

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.032

张龙江, 赵俊三, 陈国平, 等. 基于 SDG15.3.1 的土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 268-277.

ZHANG Longjiang, ZHAO Junsan, CHEN Guoping, et al. Impact of land-use change on the value of ecosystem services based on SDG 15.3.1[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 268-277.

基于 SDG15.3.1 的土地利用变化对生态系统服务价值的影响

张龙江^{1,2,3}, 赵俊三^{1,2,3}, 陈国平^{1,2,3}, 林伊琳^{1,2,3}, 刘倬汝^{1,2,3}, 彭苏芬^{1,2,3}

(1.昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2.智慧矿山地理空间信息集成创新重点实验室, 昆明 650093;
3.云南省高校自然资源空间信息集成与应用科技创新团队, 昆明 650211)

摘 要: [目的] 可持续发展目标 15.3.1 是表征土地退化的重要指标之一, 探析土地利用变化和生态系统服务价值 (ESV) 对可持续发展目标 15.3.1 的影响是改进土地退化的关键因素。基于土地利用及碳储量变化对 SDG15.3.1 指标制定新的评价规则, 并对 SDG15.3.1 完成情况进行评估。[方法] 采用等效因子法计算生态系统服务价值, 以定量分析土地利用变化对 ESV 的影响。[结果] (1) 研究区土地利用类型转换频繁, 主要表现为高林地、水体和建设用地增加, 耕地、草地和灌木林减少, 未利用地基本保持不变。(2) ESV 在空间上呈中间高、四周低, 西部高、东部低的分布格局; 2000—2020 年总 ESV 损失 7.32×10^8 元。其中, 2000—2010 年, 土地退化区域的 ESV 损失 3.03×10^9 元; 2010—2020 年, 土地退化区域的 ESV 损失 2.28×10^9 元。(3) 根据 SDG15.3.1 评估结果显示, 2000—2010 年和 2010—2020 年 SDG15.3.1 指标分别为 5.22% 和 4.77%, 而土地净恢复面积分别为 -1.62×10^5 hm^2 和 -2.4×10^5 hm^2 。SDG15.3.1 指标的完成情况有所提高, 但仍未实现土地退化零增长目标。[结论] 研究结果为高原城市群在实现可持续发展目标 15.3.1 过程中土地利用变化对生态系统服务价值的影响提供参考。

关键词: 生态系统服务价值; 可持续发展目标 15.3.1; 碳储量; 土地利用变化; 滇中城市群

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0268-10

Impact of Land-use Change on the Value of Ecosystem Services Based on SDG 15.3.1

ZHANG Longjiang^{1,2,3}, ZHAO Junsan^{1,2,3}, CHEN Guoping^{1,2,3}, LIN Yilin^{1,2,3},

LIU Fengru^{1,2,3}, PENG Sufen^{1,2,3}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Key Laboratory of Geospatial Information Integration Innovation of Smart Mine, Kunming 650093, China;

3. Science and Technology Innovation Team of Natural Resources Spatial Information Integration and Application in Yunnan University, Kunming 650211, China)

Abstract: [Objective] Sustainable Development Goal 15.3.1 (SDG 15.3.1) is one of the important indicators to characterize land degradation. Exploring the impact of land use change and ecosystem service values (ESVs) on SDG 15.3.1 is a key factor to improve land degradation. [Methods] Based on land use and carbon stock changes, a new evaluation rule was established for SDG15.3.1 index, and the completion of SDG 15.3.1 was evaluated. The equivalent factor method was used to calculate the value of ecosystem services to quantitatively analyse the impact of land use change on ESV. [Results] (1) The land use type change was frequent in the study area, which mainly showed that high forest land, water body and construction land increased, cultivated land, grassland and shrub decreased, and unused land remained basically unchanged; (2) The spatial distribution pattern of ESV was high in the middle, low around, high in the west and low in the east; From 2000 to 2020, the total ESV loss was 7.32×10^8 yuan. From 2000 to 2010, the ESV loss of land degradation area was 3.03×10^9 yuan. From 2010 to 2020, the ESV loss in land degradation areas was

收稿日期: 2023-09-25

修回日期: 2023-10-25

录用日期: 2023-11-27

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-03-06

资助项目: 云南省基础研究计划项目 (202201AU070112); 云南省哲学社会科学规划项目 (ZD202218)

第一作者: 张龙江 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务与土地利用、国土空间规划研究。E-mail: zhanglongjiangname@qq.com

通信作者: 陈国平 (1981—), 男, 副教授, 主要从事土地资源优化配置与时空模拟研究。E-mail: chenguoping@kust.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

2.28×10^9 yuan. (3) According to the evaluation results of SDG15.3.1, the indicators of SDG15.3.1 for 2000—2010 and 2010—2020 are 5.22 percent and 4.77 percent, respectively, while the net land restoration area was -1.62×10^5 hm^2 and -2.4×10^5 hm^2 . The SDG15.3.1 target had improved, but the zero land degradation grew target is still not achieved. [Conclusion] The research results provided a reference for the impact of land use change on ecosystem services in the process of achieving SDG 15.3.1 in plateau urban agglomerations.

Keywords: ecosystem services value; SDG15.3.1; carbon stock; land use/cover change; Central Yunnan urban agglomeration

Received: 2023-09-25

Revised: 2023-10-25

Accepted: 2023-11-27

Online(www.cnki.net): 2024-03-06

为了在全球范围内建设和加强人类福祉及自然资源保护,联合国于2015年提出了《改变我们的世界:2030年可持续发展议程》(简称《议程》),被称为“人类、地球和繁荣行动计划”,该《议程》由17个可持续发展目标(SDG)、169个具体目标和231个独特指标组成^[1],每一目标都与人类福祉直接或间接相关,充分反映社会进步、经济发展和环境福祉的协调可持续发展^[2]。实现可持续发展目标对每个国家、地区和政府都具有重要的意义^[3]。

生态系统服务(ecosystem services, ESs)通过其功能提供包括供应、调节、栖息地及文化和舒适服务等多种服务,这些服务对人类生存、生计和福祉至关重要,在实现可持续发展目标时起到重要作用^[4]。而随着人口增长、快速城市化和经济社会快速发展的驱动下,人类活动对陆地生态系统带来巨大压力。世界上60%的自然生态系统正在或已经退化,造成这种退化的主要原因是人类活动的干扰^[5]。土地利用/覆盖变化(LUCC)是直接反映人类活动和生态系统相互影响的重要指标,是影响ES的主要驱动因素^[6]。生态系统服务价值(ESV)是衡量ES的主要指标之一,鉴于生态系统的可持续提供是社会经济可持续发展的关键要素,因此,ESV是理解土地利用和SDGs相互影响的重要纽带^[7]。国内外学者在土地利用对ESV的影响研究方面取得大量成果。在研究方法上,LI等^[8]耦合GMOP-PLUS模型,利用LULC模式来提高相关的ESV和经济效益;ZHOU等^[9]量化黄河流域不同生态系统类型和区域的生态系统服务对生态的贡献程度;SUN等^[10]通过SD-FLUS-InVEST模型对气候和土地利用变化对区域生态系统服务价值的耦合影响进行研究,并且提出改善区域ES管理的建议;在研究尺度上,COSTANZA等^[11]从全球尺度上根据土地利用情况对生态系统服务的价值进行研究;徐新良等^[12]以全国陆地生态系统类型遥感分类数据为基础,采用生态服务价值当量因子法计算得到中国生态系统范围价值空间分布数据集;

LIU等^[13]对中国西北半干旱地区的城市化、气候和人类活动所引起的土地利用变化对生态服务价值的影响进行探索;赵先超等^[14]以长株潭城市群为例,从网格尺度分析碳排放与ESV的时空关系;ZHANG等^[15]以滇池流域为研究区域,利用动态等效法计算生态系统服务价值,对滇池流域生态系统服务价值的时空变化进行热点分析,并定量分析滇池流域土地利用变化对ESV的影响;中国学者谢高地等^[16]在COSTANZA等^[11]的研究基础上,结合中国的生态系统实际情况,得出中国生态系统单位面积价值等效因子,这是目前常被广泛使用的方法。该方法较为直观易用,并且适用于大区域尺度的ESV评估。虽然目前对土地利用和生态系统服务价值之间的相互影响已有大量研究,但考虑到可持续发展目标下的土地利用与生态系统服务价值相互影响的研究还较为鲜见。

近年来,随着城镇化和工业化快速发展,土地退化已成为全球最为关注的经济和环境问题之一,SDG15.3.1是评估土地退化的重要指标之一。研究土地利用和生态系统服务价值的时空变化,对实现土地零退化具有现实意义。本文选取滇中城市群为研究区域,通过土地利用和碳储量变化情况,制定新的评价规则对SDG15.3.1指标进行评估,基于研究区情况,采用等效因子法量化研究区生态系统服务价值,探讨土地利用变化对ESV的影响。

1 研究区概况

滇中城市群位于云贵高原中部($100^{\circ}43'—104^{\circ}49'E$, $24^{\circ}58'—25^{\circ}09'N$),是云南省中部最发达区域的城市群(图1),总面积11.14万 km^2 ,是国家重点培育的19个城市群之一,是云南省生产力布局和生产发展的核心区域。随着国家“一带一路”实施,其作为面向南亚、东南亚辐射中心的核心区地位更加显著,全国“两横三纵”城镇化战略格局的重要组成部分。研究区地形以山地和盆地为主,属于低纬度高海拔地区,区域内立体气候特征明显,生物资源丰富,年平均

气温 17.20℃, 年平均降水量约 1 000.63 mm, 森林覆盖率超过 50%, 植被主要以亚热带常绿阔叶林和灌丛草地为主, 河流水系发达, 是区域重要的生态屏障。近年来, 随着社会经济的不断发展, 对自然资源的需求也不断增长, 生态环境与人类活动的矛盾愈发凸显, 使得研究区面临着生态环境保护、城镇化发展、实现区域可持续发展的多重压力。

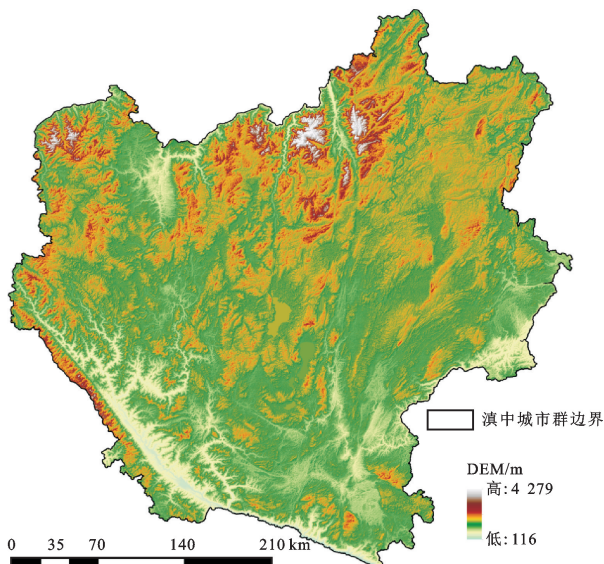


图 1 滇中城市群

Fig. 1 Central Yunnan urban agglomeration

2 研究方法与数据处理

2.1 数据来源与处理

本研究涉及的主要数据有: (1) 土地利用数据。来源于中国科学院资源与环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。根据研究需要将其重分类为耕地、高林地、灌木林、草地、水体、建设用地和未利用地 7 种地类。(2) 自然地理数据。数字高程模型 (DEM) 数据来源于地理空间数据云 (gscloud.cn), 并进行投影变换、裁剪校正等预处理。(3) 社会经济统计数据。来源于《云南省统计年鉴》和《中国农业成本效益汇编》。(4) 土地利用碳密度。来自于国家生态数据中心资源共享服务平台提供的中国陆地生态系统碳密度数据集 (2010 年)^[17] 及前人的研究^[18-20]。(5) 气象数据。来自于中国气象数据服务中心 (<http://data.cma.cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值 本文以谢高地等^[21]修订的中国单位面积生态系统服务等效表为基础, 综合考虑研究区社会经济实际, 对主要农作物单位面积 (包括玉米、水稻、小麦和大豆) 产量创造的经济价值进行修正。依据《云南省统计年鉴》和《中国农业成本效益汇编》, 研究区 2000—2020 年的年均粮食产量为

5 071.775 kg/hm², 为了减少通货膨胀对评估结果的影响, 本文统一以 2020 年的粮食平均单价为基价进行推算。以“标准生态系统服务经济价值当量系数为单位面积农田粮食生产经济价值的 1/7”为参考, 根据公式 (1)^[22] 计算得到研究区单位面积农田生态系统粮食产量的经济价值为 2 005.418 元/hm²。ESV 当量根据区域农田生态系统生物量因子修订系数 (云南, 0.64)^[23] 进行修订, 根据公式 (2) 得到滇中城市群中 ESV 系数表 (表 1)。建设用地作为生态系统的一部分, 在水调节和环境净化方面对生态系统服务产生负面影响^[24]。

$$V_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (1)$$

$$VC_K = VC_0 \times V_a \quad (2)$$

式中: V_a 为单位农田生态系统生产粮食的经济价值 (元/hm²); p_i 为研究区第 i 类粮食作物单位面积价格 (kg/元); m_i 为研究区第 i 类粮食作物播种面积 (hm²); q_i 为研究区第 i 类粮食作物单位面积产量 (kg/hm²); M 为研究区总粮食作物面积 (hm²); VC_K 为第 K 类景观生态系统服务价值系数; VC_0 为经过区域农田生态系统生物量因子修正后的生态系统单位面积生态服务价值当量表。

计算不同情景下的 ESV, 计算公式为^[25]:

$$ESV = \sum_{j=1}^n VC_j \times S_j \quad (3)$$

$$ESV_j = (S_j \times VC_j) \quad (4)$$

$$ESV_a = \sum_{j=1}^n (S_j \times VC_{ja}) \quad (5)$$

式中: ESV 为研究区的生态系统服务总价值; VC_j 为第 j 种土地生态系统服务价值系数 (元/hm²); S_j 为第 j 种土地利用类型的面积 (hm²); j 为土地利用类型; n 为土地利用类型数; ESV_j 第 j 种土地利用类型的生态系统服务价值; ESV_a 为第 a 项服务功能的生态系统服务价值; VC_{ja} 为第 j 种土地利用类型的第 a 项服务功能价值系数 (元/hm²)。

2.2.2 碳储量 研究使用 InVEST 模型对碳储量进行计算。该模型由斯坦福大学、明尼苏达大学、自然保护协会和世界自然基金会 (WWF) 开发的一套生态系统决策模型^[26]。该模型的碳储量模块将生态系统的碳储量划分为 4 个基本碳库, 即地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机碳库。总碳储量的计算公式为^[27]:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (6)$$

式中: C_{total} 为滇中城市群的总碳储量 (t); C_{above} 为地上生物量碳库 (t); C_{below} 为地下生物量碳库 (t); C_{soil} 为土壤碳库 (t); C_{dead} 为死亡有机碳库 (t)。

根据不同土地利用类型的碳密度和土地利用数据,滇中城市群各土地利用类型的碳储量由公式(7)计算^[28]:

$$C_{totalj}=(C_{abovej}+C_{belowj}+C_{soilj}+C_{deadj})\times A_j$$

(7)

式中: C_{totalj} 为第 j 类土地利用类型的总碳储量(t); C_{abovej} 为第 j 类土地利用类型的地上碳密度(t/hm²); C_{belowj} 为第 j 类土地利用类型的地下碳密度(t/hm²); C_{soilj} 为第 j 类土地利用类型的土壤碳密度

(t/hm²); C_{deadj} 为第 j 类土地利用类型的死亡有机物碳密度(t/hm²); j 为土地利用类型; A_j 是 j 类土地利用的面积(hm²)。

参考碳密度时应选择离研究区较近或相似的研究区域,防止过大的数据差距。

根据前人^[29]研究表明,碳密度与降水量、温度等密切相关。因此根据研究区的气候条件和土地利用类型进行相应的碳密度修正。不同地类经修正后的碳密度值见表 2。

表 1 研究区生态系统服务价值系数

Table 1 The coefficient of ecosystem service value in the study area

yuan/hm²

一级服务	二级服务	耕地	有林地	灌木林	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1 418.23	350.39	243.89	299.05	1 026.77	0	6.42
	原料生产	314.45	808.58	551.89	440.23	295.20	0	19.25
	水资源供给	-1 700.59	419.69	282.36	243.86	10 639.95	0	12.83
调节服务	气体调节	1 142.29	2 660.63	1 809.69	1 549.15	988.27	0	83.43
	气候调节	596.81	7 957.50	5 429.07	4 094.26	2 939.14	0	64.17
	净化环境	173.27	2 314.09	1 642.84	1 351.49	7 123.24	-4 923.50	205.35
	水文调节	1 918.78	4 958.04	4 299.62	2 999.46	131 221.71	-10 958.76	154.02
支持服务	土壤保持	667.40	3 238.19	2 207.56	1 886.70	1 193.62	0	96.26
	维持养分循环	198.94	247.71	166.85	145.03	89.84	0	6.42
	生物多样性	218.19	2 948.12	2 015.04	1 715.99	3 272.84	0	89.84
文化服务	美学景观	96.26	1 292.45	885.59	757.25	2 425.75	82.60	38.50
	合计	5 044.03	27 195.39	19 534.38	15 482.47	161 216.36	-15 799.66	776.50

表 2 研究区不同地类碳密度修正值

Table 2 The carbon density correction value of different land types in the study area

t/hm²

土地利用类型	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳储量
耕地	14.6	206.6	115.3	0
高林地	108.6	296.7	168.9	0
灌木林	30.7	240.7	149.6	0
草地	90.4	221.5	106.2	0
水体	7.7	0	0	0
建设用地	6.4	0	0	0
未利用地	3.4	0	0	0

2.2.3 可持续发展指标 土地退化是指由于土地使用或者人类活动产生的过程而导致土地生物或者经济

生产力的降低或者损失,对支持生态系统功能和服务有着至关重要的作用。SDG15.3.1 是评价土地退化的重要指标之一,其指标意义为“退化土地占土地总面积的比例”^[1]。因此,本文选用 SDG15.3.1 来评估土地退化情况。为了更好地评价 SDG15.3.1 的完成情况,本文基于土地利用和碳储量提出新的评价规则:

(1)不同的土地利用类型在不同的空间具有不同的价值和作用^[30]。如何评价土地利用类型转移过程是否发生退化情况,本文参考 Trends. Earth (http://trends.earth)提供的土地利用类型过渡矩阵,结合研究区实际情况,制定土地流转过程中的土地退化方案(表 3)。

表 3 SDG15.3.1 土地流转变化的定义

Table 3 SDG15.3.1 Definition of land transfer change

土地利用类型	耕地	高林地	灌木林	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	*	▲	▲	▽	*	▽	▽
高林地	▽	*	▽	▽	*	▽	▽
灌木林	▽	▲	*	▽	*	▽	▽
草地	▲	▲	▲	*	*	▽	▽
水域	*	*	*	*	*	*	*
建设用地	▲	▲	▲	▲	*	*	▲
未利用地	▲	▲	▲	▲	*	▽	*

注:▲表示土地改良;▽表示土地退化;*表示土地稳定。

(2)碳储量是用来衡量土地生产能力和生态恢复力的重要依据。根据《联合国防治荒漠化公约》^[31]发布的可持续发展目标指标 15.3.1 评价指标,以 2000 年土地碳储量为基线,单位碳储量下降的区域视为土地退化,碳储量增加的区域视为土地改善。

研究根据土地利用和碳储量的变化,采用“一出全出”的原则,即“2 个指标均为改善时,SDG15.3.1 为改善;1 个指标改善,另 1 个指标不变时,SDG15.3.1 为改善;2 个指标中有 1 个指标为退化时,SDG15.3.1 为退化;2 个指标均为不变时,SDG15.3.1 为不变”(表 4)。

表 4 SDG15.3.1 指标整合规则

Table 4 SDG15.3.1 indicator integration rules

评价指标				土地退化和改善					
土地利用	改善	改善	改善	不变	不变	不变	退化	退化	退化
土地碳储量	改善	不变	退化	改善	不变	退化	改善	不变	退化
SDG15.3.1	改善	改善	退化	改善	不变	退化	退化	退化	退化

3 结果与分析

3.1 SDG15.3.1 评估分析

3.1.1 土地利用变化分析 研究区 2000—2020 土地利用类型主要有草地、高林地、灌木林和耕地。草地占比最大,约占 27%,主要分布在研究区东北部和南部,该地区水系发达,地形较为平坦,适合草本植物生长;灌木林约占 25%,主要分布在研究区西部和东南部丘陵地带;高林地约占 24%,主要呈块状和带状

分布在研究区各部分山区,高林地呈现扩张趋势,主要发生在玉溪市,高林地向灌木林和草地进行扩张;耕地主要分布在东南部和西北部的平原和缓坡地带;水体由于研究区东北高、西南低的地形特征,主要分布在中部和南部地区,以及北部地区的低洼地带;建设用地主要分布在以昆明市、楚雄市、曲靖市、红河州等市县级行政中心及其周边地区,并且不断向城市周围的耕地和灌木林扩张(图 2)。

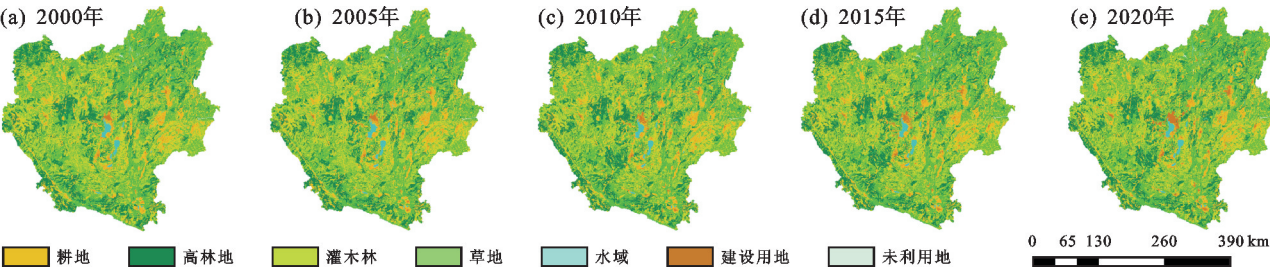


图 2 2000—2020 年土地利用空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use from 2000 to 2020

通过土地利用转移矩阵(图 3)发现,2000—2020 年高林地、水体、人造用地增加,耕地、灌木林、草地减少,未利用地基本保持不变。其中,建设用地的面积增加最多,20 年来以每年 10.36% 的增长速度增长 $1.38 \times 10^6 \text{ hm}^2$,并且主要由耕地、草地转换而来,大部分转换发生在昆明市;其次,高林地面积增加 $9.42 \times 10^5 \text{ hm}^2$,主要由灌木林、草地、耕地流转而来。说明云南实施的态保护策略和退耕还林政策取得较好成效。

3.1.2 碳储量时空变化分析 根据前述碳储量计算公式,计算得到 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的碳储量分别为 478.411×10^7 , 478.110×10^7 , 477.866×10^7 , 477.492×10^7 , $473.868 \times 10^7 \text{ t}$ 。总体为持续下降趋势,下降 $4.54 \times 10^7 \text{ t}$ (表 5)。从土地利用类型来看,2020—2020 年,高林地的碳储量占总碳储量的比例最大,约占 32.16%~33.61%,;其次是草地和灌木林,分布约占 26.78%~26.38% 和 24.80%~23.94%。

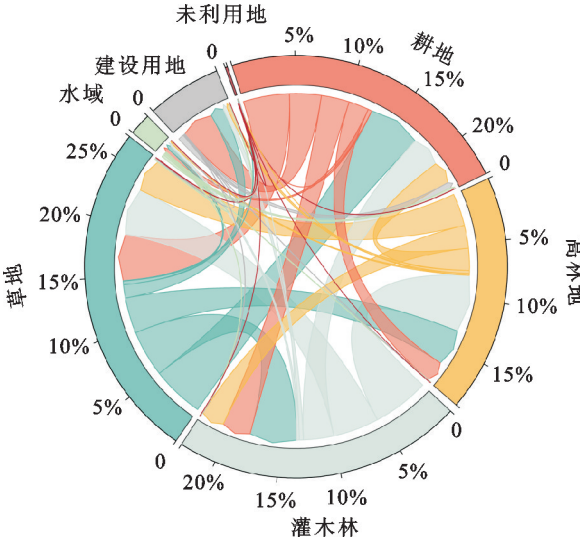


图 3 2000—2020 年土地利用转移矩阵

Fig. 3 2000—2020 land use transfer matrix

在研究期间,耕地、高林地、灌木林和草地的碳储量变化情况最明显,其中灌木林的碳储量下降最大,20 年来持续减少 $5.21 \times 10^7 \text{ t}$ 碳储量;其次是草地,减

少 3.10×10^7 t 碳储量;耕地的碳储量持续减少,从 2000 年的 7.76×10^8 t 减少到 2020 年的 7.58×10^8 t, 总共减少 1.74×10^7 t,高林地则呈现波浪式上升,总体增加 5.41×10^7 t。

通过 InVest 模型计算得到 2000—2020 年的碳储量空间变化情况(图 4)。结果表明,在研究期间,研究区碳储量总体上呈现出“中间低,四周高”的空间分布格局。低碳储量区主要位于研究区各个行政单

位及其周围,并且 20 年来不断向中碳储量区扩张,特别是昆明市;中碳储量区则分布在研究区东南部,与水体和耕地的分布情况相似;高碳储量区则是分布在研究区西部山区以及东部的丘陵地带。而碳储量的增加区域在研究区的西南部呈斑块状分布,在研究区北部则是零星分布;碳储量的减少区域则主要以带状分布在研究区内的行政单位周边,这与城市的不断扩张密切相关。

表 5 不同地类碳储量

Table 5 Carbon storage of different land types

年份	耕地	高林地	灌木林	草地	水域	建设用地	未利用地	合计
2000	77.580	153.875	118.650	128.119	0.099 7	0.082 2	0.005 3	478.411
2005	77.290	153.812	118.671	128.146	0.099 4	0.088 0	0.005 3	478.110
2010	77.315	158.854	114.626	126.854	0.102 2	0.109 9	0.005 5	477.866
2015	77.091	158.788	114.572	126.818	0.098 5	0.119 3	0.005 5	477.492
2020	75.841	159.286	113.436	125.015	0.112 7	0.170 4	0.005 6	473.868

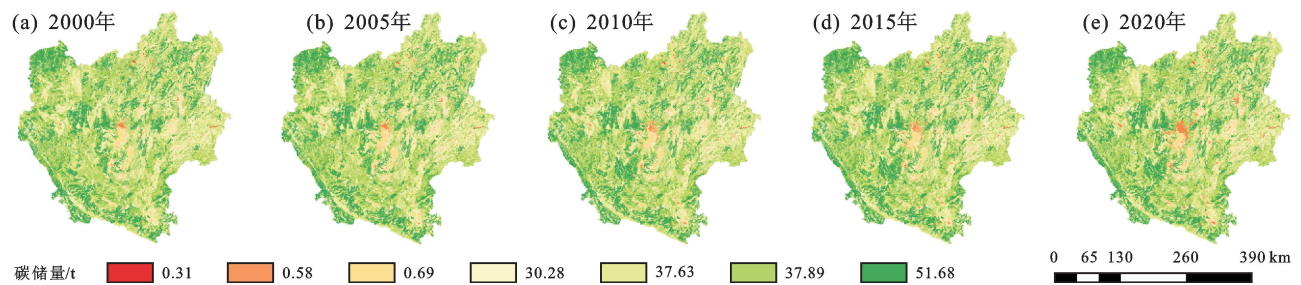


图 4 2000—2020 年碳储量空间分布及变化

Fig. 4 Spatial distribution and change of carbon storage from 2000 to 2020

3.1.3 可持续发展目标 15.3.1 评估 根据评价规则计算得到 2000—2010 年和 2010—2020 年的 SDG 15.3.1 指数分别为 5.22% 和 4.77%, 结果表明,在研究期间,滇中城市群的 SDG15.3.1 指标有所提高,但到 2020 年仍然未实现该目标。2000—2010 年,土地退化 5.81×10^5 hm²,恢复面积为 4.19×10^5 hm²; 2010—2020 年,土地退化面积为 5.31×10^5 hm²,恢复土地面积为 2.91×10^5 hm²。相比之下,土地退化面积大于土地恢复面积,因此,未能实现土地零退化目标。进一步分析土地退化空间分布图(图 5)分析,在 2000—2020 年期间大部分土地保持稳定。土地退化区域主要分布在城市周边,这与滇中城市群快速发展,建设用地不断扩张有密切联系。土地恢复面积主要分布在滇中城市群西北部,特别是玉溪市的峨山彝族自治州,这与该县自 2005 年启动生态县城建设工作,始终坚持把保护生态环境、建设生态文明作为经济社会发展的主旋律这一生态环境保护的行动密切相关。

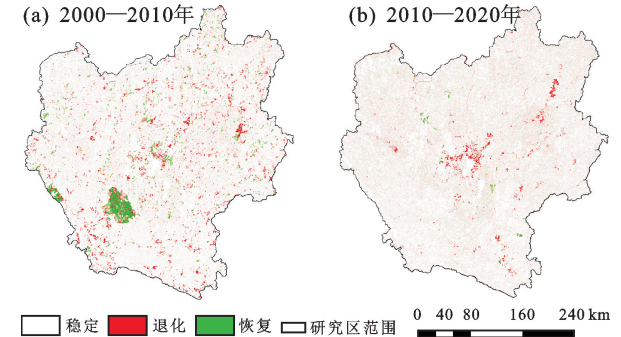


图 5 SDG15.3.1 土地退化和恢复的空间变化分布

Fig. 5 SDG15.3.1 Spatial variation distribution map of land degradation and restoration

3.2 ESV 变化分析

3.2.1 ESV 时间变化分析 根据 2000—2020 年 ESV 变化(表 6)发现,研究区 ESVESV 呈现为波浪式起伏变化,总 ESV 从 2000 年到 2005 年减少 2.791×10^8 元,随后在 2010 年增加到 2.057×10^{11} 元,增加 9.583×10^7 元,最后在 2010—2020 年减少 5.485×10^8 元。总体上,ESV 从 2000—2020 年减少 7.319×10^8 元,年平均减少

5.485×10^8 元。从土地利用类型来看,高林地是研究区 ESV 最重要的土地类型,因此 ESV 贡献度也最大,占总 ESV 比例超过 36%;其次是灌木林和草地,分别占土地利用类型总 ESV 的 26% 和 23% 以上。研究期间,高林地提供的 ESV 呈现出增长趋势,而耕地、灌木

林和草地则始终呈现出下降趋势,其中 2010—2015 年 ESV 下降幅度最大,下降 1.12×10^{10} 元,主要原因是该期间大量的耕地和灌木林转为建设用地和草地,导致 ESV 下降。特别注意的是,建设用地提供的 ESV 为负值,并且持续下降。

表 6 不同土地类型的生态系统服务价值

Table 6 Ecosystem service value of different land types

10^{10} yuan

年份	耕地	高林地	灌木林	草地	水域	建设用地	未利用地	总 ESV
2000	1.163 0	7.287 4	5.503 7	4.744 4	2.090 4	-0.203 0	0.001 2	0.587 1
2005	1.158 6	7.284 4	5.504 6	4.745 5	2.082 2	-0.217 3	0.001 2	20.559 2
2010	1.158 9	7.523 1	5.317 2	4.697 8	2.141 7	-0.271 2	0.001 3	20.568 8
2015	1.155 6	7.520 1	5.314 8	4.696 3	2.063 4	-0.294 5	0.001 3	20.456 9
2020	1.137 0	7.544 2	5.261 9	4.629 8	2.360 5	-0.420 6	0.001 2	20.513 9

由图 6 可知,在不同的单项生态系统服务中,水文调节是研究区最大的单项生态系统服务,占总生态系统服务价值的 26% 以上;其次是气候调节,占总生态服务价值的 24% 以上,这与研究区广阔的森林和丰富的水系有关。从 2000—2020 年,除了水文调节、水资源和美学景观的 ESV 增加以外,其他生态系统服务的价值都有所下降。其中,下降幅度最大的是净化环境,从 2000 年的 1.57×10^{10} 元下降到 2020 年的 1.50×10^{10} 元,下降 6.53×10^8 元;其次是气候调节,从

2000 年的 5.09×10^{10} 元下降到 2020 年的 5.07×10^{10} 元,下降 2.05×10^8 元。

从一级服务来看,在研究期间,调节服务下降 6.84×10^8 元;其次是支持服务,下降 1.93×10^{10} 元。而供给服务和文化服务的 ESV 分别增加 1.42×10^8 元和 3.41×10^6 元。造成这一情况的重要原因是,建设用地不断向其他用地的扩张,造成耕地、灌木林和草地的大量流失,直接影响滇中城市群的整体生态系统服务价值下降。

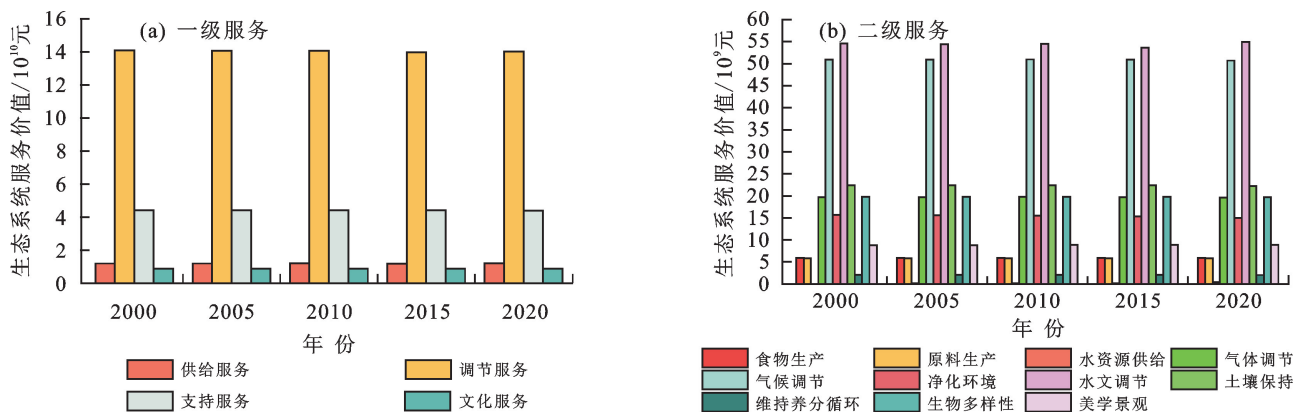


图 6 不同生态系统服务功能的生态系统服务价值

Fig. 6 The ecosystem service value of different ecosystem service functions

3.2.2 ESV 空间格局变化分析 从研究区 ESV 分布(图 7)可以看出,其总体呈中间高、四周低,西部高、东部低的空间分布格局。生态系统服务价值的负值区域以散点式分布在各个城市及其周边区域;高值区域主要集中以滇池为主体的湖泊和流域周围;中低值区域主要分布在东南部 and 西北部,与草地和耕地的分布情况大致相同;中值区域主要分布在灌木覆盖的山谷和缓坡丘陵地带;中高值区域则主要在西部和东北部海拔较高的山林区域,分布差异明显。由于建设用地向草地和耕地扩张,导致负值区域呈现不断增加,中低值区域不断下降趋势,这主要发生在昆明市;除了楚雄市和玉溪市生态服务价值有所提高以外,昆明市、红河州、曲靖市的生态系统服务价值均呈下

降趋势,主要是由于楚雄市和玉溪市地处西部山林地带,森林和灌木林的面积占比大,生态系统稳定。

3.3 土地利用变化对 ESV 的影响分析

根据 2000—2020 年土地利用类型的转换面积得到土地利用类型转换过程中所造成生态系统服务价值的损失和收益(表 7)。从 ESV 的收益方面看,由于土地利用转换对 ESV 产生的收益为 1.31×10^{10} 元,其中耕地和草地转为水域所带来的收益最为显著,分别是 1.75×10^9 元和 1.59×10^9 元,分别占总收益的 13.40% 和 12.17%。从 ESV 损失来看,由于土地利用转换对 ESV 造成的损失为 1.38×10^{10} 元,其中耕地转为建设用地所造成的损失最多,为 2.01×10^9 元,占总损失的 14.59%,其次是草地转为耕地,为

1.65×10⁹元, 占总损失的 11.98%。总体上, 由于土地利用转换对 ESV 造成的损失大于收益。

结合 SDG15.3.1 评价结果分析表明, 2000—2010 年, 土地退化区域的 ESV 损失 3.03×10⁹ 元; 2010—2020 年, 土地退化区域的 ESV 损失 2.28×10⁹ 元。由

此可见, 土地退化是 ESV 损失的主要因素。因此, 控制土地退化是减少 ESV 损失的重要措施。在发展经济社会的同时应该注意提升对自然生态系统的保护, 制定合理规范的开发方案, 促进经济社会发展全面绿色转型, 实现生态环境质量持续改善。

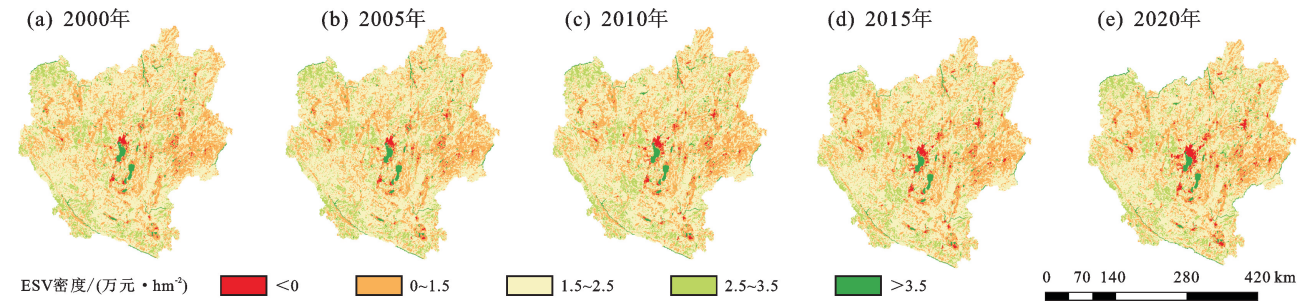


图 7 2000—2020 生态系统服务价值空间分布及变化

Fig. 7 Spatial distribution and change of ecosystem service value from 2000 to 2020

表 7 2000—2020 年研究区土地利用转换 ESV 损益

Table 7 ESV profit and loss table of land use conversion in the study area from 2000 to 2020							10 ⁸ yuan
土地利用类型	耕地	高林地	灌木林	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	0	13.620	12.337	14.582	17.485	−20.095	−0.031
高林地	−14.824	0	−5.331	−11.519	6.737	−3.978	−0.013
灌木林	−13.341	13.110	0	−5.657	10.443	−4.363	−0.051
草地	−16.500	12.682	5.723	0	15.879	−12.629	−0.210
水域	−12.576	−2.067	−1.986	−6.493	0	−5.719	−0.392
建设用地	3.587	0.554	0.502	0.855	1.885	0	0.023
未利用地	0.031	0.035	0.036	0.206	0.210	−0.002	0

4 讨论

本研究基于土地利用数据, 分析 2000—2020 年 5 个时期的土地利用和碳储量变化情况, 提出新的评价规则, 对滇中城市群 SDG15.3.1 的完成情况进行评估。探索 ESV 的时空分布情况, 以反映区域土地利用变化对 ESV 变化的影响, 为揭示可持续发展目标 15.3.1 在实现过程中对 ESV 变化的影响提供新的思路。

通过对滇中城市群 2000—2020 年土地利用时空变化分析发现, 建设用地增加 1.38×10⁵ hm², 扩张最严重的是昆明市, 主要是因为经济高速发展, 快速城镇化。而建设用地扩张的主要是耕地和草地, 导致 ESV 的快速减少。高林地和水域虽然有所增加, 但主要来源是耕地的转换, 这可能与生态环境保护、退耕还林政策相关。研究区 ESV 总量呈波动式下降, 空间布局“中间低、四周高”, 该研究与陈相等^[32] 学者的研究结论相似。2000—2010 年、2010—2020 年滇中城市群 SDG15.3.1 指标分别为 5.22% 和 4.77%, 从土地转换来看, SDG15.3.1 逐渐下降主要原因是由于高林地和水域的增加。对 SDG15.3.1 评价结果进一步分析表明, 在研究期间, 土地退化区域的 ESV 损失 5.31×10⁹ 元。由此可见, 土地退化是 ESV 损失的主要因素。因此, 控制土地退化是减少 ESV 损失的

重要措施。在发展经济社会的同时应该注意提升对自然生态系统的保护, 制定合理规范的开发方案, 促进经济社会发展全面绿色转型, 实现生态环境质量持续改善。正如《2019 年可持续发展目标报告》^[33] 中所提到的, 如果联合国成员国继续遵循当前的发展模式, 到 2030 年, 许多可持续发展目标将无法在各国实现, 这一结论也适用于滇中城市群的发展。

本研究对生态系统服务价值的时空变化进行分析, 并通过整合碳储量和土地利用情况对 SDG15.3.1 的完成情况进行评估, 以此探析土地利用变化对 ESV 的影响机制。但仍存在不足: (1) 采用 InVEST 模型计算土地碳储量是基于土地利用类型对碳储量的时空评估, 未考虑光合速率、土壤微生物活性等对碳汇有重要影响的其他因素。(2) ESV 评估采用的是修正的等效因子法, 该方法简单方便, 但是该衡量标准是静态的单位面积粮食生产的经济价值, 未考虑随市场波动而产生的通货膨胀和通货收缩, 这可能导致 ESV 计算不精确。同时未顾及自然灾害和气候变化对生态系统服务的影响。(3) 可持续发展目标 15.3.1 中退化的土地面积占总土地面积的比例, 同时衡量和评估土地利用变化、土地生产力和土地碳储量 3 个次级指标得出。本研究受数据限制, 只考虑土地利用变化和碳储量, 而没有考虑土地生产力, 本文

SDG15.3.1 土地退化的评估结果可能存在一定误差。同时本研究只考虑到历史的土地退化情况变化,没有对未来不同情景的土地退化情况进行探讨,这也是后续研究的重点。

5 结 论

(1)2000—2020 年研究区土地利用总体变化为高林地、水体和建设用地在增加,耕地、草地和灌木林在减少,未利用地基本保持不变。草地分布最广,高林地和灌木林主要分布于山区和丘陵地带,耕地则分布在城市周围和平原缓坡地带,并呈递减趋势,其中昆明市最为严重;建设用地明显增加,增加 $1.38 \times 10^6 \text{ hm}^2$,年增速 10.36%,主要向耕地和草地转移。

(2)研究区 ESV 整体呈持续下降趋势。高林地提供的 ESV 占总 ESV 比例最大,超过 36%,是 ESV 的主要提供者;建设用地的 ESV 始终呈现负值。单向服务价值以气候调节和水文调节为主。ESV 呈现“中部高于四周,西部高于东部”的空间格局。2000—2020 年,由土地利用转换对生态系统服务产生的收益为 1.31×10^{10} 元,主要来源于耕地转为草地,灌木林转为高林地;ESV 主要的损失来源于耕地向建设用地的转移,损失 2.01×10^9 元,占总损失的 16.34%。

(3)2000—2010 年,研究区土地退化 $5.81 \times 10^5 \text{ hm}^2$,恢复面积为 $4.19 \times 10^5 \text{ hm}^2$;2010—2020 年,研究区土地退化面积为 $5.31 \times 10^5 \text{ hm}^2$,恢复土地面积为 $2.91 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。结果表明,2000—2010 年、2010—2020 年 SDG15.3.1 指标分别为 5.22% 和 4.77%。在研究期间,研究区 SDG15.3.1 指标有所提高,但在 2020 年仍然没有达到土地零退化的目标,耕地、高林地和疏林地的减少是影响 SDG15.3.1 的最大因素。

参考文献:

- [1] United Nations. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Resolution adopted by the general assembly, seventieth session A/RES/70/1[EB/OL]. 2015. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>.
- [2] DONG L. China's renewed perception of global environmental governance[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2020, 18(4): 319-323.
- [3] OPOKU A, DENG J Y, ELMUALIM A, et al. Sustainable procurement in construction and the realisation of the sustainable development goal (SDG) 12[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: e134294.
- [4] AROWOLO A O, DENG X Z, OLATUNJI O A, et al. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria[J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 597-609.
- [5] WANG Y C, ZHAO J, FU J W, et al. Effects of the Grain for Green Program on the water ecosystem services in an arid area of China-Using the Shiyang River Basin as an example[J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 659-668.
- [6] 蒋小芳,段翰晨,廖杰,等.基于多模型的黑河中游甘临高地区土地利用情景模拟[J].农业机械学报, 2022, 53(9): 178-188.
- JIANG X F, DUAN H C, LIAO J, et al. Multi-model-based simulation of different land use scenarios in Gan-Lin-Gao area in middle reaches of Heihe River[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 178-188.
- [7] PENG K F, JIANG W G, LING Z Y, et al. Evaluating the potential impacts of land use changes on ecosystem service value under multiple scenarios in support of SDG reporting: A case study of the Wuhan urban agglomeration [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 307: e127321.
- [8] LI C, WU Y M, GAO B P, et al. Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: e108328.
- [9] ZHOU Z X, SUN X R, ZHANG X T, et al. Inter-regional ecological compensation in the Yellow River Basin based on the value of ecosystem services[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 322: e116073.
- [10] SUN L, YU H J, SUN M X, et al. Coupled impacts of climate and land use changes on regional ecosystem services[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 326(Pt A): e116753.
- [11] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [12] 徐新良,刘纪远,张增祥,等.中国 5 年间陆地生态系统空间分布数据集(1990—2010)内容与研发[J].全球变化数据学报(中英文), 2017, 1(1): 52-59, 175-182.
- XU X L, LIU J Y, ZHANG Z X, et al. A time series land ecosystem classification dataset of China in five-year increments (1990—2010) [J]. Journal of Global Change Data and Discovery, 2017, 1(1): 52-59, 175-182.
- [13] LIU J M, XIAO B, JIAO J Z, et al. Modeling the response of ecological service value to land use change through deep learning simulation in Lanzhou, China [J]. The Science of the Total Environment, 2021, 796: e148981.
- [14] 赵先超,田一豆,张潇湘.长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析[J].水土保持学报, 2023, 37(5): 215-225.
- ZHAO X C, TIAN Y D, ZHANG X X. Spatio-temporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value in ChangzhuTan urban agglomeration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 215-225.
- [15] ZHANG Z Y, LI J X, LU Y, et al. Temporal and spa-

- tial changes in land use and ecosystem service value based on SDGs' reports: A case study of Dianchi Lake Basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(11): 31421-31435.
- [16] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.
- [17] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. *中国科学数据*, 2019, 4(1): 90-96.
- XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s)[J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 90-96.
- [18] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.
- XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 35-43.
- [19] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(1): 378-387.
- LI J, YANG D H, WU F Z, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming city based on PLUS and InVEST models[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1): 378-387.
- [20] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2003, 33(1): 72-80.
- LI K R, WANG S Q, CAO M K. Vegetation and soil carbon storage in China [J]. *Science in China, Ser D*, 2003, 33(1): 72-80.
- [21] 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.
- XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [22] TIAN Y L, XU D X, SONG J X, et al. Impacts of land use changes on ecosystem services at different elevations in an ecological function area, Northern China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 140: e109003.
- [23] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 10-13.
- XIE G D, XIAO Y, ZHEN L, et al. Study on ecosystem services value of food production in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 10-13.
- [24] HOU J, QIN T L, LIU S S, et al. Analysis and prediction of ecosystem service values based on land use/cover change in the Yiluo river basin [J]. *Sustainability*, 2021, 13(11): e6432.
- [25] XIAO Y, HUANG M D, XIE G D, et al. Evaluating the impacts of land use change on ecosystem service values under multiple scenarios in the Hunshandake region of China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 850: e158067.
- [26] XIANG M S, WANG C J, TAN Y X, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Western Sichuan Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: e8114.
- [27] HE C Y, ZHANG D, HUANG Q X, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2016, 75(C): 44-58.
- [28] 邹桃红, 陈鹏, 刘家福, 等. 不同土地利用情景下四平市生态系统碳储量时空演变[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(10): 5508-5518.
- ZOU T H, CHEN P, LIU J F, et al. Spatio-temporal dynamics of territorial ecosystem carbon storage under different land use scenarios in Siping City [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(10): 5508-5518.
- [29] 刘雅璇, 彭秋志, 黄培依, 等. 川西高原土地利用碳储量估算及多情景预测[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 207-219.
- LIU Y X, PENG Q Z, HUANG P Y, et al. Estimation and multi scenario prediction of land use carbon storage in western Sichuan Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 207-219.
- [30] ZHANG Z, JIANG W G, PENG K F, et al. Assessment of the impact of wetland changes on carbon storage in coastal urban agglomerations from 1990 to 2035 in support of SDG15.1 [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 877: e162824.
- [31] SIMS N C, ENGLAND J R, NEWNHAM G J, et al. Developing good practice guidance for estimating land degradation in the context of the United Nations Sustainable Development Goals [J]. *Environmental Science and Policy*, 2019, 92: 349-355.
- [32] 陈相标, 丁文荣, 李孝川. 滇中城市群土地利用转型及生态系统服务价值交叉敏感性分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 233-241.
- CHEN X B, DING W R, LI X C. Analysis of cross-sensitivity of land use transition and ecosystem service value of urban agglomeration in central Yunnan [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6): 233-241.
- [33] KAVVADA A, METTERNICHT G, KERBLAT F, et al. Towards delivering on the sustainable development goals using earth observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: e111930.