

青岛市民用建筑运行及隐含碳排放特征研究

赵春晴¹, 李彦², 纪爱华³

(1. 青岛大学 经济学院, 青岛 266061; 2. 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心, 北京 100035;

3. 青岛理工大学 建筑与城乡规划学院, 青岛 266033)

摘要:碳排放特征分析是制定“双碳”方案的必要基础。为探究青岛市建筑全生命周期碳排放特征,以国内外碳排放核算标准和方法为基础,结合青岛市数据公开情况,提出适用于青岛市民用建筑碳排放核算的方法,定量分析其运行和隐含碳排放主要特征。结果表明,2023 年青岛市民用建筑运行阶段碳排放总量是 2009 年的 1.8 倍,人均碳排放达到 2.04 t,低于我国北方采暖城市平均水平,2022 年出现峰值。2023 年隐含碳排放总量是 2009 年的 2.5 倍,仍呈现上升趋势。基于青岛市建筑既有节能减排政策及技术的降碳效果评估,针对如期实现碳中和目标提出建议,可为相关管理部门明确建筑领域“双碳”路径提供数据参考和科学依据。

关键词:碳中和;碳排放特征;全生命周期碳排放核算;民用建筑;隐含碳

中图分类号: TU24; X322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)06-0064-08

Characteristics of civil building operation and embodied carbon emissions in Qingdao

ZHAO Chunqing¹, LI Yan², JI Aihua³

(1. School of Economics, Qingdao University, Qingdao 266061, China;

2. National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation, Beijing 100035, China;

3. College of Architecture and Urban Planning, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: Analyzing the characteristics of carbon emissions is essential for developing “dual carbon” strategies. In order to identify the life-cycle carbon emission characteristics of buildings in Qingdao, based on domestic and international carbon emission calculation standards and methods, combined with the available Qingdao data, a suitable method for carbon emissions accounting of civil buildings in Qingdao was proposed to analyze the characteristics of operational and embodied carbon emissions quantitatively. The results indicated that the total carbon emissions from civil buildings in Qingdao during the operational phase in 2023 were 1.8 times higher than those in 2009. Per capita carbon emissions reached 2.04 t, which were below the average level for northern Chinese cities with heating systems. Operational emissions peaked in 2022. Total embodied carbon emissions in 2023 was 2.5 times higher than those in 2009 and continued to increase. Based on the carbon reduction effect evaluation of existing energy-saving and emission reduction actions and technologies for buildings in Qingdao, policy recommendations were proposed to help achieve the carbon neutral target on

收稿日期: 2025-07-01

基金项目: 2023 年度青岛市社会科学规划项目(QDSKL2301088)

作者简介: 赵春晴(1987—), 女, 吉林集安人。博士, 工程师, 主要从事环境规划与管理方面的研究。E-mail: zcq8313@163.com。

schedule. These recommendations provide relevant management departments with data references and a scientific basis for clarifying the “dual carbon” pathway in the building sector.

Key words: carbon neutrality; carbon emission characteristics; life-cycle carbon emission accounting; civil building; embodied carbon

建筑领域是能源消耗和碳排放的主要领域之一,我国建筑碳排放占全国的48.3%^[1],节能降碳任务艰巨。城市是落实“双碳”目标的关键行政单元,识别城市建筑领域碳排放特征,是高效实施减排措施的根本基础。虽然国际上已有一系列建筑碳排放核算标准和方法^[2-6],但以面向建筑工程和企业组织的碳排放核算为主^[7],并无完全适用于城市级区域的建筑碳排放核算方法。《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)明确了民用建筑全生命周期的碳排放核算方法和数据,但更适用于单个项目的核算,难以应用于城市级区域建筑的总量核算。主要原因是建筑结构复杂且生命周期长,碳排放核算对象多,涉及产业范围广,核算过程中既要符合相关标准和方法学要求,同时也需要考虑数据可得性和可靠性。朱丽等^[8]采用能源平衡表拆分法计算了河北省民用建筑碳排放总量情况,但核算范围仅为运行阶段。叶瑞克等^[9]借鉴国内外碳核算方法,采用调研和实地测算数据通过适应性修正的方式核算某高教园区建筑群运行阶段的碳排放。黄蓓佳等^[10]通过收集整理上海市建筑材料和能源消耗数据,应用全生命周期评价方法及碳排放系数法对上海市建筑碳排放进行了核算,该方法核算范围广,数据来源可靠,但由于各城市数据公开情况有所差异,应用该方法时需进行适应性调整。李小冬等^[11]指出,宏观层面建筑部门物化阶段碳排放核算主要包括投入产出法和过程分析法,但存在核算范围定义不准确和数据输入量过大的问题;运行阶段碳排放核算分为自上而下和自下而上两类,但存在不确定性较大、过程复杂、调研数据需求大的问题。因此,在城市级区域开展建筑碳排放核算及特征研究时,需根据核算范围和数据可得性选择适宜的方法和标准,以保障核算的可操作性和结果的可靠性。

青岛市为东部沿海城市和典型的北方城市,建筑用能特点和碳排放特征具有一定的代表性。但目前关于青岛市的碳排放研究以城市总体碳排放为主^[12-14],仅个别学者开展了单体建筑碳排放研究^[15],关注青岛市建筑领域总体碳排放特征的研究匮乏,对于建筑部门降碳措施的制定缺乏理论支撑,在碳中和路径选择中也存在科学依据不足的问题。本文以国内外建筑相关碳排放核算标准和方法为基础,采用青岛市公开数据,对民用建筑历年运行碳排放和隐含碳排放进行了核算和特征分析,为青岛市建筑领域如期实现“双碳”目标提供建议。

1 方法与数据

1.1 建筑运行碳排放核算方法

根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)可知,建筑碳排放为建筑物在与其有关的建筑材料生产及运输、建造及拆除、运行阶段产生的温室气体排放的总和,以CO₂当量表示,核算过程中皆以此为碳排放单位。运行阶段碳排放核算范围包括暖通空调、生活热水、照明、电梯、可再生能源、碳汇系统在建筑运行期间的碳排放,根据各系统各类能源消耗量及其碳排放因子进行核算。在宏观统计上,与建筑相关的能耗表现为第三产业和居民生活消耗能源中扣除交通运输后的能耗。因此,对于城市级区域建筑运行阶段的年碳排放,可基于城市能源消耗统计数据先拆分出建筑相关的能耗数据,再采用碳排放因子法进行计算。

《民用建筑设计统一标准》(GB 50352—2019)将民用建筑定义为供人们居住和进行各种公共活动的建筑的总称,包括住宅、商业、办公等非生产性建筑,商业和办公等非居住功能的建筑统称公共建筑。民用建筑运行过程中主要消耗电力、热力和燃气,根据青岛市数据公开情况,这些能源碳排放核算的数据来源及使用原则如下:

1) 电力消耗数据来自青岛市统计局官方网站,根据全社会用电量统计主体分类拆分出与建筑相关的用电量。住宅建筑用电量体现为居民生活消耗能源;商业建筑用电量体现为商业、住宿和餐饮业消耗能源;办公建筑用电量体现为第三产业消耗能源,包括信息传输、计算机服务和软件业、金融、房地产、商务及

居住服务业、公共事业及管理组织能源消耗。

2) 热力消耗数据来自《中国城市建设统计年鉴》,以集中供热数据为主,根据供热量和供热面积进行核算和分析。

3) 燃气消耗数据来自《青岛统计年鉴》,将家庭用量作为住宅建筑用气碳排放核算基础数据,公共建筑用气数据参考青岛市发改委天然气供应情况官方公布比例(公服商业)进行估算。

1.2 建筑隐含碳排放核算方法

1.2.1 隐含碳定义

《联合国气候变化框架公约》将隐含碳(Embodied Carbon)定义为“商品由原料的取得、制造加工、运输,到成为消费者手中所购买的的过程中所排放的二氧化碳”^[16]。建筑是一类特殊的产品,全生命周期分为筹备、建材生产和运输、建筑施工、运行和拆除阶段。其中,筹备阶段主要包括立项、规划、设计等前期工作;建材生产和运输阶段包括建筑施工所用材料的生产过程,及从建材生产地运输至施工地的过程;建筑施工阶段指施工企业开工到竣工的过程;运行阶段从住户入住开始直至建筑报废,包括建筑使用、维护和改造等过程;拆除阶段指建筑报废后的拆除、建筑垃圾处理等过程。建筑与其他产品的差别之处在于,建筑竣工后即形成普遍意义上的产品,整个物化过程的碳排放为产品的隐含碳。核算范围应包含建筑竣工之前所有阶段的碳排放。但由于筹备阶段的碳排放缺乏核算数据基础,且比重较小,本文仅核算建材生产和运输、建筑施工阶段的碳排放。

1.2.2 建筑材料生产和运输隐含碳核算方法

建筑材料主要包括主体结构材料、围护结构材料、构件和部品等,隐含碳核算过程中选择的建材总质量不应低于所有建材总质量的95%,在此前提下,质量比重小于0.1%的建材可不计算。

建材生产和运输隐含碳核算过程中需要统计各类建材的消耗量和运输距离。在单个建筑项目的核算中,可以从施工方获取详细的材料清单和采购地址信息,实现较为准确的计算。但是在城市级区域建筑核算中难以获得这些数据,且建筑施工周期平均为3年左右,在宏观统计中当年建筑业材料消耗量与竣工面积不对应,无法获得竣工建筑的建材消耗量,统计数据中也无建材运输距离数据。因此,在核算青岛市民用建筑建材生产和运输隐含碳过程中,根据可得数据对《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)中相关核算方法进行了调整,采用宏观统计数据与微观研究数据相结合的方式核算。

1) 建材生产隐含碳核算方法。以统计数据中当年建筑竣工面积为基础,结合建材使用强度(即建筑单位面积使用的建材量)^[17]和建材生产碳排放因子进行核算,公式如下:

$$C_{JC} = \sum_{i=1}^m [A_{JGi} \cdot \sum_{j=1}^n (Q_{ij} F_{JCj})] \quad (1)$$

式中: C_{JC} 为建材生产隐含碳排放,kg; A_{JGi} 为当年竣工的*i*类建筑面积, m^2 ,数据来自《青岛统计年鉴》; Q_{ij} 为*i*类建筑*j*类建材的使用强度, kg/m^2 ; F_{JCj} 为*j*类建材生产碳排放因子, kg/kg ,按《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)取值。

本文核算的建材类型包括钢材、水泥、混凝土、砖材、砂和砾石,这些类别建材的总质量占建筑所有建材总质量的95%以上。各类建筑的建材使用强度按表1取值。

2) 建材运输隐含碳核算方法。以当年建筑竣工面积的建材用量为基础,根据建材运输距离及单位运输距离碳排放进行计算,公式如下:

$$C_{YS} = \sum_{j=1}^n Q_j D_j F_{YSj} \quad (2)$$

式中: C_{YS} 为建材运输隐含碳排放,kg; Q_j 为*j*类建材用量,kg; D_j 为*j*类建材的平均运输距离,km; F_{YSj} 为单位质量的*j*类建材运输1km的碳排放, $kg/(kg \cdot km)$ 。

1.2.3 建筑施工隐含碳核算方法

建筑施工阶段隐含碳核算包括完成各分部施工产生的碳排放和各项措施项目实施过程产生的碳排

表1 不同类型建筑的建材使用强度^[18] kg/m^2

建筑类型	钢材	水泥	混凝土	砖材	砂	砾石
住宅建筑	56	199	708	330	541	321
办公建筑	86	219	717	326	346	266
商业建筑	103	239	861	389	361	364

放,城市级区域核算中以建筑业能源消耗统计数据为基础,青岛市相关数据来自《青岛统计年鉴》。

2 结果与分析

2.1 青岛市民用建筑历年运行碳排放

2009年,青岛市民用建筑运行阶段碳排放为1126万t,人均碳排放为1.32t(图1)。随着存量建筑面积不断增加及生活水平提高,2023年运行碳排放总量增加到2111万t,是2009年的1.87倍,人均碳排放达到2.04t,但低于我国北方采暖城市平均水平(2.33t/人^[19])。其中,用电碳排放比重最高,其次为用热碳排放、用气碳排放。一方面因为电力是支撑建筑各系统正常运行的主要能源形式,另一方面因为我国电力仍以火电为主,单位电力生产的碳排放水平较高。

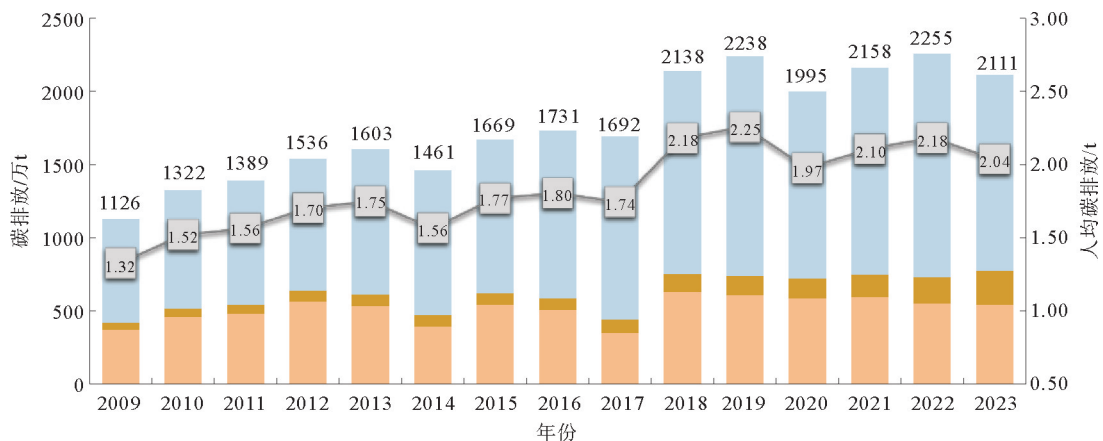


图1 青岛市民用建筑运行碳排放（2009—2023年）

用热；用气；用电；人均

2009—2022年,青岛市民用建筑总用电量呈现上升趋势,2023年较2022年有所下降,为195亿kW·h,是2009年的2.57倍,如图2所示,图中百分数为不同类型建筑用电量占总量的比重。2009年,住宅建筑用电量比重为57%,高于公共建筑。但近年来,住宅建筑用电量比重呈现下降趋势,2023年降低到45%。这与青岛市产业结构的调整有一定关系,第三产业生产总值占比从2010年的48.7%上升至2023年的63.5%,增加了公共建筑的电力消耗。

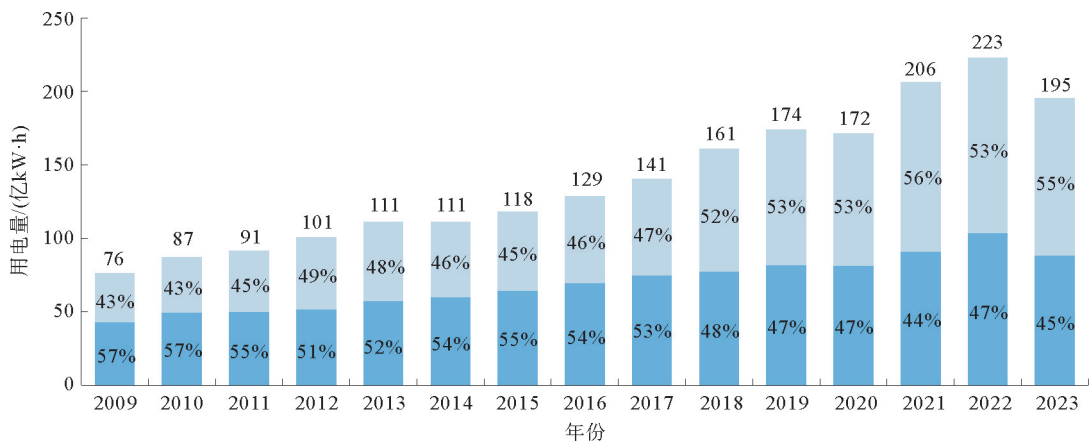


图2 青岛市民用建筑用电量（2009—2023年）

住宅建筑；公共建筑

受地域和气候特征影响,青岛市民用建筑运行碳排放的第二大来源是建筑供热。2009年,青岛市集中供热建筑的面积为5871万m²,总用热量为3958万GJ。青岛市注重民生工程建设,不断加快热源发

展,2023年集中供热的总建筑面积达2.9亿 m^2 ,建筑用热量达到7578万GJ(图3)。与此同时,充分利用“气热一体化”优势,推进以天然气“两联供”“三联供”及热泵为主要形式的清洁能源项目建设,不断提高清洁能源供热份额,促进节能减排,实现由“供好热”到“绿色供”的转变,助推青岛能源结构转型优化。因此,单位建筑面积用热量呈现出不断下降趋势,从2009年的 $0.67\text{GJ}/\text{m}^2$ 下降到2023年的 $0.25\text{GJ}/\text{m}^2$ 。

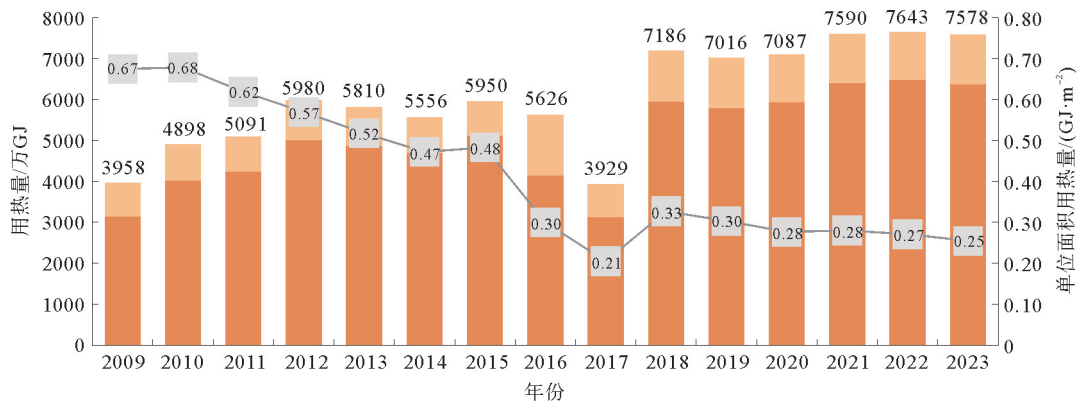


图3 青岛市民用建筑用热量（2009—2023年）

■ 住宅建筑；■ 公共建筑；— 单位面积

建筑消耗的天然气和液化气主要用于炊事,碳排放占建筑总碳排放的比重不高。2009—2023年,青岛市民用建筑运行阶段用气碳排放占总碳排放的平均比重为6%,其中住宅建筑用气量平均比重为51%,略高于公共建筑。青岛市从2003年开始进入天然气时代,逐步从人工煤气转换为天然气,到2023年总用气量达10.8亿 m^3 ,其中住宅建筑用气量占比57%,如图4所示,图中百分数为不同类型建筑用气量占总量的比重。

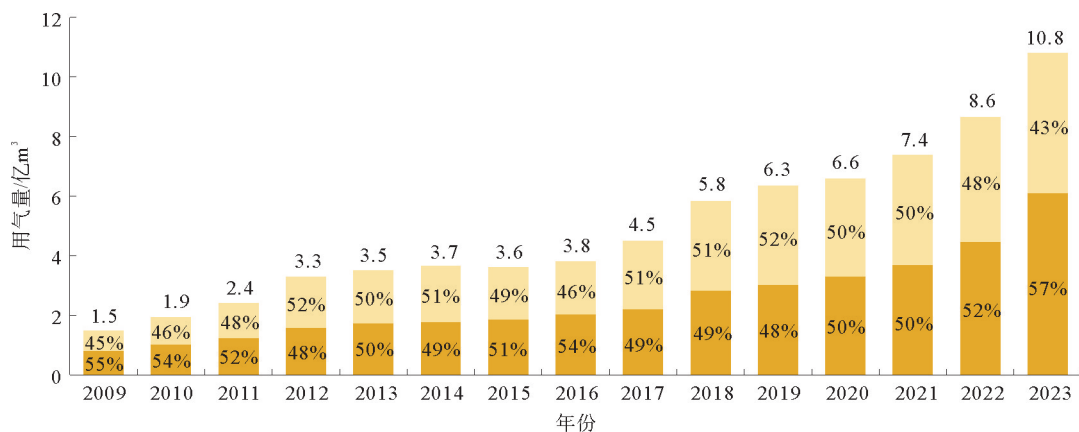


图4 青岛市民用建筑用气量（2009—2023年）

■ 住宅建筑；■ 公共建筑

2.2 青岛市民用建筑历年隐含碳排放

2023年,青岛市民用建筑隐含碳排放达到1630万t,约是2009年总量的2.5倍,如图5所示,图中百分数为不同阶段隐含碳占总量的比重,其中建材生产隐含碳比重最高,其次为建材运输、建筑施工隐含碳,且每年比重分配变化不大。

2009—2023年,青岛市民用建筑建材生产隐含碳总增长率呈现波动变化趋势,排放总量暂未达到峰值,如图6所示,图中百分数为不同类型建筑隐含碳占总量的比重。2016—2020年间,建材生产隐含碳总量平均增长率为6%,高于全国平均值2%^[19]。2020年受疫情影响,总量增长率为负值,2021年疫情后总增长率小于2019年,变化趋于平缓。住宅建筑建材生产隐含碳比重一直处于较高水平,2009—2023年平

均比重为 85%。

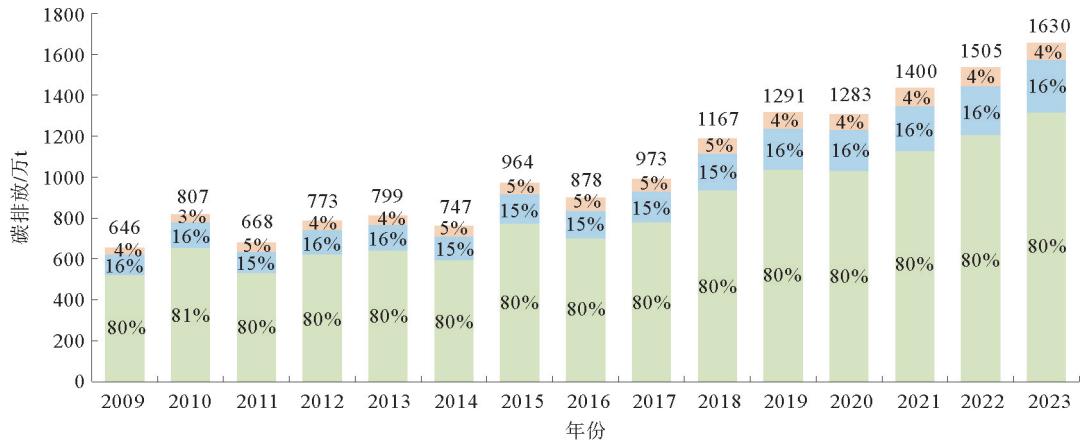


图 5 青岛市民用建筑隐含碳排放 (2009—2023年)

■ 建材生产; ■ 建材运输; ■ 建筑施工

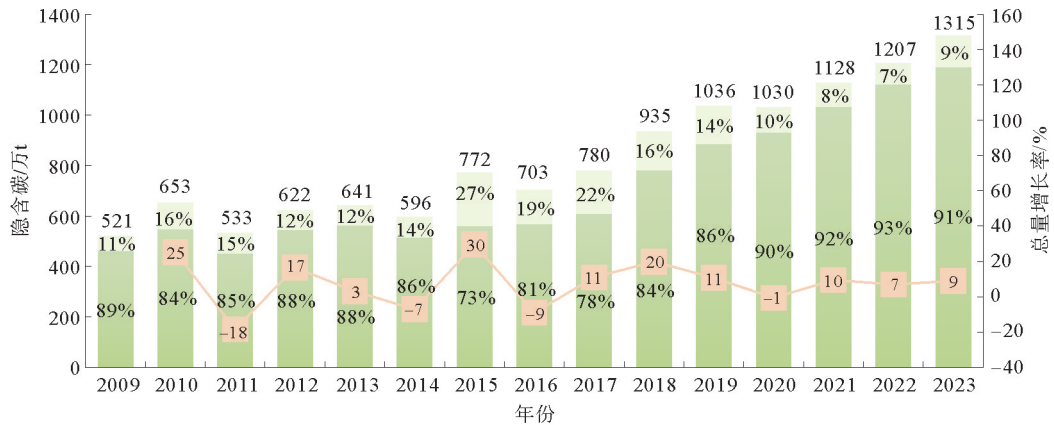


图 6 青岛市民用建筑建材生产隐含碳 (2009—2023年)

■ 住宅建筑; ■ 公共建筑; — 总量增长率

按建材类别分析,水泥生产隐含碳最多,其次为钢材、混凝土、砖材、砂和砾石(图 7(a))。建材运输隐含碳中,砖材运输产生的隐含碳最多,其次为混凝土和砂,钢材运输隐含碳最少(图 7(b))。由于难以获得各类建材采购地信息,在核算过程中参考《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2019)中第 7.1.10 条进行取值,假设平均运输距离为 500 km,影响本文建材运输隐含碳核算结果的主要因素是建材消耗量。

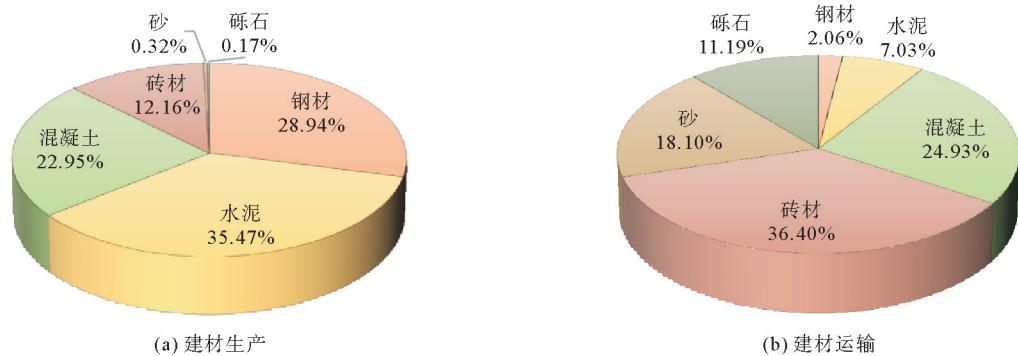


图 7 青岛民用建筑建材生产及运输隐含碳排放比重分布 (2023 年)

3 青岛市民用建筑碳中和路径建议

青岛市从“十一五”开始高度重视建筑节能工作,“十二五”全面推广节能建筑,“十三五”将建筑节能与绿色建筑统一规划发展,“十四五”期间以“双碳”目标为指引,进一步提高了建筑能源资源利用效率,减少碳排放。2023年青岛市民用建筑运行碳排放低于2022年,在既有节能减排政策下,2022年有望成为碳达峰点。但隐含碳排放总量还处于上升阶段,亟须进一步强化建材生产、运输和建筑施工阶段的降碳政策,尽快实现碳达峰目标。为确保青岛市民用建筑碳排放如期实现碳中和目标,结合碳排放特征及既有政策目标,基于建筑节能降碳技术的减碳效果分析和评估,提出以下政策建议:

1) 针对运行阶段降碳,重点关注建筑用电碳排放,控制办公建筑用电增长,提高公共建筑节能标准,加快推进既有公共建筑节能改造;提高绿色建筑品质,争取尽早将新建建筑中二星级绿色建筑占比提高到70%,三星级绿色建筑占比提高到25%;大力推广可再生能源建筑,在保持目前可再生能源建筑面积增速的基础上,从2036年起持续提高光伏、光热、地源热泵建筑新增面积要求;实现超低能耗建筑的规模化发展,在既定发展目标的基础上,不断提高每年新增超低能耗建筑的面积;加速城市低碳供热改革,持续降低城市供热管网热损失比,逐步开展零碳供热改革,尽早实现供热能源的100%新能源替代;明确建筑电气化发展的量化目标,分三个阶段实现建筑用气终端电气化率100%的目标;充分利用风能、海水能等其他可再生能源进行建筑用能替代,鼓励各类新能源技术的研发创新。

2) 针对建筑隐含碳排放,尽快实现装配式建筑普及化、低碳化发展,不断提高装配式建筑占城镇新建建筑的比重,在2050年之前达到100%,通过可再生能源替代、采用再生原材料等措施提高装配式建筑生产的低碳水平;加强建材生产隐含碳控制,不断提高绿色建筑再生建材应用比重要求,到2035年,再生建材应用比重不低于30%,之后不断提高每年应用比重要求;加快提升绿色施工低碳水平,明确绿色施工减碳标准;合理规划建材运输车辆的电气化替代,到2035年运输车辆的电气化率至少为5%;鼓励使用本地建材,降低砖材、混凝土等质量较大的建材在运输阶段的碳排放。

4 结束语

建筑是社会经济系统运行的重要载体,在保障发展的同时也产生了大量的碳排放,是实现“双碳”目标的关键减排领域。城市是落实减排措施的最优单元,明确城市级区域建筑的碳排放核算方法是充分识别排放特征和制定减排路径的重要基础。青岛市建筑节能降碳工作基础扎实,碳排放特征在我国北方地区具有一定代表性,结合特征分析进一步开展降碳路径研究,对于实现“双碳”目标具有重要作用,可为其他城市建筑的低碳发展提供经验参考。

参考文献(References):

- [1] 中国建筑节能协会. 中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024年)[R/OL]. (2025-01-18)[2025-07-01]. https://mp.weixin.qq.com/s/uKfHMuDSWGCl049_B8xeNA.
China Association of Building Energy Efficiency. Research report on carbon emissions in the field of urban and rural development in China (2024)[R/OL]. (2025-01-18)[2025-07-01]. https://mp.weixin.qq.com/s/uKfHMuDSWGCl049_B8xeNA.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Paris: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1997.
- [3] World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development. The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard[R]. Washington, DC: World Resources Institute, 1998.
- [4] European Committee for Standardization. EN 15978: 2011, Sustainability of construction works: Assessment of environmental performance of buildings calculation method[R]. Brussels: European Committee for Standardization, 2011.
- [5] International Organization for Standardization. ISO 16745-1: 2017, Sustainability in buildings and civil engineering works Carbon metric of an existing building during use stage Part 1: Calculation, reporting and communication[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
- [6] International Organization for Standardization. ISO 16745-2: 2017, Sustainability in buildings and civil engineering works Carbon metric of an existing building during use stage Part 2: Verification[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

- [7] 孙德宇,徐伟,高雨识,等. 建筑碳排放计算与核算标准体系研究[J]. 暖通空调,2025,55(6):129-137.
SUN Deyu,XU Wei,GAO Yushi, et al. Research on calculation and accounting standard system of building carbon emissions[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2025,55(6):129-137.
- [8] 朱丽,李明杰,严哲星,等. 考虑电力调配的省级民用建筑碳排放核算方法研究:以河北省为例[J]. 建筑节能(中英文),2025,53(2):7-12.
ZHU Li,LI Mingjie,YAN Zhexing, et al. Carbon emission accounting method of provincial civil buildings considering power allocation: A case study on Hebei Province[J]. Building Energy Efficiency,2025,53(2):7-12.
- [9] 叶瑞克,李亦唯,高壮飞,等. 城市建筑群碳排放核算模型构建与实证研究[J]. 资源开发与市场,2017,33(11):1295-1299.
YE Ruike,LI Yiwei,GAO Zhuangfei, et al. Urban building group carbon emission accounting model construct and empirical research[J]. Resource Development & Market,2017,33(11):1295-1299.
- [10] 黄蓓佳,崔航,宋嘉玲,等. 上海市建筑碳排放核算研究[J]. 上海理工大学学报,2022,44(4):343-350.
HUANG Beijia,CUI Hang,SONG Jialing, et al. Building carbon emission evaluation of Shanghai[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology,2022,44(4):343-350.
- [11] 李小冬,朱辰. 我国建筑碳排放核算及影响因素研究综述[J]. 安全与环境学报,2020,20(1):317-327.
LI Xiaodong,ZHU Chen. Summary of research on account of carbon emission in building industry and analysis of its influential factors[J]. Journal of Safety and Environment,2020,20(1):317-327.
- [12] 单孟文,李婷,王映然,等. 2000—2020年青岛市区碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 水土保持通报,2024,44(3):367-378.
SHAN Mengwen,LI Ting,WANG Yingran, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of regional carbon emission in Qingdao City during 2000—2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2024,44(3):367-378.
- [13] 王乃春,徐翠蓉. 基于STIRPAT模型的青岛市碳排放影响因素分析[J]. 青岛大学学报(自然科学版),2016,29(2):90-94.
WANG Naichun,XU Cuirong. Analysis of factors affecting carbon emissions in Qingdao based on STIRPAT model[J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition),2016,29(2):90-94.
- [14] 李闻卓,郭健翔,王心竹,等. 基于扩展STIRPAT模型与情景分析法的青岛市能源消费碳排放预测及减碳措施研究[J]. 青岛理工大学学报,2023,44(3):74-82.
LI Wenzhuo,GUO Jianxiang,WANG Xinzhu, et al. Research on energy consumption carbon emission forecasting and carbon reduction strategies in Qingdao based on extended STIRPAT model and scenario analysis method[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2023,44(3):74-82.
- [15] 田力男,刘平平,郝楠,等. 基于青岛市碳排放 BIM 审查系统的建筑能耗及碳排放分析[J]. 土木建筑工程信息技术,2023,15(5):36-39.
TIAN Linan,LIU Pingping,HAO Nan, et al. Analysis of building energy consumption and carbon emission based on Qingdao's carbon emission BIM review system[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture,2023,15(5):36-39.
- [16] 韩玉晶. 中国与RCEP成员国贸易隐含碳排放与转移研究[D]. 昆明:云南财经大学,2023.
HAN Yujing. A study on carbon emissions and transfer implied by trade between China and RCEP member countries[J]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics,2023.
- [17] HUANG B,CHEN Y,MC DOWALL W, et al. Embodied GHG emissions of building materials in Shanghai[J]. Journal of Cleaner Production,2019,210:777-785.
- [18] 施庆伟. 中国建筑部门碳排放达峰模拟与减排责任分担研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
SHI Qingwei. Peaking simulation and sharing the mitigation burden of carbon emissions in the Chinese building sector [D]. Chongqing:Chongqing University,2021.
- [19] 中国建筑节能协会,重庆大学. 2023 中国建筑与城市基础设施碳排放研究报告[R/OL]. (2023-12-27)[2025-07-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/k47vqiVYVXd0z4i7ILk3KA>.
China Association of Building Energy Efficiency,Chongqing University. Research report on carbon emissions of building and urban infrastructure in China (2023) [R/OL]. (2023-12-27)[2025-07-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/k47vqiVYVXd0z4i7ILk3KA>.

(责任编辑 赵金环;英文校审 徐飞)