高校校园碳足迹核算及零碳校园规划路径分析
——以北京师范大学海淀校园为例*

蔡 鑫[1)] 孟凡鑫[1)†] 孙宇彤[1)] 庞凌云[2)] 张 哲[2)] 蔡博峰[2)]
(1)北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京; 2)生态环境部环境规划院,北京)

摘要 本研究综合考虑高校地理边界内的直接碳排放和跨境间接碳排放,从生命周期视角出发构建了高校校园碳足迹核算方法学模型,选取北京师范大学海淀校园(简称海淀校园)作为案例,系统性地核算并分析了海淀校园碳足迹(包括直接碳排放与间接碳排放)现状,并从消费侧及生产侧 2 个视角出发,设计低碳校园、深度减碳及零碳校园 3 种情景规划,探究零碳校园规划路径. 结果表明:1) 海淀校园 2022 年的碳足迹为 96.72 kt,其中高校碳足迹主要来源为外调电力引起的间接碳排放,占比 50.3%;校园直接碳排放与其他间接碳排放所产生的碳排放总量相当,分别占高校碳足迹总量的 25.5% 和 24.2%. 2) 海淀校园教师公寓区、学生宿舍区、办公区为高校碳足迹的主要来源区域,碳排放总量达到 42.06 kt,占高校碳足迹总量的 43.5%,主要由电能消耗及天然气消耗导致;其余功能区中,图书馆、生活服务区、教学区及主楼碳排放量分别为 9.30、8.32 、7.92 、7.25 kt,其中,生活服务区的碳排放来源比较特殊,主要由用水及用天然气驱动引起. 3) 海淀校园如果参考低碳校园情景方案,在 2060 年可实现 40% 的校园碳减排;若执行深度减碳情景规划,则可在 2060 年减少近 70% 的校园碳排放;如果高校可以依照零碳校园规划路径,综合消费侧及生产侧各项减碳措施,则有望在 2060 年实现零碳校园建设. 本研究结果可为高校落实“碳中和”政策,厘清高校碳足迹现状并实现零碳校园建设提供科学依据和政策启示.

关键词 生命周期;零碳校园;碳排放核算;情景分析
中图分类号 TL812+.2 **DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2024079

0 引言

作为全球碳减排的关键阵地,城市在碳中和战略中承担着引领者的角色[1]. 在此背景下,城市发展正经历着从建设低碳城市到以建设零碳城市为目标的巨大转型[2]. 高校校园作为城市的重要组成部分,在温室气体减排和区域碳中和体系中发挥着重要作用[3]. 首先,区域碳排放量普遍集中于少数高能耗领域[4]. 作为城市用能的特殊单元,高校校园即是高能耗、高碳排放的区域[5–6]. 美国环境保护署的数据显示,高校温室气体排放量占城市排放总量的 12%[7]. 此外,高校作为典型的消费组织,人口集中、易于管理,具有巨大的碳减排潜力[8]. 在过去的 10 多年里,我国高校的碳减排行动始终秉持“绿色、低碳、可持续”的发展理念,从创建节约型校园起步,到向建设绿色校园纵深发展[9]. 截至 2022 年,我国已有 60% 以上的高校开展低碳校园建设计划[10]. 然而,尽管目前各界正积极推进碳中和战略,大部分高校的碳减排计划却仍然侧重于低碳校园建设,较少从“碳中和”视角考虑高校碳减排问题,而在双碳战略下显然应该以建设零碳校园作为高校碳减排的规划战略. 目前,从建设零碳校园的视角厘清高校碳排放现状并探究零碳校园规划路径,已成为高校落实双碳战略的研究热点. 零碳校园的建设不仅要考虑高校内部产生的直接碳排放,还应综合考虑校园驱动的间接碳排放问题[9]. 本研究从生命周期视角出发,构建了高校校园碳足迹核算方法学模型,以北京师范大学海淀校园(简称海淀校园)为例,厘清高校碳足迹(包括直接碳排放与间接碳排放)现状并进行零碳校园情景规划,研究结果可为高校推进零碳校园建设提供理论支持及政策建议.

1 文献综述

当前,对于高校碳排放核算及校园碳减排措施的研究虽然众多,但至今尚未形成统一的高校碳排放核算框架及方法学体系. 主要相关研究见表 1.

* 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3807700);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目
† 通信作者:孟凡鑫(1987—),副教授,博士生导师. 研究方向:城市生态规划与管理. E-mail: fanxin.meng@bnu.edu.cn
收稿日期:2024-04-18

表 1　低碳校园、零碳校园碳核算视角及其应用案例

视角	核算范围	核算方法	核算边界	相关研究	主要措施
基于能源使用视角	校园内直接碳排放及外调电力间接碳排放（范围1和范围2）	过程分析	洗澡燃气 烹饪燃气 供暖燃气 外调电力	Clabeaux等[11] Li 等[12]	节约用电 外墙保温 （以低碳校园为目标）
基于消费行为视角	校园外调电力碳排放及其他间接碳排放（范围2和范围3）	投入产出分析	交通出行 外调电力 纸张使用 食品消费 水资源消耗	Wu 等[13] Ridhosari等[14] Zheng 等[15]	绿色出行 节约用电 节约纸张 光盘行动 （以低碳校园为目标）
基于综合视角	校园直接碳排放及部分间接碳排放（范围1、范围2和范围3）	混合分析(过程分析+投入产出分析)	供暖燃气 外调电力 交通出行 垃圾处理	Genta 等[16] Shboul等[17] Wang等[18]	节约能源 绿色出行 垃圾回收 （以零碳校园为目标）

低碳校园研究主要从基于能源使用的视角出发，从校园建筑用能方面考虑低碳校园建设路径. Clabeaux 等[11] 从校园内直接碳排放及外调电力驱动的间接碳排放出发，利用基于过程的生命周期分析法对校园建筑的各类燃气使用碳排放以及外调电力碳排放进行核算分析. 该研究结果表明范围 2(外调电力)对于校园碳排放的贡献度最大，约占校园总碳排放的 45%，应该重点从节约使用电能、改变能源结构的角度出发，减少校园碳排放. 此外，Li 等[12]则构建了校园不同功能区水-能-碳分析的复合框架，以高校能源直接碳排放及电力消费的间接碳排放作为主要核算边界，利用排放因子法对校园中不同功能区的能源碳排放进行了系统核算. 该研究提出供暖产生的高能耗成为制约校园可持续发展的主要因素，应加强校园建筑外墙保温以实现低碳校园建设.

对于消费行为视角的校园碳核算，Zheng 等[15] 的研究提出了具有代表性、普适性的核算框架. 该研究综合考虑了校园人员在交通出行、电力使用、纸张使用、食品消费、水资源使用等消费行为驱动的碳排放，利用投入产出分析法对校园人员的碳足迹进行追溯核算. 研究结果表明，校园人员的消费行为驱动的碳排放总量大，且校园人员日常通勤及电力使用是校园碳排放的主要来源. 高校应大力鼓励校园师生共同参与低碳校园的建设、管理和运营，改变自身的消费行为和生活方式，做到绿色出行、节约用电，成为低碳校园的认知者、实践者和宣传者.

基于能源使用及消费行为研究视角的综合研究，不同于以往致力于低碳校园建设的研究目的，而是致力于发展建设零碳校园. 基于综合视角的研究目前相对较少，以 Wang 等[18] 的相关研究为主. 该研究基于校园直接碳排放及部分间接碳排放(范围 1、范围 2 和范围 3)，利用混合分析模型对高校校园的供暖燃气、外调电力、交通出行、垃圾处理等驱动的碳排放进行核算，提出高校应开展节约能源、绿色出行、垃圾分类回收等多项举措以实现零碳校园建设. 研究促进了高校推动碳减排及可持续发展，并揭示了开展零碳校园规划路径研究的重要意义，有利于碳中和战略在高校的推广落实. 但现有基于综合视角的研究主要聚焦于燃气、电能、交通以及垃圾处理驱动的碳排放，并未全面考虑高校其他主要的消费行为(如纸张使用等)，依然存在局限性.

由此可见，当前研究试图从不同角度厘清高校碳排放现状并探究校园碳减排行动措施，但尚未形成一致的高校校园碳排放核算边界及理论框架，这也进一步导致高校在进行碳减排规划时难以全面考虑各项政策举措，无法实现高校从低碳校园规划建设到零碳校园规划建设的重要转型. 因此，本研究从生命周期视角出发，构建了高校校园碳足迹核算方法学模型，并选取海淀校园作为案例，进行碳足迹现状分析及零碳校园路径规划.

2　海淀校园基本情况概述

海淀校园是北京师范大学主校区，坐落于北京市北二环和北三环之间. 该校区包含北京师范大学下设的 3 个学部、23 个学院，承担学校主要的教学、科研任务，是北京师范大学最为重要、最具代表性的校区. 截至 2023 年，海淀校园占地面积为 74 万 m^2，在校学生人数 28 888 人，教职工总人数2 556 人，建筑总量 256 座. 由此可见，海淀校园占地面积小、人口密集、能源使用密度高，具有高校节能降碳的典型场景. 近年来，北京师范大学发布《节约型校园建设中长期规划方案》，并开展“1356”工程，助推低碳校园建设，已初步形成独具特色的低碳发展模式. 因此，海淀校园是开展零碳校园研究的良好案例，厘清高校的碳足迹

现状及零碳校园规划路径,可为北京师范大学开展并引领零碳校园建设提供科学依据.

3 研究方法与数据来源

3.1 高校校园碳足迹核算方法学模型 为解决现有研究中高校碳排放核算方法学的主要问题,本文建立了具有普适性的高校校园碳足迹核算方法学模型,具体包括高校碳足迹核算框架体系(研究边界)及高校碳足迹核算方法体系(计算方法),以实现高校碳足迹的全面、精准核算.

3.1.1 *研究边界* 本文基于世界资源所和世界可持续发展工商理事会(WBSCD)温室气体议定书的相关定义,综合考虑了校园地理边界内直接碳排放及校园上、下游间接碳排放,构建了高校校园碳足迹核算边界理论框架,明确了高校 CO_2 排放核算的系统边界.其中:校园内直接碳排放主要包括校内锅炉房供暖的能源消耗、校内食堂食品加工的燃气消耗,以及公共浴室热水供应的燃气消耗;校园上游碳排放来源主要包括外调电力、跨境交通以及食物、水、关键易耗品(纸张)等主要物质的上游供应链;校园下游碳排放的主要来源为校园内产生的厨余垃圾和生活垃圾后续的回收处理过程.校园碳汇的主要来源为校内草地、林地、水域对于 CO_2 的吸收作用.同时,本研究还基于海淀校园特点,将校园具体分为教学区、办公区(主要指学院办公楼等)、学生宿舍区、教师公寓区、生活服务区、主楼和图书馆这 7 大功能区,以开展高校碳足迹总量研究及分区溯源.

高校校园碳足迹核算边界理论框架如图 1 所示.

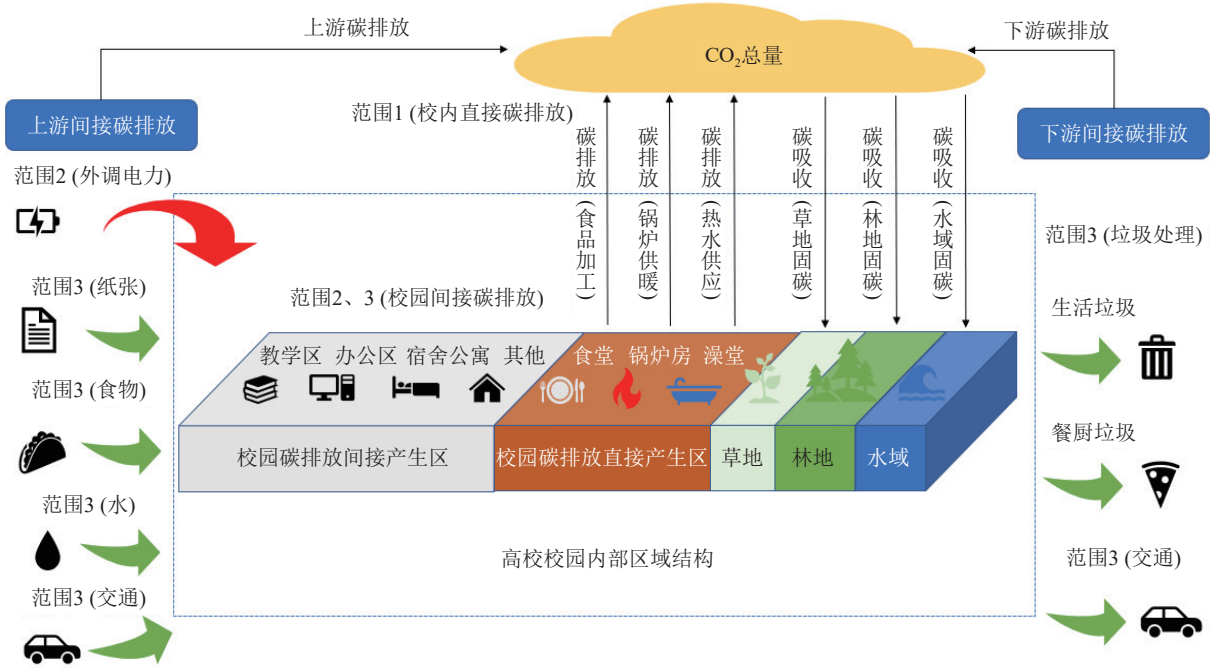

图 1 高校校园碳足迹核算边界理论框架

3.1.2 *计算方法* 本文将基于过程的生命周期碳排放核算方法与碳汇核算方法相耦合,综合构建了高校碳足迹核算方法体系.

1)基于过程的生命周期碳排放核算方法——碳排放因子法.碳排放因子法是碳排放核算的基本方法,主要通过活动水平数据和相关参数来计算碳排放量.本研究主要采用该核算方法,以保证核算结果的准确度.

碳排放因子法计算的具体方法为

$$Q_{\text{tot}} = A_i \times E_{\text{F}i} \times P_{\text{V,CO}_2}, \tag{1}$$

式中:Q_{tot} 为各活动碳排放总量;A_i 为各碳排放活动数据清单;$E_{\text{F}i}$ 为各活动所对应的碳排放因子系数;$P_{\text{V,CO}_2}$ 为温室气体的温室效应潜势值(来自 IPCC 第六次评估报告[19]);i 代表各碳排放活动.

各资源类型的碳排放因子系数如表 2 所示(来自中国产品全生命周期温室气体排放系数库[20]).

2)校园碳汇核算方法——碳吸收系数法.校园内碳汇的主要来源为草地、林地、水域对于碳的吸收作用,这 3 类不同土地利用类型的碳吸收可表示为

$$C_{\text{g}} = \sum S_i \times G_i \times \frac{44}{12}, \tag{2}$$

式中:C_{g} 为校园水域、林地、草地产生的碳吸收总量,t;S_i 为第 i 类土地利用类型面积,hm^2;G_i 为该区域的碳吸收系数;$\frac{44}{12}$ 为一单位 C 转化为一单位 CO_2 的因数.

表 2　各资源类型的碳排放因子系数

资源类型	电能/(kg・kW・h^{-1})	天然气/(kg・m^{-3})	汽油	柴油	垃圾处理	纸张	肉类	蔬菜	米饭	面粉
			kg・kg^{-1}							
碳排放系数	0.686 5	2.160	2.930	3.159	0.561	3.500	22.430	0.470	1.590	0.980

水域、林地、草地这 3 种土地利用类型的碳吸收系数分别是 0.567、3.81、0.948 t・hm^{-2}・a^{-1}[12].

3.2　校园碳减排情景设置　根据对北京师范大学的政策调研，发现案例校园在近年来发布实施《节约型校园建设中长期规划方案》等相关条例，并积极与北京市节能环保中心合作，开展光伏项目落地计划，推动绿色校园建设发展.

基于北京师范大学目前的政策导向及发展需求，本研究从消费行为（消费侧）以及校园建设（生产侧）2 个角度，设计校园碳减排情景规划，探究零碳校园建设路径. 其中：消费行为主要包括节约用电、节约用水、践行光盘行动及减少办公用纸 4 条具体措施；校园建设主要包括增种绿植、垃圾分类管理、建设光伏系统及加强外墙保温 4 项政策.

基于以上多类政策措施，本研究设计了低碳校园情景规划、校园深度减碳情景规划和零碳校园情景规划这 3 类不同的校园碳减排情景方案，为高校碳减排提供理论支持. 具体规划方案如表 3 所示（方案设计参考北京师范大学现有政策及校园设施情况）.

表 3　海淀校园碳减排情景规划方案

%

情景规划方案	消费行为措施（消费侧）				校园建设措施（生产侧）				2060减碳目标
	节约用电（用电每年减少）	节约用水（用水每年减少）	光盘行动（厨余垃圾每年减少）	绿色出行（交通耗能每年减少）	增种绿植（绿植面积每年增加）	垃圾分类回收（垃圾焚烧每年减少）	建设光伏系统（屋顶光伏铺设面积的比例）	加筑外墙保温（减少供暖用能的比例）	
低碳校园情景规划	2（减碳：32）	2（减碳：1）	无	无	2（减碳：1）	3（减碳：4）	无	无	初步减碳，碳减排接近40%
校园深度减碳情景规划	4（减碳：40）	4（减碳：2）	2（减碳：3）	无	4（减碳：1.5）	4（减碳：4.5）	70（减碳：10）	50（减碳：10）	深度减碳，碳减排达到70%
零碳校园情景规划	5（减碳：45）	5（减碳：3）	5（减碳：5）	4（减碳：10）	5（减碳：2）	5（减碳：5）	100（减碳：15）	100（减碳：20）	零碳校园建设，实现校园“碳中和”

3.3　数据来源　本文需要的数据包括高校用电数据、用水数据、用天然气数据、食品原材料消耗数据、垃圾产生量数据、跨境交通数据和办公用纸消耗数据. 所需数据主要通过对高校部门走访调研及高校人员问卷调研获取，具体如下：2022 年校园用电、用水、用天然气数据来自海淀校园后勤部节能办官方数据；2022 年校园食品原材料消耗数据和垃圾产生量数据分别从学校餐饮服务中心及垃圾转运中心处获取；跨境交通数据（跨境交通包括乘坐私家车、长途客运、铁路、航空等）则采用调研问卷法进行调研，分别对学生的日常通勤、返乡活动和教师的日常通勤、出差活动进行调查，获取以上活动的交通出行方式、距离、时长等数据，并以此计算交通出行人均能源消耗量，最后利用校园学生和教师人数估算得到校园跨境交通总耗能；办公用纸消耗数据同样采用调研问卷法分别对校园学生及教师耗纸情况进行调研，其中办公用纸具体包括打印用纸、笔记本及教辅材料. 通过分析抽样人员的用纸情况，可以实现对校园年办公用纸消耗量的粗略估算.

4　研究结果

4.1　海淀校园碳足迹总量分析　海淀校园的 2022 年碳足迹（碳排放总量）为 96.72 kt. 校园各资源消耗量如表 4 所示，核算得到的各来源碳排放量如表 5 所示，碳足迹组成占比如图 2 所示.

校园碳足迹的主要来源为范围 2 的间接碳排放，即电能消耗所产生的隐含间接碳排放. 电能消耗所产生的碳排放总量达到 48.68 kt，占校园碳足迹总量的 50.3%.

范围 1 的碳排放总量为 24.65 kt，占碳足迹总量的 25.5%，主要由校园建筑冬日供暖所消耗的天然气构成，其碳排放量达到 23.66 kt，占碳足迹总量的 24.5%，是校园碳足迹的第二主要来源.

而范围 3 的碳排放则指校园其他的间接碳排放，碳排放量达到 23.39 kt，占比 24.2%. 其中，范围 3 中交通出行所驱动的碳排放量较多，为 12.23 kt，占校园碳足迹总量的 12.6%. 剩余食品原材料消耗、垃圾处置、耗水、纸张使用这 4 类项目驱动的碳排放量较少，分别占高校碳足迹总量的 5.3%、3.3%、1.7%、1.3%.

表 4 2022 年海淀校园各资源消耗基本情况

各资源项目	消耗量
总供热/m^3	10 954 796
食堂燃气/m^3	460 262
总电能/(kW·h)	70 912 240
总耗水/t	1 820 272
米饭/t	415 567
鸡蛋/t	244 033
面粉/t	238 671
牛羊肉/t	84 622
猪肉/t	197 150.5
蔬菜/t	1 540 139
厨余干垃圾/t	1 631 550
厨余泔水/t	1 826 972
生活垃圾/t	4 594 401

表 5 2022 年海淀校园碳足迹溯源

kt

范围	项目	各项目碳排放量	各范围碳排放总量
范围1	总供热	23.66	24.65
	食堂燃气	0.99	
范围2	总电能	48.68	48.68
范围3	交通	12.23	23.39
	食品原材料	5.08	
	垃圾处置	3.15	
	总耗水	1.69	
	纸张使用	1.24	
碳汇	草地碳汇	−0.40	−1.15
	林地碳汇	−0.75	
	水域碳汇	0	

海淀校园的碳汇总量相对较少，每年可以吸收 CO_2 约 1.15 kt，远远不能中和校园现有的碳排放总量.

4.2 海淀校园分区碳足迹空间特征 分析能-水-碳关系是反映校园分区碳足迹最显著可行的方法[12]，可以找到校园碳排放的关键节点，说明碳排放分布问题. 因此，本文基于调研获得的校园主要建筑能、水数据，对校园 7 大功能区能-水消耗所驱动的碳足迹进行核算分析，探究海淀校园碳排放分区治理的关键节点. 据调研核算，校园分区能-水驱动的碳足迹清单见表 6.

从表 6 中可以发现，校园不同区域碳排放量由多至少依次为：教师公寓区、学生宿舍区、办公区、图书馆、生活服务区、教学区、主楼. 其中，教师公寓区、学生宿舍区和办公区产生的碳排放量较多，排名前 3，分别为 15.87、13.80、12.39 kt. 这 3 个区域的碳排放总量达到 42.06 kt，占校园碳足迹的 43.5%，是校园碳排放治理的关键节点. 而其他区域的碳排放量则相对较少.

而在碳排放来源中，电能驱动的碳排放一般占比更大，其次是天然气消耗，水资源消耗对于碳排放的贡献最少. 例如，在教师公寓区、学生宿舍区、办公区中，各区域电能驱动的碳排放占比均>50%，天然气驱动的碳排放占比均>25%. 而在这 7 类功能区中，只有生活服务区的碳排放结构较为特殊. 由于生活服务区中食堂的烹饪需求以及学生浴室的用水需求，该区域碳排放更多由天然气及水驱动产生. 其中，生活服

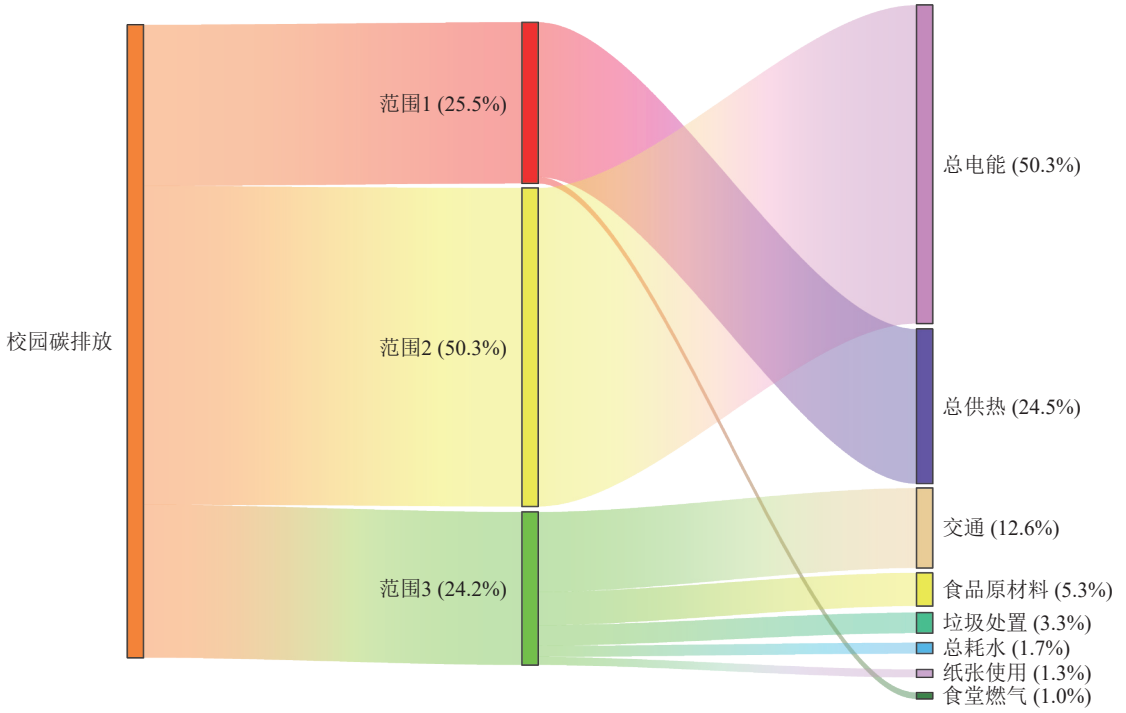

图 2 2022 年海淀校园碳足迹组成占比

表 6　2022 年海淀校园分区碳足迹清单

kt

区域	各区涵盖范围	用水碳排放	用电碳排放	用天然气碳排放	总碳排放
主楼	学校主行政楼	0.17	4.24	2.84	7.25
教学区	学校所有教学楼	0.05	5.50	2.37	7.92
生活服务区	食堂、商店、公共浴室	0.59	4.48	3.36	8.43
图书馆	学校图书馆	0.06	6.87	2.37	9.30
办公区	各学院办公楼	0.18	8.66	3.55	12.39
学生宿舍区	所有学生宿舍楼	0.37	7.51	5.92	13.80
教师公寓区	学校家属区	0.19	11.42	4.26	15.87

务区用水驱动的碳排放总量达到 0.59 kt, 在 7 类功能区中排名第一; 天然气驱动的碳排放量则达到 4.48 kt, 占该区域碳排放总量的 53.1%.

4.3　北京师范大学零碳校园情景规划分析　本研究基于前文设置的校园碳减排情景, 以 2022 年为起始年, 对海淀校园不同情景下的碳足迹变化趋势进行预测, 得到预测结果如图 3 所示. 其中: 低碳校园情景规划可以指导校园在 2060 年减少 40% 左右的碳排放; 在深度减碳情景规划指导下, 则可以实现近 70% 的校园碳减排; 而海淀校园若想在 2060 年前实现校园的“零碳排放”, 则需要从消费行为及校园建设 2 个方面出发, 综合实施节约用电、节约用水、光盘行动、绿色出行、增种绿植、垃圾回收、铺设光伏、外墙保温等各项举措, 加大力度解决高校各类碳排放问题, 才能有效地完成零碳校园建设计划.

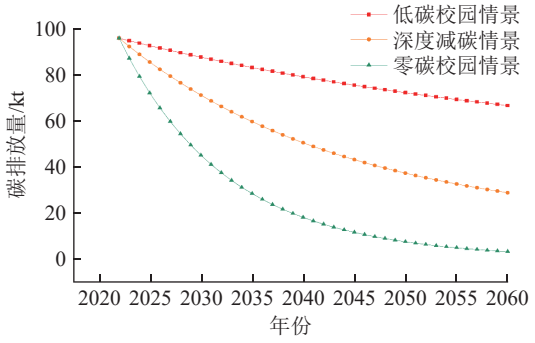

图 3　不同情景规划下海淀校园的碳足迹变化趋势

5　结论与政策建议

本研究从生命周期视角出发, 构建了高校校园碳足迹核算方法学模型, 以海淀校园为案例, 识别了学校碳足迹的主要来源及分区特征, 探究了零碳校园情景规划路径. 研究结果可为高校厘清碳足迹现状、推进零碳校园建设提供科学基础. 具体政策建议及管理启示如下.

1)加快推进高校能源结构调整. 2022 年海淀校园的碳足迹主要由能源使用引起, 其中电能驱动碳排放占比 50%, 天然气驱动碳排放占比 25%. 同时, 学生宿舍区、教师公寓区、办公区是能源消耗的主要区域. 因此, 学校应重点管控校园学生宿舍区、教师公寓区、办公区能源使用情况, 持续推进高校能源结构调整, 并在校园屋顶、空地增设太阳能装置, 利用绿色低碳能源(如光伏发电、生物质能等)代替传统火电及天然气, 落实校园能源碳减排.

2)深化高校人员绿色出行理念. 2022 年海淀校园由交通出行驱动的碳排放占比达到 13%. 践行绿色出行理念, 是减少交通出行间接碳排放的关键举措. 高校应积极宣传绿色出行理念, 鼓励校园人员多选择清洁绿色的交通出行方式, 减少乘坐高碳排的私家车出行. 同时, 高校可以在校园生活服务区、教学区等人流量较大的区域, 设立专门的自行车道和人行通道, 方便师生们能够以步行或骑车方式出行.

3)引导高校人员消费模式调整. 海淀校园作为典型的消费组织, 2022 年进口的校园关键易耗品驱动上游供应链碳排放占比达到 11%. 高校应有序引导校园消费模式调整, 通过开展绿色低碳产品宣传活动、生态文明课程教育等方式, 增强师生的绿色环保意识和低碳消费观念, 提倡绿色及可持续消费. 同时, 高校应积极为师生提供更多具有低碳绿色供应链的产品, 减少由消费品上游供应链所驱动的隐含碳排放.

4)实施高校碳排放分区管理策略. 本研究表明校园内各功能区的不同建筑表现出明显的碳排放差异. 高校应对各功能区排放源采取针对性措施进行碳减排. 对于学生宿舍区、教师公寓区、办公区、图书馆这些电能集中消耗区, 应采用替换节能灯具等措施减少电力碳排放; 对于生活服务区这类天然气集中消耗区, 应采用余热回收和外墙保温等方式减少热力和天然气碳排放. 同时, 高校应制定一系列规章制度, 促

进师生开展低碳行动,做到人走灯灭,公共教室的风扇、窗户也都应有相关责任人管理.

5)从消费侧及生产侧双管齐下提早开展零碳校园规划布局.根据情景规划模拟,北京师范大学只有同时规划实施消费侧减碳措施及生产侧减碳措施,才能在 2060 年实现"近零碳排放"建设.因此,高校应从消费侧及生产侧 2 个维度同时发力,尽早做好零碳校园规划布局,推进零碳校园建设计划有序进行.

6 参考文献

[1] 孟凡鑫,樊兆宇,王东方,等.生命周期视角下城市碳足迹核算及实现碳中和的路径建议:以深圳市为例 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(6):878

[2] SETO K C, CHURKINA G, HSU A, et al. From low- to net-zero carbon cities: the next global agenda[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2021, 46: 377

[3] 金德禄,朱晓利,徐攀.零碳排放校园建设 [J]. 能源与节能,2022(4):5

[4] 蔡博峰,吕晨,董金池,等.重点行业/领域碳达峰路径研究方法 [J]. 环境科学研究,2022,35(2):320

[5] 黄献明.加快校园碳减排研究与实践步伐 [N]. 中国建设报,2021-06-07(4)

[6] 焦成英,张卫国,李曙.基于排放因子法的校园碳排放核算研究 [C]//中国环境科学学会科学技术年会论文集(2020). 南京:中国环境科学学会,2020

[7] US Environmental Protection Agency (EPA). Inventory of U. S. green-house gas emissions and sinks[R]. Washington D C: EPA, 2018

[8] LARSEN H N, PETTERSEN J, SOLLI C, et al. Investigating the carbon footprint of a university - the case of NTNU[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 48: 39

[9] 谭洪卫.碳中和目标下高校校园的绿色发展路径新探 [J]. 能源环境保护,2022,36(5):1

[10] 施剑松.北京:2022 年底至少 7 成高校建成绿色学校 [N]. 中国教育报,2021-03-01(6)

[11] CLABEAUX R, CARBAJALES-DALE M, LADNER D, et al. Assessing the carbon footprint of a university campus using a life cycle assessment approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 122600

[12] LI R S, ZHAO R Q, XIE Z X, et al. Water-energy-carbon nexus at campus scale: case of North China University of Water Resources and Electric Power[J]. Energy Policy, 2022, 166: 113001

[13] WU Y L, TIAN X, LI X R, et al. Characteristics, influencing factors, and environmental effects of plate waste at university canteens in Beijing, China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 149: 151

[14] RIDHOSARI B, RAHMAN A. 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]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 119172

[15] ZHENG N T, LI S, WANG Y P, et al. Research on low-carbon campus based on ecological footprint evaluation and machine learning: a case study in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 323: 129181

[16] GENTA C, FAVARO S, SONETTI G, et al. Quantitative assessment of environmental impacts at the urban scale: the ecological footprint of a university campus[J]. Environment, Development and Sustainability, 2022, 24(4): 5826

[17] SHBOUL B, KOH S C L, VENETI C, et al. Evaluating sustainable development practices in a zero-carbon university campus: a pre and post-COVID-19 pandemic recovery study[J]. Science of the Total Environment, 2023, 896: 165178

[18] WANG C X, PARVEZ A M, MOU J Y, et al. The status and improvement opportunities towards carbon neutrality of a university campus in China: a case study on energy transition and innovation perspectives[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414: 137521

[19] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M/OL]. [S.l.]: Cambridge University Press, 2021[2024-04-17]. http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_Report.pdf

[20] 中国城市温室气体工作组(CCG). 中国产品全生命周期温室气体排放系数库 [EB/OL]. [2024-04-17]. http://lca.cityghg.com/

College campus carbon footprint accounting and zero-carbon campus planning at Beijing Normal University

CAI Xin[1)]　MENG Fanxin[1)]　SUN Yutong[1)]　PANG Lingyun[2)]　ZHANG Zhe[2)]　CAI Bofeng[2)]

（1）State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing, China;
2）Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Beijing, China）

Abstract　Direct carbon emissions within the geographical boundaries of universities and cross-border indirect carbon emissions are comprehensively considered, to construct a model of campus carbon emissions-accounting. The Haidian campus of Beijing Normal University is used to calculate and analyze current carbon emissions from the perspectives of both consumption and production. Three scenarios of low-carbon campus, deep carbon reduction and zero-carbon campus are designed. Total carbon emission at Beijing Normal University in 2022 was found to be 96.72 kt, the main source of carbon emission was indirect carbon emission by external power transfer（Scope2）, accounting for 50.3% of total. Direct carbon emissions on campus（Scope1）are comparable to other indirect carbon emissions（Scope3）, accounting for 25.5% and 24.2% of total carbon emissions respectively. Faculty apartments, student dormitories and office areas are the main sources of carbon emissions on campus, total carbon emissions reaching 42.06 kt CO_2, accounting for 43.5% of the total carbon emissions on campus, driven mainly by electric energy consumption and natural gas consumption. Among the remainder functional areas, carbon emissions by library, living service area, teaching area and main building were 9.30, 8.32, 7.92 and 7.25 kt, respectively. The sources of carbon emissions in living service areas are special, mainly caused by water and natural gas. Beijing Normal University can achieve a 40% carbon reduction by 2060 with a low-carbon campus scenario plan. If the deep carbon reduction scenario is implemented, the campus carbon emissions can be reduced by nearly 70% by 2060. If universities can follow the zero-carbon campus planning path and integrate various carbon reduction measures on both consumption and production, the university could achieve zero-carbon campus in 2060. This study can help colleges and universities to implement "carbon neutral" policy, clarify the status quo of carbon emissions, and realize zero-carbon campus.

Keywords　life cycle; zero-carbon campus; carbon emissions accounting; scenario analysis

【责任编辑: 武　佳】