

基于不同原始数据的碳排放空间化过程对比研究

周昱琳¹, 刚爽^{1,2*}, 许耀天^{3,4}, 李京忠⁵, 肖骁¹, 薛冰³

1. 沈阳大学 区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳 110044;
2. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 沈阳 110034;
3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;
4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 许昌学院城市与环境学院, 许昌 461000

摘要: 随着“双碳”战略的推进, 碳排放研究逐渐成为环境科学中的关键研究领域, 并对气候变化和可持续发展决策具有重要指导意义。碳数据空间化能直观展示出行业间和地域间的排放差异。高空间分辨率的碳排放结合时间维度可以用于构建长时间序列的碳排放图集, 为碳排放监测与碳循环研究提供本底数据支撑。因此, 本文从碳排放空间化前的数据形式及其响应尺度着手, 梳理基于夜间灯光数据和基于社会统计数据的碳排放空间化处理过程, 综述土地类型变化与行业间碳排放变化中的不同空间化方法, 从国-省-市角度分析不同尺度将如何进行碳排放空间可视化。最后讨论此过程中存在的问题, 同时针对问题提出建议并进行展望, 为更高效实施减碳排政策提供一定参考。

关键词: 碳排放; 空间化; 数据处理

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.02.12>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2024.02.12>

1 前言

全球气候变化已成为人类发展所面临的重大挑战之一。国际合作中,《巴黎协定》^[1]作为各国应对气候变化的重要承诺,已然成为构建人类命运共同体^[2]的重要环节。长期以来碳排放被认为是导致全球变暖的主要原因,习近平总书记提出的“2023年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”已成为中国应对气候变化的重要国家举措。因此,精准识别研究区碳排放情况,深入研究各地区生产生活环节的碳排放量,有助于碳减排工作和“双碳”目标的有效落实。作为世界最大的碳排放国^[3],我国碳排放主要来源于电力^[4]、交通运输^[5]、农业^[6]、建筑^[7]、工业生产^[8]等领域。碳数据指与碳排放相关的数据,可以用于衡量个体、组织或地区在生产消费过程中产生的二氧化碳等温室气体,包括直接碳排放、间接碳排放、排放因子和碳汇等不同数据。不同行业都有与其对应的碳排放数据,不同地域尺度也有相应的碳数据,如国家级碳数据清单、省级碳数据清单、城市级碳数据清单、县级碳数据清单等。为共建地球美好家园,必须重视空间治理,践行习近平生态文明思想。

收稿日期: 2024-03-06; 修订日期: 2024-06-18; 出版日期: 2024-06-25

基金项目: 国家社会科学基金(23TJA00092); 东北地质科技创新中心区创基金项目(QCJJ2022-26)

*通讯作者: 刚爽, 沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, gang_shuang@163.com

引用方式: 周昱琳, 刚爽, 许耀天等. 基于不同原始数据的碳排放空间化过程对比研究[J]. 全球变化数据学报, 2024, 8(2): 210–221. <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.02.12>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2024.02.12>.

碳排放数据空间化可以直观展示不同地域范围^[9]、不同空间尺度^[10,11]及不同行业产业间^[12]碳排放的差异,便于研究者从地理学角度回答什么区域碳排放减排效果最好,哪些行业碳减排迫在眉睫等问题。在碳数据处理的过程中,其也常与 GDP、POI、人口、土地利用、交通路网等多源数据融合使用。空间化过程中还涉及数据转换问题,如大尺度数据精细化至小尺度范围,点源碳数据模拟面源域碳排放等。厘清碳数据空间化机制,便于碳数据空间可视化,有助于制定切实可行的碳减排方案。因此,本文以碳排放数据空间化处理为核心,系统梳理碳数据处理相关文献,整理在此过程中所涉及的数据处理情景及其对应方法,从技术和应用视角分别对跨尺度应用情境下碳排放数据处理进行对比,并讨论适用条件,从而为涉及碳数据处理的相关研究提供参考依据,为我国早日实现“双碳”目标提供扎实的科学基础。

2 碳排放数据的基本形式和尺度响应

碳排放具体包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮排放等,本文主要讨论二氧化碳排放。碳排放数据获取方式从社会职能角度区分来源包括政府部门源、科研机构源、企业组织源等。政府部门源指来自政府部门或机构监测或统计工作提供的碳排放数据,如政府间气候变化专门委员会(IPCC)、联合国气候变化框架公约(UNFCCC)、中国国家统计局等。科研机构源指相关机构常开展碳排放的研究工作,通过实地调查、模型模拟和数据分析等获得碳数据。企业组织源指一些企业也会利用监测设备对碳排放进行监测。碳数据涵盖碳排放量、碳排放强度、碳排放清单等。排放量数据可以描述某一地区、行业或活动所产生的碳排放量,其中,衡量单位 GDP 产生的碳排放量被称为碳排放强度。政府、企业等组织机构计算其在生活生产中各环节产生的直接或间接碳排放称为碳排放清单。

从地学角度而言,碳数据获取方式可主要分为卫星遥感数据和社会统计数据两大方面^[13]。遥感卫星可以获得全球温室气体和陆地碳汇分布情况,与地基站点相比有稳定、空间覆盖广、成本低的特点。目前专注于碳气体监测的遥感卫星有 OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory 2)、GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite)、碳卫星 (TanSat) 等,但这类数据在对县村落级尺度研究时,会受大气环流影响导致温室气体扩散,因此从这类数据中识别特定小尺度区域碳排放量误差较大。Elvidge^[14]和 Doll^[15]等学者的研究表明夜间灯光强度与碳排放显著相关,现常用夜间灯光遥感卫星如美国发射的 Soumi NPP 和 DMSP-OLS (Defense Meteorological Satellite Program - Operational Linescan System)、武汉大学团队领衔发射的珞珈一号等(表 1)。余柏菡^[16]指出,DMSP-OLS 数据存在数据饱和的问题,且 NPP-VIIRS 采集的夜间灯光数据比 DMSP-OLS 采集的数据分辨率更高成像效果更好。针对小尺度研究时,珞珈一号采集的夜间灯光数据比上述两颗卫星采集的数据更具优势^[17],且珞珈一号获取的数据与碳排放量具有较好的相关性。夜间灯光数据可以为研究者提供较为完整、连续的碳排放数据,但地区发达程度、人口聚集度和工业产业园区分布等因素会影响夜间灯光数据反演碳排放数据的准确性,因此,可以将夜间灯光数据与其他数据联合使用。有关碳排放的社会统计数据可以被用来大范围模拟区域碳排放,在 GIS 中可被分为点数据、线数据和面数据^[18]三种呈现形式。其中,点数据指在例如研究市级以上尺度的区域时工厂等区域可看作点状,在地图上可用经纬度等定位;线数据可指交通运输

等线性功能区,许多研究通过交通统计数据,自上而下对碳排放进行分配;面数据指除点、线数据外的城市地块数据。

表 1 常用的夜间灯光遥感卫星列表

卫星名称	国家	获取途径	发射年	数据产品	空间分辨率	数据特点	
DMSP-OLS	美国	美国国家海洋和大气管理局	DMSP 5D-3F15	1999	年合成稳定灯光数据(1992–2013)	-1,000 m	应用广泛,生成的产品是至今应用最广泛的夜间灯光遥感数据之一。但受传感器影响,获取的灯光亮度最大值限制在 63。存在数据过饱和、长时序分析困难以及灯光边缘区“溢出效应”等问题
			DMSP 5D-3F16	2001			
			DMSP 5D-3F17	2006			
			DMSP 5D-3F18	2009			
NPP-VIIRS	美国	美国国家海洋和大气管理局	2011	2015、2016 年的	-500 m	与 DMSP-OLS 相比,空间分辨率更高、成像效果更好,更有益于研究精细空间尺度下的地域研究。但时间跨度短没有剔除异常灯光以及背景噪声	
				月合成数据(2012.04 至今)			
				逐日原始数据(2012.01.19 至今)	-750 m		
珞珈一号	中国	珞珈一号官网	2018	原始数据(2018.06 开始生产数据)	-130m	空间分辨率远高于 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS。理想情况下能在 15d 完成全球夜间灯光遥感数据采集	

3 碳排放数据的空间化处理

研究碳排放及其时空变化对于中国实现可持续发展、推动经济结构转型、提升能源利用效率、提高生态系统碳汇能力、促进科技创新、增强公众意识、加强国际合作等方面都具有重要的现实意义和深远的战略意义。实现碳排放数据空间化可以说是促使抽象数据变具体的过程,无论是使用遥感数据反演区域碳排放情况还是根据点线面数据模拟区域碳排放,通常都会选取空间代理参数与之关联,以便更好实现数据空间化。在这一过程中,地理学第一定律、空间溢出效应、空间插值等地理学经典理论知识被广泛用于辅助解释碳排放强弱的时空变化。地理学第一定律指出事物之间的相关性随距离增加而减少。空间溢出效应指某地区碳排放强弱变化会影响其周围地域碳排放变量值。基于上述理论,空间插值可以用已知点数据模拟出周围点的未知数据,弥补了常规测量方法无法对空间所有点进行测量的缺陷。

3.1 基于夜间灯光数据的碳排放空间化

夜间灯光遥感卫星能够检测城市照明,Shi 等^[19]指出夜间灯光(nighttime light, NTL)数据的像元 DN 值与该像元所在位置的 CO₂ 排放量呈正相关,因此夜间灯光数据可以在网格水平评价区域碳排放情况。不同的卫星也有各自的优势,NPP-VIIRS 比 DMSP-OLS 数据分辨率更高时效性更好,但 DMSP-OLS 数据时间跨度更长,可用于时间序列更深的研究。西南大学施开放团队发布的类 DMSP-OLS 中国夜间灯光遥感数据集,是基于 NPP-VIIRS

和 DMS-OLS 数据改进后的数据,其在评价社会指标的表现已被验证的精度比这两类数据更高^[20]。在碳排放空间化实际应用中,常将夜间灯光数据与能源数据、人口密度数据结合获取数据。如张瑶等^[17]以夜间灯光数据与能源统计数据为基础,人口数据为权重,得到西安市空间化的碳排放情况;Wei 等^[21]以人口数据辅助,使用夜间灯光数据进行全中国碳排放模拟。

基于夜间灯光数据的碳排放空间化的一般过程为:(1)获取并按照研究尺度预处理(减小噪声影响剔除异常值)研究区夜间灯光数据;(2)联合人口密度、能源消费和土地利用等数据建立模型得到空间化碳排放情况;(3)数据验证。(4)结果分析。在数据验证部分常利用夜间灯光数据和碳排放统计数据构建估算模型,选取拟合程度最优的模型建立两者关系式,或通过某行业反演出的碳排放量与该行业碳排放总量对比得到均方根误差 RMSE 和平均相对误差 MRE 等,判断数据精度进而探索区域碳排放量。也有研究^[22]通过与国际碳数据库分配的碳排放相比进行数据的精度验证。相关研究^[23]表明建立中国能源消费类与灯光总量数学关系时,线性关系的拟合度相对最优。并且在建立多项式函数估算模型时,通常多项式阶数越高拟合程度更优^[17]。构建拟合公式的 R^2 值常在 0.6-1^[24-27]区间或 $p < 0.01$ ^[28],这均能表明数据结果精度良好。

3.2 基于社会统计数据的碳排放空间化

针对基于社会统计数据获取的原始碳排放点数据,可以引入空间插值,该方法可基于已有数据,估算未测量区域的碳数据,从而构建区域完整的碳数据集,结合聚类分析、热点分析等方法识别二氧化碳的高排放和低排放区,帮助理解碳排放的空间分布特征和驱动因素。空间插值方法包括反距离权重法、泰森多边形、趋势面法、克里金法等,在对区县等小尺度区域的碳数据处理时多用克里金插值,对省市级碳数据处理时常用反距离加权法,如表 2。需要注意的是,反距离加权法对权重函数的选择十分敏感,数据离散不均匀时,结果可能出现异常,插值结果易受极值影响,也无法估计预测值的方差,因此该方法在已知点分布均匀时的插值效果更好。克里金插值属于地统计方法,通过半方差函数计算获得各实测点的权重,很多模型参数可调,能根据区域化变量的性质恰当设置参数,同时还能给出结果的误差和精度,适合区域化变量存在相关性的要素。在对文献进行梳理中,国内使用传统简单的插值方法辅助研究的情况与国际上相比偏多,一些学者认为仅靠传统的插值方法得到网格,可能会造成结果误差较大,因此他们会传统方法参数进行修改^[41]或建立新的模型^[38]将点数据转换成面数据。在不同的研究区都有必要对不同方法得到的结果进行交叉验证以保证结果准确性。

针对基于社会统计数据获取的原始碳排放线状或面状数据时,常使用“自上而下”^[42]或“自下而上”的方式构建空间化的碳排放数据(图 1)。“自上而下”构建方式的核心思想是将地域范围(常为全球或国家尺度)内所得到的碳排放总量根据人口、区域发展水平等因子按权重比例划分给网格单元。随着技术水平的提高,该方法适用范围从全球和国家的大尺度逐渐向城市尺度变化,对于碳排放资料较少的地区具有重要价值。图 2a 展示了“自下而上”是一种融入聚合思想的网格构建方式,能将非点源数据推广至区域尺度,原理是收集研究区域内不同部门(如交通运输、工业、居民生活等)的碳排放信息和位置,按照同一分辨率进行碳排放网格化,再叠加形成综合的网格地图,如图 2。这种方法较前

者更为复杂,需要较多的原始数据去支撑不同部门的碳排放测算,但精度更高,得出的结果误差会相对较小^[43]。

表2 数据处理中插值方法应用情况对比表

文献	研究区域	研究方法	内容
晏希宁 (2018) ^[29]	怀来县	克里金	怀来县土地碳排放空间分布
苏雅丽等 (2011) ^[30]	陕西省	反距离加权	分析陕西省内不同区域碳排放总量的空间差异和变化
郭忻怡等 (2016) ^[31]	江苏省	普通克里金	对各区县碳排放总量进行插值
孔佑花 (2018) ^[32]	兰州市	反距离加权	兰州市工业碳排放空间分布
袁玉娟等 (2021) ^[33]	济南市	克里金	济南市通勤碳排放的空间分布特征
荣培君等 (2018) ^[34]	开封市	反距离加权	开封市日常出行碳排放空间分布示意图
吴继贵 (2016) ^[35]	中国	反距离加权	模拟了1990–2012年中国碳排放总量的空间分布
黄经南等 (2015) ^[36]	武汉市	克里金	武汉市的家庭碳排放进行趋势预估
Dalvi (2006) ^[37]	印度	大排放插值统计模型(G-SMILE)	将点数据网格化到所需分辨率,得到碳排放分布格局
Hodam 等 (2017) ^[38]	印度	反距离加权与克里金	研究印度上空ET ₀ 空间分布时,反距离权重几乎在所有情况的精度都比克里格方法高
Aryai 等 (2024) ^[39]	澳大利亚	线性插值	探索电网碳排放强度,用该方法补缺数据集中缺失部分
Stokić 等 (2023) ^[40]	贝尔格莱德	双线性插值	建立了商用车油耗与尾气排放估算的双线性插值模型

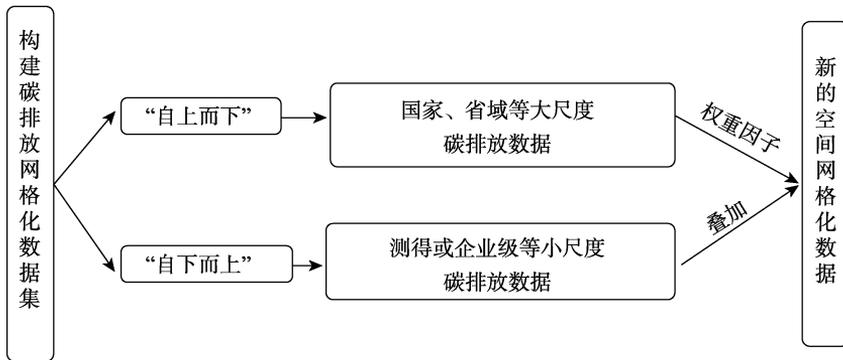


图1 “自上而下”和“自下而上”方法技术路线图

空间网格化能够进一步细化碳排放数据的空间分布情况,进而按照特定空间分辨率进行可视化,形成空间连续的碳排放数据集,以更好地分析区域碳排放变化特征。目前,大多数关于碳排放空间分配的研究受限于数据精度,主要集中在大中比例尺范围。然而,在城区、工业园等小比例尺单元,由于其减排弹性和能力更强,更适合对其进行有效管控,以推动“双碳”目标的实现。因此,在对小范围碳排放进行空间分配时,必须考虑人口密度、交通流量和土地利用等多种因素,并设定合理的权重系数,以便模拟出最接近实际情况的碳排放空间分配网格图。对于小尺度区域,由于所需基础数据的准确度和透明度不足,且直接测量碳排放的难度和成本较高,建议构建合理的分配指标,从较大范围的已知数据估算出较小范围的未知碳排放。这一过程可以采用“自上而下”的思路(图2b),通过降尺

度分配碳排放数据,构建区域能源消耗的空间分配地图。这种方法通常结合 GIS 技术与 POI 数据、人口密度、交通流量、土地利用和夜间灯光数据等一种或多种交叉关联的数据作为分配因子,将排放量分配至网格。这种模式既能反映大、小尺度区域间的紧密联系,又有助于理解研究区碳排放空间特性,如王锐等^[44]利用系列空间代理数据编制出反映杭州市碳排放的空间格局格点化清单。

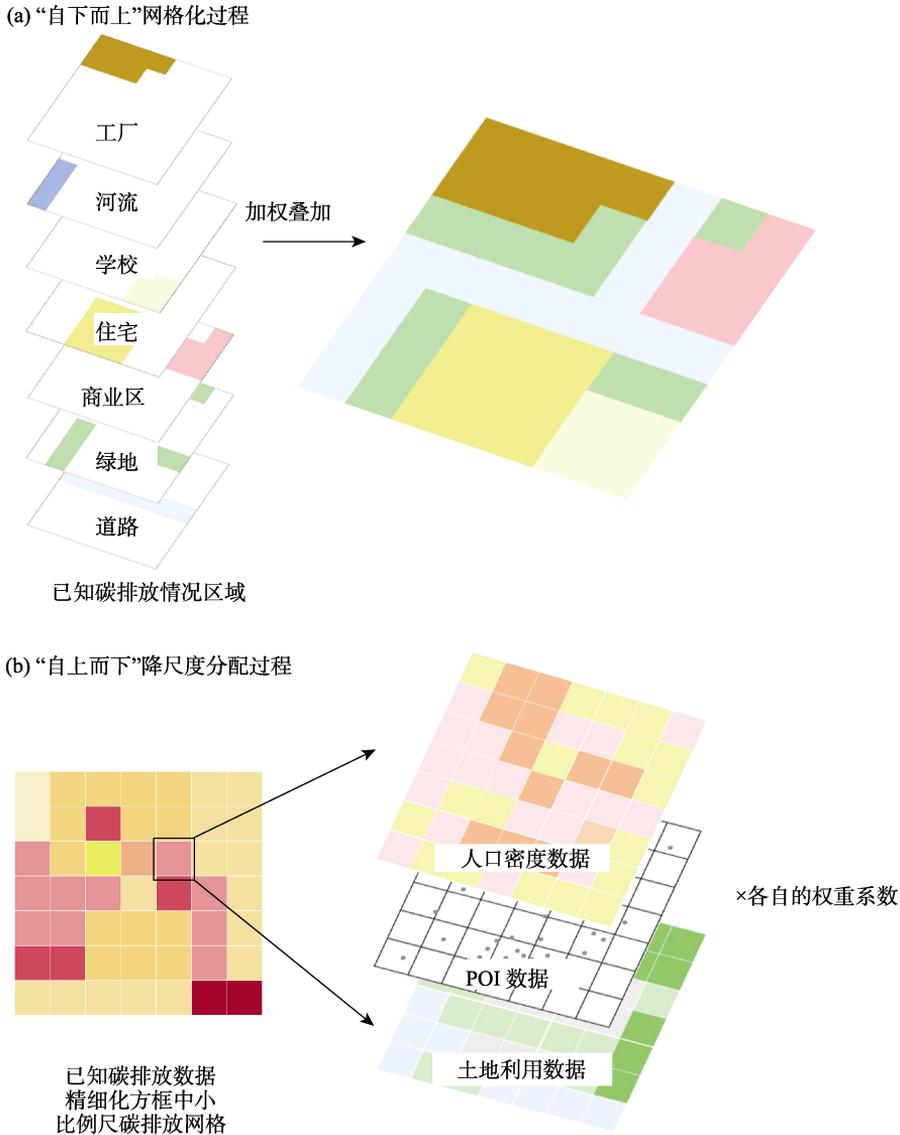


图 2 空间网格化细化碳排放数据过程示意图

3.3 基于夜间灯光数据与基于社会统计数据碳排放空间化的区别与联系

基于夜间灯光数据与基于社会统计数据的碳排放空间化的区别包括了:(1)数据来源方面夜间灯光数据主要指通过遥感技术获取地表在夜间的照明情况,而社会统计数据是基

于社会经济指标的统计。(2)前者在能源消费和经济活动密集的地方表现更优,后者更有潜力刻画农村等地区碳排放情况。(3)前者可以帮助研究者更快速地识别经济活动强度较高更高的区域,而后者更侧重识别具体的排放源。在实际应用中,不同数据源的碳排放空间化可互为补充夜间灯光数据可以为社会统计数据提供宏观的空间分布特征,而社会统计数据则可以为夜间灯光数据提供校准和验证。

4 技术视角下的碳排放数据空间化应用场景

在经济学的研究中,常用折线图或柱状图表示地区碳排在时空尺度上的变化趋势^[45],这利于分析碳排放变化的内在逻辑。但在地学视角下,仅用数值表示碳排放的变化会在空间上略显不够直观,通常会依托地理底图刻画具体的碳排放变化等信息。合理模拟区域内部碳排放的空间分布是制定更有效碳减排政策的前提。国内外学者围绕以夜间灯光数据辅的碳排放问题从国家、省域、区域等不同角度对碳排放空间分异、影响因素、变化机制、驱动因素等角度开展了大量研究。

4.1 碳排放数据空间化的研究对象

城市扩张、退耕还林、农用地类型改变等人类活动都影响着土地类型,在此过程中碳排放量也会增加或减少。土地利用碳排放常使用到社会经济数据、化石能源消耗、土地覆盖遥感以及夜间灯光 DN 值等数据,结合空间统计分析、地理探测器或地理加权回归等方法,进行土地利用碳排放量估算,对研究区土地利用碳排放进行模拟探索区域内部或不同区域之间碳排放的强弱。如牛亚文等^[46]利用探索性空间数据分析和地理探测器方法,利用夜间灯光数据亮度值与能源消耗构建了拟合度 R^2 均在 0.85 以上的方程,研究了长株潭地区县域尺度土地利用碳排放情况及影响因素。苏宇凡等^[47]研究山西省能源消费碳排放量与夜间灯光指数拟合度 R^2 为 0.9914,证明两者相关性极强,进而探索该区域碳排放影响因素。利用网格法(如 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$)对区域进行划分,更有利于表现区域之间碳排放差异,突出排放热点。王丹等^[48]用各地类型的面积乘上相应的碳排放系数再求和,构建区域网格,发现南四湖流域面临碳排放增加趋势。在一些研究中还常加入不同时间序列的数据以得到区域的时空分异研究。如邓灵颖等^[49]以不同年份的遥感影像和经济社会数据为基础,构建碳排放测算模型及时空地理加权回归模型揭示武汉城市圈土地利用碳排放时空演变及驱动因素。刘耀辉等^[50]基于 2012–2021 年夜间灯光数据和统计数据构建拟合模型,刻画了东部七省市碳排放时空演变。研究结果还显示出城市地区碳排放总量虽存在波动但总体上升趋势,具体变化特征因地区而异。总之,探索土地利用碳排放时,常会构建拟合方程反应遥感数据与区域碳排放的拟合度,通常 $R^2 > 0.8$,表明夜间灯光数据有助于研究土地利用碳排放变化。研究对比省-省、市-市或县-县等区域问题时,采用数据精度比仅研究省、市或县等区域内部间土地利用碳排放变化时低,因此,后者得到结果更精细能反映区域内排放热点。

农业、能源和运输等行业为我国经济快速发展做出了重要贡献,同时也是二氧化碳的重要排放源,明晰不同行业在空间上碳排放强弱有助于针对性地制定实施碳减排政策。农业方向研究会利用农作物播种面积、类型等测算碳排放强度。如崔永福等^[51]借助农作物播

种面积,结合探索性空间数据分析,通过 ArcGIS 绘制河北省县域农业碳排放量。能源方向侧重时间与空间结合探索演变特征、时空格局。如郝瑞军等^[52]结合夜间灯光数据和统计数据,模拟能源碳排放,利用空间自相关分析等刻画出 2000–2018 中国能源消费碳排放的时空格局,发现大部分地区碳排放量变化不大。交通运输行业中有以道路类型为界,探究不同路网中碳排放分布格局,如代洪娜等^[53]可视化山东省高速路网碳排放情况,也有学者从机动车碳排放角度进行研究,如王天旻等^[54]结合交通类统计数据,以对机动车排放影响较大的因子为参数建立空间分配模型,将 2021 年济南市机动车碳排放分配至 1 km×1 km 的网格化空间里,得到高精度机动车碳排放清单。不同行业中的数据也有不同特点。农业行业空间化研究结果往往是面状;研究能源行业数据结果表现形式也常为面状;交通方面,会按照交通工具使用环境、规格和动力来源等精细的测算具体碳排放量,其数据结果表现形式有条带状和面状。

4.2 碳排放数据的空间尺度

全球尺度上,随着研究地不断深入,碳排放网格数据从最初仅有的年度数据到现在能够提供近实时的日数据^[55],空间分辨率也从全球 1°×1°^[56]、0.25°×0.25°等分辨率的碳排放空间数据集到现在的 0.1°×0.1°网格^[57]。对国家尺度碳排放空间分布探索中,现有研究常以省为单位从国家的高度研究能源消费行业的碳排放空间分布。通常先以夜间灯光数据和人口数据为基础,空间插值填补缺失值,将碳排放分配至网格尺度^[58]。如王宇^[59]融合人口、GDP、夜间灯光数据等结合相关分析、回归分析等统计方法,构建中国碳排放跨尺度空间模型。省级尺度时,常以其内部的县为最小单位进行碳排放空间格局。研究中还会构建拟合程度高的方程揭示以区域中碳排放的空间变化格局,如顾羊羊等^[60]以夜间灯光像元值构建出表示能源消耗碳排放的函数,再利用排放清单进行碳排放量测算,之后将统计的灯光总值与相应碳排放量拟合分析修正得到线性模型,以此反演出河南省空间化的能源消耗碳排放量;Xie^[61]等使用 ArcGIS 10.4 软件来确定温室气体排放的网格化空间分布,生成了 200 m × 200 m 网格的温室气体排放空间分布图,并最终探究了研究区温室气体排放水平的差异。当前对区域尺度的研究主要涉及兰西城市群^[62]、哈长城市群^[63]、长江经济带^[64]等区域。如杨柳林等^[65]使用排放因子法“自下而上”计算污染物排放量,构建了具备时空分布属性的区域性网格化大气源排放清单并指出珠三角区域大气污染物空间分布。与国家或省级尺度的研究相比,市级尺度的研究更加精细化,所需要的数据精度也更高,常会使用到人口密度、POI 和 GDP 等社会统计数据以及相关遥感数据,结合“自上而下”和“自下而上”等碳排放测算方法,依托 GIS 平台得到不同行业背景的碳排放空间分布。如李璇等^[66]提出了一种城市级别的高空间分辨率碳排放清单建立方法,以省级能源平衡表为基础,应用经济和产业指标、人口、道路、土地和兴趣点(POI)等数据,建立了营口市 1 km×1 km 碳排放清单。

基于夜间灯光和基于社会统计数据的方法均能在国、省和市等范围空间化碳排放强度。在数据选择时应明确研究范围和主题后选取适合分辨率的数据。宏观尺度的分布特征常需要较大的空间分辨率。研究城市或更小尺度的排放细节时常会选用分辨率更高的数据构建

出大小例如 1 km×1 km 或 200 m×200 m 等的网格,若原始数据分辨率太小难以反映不同区域间碳排放分布差异,可借助社会统计数据“自上而下”方法得到精度更高的结果。

5 讨论

5.1 碳排放数据空间化过程中的问题及对策

首先,回归建模缺失验证精度过程。基于夜间灯光数据探索区域碳排放时,常用途径是借助回归建模估算排放量,但在研究时空尺度时,不少研究者的论述中缺失验证回归准确性的步骤。简单的回归仅用时间或空间尺度量化数据间的关系,而没有考虑多因素的共同作用。目前学术界普遍认为选取统计数据估算碳排放更为全面,部分学者还对小尺度区域仅单一的基于夜间灯光数据研究碳排放分布结果提出了质疑^[52],同时也有研究表明构建灯光亮度和碳排放量反演方程模型,是未来碳核算方法的重要发展方向^[67]。因此,应当通过对比验证构建出耦合相对最强的夜间灯光与其他因子间的模型。

其次,“自上而下”方式使用到的碳排放数据往往存在缺失的空间信息。大尺度区域碳排放数据在网格化时,可能会导致局部小范围数据过于平滑,无法反映出碳排放情况在小范围上的变化。同样,“自下而上”精准度虽然更高,但需要更多的原始数据积累。因此,在研究区统计数据存在部分缺失或数据精度不够时,可以结合“自上而下”和“自下而上”的方法,以空间插值相辅,相互矫正空间网格内数值,以此模拟出精度更大的碳排放空间网格。

第三,目前的研究中常忽略不同空间插值方法在原理上的差异,而是直接选取某种方法进行缺失数据的模拟预测,但实际上在不同研究环境中,插值方法的选取失误会造成预测值与真实值的差异,让模拟的空间化碳排放结果误差较大。这种差异在研究县级或更小尺度范围碳排放空间分布特征时更明显,因此在这种情况下对空间插值方法选取更为重要,应结合多源数据,并对结果进行交叉验证,从而得到拟合程度最高的碳排放空间预测表面。

最后,二氧化碳的排放和传输具有很强的空间特征和地理相关性。一方面受风向、风速、降雨等气象条件和地形地貌等自然地理因素的影响,另一方面,还受到人口密度及其分布情况、产业聚集度等人文因素的影响,譬如人口密度高的地区通常伴随着更多的交通、建筑和工业活动,从而导致更高的空气污染物排放。在面向不同研究对象时,应当考虑到人地关系、地理要素、地势地貌或气候条件对研究因素的影响,研究多种因素对碳排放转移的影响,针对性构建空间分配模型,有助于模拟出高精度的碳排放实时监测网格,更好地理解和管理空气质量问题,促进空气污染治理和减排措施的实施。在小尺度插值碳排放情况时,应该考虑不同区域碳排放的情况不同,尽可能地减少由区域建筑类型不同带来的误差。在大尺度范围时,应与多源数据结合,减小由分辨率小所带来的数据误差与模糊。

5.2 展望

目前我国碳排放研究的的空间维度主要集中在国家-省-市的多尺度层面,涉及建筑、工业、交通和农业等众多领域,涵盖环境、地理和经济等多种学科,呈现出学科交叉、主题多样的特征,反映出学界积极响应“双碳”目标的行动。本文认为未来对碳数据的研究还需要加强以下两方面的探索。

第一,加强对小、微尺度碳排放研究。村落、校园等更小尺度与大尺度区域相比,碳

减排的执行力更强、潜力更大，更容易在实际应用中担任探索创新型减排技术与模式的范例，具有先导作用。因此，未来可以深入研究小尺度内部间或区域间碳排放分布差异。精准掌握碳排放空间流动状态，可以更加具有针对性地点对点实施减排策略，为政府因地制宜制定更为聚集的减排政策提供科学参考。

第二，细化碳排放在地图上的表现形式。在研究对象上，现在的研究多以省或市级行政区域为单位，按照某行业或部门碳排放高低用不同颜色填充不同区域的排放量，未能很好展现出行业或部门在行政区内的具体位置。网格化处理能够更准确地捕捉碳排放的空间分布和变化趋势，突出范围内碳排放强弱变化的渐变过程，但仅少部分研究采用精细化网格这一表达方式。因此，未来在刻画区域碳排放时，应更加注重研究对象在地图上的具体分布及随排放源距离变远而碳排放减少的这一变化过程的细节展示。

作者分工：薛冰和刚爽对论文做了总体设计；周昱琳撰写了论文；周昱琳和许耀天进行了资料和文献搜集整理工作，肖骁和李京忠修改了论文。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 巢清尘, 张永香, 高翔等. 巴黎协定——全球气候治理的新起点[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 61-67.
- [2] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 1-25.
- [3] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [4] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [5] 李晓易, 谭晓雨, 吴睿等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 15-21.
- [6] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80-86.
- [7] 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.
- [8] 陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J]. 经济研究, 2009, 44(4): 41-55.
- [9] 李建豹, 黄贤金, 揣小伟等. 江苏省人口城镇化与能源消费 CO₂ 排放耦合协调度时空格局及影响因素[J]. 经济地理, 2021, 41(5): 57-64.
- [10] 王晓平, 冯庆, 宋金昭. 成渝城市群碳排放空间关联结构演化及影响因素[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 4123-4134.
- [11] 吉雪强, 刘慧敏, 张跃松. 中国省际土地利用碳排放空间关联网络结构演化及驱动因素[J]. 经济地理, 2023, 43(2): 190-200.
- [12] 吴永娇, 郑华珠, 董锁成等. 中西部地区产业发展与碳排放空间效应研究[J]. 生态经济, 2022, 38(1): 21-29+59.
- [13] 王建事, 王成新, 任婉侠等. 地理学视角下“双碳”研究：主题、成效及展望[J]. 地球科学进展, 2023, 38(7): 757-768.
- [14] Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Kihn, E. A., et al. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(6): 1373-1379.
- [15] Doll, C. N. H., Muller, J. P., Elvidge, C. D. Night-time imagery as a tool for global map of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions [J]. *AMBIO: a Journal of the Human Environment*, 2000, 29(3): 157-162.

- [16] 余柏菡, 王丛笑, 官文康等. 夜间灯光遥感与城市问题研究: 数据、方法、应用和展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 342–364.
- [17] 张瑶, 张宇鑫, 张勇建等. 基于珞珈一号夜间灯光数据西安市碳排放空间化研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(4): 869–879.
- [18] 王乙喆, 王兴平, 马雨琪. 基于空间视角的城市碳排放定量化评估方法与规划应用思考[J]. 城市发展研究, 2024, 31(4): 43–54.
- [19] Shi, K., Chen, Y., Yu, B., *et al.* Modeling spatiotemporal CO₂ (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis [J]. *Applied Energy*, 2016, 168: 523–533.
- [20] 宋冬凌, 卢文字. 黄河流域城市群碳排放时空演变多尺度分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(5): 48–59.
- [21] Wei, W., Zhang, X., Zhou, L., *et al.* How does spatiotemporal variations and impact factors in CO₂ emissions differ across cities in China? Investigation on grid scale and geographic detection method [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128933.
- [22] 刘贤赵, 杨旭. 夜间灯光数据估算中国省域碳排放与国际碳数据库分配的碳排放比较[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(2): 319–332.
- [23] 吴健生, 牛妍, 彭建等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995–2009 年中国地级市能源消费动态[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 625–634.
- [24] 秦耀伟, 闫语, 东嘉琪等. 燕山–太行山固碳量及经济生态指数分析[J/OL]. 环境科学, 2024: 1–12.
- [25] 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+389.
- [26] 王嘉诚, 张琳敏, 李渊等. 城市街区三维空间形态对碳排放的影响机制[J/OL]. 环境科学, 2024: 1–21.
- [27] 王艳军, 王孟杰, 柳林等. DMSP/OLS 夜光数据的珠三角碳排放时空差异性分析[J]. 遥感学报, 2022, 26(9): 1824–1837.
- [28] 高嵩, 梁仕龙, 姜雪. 基于夜间灯光数据的县域碳排放空间关联网络特征研究——以吉林省为例[J]. 环境科学学报, 2024, 44(9): 414–426.
- [29] 晏希宁. 怀来县土地利用碳排放变化及低碳优化研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- [30] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 152–156.
- [31] 郭忻怡, 闫庆武, 谭晓悦等. 基于 DMSP/OLS 与 NDVI 的江苏省碳排放空间分布模拟[J]. 世界地理研究, 2016, 25(4): 102–110.
- [32] 孔佑花. 兰州市工业碳排放影响因素与峰值预测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [33] 袁玉娟, 刘清春, 马寒卿. 基于住房价格的通勤碳排放空间分异——以济南市为例[J]. 自然资源学报, 2021, 36(8): 2081–2094.
- [34] 荣培君, 张丽君, 刘荣增等. 开封城市家庭日常出行碳排放空间分异研究[J]. 资源科学, 2018, 40(6): 1307–1318.
- [35] 吴继贵. 技术进步和经济增长对二氧化碳排放的空间影响研究[D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [36] 黄经南, 李丹哲, 韩笋生. 武汉市家庭碳排放的空间分布特征研究[J]. 现代城市研究, 2015(10): 108–116.
- [37] Dalvi, M., Beig, G., Patil, U., *et al.* A GIS based methodology for gridding of large-scale emission inventories: Application to carbon-monoxide emissions over Indian region [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(16): 2995–3007.
- [38] Hodam, S., Sarkar, S., Marak, A. G. R., *et al.* Spatial interpolation of reference evapotranspiration in India: Comparison of IDW and Kriging methods [J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 2017, 98: 511–524.
- [39] Aryai, V., Goldsworthy, M. Real-time high-resolution modelling of grid carbon emissions intensity [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 104: 105316.
- [40] Stokić, M., Momčilović, V., Dimitrijević, B. A bilinear interpolation model for estimating commercial vehicles' fuel consumption and exhaust emissions [J]. *Sustainable Futures*, 2023, 5: 100105.
- [41] 胡丹桂, 舒红, 胡泓达. 时空 CoKriging 的变异函数建模[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2015, 49(4): 596–602+622.
- [42] 景侨楠, 侯慧敏, 白宏涛等. 自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 420–427.

- [43] Zhao, Y., Nielsen, C. P., McElroy, M. B. China's CO₂ emissions estimated from the bottom up: recent trends, spatial distributions, and quantification of uncertainties [J]. *Atmospheric environment*, 2012, 59: 214–223.
- [44] 王锐, 张羽中, 赵爽等. 适用于城市碳排放反演的 CO₂ 格点化排放清单编制——以杭州市为例[J]. 环境监控与预警, 2023, 15(5): 75–83.
- [45] 孔淑娟, 薛晔. 基于土地利用的山西省碳排放时空跃迁与影响因素分析[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(5): 75–82.
- [46] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3847–3856.
- [47] 苏宇凡, 刘珺, 孟鑫等. 资源型地区碳排放时空演变和影响因素分析[J]. 遥感信息, 2023, 38(5): 114–121.
- [48] 王丹, 荆延德, 韩善梅等. 基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9604–9614.
- [49] 邓灵颖, 李红波. 武汉城市圈土地利用碳排放时空演变及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 345–353.
- [50] 刘耀辉, 刘文毅, 仇培元等. 基于夜间灯光数据的东部七省市碳排放时空演变和监测评估[J]. 测绘通报, 2023(12): 38–44.
- [51] 崔永福, 高策, 王俊峰等. 河北省县域农业碳排放空间演化及对策[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(5): 241–248+256.
- [52] 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳等. 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5305–5314.
- [53] 代洪娜, 曾煜磊, 施庆利等. 碳达峰与碳中和背景下省域高速公路网碳排放精细化测算方法[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2023, 55(4): 1–13.
- [54] 王天旻, 冯海霞, 魏代梅等. 济南市高精度机动车碳排放清单研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(10): 1338–1342+1351.
- [55] Dou, X., Hong, J., Ciais, P., et al. Near-real-time global gridded daily CO₂ emissions 2021 [J]. *Scientific data*, 2023, 10(1): 69.
- [56] Andres, R. J., Marland, G., Fung, I., et al. A 1 × 1 distribution of carbon dioxide emissions from fossil fuel consumption and cement manufacture, 1950–1990 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(3): 419–429.
- [57] Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., et al. GHG Emissions of All World Countries [M]. Publications Office of the European Union, 2021.
- [58] Cai, B., Wang, X., Huang, G., et al. Spatiotemporal changes of China's carbon emissions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(16): 8536–8546.
- [59] 王宇. 中国化石能源碳排放统计数据跨尺度空间化方法研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2017.
- [60] 顾羊羊, 乔旭宁, 樊良新等. 夜间灯光数据的区域能源消费碳排放空间化[J]. 测绘科学, 2017, 42(2): 140–146.
- [61] Xie, Z., Jia, H., Cai, Y., et al. Emission accounting, sectoral contributions and gridded spatial distribution of greenhouse gases in a typical petrochemical district of Shanghai [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2023, 14(6): 101776.
- [62] 杜海波. 基于夜间灯光数据的黄河与长江流域碳排放空间差异分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [63] 于博, 杨旭, 吴相利. 哈长城市群县域碳排放空间溢出效应及影响因素研究——基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的实证[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 697–706.
- [64] 刘云龙, 刘佳, 黄承锋. 长江经济带交通碳排放空间网络结构特征及影响因素研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(3): 45–49+65.
- [65] 杨柳林, 曾武涛, 张永波等. 珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3521–3534.
- [66] 李璇, 高倍, 刘馨瑶等. 高空间分辨率城市碳排放清单建立: 以营口市为例[J/OL]. 环境工程, 2024, 1–9.
- [67] 王正, 周侃, 樊杰等. 市—县尺度能源消费碳排放核算方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2023, 42(7): 1406–1419.