

# 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

李俊, 杨德宏, 吴锋振, 陈如俊, 何万才

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** [目的] 评估不同情景下的土地利用变化与碳储量变化, 为优化生态服务与可持续性发展提供科学依据。[方法] 基于 PLUS 模型与 InVEST 模型, 模拟和预测不同情景下的土地利用变化与碳储量。[结果] ①在自然发展与生态保护情景下, 土地利用变化相似, 耕地、草地、水域减少, 建设用地急剧扩张, 其中建设用地在自然发展情景下扩张更快, 变化率达 27.70%; 在耕地保护情景下, 土地利用变化与其他两种情景不同, 这是由于林地面积的减少与建设用地的迅速扩张造成的; ②昆明市 2000, 2010, 2020 年的碳储量分别为  $3.37 \times 10^8$ ,  $3.34 \times 10^8$ ,  $3.28 \times 10^8$  t, 呈现逐年下降的趋势。到 2030 年, 耕地保护与生态保护相较于自然发展情景碳储量较高, 说明采取保护措施, 能有效控制碳储量的减少; ③土地利用变化导致碳储量减少  $9.15 \times 10^6$  t, 土地利用变化与碳储量变化呈现高度一致性。[结论] 落实耕地保护、生态保护政策, 控制建设用地向耕地、林地的扩张, 优化土地利用结构, 有利于减缓区域碳储量损失。

**关键词:** PLUS 模型; InVEST 模型; 土地利用变化; 碳储量; 多情景模拟; 昆明市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)01-0378-10

**中图分类号:** X321; F301.2

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230220.009; 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.

## Dynamic Simulation of Land Use Changes and Assessment of Carbon Storage in Kunming City Based on PLUS and InVEST Models

Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, Chen Rujun, He Wancai

(Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming

University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

**Abstract:** [Objective] Changes in land use and carbon stocks under different scenarios were evaluated to provide a scientific basis for optimizing ecological services and sustainable development. [Methods] Changes in land use and carbon storage under different scenarios were simulated and extrapolated by comprehensively using the PLUS and InVEST models. [Results] ① Similar land use changes were observed for both the natural evolution and ecological protection scenarios. Areas of farmland, grassland, and water decreased over time. There was a rapid expansion of construction land. The rate of construction land expansion was much higher for the natural evolution scenario (27.70%). Under the farmland protection scenario, changes in land use were different from those in the other two scenarios because of a decrease in woodland area and a rapid expansion in construction land area. ② Carbon storage in Kunming City decreased over time, with  $3.37 \times 10^8$  t in 2000,  $3.34 \times 10^8$  t in 2010, and  $3.28 \times 10^8$  t in 2020. By 2030. The carbon storage under the farmland protection and ecological protection scenarios will be relatively more than that under the natural evolution scenario. Adopting protective measures can effectively control the reduction in carbon storage; ③ The

收稿日期: 2022-08-05

修回日期: 2022-09-16

资助项目: 云南省测绘地理信息科技发展有限公司项目“芒市勐嘎镇村庄规划航测”(kmmy20220304)

第一作者: 李俊(1997—), 男(汉族), 云南省昆明市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用。Email: 1767321275@qq.com。

通信作者: 杨德宏(1965—), 男(汉族), 云南省大理州人, 副教授, 硕士, 主要从事土地资源利用等方面的研究。Email: 1486097650@qq.com。

decrease in carbon storage caused by land use changes was  $9.15 \times 10^6$  t, and there was high consistency between land use changes and carbon storage changes. [Conclusion] Implementing a policy of farmland and ecological protection, limiting the expansion of construction land from, farmland and woodland, and optimizing land use structure will slow the loss of regional carbon storage.

**Keywords:** PLUS model; InVEST model; land use change; carbon storage; multi-scenario simulation; Kunming City

全球气候变暖问题日益加重,严重阻碍人类活动和经济社会的可持续性发展<sup>[1]</sup>。陆地生态系统是全球碳储量的重要组成部分<sup>[2]</sup>,通过吸收、固定大气中的 CO<sub>2</sub>,可以有效维持生态平衡、缓解气候变暖<sup>[3-4]</sup>,利用陆地生态系统固碳,是减缓二氧化碳浓度升高最为经济可行和环境友好的途径。土地利用变化是决定陆地生态碳储量和影响碳循环的重要因素<sup>[5]</sup>,它会改变生态系统的能量、结构与生物循环<sup>[6]</sup>,从而改变土壤和植被的固碳能力,进而影响碳储存。中国是世界上最大的发展中国家和碳排放国<sup>[7]</sup>,自工业革命以来,土地利用变化每年导致的碳排放量约为  $4.30 \times 10^9$  t<sup>[8]</sup>。因此,研究土地利用变化和碳储量之间的关系,从而优化土地利用结构以提高区域碳储量,将对社会可持续发展、维持碳循环的平衡与稳定具有重要意义。

为更精确预测土地利用的空间分布,国内外学者进行了诸多研究,其中应用较为广泛的模型有 SD<sup>[9]</sup>, Logistic-CA<sup>[10]</sup>, ANN-CA<sup>[11]</sup>, FLUS<sup>[12]</sup>, CLUES<sup>[13]</sup>, CFLUS<sup>[14]</sup>,但是这些模型不能有效挖掘土地利用变化的机理,对多种土地利用类型的斑块进行时空动态模拟的效果也不是很好。而 PLUS<sup>[15]</sup> (patch-generating land use simulation) 模型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>[16]</sup>,同时具有模拟精度高、数据处理快等优势,能有效地模拟多地类复杂演变的过程<sup>[17-18]</sup>。众多学者采用 PLUS 模型取得了较多研究成果,杨激威等<sup>[19]</sup>运用 PLUS 模型结合 InVEST 模型预测了西安市未来不同情景下土地利用及碳储量时空变化特征,研究了土地利用变化对碳储量的影响;李安林等<sup>[20]</sup>借助 PLUS 模型及当量因子法计算 3 种情景下土地利用变化的生态系统服务价值;Gao 等<sup>[21]</sup>利用 PLUS 模型模拟了自然发展、经济快速发展、土地生态保护和生态经济平衡 4 种情景下的南京市 2025 年土地利用数据,分析了各情景下各类土地的变化和土地流转情况,采用综合考虑城市扩张压力、景观生态风险、粮食储备压力和生态退化压力的评价指标,分析各情景下土地利用的生态风险。

近年来,越来越多的学者对陆地生态碳储量进行估算,最常用的方法为实地调查法与模型模拟法<sup>[22]</sup>。实地调查法是最基本、最有效的碳储量估算方法,但

是操作相对复杂,调研设备昂贵,只适用于小区域研究,在大范围区域实施较为困难。FORCCHN<sup>[23]</sup>、LPJ-GUESS<sup>[24]</sup>等模型很好的弥补实地调查法的不足,被广泛用于碳储量的估算,但也存在数据参数复杂、适用性差的缺陷<sup>[25]</sup>,极大的限制了它的应用范围。目前,国内外诸多学者,如朱文博等<sup>[26]</sup>、刘洋等<sup>[27]</sup>、Mendoza-Ponce 等<sup>[28]</sup>、Babbar 等<sup>[29]</sup>等,采用 InVEST 模型来评估生态系统的碳储量,该模型具有数据所需参数少、运行速度快、模型精度高<sup>[30]</sup>等优势,因而被广泛应用。

综上所述,PLUS 模型和 InVEST 模型在模拟多地类复杂演变及碳储量估算领域具有较好的应用前景,因此本文基于 PLUS 模型和 InVEST 模型,模拟不同情景下的昆明市土地利用、生态系统碳储量变化,分析其变化特征并讨论土地利用变化对生态系统碳储量的影响,将对生态系统的保护、推动昆明市可持续发展起到积极作用。

## 1 研究区与数据源

### 1.1 研究区概况

昆明市地处中国西南地区、云贵高原中部,位于东经  $102^{\circ}10' - 103^{\circ}40'$ ,北纬  $24^{\circ}23' - 26^{\circ}22'$ ,地势北部高,南部低,由北向南呈阶梯状逐渐降低,中部隆起,东西两侧较低<sup>[31]</sup>。主要地类为耕地、林地与草地。昆明属北纬低纬度亚热带—高原山地季风气候,由于地处低纬高原而形成“四季如春”的气候,享有“春城”的美誉。全年温差较小,市区年平均气温  $15^{\circ}\text{C}$ ,年降水量  $1\ 035$  mm。昆明市是中国西部最重要的枢纽之一,已建成“四环二十五射”的骨干路网,基本建成片区支撑性道路。

### 1.2 数据源

(1) 土地利用数据。昆明市 2000, 2010, 2020 年的土地利用类型数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/data>),空间分辨率为 30 m,包含一级类 6 个。

(2) 土地利用变化驱动因子数据。用于模拟未来土地利用变化的驱动因子包括 DEM、坡度、温度、降雨量、人口密度、GDP 值、土壤侵蚀类型、距水域、政府、铁路、高速公路、省道、二级、三级道路距离。DEM 数据来源于地理空间数据云(<https://www.>

gscloud.cn),空间分辨率为 30 m,坡度数据由 ArcGIS 处理 DEM 数据而来;社会经济数据(人口密度、GDP)和气候数据(年平均气温、年平均降水)(1 km 空间分辨率)来源于中科院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>);距离水域、政府、高速公路、铁路、省道、二级、三级距离数据可以通过 OSM (Open Street Map, <http://www.openstreetmap.org>),借助欧氏距离法计算得到。

## 2 研究方法

### 2.1 多情景设定

(1) 自然发展情景。该情景基于 2010—2020 年土地利用变化规律,不设置各类用地之间的转换概率,以 10 a 为间隔,运用 PLUS 模型中的 Markov Chain 预测 2030 年自然增长情景下的土地利用需求,是其他情景模拟的基础<sup>[32]</sup>。

(2) 耕地保护情景。耕地保护关系到国家粮食安全,耕地是粮食安全的载体<sup>[33]</sup>,本文设定耕地保护情景。通过减缓耕地向其他地类的转移速率及抑制建设用地的扩张速度,来保护耕地。将耕地向建设用地转移的概率减少 60%<sup>[34]</sup>,以 10 a 为间隔,预测 2030 年研究区耕地保护情景下的土地利用。

(3) 生态保护情景。除建设用地外,其他地类均可转换为林地和草地,将林地、草地向建设用地的转移概率降低 50%,耕地向建设用地的转移概率降低 30%,同时将耕地、草地向林地的转移概率提高 30%<sup>[35]</sup>,以 10 a 为间隔,预测 2030 年生态保护情景下的土地利用。

### 2.2 不同情景下的土地利用变化模拟

PLUS 是基于现有土地利用类型来模拟未来土地利用/覆被变化的模型,集成了基于土地扩张分析策略 LEAS (land expansion analysis strategy) 模型的规则挖掘框架和基于多类型随机斑块种子的 CA 模型 CARS (CA based on multiple random seeds)<sup>[36]</sup>。该模型首先对两个时期的土地利用数据进行叠加,从后期的土地利用数据中提取变化状态的图像元素,表示各土地利用类型的变化面积,然后利用 RF (random forest) 算法探索各土地利用类型与多种驱动因子之间的关系,得到各土地利用类型的变化规律,即各土地利用类型的发展潜力<sup>[37]</sup>,由于发展潜力的限制,PLUS 将自动生成模拟的斑块。以往的研究表明<sup>[38-39]</sup>,PLUS 模型能够将各种空间因素的影响与地理单元动态结合,以模拟土地利用变化,从而获得高精度、高准确性的土地利用空间分布。

根据昆明市的 2000,2010 年历史土地利用数据,

利用 14 个驱动因子进行模拟,得到 2020 年的土地利用类型,与 2020 年的实际数据作对比评估 PLUS 模型的模拟精度,用 kappa 系数和整体精度作评价指标,如果精度足够高,可以用来预测未来几年昆明市的土地利用变化,采用同样的方法模拟得到 2030 年不同情景下的土地利用。

### 2.3 基于 InVEST 模型的碳储量估算

本研究采用 InVEST 中的 Carbon 模块,结合土地利用数据和碳密度数据计算碳储量,计算公式如下:

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

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n A_i C_i \quad (2)$$

式中: $i$  代表土地利用类型; $C_i$  为土地利用类型的碳密度; $C_{\text{above}}, C_{\text{below}}, C_{\text{soil}}, C_{\text{dead}}$  分别代表该地类的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度、死亡有机物碳密度 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $C_{\text{total}}$  为陆地生态系统碳存储总量 ( $\text{t}$ );  $A_i$  为土地利用类型  $i$  的面积 ( $\text{km}^2$ );  $n$  为土地利用类型数量,本文为 6。

InVEST 模型运行需要得到不同地类的碳密度数据,碳密度数据根据李克让等<sup>[40]</sup>、解宪丽等<sup>[41]</sup>、陈利军等<sup>[42]</sup>、Tang 等<sup>[43]</sup>、徐丽等<sup>[44]</sup>、包承宇等<sup>[45]</sup>、汤浩藩等<sup>[46]</sup>等的研究结合碳密度修正公式得到。碳密度修正公式如下所示:

$$C_{\text{SP}} = 3.3968 \times \text{MAP} + 3996.1 \quad (3)$$

$$C_{\text{BP}} = 6.798 \times e^{(0.0054 \times \text{MAP})} \quad (4)$$

$$C_{\text{BT}} = 28 \times \text{MAT} + 398 \quad (5)$$

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

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

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

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

式中:MAP 为年均降雨量 ( $\text{mm}$ ),全国、昆明市分别确定为 628  $\text{mm}$ ,939.5  $\text{mm}$ ; MAT 为全国和昆明市的平均温度,分别确定为 9  $^{\circ}\text{C}$  和 15.3  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_{\text{SP}}, C_{\text{BP}}$  为根据年均降水量修正得到的土壤碳密度与生物量碳密度 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $C_{\text{BT}}$  为根据年均气温修正得到的生物量碳密度 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $K_{\text{BP}}, K_{\text{BT}}$  分别表示地上生物量碳密度年均降水因子与年均温度因子修正系数;  $C^1, C^2$  代表全国和昆明市根据年均降水量与年平均气温计算得到的数据;  $K_B, K_S$  分别表示地上生物修正系数与土壤碳密度修正系数。

由于死亡有机碳密度所占比例较小,将其默认设

置为 0。最终,得到昆明市各个土地利用类型的碳密度(表 1)。

表 1 昆明市各土地利用类型碳密度

**Table 1 Carbon density of land use types in Kunming kg/m<sup>2</sup>**

土地利用类型	C <sub>above</sub>	C <sub>below</sub>	C <sub>soil</sub>	C <sub>dead</sub>
耕地	1.17	2.01	3.93	0
林地	6.47	4.89	11.59	0
草地	3.93	1.62	8.41	0
水域	0.13	0	0	0
建设用地	0.08	0	0	0
未利用地	0.04	0	0	0

2.4 土地利用变化对碳储量的影响

利用 ArcGIS 中的栅格计算器工具,对昆明市 2000—2020 年的土地利用进行联合计算,可得到研究区内的土地利用转移矩阵。通过碳密度修正公式得到的各土地利用类型的植被与土壤碳密度,计算土地转移矩阵与不同土地利用类型碳密度变化差值数据,土地利用变化引起的碳储量变化则等于各转化地类的植被、土壤碳密度的变化值乘以土地转移矩阵面积<sup>[47]</sup>,公式如下<sup>[48]</sup>:

$$T = \sum_{i=1}^n S_{ij} \times \Delta d_{ij} \times 10^6 \quad (10)$$

式中: $T$  为碳储量总变化量;  $S_{ij}$  为第  $i$  种土地类型转移为第  $j$  种土地类型的面积(km<sup>2</sup>);  $\Delta d_{ij}$  为第  $i$  种土地类型转移为第  $j$  种土地类型的碳密度变化(kg/m<sup>2</sup>);  $10^6$  为 m<sup>2</sup> 与 km<sup>2</sup> 单位之间的转换关系; $i=1,2,3,4,5,6$ ;  $j=1,2,3,4,5,6$ ,按数字排序依次对应耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

表 2 2000—2020 年昆明市土地利用转移类型转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of land use transfer types in Kunming from 2000 to 2020

土地利用类型	2020 年						总和	转出总计
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地		
耕地	3 478.27	211.51	190.86	26.13	360.78	0.71	4 268.27	789.99
林地	225.03	8 820.63	434.74	40.73	107.20	1.71	9 630.03	809.41
草地	264.87	450.33	5 189.34	22.01	219.49	6.54	6 152.57	963.23
水域	17.53	3.94	6.12	420.41	24.31	0.31	472.62	52.21
建设用地	32.18	11.41	10.18	4.25	428.08	0.18	486.28	58.20
未利用地	0.97	1.12	4.11	0.53	0.13	61.37	68.22	6.85
总和	4 018.84	9 498.93	5 835.35	514.06	1 139.98	70.83	21 077.99	
转入总计	540.57	678.30	646.01	93.65	711.90	9.46		2 679.90

通过设置地类间不同情景下的成本矩阵与邻域因子权重,利用 2010 年与 2020 年的土地利用数据模拟 2030 年的土地利用情况(如表 3 所示)。结果表明,在不同情景下,土地利用需求及分布具有较大差异。

在自然发展情景下,不考虑政策因素影响,只考

3 结果与分析

3.1 基于 PLUS 模型对土地利用分布的模拟及预测

以 2000 年与 2010 年的数据为基础,采用 PLUS 模型对 2020 年的土地利用进行模拟,并与 2020 年真实的土地利用进行比较。PLUS 模型的整体模拟精度为 0.92, kappa 系数为 0.89,证明 PLUS 模型具有可靠性,可以用来预测未来的土地利用分布。

如表 2 所示,2000—2020 年,发生转移的土地利用面积为 2 979.90 km<sup>2</sup>,占研究区土地利用面积的 12.71%,土地利用格局变化不大。2000 年耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地的面积分别为 4 268.27,9 630.03,6 152.57,472.62,486.28,68.22 km<sup>2</sup>,2020 年各地类面积为 4 018.90,9 499.17,5 835.35,514.06,1 139.99,70.83 km<sup>2</sup>。在此期间,耕地转出面积大于转入面积,减少 249.42 km<sup>2</sup>,减幅为 5.84%;林地转出面积大于转入面积,减少 131.11 km<sup>2</sup>,减幅为 1.36%;草地转出面积大于转入面积,减少 317.22 km<sup>2</sup>,减幅为 5.16%;水域面积变化量较小,增加了 41.44 km<sup>2</sup>,主要来自耕地、林地与草地;建设用地面积明显增加,为 653.71 km<sup>2</sup>,增幅为 134.43%,增加部分主要来自耕地和草地,林地次之;未利用地的变化量最少,仅增加了 2.61 km<sup>2</sup>,主要是来自草地的转入。结合昆明市 2000—2020 年的土地利用类型生成涨势、落势图谱(图 1),可以看出昆明土地利用变化呈现建设用地沿滇池向外扩张,水域面积有一定程度增加,耕地、林地与草地面积有一定程度减小的特点。

虑自然与人文共同作用下的土地利用。该情景下,耕地面积为 4 018.90 km<sup>2</sup>,与 2020 年相比,减幅为 4.41%,草地、水域与未利用地均发生不同程度的减少,幅度分别为 2.38%,0.25%,1.22%,而林地与建设用地情况相反,林地有小幅度的增长,增幅为 0.03%,

而建设用地扩张最为明显,增幅达 27.67%。从图 2 可以看出,建设用地的增长在原有的土地利用情况

下,由滇池向外延伸,主要占用耕地与林地,如果不加以限制,生态环境与粮食安全将受威胁。

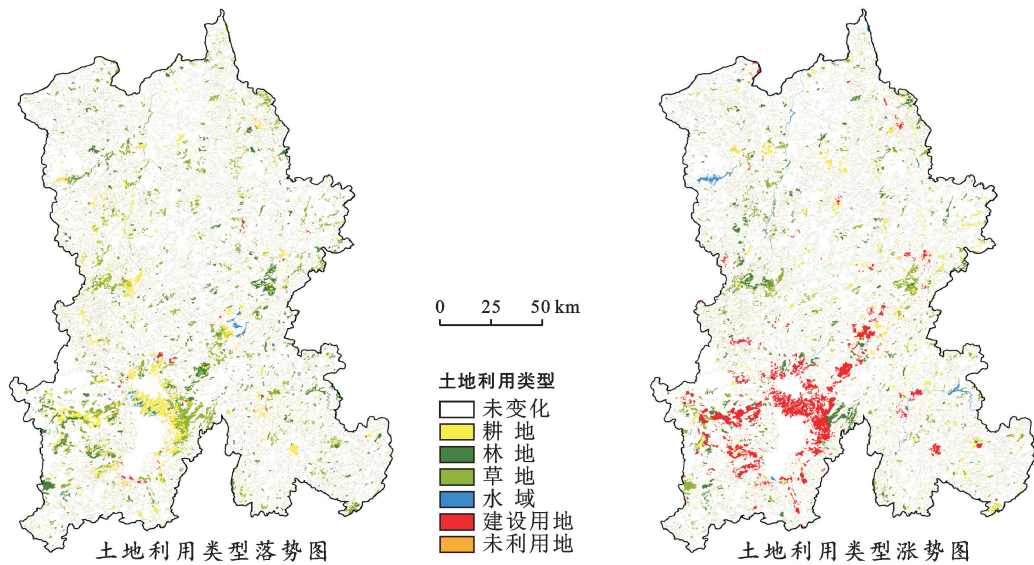


图 1 2000—2020 年昆明市土地利用类型落、涨势图

Fig.1 Decline and increase of land use types in Kunming from 2000 to 2020

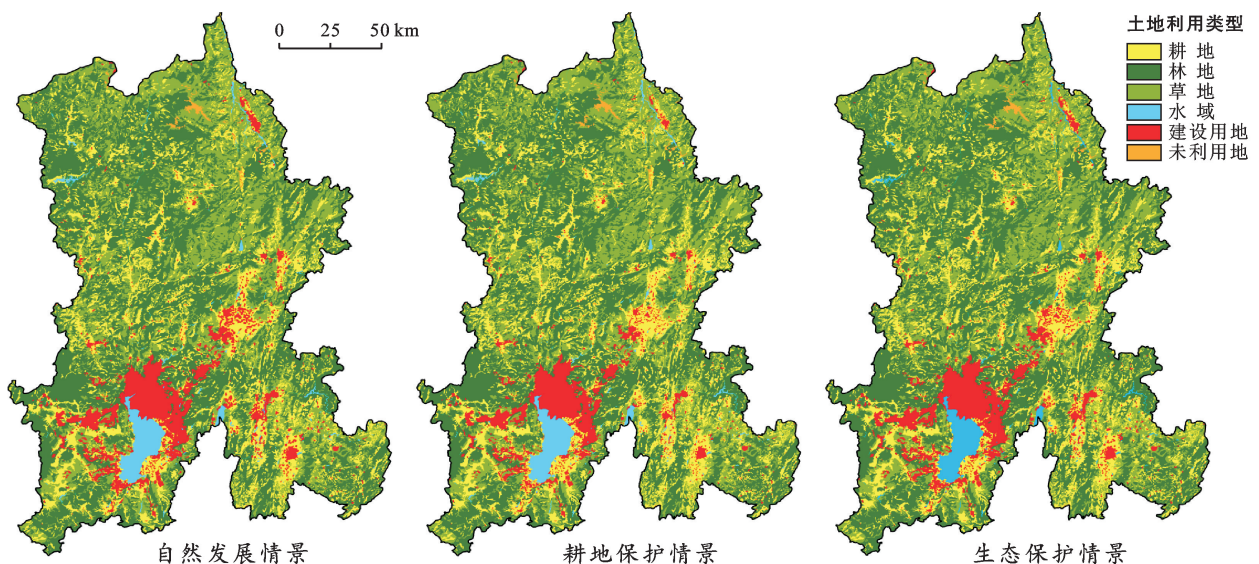


图 2 2030 年 3 种不同情景下的昆明市土地利用空间分布模拟

Fig.2 Simulation of spatial distribution of land use in Kunming under three different scenarios in 2030

表 3 昆明市 3 种情景下昆明市地类面积与变化率

Table 3 Land type area and change rate in Kunming under three scenarios

情景模式	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2020 年(基准年)面积/km <sup>2</sup>	4 018.90	9 499.17	5 835.35	514.06	1 139.99	70.83
2030 年自然发展情景面积/km <sup>2</sup>	3 841.63	9 501.96	5 696.61	512.77	1 455.37	69.96
2030 年耕地保护情景面积/km <sup>2</sup>	4 059.08	9 494.26	5 751.21	504.03	1 200.21	69.49
2030 年生态保护情景面积/km <sup>2</sup>	3 911.10	9 539.40	5 660.91	501.33	1 394.88	70.66
2030 年自然发展情景变化率/%	-4.41	0.03	-2.38	-0.25	27.67	-1.22
2030 年耕地保护情景变化率/%	1.00	-0.05	-1.44	-1.95	5.28	-1.89
2030 年生态保护情景变化率/%	-2.68	0.42	-2.99	-2.48	22.36	-0.24

在耕地保护情景下,严格限制耕地向其他地类转换,该情景下,耕地面积为 4 059.08 km<sup>2</sup>,与 2020 年相比,增加了 1.00%,耕地保护取得一定成效。与自然发展情景相比,耕地面积增加 217.45 km<sup>2</sup>,表明落实耕地保护,严格管控其他地类占用耕地,能切实保护耕地,保障粮食安全。至 2030 年,林地、草地水域与未利用地都有一定程度下降,而建设用地仍然是扩张最明显的地类,但相较于自然发展情景,建设用地减少 255.16 km<sup>2</sup>,这表明在耕地保护政策驱动下,建设用地扩张趋势会受限制。从各地类空间分布上看,建设用地的扩张主要集中在滇池周围,耕地增加的区域零散分布。

生态保护情景与自然发展情景的土地利用类似。相较于 2020 年,该情景下,2030 年昆明市耕地、草地、水域都有小幅度减少,减幅分别为 2.68%, 2.99%, 2.48%,未利用地减幅最小,为 0.24%。林地面积为 9 539.40 km<sup>2</sup>,呈现小幅度增长趋势,涨幅为 0.42%。建设用地扩张明显,但是扩张率得到抑制,

由自然增长情景的 22.67% 降到 22.36%。

### 3.2 碳储量变化评估

利用 InVEST 模型对昆明市不同情景土地利用变化所引起的生物碳储量进行评估(如表 4 所示),碳储量的变化也有显著差异。从时间变化来看,昆明市 2000 年、2010 年与 2020 年的碳储量分别为  $3.37 \times 10^8$  t,  $3.34 \times 10^8$  t,  $3.28 \times 10^8$  t,整体呈下降趋势,2000—2010 年昆明市总碳储量减少  $3.06 \times 10^6$  t,相较于 2000 年,减幅为 0.91%;2010—2020 年,减幅加快,减少  $6.09 \times 10^6$  t,相较于 2010 年减幅为 1.82%。2000—2020 年总碳储量减少  $9.15 \times 10^6$  t,年均减少量为  $9.20 \times 10^5$  t。到 2030 年,自然发展情景下,碳储量预测为  $3.28 \times 10^8$  t,较 2020 年减少  $3.11 \times 10^6$  t;耕地保护情景下,碳储量预测为  $3.27 \times 10^8$  t,较 2020 年减少  $1.00 \times 10^6$  t,碳储量减少程度相较于自然发展情景得到缓和;生态保护情景下,碳储量预测为  $3.25 \times 10^8$  t,相较于 2020 年减少  $2.26 \times 10^6$  t,减幅为 0.69%。

表 4 2000—2030 年昆明市不同土地利用类型碳储量

Table 4 Carbon storage of different land types in Kunming from 2000 to 2030

10<sup>4</sup> t

情景模式	不同土地利用类型碳储量						总碳储量
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2000 年	3 034.74	22 100.92	8 588.99	6.14	3.89	0.27	33 734.96
2010 年	3 011.92	22 052.01	8 353.05	6.33	5.53	0.29	33 429.14
2020 年	2 857.43	21 800.59	8 146.15	6.68	9.12	0.28	32 820.26
2030 年自然发展	2 731.40	21 807.00	7 952.46	6.67	11.64	0.28	32 509.45
2030 年耕地保护	2 886.01	21 789.33	8 028.69	6.55	9.60	0.28	32 720.46
2030 年生态保护	2 780.80	21 892.93	7 902.63	6.52	11.16	0.28	32 594.31

从碳储量的空间分布(图 3)可知,昆明市碳储量变化不是很明显,主要分布在耕地、林地、草地的转化,但在空间上仍有差异性。2000—2010—2020 年,昆明市碳储量空间格局变化小,碳储量变化明显的地区主要集中在中偏南的地方。2020—2030 年自然发展情景下,碳储量损失最多,主要集中于中部偏南方向,2020—2030 年耕地保护、生态保护情景下,昆明市碳储量相较于自然增长情景下碳储量减少程度变小。这与昆明市的林地、草地分布一致,而中偏南方向主要是水域与建设用地,因此碳密度较低,结果表明,昆明市土地利用类型与碳储量变化具有高度一致性。

### 3.3 土地利用变化引起碳储量变化

根据昆明市 2000—2020 年的土地利用转移矩阵和不同地类之间的碳密度差值,计算土地利用变化引

起的碳储量变化,结果表明由于土地利用变化,导致昆明市 2000—2020 年植被碳储量减少  $3.99 \times 10^6$  t,土壤碳储量减少  $5.17 \times 10^6$  t,总碳储量减少  $9.15 \times 10^6$  t(表 5)。林地、草地的转出使碳储量大量减少,共计  $1.21 \times 10^7$  t,而耕地、草地转为建设用地导致碳储量减少  $2.53 \times 10^6$ ,  $3.05 \times 10^6$  t,占研究区碳储量减少的 20.93%, 25.18%。耕地、水域、建设用地、未利用地的转出类型使碳储量增加  $1.93 \times 10^6$ ,  $7.06 \times 10^5$ ,  $1.42 \times 10^6$ ,  $1.93 \times 10^5$  t。其中耕地—水域、耕地—建设用地、耕地—未利用地、林地的转出、草地—耕地、草地—水域、草地—建设用地、草地—未利用地等土地利用变化使植被与土壤碳储量均减少,其他土地类型之间的转化使植被与土壤碳储量均增加,有利于碳汇的形成。

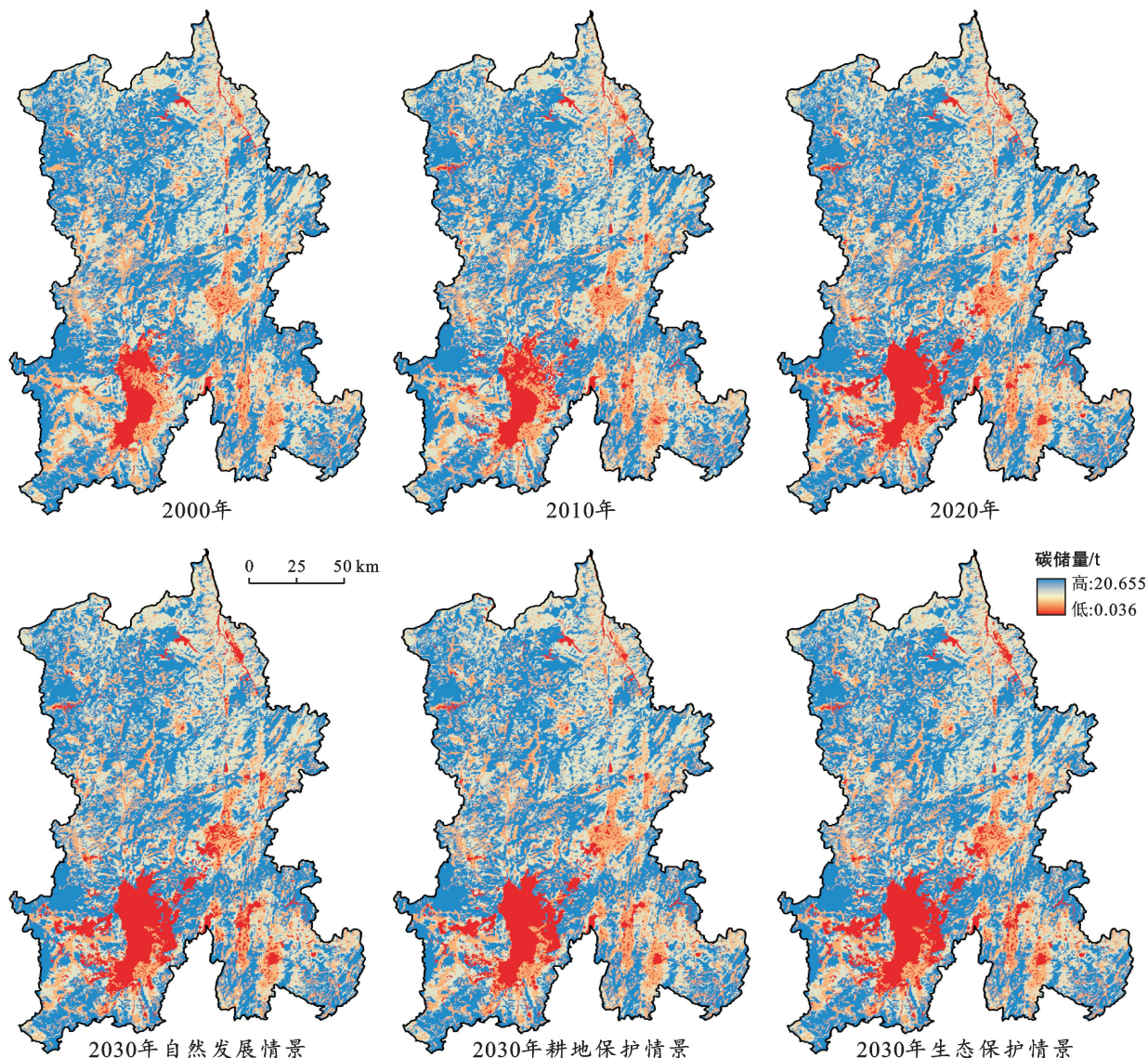


图 3 2000—2030 年昆明市碳储量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon storage in Kunming from 2000 to 2030

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 模型优势与局限性。土地利用变化是相对复杂的过程,受社会经济、气候和环境因素的共同影响。本文选取 14 个驱动因子来模拟研究区土地利用格局。虽然各因子对土地利用类型具有较好的拟合效果,模拟结果精度也满足要求,但是却忽略了生态保护红线、永久基本农田保护界线以及城市开发边界等政策限制因子对土地利用变化的影响。为提高模型模拟的准确度,应该将政策因素加入驱动因子。其次,数据(不同地类碳密度数据)都来源于文献及修正公式,并且选取的指标存在差异,造成估算结果的不准确性。最后,InVEST 模型只考虑不同地类碳密

度,忽略植被类型和植被生长对碳密度的影响,在今后的研究中,将加入实地调查数据对碳密度进行验证。

(2) 土地利用变化对碳储量的影响。通过对昆明市的土地利用与碳储量进行模拟及预测发现,现行土地利用转移趋势为高碳密度地类向低密度地类转换,导致区域总储量减少。采取耕地保护措施,在一定程度上保证了经济效益,但是会损失生态效益,而生态保护情景,可以保障林草的自然演替,对生态系统碳储量的恢复具有重要作用,但耕地仍得不到有效保护。在未来的研究中,可以加入综合发展情景,既满足经济发展,同时兼顾生态保护,在建设用地基本增长的同时控制其扩张速度,有助于恢复碳储量水平,实现碳中和的政策需求。为此,政府部门可制定

合理的发展战略,采取适当的措施使昆明市向更好的方向发展的地类转化,如继续实施退耕还林等政策,同时加强林地的保护,提高森林覆盖率。

表 5 土地利用变化引起的碳储量变化

Table 5 Changes of carbon storage caused by land use change

土地利用类型转化	面积/km <sup>2</sup>	植被碳储量变化/10 <sup>6</sup> t	土壤碳储量变化/10 <sup>6</sup> t	总碳储量变化/10 <sup>6</sup> t
耕地—林地	211.5 1	1.730 1	1.620 2	3.350 3
耕地—草地	190.86	0.452 3	0.855 1	1.307 4
耕地—水域	26.13	-0.079 7	-0.102 7	-0.182 4
耕地—建设用地	360.78	-1.118 4	-1.417 9	-2.536 3
耕地—未利用地	0.71	-0.002 2	-0.002 8	-0.005 1
小 计	789.99	0.982 1	0.951 9	1.934 0
林地—耕地	225.03	-1.840 7	-1.723 7	-3.564 4
林地—草地	434.74	-2.525 8	-1.382 5	-3.908 3
林地—水域	40.73	-0.457 4	-0.472 0	-0.929 4
林地—建设用地	107.20	-1.209 2	-1.242 4	-2.451 6
林地—未利用地	1.71	-0.019 4	-0.019 8	-0.039 2
小 计	809.41	-6.052 5	-4.840 5	-10.893 0
草地—耕地	264.87	-0.627 7	-1.186 6	-1.814 3
草地—林地	450.33	2.616 4	1.432 1	4.048 5
草地—水域	22.01	-0.119 3	-0.185 1	-0.304 4
草地—建设用地	219.49	-1.200 6	-1.845 9	-3.046 5
草地—未利用地	6.54	-0.036 0	-0.055 0	-0.091 0
小 计	963.23	0.632 8	-1.840 5	-1.207 8
水域—耕地	17.53	0.053 5	0.068 9	0.122 3
水域—林地	3.94	0.044 2	0.045 6	0.089 8
水域—草地	6.12	0.033 2	0.051 5	0.084 7
水域—建设用地	24.31	-0.001 2	0.000 0	-0.001 2
水域—未利用地	0.31	0.000 0	0.000 0	0.000 0
小 计	52.21	0.129 6	0.166 0	0.295 6
建设用地—耕地	32.18	0.099 8	0.126 5	0.226 2
建设用地—林地	11.41	0.128 7	0.132 2	0.260 9
建设用地—草地	10.18	0.055 7	0.085 6	0.141 3
建设用地—水域	4.25	0.000 2	0.000 0	0.000 2
建设用地—未利用地	0.18	0.000 0	0.000 0	0.000 0
小 计	58.20	0.284 3	0.344 3	0.628 6
未利用地—耕地	0.97	0.003 0	0.003 8	0.006 8
未利用地—林地	1.12	0.012 7	0.013 0	0.025 7
未利用地—草地	4.11	0.022 6	0.034 5	0.057 2
未利用地—水域	0.53	0.000 0	0.000 0	0.000 0
未利用地—建设用地	0.13	0.000 0	0.000 0	0.000 0
小 计	6.85	0.038 4	0.051 3	0.089 7
总 计	2 679.90	-3.985 3	-5.167 5	-9.152 8

土地利用变化通过改变生态系统的结构和功能来影响固碳能力<sup>[49]</sup>,对碳储量的变化有着举足轻重影响<sup>[50]</sup>。结果表明,林地、耕地、草地的碳储量较高,水域、建设用地、未利用地碳储量较少。随着城镇化进程的加快,建设用地需求急剧增加,土地利用分布发生变化,主要表现为耕地、林地、草地减少,建设用

地急剧扩张,将对区域碳储量产生不利影响。为实现双碳目标,必须推进生态保护与低碳发展,实现人与自然和谐共生。

#### 4.2 结 论

(1) 2000—2020 年,昆明市土地利用类型面积变化不大,耕地、林地、草地面积减少,水域、未利用地呈



现小幅度增加,建设用地呈爆炸式增长,增加面积达 653.7 km<sup>2</sup>。

(2) 2020—2030 年自然发展情景下,建设用地大幅度增加,耕地、草地、水域与未利用地有不同程度的减少;耕地保护情景下,耕地有小幅度增加,建设用地增加趋于平缓,林地、草地、水域、未利用地均有减少;生态保护情景土地利用变化与自然发展情景类似,建设用地扩张受到一定的限制,但也出现大幅度增长。

(3) 根据 InVEST 模型测算结果,昆明市 2000, 2010, 2020 年的碳储量呈逐年递减趋势,由于建设用地的迅速扩张,占用碳密度较高的地类,导致碳储量明显减少。

(4) 在 2020—2030 年,碳储量在自然发展、耕地保护、生态保护情景下都呈现不同程度下降,自然发展情景下碳储量减少最多,从 3 种情景模型结果来看,生态保护情景是昆明市未来发展的最优情景。而生态保护情景最重要的是保护生态用地,林地作为 6 种地类中固碳能力最强的地类,因此可以通过人工造林的方式增加林地面积,从而提高生态系统固碳能力。研究的结果可为实现碳达峰和碳中和的目标提供数据支撑。

(5) 研究时间段内,昆明市土地利用与碳储量呈现高度一致性,土地利用数量变化决定生态系统碳储量与空间分布。合理优化土地利用结构,控制建设用地向林地、草地的扩张,有利于减缓区域内碳储量损失。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Udara Willhelm Abeydeera L H, Wadu Mesthrige J, Samarasinghalage T I. Global research on carbon emissions: A scientometric review [J]. Sustainability, 2019, 11(14):3972.
- [2] 张燕,师学义,唐倩.不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J].生态学报,2021,41(1):360-373.
- [3] 赵昕月,董世魁,杨明岳,等.基于扰动模型的青藏高原放牧社会—生态系统分析[J].自然资源学报,2021,36(8):2125-2138.
- [4] Kauffman J B, Adame M F, Arifanti V B, et al. Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients [J]. Ecological Monographs, 2020, 90(2):e01415.
- [5] 张海凤,崔桂善.土地利用/覆盖类型的变化对陆地生态系统碳收支的影响[J].中国资源综合利用,2019,37(1):176-179.
- [6] 白娥,薛冰.土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响[J].植物生态学报,2020,44(5):543-552.
- [7] Tian Lei, Tao Yu, Fu Wenxue, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China [J]. Remote Sensing, 2022, 14(10):2330.
- [8] de B Richter D, Houghton R. Gross CO<sub>2</sub> fluxes from land-use change: Implications for reducing global emissions and increasing sinks [J]. Carbon Management, 2011, 2(1):41-47.
- [9] 曹祺文,顾朝林,管卫华.基于土地利用的中国城镇化 SD 模型与模拟[J].自然资源学报,2021,36(4):1062-1084.
- [10] 李世锋,洪增林,薛旭平,等.基于 Logistic-CA-Markov 耦合模型的彬州市 LUCC 多情景模拟[J].水土保持研究,2022,29(4):292-299.
- [11] Yang X, Chen R, Zheng X Q. Simulating land use change by integrating ANN-CA model and landscape pattern indices [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(3):918-932.
- [12] 高周冰,王晓瑞,隋雪艳,等.基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测[J].农业资源与环境学报,2022,39(5):1001-1013.
- [13] Jin Qingwen, Guang Liu, Li Lei, et al. Land use scenarios simulation based on the CLUE-S model of the Lijiang River Basin in Guilin, China [J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2016, 46(1):012051.
- [14] 许小亮,李鑫,肖长江,等.基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化[J].生态学报,2016,36(17):5401-5410.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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(03):139-148,179.
- [18] 陆羽,黄秋昊,赵琪琪,等.基于 InVEST 与 CARS 的生态空间分区与未来预测研究[J].地理信息世界,2021,28(3):15-19.
- [19] 杨激威,赵娟,朱家田,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J].自然资源遥感,2022,34(04):175-182.
- [20] 李安林,周艳,唐丽毅,等.怒江州土地利用模拟及生态系统服务价值评估:基于 PLUS 模型的多情景分析[J].中国农业资源与区划:1-12.
- [21] 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.
- [22] 李姣,汪杰,李朗,等.洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响[J].*生态学杂志*, 2022, 41(6):1156-1165.
- [23] 赵俊芳,曹云,马建勇,等.基于遥感和 FORCCHN 的中国森林生态系统 NPP 及生态服务功能评估[J].*生态环境学报*, 2018, 27(9):1585-1592.
- [24] Zhao Mingwei, Yue Tianxiang, Zhao Na, 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.
- [25] 张平平,李艳红,殷浩然,等.中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J].*自然资源学报*, 2022, 37(5):1183-1197.
- [26] 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.
- [27] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].*生态学报*, 2021, 41(10): 4052-4065.
- [28] Mendoza-Ponce A, Corona-Núñez R, Kraxner F, et al. Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico [J]. *Global Environmental Change*, 2018, 53: 12-23.
- [29] Babbar D, Areendran G, Sahana M, et al. Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278:123333.
- [30] 杨芝歌,周彬,余新晓,等.北京山区生物多样性分析与碳储量评估[J].*水土保持通报*, 2012, 32(3):42-46.
- [31] 张薇,刘森,戚与珊.基于 CLUE-S 模型的昆明市域土地利用预案模拟[J].*生态学杂志*, 2014, 33(6):1655-1662.
- [32] 陈理庭,蔡海生,张婷,等.基于 Markov-PLUS 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.
- [33] 刘强,杨众养,陈毅青,等.基于 CA-Markov 多情景模拟的海南岛土地利用变化及其生态环境效应[J].*生态环境学报*, 2021, 30(7):1522-1531.
- [34] 杨朔,苏昊,赵国平.基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟:以汉中市为例[J].*干旱区资源与环境*, 2022, 36(10):86-95.
- [35] 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.
- [36] Li Chen, Wu Yingmei, Gao Binpin, 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: 108328.
- [37] Zhai Han, Lv Chaoqun, Liu Wanzeng, et al. Understanding spatio-temporal patterns of land use/land cover change under urbanization in Wuhan, China, 2000—2019 [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16):3331.
- [38] 李代超,卢嘉奇,谢晓苇,等.碳中和视角下基于主体功能区分类约束的国土空间分区优化模拟:以福建省为例[J].*生态学报*, 2022, (24):1-16.
- [39] Lin Zhiqiang, Peng Shuangyun. Comparison of multi-model simulations of land use and land cover change considering integrated constraints: A case study of the Fuxian Lake basin [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142:109254.
- [40] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳储量[J].*中国科学(D辑:地球科学)*, 2003, 33(1):72-80.
- [41] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J].*土壤学报*, 2004, 41(5):687-699.
- [42] 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.
- [43] Tang Xuli, Zhao Xia, Bai Yongfei, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey [J]. *PNAS*, 2018, 115(16):4021-4026.
- [44] 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.
- [45] 包承宇,曾和平,张梦妍,等.云南省土壤有机碳储量估算及空间分布[J].*水土保持通报*, 2014, 34(6):260-266.
- [46] 汤浩藩,许彦红,艾建林.云南省森林植被碳储量和碳密度及其空间分布格局[J].*林业资源管理*, 2019(5):37-43.
- [47] 郭晓敏,揣小伟,张梅,等.扬子江城市群土地利用时空变化及其对陆地生态系统碳储量的影响[J].*长江流域资源与环境*, 2019, 28(2):269-280.
- [48] 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.
- [49] Chen Dima, Lan Zhichun, Hu Shuijin, et al. Effects of nitrogen enrichment on belowground communities in grassland: Relative role of soil nitrogen availability vs. soil acidification [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 89:99-108.
- [50] 唐睿,彭开丽.土地利用变化对区域陆地碳储量的影响研究综述[J].*江苏农业科学*, 2018, 46(19):5-11.