



水科学博士文库

*Benefit Evaluation for Carbon Emissions of Concrete Dams  
Based on Life Cycle Assessment*

# 基于生命周期的 混凝土大坝碳排放 效益评价

柳春娜 安雪晖 著

$$E = E_{\text{material}} + E_{\text{transport}} + E_{\text{construction}} + E_{\text{operation}}$$



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

水科学博士文库

*Benefit Evaluation for Carbon Emissions of Concrete Dams  
Based on Life Cycle Assessment*

# 基于生命周期的 混凝土大坝碳排放 效益评价

柳春娜

安



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书基于生命周期视角,建立了混凝土大坝碳排放评价模型,提出了材料生产、运输、建设和运行维护阶段碳排放的计算方法,结合离散事件模拟,分析了项目建设过程中排放、成本和进度表现;并以溪洛渡水电站、恒山水库等14个工程项目为例,验证了混凝土大坝碳排放效益评价模型的合理性,比较了各类筑坝技术的碳排放指标,指出了提高混凝土大坝碳减排效益的措施。全书理论研究和工程实践相结合,具有较好的理论和应用价值。

本书可供相关领域的科研人员和工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于生命周期的混凝土大坝碳排放效益评价 / 柳春娜, 安雪晖著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 11

(水科学博士文库)

ISBN 978-7-5170-6023-9

I. ①基… II. ①柳… ②安… III. ①混凝土坝—大坝—二氧化碳—排气—研究—中国 IV. ①TV642

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第272846号

书 名	水科学博士文库 <b>基于生命周期的混凝土大坝碳排放效益评价</b> JIYU SHENGMING ZHOUQI DE HUNNINGTU DABA TANPAIFANG XIAOYI PINGJIA
作 者	柳春娜 安雪晖 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京印匠彩色印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8.5印张 165千字
版 次	2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	<b>45.00元</b>

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究





## 前言

QIANYAN

在全球变暖和雾霾污染加重的趋势下，促进水电能源战略发展是实现我国节能减排承诺和改善空气质量的重要途径。随着各类混凝土筑坝技术的快速发展，混凝土大坝已成为大中型水电项目的主要方案。系统评估混凝土大坝生命周期碳排放效益，建立混凝土大坝碳排放评价方法，正确认识关键碳排放因素，能够实现水电项目碳排放过程管理，对促进大中型水电项目碳减排效益进入国内外碳交易市场交易、鼓励低碳筑坝技术发展具有重要的理论与现实意义。

本书基于生命周期的理论框架，确定了研究的边界，包括材料生产、运输、建设过程和运行维护阶段。在综合文献、数据库和工程资料调研结果，分析各类筑坝技术后，确定了碳排放研究要素，建立了混凝土大坝建筑物的碳排放清单。通过耦合生命周期评价和离散事件模拟方法，进一步建立了基于生命周期的混凝土大坝碳排放评价计算模型，提出了生命周期各阶段的碳排放计算方法；基于机械设备的操作和待工状态的真实工作时间评价了建设过程的碳排放量，并通过模拟设备工作的时间、模拟工程的进度和碳排放量评价结果3个方面的对比，证明了采用离散事件模型的可靠性和必要性。

本书根据模型基础研究的成果，开展实证应用研究。以溪洛渡水电站、恒山水库等工程案例为例，选择调研设计结算资料、物资设备消耗表，通过拍摄视频和访谈等方法采集数据，利用建立的评价模型，计算了混凝土大坝生命周期各阶段的碳排放量，确定了主要的碳排放阶段。通过分析常规混凝土、碾压混凝土和堆石混凝土3种筑坝技术的单方碳排放量，证明了本书中提到的研究方法可以客观地比较不同筑坝技术的碳排放量，衡量低碳技术的碳减排量，得出了堆石混凝土是一种更为低碳的筑坝技术的结论。在评价和优

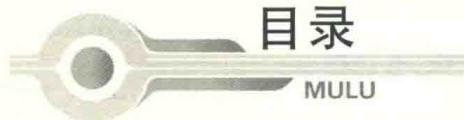
化建设过程中，指出了降低待工时间、提高使用效率是提升排放表现的关键因素，建立了排放、成本和进度表现的评价方法，采用相关分析法和典型分析法揭示了在方案优化过程中排放和成本、进度之间的变化机理，提出了排放可作为过程管理优化的指标，以提高项目的整体表现。结合溪洛渡工程案例，从材料生产、机械设备等方面，分析了主要碳排放来源；结合主体工程施工进度，分析了碳排放密集阶段，实现了碳排放的过程管理，验证了提出的混凝土大坝生命周期评价计算模型的合理性，并讨论了各类节能减排措施效果，从采用低碳筑坝技术、优化施工方案、循环利用废弃材料、加强温控措施和建立碳交易额核算方法学等方面入手，提出了基于生命周期提高混凝土大坝碳减排效益的途径。

本书由中国水利水电科学研究院、国家水电可持续发展研究中心柳春娜博士和清华大学水利水电工程系安雪晖教授共同撰写。感谢清华大学金峰教授、强茂山教授和唐文哲研究员对本书的悉心指导，感谢国家能源局、中国长江三峡集团公司、雅砻江流域水电开发有限公司、中国电建集团成都勘测设计研究院、中国电建集团中国水利水电第八工程局有限公司、北京华实水木科技有限公司等调研单位和业内专家给予的大力支持，感谢所有调研工程现场的管理人员的支持帮助。感谢 SangHyun Lee 教授和 Changbum Ahn 教授在密歇根大学（安娜堡校区）交流学习期间，对相关研究工作的指导和帮助。感谢中国水利水电科学研究院科研专项（SS0145B612017）对本书的资助。

在本书的撰写过程中，笔者力求做到科学性和实用性相结合，但水电工程全生命周期中碳排放影响要素复杂，特别是在运行维护期，除水工建筑物本身维护产生的碳排放量之外，还存在水库温室气体排放问题，以及替代调水、发电等综合利用功能产生的碳排放，目前国内外尚无全面著作。本书重点研究了各类筑坝技术的碳排放效益核算方法和案例，在研究和数据的全面性上难免存在不足之处，敬请同行专家和广大读者批评指正。

作者

2017年8月



# 目录

MULU

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 背景和意义 .....	1
1.2 研究进展 .....	4
1.3 研究内容 .....	20
<b>第 2 章 基于生命周期的混凝土大坝碳排放清单</b> .....	24
2.1 生命周期评价的研究边界 .....	24
2.2 调研数据的采集 .....	29
2.3 混凝土大坝碳排放清单 .....	34
2.4 方法小结 .....	41
<b>第 3 章 基于生命周期的碳排放评价方法</b> .....	42
3.1 碳排放耦合评价模型 .....	42
3.2 碳排放计算方法 .....	43
3.3 生命周期各阶段碳排放计算方法 .....	45
3.4 温控措施碳排放计算方法 .....	48
3.5 方法小结 .....	49
<b>第 4 章 建设过程离散事件模拟及碳排放评价</b> .....	50
4.1 离散事件模拟方法 .....	50
4.2 碳排放计算方法 .....	58
4.3 综合效益优化方法 .....	59
4.4 方法小结 .....	65
<b>第 5 章 恒山水库工程碳排放评价</b> .....	66
5.1 案例评价 .....	66
5.2 方法对比和结果讨论 .....	77
5.3 施工方案效益优化 .....	80
5.4 筑坝技术对比分析 .....	91

<b>第 6 章 溪洛渡水电站工程碳排放评价</b> .....	93
6.1 案例评价 .....	93
6.2 主要节能减排的措施分析 .....	99
<b>第 7 章 基于生命周期实现混凝土大坝碳减排的途径</b> .....	103
7.1 采取低碳筑坝技术 .....	103
7.2 优化施工组织设计 .....	104
7.3 循环利用废弃材料 .....	105
7.4 加强温控措施 .....	107
7.5 建立碳交易额方法学 .....	109
7.6 综合建议 .....	109
<b>第 8 章 结论与展望</b> .....	112
8.1 主要的研究成果 .....	112
8.2 贡献和创新点 .....	115
8.3 局限性和展望 .....	116
参考文献 .....	117



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 背景 和 意义

### 1.1.1 全球气候变化

气候变暖问题已经引起了全球的广泛关注，联合国政府间气候变化专门委员会（International Panel on Climate Change, IPCC）评估报告指出，气候变暖主要是人类活动的结果<sup>[1]</sup>，很大程度上是过度使用化石燃料导致大量温室气体排放造成的<sup>[2]</sup>，根据国际能源协会（International Energy Agency, IEA）的数据，人均二氧化碳排放量变化趋势见图 1.1。

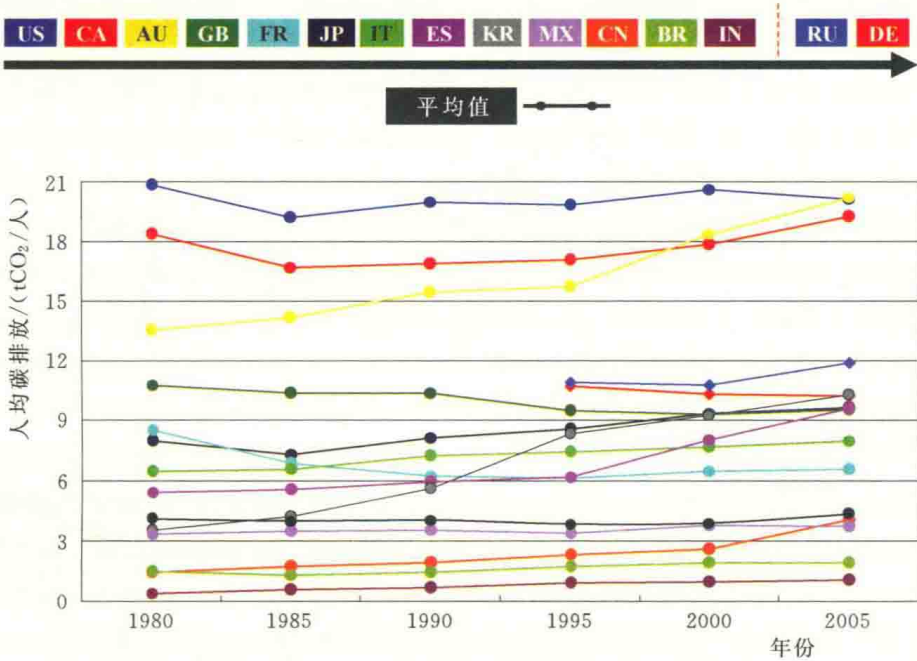


图 1.1 世界各国的人均二氧化碳排放量变化趋势

US—美国；CA—加拿大；AU—澳大利亚；GB—英国；FR—法国；JP—日本；  
IT—意大利；ES—西班牙；KR—韩国；MX—墨西哥；CN—中国；  
BR—巴西；IN—印度；RU—俄罗斯；DE—德国





可以看出世界各国的人均二氧化碳排放量在近些年逐渐增加,减缓气候变暖的关键是要减少二氧化碳排放<sup>[3]</sup>。根据国际能源协会最新数据,2015 年中国排放 90 亿 t 二氧化碳,占当年世界二氧化碳总排放量 321.4 亿 t 的 28%,位于世界各国首位<sup>[4]</sup>。此外,2035 年之前,全球二氧化碳排放量增量的一半将来自中国<sup>[5]</sup>。

### 1.1.2 碳排放权交易

我国正处在高速城市化发展过程中,预计到 2050 年发展到中等发达国家水平时,二氧化碳的年排放量可能达到 156 亿 t<sup>[6]</sup>。因此,控制中国温室气体排放对于全球碳减排效果至关重要。我国政府高度重视温室气体减排,积极采取措施保证经济发展的同时,减少二氧化碳排放<sup>[7]</sup>。2015 年 6 月,李克强总理宣布了中国应对气候变化 2030 减排计划,即二氧化碳排放 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰;单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%,非化石能源占一次能源消费比重达到 20%左右<sup>[8,9]</sup>。《“十三五”控制温室气体排放工作方案》明确要求:2020 年实现我国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2015 年下降 18%,加快发展非化石能源,加快低碳技术研发与示范,加强温室气体排放统计与核算,强化全国碳排放权交易基础支撑能力,建立碳排放权交易制度,建设和运行全国碳排放权交易市场。

针对碳排放权交易,《联合国气候变化框架公约》及其《京都议定书》明确了发达国家和发展中国家在温室气体减排中共同而有区别的责任,赋予了实现温室气体减排目标的法律约束力<sup>[10]</sup>。欧洲碳排放交易体系(EU-ETS)是当前世界范围内最大的碳排放交易市场,通过对各企业强制规定碳排放量,为减少全球碳排放量做出了巨大贡献。目前,碳排放交易主要采用“清洁发展、联合履约与国家排放交易”3 种机制,其中,清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)是基于项目的减排机制,即碳减排额度(certified emission reductions, CER)交易,以实现发达国家和发展中国家进行项目级的减排量抵销额的转让与获得。借鉴 CDM 方法学,针对我国国情,国家发展和改革委员会尝试建立了全国碳交易统一市场,实行中国认证碳减排额交易(Chinese certified emission reductions, CCER),旨在全面推进自愿减排项目市场化,促进各个领域低碳技术的研发与应用,鼓励通过方法学核算的减排量进入碳市场交易。

### 1.1.3 国内雾霾污染

我国作为煤炭第一消费大国,近 30 年经济发展高度依赖煤炭为主导的能源结构是当前严重雾霾的重要原因。我国人口不到全球 20%,国土面积仅占



世界 7%，但每年煤炭消耗量早在 2011 年就已高达全球一半，且主要集中在我国东中部地区，导致污染物浓度大大超过了大气环境的承载力极限。2016 年，全国 338 个地级及以上城市中  $\text{PM}_{2.5}$  浓度为  $47\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，为世界卫生组织 (WHO) 过渡期第 1 阶段目标值的 1.34 倍；全国范围内超过 1/7 的国土被雾霾笼罩。与此同时，煤炭消费与雾霾密度高度重叠。空间分布上，京津冀及周边地区是我国受雾霾侵害最重的区域，其煤炭消费量占能源消费总量的 71.6%，高于全国平均水平 5 个百分点。2016 年，京津冀区域  $\text{PM}_{2.5}$ （细颗粒物）平均浓度为  $71\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超过国家二级年均浓度标准 1.03 倍。时间分布上，重污染天气主要发生在冬季。2016 年 11 月 15 日至 12 月 31 日采暖期间，京津冀区域  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度为  $135\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，是非采暖期 2.4 倍，仅 12 月就发生了 5 次大范围重污染天气。2016 年区域内河北省火电发电量占全省发电量的 90.6%，送出电量 400 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，同比增长 17.3%；华北送华中（特高压）和华东 188 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。火电外送更加重了京津冀区域燃煤及雾霾危害。调整以煤为主的高碳能源结构，用清洁电力代替燃煤是根治雾霾、实现美丽中国碧水蓝天目标的必然要求和选择，也是发达国家几十年前治理空气污染的共同经验。

#### 1.1.4 水电开发碳排放管理

目前，开发利用可再生能源是已成为世界各国保障能源安全、加强环境保护、减少雾霾、应对气候变化的重要措施，也是我国应对日益严峻的能源问题和环境问题的必由之路。水电是技术成熟、运行灵活的清洁低碳可再生能源，在我国可再生能源中具有绝对优势，也是能源替代战略的优先电源方式。为了满足我国节能减排目标，《水电发展“十三五”规划》明确要求，2020 年水电装机容量将达到 3.8 亿  $\text{kW}$ <sup>[11]</sup>。然而，CDM 和 CCER 的基准线碳排放核算方法仅针对小水电项目。小水电项目具有建筑物体积相对较小、建设周期短的特点，工程自身建设和维护过程中的碳排放量可忽略不计。相反，大中型水电工程项目涉及的碳排放影响因素较多，项目本身发电减排效益可观，但是施工建设和维护过程中的碳排放量大且集中。同时，大中型水电工程项目中多包括大量创新技术和新型施工组织工艺，这些新技术与新工艺本身具有明显的节能减排效益。由于目前缺乏大中型水电项目碳排放量的科学核算方法，严重制约了此类项目参与中国 CCER 碳认证和碳交易，以及全球 CDM 碳交易。

根据国际大坝协会最新预测，为实现“十三五”水电装机目标，全国混凝土大坝浇筑方量将超过 4 亿  $\text{m}^3$ <sup>[12]</sup>。已有的研究表明，当前许多混凝土大坝工程在施工过程中，由于混凝土的生产、运输和浇筑而排放大量的二氧化碳<sup>[13]</sup>。其中，水泥作为混凝土的重要组成部分，是碳排放密集的材料；施工机械是能





源消耗密集的设备。随着混凝土浇筑方量的增加，水利工程建筑物本身生命周期的环境问题也值得关注<sup>[14]</sup>。此外，鉴于大中型水电项目建设周期相对较长，建设水电站等大型工程时，混凝土大坝的浇筑过程中将消耗大量建筑材料，使用许多机械设备和能源，在某一时期内的集中排放量对周边地区节能减排影响较大，开展城市温室气体清单编制工作时，多要求核算此类水利水电基础设施碳排放量<sup>[15,16]</sup>。

以汾河水电站建设过程为案例，评价结果显示项目建设过程中的碳排放量大约需要一年发电量折算的碳盈余量才可以抵消<sup>[17]</sup>，见图 1.2。

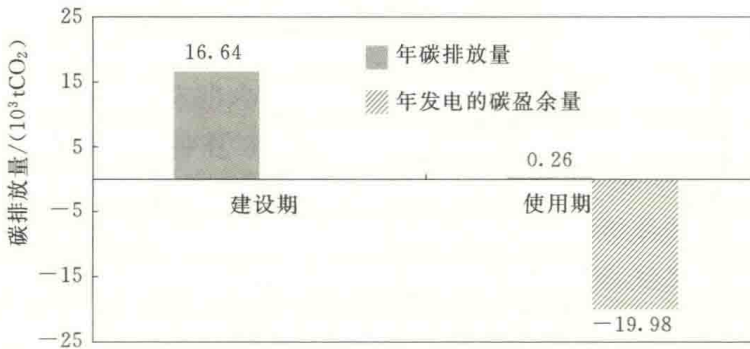


图 1.2 汾河水电站碳排放与碳盈余量结果对比图

因此，在积极发展水电项目、实现我国节能减排承诺的过程中，要关注混凝土大坝建筑物所产生的碳排放量，有必要基于生命周期研究混凝土大坝碳排放，在生命周期各个阶段对比各类筑坝技术的碳排放表现，推动和优化低碳筑坝技术，以减少碳排放量；而且在优化建设期的排放时，要充分考虑建设过程中两个项目管理的重要因素，即成本和进度<sup>[18]</sup>，研究成本和进度随碳排放变化的关系，才能实现碳排放的过程控制。所以基于生命周期理论，建立混凝土大坝生命周期碳排放评价计算模型，发展低碳筑坝技术，明晰碳排放要素，实现碳排放的过程管理，为大中型水电项目进入碳交易市场提供方法学提供科学支撑，为水电管理者建立低碳企业、履行社会责任提供决策依据，具有重要的理论与现实意义。

## 1.2 研究进展

### 1.2.1 基于生命周期的碳排放评价方法

在碳排放评价计算模型方法的研究中，基本方法是由联合国气候变化组织 IPCC 提出的：排放量 = 活动水平 × 排放因子<sup>[6]</sup>，即

$$Q=AD \cdot EF \quad (1.1)$$

式中： $Q$ 为总的碳排放量； $AD$ 为活动水平； $EF$ 为碳排放因子，通过评价模型直接计算。

现在针对能源、工业、畜牧业、种植业、土地利用、林业和废弃物七大领域<sup>[8]</sup>，IPCC已经公布了相应的评价模型，定量计算碳排放量。但对建筑业没有可以直接使用的评价模型。

在评价建设项目的环境问题时，生命周期评价（life cycle assessment, LCA）方法是一种将建设项目作为产品，全面系统的进行环境量化评估的方法，近些年已被学术界广泛认可。国际环境毒理学和化学学会（Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC）在1990年首先定义了生命周期评价<sup>[19-21]</sup>：“LCA是一个量化评价产品系统或者其行为相关的全部环境负荷的过程。在生命周期评价的过程中，首先要辨识和量化使用的物质、能源以及对环境的排放，然后再评价这些排放产生的影响。生命周期评价的范围包括了产品及其行为相关的所有过程，即包括了原材料的开采、加工、运输，制造、使用、维持，循环以及最终处理所有过程<sup>[22]</sup>。”2006年，国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）继续颁布了ISO 14040<sup>[23]</sup>；2006替代了ISO 14040；1997中关于LCA的定义、原则和框架的部分阐述。ISO颁布的生命周期评价框架以及ISO 14040 - ISO 14043标准的作用见图1.3。

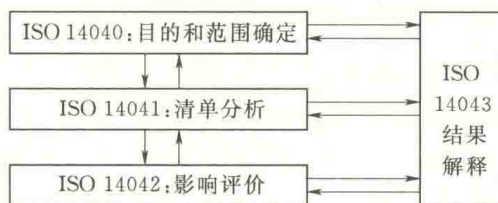


图 1.3 ISO 生命周期框架

可以看出生命周期评价框架包括了确定目的范围，生命周期清单分析（life cycle inventory, LCI），生命周期影响评价（life cycle impact assessment, LCIA），以及结果解释4个部分。

在建筑业，比较成熟的评价体系都是基于LCA的框架建立，如英国建筑研究所（building research establishment, BRE）和美国绿色建筑委员会（The U. S. Green Building Council, USGBC）等，都颁布建筑物碳排放评价工具，如绿色建筑评估体系（leadership in energy and environmental design building rating system, LEEDTM）。这些评价体系的研究边界集中在商业建筑物的使用期，从建设完成到建筑物废弃的过程，影响碳排放的要素是根据绿



色建筑物评价标准中选取的与碳排放相关且可以定量计算的要素，主要包括节能、绿化、节水、区内交通 4 个要素，进一步细化成各项指标。然后根据确定所得的要素，选择国际标准公认的排放系数指标，计算排放因子，建立评价公式。但过去的研究证明了商业和水电建筑物在其生命周期中碳排放量分布比例是不同的<sup>[17]</sup>，见图 1.4。

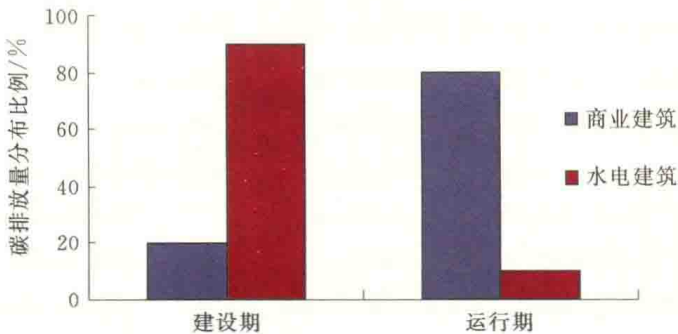


图 1.4 商业和水电建筑物碳排放比例分布图

商业建筑物使用期的碳排放量占到 80% 左右，而水电建筑的碳排放主要集中在建设期。根据生命周期的评价框架、范围和影响要素的不同，所选择的评价方法也不相同，所以上述建筑业评价体系模型不能直接用于衡量混凝土大坝生命周期的碳排放量。在混凝土大坝生命周期碳排放评价时，要重新根据 LCA 评价框架步骤，分析已有建设项目的碳排放评价方法，确定碳排放要素，建立碳排放清单以计算混凝土大坝的碳排放量。

基于 LCA 的碳排放评价方法已经成为了选择建设过程材料、构件以及施工设备的唯一合理标准，也是建筑物环境评价的基础方法<sup>[20]</sup>。根据生命周期评价框架的步骤，在建设项目的评价过程中，首先要确定评价的范围。过去研究中在制定生命周期范围时通常会根据现有的数据量和研究项目的特点进行取舍，如 Ochoa 评价了居民建筑时将范围确定在原材料获取、生产制造和运输阶段，但忽略了建设过程阶段<sup>[24]</sup>；谷立静将建筑物的生命周期分为建筑部品（材料及设备）生产、建造施工、运行维护和拆毁处置 4 个阶段，在各个阶段中都使用到能源，能源的输配和建筑部品的运输可以将各个部分连接起来，形成图 1.5 所示的整体<sup>[19]</sup>。

张又升主要从建设和使用两个阶段分析了建筑物的碳排放量，其中建设阶段包括了设计、材料生产、运输、施工过程，使用阶段包括了维修、拆除和废弃物处理的过程<sup>[25]</sup>。尚春静和张智慧定义的生命周期阶段包括了原材料的开采，建设材料和设备生产，以及施工安装、运行维护和拆除的过程<sup>[26, 27]</sup>，而且深入讨论了项目周期和建筑生命周期间的关系。

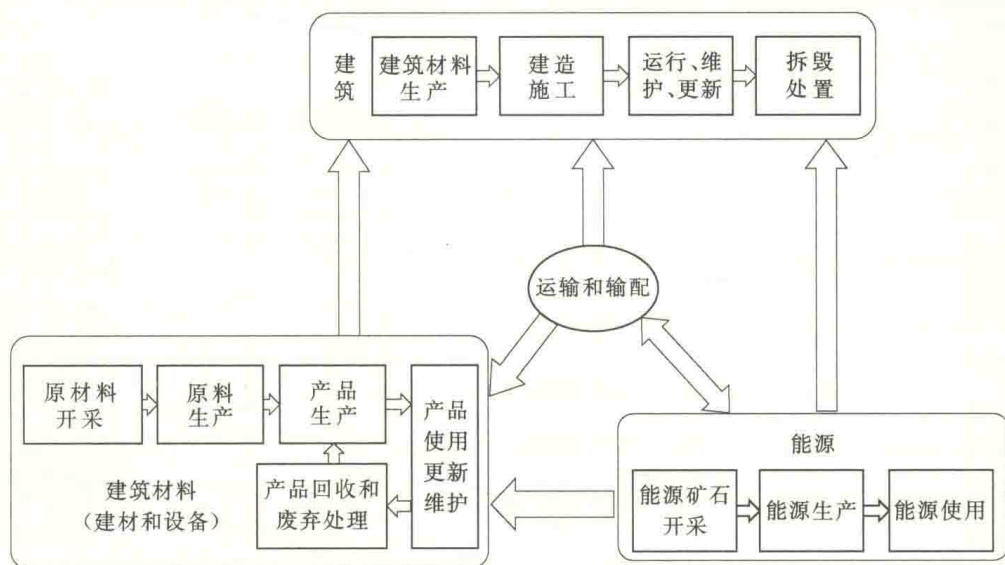


图 1.5 建筑物的生命周期

在国外的相关研究中，在 ASCE library、Science Direct - Online、Elsevier Science 等数据库上查到的近 200 篇关于建筑碳排放的研究文献中，由于建设项目的复杂性、独特性和数据的局限性，研究设定的计算范围也有不同。分析了其中 13 篇重点研究了建设过程中碳排放量的文献，计算范围包括了建筑材料获取<sup>[28-31]</sup>、材料运输<sup>[32-34]</sup>、设备运输<sup>[32,33]</sup>、设备能耗<sup>[29,32,34,35]</sup>、工人运输<sup>[32]</sup>、材料废弃<sup>[33]</sup>等部分，统计得到各部分的篇数为：材料获取（7 篇）、材料运输（4 篇）、设备运输（3 篇）、设备能耗（7 篇）、工人运输（2 篇）、材料废弃（2 篇）、建设服务（3 篇）。

在框架研究的生命周期清单研究中，关键是要收集基础数据，建立排放要素，进行清单分析。国内外主要的建筑材料清单研究的数据收集方法见表 1.1<sup>[20]</sup>。

表 1.1 国内外生命周期清单研究

学者	年份	建筑材料	数据收集的方法
Thormark <sup>[36]</sup>	2002	建筑材料、运输和运行耗能	文献、能源模拟数据
González, Navarro <sup>[37]</sup>	2006	21 类建筑构件材料	行业和政府数据
Guggemos, Horvath <sup>[38]</sup>	2006	临时建筑材料	现场调研
Bilec <sup>[39]</sup>	2007	主要建筑材料	数据库、行业数据
Hammond, Jones <sup>[40]</sup>	2008	34 类主要建筑材料	文献、调研
Huberman, Pearlmutter <sup>[41]</sup>	2008	12 种建筑材料	文献、现场调研
Huntzinger, Eatmon <sup>[42]</sup>	2009	4 种水泥	文献、数据库数据

续表

学 者	年份	建筑材料	数据收集的方法
张又升 <sup>[25]</sup>	2002	9 类建筑材料	行业调研
龚志起, 张智慧 <sup>[22]</sup>	2004	水泥、钢材和平板玻璃	文献、现场调研
刘颖昊, 等 <sup>[43]</sup>	2005	电力	现场调研
李小冬, 等 <sup>[44]</sup>	2005	3 种型号水泥	文献调研
吴星 <sup>[45]</sup>	2005	6 种建筑材料	文献、现场调研
顾道金, 朱颖新, 等 <sup>[46,47]</sup>	2006	18 种建筑材料	文献调研
刘颖昊, 黄志甲, 等 <sup>[48]</sup>	2007	电镀锌产品	文献、现场调研
顾道金, 等 <sup>[49]</sup>	2007	27 种建筑材料	文献调研
王婧, 等 <sup>[50]</sup>	2007	12 种建筑材料	文献调研
苏醒, 等 <sup>[51]</sup>	2008	混凝土和钢结构建筑	文献调研
谷立静 <sup>[19]</sup>	2009	7 种能源和 8 种建筑材料	文献调研
蔡博峰, 等 <sup>[12]</sup>	2009	6 种建筑材料	文献调研
高源雪 <sup>[52]</sup>	2012	主要建筑材料	文献调研、计算

可以看出, 在国内的研究中以文献调研为主, 虽然现场调研可以得到最直接的一线资料, 了解当地的流程, 相对于文献调研可评价得更准确, 但容易受到行业保护和数据保密的约束, 且需要较高的成本, 只在客观条件允许时优先采用。国外的数据库研究相对更加完善, Simapro、Gabi、Gemis、Analytical、ELCD (European reference life cycle database) 等数据库和分析软件都是在 LCA 框架图的基础上, 分析文献资料, 建立基础数据库, 以方便用户直接建模进行生命周期评价。但这些商业软件的地域性和时间性都很强, 与研究所在国家的技术水平直接相关, 难以直接应用到我国的数据分析中, 本土化过程中需要进行系数调整, 在这方面现在仅有个别研究做了假设, 还缺少理论的验证。在数据库建设方面, 我国和国外相比还很不完善, 近些年随着国家对环境问题的日益重视以及文献、调研等基础数据资料的不断完善, LCA 研究在国内发展迅速, 陆续推出了绿色建筑物评价标准和绿色奥运建筑评估体系。张智慧等研究和开发了基于 Web 平台的 6 种建筑材料的数据库及评价体系 (building environmental performance analysis system, BEPAS)<sup>[53]</sup>。已有的研究中, 资料较完整的是由四川大学开发的中国生命周期参考数据库 (Chinese reference life cycle database, CLCD)<sup>[54]</sup>, 该数据库示例见图 1.6。

该数据库主要是在全国平均水平下, 基于过程 LCA 计算得到的基础材料数据、设备数据, 并在此基础上建立了 eBalance 软件, 可在软件平台上模拟输入输出过程, 计算碳排放清单。



类型	名称	数量	单位
产品或服务产出	electricity mix	3.60E+000	MJ
资源投入	air [大气可...]	5.26E+000	kg
资源投入	barium sulfa...	5.68E-016	kg
资源投入	重晶石 [土地...]	2.69E-004	kg
资源投入	basalt [土地...]	1.51E-005	kg
资源投入	铝土矿 [土地...]	3.75E-006	kg
资源投入	bentonite [...]	1.12E-004	kg
资源投入	褐煤 [土地不...]	5.81E-004	kg
资源投入	calcium carb...	3.78E-003	kg
资源投入	calcium chlo...	5.81E-014	kg
资源投入	carbon dioxi...	1.19E-004	kg
资源投入	镉 [土地不可...]	4.44E-007	kg
资源投入	clay [土地不...]	2.32E-005	kg
资源投入	colemanita [...]	4.26E-007	kg

图 1.6 中国生命周期参考数据库 (CLCD) 的示例

接下来分析主要的碳排放评价方法，主要分为“由下至上”的基于过程 (process) 分析和“由上至下”的基于投入产出 (economic input - output, EIO) 分析两派。基于过程的 LCA 评价方法是按照 SETAC 提出的研究框架的形式，在制定范围边界后，对评价过程进行详细的分析，该方法在概念上简单直接，在数据可获得性和可靠度较高时，计算结果相对准确，但要花费较高的时间和成本，有时很难得到一手的数据资料<sup>[55,56]</sup>。基于投入产出的 LCA 方法最早由 Leontief 在 20 世纪 70 年代提出<sup>[57]</sup>，在卡内基梅隆大学的研究中得到推广<sup>[55,58,59]</sup>。该方法是以国家和地区的经济为边界<sup>[60]</sup>，成本和时间投入少，为用户提供方便，但因使用集成的数据，评价结果相对粗略，难以准确分析具体过程的排放量<sup>[56]</sup>。

上述两种方法是建筑项目生命周期评价中普遍使用的方法，表 1.1 中学者采集数据的过程都属于过程分析法，其他的一些采用过程分析法的研究，如 Junnila 等，在 2003 年从材料制造和现场设备两个方面，评价了建设过程的碳排放量<sup>[61]</sup>；燕艳针对浙江省的建筑物进行了碳排放量计算<sup>[62]</sup>；顾道金、朱颖心、谷立静等评价了住宅建筑物环境影响，并对我国建筑行业的综合环境、发展变化情况和可能的节能措施进行了分析<sup>[46]</sup>；李小冬、张智慧采用过程单元，评价不同建筑材料能源消耗和施工过程中的环境影响<sup>[63]</sup>；尚春静、张智慧以北京一个住宅小区为例分析了从建设、使用到建筑物废弃整个过程的碳排放量<sup>[26,27]</sup>。Hacker<sup>[64]</sup>、Gustavsson<sup>[65]</sup>、Yan<sup>[66]</sup>、Tang<sup>[67]</sup>、刘伟<sup>[68]</sup>、秦佑国<sup>[69]</sup>、刘博宇<sup>[70]</sup>、黄国仓<sup>[71]</sup>、张倩影<sup>[72]</sup>、林波荣<sup>[73]</sup>、李海峰<sup>[74]</sup>等也都曾采用过程分析法分析建筑物的碳排放量。投入产出法在针对单独项目的评价中主要是以



Leontief<sup>[57]</sup>、Lave<sup>[58]</sup>、Hendrickson<sup>[56]</sup>、Ochoa<sup>[24]</sup>、Matthews 和 Sharrard<sup>[75,76]</sup> 等的研究为主, Suzuki<sup>[77]</sup>、Seo<sup>[78]</sup>、Norman<sup>[79]</sup>、Gerilla<sup>[80]</sup> 等也做过一些评价。

Singh 等在研究中指出 EIO - LCA 的方法高度的数据集成过程不利于对单个建设项目进行具体评价, 而且也不适用于评价同一部门下的不同建设方法, 当两种方法的投入相同时, 得到的排放量也相同, 难以区分具体的过程<sup>[81]</sup>。在对美国匹兹堡市的一座钢结构建筑物案例研究可以看出, 相对过程生命周期评价 (Process - LCA), 投入产出生命周期 (EIO - LCA) 的评价结果相差到 2 倍以上<sup>[32,39]</sup>。Keoleian 等使用 Process - LCA 方法计算了美国密歇根州安娜堡的一所标准住宅的能源消耗和温室气体排放, 结果显示 90% 都来自于住宅的使用阶段<sup>[82]</sup>。Ochao - Franco 通过 EIO - LCA 对同一个案例进行计算, 得到了相似的排放比例, 但排放总量要明显的提高<sup>[83]</sup>。为了更大程度地发挥上述两种 LCA 评价方法的优势, 学者们提出耦合生命周期评价 (Hybird LCA) 方法, 在不同的阶段选择适当的方法, 以有效解决统一边界范围、时间和成本的问题。现有的 Hybrid LCA 评价模型, 主要包括了 tiered<sup>[84]</sup>、I - O based hybrid<sup>[60]</sup>、integrated<sup>[85]</sup> 和 augmented process - based<sup>[86]</sup> 等。Guggemos 和 Horvath 根据 Hybrid LCA 模型, 分析了美国加利福尼亚的一座商业大楼的建设过程阶段, 研究的边界设在临时材料制造、材料和设备运输、设备使用、废弃物处理阶段, 在案例研究中看出, 设备的使用占到环境影响的 50% 以上<sup>[38]</sup>。Bilec 等也采用 Hybrid LCA 模型, 评价了美国匹兹堡市一座车库在运输、设备使用、建设服务、生产和维修建设设备、现场用电、用水方面的环境影响, 指出交通运输是最大的影响因素<sup>[87]</sup>, 并结合商业建筑物建设过程的特点, 耦合评价了过程的环境影响<sup>[88]</sup>。

### 1.2.2 大型基础建设项目的生命周期评价

随着大型基础建设部分的碳排放量日益增加并受到了人们的关注, 近些年学者们逐渐开始研究这方面的碳排放量, 但比起建筑物的研究进展还是相差较远。在现有的研究中, 生命周期评价仍然是分析这部分排放量的主要方法<sup>[81]</sup>, 主要有代表性的包括: Keoleian 等应用 Process - LCA 方法评价了两种不同的桥梁设计方法的生命周期影响, 该研究侧重于分析由于使用不同的维修桥梁的方法, 改变了工期, 在此过程中原定于通行该桥梁的车辆, 因为桥梁维修而变更路线而产生的排放差异, 结果见图 1.7, 水泥基复合材料 (engineered cementitious composites, ECC) 的环境表现要好于普通材料 (conventional composites, Conv. C)<sup>[89]</sup>。

Cass 等结合了过程分析和投入产出法, 计算了高速公路建设过程中的温