

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403009



艾比湖流域 LUCC 驱动的碳储量 时空动态特征与多情景预测

布威阿依谢姆·吐合提^{1,2}, 阿布都热合曼·哈力克^{1,2,3},
姚凯旋^{1,2}, 魏倩倩^{1,2}, 姚磊^{1,2}, 唐华^{1,2}, 罗健梅^{1,2}, 段越帆^{1,2}

(1. 新疆大学 地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830017;

2. 新疆大学 绿洲生态学新疆重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017;

3. 新疆大学 智慧城市与环境建模重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 运用一个集成 GMOP-PLUS-InVEST 模型的框架, 动态分析艾比湖流域土地利用/土地覆被变化 (LUCC) 和碳储量的变化, 并提供 2030 年 3 种可代替发展方案: 自然发展情景 (情形 S1)、经济快速发展情景 (情形 S2)、经济和生态平衡发展情景 (情形 S3)。研究结果表明: 1990—2020 年间, 耕地、建设用地和草地增加, 林地、未利用地和水体则减少; 在 LUCC 驱动下, 过去 30 年间, 总碳储量呈“增-减-增-减”的交替波动状态, 整体增加了 9.79×10^6 t; 与延续历史发展和经济快速发展相比, 情景 S3 碳储量及其经济价值最为缓减, 因为该情景对区域森林和草地资源的干扰有最大限制。

关键词: 碳储量; 耦合模型; 土地利用/土地覆被变化; 情景模拟; 艾比湖流域

中图分类号: S 718.5; F 301.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)04-0501-13

Spatio-Temporal Dynamics Characteristic and Multi-Scenario Prediction of Carbon Storage Driven by LUCC in Ebinur Lake Basin

BUWEIAYXIEMU · Tuheti^{1,2}, ABUDUREHEMAN · Halike^{1,2,3},
YAO Kaixuan^{1,2}, WEI Qianqian^{1,2}, YAO Lei^{1,2},
TANG Hua^{1,2}, LUO Jianmei^{1,2}, DUAN Yuefan^{1,2}

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

3. Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: A framework of the integrated GMOP-PLUS-InVEST model is used to dynamically analyze the land use/land cover change (LUCC) and carbon stock change in the Ebinur Lake Basin, and three alternative development plans in 2030 are provided: the scenario of natural development (scenario S1), the scenario of rapid economic development (scenario S2), and the scenario of economic and ecological balanced development (scenario S3). The research results show, between 1990 and 2020, the cultivated land, construction land and

收稿日期: 2024-03-09

通信作者: 阿布都热合曼·哈力克(1967-), 教授, 博士, 主要从事干旱区水土资源与环境管理的研究。E-mail: ah@xju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42161049, 41761019, 41061052)

grassland increase, while wood land, unused land and water bodies decrease. Driven by LUCC, the total carbon storage has shown an alternating fluctuation state of “increase-decrease-increase-decrease” with a total increase of 9.79×10^6 t in the past 30 years. Compared with the continuation of historical development and rapid economic growth, the carbon storage and its economic value of scenario S3 present the most gradual reduction because the disturbance of the regional forest and grassland resources in this scenario is most limited.

Keywords: carbon storage; coupling model; land use/land cover change; scenario simulation; Ebinur Lake Basin

化石燃料的大量排放^[1]造成全球二氧化碳质量浓度激增^[2-3],破坏了全球碳循环,进而导致全球变暖。1992 年,国际社会通过碳排放管理谈判应对气候变化。2020 年,中国在联合国第 75 届会议上承诺了“双碳”目标。碳减排的关键是利用陆地碳汇^[4],受土地利用/土地覆被变化(LUCC)对各土地碳封存能力变化的影响^[5-6]，“双碳”目标面临着巨大的挑战,经济发展使一些地区开始出现碳流失问题^[7-10]。不同土地类型具有不同的固碳能力,正确的土地管理可补偿碳损失^[11]。因此,理解 LUCC 对碳储量的影响及优化土地使用对可持续发展至关重要。

当前,研究普遍采用模型估算法评估 LUCC 对陆地碳储量的影响。InVEST 模型因其速度快、直观且数据需求较少的优点,在多个尺度上被广泛应用,包括国家^[12]、山区^[13]、流域^[14]、沿海湿地^[15]及各级行政区域,如省^[8]和县^[16]等。土地利用情景模拟方法是帮助决策者量化生态系统服务对社会经济和政策响应的重要方法^[17-18]。在土地利用模拟方面,近年来,PLUS 模型因其在斑块级变化模拟的高精度得到学者们的青睐,其精度超过了其他模型,如 CA-Markov 模型和 FLUS 模型等^[19],更适合大尺度研究。随着研究的深入,结合土地利用模拟与 InVEST 模型评估碳储量的方法已成为新趋势^[20]。目前,为了解决单一模型在捕捉 LUCC 复杂性方面的不足,采用多模型耦合(如耦合 GMOP 模型与 PLUS 模型)的方法已成为发展的主流^[21-22]。

生态环境脆弱的西北干旱区^[23]是中国陆地生态系统碳库的重要部分,近年来,该区域面临土地沙漠化^[24]、生境质量退化^[25]、碳储量减少^[26]等生态环境问题。基于此,本文对艾比湖流域 LUCC 驱动的碳储量时空动态特征与多情景预测进行研究。

1 艾比湖流域

1.1 研究区概况

艾比湖流域位于新疆西北部(79°53'E—85°02'E, 43°38'N—45°52'N)(图 1),由北部和南侧的北天山分支及西侧的阿拉山脉包围,东部与准噶尔盆地平原相连,中部是谷地和平原。艾比湖流域远离海洋,地处干旱和半干旱的环境,降水稀少、蒸发量大、气温高,属于温带大陆性气候。该流域为典型的内陆河流域,西部是阿拉山口,多风沙天气,生态环境较为脆弱^[27]。流域总面积为 5 035 616 hm²,地广人稀,是新疆最著名的农业灌溉区,农业和畜牧业是主要产业。

1.2 研究方法

首先,根据艾比湖流域 1990—2020 年 LUCC 规律,用 InVEST 模型从空间和时间尺度出发,分析陆地生态系统碳储量演变特征,并定量分析 LUCC 动态对其影响。随后,提出了一种耦合 GM 模型, MOP 模型和 PLUS 模型的集成方法,应用于未来情景模拟和碳储量预测。

1.3 数据来源

数据类型和来源,如表 1 所示。土地利用数据经裁剪后,分为耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地。基于矢量数据,采用欧氏距离对距道路、居民点和水体的距离进行计算。数字高程模型(DEM)数据经过剪切后,计算得到坡度和坡向数据。所有土地利用和驱动因子数据统一坐标系至 WGS_1984_UTM 后,重采样到 100 m 分辨率,用于 PLUS 模型计算。

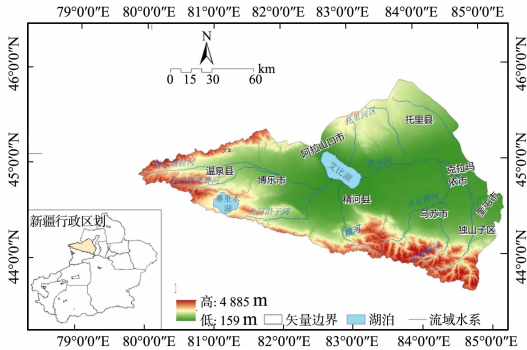


图 1 艾比湖流域区位图

Fig. 1 Location diagram of Ebinur Lake Basin

上述 GIS 操作和计算均在 ArcGIS 10. 8. 1 软件中进行。产业产值、粮食作物面积及单产等用于 MOP 模型目标函数的解算。

表 1 数据类型和来源
Tab. 1 Types and sources of data

数据类型	数据名称	分辨率	数据来源
基础数据	土地利用	30 m	http://www.resdc.cn
	年均降水量	1 km	http://developers.google.com
自然因素	年均气温	1 km	http://www.nesdc.org.cn/
	干燥度	1 km	http://developers.google.com
	NDVI	30 m	https://www.nasa.gov
	DEM	30 m	基于 DEM 计算得到
	坡度	30 m	
	坡向		
驱动因子	土壤类型	1 km	http://vdb3.soil.csdb.cn
	土壤侵蚀度	1 km	http://www.resdc.cn
	夜间灯光数据	500 m	https://www.ngdc.noaa.gov/
社会经济因素	GDP	1 km	http://www.resdc.cn
	人口密度		
可达性因素	到河流和湖泊的距离		
	到道路的距离	—	https://www.ngcc.cn
	到居民点的距离		
碳密度数据	地上、地下和土壤碳密度	—	http://www.cnern.org.cn/, 文献查阅
其他统计数据	粮食作物面积及单产、产业产值	—	《中国统计年鉴》《新疆统计年鉴》《博尔塔拉蒙古自治州统计年鉴》

1. 4 Invest 模型

每种土地利用类型对应地上、地下、土壤和死亡有机碳 4 个具有不同碳密度的碳库^[28]。碳密度(ρ)和总碳储量(m_t)的计算公式分别为

$$\rho = \rho_{above} + \rho_{below} + \rho_{soil} + \rho_{dead} \circ$$
 (1)

$$m_t = \sum_{m=1}^j s_m \rho_m \circ$$
 (2)

式(1),(2)中: ρ_{above} , ρ_{below} , ρ_{soil} , ρ_{dead} 分别为地类的地上、地下、土壤和死亡有机物的碳密度; s_m 为地类 m 的总面积; j 为土地利用类型的总数量; ρ_m 为各地类的碳密度。

地上、地下和土壤有机碳库为 3 个贡献大的碳库^[29],各地类土壤碳密度数据来源于相关研究^[30],地上和地下生物碳密度数据从国家生态科学中心获得。艾比湖流域各地类碳密度,如表 2 所示。

根据 InVEST 模型,对艾比湖流域未来不同土地利用方案下的碳封存经济价值进行估

算。碳价值评估采用市场价格进行估算。当前碳的社会成本确定为 24 \$ · Mg⁻¹^[31](\$ 为美元),对未来碳封存付款的价值进行了贴现,采用了每年 10% 的市场贴现率^[32],碳价格的年际变化率确定为 0^[33]。

1. 5 PLUS 模型

PLUS 模型能精确模拟 LUCC 斑块演化,广泛应用于土地利用预测^[34]。PLUS 模型包含土地扩展分析策略(LEAS)和基于多类型随机斑块种子的细胞自动机模块(CARS),挖掘历史 LUCC 规则,生成发展概率,并模拟未来地类斑块的形成。

艾比湖流域 2030 年土地利用变化的模拟分为两个步骤。

1) 利用 2015 年数据预测 2020 年情况,与实际数据对比,验证 PLUS 模型的精度,并调整参数直至

满足要求。选取 15 个驱动因子,包括自然因素、社会经济因素和区域可达性因素,将这些因素输入 LEAS 模块,计算各类用地的扩张概率。应用 CARS 模型模拟土地类型分布,并设置相关参数。

2) 基于 2020 年数据模拟未来土地利用情景。

1.6 GMOP 模型

GMOP 模型是 GM(1,1)模型和 MOP 模型的耦合,用于规划艾比湖流域的可持续土地利用,MOP 模型提供灵活的宏观决策支持,定义优化目标和约束条件^[35],GM(1,1)模型预测不同土地利用类型的价值系数,协助确定这些目标。

1) 自然发展情景(情形 S1)。假设 LUCC 的发展趋势保持不变,同时排除任何外界因素干涉的前提下,根据艾比湖流域 2015—2020 年的土地利用转移规律,利用 PLUS 模型集成的 CA-Markov 模块线性预测了 2030 年的土地需求量。

2) 经济快速发展情景(情形 S2)。以土地经济输出最大化为首要目标,模拟了艾比湖流域各类用地的需求量,并应用 MATLAB 软件进行求解,目标函数设立为

$$\text{Max } G_1(K) = \sum_{j=1}^6 \text{Eco}_j K_j。$$

(3)

式(3)中: $G_1(K)$ 为总经济效益; K_j 为各土地利用类型面积; Eco_j 为不同用地类型的经济效益。

参考文献[36]的研究,分别以农业、林业、牧业、渔业产值估算耕地、林地、草地、水域的经济效益;以第二和第三产业产值之和估算建设用地的经济效益;未利用地因其经济效益不明显,设为 0.000 1。基于 2015—2020 年历史经济数据,运用 GM(1,1)模型对 2030 年的不同地类经济效益系数进行预测,则式(3)变换为

$$G_1(K) = 1.83K_1 + 0.18K_2 + 0.14K_3 + 0.02K_4 + 113K_5 + 0.000\ 1K_6。$$

(4)

式(4)中: $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ 分别为耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地面积。

3) 经济和生态平衡发展情景(情形 S3)。从推动绿色低碳发展出发,以当地自然生态保护和经济发展协调发展的土地开发为目标,目标函数设置为

$$\text{Max } G_2(K) = \sum_{i=1}^6 B_j K_j，$$

(5)

$$\text{Max}\{G_1(K), G_2(K)\}。$$

(6)

式(5),(6)中: $G_2(K)$ 为总生态系统服务价值; B_j 为第 j 种土地利用类型单位面积生态系统服务价值。

从相关统计年鉴中查阅艾比湖流域主要的粮食作物(小麦、玉米)市场单价、单产和种植面积,分别计算出平均粮食单价、平均市场单产和平均种植面积,再根据当量因子法和中国陆地生态系统单位面积生态服务价值系数表^[37]计算出各类用地的单位面积生态系统服务价值,则式(5)变换为

$$G_2(K) = 0.89K_1 + 3.9K_2 + 2.6K_3 + 19.85K_4 + 0.000\ 1K_5 + 0.16K_6。$$

(7)

结合艾比湖流域未来发展趋势、经验知识^[36,38]设置多个约束条件,如表 3 所示。

表 3 GMOP 模型的约束条件

Tab. 3 Restrictive conditions of GMOP model

约束因素	约束条件	解释说明
总面积	$K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 = 5\ 035\ 616\ \text{hm}^2$	土地总面积为 5 035 616 hm^2 ,且在发展过程中保持不变
耕地	$725\ 534\ \text{hm}^2 \leq K_1 \leq 824\ 553\ \text{hm}^2$	最大值根据 2010—2015 年耕地面积增长速度确定,最小值为 2020 年耕地面积
林地	$96\ 423.15\ \text{hm}^2 \leq K_2 \leq 113\ 439\ \text{hm}^2$	最大值为 2020 年林地面积,按 2015—2020 年面积的减少速度确定最小值
草地	$2478\ 391\ \text{hm}^2 \leq K_3 \leq 2\ 579\ 527\ \text{hm}^2$	以当前年草地面积为最大值,由 2015—2020 年间的面积减少速度确定最小值
水体	$166\ 058\ \text{hm}^2 \leq K_4 \leq 199\ 594\ \text{hm}^2$	约束面积分别以自然发展状态和 2020 年水体面积为上、下限
建设用地	$59\ 649\ \text{hm}^2 \leq K_5 \leq 71\ 578.8\ \text{hm}^2$	建设用地面积下限为 2030 年马尔科夫链预测值,将其 1.1 倍设为建设用地最大规模
未利用地	$0\ \text{hm}^2 \leq K_6 \leq 1\ 389\ 920\ \text{hm}^2$	为保留土地供给能力,将 2020 年未利用地面积设为最大值

2 研究结果与分析

2.1 1990—2020 年 LUCC 时空变化

1990—2020 年,艾比湖流域土地利用类型(图 2)以草地和未利用地为主,共约占总面积的 80%(图 2(a))。由图 2(b)可知:1990—2020 年,研究区每种土地利用类型都发生了重大变化;耕地和建设用地面积显著增加,草地面积转折性猛增,其余类型面积减少,变化的趋势和程度随年份而异,尤其在 2010—2015 年间,随着经济的快速发展和城市化水平的显著提升,耕地和建设用地的扩张尤为突出。

由图 2 还可知:1990—2020 年,耕地面积持续扩张到两倍(由 369 507 hm^2 至 725 534 hm^2),而建设用地面积则翻了 4 倍(由 16 228 hm^2 至 61 138 hm^2),增长幅度最大(2.77%);林地、草地、水体等自然景观的变化也较大,其中,林地面积损失严重,虽然它在 1990—2000 年有所增加,但 2000 年开始持续减少,由 242 211 hm^2 缩减至 113 439 hm^2 ,草地和水体增减趋势分别呈倒“V”型和“V”型,这两地类分别在 2010—2015 年经历猛增和猛减之后,又回到各自的减少和增加状态;伴随着对经济用地的需求增加和草地的增加,未利用地持续减少。

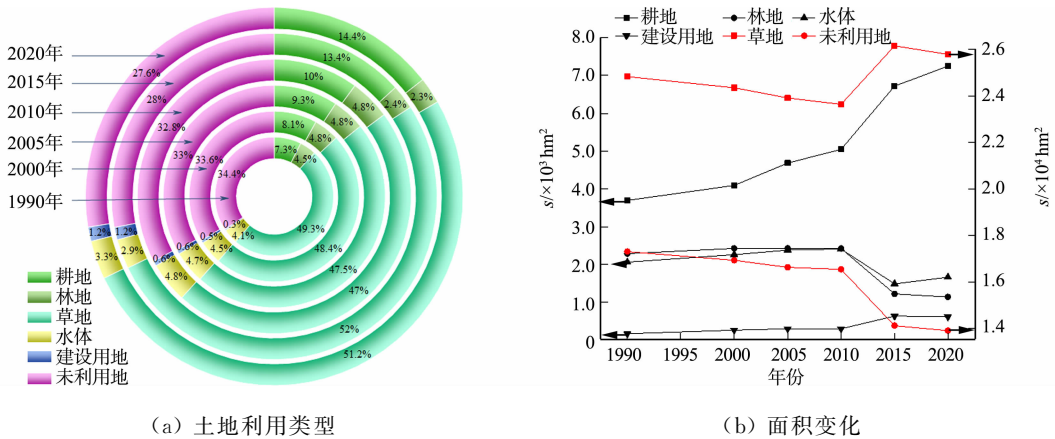
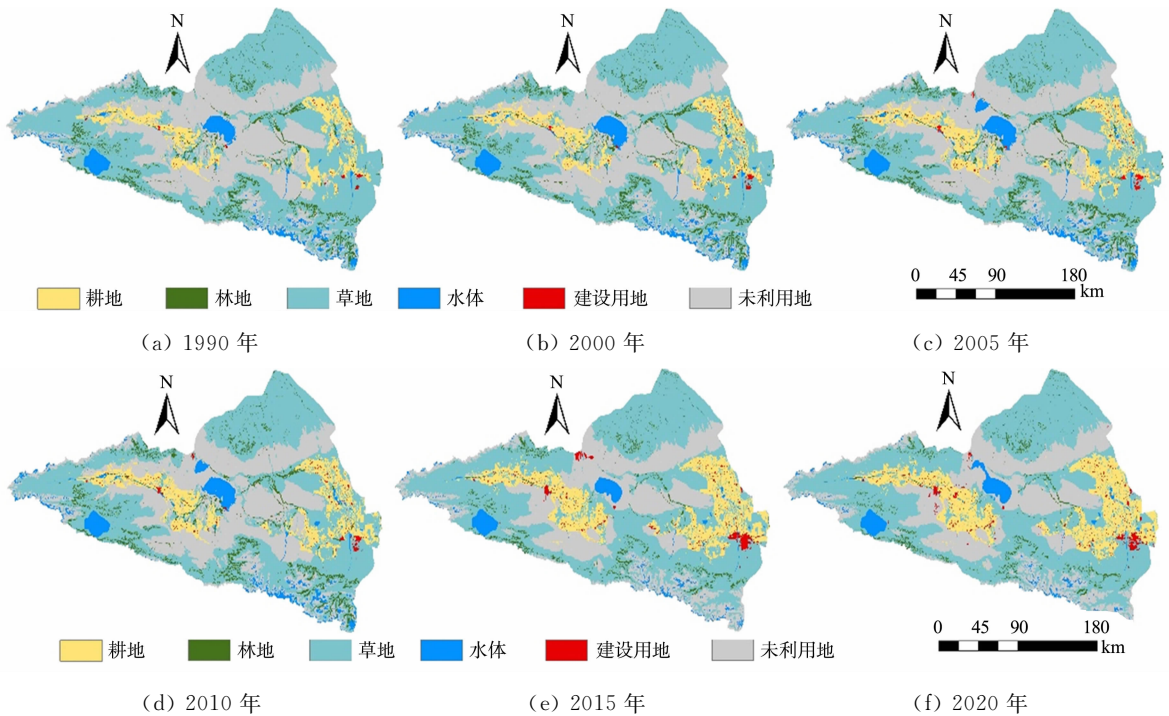


图 2 1990—2020 年艾比湖流域土地类型

Fig. 2 Land types of Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

艾比湖流域 1990—2020 年土地利用时空演变格局,如图 3 所示。由图 3 可知:由于地理条件不同,耕地和建设用地主要分布在研究区东部和中部平原区域;草地围绕未利用地向四周延伸;林地在研究区



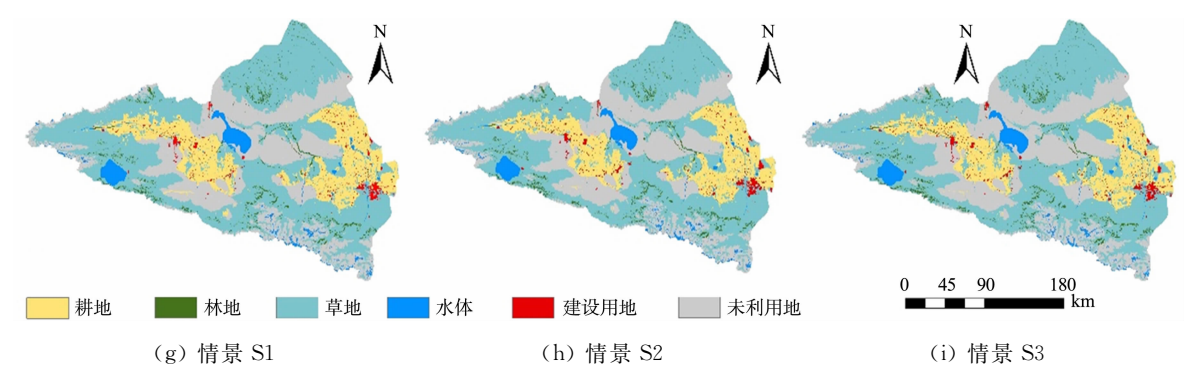


图 3 艾比湖流域 1990—2020 年土地利用时空演变格局

Fig. 3 Spatio-temporal distribution of land use in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

三面山地和中部平原地区都有分布,近 30 年来,各地类空间布局表现出一定的变化趋势;平原绿洲区的耕地和建设用地逐渐向外扩张,各区域林地都有明显的缩减;2010—2015 年,研究区中部和北部出现大面积的新增草地。

1990—2020 年土地利用转移矩阵,如图 4 所示。由图 4 可知:1990—2020 年,艾比湖流域各年份的 LUCC 转变总体趋势相似。

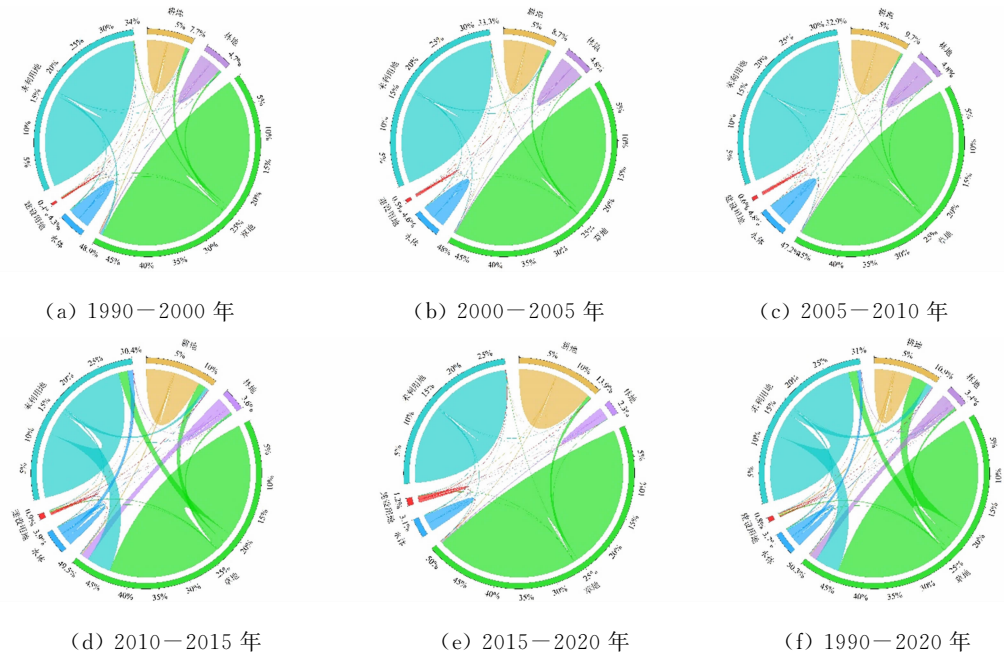


图 4 1990—2020 年土地利用转移矩阵

Fig. 4 Land use transfer matrix from 1990 to 2020

有 1 352 823 hm^2 的土地发生变化,占全流域总面积的 26.87%。耕地转入面积是转出面积的 10 倍,转入来源主要是草地和未利用地,分别占转入总量的 68.72%,25.13%,可见农田对 LUCC 贡献巨大;建设用地的扩增主要来自草地、耕地和未利用地,分别占总增长面积的 40.53%,39.10%,18.08%,自 2010 年,农田得到保护,农田被转换为城镇区域的情况有所缓解。草地面积的转入大于转出,其中,未利用地是主要的转入贡献者,占总转入面积的 73.17%,草地除了用于耕地和建设用地的开发之外,主要退化为未利用地,这跟当地放牧异常有关。林地转出面积占转入面积的 1.88%,主要向草地面积转出,其次是耕地面积和未利用地面积,这是由于伐木、农业发展。草地、未利用地和一些耕地被恢复为林地。值得注意的是,部分农田转变为森林,而一些住宅区则用于耕作,反映了人口迁移到城市的现象。综上所述,林地、草地、耕地和未利用地之间的转换关系显著,以林地和草地退化,以及还草为主要模式。

2.2 1990—2020 年碳储量变化及其对 LUCC 的响应

2.2.1 碳储量时空变化 1990—2020 年艾比湖流域碳储量的变化,如图 5 所示。图 5 中: m 为碳储量。由图 5 可知:1990,2000,2005,2010,2015,2020 年的总碳储量分别为 407.63×10^6 , 408.14×10^6 ,

407.79×10^6 , 407.73×10^6 , 419.15×10^6 , 417.42×10^6 t, 总碳储量呈“增-减-增-减”的交替波动趋势, 整体增加了 9.79×10^6 t; 如果考虑各个地类碳储量的净增长, 可以发现耕地的碳储量 (32.58×10^6 t) 大于草地 (10.97×10^6 t), 而其余地类均呈现负向增长, 特别是林地的负增长最为明显 (-26.40×10^6 t); 草地是对总碳储量贡献最大的地类, 占总碳储量的 $69.66\% \sim 70.65\%$; 30 年间总碳储量增加的主要原因在于研究区最大碳库(草地)碳储量在 2015—2020 年大幅增加。

艾比湖流域 1990—2020 年碳储量空间分布, 如图 6 所示。由图 6 可知: 分布格局大致呈现为外部高碳密度区域环绕着内部低碳密度区域的特点, 高碳密度分布在中部平原地区的草地和森林区域, 以及外围三面的山地森林和草原地带; 相反, 低碳密度区域则集中在南部和东部的高山冰雪带、中部、东部河谷平原区域的城镇用地, 以及这些区域周围大片未利用地; 城镇区周围较为密集的中等碳密度区域主要为农田, 在研究时期内这一区域逐渐扩展, 碳储量的空间分布格局与植被状况息息相关; 高、中碳密度区域主要为植被覆盖良好的森林、草地和农田, 具有较强的固碳能力, 相比之下, 低碳密度区域则为缺乏植被的水域、裸地及被人为改造的城镇用地。

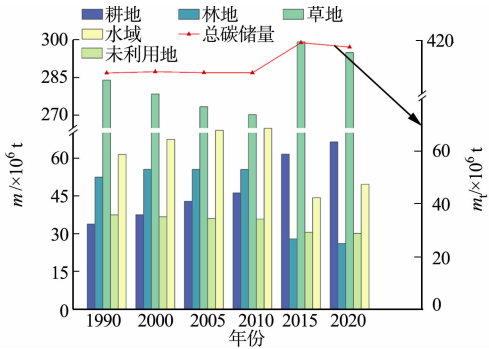


图 5 1990—2020 年艾比湖流域碳储量的变化
Fig. 5 Changes of carbon stock in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

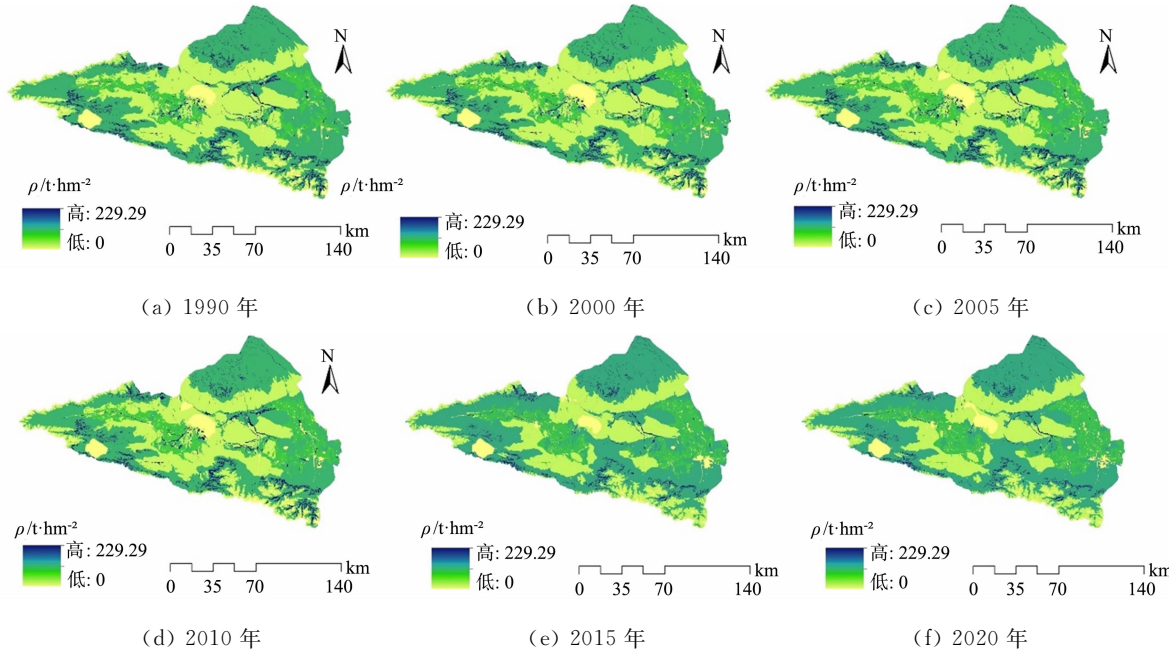


图 6 艾比湖流域 1990—2020 年碳储量空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of carbon stock in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

2.2.2 地类转换对碳储量的影响 1990—2020 年艾比湖流域土地利用转化导致的碳储量变化 (Δm), 如表 4 所示。由表 4 可知: 艾比湖流域的碳损失主要源于林地和草地资源的耗竭, 由于林地和草地的退化分别导致 $2\,020.29 \times 10^4$, $2\,387.77 \times 10^4$ t 的碳损失, 其中, 转变为草地是林地碳损失的主要原因 (占比为 73.91%), 它在所有土地利用转移引起的碳损失中占据了最严重的地位, 而草地碳损失的主要贡献者是向未利用地的转出 (转换面积达 $155\,829$ hm^2), 碳储量为 $1\,444.22 \times 10^4$ t, 仅次于林地转变为草地, 被耕地侵占是林地和草地固碳量下降的次要原因, 减少量分别为 252.00×10^4 , 621.02×10^4 t; 将碳密度较低的未利用地开垦为耕地虽有增加碳储量的潜力, 但因耕地替代林地和草地, 导致的碳排放超过其固碳量, 最终结果为碳排放 (122.27×10^4 t); 随着城镇化水平的提高, 越来越多的草地和耕地被用于城镇建设, 引起的碳损失分别为 180.90×10^4 , 231.85×10^4 t, 共占建设用地碳排放的 91.93% ; 尽管发生了这些碳流失, 但森林和草地的恢复增加区域固碳量; 在还草方面, 由未利用地转入的面积占比最大

(73.17%),转入面积总面积为 433 219 hm²,对区域碳存储的增加做出了主要贡献,达到 4 015.07×10⁴ t;还林带来 570.22×10⁴ t 的固碳量。

表 4 1990—2020 年艾比湖流域土地利用转化导致的碳储量变化

Tab. 4 Carbon stock changes due to land use transition in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

土地类型	2020 年碳储量变化/10 ⁴ t						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
耕地	0	24.21	37.45	−13.99	−180.90	−3.67	−136.90
林地	−252.00	0	−1 493.18	−41.10	−16.65	−217.36	−2 020.29
草地	−621.02	462.91	0	−90.67	−231.85	−1 444.22	−1 924.86
水域	14.89	5.11	139.71	0	0	134.51	294.21
建设用地	40.58	0.05	3.88	0	0	0.69	45.19
未利用地	695.29	77.95	4 015.07	−55.20	−19.59	0	4 713.52
总计	−122.26	570.23	2 702.93	−200.96	−448.99	−1 530.05	970.87

空间分析结果,如图 7 所示。

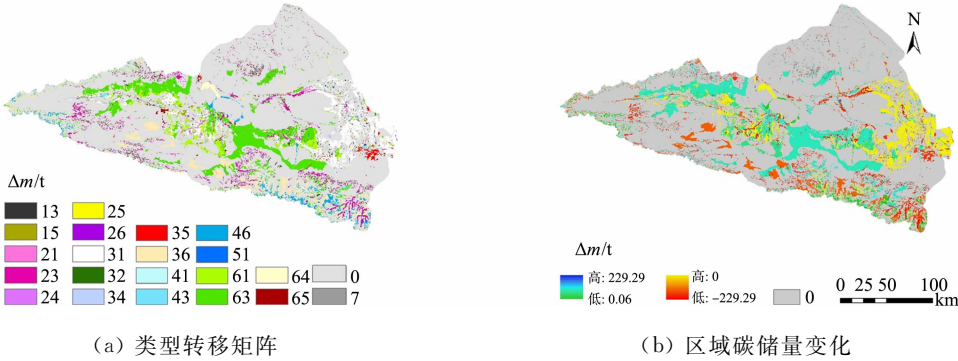


图 7 空间分析结果

Fig. 7 Spatial analysis results

由图 7 可知:1990—2020 年期间变化区域面积占比超过了 26%,说明碳储量空间格局经历了较大变化,草地和未利用地之间的转换对其贡献最大(占 43.54%);增加的区域与减少的区域大致持平,在碳储量减少的区域中,最低值位于研究区林地损失区和东部由草地转变而来的新增建设用地;以流域西南部平原地区和南部为主呈现的“斑块状”和“链状”是草地退化为未利用地的区域,对应碳损失较低值,研究区东部和中央平原地区呈现较为集中的碳损失较高值是由草地转变的耕地;而碳储量增加的区域则主要分布在中部和西北部绿洲平原区的新增草地,以及中部和东部平原区的小区域新增耕地,这两个新增地类都来源于未利用地,碳密度较低的未利用地向二者转变有利于促进碳储存。

综上所述,1990—2020 年,研究区碳储量变动主要由林地减少、草地及耕地与城市用地扩张驱动。尽管部分土地用途转变降低碳储存,草地扩展等带来的碳固定远超释放,导致碳储量总体增加。

2.3 未来不同情景下土地利用模拟和碳储量估值

使用 PLUS 模型模拟 2020 年的土地使用并与实际数据进行对比,得到总体精度为 0.97,Kappa 系数达 0.95,FOM 系数为 0.17,表明模拟精准,适用后续模拟。不同情景下的土地利用需求量,如表 5 所示。在所有情景中,耕地和水体均呈现增加的趋势,情景 S1 的扩张幅度最大,建设用地在情景 S2 和情景 S3 下均增加,但在情景 S1 下略有减少,尽管情景 S2 的建设用地增速领先,且耕地增量仅次于情景 S1,但微增的水体与大幅减少的林、草地,使该情景拥有最多的未利用地,相比之下,情景 S3 中的耕地和建设用地扩张、林地和草地退化则相对缓慢,在空间分布上,3 种情景中土地利用分布格局基本一致。

不同情景下碳储量估值对比,如表 6 所示。由表 6 可知:情景 S1 的耕地与 2020 年相比继续迅速扩大,牺牲了林地和草地等自然景观,导致碳损失为 4.42×10⁶ t;情景 S2 的碳损失最大,原因是为经济活动需要引发了高强度的土地利用开发,耕地和建设用地大幅增加,再加上林地和草地的退化,加快了碳损失的速度,总量达 5.39×10⁶ t;相比之下,情景 S3 的碳损失较为缓慢,较 2020 年减少了 3.37×10⁶ t;经济评价显示,维持历史土地利用动态将损失 −78.18×10⁶ \$ · t^{−1},情景 S2 的净碳排放成本会更高,

为 $-101.32\times10^6\text{ \$}\cdot\text{t}^{-1}$,而情形 S3 承担的成本将小得多,分别为情景 S1,情景 S2 的 67.8%,52.3%。

表 5 不同情景下的土地利用需求量

Tab. 5 Land-use requirements under different scenarios

土地利用类型	s/hm ²			
	2020 年	情形 S1	情形 S2	情形 S3
耕地	725 534	824 553	796 140	743 693
林地	113 439	98 448	105 536	109 531
草地	2 579 527	2 503 425	2 505 878	2 551 926
水体	166 058	199 594	176 841	199 072
建设用地	61 138	59 649	71 578	65 825
未利用地	1 389 920	1 346 893	1 379 642	1 365 569

表 6 不同情景下碳储量估值对比

Tab. 6 Comparison of carbon stock valuation under different scenarios

参数	2020 年	情形 S1	情形 S2	情形 S3
$m_t/10^6\text{ t}$	417.42	413.01	412.04	414.06
$\Delta m/10^6\text{ t}$	—	−4.42	−5.39	−3.37
经济估值/ $10^6\text{ \$}\cdot\text{t}^{-1}$	—	−78.18	−101.32	−53.02

3 个情景中碳储量分布相较于 2020 年的变化,如图 8 所示。由图 8 可知:不同情景下流域大部分区域碳储量保持平衡,其中,情景 S1 的中部和南侧谷地和平原出现碳储量的较高值,此地区未利用地扩展为耕地;情景 S2 碳储存减少的面积明显比增加区域多,东部奎屯河下游绿洲地区碳储量低值较为密集,是建设用地扩张引起的,情景 S1 和情景 S2 碳储量减少的其他区域基本相似,主要表现为西北部和南部森林退化及中部和其他区域耕地侵占草地和建设用地扩张引起的零散的低值;情景 S3 相对于情景 S1 和情景 S2,碳储量的低值区域明显变少,这表明该情景的发展模式(考虑生态保护的 土地开发)最大限度地减少了森林向耕地和建设用地的转化,这种方法还控制了建设用地和耕地的扩张幅度。因此,适当实施生态保护措施有助于减少碳储存的损失,与另外两种情景相比,情景 S3 受人活动影响较小并考虑生态保护,显然是艾比湖流域的最佳发展模式。

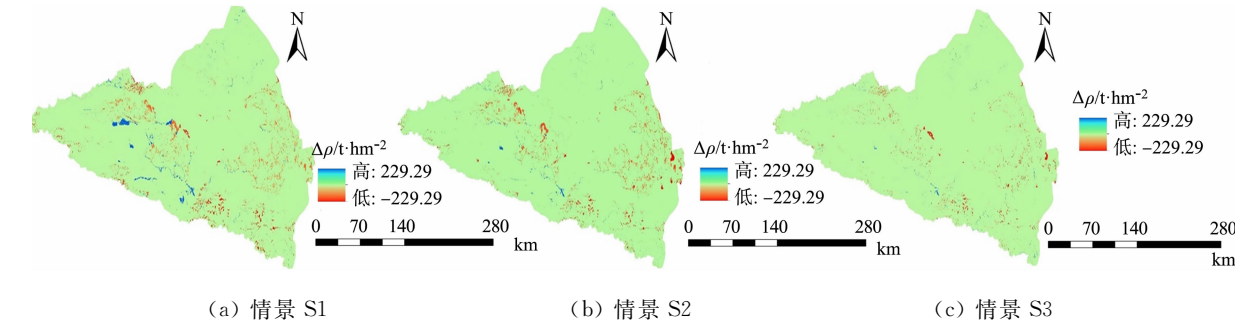


图 8 3 个情景中碳储量分布相较于 2020 年的变化

Fig. 8 Changes of carbon storage distribution in three scenarios compared to 2020

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 LUCC 动态对碳储量的影响 LUCC 导致的碳损失主要发生在自然景观,尤其是森林,转为农田、牧场或人造地表^[39]。在艾比湖流域,由于农业需求,大量森林和草原被转为耕作、放牧用地,导致该地区生态服务功能衰退。研究显示,耕地扩张以牺牲自然景观为代价,导致严重的碳储量下降,最终结果是碳损失而非增加($122.27\times10^4\text{ t}$)。

随着艾比湖流域城市化的加速,草地被侵占,同时,一些耕地也开始转用于城镇建设,导致流失 $180.90\times10^4\text{ t}$ 的碳储存,此现象也在其他研究中得到验证^[40-41]。因此,为了防止农田过度增长和保护现有耕地不被城镇建设占用,应采取相关措施,这将有利于区域碳储量的增加^[8]。作为植被以草本为主

的干旱区,草地破坏是本区碳流失的主要原因之一。平原绿洲的人类居住地及耕地扩张加剧草地退化。然而,草地主要向未利用地退化,归因于过度放牧等人类活动^[42]。值得注意的是,具备最高碳密度的森林(图 6)退化代表碳排放而不是碳封存^[33,43],而且在单位面积上排放量最为严重(图 8)。

在艾比湖流域,草地退化和改善同在,尤其是在 2010—2015 年,草地面积显著增长,这主要是由于当地实施退牧还草措施和气候暖湿化^[44]的影响。蔡朝朝等^[45]在新疆地区也发现草地覆盖表现出增加的趋势,而草地变化是气候因素和人类活动共同影响的结果^[46-47]。草地的这种转折性增长是研究区三十年间总碳储量增加的主要原因(固碳量达 $1\,097\times10^4\text{ t}$)。另外,对一些草地进行的植树造林活动和森林自然恢复,也促使了区域碳储量的增加($462.91\times10^4\text{ t}$)。

3.1.2 3 种情景对比分析和未来发展建议 为了响应 2030 年中国《碳达峰》战略^[48],设计了几种土地利用方案,旨在为该流域 2030 年低碳发展提出最优模式。模拟结果表明,延续历史 LUCC 动态的情景 S1 下,2030 年碳排放量增加 $4.42\times10^4\text{ t}$ 。情景 S2 因经济用地扩张牺牲自然生态,导致更严重的碳损失。相比之下,情景 S3 下 LUCC 动态不显著,有效避免了森林和草地的高强利用带来的碳排放和生态系统的退化^[49],因此,碳损失和社会经济成本更低,显示出通过合理社经发展和土地节约可减缓碳损失,与现有研究^[40,50]相吻合。

内陆干旱区的森林和草原对人为活动极为敏感^[51-52]。值得注意的是,草地退化为未利用地的趋势在各情景中仍然存在,因此,未来的规划与管理中需减少人为干扰,采取禁牧、补播等措施修复退化草地,并加强林业支持,以提升草地和森林保护,从而固定更多的碳。同时,根据《2030 年前碳达峰行动方案》指导,控制建设用地过快增长,并强化绿色低碳、集约高效的基础设施建设。通过合理管理和生态恢复项目,可以提高碳储存能力^[53-54],情景 S3 可减少对生态系统服务的不利影响。此外,碳储量的经济成本评估结果为政府和利益相关者提供了决策依据。

3.1.3 模型优势与局限 基于 LUCC 模拟的碳储量演变研究中,GMOP-PLUS 耦合模型能够克服以往单一数量模拟模型的缺陷^[55],通过约束条件和多个目标的设定,将土地生态和社会经济效益运用到未来土地利用数量和空间优化过程中。运用此模型设定了适用于本地的约束条件和多目标函数,对研究区未来 LUCC 进行了优化,并在 InVEST 模型采用当地的碳密度数据,准确评估了流域碳储存和封存及其经济价值。经过优化的发展情景 S3,即注重生态和经济协调性的方案,能够有效减缓碳损失,这表明此模型在该流域能够成为探索以碳减排为目标的土地发展策略的有力工具。

InVEST 模型的碳储量模块只考虑不同地类之间的碳密度差异,而忽略了土地利用类型内部^[56]及植被特征^[20]可能引起的固碳功能上的差异。在未来的研究中应该用实测数据验证碳密度数据是否合理,以提高碳储量估算精度。如果 3 种基于社会经济影响的土地配置情景模拟能够纳入气候因素,对于未来土地利用预测会更加科学。

3.2 结论

深入探讨了艾比湖流域碳储量的时空变化及 LUCC 对其影响,并评估了不同土地利用情景下的潜在经济成本,有如下 3 个结论。

1) 过去 30 年间,艾比湖流域 LUCC 动态显著,经历转换的区域占总面积的 26.87%,耕地、草地和建设用地之外的地类都呈“入不敷出”的状态。

2) LUCC 格局影响着碳储量变化。历史期间,研究区碳储量呈“增-减-增-减”的变化趋势,总增加量为 $9.79\times10^6\text{ t}$,其中,草地增长对碳储量的增加贡献最大。从空间上看,碳储量大致呈外部高碳密度区围绕内部低碳密度区分布的特点。研究区平原耕作带耕地迅速扩张和周围建设用地的增加、林地大幅退化及草地的转折性增加是导致该流域碳储量总体变化的主要驱动力。

3) 未来 3 种情景下的 LUCC 动态化有所不同,导致碳储量减少的程度有差异。情景 S2 因经济用地开发剧烈,碳储量损失和应承担的经济成本最严重。延续历史发展的情景 S1,碳储量空间变化与情景 S2 相似,但损失量相对较小。相比之下,加入生态环境保护措施的情景 S3 碳损失和经济成本预计大大减小。这表明,较完好地保留森林和草地等自然景观,同时控制耕地和建设用地的过度扩张,将有利于减缓碳储量的损失。

参考文献:

- [1] JO H. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64(2): 115-126. DOI:10. 1006/jema. 2001. 0491.
- [2] CHAPIN F S, MATSON P A, VITOUSEK P M, *et al.* Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer, 2011.
- [3] HOUGHTON R A, HOUSE J I, PONGRATZ J, *et al.* Carbon emissions from land use and land-cover change[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(12): 5125-5142. DOI:10. 5194/bg-9-5125-2012.
- [4] WANG Jing, FENG Liang, PALMER P I, *et al.* Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723. DOI:10. 1038/s41586-020-2986-1.
- [5] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(17): 5898-5907. DOI:10. 5846/stxb201312112932.
- [6] MAHOWALD N M, RANDERSON J T, LINDSAY K, *et al.* Interactions between land use change and carbon cycle feedbacks[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31(1): 96-113. DOI:10. 1002/2016GB005374.
- [7] WU Jiansheng, CHEN Bikai, MAO Jiaying, *et al.* Spatiotemporal evolution of carbon sequestration vulnerability and its relationship with urbanization in China's coastal zone[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 692-701. DOI:10. 1016/j. scitotenv. 2018. 07. 086.
- [8] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响: 以湖北省为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 672-683. DOI:10. 5846/stxb201712042177.
- [9] 张斌, 李璐, 夏秋月, 等. “三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响: 以武汉城市圈为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2265-2280. DOI:10. 5846/stxb202101070075.
- [10] WU Weiguang, YING Zhu, WANG Yifei. Spatio-temporal pattern, evolution and influencing factors of forest carbon sinks in Zhejiang Province, China[J]. *Forests*, 2023, 14(3): 445. DOI:10. 3390/f14030445.
- [11] 陈媛. 土地利用变化对区域碳汇的影响综述[J]. *地矿测绘*, 2020, 3(3): 35. DOI:10. 32629/gmsm. v3i3. 727.
- [12] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. *热带地理*, 2019, 39(3): 397-409. DOI:10. 13284/j. cnki. rddl. 003138.
- [13] ZHIYANSKI M, GLUSHKOVA M, FERENZLIEV A, *et al.* Carbon storage and soil property changes following afforestation in mountain ecosystems of the Western Rhodopes, Bulgaria[J]. *Forest-Biogeosciences and Forestry*, 2016, 9(4): 626. DOI:10. 3832/for1866-008.
- [14] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. *资源科学*, 2016, 38(8): 1585-1593. DOI:10. 18402/resci. 2016. 08. 16.
- [15] LI Jingtai, YANG andan, YAO Xiuying, *et al.* Dynamics of carbon storage in saltmarshes across China's Eastern Coastal Wetlands from 1987 to 2020[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 915727. DOI:10. 3389/fmars. 2022. 915727.
- [16] WANG Ningfei, CHEN Xingpeng, ZHANG Zilong, *et al.* Spatiotemporal dynamics and driving factors of county-level carbon storage in the Loess Plateau: A case study in Qingcheng County, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109460. DOI:10. 1016/j. ecolind. 2022. 109460.
- [17] ZARANDIAN A, MOHAMMADYARI F, MIRSANJARI M M, *et al.* Scenario modeling to predict changes in land use/cover using Land Change Modeler and InVEST model: A case study of Karaj Metropolis, Iran[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(2): 273. DOI:10. 1007/s10661-022-10740-2.
- [18] ZHAO Dengyue, XIAO Mingzhu, HUANG Chunbo, *et al.* Land use scenario simulation and ecosystem service management for different regional development models of the Beibu Gulf Area, China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3161. DOI:10. 3390/rs13163161.
- [19] AN Xuexian, JIN Wenping, LONG Xiangren, *et al.* Spatial and temporal evolution of carbon stocks in Dongting Lake wetlands based on remote sensing data[J]. *Geocarto International*, 2022, 37(27): 14983-15009. DOI:10. 1080/10106049. 2022. 2093412.
- [20] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 446-459. DOI:10. 11821/dlxb201903004.
- [21] 乔治, 蒋玉颖, 贺瞳, 等. 土地利用变化模拟研究进展[J]. *生态学报*, 2022, 42(13): 5165-5176. DOI:10. 5846/stxb202106201639.

[22] SADEGHI S H R, JALILI K, NIKKAMI D. Land use optimization in watershed scale[J]. Land Use Policy, 2009, 26(2):186-193. DOI:10. 1016/j. landusepol. 2008. 02. 007.

[23] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9):1295-1304. DOI:10. 11821/dlxb201409005.

[24] DING Hua, HAO Xingming. Spatiotemporal change and drivers analysis of desertification in the arid region of northwest China based on geographic detector[J]. Environmental Challenges, 2021, 4:100082. DOI:10. 1016/j. env. 2021. 100082.

[25] 王晓琴, 王宏卫, 谈波, 等. 新疆阿克苏地区景观格局与生境质量时空演变及影响机制[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2022, 43(6):777-789. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202203041.

[26] ZHU Guofeng, QIU Dongdong, ZHANG Zhuania, *et al.* Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 127:107770. DOI:10. 1016/j. ecolind. 2021. 107770.

[27] WEI Qianqian, MUKADASI A, HALIKE A, *et al.* Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 145:109632. DOI:10. 3390/w11102171.

[28] SHARP R, TALLIS H, RICKETTS T, *et al.* InVEST user's guide[J]. The Natural Capital Project: Stanford, 2014, 306. DOI:10. 13140/RG. 2. 2. 32693. 78567.

[29] NIE Xin, LU Bo, CHEN Zhoupeng, *et al.* Increase or decrease? Integrating the CLUMondo and InVEST models to assess the impact of the implementation of the major function oriented zone planning on carbon storage[J]. Ecological Indicators, 2020, 118:106708. DOI:10. 1016/j. ecolind. 2020. 106708.

[30] 张杰, 李敏, 敖子强, 等. 中国西部干旱区土壤有机碳储量估算[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9):132-137.

[31] RIKE K, DROUET L, CALDEIRA K, *et al.* Country-level social cost of carbon[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(10):895-900. DOI:10. 1038/s41558-018-0282-y.

[32] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响: 以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4):826-844. DOI:10. 31497/zrzyxb. 20200407.

[33] ZARANDIAN A, BADAMFIROUZ J, MUSAZADEF R, *et al.* Scenario modeling for spatial-temporal change detection of carbon storage and sequestration in a forested landscape in Northern Iran[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(8):474. DOI:10. 1007/s10661-018-6845-6.

[34] LIANG Xun, GUAN Qingfeng, CLARKE K 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. DOI:10. 1016/j. compenvurbsys. 2020. 101569.

[35] GARDINER L R, STEUER R E. Unified interactive multiple objective programming: An open architecture for accommodating new procedures[J]. Journal of the Operational Research Society, 1994, 45:1456-1466. DOI:10. 1038/sj/jors/0451212.

[36] WANG Ying, LI Xiangmei, ZHANG Qi, *et al.* Projections of future land use changes: Multiple scenarios-based impacts analysis on ecosystem services for Wuhan City, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 94:430-445. DOI:10. 1016/j. ecolind. 2018. 06. 047.

[37] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8):1243-1254. DOI:10. 11849/zrzyxb. 2015. 08. 001.

[38] GAO Lina, TAO Fei, LIU Runrui, *et al.* Multi-scenario simulation and ecological risk analysis of land use based on the PLUS model: A case study of Nanjing[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 85:104055. DOI:10. 1016/j. scs. 2022. 104055.

[39] HAN Yiwen, KANG Wanmo, SONG Youngkeun. Mapping and quantifying variations in ecosystem services of urban green spaces: A test case of carbon sequestration at the district scale for Seoul, Korea (1975-2015)[J]. International Review for Spatial Planning and Sustainable Development, 2018, 6(3):110-120. DOI:10. 14246/irspsd. 6. 3_110.

[40] YANG Hang, HUANG Junlong, LIU Dianfeng. Linking climate change and socioeconomic development to urban land use simulation: Analysis of their concurrent effects on carbon storage[J]. Applied Geography, 2020, 115:102135. DOI:10. 1016/j. apgeog. 2019. 102135.

[41] TAO Yu, LI Feng, WANG Rusong, *et al.* Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in ur-

- banized areas: A study from Changzhou, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 651-657. DOI: 10.1016/j.jclepro. 2014. 07. 055.
- [42] CHEN Tao, BAO Anming, JIAPAER G, *et al.* Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982—2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 1311-1325. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2018. 11. 058.
- [43] JAPELAGHI M, HAJIAN F, GHOLAMALIFARD M, *et al.* Modelling the impact of land cover changes on carbon storage and sequestration in the central zagros region, Iran using ecosystem services approach[J]. *Land*, 2022, 11(3): 423. DOI: 10.3390/land11030423.
- [44] 丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 等. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(6): 551-562. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166. 2023. 027.
- [45] 蔡朝朝, 淮永建, 白涛, 等. 基于NDVI的新疆草地覆盖变化特征[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(6): 1369-1381. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930. 2020. 06. 010.
- [46] LIU Yangyang, WANG Qian, ZHANG Zhaoying, *et al.* Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 27-39. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2019. 06. 503.
- [47] ZHANG Renping, LIANG Tiangang, GUO Jing, *et al.* Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2888. DOI: 10.1038/s41598-019-41390-z.
- [48] FANG Kai, TANG Yiqi, ZHANG Qifeng, *et al.* Will China peak its energy-related carbon emissions by 2030? Lessons from 30 Chinese provinces[J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113852. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2019. 113852.
- [49] LU Fei, HU Huifeng, SUN Wenjuan, *et al.* Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4039-4044. DOI: 10.1073/pnas.170029411.
- [50] LIANG Youjia, LIU Lijun, HUANG Jiejun. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in Northwestern China[J]. *Plos One*, 2017, 12(2): e0172494. DOI: 10.1371/journal.pone.0172494.
- [51] LI Chuanhua, WANG Yutao, WU Xiaodong, *et al.* Reducing human activity promotes environmental restoration in arid and semi-arid regions: A case study in Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144525. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2020. 144525.
- [52] YAN Junjie, ZHANG Guangpeng, DENG Xiaoya, *et al.* Does climate change or human activity lead to the degradation in the grassland ecosystem in a mountain-basin system in an arid region of China? [J]. *Sustainability*, 2019, 11(9): 2618. DOI: 10.3390/su11092618.
- [53] YU Zhen, LU Chaoqun, CAO Peiyu, *et al.* Long-term terrestrial carbon dynamics in the Midwestern United States during 1850-2015: Roles of land use and cover change and agricultural management[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(6): 2673-2690. DOI: 10.1016/j.ecolind. 2020. 106939.
- [54] ZHANG Fan, XU Ning, WANG Chao, *et al.* Effects of land use and land cover change on carbon sequestration and adaptive management in Shanghai, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/b/c*, 2020, 120: 102948. DOI: 10.1016/j.pce. 2020. 102948.
- [55] ZHU Liya, SONG Ruixiang, SUN Shuang, *et al.* Land use/land cover change and its impact on ecosystem carbon storage in coastal areas of China from 1980 to 2050[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109178. DOI: 10.1016/j.ecolind. 2022. 109178.
- [56] FRYER J, WILLIAMS I D. Regional carbon stock assessment and the potential effects of land cover change[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145815. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2021. 145815.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)