

基于 PLUS-InVEST 模型的白邑喀斯特盆地土地利用与碳储量时空变化分析及预测

陈俊旭^{1,2}, 刘沐筱¹, 金岩松¹, 黄军儒¹, 朱莹¹, 林浣忱¹, 谷雨桐¹

(1.云南大学 地球科学学院,昆明 650500;2.云南大学 喀斯特国际联合研究中心,昆明 650091)

摘要:开展土地利用变化下碳储量评估是碳循环研究的重要内容.以白邑喀斯特盆地为研究区,基于 1990、2000、2010 和 2020 年土地利用数据,分析 1990—2020 年土地利用时空变化,应用 PLUS 模型预测 2030 年土地利用空间格局,基于 InVEST 模型探讨碳储量时空变化及不同情景下分布.结果表明,1990—2020 年研究区耕地面积占比由 46.50%降至 36.17%,林地占比由 37.31%升至 57.70%;碳储量从 1.21×10^6 t 增至 1.56×10^6 t.自然发展情景下,2020—2030 年研究区碳储量增长约 4.49%;生态保护情景下,耕地持续减少,林地继续增加,碳储量增长约 5.77%.白邑喀斯特盆地耕地向林地的持续转化是碳储量增加的主要原因.

关键词:碳储量;土地利用变化;PLUS 模型;InVEST 模型;白邑喀斯特盆地

中图分类号:X171.1;P967

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)05-0056-06

全球气候变化加剧的背景下,碳排放与碳吸收的平衡问题已成为当前生态与气候变化领域的核心议题之一^[1].碳储量作为衡量生态系统碳汇能力的重要指标,其时空动态变化直接影响区域碳循环及气候调节功能^[2].土地利用变化被认为是影响陆地生态系统碳储量时空动态变化的关键驱动因素^[3],同时优化土地利用方式促进碳存储是基于自然的碳存储的重要解决方案.中国作为全球喀斯特地貌分布最广的国家之一,其喀斯特区面积约占国土总面积的 1/3 左右^[4],生态脆弱性与碳汇潜力并存.喀斯特地区生态系统脆弱、土地利用条件较差、易受变化环境影响,碳储量具有明显的土地利用依赖性和时空差异^[5].气候变化^[6]、地质灾害影响喀斯特地区的生态恢复过程,对区域碳储量产生影响^[7].同时,生态修复和土地利用方式改变等人类活动将进一步导致喀斯特地区碳储量的改变和时空差异^[8].因此,开展喀斯特区土地利用变化下碳储量的评估及预测,对揭示喀斯特区域碳循环机制,服务生态保护、土地管理和落实“双碳”目标具有重要意义.

国内外学者基于不同的模型与方法对区域碳储量的时空变化及预测开展了大量研究.其中,InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型因其在碳储量估算中的高效性和便利性被广泛应用于碳储量估算相关研究^[9],但该模型对碳储量的评估多依赖于静态数据和简单统计模型,未来的碳储量的预估则需要叠加未来土地利用数据^[10],难以有效模拟未来情景下碳储量的动态变化.因此,通过引入土地转移矩阵与土地格局指数^[11]、土地动态模拟方法^[12]等方法开展 InVEST 模型与 CA-Markov、PLUS (patch-generating land use simulation)、FLUS 模型的结合成为碳储量模拟和预估的主流方法.而 PLUS 模型因在动态模拟不同情景下多种土地利用斑块的未來变化具有优势,弥补了 FLUS 模型等在转化规则挖掘

收稿日期:2025-01-21;**修回日期:**2025-04-11.

基金项目:国家自然科学基金(42161006);云南省基础研究计划项目(202301BF070001-004).

作者简介(通信作者):陈俊旭(1984—),男,云南曲靖人,云南大学教授,博士,研究方向为山地水土过程与资源配置, E-mail: chenjunxu@ynu.edu.cn.

引用本文:陈俊旭,刘沐筱,金岩松,等.基于 PLUS-InVEST 模型的白邑喀斯特盆地土地利用与碳储量时空变化分析及预测[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(5):56-61.(Chen Junxu, Liu Muxiao, Jin Yansong, et al. Spatial-temporal analysis and prediction of land use change and carbon storage in Baiyi Karst Basin based on PLUS and InVEST Model[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(5): 56-61. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.01.21.0002.)

策略和景观动态变化模拟策略方面的不足,其结合 InVEST 模型实现对土地利用变化与碳储量的动态模拟和预测得到应用^[13].因此,PLUS 模型和 InVEST 模型的结合已广泛应用于区域土地利用与碳储量动态变化的研究中.

白邑喀斯特盆地位于云南省昆明市,是昆明市的水源保护区,在土地利用受限、生态修复和碳减排目标下,开展土地利用下碳储量的变化及预估具有理论和现实意义.该区域属于喀斯特断陷盆地,具有喀斯特区域复杂地貌形态、局部小气候、水质水量禀赋差^[14]、生态系统脆弱的特点,这使得该区碳储量对外界的响应十分敏感^[15].在生态保护和用地结构调整的双重影响下,区域水土资源变化将驱动碳储量发生改变.然而,目前针对白邑喀斯特盆地的碳储评估及未来情景模拟的研究和认识较少,限制了对该区生态可持续发展策略的精准制定.因此,明确白邑喀斯特盆地土地利用及碳储量的动态变化,预测未来不同情景下该区土地利用及碳储量的空间分布,具有重要意义.

本研究以白邑喀斯特盆地为研究区,基于 PLUS 模型和 InVEST 模型,分析 1990—2020 年白邑喀斯特盆地土地利用的时空演变特征,探讨近 30 a 碳储量的时空变化规律,并模拟在自然发展情景和生态保护情景下 2030 年区域碳储量的空间格局.研究结果将为区域生态保护和土地利用优化提供科学支撑.

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

白邑喀斯特盆地位于云南省昆明市($102^{\circ}50'E\sim102^{\circ}55'E,25^{\circ}15'N\sim25^{\circ}25'N$)(附录图 S1),区内分布喀斯特峰丛洼地、溶洞、岩溶泉、暗河,地形起伏较大.区域属于亚热带季风气候,全年降水雨季、旱季分明,5 至 10 月为雨季,集中了 85% 以上的降雨量.土地利用类型以林地和耕地为主.研究区人口约 5.2 万(2020 年),辖 3 镇 1 乡,以农业为主导产业,耕地主要用于旱作种植,林下经济逐步发展.在生态保护政策驱动下,传统农业向生态农业转型,部分乡镇试点推广有机种植与林业碳汇项目,建设用地扩张受限于地形破碎化与生态红线管控.近年来,白邑喀斯特盆地采取用地限制、生态保护区划定、产业转移、植树还林等措施,导致森林砍伐、耕地扩张、建设用地增加等活动受到限制.

1.2 数据来源

1) 土地利用数据.1990、2000、2010 及 2020 年的土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m,共包含耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个一级类别.

2) 土地利用变化驱动因素数据.为模拟研究区 2030 年的土地利用空间分布,本研究从社会经济因素、可达性因素、自然环境因素三类数据中共选取了 13 个驱动因子(附录表 S1).由于在研究期间研究区高程和坡度的变化可忽略,因此仅选取 ASTER 全球数字高程模型,数据源的采样时间是 2011 年.社会经济因素和自然环境因素与土地利用数据的时间序列相一致.此外,可达性因素的时间为 2020 年.

2 研究方法

2.1 PLUS 模型

PLUS 模型是基于元胞自动机的土地利用模拟新模型,该模型在研究土地利用变化的起因和动态模拟多种土地利用斑块变化方面优势明显.通过提取土地利用数据的转化样本,基于转化概率模拟未来土地利用,利用随机森林算法计算各类用地扩张概率及驱动因素贡献,并结合随机斑块生成和转移矩阵,确定未来土地利用格局.本研究主要运用 PLUS 模型的以下 2 个模块:1) 土地扩张分析策略(LEAS),LEAS 是对两个日期的土地利用数据进行分析,通过每一个变化的土地利用类型的生长斑块得到土地利用类型的变化,采用随机森林分类(RFC)算法,探讨不同土地利用类型的生长与多种驱动因子之间的关系,获取各土地利用类型的发展概率,计算公式见附录表 S2 公式(1);2) 基于多类随机斑块种子的 CA 模型(CARS),CARS 是基于元胞自动机,主要通过获得各类用地的发展概率模拟得到的土地利用分布格局,是一个场景驱动的土地利用模拟模型,计算公式见附录表 S2 公式(2)~(4).

2.2 InVEST 模型

应用 InVEST 模型碳储量模块,结合土地利用数据和碳密度数据计算白邑喀斯特盆地碳储量.计算公式见附录表 S2 公式(5)和(6).本文碳储量主要计算各种用地类型地上植被、地下植被和土壤碳密度值.由于死亡有机物碳储量含量非常低,在碳库中所占比重较小^[16],本研究不予考虑.研究区不同土地利用类型的碳密度标准参照江民^[17]关于西南喀斯特地区不同土地利用类型碳密度的研究结果,具体数据见附录表 S3.

2.3 土地利用转移矩阵

转移矩阵能够具体反映土地利用变化的结构特征和各类型之间的转移方向.本研究通过 ArcGIS 10.3 将土地利用分布数据在空间上进行叠加运算,得到 1990—2020 年白邑喀斯特盆地土地利用类型的转移矩阵.转移矩阵的数学形式见附录表 S2 公式(7).

2.4 不同情景设定

1)自然发展情景.延续前期土地利用结构变化趋势,保持土地转移概率不变.该情景基于 2010—2020 年土地利用变化规律,不改变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 链接预测 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^[17].

2)生态保护情景.以自然发展情景为基础,将生态环境保护作为第一目标.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%,以 10 a 为间隔,预测 2030 年生态保护情景下的土地利用需求.

3 结果与分析

3.1 1990—2020 年白邑喀斯特盆地土地利用时空变化特征

1990—2020 年白邑喀斯特盆地土地利用类型以耕地和林地为主.耕地主要分布在盆地中部平原区域;林地主要分布在盆地东北及东南部山地和盆地边缘区域;草地、建设用地和未利用地呈点状零星分布,主要分布于盆地中部;水域主要集中于盆地南部,2020 年后水域面积减少明显(图 1).

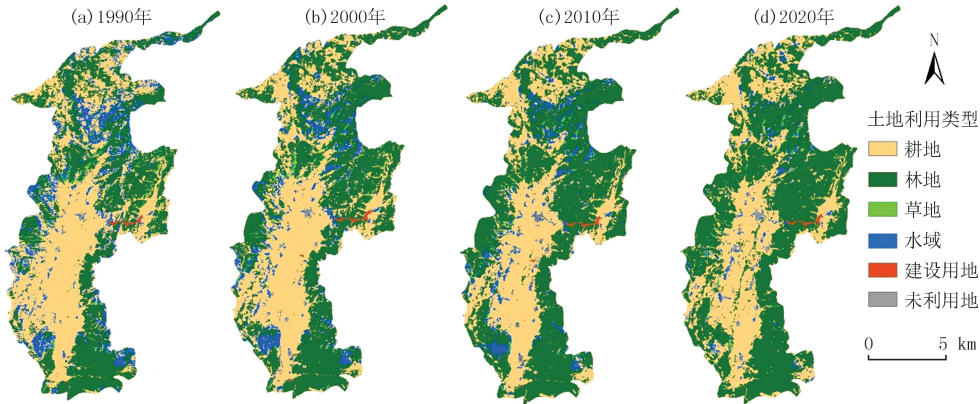


图1 1990—2020年白邑喀斯特盆地土地利用空间分布

Fig.1 Spatial distribution of land use in Baiyi Karst Basin from 1990 to 2020

1990—2020 年研究区耕地、草地、建设用地面积逐渐缩减,林地面积逐渐扩张,水域面积呈现先增加后减少的趋势(附录表 S4).其中耕地面积占比由 1990 年的 46.50%减少至 2020 年的 36.17%,减少了 15.44 km²;林地面积占比由 1990 年的 37.31%增加至 2020 年 57.70%,共增加了 30.35 km²;草地面积变化较小,1990 至 2020 年仅减少了 0.74 km²;水域面积由 1990 年的 21.77 km² 减少至 2020 年的 6.75 km²;建设用地面积没有变化.林地面积的增加,尤其是在东南部地区,与研究区退耕还林和植被恢复工程的实施密切相关.整体来看,白邑喀斯特盆地的土地利用变化呈现出由农业用地向林地转化的趋势.

3.2 土地利用空间分布的模拟及预测

基于 1990、2000 和 2010 年研究区土地利用数据,结合所选择的 13 个驱动因子数据,利用 PLUS 模型对 2020 年研究区土地利用空间分布进行模拟.基于 2020 年研究区实际的土地利用空间分布数据,运用 Kappa

系数,对模拟的研究区土地利用空间分布数据进行精度检验.模型整体精度为 0.89,Kappa 系数为 0.79,在 PLUS 模型的 Kappa 统计工具中,将采样率设置为 100%,即对整个研究区进行精度验证,而非随机抽样或分区验证,以保障 Kappa 系数结果的准确率.表明该模型能够较为准确地反映研究区土地利用空间分布的变化趋势,具有较高的可靠性和预测能力,结果如图 2 所示.

自然发展情景下,2020—2030 年研究区耕地面积呈现下降趋势,预计减少 2.87 km²,下降幅度为 5.34%,耕地面积减少,城市化与土地利用结构调整对耕地的持续压缩可能是主要驱动因素.自然发展情景下,林地面积呈现增加趋势,预计由 2020 年 85.89 km² 增加至 2030 年的 92.02 km²,增加 6.13 km²,增幅为 7.14%.未利用地的变化幅度较小,预计在 2030 年自然发展情景下增加 0.22 km².草地、水域和建设用地的土地利用面积变化率分别约为−18.24%、−40.43%和−9.43%.

生态保护情景下,耕地面积预计将继续下降,2020—2030 年减少 4.83 km²,下降幅度约为 8.97%.林地面积呈现显著增加,预计到 2030 年林地面积将增加 8.49 km²,增幅为 9.89%.这一变化体现了生态保护情景下森林恢复和生态修复政策的显著成效.水域面积预计将减少 45.57%,草地、建设用地和未利用地的变化幅度分别为−19.76%、−9.67%和 14.83%.预测结果表明,在生态保护情景下,严禁建设用地占用林地的政策具有较好成效.

3.3 碳储量变化分析

1990—2020 年,白垩喀斯特盆地的碳储量呈稳步增长趋势(图 3),从 1990 年的 1.21×10^6 t 增至 2020 年的 1.56×10^6 t,累计增加 0.35×10^6 t.这一变化体现了区域生态系统碳汇功能的逐步增强,特别是在 2000—2010 年期间,碳储量增长尤为显著.这一时期碳储量的快速增长与植被恢复工程的持续推进、退耕还林政策的实施、农业生产方式的优化等措施密切相关.特别是在退耕还林和森林恢复政策的推动下,研究区林地的增加和森林覆盖率的提升对碳储量产生了积极的作用.总体而言,1990—2020 年间碳储量的增加不仅反映了区域生态保护政策成效的显现,也进一步表明碳汇功能在调节温室气体排放以及提升生态系统服务功能方面具有重要作用.

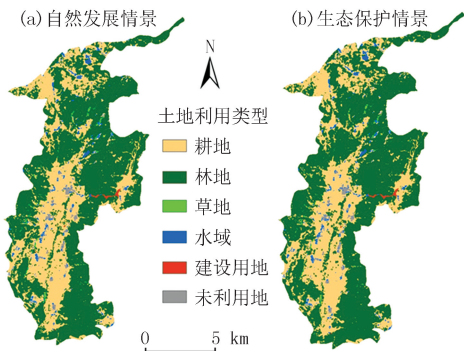


图2 2030年不同情景条件下土地利用空间分布
Fig.2 Spatial distribution of land use under different scenarios in 2030

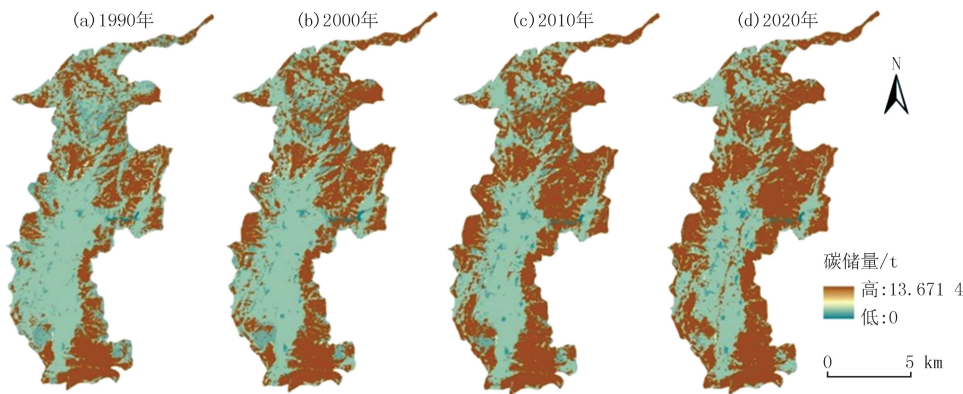


图3 1990—2020年白垩喀斯特盆地碳储量空间分布图
Fig.3 Spatial distribution of carbon storage in Baiyi Karst Basin from 1990 to 2020

为了进一步探讨未来白垩喀斯特盆地碳储量的变化,本研究基于 InVEST 模型对 2030 年的碳储量进行了预测(图 4),并设定了两种不同的情景:自然发展情景和生态保护情景.在自然发展情景下,预计 2030 年白垩喀斯特盆地的碳储量总量将达到 1.63×10^6 t,较 2020 年增加约 4.49%.可见,在没有严格的保护措施情况下,碳储量的增加受限于土地利用方式的变化和自然环境的制约,无法实现更为显著的碳汇增长.在生态保护情景下,预计 2030 年白垩喀斯特盆地碳储量总量将达到 1.65×10^6 t,比 2020 年增加约 5.77%.尽管生态保护情景下的短期碳储量增幅相对有限,但这一情景通过恢复植被、改善土壤质量等措施,对碳储量的长远

增加具有重要促进作用。

1990—2020 年研究区林地面积大幅增长,使得研究期间研究区碳储量总体呈现明显增加。然而,在研究区南部地区,耕地和草地被建设用地侵占,这导致了碳储量的下降,使原有的碳储量被破坏,影响了碳汇的稳定性。建议应进一步加强白垩喀斯特盆地林地、草地和湿地等碳汇资源的保护与恢复,促进碳储量的持续增加,以期推动该区生态系统的可持续发展。

4 结论

本研究基于 PLUS 和 InVEST 模型分析了 1990—2020 年白垩喀斯特盆地土地利用变化及碳储量时空变化,对未来土地利用和碳储量进行了预测。结果显示:

- 1)1990—2020 年研究区耕地面积减少了 15.44 km²,减少幅度为 22.29%,林地面积增加了 30.35 km²,增加幅度为 54.65%。研究区土地利用类型变化主要呈现耕地向林地转换特征。
- 2)1990—2020 年研究区碳储量增长了约 0.35×10⁶ t,主要由研究区林地面积的大幅增加所致。
- 3)自然发展情景下,2020—2030 年研究区碳储量增加了 0.07×10⁶ t,增加幅度约为 4.49%。生态保护情景下,2020—2030 年研究区碳储量增加了 0.09×10⁶ t,增加幅度约为 5.77%。可见,相比于自然发展情景,生态保护情景下 2020—2030 年研究区碳储量增幅稍高。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.01.21.0002)。

参 考 文 献

[1] 石岳,杨晨,朱江玲,等.中国及省域碳排放、陆地碳汇及其相对减排贡献,1980—2020[J].中国科学:生命科学,2024,54(12):2459-2478.
Shi Y, Yang C, Zhu J L, et al. Estimation of national and provincial carbon emissions, terrestrial carbon sinks and their relative contribution to emission reductions during 1980-2020[J]. Scientia Sinica(Vitae), 2024, 54(12): 2459-2478.

[2] Keith H, Vardon M, Obst C, et al. Evaluating nature-based solutions for climate mitigation and conservation requires comprehensive carbon accounting[J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: 144341.

[3] 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): e01405.

[4] 曾红,董天富,杨静,等.喀斯特区出露基岩对土壤水分入渗过程的影响[J].水土保持学报, 2025, 39(2): 144-154.
Zeng H, Dong T F, Yang J, et al. Effect of exposed bedrock on soil water infiltration in karst region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 144-154.

[5] 李月,冯霞,吴路华,等.基于能值-生态足迹的贵州高原典型喀斯特区域水资源可持续评价研究[J].灌溉排水学报, 2024, 43(4): 96-104.
Li Y, Feng X, Wu L H, et al. Evaluating sustainable development of water resources in typical Karst basins in Guizhou plateau using energy-ecological footprint analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 96-104.

[6] 李汇文,王世杰,白晓永,等.气候变化及生态恢复对喀斯特槽谷碳酸盐岩风化碳汇的影响评估[J].生态学报, 2019, 39(16): 6158-6172.
Li H W, Wang S J, Bai X Y, et al. Effects of climate change and ecological restoration on carbonate rock weathering carbon sequestration in the karst valley of Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6158-6172.

[7] 高耀,陈俊旭,徐佳,等.基于混合自组织映射神经网络的云南省山洪灾害危险性区划[J].云南大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 1067-1077.
Gao Y, Chen J X, Xu J, et al. Flash flood hazard regionalization in Yunnan Province based on hybrid self-organizing mapping neural network[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2024, 46(6): 1067-1077.

[8] 王世杰,刘再华,倪健,等.中国南方喀斯特地区碳循环研究进展[J].地球与环境, 2017, 45(1): 2-9.
Wang S J, Liu Z H, Ni J, et al. A review of research progress and future prospective of carbon cycle in karst area of South China[J]. Earth and Environment, 2017, 45(1): 2-9.

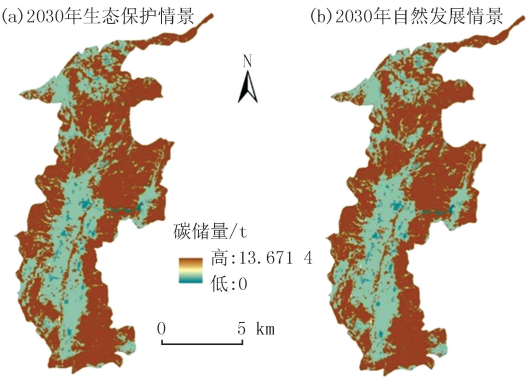


图4 2030年不同情景下碳储量分布情况
Fig.4 Distribution of carbon stocks under different scenarios in 2030

[9] He C Y,Zhang D,Huang Q X,et al.Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models[C]//Environmental Modelling & Software.[S.l.]:ACM,2016:44-58.

[10] 范强,孙虎虎,孙爽,等.生态-耕地保护下的山东省碳储量估算与演变[J].生态学报,2025,45(4):1588-1598.
Fan Q,Sun H H,Sun S,et al.Estimation and evolutionary analysis of carbon stocks in Shandong Province under the ecological-cultivated land protection scenario[J].Acta Ecologica Sinica,2025,45(4):1588-1598.

[11] 胡智文,陈俊旭,赵志芳,等.隆子县土地利用多样化及其聚集度分析[J].西部林业科学,2021,50(3):164-170.
Hu Z W,Chen J X,Zhao Z F,et al.Analysis of land use diversification and its aggregation in Longzi County[J].Journal of West China Forestry Science,2021,50(3):164-170.

[12] 李佳珂,邵战林.基于 PLUS 和 InVEST 模型的乌鲁木齐市碳储量时空演变与预测[J].干旱区研究,2024,41(3):499-508.
Li J K,Shao Z L.Spatiotemporal evolution and prediction of carbon stock in Urumqi City based on PLUS and InVEST models[J].Arid Zone Research,2024,41(3):499-508.

[13] 吴先雯,郭风成.基于 Invest 模型和 Flus 模型的江苏省碳储量变化模拟与预测[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(2):230-239.
Wu X W,Guo F C.Analysis and prediction of carbon storage changes in Jiangsu Province based on the Invest model and Flus model[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,32(2):230-239.

[14] Peng J B,Chen J X,Liu S Y,et al.Dynamics of algal blooms in typical low-latitude plateau lakes:Spatiotemporal patterns and driving factors[J].Environmental Pollution,2024,345:123453.

[15] 李俊,杨德宏,吴锋振,等.基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J].水土保持通报,2023,43(1):378-387.
Li J,Yang D H,Wu F Z,et al.Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming City based on PLUS and in VEST models[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2023,43(1):378-387.

[16] 王旭,马伯文,李丹,等.基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J].自然资源学报,2020,35(1):230-242.
Wang X,Ma B W,Li D,et al.Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei Province based on FLUS model[J].Journal of Natural Resources,2020,35(1):230-242.

[17] 江民.西南喀斯特地区生态系统服务功能时空变化及驱动因子分析[D].武汉:华中农业大学,2022.
Jiang M.Study on the spatiotemporal variation and assoicated driving factors of ecosystem service in southwest karst of China[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University,2022.

Spatial-temporal analysis and prediction of land use change and carbon storage in Baiyi Karst Basin based on PLUS and InVEST Model

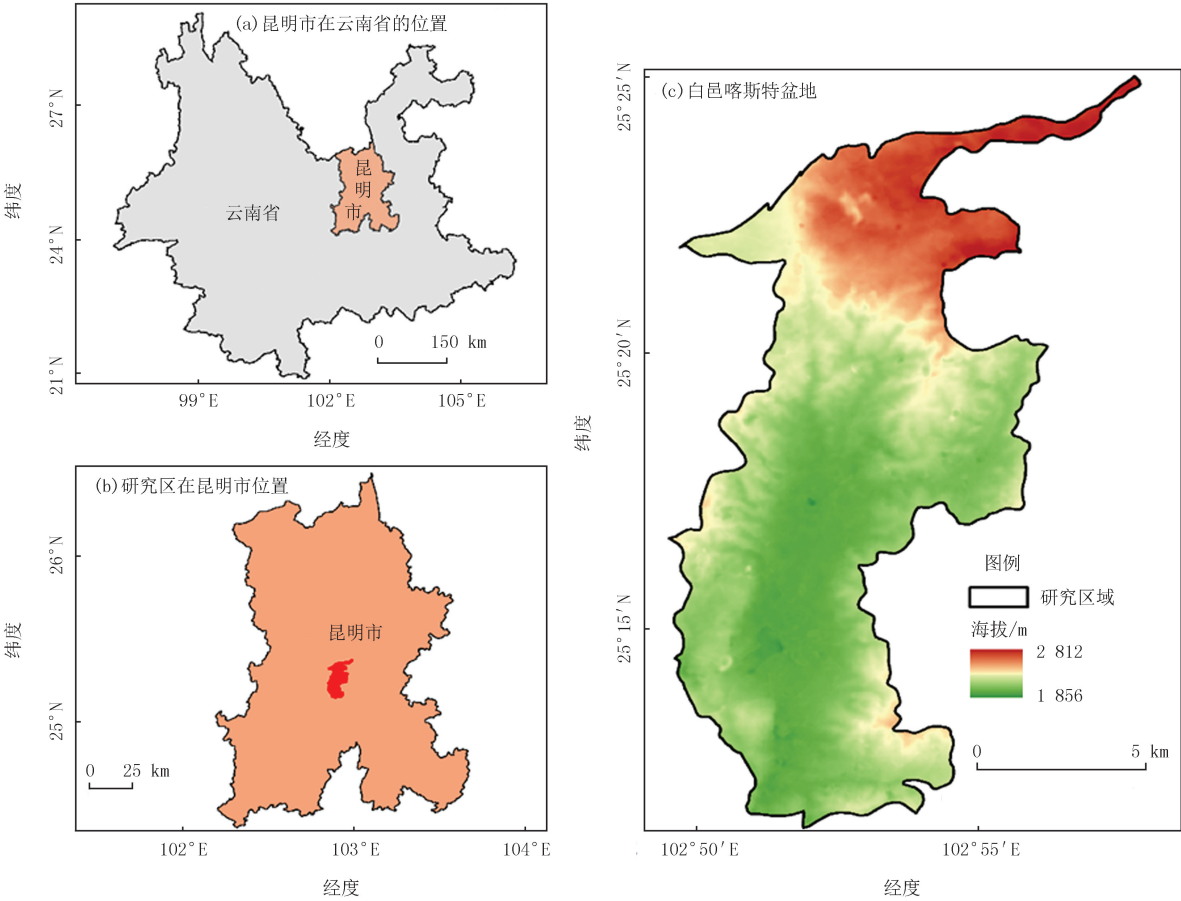
Chen Junxu^{1,2}, Liu Muxiao¹, Jin Yansong¹, Huang Junru¹, Zhu Ying¹, Lin Yanchen¹, Gu Yutong¹

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China;
2. International Joint Research Center for Karstology, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: Investigating land use changes and carbon storage dynamics is a fundamental basis for achieving carbon neutrality. This study focuses on the Baiyi Karst Basin as the research area, analyzing the spatial and temporal changes in land use from 1990 to 2020 based on land use data from 1990, 2000, 2010, and 2020. The PLUS model was used to predict the spatial pattern of land use in 2030, and the InVEST model was applied to explore the spatial and temporal variations in carbon storage and its distribution under different scenarios. The results show that from 1990 to 2020 the main characteristic of land use change in the study area was the conversion of cropland to forestland, with the proportion of cropland decreasing from 46.50% to 36.17%, and forestland increasing from 37.31% to 57.70%. Carbon storage increased from 1.21×10^6 t to 1.56×10^6 t during the same period. Under the natural development scenario, carbon storage in the study area is projected to grow by 4.49% from 2020 to 2030. Under the ecological protection scenario, cropland continues to decrease while forestland increases, leading to a 5.77% growth in carbon storage. The increase in carbon storage in the Baiyi Karst Basin is primarily driven by the continuous conversion of cropland to forestland.

Keywords: carbon storage; land use change; PLUS model; InVEST model; Baiyi Karst Basin

附 录



注:该图根据审图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图无修改.

图1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

表 S1 土地利用变化驱动因素数据来源

Tab. S1 Source of data on drivers of land use change

类型	驱动因素	数据来源
社会经济	人口	Open Spatial Demographic Data and Research(https://www.worldpop.org/)
	生产总值	资源与环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
可达性	到铁路的距离	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org/)
	到快速路的距离	
	到主干道的距离	
	到次干道的距离	
	到城市中心的距离	
自然环境	到河流距离	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org/)
	归一化植被指数	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)
	年平均温度	国家青藏高原科学数据中心
	年平均降雨	(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)
	高程	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡度	

表 S2 本研究公式		
Tab. S2 The formula of this study		
序号	公式	说明
(1)	$P_{i,k(X)}^d = \frac{\sum_{n=1}^M I[h_n(X) = d]}{M}$	X 为由驱动因子组成的向量; M 为决策树数量; d 取值为 0 或者 1,1 表示其他土地利用类型可以转变为土地利用类型 k ,0 表示其他地类不可以转变为地类 k ; $h_n(X)$ 为在决策树为 n 时计算得到的土地利用预测类型; $I[h_n(X) = d]$ 为决策树的指数函数; $P_{i,k(X)}^d$ 为空间单元 i 处 k 类土地利用类型增长的概率.
(2)	$P_{O,i,k}^{d=1,t} = P_{i,k}^{d=1} \times \Omega_{i,k}^t \times D_k^t$	$P_{O,i,k}^{d=1,t}$ 为土地利用类型 k 在单元格 i 上的增长概率; $\Omega_{i,k}^t$ 为单元格 i 的领域效应; D_k^t 为未来土地利用 k 需求的影响.
(3)	$\Omega_{i,k}^t = \frac{con(c_i^{t-1} = k)}{n \times n - 1} \times w_k$	con 为第 $n \times n$ 个窗口中,第 k 种土地利用类型在最后一次迭代中占用的网格单元总数; w_k 为不同土地利用类型之间的权重,默认值为 1; G_k^{t-1} 和 G_k^{t-2} 分别为土地利用类型 k 在第 $t-1$ 次和 $t-2$ 次迭代时的当前需求量和未来需求量的差值.
(4)	$D_k^{t-1} = \begin{cases} D_k^{t-1} (G_k^{t-1} \leq G_k^{t-2}) \\ D_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-2}}{G_k^{t-1}} (G_k^{t-1} < G_k^{t-2} < 0) \\ D_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-2}}{G_k^{t-1}} (0 < G_k^{t-2} < G_k^{t-1}) \end{cases}$	
(5)	$C = C_{\text{bove}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}$	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 (kg/m^2);
(6)	$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n A_i C_i$	C_{total} 为陆地生态系统碳存储总量(t); A_i 为土地利用类型 i 的面积 (cm^2); n 为土地利用类型数量.
(7)	$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \cdots & \cdots & P_{ij} & \cdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix}$	n 表示土地利用类型数; P_{ij} 中的 i, j 分别表示研究初期与末期的土地利用类型; P_{ij} 表示研究期间用地类型 i 向用地类型 j 的转移面积.

表 S3 白邑喀斯特盆地土地利用类型碳密度						
Tab. S3 Carbon density of land use type in Baiyi Karst Basin						
土地利用类型	林地	草地	未利用地	耕地	建设用地	水域
C_{above}	42.85	2.55	0	1.60	0	0
C_{below}	8.57	11.35	0	0.32	0	0
C_{soil}	22.00	7.54	4.20	5.87	4.05	0
C_{dead}	2.35	0.85	0	0	0	0

表 S4 1990—2020 年白邑喀斯特盆地土地利用转移矩阵								
Tab. S4 Land use transfer matrix of Baiyi Karst Basin from 1990 to 2020							km ²	
土地利用类型		2020 年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总和
1990 年	耕地	45.03	20.29	0.21	3.01	0.04	0.70	69.28
	林地	4.63	50.37	0.07	0.45	0.02	0	55.54
	草地	0.14	1.23	0.13	0.07	0	0	1.57
	水域	3.99	13.93	0.42	3.20	0.04	0.19	21.77
	建设用地	0.03	0.07	0	0	0.28	0.00	0.38
	未利用地	0.02	0	0	0.02	0	0.27	0.31
总和		53.84	85.89	0.83	6.75	0.38	1.16	148.85