

# 1985—2035 年密云水库流域生态系统 碳储量时空演替格局与预测

刘小丹<sup>1,2</sup>, 李垒<sup>1</sup>, 张洪<sup>2</sup>, 薛万来<sup>1</sup>, 刘可暄<sup>1</sup>, 薛晨旺<sup>3</sup>

(1.北京市水科学技术研究院 流域水环境与生态技术北京市重点实验室, 北京 100048;  
2.中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085; 3.北京市密云水库管理处, 北京 101512)

**摘要:** [目的] 开展 1985—2035 年密云水库流域生态系统碳储量时空演替格局与预测研究, 为流域“双碳”目标下山水林田湖草沙一体化保护修复和流域生态补偿标准优化提供科学依据。[方法] 采用 InVEST-PLUS 模型对该流域 1985—2020 年碳储量时空演变格局进行分析, 并预测 2035 年 3 种情景(自然发展、耕地保护、生态保护)下的碳储量变化趋势。[结果] ①1985—2020 年, 密云水库流域生态系统碳储量呈现持续增长趋势, 35 a 间碳储量增加  $2.35 \times 10^7$  t, 其中贡献程度最大的为林地, 其次为草地和耕地, 共占总碳储量约 98%。②2035 年, 3 种模拟情景下流域碳储量仍均趋于增长, 相对来说在生态保护情景下, 由于林地面积增长较多, 导致碳储量保持较高水平。③流域碳储量呈现出“中南部高, 西部、东北低”的空间格局, 中南部对应流域山区地貌, 为水源涵养核心区域, 森林覆盖率较高, 而西部、东北部主要分布草地、耕地及城镇建设用地等, 相对碳储量偏低。[结论] 碳储量与土地利用空间格局具有一致性, 可通过生态建设增加林草地、控制林地转出及合理控制建设用地扩张来促进生态系统碳储量巩固与提升。

**关键词:** 土地利用变化; InVEST 模型; PLUS 模型; 生态系统碳储量; 密云水库流域

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2025)01-0244-10

**中图分类号:** X87, F301.2

**文献参数:** 刘小丹, 李垒, 张洪, 等. 1985—2035 年密云水库流域生态系统碳储量时空演替格局与预测 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 244-253. Liu Xiaodan, Li Lei, Zhang Hong, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Miyun Reservoir basin during 1985—2035 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 244-253. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.026; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.026.

## Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Miyun Reservoir basin during 1985—2035

Liu Xiaodan<sup>1,2</sup>, Li Lei<sup>1</sup>, Zhang Hong<sup>2</sup>, Xue Wanlai<sup>1</sup>, Liu Kexuan<sup>1</sup>, Xue Chenwang<sup>3</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Watershed Water Environment and Ecological Technology, Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Beijing Miyun Reservoir Management Office, Beijing 101512, China)

**Abstract:** [Objective] Spatial and temporal succession patterns and predictions of ecosystem carbon storage in the Miyun Reservoir basin from 1985 to 2035 were conducted to provide a scientific basis for the integrated protection and restoration of mountains, rivers, forests, fields, lakes, grasslands, and sands and the optimization of ecological compensation standards under the goal of “double carbon” in the basin. [Methods] The InVEST-PLUS model was used to analyze the spatial and temporal evolution patterns of carbon storage in the basin during 1985—2020, and the changing trend of carbon storage under three scenarios (natural development, cultivated land protection, and ecological protection) in 2035 was predicted. [Results] ① During 1985—2020, the ecosystem carbon storage of Miyun Reservoir basin showed a continuous growth trend, and the carbon storage increased by  $4.03 \times 10^7$  t in 35 years. The largest contributors to carbon storage

收稿日期: 2024-08-24

修回日期: 2024-10-21

采用日期: 2024-10-22

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项“永定河(北京段)河流廊道生态修复技术与示范”(2018ZX07101005-03); 北京市科技计划课题“密云水库水生态安全优化调控技术体系研究与示范”(Z221100005222013); 2024 年北京水务科技开放项目(SK-2024-001-ST5)

第一作者: 刘小丹(1983—), 男(汉族), 山西省临县人, 博士, 高级工程师, 主要从事流域生态系统服务及碳汇评价研究。Email: 402698291@qq.com。

were forest land, grassland, and cultivated land, which accounted for approximately 98% of the total carbon storage. ② In 2035, the carbon storage of the basin will tend to increase under the three simulation scenarios. In the protection scenario, owing to the increase in forestland area, carbon storage remains at a high level. ③ Carbon storage in the basin showed a spatial pattern of ‘higher in the south-central part and lower in the west and northeast’. The south-central part corresponds to the mountainous landform of the basin, which was the core area of water conservation, and the forest coverage rate was higher, while the west and northeast were mainly distributed in grassland, cultivated land, and urban construction land, with relatively lower carbon storage. [Conclusion] Carbon storage is consistent with the spatial pattern of land use. The consolidation and improvement of ecosystem carbon storage can be promoted by increasing forests and grasslands through ecological construction, controlling the transfer of forest land, and reasonably controlling the expansion of construction land.

**Keywords:** land use change; InVEST model; PLUS model; ecosystem carbon storage; Miyun Reservoir basin

陆地生态系统在吸收 CO<sub>2</sub>, 调节气候变化方面起着关键作用<sup>[1]</sup>, 当区域碳储量提高时, 能有效缓解温室效应对气候的影响<sup>[2]</sup>, 鉴于此, 陆地生态系统固碳作用成为各国政府和学者共同关注的研究热点<sup>[3]</sup>。随着国家“双碳”目标的提出, 如何提升陆地生态系统碳汇能力成为关注的重要方面, 尤其是对大尺度长时序生态系统碳储量时空演变格局研究。有关研究表明, 在土地利用变化驱动下陆地生态格局与生态系统发生改变进而会影响碳循环过程<sup>[4]</sup>, 是碳储量变化的重要原因<sup>[5]</sup>。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<sup>[6]</sup>。不合理土地利用是导致陆地生态系统碳源/汇失衡而引起温室气体浓度增加主因之一。因此, 深入研究土地利用变化下的生态系统碳储量动态演变规律, 将对促进区域“双碳”目标实现具有重要的参考价值和借鉴意义。

在生态系统碳储量测算中, 传统方法主要包括样地调查、遥感反演和模型模拟、IPCC 清单法等, 虽然精度高但是采样周期长和工作繁琐等不足, 无法有效适用大尺度研究。为了弥补传统估算方法的不足, 综合集成的模型模拟法得到发展, 其中生态系统服务和权衡的综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)因较为适用于长时序大尺度研究, 且操作简便、评估精度较高等优点, 近年得到应用。同时为了进一步模拟预测碳储量变化趋势, 基于土地扩张分析策略(land expansion analysis strategy, LEAS)和多类型随机种子元胞自动机模型集成发展了斑块级土地利用模拟(patch-generating landuse simulation, PLUS)模型, 其保留基于轮盘赌的自适应惯性竞争机制获取土地利用变化综合概率<sup>[7]</sup>, 并具有模拟精度高、数据处理快、能有效挖掘土地利用变化的原因和模拟多类复杂演变的过程的优点<sup>[8]</sup>, 进而实现对碳储量模拟预

测。因此, 综合 InVEST 与 PLUS 模型用于模拟各种地类复杂演变及估算碳储量具有较好的应用前景<sup>[9-10]</sup>。目前, 流域尺度下长序列碳储量研究成为热点, 多侧重于开展基于 InVEST 模型的流域碳储量时空变化特征分析研究<sup>[11-12]</sup>, 并利用 PLUS 模型等开展多情景模拟预测碳储量变化趋势, 有关研究认为碳储量与土地利用空间分布一致, 碳储量空间分异主要受气候因素影响<sup>[13]</sup>, 尤其碳储量与降水呈明显正相关, 降水量的增加有利于碳损失的缓解<sup>[14]</sup>。认为生态保护情景能有效缓解碳损失<sup>[15]</sup>, 相较于自然发展情景更有利于碳的蓄积<sup>[16-17]</sup>, 生态工程建设是流域碳储量增加的主导因素<sup>[18]</sup>, 林地等增加将对区域碳汇能力产生正向影响<sup>[19]</sup>。以上有关研究证明耦合 InVEST 与 PLUS 模型开展流域生态系统碳储量时空变化及模拟预测是比较有效的方法。

密云水库是首都重要的地表饮用水源地、水资源战略储备基地。密云水库流域作为密云水库的载体, 是区域重要的生态屏障与水源涵养区, 在维系区域生态平衡中起着极其重要的作用。目前, 密云水库流域生态系统的研究主要关注不同影响因子与生态环境系统之间的响应机制, 而对生态系统碳储量状况鲜有报道。因此, 本文选取密云水库流域作为研究区域, 探究 1985—2020 年密云水库流域生态系统碳储量时空演变格局, 并模拟预测 2035 年不同情境下碳储量变化趋势, 以期为密云水库流域“双碳”目标下的山水林田湖草沙一体化保护修复和流域生态补偿标准优化提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况与数据来源

1.1.1 研究区概况 密云水库流域位于东经 115.44°—117.55°, 北纬 40.34°—41.61°之间, 流域总

面积 15 396.3 km<sup>2</sup>, 东西长约 184 km, 南北宽约 130 km。流域地势整体呈现出西北高、东南低特征, 地貌以山地为主, 流域内西部为白河水系, 东部为潮河水系, 气候区属于半干旱与半湿润过渡带, 具有典型大陆性季风气候特点, 多年平均气温范围 6~12 ℃, 多年平均降水量约 488 mm, 降水主要集中在 6~8 月雨季。流域地跨河北省张家口市赤城县、沽源县, 承德市兴隆县、滦平县、丰宁满族自治县以及北京市延庆区、怀柔区、密云区。

### 1.1.2 数据来源

(1) 土地利用数据。本文选取密云水库流域 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年的土地利用类型数据, 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/data>), 空间分辨率 30 m×30 m。按照《土地利用现状分类(GB/T 21010—2017)》对土地类型进行了部分整合和重分类, 采用 ArcMap 10.2 重分类划分耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 大类。

(2) 土地利用变化驱动因子。为了提升 PLUS 模型对未来土地利用空间格局的模拟精度, 主要从影响土地利用变化的自然驱动、社会经济发展驱动及交通可达性因素 3 个主要方面出发, 综合参考已有研究<sup>[9-10, 13]</sup>选取自然、社会、经济方面 16 项驱动因子, 包括 1 个限制转换因素、7 个自然环境因素和 8 个社会经济因素, 具体指标包括限制转换区域数据、自然环境数据(包括 DEM、坡度、坡向、年均温度、年均降水量、土壤类型、到水域距离)、社会经济因素(包括人口密度、GDP 值、距居民点距离、距铁路距离、距高速公路距离、距省道距离、距二级公路距离、距三级公路距离)。

对社会驱动因子(到铁路交通节点、公路交通线、水体、居民点的距离等)在进行数据预处理时, 均通过 ArcGIS 10.2 的欧氏距离(Euclidean distance)分析工具计算获得。根据模型需要, 将土地利用驱动因子栅格化后统一成与土地利用数据相同的投影坐标、行列号和空间分辨率。研究区土地利用变化驱动因子与数据来源详见表 1。

表 1 土地利用变化驱动因子及数据来源

Table 1 Driving factors and data sources of land use change

数据类型	数据名称	空间分辨率/m	数据来源与处理
限制转换区域数据	土地利用与覆被限制因素	30	利用水域数据计算得到
	高程 DEM	30	地理空间数据云( <a href="https://www.gscloud.cn">https://www.gscloud.cn</a> )
	坡度	30	由 ArcGIS 处理 DEM 数据而来, 路径 arcmap—工具箱—空间分析—表面分析—坡度
	坡向	30	由 ArcGIS 处理 DEM 数据而来, 路径 arcmap—工具箱—Analyst 工具—栅格表面—坡向
自然环境因素	年均温度	1 000	中国气象数据网( <a href="http://data.cma.cn">http://data.cma.cn</a> ), 在 GIS 中使用克里金插值法得到
	年均降水量	1 000	
	土壤类型	1 000	
	到水域距离	30	
社会经济因素	GDP	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
	人口密度	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
	距铁路距离	30	通过 OSM (Open Street Map, <a href="http://www.openstreetmap.org">http://www.openstreetmap.org</a> ), 借助欧氏距离法计算得到
	距高速公路距离	30	
	距省道距离	30	
	距二级公路距离	30	
	距三级公路距离	30	
距居民点距离	30		

## 1.2 研究方法

1.2.1 不同情景设置 由于密云水库流域横跨京冀, 不是完整的行政单元, 其未来土地利用需求预测有一定难度。鉴于此, 本文采用情景分析法, 通过修改 Markov 模型的过程转移概率估算研究区 2035 年不同情景各用地类型的需求面积。具体情景包括: ①自然发展情景。利用 PLUS 模型 Markov Chain 模块, 基于 2010—2015 年土地利用转移规律, 根据研究区的实际情况, 不设置各类用地之间的转换概率, 以 5 a 为间隔设置条件下, 预测 2035 年土地利用状况, 并作

为其余情景模拟的基础<sup>[19]</sup>。②耕地保护情景。耕地是密云水库流域产业发展的重要载体。参考《北京市国土空间总体规划(2020—2035 年)》《北京市土地资源保护利用规划》对耕地保护的目标要求, 以《河北省国土空间规划(2021—2035 年)》对承德、张家口耕地保护任务要求, 本文设定耕地保护情景为减缓耕地向其他地类的转移速率并遏制建设用地的扩张速度。为此, 设置耕地向林地、草地及水域的转换概率降低 30%, 向建设用地的转换概率降低 80%, 向未利用地的转换概率降低 100%, 以 5 a 为间隔预测 2035 年该

情景下的土地利用情况。③生态保护情景。参照《京津冀密云水库水源保护共同行动方案》《北京市密云水库上游地区空间保护规划(2021—2035年)》《张家口首都水源涵养功能区和生态环境支撑区建设规划(2019—2035年)》生态建设任务,加强对林地、草地和水域等生态用地的保护并设定其他用地向生态用地的转化。本情景遏制建设用地扩张,将林地、草地等生态用地向建设用地转换概率降低 90%,向未利用地转换概率降低 100%,假设开展退耕还林等措施,将耕地向林地的转换概率增加 20%,将建设用地转换概率降低 60%,以 5 a 为间隔预测 2035 年该情景下的土地利用情况。

1.2.2 基于 PLUS 模型的不同情景下的土地利用变化模拟 本研究中,初期数据用 2010 年土地利用数据,基准数据用 2015 年的,基于 PLUS 模型神经网络算法输入土地利用数据结合多种驱动力因子获取各地类的适宜性概率,得到 2020 年土地利用模拟结果,并与现实 2020 年土地利用情况进行匹配比较,表明耕地模拟精度达到 86.59%,林地模拟精度达到 96.59%,草地模拟精度达到 90.15%,水域模拟精度达到 73.39%,未利用地模拟精度为 74.12%,建设用地模拟精度为 85.33%。借助 kappa 系数验证结果显示,kappa 值为 0.877,总精度为 0.937,说明在本流域尺度上模型模拟效果较好,可用于预测模拟 2035 年土地利用情况。

1.2.3 基于 InVEST 模型的碳储量估算 InVEST 模型的碳储量模块把生态系统的碳储量划分为 4 个基本碳库<sup>[20]</sup>:碳库可分为地上生物碳库、地下生物碳库、土壤有机质碳库和死亡有机质碳库<sup>[21]</sup>。基于 InVEST 模型对不同土地利用的平均碳密度进行统计,然后用各土地利用的面积与其对应碳密度相乘并求和,得出研究区的总碳储量。

碳密度的计算公式为:

$$C = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{dead}} + C_{\text{soil}} \quad (1)$$

式中: $C$  为地类的总碳密度( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C_{\text{above}}$  为地类的地上生物的碳密度( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C_{\text{below}}$  为地类的地下生物的碳密度( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C_{\text{dead}}$  为地类的死亡有机质碳密度( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C_{\text{soil}}$  为地类的土壤有机质碳密度( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。

碳储量计算公式为:

$$C_{\text{total}} = C \cdot A \quad (2)$$

式中: $C_{\text{total}}$  为区域内地类的总碳储量( $\text{t}$ );  $C$  为地类的总碳密度( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $A$  为地类的面积( $\text{hm}^2$ )。

碳密度数据参考李克让等<sup>[22]</sup>、陈利军等<sup>[23]</sup>、任玺锦等<sup>[24]</sup>有关全国碳密度研究成果数据并结合密云水库流域实际进行修正处理。由于死亡有机质碳库数

据来源缺乏且占碳库比例较小,本文不予考虑。由于地上、地下生物量碳密度与土壤碳密度与气温和降水密切相关<sup>[25]</sup>,本文采用 Alam 等<sup>[26]</sup>研究中的公式作为修正因子的公式。

碳密度修正公式为:

$$C_{\text{SP}} = 3.3968 \times P + 3996.1 \quad (R^2 = 0.11) \quad (3)$$

$$C_{\text{BP}} = 6.798 \times e^{0.0054P} \quad (R^2 = 0.70) \quad (4)$$

$$C_{\text{BT}} = 28 \times T + 398 \quad (R^2 = 0.47, p < 0.01) \quad (5)$$

式中: $C_{\text{SP}}$  为根据年降水量得到的土壤有机质碳密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $C_{\text{BP}}$ 、 $C_{\text{BT}}$  分别为根据年降水量和年均气温得到的生物量碳密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $P$  为年降水量( $\text{mm}$ );  $T$  为年均气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

$$K_{\text{BP}} = \frac{C_{\text{BP}}^1}{C_{\text{BP}}^2} \quad (6)$$

$$K_{\text{BT}} = \frac{C_{\text{BT}}^1}{C_{\text{BT}}^2} \quad (7)$$

$$K_B = K_{\text{BP}} \cdot K_{\text{BT}} \quad (8)$$

$$K_S = \frac{C_{\text{SP}}^1}{C_{\text{SP}}^2} \quad (9)$$

式中: $K_{\text{BP}}$  为降水因子修正系数;  $K_{\text{BT}}$  为气温因子修正系数;  $K_B$  为生物量碳密度修正系数;  $K_S$  为土壤碳密度修正系数;  $C^1$  为研究区域碳密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $C^2$  为全国碳密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ )。

研究区域各地类碳密度详见表 2。

表 2 研究区各土地利用类型碳密度

Table 2 Carbon density of land use types in study area

土地利用类型	地上碳密度 $C_{\text{above}}$	地下碳密度 $C_{\text{below}}$	土壤碳密度 $C_{\text{soil}}$
耕地	13.3	80.7	117.5
林地	99.3	115.9	172.2
草地	82.7	86.5	108.3
水域	7.0	0.0	0.0
建设用地	5.9	0.0	34.0
未利用地	3.0	0.0	23.4

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用时空变化特征

由图 1 可以看出,1985—2020 年密云水库流域主要土地利用类型为林地、草地和耕地,面积总和约占全流域面积的 99%;水域、建设用地、未利用地面积比例较小,仅占总面积的 1%。1985—2020 年,林地、建设用地、水域分别增加 1 873.82,124.89 和 20.32  $\text{km}^2$ ,其中,林地比例由 52.80% 上升至 64.97%,建设用地比例由 0.44% 上升至 1.25%,水域比例由 0.76% 上升至 0.90%。耕地、草地、未利用地分别减少 970.82,1 047.91 和

0.32 km<sup>2</sup>,其中,耕地比例由 16.90%降至 10.60%,草地比例由 29.09%降至 22.28%,未利用地比例由 0.005%降至 0.003%。

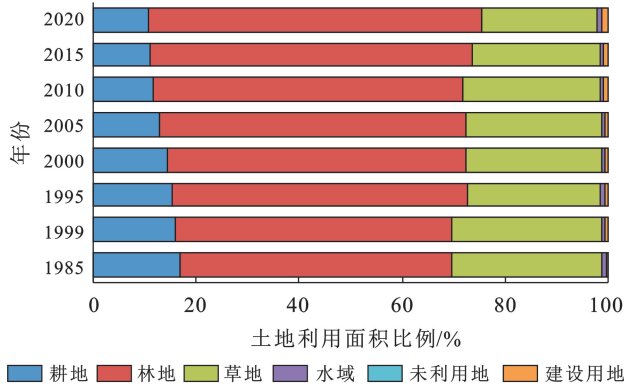


图 1 密云水库流域 1985—2020 年土地利用面积比例

Fig.1 Proportion of land use area in Miyun Reservoir basin during 1985—2020

表 3 密云水库流域 1985—2020 年土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix in Miyun Reservoir basin during 1985—2020

km<sup>2</sup>

土地利用类型	2020 年面积					
	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
1985 年面积						
耕地	1 401.84	514.68	561.64	19.13	0.07	103.27
林地	63.67	7 821.56	224.66	2.84	0.02	10.68
草地	152.85	1 652.64	2 638.88	1.71	0.28	29.41
水域	1.10	2.85	0.11	113.17	0.00	0.43
未利用地	0.23	0.00	0.34	0.00	0.01	0.12
建设用地	10.79	4.14	3.06	1.14	0.00	48.22

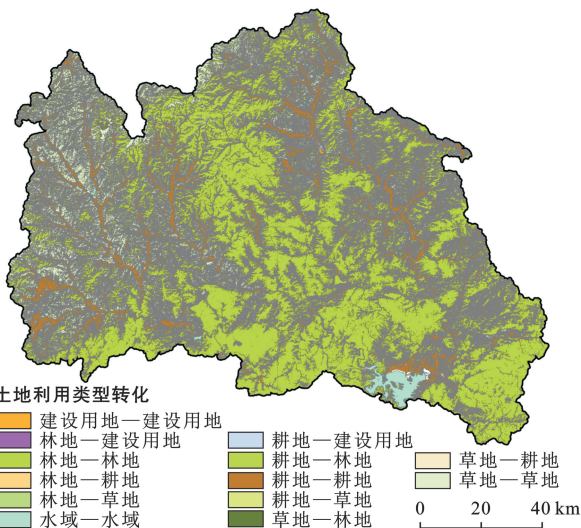


图 2 密云水库流域 1985—2020 年主要土地利用变化空间分布

Fig.2 Spatial distribution of main land use change in Miyun Reservoir basin during 1985—2020

## 2.2 碳储量时空变化特征分析

运用 InVEST 模型中的 Carbon 模块估算密云水库流域总碳储量。1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年密云水库流域总碳储量分别为

基于 8 期土地利用数据,利用 PLUS 模型 Markov chain 模块得到土地利用转移矩阵(表 3)。1985—2020 年,密云水库流域 21.84%的土地发生转移,主要发生在草地、耕地、林地和建设用地间(图 2)。其中,转出面积最大的土地利用类型为草地和耕地,分别占总流转面积的 54.64%和 35.66%,而转入面积最大的土地利用为林地,占总流转面积的 64.68%。草地有 89.97%转向林地,耕地有 46.85%的转向草地,转移主要出现在流域西部赤城县、西北部沽源县及中北部丰宁县等地区;耕地有 42.93%转向林地,耕地有 8.61%的转向建设用地,分散分布于流域各个城乡建成区周边。究其原因,一方面为保护密云水库流域实施退耕还林、京津风沙源治理、山水工程等生态建设,促进林地增加,耕地减少;另一方面社会经济活动加强,城镇化进程加快,对土地开发利用需求增大,建设用地的增加,耕地、草地减少。

4.94×10<sup>8</sup> t, 4.96×10<sup>8</sup> t, 5.03×10<sup>8</sup> t, 5.05×10<sup>8</sup> t, 5.10×10<sup>8</sup> t, 5.11×10<sup>8</sup> t, 5.15×10<sup>8</sup> t, 5.18×10<sup>8</sup> t。1985—2020 年,总碳储量持续增加,35 a 间碳储量增加 2.35×10<sup>7</sup> t。从不同土地类型碳储量来看,林地碳储量最高,其次为草地、耕地,水域、建设用地,未利用地碳储量最少。1985—2020 年,各土地利用类型中对碳储量的贡献程度最大的为林地、耕地和草地,共占总碳储量的 98%(图 3)。

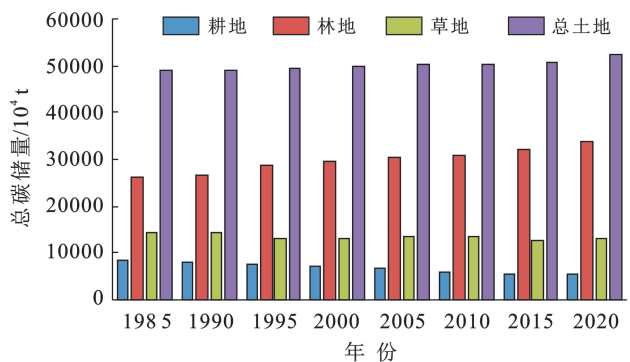


图 3 密云水库流域 1985—2020 年主要土地利用类型总碳储量变化  
Fig.3 Change of total carbon storage of main land use types in Miyun Reservoir basin during 1985—2020

研究期间,林地、建设用地碳储量持续上升,耕地持续下降,草地碳储量波动下降,未利用地和水域碳储量波动上升。从碳储量空间分布来看,碳储量高值主要分布在延庆、怀柔、密云、滦平、兴隆等林地稠密地区,沽源、赤城、丰宁碳储量相对偏低(图 4)。

3 种情景下最小,说明通过生态保护限制了其他土地利用类型向建设用地的转换,生态保护下更有利于流域生态环境的持续改善。

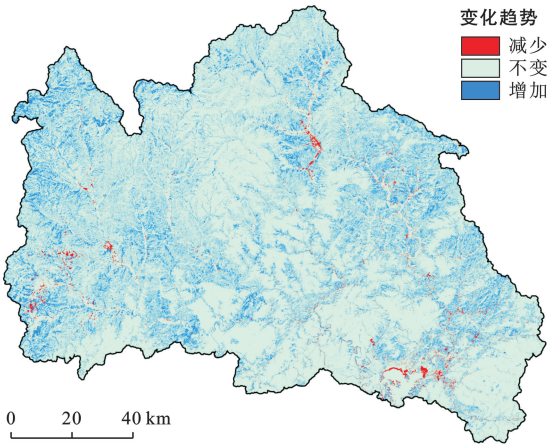


图 4 密云水库流域 1985—2020 年碳储量空间变化趋势  
Fig.4 Spatial variation trend of carbon storage in Miyun Reservoir basin during 1985—2020

### 2.3 土地利用变化模拟与碳储量预测

2.3.1 驱动因子分析 通过 PLUS 模型的用地扩张分析模块得出主要用地类型的驱动因子贡献度(图 5)。耕地变化驱动力主要受高程、坡度、人口密度影响,耕地主要增加区域位于高程较低、坡度较平缓、人口密度相对较少的地区;林地驱动力主要受坡度、年均降水量、高程、距居民点距离等因素影响,流域内中部、南部、东部地区有广袤地区适宜林地建设,这些地区是林地增加潜在区域;草地变化驱动力主要受年均降水量、坡度、高程、人口密度、年均温度等因素影响,流域西北部适宜的降水量,较高高程等促进草地面积增加;水域变化驱动力主要受高程、距水域距离、人口密度、坡度等因素影响,距现有水源越近、适宜地理环境等条件促进水域面积增加;未利用地变化驱动因素主要是年均降水量、距三级公路距离;建设用地变化驱动因素主要是人口密度、高程、坡度等,尤其是人口密度较高地区,随着城镇化建设,建设用地表现出较快的增长趋势。

2.3.2 密云水库流域 2035 年多情景模式下土地利用预测 从表 4 可以看出,与 2020 年各土地利用面积相比,3 种情景下 2035 年林地、建设用地均呈增长趋势,而耕地、草地、水域、未利用地均呈减少趋势,主要的土地利用转移为耕地、草地转向林地,耕地转向建设用地(图 6)。其中在生态保护情景下,与 2020 年相比林地增加最多,达到 911.01 km<sup>2</sup>,建设用地扩张在

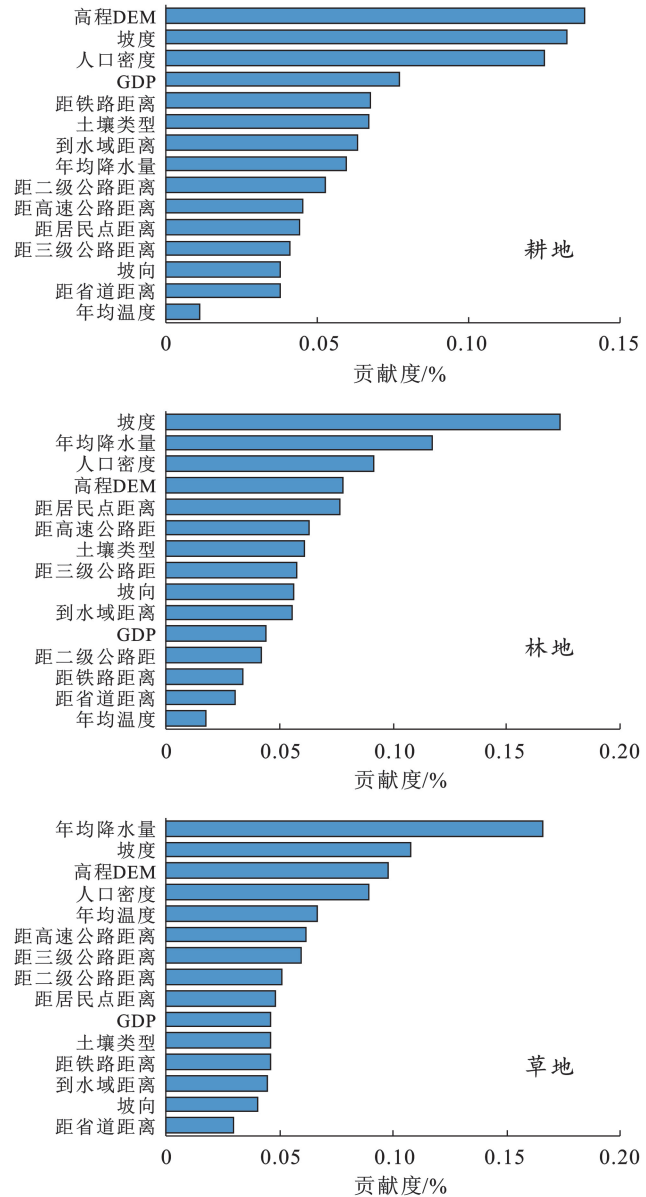


图 5 密云水库流域主要用地类型扩张的驱动因子贡献度  
Fig.5 Contribution of driving factors for expansion of main land use types in Miyun Reservoir basin

表 4 密云水库流域 2035 年 3 种情景下土地利用类型面积  
Table 4 Areas of different land use types under three scenarios in Miyun Reservoir basin in 2025

土地利用类型	2020 年 面积/km <sup>2</sup>	2035 年面积/km <sup>2</sup>		
		自然发展	耕地保护	生态保护
耕地	1 631.61	1 362.06	1 417.5	1 362.05
林地	10 003.2	10 894.36	10 881.05	10 914.21
草地	3 430.65	2 770.02	2 740.48	2 770.02
水域	138.09	93.00	92.70	92.99
未利用地	0.39	0.26	0.26	0.15
建设用地	192.3	276.56	264.27	256.83

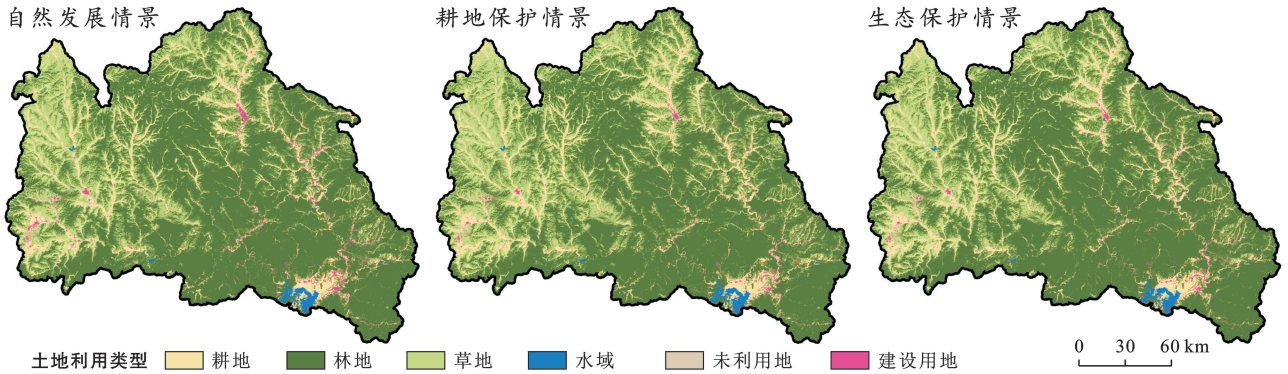


图 6 密云水库流域 2035 年预测 3 种情景下土地利用分布

Fig.6 Land use distribution under three scenarios in Miyun Reservoir basin in 2035

2.3.3 2035 年碳储量预测 从表 5 看出,与 2020 年相比,3 种情景下研究区碳储量总量均增加。在自然发展情景下,碳储量增加  $1.08 \times 10^7$  t。在耕地保护情景下,碳储量增加  $1.24 \times 10^7$  t。在生态保护情景下,生态保护修复力度加大,林地面积持续增长,进而带来碳储量的增长,期间增长  $1.31 \times 10^7$  t。在 3 种情景下,林地碳储量贡献率最大,是所有土地利用类型中最主要的碳储量来源(图 7)。总体上,采取生态保护措施能够取得较高的碳储量水平,其他土地利用类型向林地转化的概率增加,进一步增强森林碳汇功能,流域整体固碳能力得到巩固和提升。

表 5 密云水库流域 2035 年 3 种情景下碳储量统计  
Table 5 Carbon storage statistics under three scenarios in Miyun Reservoir basin in 2035  $10^4$  t

土地类型	2020 年	2035 年		
		自然发展	耕地保护	生态保护
耕地	5 486.70	4 679.38	4 883.79	4 699.64
林地	33 636.80	37 390.99	37 452.24	37 621.5
草地	11 537.79	9 516.47	9 441.94	9 557.7
水域	464.34	319.49	319.40	320.87
未利用地	1.30	0.88	0.89	0.50
建设用地	646.56	950.12	910.49	886.17
合计	51 773.48	52 857.33	53 008.75	53 086.39

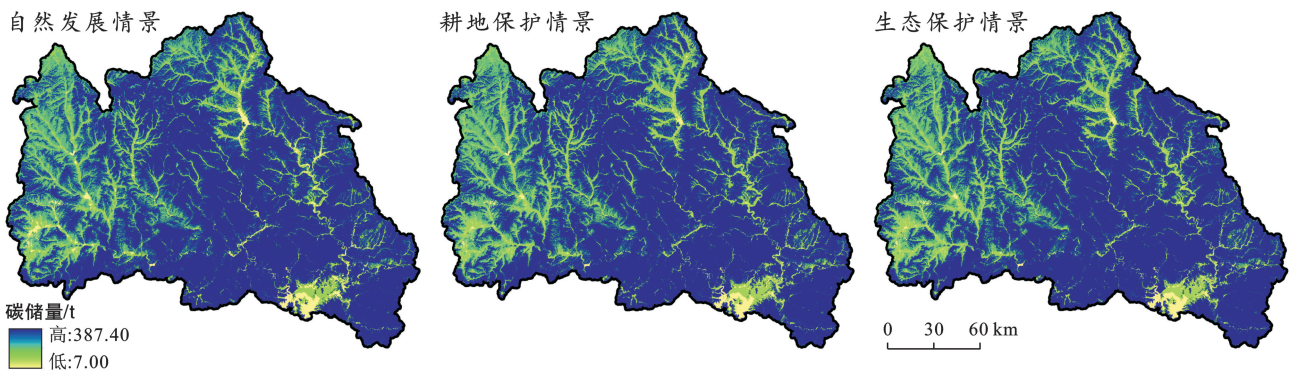


图 7 密云水库流域 2035 年碳储量空间分布

Fig.7 Spatial distribution of carbon storage in Miyun Reservoir basin in 2035

### 3 讨论

(1) 在土地利用变化对碳储量的响应方面,土地利用变化是影响陆地生态系统中碳储存变化的关键因素,无论是草地到林地、耕地到林地的转移,还是建设用地的开发扩张,这些变化对陆地生态系统碳储量时空格局变化产生深远的影响。从研究结果来看,各用地类型面积的增减将会影响碳储量的增减,这与有关研究结果相似,碳储量的空间分布与区域土地利用空间布局有显著一致性<sup>[27]</sup>,说明土地利用的空间布

局和结构变化在很大程度上影响着区域碳储量,可通过生态建设增加林草地、控制林地转为其他用地及合理控制建设用地扩张来实现土地结构的优化,进而促进生态系统碳储量巩固与提升。

(2) 在模型及碳密度选取准确性与局限性方面,InVEST 模型对碳储量测算是基于大尺度土地利用变化,对土地利用内部结构和植被年龄的固碳能力差异考虑不足<sup>[28]</sup>。InVEST 模型中的 Carbon 模块对碳循环过程进行了简化,用静态碳密度来进行估算,而且研究中土地利用类型碳密度综合参考已有全国碳

密度研究成果,并根据区域实际情况进行修正处理,但仍与研究区真实的碳密度数据存在一定的误差,影响碳储量测算的准确性,下一步结合样地调查数据对碳密度数据进行修正,以提高测算精度。

(3) 2020 年林地面积占流域总面积的 64.97%,相关研究表明,不同的树种对碳储量影响也存在差异,下一步需要对不同树种碳汇能力及分布状况进行研究,以期在增加林地和控制林地转为其他地类的同时注重树种结构的优化。本研究重点探讨长时序土地利用变化引起碳储量时空演替特征,反过来碳储量对土地利用变化脆弱性响应的研究还有待开展。碳储存服务作为生态系统服务的重要组成部分之一<sup>[29]</sup>,研究其变化及脆弱性对缓解生态系统服务损失及退化有着重要意义<sup>[30]</sup>,下一步将深入探讨碳储量脆弱性等问题。

## 4 结论

(1) 密云水库流域主要土地利用类型为林地、草地和耕地,面积总和约占全流域总面积的 99%。1985—2020 年,密云水库流域 21.84%的土地发生转移,其中,转出面积最大的土地利用类型为草地和耕地,而转入面积最大的土地利用为林地,林地持续增加,林地占全流域面积比由 52.80%上升至 64.97%。

(2) 1985—2020 年,总碳储量持续增加,由 1985 年  $4.94 \times 10^8$  t 增加到 2020 年  $5.18 \times 10^8$  t, 35 a 间碳储量增加  $2.35 \times 10^7$  t。从不同土地类型碳储量来看,林地碳储量最高,其次为草地、耕地,水域、建设用地,未利用地碳储量最少。期间,林地、建设用地碳储量持续上升,耕地持续下降,草地碳储量波动下降,未利用地和水域碳储量波动上升。

(3) 流域碳储量呈现出“中南部高,西部、东北低”的空间格局,中南部对应流域山区地貌,为水源涵养核心区域,森林覆盖率较高,而西部、东北部主要分布草地、耕地及城镇建设用地等,相对碳储量偏低。

(4) 预测 2035 年生态保护情景更有利于碳储量储存。总体上,采取生态保护措施能够取得较高的碳储量水平,其他土地利用类型向林地转化的概率增加,流域整体固碳能力得到巩固和提升。

## 参考文献 (References)

[1] 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.  
Zhang Bin, Li Lu, Xia Qiuyue, et al. Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “three lines”: A case study of Wuhan City circle [J].

Acta Ecologica Sinica, 2022,42(6):2265-2280.

- [2] Tang Xuli, Zhao Xia, Bai Yongfei, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,115(16):4021-4026.
- [3] 孙一帆,徐梦菲,汪霞.基于 InVEST-PLUS 模型的郑州市碳储量时空演变及空间自相关分析[J].水土保持通报,2023,43(5):374-384.  
Sun Yifan, Xu Mengfei, Wang Xia. Spatial-temporal evolution of carbon storage and spatial autocorrelation analysis in Zhengzhou City based on InVEST-PLUS model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):374-384.
- [4] 朱诗柔,牟凤云,黄淇,等.2000—2030 年多级流域尺度下重庆市林地景观格局碳储量变化[J].水土保持通报,2024,44(3):356-366.  
Zhu Shirou, Mou Fengyun, Huang Qi, et al. Changes of forest landscape carbon storage pattern in Chongqing City under multi-level watershed scales during 2000—2030 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):356-366.
- [5] 李彦旻,沈育生,王世航.基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J].水土保持学报,2022,36(1):182-188.  
Li Yanmin, Shen Yusheng, Wang Shihang. Spatio-temporal characteristics and effects of terrestrial carbon emissions based on land use change in Anhui Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):182-188.
- [6] 布威阿依谢姆·吐合提,阿布都热合曼·哈力克,姚凯旋,等.艾比湖流域 LUCC 驱动的碳储量时空动态特征与多情景预测[J].华侨大学学报(自然科学版),2024,45(4):501-513.  
Buweiyaxiemu Tuheti, Abudureheman Halike, YAO Kaixuan, et al. Spatio-temporal dynamics characteristic and multi-scenario prediction of carbon storage driven by LUCC in Ebinur Lake basin [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science),2024,45(4):501-513.
- [7] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.  
Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. Arid Land Geography, 2022,45(4):1125-1136.
- [8] 王佳楠,张志.基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析[J].西北林学院学报,2022,37(3):

- 139-148.
- Wang Jianan, Zhang Zhi. Land use change and simulation analysis in the northern margin of the Qaidam basin based on Markov-PLUS model [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(3):139-148.
- [9] 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 Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, 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.
- [10] 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 Wenbo, Zhang Jingjing, Cui Yaoping, 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.
- [11] 唐娜, 张震域, 廉耀康, 等. 基于 InVEST 模型的黑河流域碳储量时空变化分析[J]. *人民黄河*, 2024, 46(8):99-103.
- Tang Na, Zhang Zhenyu, Lian Yaokang, et al. Analysis of temporal and spatial variation of carbon storage in Heihe River basin based on InVEST model [J]. *Yellow River*, 2024, 46(8):99-103.
- [12] 唐文睿, 曹玉红. 基于 InVEST-PLUS 模型的皖江流域碳储量时空演变及预测[EJ/OL]. *环境科学* [2024-10-16], <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.20240606>.
- Tang Wenrui, Cao Yuhong. Spatial-temporal evolution and prediction of carbon reserves in Wanjiang River basin with the InVEST-PLUS Model[EJ/OL]. *Environmental Science* [2024-10-16], <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.20240606>.
- [13] 薛万来, 朱莎莎, 朱梦洵, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的永定河流域碳储量功能变化分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(9):13-25.
- Xue Wanlai, Zhu Shasha, Zhu Mengxun, et al. Carbon storage function in Yongding River basin based on the FLUS-InVEST model [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(9):13-25.
- [14] 汪东川, 杨菲, 郎明伟, 等. 金沙江干热河谷碳储量时空演变与多情景模拟[EJ/OL]. *武汉大学学报(理学版)*, 1-14 [2024-12-16], <https://doi.org/10.14188/j.1671-8836.2023.0250>.
- Wang Dongchuan, Yang Fei, Lang Mingwei, et al. Spatiotemporal evolution and multi-scenario simulation of carbon storage in the Dry-Hot Valley of the Jinsha River [EJ/OL]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 1-14 [2024-10-16]. <https://doi.org/10.14188/j.1671-8836.2023.0250>.
- [15] 陈虎, 孙毅, 袁漓, 等. 鄂西南清江流域碳储量时空演变及情景模拟[J]. *湖北民族大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(3):426-434.
- Chen Hu, Sun Yi, Yuan Hao, et al. Spatial and temporal evolution of carbon stocks and scenario modeling in Qingjiang River basin in Southwestern Hubei Province [J]. *Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition)*, 2024, 42(3):426-434.
- [16] 许澳康, 胡梦珺, 石晶, 等. 石羊河流域生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(6):3365-3375.
- Xu Aokang, Hu Mengjun, Shi Jing, et al. Spatial and temporal variability of ecosystem carbon storages and multi-scenario simulation in the Shiyang River basin [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(6):3365-3375.
- [17] 谢晨新, 张守红, 李华林, 等. 1987—2020 年昕水河流域土地利用变化对碳储量的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(18):8021-8032.
- Xie Chenxin, Zhang Shouhong, Li Hualin, et al. Impact of land use change on carbon storage in Xinshui River basin from 1987 to 2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(18):8021-8032.
- [18] 王怀毅, 李忠魁. 基于 LUCC 的渭河流域生态系统碳储量动态变化及脆弱性分析[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6):252-260.
- Wang Huaiyi, Li Zhongkui. Dynamic changes and vulnerability analysis of carbon storage in the Weihe River basin ecosystem based on LUCC [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6):252-260.
- [19] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(10):3947-3958.
- Chen Liting, Cai Haisheng, Zhang Ting, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River basin based on Markov-FLUS model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10):3947-3958.
- [20] 王宁飞, 陈兴鹏, 张宗龙, 等. 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.
- [21] 王双, 赵晓, 周生辉. 未来多情景土地利用变化对河南省区域碳储量的影响[EJ/OL]. *环境科学* [2024-10-16], <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202405168>.

- Wang Shuang, Zhao Xiao, Zhou Shenghu. Exploring on the impact of future multi-scenario land use change on Henan Province regional carbon storage [EJ/OL]. Environmental Science [2024-10-16], <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202405168>.
- [22] 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 Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingkui. Vegetation and soil carbon storage in China [J]. Science in China (Ser D), 2003, 33(1): 72-80.
- [23] 陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J]. 遥感学报, 2002, 6(2): 129-135.  
Chen Lijun, Liu Gaohuan, Li Huiguo. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation in China using remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(2): 129-135.
- [24] 任玺锦, 裴婷婷, 陈英, 等. 基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J]. 生态科学, 2021, 40(4): 66-74.  
Ren Xijin, Pei Tingting, Chen Ying, et al. Impact of land use change on carbon storage in Gansu Province based on carbon density correction [J]. Ecological Science, 2021, 40(4): 66-74.
- [25] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends [J]. Ecology, 1989, 70(5): 1346-1354.
- [26] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013, 89: 67-76.
- [27] 廖超明, 韦媛媛, 云子恒, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的珠三角碳储量时空演变与预测[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 410-420.  
Liao Chaoming, Wei Yuanyuan, Yun Ziheng, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Pearl River Delta based on PLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 410-420.
- [28] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4-11.
- [29] 万海峰, 蒙友波, 陈洋, 等. 黔中城市群碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 443-452.  
Wan Haifeng, Meng Youbo, Chen Yang, et al. Response of carbon storage to land use/cover changes and vulnerability for central Guizhou urban agglomeration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 443-452.
- [30] 滕明塔, 李旭东, 方冰轲, 等. 黔中城市群地表覆盖变化及驱动因素分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(1): 21-31.  
Teng Mingta, Li Xudong, Fang Bingke, et al. Study of land cover change and its driving factors of urban cluster in central Guizhou [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2023, 41(1): 21-31.
- ~~~~~
- (上接第 207 页)
- [8] 樊成虎, 王雅琛, 许丽娟, 等. 西北生态脆弱区输变电工程植被恢复技术体系构建[J]. 环境生态学, 2023, 5(8): 112-118.  
Fan Chenghu, Wang Yachen, Xu Lijuan, et al. Construction of vegetation restoration technology system for power transmission and transformation projects in ecological fragile area of Northwest China [J]. Environmental Ecology, 2023, 5(8): 112-118.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao Shidan. Soil Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2020.
- [10] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.  
Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [11] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5.  
Wang Guoliang, Liu Guobin, Xu Mingxiang. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(1): 1-5.