

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.04.020

彭双云, 陈明潇, 张老伟, 等. 滇中城市群碳储量时空演变及其对 LULC 变化的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 246-256, 266.

PENG Shuangyun, CHEN Mingxiao, ZHANG Laowei, et al. Spatiotemporal evolution of carbon storage in the Central Yunnan Urban Agglomeration and its response to LULC[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 246-256, 266.

滇中城市群碳储量时空演变及其对 LULC 变化的响应

彭双云^{1,2}, 陈明潇¹, 张老伟¹, 龚陆平¹, 范嘉俊¹

(1. 云南师范大学地理学部, 昆明 650500; 2. 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 昆明 650500)

摘要: [目的] 通过分析滇中城市群碳储量的时空演变特征及其对土地利用/覆被(land use/land cover, LULC)变化的响应, 以深化对该区域碳循环的理解, 从而有效地指导碳管理和生态恢复策略的制定。[方法] 利用 InVEST 和 PLUS 模型模拟并预测 1990—2030 年滇中城市群碳储量的时空演变规律, 结合土地覆被变化数据, 定量分析碳储量与 LULC 变化之间的响应关系。[结果] (1) 1990—2020 年滇中城市群的土地类型主要以林地、耕地和草地为主, 林地、耕地和建设用地呈增长趋势, 其中建设用地增幅最大; (2) 滇中城市群碳储量呈现出“先增后减, 逐渐趋于平稳”的变化特征, 2000 年达到最高值, 为 1.46×10^9 t, 到 2020 年下降到 1.45×10^9 t, 空间上呈“西高东低”的分布特征; (3) 未来不同发展情景下的碳储量预测显示, 与 2020 年相比, 4 个情景到 2030 年碳储量均呈下降趋势, 其中生态发展情景下降最少, 相比 2020 年下降 0.43×10^7 t, 而耕地发展情景下降最为显著, 相比 2020 年下降 1.05×10^7 t; (4) 耕地和林地间的转变是影响碳储量的主要因素, 其中耕地向林地的转换对滇中城市群碳储量增加尤为关键, 林地增加可显著提升区域碳储量, 而草地减少则对碳储量产生负面影响。[结论] 林地和耕地转换对增加或降低滇中城市群碳储量具有显著影响。

关键词: 滇中城市群; 碳储量; 土地利用/覆被变化; PLUS 模型; InVEST 模型

中图分类号: K903; X144

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0246-11

Spatiotemporal Evolution of Carbon Storage in the Central Yunnan Urban Agglomeration and Its Response to LULC Change

PENG Shuangyun^{1,2}, CHEN Mingxiao¹, ZHANG Laowei¹, GONG Luping¹, FAN Jiajun¹

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. GIS Technology Research Center of Resource and Environment in Western China of Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to deepen the understanding of the carbon cycle by analyzing the spatiotemporal evolution characteristics of carbon storage in the central Yunnan urban agglomeration and its response to land use/land cover (LULC) change, so as to effective guidance for carbon management and ecological restoration strategies. [Methods] InVEST and PLUS models were used to simulate and predict the spatiotemporal evolution patterns of carbon storage in the central Yunnan urban agglomeration from 1990 to 2030. By combining data on LULC change, the relationship between carbon storage and LULC change was quantitatively analyzed. [Results] (1) From 1990 to 2020, the land types of the central Yunnan urban agglomeration were mainly forestland, cropland, and grassland, and forestland, cropland, and construction land showed an increasing trend, among which construction land increased the largest. (2) Carbon storage in the central Yunnan urban agglomeration presented a change characteristics of “first increase and then decrease, gradually stabilize”, reaching a maximum value of 1.46×10^9 t in 2000, and decreasing to 1.45×10^9 t in 2020, showing a spatial distribution characteristic of “higher in the west, lower in the east”. (3) The

收稿日期: 2024-02-08

修回日期: 2024-03-01

录用日期: 2024-03-13

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-05-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(42261073, 41971369, 42201037); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202305AC160083, 202205AC160014); 云南省基础研究专项重点项目(202201AS070024, 202001AS070032); 云南省基础研究专项面上项目(202401AT070103); 云南师范大学大学生科研训练基金项目(KX2022136)

第一作者: 彭双云(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事土地利用变化的生态环境效应研究。E-mail: frankmei@126.com

通信作者: 彭双云(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事土地利用变化的生态环境效应研究。E-mail: frankmei@126.com

http://stbcxb.alljournal.com.cn

carbon storage predictions under different future development scenarios indicated that, compared with 2020, all four scenarios showed a declining trend in carbon storage by 2030, among which the ecological development scenario experienced the least decline, with a reduction of 0.43×10^7 t compared with 2020, while the cropland development scenario exhibited the most significant decline, with a reduction of 1.05×10^7 t compared with 2020. (4) The conversion between cultivated land and forestland was the primary factor affecting carbon storage. Specifically, the transformation of cultivated land into forests plays a crucial role in increasing carbon storage in the central Yunnan urban agglomeration. Forest expansion significantly enhanced regional carbon storage, while a reduction in grassland negatively impacted carbon storage. [Conclusion] The conversion of forestland and cultivated land has a significant impact on increasing or decreasing carbon storage in the central Yunnan urban agglomeration.

Keywords: central Yunnan urban agglomeration; carbon storage; LULC change; PLUS model; InVEST model

Received: 2024-02-08

Revised: 2024-03-01

Accepted: 2024-03-13

Online(www.cnki.net): 2024-05-14

在全球气候变化的大背景下,陆地生态系统的碳储量成为核心议题,并占据至关重要的位置。碳储量不仅构成陆地生态系统与大气之间碳交换的物质基础,而且是评价陆地生态系统固碳和释碳能力的关键指标。随着全球气候变化的逐步加剧,碳储量的时空动态变化直接影响着全球碳循环的平衡及气候变化趋势的判定。近年来,人类活动引起的土地利用/覆被(land use/land cover, LULC)变化被认为是影响陆地生态系统碳储量的一个重要变量。因此,探明碳储量时空演变特征及其对 LULC 变化的响应关系,对于深刻理解全球气候变化的内在机制与作用具有重要意义,有助于深入理解全球气候变化的机制和影响,为应对气候变化提供科学依据。

准确评估碳储量是深入理解其时空演化特征的基础。目前,碳储量的定量评估已经发展出多种方法,包括实地取样法^[1]、碳通量监测法^[2-3]及模型演算法^[4]等。实地取样法虽然直接准确,但需要大量时间和精力,且对测量技术和方法要求较高,一般适用于局部或小范围的碳储量评估。碳通量监测法具备实时监测的能力,精度高且操作简便。然而,其适用范围受限,同时容易受到环境影响,对数据处理要求较高。相较而言,模型演算法计算效率高、可比性强、可推广性强,且适用于大区域的碳储量评估,已成为碳储量评估的理想工具。目前,如 CUENTURY^[5]、BIOME-BGC^[6-7]、CASA、Earth system models^[8]、GLOBIOM^[9]、InVEST^[10-14]等众多模型已被广泛应用于碳储量估算领域。尽管这些模型在理论上具有强大的估算潜力,但在实际操作中普遍要求大量地输入数据,而这部分数据的获取往往颇具挑战性。以 BIOME-BGC 模型为例,需要输入站点描述数据、气象数据及植被生理生态参数等多种数据。相较于

其他模型,InVEST 模型因其精确、简易,所需数据量较小、适应性广及优秀的预测性能脱颖而出,成为研究者们不同层面和不同地理尺度^[15-21]探讨碳储量格局及其动态变化的理想工具。该模型已广泛应用于中国中东部的发达区域和城市群,包括对北京^[22-23]、广东^[24]等城市以及京津冀^[25]、珠三角^[26]、长三角^[27]、关中原^[28]等经济活跃地区的陆地生态系统碳储量的评估。然而,针对中国西部相对欠发达地区的碳储量研究尚显不足,特别是像滇中城市群这样兼具生物多样性和复杂地形特点的地区,仍面临一定的研究挑战。此区域的碳储量评估工作亟待加强,以便更全面深入地理解区域碳循环特征及生态环境效应。

已有研究^[29-30]表明,LULC 及其变化是影响碳储量的一个关键因素。当林地被转变为农田、城市用地或其他类型的用地时会导致碳的大量排放,从而加剧温室效应。同时,通过实施恰当的土地管理和生态恢复策略,可以提高土地的碳固定能力,有望降低大气中的碳浓度。LULC 变化对碳储量的影响因地而异,具有明显的区域特征。如在高纬度地区,森林采伐极大地减少碳储量;而在一些农业密集的南方地区,化肥等农业化学物质的使用则对土壤碳库造成显著影响。尽管已有大量研究关注 LULC 变化对碳储量的影响,然而当前对于不同 LULC 类型及其变化对碳储量影响的定量理解仍然不足。

作为国家重点培育的 19 个城市群之一,滇中城市群不仅是云南省的发展核心,而且在推动区域协调发展、促进生态文明建设方面发挥着关键作用。然而,随着城镇化和工业化的快速发展,滇中城市群的 LULC 动态变化愈发显著,碳减排和环境问题逐渐凸显,对区域的可持续发展造成重要影响。因此,本文利用 InVEST 模型对滇中城市群近 30 年的碳储量进

行量化评估,并结合 PLUS 模型预测未来不同发展情景下的碳储量变化,在此基础上,探析滇中城市群碳储量的时空变化特征及其对 LULC 变化的响应,为制定土地管理政策和促进区域可持续发展提供了决策支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇中城市群位于中国西南部,包括昆明、曲靖、玉溪、楚雄全境和红河北部 7 个县、市,共 49 个县、市、区(22°59′34″—27°03′19″N,100°43′07″—104°49′40″E),是全国“两横三纵”城镇化战略格局的重要组成部分,也是西部大开发的重点区域(图 1)。该地区地貌多样,涵盖高原山地、盆地和河谷等地形。气候属于亚热带高原季风气候,呈现明显的四季变化。降雨分布不均,季节间干湿明显,年降水量为 500~1 000 mm。滇中城市群拥有丰富的自然资源和优越的地理位置,是云南省的经济、政治和文化中心,是云南省的重要生态屏障,拥有丰富的生物多样性资源。然而,近 30 年来,滇中城市群的经济迅速发展,人口不断增长,城市化水平显著提高。随着城镇化和工业化的加速推进,该地区的 LULC 变化剧烈,进而影响了固碳能力。

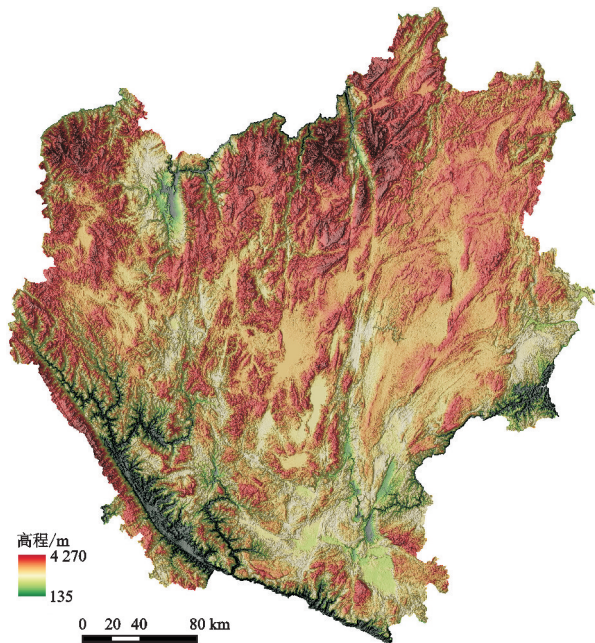


图 1 滇中城市群地理位置

Fig. 1 Location of the central Yunnan urban agglomeration

1.2 数据来源与处理

本文所需的数据包括 LULC 数据、气温、降水量、GDP、人口密度、道路、水系等,所有数据产品的详细信息见表 1。LULC 数据选取 YANG 等^[31]制作发布的数据集,按照研究需求归为 7 个类别,包括耕地、林地、灌木林地、草地、水域、裸地和建设用地。

表 1 数据来源及处理

Table 1 Data sources and processing

数据类型	数据名称	数据精度/m	数据来源及处理
LULC 数据	LULC 数据	30	https://zenodo.org/
	日均温数据	100	
气象数据	日均降水数据	100	http://www.resdc.cn
	数字高程数据	30	
DEM 数据	坡度数据	30	基于 DEM 利用 ArcMap10.8 处理生成
	坡向数据	30	
社会经 济数据	GDP 和人口	1 000	http://www.resdc.cn
	密度数据		
矢量数据	保护区数据		http://www.zrbhq.cn
	道路数据		
	水系流域数据		

1.3 研究方法

1.3.1 碳储量估计 InVEST 模型的 Carbon Storage and Sequestration 模块是评估生态系统碳储量及预测未来变化的有效工具。它依据各生态系统的结构特征和功能,将碳储量分为地上生物量、地下生物量、土壤有机质及凋落物等多个碳池,其计算公式为:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$$
 (1)

式中: C_{total} 为生态系统总碳储量(t); C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别为地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和已故生物封存的有机碳(t)。

为保证碳储量计算的准确性,研究中通常以同一作者或邻近区域的研究为依据选取碳密度数据。本文依据前人^[12,32]的方法对碳密度进行了修正,从而获得滇中城市群的碳密度估算,具体修正结果见表 2。

表 2 滇中城市群各 LULC 类型碳密度

Table 2 Carbon density of various LULC types in central Yunnan urban agglomeration

Yunnan urban agglomeration				t/hm ²
LULC_name	C_above	C_below	C_soil	C_dead
耕地	16.52	10.91	75.56	2.07
林地	30.19	18.06	99.81	2.73
灌木林地	5.36	13.61	82.27	0.71
草地	14.32	17.17	86.75	2.37
水域	1.59	0	63.81	1.75
裸地	10.37	2.07	34.30	0.94
建设用地	7.63	1.52	34.21	0

1.3.2 多情景下未来 LULC 模拟 (1)PLUS 模型

PLUS 模型是一个基于栅格数据的元胞自动机模型,用于模拟斑块尺度的 LULC 变化。它将规则挖掘框架和多类型随机斑块种子生成机制相结合,能够精确地预测 LULC 的景观动态。

(2)驱动因子选取

本文从自然、社会经济和区位 3 个角度,选取 12 个影响 LULC 变化的因素(表 3)。其中,自然因素包括气温、降水量、DEM、坡度、坡向、归一化植被指数(NDVI)和土壤类型等,社会经济因素主要考虑人口密度和 GDP 密度,区位因素则包括水系(河流、湖泊)距离、铁路距离及公路(高速公路、普通道路)距离。

表 3 滇中城市群 LULC 变化驱动因子

Table 3 Drivers of LULC change in central Yunnan urban agglomeration

选取层面	驱动因子	因子解释
自然因素	年平均气温/℃	气温气候
	年平均降水量/mm	降水气象
	DEM/m	地形高程
	坡度/(°)	地形坡度
	坡向/(°)	地形坡向
	归一化植被指数(NDVI)	生态环境
	土壤类型	生态环境
社会经济因素	人口密度/(人·km ⁻²)	每平方公里人口分布密度
	GDP 密度/(元·km ⁻²)	每平方公里 GDP 分布密度
区位因素	到水域距离/m	像元中心到水域的欧氏距离
	到铁路距离/m	像元中心到铁路的欧氏距离
	到公路距离/m	像元中心到公路的欧氏距离

(3)不同发展情景设置

根据研究需求,设定自由发展、耕地发展、生态发展和城市发展 4 个情景。其中,开放水域区和自然保护区被视为限制区域。

①自由发展情景(S1)

城市群的发展遵循一定的规律与历史路径,通常沿袭既有的 LULC 变迁和顺应社会经济发展趋势。滇中城市群的发展亦不例外,但鉴于河流湖泊保护的重要性及国家政策导向,本文将开放水域划定为限制发展区,禁止建设用地的转出。其他地类之间的相互转化则不受此限制,以确保城市发展与生态保护之间的平衡。

②耕地发展情景(S2)

在自由发展的基础上,考虑耕地保护政策,加大对耕地的保护力度,降低耕地转化为其他地类的可能性。

③生态发展情景(S3)

考虑生态环境保护政策和双碳目标的重要性,尽量增加林地、草地等碳汇用地的面积,以确保滇中城市群能够按时或提前实现碳达峰和碳中和目标。研究中将自然保护区划定为限制发展区域,并降低林地、草地、灌木林地等生态用地转化为建设用地的概率。

④城市发展情景(S4)

在自由发展的基础上,以城市扩张为主要目标,

除开放水域外不设限制区域。同时,提高其他地类向建设用地的转化概率。

1.3.3 冷热点分析 冷热点分析是一种空间数据分析方法,用于识别数据集中的统计显著性区域,从而确定区域的热点或冷点。本文利用 ArcMap 10.8 空间分析模块中的热点分析工具 Getis-Ord G_i^* 统计量对滇中城市群的碳储量空间格局进行冷热点识别。其计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n w_{ij} x_j}{\sum_j^n x_j} \quad (2)$$

式中: n 为空间单元总数; w_{ij} 为通过空间邻接和空间距离来确定的要素 i 和要素 j 空间权重矩阵; x_j 为空间单元的特定属性值,即每个空间单元的碳储量。

2 结果与分析

2.1 LULC 时空演变特征

2.1.1 1990—2020 年 LULC 变化特征 图 2 为 1990—2020 年的 LULC 空间格局。滇中城市群土地类型主要以林地和耕地为主,其中林地面积最大,占据总面积的 50% 以上,其次是耕地,占据总面积的 30% 以上。林地主要分布于滇中西部,耕地则多分布于中部与东部。1990 年林地占比由 51.76%,到 2020 年增加到 55.06%,增长 3.3%。耕地变化不大,仅增长 0.2%。1990—2020 年,滇中城市群在快速城市化进程中,城市用地面积显著扩大,增长 659.62 km²。

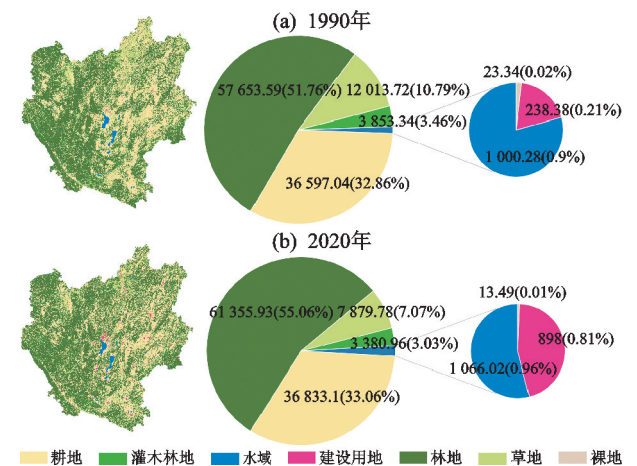


图 2 滇中城市群 1990—2020 年 LULC 分布

Fig. 2 LULC distribution in central Yunnan urban agglomeration from 1990 to 2020

由图 3 可知,1990—2020 年,滇中城市群的 LULC 经历了显著的变化。在前期,城市群的耕地转入主要集中于昆明市区、会泽县、宣威市、元谋县等地。然而,到后期,耕地转入面积减少,主要转入区为罗平县、师宗县、富源县、蒙自市等农业发展较好的地区。林地转变初期呈现分散趋势,但随着“退耕还林

还草”和“绿水青山就是金山银山”等政策的实施,耕地、裸地等地类转换为林地。同时受到政策的影响,

林地转入面积的增长地区虽然面积较小但是具有显著的聚集效应。

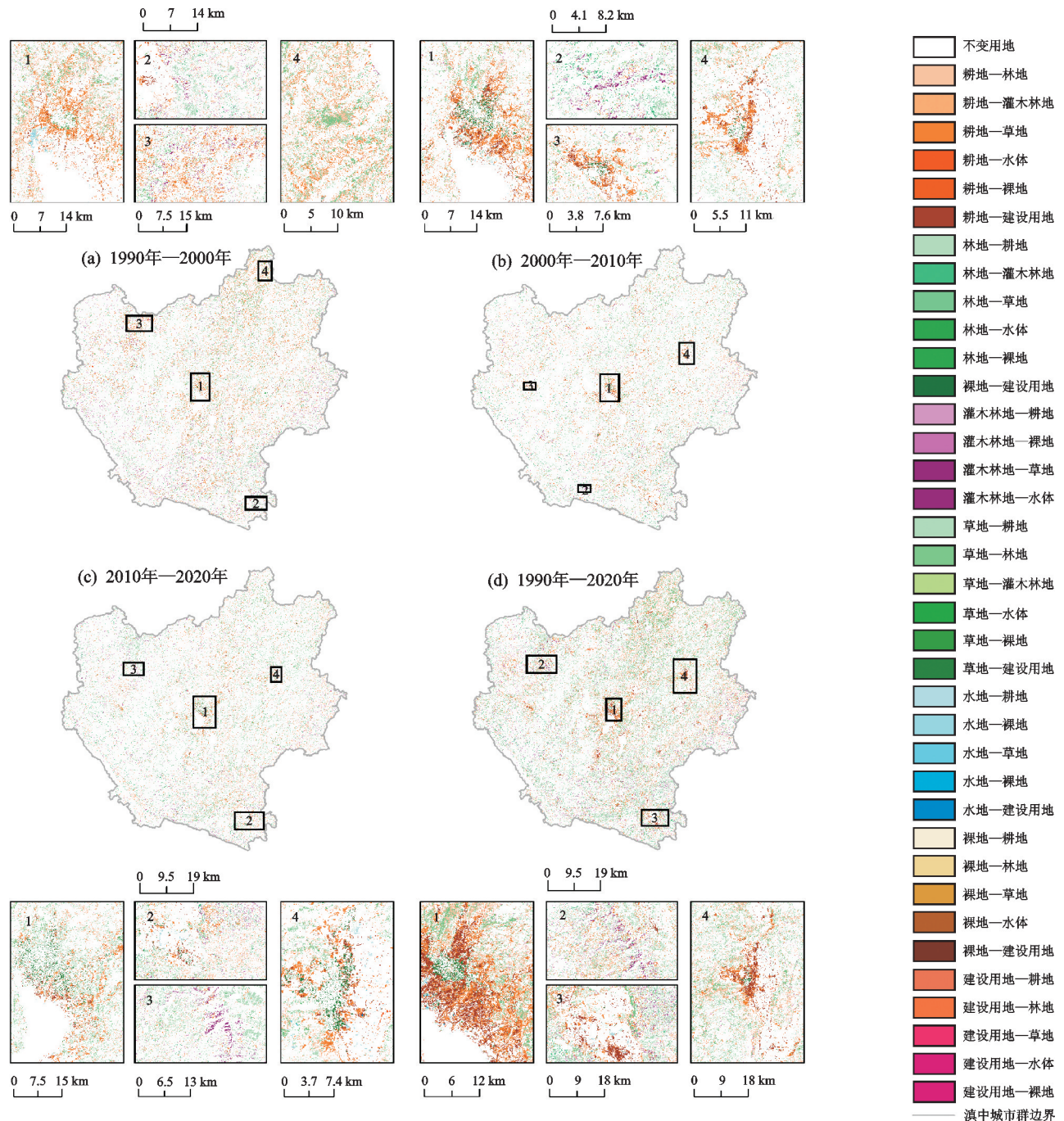


图 3 1990—2020 年滇中城市群 LULC 转移

Fig. 3 LULC transfer in central Yunnan urban agglomeration from 1990 to 2020

在考察 LULC 面积变化的时间跨度中,1995—2000 年出现最显著的变化,主要表现为耕地大幅减少和林地大面积增加。具体而言,耕地面积减少 1 744.16 km²,其中在 1995—2000 年,2 252.79 km² 的耕地被改变为草地,1 740.73 km² 变成林地,176.96 km² 变成灌木林地,65.66 km² 转变成建设用地,45.24 km² 转变成水域,0.17 km² 转变成裸地。与此同时,有 1 492.03 km² 的林地,762.37 km² 的草地,

272.62 km² 的灌木林地,8.84 km² 的水域和 1.59 km² 的裸地转变成耕地。此外,在时间维度上观察到趋势为:建设用地的面积一直呈增长趋势,累计增加 659.62 km²;草地在 1995—2000 年增加 548.89 km²,而在其他时间段则普遍呈减少趋势,累计减少 4 133.95 km²;耕地的面积虽然在 1995—2000 年减少 1 744.16 km²,但总体上增加 236.06 km²;林地的面积在 2000—2005 年降低,其他时间段基本上呈增

长趋势,累计增加 3 702.33 km²;灌木林地的变化较为灵活,增减状态没有明显规律,总体减少 472.38 km²;水域和裸地的面积相对较小,因此其变化范围也较小,总体上保持相对稳定的状态。

2.1.2 未来不同发展情景下 LULC 变化特征 由图 4 可知,滇中城市群在不同模拟情景下的 LULC 空间格局与 1990—2020 年保持基本一致。与 2020 年相比,4 个情景中的草地和建设用地面积均有所增加,而林地和裸地面积则呈现减少趋势。在这 4 个情景中,各地类的转变特点各不相同。在耕地发展情景

下,耕地面积相较于 2020 年增加 1 104.08 km²,而在其他情景下,耕地面积均有所减少,尤其在生态发展情景下,耕地面积减少 2 596 km²。在城市发展情景中,建设用地增加 433.40 km²,但林地面积减少 2 246.50 km²。在生态发展情景下,林地面积减少最少,约为 1 326.90 km²,而草地和灌木林地面积则分别增加 2 789.74,766.04 km²。在自由发展情景中,耕地、林地、水域和裸地面积均有所减少,而建设用地、灌木林地和草地面积则呈现增长趋势,尽管与其他情景相比,其变化并不显著。

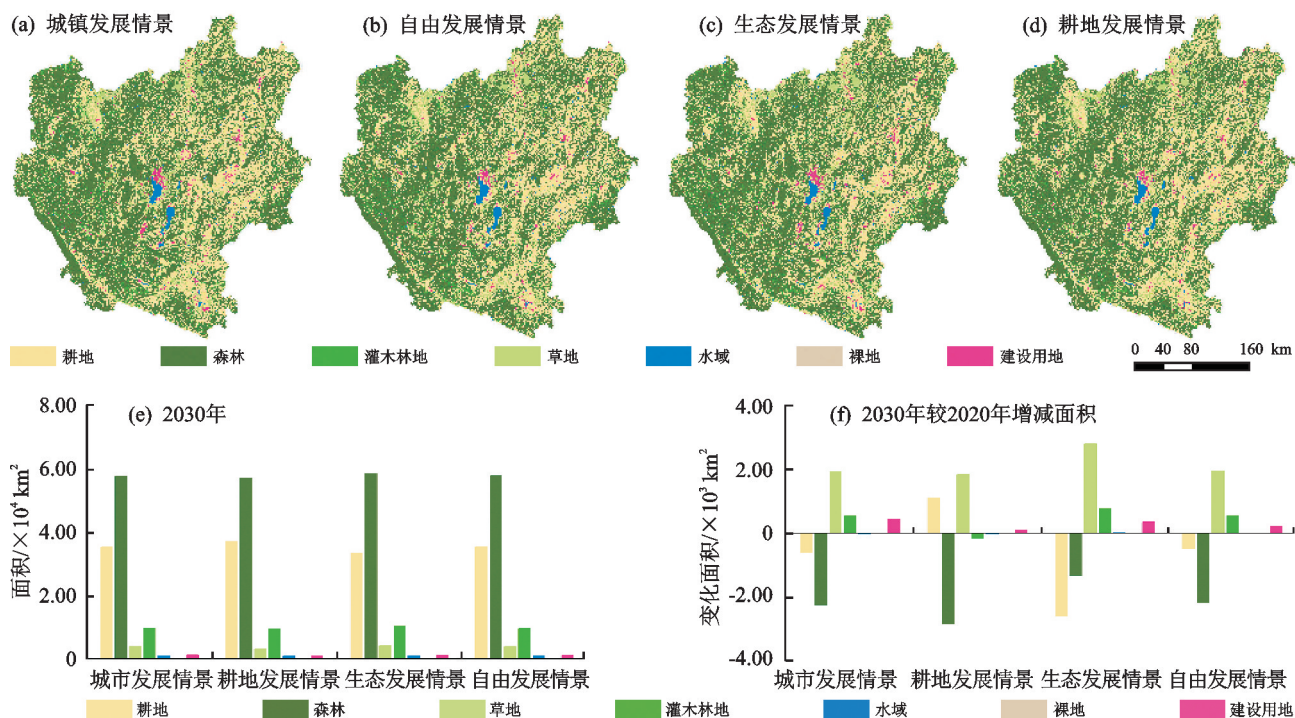


图 4 未来 2030 年不同发展情景下的滇中城市群 LULC 预测

Fig. 4 LULC forecast map of central Yunnan urban agglomeration under different development scenarios in the future 2030

2.2 碳储量时空演变特征

根据碳储量的计算,滇中城市群在 1990—2020 年碳储量及其变化趋势(图 5)。在 1990—2000 年,滇中城市群的碳储量呈现上升趋势,并在 2000 年达到峰值,为 1.46×10^9 t,到 2020 年下降到 1.45×10^9 t。然而,从 2000—2020 年,碳储量整体呈下降趋势,变化趋势逐渐平稳。在这期间,2000—2005 年的碳储量下降幅度最大,达到 4.49×10^6 t,在 2015—2020 年,碳储量下降 1.47×10^6 t。总体来说,从 2000—2020 年,碳储量累计下降 6.30×10^6 t。综合考虑滇中城市群碳储量的变化,在过去的 30 年里,滇中城市群碳储量的演变规律呈现出“先增后减、逐渐平稳”的发展趋势。

滇中城市群碳储量空间自相关分析显示,从 1990—2020 年,碳储量的 Moran's *I* 值依次为 0.82, 0.81, 0.80, 0.79, 0.78, 0.77, 0.77, 整体呈现下降趋势。

这表明,虽然碳储量在空间上总体呈聚集分布,但随着时间的推移,其聚集程度逐渐减弱。为了更深入地理解碳储量的聚集特性,对滇中城市群的碳储量进行冷热点分析(图 6)。

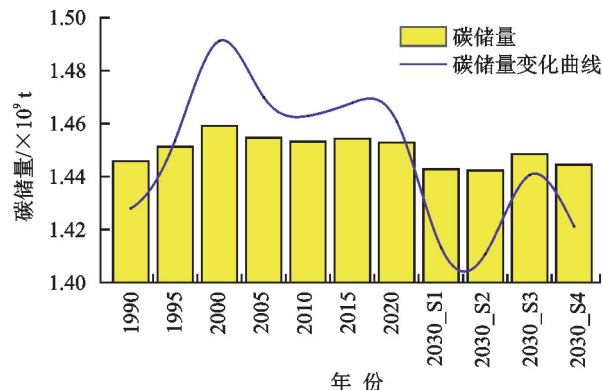


图 5 1990—2030 年滇中城市群碳储量及其变化曲线

Fig. 5 Carbon storage and its change curve in central Yunnan urban agglomeration from 1990 to 2030

结果显示,城市群西部的林地密集地带原本是碳储量的主要热点区域,但随着时间的推移,这些热点区域的面积逐渐减少。与此同时,人口密集且人类活动频繁的建设用地和耕地则逐渐成为碳储量的低值区域。这种变化表明,城市群的土地利用方式与碳储量分布之间存在密切的关系。冷热点分析揭示滇中

城市群碳储量的空间分布特征和变化趋势,有助于识别关键的碳储区,为生态保护和恢复提供指导,并预测未来的碳储量变化。

此外,通过分析冷热点与土地类型、植被覆盖等因素之间的关系,可深入理解影响碳储量空间分布的生态学机制。

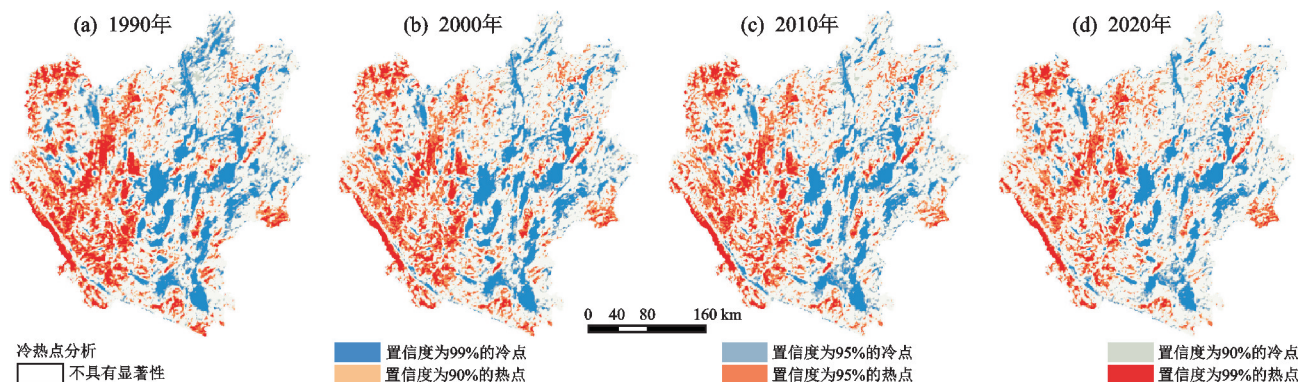


图 6 1990—2020 年滇中城市群碳储量冷热点分析

Fig. 6 Analysis of cold and hot spots of carbon storage in central Yunnan urban agglomeration from 1990 to 2020

2.3 碳储量对 LULC 变化的响应

2.3.1 LULC 变化对碳储量影响 通过对比滇中城市群的碳储量变化和 LULC 面积占比变化(图 7),发现在 1990—2005 年,滇中城市群的碳储量变化曲线与林地和水域面积占比的变化趋势相吻合。同时表明,保护和恢复林地及水域对于减少碳排放和缓解气

候变化起着重要的作用。在 2005—2020 年,林地、水域和耕地的面积占比与碳储量的变化趋势出现反向关系。这与同时期草地面积的急剧下降有关,草地面积占比在此期间下降 3.25%。草地是重要的碳汇,能够吸收并储存大量的碳,因此,滇中城市群的草地面积的减少对碳储量产生负面影响。

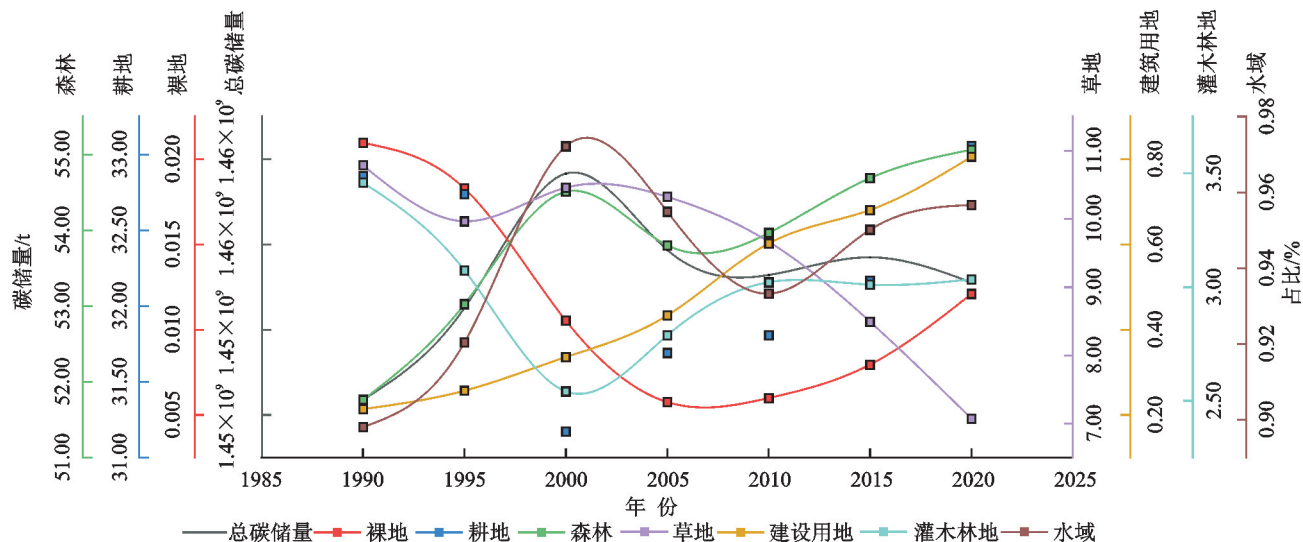


图 7 1990—2020 年滇中城市群碳储量变化曲线及各 LULC 面积占比趋势曲线

Fig. 7 Carbon storage change curve and proportion curve of LULC area in central Yunnan urban agglomeration from 1990 to 2020

由表 4 可知,1990—2020 年 LULC 变化对碳储量有显著影响,尤其是耕地和林地的转变。约 9 090.58 km² 的耕地转化为其他类型,与此同时,碳储量减少 2.43×10⁴ t。其中,转为林地的面积最大,为 5 316.61 km²。约 6 820.73 km² 林地转化为其他类型,这导致碳储量减少 3.10×10⁷ t。其中,转为草

地的面积最大,为 3 918.46 km²。草地和灌木林地转化过程中分别增加 0.57×10⁷, 0.68×10⁷ t 碳储量,是由草地和灌木林地转化为林地所导致的。水域、建设用地和裸地等占比较小的地类,其转化过程中对碳储量的影响也相对较小。LULC 变化对碳储量有显著影响,其中耕地和林地之间的转变是主要影响因素。

表 4 1990—2020 年 LULC 类型转变引起的碳储量变化情况
Table 4 Changes in carbon stocks caused by LULC transition from 1990 to 2020

LULC 变化		面积变化		碳储量变化		合计/
转出	转入	变化面积/km ²	面积/km ²	碳储量变化/×10 ⁴ t	比例/%	×10 ⁴ t
耕地	裸地	9 090.58	9.07	−5.21	−0.01	+2 429.10
	林地		5 316.61	2 431.29	6.32	
	草地		2 583.37	401.71	1.04	
	建设用地		561.57	−346.49	−0.90	
	灌木林地		525.37	−16.34	−0.04	
	水域		94.59	−35.86	−0.09	
林地	裸地	6 820.7	30.52	−0.53	0	−3 101.19
	耕地		5 509.04	−2 519.28	−2.90	
	草地		342.41	−103.34	−0.12	
	建设用地		5.17	−5.56	−0.01	
	灌木林地		958.23	−468.00	−0.54	
	水域		5.35	−4.48	−0.01	
草地	裸地	7 360.60	2.43	−1.77	−0.01	+570.08
	耕地		2 966.02	−461.22	−3.18	
	林地		3 918.46	1 182.59	8.16	
	建设用地		77.79	−60.09	−0.41	
	灌木林地		351.20	−65.53	−0.45	
	水域		44.70	−23.90	−0.16	
建设用地	裸地	6.74	0.03	0	0	+2.43
	耕地		1.77	1.10	1.06	
	林地		0.06	0.06	0.06	
	草地		0.21	0.16	0.16	
	水域		4.66	1.11	1.07	
	裸地		0.01	−0.01	0	
灌木林地	耕地	2 308.36	780.05	24.26	0.62	+684.99
	林地		1 246.71	608.89	15.50	
	草地		280.30	52.30	1.33	
	建设用地		0.06	−0.04	0	
	水域		1.23	−0.43	−0.01	
	裸地		0.45	−0.09	−0.01	
水域	耕地	92.84	54.45	20.64	3.07	+42.32
	林地		20.85	17.44	2.60	
	草地		10.85	5.80	0.86	
	建设用地		6.23	−1.48	−0.22	
裸地	耕地	22.38	2.22	1.28	11.46	+4.07
	林地		0.15	0.16	1.40	
	草地		4.22	3.07	27.62	
	建设用地		14.75	−0.64	−5.72	
	水域		1.04	0.20	1.83	

2.3.2 多情景模拟下碳储量潜力预测分析 经过验证,PLUS 模型模拟结果与 2020 年实际 LULC 数据对比,其 Kappa 系数为 0.78,超过 0.7 的阈值,说明模拟结果在统计学上具有显著的可靠性和准确性。将 PLUS 与 InVEST 集成,得到 2030 年不同发展情景下碳储量(图 8)。不同情景下碳储量空间格局与 1990—2020 年基本一致,总体上呈现出“东低西高”的特征。与 2020 年相比,4 个模拟情景到 2030 年碳储量均呈下降趋势,其中生态发展情景下降最少,相比 2020 年下降 0.43×10^7 t,而耕地发展情景下降最为显著,相比 2020 年下降 1.05×10^7 t。

这一趋势反映不同发展情景的碳储量存在差异。在生态发展情景下,对生态系统的保护和可持续发展措施的实施有助于维持碳储量的相对稳定。而在耕地发展情景下,耕地的扩张或其他形式的土地转化,导致碳储量的显著下降。

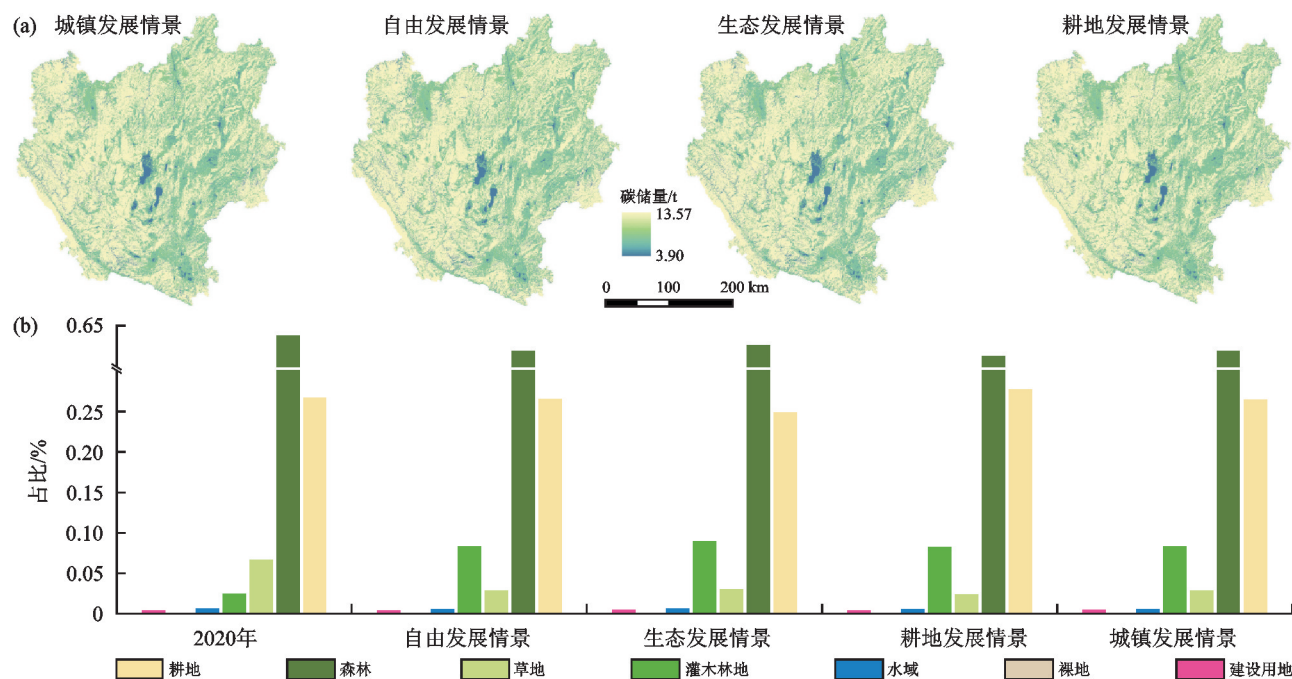


图 8 2030 年滇中城市群不同发展情景下碳储量分布

Fig. 8 Distribution of carbon storage under different development scenarios of central Yunnan urban agglomeration in 2030

全局空间自相关结果显示,2030 年 4 种发展情景下的碳储量均呈现空间聚集现象,其 Moran's I 系数分别为 0.749,0.725,0.732,0.721,均低于 2020 年的 0.77,这表明未来碳储量的空间分布将更加均匀。相对而言,生态发展情景和城市发展情景的碳储量分

布较为集中。热点分析(图 9)显示,碳储量的热点和冷点分布差异较小,与 1990—2020 年的分析结果一致。热点地区主要是林地,而冷点地区主要分布在建设用和耕地,这些地区通常是人口密集和人类活动频繁的区域。

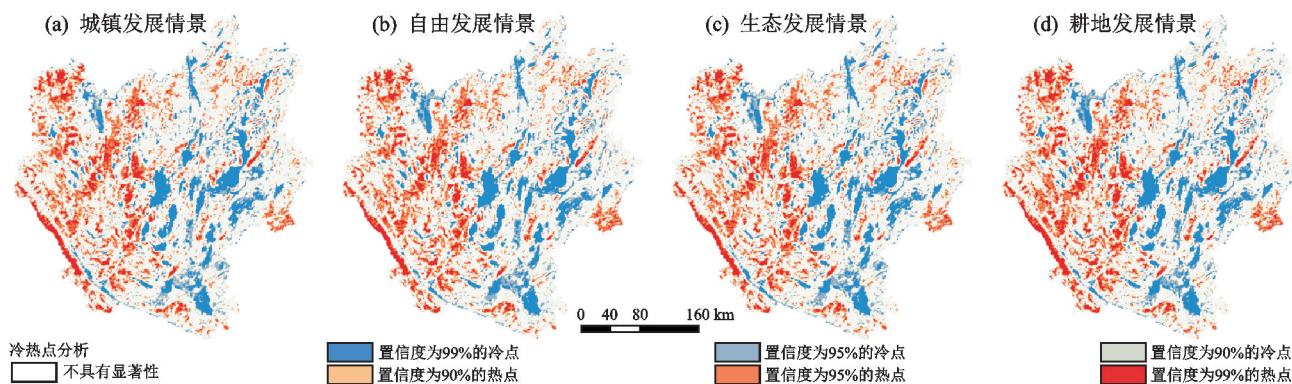


图 9 2030 年滇中城市群不同发展情景下的碳储量热点分析

Fig. 9 Hot spot analysis of carbon storage under different development scenarios of central Yunnan urban agglomeration in 2030

3 讨论

本文聚焦于滇中城市群碳储量的时空演变及其对 LULC 变化的响应关系,通过对滇中城市群过去 30 年的评估,揭示碳储量呈现“先增后减、逐渐平稳”的趋势。早期碳储量的增加与 2000—2005 年生态建设的加强和森林覆盖率的提升密切相关。然而,从 2005—2020 年,耕地面积占比的趋势由下降转为上升,这与滇中城市群的一系列政策导向有关,包括守住耕地红线、统筹城乡、城镇上山、农民进城等。此类政策导向严格限制了耕地出让和建设用与耕地的

转换,尤其是对坝区高质量耕地实行的重点保护。因此,耕地得以保护,农业用地逐步扩展到其他 LULC 类型,尤其是草地,由于其良好的农业开发潜力和低成本的开发特性,成为扩展的主要目标。同时,政策引导下的建设用地扩展也更多地集中在开发成本低、适宜居住的草地地区,导致草地面积减少,碳储量相应下降。

本研究显示,LULC 变化(尤其是耕地与林地的转化)对碳储量有深远影响。不同 LULC 类型的转变对碳储量影响程度和趋势各异。其中,耕地和林地

的转换对碳储量影响最显著,而草地转换的影响则相对较小。生态发展情景下的措施,如强调森林保护和恢复,能够有效减缓碳储量的下降趋势。反之,在耕地扩张导向的情景下,碳储量的下降趋势更为显著,尤其是在城市和耕地区域。因此,土地利用策略应考虑不同 LULC 类型的特性,并在生态恢复和耕地规划中制定细化措施,以平衡各种土地利用需求。

从碳储量潜力预测看,不同的发展情景下滇中城市群碳储量均呈下降趋势。然而,不同发展情景所表现的碳储量变化趋势和空间分布有显著不同。其中,生态发展情景下碳储量下降最少,而耕地发展情景下碳储量下降最为显著。这与已有研究^[12,14,20]得出的结论一致,生态发展情景模式是提升城市碳储量和绿色协调发展的最优发展模式。在生态发展情景下,碳储量的均匀分布和下降趋势缓解凸显了生态保护在土地利用策略中的核心地位。然而,在以耕地利用为主的发展情景下,必须谨慎规划以确保粮食安全、经济发展的同时,也能采取有效措施保护和提升碳储量。

为了实现滇中城市群的碳储量保护和提升,推动滇中城市群的可持续发展。本文提出几点政策建议:首先,要加强林地和草地的保护工作,通过林地保护项目、限制非法伐木等措施维持和提高碳储量;其次,应合理控制耕地扩张,实施土地利用规划,提高农业生产效率和可持续性,以减缓碳储量下降;最后,应促进城市发展与生态保护的协调,通过绿色城市建设和低碳技术应用,推动城市与生态的和谐发展。

4 结论

(1)1990—2020 年,滇中城市群的 LULC 类型主要以林地和耕地为主,林地和耕地是主要的土地类型,其中林地面积最大,主要分布在滇中西部,而耕地则多分布于中部与东部。在此期间,林地的面积总体呈增长趋势,建设用地增长迅速,草地则普遍呈减少趋势,耕地、水域和裸地的面积相对稳定。

(2)1990—2020 年,滇中城市群的碳储量呈现“先增后减、逐渐平稳”的趋势,从 2000 年达到峰值 1.46×10^9 t,到 2020 年略有下降至 1.45×10^9 t。空间自相关分析显示,碳储量整体呈聚集分布,但聚集程度逐渐减弱,热点区域主要位于西部且面积逐渐缩小,这与林地的密集分布相关;低值区域则分布于建设用地和耕地,主要为人口密集区域。

(3)通过对比碳储量变化和 LULC 面积占比变化,发现 1990—2005 年碳储量与林地、水域面积占比变化趋势相符,表明林地和水域保护对碳储量具有重要作用。然而,2005—2020 年,碳储量与林地、水域面积占比出现反向关系,这是草地面积急剧减少导致

的。LULC 类型转变研究表明,耕地和林地转变对碳储量影响显著,其中林地转为耕地导致碳储量减少最为显著。

(4)2030 年滇中城市群的碳储量在所有情景下都将下降,其中生态发展情景下降最少,耕地发展情景下降最显著。空间聚集分析显示,生态发展和城市发展情景下的碳储量分布更为集中,而耕地发展和自由发展情景下分布相对分散。

参考文献:

- [1] MEENA S K, DWIVEDI B S, MEENA M C, et al. Effect of nutrient management on soil carbon quantities, qualities, and stock under rice-wheat production system [J]. *Agriculture*, 2022, 12 (11): e1822.
- [2] TAI H Y, XIA Y H, YAN M, et al. Construction of artificial forest point clouds by laser SLAM technology and estimation of carbon storage [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12 (21): e10838.
- [3] 牛亚毅,李玉强,王旭洋,等.干旱年份沙质草地生态系统净 CO₂ 通量年变化特征 [J]. *草业学报*, 2018, 27 (1): 215-221.
- [4] NIU Y Y, LI Y Q, WANG X Y, et al. Characteristics of annual variation in net carbon dioxide flux in a sandy grassland ecosystem during dry years [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27 (1): 215-221.
- [5] CSILLIK O, KUMAR P, MASCARO J, et al. Monitoring tropical forest carbon stocks and emissions using planet satellite data [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: e17831.
- [6] 王旭洋,李玉强,连杰,等. CENTURY 模型在不同生态系统的土壤有机碳动态预测研究进展 [J]. *草业学报*, 2019, 28 (2): 179-189.
- [7] WANG X Y, LI Y Q, LIAN J, et al. Progress in application of the CENTURY model for prediction of soil carbon levels in different ecosystems [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28 (2): 179-189.
- [8] 陈雪娇,周伟,杨晗. 2001—2017 年三江源区典型草地群落碳源/汇模拟及动态变化分析 [J]. *干旱区地理*, 2020, 43 (6): 1583-1592.
- [9] CHEN X J, ZHOU W, YANG H. Simulation and dynamic change of carbon source/sink in the typical grassland communities in the Three River Source Area from 2001 to 2017 [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43 (6): 1583-1592.
- [10] 李旭华,孙建新. Biome-BGC 模型模拟阔叶红松林碳水通量的参数敏感性检验和不确定性分析 [J]. *植物生态学报*, 2018, 42 (12): 1131-1144.
- [11] LI X H, SUN J X. Testing parameter sensitivities and uncertainty analysis of Biome-BGC model in simulating carbon and water fluxes in broadleaved-Korean pine

- forests[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(12): 1131-1144.
- [8] PIAO S L, HE Y, WANG X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(4): 641-651.
- [9] AJAYI T, GOMES J S, BERA A. A review of CO₂ storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches [J]. Petroleum Science, 2019, 16(5): 1028-1063.
- [10] HERNANDEZ-GUZMAN R, RUIZ-LUNA A, GONZALEZ C. Assessing and modeling the impact of land use and changes in land cover related to carbon storage in a western basin in Mexico[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2019, 13: 318-327.
- [11] ADELISARDOU F, ZHAO W, CHOW R, et al. Spatiotemporal change detection of carbon storage and sequestration in an arid ecosystem by integrating Google Earth Engine and InVEST (the Jiroft Plain, Iran)[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(7): 5929-5944.
- [12] 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 等. 基于 InVEST 与 C-Markov 模型的昆明市碳储量时空演变与预测[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 1-18.
- WUSIMANJIANG P, AI D, FANG Y S, et al. Spatial and temporal evolution and prediction of carbon storage in Kunming City based on InVEST and CA-Markov Model[J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 1-18.
- [13] 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.
- SHI J, SHI P J, WANG Z Y, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of carbon storage in Jiuquan city ecosystem based on PLUS-InVEST model [J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 300-313.
- [14] ZHAO M M, HE Z B, DU J, et al. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models [J]. Ecological Indicators, 2019, 98: 29-38.
- [15] 王子昊, 王冰, 张宇飞, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 292-304.
- WANG Z H, WANG B, ZHANG Y F, et al. Dynamic simulation of multi-scenario land use change and carbon storage assessment in Hohhot city based on PLUS-InVEST model [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(2): 292-304.
- [16] 王怡冰, 李成亮, 张鹏, 等. 济南南部山区土地利用/覆被变化对碳储量的影响研究[J/OL]. 中国环境科学, 2024. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240026.001.
- WANG Y B, LI C L, ZHANG P, et al. Research on the impact of land use/cover change on carbon storage in the Southern Mountain Area of Jinan[J/OL]. China Environmental Science, 2024. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240026.001.
- [17] LI P C, CHEN J D, LI Y X, et al. Using the InVEST-PLUS Model to predict and analyze the pattern of ecosystem carbon storage in Liaoning Province, China [J]. Remote Sensing, 2023, 15(16): e4050.
- [18] LI K, CAO J, ADAMOWSKI J F, et al. Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the InVEST model: A case study in Huining County, China [J]. Environmental Development, 2021, 39: e100641.
- [19] GENG L L, ZHANG Y Y, HUI H X, et al. Response of urban ecosystem carbon storage to land use/cover change and its vulnerability based on major function-oriented zone planning[J]. Land, 2023, 12(8): e1563.
- [20] 黄韬, 程颖. 基于 PLUS-InVEST 模型的福建省土地利用变化与碳储量评估[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 246-257.
- HUANG Tao, CHENG Y. Evaluation of land use change and carbon storage in Fujian Province based on PLUS-InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 246-257.
- [21] 祁迷, 王飞, 滑永春, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的内蒙古自治区土地利用变化及碳储量评估[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 194-200.
- QI M, WANG F, HUA Y C, et al. Assessment of land use change and carbon storage in Inner Mongolia autonomous region based on PLUS and InVEST models [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 194-200.
- [22] LI Z Z, CHENG X Q, HAN H R. Future impacts of land use change on ecosystem services under different scenarios in the ecological conservation area, Beijing, China[J]. Forests, 2020, 11(5): e584.
- [23] 邵壮, 陈然, 赵晶, 等. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9456-9469.
- SHAO Z, CHEN R, ZHAO J, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9456-9469.

(下转第 266 页)

- pact development of urban transportation on green land use efficiency: An empirical analysis based on spatial measurement[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(3): 113-124.
- [34] 北京市统计局.北京市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2008—2020.
Beijing Municipal Bureau of Statistics. Beijing statistical year-book[M].Beijing: China Statistics Press,2008—2020.
- [35] 天津市统计局.天津市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2008—2020.
Tianjin Municipal Bureau of Statistics. Tianjin statistical year-book[M].Beijing: China Statistics Press,2008—2020.
- [36] 河北省统计局.河北省统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2008—2020.
Hebei Provincial Bureau of Statistics. Hebei statistical year-book[M].Beijing: China Statistics Press,2008—2020.
- [37] 国家统计局.中国城市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2008—2020.
National Bureau of Statistics. China urban statistics yearbook [M].Beijing: China Statistics Press,2008—2020.
- [38] 国家统计局,生态环境部.中国环境统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2008—2020.
National Bureau of Statistics. Ministry of Ecology and Environment. China environmental statistics yearbook [M].Beijing: China Statistics Press,2008—2020.
- [39] 北京市规划和自然资源委员会.北京市第三次全国国土调查主要数据公报[EB/OL].[2021-11-05].https://ghzrzyw.beijing.gov.cn/zhengwuxinxi/sjtj/tdbgdctj/202111/t20211105_2529986.html.
Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources. Main data bulletin of the third national land survey in Beijing [EB/OL]. [2021-11-05]. https://ghzrzyw.beijing.gov.cn/zhengwuxinxi/sjtj/tdbgdctj/202111/t20211105_2529986.html.
- [40] 北京市生态环境局.2020年北京市生态环境状况公报[EB/OL].[2021-05-13].<https://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/10985106/index.html>.
Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. 2020 Beijing ecological environment status bulletin[EB/OL].[2021-05-13].<https://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/10985106/index.html>.
- [41] 欧阳晓,朱翔.中国城市群城市用地扩张时空动态特征[J].*地理学报*,2020,75(3):571-588.
OUYANG X, ZHU X. Spatio-temporal characteristics of urban land expansion in Chinese urban agglomerations [J].*Acta Geographica Sinica*,2020,75(3):571-588.
- (上接第 256 页)
- [24] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测:以广东省为例[J].*中国环境科学*,2022,42(10):4827-4839.
LINT, YANG M Z, WU D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study in Guangdong Province[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10):4827-4839.
- [25] 巩晟萱,张玉虎,李宇航.基于 PLUS-InVEST 模型的京津冀碳储量变化及预测[J].*干旱区资源与环境*,2023,37(6):20-28.
GONG S X, ZHANG Y H, LI Y H. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei region: A PLUS-InVEST model approach[J].*Journal of Arid Land Resources and Environment*,2023,37(6):20-28.
- [26] ZHOU R B, LIN M Z, GONG J Z, et al. Spatiotemporal heterogeneity and influencing mechanism of ecosystem services in the Pearl River Delta from the perspective of LUCC[J].*Journal of Geographical Sciences*,2019,29(5):831-845.
- [27] LI W, CHEN Z J, LI M C, et al. Carbon emission and economic development trade-offs for optimizing land use allocation in the Yangtze River Delta, China[J].*Ecological Indicators*,2023,147:e109950.
- [28] 边蕊,赵安周,刘宪锋,等.关中平原城市群土地利用变化对碳储量的影响[J].*环境科学*,2024,45(6):3260-3269.
BIAN R, ZHAO A Z, LIU X F, et al. Impact of land use change on carbon storage in urban agglomerations in the Guanzhong Plain [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6):3260-3269.
- [29] CANADELL J G, RAUPACH M R. Managing forests for climate change mitigation [J]. *Science*, 2008, 320(5882):1456-1457.
- [30] PAUSTIAN K, LEHMANN J, OGLE S, et al. Climate-smart soils[J].*Nature*,2016,532(7597):49-57.
- [31] 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(8):3907-3925.
- [32] 李月,罗红芬.黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测:以普定县为例[J].*环境科学*,2024,45(2):961-973.
LI Y, LUO H F. Spatio-temporal evolution and multi-scenario simulation of carbon storage in Karst regions of central Guizhou Province: Taking Puding County as an example[J].*Environmental Science*, 2024, 45(2):961-973.