

基于PLUS-InVEST模型的昆明市多情景土地利用变化及碳储量响应研究

符兆新^{1,2}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²云南师范大学西部资源环境地理信息技术教育部工程技术研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2026年6月30日; 录用日期: 2026年8月3日; 发布日期: 2026年8月27日

摘要

土地利用变化是影响区域生态系统碳储量的重要因素。本文以昆明市为研究区, 基于2010、2015和2020年土地利用数据, 以及自然、社会经济和交通区位等驱动因子, 构建PLUS-InVEST耦合模型。研究分析2010~2020年土地利用变化特征, 并模拟2030年自然发展、生态保护、城市扩张和耕地保护四种情景下的土地利用格局。在此基础上, 评估不同情景下的碳储量响应差异。结果表明, 2010~2020年, 昆明市林地和建设用地面积增加, 草地面积减少。土地利用变化主要表现为草地向耕地、林地和建设用地转化。2020年土地利用模拟结果的总体精度为91.34%, Kappa系数为0.8556, 说明PLUS模型具有较好的模拟效果。2030年多情景模拟结果显示, 生态保护情景下林地面积最大, 城市扩张情景下建设用地扩张最明显。InVEST结果显示, 2020年昆明市碳储量为346.417 Mt C。2030年, 生态保护情景碳储量最高, 为348.307 Mt C。城市扩张情景碳储量最低, 为348.016 Mt C。这些结果表明, 不同发展情景会改变土地利用结构, 并进一步影响碳储量。保护林地等生态空间有利于提高区域碳储量, 控制建设用地扩张有助于维持土地生态系统碳汇能力。

关键词

PLUS, InVEST, 多情景模拟, 土地利用变化, 碳储量

Research on Multi-Scenarios of Land Use Change and Carbon Storage Responses in Kunming Based on the PLUS-InVEST Model

Zhaoxin Fu^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²The Engineering Research Center of GIS Technology in Western China, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Abstract

Land use change is an important factor affecting carbon storage in regional ecosystems. Using Kunming as the study area, this study develops a coupled PLUS-InVEST model based on land use data from 2010, 2015, and 2020, together with natural, socioeconomic, and transport-location driving factors. Land use change from 2010 to 2020 was analyzed, and land use patterns in 2030 were simulated under four scenarios: natural development, ecological protection, urban expansion, and cropland protection. Differences in carbon storage responses under different scenarios were then evaluated. The results show that forest land and construction land increased from 2010 to 2020, while grassland decreased. Land use change was mainly characterized by the conversion of grassland to cropland, forest land, and construction land. The simulated 2020 land use map achieved an overall accuracy of 91.34% and a Kappa coefficient of 0.8556, indicating that the PLUS model performed well in simulating land use change. The multi-scenario simulation results for 2030 show that forest land was the largest under the ecological protection scenario, while the expansion of construction land was most pronounced under the urban expansion scenario. The InVEST results show that carbon storage in Kunming was 346.417 Mt C in 2020. In 2030, carbon storage was highest under the ecological protection scenario, reaching 348.307 Mt C, and lowest under the urban expansion scenario, at 348.016 Mt C. These results indicate that different development scenarios affect carbon storage by changing land use structure. Protecting ecological spaces such as forest land can increase regional carbon storage, while controlling construction land expansion can help maintain the carbon sink capacity of land ecosystems.

Keywords

PLUS, InVEST, Multi-Scenario Simulation, Land Use Change, Carbon Storage

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土地利用变化是人类活动影响陆地生态系统结构与功能的重要途径，也是区域碳循环变化的重要驱动因素[1]。随着城市化进程加快，建设用地扩张、耕地调整、林草地转化等过程不断改变区域生态空间格局，并进一步影响生态系统碳储量。对于山地城市和高原湖泊型城市而言，如何在城市发展、农业空间稳定和生态功能维护之间取得平衡，是国土空间规划与管理以及区域低碳发展背景下需要关注的重要问题。

目前，土地利用变化模拟和生态系统服务评估已成为分析土地系统演变及其生态效应的重要方法[2]-[4]。多情景土地利用研究不仅需要判断不同土地利用类型在哪里发生转化，还需要模拟土地利用斑块如何生成和扩展[5]。PLUS 模型可以满足这一需求。该模型主要由土地扩张分析策略(LEAS)和基于斑块生成的元胞自动机模块(CARS)组成，不仅可以分析不同土地利用类型扩张的驱动因素，还可以模拟土地利用斑块的生成和扩展过程。在模拟过程中，土地利用转化概率、邻域效应、土地需求量和转化约束等共同影响斑块生成。相比只关注像元转化的模型，PLUS 模型更重视土地利用斑块的空间生成过程，适合用于多情景土地利用格局模拟[6]。InVEST 模型的碳储量模块可根据不同土地利用类型的碳密度参数估算

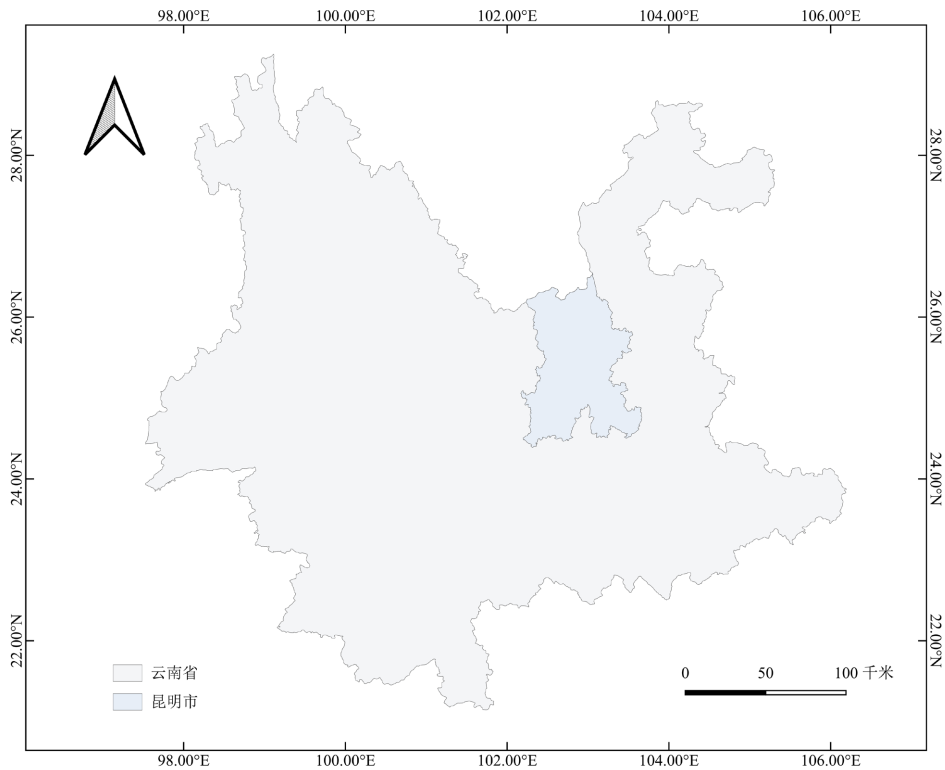
区域生态系统碳储量[7]。将 PLUS 模型与 InVEST 模型结合，可在模拟未来土地利用格局的基础上，评估不同发展情景下碳储量的变化。

已有研究多关注单一情景或历史时期的土地利用变化，并分析其对碳储量的影响[8]-[10]。相比之下，不同发展导向下土地利用结构如何变化，以及这些变化如何影响碳储量，仍需要进一步分析。在快速城市化地区，建设用地扩张与生态保护之间的矛盾逐渐显现。不同发展导向会形成不同的土地利用格局，也会带来不同的碳储量变化[11]。因此，有必要开展多情景土地利用模拟，并比较不同情景下的碳储量响应。

本文以昆明市为研究区，基于 2010、2015 和 2020 年土地利用数据，以及自然、社会经济和交通区位等驱动因子，构建 PLUS-InVEST 耦合模型。研究首先分析 2010~2020 年土地利用变化特征，然后设置自然发展、生态保护、城市扩张和耕地保护四种情景，模拟 2030 年土地利用格局，最后利用 InVEST 碳储量模型评估不同年份和不同情景下的碳储量变化。研究结果可为昆明市生态空间保护、建设用地管控和国土空间优化提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3266号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Location map of the study area

图 1. 研究区概况

如图 1 所示，昆明市位于云南省中部，是云南省省会和滇中城市群核心城市。该地地处云贵高原中部，地形以山地、高原盆地和湖泊湿地为主。山地、湖泊、坝区和城市建设空间交错分布，形成了典型的

山地城市和高原湖泊型城市格局。受高原季风气候影响，昆明市气候温和，年平均气温约 16.0℃，年降水量约 991 mm。复杂的地形条件和较好的水热条件，使昆明市形成了以林地和耕地为主的土地利用结构[12]。建设用地主要分布在中心城区、坝区和交通条件较好的区域。由于不同土地利用类型的碳密度不同，土地利用变化会影响区域生态系统碳储量[13]。昆明市的土地利用变化具有明显的空间差异，使其成为研究多情景土地利用变化及碳储量响应的典型区域。

2.2. 数据来源及预处理

本文所用数据主要包括土地利用数据、自然环境数据、社会经济数据、交通区位数据和碳密度数据(如表 1)。土地利用数据包括 2010 年、2015 年和 2020 年三期数据[14]，用于分析历史土地利用变化，并作为 PLUS 模型训练和验证的基础。根据研究需要，将土地利用类型统一划分为耕地、林地、草地、水体、未利用土地和建设用地六大类。自然环境数据包括高程、坡度、坡向、年平均气温、年平均降雨量，用于反映地形和气候对土地利用变化的影响。社会经济数据包括人口密度和 GDP，用于表征人类活动强度。交通区位数据包括铁路、公路和河流等空间数据，并通过欧式距离分析得到距铁路、距公路和距河流的距离等因子。碳密度数据包括地上生物量碳密度、地下生物量碳密度、土壤碳密度和死有机质碳密度。本文参考已有研究中不同土地利用类型的碳密度参数[15]，结合昆明市气候条件对碳密度进行本地化校正，从而获得适用于昆明市的 InVEST 碳密度参数表。

Table 1. Details of the data used in this study
表 1. 本研究中使用的数据详情

数据类型	数据名称	空间分辨率	数据来源
土地利用数据	土地利用数据	30 米	(https://zenodo.org/records/18180184)
	数字高程模型	90 米	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡度	90 米	使用 ArcMap 10.2 从 DEM 中生成
自然环境数据	坡向	90 米	使用 ArcMap 10.2 从 DEM 中生成
	年平均气温	1000 米	生态气象云服务平台(https://em.cams.cma.cn/)
	年平均降雨量	1000 米	生态气象云服务平台(https://em.cams.cma.cn/)
社会经济数据	人口密度	1000 米	橡树岭国家实验室(https://landscan.ornl.gov/)
	GDP	1000 米	资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/)
交通区位数据	距铁路的距离	100 米	美国国家经济研究局 (https://data.nber.org/data-appendix/w33515/?sessionid=-1428200437)
	距公路的距离	100 米	美国国家经济研究局 (https://data.nber.org/data-appendix/w33515/?sessionid=-1428200437)
	距河流的距离	100 米	可持续发展大数据国际研究中心 (https://data.casearth.cn/dataset/66580e10819aec3bf756e167)
碳密度数据	碳密度数据	/	参考已有文献，结合昆明市气候条件进行本地化校正

2.3. 研究方法

2.3.1. PLUS 模型

PLUS 模型主要包括 LEAS 模块和 CARS 模块。LEAS 模块通过比较起始期和终止期土地利用数据，提取各土地利用类型扩张斑块。然后，结合驱动因子，利用随机森林算法分析土地利用变化规则，并生成各类土地利用发展潜力图。CARS 模块以发展潜力图为基础，结合土地需求量、转移矩阵、邻域权重和限制转换区域，模拟未来土地利用空间格局。

在模型验证阶段,本文利用2010年和2015年土地利用数据,以及2010年驱动因子训练LEAS模块,得到2010~2015年土地利用扩张潜力图。然后,以2015年土地利用作为初始格局,通过CARS模块模拟2020年土地利用,并与真实2020年土地利用进行对比。本文采用总体精度和Kappa系数评价模拟结果。

在模型预测阶段,基于2015年和2020年土地利用数据,以及2015年驱动因子训练LEAS模块,并以2020年土地利用为基期模拟2030年土地利用。自然发展情景的土地需求量由PLUS模型内置Markov Chain模块根据2015~2020年土地利用转移矩阵预测得到。生态保护、城市扩张和耕地保护情景在自然发展情景基础上进行调整。生态保护情景降低建设用地扩张强度,并提高生态用地保有水平。城市扩张情景提高建设用地需求。耕地保护情景提高耕地保有量,并限制建设用地无序扩张。

2.3.2. InVEST 模型

InVEST碳储量模型根据不同土地利用类型的碳密度参数估算区域碳储量。模型包括地上生物量碳、地下生物量碳、土壤有机碳和死有机质碳四类碳库。各土地利用类型的总碳储量由四类碳库相加得到,如公式(1)、(2)所示。

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

$$C_{total} = \sum_i A_i \times C_i \quad (2)$$

式中, C_i 为第 i 类土地利用类型单位面积总碳密度, A_i 为该地类面积, C_{total} 为区域总碳储量。本文参考 InVEST 碳储量模型四碳库结构和政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提出的土地利用碳库核算框架,结合昆明市气候条件对基础碳密度进行修正。修正后耕地、林地、草地、水体、未利用土地和建设用地的总碳密度分别为 104.232、226.475、98.121、7.097、42.828 和 25.549 t C/ha。其中,林地碳密度最高,水体和建设用地碳密度最低。

2.3.3. PLUS-InVEST 耦合模型框架



Figure 2. PLUS-InVEST coupling model technology flowchart

图 2. PLUS-InVEST 耦合模型技术流程图

本文构建 PLUS-InVEST 耦合模型，用于模拟昆明市多情景土地利用变化，并评估不同情景下的碳储量响应。模型框架主要包括数据准备与预处理、PLUS 模型模拟、InVEST 碳储量评估和结果分析与表达四个部分(图 2)。

3. 结果分析

3.1. 2010~2020 年土地利用变化特征



注: (a)~(c) 分别表示 2010、2015 和 2020 年土地利用空间分布, (d) 2010、2015 和 2020 年各土地利用类型面积变化, (e) 2010~2020 年土地利用转移矩阵。

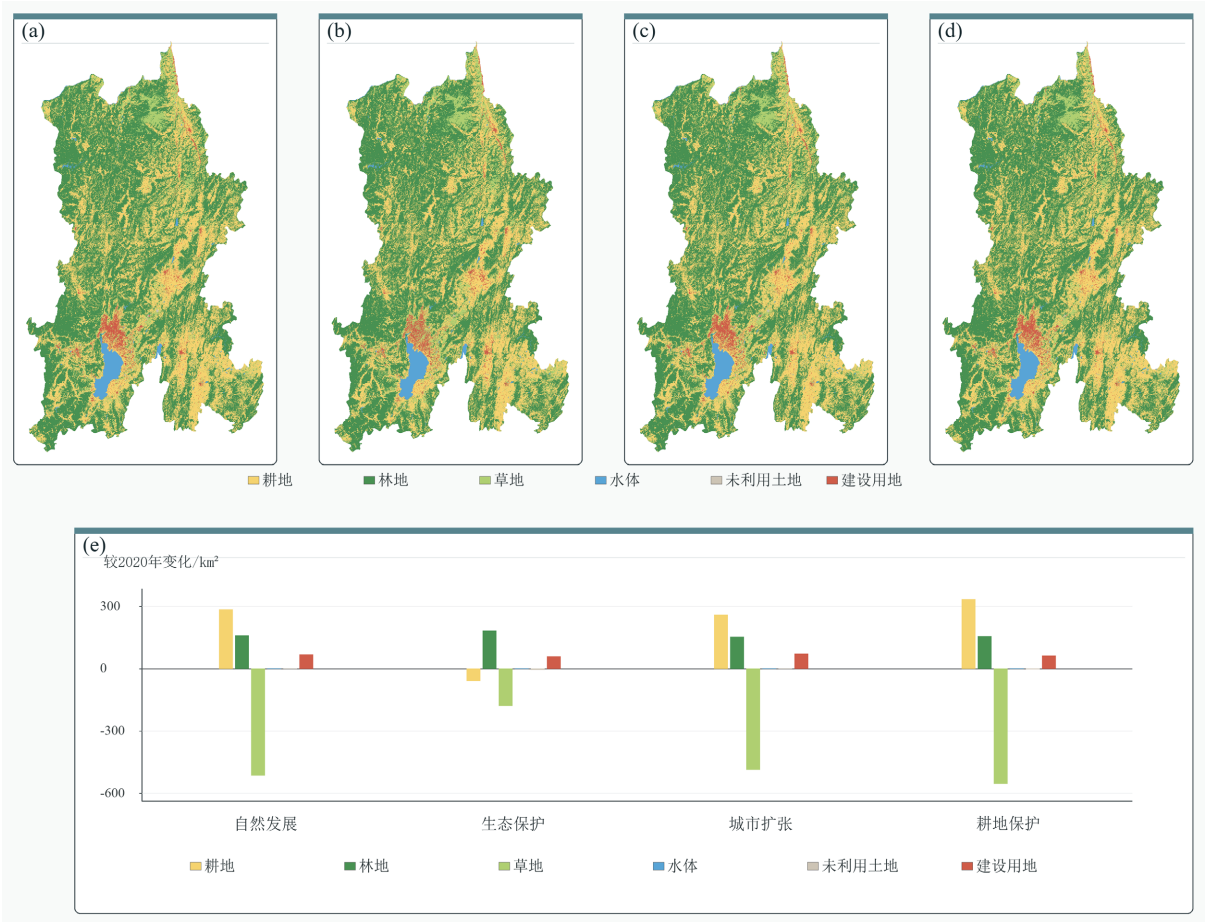
Figure 3. Characteristics of land use change in Kunming from 2010 to 2020

图 3. 2010~2020 年昆明市土地利用变化特征

图 3 展示了 2010 年、2015 年和 2020 年昆明市土地利用空间格局、各地类面积变化以及 2010~2020 年土地利用转移关系。由图 3(a)~(c)可见,昆明市土地利用类型以林地和耕地为主,林地主要分布在北部、西部及东南部山地丘陵区,耕地多分布于坝区、河谷及城镇周边区域,建设用地则集中于滇池周边及中心城区,并沿交通和城镇发展轴带呈集聚扩张特征。2010~2020 年间,土地利用空间格局总体保持稳定,但局部区域仍表现出明显的林地扩展、草地缩减和建设用地增加现象。从面积变化来看,图 3(d)表明,2010 年昆明市耕地、林地、草地、水体、未利用土地和建设用地面积分别为 7109.51、10497.34、2774.05、399.62、2.97 和 221.43 km²。到 2020 年,各地类面积分别变为 7005.99、11066.88、2203.70、404.31、10.56 和 313.48 km²。2010~2020 年,林地面积增加 569.54 km²,是增加幅度最大的地类。建设用地增加 92.05 km²,反映出研究期内城市化扩张过程较为明显。相反,草地面积减少 570.35 km²,是减少最显著的地类。

耕地减少 103.52 km²，表现为总体小幅下降。水体和未利用土地变化幅度较小，对整体土地利用结构影响有限。图 3(e)进一步揭示了不同土地利用类型之间的转移方向。2010~2020 年，林地保持量最大，约 10,038 km²，说明林地格局具有较强稳定性。耕地保持量约 5999 km²，但同时存在向林地和草地转出现象。其中，耕地转为林地约 636 km²，转为草地约 419 km²。草地是研究期内变化最活跃的地类之一，除保留约 1745 km² 外，分别有约 577 km²、392 km² 和 48 km² 转为耕地、林地和建设用地。总体来看，昆明市 2010~2020 年土地利用变化主要表现为草地向耕地、林地和建设用地转化，以及耕地与林地之间的相互转换。这种变化格局与生态恢复、农业用地调整和城市建设扩张等过程密切相关。

3.2. 2030 年多情景土地利用模拟结果



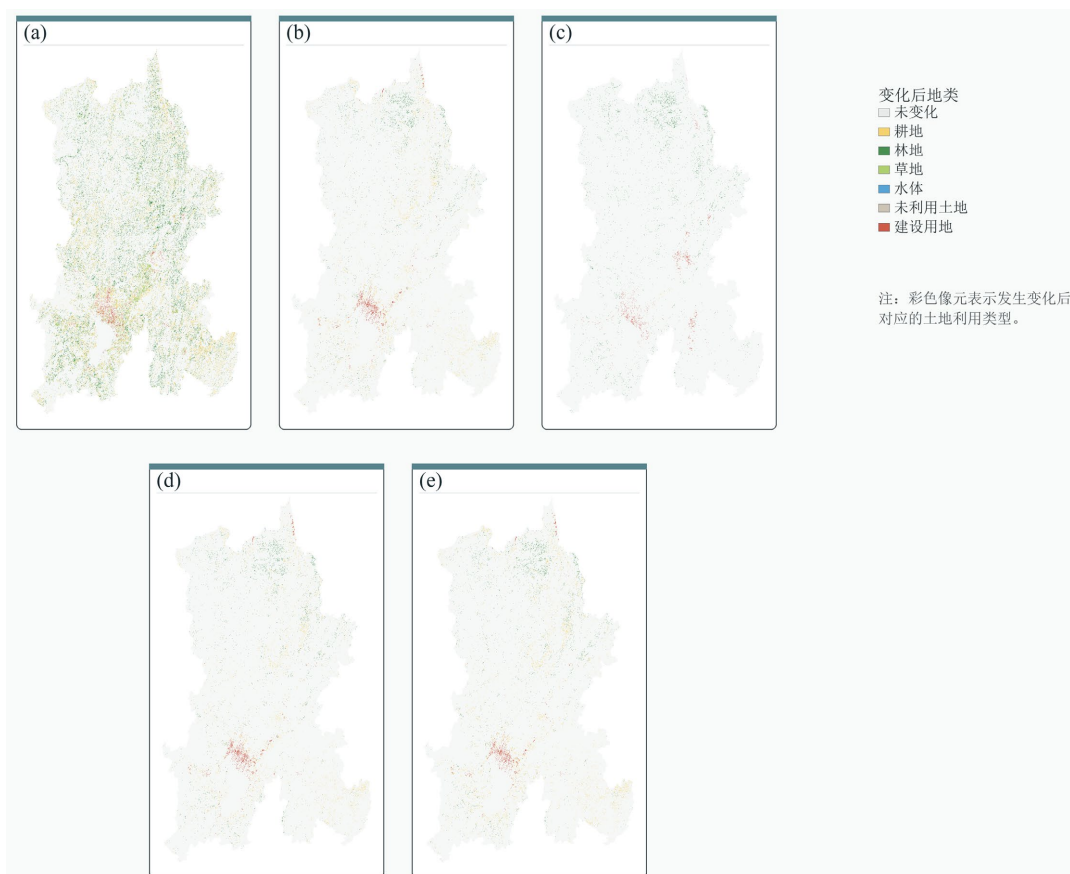
注：(a)~(d) 分别表示自然发展情景、生态保护情景、城市扩张情景和耕地保护情景，(e) 2030 年不同情景下各土地利用类型较 2020 年的面积变化。

Figure 4. Simulation results of multi-scenario land use in Kunming in 2030
图 4. 2030 年昆明市多情景土地利用模拟结果

图 4 展示了 2030 年自然发展、生态保护、城市扩张和耕地保护四种情景下的土地利用模拟结果及其相对 2020 年的面积变化。由图 4(a)~(d)可见，四种情景下昆明市土地利用总体格局仍以林地和耕地为主，建设用地主要集中于中心城区及滇池周边区域，不同情景之间的差异主要体现在耕地、林地、草地和建设用地的数量变化及局部空间扩张强度上。自然发展情景延续了 2015~2020 年土地利用转移趋势。由图 4(a)和图 4(e)可知，该情景下耕地、林地和建设用地均较 2020 年增加。其中，耕地增加 285.68 km²，林地

增加 158.84 km², 建设用地增加 67.49 km², 草地减少 513.92 km²。该结果说明, 在不施加强生态保护或耕地保有约束的情况下, 昆明市未来土地利用变化仍可能表现为耕地和林地增加、草地持续减少以及建设用地扩张并存的特征。生态保护情景下, 林地面积达到 11249.30 km², 较 2020 年增加 182.42 km², 是四种情景中林地面积最高的情景。草地面积为 2024.68 km², 较 2020 年减少 179.02 km², 下降幅度明显小于其他情景。建设用地增加 58.95 km², 低于自然发展和城市扩张情景。图 4(b)和图 4(e)共同表明, 生态保护情景能够在一定程度上抑制建设用地扩张并维持生态用地规模, 尤其对草地快速减少具有明显缓冲作用。城市扩张情景下, 建设用地面积达到 384.89 km², 较 2020 年增加 71.41 km², 是四种情景中建设用地扩张最明显的情景。与此同时, 草地减少 485.96 km², 耕地和林地虽仍分别增加 258.66 km² 和 153.93 km², 但生态空间受到建设用地扩张的压力更加突出。图 4(c)显示, 城市扩张主要集中在既有建设用地周边及滇池周边城镇发展区域, 体现出建设用地在原有城镇斑块基础上的外延扩展特征。耕地保护情景下, 耕地面积达到 7340.80 km², 较 2020 年增加 334.81 km², 是四种情景中耕地面积最高的情景, 说明耕地保有约束能够有效提高耕地保有水平。但该情景下草地减少 554.58 km², 是四种情景中草地下降幅度最大的情景。图 4(d)和图 4(e)表明, 耕地保有约束虽然有助于稳定农业生产空间, 但若新增耕地主要来源于草地等生态用地, 则可能对生态空间连续性产生一定压力。

3.3. 土地利用变化空间分布特征



注: (a) 2010~2020 年土地利用变化, (b)~(e) 分别表示 2030 年自然发展、生态保护、城市扩张和耕地保护情景相对 2020 年的土地利用变化; 彩色像元表示变化后地类, 灰色表示未变化区域。

Figure 5. Spatial distribution of land use change in Kunming

图 5. 昆明市土地利用变化空间分布

为进一步揭示土地利用变化的空间位置, 本文绘制了历史期及 2030 年不同情景相对 2020 年的土地利用变化空间分布图(图 5)。

图 5(a)显示, 空间上, 林地新增斑块主要分布于北部、西部和东南部山地丘陵区, 呈现沿山地斑块镶嵌扩展的特征。耕地新增斑块多分布于坝区、河谷及东南部农业空间附近。建设用地新增斑块集中于中心城区、滇池周边及既有城镇斑块外围, 体现出明显的近城扩展和斑块边缘扩张特征。图 5(b)~(e)进一步反映了 2030 年不同情景下土地利用变化空间格局的差异。自然发展情景下, 新增耕地、林地和建设用地变化斑块同时分布于中心城区外围、北部山地和东南部农业区, 说明该情景延续了 2015~2020 年耕地补充、林地增加与建设用地扩张并存的变化趋势。生态保护情景下, 由于生态保护约束显著压缩了非生态地类扩张规模, 使得变化更多表现为林地增加。城市扩张情景下, 新增建设用地主要集中于中心城区和滇池周边城镇发展区域。耕地保护情景下, 新增耕地斑块相对分散, 说明提高耕地保有水平会带来更广泛的土地类型调整, 也提示耕地布局优化需要与生态空间连续性维护相协调。

3.4. 不同情景下碳储量变化

图 6 从总碳储量、情景排序和分地类贡献三个方面展示了不同情景下昆明市碳储量变化。由图 6(a)可以看出, 2020 年昆明市总碳储量为 346.417 Mt C。到 2030 年, 四种情景下碳储量均较 2020 年有所增加。其中, 自然发展情景为 348.125 Mt C, 较 2020 年增加 1.708 Mt C。生态保护情景为 348.307 Mt C, 增加 1.890 Mt C。城市扩张情景为 348.016 Mt C, 增加 1.599 Mt C。耕地保护情景为 348.164 Mt C, 增加 1.747 Mt C。图 6(b)显示, 2030 年各情景碳储量大小排序为: 生态保护情景 > 耕地保护情景 > 自然发展情景 > 城市扩张情景。从分地类贡献来看, 图 6(c)表明, 林地是昆明市碳储量最主要的贡献地类。2020 年林地碳储量为 250.637 Mt C, 占总碳储量的主体部分。耕地碳储量为 73.025 Mt C, 是第二大碳储量来源。草地、水体、未利用土地和建设用地贡献相对较低。2030 年生态保护情景下, 林地碳储量提高至 254.769 Mt C, 是该情景总碳储量最高的主要原因。耕地保护情景下, 耕地碳储量由 2020 年的 73.025 Mt C 提高至 76.515 Mt C, 对总碳储量增加具有一定贡献。但由于草地减少幅度较大, 部分抵消了耕地增加带来的碳储量提升, 因此其总碳储量仍低于生态保护情景。

图 7 进一步展示了 2020 年及 2030 年四种情景下碳储量空间分布。总体来看, 昆明市高碳储量区域主要与林地分布相对应, 集中在北部、西部和东南部山地丘陵区。低碳储量区域主要分布于建设用地、水体及部分耕地和草地区域, 尤其在滇池周边及中心城区附近较为明显。不同情景下碳储量空间格局总体相似, 说明区域碳储量空间分布主要受土地利用基本格局控制。但局部差异仍反映出不同情景下林地、草地、耕地和建设用地变化对碳储量的影响。

图 8 进一步刻画了 2030 年四种情景相对 2020 年的碳储量变化空间分布。碳储量增加区主要对应林地和耕地增加区域, 集中于北部山地、东部丘陵及部分南部农业空间。碳储量减少区则多出现在中心城区、滇池周边以及建设用地扩张或高碳密度地类转出的区域。自然发展情景下碳储量增加区面积为 444.76 km², 减少区面积为 72.16 km²。生态保护情景增加区面积为 185.88 km², 减少区面积为 65.04 km², 但由于新增高碳密度林地贡献较高, 其净增量最高。城市扩张情景减少区面积为 76.17 km², 是四种情景中碳储量下降区域最广的情景。耕地保护情景增加区面积为 491.19 km², 空间分布较为分散, 说明耕地与林地增加能够提升局部碳储量, 但仍需关注草地等生态用地转出产生的负效应。

综合图 6~8 可知, 生态保护情景通过提高林地面积并控制建设用地扩张, 使区域碳储量达到最高水平。城市扩张情景虽然总碳储量仍较 2020 年增加, 但由于建设用地扩张强度最大, 且建设用地碳密度较低, 其碳储量增幅最低。自然发展情景处于中间水平, 林地和耕地增加提升了碳储量, 但草地减少和建设用地扩张限制了碳储量进一步提高。总体而言, 维持和扩大林地等高碳密度生态空间, 是提升昆明市

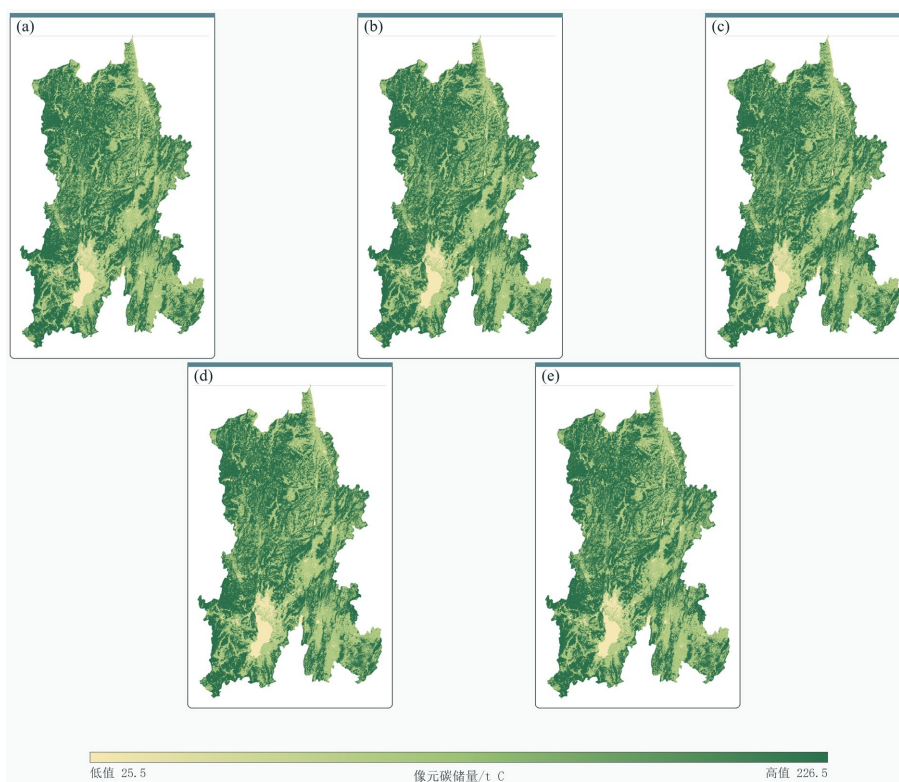
土地生态系统碳储量的重要路径。



注: (a) 2020 年及 2030 年不同情景下总碳储量变化, (b) 2030 年不同情景碳储量排序, (c) 不同土地利用类型对碳储量的贡献。

Figure 6. Changes in carbon storage statistics in Kunming under different scenarios

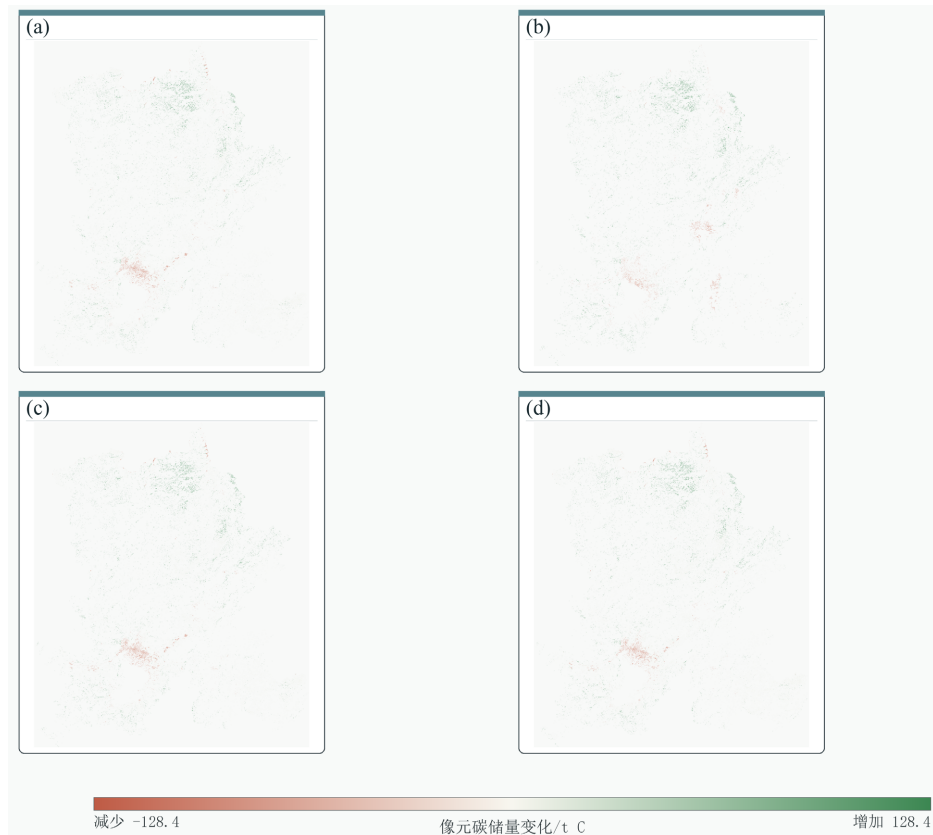
图 6. 不同情景下昆明市碳储量统计变化



注: (a) 2020 年碳储量空间分布, (b)~(e) 分别表示 2030 年自然发展情景、生态保护情景、城市扩张情景和耕地保护情景。

Figure 7. Spatial distribution of carbon storage in Kunming

图 7. 昆明市碳储量空间分布



注：(a)~(d) 分别表示 2030 年自然发展、生态保护、城市扩张和耕地保护情景相对 2020 年的碳储量变化；绿色表示碳储量增加，红色表示碳储量减少。

Figure 8. Spatial distribution of carbon storage change in Kunming under different scenarios
图 8. 不同情景下昆明市碳储量变化空间分布

4. 讨论

研究结果表明，昆明市碳储量变化与林地、草地、耕地和建设用地之间的空间转换密切相关。由于林地碳密度显著高于其他地类，林地面积变化对区域碳储量影响最为突出。生态保护情景通过提高林地面积并控制建设用地扩张，使碳储量达到最高水平，说明维持和扩大生态空间是提升区域碳汇能力的重要途径。城市扩张情景虽然碳储量较 2020 年有所增加，但增幅最低，说明建设用地扩张会削弱土地利用结构优化对碳储量的提升作用。耕地保护情景的结果表明，提高耕地保有水平有助于稳定农业生产空间。但若耕地增加主要依赖草地等生态用地转化，可能对区域碳储量和生态功能产生一定影响。因此，需要在农业空间稳定和生态空间维护之间进行协调。

4.1. 与昆明市国土空间总体规划的衔接

《昆明市国土空间总体规划（2021—2035 年）》明确指出，推进滇池、阳宗海等高原湖泊水环境综合治理，加强滇池流域水污染防治，改善入湖河流和湖体水质，加强石漠化地区生态修复[16]。本文模拟结果与上述规划导向具有较好的对应关系：生态保护情景下林地面积和总碳储量最高，验证了维持山地丘陵区林地和高碳密度生态空间对提升区域碳储量的重要作用。城市扩张情景下建设用地增幅最大且碳储量增幅最低，表明若建设用地沿中心城区和滇池周边持续外延扩展，将削弱规划中强调的节约集约用地和蓝绿空间维护效果。耕地保护情景下耕地面积最高，但草地减少幅度较大，提示耕地保有目标不宜

简单通过挤占草地等生态用地实现，而应优先通过存量低效建设用地整理、耕地质量提升和农业空间内部优化来实现。

生态保护红线是国土空间规划中的重要管控边界，生态保护红线内自然保护区核心区外，禁止开发性、生产性建设活动，在符合法律法规的前提下，仅允许以下对生态功能不造成破坏的有限人为活动[17]。因此，本文结果对昆明市规划实施具有三方面启示：一是将北部、西部和东南部山地丘陵区林地和碳储量高值区作为生态空间维护的重点区域，避免高碳密度地向低碳密度地类转化。二是将中心城区和滇池周边识别为建设用地扩张与碳储量损失的重点管控区，优先通过城市更新、存量建设用地再开发和公共绿地系统完善降低新增建设占用压力。三是在耕地保有约束下，应将新增或补充耕地布局与生态空间连续性、坡度条件和碳储量变化共同评估，减少草地和林地转出的生态代价。

4.2. 不确定性

本文仍存在一定不确定性。首先，碳密度参数虽然结合昆明市气候条件进行了修正，但不同地类内部植被类型、土壤性质和管理方式差异较大[18]，后续可结合实测数据进一步校正。其次，2030年多情景需求量虽然基于 PLUS Markov Chain 预测和情景设置构建，但仍受到规划目标和政策不确定性的影响[19]。未来可进一步引入生态保护约束区、农业用地保护区和城镇开发边界等矢量管控数据，提高情景模拟与规划实施评估之间的衔接程度。

5. 结论

本文基于 PLUS-InVEST 耦合模型评估了昆明市 2010~2020 年土地利用变化、2030 年多情景土地利用格局及碳储量响应，主要结论如下：

(1) 2010~2020 年昆明市土地利用变化明显，林地和建设用地面积增加，草地面积显著减少，耕地总体小幅下降。土地利用变化表现出明显的阶段性差异，2015~2020 年建设用地扩张和草地减少特征更加突出。

(2) PLUS 模型验证结果显示，模拟 2020 年土地利用总体精度为 91.34%，Kappa 系数为 0.8556，说明模型具有较好的适用性，可用于 2030 年土地利用多情景模拟。

(3) 2030 年不同情景下土地利用格局差异明显。生态保护情景能够有效提高林地面积并控制建设用地扩张，城市扩张情景建设用地增长最明显，耕地保护情景耕地面积最高，但草地减少幅度较大。

(4) 2020 年昆明市总碳储量为 346.417 Mt C。2030 年四种情景下碳储量均有所增加，其中生态保护情景最高，为 348.307 Mt C。城市扩张情景最低，为 348.016 Mt C。结果表明，生态保护有利于区域碳储量提升，而建设用地扩张会抑制碳储量增长。

(5) 从低碳国土空间优化角度看，昆明市未来应优先保护林地等高碳密度生态空间，控制建设用地扩张强度，并协调农业空间保护与生态保护关系，以实现土地利用优化和碳储量提升的协同。

参考文献

- [1] Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., *et al.* (2005) Global Consequences of Land Use. *Science*, **309**, 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- [2] Nelson, E., Mendoza, G., Regetz, J., Polasky, S., Tallis, H., Cameron, D., *et al.* (2009) Modeling Multiple Ecosystem Services, Biodiversity Conservation, Commodity Production, and Tradeoffs at Landscape Scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **7**, 4-11. <https://doi.org/10.1890/080023>
- [3] 戴尔阜, 马良. 土地变化模型方法综述[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 152-162.
- [4] 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3343-3352.

- [5] 李夏瑜, 陈春, 李康琪. 基于 Markov-PLUS 模型的延安市土地利用多情景模拟研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学版), 2024, 53(2): 153-162.
- [6] Liang, X., Guan, Q., Clarke, K.C., Liu, S., Wang, B. and Yao, Y. (2021) Understanding the Drivers of Sustainable Land Expansion Using a Patch-Generating Land Use Simulation (PLUS) Model: A Case Study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, **85**, Article ID: 101569. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569>
- [7] Goldstein, J.H., Caldarone, G., Duarte, T.K., Ennaanay, D., Hannahs, N., Mendoza, G., *et al.* (2012) Integrating Ecosystem-Service Tradeoffs into Land-Use Decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109**, 7565-7570. <https://doi.org/10.1073/pnas.1201040109>
- [8] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. 热带地理, 2019, 39(3): 397-409.
- [9] 向书江, 张骞, 王丹, 等. 近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1198-1213.
- [10] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等. 基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010-1019.
- [11] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 300-314.
- [12] Li, Y., Yang, X., Wu, B., Zhao, J., Jiang, W., Feng, X., *et al.* (2023) Spatio-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming Based on PLUS and Invest Models. *PeerJ*, **11**, e15285. <https://doi.org/10.7717/peerj.15285>
- [13] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1018-1029.
- [14] Yang, J. and Huang, X. (2021) The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, **13**, 3907-3925. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>
- [15] Jiang, H., Cui, Z., Fan, T. and Yin, H. (2025) Impacts of Land Use Change on Carbon Storage in the Guangxi Beibu Gulf Economic Zone Based on the Plus-Invest Model. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 6468. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89407-0>
- [16] 国务院关于《昆明市国土空间总体规划（2021—2035 年）》的批复[EB/OL]. https://dnr.yn.gov.cn/html/2024/dangzhongyangguowuyuanxinxi_1220/4048331.html, 2024-12-16.
- [17] 自然资源部 生态环境部 国家林业和草原局关于加强生态保护红线管理的通知（试行）[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/20/content_5706169.htm, 2022-08-16.
- [18] 张涛, 李永夫, 姜培坤, 等. 土地利用变化影响土壤碳库特征与土壤呼吸研究综述[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(3): 428-437.
- [19] 李少英, 刘小平, 黎夏, 等. 土地利用变化模拟模型及应用研究进展[J]. 遥感学报, 2017, 21(3): 329-340.