

建造·性能·人文与设计系列丛书

张 宏 主编

工业化预制装配建筑全生命周期 碳排放模型

王 玉 著



东南大学出版社

建造·性能·人文与设计系列丛书

国家自然科学基金资助项目“基于构件法建筑设计的装配式建筑建造与再利用碳排放定量方法研究”(51778119)

国家“十二五”科技支撑计划课题“水网密集地区村镇宜居社区与工业化小康住宅建设关键技术与集成示范”(2013BAJ10B13)

工业化预制装配建筑全生命周期 碳排放模型

王 玉 著

东南大学出版社

南 京

内容提要

建筑业是以消耗大量的自然资源以及造成沉重的环境负担为代价的,据统计:建筑活动分别使用了自然资源、能源总量的40%,而造成的建筑垃圾也占人类活动产生垃圾总量的40%,预计2030年建筑业产生的温室气体将占全社会排放总量的25%。因此,建筑业的低碳减排迫在眉睫。

而作为在改变生产方式上具有革新意义的技术创新——工业化生产方式是节能减排的重要途径,其发展前景十分广阔。同时,建筑工业化已然成为建筑发展的趋势和必然。然而,由于真正基于市场环境的、相对深入的工业化建筑实践才刚刚起步,因此有针对性的相关节能减排研究还不充分甚至空白。在此背景下,针对工业化建筑的碳排放研究更具有现实意义。

本书在对国内外工业化建筑发展及其建筑碳排放现状研究的基础上,构建了全新的工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放评价模型,实现了低碳建筑的可视化、可控化、智能化和可操作化。同时以轻型建造系统为例,建立了一套完整的轻型建筑系统的低碳建筑碳排放评价指南及核算表格系统,不仅为轻型工业化预制装配住宅系统全生命周期的低碳建设提供了技术保障,也将为我国其他低碳建筑的健康、迅速发展提供强大的理论依据和实践指导。

图书在版编目(CIP)数据

工业化预制装配建筑全生命周期碳排放模型 / 王玉

著. — 南京:东南大学出版社,2017.7

(建造·性能·人文与设计系列丛书 / 张宏主编)

ISBN 978-7-5641-7272-5

I. ①工… II. ①王… III. ①工业化-预制结构-建筑安装-二氧化碳-排气-研究 IV. ①TU756.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 167460 号

书 名:工业化预制装配建筑全生命周期碳排放模型

著 者:王 玉

责任编辑:戴 丽

文字编辑:辛健彤 贺玮玮

责任印制:周荣虎

出版发行:东南大学出版社

社 址:南京市四牌楼2号 邮编:210096

网 址:<http://www.seupress.com>

出 版 人:江建中

印 刷:南京玉河印刷厂

排 版:南京新洲制版有限公司

开 本:889mm×1194mm 1/16 印张:13 字数:420千字

版 次:2017年7月第1版 2017年7月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5641-7272-5

定 价:58.00元

经 销:全国各地新华书店

发行热线:025-83790519 83791830



* 版权所有,侵权必究

* 本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830

序一

2013年秋天,我在参加江苏省科技论坛“建筑工业化与城乡可持续发展论坛”上提出:建筑工业化是建筑学进一步发展的重要抓手,也是建筑行业转型升级的重要推动力量。会上我深感建筑工业化对中国城乡建设的可持续发展将起到重要促进作用。2016年3月5日,第十二届全国人民代表大会第四次会议政府工作报告中指出,我国应积极推广绿色建筑,大力发展装配式建筑,提高建筑技术水平和工程质量。可见,中国的建筑行业正面临着由粗放型向可持续型发展的重大转变。新型建筑工业化是促进这一转变的重要保证,建筑院校要引领建筑工业化领域的发展方向,及时地为建设行业培养新型建筑学人才。

张宏教授是我的学生,曾在东南大学建筑研究所工作近20年。在到东南大学建筑学院后,张宏教授带领团队潜心钻研建筑工业化技术研发与应用十多年,参加了多项建筑工业化方向的国家级和省级科研项目,并取得了丰硕的成果,建造·性能·人文与设计系列丛书就是阶段性成果,后续还会有系列图书出版发行。

我和张宏经常讨论建筑工业化的相关问题,从技术、科研到教学、新型建筑学人才培养等等,见证了他和他的团队一路走来的艰辛与努力。作为老师,为他能取得今天的成果而高兴。

此丛书只是记录了一个开始,希望张宏教授带领团队在未来做得更好,培养更多的新型建筑工业化人才,推进新型建筑学的发展,为城乡建设可持续发展做出贡献。



2016年3月

序二

建筑构件的制作、生产、装配,建造成各种类型建筑的方法、模式和过程,不仅涉及过程中获取和消耗自然资源和能源的量以及产生的温室气体排放量(碳排放控制),而且通过产业链与经济发展模式高度关联,更与在建筑建造、营销、运营、维护等建筑全生命周期各环节中的社会个体和社会群体的权力、利益和责任相关联。所以,以基于建筑产业现代化的绿色建材工业化生产——建筑构件、设备和装备的工业化制造——建筑构件机械化装配建成建筑——建筑的智能化运营、维护——最后安全拆除建筑构件、材料再利用的新知识体系,不仅是建筑工业化发展战略目标的重要组成部分,而且构成了新型建筑学(Next Generation Architecture)的内容。换言之,经典建筑学(Classic Architecture)知识体系长期以来主要局限在为“建筑施工”而设计的形式、空间与功能层面,需要进一步扩展,才能培养出支撑城乡建设在社会、环境、经济三个方面可持续发展的新型建筑学人才,实现我国建筑产业现代化转型升级,从而推动新型城镇化的进程,进而通过“一带一路”战略影响世界的可持续发展。

建筑工业化发展战略目标是将经典建筑学的知识体系扩展为新型建筑学的知识体系,在如下五个方面拓展研究:

- (1) 开展基于构件分类组合的标准化建筑设计理论与应用研究。
- (2) 开展建造、性能、人文与设计的新建筑学知识体系拓展理论与人才培养方法研究。
- (3) 开展装配式建造技术及其建造设计理论与应用研究。
- (4) 开展开放的 BIM(Building Information Modeling,建筑信息模型)技术应用和理论研究。
- (5) 开展从 BIM 到 CIM(City Information Modeling,城市信息模型)技术扩展应用和理论研究。

本系列丛书作为国家“十二五”科技支撑计划项目 2012BAJ16B00“保障性住房工业化设计建造关键技术研究及示范”,以及 2013BAJ10B13 课题“水网密集地区村镇宜居社区与工业化小康住宅建设关键技术与集成示范”的研究成果,凝聚了以中国建设科技集团有限公司为首的科研项目大团队的智慧和力量,得到了科技部、住房和城乡建设部有关部门的关心、支持和帮助。江苏省住房和城乡建设厅、南京市住房和城乡建设委员会以及常州武进区江苏省绿色建筑博览园,在示范工程的建设和科研成果的转化、推广方面给予了大力支持。“保障性住房新型工业化建造施工关键技术研究及示范”课题 2012BAJ16B03 参与单位南京建工集团有限公司、常州市建筑科学

研究院有限公司及课题合作单位南京长江都市建筑设计股份有限公司、深圳市建筑设计研究总院有限公司、南京市兴华建筑设计研究院股份有限公司、江苏省邮电规划设计院有限责任公司、北京中外建建筑设计有限公司江苏分公司、江苏圣乐建设工程有限公司、江苏建设集团有限公司、中国建材(江苏)产业研究院有限公司、江苏生态屋住工股份有限公司、南京大地建设集团有限公司、南京思丹鼎建筑科技有限公司、江苏大才建设集团有限公司、南京筑道智能科技有限公司、苏州科逸住宅设备股份有限公司、浙江正合建筑网模有限公司、南京嘉翼建筑科技有限公司、南京翼合华建筑数字化科技有限公司、江苏金砼预制装配建筑发展有限公司、无锡泛亚环保科技有限公司,给予了课题研究在设计、研发和建造方面的全力配合。东南大学各相关管理部门以及由建筑学院、土木工程学院、材料学院、能源与环境学院、交通学院、机械学院、计算机学院组成的课题高校研究团队紧密协同配合,高水平地完成了国家支撑计划课题研究。最终,整个团队的协同创新科研成果:“基于构件法的刚性钢筋笼免拆模混凝土保障性住房新型工业化设计建造技术系统”,参加了“十二五”国家科技创新成就展,得到了社会各界的高度关注和好评。

最后感谢我的导师齐康院士为本丛书写序,并高屋建瓴地提出了新型建筑学的概念和目标。感谢东南大学出版社及戴丽老师在本书出版上的大力支持,并共同策划了这套建造·性能·人文与设计丛书,同时感谢贺玮玮老师在出版工作中所付出的努力,相信通过系统的出版工作,必将推动新型建筑学的发展,培养支撑城乡建设可持续发展的新型建筑学人才。

东南大学建筑学院建筑技术与科学研究所

东南大学工业化住宅与建筑工业研究所

东南大学 BIM-CIM 技术研究所

东南大学建筑设计研究院有限公司建筑工业化工程设计研究院



2016年10月1日于容园·南京

前言

建筑业的发展是以消耗大量的自然资源以及造成沉重的环境负担为代价的,据统计:建筑活动使用了自然资源总量的 40%,能源总量的 40%,而造成的建筑垃圾也占人类活动产生垃圾总量的 40%,预计 2030 年建筑业产生的温室气体将占全社会排放量的 25%。因此,建筑业的低碳减排迫在眉睫。

作为在改变生产方式上具有革新意义的技术创新——工业化生产方式是节能减排的重要途径,其发展前景十分广阔;同时,建筑工业化已然成为建筑发展的趋势和必然。然而,由于真正基于市场环境的、相对深入的工业化建筑实践才刚刚起步,因此有针对性的相关节能减排研究还不充分甚至空白。在此背景下,针对工业化建筑的碳排放研究更具有现实意义。

本书首先对国内外工业化建筑发展及其碳排放现状进行了分析。其次,从碳排放基础研究、建筑碳排放研究、建筑碳排放模型分析、低碳建筑评价等四个方面对国内外碳排放现状展开研究。其中,碳排放基础研究包括碳排放政策、标准、相关评估法,能源碳排放因子,建材、设备碳排放因子以及碳排放计算软件;建筑碳排放模型分析包括生命周期划分和全生命周期各阶段碳排放比例;通过以上背景研究整理现有问题,并提出研究目标和研究内容。

针对本书的研究目标,从基于全生命周期评价理论的建筑碳排放基础研究和传统建造方式的建筑全生命周期碳排放模型两部分展开。第一部分主要包括全生命周期评价理论、建筑全生命周期碳排放评价理论以及建筑碳排放基础研究;第二部分对传统建造方式下的建筑全生命周期碳排放进行汇总,构建碳排放时空矩阵核算模型,对碳排放来源进行盘查,明确各阶段碳排放测算方法和测算清单,汇总碳排放数据来源及减碳措施;并对不同结构类型、结构材料的建筑碳排放进行分析评估。在此基础上,对以上问题进行整理。

在对传统建造方式的建筑碳排放模型的研究基础上,对比传统建造方式与工业化生产模式的差别,结合工业化预制装配模式的特点。通过确定目标范围、清单分析、影响评价和结果解释等四个方面建立一套基于全流程控制的、系统的工业化预制装配建筑全生命周期碳排放评价模型。之后具体分两部分展开:碳排放核算模型和分析评估。碳排放核算模型包括基础数据库框架、基于 BIM 的工业化建筑数据信息库以及各阶段的计算方法,并重新划分其生命周期的各阶段;分析评估针对具体碳源、影响因素提出关于工业化预制装配建筑的减碳措施。

本书最后部分以轻型建造系统为例,对轻型可移动铝合金住宅的建筑全生命周期各阶段进行实证分析,包括碳排放核算、影响评价(LCIA)和针对

具体碳源的低碳设计,从而建立一套完整的轻型建筑系统的低碳建筑碳排放评价指南及核算表格系统。

本书构建了全新的工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放评价模型,实现了低碳建筑的可视化、可控化、智能化和可操作化,不仅为轻型工业化预制装配住宅系统全生命周期的低碳建设提供了技术保障,也将为我国其他低碳建筑的健康、迅速发展提供强大的理论依据和实践指导。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 背景	1
一、建筑产业碳排放现状与减排潜力	1
二、建筑工业化——碳减排的重要途径	2
第二节 现状	3
一、住宅	3
二、公建	5
三、现状问题整理	5
四、策略	6
第二章 传统建造方式的建筑碳排放研究	10
第一节 全生命周期碳排放评价理论	10
一、全生命周期评价理论	10
二、建筑全生命周期碳排放评价理论	12
第二节 碳排放基础研究	17
一、碳排放因子	17
二、碳排放模型	30
三、低碳评价	33
第三节 碳排放时空矩阵模型	35
一、碳排放核算及数据来源	37
二、减碳措施	50
三、不同类型建筑碳排放评价	54
四、问题整理	58
第三章 工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放模型研究	63
第一节 工业化预制装配建筑	63
一、建造模式与传统的区别	63
二、预制装配模式的特点	64
三、全生命周期划分	68
四、评价模型	69
第二节 碳排放核算与评估	72
一、基础数据库框架	72
二、基于 BIM 的工业化建筑数据信息库	76
三、碳排放核算	79

四、不同建造模式的碳排放核算对比	95
五、不同结构类型的碳排放核算对比	105
六、碳排放分析评估	110
第四章 轻型可移动铝合金住宅的全生命周期碳排放评价	135
第一节 轻型可移动铝合金住宅	135
第二节 全生命周期碳排放评价	136
一、建材开采	136
二、工厂化生产	142
三、物流	149
四、装配	157
五、使用维护更新	166
六、拆除回收	172
七、分析评估	176
第三节 碳排放模型验证	178
一、数据来源	178
二、碳排放核算分析	179
结束语	181
附录	184
参考文献	195

第一章 绪论

第一节 背景

一、建筑产业碳排放现状与减排潜力

建筑、工业、交通为能源消耗的三大领域,也是温室气体排放的主要来源。联合国环境署(UNEP)2009年公布《建筑与气候变化》报告指出,建筑部门能源消耗占全球能源消耗的30%~40%,全球温室气体排放的1/3与之相关,是低碳节能的关键领域之一^[1]。欧洲建筑师协会估计,全球的建筑相关产业消耗了地球能源的50%、原材料的40%、农地损失的80%、水资源的50%,同时产生全球42%的温室气体、50%的空气污染、50%的氟氯烷、48%的固体废弃物、50%的水污染^[2]。在美国,建筑消耗了全国70%的电能,使用了全国40%以上的一次能源,排放了全国40%~45%的温室气体;英国2000年温室气体排放总量为1.5亿t,其中建筑排放占7500万t;日本建筑学会于1990年左右着手进行的关于建筑业中碳排放量的调查结果显示,碳排放量与能源消费大体成正比。联合国环境署的研究报告也显示,建筑部门消耗的能源与相应的碳排放量占总排放量的比例相当。

我国的建筑能耗约占总能耗的27%,碳排放量占总排放量的40%左右。国内单位建筑面积能耗是发达国家的2~3倍,新建筑中有80%以上是高能耗建筑,存量建筑中有95%以上是高能耗建筑。因我国城市化进程不断加速,城市建筑规模也持续以5%~8%的速度增长,每年新建建筑10多亿m²占全球每年新建建筑的40%,并将持续25~30年,因此建筑能耗与碳排放是当下的重点研究内容^[3]。

此外,已有研究表明工业产品(如汽车)要达到10%~20%的节能效果并非易事,而建筑领域的节能潜力巨大,较容易达到50%~60%的节能效果,并且建筑的使用寿命较其他工业产品长,所以建筑节能减排对发展低碳经济、控制全球气候变暖具有更深远的意义。IPCC第四次报告预测指出,全球建筑领域到2030年的碳减排潜力可达每年60亿t。2009年麦肯锡发布的《全球温室气体减排成本曲线》中数据显示,交通和建筑部门减排前期融资可能较困难,但实际成本较低。

2009年12月,联合国气候变化大会在哥本哈根召开。会上,我国郑

重承诺:截至 2020 年单位国内生产总值碳排放比 2005 年下降 40%~45%。我国的近期目标,“十一五”期间单位国内生产总值能耗降低 20%,主要污染物排放总量减少 20%,为此我国政府指出了实施纲要即必须深入贯彻落实科学发展观,采取更加强有力的政策措施与行动,加快转变发展方式,努力控制温室气体排放,建设资源节约型和环境友好型社会。在低碳经济呼吁下,各行各业开展了低碳发展路径研究,作为最具有节能减排潜力之一的建筑业开始了建筑碳排放的定性定量研究,将为我国进行建筑物碳排放的盘查和评价提供有力的决策依据。

二、建筑工业化——碳减排的重要途径

建筑工业化是随西方工业革命出现的概念,工业革命让造船、汽车生产效率大幅提升,随着欧洲兴起的新建筑运动,实行工厂预制、现场机械装配,逐步形成了建筑工业化最初的理论雏形。二战后,西方国家在亟待解决大量的住房而劳动力严重缺乏的情况下,为推行建筑工业化提供了实践的基础,因其工业效率高而在欧美风靡一时。1974 年,联合国出版的《政府逐步实现建筑工业化的政策和措施指引》中定义了“建筑工业化”:按照工业化生产方式改造建筑业,使之逐步从手工业生产转向社会化大生产的过程。它的基本途径是建筑标准化,构配件生产工厂化、施工机械化和组织管理科学化。

通过认知调研和国内外实践分析,借助技术创新理论从中观层面将低碳建筑技术策略划分为改良性低碳技术策略和革新性低碳技术策略两类,前者碳减排作用显现的关键阶段是建筑生命周期中的使用阶段,主要依赖标准规范推动;后者作用显现的关键是建造阶段,主要依赖工业化生产方式的推动。结论显示:在生命周期的碳减排总量来看,前者的使用阶段远高于后者的建造阶段,但后者的单位时间内的作用效率更高。与前者建筑使用阶段有国家强力的标准规范进行约束并推动节能减排升级不同,后者即建筑工业化目前尽管陆续有工业化建筑的建设,但整体仍处于传统自发的、粗放型的生产方式,呈现生产效率低、综合质量差、资源消耗高、污染严重等缺陷,并且建筑施工阶段的能耗在社会能耗中占有相当比例。而作为在改变生产方式上具有革新意义的技术创新——工业化生产方式所能带来的节能减排成效为人们所期待,其发展前景十分广阔。同时建筑工业化已然成为建筑发展的趋势和必然。在此背景下,针对工业化建筑的碳排放研究更具现实意义。

尽管在推行建筑工业化的早期会面临很多阻力,但只要规模化应用程度达到能够摊薄技术创新带来的增量成本这道门槛后,规模化的推进速度将进一步加快,节能减排效果将更加突出。对比传统施工方式和工业化方式的碳排放差异,仅能耗一项就比传统施工方式降低 20%~30%,材料损耗约减少 60%,建筑垃圾减少 83%,可回收材料增加 66%^[4],这些都可带来碳排放量的减少。按照中国房地产行业的预计规模,如果住宅工业化占全国住宅建设量的 10%,每年节约能耗将相当于葛洲坝发电站两个月的发电量,减少混凝土损耗相当于 5.1 万户 90 m²小户型住宅混凝土用量,减少钢材损耗超过 1 个鸟巢的用钢量^[5]。由于我国住宅数量基数巨大,因此在低碳技术上哪怕点滴的进步创新也将在总量上带来可观的经济效益、环境效益和社会效益。

研究表明,构件工厂预制化和现场装配这一工业化技术手段能够通过节省主要建材(钢材、水泥)和节约施工现场用电量的具体方式降低建筑建造阶段的碳排放量,且随着预制率的提高,将进一步提高建材生产阶段水泥、钢材的节约量和减少施工阶段的电力消耗和钢材消耗。以“上海万科新里程项目”为例,其预制化率仅为 36.85%,其建造过程总的碳排放量为 $296.2 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$;若按传统建造方式,则为 $346.7 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$,可实现碳减排 14.6%。而中国香港同类预制混凝土住宅的预制率在 45%~50%^[6],日本则要求全套住宅建造过程中的 2/3 或以上在工厂完成,包括主要结构部分(墙、柱、地板、梁、屋面、楼梯等,不包括隔断墙、辅助柱、底层地板、局部楼梯、室外楼梯等)均为工厂生产的规格化部件,并采用装配式工法施工,85%以上的高层集合住宅都不同程度地使用了预制构件。因此随着工厂预制化程度的深入,住宅建造阶段碳减排还有较大提升空间^[7]。

从技术创新科技含量的比重看,科技进步对我国住宅产业发展的贡献率刚过 30%,而欧美主要发达国家均在 70%~80%。我国住宅产业的产业化率(含工业化生产建造)仅为 15%,美国、日本达 70%~80%。按国际通行标准,集约型发展的产业要求科技进步对产业的贡献率超过 50%^[8-9]。然而,尽管建筑工业化是大势所趋,但由于真正基于市场环境的、相对深入的工业化建筑实践才刚刚起步,因此有针对性的相关节能减排研究还不充分,甚至存在空白。

第二节 现状

尽管建筑工业化是大势所趋,但由于真正基于市场环境的、相对深入的工业化建筑实践才刚刚起步,因此有针对性的相关节能减排研究还不充分甚至存在空白。

刘君怡将低碳住宅技术策略划分为改良性低碳住宅技术策略和革新性低碳住宅技术策略两类,提出后者的关键阶段是建造阶段,依赖工业化生产方式的推动,并进一步细分为建材生产、建材运输和营造施工三个分阶段,提出各阶段的碳排放数学模型,对比传统方式和工业化方式在建造阶段带来的碳排放差异^[10];朱家平、沈孝庭等阐述用产业化方式建造住宅,绿色环保节能和维护施工现场自然环境,降低物耗和有害排放以及粉尘与各类污染物的产生,通过施工节能降耗减排分析与测算,显示了产业化住宅的优势和发展方向^[11];黄一如、张磊等从碳排放的角度针对住宅产业化进行研究,在住宅生命周期碳排放评价中引入延迟排放加权平均时间的计算,讨论了物化阶段对总体碳排放的重要性,并对产业化住宅物化阶段减碳效能进行分析,提出采用具有碳储存能力的生物质建材及建设现代竹木结构体系住宅等是实现低碳居住的有效途径^[12]。

一、住宅

研究表明,住宅建筑碳排放在整个社会碳排放中占有很大的比重。各国的住宅建筑能源消耗量占总能耗的比例基本维持在 1/3 左右,伴随这些能耗的碳排放量同样占有较大的份额。以欧盟为例,2002 年住宅的

碳排放量占建筑总碳排放量的 77%，是欧盟的第四大 CO₂ 排放源，占到了总排放量的 10%；在美国，住宅建筑能耗连同个人交通所形成的碳排放量占据了全社会碳排放量的 49%^[13]；在阿联酋，住宅建筑的能耗比例同样较高，为 45.9%^[14]。

在中国，通过数据分析得出住宅中主要能源消耗所产生的 CO₂ 排放量约占全国总排放量的 34.34%^[15]。住宅建筑建设阶段的碳排放比例为 7%，而与建筑相关的热电联产的碳排放比例高达 42%，足可判断住宅建筑碳排放总量的比重之高。同时，住宅建筑能耗占总能耗的比例为 45.9%，亦说明建筑部门的碳排放比例之大^[16]。此外，综合研究表明，建筑的潜在节能比例为 20%~30%，在个别地区此比例会更大，最高可达 50%^[17]。因此，研究住宅建筑碳排放的计算对于整个社会的节能减排具有重要的意义。

据住建部预测，由于我国的快速城市化进程影响，从 2005 年到 2020 年的 15 年间，中国的城市住宅新增面积将达到 150 亿~200 亿 m²，相当于欧盟成员国现有建筑的总面积之和^[18]。仅 2009 年当年已销售商品房面积就达 9.371 3 亿 m²^[19]。如此巨大的建设规模必将使我国的能源供给和碳排放面临严峻考验。在以煤为主的能源结构短期难以改变的情况下，生态环境压力明显增大。

住宅碳排放研究：

于萍、陈效速等从住宅建筑生命周期碳排放的阶段划分和计算两方面入手，介绍了近年来国内外住宅建筑生命周期碳排放的研究进展，得到两点基本认识：一是需要在传统的线性消耗型建筑生命周期中加入循环的概念；二是在计算住宅建筑碳排放时，为了保证其完整性和准确性，应侧重主要排放阶段。同时还应注意科技发展对不同阶段碳排放量变化的影响，以及建筑废物回收和住区绿地的负碳排放效应^[20]。陈滨、孟世荣等利用生命周期评价方法，根据中国煤电链和水电链的温室气体排放系数，计算了各种燃料的温室气体排放系数，并在此基础上，计算出我国住宅中由于家用电器的使用、冬季集中供暖及农村生活能源消费所造成的温室气体排放量。通过数据分析得出住宅中主要能源消耗所产生的碳排放量约占全国总排放量的 34.34%，提出了住宅中碳减排的对策^[21]。刘念雄、汪静等为研究中国城市住区全寿命周期碳排放情况，综合考虑住区住宅建筑排放量和绿地吸收量，提出计算方法，并以北京为例选择典型多层住区单元地块进行计算，讨论减排方法和减排潜力。计算结果表明：在现行规范、现有能源结构和技术水平下，案例住区建筑碳排放量中约 3% 可由住区绿地吸收。通过推行节能措施和利用可再生能源，可实现减排约 50%。而实现住区零排放，则需要从城市整体角度大量依靠郊区森林碳汇资源^[22]。刘博宇选取上海地区住宅平面中的五类典型问题——体形系数问题、平面开槽问题、功能复合问题、厨卫间距问题和卫生间功能问题作为研究对象，尝试利用“节约化”的设计方法，对其进行优化设计，并计算得出相应的碳减排效果^[23]。蔡向荣、王敏权等从建材的生产、运输、建筑施工、正常使用、拆除以及拆除以后废弃物的处理等方面，对住宅建筑的能源消耗、碳排放量及节能减排的措施和潜力进行了分析。分析结果表明，住宅建筑在使用阶段和建材生产阶段的能耗和碳排放量占建筑总能耗和总碳排放量的 90% 以上，而且这两个阶段的能耗和碳排放量

均具有较大的节能减排潜力;其他三个阶段的能耗和碳排放量相对很小^[24]。陈莹、朱熾等基于生命周期评价(LCA)理论,剖析了住宅建筑相关活动能耗与环境排放的影响因素,提出了建材开采生产、建筑施工、运行、维护和建筑拆除固体废物处置等五个阶段的能耗,以及以 CO_2 、 SO_2 、 CO 、 NO_x 和 PM_{10} 等为代表的环境排放的理论计算模型,该模型可为全面认识中国住宅能耗和污染水平提供理论基础^[25]。

二、公建

姜兴坤以我国大型公共建筑碳排放为研究对象,以1996年至2008年的相关数据为样本,对我国大型公共建筑碳排放量、减排潜力及减排成本进行长期(到2050年)预测,并进一步对其碳排放变化影响因素进行分析,最后提出针对我国大型公共建筑的减排路径^[26]。魏小清、李念平等采用复杂系统建模与仿真的思路构建大型公共建筑碳足迹框架体系,此体系有利于发现大型公共建筑能源浪费和碳排放问题的严重程度及主要集中领域,可适用于量化分析单个和各类型大型公共建筑碳足迹^[27]。李鹏、黄继华等将碳足迹引入旅游研究,对酒店住宿产品进行生命周期评价,构建酒店住宿产品碳足迹计算模型,并实证于昆明市6家四星级酒店。结果表明:碳足迹主要来自运营期,约占整个生命周期的72.72%^[28]。

三、现状问题整理

现状问题整理包括以下几个方面:建筑碳排放计量标准、基础研究、建筑碳排放模型研究、低碳建筑评价体系、工业化建筑碳排放,主要内容有:

1. 建筑碳排放计量标准

目前,国际上有七大碳排放计量模型,主要针对林业、农业和城市等,建筑业作为一个碳排放大户,至今为止却没有一个国际上通行的、公认的碳排放计量标准。建筑业由于其特有的建材复杂性、多样性,其碳排放计量问题一直是一个学术难题。原因是影响建筑碳排放的因素太多。

(1) 建筑生命周期各阶段的复杂性:建筑生命周期各阶段碳源较多,而且碳排放的核算边界难以确定,导致低碳建筑的评价工作难以开展,而且不同阶段由不同部门负责,没有统一的管理。

(2) 建筑部门的分散性:建筑不同于其他产品,生命周期较长,期间涉及不同的参与者、利益拥有者,例如:房地产商、建筑师、金融家、工程师、施工单位、使用者,他们分别负责建筑的某一个时期,彼此之间缺乏有效沟通,是低碳建筑发展主要阻力,只有各参与方形成共同遵守的准则,明确各自的任务,才能激发各方的降碳潜力。

(3) 气候的多变性:建筑的碳排放和气候相关,不同气候区域的建筑能耗是不同的,从而导致建筑碳排放的差异,所以低碳建筑评价必须和当地气候相结合。例如,北方地区需供热,冬季的能耗自然比南方温和地区要高,无法用一个数值区分地区间的差异。气候是一个复杂的问题,难以用一两个指标系数去量化,导致无法确定一个基准值来量化低碳建筑,这就增加了不同地区低碳建筑评价的难度。

(4) 建筑类型的多样性:公建、民用不同的建筑类型的低碳建筑评价标准存在明显差异,需分类型、分对象划分基准值。

2. 基础研究

能源碳排放因子:概念模糊,没有把逸散排放和燃烧排放分清楚;关于能源碳排放因子影响因素分析不准确,能源分类不详细;还没有针对热水、蒸汽的碳排放计算方法。

建材碳排放因子:目前关于建材碳排放的研究大都停留在能耗分析上,碳排放因子也大多根据能耗值折算而来的,存在很大误差;建材碳排放还包括建材生产时化学变化导致的温室气体,研究中一般都没有考虑。

建筑能耗的统计:目前我国关于建筑能耗的统计还不够规范,还没有关于某一地区的详细的建筑能耗数据,部分数据是由能耗模拟得到的,可信度不高。

3. 建筑碳排放模型研究

基于生命周期理论进行建筑碳排放的分析,数据的来源都是非常复杂的过程,涉及建筑本体诸多参数,以及能源、材料等多种碳排放因子。目前的建筑生命周期碳排放测算研究成果存在以下问题:

(1) 不同的研究对于生命周期评价的假设与限定条件不同,导致建筑生命周期划分、碳排放系统边界、碳排放清单差别很大,缺乏统一、规范的评价模式与方法。

(2) 建筑生命周期评价中对于建材、施工、运营以及拆除等阶段的各类碳排放因子数据非常缺乏,没有权威部门收集整理及发布相关数据库。

(3) 由于生命周期操作模式不统一、基本数据获取困难,导致各类研究的评价结果间不具可比性,难以建立碳排放定量评价工具。

(4) 一直以来,建筑使用阶段是建筑减碳的重点,也是建筑碳排放研究的重点;而施工阶段作为建设项目全生命周期中最为复杂的阶段,虽然碳排放量占全生命周期比例较小,但从单位时间减碳的角度考虑,施工阶段的潜力很大,应当予以重视。

4. 低碳建筑评价体系

目前的低碳建筑评价体系大部分都是参考绿色建筑评价建立的,还没有形成统一的、科学的低碳评价体系。低碳建筑的评价应该是以定量为基础的,有别于绿色建筑,但现在还没有形成能够量化的评价指标。低碳建筑与地域、环境、能源等因素有关,低碳建筑基准线不是统一值,应针对各地情况进行具体分析,目前还没有针对这方面的研究。

5. 工业化建筑碳排放

尽管工业化的建筑生产方式是大势所趋,同时建筑工业化是重要的CO₂减排方式,但由于我国真正基于市场环境的、相对深入的工业化建筑建设实践才刚刚起步,因此有针对性的相关节能减排研究还不充分甚至存在空白。

四、策略

1. 目标

(1) 整理归纳现有的传统建造方式下的建筑全生命周期碳排放模型。

(2) 建立基于全流程控制的工业化预制装配建筑全生命周期碳排放

评价模型,使核算透明化,实现碳排放计算的可控性和可操作性,从而有效提升低碳减排的潜力和空间。

(3) 以轻型建造系统为例,建立一套完整的轻型建造系统的低碳建筑碳排放评价指南及核算表格系统。

2. 内容

针对国内外研究现状的问题整理及论文的研究目标,本书从下列三个方面展开论述。

(1) 针对本书的研究目标,从基于全生命周期评价理论的建筑碳排放基础研究和传统建造方式的建筑全生命周期碳排放模型两部分对现有的建筑碳排放研究进行整理归纳。其中第一部分主要包括全生命周期评价理论、建筑全生命周期碳排放评价理论以及建筑碳排放基础研究;第二部分对现阶段国内传统建造方式下的建筑全生命周期碳排放进行研究汇总,构建建筑全生命周期碳排放时空矩阵核算模型,分别对建材开采生产阶段、建筑施工阶段、建筑使用和维护阶段、建筑拆除和回收阶段的碳排放来源进行盘查,明确了各阶段碳排放测算的方法和测算清单,汇总全生命周期各阶段的碳排放数据来源及减碳措施;并根据现有研究成果,对不同结构类型、结构材料的建筑碳排放进行分析评估。在以上研究的基础上,对传统建造方式的建筑碳排放模型问题进行整理。

(2) 在对传统建造方式的建筑碳排放模型的研究基础上,对比传统建造方式与工业化生产模式的区别,结合工业化预制装配模式的特点:集成化、工厂化、循环化;通过确定目标范围、清单分析、影响评价和结果解释等四个方面建立一套完整的、基于全流程控制的、系统的工业化预制装配建筑全生命周期碳排放评价模型;之后具体分两部分展开,碳排放核算模型和分析评估;碳排放核算模型包括基础数据库框架、基于 BIM 的工业化建筑数据信息库(参数库、清单库、运行数据库)以及各阶段的计算方法,并重新划分其生命周期的各阶段;分析评估主要针对具体碳源、影响碳排放量的影响因素提出关于工业化预制装配建筑的具体减碳措施。该工业化建筑全生命周期碳排放评价模型使核算透明化、定量化,从而有效提升低碳减排的潜力和空间。

(3) 最后部分以轻型建造系统为例,对轻型可移动铝合金住宅的建筑全生命周期各阶段进行实证分析和研究,包括碳排放核算、影响评价(LCIA)和针对具体碳源的低碳设计,从而建立一套完整的轻型建造系统的低碳建筑碳排放评价指南及核算表格系统。

3. 意义

本书的研究内容反映了建筑行业的时代要求和趋势,对我国低碳建筑的发展具有重大而深远的意义。通过构建全面的工业化预制装配的建筑全生命周期碳排放核算模型,实现了低碳住宅碳排放的定量化、可视化和智能化,从而协助建筑师核算和统计建筑生命周期各个阶段碳排放量,找出生命周期各个阶段造成碳排放影响的直接原因和主要原因,并寻找最有效的改进途径,设计最佳的建筑方案。这不仅为轻型工业化预制装配系统全生命周期的低碳建设提供了技术保障,也将为我国其他低碳建筑的健康、迅速发展提供强大的理论依据和实践指导。