

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良苏, 张天娇 (1938)
2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM _{2.5} 和O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安PM _{2.5} 和O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对N ₂ O排放影响:基于Meta分析	黄艺华, 余冬立, 史祺琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

高校碳排放核算与分析：以北京A高校为例

曹睿^{1,2}, 封莉^{1,2}, 张立秋^{1,2*}

(1. 北京林业大学环境科学与工程学院, 水体污染源控制技术北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学环境科学与工程学院, 污染水体源控与生态修复技术北京高校工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 在双碳背景下, 我国各行业正积极核算自身碳排放, 以有效应对气候变化, 大学校园也应积极参与其中. 以北京A高校为例, 采用排放因子法和理论计算法核算了2021年其校园碳排放量. 结果表明, A高校净碳排放量(以CO₂计, 下同)为43 249.04 t, 人均碳排放量为1.52 t. 电力、通勤与差旅、热力、天然气和食物是碳排放的主要来源. 热力和天然气的碳排放与月份密切相关, 而电力碳排放在不同的功能区和月份都有所不同. 食物的碳排放与饮食结构有关, 而污水和垃圾处理的碳排放则与处理过程有关. 使用蒙特卡洛模拟法讨论了碳排放清单的不确定性, 发现碳排放总量的不确定性在-13.61%~26.08%之间. 尽管计算结果相对科学可靠, 但通勤和差旅、电力、天然气和食品是主要的不确定性来源. 总体来说, 研究结果为校园和其他复杂系统的碳排放核算和不确定性计算提供了参考.

关键词: 高校; 排放因子法; 理论计算法; 碳排放计算; 碳吸收; 不确定性

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1907-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202305013

Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University

CAO Rui^{1,2}, FENG Li^{1,2}, ZHANG Li-qiu^{1,2*}

(1. Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center for Water Pollution Source Control & Eco-remediation, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the context of carbon peaking and carbon neutrality, various industries in China are actively accounting for their own carbon emissions to effectively respond to climate change, an effort that university campuses should also actively participate in. Therefore, Beijing A University served as an example to investigate carbon emissions using emission factors and theoretical calculation methods in 2021. The results showed that the net carbon emission of university A was 43 249.04 t (calculated as CO₂, same below), and the per capita carbon emission was 1.52 t. Electricity, commuting and travel, heat, natural gas, and food were the main sources of carbon emissions. Carbon emissions from heat and natural gas were closely related to the month, whereas carbon emissions from electricity varied by functional area and month. Carbon emissions from food were related to the diet structure, whereas carbon emissions from sewage and waste disposal were related to the treatment process. Monte Carlo was used to simulate and discuss the uncertainty of carbon emission inventories, with the findings suggesting that the uncertainty of total carbon emissions ranged from -13.61% to 26.08%. Although the calculations were relatively scientifically reliable, commuting and travel, electricity, natural gas, and food were the main sources of uncertainty. Overall, the results provide a reference for carbon emission accounting and uncertainty calculations for campuses and other complex systems.

Key words: universities; emission factor method; theoretical calculation method; carbon emission calculation; carbon sequestration; uncertainty

人类活动导致的碳排放是全球变暖的主要原因^[1]. 碳排放的来源非常广泛, 包括化石燃料燃烧、森林砍伐和工业加工. 大学是碳排放的一个重要来源, 为了实现整体社会的低碳发展, 大学减碳也被纳入国家减碳目标^[2,3].

我国作为世界上最大的碳排放国, 正在气候变化的治理中发挥着积极作用, 其目标是在2030年实现碳达峰, 在2060年实现碳中和. 随着中国经济的增长, 高等教育也经历了快速发展, 高校数量和学生数量大幅增加^[4]. 截至2021年, 我国有3012所高校和3829万在校学生^[5]. 尽管我国大学的碳排放占比比较低, 但存在巨大的节能减排潜力. 有研究表明, 我国大学消耗了大约40%的公共部门能源, 学生的人均能耗是中国普通居民的两倍多^[6]. Li等^[7]发现大学生的公共活动, 如在食堂就餐、在公共淋浴间洗

澡和在图书馆学习, 都有减少碳排放的潜力. 分析计算碳排放, 并将低碳理念引入日常校园活动中, 可以有效减少校园碳排放量, 具有重要的实际意义. 大学拥有复杂的基础设施, 除了教室、实验室和大型研究设备等教学和研究设施外, 还包括其他满足学生和教师日常生活的设施, 如宿舍、食堂和超市^[8]. 对于大学碳排放的核算研究, 可以为其他复杂系统或机构编制碳排放清单、进行碳排放核算提供参考. 从更广泛的角度来看, 大学是高等教育的培训基地, 其毕业生将成为各类组织或机构的未来领导者, 并将受到大学教育期间所接触的可持续发

收稿日期: 2023-05-03; 修订日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977317, 42177051, 52170021)

作者简介: 曹睿(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为碳排放核算与碳减排分析, E-mail: 1172902074@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhangliqiu@163.com

展理念的深刻影响^[9].因此,大学应该将可持续性原则纳入自身的校园运营,同时承担起保护环境和适应气候变化影响的责任.

在过去的几十年里,全世界的大学在研究和核算校园碳排放方面取得了重大进展.Larsen等^[10]使用环境混合投入产出模型,计算了挪威科技大学的碳排放,并分不同学院进行计算,结果表明,医学、工程和自然科学为人均碳排放最高的3个学科,因其购买了大量用于科研的设备与消耗品.Gu等^[11]采用排放因子法计算了基尔大学2015~2016年碳排放量(以CO₂计,下同)为14 393 t,直接排放、间接排放和其他排放占比分别为46.65%、39.12%和14.24%,天然气和电力是该大学的重要排放源.尽管这些案例核算范围覆盖较为全面,但没有对碳排放量的不确定性进行定量研究,主要是依靠专家评价等定性的评估方法.同时,对于校园内污水和垃圾处理等复杂过程,仅采用排放因子法或投入产出模型来计算,会存在较大的误差以及不确定性.我国学者对大学碳排放核算也进行了研究,赵薇等^[12]采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)清单法,计算了2014年辽宁工业大学校园人均碳排放为2 020 kg,外购热力消耗产生的碳排放的比例最大,占49.64%;其次是外购电力消耗及垃圾处理过程产生的碳排放,所占比例分别为21.23%和25.33%.邹蓐等^[13]对山东建筑大学碳平衡进行核算,其中碳排放包括用电、用煤、交通及生活这4个部分,碳吸收包括绿植固碳与光伏发电减碳.在碳排放中,建筑能源消耗占据了绝大部分份额.目前国内的研究案例只关注了直接排放和间接排放,忽略了其他排放,而其他排放占校园总碳排放的比例超过了50%,甚至在已有研究中高达70%~80%^[10,14,15],因此国内的研究案例存在范围覆盖不全面且核算结果偏小的问题.

为改善过往研究存在不足,本研究以北京A高校为例,完成以下目标:①采用排放因子法和理论计算的组合方法,全面准确阐述我国高校的碳排放概况,包括直接排放、间接排放、其他排放和碳吸收;②确定关键排放源并分析其排放特征;③在校园尺度上采用蒙特卡洛法,定量研究碳排放清单的不确定性和相关性;④提供校园碳减排的政策建议和措施.本研究的结果可为高校编制碳排放清单和进行碳排放核算提供有价值的参考,对推动低碳校园管理实践具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 研究区域

A校园面积为46.4 hm²,2021年的师生员工总人

数为28 502人.选择北京A高校作为碳排放核算的原因有:①北京位于中国北部,属于暖温带季风气候,夏季温暖潮湿,冬季寒冷干燥,导致电力、热力和天然气等能源消耗呈现明显季节性波动;②A高校人口密度大,科研、办公和生活等功能多样,是我国大多数校园的典型.它不仅包括教室、宿舍、食堂、实验室、办公楼和体育设施,而且还包括广泛的植被,如绿地和树木.根据《工业企业温室气体排放核算与报告指南》^[16],结合相关文献和校园的实际情况,笔者将校园范围内的排放源分为直接排放、间接排放和其他排放这3种类型.此外,还考虑了校园内树木和绿地的碳吸收量^[17].

1.2 数据来源

本研究使用了A高校2021年的数据.除教师和学生通勤以及差旅数据来源于调查问卷,其他数据均为统计数据.具体数据来源包括校园后勤部门提供的电力、天然气、石油、柴油、热力、食物、纸张、印刷、水、可回收物、厨余垃圾、其他垃圾、肥料、树木和绿地的相关数据,电力、天然气、热力和水相关数据来源于对应的仪器仪表读数,其他统计数据来源于校内统计台账或购物凭证等.危险废物处理量和实验室化学品消耗量则由实验室和设备管理部门的统计台账提供.电力损耗和污水数据则是根据公布的电力损耗率和污水转换率计算得出.笔者走访了校内的垃圾转运中心,确定了各类垃圾处理的方式.此外,在2022年10月对全校师生进行问卷调查,获得了教师和学生2021年的通勤以及差旅数据,问卷内容包括基础信息、通勤差旅方式和各方式里程等内容,有效问卷146份,覆盖学校各个学院的教职工、本科生和研究生.

1.3 碳排放计算方法

1.3.1 排放因子法

排放因子法是计算碳排放的一种常用方法,采用公式(1)进行计算^[18]:

$$E_{\text{CO}_2} = \text{AD} \times \text{EF} \quad (1)$$

式中, E_{CO_2} 为CO₂排放量;AD为活动数据;EF为碳排放系数或碳补偿系数.

本文采用排放因子法计算电力、天然气、通勤和差旅、食物、热力、水、纸张、印刷、学校车辆、肥料和实验室化学品的碳排放.表1列出了每种物质的碳排放系数,值得注意的是,由于校园运营错综复杂,校园内的可回收物、树木和绿地提供了一部分碳补偿^[19,20].表2列出了每种物质的碳补偿系数.

表 1 各物质碳排放因子
Table 1 Carbon emission factor of each category

参数	数值	单位(以 CO ₂ 计)	文献	参数	数值	单位(以 CO ₂ 计)	文献
电力	0.581 0	t·(MW·h) ⁻¹	[16]	粮食	0.27	t·t ⁻¹	[21]
天然气	21.621 9	t·(10 ⁴ ·m ³) ⁻¹	[16]	蔬菜	0.4	t·t ⁻¹	[21]
热力	0.11	t·GJ ⁻¹	[16]	肉	4.268 8	t·t ⁻¹	[21]
汽油	2.925 1	t·t ⁻¹	[16]	奶	0.36	t·t ⁻¹	[21]
柴油	3.095 9	t·t ⁻¹	[16]	蛋	0.78	t·t ⁻¹	[21]
火车	0.018	kg·km ⁻¹	[22]	水果	0.07	t·t ⁻¹	[21]
飞机	0.088	kg·km ⁻¹	[22]	纸张	1.4	t·t ⁻¹	[23]
私家车	0.043	kg·km ⁻¹	[24]	打印	1.5	kg·(100 张纸) ⁻¹	[25]
公交	0.016	kg·km ⁻¹	[24]	肥料	0.465	t·t ⁻¹	[26]
供水	0.93	kg·t ⁻¹	[27]	实验室化学品	0.665 3	t·t ⁻¹	本研究

表 2 各物质碳补偿因子
Table 2 Carbon compensation factor of each category

参数	数值	单位(以 CO ₂ 计)	文献	参数	数值	单位(以 CO ₂ 计)	文献
玻璃	-0.314	t·t ⁻¹	[28]	塑料	-0.242	t·t ⁻¹	[29]
纸	-0.459	t·t ⁻¹	[28]	树木	-0.061	t·棵 ⁻¹	[30]
易拉罐	-3.577	t·t ⁻¹	[28]	绿地	-0.348	kg·m ⁻²	[27]
瓦楞纸箱	-0.12	t·t ⁻¹	[28]				

1.3.2 理论计算法

污水和垃圾的处理工艺复杂多样，不同地区和处理工艺都会对碳排放产生较大影响，简单采用排放因子法计算会存在较大的误差。因此，本文采用了理论计算的方法来计算污水和垃圾处理的碳排放。

1.3.2.1 污水处理碳排放计算方法

污水处理产生的碳排放包括：处理设施电力消耗、化学需氧量(COD)去除转化产生的CH₄和总氮(TN)去除转化产生的N₂O。处理设施电力消耗产生的碳排放使用公式(1)进行计算。

污水处理中的产生CH₄造成的碳排放可按公式(2)计算：

$$E_{\text{COD-污水}} = \text{COD}_{\text{去除}} \times B_0 \times 10^{-6} \times G_{\text{CH}_4} \quad (2)$$

式中， $E_{\text{COD-污水}}$ 为污水处理过程中去除COD产生的碳排放量(以CO₂计)，t·m⁻³； $\text{COD}_{\text{去除}}$ 为污水处理过程中COD的去除量，mg·L⁻¹； B_0 为COD转化为CH₄的系数(以CH₄·COD⁻¹计)，0.005 5 t·t⁻¹[31]； G_{CH_4} 为CH₄全球变暖潜能值，取值28。

污水处理中的产生N₂O造成的碳排放可按公式(3)计算：

$$E_{\text{TN-污水}} = \text{TN}_{\text{去除}} \times B_1 \times 10^{-6} \times G_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

式中， $E_{\text{TN-污水}}$ 为污水处理过程中去除TN产生的碳排放量(以CO₂计)，t·m⁻³； $\text{TN}_{\text{去除}}$ 为污水处理过程中TN的去除量，mg·L⁻¹； B_1 为TN转化为N₂O的系数(以N₂O·TN⁻¹计)，0.04 t·t⁻¹[32]； $G_{\text{N}_2\text{O}}$ 为N₂O全球变暖潜能值，取值310。

1.3.2.2 垃圾处理碳排放和碳补偿计算方法

与垃圾处理相关的碳排放包含了垃圾处理处置的各个阶段，包括：运输、处理过程、渗滤液处理和处理设施的电力消耗[33]。从实验室容器和溶液中产生的危险废物通过焚烧进行处理；食堂的厨余垃圾通过厌氧消化处理，所产生的CH₄有95%用于发电，其余5%泄漏[34]；校园内的其他垃圾是通过填埋来处理。根据北京市政府的计划，预计填埋产生的CH₄有80%将被回收并用于发电，10%将被泄漏到环境中，其余10%将被焚烧[35]。渗滤液处理的碳排放计算公式参考污水处理碳排放。处理设施电力消耗产生的碳排放使用公式(1)进行计算。

垃圾运输过程中的燃料消耗造成的碳排放可按公式(4)计算：

$$E_{\text{运输}} = L \times \text{AVG} \times \rho_1 \times \text{RZ} \times C \times \alpha \times \frac{44}{12} \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中， $E_{\text{运输}}$ 为垃圾运输过程中的碳排放量(以CO₂计)，t·t⁻¹； L 为学校到垃圾处理厂的距离，km； AVG 为每百公里的燃料消耗，L·(100 km)⁻¹； ρ_1 为柴油密度，kg·L⁻¹； RZ 为柴油的热值，42.652 GJ·t⁻¹[16]； C 为柴油单位热值的碳含量，按C元素计算，20.2 TJ·t⁻¹[16]； α 为柴油的氧化率，98%[16]。

危险废物焚烧的碳排放可按公式(5)计算：

$$E_{\text{焚烧}} = \text{CF} \times \text{FCF} \times \text{OF} \times \frac{44}{12} \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中， $E_{\text{焚烧}}$ 为危险废物焚烧产生的碳排放量(以CO₂计)，t·t⁻¹； CF 为危险废物中的碳含量，100%[36]； FCF 为矿物碳占总碳含量的比例，90%[36]； OF 为氧

化系数, 97%^[36].

其他垃圾填埋会产生 CH₄, 此部分的碳排放可按公式(6)计算:

$$E_{\text{填埋}} = \text{MCF}_{\text{填埋}} \times \text{DOC} \times \text{DOC}_F \times F \times \frac{16}{12} \times G_{\text{CH}_4} \quad (6)$$

式中, $E_{\text{填埋}}$ 为其他垃圾填埋产生的碳排放量(以 CO₂ 计), t·t⁻¹; $\text{MCF}_{\text{填埋}}$ 为其他垃圾填埋的 CH₄ 校正因子, 1^[36]; DOC 为可降解的有机碳分数, 20%^[36]; DOC_F 为可降解生物碳实际上转化为 CO₂ 和 CH₄ 的分数, 50%^[36]; F 为填埋气中 CH₄ 的比例, 50%^[36].

厨余垃圾厌氧消化会产生 CH₄, 此部分的碳排放可按公式(7)计算:

$$E_{\text{厌氧消化}} = \text{MCF}_{\text{厌氧消化}} \times \text{CL} \times \frac{16}{12} \times G_{\text{CH}_4} \quad (7)$$

式中, $E_{\text{厌氧消化}}$ 为厨余垃圾厌氧消化产生的碳排放量(以 CO₂ 计), t·t⁻¹; $\text{MCF}_{\text{厌氧消化}}$ 为厌氧消化的 CH₄ 校正因子, 1^[36]; CL 为 CH₄ 的转化因子(以 CO₂ 计), t·t⁻¹, 0.037 5^[34].

CH₄ 焚烧发电的碳补偿按公式(8)计算:

$$E_{\text{发电}} = \text{LHV}_{\text{CH}_4} \times \eta \times \text{EF}_{\text{电力}} \times \frac{1}{3\,600\text{ kJ}} \quad (8)$$

式中, $E_{\text{发电}}$ 为 CH₄ 发电的碳补偿量(以 CO₂ 计), t·t⁻¹; LHV_{CH_4} 为 CH₄ 的热值, 502 00 kJ·kg⁻¹^[34]; η 为 CH₄ 发电效率, 0.22^[34]; $\text{EF}_{\text{电力}}$ 为电力的碳排放系数(以 CO₂ 计), 0.581 t·(MW·h)⁻¹^[16].

1.4 不确定性分析

碳排放计算的不确定性来自于活动数据和排放因子的不确定性^[37]. 虽然已有研究对校园碳排放的不确定性进行了讨论, 但大多数都停留在定性描述阶段, 或者简单地描述每个排放源对整体排放的影响^[38, 39]. 本文采用了 IPCC^[40] 推荐的蒙特卡洛模拟方法, 利用 AUVtoolpro 工具评估整个校园碳排放的不确定性^[41]. 蒙特卡洛模拟方法已在大气污染研究中广泛应用^[42, 43], 但在碳排放核算研究中, 特别是校园尺度上的碳排放核算研究中还鲜有应用. 蒙特卡洛法包括 3 个步骤: ①根据数据来源, 结合 Cai 等^[44] 的研究和专家判断方法, 确定每个排放源的活动水平数据和排放因子的不确定性和概率分布; ②根据清单, 计算出每个类别的相应排放量; ③重复模拟 10 000 次, 得到不同排放类别或总排放量的概率分布, 以及用于不确定性分析的相应统计数据.

2 结果与讨论

2.1 总体碳排放情况

2021 年 A 高校校园碳排放总量(以 CO₂ 计, 下同)为 43 475.85 t, 绿地和树木的碳吸收总量为

226.81 t, 净碳排放量为 43 249.04 t. 根据图 1 和表 3, A 高校校园 5 个最大排放源是: 电力(45.65%)、天然气(21.27%)、通勤和差旅(10.50%)、食物(7.96%)和热力(6.93%), 这 5 个排放源占总碳排放量的 90% 以上. 从功能上看, 固定设施、日常生活、交通、办公和科研分别占校园碳排放总量的 69.04%、18.54%、10.89% 和 1.53%. 直接排放、间接排放和其他排放分别占总碳排放的 21.66%、52.58% 和 25.76%. 电力是最重要的能源消耗, 日常生活和教学研究等活动与用电密切相关, 基础设施和大量的科研设备也需要用电. 我国北方秋、冬季节天气寒冷, 需要大量的天然气和热力来维持室温, 因此天然气和热力的碳排放量也很高. 尽管大多数学生都住在校园里, 但仍有一些来自教师通勤的碳排放. 由于教师和学生经常到其他省份进行调研和学术交流, 差旅也带来了一定的碳排放. 虽然校园内有绿地和树木, 但碳吸收量占比不到 1%, 远远小于碳排放量. 仅依靠绿地和树木的碳吸收, A 高校很难实现碳中和的目标. 电力和热力作为 A 高校的主要能源, 导致了间接排放量占比最高, 在未来可引入光电和风电等可再生能源, 以期实现碳减排, 进而实现碳中和.

表 3 A 高校校园碳排放量
Table 3 Carbon emissions of A university

排放类型	名称	碳排放量/t
直接排放	天然气	9 249.42
	学校车辆	169.35
	小计	9 418.78
间接排放	电力	19 847.51
	热力	3 011.96
	小计	22 859.47
其他排放	通勤和差旅	4 563.54
	食物	3 459.68
	供水	950.21
	电力损耗	857.41
	污水处理	562.94
	打印	391.60
	垃圾处理	180.15
	纸张	159.57
	肥料	63.51
	实验室化学品	9.01
碳吸收	小计	11 197.62
	树木	-202.43
	绿地	-24.38
	小计	-226.81
总计		43 249.04

2.2 电力碳排放特征

如图 2(a)所示, 秋季和冬季的电力碳排放量高于春季. 6 月和 7 月的电力碳排放较高, 是由于夏季

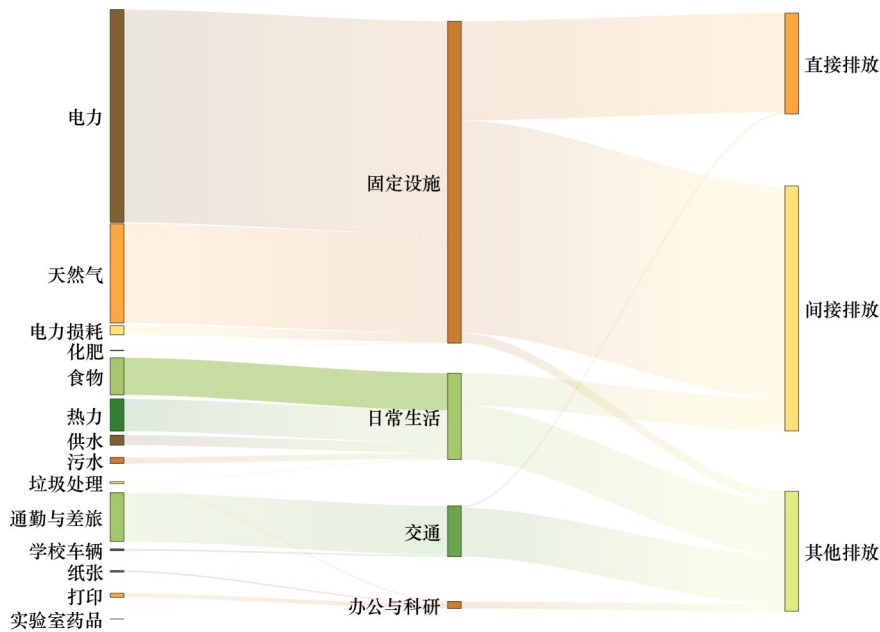


图1 A高校校园碳排放组成
Fig. 1 Carbon emission composition of A university

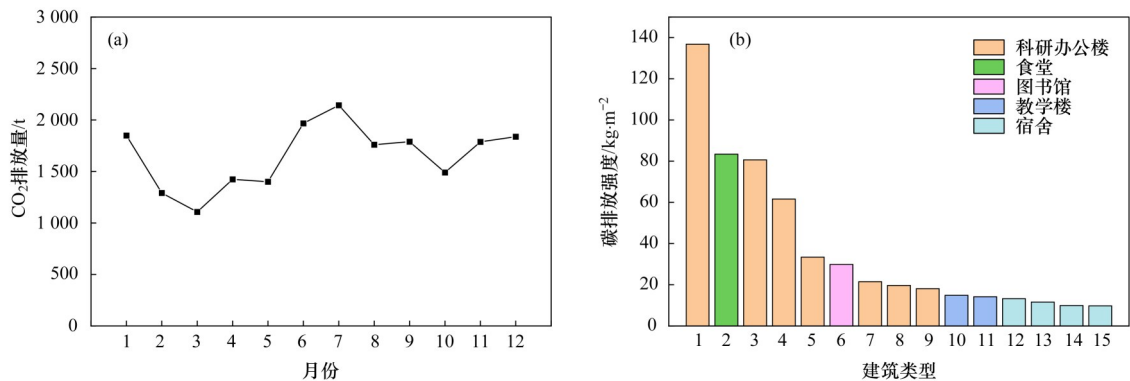
炎热，空调等制冷设备使用频繁所致。2月和3月处于寒假期间，学生人数较少，所以电力的碳排放量较低。

笔者选择了校园内一些有代表性的建筑来研究不同类型建筑的电力碳排放强度特点[图2(b)]。这些建筑包括科研办公楼、食堂、图书馆、教学楼和宿舍。除科研楼外，基本可以认为，电力的碳排放强度从高到低依次是食堂、科研办公楼、图书馆、教学楼和宿舍。科研楼有很多大型科研仪器和设备，功率大，运行频繁，所以电力的碳排放强度最高。图书馆的特点与教学楼类似，都是使用大功率灯具，工作时间长。与教学楼相比，图书馆开放时间长，冷暖设备功率大，存在夏季室内温度过低、冬季室内温度过高等能源浪费问题，因此碳排放强度也高于教学楼^[7]。虽然宿舍人口密集，但白天大部分

同学外出上课，使用电子设备的时间少，且使用的设备如电脑和台灯，功率较小，所以电力的碳强度很低。电力碳减排计划可以着重于图书馆进行展开^[45]，可采取控制在适宜温度和使用节能灯具等措施。

2.3 天然气和热力碳排放特征

天然气和热力的碳排放特点类似，表现出很明显的季节性，呈现出秋冬季节碳排放量高，春夏季节碳排放量低的特点。供暖季节从11月开始，到第2年3月结束(图3)。学校采用天然气和热力相结合的方式取暖，导致这一时期的天然气和热力消费及碳排放增加。虽然4~10月停止供热，但食堂仍然会消耗少量天然气。在供暖季，A高校可采取集中供热、分区供热和加强余热回收等措施，减少天然气和热力的使用。



1. 科研楼, 2. 食堂, 3. 林业楼, 4. 环境楼, 5. 主楼, 6. 图书馆, 7. 森工楼, 8. 生物楼, 9. 基础楼, 10. 第一教学楼, 11. 第二教学楼, 12. 12号宿舍楼, 13. 4号宿舍楼, 14. 9号宿舍楼, 15. 7号宿舍楼

图2 各月电力碳排放变化与不同类型建筑碳排放强度
Fig. 2 Change in electricity carbon emissions by month and carbon emission intensity of different types of buildings

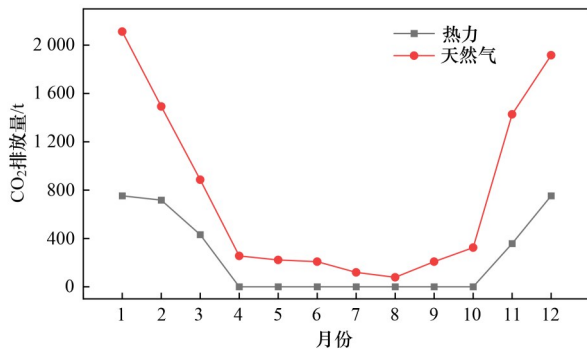


图3 各月热力和天然气碳排放的变化

Fig. 3 Variation in heat and natural gas carbon emissions by month

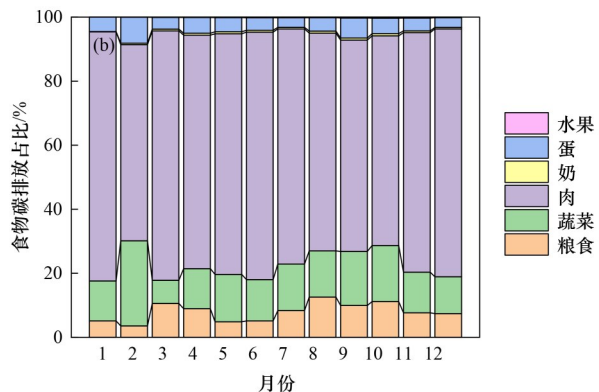
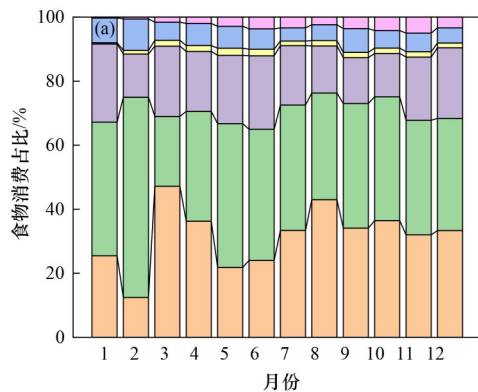


图4 2021年各月食物碳排放组成与消费组成

Fig. 4 Composition of food carbon emissions and consumption by month in 2021

2.5 污水处理碳排放特征

校园排放的污水主要为生活污水,通过市政管网输送到附近的污水处理厂进行处理.该污水处理厂采用A²O工艺,可以完成对有机物、氮和磷的有效去除,但污染物的去除会转化为温室气体排放,从而导致碳排放量的增加.从图5可以看出,污水处理碳排放主要来自于对TN的去除,这与反硝化过程中产生的N₂O密切相关^[48],其次是电力消耗,这是因为提升泵站和生物处理的鼓风和曝气系统会消耗大量电力.

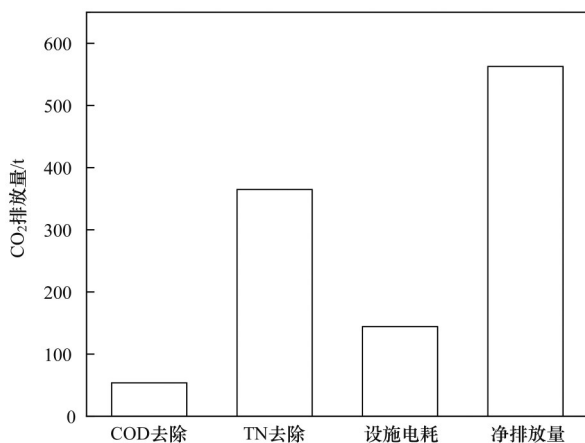


图5 污水处理碳排放

Fig. 5 Carbon emissions from wastewater treatment

2.4 食物碳排放特征

图4(a)中展示了每月校园内的食物消费比例,以蔬菜和粮食为主,与我国居民的食物消费比例相似^[46].图4(b)展示了每月由食物消耗产生的碳排放比例,肉类占60%~80%,比例相对稳定.食品的碳排放量从高到低的顺序可以认为是:肉类、蔬菜、粮食、蛋类、奶类和水果.尽管肉类不是消费最多的食物,但由于其碳排放因子远远高于其他食品,因此碳排放量最大,这与Zhang等^[47]的研究结果类似.推动“光盘行动”,减少食物浪费,尤其是减少肉类的浪费,可有效减少食物碳排放.

2.6 垃圾处理碳排放特征

A高校从2020年开始进行垃圾分类,将校园内的垃圾分为危险废物、厨余垃圾、可回收物和其他垃圾,有效减少了垃圾处理的碳排放,这与陈纪宏等^[34]和孙雨清等^[49]的研究结果类似.2021年各类垃圾的产生比例如图6所示,其中,其他垃圾处理量最大,所以碳排放总量也最高.处理不同类型每吨垃圾产生净碳排放量从小到大依次为:可回收物(-540.3 kg) < 餐厨垃圾(48.89 kg) < 其他垃圾(118.60 kg) < 危险废物(3 260.70 kg).从图7可以看

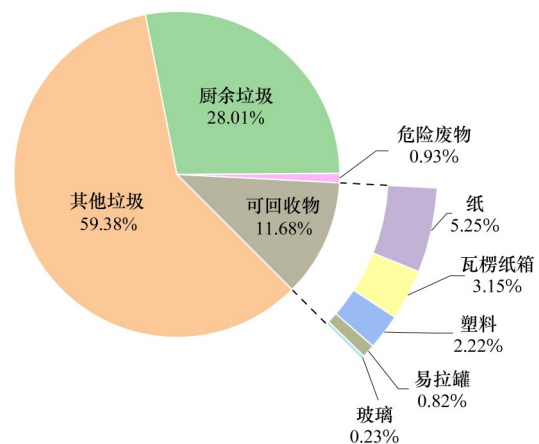
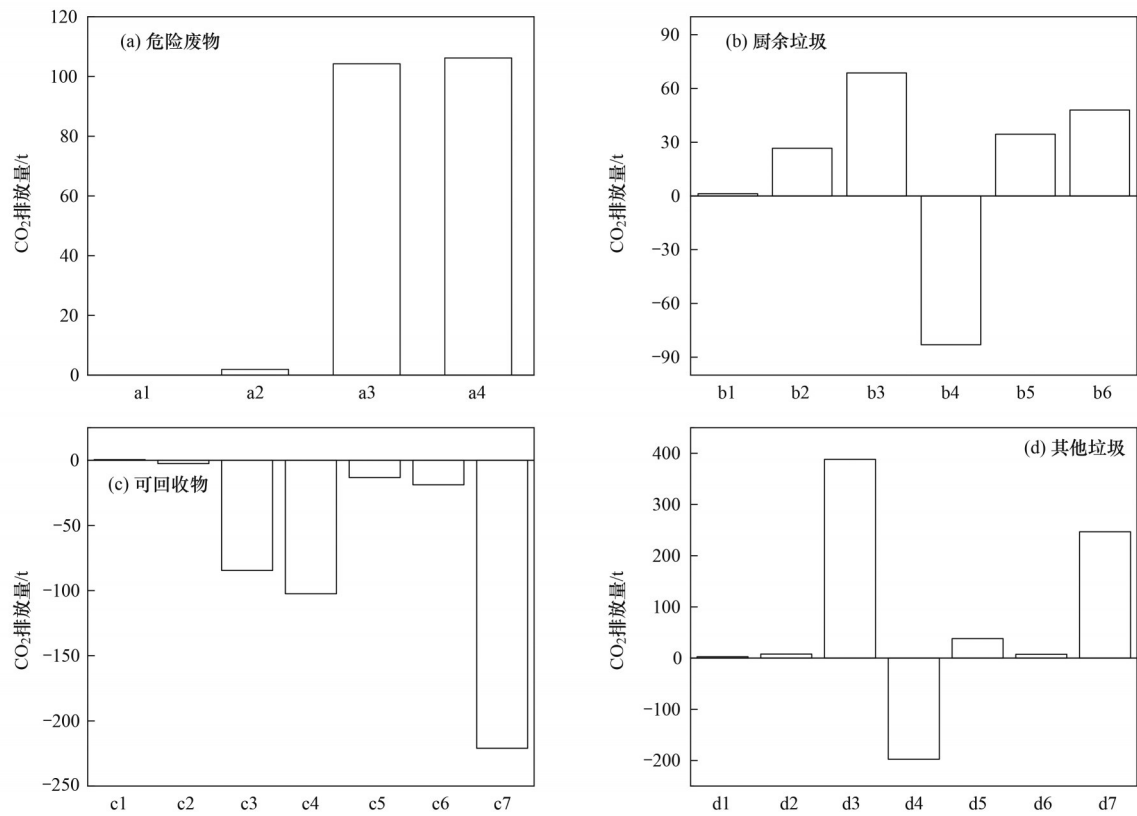


图6 A高校2021年垃圾处理情况

Fig. 6 A university waste treatment composition in 2021

出，虽然厌氧消化和填埋过程中存在 CH_4 泄漏，但回收 CH_4 用于发电可以有效抵消部分碳排放，而焚烧危险废物(如废溶剂和废容器等)会产生大量的碳排放，且垃圾焚烧厂没有采用碳捕集等减排措施，这导致处理单位重量的厨余垃圾和其他垃圾的碳排

放远远低于危险废物. 校园内有大量的旧书、快递留下的瓦楞纸箱、用于食品包装的塑料和易拉罐，回收这些物品可以有效减少碳排放. A 高校应继续落实垃圾分类政策，推动垃圾分类精细化管理，提升资源(能源)产出率.



a1. 运输, a2. 设施电耗, a3. 危险废物焚烧, a4. 净排放量, b1. 运输, b2. 设施电耗, b3. 甲烷泄漏, b4. 甲烷发电, b5. 渗滤液处理, b6. 净排放量, c1. 运输, c2. 玻璃, c3. 纸, c4. 易拉罐, c5. 瓦楞纸箱, c6. 塑料, c7. 净排放量, d1. 运输, d2. 设施电耗, d3. 甲烷泄漏, d4. 甲烷发电, d5. 甲烷焚烧, d6. 渗滤液处理, d7. 净排放量

图 7 垃圾处理碳排放
Fig. 7 Carbon emissions from waste treatment

2.7 不同地区大学之间的碳排放比较

本文对世界各地的校园碳排放进行了比较分析，以研究造成其碳排放差异的基本因素(表 4). 总的来说，A 高校人均碳排放量中等偏高. 计算范围的选择，特别是其他排放的选择，对人均碳排放量的计算结果有决定性的影响. 克莱姆森大学的研究涵盖了所有 6 种温室气体，包括校园内使用的制冷剂中添加的氯氟烃(HCFCs)，而其他案例只考察了 3 种常见的温室气体，即 CO_2 、 CH_4 和 N_2O . 克莱姆森大学的研究还考虑了校外建筑，如 Madren 会议中心，且在计算中没有包括绿地的碳吸收量，这些都导致人均碳排放量明显高于其他学校^[26]. 相反，佩塔米纳大学的计算只考虑了电力消耗、运输和垃圾处理的碳排放，计算范围较小，导致人均碳排放量远低于其他大学^[50]. 因此，制定一个对国内外大多数大学都适用的标准化碳排放计算方法，可以促进

不同地区校园碳排放的可比性，推动大学制定碳减排计划^[51].

当地的气候会一定程度上影响大学的碳排放，由于对供暖的需求较高，寒冷地区的大学往往比炎热地区的大学产生更多的碳排放. A 高校和华北水利水电大学所在的北京市和河南省都是四季分明，冬季寒冷，因此对供暖的需求很大^[27]. 两所大学的供热系统分别占其碳排放的 28.19% 和 51.3%. 另一方面，哥伦比亚国立大学位于赤道附近波哥大，年平均温度为 14°C ^[52]. 因为该校不需要供暖，所以大大减少了热力消耗带来的碳排放.

通过比较中国和其他国家的大学的直接排放、间接排放和其他排放的占比，可以看出，西方发达国家大学的其他碳排放占比普遍较高. 这种差异是由于国内外大学的管理方式不同造成的. 在中国，大学承担了大部分学生住宿和生活的责任，这导致

直接排放和间接排放的占比相对较高.相比之下,国外大学通常提供较少的校内住宿,而学生则通常选择住在校外^[53],这减少了能源的消耗,如电力和热力,并降低了直接排放和间接排放.住在校外也会导致学生通勤的碳排放增加,从而提升其他碳排放的比例.如伯恩茅斯大学,学生通勤占碳排放的41%^[54].

伯恩茅斯大学和奥卢大学2019年的人均碳排放量分别为1.41 t和1.13 t,均略低于A高校.与中国校园相比,发达国家的大学校园一般人口密度较低,生活方式也有很大不同.一般来说,西方大学有大片的绿地和景观设施,建筑密度低,能源消耗强度低.相比之下,由于土地资源紧张,中国大学的特点是建筑密度大,楼层高,人口多.此外,西方大学较早制定了低碳和可持续发展计划以应对气候变化,并取得了一些成果.例如,2006年美国有12所大学和学院签署了《美国大学

校长气候承诺》(ACUPCC),ACUPCC要求参与大学制定和实施气候行动计划(CAP).近年来,越来越多的国家提出了碳中和时间表,美国和澳大利亚的大学已经将其CAP升级为碳中和计划,提出了大学的碳中和时间表和路线图^[55].一些大学已经实施了具体措施来减少碳排放.例如,哥伦比亚国立大学82%的电力来自可再生能源,奥卢大学100%的电力来自可再生能源,大大降低了电力的碳排放系数.在英国,“智能校园”的概念已经被引入,将智能服务和信息通信技术整合到大学运营管理中,以减少建筑能耗^[56].墨尔本大学建立了一个垃圾再利用中心,并实施了循环经济战略,仅在2017年就回收了2 300万件电子产品和家具,减少了23 673 GJ的能源消耗和1 466 t的碳排放量^[57].随着我国碳中和战略的出台,高校也应制定相应的碳减排和碳中和计划,积极推动低碳校园的发展转型.

表4 国内外大学碳排放比较
Table 4 Comparison of different research on the domestic and foreign campuses

名称	位置	人均碳排放量 t/人·a ⁻¹	直接排放 /%	间接排放 /%	其他排放 /%	年份	文献
伯恩茅斯大学	英国伯恩茅斯	1.41	9	27	64	2019	[54]
克莱姆森大学	美国南加利福尼亚	4.3	18.91	40.58	40.51	2014	[26]
佩塔米纳大学	印度尼西亚雅加达	0.52	—	98.96	1.04	2019	[50]
奥卢大学	芬兰奥卢	1.13	1.68	40.63	57.69	2019	[38]
哥伦比亚国立大学	哥伦比亚波哥大	0.432	2.84	14.03	83.13	2019	[52]
华北水利水电大学	中国郑州	1.39	—	—	—	2019	[27]
A高校	中国北京	1.52	21.54	52.28	26.17	2021	本文

2.8 不确定性和相关性分析

表5列出了蒙特卡洛模拟的结果,用于确定碳排放计算中的不确定性和相关性.研究的总体不确定性在置信度范围内,这表明本研究结果可信度很高,能准确反映A高校碳排放情况.然而,通勤和差旅、实验室化学品的碳排放不确定性范围较大,这主要是由于使用了调查问卷的方式获得活动水平数据^[58].此外,化肥碳排放的不确定性范围也很大,

因为使用的是已有研究中的排放因子,可能与当地的排放因子不同.值得注意的是,其余排放源表现出较小的不确定性范围.这说明活动数据和排放因子的获取方式对不确定性起着重要作用^[59],建议使用电表读数或提供购物发票、车票等凭证来获取活动数据保证以其可靠性^[60],对于排放因子则尽可能地从当地的研究中选择排放因子或通过理论计算的方法得出排放因子,以避免出现较大误差.

表5 排放/吸收源的不确定性范围和相关系数
Table 5 Emission/absorption source uncertainty range and correlation coefficient

名称	不确定性/%	相关系数	名称	不确定性/%	相关系数
电力	-19.86 ~ 23.88	0.495	打印	-33.34 ~ 32.93	0.012
天然气	-19.93 ~ 24.57	0.254	垃圾处理	-46.54 ~ 83.59	0.046
通勤和差旅	-68.21 ~ 209.79	0.777	纸张	-213.55 ~ 85.58	0.015
食物	-46.11 ~ 85.27	0.268	学校车辆	-19.79 ~ 39.91	0.006
热力	-19.68 ~ 23.91	0.074	化肥	-64.42 ~ 198.24	0.005
供水	-26.76 ~ 36.21	0.026	实验室化学品	-82.81 ~ 466.04	0.001
电力损耗	-30.42 ~ 43.15	0.036	树木	-26.48 ~ 37.02	-0.004
污水	-27.21 ~ 36.06	0.008	绿地	-35.09 ~ 53.78	-0.025
			总碳排放	-13.61 ~ 26.08	—

本研究使用相关系数来表明每个排放源对总碳排放不确定性的贡献, 相关系数越大则说明该排放源对总碳排放不确定性的贡献越高. 通勤和差旅由于其高碳排放和不确定性较大而具有最高的相关系数, 紧随其后的是电力, 尽管其不确定性较低, 但其碳排放量远高于其他来源, 天然气和食物不确定性较高的原因与电力类似. 所有其他排放源由于碳排放量相对较小, 相关系数也较小. 为了提高碳排放计算的准确性, 必须关注碳排放较大的排放源, 以控制碳排放总量的不确定性.

3 结论

(1) 使用排放因子法和理论算法结合的综合方法, 计算出 A 高校 2021 年的净碳排放总量为 43 249.04 t, 其中电力、天然气、通勤和差旅、食物和热力是主要的碳排放源, 与其他国家地区学校相比, 人均碳排放量中等偏大. 通过蒙特卡洛模拟对清单进行不确定性和相关性定量分析, 证明数据具有较好的可信度.

(2) 电力碳排放在校园内各功能区的不同建筑中表现出明显的差异, 并受到季节性变化的影响; 天然气和热力碳排放显示出明显的季节性, 冬季的碳排放量较高; 食物相关的碳排放主要归因于肉类消费, 其他食物消费碳排放量较小; 校园污水处理产生的碳排放主要来自 TN 去除所产生的 N_2O ; 垃圾处理产生的碳排放取决于垃圾类型与处理方式.

(3) 对于重点排放源采取针对性措施进行碳减排. 引入可再生能源可有效减少间接排放, 进而减少总排放量; 采用节能灯具等措施减少电力碳排放; 采用余热回收和集中供热等方式减少热力和天然气碳排放; 推动“光盘行动”减少食物碳排放; 提升垃圾分类精细化管理水平减少垃圾处理碳排放. 上述措施均可有效减少校园碳排放, 助力校园绿色低碳发展.

参考文献:

- [1] Yang Q, Zhou H W, Bartocci P, *et al.* Prospective contributions of biomass pyrolysis to China's 2050 carbon reduction and renewable energy goals[J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1), doi: 10.1038/s41467-021-21868-z.
- [2] Xiong W Y, Mok K H. Sustainability practices of higher education institutions in Hong Kong: a case study of a sustainable campus consortium[J]. *Sustainability*, 2020, **12**(2), doi: 10.3390/su12020452.
- [3] 王焰新, 徐绍红, 齐睿. 论高校碳中和规划的架构[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2021, **21**(6): 1-9.
Wang Y X, Xu S H, Qi R. Framework of carbon neutrality plan in colleges and universities[J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2021, **21**(6): 1-9.
- [4] Li X Q, Ni G P, Dewancker B. Improving the attractiveness and accessibility of campus green space for developing a sustainable university environment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(32): 33399-33415.
- [5] 国家统计局. 中国统计年鉴-2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [6] Yuan X L, Zuo J, Huisingh D. Green universities in China - what matters?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, **61**: 36-45.
- [7] Li X W, Tan H W, Rackes A. Carbon footprint analysis of student behavior for a sustainable university campus in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **106**: 97-108.
- [8] Asadi-Shekari Z, Moeinaddini M, Zaly Shah M. A pedestrian level of service method for evaluating and promoting walking facilities on campus streets[J]. *Land Use Policy*, 2014, **38**: 175-193.
- [9] Cooper S, Parkes C, Blewitt J. Can accreditation help a leopard change its spots? [J]. *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, 2014, **27**(2): 234-258.
- [10] 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**: 39-47.
- [11] Gu Y F, Wang H T, Xu J, *et al.* Quantification of interlinked environmental footprints on a sustainable university campus: a nexus analysis perspective[J]. *Applied Energy*, 2019, **246**: 65-76.
- [12] 赵薇, 郑斌, 武斌, 等. 基于 IPCC 排放清单的校园温室气体排放研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, **40**(12): 15-19.
Zhao W, Zheng B, Wu B, *et al.* Quantitative analysis of greenhouse gas emissions from university campus based on IPCC method[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, **40**(12): 15-19.
- [13] 邹蓓, 张晨悦, 房涛, 等. 基于碳平衡核算的寒冷地区高校校园低碳建设策略研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, **27**(4): 144-150.
Zou R, Zhang C Y, Fang T, *et al.* Research on low-carbon construction strategy of campus in cold area based on carbon balance accounting [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, **27**(4): 144-150.
- [14] Yañez P, Sinha A, Vásquez M. Carbon footprint estimation in a university campus: evaluation and insights [J]. *Sustainability*, 2020, **12**(1), doi: 10.3390/su12010181.
- [15] Güereca L P, Torres N, Noyola A. Carbon footprint as a basis for a cleaner research institute in Mexico [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, **47**: 396-403.
- [16] GB/T 32150-2015, 工业企业温室气体排放核算和报告通则[S].
- [17] Jung J, Ha G, Bae K. Analysis of the factors affecting carbon emissions and absorption on a university campus - focusing on Pusan National University in Korea [J]. *Carbon Management*, 2016, **7**(1-2): 55-65.
- [18] Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y, *et al.* Carbon flow of urban system and its policy implications: the case of Nanjing [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **33**: 589-601.
- [19] Huang Y, Sun W J, Qin Z C, *et al.* The role of China's terrestrial carbon sequestration 2010-2060 in offsetting energy-related CO₂ emissions [J]. *National Science Review*, 2022, **9**(8), doi: 10.1093/nsr/nwac057.
- [20] Fitzgerald G C, Krones J S, Themelis N J. Greenhouse gas impact of dual stream and single stream collection and separation of recyclables [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, **69**: 50-56.
- [21] 曹志宏, 郝晋珉, 邢红萍. 中国居民食物消费碳排放时空演变趋势及其驱动机制分析[J]. *地理科学进展*, 2020, **39**(1): 91-99.
Cao Z H, Hao J M, Xing H P. Spatial-temporal change of Chinese resident food consumption carbon emissions and its driving mechanism[J]. *Progress in Geography*, 2020, **39**(1): 91-99.
- [22] Cai B F, Liang S, Zhou J, *et al.* China high resolution emission database (CHRED) with point emission sources, gridded emission data, and supplementary socioeconomic data [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, **129**: 232-239.
- [23] Wang Y T, Yang X C, Sun M X, *et al.* Estimating carbon emissions from the pulp and paper industry: a case study [J]. *Applied Energy*, 2016, **184**: 779-789.
- [24] 吕晨, 张哲, 陈徐梅, 等. 中国分省道路交通二氧化碳碳排放因子[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3122-3130.
LÜ C, Zhang Z, Chen X M, *et al.* Study on CO₂ emission factors of

- road transport in Chinese provinces [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3122-3130.
- [25] 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**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129181.
- [26] 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**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122600.
- [27] 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**, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113001.
- [28] Turner D A, Williams I D, Kemp S. Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, **105**: 186-197.
- [29] Zheng J J, Suh S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics [J]. *Nature Climate Change*, 2019, **9**(5): 374-378.
- [30] Hou G L, Delang C O, Lu X X, *et al.* Valuing carbon sequestration to finance afforestation projects in China [J]. *Forests*, 2019, **10**(9), doi: 10.3390/f10090754.
- [31] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 等. 中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, **25**(4): 118-124.
- [32] Cai B F, Gao Q X, Li Z H, *et al.* Study on the methane emission factors of wastewater treatment plants in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, **25**(4): 118-124.
- [33] 张岳, 葛铜岗, 孙永利, 等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究 [J]. *中国给水排水*, 2021, **37**(9): 65-74.
- [34] Zhang Y, Ge T G, Sun Y L, *et al.* Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, **37**(9): 65-74.
- [35] Du J, Zhou C C, Zhang Y L, *et al.* Physical-chemical properties of municipal solid waste and the implication for urban management on greenhouse gas emissions: a case study in Hefei, China [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, **10**(35): 11692-11701.
- [36] 陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 等. 垃圾分类对碳减排的影响分析: 以青岛市为例 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2995-3002.
- [37] Chen J H, Bian R X, Zhang T X, *et al.* Influence of the classification of municipal solid wastes on the reduction of greenhouse gas emissions: a case study of Qingdao City, China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2995-3002.
- [38] 李颖, 武学, 孙成双, 等. 基于低碳发展的北京城市生活垃圾处理模式优化 [J]. *资源科学*, 2021, **43**(8): 1574-1588.
- [39] Li Y, Wu X, Sun C S, *et al.* Optimization of Beijing municipal solid waste treatment model based on low-carbon development [J]. *Resources Science*, 2021, **43**(8): 1574-1588.
- [40] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行) [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2011.
- [41] Konstantinavičiute I, Bobinaite V. Comparative analysis of carbon dioxide emission factors for energy industries in European Union countries [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **51**: 603-612.
- [42] Kiehle J, Kopsakangas-Savolainen M, Hilli M, *et al.* Carbon footprint at institutions of higher education: the case of the University of Oulu [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **329**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117056.
- [43] Ozawa-Meida L, Brockway P, Letten K, *et al.* Measuring carbon performance in a UK university through a consumption-based carbon footprint: de Montfort University case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, **56**: 185-198.
- [44] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, 2006-04-26.
- [45] Huang Z J, Hu Y T, Zheng J Y, *et al.* A new combined stepwise-based high-order decoupled direct and reduced-form method to improve uncertainty analysis in PM_{2.5} simulations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(7): 3852-3859.
- [46] Yu P Y, Han Y L, Wang M D, *et al.* Heavy metal content and health risk assessment of atmospheric particles in China: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **867**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161556.
- [47] Blanco M N, Bi J Z, Austin E, *et al.* Impact of mobile monitoring network design on air pollution exposure assessment models [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, **57**(1): 440-450.
- [48] Cai B F, Cui C, Zhang D, *et al.* China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015 and uncertainty analysis [J]. *Applied Energy*, 2019, **253**, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113579.
- [49] Guerrieri M, La Gennusa M, Peri G, *et al.* University campuses as small-scale models of cities: quantitative assessment of a low carbon transition path [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, **113**, doi: 10.1016/j.rser.2019.109263.
- [50] 韩金雨. 中国食物消费碳排放的全球背景及其演变趋势研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [51] Zhang H Y, Xu Y, Lahr M L. The greenhouse gas footprints of China's food production and consumption (1987-2017) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113934.
- [52] Ni B J, Yuan Z G. Recent advances in mathematical modeling of nitrous oxides emissions from wastewater treatment processes [J]. *Water Research*, 2015, **87**: 336-346.
- [53] 孙雨清, 钱寅飞, 储思琴. 苏州市垃圾分类对焚烧过程碳排放的影响 [J]. *环境卫生工程*, 2023, **31**(1): 104-111, 118.
- [54] Sun Y Q, Qian Y F, Chu S Q. The impact of waste classification on carbon emissions in the incineration process in Suzhou [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2023, **31**(1): 104-111, 118.
- [55] 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**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119172.
- [56] Robinson O, Kemp S, Williams I. Carbon management at universities: a reality check [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **106**: 109-118.
- [57] Cano N, Berrio L, Carvajal E, *et al.* Assessing the carbon footprint of a Colombian University campus using the UNE-ISO 14064-1 and WRI/WBCSD GHG protocol corporate standard [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**(2): 3980-3996.
- [58] Soltani A, Allan A, Nguyen H A, *et al.* Students' commuting pattern from the viewpoint of environmentalism: comparing Australia with China [J]. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2019, **20**(1): 91-114.
- [59] Filimonau V, Archer D, Bellamy L, *et al.* The carbon footprint of a UK university during the COVID-19 lockdown [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **756**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143964.
- [60] Dyer G, Dyer M. Strategic leadership for sustainability by higher education: the American college & university presidents' climate commitment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **140**: 111-116.
- [61] Kourgiouzou V, Commin A, Dowson M, *et al.* Scalable pathways to net zero carbon in the UK higher education sector: a systematic review of smart energy systems in university campuses [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, **147**, doi: 10.1016/j.rser.2021.111234.
- [62] Stephan A, Muñoz S, Healey G, *et al.* Analysing material and embodied environmental flows of an Australian university-towards a more circular economy [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, **155**, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104632.
- [63] Valls-Val K, Bovea M D. Carbon footprint in higher education institutions: a literature review and prospects for future research [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021, **23**(9): 2523-2542.
- [64] Li Y, Du W, Huisingh D. Challenges in developing an inventory of greenhouse gas emissions of Chinese cities: a case study of Beijing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **161**: 1051-1063.
- [65] Kongboon R, Gheewala S H, Sampattagul S. Greenhouse gas emissions inventory data acquisition and analytics for low carbon cities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **343**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130711.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)