

基于全生命周期的校园碳排放评估模型

董芝钰

青海大学, 青海 西宁 810016

DOI:10.61369/UAID.2026020029

摘 要 : 高校有着较大的节能减排潜力, 是响应“碳达峰、碳中和”发展目标的重要组成部分。大学校园因其强有力的顶层决策能力和非营利的公益属性, 成为研究碳中和核算的理想场所。通过生命周期评价方法对大学校园碳排放进行了全面核算和分析, 计算校园的碳平衡清单。经计算, 校园全生命周期碳排放量为278186.6t/m²。基于分析结果的量化评估, 建议降低建筑碳排放, 提升能源利用率等措施, 进一步优化校园环境, 促进碳减排, 以期建成绿色校园。

关 键 词 : 全生命周期; 校园碳排放; 评估模型

Campus Carbon Emission Assessment Model Based on the Full Life Cycle

Dong Zhiyu

Qinghai University, Xining, Qinghai 810016

Abstract : Universities possess significant potential for energy conservation and emission reduction, serving as a crucial component in responding to the development goals of "carbon peaking and carbon neutrality." With their strong top-level decision-making capabilities and non-profit public welfare attributes, university campuses provide an ideal setting for researching carbon neutrality accounting. This study employs a life cycle assessment method to comprehensively account for and analyze carbon emissions on university campuses, calculating the campus carbon balance inventory. The calculated total carbon emissions over the campus's full life cycle amount to 278,186.6 t/m². Based on the quantitative assessment of the analysis results, it is recommended to reduce building carbon emissions, enhance energy efficiency, and implement other measures to further optimize the campus environment, promote carbon sink reduction, and strive to establish a green campus.

Keywords : full life cycle; campus carbon emissions; evaluation model

引言

全球变暖导致海平面上升和风暴等极端天气事件频发, 对人类生存构成威胁^[1-2]。二氧化碳加剧了温室效应, 破坏了地球的辐射平衡, 导致全球平均气温上升^[3-4]。随着我国“双碳”战略的深入推进, 解决高等教育机构内的碳达峰和碳中和问题具有重要的意义。

大学校园因其独特的组织架构和运营模式, 被视为开展碳中和实践与研究的理想场所^[5]。在分析大学的碳排放时, 生命周期评估(LCA)方法的应用为理解和管理校园建筑整个生命周期内的排放提供了一个全面的框架^[6-10]。研究表明, 运营阶段的能源消耗占建筑物生命周期碳排放量的最大份额, 约为85.4%, 而施工和拆除阶段的能源消耗分别占12.6%和2%左右。这强调了在运营阶段关注减少排放的重要性, 同时也承认非运营阶段排放的影响^[11-14]。LCA分析表明, 校园碳排放主要由间接排放组成^[15], 其中电力消耗是最大的单一贡献者^[16-19]。运营阶段管理、非住宅建筑的结构和使用^[20]、个人行为模式和校园空间规划等因素都会显著影响大学的碳足迹。一般来说, 减排和碳汇是实现碳中和的核心支柱^[21-22]。通过整合遥感和大数据分析等工具^[23], 学者们已经能够确定校园碳排放和碳封存的关键驱动因素^[24-27], 确定有效的缓解策略^[28-30], 并制定可行的气候应对计划^[31-32]。为了支持这些工作, 还必须建立强大的数据收集和监测系统, 从而能够更准确地跟踪和管理校园排放^[33]。

综上所述, 现有的校园碳排放研究主要集中在校园碳排放的概念化、评价指标、测量方法的制定以及综合实施计划的设计。然而, 在评估具体缓解措施的预期结果和建立实现碳中和的系统性综合框架方面, 仍然存在明显差距。本研究通过核算位于中国的一所大学校园的碳排放来解决这些差距, 该地区夏季温暖, 冬季寒冷。通过查阅档案和实地调研, 以排放因子法定量分析校园全生命周期碳排放, 分析校园碳排放特点以及校园减碳潜力, 为未来高校校园低碳建设提供一定借鉴。

一、研究与方法

(一) 生命周期碳排放评估框架

从生命周期视角出发,建筑碳排放可按材料获取与准备—施工建造—运行使用—拆除处置四个环节划分。基于阶段叠加思想,生命周期总碳排放可写为:

$$C_{LCA} = C_{pre} + C_{con} + C_{ope} + C_{dem} \quad (1)$$

其中, C_{LCA} 表示建筑全生命周期碳排放总量; C_{pre} 、 C_{con} 、 C_{ope} 、 C_{dem} 依次为建材准备、施工、运营与拆除阶段碳排放。本文碳排放计量单位统一采用 kg CO_2 。

1. 建材准备阶段(生产+运输)

建材准备阶段通常包含两类排放来源:一是建材生产过程(原材料开采、加工制造等)引起的排放;二是建材运输过程(运输能耗)导致的排放。考虑到建筑材料种类繁多、逐项核算成本高且数据不易完整获得,本文参考王幼松^[38]关于主要排放贡献材料的结论,并结合现场调研可获取数据,选取钢材、混凝土、砂浆、水泥、金属与砌块六类材料作为代表性核算对象。

生产端碳排放由材料用量与相应排放因子折算得到;运输端碳排放与运输方式及运输距离相关。为降低运输边界的复杂性,本文统一假设运输方式为重型汽油货车。运输距离依据文献取值:混凝土平均运输距离取 40 km,其余材料平均运输距离取 500 km^[39]。

该阶段碳排放可表示为:

$$\begin{aligned} C_{pre} &= C_{manu} + C_{trans} \\ C_{manu} &= \sum_i \alpha_i m_i (1 - \beta_i) \\ C_{trans} &= \sum_{i,j} m_i l_{ij} Tc_j \end{aligned}$$

式中: C_{manu} 为材料生产碳排放; C_{trans} 为材料运输碳排放; m_i 为第 i 类材料用量 (kg); α_i 为对应生产排放因子 ($\text{kg CO}_2/\text{kg}$); β_i 为材料回收系数; l_{ij} 为材料 i 在运输方式 j 下的运输距离 (km); Tc_j 为运输方式 j 的单位质量—单位距离排放系数 ($\text{kg CO}_2/\text{t} \cdot \text{km}$)。

2. 建筑施工阶段

施工阶段排放主要来自施工现场活动的能耗。本文采用“活动量 × 能耗强度 × 排放因子”的核算思路,将典型工序(如土方作业、预拌混凝土浇筑与吊装、振捣压实、钢筋加工与加固以及现场照明等)对应的燃料/电力消耗折算为碳排放。施工阶段能源类型限定为柴油与电力。施工阶段碳排放模型为:

$$C_{con} = \sum_{i=1}^N Q_i \times R_i \times fc_i$$

式中: N 为施工活动类型数量; Q_i 表示第 i 类活动的工程量/次数; R_i 为活动 i 的单位工程量能耗(或对应的燃料/电力消耗量); fc_i 为活动 i 所使用能源的碳排放系数。

3. 建筑运营阶段

运营阶段碳排放与建筑运行期能源消费紧密相关,通常是全生命周期的重要组成部分。本文在运营阶段的建模中,重点纳入两类能耗:

(1) 日常用能:依据建筑能耗数据或能耗强度参数折算;

(2) 供暖/制冷用能:通过估算暖通系统需求对应的能源消耗,并乘以排放因子得到碳排放。

运营阶段碳排放表达式为:

$$C_{ope} = \sum_n \delta_n \times Q_n \times Y$$

式中: δ_n 为第 n 种能源排放因子; Q_n 为该能源年消耗量; Y 为建筑使用年限。

4. 拆除阶段

拆除阶段在核算逻辑上可参照施工阶段,即依据拆除作业过程的能耗折算排放。但鉴于拆除阶段公开研究与参数体系相对不足,且项目层面数据难以完整获取,本文参考日本建筑学会 AIJ-LCA 的处理方法,将拆除阶段碳排放近似设定为材料准备阶段与施工阶段之和的 10%^[40]:

$$C_{dem} = (C_{pre} + C_{con}) \times 10$$

二、案例

(一) 项目概述

本研究从生命周期角度出发,以大学校园建筑为研究对象,基于数据可获得性,选择大学各校区典型的四类不同服务功能校园公共建筑,基本上涵盖了校园建筑服务功能,探讨校园建筑碳排放量。

(二) 物化阶段碳排放计算

1. 建筑材料准备阶段

基于材料工程量清单,依据现有的材料纳入计算标准(纳入碳排放计算的建筑材料的总重量应占建筑中建筑耗材总重量的 80%—95%为宜)。建筑材料生产过程中不计材料回收系数的总排放量为 234793.7 吨,

根据《中国交通运输年鉴 2018》,根据建筑材料清单核对应后,混凝土的默认运输距离值应 40km,其他建材的默认运输距离值应为 500km,建材运输阶段碳排放总量为 33376.87t。

2. 建筑施工阶段

施工阶段的排放量是从项目清单中列出的机械和能源消耗中推断出来的。通过查阅建筑碳排放指标并应用碳排放因子,我们得到的总排放量为 2362.06kg。

(三) 运行阶段碳排放

运营阶段碳排放包括照明、供暖与设备三方面。建筑运营阶段碳排放强度大小顺序依次为:宿舍楼、实验楼、办公楼、教学楼。对于所有建筑,运营阶段碳排放皆以供暖为主,其次为电力消费,具体受建筑功能影响有不同的分布情况。

表 3.2 运营阶段碳排放（50 年）

建筑名称	办公楼	实验楼	宿舍楼	教学楼
碳排放 (kgCO ₂ /m ²)	114.7457249	155.9656	317.92671	98.7505

（四）建筑拆除阶段

根据文献检索，以及实例研究，得到建筑拆除阶段碳排放量占材料生产阶段的 7.8–10.1%，本次计算按照 10% 进行计算。参考 3.3.3 数据，计算出为 23479.37tCO₂。

本文将建筑拆除时使用机械设备产生的碳排放和建筑废料运输过程中产生的碳排放按照以建材准备阶段和建筑施工阶段的 10% 进行估算。参考 3.2 数据，计算出为 2359.04tCO₂。综上所述，建筑生命终止阶段总碳排放量为 25838.41tCO₂。

三、构建碳中和路径

基于上述生命周期核算结果，校园碳中和的实现路径应从能源体系优化、基础设施更新、以及生态碳汇提升三个维度深度重构。这不仅是技术层面的迭代，更是治理逻辑的系统性变革。

（一）能源管理体系的精细化与电耗负荷压降

校园用电负荷集中在照明、暖通、实验设备及后勤加热环节。针对当前普遍存在的“长时间运行、按需不足”管理问题，路径构建的第一步是全方位的能源资源管理平台。

（1）设备端的高效替代：2024 年国家对于制冷、供暖及照明器具的能效标准进行了全面修订升级。校园应分分期分批完成高效照明改造，并逐步淘汰实验实训及供电系统中能耗偏高的老旧设备。

（2）智能化调控策略：利用传感器和智能算法，根据教室预约情况、环境亮度及室内外温差，动态调整空调设定值与照明开启状态。这不仅能减少无效能耗，还能通过需求侧管理参与电力系统的调峰辅助服务。

（3）数字化计量与对标：完善学校能源资源计量器具配置，建立能耗水耗对标管理制度，鼓励开展节能节水诊断挖潜工作，从而将碳减排目标转化为可量化、可考核的绩效指标。

（二）基础设施的低碳化运行与更新

随着高校发展模式由增量扩张转向内涵提升，既有建筑的节能改造成为减排的主战场。

（1）热泵技术与清洁取暖：传统燃气锅炉正逐步被地源热泵、空气源热泵及二氧化碳热泵取代。特别是在北方供暖地区，

地源热泵技术的应用可大幅提升能源供应的可靠性与低碳性。2025 年地热能清洁供暖面积的预期增长目标为 580 万平方米。

（2）建筑光伏一体化（BIPV）的应用：校园内的大量建筑屋顶与立面是天然的发电单元。2024 年的政策导向明确要求新建公共建筑优先推广 BIPV 建设。到 2025 年，城市建筑可再生能源替代率目标应超过 8%，这要求校园在规划阶段即实现光伏与建筑结构的深度融合。

（3）数据中心能效提升：针对校内智算中心及机房，高性能喷淋液冷技术等新型散热方案的引入，能显著降低 PUE（能源使用效率）值。最新的标准要求既有数据中心通过改造使 PUE 不高于 1.4，而新建项目则不应高于 1.2。

（三）生态型校园格局与自然增汇贡献

植被碳汇是校园实现碳中和的“最后一块拼图”。通过科学规划绿地，校园可以实现显著的自然减排效应。

（1）碳汇量的科学评估：2024 年发布的《城市森林碳储量与碳汇量评估技术规范》为校园绿地提供了精确的量化工具。评估流程集成了地面调查、无人机航拍及遥感监测，优先度排序为：遥感 > 涡度相关 > 地面调查。

（2）关键计量参数的应用：在核算乔木生物量时，应采用针对本地树种（如相思、桉树、木荷等）的异速生长方程，并结合生物量扩展因子（BEF）进行折算。土壤碳储量的评估标准深度宜设为 100 cm，以全面捕捉生态系统的固碳潜力。

（3）景观设计的碳良知策略：在校园景观规划中，应统筹行道树、林地与草坪的搭配，增加屋顶绿化与垂直绿化，利用自然景观水体提升生态系统服务功能。通过选用高固碳率的树种并建立维护管养的长效机制，校园能够持续增强其生态碳汇能力。

四、结语

低碳校园是高校节能发展追求的目标。当前，我们要抢抓低碳经济发展的良好机遇，全方位做好节能减排工作，积极打造绿色低碳校园环境，营造低碳校园文化。在实现碳达峰与碳中和目标过程中，可通过加强能源管理、充分利用可再生能源、推动生态型校园建设以及加强环保教育、政策引领等技术措施和管理措施的实施，实现校园碳排放的有效控制，努力创建文化、管理、科技全方位一体化的现代高校低碳校园。

参考文献

[1] P.A. Mirzaei, F. Haghighat, Approaches to study urban heat island – abilities and limitations, Build. Environ. 45 (10) (2010) 2192 – 2201.
[2] Y. Lou, W.M. Jayantha, L. Shen, Z. Liu, T. Shu, The application of low-carbon city (LCC) indicators—a comparison between academia and practice, Sustain. Cities Soc. 51 (2019).
[3] J. Huang, P. Jones, A. Zhang, R. Peng, X. Li, P.W. Chan, Urban building energy and climate (UrBEC) simulation: example application and field evaluation in Sai Ying Pun, Hong Kong, Energy Build. 207 (2020) 109580.

- [4] S. Kato, Y. Yamaguchi, Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ data: separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux, *Remote Sens. Environ.* 99 (1–2) (2005) 44 – 54.
- [5] X. Li, H. Tan, A. Rackes, Carbon footprint analysis of student behavior for a sustainable university campus in China, *J. Clean. Prod.* 106 (nov.1) (2015) 97 – 108.
- [6] X. Wang, G. Wang, T. Chen, Z. Zeng, C.K. Heng, Low-carbon city and its future research trends: a bibliometric analysis and systematic review, *Sustain. Cities Soc.* 90 (2023).
- [7] W.L. Shang, Z. Lv, Low carbon technology for carbon neutrality in sustainable cities: a survey, *Sustain. Cities Soc.* 92 (2023).
- [8] J. Basbagill, F. Flager, M. Lepech, M. Fischer, Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts, *Build. Environ.* 60 (FEB) (2013) 81 – 92.
- [9] Q. Jiang, J. Kurnitski, Performance based core sustainability metrics for university campuses developing towards climate neutrality: a robust PICSOU framework, *Sustain. Cities Soc.* 97 (2023).
- [10] J. Kiehle, M. Kopsakangas-Savolainen, M. Hilli, E. Pongr'acz, Carbon footprint at institutions of higher education: the case of the University of Oulu, *J. Environ. Manage* 329 (2023).
- [11] I. Sartori, A.G. Hestnes, Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: a review article, *Energy Build.* 39 (3) (2007) 249 – 257.
- [12] C. Peng, Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling, *J. Clean. Prod.* 112 (JAN.20PT.1) (2016) 453 – 465.
- [13] C. Chen, L. Bi, Study on spatio-temporal changes and driving factors of carbon emissions at the building operation stage— a case study of China, *Build. Environ.* 219 (2022).
- [14] M. Fouquet, A. Levasseur, M. Margni, A. Lebert, S. Lasvaux, B. Souyri, C. Buh'e, M. Woloszyn, Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: application to biogenic carbon and global warming assessment, *Build. Environ.* 90 (2015) 51 – 59.
- [15] M. Var'on-Hoyos, J. Osorio-Tejada, T. Morales-Pinz'on, Carbon footprint of a university campus from Colombia, *Carbon Manag.* 12 (1) (2021) 93 – 107.
- [16] A. Mustafa, M. Kazmi, H.R. Khan, S.A. Qazi, S.H. Lodi, M.E. Li, Towards a carbon neutral and sustainable campus: case study of NED university of engineering and technology, (2022).
- [17] B. Ridhosari, A. Rahman, Carbon footprint assessment at Universitas Pertamina from the scope of electricity, transportation, and waste generation: toward a green campus and promotion of environmental sustainability, *J. Clean. Prod.* 246 (Feb.10) (2020) 119172.1 – 119172.11.
- [18] R. Mendoza-Flores, R. Quintero-Ramírez, I. Ortiz, The carbon footprint of a public university campus in Mexico City, *Carbon Manag.* 10 (5) (2019) 501 – 511.
- [19] F.M. Amoruso, M.H. Sonn, T. Schuetze, Carbon-neutral building renovation potential with passive house-certified components: applications for an exemplary apartment building in the Republic of Korea, *Build. Environ.* 215 (2022) 108986.
- [20] G. Lee, N. Avelina, D. Rim, S. Chi, H. Ahn, Systematic review of carbon-neutral building technologies (CNBTs) by climate groups and building types, *J. Build. Eng.* 78 (2023).
- [21] Z. Zhang, G. Hu, X. Mu, L. Kong, From low carbon to carbon neutrality: a bibliometric analysis of the status, evolution and development trend, *J. Environ. Manage* 322 (2022).
- [22] H. Ye, Y. Li, D. Shi, D. Meng, N. Zhang, H. Zhao, Evaluating the potential of achieving carbon neutrality at the neighborhood scale in urban areas, *Sustain. Cities Soc.* 97 (2023).
- [23] M. Xia, X. Chuai, L. Zhai, A. Xiang, T. Wang, High-resolution carbon neutrality mapping and a heterogeneity analysis for China's two typical megalopolises, *Urban Clim.* (2023) 49.
- [24] J. Jung, G. Ha, K. Bae, Analysis of the factors affecting carbon emissions and absorption on a university campus – focusing on Pusan National University in Korea, *Carbon Manag.* 7 (1–2) (2016) 55 – 65.
- [25] R. Tonietto, L. O'Brien, C. Van Haitsma, C. Su, N. Blankertz, H.G.S. Mosiniak, C. Short, H.A. Dawson, Toward a carbon neutral campus: a scalable approach to estimate carbon storage and biosequestration, an example from University of Michigan, *Int. J. Sustain. High. Educ.* 22 (5) (2021) 1108 – 1124.
- [26] C. Wang, A.M. Parvez, J. Mou, C. Quan, J. Wang, Y. Zheng, X. Luo, T. Wu, The status and improvement opportunities towards carbon neutrality of a university campus in China: a case study on energy transition and innovation perspectives, *J. Clean. Prod.* 414 (2023).
- [27] L. Yang, Y. Li, Low-carbon city in China, *Sustain. Cities Soc.* 9 (2013) 62 – 66.
- [28] Y. Li, Q.S. Jia, On the feasibility to achieve carbon neutrality in university campus: a case study, *ifac paperonline* 55(5) (2022) 78–83.
- [29] R. Clabeaux, M. Carbajales-Dale, D. Ladner, T. Walker, Assessing the carbon footprint of a university campus using a life cycle assessment approach, *J. Clean. Prod.* 273 (2020) 122600.
- [30] J. Townsend, J. Barrett, Exploring the applications of carbon footprinting towards sustainability at a UK university: reporting and decision making, *J. Clean. Prod.* 107 (NOV.16) (2015) 164 – 176.
- [31] D. Spirovski, A. Abazi, I. Iljazi, M. Ismaili, G. Cassulo, A. Venturin, Realization of a low emission university campus through the implementation of a climate action plan, *Procedia Soc. Behav. Sci.* 46 (2012) 4695 – 4702.
- [32] A.R. Suppa, I. Ballarini, Supporting climate-neutral cities with urban energy modeling: a review of building retrofit scenarios, focused on decision-making, energy and environmental performance, and cost, *Sustain. Cities Soc.* 98 (2023).
- [33] G. Ulpiani, N. Vetter, G. Melica, P. Bertoldi, Towards the first cohort of climate-neutral cities: expected impact, current gaps, and next steps to take to establish evidence-based zero-emission urban futures, *Sustain. Cities Soc.* 95 (2023).
- [34] Li, H.; Song, F.; Wang, L. Research on carbon reduction and carbon neutrality measures in public buildings of universities. *Archit.Econ.* 2023, 44, 359 – 363.
- [35] Zhang, R. Strategies for carbon reduction over the whole life cycle of ultra-low-energy buildings. *Jiangxi Build. Mater.* 2023, 8, 361 – 362.
- [36] Lin, Y.R.; Yin, S.; Xiao, Y. Assessing the potential of carbon emission reduction in building interface renovation of traditional districts: The case of Guangzhou. *Hous. Real Estate* 2023, 15 – 20.
- [37] Zhang, X.; Zheng, R.; Wang, F. Influence analysis of inventory selection on the physical carbon emission of rural buildings. *J. Eng. Manag.* 2020, 34, 51 – 55.
- [38] 王幼松, 杨馨, 闫辉等. 基于全生命周期的建筑碳排放测算——以广州某校园办公楼改扩建项目为例 [J]. 工程管理学报, 2017, 31(03): 19–24.
- [39] 中国建筑科学研究院有限公司, 中国建筑标准设计研究院有限公司. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366–2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [40] Imura H. LCA in Constrution[M]. Ohmhsa Press, Japan, 2001.