

王飞,韩君.兰州-西宁城市群土地利用碳排放时空演变及驱动因素[J].中国沙漠,2026,46(4):1-11.

兰州-西宁城市群土地利用碳排放 时空演变及驱动因素

王飞^{ab}, 韩君^a

(兰州财经大学 a.统计学院, b.金融学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 探究城市群土地利用碳排放的时空分异特征及其驱动机制,对推动区域土地集约利用与低碳发展具有重要意义。基于遥感、能源、经济等多源数据,利用碳排放系数法、夜间灯光反演和LMDI分解模型,系统分析了2000—2022年兰州-西宁城市群土地利用碳排放的动态演变特征及驱动因素。结果表明:(1)兰西城市群土地利用结构以草地和耕地为主,其次为林地、水域、未利用地,最后是建设用地;年净变化率表现为建设用地(2.94%)>未利用地(0.81%)>水域(0.50%)>林地(0.23%)>草地(0.05%)>耕地(-0.63%)。(2)土地利用直接碳排放呈下降趋势,年均减少3.26%;建设用地碳排放与土地利用总碳排放持续增加,年均增速分别为4.27%与4.26%;建设用地是最主要碳源,土地利用总碳排放高值区集中于甘肃省辖县域及西宁市-乐都区核心带。(3)经济发展水平(主导因素)和建设用地规模是土地利用总碳排放增加的核心驱动因素,累积贡献碳排放增量32 104.72万t;碳排放强度(主控因子)和土地利用效率则具有显著抑制效应,累积促使碳排放下降25 244.80万t。因此,提升土地利用效率,严控经济发展过程中的建设用地扩张是推动兰西城市群减排的关键路径。

关键词: 土地利用碳排放; 时序变化; 空间差异; 驱动因素; 兰州-西宁城市群

文章编号: 1000-694X(2026)04-001-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00150

中图分类号: X196

文献标志码: A

0 引言

控制二氧化碳(CO₂)排放以减缓全球变暖进程,已成为国际社会的核心共识和关键环境议题^[1-2]。作为连接社会经济系统与自然生态环境之间的关键纽带,土地利用变化深刻影响着全球碳循环动态^[3],其引起的碳排放已被广泛认为是驱动全球气候变暖的重要因素^[4-5]。经济发展、产业布局、空间格局、能源消费等人类活动均与碳排放紧密相关,并最终体现在差异化的土地利用活动中^[6]。因此,面向“双碳”目标,深入解析区域土地利用变化对碳排放的影响机理,探索通过土地利用优化实现减排固碳、促进低碳经济发展的路径,不仅是减缓全球变暖的核心策略,亦对构建资源节约型、环境友好型社会具有重要的现实意义。

土地利用碳排放既是土地利用/覆盖变化环境

效应研究的重点领域^[7-8],也是全球变化与碳循环研究的核心科学问题^[8]。学者针对全球变化背景下的土地利用碳排放开展了广泛研究^[9],研究重点各有侧重。国外研究多聚焦于土地利用变化对碳动态的影响及其气候减缓路径^[10],而国内则侧重于土地利用碳排放的核算^[11-13]、时空格局^[14-15]、影响^[14,16-18]、效率^[19]及模拟预测^[20-21]。研究方法上,探索性空间数据分析与时序分析成为主流。研究尺度涵盖广泛,从全国、省域、县市到流域。然而,现有研究多聚焦于社会经济发展热点区域的省市及全国范围,针对中国西北地区的研究匮乏,城市群层面的土地利用碳排放研究更为少见。受限于基础数据的可获取性,地市以下单元的相关研究尤为薄弱。近年来,遥感技术的进步使得夜间灯光数据广泛被应用于地市及以下单元碳排放量估算^[13,22-24],有效弥补

收稿日期:2025-08-05; 改回日期:2025-10-02

资助项目:甘肃省基础研究计划—软科学专项项目(24JRZA079);甘肃省教育厅高校教师创新基金项目(2024A-071);兰州财经大学科研项目(Lzufe2024C-007)

作者简介:王飞(1982—)男,河北宁晋人,博士研究生,副教授,研究方向为西部生态与资源环境可持续。E-mail: wangfei@lzu.edu.cn

通信作者:韩君(E-mail: hanjun8012@126.com)

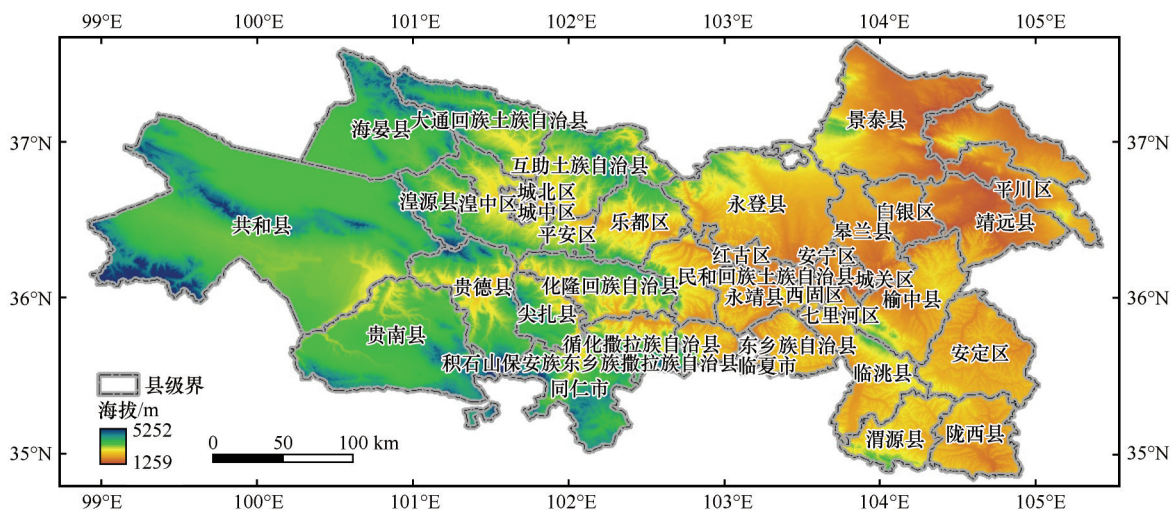
了能源消耗统计数据的不足,为揭示中小尺度碳排放时空分布特征及变化规律提供了有力的数据支撑。

作为新型城镇化的核心空间载体和经济社会发展的重要战略区,城市群又是生态环境问题的高度敏感区和集中显现区。开展城市群土地利用碳排放研究,突破了单一城市研究局限,对于统筹不同层级规划主体诉求、支撑低碳发展策略的纵向衔接与横向协调至关重要^[25]。当前,围绕“双碳”目标,部分经济发达城市群已率先探索转型路径。然而,地处西北欠发达地区的兰州-西宁城市群(简称兰西城市群),正处于经济体制转型与产业结构升级的关键时期,经济发展需求与生态环境脆弱之间的矛盾突出,在推进绿色低碳转型、应对环境约束方面存在显著困难。鉴于此,本研究选取兰西城市群为研究区,综合集成土地利用和夜间灯光遥感数据,以及能源消费与经济发展统计数据,采用碳排放系数与夜间灯光反演相结合,探究土地利用碳排放的时空演变特征,并进一步借助对数平均迪氏指数(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI),深入剖析关键驱动因素,旨在为因地制宜制定兰西城市群

全面、合理的低碳经济发展措施与政策提供理论支撑与实践依据。

1 研究区概况

兰西城市群位于34°51'—37°38'N、99°01'—105°38'E,是以兰州市和西宁市为枢纽的中国西北地区重要的跨省城市群(图1),也是黄河上游重要的新型城镇化区域,主要涉及甘肃省兰州市全部以及白银市、定西市、临夏回族自治州部分县市区和青海省西宁市、海东市全部以及海北藏族自治州、海南藏族自治州、黄南藏族自治州部分县市(图1),总面积9.75万km²,占甘肃、青海两省总面积的36.7%。2022年的常住人口和地区生产总值分别占甘肃、青海两省总人口和地区生产总值总量的39.55%和53.34%。兰西城市群立足于独特的地理位置和区位优势,孕育了各具特色的多层次、多类型城市,不仅是甘、青两省经济发展的关键增长极,也是全国“两纵三横”城镇化战略中陆桥通道西北段的核心区域。同时,也是中国向西开放的重要枢纽,关联内地与丝绸之路经济带,对维护国家生态安全、促进西部地区繁荣稳定具有重要战略意义。



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2024)0650号)制作,底图边界无修改

图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the research area

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究所用数据包括土地利用和夜间灯光遥感数据,以及能源消费、经济、人口统计数据。

土地利用类型数据:源于Yang等^[26]发布的中国土地覆盖数据集,空间分辨率30 m。基于已有研究^[27],将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类。

夜间灯光数据:源于<http://geodata.nnu.edu.cn/>,空间分辨率500 m。该数据集实现了跨传感器长时

间序列中国区夜间灯光数据的校准、合成和改进,精度可靠,能够真实反映不同尺度的夜间灯光亮度值与能源消费碳排放量的时序一致性变化特征^[22,28-30]。

能源消费、经济和人口数据:源于《甘肃改革开放30年》、2001—2023年的《甘肃统计年鉴》《青海统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国城市统计年鉴》和县域统计年鉴。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态变化

单一土地利用动态变化是指一定时期内研究区某一土地利用类型面积变化状况,通常用净变化率表示,计算公式参见文献[27]。

综合土地利用动态变化是指整个区域土地利用变化的总体状况,计算公式参见文献[31]。

引入土地利用转移矩阵以分析地类之间的双向转化过程,有效解决了净变化率无法揭示转化路径的不足,计算公式参见文献[32]。

2.2.2 土地利用碳排放核算

遵循《IPCC 2006年国家温室气体清单指南》,采用碳排放系数法估算耕地、林地、草地、水域及未利用地因人为活动直接驱动的碳排放量,即土地利用直接碳排放^[11-14,16,18,22,27,29,33-35]:

$$C_i = S_i \times K_i \quad (1)$$

式中: C_i 、 S_i 、 K_i 分别为第*i*类土地利用的直接碳排放量、面积和碳排放系数;*i*为土地利用类型。借鉴已有研究^[11-14,16,18,22,27,29,33-35],结合兰西城市群实际,耕地、林地、草地、水域和未利用地的碳排放系数($t \cdot hm^{-2}$)取值分别为0.422、-0.578、-0.021、-0.253、-0.005,系数正值表示该地类是碳源,负值为碳汇。

通过省域层面煤、石油、天然气等能源消耗产生的碳排放量间接得到建设用地上因人类活动产生的碳排放量^[11-14,16,18,22,27,29,33-35],称这部分碳排放量为建设用地碳排放。鉴于地市及以下层面能源消耗数据缺失,利用夜间灯光数据反演得到县域能源消耗碳排放量^[13,22,24,29]。计算步骤是:①参考苏泳娴等^[24]测算甘、青两省省域能源消费碳排放量;②分析甘、青两省夜间灯光总亮度值与省级能源消费碳排放量之间的相关系数和回归关系,考虑降尺度至栅格单元的精度,二者之间的拟合模型采用无常数项线性回归,构建并分别得到甘、青两省省域的夜间灯光亮度总值与能源消费碳排放量线性拟合

公式:

$$\text{甘肃省: } y = 0.1351x, R^2 = 0.93 \quad (2)$$

$$\text{青海省: } y = 0.0832x, R^2 = 0.89 \quad (3)$$

式中: y 表示省级能源消费碳排放量; x 表示省级夜间灯光总亮度值。由拟合公式和相关系数得出甘、青两省省域的夜间灯光总亮度值与能源消费碳排放量显著正相关,且拟合程度很好,表明了基于夜间灯光数据测算兰西城市群能源消费碳排放的合理性。③计算兰西城市群县域夜间灯光总亮度值占所在省域夜间灯光总亮度值的比例,进而依据拟合公式估算研究区的建设用地碳排放。

因此,土地利用碳排放的计算公式是^[32-35]:

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_i + C_{id} \quad (4)$$

式中: C_t 为土地利用总碳排放; C_i 为土地利用直接碳排放; C_{id} 为建设用地碳排放。

2.2.3 驱动因素分析

LMDI模型具有技术成熟、分解无残差等优势,常用于土地利用碳排放的驱动因素研究^[34-36]。因此,本研究基于Kaya碳排放恒等式,借鉴相关研究^[34-36]中广泛考虑的核心因素,结合兰西城市群快速城镇化引起建设用地相对增加71.70%,且远高于其余土地利用类型的实际,建设用地成为承载研究区主要社会经济活动和能源消耗的空间载体^[33,37-39],故将建设用地面积作为独立因素纳入模型。鉴于研究区碳排放强度区域内部差异显著,同时其单位建设用地地区生产总值产出(土地利用效率)波动较大,还将碳排放强度^[23,34,39]、经济发展水平^[23,33-36,38-39](地区生产总值)和土地利用效率^[33-34,40]作为关键驱动因素,故重点从碳排放强度(万元产值碳排放量)、经济发展水平(人均地区生产总值)、土地利用效率(建设用地上的人口密度)、建设用地规模(建设用地面积)4个方面构建土地利用碳排放LMDI分解模型。

$$C = (C/GDP) \times (GDP/P) \times (P/S) \times S \quad (5)$$

$$CI = C/GDP \quad (6)$$

$$GI = GDP/P \quad (7)$$

$$PI = P/S \quad (8)$$

$$C = CI \times GI \times PI \times S \quad (9)$$

式中: C 为土地利用总碳排放量; GDP 为地区生产总值; P 为年末常住人口; S 为建设用地面积; CI 、 GI 、 PI 分别表示碳排放强度、经济发展水平、土地利用

效率。

最后,采用LMDI模型对公式(4)进行加和分解:

$$\Delta C_{\text{tot}} = C^t - C^0 = \Delta CI + \Delta GI + \Delta PI + \Delta S \quad (10)$$

式中: C^0 和 C^t 为研究初期、 t 时期的土地利用总碳排放量; ΔC_{tot} 为土地利用总碳排放变化的总量,即总效应; ΔCI 、 ΔGI 、 ΔPI 、 ΔS 分别表示从研究初期到 t 时期的碳排放强度效应(反映能源结构和技术水平引起的碳排放效应)、经济发展水平效应(体现经济增长引起的碳排放效应)、土地利用效率效应(体现土地集约利用驱动的碳排放效应)和建设用地规模效应(表征空间扩张主要碳源带来的碳排放效应)。碳排放强度效应(CON_{CI})、经济发展水平效应(CON_{GI})、土地利用效率效应(CON_{PI})和建设用地规模效应(CON_S)对土地利用碳排放的贡献率分别为:

$$CON_{CI} = \Delta CI / \Delta C_{\text{tot}} \quad (11)$$

$$CON_{GI} = \Delta GI / \Delta C_{\text{tot}} \quad (12)$$

$$CON_{PI} = \Delta PI / \Delta C_{\text{tot}} \quad (13)$$

$$CON_S = \Delta S / \Delta C_{\text{tot}} \quad (14)$$

3 结果与分析

3.1 土地利用变化的时空特征

3.1.1 土地利用面积的时序变化

2000—2022年兰西城市群土地利用结构以草地和耕地为主,其次是林地、水域和未利用地,最后是建设用地。从多年变化(图2A、B)和净变化率(图2C)看,耕地面积呈波动下降态势,2022年相比2000年下降了2 057.23 km²,年净变化率为-0.63%。而建设用地整体持续增加,2022年相对2000年增加了113.34 km²,年均增加2.94%。其余4种土地利用类型面积呈不同幅度波动增加,年净变化率依次为未利用地(0.81%)、水域(0.50%)、林地(0.23%),草地(0.05%)。

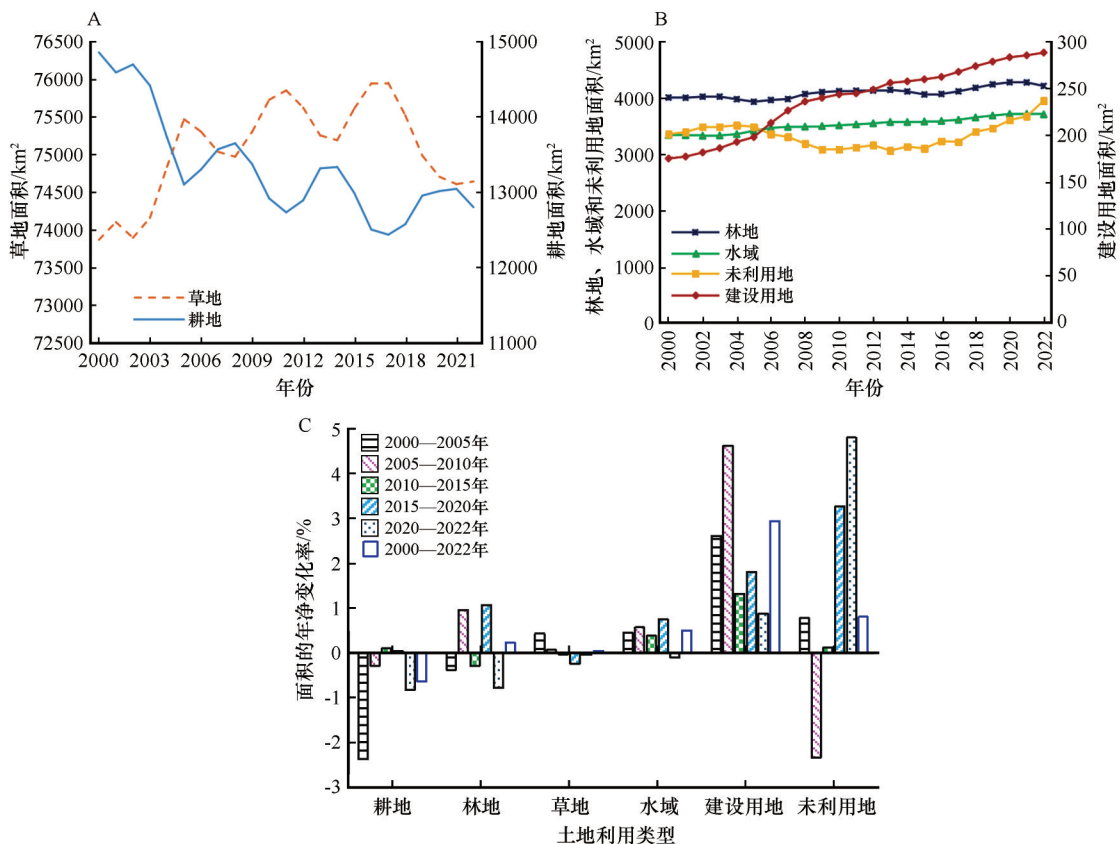


图2 2000—2022年兰西城市群土地利用面积变化

Fig.2 Area changes of land use in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration (2000–2022)

3.1.2 土地利用面积的空间变化

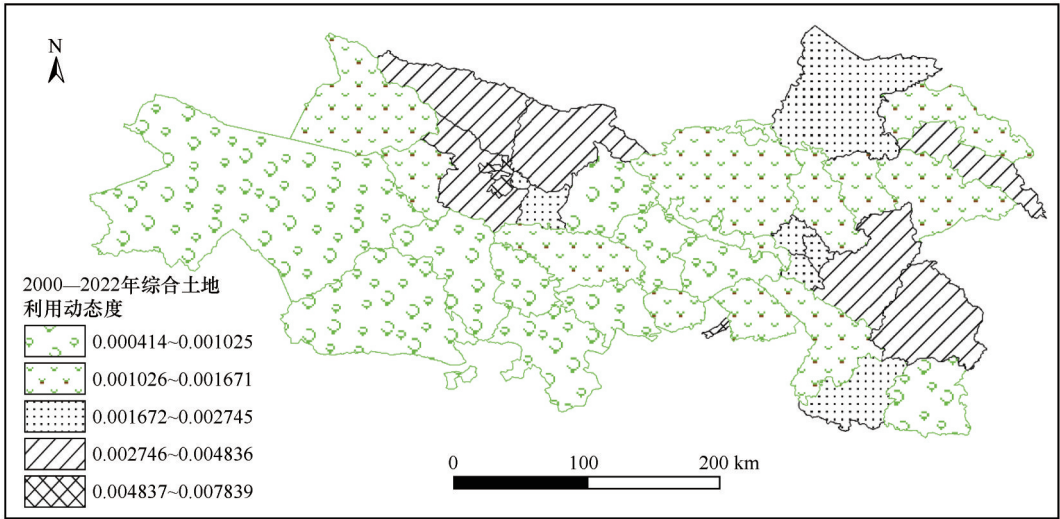
兰西城市群综合土地利用动态变化最低值集中在研究区的西南部、中部和东南部的陇西县,最

高值分布在西宁市城中区、城北区和临夏市,次高值集中于榆中县、定西市安定区、白银市平川区、西宁市湟中区、互助县和大通县(图3)。整体看,兰州

市和西宁市所辖县区及其周边人口密集、经济发展较快县区的综合动态变化相对较高。

2000—2022 年土地利用类型转移(图 4)以耕地和草地、草地和未利用地为主,其次是草地和林地,水域和草地,最后是耕地和建设用地、草地和建设

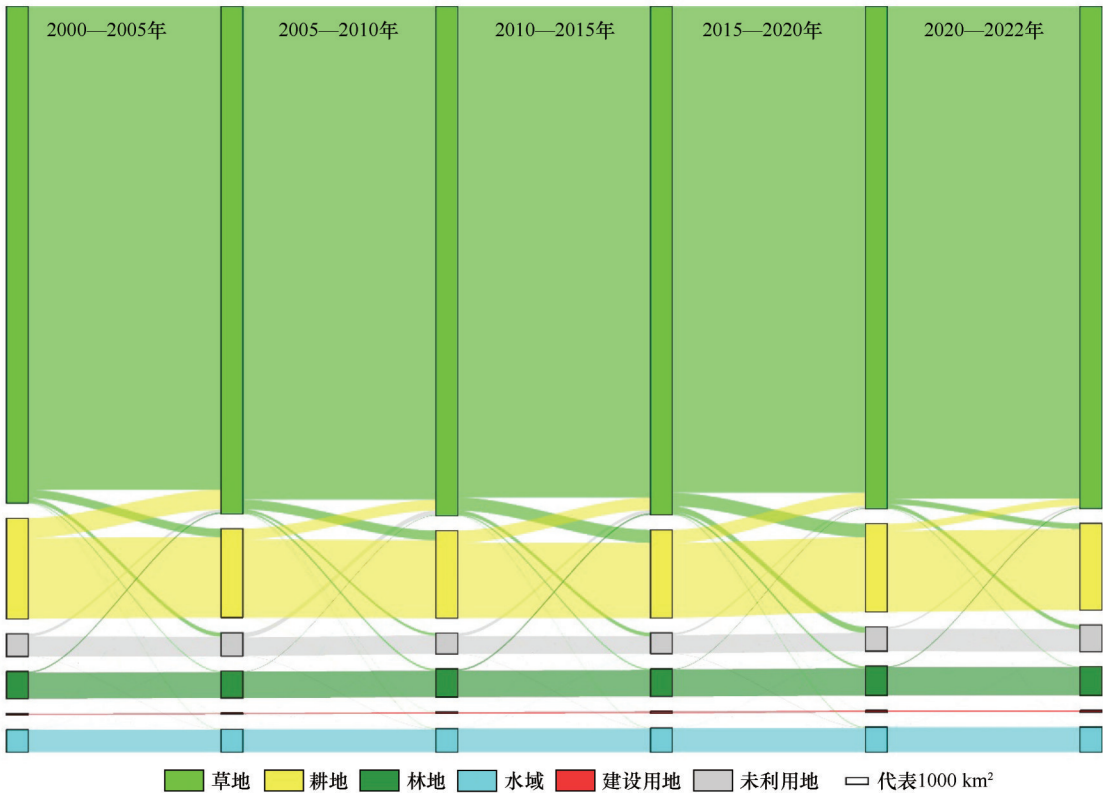
用地。从转移面积看,2015—2020 年转移面积最多,6 375.61 km²;其次是 2000—2005 年和 2010—2015 年,分别为 5 689.62、5 363.04 km²;2005—2010



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2024)0650号)制作,底图边界无修改

图 3 2000—2022 年兰西城市群县域综合土地利用类型动态变化空间分布

Fig.3 Spatial distribution of county-level comprehensive land use dynamic changes in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration (2000–2022)



注:流的宽度与各土地类型面积成正比

图 4 2000—2022 年兰西城市群不同时期各土地利用类型之间的转移

Fig.4 Transfer between different land use types in different periods in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration(2000–2022)

年转移面积相对较少,为4 565.79 km²;2020—2022年相对最少,为2 420.39 km²。

3.2 土地利用碳排放的时空变化

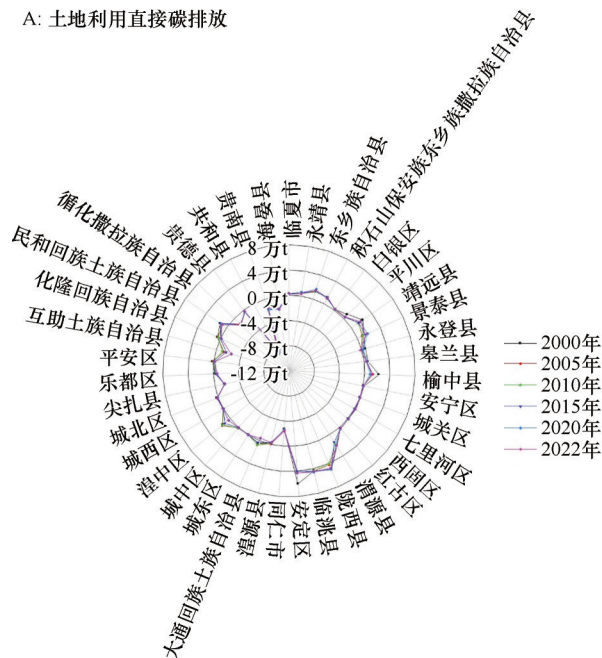
3.2.1 土地利用直接碳排放时空变化

2000—2022年兰西城市群土地利用直接碳排放整体持续下降,由2000年的15.34万t下降至2022年4.35万t。其中:2000—2010年快速降低,相对下降了62.9%,2010—2015年又相对增加8.69%,2015—2022年下降速率趋缓,相对下降了29.70%。

2000—2022年各县的土地利用直接碳排放整体呈阶段性波动下降(图5A)。甘肃省辖县域的土地利用直接碳排放整体呈波动下降,2022年相比

2000年下降了5.28万t;青海省辖县域则表现为碳吸收且呈持续增加趋势,同比增加了5.71万t。共和县、同仁市、海晏县的土地利用直接碳吸收量最大,三县市碳吸收量占青海省辖的比例由2000年90.50%持续下降至2022年65.40%。定西市安定区、临洮县和陇西县三县区的土地利用直接碳排放量相对最高,占甘肃省辖的一半以上,且这三县区的直接碳排放增速远超兰西城市群整体水平,从2000年与兰西城市群持平急剧增加至2022年的3.12倍。由此可见,兰西城市群的土地利用碳吸收增加量抵消了土地利用直接碳排放增加量,加上2000年土地利用直接碳排放相对最高,达15.34万t,使得兰西城市群土地利用直接碳排放仍一直表现为净碳排放。

A: 土地利用直接碳排放



B: 建设用地碳排放

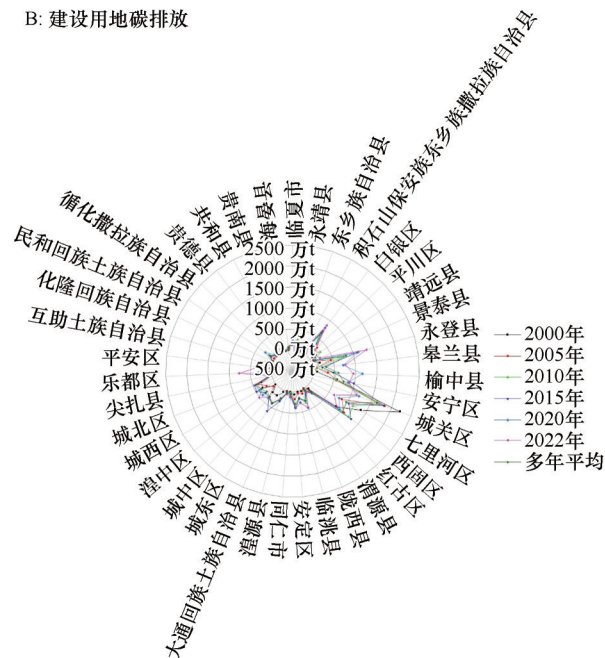


图5 2000—2022年兰西城市群县域土地利用碳排放变化

Fig.5 Changes of county-level land use carbon emissions in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration (2000—2022):

(A) Direct land-use carbon emissions; (B) Construction land carbon emissions

3.2.2 建设用地碳排放时空变化

2000—2022年兰西城市群的建设用地碳排放整体呈持续增加趋势,2022年比2000年增加了6 870.91万t。其中:2005—2010年,增加速度相对最快,年均增长6.42%;2015—2020年,年均增长率相对最低,为0.89%。从省辖看,甘肃省辖占研究区的比例由2000年83.56%下降至2022年69.43%,但仍占主导。分县域看,各县域建设用地碳排放均持续增加,仅兰州市城关区、七里河区和西固区例外(图5B)。城关区、西固区和七里河区三区占甘肃省辖的比例由2000年72.76%持续下降至2022年

26.52%,与节能减排有效落实密切相关。西宁市城东区、城中区、湟中区、城西区 and 城北区占青海省辖的约50%,由2000年82.91%持续下降至2022年的46.80%;海东市乐都区和大通县的占比由2000年5.36%持续增至2022年的22.98%。从多年平均变化看,最高值分布在城关区、七里河区和西固区;次高值区分布在榆中县、永登县及白银区;较高值区则分布在陇西县、安定区及城东区、城中区、湟中区、城西区、城北区、乐都区和大通县。低值区集中于贵南县、尖扎县、湟源县,及化隆回族自治县、东乡族自治县和积石山保安族东乡族撒拉族自治县。

由此可见,兰西城市群建设用地碳排放的控制可从多维度梯度减排以助推产业减排转型和实现区域经济高质量发展。

3.2.3 土地利用总碳排放时空变化

2000—2022年兰西城市群土地利用总碳排放持续增加(图6),由2000年的7 326.37万t增至2022年的14 186.29万t,年均增长4.26%;分时期看,年均增长率分别为4.27%(2000—2005年)、6.41%(2005—2010年)、1.94%(2010—2015年)、0.89%(2015—2020年)、2.74%(2020—2022年),呈先增后减又增

的波动特征。从省辖看,甘肃省辖占兰西城市群的比重由2000年的83.79%持续下降至2022年的69.58%,仍远高于青海省辖部分。从高值分布看,甘肃省辖主要分布在兰州市城关区、七里河区、安宁区、红古区、永登县,以及白银市白银区、陇西县和定西市安定区,占兰西城市群和甘肃省辖的比重分别由2000年的76.01%和90.71%下降至2022年的45.67%和65.64%。青海省辖高值区主要在西宁市的五区及乐都区、大通县,占青海省辖的比例由2000年的89.53%减至2022年的70.10%。

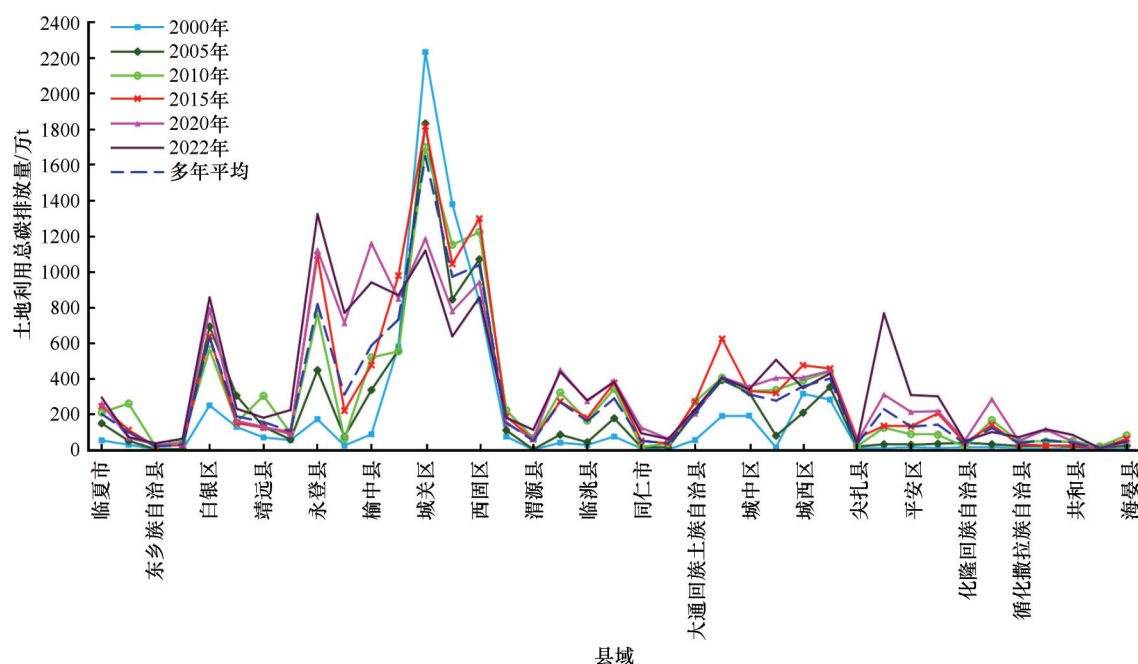


图6 2000—2022年兰西城市群土地利用总碳排放变化

Fig.6 Changes of total land use carbon emissions in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration (2000–2022)

兰西城市群土地利用总碳排放主要受建设用地碳排放变化影响,建设用地碳排放占土地利用总碳排放的比例持续增加,平均占比高达99.92%(图5)。

3.3 土地利用碳排放驱动因素

经济发展水平和建设用地规模是促使兰西城市群土地利用总碳排放增加的主要因素(表1),二者分别使碳排放累积量增加了26 276.14万t和5 828.58万t。而碳排放强度和土地利用效率对土地利用碳排放起主要抑制作用,二者分别使碳排放下降了21 067.49万t和4 177.31万t,但促进作用大于抑制作用,使得2000—2022年兰西城市群土地利用碳排放累积增加了6 859.92万t。经济发展水平和建设用地规模分别贡献了土地利用碳排放增加量的81.85%和18.15%。由此可见,经济发展水平

提升带动了建设用地扩张,进而引起能源消耗和土地利用的碳排放增加。碳排放强度和土地利用效率分别贡献了土地利用碳排放下降量的83.45%和16.55%。可见,碳排放强度是抑制兰西城市群土地利用碳排放持续增加的主要因素,与近年来产业结构转型升级、清洁能源的开发与使用密不可分。

兰西城市群土地利用碳排放驱动因素的作用程度存在显著空间分异。2000—2022年兰西城市群分属两省域的土地利用碳排放累积增加量在一个量级,但甘肃省辖的土地利用碳排放增加量比青海省辖多603.07万t,建设用地规模对青海省辖土地利用碳排放的驱动作用相对甘肃省辖高5.97%,土地利用效率对青海省辖土地利用碳排放的抑制作用相对甘肃省辖高13.52%。因此,控制兰西城市群

表 1 兰西城市群县域土地利用碳排放驱动因素分解结果(单位:万 t)
Table 1 Decomposition results of driving factors for county-level land use carbon emissions in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration(unit: 10⁴ t)

指标	年份					累积效应
	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020	2020—2022	
ΔCI_{lx}	-3 502.65	-4 837.16	-6 180.67	-4 416.51	-2 130.49	-21 067.49
ΔGI_{lx}	4 765.11	7 069.18	7 145.13	4 451.73	2 844.99	26 276.14
ΔPI_{lx}	-681.89	-1 569.09	-677.99	-991.96	-256.37	-4 177.31
ΔS_{lx}	984.21	2 185.72	850.05	1 529.61	278.97	5 828.58
ΔC_{totlx}	1 564.78	2 848.64	1 136.52	572.87	737.11	6 859.92
CON_{Cllx}	-223.84%	-169.81%	-543.83%	-770.95%	-289.03%	-307.11%
CON_{Gllx}	304.52%	248.16%	628.69%	777.10%	385.97%	383.04%
CON_{Pllx}	-43.58%	-55.08%	-59.66%	-173.16%	-34.78%	-60.89%
CON_{Slx}	62.90%	76.73%	74.79%	267.01%	37.85%	84.97%

土地利用碳排放一方面要控制经济发展过程中建设用地扩张带来的碳排放增加,另一方面要提高土地利用的集约化程度、降低万元产值碳排放。

4 讨论

准确估算土地利用碳排放,有助于科学理解人类活动对环境的影响,还为辨识、划分减排责任提供了理论支撑。目前,缺乏兰西城市群各地类及其下不同亚类的本地碳排放系数实测数据支撑,综合科学性与可操作性,遵循宏观尺度的通用做法,本研究采用碳排放系数法计算兰西城市群土地利用碳排放。该方法因计算简单、基础数据容易获取被广泛应用于土地利用碳排放估算^[11-14,16,18,22,27,29,33,35,41],为不同数据基础宏观尺度的土地利用碳排放研究提供了一个科学且可横向比较的核算基准^[42]。本研究采用的碳排放系数是借鉴学者基于大量观测数据综合平均后的数值^[11-14,16,18,22,27,29,33,35,41],其代表某类土地利用在典型人为管理模式下载源/碳汇功能的平均状态及其内部一定程度的空间异质性,是宏观平均效应的体现。

兰西城市群土地利用碳排放源于耕地和建设用地,土地利用直接碳排放年均减少 3.26%,其中,甘肃省辖区年均减少 0.81%,青海省辖区则年均增加 1.82% 碳吸收,与李缘缘等^[12]、马远等^[18]得出的甘、青两省土地利用(除建设用地)碳排放呈线性下降趋势一致。尤其是共和县、贵南县、贵德县等县域呈较高碳汇,与吕倩等^[13]、冯薇等^[19]的研究

结论一致。为精细化估算土地利用碳排放,基于已有研究^[13,22-24,29],利用夜间灯光数据反演得出 2000—2022 年建设用地碳排放呈先快后缓的增加趋势,且甘肃省辖区大于青海省辖,高碳排放区域集中在兰州市和西宁市主城区及其周边人口密集、经济发达的县区,究其原因,经济发展水平对碳排放的影响最大,而土地利用效率抑制碳排放,这与马远等^[18]、冯薇等^[19]、邓光耀等^[23]的研究结论一致。

本研究结果有效揭示了兰西城市群土地利用碳排放的时空演变特征,对于制定服务于兰西城市群“双碳”目标的战略决策具有科学参考价值。然而,本研究采用统一碳排放系数法估算土地利用碳排放,掩盖了土地利用类型内部的异质性特征及其带来的估算结果不确定性。为此,未来的改进主要着眼于:一是尝试引入高分辨率历史影像、植被指数等数据与地方政策资料以辅助精准解译土地利用类型的动态变化,从而实现土地利用碳排放的精细化核算;二是主要通过耦合气温、降水等自然环境因素及当地生态、产业政策等人为因素进行系数修正,构建兰西城市群的本地化碳排放系数,并量化最终结果对系数变化的敏感性,进而增强结果的可靠性;三是尝试与 InVEST 等过程性模型结合,通过多方法相互验证来提升结果估算精度。

5 结论

2000—2022 年,兰州—西宁城市群耕地整体呈

下降趋势,其余土地利用类型整体均呈不同幅度增加。建设用地持续增加且增加最快,其次是未利用地、水域、林地,最后是草地。土地利用类型综合动态变化呈“多核”分布,高值区集中于兰州市和西宁市所辖县区及其周边人口密集、经济发展较快的县区,其次是临夏市和白银市平川区,低值区集中于城市群的西部、中部和北部。土地利用类型之间的转移以耕地和草地、草地和未利用地为主,其次是草地和林地、水域和草地,最后是耕地和建设用地、草地和建设用地。

兰西城市群土地利用总碳排放整体持续增加,由建设用地碳排放主导。各县域(除城关区、七里河区 and 西固区外)建设用地碳排放均呈增加趋势,并按总碳排放量识别出3个高值梯度,高值区主要集中在甘肃省辖县域及西宁市和海东市乐都区、大通县。同期,土地利用直接碳排放呈下降趋势,建设用地碳排放时空演变特征与土地利用总碳排放基本一致。

经济发展水平和建设用地规模促进兰西城市群土地利用碳排放增加,且经济发展水平起主导作用。碳排放强度和土地利用效率抑制土地利用碳排放增加,且以碳排放强度为主。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023.
- [2] Marcos L, Sassan S, Michael K, et al. Impacts of degradation on water, energy, and carbon cycling of the Amazon Tropical Forests [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125: JG005677.
- [3] 杨皓然, 吴群. 不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟[J]. *地域研究与开发*, 2021, 40(3): 121-126.
- [4] Lau H C, Ramakrishna S, Zhang K, et al. The role of carbon capture and storage in the energy transition [J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35: 7364-7386.
- [5] 马海良, 丁元卿, 庞庆华. 武汉市湖泊水域利用转变及其碳排放影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(2): 369-375.
- [6] Lai L, Huang X J, Yang H, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010 [J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601063.
- [7] 陆大道. 中国地理学的发展与全球变化研究[J]. *地理学报*, 2011, 66(2): 147-156.
- [8] Boyle J F, Gaillard M J, Kaplan J O, et al. Modelling prehistoric land use and carbon budgets: a critical review [J]. *Holocene*, 2011, 21(5): 715-722.
- [9] Li W, Yu T, Xu Y, et al. Visual analysis of article publication related to carbon emission quota field based on CiteSpace software [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 55(2): 26-33.
- [10] Liu M, Chen Y R, Chen K, et al. Progress and hotspots of research on land-use carbon emissions: a global perspective [J]. *Sustainability*, 2023, 15(9): 7245.
- [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] 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区[J]. *环境科学*, 2023, 44(3): 1267-1276.
- [13] 吕倩, 张林野, 雒瑶. 黄河流域县域土地利用碳排放时空格局及碳平衡分区[J/OL]. *环境科学*, 1-20[2025-09-30]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202409082>.
- [14] 张杰, 陈海, 刘迪, 等. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(1): 21-31.
- [15] Yang B, Chen X, Wang Z Q, et al. Analyzing land use structure efficiency with carbon emissions: a case study in the middle reaches of the Yangtze River, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 123076.
- [16] 樊高源, 杨俊孝. 土地利用结构、经济发展与土地碳排放影响效应研究: 以乌鲁木齐市为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(10): 177-184.
- [17] Yang Y J, Li H Y. Monitoring spatiotemporal characteristics of land-use carbon emissions and their driving mechanisms in the Yellow River Delta: a grid-scale analysis [J]. *Environmental Research*, 2022, 214(4): 114151.
- [18] 马远, 刘真真. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J]. *生态经济*, 2021, 37(7): 35-43.
- [19] 冯薇, 赵荣钦, 谢志祥, 等. 碳中和目标下土地利用碳排放效率及其时空格局: 以黄河流域72个地级市为例[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(1): 102-113.
- [20] 石晶, 石培基, 王梓洋, 等. 基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 300-313.
- [21] Liang X, Guan Q F, Keith C C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China [J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [22] 武爱彬, 赵艳霞, 郭小平, 等. 基于土地利用和夜间灯光数据的京津冀区域碳排放时空分异研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2022, 38(6): 36-42.
- [23] 邓光耀, 陈刚刚. 兰西城市群能源消费碳排放时空分布特征及影响因素: 基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据[J]. *西华大学学报(哲学社会科学版)*, 2022, 41(6): 40-60.
- [24] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J]. *地理学报*, 2013, 68(11): 1513-1526.

- [25] 方创琳, 张国友, 薛德升. 中国城市群高质量发展与科技协同创新共同体建设[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 2898–2908.
- [26] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13: 3907–3925.
- [27] 王飞, 韩君. 基于土地利用变化的河西内陆河流域碳排放时空特征[J]. 冰川冻土, 2023, 45(3): 940–952.
- [28] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, et al. An extended time series (2000–2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13: 889–906.
- [29] 张斌, 卫丹琪, 丁乙, 等. 基于夜间灯光和土地利用的珠江流域城市碳排放估算及其时空动态特征研究[J]. 地球科学进展, 2024, 39(3): 317–328.
- [30] Li J, Jiao L M, Li F H, et al. Spatial disequilibrium and influencing factors of carbon emission intensity of construction land in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 396: 136464.
- [31] 王生霞, 丁永建, 叶柏生, 等. 基于气候变化和人类活动影响的土地利用分析: 以新疆阿克苏河流域绿洲为例[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 828–835.
- [32] Liu J Y, Liu M L, Deng X Z, et al. The land use and land cover change database and its relative studies in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2002, 12(3): 275–282.
- [33] 王亚娟, 翟晨曦, 刘彩玉, 等. 宁夏土地利用碳排放时空差异及影响因素分析[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5049–5059.
- [34] 黄汉志, 贾俊松, 张振旭. 江西县域土地利用变化碳排放时空演变及其影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8390–8403.
- [35] 谭洁, 刘琴, 唐晓佩, 等. 基于LMDI模型的土地利用碳排放时空差异及影响因素研究: 以洞庭湖区为例[J]. 地域研究与开发, 2024, 43(1): 160–166.
- [36] 董莹, 许宝荣, 华中, 等. 基于LMDI的甘肃省碳排放影响因素分解研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 606–614.
- [37] 罗君, 张学斌, 石培基. 兰州-西宁城市群国土空间演化特征及分区优化[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 182–193.
- [38] 李再艳, 石培基. 兰州-西宁城市群城乡建设用地开发强度空间格局变化及影响因素分析[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(4): 450–458.
- [39] 王宁飞. 甘肃省碳排放影响因素、峰值预测和配额分配研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [40] 杨涛. 基于土地利用的天津市能源碳排放分析与减排路径研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [41] 王家明. 兰西城市群土地利用碳排放时空变化及其低碳路径研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
- [42] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.

Spatiotemporal evolution and driving factors of land use carbon emissions in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration

Wang Fei^{ab}, Han Jun^a

(a.School of Statistics /b.School of Finance, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Understanding the spatiotemporal differentiation characteristics and driving mechanisms of land use carbon emissions in urban agglomerations is critical for promoting regional land intensive use and low-carbon development. Based on multi-source data such as remote sensing, energy, and economic statistics, adopting carbon emission coefficient methods, nighttime light remote sensing inversion, and the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) decomposition model, this study systematically analyzes the spatiotemporal evolution patterns and driving factors of land use carbon emissions in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration from 2000 to 2022. The results show that: (1) The land use structure was dominated by grassland and cropland, followed by forest, water bodies and barren land, finally construction land. In terms of net change rate, the order was construction land (2.94%) > barren land (0.81%) > water bodies (0.50%) > forest (0.23%) > grassland (0.05%) > cropland (-0.63%). (2) Direct carbon emissions from land use showed a declining trend, with an average annual decrease of 3.26%. In contrast, carbon emissions from construction land and total land use carbon emissions showed continuous growth, with average annual increases of 4.27% and 4.26% respectively. Construction land was the main carbon source, and regions with high carbon emissions were concentrated in the counties administered by Gansu Province and the core zone of Xining-Ledu. (3) The economic development level (the primary contribution factor) and construction land expansion were the primary positive drivers for the increase in total land use carbon emissions, which cumulatively contributing to the total land use carbon emission increase of $32\ 104.72 \times 10^4$ t. While carbon emission intensity (the dominant suppressing factor) and land use efficiency played significant inhibitory roles, which cumulatively leading to the total land use carbon emission decrease of $25\ 244.80 \times 10^4$ t. Therefore, enhancing land use efficiency and strictly controlling carbon emission growth resulting from construction land expansion during economic development are crucial pathways for achieving emission reduction in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration.

Key words: land use carbon emissions; temporal evolution; spatial heterogeneity; driving factors; Lanzhou-Xining Urban Agglomeration