

“双碳”目标下城市空间数字化技术应用研究进展

朱丽^{1,2}, 马俊榕¹

1. 天津大学建筑学院, 天津 300072

2. APEC 可持续能源中心, 天津 300072

摘要 目前,城市空间碳排放的数字化技术中轨迹数据挖掘是需要关注的发展方向。数字化技术为空间碳源和碳汇数据的准确获取和分析提供了动态数据信息平台,可提升国土空间规划的全要素管控效率,促进城市领域的碳减排。基于数字化分析方法发现:生态脆弱性识别与安全格局构建是建立生态韧性城市空间需要重点关注的方面,利用遥感技术测算碳汇过程中的同一类型内容由于地理特征不同带来误差的问题值得关注,未来城市空间碳汇精准计量需要通过宏、微观相结合,多平台、多时段动态监测相结合的方式来实现。

关键词 “双碳”目标;城市空间;国土空间规划

中国二氧化碳排放力争于2030年之前达到峰值,努力争取2060年实现碳中和^[1]。在全球的碳排放中,城市贡献了其中约70%,并且消耗了全球2/3的能源^[2-3]。城市低碳发展是广泛而深刻的经济社会系统性变革,综合考虑能源问题与城市的可持续发展具有现实意义。从全球行动和国家层面来看,全面推进生态环境改善以及提升资源与能源效率不仅依靠行政与规划管控,还需要城市空间发展理念与有效的技术结合作为支撑。中国已经逐步由“工业经济”向“数字经济”转型^[4],数字技术的渗透全面推动了城市全要素管控的优化升级。通过结合地理信息系统(GIS)和实时卫星通信,利用能源

生产和消费数据、金融交易平台数据以及经济和社会核算数据,可实现碳排放量的精确计算和测量,从而建立区域碳交易平台的智慧互联,为国家及其城市提供以人为中心的碳中和的最佳技术和政策组合。

1 城市碳中和与数字化技术

2018年,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在发布的《全球升温1.5度特别报告》中希望全球变暖限制在1.5℃,为此在土地、能源、工业、建筑、交

收稿日期:2021-12-15;修回日期:2022-03-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0704400)

作者简介:朱丽,教授,研究方向为低碳建筑设计与技术集成、低碳城镇能源规划,电子信箱:zhuli1977@tju.edu.cn

引用格式:朱丽,马俊榕.“双碳”目标下城市空间数字化技术应用研究进展[J].科技导报,2022,40(6):38-45;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.06.005

通和城市方面,都需要作出迅速且前所未有的变革^[5-7]。将温升控制在1.5℃意味着2030年前,全球年排放需要在2010年的基础上消减45%,并在2050年前达成“零排放”的目标^[8]。世界自然基金会(World Wide Fund for Nature or World Wildlife Fund, WWF)提出的国际城市应对气候变化中长期减排行动表明:全球范围内除寒带外,各气候类型区内均有城市致力于零排放未来^[9]。人类和居住的城市面临着气候变化带来的挑战和机遇,需要在各个层面向低碳转型迈进^[10]。与此同时,以数字化、人工智能化为代表的第三次工业革命和以虚拟现实、量子信息技术、清洁能源技术为代表的第四次工业革命也给城市的可持续发展带来了技术解决方案。

城市规划与政策制定者在多层次治理城市中倡导低碳发展理念和转型更新要求,对创新政策和实施内容给出新的发展导向^[11-13]。就中国而言,在城市空间落实低碳目标进程中,对国土空间规划及前沿技术提出了新的要求。2021年9月22日,中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》^[14],一方面从国土空间规划架构层面,强调将“双碳”目标逐级扎实落实于五级三类的国土空间中的重要性;另一方面从信息化建设与科学技术布局层面强调前沿技术应用国土空间规划的重要性。前沿技术的应用可以保障国土空间规划全周期科学且有效的落实“双碳”目标。城市层面的低碳活动和实践,带来过渡变革中与之匹配的参与性战略以及支撑的重要技术手段^[15]。在构建国土空间规划中数字化技术有效推动了“双碳”目标的实现。以温室气体的吸收、释放机制耦合国土空间规划、治理是主导的研究方向。鄢金明等^[16]提出制定国土空间规划可从碳减排与碳汇两个层面落实“双碳”目标。熊健等^[17]通过总结应对气候变化的规划经验,指出空间规划作为重要城市管理手段在交通、建筑、土地利用等关键领域发挥了减碳排、增碳汇的重要作用。

碳排放与碳汇是融合数字化与国土空间规划后两项落实“双碳”目标的重要抓手。具体来说,规划与实施阶段有效的技术应用可以保障国土空间

规划落实“双碳”目标的科学性与精准性。Lee等^[18]运用多层次结构方程模型(SEM)分析了美国125个最大的城市化地区其城市形态如何影响家庭二氧化碳排放量问题,研究指出制定城市政策满足城市智慧型增长的关键是减少温室气体排放和稳定气候战略。Makido等^[19]以50个日本中小城市为研究对象,运用遥感技术描绘城市区域,考虑城市中聚落斑块的物理属性,最终建立碳排放与城市形态之间的关系。Wang等^[20]运用定量分析城市紧凑性指数和多中心性指标,得出中国104个城市形态与二氧化碳排放的关系,用于指导城市空间结构进而实现低碳目标。黄贤金等^[21]基于IPAT和IBIS模型,在预测人为碳排放变化趋势和陆地生态系统固碳能力基础上,分析了中国2060年实现碳中和的可行性以及国土利用碳汇分布情况,为优化国土空间分布格局提供决策参考。除了城市结构、布局、形态外,学者也探索数字化技术应用于城市治理及国土空间规划落实低碳目标的挑战与难点内容。Glaeser等^[22]量化美国不同地点新建筑相关的二氧化碳排放量,指出不断变化的城市发展模式可能会对总碳排放产生巨大影响。张赫等^[23]以县域面板数据为基础,通过数理统计方法构建低碳评价指标体系来掌握县域国土空间总体规划控制碳排放层面薄弱环节。Zheng等^[24]利用高斯羽流模型研究中国46个城市和工业区的二氧化碳排放的卫星观测值,重点是开发了一种新的客观方法,基于卫星检索量化当地人为二氧化碳排放情况。

监督评估阶段有效的技术应用可以依托“多规合一”及“一张图”保障“双碳”监测评估科学性与及时性。“多规合一”与“一张图”重点在“一”^[25],统一底图、统一标准、统一平台和统一管理可从城市尺度整合资源,全过程精准管理碳减排与碳汇。近年来,全国遵循国土空间规划“一张图”平台体系框架的指引,由上而下落实“双碳”目标。北京推进数据整合与数据库构建、标准研究、系统开发和规划应用等内容,较为全面地探索了“一张图”建设与实施路径,为落实“双碳”目标提供了数字化的支撑^[26]。在资源整合的基础上,运用技术实现更加智慧化的监督和更精进的评估是学者重点探索的内容。美

国加州大学伯克利分校设计与实施了一种分布式二氧化碳监测仪器,成功地在空间尺度上捕获了与城市环境相关的每小时、每日和季节性的二氧化碳信号,这些信号在过去无法仅由大气传输模型准确表示^[27]。Han等^[28]运用 Arcgis 平台比较分析 8 个排放清单中京津冀地区 13 个城市的化石燃料和工业过程引起的二氧化碳排放情况,发现基于国家级数据的排放清单与地级市级别的清单中碳排放估算中产生了很大差异。因此,在将国家清单用于城市层面时应该谨慎。碳排放清单确定的高排放区域对监测仪器的部署具有重要意义^[29]。相关研究对于国土空间规划耦合双碳目标的研究各有侧重,但数字化技术始终贯穿其中。

碳达峰、碳中和目标如何影响国土空间规划的数字化技术应用演进如图 1 所示。“双碳”目标通过碳排与碳汇 2 条主线落实到国土空间规划内容中,且碳排放效果受能源消费和能源结构的影响。城市中交通、建筑与产业是 3 大重要的能源消费终端^[30]。能源及消费结构调整背景下传统的规划需

要发生变革,尤其在能源需求的发展与分配方面需要融合智慧与技术性优势。碳汇效果取决于国土空间规划中增汇行动的力度。具体体现在森林、草原、湿地、耕地等国土空间吸收并储存二氧化碳的能力^[31]。

为了精确掌握国土空间各要素碳排放与碳汇的情况,有效支撑规划的科学性与合理性,需要构建碳排放量与碳汇计量的基础数据库。智慧与数字化时代背景下,数据在体量、类型、应用多维度发生变革。从小样本走向大样本,从静态走向动态^[32],从注重物质空间数据走向注重活动空间数据。在应用过程中多源数据不仅仅是工程体系的拼凑,而是转向多源数据统一。统一的数据形成了国土空间基础信息平台。平台即数字化生态基础设施。在数字化生态基础设施上构建规划内容,首先要解决划定生态保护红线与永久基本农田控制线的问题。由此,碳减排耦合数字国土的关键内容是轨迹数据的挖掘,碳汇耦合数字国土的关键内容是生态脆弱空间的识别与生态安全格局的构建。

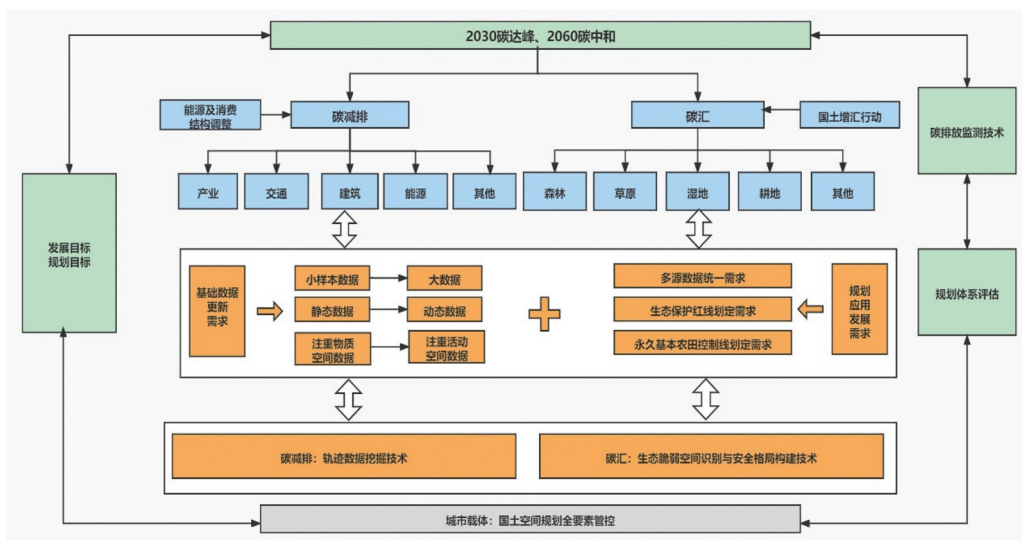


图1 “双碳”背景下国土空间规划的数字化技术应用分析

2 城市空间碳排放数字化技术

传统的碳排放统计数据数据库包含人口、用地、交通路网以及耗煤量等小样本数据,最终的碳排放结

果由估算得到。由于燃烧效率以及负荷情况等因素导致基于数据估算的结果可能存在较大的误差。传统的数据获取方式依托调查问卷、实地调研、统计年鉴等途径,数据在时间维度多以年为单位进行

计量,导致数据为静态数据且存在滞后性。传统数据统计范围取决于空间规划的范围,多与行政区划一致。限定的数据范围缺乏对全域尺度能源资源流动情况的考虑。随着信息化建设在城市载体中逐步运用,数字化技术的创新为智慧城市提供极大动能^[33]。传统数据向大样本量、实时动态、注重活动空间的方向变革。利用传感器、各类模型,拓宽时间与空间维度的数据范围可大批量精准抓取数据。通过轨迹数据挖掘技术可以实现数据的动态溯源及精准掌握人与环境的互动关系。

碳排放的轨迹分析主要有时间轨迹、空间轨迹和时空轨迹3大类。例如,Wang等^[34]从时间轨迹维度出发,利用代谢非线性灰色模型(MNGM)与自回归综合平均移动(ARIMA)、反向传播神经网络(BPNN)分别组合成MNGM-ARIMA与MNGM-BPNN模型预测中国、美国、印度的碳排放量。Dimitriou等^[35]以空间轨迹为视角通过浓度加权轨迹分析PM_{2.5}等数据的空间分布特征。Zhang等^[36]以空间轨迹为视角,基于出租车油耗和二氧化碳排放因子计算排放量,同时利用核密度分析的可视化方法获得碳排放的动态轨迹时空分布。不同于基于能源消费的时空轨迹分析,有的学者研究侧重陆地生态的变化轨迹带来的净碳变化^[37],他们基于历史土地利用重建分析、遥感的当代土地利用变化分析和陆地生物地球化学模拟模型相结合的方法,来估计巴西马托格罗索州在1901—2006年期间的净碳平衡。

碳排放轨迹数据挖掘研究有以下3类方向。

1) 第一类侧重系统维度的碳排放轨迹数据挖掘,其中对交通数据的计量是主导研究方向。孙占波等^[38]以交通干线样本流中收集的移动传感数据(如GPS轨迹)估计整个交通人口的轨迹,自由流动的车辆和排队车辆的状况,然后使用综合模态排放模型(CMEM)估算基于车辆的碳排放,最后估算整个交通流的总碳排放。在传统的GPS轨迹数据测算研究上,Wang等^[39]提出一种基于低频GPS轨迹估计车辆排放量的新方法,具体通过遗传算法降低估算的误差。除了私人交通,Saxe等^[40]追踪了公

共交通中地铁(Sheppard线路)从开通到2011年的碳排放情况与影响。

2) 第二类侧重空间维度的碳排放轨迹数据挖掘。为了反应面域维度的碳排放情况,Sun等^[41]将交通轨迹数据与人口密度数据叠合,按照人口分布将研究区域划分为网格,计算网格碳排放量(GCE)和网格平均碳排放量(GACE),得到出行排放的时空趋势及影响因素。以空间维度挖掘轨迹数据时人口要素应着重考量。日本学者Kaya于1989年在IPCC举办的研讨会上提出计算碳排放量的“Kaya恒等式”被广泛利用^[42]。恒等式中提出二氧化碳排放量主要由人均GDP、人口数量、能源强度、碳排放系数因素决定。姜洋等^[43]通过对Kaya公式扩展,构建土地利用与碳排放的关联框架,计量建筑、生产及交通部门等的碳排放量以及城市生态绿地空间的碳汇量,从而得到城市空间的碳排放量。金乐琴等^[44]在“Kaya等式扩展式”基础上,建立LMDI分解模型,充分挖掘碳排放面域轨迹数据得出中国东部、中部、西部三大区域空间异质性特征。

3) 第三类侧重大数据维度的碳排放轨迹数据挖掘。例如为了精准掌握建筑碳排放轨迹,霍腾飞等^[45]开发了建筑终端能源动态仿真模型,将情景分析方法与蒙特卡罗模拟相结合,纳入不确定性要素探索可能的碳排放峰值和峰值时间,将集成的SD-LEAP模型应用于中国夏热冬冷区的典型城市重庆,结果显示城市住宅建筑碳排放可能会在2042年达到峰值,远远超出中国2030年的目标。系统动力学模型作为一种综合的仿真模型被大量应用于碳排放的分析模拟中。吴萌等^[46]、胡玥昕等^[47]运用系统动力学模型模拟不同省市下不同行业的能源与产业结构情况、碳排放管理内容。通过低碳发展模式进行系统动力学仿真预测,可指导城市经济与能源协调发展路径。

在智慧城市与“互联网+”时代背景下,交通方式的变革带来的对碳排放量方式变化的研究,以及轨迹线与人口活动线交织下的精准计量面域碳排放特征研究将是未来研究热点;同时,大数据对于碳排放的情景模拟与预测也成为未来发展的前沿。

3 城市空间碳汇数字化技术

《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)将碳汇定义为从大气中清除二氧化碳的过程、活动或机制^[48]。生物固碳主要是利用植物的光合作用,提高生态系统的碳吸收和储存能力,从而减少大气中二氧化碳的浓度。生物固碳由于经济性好且环境友好是广泛采用的固碳方法。基于此,传统的碳汇数据测算主要依托林业、农业的生产活动碳汇形成机理测算固碳能力。例如林业测算是区分森林、竹林等类型,具体包含林地生物总量、林地面积、转换系数等变量。但是数据来源的不同,造成碳汇能力测算存在误差。例如,森林基础数据来源于国家森林清单、统计年鉴、遥感监测、原位调查等^[49],不同的渠道会造成碳汇数据测算的差距。随着国土空间规划与实践的开展,同一系统不同渠道数据逐步实现了汇集,不同系统也综合汇总于一张规划底图。多源数据统一的发展趋势为进一步精准测算碳汇数据提供基础。

国土空间规划区别于传统的城市规划,更加注重生态文明建设。在生态文明背景下精准计算碳汇需要界定清晰边界,生态保护红线划定以及永久基本农田划定显得尤为重要。构建基本安全格局的基础是对生态脆弱空间的摸底工作。生态脆弱空间识别技术与安全格局构建技术作为落实碳汇计算的基础工作被广泛讨论与分析。郭泽呈等^[50]运用空间主成分分析法(SPCA)和遥感指数识别了石羊河流域2000年和2016年生态脆弱性时空演变过程。王士远等^[51]基于遥感技术,应用新型遥感生态指数RSEI对长白山自然保护区1995—2015年的生态脆弱性进行评价。袁媛等^[52]集InVEST模型、形态学空间格局分析、Arcgis空间权重计算于一体分析生态安全格局,识别出生态“夹点”、生态“障碍点”、生态“断裂点”。

生态系统净生产力法是研究生态系统碳汇的基本方法。碳汇研究通过测定生物净初级生产力和环境土壤的呼吸消耗来实现^[53]。目前碳汇多基于光学和微波遥感数据计算,全球80%的森林碳

汇都高于饱和点^[54]。地理环境特征的不同造成了生物碳收支核算结果的不同,这制约了碳汇的精准计量。故计量碳汇挑战与机遇并存,未来应走向宏观与微观结合,多平台与多时段动态监测结合的精准计量方向。依托精准的碳排放与碳汇数据对于国土空间规划进行全要素管控,可实现“双碳”目标与城市空间发展路径的有效对接。

4 结论

数字化技术支撑城市所有部门和职能实现数字化链接,进而共同推进“双碳”目标。数字化技术使得城市治理从注重小样本、静态数据及单一片区管理走向注重大样本、动态数据以及注重活动空间管理。城市碳减排数字化技术聚焦时空轨迹数据挖掘。未来注重变革的交通方式、精准计量面域的碳排放分异情况以及综合应用大数据、人工智能技术是研究热点内容。碳汇数字化技术注重生态脆弱空间识别与生态安全空间格局构建技术。依托光学与遥感核算碳汇是主导方向,但是由于地域空间的差异带来同一品类碳汇核算存在误差,未来结合多尺度,多时段精准计量碳汇是研究热门方向。数据的统一、技术的融合、部门与系统相互连接可提升城市的可持续性、连通性、生态韧性,为实现2030年碳达峰与2060年碳中和目标提供有效的基础。

参考文献(References)

- [1] 本刊编辑部. 为力争二氧化碳排放于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和而奋斗[J]. 中国能源, 2020, 42(10): 1.
- [2] Huovila A, Siikavirta H, Antuña R C, et al. Carbon-neutral cities: Critical review of theory and practice[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 341: 130912.
- [3] Wiedmann T, Chen G, Owen A, et al. Three-scope carbon emission inventories of global cities[J]. Journal of Industrial Ecology, 2021, 25: 735-750.
- [4] 翟云, 蒋敏娟, 王伟玲. 中国数字化转型的理论阐释与运行机制[J]. 电子政务, 2021, 18(6): 67-84.
- [5] 陈明星, 先乐, 王朋岭, 等. 气候变化与多维度可持续城

- 市化[J]. 地理学报, 2021, 76(8): 1895-1909.
- [6] Mika J, Forgo P, Lakatos L, et al. Impact of 1.5 K global warming on urban air pollution and heat island with outlook on human health effects[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 30: 151-159.
- [7] Djalante R. Key assessments from the IPCC special report on global warming of 1.5 °C and the implications for the Sendai framework for disaster risk reduction[J]. *Progress in Disaster Science*, 2019, 1: 100001.
- [8] Handayani K, Anugrah P, Goembira F, et al. Moving beyond the NDCS: Asean pathways to a net-zero emissions power sector in 2050[J]. *Applied Energy*, 2022, 311: 118580.
- [9] Sahimaa O, Mattinen M K, Koskela S, et al. Towards zero climate emissions, zero waste, and one planet living: Testing the applicability of three indicators in finnish cities [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2017, 10: 121-132.
- [10] Holtz G, Xia-Bauer C, Roelfes M, et al. Competences of local and regional urban governance actors to support low-carbon transitions: Development of a framework and its application to a case-study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177: 846-856.
- [11] Nagorny-Koring N C, Nocht T. Managing urban transitions in theory and practice—the case of the pioneer cities and transition cities projects[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 175: 60-69.
- [12] Moore M L, Milkoreit M. Imagination and transformations to sustainable and just futures[J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2020, 8(1): 70-81.
- [13] Shahani F, Pineda-Pinto M, Frantzeskaki N. Transformative low-carbon urban innovations: Operationalizing transformative capacity for urban planning[J]. *Ambio*, 2021, 1653: 4.
- [14] 何立峰. 完整准确全面贯彻新发展理念, 扎实做好碳达峰碳中和工作[N]. 人民日报, 2021-10-25(04).
- [15] Axon S. The socio-cultural dimensions of community-based sustainability: Implications for transformational change[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266: 121933.
- [16] 鄢金明, 王建军. 双碳目标下的广州国土空间规划编制思考[C]//2020/2021中国城市规划年会暨2021中国城市规划学术季. 成都: 中国城市规划学会, 2021: 525-532
- [17] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J]. *城市规划学刊*, 2021(4): 74-80.
- [18] Lee S, Lee B. The influence of urban form on ghg emissions in the U.S. Household sector[J]. *Energy Policy*, 2014, 68: 534-549.
- [19] Makido Y, Dhakal S, Yamagata Y. Relationship between urban form and CO₂ emissions: evidence from fifty japanese cities[J]. *Urban Climate*, 2012, 2: 55-67.
- [20] Wang M, Madden M, Liu X. Exploring the relationship between urban forms and CO₂ emissions in 104 Chinese cities[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2017, 143(4): 04017014.
- [21] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 2995-3006.
- [22] Glaeser E L, Kahn M E. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development[J]. *Journal of Urban Economics*, 2010, 67(3): 404-418.
- [23] 张赫, 胡佳慧, 王睿, 等. 面向国土空间规划的县域规划建设低碳评价方法研究——以河北省武安市为例[J]. *西部人居环境学刊*, 2021, 36(6): 23-30.
- [24] Zheng B, Chevallier F, Ciaia P, et al. Observing carbon dioxide emissions over China's cities and industrial areas with the orbiting carbon observatory-2[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(14): 8501-8510.
- [25] 庄少勤, 赵星烁, 李晨源. 国土空间规划的维度和温度[J]. *城市规划*, 2020, 44(1): 9-13.
- [26] 喻文承, 李晓焯, 高娜, 等. 北京国土空间规划“一张图”建设实践[J]. *规划师*, 2020, 36(2): 59-64.
- [27] Shusterman A A, Teige V E, Turner A J, et al. The berkeley atmospheric CO₂ observation network: Initial evaluation[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(21): 13449-13463.
- [28] Han P, Zeng N, Oda T, et al. A city-level comparison of fossil-fuel and industry processes-induced CO₂ emissions over the Beijing-Tianjin-Hebei region from eight emission inventories[J]. *Carbon Balance and Management*, 2020, 15(1): 25.
- [29] Wang Y, Ciaia P, Broquet G, et al. A global map of emission clumps for future monitoring of fossil fuel CO₂ emissions from space[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(2): 687-703.
- [30] 赖玉珮, 李芬, 彭锐, 等. 基于城市能源系统的碳排放风险评估研究——以湖北荆门市为例[J]. *城市发展研*

- 究, 2020, 27(5): 27-31.
- [31] 杜金霜, 付晶莹, 郝蒙蒙. 基于生态网络效用的昭通市“三生空间”碳代谢分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1208-1223.
- [32] 杨滔, 杨保军, 刘畅, 等. 数字孪生城市平台原型的初步设想[J]. 北京规划建设, 2021, 4: 95-99.
- [33] Söderberg R, Wärmefjord K, Carlson J S, et al. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 137-140.
- [34] Wang Q, Li S, Pisarenko Z. Modeling carbon emission trajectory of China, us and india[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120723.
- [35] Dimitriou K, Remoundaki E, Mantas E, et al. Spatial distribution of source areas of PM_{2.5} by concentration weighted trajectory (CWT) model applied in PM_{2.5} concentration and composition data[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 116: 138-145.
- [36] Zhang J, Chen F, Wang Z, et al. Spatiotemporal patterns of carbon emissions and taxi travel using gps data in Beijing[J]. *Energies*, 2018, 11(3): 500.
- [37] Galford G L, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Historical carbon emissions and uptake from the agricultural frontier of the brazilian amazon[J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(3): 750-763.
- [38] Sun Z, Hao P, Ban X, et al. Trajectory-based vehicle energy/emissions estimation for signalized arterials using mobile sensing data[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 34: 27-40.
- [39] Wang S, Li Z, Tan J, et al. A method for estimating carbon dioxide emissions based on low frequency GPS trajectories[C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). New York: IEEE, 2017: 1960-1964.
- [40] Saxe S, Miller E, Guthrie P. The net greenhouse gas impact of the sheppard subway line[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 51: 261-275.
- [41] Sun M, Xue C, Cheng Y, et al. Analyzing spatiotemporal daily travel source carbon emissions based on taxi trajectory data[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 107012-107023.
- [42] Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios[R]. Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, IPCC, 1989.
- [43] 姜洋, 何永, 毛其智, 等. 基于空间规划视角的城市温室气体清单研究[J]. 城市规划, 2013, 37(4): 50-56+67.
- [44] 金乐琴, 吴慧颖. 中国碳排放的区域异质性及减排对策[J]. 经济与管理, 2013, 27(11): 83-87.
- [45] Huo T, Xu L, Feng W, et al. Dynamic scenario simulations of carbon emission peak in China's city-scale urban residential building sector through 2050[J]. *Energy Policy*, 2021, 159: 112612.
- [46] 吴萌, 任立, 陈银蓉. 城市土地利用碳排放系统动力学仿真研究——以武汉市为例[J]. 中国土地科学, 2017, 31(2): 29-39.
- [47] 胡玥昕, 江洪, 王颖, 等. 基于系统动力学的工业产业经济与碳排放综合分析——以无锡装备制造业为例[J]. 生态经济, 2014, 30(8): 18-25.
- [48] Löwe H, Seufert G, Raes F. Comparison of methods used within member states for estimating CO₂ emissions and sinks according to UNFCCC and EU monitoring mechanism: Forest and other wooded land[J]. *BASE*, 2011, 4: 2000.
- [49] 刘魏魏, 王效科, 逯非, 等. 全球森林生态系统碳储量、固碳能力估算及其区域特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2881-2890.
- [50] 郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 基于SPCA和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析——以石羊河流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2558-2572.
- [51] 王士远, 张学霞, 朱彤, 等. 长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价[J]. 地理科学进展, 2016, 35(10): 1269-1278.
- [52] 袁媛, 白中科, 师学义, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复优先区确定——以河北省遵化市为例[J]. 生态学杂志, 2022, doi: 10.13292/j.1000-4890.202203.031.
- [53] 张莉, 郭志华, 李志勇. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1153-1159.
- [54] 张颖. 基于高分辨率遥感和极化雷达数据的大兴安岭地区森林地上生物量估测[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

Research progress of urban digitization technology under "dual carbon" goals

ZHU Li^{1,2}, MA Junrong¹

1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. APEC Sustainable Energy Center, Tianjin 300072, China

Abstract The digital technology in the urban field provides a dynamic data information platform for the accurate acquisition and analysis of the spatial carbon source and sink data. The platform can improve the efficiency of all-factor control of the territorial spatial planning and promote the carbon emission reduction in the urban domain. By integrating the advantages of the multi-discipline, the multi-scale and the multi-probability, the digital technology can make full use of various models and sensors to update and run the data of each system anytime. The trajectory data mining in the digital technology of the urban spatial carbon emission is the development direction that needs attention, while the spatio-temporal trajectory mining of the urban carbon emission should focus on the system update, the spatial surface domain feature mining and the big data application. Based on the digital analysis method, it is found that the ecological vulnerability identification and the security pattern construction are the aspects that need to be focused on to establish the ecologically resilient urban space. Using the remote sensing technology to measure the carbon sinks of the same category will have errors due to different geographical features, and this difficulty deserves attention. The accurate measurement of the urban spatial carbon sinks in the future needs to be realized by combining macro and microscopic features and combining multi-platform and multi-temporal dynamic monitoring.

Keywords "dual carbon" goals; urban space; territorial spatial planning ●



(责任编辑 卫夏雯)