

基于土地利用变化情景的云贵地区生态系统碳储量评估

李灿锋¹, 方林^{2*}

(1. 中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650100; 2. 安徽农业大学 公共管理系, 安徽 合肥 230036)

摘要:基于 InVEST 模型,并耦合 Markov-PLUS 模型对云贵地区历史及未来情景下生态系统碳储量的时空演变趋势进行系统分析。结果表明,1)云贵地区以林草地为主,1980—2020 年,林草地面积均呈现减少趋势,其中林地面积减少 1 455.47 km²,草地面积减少 2 007.76 km²;道路铺设、海拔地形、经济发展是造成区域土地利用变化的主要原因;2)历史情景下(1980—2020 年)云贵地区碳储量呈现先减后增再减、整体减少的动态变化趋势,40 a 间共减少 0.47 亿 t;空间上呈现东西高、中部低的空间分布格局;3)2030—2060 年,生态保护情景对于云贵地区生态系统碳储量的提升极有助益,较之于 2020 年,陆地生态系统碳储量提高 0.48 亿 t;耕地保护情景与自然发展情景下区域生态系统碳储量均有明显减少,耕地保护情景并不利于云贵地区碳储量提升。研究结果可为云贵地区生态系统治理与保护提供理论支持。

关键词:土地利用;情景模拟;InVEST 模型;碳储量;PLUS 模型

中图分类号:S718.52

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)05-0034-09

Ecosystem Carbon Storage Assessment Based on Land Use Change Scenarios: A Case Study of Yunnan-Guizhou Region

LI Can-feng¹, FANG Lin^{2*}

(1. Kunming Comprehensive Survey Center of Natural Resources, China Geological Survey, Kunming 650100, Yunnan, China;
2. Department of Public Administration, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China)

Abstract: The Yunnan-Guizhou region is an important ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River and one of the important carbon storage areas in China. Exploring the spatial and temporal characteristics of regional ecosystem carbon storage and their evolution trends under different scenarios in the future is of importance for coordinating the relationship between regional economic development, resource assurance and ecological protection. Based on the InVEST model and coupled with the Markov-PLUS model, this study systematically analyzed the spatial and temporal evolution trends of ecosystem carbon stocks in the Yunnan-Guizhou region under historical and future scenarios. We found that 1) Yunnan-Guizhou region was dominated by forest and grassland. During 1980—2020, the area of forest and grassland all showed a trend of decrease, among which the forest area decreased by 1 455.47 km² and the grassland area decreased by 2 007.76 km². Road construction, altitude topography, and economic development were the main reasons for regional land-use changes. 2) Under the historical scenario (1980—2020), the carbon storage in the region showed a dynamic trend of decreasing-increasing-decreasing, with an overall decrease of 0.47 billion t in 40 years. Spatially, the spatial distribution pattern was high in the east and west areas and low in the central part of the region. 3) From 2030 to 2060, the ecological conservation scenario would be extremely beneficial to the enhancement of carbon storage in the ecosystem of the region, and the carbon storage of terres-

收稿日期:2022-06-14 修回日期:2022-07-21

基金项目:国家自然科学基金云南联合基金重点项目(U2102209)。

第一作者:李灿锋。研究方向:土地利用和碳排放监测。E-mail:licanfeng@mail.cgs.gov.cn

*通信作者:方林。研究方向:土地利用及土地生态。E-mail:183825641@qq.com

trial ecosystem would increase by about 0.48 billion t compared with that in 2020. The carbon storage of regional ecosystem under the arable land conservation scenario and natural development scenario would significantly reduce, and the arable land conservation scenario would not be beneficial to the enhancement of carbon storage in the region. The results of the study can provide theoretical support for ecosystem governance and conservation in the Yunnan-Guizhou region.

Key words: land use; scenario simulation; InVEST model; carbon storage; PLUS model

2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和是我国政府立足于中华民族永续发展及应对气候变化引发的全球性生态环境问题所做出的庄严承诺^[1-3]。陆地生态系统作为全球碳循环的重要组成部分,在调节和缓和全球气候问题方面发挥着重要作用^[4]。“双碳”目标的实现及全球性生态环境问题的解决离不开陆地生态系统碳储量的保护与提高^[5]。土地是承载人类生产经营性活动的核心场所^[6],人类活动的显性后果将直接作用于陆地表面^[7],对土地利用类型、格局、强度产生密切影响,进而改变区域碳储量的时空特征,并对区域碳汇能力产生巨大影响^[8-11]。因此基于土地利用视角开展区域生态系统碳储量的时空动态研究,并就区域不同发展目标开展模拟预测,对于加强区域生态治理及促进双碳目标的实现具有重要意义。

碳储量核算是生态系统碳汇保护以及相关政策制定的基础^[12],当前生态系统碳储量量化的研究方法主要包括实测法^[13]、遥感估算法^[14]、模型估算法^[15]。实测法在研究精度上具有显著优势,但这一方法依赖于大量人力物力投入,耗时相对较长,难以大面积地推广使用。近年来,伴随着3S技术的发展,依靠卫星遥感及模型推演,开展区域碳储量时空演化的动态评估得以普及^[16],主要包括向量自回归模型^[17]、高精度表面建模模型^[18]、通用集成生物地球化学建模系统^[19]以及InVEST模型^[20]。其中InVEST模型是目前最成熟、应用最广泛的生态系统碳储量评估模型之一^[21]。InVEST模型中的碳模块以土地利用数据为输入基础,同时结合实测所得的陆地碳库数据,有效保证了研究精度,同时提升了实验的可操作性^[4]。

已有研究证明,土地利用变化通过改变地球表面的生物物理化学过程及其能量收支和物质循环,进而对区域碳储量时空格局产生剧烈影响^[22-23]。洞悉土地利用变化与区域碳储量时空变化的关系对于生态系统碳汇管理具有重要意义。但以往基于土地利用视角的生态系统碳储量变化研究多集中在生态系统碳储量的历史变化上,对未来陆地生态系统碳储量的时空变化研究还不够深入^[24-25]。考虑到政策实施效果的时间滞后性,单纯从历史情景思考区域

土地利用变化与生态系统碳储量变化的时空关系难以满足生态保护与治理的实践需求。生态管理实践迫切需要采用前瞻性视角对当前区域生态变化开展模拟预测研究。现有的土地利用预测模型包括CA-Markov^[26]、CLUE-S^[27]、PLUS^[28]等,其中CA-Markov模型是当前成熟度最高的土地利用预测模型,但在模拟精度及情景模拟方面则有所欠缺。相对而言,基于随机森林算法的CLUE-S模型在模拟精度及情景分析上更具优势,但该模型主要适用于县域微观尺度的土地利用预测,对于较大区域的预测模拟并不适用,且难以洞察单个土地利用类型转换的驱动背因。而基于斑块生成模拟的PLUS模型,可以有效避免以上问题,依托自身强大的数据挖掘能力,实现高精度景观格局变化模拟的同时,通过耦合自然地理、社会经济等多指标因子分析土地利用演化的驱动背因,这对于系统分析未来不同情景下的区域生态系统碳储量时空变化,加强区域生态及碳治理具有重要的理论指导作用。

云贵地区作为我国西南地区重要的生态安全屏障,生态地位十分突出,但近年来受全球气候变暖与人类活动影响,整个地区的生态环境系统正变得更加脆弱与敏感,各类资源环境问题不断凸显,对区域生态系统碳储量的维持与平衡造成了严重影响。现有针对云贵地区生态系统碳储量时空研究并不多见,特别是缺少对区域不同发展目标开展的情景预测研究。因此本研究分析1980—2020年间云贵地区土地利用的变化特征,揭示云贵地区土地利用变化驱动因素;分析历史情景下云贵地区生态系统碳储量变化的时空特征;创建不同发展情景,探究未来情景下区域碳储量的演化规律。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云贵地区地处中国西南部,是我国四大高原之一云贵高原的主体部分(图1),云贵地区受来自西太平洋及印度洋的暖湿气流影响,雨热条件优越,林草地广布,是我国西南乃至全国重要的碳汇地之一^[3-4]。此外域内地形地貌及水文地质条件复杂,云贵地区亦是我国最大的喀斯特地貌区之一,生态环

境敏感脆弱。

1.2 数据来源与预处理

所需的 5 期(1980、1990、2000、2010、2020 年)土地利用数据(图 2)来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),该数据空间分辨率为 30×30 m,数据精度达 90%;DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);公路及铁路数据来源于开放街道(<https://www.openhistoricalmap.org>);河流水系数据集、人口空间分布及 GDP 空间分布数据集源自资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。所有栅格数据均通过 ArcGIS 重采样工具,将空间分辨率统一为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,投影统一为 Krasovsky_

1940_Albers。

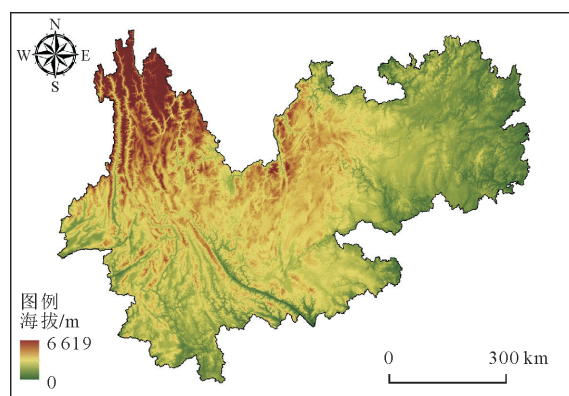


图 1 研究区区位

Fig. 1 Location map of the study area

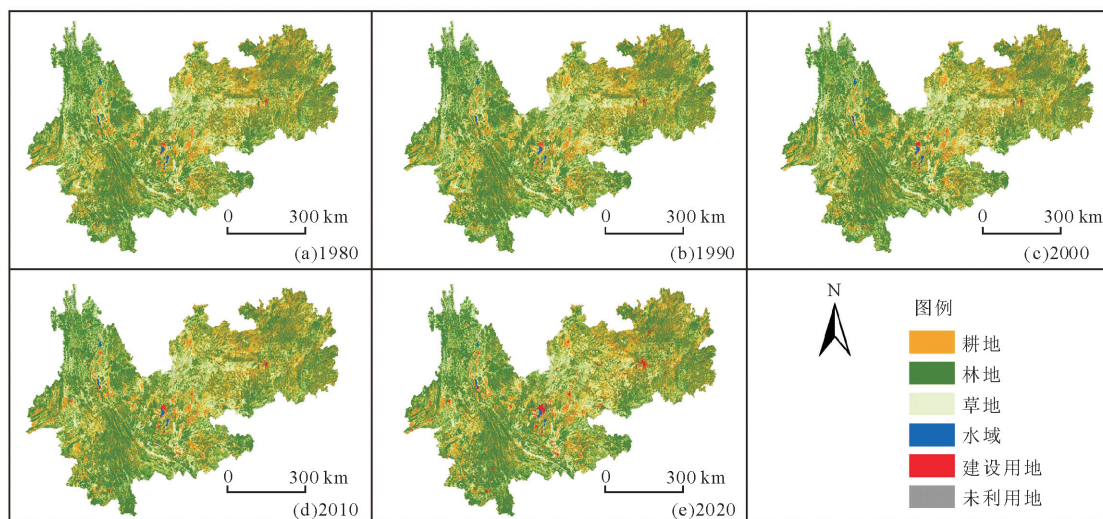


图 2 1980—2020 年云贵地区土地利用现状

Fig. 2 Land use status map of Yunnan-Guizhou region from 1980 to 2020

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用模拟预测 PLUS 模型是一种基于斑块生成模拟的新型土地利用预测软件,得益于先进的算法及强大的数据挖掘能力,在图层可视化及区域土地利用变化驱动背因的刻画方面具有突出优势^[29],本研究通过耦合 Markov 模型对云贵地区的土地利用变化情况开展预测模拟。

1)Extract Land Expansion:以 2010 年土地利用数据为基期,提取 2010—2020 年云贵地区的土地利用扩张数据。

2)Land Expansion Analysis Strategy:考虑到数据的可获取性,依据 PLUS 模型指南^[30],围绕自然地理(海拔 ELE、坡度 SLO、坡向 SLA)、可达性(距离铁路的距离 DTR、距离公路的距离 DTH)、社会经济(人口规模 PS、经济发展 GDP)3 个方面构建土地利用变化驱动因素指标体系。

3)CA based on Multiple Random Seeds:通过耦合 Markov 模型对云贵山区土地需求展开预测,

并基于 PLUS 模型中 CARS 模块开展土地利用模拟预测。其中多情景模拟分析详见 1.3.2。

4)模型精度验证:采用 Kappa 系数及 FoM 系数对模型模拟结果进行验证。

1.3.2 情景设置 鉴于土地利用变化对于区域碳储量的重要影响^[31],结合云贵地区的发展阶段及生态功能定位,构建 3 种不同发展情景,即自然发展情景(natural development scenarios,NDS)、生态保护情景(ecological protection scenarios,EPS)、耕地保护情景(cultivated land protection scenario,CPS),对未来云贵地区的土地利用及生态系统的碳储量动态变化展开分析。

1)自然发展情景:是一种基准情景,用以对比不同政策倾向干预下的生态系统碳储量变化。在没有外力干涉情况下,按照区域土地利用历史演进趋势,基于现有经济发展及生态保护政策,各土地利用类型转移概率不变的情况下,模拟 2030 年云贵地区土地利用变化情况。

2)生态保护情景:设置生态保护的政策制定倾向,以生态保护为首要目的,减缓农用地退化,开展植树造林活动,提升区域林草水等生态空间的占比,限制城镇用地无序扩张,模拟植被封禁管护、退耕还林还草等生态措施后果,将林草地转出率下降 30%,将耕地向林草地转出率提高 5%,防止建设用地侵吞现有的林草等碳汇空间。

3)耕地保护情景:考虑到耕地在云贵地区约 20%的占比,以及不断下降的整体趋势,本研究设置了以耕地保护为目的的未来发展情景,在土地转移的参数设置上具体表现为将耕地向建设用地转移概率降低 30%;同时将林地、草地、建设用地向耕地的转入概率提高 5%。防止建设用地的无序增长占用过多的耕地。

此外本研究根据模型参数设置要求,并参考前

人研究成果^[29]以及情景模拟的具体要求,设置云贵地区土地利用转移成本矩阵(表 1)。

1.3.3 碳储量评估 利用 InVEST 模型中 Carbon module 对云贵地区碳储量时空动态进行评估,该模块是根据常见地上生物、地下生物、死亡有机质、土壤有机质 4 大碳库对云贵地区碳储量进行估算^[32],模型表达式为

$$C_{total}=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead}$$
 (3)

式中: C_{total} 为总碳储量($t \cdot hm^{-2}$); C_{above} 为地上碳储量; C_{below} 为地下碳储量; C_{soil} 为土壤碳储量; C_{dead} 为死亡有机质碳储量。碳储总量由碳密度与各地类土地利用面积相乘所得。

在碳库数据的获取上,根据已有研究成果^[33-36]及研究区实际情况,优先选取山区较多、同纬度、相邻地区的碳密度数据,以保证数据的可靠真实(表 2)。

表 1 云贵地区不同情景下土地利用转移成本矩阵

Table 1 Land use transfer cost matrix under different scenarios in Yunnan-Guizhou region

| | NDS | | | | | | EPS | | | | | | CPS | | | | | |
|---|-----|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F | A | B | C | D | E | F | A | B | C | D | E | F |
| A | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| D | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| F | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

注:A、B、C、D、E、F 分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。NDS 为自然发展情景;EPS 为生态保护情景;CPS 为耕地保护情景。0 代表地类间不可转移,1 表示可以转移。

表 2 云贵地区土地利用各部分碳密度

Table 2 Carbon density of land use components

in Yunnan-Guizhou region ($t \cdot hm^{-2}$)

| 土地利用类型 | C_{above} | C_{below} | C_{dead} | C_{soil} |
|--------|-------------|-------------|------------|------------|
| 耕地 | 4.02 | 1.00 | 2.11 | 89.18 |
| 林地 | 22.62 | 18.03 | 2.78 | 126.75 |
| 草地 | 3.60 | 11.70 | 7.28 | 90.43 |
| 水域 | 1.59 | 0.00 | 3.98 | 64.03 |
| 建设用地 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 43.71 |
| 未利用地 | 0.00 | 0.64 | 0.96 | 28.42 |

2 结果与分析

2.1 云贵地区土地利用时空特征及驱动因素分析

由图 3 可见,云贵地区主以林地为主,占比达 55%左右;草地与耕地相近,占 20%左右;水域及建设用地及未利用地的面积占比较小。1980—2020 年间,区域耕地面积持续减少,2010 年后减势增加;1980—2000 年间林地面积呈现减少趋势,但减势较缓,2000—2010 年间,区域林地面积增长明显,但 2010—2020 年间,区域林地面积呈较大幅度的减少;建设用地及水域面积增势明显,特别是建设用地

占比由 1980 年的 0.41%上升到 2020 年的 1.28%;未利用地呈现减少趋势。40 a 间林地面积减少 1 455.47 km^2 ,草地面积减少 2 007.76 km^2 ,耕地面积减少 3 168.04 km^2 ,而建设用地面积增长达 4 884.81 km^2 。

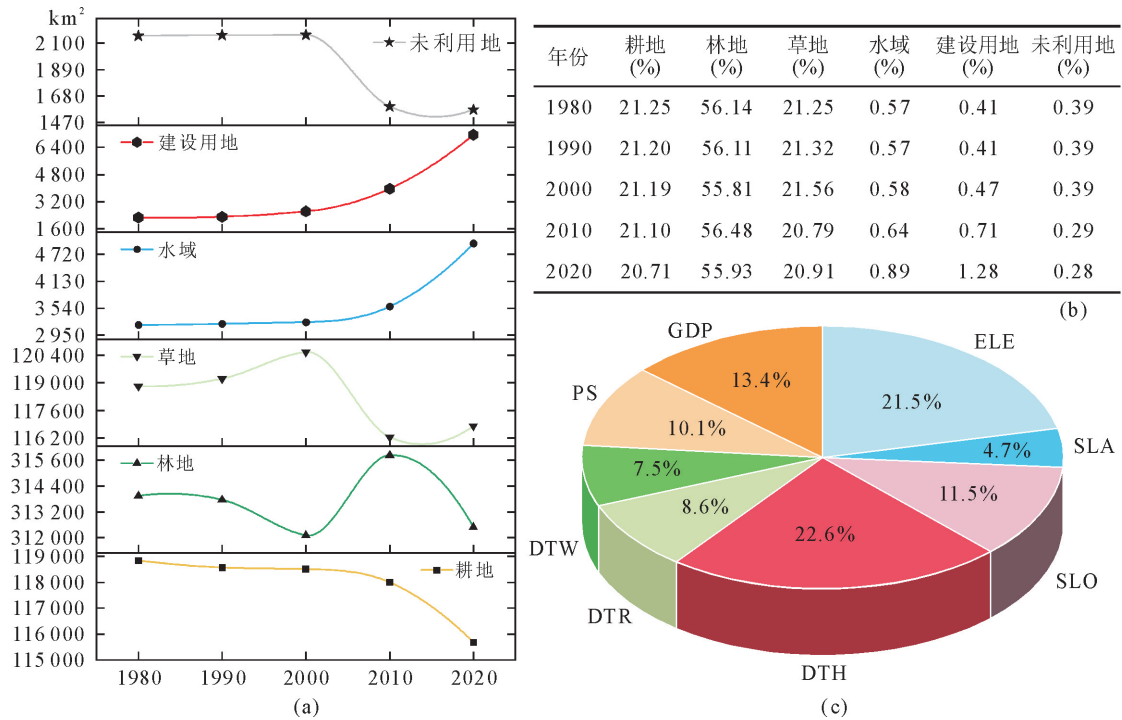
基于 2010—2020 年土地利用变化,并耦合区域自然地理,可达性及社会经济发展等多指标因子,开展云贵地区 2030—2060 年土地利用变化的多情景模拟,研究发现 Kappa 系数达 0.87,FoM 系数达 0.19,整体精度达 0.92,说明模型精度较高,模拟结果可靠。此外,研究发现造成云贵地区土地利用变化的驱动因子贡献率大小排序为:距离公路的距离(DTH)>海拔(ELE)>地区生产总值(GDP)>坡度(SLO)>人口规模(PS)>距离铁路的距离(DTR)>距离湖泊的距离(DTW)>坡向(SLA)。这表明,公路铺设、海拔差异及经济发展是造成区域土地利用变化的主要影响因素。

2.2 历史情景下云贵地区碳储量时空变化

由图 4 可知,云贵地区 1980、1990、2000、2010、2020 年碳储量分别为 78.69、78.67、78.56、78.72

亿 t 及 78.22 亿 t, 在近 40 a 间共计下降了近 0.47 亿 t。区域碳储量变化呈现整体减少趋势, 但 2000

年前减少趋势较缓, 2000—2010 年间呈现明显的增长趋势, 但在 2010 年后, 区域的碳汇储量大幅下降。



(a) 为 1980—2020 年间云贵地区土地利用变化趋势; (b) 为 1980—2020 年间云贵地区土地利用面积占比变化表; (c) 为云贵地区土地利用变化驱动因素贡献率。ELE, 海拔; SLO, 坡度、坡向; SLA, DTR, 距离铁路的距离; DTH, 距离公路的距离; DTW, 距离湖泊的距离; PS, 人口规模; GDP, 经济发展

图 3 云贵地区土地利用时空特征及驱动因素

Fig. 3 Spatial and temporal characteristics of land use in Yunnan and Guizhou region and the driving factors

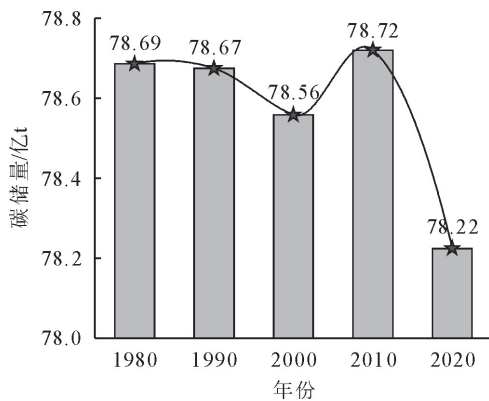


图 4 1980—2020 年间云贵地区碳储量变化

Fig. 4 Changes in carbon storage in Yunnan and Guizhou region between 1980 and 2020

从云贵地区碳储量的空间分布特征上看 (图 5), 该区域碳储量高值区主要分布在西部的横断山区以及贵阳市的东部的低山丘陵区, 低值区主要分布在云贵两省交界的地区。该地区海拔较低, 以草地及耕地为主, 经济发展相对迅速, 包含昆明、六盘水、贵阳等的中国西部较大规模的城市。因此云贵地区的碳储量空间分布主要呈现东西高, 中间低的空间分布格局。尽管这一空间分布格局在六盘

水、贵阳等大城市附近; 相反, 1980—2020 年云贵地区碳储量增加区域主要分布在研究区西边的横断山脉附近, 近 40 a 间碳储量增加区域的面积为 268.19 万 hm^2 , 占比达 4.80%; 值得注意的是, 空间上六盘水—贵阳一带既是云贵地区碳储量增加的主要区域, 同时也是该地区碳储量减少的核心地带, 六盘水—贵阳地区碳储量空间变化十分明显。

2.3 未来情景下云贵地区碳储量时空变化

通过对云贵地区 2030、2040、2050、2060 年 4 个时期的土地利用及碳储量时空变化开展情景模拟 (图 6), 研究发现生态保护情景对于云贵地区的碳储量提升有着很大的助益, 其中 2030、2040、2050、2060 年 4 个时期的碳储量分别为 78.69、78.68、78.72、78.70 亿 t, 呈现先增后减、整体增加的趋势; 耕地保护情景下, 2030—2060 年, 碳储量下降趋势明显, 30 a 间下降 0.18 亿 t; 自然发展情景下, 区域碳储量呈现先增加后减少的趋势, 特别是 2050 年后, 区域碳储量下降明显。

未来不同情景下区域生态系统碳储量仍呈现东西高, 中间低的空间分布格局 (图 7)。就不同情景下碳储量减少区域面积变化而言, 生态保护情景下,

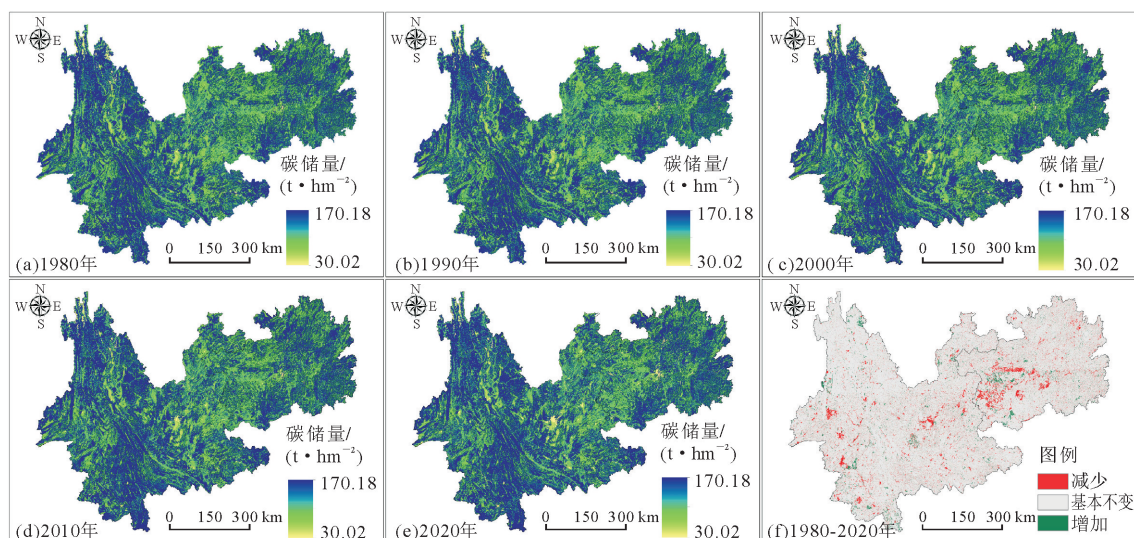


图5 1980—2020年间云贵地区碳储量空间变化

Fig. 5 Spatial changes of carbon storage in Yunnan-Guizhou region during 1980—2020

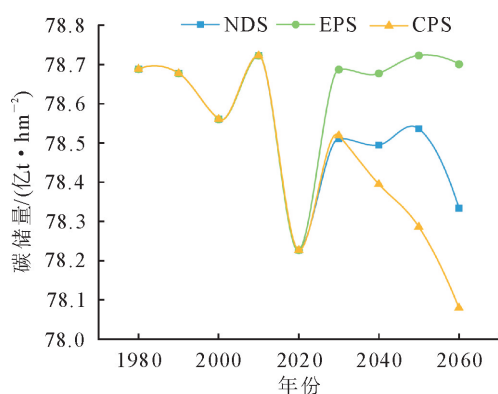


图6 1980—2060年间云贵地区碳储量变化

Fig. 6 Changes in carbon stocks in Yunnan and Guizhou region during 1980—2060

碳储量减少区域为 2.07 万 km^2 ; 自然发展情景下, 碳储量减少区域 3.35 万 km^2 ; 耕地保护情景下, 碳储量减少区域 3.22 万 km^2 。而不同情景下碳储量增加区域占比变化不明显, 其中自然情景下碳储量增加区域占 0.05%, 生态保护情景下碳储量增加区域占 0.04%, 耕地保护情景碳储量增加区域占 0.05%。造成这一现象的可能原因是 1980 年云贵地区生态系统碳储量处于历史较高水平, 而生态保护情景下 2060 年云贵地区碳储量亦处于较高水平, 因此二者碳储量空间分布的重叠度最高, 即变化不显著区域最多。通过对比 1980—2060 年不同情景下变化不显著区域面积, 发现生态保护情景下重叠面积最高 (51.76 万 km^2), 耕地保护情景下次之 (50.17 万 km^2), 自然发展情景下重叠面积最低 (49.54 万 km^2), 这从侧面印证了本研究的猜测。

3 结论与讨论

3.1 结论

云贵地区土地利用主要以林草地为主, 耕地次之, 1980—2020 年间, 林草地均有所下降, 耕地面积持续减少, 建设用地持续上升, 其中林地面积减少 1 455.47 km^2 , 草地面积减少 2 007.76 km^2 , 耕地面积减少 3 168.04 km^2 , 而建设用地面积增长达 4 884.81 km^2 。造成区域土地利用变化的主要驱动背因为道路铺设、海拔地形及经济发展。

1980—2020 年, 云贵地区碳储量呈现先减后增再减, 整体减少的动态变化趋势, 40 a 间共减少 0.47 亿 t; 区域碳储量呈现东西高, 中间低的空间分布格局; 近 40 a 间碳储量增加区域主要分布于横断山区, 碳储量减少区域主要分布在昆明、贵阳、六盘水、保山等城市附近, 其中六盘山贵阳一带, 碳储量增减矛盾突出。

生态保护情景对于云贵地区生态系统碳储量提升有着明显的促进作用, 但该情景下碳储量并非持续提升, 2050 年后呈现下降趋势; 耕地保护情景不利于区域生态系统碳储量的保护, 加强区域耕地保护, 会带来区域生态系统碳储量的进一步下降, 需协调耕地保护与生态保护之间的矛盾关系。

3.2 讨论

3.2.1 历史情景下云贵地区碳储量变化 研究发现, 在过去的 40 a 间, 区域碳储量呈现先减后增再减、整体减少的趋势。研究初期 (1980—1990 年), 云贵地区经济发展缓慢, 对于建设用地的需求较低, 域内生态空间基本完整, 区域碳储量处于历史较高

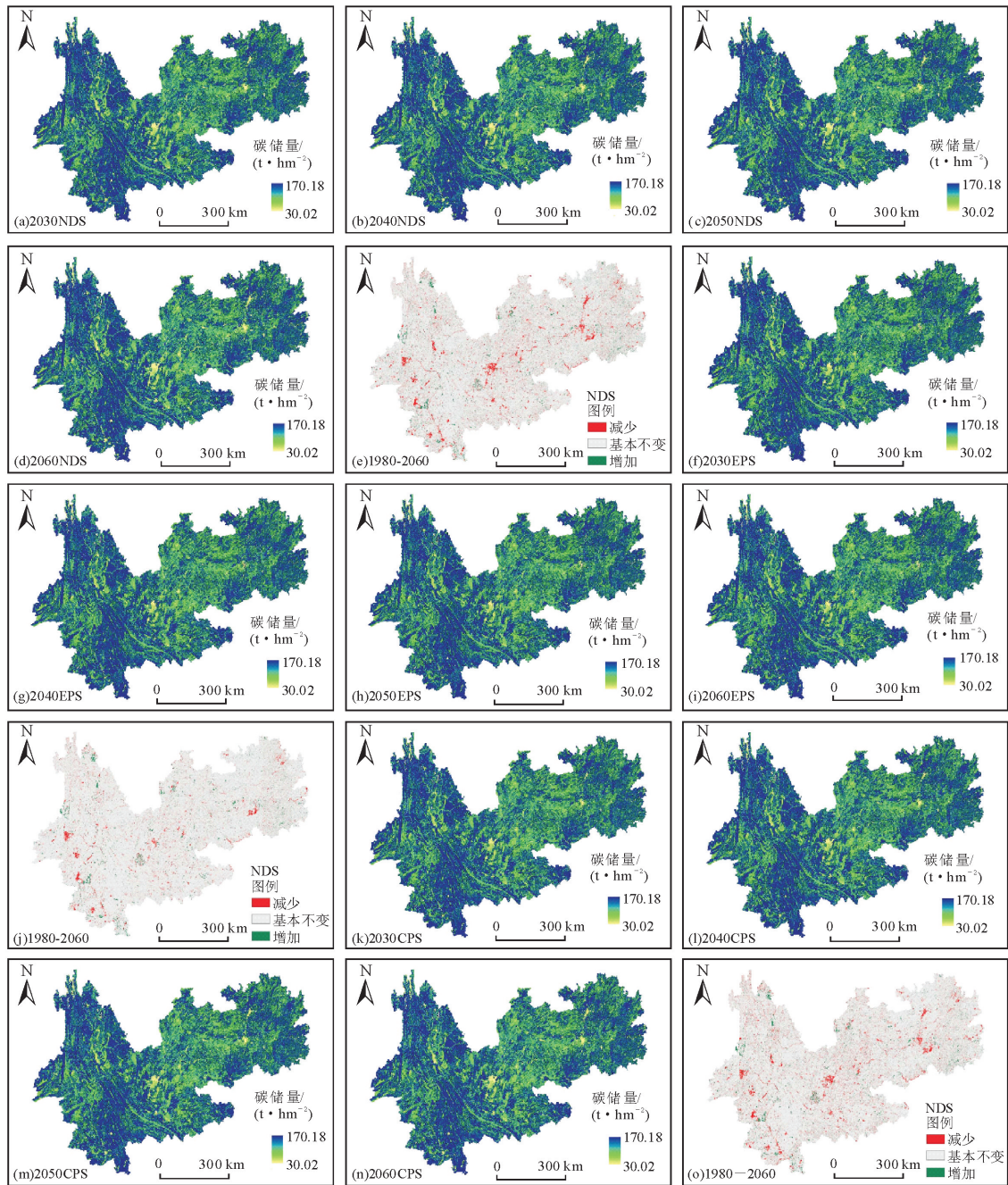


图 7 2030—2060 年间云贵地区碳储量空间变化

Fig. 7 Spatial changes of carbon storage in Yunnan and Guizhou region during 2030—2060

水平;研究中期(1990—2010 年),云贵地区碳储量波动较大,因为期间正值我国改革开放全面实行,内陆经济发展迅速,城市化进程加快,对于林木资源需求增多,致使该区域碳储量在 1990—2000 年间呈现较大幅度的减少,而 2000 年后,为应对国家范围生态普遍恶化的严峻趋势,政府大力推行退耕还林政策,10 a 的发展,云贵地区生态明显好转,区域碳储量达到历史最高水平。但研究末期(2010—2020 年)迫于云贵地区经济的普遍上行,域内生态系统碳储量呈现快速下降的趋势。尽管已有研究表明区域生态系统碳储量的变化受土地利用、地形、土壤、生

物、气候、社会经济等诸多因素影响,但在区域尺度下,土地利用方式对区域生态系统服务碳储量变化的影响则更为显著^[25-26]。本研究发现造成云贵地区土地利用变化的主要驱动因素是交通可达性,海拔地形差异及经济发展。低海拔地区及路网密集地区通常经济发展迅速,而经济的快速发展又会加剧区域的人类活动,三者共同影响和驱动了云贵地区的土地利用变化,进而导致该地区耕地的持续下降,建设用地的快速增长,林草地退化,以至于 2010 年后云贵地区碳储量大幅下降。从空间上看,云贵地区生态系统碳储量的大致呈现东西高,中间低的空间

分布格局,近40 a间,碳储量的减少区域主要集中在保山、临沧、昆明、六盘水、贵阳等大城市附近;而碳储量的增加区域主要分布于横断山区;值得注意的是六盘水-贵阳地区的碳储量增减矛盾突出,该地区矿产资源丰富,工业较为发达,且地形以喀斯特为主,环境脆弱,容易导致区域碳储量的相对减少。综合而言,结合区域历史情景下碳储量变化的时空特征,未来应加强昆明、六盘水、贵阳等大城市的建设用地扩张的管理,防止其进一步侵占当地生态空间。而为防止区域生态系统碳储量进一步下滑,应积极调整现有发展政策,协调好区域资源保障、经济发展、生态保护之间的关系,并以云贵两省接壤的喀斯特山区为重点,加强该地的生态治理。

3.2.2 未来情景下云贵地区碳储量变化 基于Markov-PLUS模型对区域2030—2060年3种不同发展情景下的生态系统碳储量变化开展评估,本研究发现生态保护情景能够有效巩固并提升区域生态系统服务碳储量,但该情景下云贵地区生态系统服务碳储量并不会持续提升,相反伴随着时间的发展,碳储量会呈现波动变化,2050年后云贵地区的生态系统碳储量呈现下降趋势,这表明提升植被覆盖率,加强林草地保护,能在一定时间内提升区域生态系统碳储量。但随着时间的推移,其提升效果逐渐饱和。这一发现也印证了HONG等^[37]此前的研究成果。但云贵地区的碳储量演化,将会对长江流域乃至全国生态系统固碳能力产生重要影响。就本研究预测结果而言,单纯通过调整土地利用格局增加碳汇区域面积的方式来提高区域碳储量,将在2030年左右达到峰值。因此,为保证“双碳”目标的实现,稳步提升云贵地区的碳储量,除优化土地利用格局,稳固现有碳汇空间面积外,还需要着力提升云贵地区植被、草地、耕地以及土壤碳汇的碳密度。此外,就另外2种情景模拟的结果而言,耕地保护情景对于区域生态系统碳储量的提升并没有助益,相反较之于区域自然发展情景,区域碳储量还呈现进一步下降趋势,这与朱文博等^[4]关于太行山淇河流域碳储量变化的研究结果差别较大,这是由于云贵地区与淇河流域显著的地形地貌差异造成的,云贵地区山区广布,尽管耕地面积占比达20%左右,但多为梯田,而这些梯田多分布于林草广布的山腰河谷区^[38]。未来加强区域的耕地保护,势必会侵占部分的林草地,进而引发碳储量较大幅度的下滑;相较之下,淇河地区除上游部分低山丘陵外,其余地区多为冲积扇平原,耕地保护反而可以增强低海拔地区的固碳能力。但粮食安全问题关系国计民生,保护环境不可以牺牲粮食安全为代价,未来可以对农田生

态系统的灌溉方式^[39]、耕作方式^[40]、施肥方式^[41]做出调整以提升耕地的固碳潜力,进而保障区域农田生态系统的碳平衡。

3.2.3 不足之处 本研究采用新型土地模拟软件PLUS模型,并依靠InVEST模型对云贵地区历史及未来情景下碳储量的时空特征展开分析,为区域生态系统治理,碳汇空间保护提供了一个前瞻性的视角。但受限于模型及方法限制,在未来情景设置中主要依赖于对土地利用变化的调整,未来研究应结合区域社会经济发展,自然环境变迁的多种因素,优化情景模拟结果,使之更好服务于生态管理实践。

参考文献:

- [1] 郭芳,王灿,张诗卉.中国城市碳达峰趋势的聚类分析[J].中国环境管理,2021,13(1):40-48.
GUO F, WANG C, ZHANG S H. Cluster analysis of carbon emissions peaking trends in Chinese cities[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(1): 40-48. (in Chinese)
- [2] 欧阳志远,史作廷,石敏俊,等.“碳达峰碳中和”:挑战与对策[J].河北经贸大学学报,2021,42(5):1-11.
- [3] 庄贵阳.我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J].人民论坛,2021(18):50-53.
- [4] 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.
ZHU W B, ZHANG J J, CUI Y P, *et al.* Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: a case study in Qihe River basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 446-459. (in Chinese)
- [5] 李瑾璞,夏少霞,于秀波,等.基于InVEST模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(7):854-861.
LI J P, XIA S X, YU X B, *et al.* Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem in Hebei Province Based on InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(7): 854-861. (in Chinese)
- [6] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J].地理学报,2014,69(1):54-63.
WU L N, YANG S T, LIU X Y, *et al.* Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 54-63. (in Chinese)
- [7] 李佩君,左德鹏,徐宗学,等.基于地形梯度的雅鲁藏布江流域土地利用及景观格局分析[J].山地学报,2022,40(1):136-150.
LI P J, ZUO D P, XU Z X, *et al.* Land use cover and landscape patterns based on terrain in the Yarlung Tsangpo River basin, China[J]. Mountain Research, 2022, 40(1): 136-150. (in Chinese)
- [8] 李秀彬.全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J].地理学报,1996,51(6):553-558.

- [9] 程腾辉,范文义,吴国明.多时相 PolInSAR 数据土地覆盖类型分类研究[J].森林工程,2022,38(5):10-17.
- [10] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [11] 陈媛媛,雷鸣,王泽远,等.基于 Sentinel 卫星影像的土地利用类型提取:以丽水市莲都区为例[J].森林工程,2022,38(2):54-61.
- [12] 於冉,黄贤金.碳排放峰值控制下的建设用地扩展规模研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(7):66-72.
YU R, HUANG X J. Research on the expansion scale of construction land under the restriction of carbon emission peak[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(7):66-72. (in Chinese)
- [13] DOBSON M C, CRISPO M, BLEVINS R S, *et al.* An assessment of urban horticultural soil quality in the United Kingdom and its contribution to carbon storage[J]. Science of The Total Environment, 2021, 777:146199.
- [14] LASSLOP G, HANTSON S, HARRISON S P, *et al.* Global ecosystems and fire: Multi-model assessment of fire-induced tree-cover and carbon storage reduction[J]. Global Change Biology, 2020, 26(9):5027-5041.
- [15] LIANG Y, LIU L, HUANG J. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China[J]. PLoS One, 2017, 12(2):0172494.
- [16] ZHU X J, YU G R, HE H L, *et al.* Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: results from upscaling network observations[J]. Global and Planetary Change, 2014, 118:52-61.
- [17] WU S N, LI Y Q, YU D P, *et al.* Analysis of factors that influence forest vegetation carbon storage by using the VAR model: a case study in Shanxi Province[J]. Acta Ecol. Sin., 2015, 35(1):196-203.
- [18] ZHAO M, YUE T, ZHAO N, *et al.* Combining LPJ-GUESS and HASM to simulate the spatial distribution of forest vegetation carbon stock in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2):249-268.
- [19] ZHAO S, LIU S, SOHL T, *et al.* Land use and carbon dynamics in the southeastern united states from 1992 to 2050[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(4):044022.
- [20] 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.
DENG Y J, YAO S B, HOU M Y, *et al.* Assessing the effects of the green for grain program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: a case study of Zichang County in hilly and gully region of Loess Plateau, Journal of Natural Resources, 2020, 35(4):826-844. (in Chinese)
- [21] 尚二萍,张红旗.1980—2010s 新疆伊犁河谷草地碳存储动态评估[J].资源科学,2016,38(7):1229-1238.
- [22] 雒琼,王玉刚,邓彩云,等.不同农业土地利用年限干旱区土壤剖面碳存储动态变化[J].农业工程学报,2017,33(19):287-294.
LUO Q, WANG Y G, DENG C Y, *et al.* Dynamics of soil carbon storage under different land use years in arid agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19):287-294. (in Chinese)
- [23] 位盼盼,管梅.伊犁地区土地覆被变化及其对植被碳储量的影响[J].西北林学院学报,2020,35(4):158-166.
WEI P P, ZAN M. Change of land coverage and the impact on vegetation carbon storage in Yili region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4):158-166. (in Chinese)
- [24] PENG K, JIANG W, DENG Y, *et al.* Simulating wetland changes under different scenarios based on integrating the random forest and CLUE-S models: a case study of Wuhan urban agglomeration[J]. Ecological Indicators, 2020, 117:106671.
- [25] PENG K, JIANG W, LING Z, *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, 307:127321.
- [26] HUANG S, XI F, CHEN Y, *et al.* Land use optimization and simulation of low-carbon-oriented—a Case study of Jinhua, China[J]. Land, 2021, 10(10):1020.
- [27] 时宇,李明阳,杨玉锋,等.基于 CLUE-S 模型的城市森林公园土地利用情景规划方法研究[J].西北林学院学报,2014,29(5):163-168.
SHI Y, LI M Y, YANG Y F, *et al.* CLUE-S based scenario planning of land use in urban forest park[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(5):163-168. (in Chinese)
- [28] ZHANG S, ZHONG Q, CHENG D, *et al.* Coupling coordination analysis and prediction of landscape ecological risks and ecosystem services in the Min River basin[J]. Land, 2022, 11(2):222.
- [29] 喇露梦,勾蒙蒙,李乐,等.三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟:以秭归县为例[J].生态与农村环境学报,2021,37(11):1368-1377.
LA L M, GOU M M, LI L, *et al.* Spatiotemporal dynamics and scenarios analysis on trade-offs between ecosystem service in Three Gorges Reservoir area: a case study of Zigui County[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(11):1368-1377. (in Chinese)
- [30] LIANG X, GUAN Q, 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.
- [31] 林媚珍,刘汉仪,周汝波,等.多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究[J].地理研究,2021,40(9):2657-2669.
LIN M Z, LIU H Y, ZHOU R B, *et al.* Evaluation and trade-offs of ecosystem services in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area under multi-scenario simulation[J]. Geographical Research, 2021, 40(9):2657-2669. (in Chinese)
- [32] 李瑾璞.基于 InVEST 模型的土地利用变化与生态系统碳储量研究[D].保定:河北农业大学,2020.
- [33] 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,2003,33(1):72-80.

- YAN D R, YUAN L M, HUANG H G, *et al.* Influence of gauze sand barrier on sediment transport and wind speed near surface[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(2): 79-85. (in Chinese)
- [24] 满良, 哈斯, 张萍, 等. 呼伦贝尔草原风蚀坑及下风侧积沙区植被小群落特征[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2177-2181.
- MAN L, HA S, ZHANG P. Micro-community characteristics of vegetations in blowouts and depositional areas of hulunbuir grassland, Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2177-2181. (in Chinese)
- [25] 牛翠娟. 基础生态学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [26] 高海燕, 红梅, 霍利霞, 等. 水氮耦合对荒漠草原植物物种多样性及生物量的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35(1): 36-45.
- GAO H Y, HONG M, HUO L X, *et al.* Effect of water and nitrogen interaction on plant species diversity and biomass in a desert grassland[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(1): 36-45. (in Chinese)
- [27] 潘声旺, 袁馨, 雷志华, 等. 乡土植物生活型构成对川渝地区边坡植被水土保持效益的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4654-4663.
- PAN S W, YUAN X, LEI Z H, *et al.* Effect of life form composition of indigenous plant species on soil and water conservation on slopes in Sichuan Chongqing region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4654-4663. (in Chinese)
- [28] 王海涛, 何兴东, 高玉葆, 等. 油蒿演替群落密度对土壤湿度和有机质空间异质性的响应[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1145-1153.
- WANG H T, HE X D, GAO Y B, *et al.* Density in artemisia ordosica successional community in response to spatial heterogeneity of soil moisture and organic matter[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1145-1153. (in Chinese)
- [29] 王春玲, 郭泉水, 谭德远, 等. 准噶尔盆地东南缘不同生境条件下梭梭群落结构特征研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 43-48.
- WANG C L, GUO Q S, TAN D Y, *et al.* *Haloxylon ammodendron* community patterns in different habitats along southeastern edge of Zhunger basin[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 43-48. (in Chinese)
- [30] 卢建国, 王海涛, 何兴东, 等. 毛乌素沙地半固定沙丘油蒿种群对土壤湿度空间异质性的响应[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1469-1474.
- LU J G, WANG H T, HE X D, *et al.* Responses of artemisia ordosica population to soil moisture spatial heterogeneity on semi-fixed dune of Mu Us sandy land[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1469-1474. (in Chinese)
- [31] 彭羽, 蒋高明, 牛书丽, 等. 浑善达克沙地中部典型固定沙丘植物群落分析[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(7): 1414-1419.
- PENG Y, JIANG G M, NIU S L, *et al.* Communities of typical sand dune-fixed plants in the central part of Otindag sandy region[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(7): 1414-1419. (in Chinese)
- [32] 宋明华, 陈玉福, 董鸣, 鄂尔多斯高原覆沙坡地植物群落格局[J]. *植物生态学报*, 2002, 13(4): 396-402.
- SONG M H, CHEN Y F, DONG M. Spatial pattern of the plant community along a sand-covered hillslope in Ordos plateau in China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 13(4): 396-402. (in Chinese)

(上接第42页)

- [34] 方精云, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [35] 李义平, 蔡宏, 田鹏举, 等. 贵州省黎平县地表覆被变化引起的生态系统碳储量变化[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2): 92-99.
- LI Y P, CAI H, TIAN P J, *et al.* Changes in ecosystem carbon stock caused by land cover change in Liping County, Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(2): 92-99. (in Chinese)
- [36] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2799-2809.
- ZHANG K Q, CHEN J J, HOU J K, *et al.* Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with InVEST and GeoSOS-FLUS model[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2799-2809. (in Chinese)
- [37] HONG S, YIN G, PIAO S, *et al.* Divergent responses of soil organic carbon to afforestation[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 694-700.
- [38] 角媛梅, 张家元. 云贵川大坡度梯田形成原因探析——以红河南岸哈尼梯田为例[J]. *经济地理*, 2000(4): 94-96.
- [39] 牛海生, 李大平, 张娜, 等. 不同灌溉方式冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(5): 749-755.
- [40] 王玉英, 胡春胜, 董文旭, 等. 华北平原小麦-玉米轮作系统碳中和潜力及固碳措施[J]. *中国生态农业学报: 中英文*, 2022, 30(4): 651-657.
- WANG Y Y, HU C S, DONG W X, *et al.* Carbon neutralization potential and carbon sequestration efforts in a wheat-maize rotation system in the north China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 651-657. (in Chinese)
- [41] 陈绍民, 杨硕欢, 张保成, 等. 不同水肥条件下夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 229-238.
- CHEN S M, YANG S H, ZHANG B C, *et al.* Carbon balance in summer maize/winter wheat farmland ecosystem under different water and fertilizer conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 229-238. (in Chinese)