造阶段及运营阶段的减碳政策，设置各种情景设置及政策支撑，如表 5.5 所示：

表 5.5 情景设置及政策支撑  
Tab. 5.5 Scenario setting and policy support

情景设置	减碳路径	政策支撑
基准情景	无	无
经济情景	大宗固体废弃物利用率 2025 年上升 5%，2030 年上升 10%，2035 年上升 15%。	《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》 《“十四五”工业绿色发展规划》 《“十四五”建筑业发展规划》 《关于加快推进大宗固体废弃物综合利用示范建设的通知》 《四川省住房和城乡建设厅等六部门关于加强城市建筑垃圾管理与资源化利用的指导意见》
绿色情景	清洁能源 2025 年比重达到 20%，2030 年比重达到 25%，2035 年比重达到 30%。	《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》 《绿色交通“十四五”发展规划》 《成都市“十四五”能源发展专项规划》 《“十四五”循环经济发展规划》
达峰情景	2025 年大宗固体废弃物利用率上升 5%，清洁能源比重达到 20%； 2030 年大宗固体废弃物利用率上升 10%，清洁能源比重达到 25%； 2035 年大宗固体废弃物利用率上升 15%，清洁能源比重达到 30%。	综合经济情景及绿色情景的政策支撑

### 5.3.2 LCA—LEAP 模型参数设置

假设大宗固体废弃物的利用过程中以及清洁能源的使用过程中不产生碳排放，根据各现行减碳政策，设置各情景的减碳路径参数：

基准情景：无减碳措施，维持碳排放现状进行碳排放预测；

经济情景：无清洁能源利用；2020年建筑材料中无大宗固体废弃物利用，2025年大宗固体废弃物利用率上升5%，2030年大宗固体废弃物利用率上升10%，2035年大宗固体废弃物利用率上升15%；

绿色情景：无大宗固体废弃物利用；2020年无清洁能源利用，2025年清洁能源利用比重达到20%，2030年清洁能源利用比重达到25%，2035年清洁能源利用比重达到30%；

达峰情景：综合考虑经济情景以及绿色情景的减碳路径，设置建造阶段2020年建筑材料中无大宗固体废弃物利用，2025年大宗固体废弃物利用率上升5%，2030年大宗固体废弃物利用率上升10%，2035年大宗固体废弃物利用率上升15%；运营阶段2020年无清洁能源利用，2025年清洁能源利用比重达到20%，2030年清洁能源利用比重达到25%，2035年清洁能源利用比重达到30%。

通过LEAP软件中的情景设置功能，设置模型的基准年份为2020年，预测年份设置为2035年，并将所设置各情景的减碳路径参数输入至LEAP软件当中：

基准情景下，地铁增长率设置为Growth（10），建筑材料消耗以及能源消耗与基准年保持一致，不做调整；

经济情景下，地铁增长率设置为Growth（10），建造阶段的建筑材料消耗设置为Interp（2020，100，2025，95，2030，90，2035，85），运营阶段的能源消耗与基准年保持一致，不做调整；

绿色情景下，地铁增长率设置为Growth（10），运营阶段的能源消耗设置为Interp（2020，100，2025，80，2030，75，2035，70），建造阶段的建筑材料消耗与基准年保持一致，不做调整；

达峰情景下，地铁增长率设置为Growth（10），建造阶段的建筑材料消耗设置为Interp（2020，100，2025，95，2030，90，2035，85），运营阶段的能源消耗设置为Interp（2020，100，2025，80，2030，75，2035，70）。

各个能耗部门的消耗能源种类按其使用情况分别选取。

## 5.4 结果分析

基准情景设置下地铁站碳排放预测情况如图 5.3 所示：

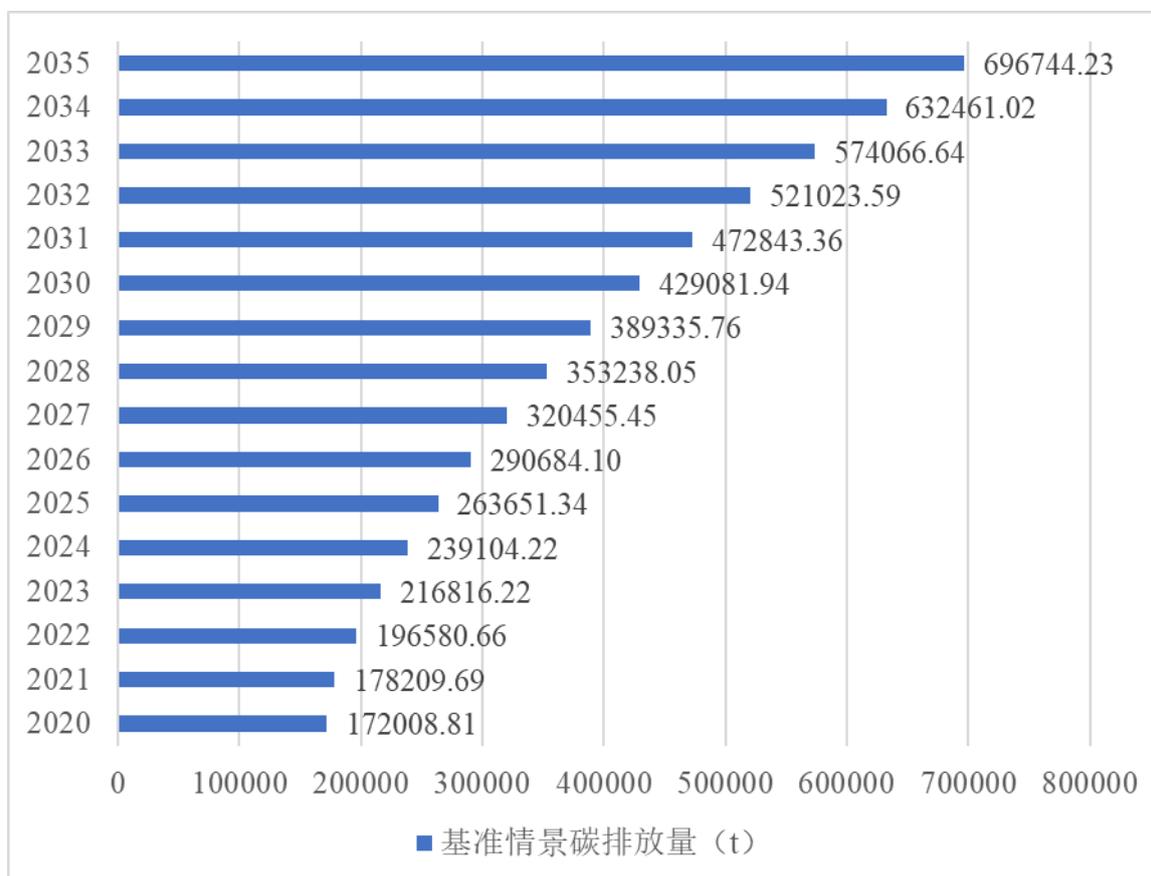


图 5.3 基准情景碳排放预测

Fig.5.3 Baseline scenario carbon emission prediction

由图 5.3 可知，基准情景设置下，地铁站碳排放逐年上升，无法实现 2030 年碳达峰的目标。2030 年的碳排放量为 429081.94t。基准情景设置下：

2020 年地铁站碳排放量为 172008.81t，碳排放强度为 9.71t/亿元。

2025 年地铁站碳排放量为 263651.34t，碳排放强度为 11.25t/亿元。

2030 年地铁站碳排放量为 429081.94t，碳排放强度 15.03t/亿元。

2035 年地铁站碳排放量为 696744.23t，碳排放强度 20.42t/亿元。

经济情景设置下地铁站碳排放预测如图 5.4 所示：

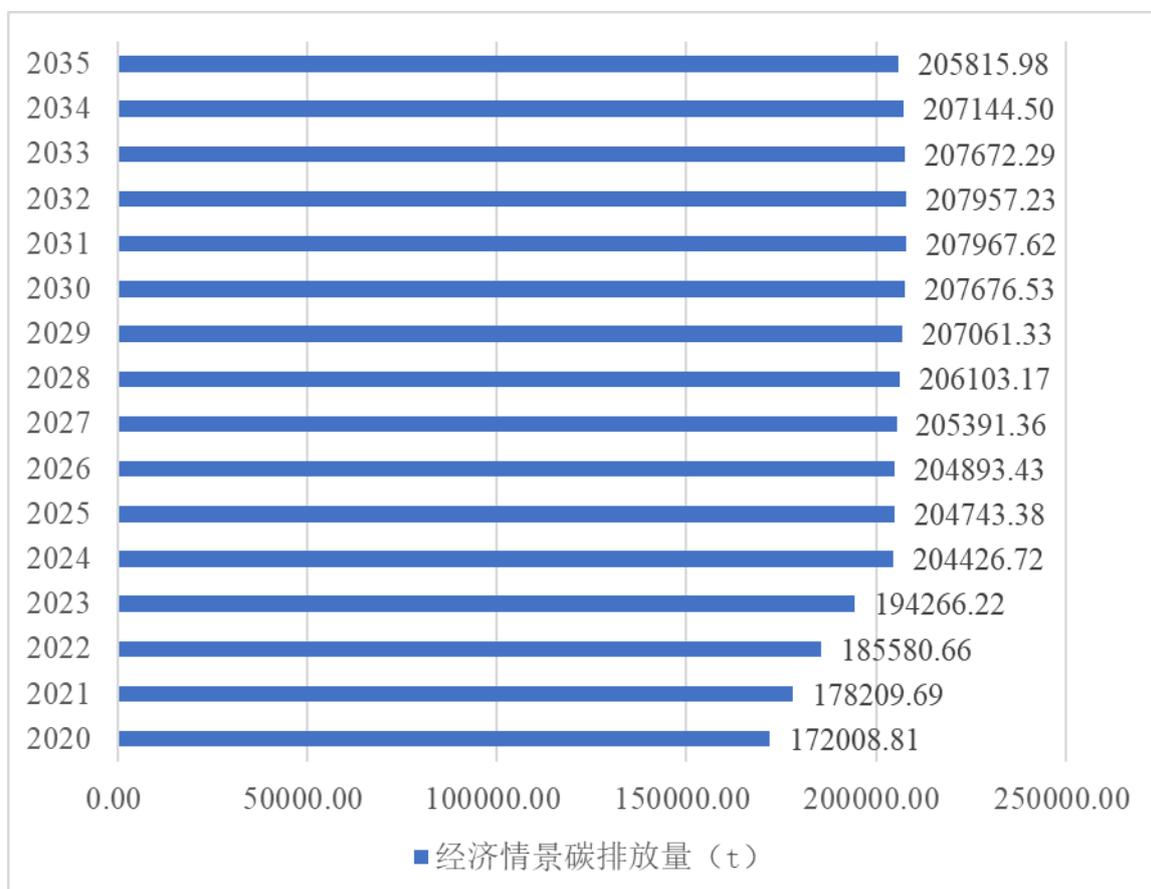


图 5.4 经济情景碳排放预测

Fig.5.4 Economic scenario carbon emission prediction

由图 5.4 可知，经济情景设置下，地铁站无法实现 2030 年碳达峰的目标，地铁站碳排放在 2031 年达到了峰值，2031 年之后，碳排放由稳步上升的趋势转变为了逐渐降低，峰值碳排放量为 207967.62t。经济情景设置下：

2020 年地铁站碳排放量为 172008.81t，碳排放强度为 9.71t/亿元。

2025 年，大宗固体废弃物利用率上升 5%，地铁站碳排放量为 204743.38t，相较于基准情景下降 58907.96t，碳排放强度为 8.74t/亿元，相较于基准情景下降 2.51t/亿元；减碳系数为 0.21。

2030 年，大宗固体废弃物利用率上升 10%，地铁站碳排放量为 207676.53t，相较于基准情景下降 221405.41t，碳排放强度为 7.28t/亿元，相较于基准情景下降 7.75t/亿元；减碳系数为 0.51。

2035 年，大宗固体废弃物利用率上升 15%，地铁站碳排放量为 205815.98t，相较于基准情景下降 490928.25t，碳排放强度为 6.03t/亿元，相较于基准情景下降 14.39t/亿元；减碳系数为 0.70。

绿色情景设置下地铁站碳排放预测如图 5.5 所示：

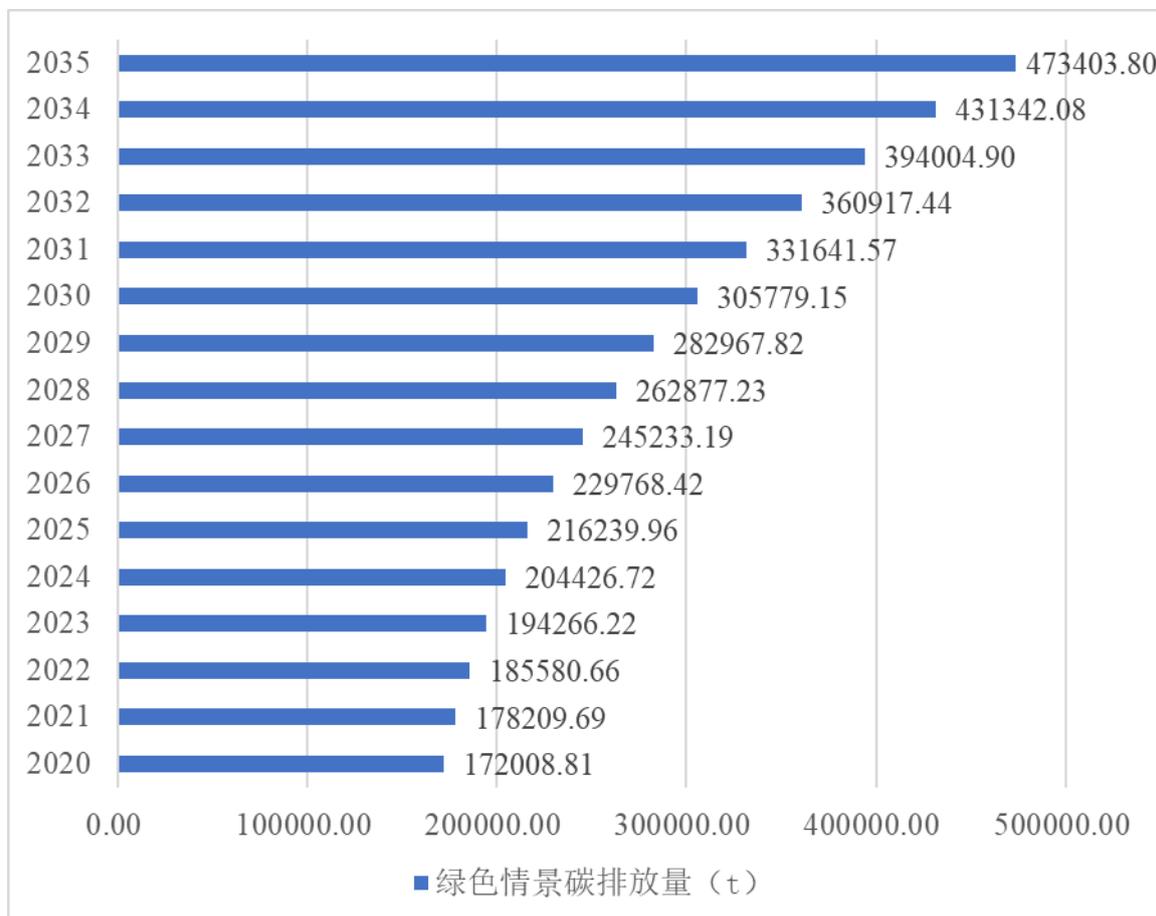


图 5.5 绿色情景碳排放预测

Fig.5.5 Green scenario carbon emission prediction

由图 5.5 可知，绿色情景设置下，地铁站碳排放逐年上升，无法实现 2030 年碳达峰的目标。2030 年的碳排放量为 305779.15t。绿色情景设置下：

2020 年地铁站碳排放量为 172008.81t，碳排放强度为 9.71t/亿元。

2025 年，清洁能源利用比重达到 20%，地铁站碳排放量为 216239.96t，相较于基准情景下降 47411.38t，碳排放强度为 9.23t/亿元，相较于基准情景下降 2.02t/亿元；减碳系数为 0.18。

2030 年，清洁能源利用比重达到 25%，地铁站碳排放量为 305779.15t，相较于基准情景下降 123302.79t，碳排放强度为 10.71t/亿元，相较于基准情景下降 4.32t/亿元；减碳系数为 0.29。

2035 年，清洁能源利用比重达到 30%，地铁站碳排放量为 473403.80t，相较于基准情景下降 223340.43t，碳排放强度为 13.87t/亿元，相较于基准情景下降 6.45t/亿元；减碳系数为 0.32。

达峰情景设置下地铁站碳排放预测如图 5.6 所示

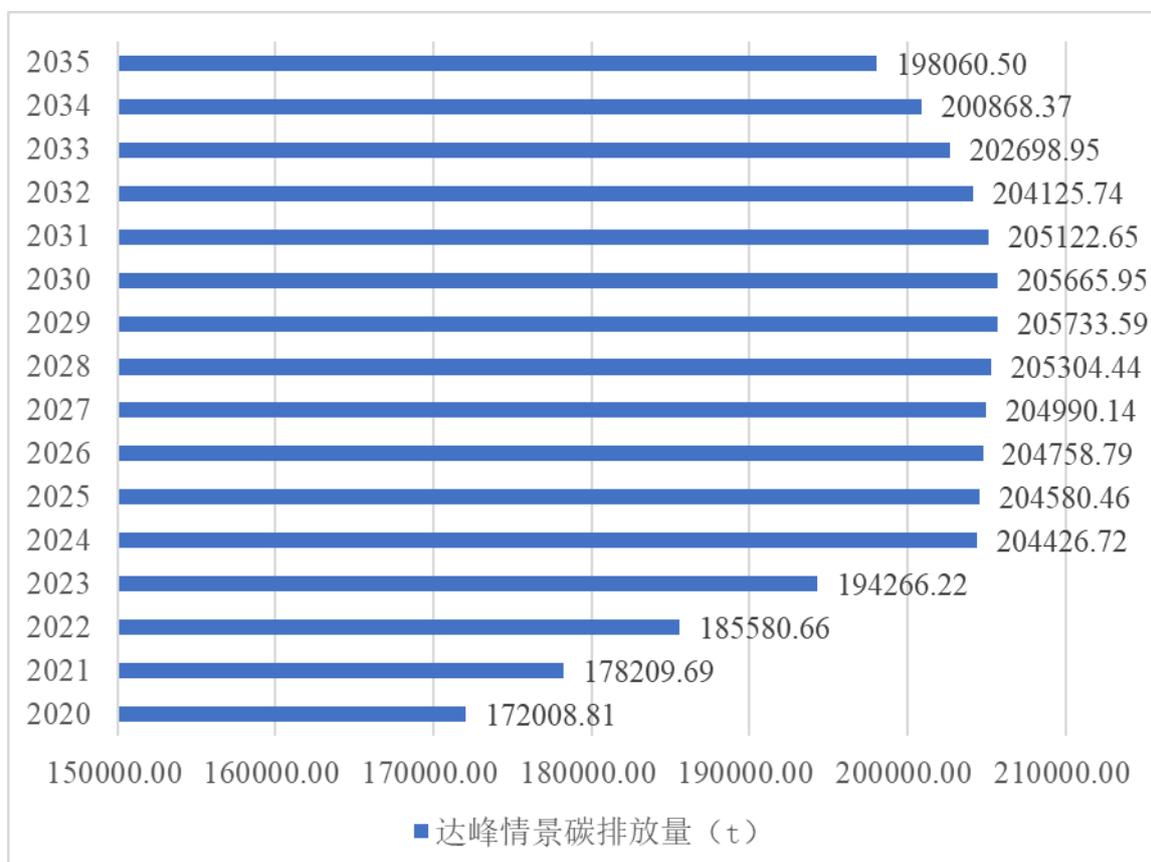


图 5.6 达峰情景碳排放预测

Fig.5.6 Peak scenario carbon emission prediction

由图 5.6 可知，达峰情景设置下，地铁站能够实现 2030 年碳达峰的目标，地铁站碳排在 2029 年达到了峰值，2029 年之后，碳排放由稳步上升的趋势转变为了逐渐降低，峰值碳排放量为 205733.59t。达峰情景设置下：

2020 年地铁站碳排放量为 172008.81t，碳排放强度为 9.71t/亿元。

2025 年，大宗固体废弃物利用率上升 5%、清洁能源利用比重达到 20%，地铁站碳排放量为 204580.46t，相较于基准情景下降 59070.88t，碳排放强度为 8.73t/亿元，相较于基准情景下降 2.52t/亿元；减碳系数为 0.22。

2030 年，大宗固体废弃物利用率上升 10%、清洁能源利用比重达到 25%，地铁站碳排放量为 205665.95t，相较于基准情景下降 223415.99t，碳排放强度为 7.21t/亿元，相较于基准情景下降 7.82t/亿元；减碳系数为 0.52。

2035 年，大宗固体废弃物利用率上升 15%、2035 年清洁能源利用比重达到 30%，地铁站碳排放量为 198060.50t，相较于基准情景下降 498683.73t，碳排放强度为 5.80t/亿元，相较于基准情景下降 14.62t/亿元；减碳系数为 0.72。

各个设置情景的减碳潜力如表 5.6 所示：

表 5.6 各设置情景减碳潜力

Tab. 5.6 Carbon reduction potential for each scenario

情景	减碳措施	减碳量 (t)	碳排放强度 (t/亿元)	减碳系数
基准 (2020)	无		9.71	
基准 (2025)	无		11.25	
基准 (2030)	无		15.03	
基准 (2035)	无		20.42	
经济 (2020)	无		9.71	
经济 (2025)	大宗固体废弃物 利用率上升 5%	58907.96	8.74	0.21
经济 (2030)	大宗固体废弃物 利用率上升 10%	221405.41	7.28	0.51
经济 (2035)	大宗固体废弃物 利用率上升 15%	490928.25	6.03	0.70
绿色 (2020)	无		9.71	
绿色 (2025)	清洁能源利用比 重达到 20%	47411.38	9.23	0.18
绿色 (2030)	清洁能源利用比 重达到 25%	123302.79	10.71	0.29
绿色 (2035)	清洁能源利用比 重达到 30%	223340.43	13.87	0.32
达峰 (2020)	无		9.71	
达峰 (2025)	大宗固体废弃物 利用率上升 5%， 清洁能源利用比 重达到 20%	59070.88	8.73	0.22
达峰 (2030)	大宗固体废弃物 利用率上升 10%， 清洁能源利用比 重达到 25%	223415.99	7.21	0.52
达峰 (2035)	大宗固体废弃物 利用率上升 15%， 清洁能源利用比 重达到 30%	498683.73	5.80	0.72

各个设置情景的碳达峰预测结果如表 5.7 所示：

表 5.7 各设置情景预测结果

Tab. 5.7 Prediction results of each setting scenario

情景	2030 年是否达峰	碳排放峰值 (t)
基准情景	否	
经济情景	否 (2031 年达峰)	207967.62
绿色情景	否	
达峰情景	是 (2029 年达峰)	205733.59

由表 5.6、表 5.7 可知，随着大宗固体废弃物利用率的上升、清洁能源利用比重的增加，地铁站碳排放强度持续下降，减碳潜力不断增大。

经济情景设置下，相较于基准情景，大宗固体废弃物利用率上升 5% 时，地铁站减碳量为 58907.96t，碳排放强度下降 2.51t/亿元，减碳系数为 0.21；大宗固体废弃物利用率上升 10% 时，地铁站减碳量为 221405.41t，碳排放强度下降 7.75t/亿元，减碳系数为 0.51；大宗固体废弃物利用率上升 15% 时，地铁站减碳量为 490928.25t，碳排放强度下降 14.39t/亿元，减碳系数为 0.70。

绿色情景设置下，相较于基准情景，清洁能源利用比重达到 20% 时，地铁站减碳量为 47411.38t，碳排放强度下降 2.02 t/亿元，减碳系数为 0.18；清洁能源利用比重达到 25% 时，地铁站减碳量为 123302.79t，碳排放强度下降 4.32t/亿元，减碳系数为 0.29；清洁能源利用比重达到 30% 时，地铁站减碳量为 223340.43t，碳排放强度下降 6.45t/亿元，减碳系数为 0.32。

达峰情景设置下，相较于基准情景，大宗固体废弃物利用率上升 5%、清洁能源利用比重达到 20% 时，地铁站减碳量为 59070.88t，碳排放下降 2.52 t/亿元，减碳系数为 0.22；大宗固体废弃物利用率上升 10%、清洁能源利用比重达到 25% 时，地铁站减碳量为 223415.99t，碳排放强度下降 7.82t/亿元，减碳系数为 0.52；大宗固体废弃物利用率上升 15%、清洁能源利用比重达到 30% 时，地铁站减碳量为 498683.73t，碳排放强度下降 14.62t/亿元，减碳系数为 0.72。

基准情景以及绿色情景的控制下，地铁站碳排放一直呈现上升的趋势，无法出现峰值；经济情景的控制下虽然地铁站碳排放的预测在 2031 年出现了峰值，但无法实现 2030 碳达峰的目标；达峰情景的控制下地铁站碳排放预测在 2029 年达到峰值，达峰情景综合了经济情景以及绿色情景两种情景的减碳路径，通过大宗固体废弃物利用率上升 15%、清洁能源利用比重达到 30% 的减碳方式，实现了 2030 年碳达峰的目标。

基于以上研究结果，本文提出 2030 年成都地铁碳达峰的减碳建议：针对地铁单个阶段的减碳政策无法实现 2030 年碳达峰的目标，要实现地铁 2030 年碳达峰的目标，需

在全生命周期视角下，通过大宗固体废弃物利用率上升 15%、清洁能源利用比重达到 30% 的减碳方式，共同实施建造阶段以及运营阶段的减碳政策。

## 5.5 碳交易模式下减碳经济分析

碳交易，是一种通过运用市场经济体系来实现绿色低碳、促进温室气体减排的交易机制。根据《京都议定书》的相关内容，碳交易是在二氧化碳排放总量一定的前提下，通过二氧化碳的市场交易，买方通过二氧化碳的交易市场购入二氧化碳减排额，卖方通过二氧化碳的交易市场卖出二氧化碳减排额，通过买卖双方的市场经济行为使得交易的各方不仅能完成减排任务，也能将减排的二氧化碳具体量化为经济数据，从而使得二氧化碳减排额成为了交易市场中的商品，具有了相应的经济价值，碳交易的交易单位为每吨二氧化碳当量。

根据四川联合环境交易所 2023 年提供的数据，全国碳市场配额交易的价格为 56 元/每吨二氧化碳当量。对比基准情景，各设置情景 2020—2030 年的减碳总量及减碳经济效益如表 5.8 所示：

表 5.8 2020—2030 年各设置情景减碳经济效益

情景	减碳总量 (t)	经济效益 (万元)
基准情景		
经济情景	878804.94	4921.31
绿色情景	571808.37	3202.13
达峰情景	884640.77	4953.99

## 5.6 本章小结

本章利用全生命周期及长期能源替代规划系统构建了成都市地铁站 LCA—LEAP 碳排放模型，然后分类梳理了现行相关的减碳政策文件，依据各政策文件分别设置了基准情景、经济情景、绿色情景以及达峰情景等四种地铁站减碳情景，分别分析了各种现行政策支持下的各个减碳情景的碳排放强度及减碳潜力，同时预测了各个减碳情景能否实现 2030 年碳达峰的目标。结果显示只有达峰情景通过大宗固体废弃物利用率上升 15%、清洁能源利用比重达到 30% 的减碳方式才能实现 2030 年碳达峰的目标。最后在碳交易模式下通过对比基准情景，对各情景到 2030 年的减碳经济效益进行了量化。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

本文在碳达峰的背景下，以成都市某地铁站为研究对象，依据《建筑碳排放计算标准》的核算方法，测算了该地铁站建造阶段以及运营阶段的碳排放量，并以 50 年为限测算了全生命周期内地铁站的碳排放总量，然后将全生命周期与长期能源替代规划系统相结合，构建了关于成都市地铁站碳排放的 LCA—LEAP 预测模型，并使用情景分析法分别对该地铁站建立了基准情景、经济情景、绿色情景以及达峰情景 4 种 2020 年至 2035 碳排放的未来情景，再根据各种现行的相关减碳政策对各个情景下的参数进行调整，通过模型对地铁站 2020 年至 2035 的碳排放趋势进行预测，分析各个情景的碳排放强度及减碳潜力，并预测了地铁站碳达峰时间以及峰值碳排放。研究结果如下：

(1) 地铁站建造阶段碳排放总量为 167828.81t，在建造阶段的各个部门中，碳排放贡献最大的是材料生产部门，占比达到了整个建造阶段的 85% 以上，其次是建造物化部门，碳排放贡献达到了 13% 左右，碳排放贡献最小的是材料运输部门，占比为 1% 左右。地铁站运营阶段年碳排放量为 4180.01t，在运营阶段的各个部门中，碳排放贡献最大的是地铁车辆部门，占比达到了整个运营阶段的一半以上，其次是站台电梯部门，碳排放贡献达到了 18% 左右，站台空调和站台照明部门的碳排放贡献值较为相似，占比均为 15% 左右。

(2) 基准年 2020 年地铁站碳排放总量为 172008.81t，建造阶段为 167828.80t，运营阶段为 4180.01t；全生命周期视角下地铁站碳排放总量为 376829.16t，建造阶段为 167828.80t，运营阶段为 209000.36t。在地铁站建成并投入运营的当年，建造阶段的碳排放量占比最大，达到了 97% 左右，而运营阶段的碳排放量占比仅为 3% 左右，在这一时期地铁站碳排放几乎全部来自于建造阶段。随着运营时间的增长，运营阶段的碳排放量也在不断攀升，在 50 年全生命周期的视角下，建造阶段的碳排放量占比逐步的降低，最终下降至了 45% 左右，而运营阶段的碳排放量贡献占比则超过了建造阶段的碳排放量贡献占比，上升至了 55% 左右。

(3) 随着大宗固废利用率提高、清洁能源利用比重的增大，地铁站的减碳量增大、碳排放强度下降、减碳潜力上升。大宗固体废弃物利用率上升 5% 时，地铁站减碳量为 58907.96t，碳排放强度下降 2.51 t/亿元，减碳系数为 0.21；大宗固体废弃物利用率上升 10% 时，地铁站减碳量为 221405.41t，碳排放强度下降 7.75t/亿元，减碳系数为 0.51；大宗固体废弃物利用率上升 15% 时，地铁站减碳量为 490928.25t，碳排放强度下降 14.39t/

亿元，减碳系数为 0.70。清洁能源利用比重达到 20%时，地铁站减碳量为 47411.38t，碳排放强度下降 2.02 t/亿元，减碳系数为 0.18；清洁能源利用比重达到 25%时，地铁站减碳量为 123302.79t，碳排放强度下降 4.32t/亿元，减碳系数为 0.29；清洁能源利用比重达到 30%时，地铁站减碳量为 223340.43t，碳排放强度下降 6.45t/亿元，减碳系数为 0.32。大宗固体废弃物利用率上升 5%、清洁能源利用比重达到 20%时，地铁站减碳量为 59070.88t，碳排放下降 2.52 t/亿元，减碳系数为 0.22；大宗固体废弃物利用率上升 10%、清洁能源利用比重达到 25%时，地铁站减碳量为 223415.99t，碳排放强度下降 7.82t/亿元，减碳系数为 0.52；大宗固体废弃物利用率上升 15%、清洁能源利用比重达到 30%时，地铁站减碳量为 498683.73t，碳排放强度下降 14.62t/亿元，减碳系数为 0.72。

(4) 基准情景及绿色情景下，成都地铁碳排放逐年上升，无法实现 2030 年碳达峰的目标；经济情景下，成都地铁碳排放于 2031 年达到了峰值，无法实现 2030 年碳达峰的目标，峰值碳排放量为 207967.62t；达峰情景下，成都地铁碳排放于 2029 年达到了峰值，实现了 2030 年碳达峰的目标，峰值碳排放量为 205733.59t。通过对不同设置情景的碳排放进行预测，本文提出了实现 2030 年碳达峰的减碳建议：针对单个阶段的减碳政策无法实现 2030 年碳达峰，要实现 2030 年碳达峰的目标，需通过大宗固体废弃物利用率上升 15%、清洁能源利用比重达到 30%的减碳方式，共同实施建造阶段以及运营阶段的减碳政策。

## 6.2 不足与展望

本文通过构建 LCA—LEAP 模型对成都市地铁站碳排放的碳排放强度及减碳潜力进行了分析，预测了各个情景控制下碳达峰的时间以及碳排放峰值，根据预测结果提出了实现碳达峰的相应措施，但本文尚有以下不足之处：

(1) 由于查找难度以及资料有限，材料开采阶段没有考虑人工、机械本身的碳排放，物化建造阶段没有考虑按机械台班而是直接通过能源消耗计算碳排放，运营阶段未考虑地铁使用者自身的碳排放，与实际数据存在偏差。

(2) 本文仅从地铁的宏观碳排放层面进行了碳达峰的预测，未对研究结果进行指数分解从而细化各个影响因子对减碳潜力的影响大小，后续可就各个碳排放影响因子对减碳潜力的影响进行深入研究。

(3) 对于碳经济的评价本文仅从碳交易的终端交易市场进行了分析，未对从源头产生的隐含碳、碳足迹进行研究，后续研究可由不同减碳措施所从源头产生的减碳经济效益进行研究分析，从而对不同减碳措施进行经济量化评价及实际运用选取。

## 参 考 文 献

- [1] 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 吝涛. 碳足迹分析方法研究综述 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7):71-78
- [2] IPCC. Climate Change 2021: The physical science basis[M/OL]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021[2022-4-18].  
<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.
- [3] 政府间气候变化专门委员会. 气候变化综合报告书 2007 [R]. 2007.
- [4] United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2016[R]. New York, 2016.
- [5] The World Bank. Cities and climate change: an urgent agenda. Washington DC[M]. World Bank Publications, 2010
- [6] International Energy Agency (IEA). CO2 emissions from fuel combustion highlights [R], 2016
- [7] Duan H, Hu M, Zuo J, et al. Assessing the carbon footprint of the transport sector in mega cities via streamlined life cycle assessment: a case study of Shenzhen, South China[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22(5):683-693.
- [8] Seongwon S, Junbeum K, Kwok-Keung Y, James M. Embodied carbon of building products during their supply chains: Case study of aluminium window in Australia [J]. Resources Conservation and Recycling, 2015, 105: 160-166.
- [9] Anthonissen J, Troyen DV, Braet J, Bergh WVD. Using carbon dioxide emissions as a criterion to award road construction projects: a pilot case in Flanders [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 102: 96-102.
- [10] Abdallah M, El-Rayes K, Clewenger C. Minimizing Energy Consumption and Carbon Emissions of Aging Buildings [J]. Procedia Engineering, 2015, 118: 886-893.
- [11] 安东, 李子惊, 孙念念. 地铁站点施工期碳排放预测模型研究 [J]. 居舍, 2019(14)\_139-140.
- [12] 皮膺海. 盾构隧道施工碳排放测评研究[D]. 南昌大学, 2016.
- [13] 贺晓彤. 城市轨道交通明挖车站建设碳排放计算及主要影响因素分析[D]. 北京交通大学, 2015.
- [14] Fornaro A, Andrade M F, Ynoue R Y, et al. Greenhouse gases measurements in road tunnel in São Paulo Megacity, Brazil[C]// Egu General Assembly Conference. 2012.
- [15] Huang L, Rolf André Bohne, Bruland A, et al. Life cycle assessment of Norwegian road tunnel[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20:174-184.

- [16] Ebadi A, Nejad NM, Rahnamaee MT, et al. Determining the Ecological Footprint of Vehicles in Tehran, Iran[J]. Applied Ecology and Environmental Research. 2016, 14(3): 439-450.
- [17] 王玉明. 城市轨道交通系统能耗影响因素的量化分析[D]. 北京交通大学, 2011.
- [18] 王环宇. 城市轨道交通车站动力系统能耗体系分析与节能措施研究[D]. 北京交通大学, 2018.
- [19] 龙江英, 李焱, 马龙. 城市轨道交通运营期碳排放算量研究[J]. 贵阳学院学报(自然科学版). 2011, 6(02): 1-11.
- [20] 谢鸿宇, 王习祥, 杨木壮, 等. 深圳地铁碳排放量[J]. 生态学报. 2011, 31(12): 3551-3558.
- [21] 何彩虹. 基于 LMDI 模型的上海市低碳交通发展研究[D]. 合肥工业大学, 2012.
- [22] 张陶新, 邹毓, 谢世雄. 长株潭城市群低碳交通建设现状与对策分析[J]. 湖南工业大学学报(社会科学版), 2013, (01): 12-17.
- [23] 姬文哲. 天津市交通碳排放计算与减排对策研究[D]. 天津大学, 2014.
- [24] Chang B. Initial greenhouse gas emissions from the construction of the California High Speed Rail infrastructure: A preliminary estimate[Z]. Ann Arbor: University of California, Davis, 200972.
- [25] Chang B, Kendall A. 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.
- [26] Noland RB. Life-cycle greenhouse gas emissions associated with a highway reconstruction: a New Jersey case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107: 731-740.
- [27] Li Y, He Q, Luo X, 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, 128: 451-457.
- [28] 郜新军. 城市轨道交通系统碳排放评估及集成优化控制方法研究[D]. 北京交通大学, 2013
- [29] 冯旭杰. 基于生命周期的高速铁路能源消耗和碳排放建模方法[D]. 北京交通大学, 2014.
- [30] 杨馨. 基于建筑全生命周期碳排放的某工程生态改良实证研究[D]. 华南理工大学, 2017.
- [31] 阴世超. 建筑全生命周期碳排放核算分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [32] 徐建峰, 郭春, 郭雄, 等. 隧道物化阶段碳排放计算模型研究[Z]. 中国四川成都: 2016.
- [33] Fei L, Zhang Q, Xie Y. Study on energy consumption evaluation of mountainous highway based on LCA[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 69: 012036.
- [34] 曾雪兰, 徐伟嘉, 郭绍德, 张武英. 基于生命周期的轨道交通能耗与碳排放分析[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(06): 290-294.
- [35] 粟月欢, 张宇, 段华波等. 地铁建设环境影响评估及减排效益研究: 以深圳市为例[J]. 环境工程, 2022, 40(05): 184-192+236.

- [36] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究[D]. 深圳大学, 2017.
- [37] 郜新军. 城市轨道交通系统碳排放评估及集成优化控制方法研究[D]. 北京交通大学, 2013.
- [38] 董丹. 基于 LCA 方法的城市公共交通系统低碳管理评价研究[D]. 深圳大学, 2018.
- [39] 秦鹭, 袁艳平, 蒋福建. 地铁站建筑全生命周期碳排放研究——以成都三号线某站为例[J]. 建筑经济, 2020, 41 (S1) 329-334.
- [40] 陈纬, 李琼. 基于 LEAP 模型的既有城镇住区清洁能源替代及二氧化碳排放研究[J]. 华北科技学院学报, 2021, 18 (06) \_60-64+82.
- [41] 陈宇光. 基于 LEAP 模型的浙江省能源消费和碳达峰路径规划研究[J]. 湖州师范学院学报, 2022, 44 (05) \_8-16.
- [42] 董蕾. 基于 LEAP 模型的四川省交通运输业能源消费趋势研究[D]. 四川省社会科学院, 2016.
- [43] 杜涵蓓, 赵立君, 刘臣炜, 仇宽彪, 李海东. 基于 LEAP 模型和 KAYA 模型的主城区碳达峰预测及不确定性分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38 (08) \_983-991.
- [44] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型[J]. 资源科学, 2021, 43 (04) \_639-651.
- [45] 黄莹, 郭洪旭, 廖翠萍, 赵黛青. 基于 LEAP 模型的城市交通低碳发展路径研究——以广州市为例[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (06) \_670-683.
- [46] 赖文亨. 基于时空指数分解法与 LEAP 模型的福建省市级尺度二氧化碳排放研究[D]. 福建师范大学, 2021.
- [47] 栗树朋. 基于 LEAP 模型的沈阳市道路交通部门能源需求及环境影响研究[D]. 东北大学, 2019.
- [48] 刘方舟. 基于 LEAP 模型的城市碳排放达峰预测研究[D]. 中钢集团武汉安全环保研究院, 2021.
- [49] 罗薇. 基于 LEAP 模型的云南省交通运输业能源消费及环境排放趋势研究[D]. 云南大学, 2019.
- [50] 马海涛, 康雷. 京津冀区域公路客运交通碳排放时空特征与调控预测[J]. 资源科学, 2017, 39 (07) \_1361-1370.
- [51] 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒蕤, 孔祥如, 潘峰, 杨宏. 基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟[J]. 环境科学, 2022, 43 (07) \_3386-3395.
- [52] 秦宝洋. 碳中和目标导向下吉林省城市交通部门碳减排路径研究[D]. 吉林大学, 2022.
- [53] 任梦洋. 在碳达峰目标下广州市交通低碳发展路径研究[D]. 广州大学, 2022.
- [54] 史丹, 叶云岭. 城市交通碳排放趋势与减排对策研究——以上海市为例[J]. 现代管理科学, 2022 (04) \_3-14.
- [55] 宋伊迪. 基于 LEAP 模型的北京市道路移动污染源减排潜力研究[D]. 北京工业大学, 2021.
- [56] 王力, 冯相昭, 马彤, 高健. 典型城市减污降碳协同控制潜力评价研究: 以渭南市为例[J]. 环境科学研究, 2022, 35 (08) \_2006-2014.

- [57] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 马道天, 洪静兰. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(03):446-455.
- [58] 田光明. 情景分析法[J]. 晋图学刊, 2008(3):7-9.
- [59] The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [60] 庞可. 基于道路交通碳达峰情景的兰州市环境空气质量改善研究[D]. 兰州大学, 2022.
- [61] 闫琰. 城市公共交通系统能源消耗模型和计算方法[D]. 清华大学, 2013.
- [62] 中华人民共和国中央人民政府. 关于印发《2030年前碳达峰行动方案》的通知(国发〔2021〕23号)[EB/OL]. (2021. 10. 26)[2023. 4. 10].  
[http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm)
- [63] 中华人民共和国中央人民政府. 关于“十四五”期间大宗固体废物综合利用规划(发改环资〔2021年〕381号)[EB/OL]. (2021. 3. 18)[2023. 4. 10].  
[http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content\\_5595566.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content_5595566.htm)
- [64] 中华人民共和国中央人民政府. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. (2021. 9. 22)[2023. 4. 10].  
[http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm)