

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)

不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)

不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧楠, 胡建林 (635)

2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大尺度环流背景分析郑庆锋, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)

基于大气成分观测网的山西省近地面O₃体积分数分布特征李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)

伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)

运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种阴世杰, 刘新罡, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)

郑州市冬夏季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)

郑州市PM_{2.5}中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成李子涵, 董喆, 尚璐琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)

中国三大城市群PM_{2.5}浓度非线性变化分析吴舒祺, 顾杨阳, 张天岳, 赵文吉 (709)

基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)

碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)

考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)

我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)

不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)

深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)

河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)

北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)

店埠河流域地表水-地下水化学特征及其成因分析郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)

张家口地区枯水期地下水化学特征及其成因机制分析金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)

黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)

制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法彭安萍, 高虎, 张新波 (844)

水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)

富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)

壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd²⁺的吸附机制姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)

硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)

磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)

广东省高分辨率温室气体排放清单及特征卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志烟, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)

辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO₂交换及其环境调控刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)

生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N₂O和CH₄排放的影响胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)

生物炭改良盐碱地研究与应用进展魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董辰辰, 孙红文 (940)

免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析徐芝萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)

黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例李月, 罗红芬 (961)

不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)

Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制张超, 翟付杰, 单保庆 (983)

秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)

我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)

广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)

基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)

基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)

基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)

基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)

PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)

氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓琦, 蒋建东 (1080)

昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)

钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)

氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙淇, 田欣, 赵科理 (1107)

关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)

外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)

稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)

根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)

高密度聚乙烯微塑料与氯嘧磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)

微塑料的人体富集及毒性机制研究进展包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)

机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)

微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)

水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)

基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

《环境科学》征订启事(825) 《环境科学》征稿简则(836) 信息(897, 1106, 1149)

黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测：以普定县为例

李月, 罗红芬

(贵州财经大学公共管理学院, 贵阳 550025)

摘要: 探析黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变和未来空间分布趋势, 对优化土地生态安全格局, 提升区域碳储量, 促进城市低碳可持续发展具有重要意义. 以黔中喀斯特地区典型县域——普定县为例, 耦合 PLUS-InVEST 模型, 基于解译的土地利用数据和未来土地预测, 反演 1973~2020 年普定县的土地利用变化与碳储量时空演变特征, 并模拟预测 2060 年不同情景下土地利用空间格局演变及其碳储量变化. 结果表明: ① 1973~2020 年普定县碳储量整体增加 6.61×10^5 t, 呈上升趋势, 空间上呈现出“东和西部上升, 中南部下降”的变化特征. ② 普定县历史时期土地利用变化主要表现为建设用地持续扩张, 有林地和灌木林地面积占比波动上升, 2060 年不同情景下土地利用变化延续了历史时期的变化特征. ③ 2060 年普定县在自然演变、生态保护和经济发展情景下碳储量较 2020 年分别增加 2.93×10^5 、 5.40×10^5 和 1.11×10^5 t, 其中生态保护情景增加最为显著, 旱地向灌木林地转移是区域固碳能力增加的主要原因. 研究结果可为普定县土地利用管理决策以及减排增汇政策制定提供科学参考.

关键词: 土地利用变化; 喀斯特; 碳储量; InVEST 模型; PLUS 模型; 普定县

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0961-13 DOI: 10.13227/j.hjx.202302238

Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as An Example

LI Yue, LUO Hong-fen

(College of Public Management, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China)

Abstract: Regional land use change is the main cause for the change in karst carbon storage. It is important to analyze the spatial and temporal evolution and future spatial distribution trends of carbon storage in typical counties in central Guizhou's karst region, such as Puding County, to improve regional carbon storage, optimize land ecological security patterns, and promote low-carbon sustainable urban development. The PLUS-InVEST model was coupled, based on the interpreted land use data and future land prediction, the spatial and temporal evolution characteristics of land use change and carbon storage in Puding County from 1973 to 2020 were inverted, and the spatial pattern evolution of land use and carbon storage change under different scenarios in 2060 were simulated and predicted. The results showed: ① from 1973 to 2020, the overall carbon storage in Puding County increased by 6.61×10^5 t, showing an upward trend. The spatial distribution showed a significant increase in the northeastern and southwestern parts of Puding County and a significant decrease in the south-central parts. The change was due to the increase in carbon storage in dryland to shrubland and forest land and the decrease in carbon storage in areas where paddy fields are converted to construction land. ② The land use change in Puding County in the historical period was mainly reflected in the continuous expansion of construction land and the increased fluctuation of the proportion of forest land and shrub forest land, and the change in land use in different scenarios projected in 2060 retained the change characteristics of the historical period. ③ In 2060, the carbon storage in Puding County under the scenarios of natural evolution, ecological protection, and economic development increased by 2.93×10^5 , 5.40×10^5 , and 1.11×10^5 t, respectively, compared with that in 2020. Of these, the increase in ecological protection scenarios was the most significant, with the transfer of dryland to shrubland being the main reason for the increase in regional carbon sequestration capacity. These results can serve as a scientific reference for land use management decisions and the formulation of emission reduction and sink increase policies in Puding County. The future land use planning of karst areas should be guided by the goal of "carbon neutrality" in 2060, take appropriate ecological protection measures, strictly control the rapid expansion of construction land to paddy fields, optimize the land use structure, and effectively improve the level of regional carbon storage.

Key words: land use change; karst; carbon storage; InVEST model; PLUS model; Puding County

碳储量动态变化已经成为全球变化研究的核心内容之一^[1-4]. 2020 年, 我国提出在 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和目标^[5-7], 如何提高碳储量以及固碳能力^[8], 近年来受到越来越多学者的广泛关注^[9-11]. 提高生态系统中碳储量能够有效减少大气中的 CO₂ 含量^[11], 在缓解气候变化中具有重要作用^[12], 而土地利用变化又是影响碳储量的重要因素之一^[13-15]. 因此, 碳储量变化研究对系统认识区域生态系统碳汇特征及实现“双碳”目标具有重要现实意义.

目前, 众多学者从全球、国家以及区域尺度研究土地利用变化对碳储量的影响, 研究表明土地利用变化与碳储量时空变化密切相关^[16-20]. InVEST 模型作为生态评估模型之一, 可以绘制出生态系统服务功能空间分布, 具有所需数据少与运行快等特点^[21], 在研究土地利用变化与生态系统服务功能之间的相

收稿日期: 2023-02-28; 修订日期: 2023-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42261044); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2022]202 号); 2022 年度贵州省水利科技项目(KT202223)

作者简介: 李月(1991-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土地变化科学与生态修复, E-mail: 976438528@qq.com

互关系上得以广泛应用^[22-25]。此外,部分学者通过 CLUE-S、FLUS 和 CA-Markov 等模型对未来土地利用与碳储量变化进行时空预测^[26-29],以上模型虽然能够较好模拟出未来土地利用格局变化,但忽视了土地利用变化的潜在驱动因素的影响,同时也无法挖掘时空上土地利用斑块的演变,而 Liang 等^[30]提出的 PLUS(patch-generating land use simulation)模型能够改进转化规则挖掘和景观动态模拟不足,获得更高模拟精度和更接近真实的景观格局指标。目前,多数学者结合 PLUS 与 InVEST 模型探究多情景下土地利用变化对碳储量的影响^[31-34],在研究方法、尺度和内容等方面表现出多元化特征,综合来看,当前多数研究的时间跨度较短,研究区的选择多聚焦在流域^[14]和城市^[22]等区域,鲜有以生态系统脆弱的喀斯特山区为研究对象展开基于长时间序列下县域尺度的碳储量时空变化研究及其未来碳储量潜力定量评估。

贵州是中国西南喀斯特地貌最丰富的地区之一,受外界干扰,生态系统容易退化^[29],是全国生态修复的重点地区^[35],也因具有巨大固碳潜力,成为落实“双碳”战略的重要战场。县域作为社会经济发展最基本的区域单元,在国土空间规划及推动区域低碳协调发展中具有重要作用。普定县既是贵州中部经济发展中心,同时也是长江、珠江上游地区的重要生态功能区,境内喀斯特广泛发育,近几十年来,社会经济高速增长和人类活动加剧造成土地利用变化显著,尤其是建设用地的急剧扩张^[36],其过程必然伴随着高强度的碳排放,区域内土地供应紧张,给促进

人地和谐带来压力与挑战^[37],是目前喀斯特地区如何实现社会经济与生态环境可持续发展面临的重要问题。阐明不同历史时期喀斯特地区县域尺度碳储量时空分布格局与演变规律,科学预测不同情景下土地利用及碳储量时空变化特征,探究区域土地利用变化及其对碳储量的影响,对优化喀斯特地区土地利用格局和合理生态决策,推动区域碳储量向良性方向发展是十分迫切的。鉴于此,本研究以黔中喀斯特地区典型县域——普定县为例,采用 ArcGIS 技术和 InVEST 模型 Carbon 模块,分析 1973~2020 年普定县土地利用变化对碳储量的影响,通过耦合 PLUS 与 InVEST 模型对普定县 2060 年进行自然演变、生态保护和经济发展情景下土地利用空间格局的模拟及碳储量评估,以期为普定县的土地管理政策调整、减排增汇政策制定以及“双碳”的目标实现提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

普定县位于贵州省西部(图 1),隶属安顺市,总面积 1 091 km²,属亚热带季风湿润气候,年均气温 15.1℃,平均降水量 1 378.2 mm。地势总体上表现为南和北部高,中间低,土壤类型以黄壤、石灰土和黄棕壤等为主,境内喀斯特地貌广泛发育,土地利用类型主要以有林地、灌木林地和旱地为主(图 2)。2020 年末常住人口 37.63 万人,2021 年,全县地区生产总值完成 154.63 亿元,增长 10.4%。

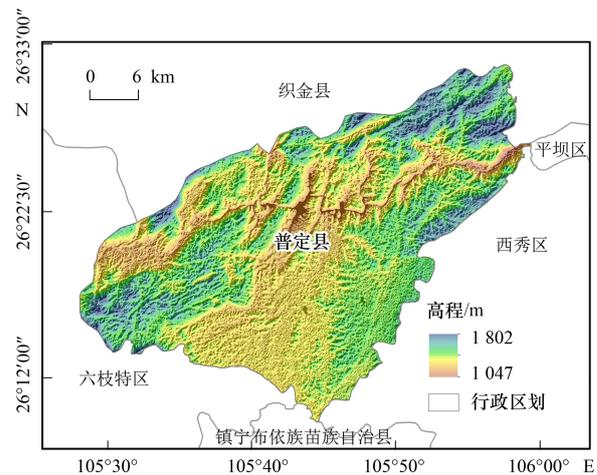


图 1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源与处理

1.2.1 土地利用数据

基于遥感和地理信息系统技术方法,利用普定县 5 期影像进行遥感监测和分类,获得土地利用现状图,并对图像进行处理和数据提取。5 期遥感影像来

源于马里兰大学和地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),其中 1973 年 Landsat 1-3 MSS 影像,空间分辨率为 60 m,1989 年 Landsat 4-5 MSS 影像,2003、2010 和 2020 年 Landsat 7 TM 影像,空间分辨率均为 30 m。为提高解译的准确性和时效性,本研究选择季

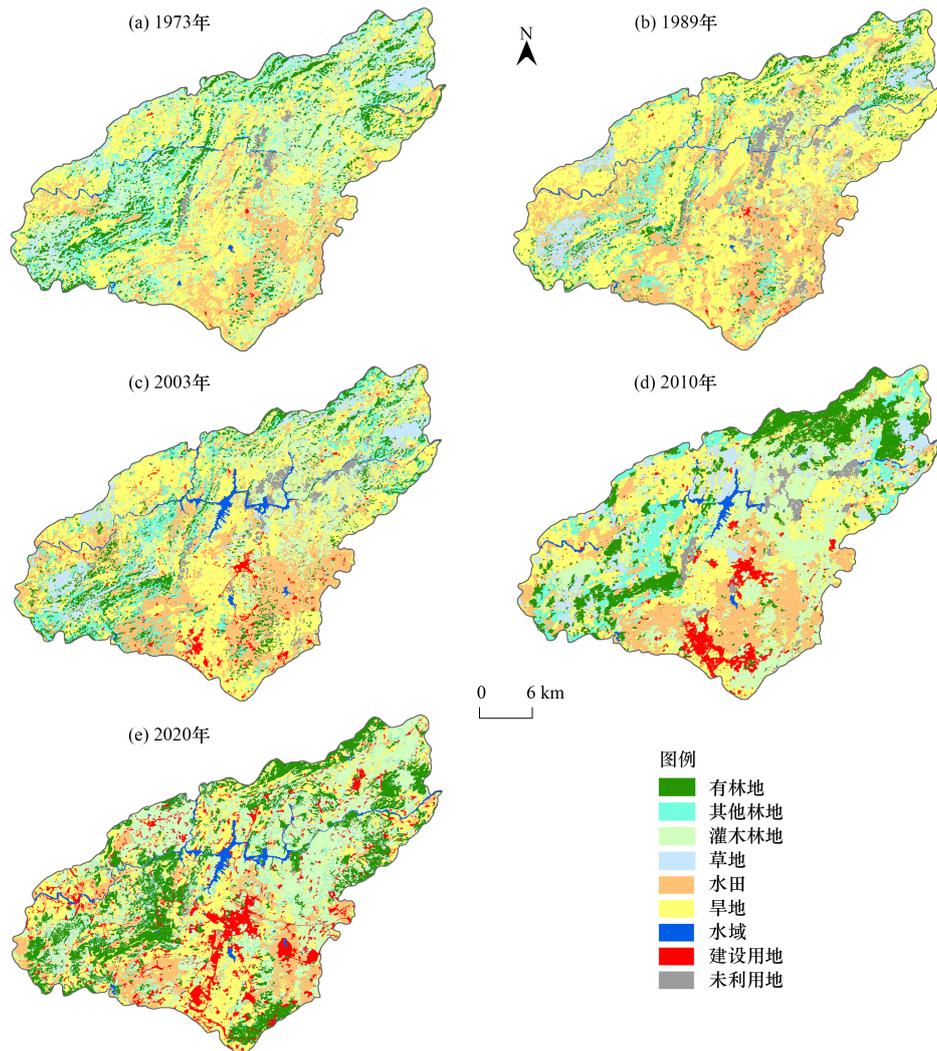


图2 1973~2020年普定县土地利用现状

Fig. 2 Land use status map of Puding County from 1973 to 2020

节一致,且云量低于5%以下的遥感影像作为基础数据。首先,在Erdas 9.2软件下,对5期影像分别进行光谱增强和辐射增强,采用近红外、红光与绿光波段进行标准假彩色合成,使用1:1万地形图对影像进行几何精校正,并采用较为成熟的FLAASH模型进行大气校正处理;其次,采用监督分类与人机交互式解译法进行目视解译提取9种地类,最后,对得到的土地利用矢量图9种土地利用类型随机选取大量的野外验证点,并结合普定县土地利用现状图、Google Earth高分辨率历史影像及全国国土调查主要数据公报等,对土地利用矢量图进行图斑修正。土地利用类型为有林地、灌木林地、其他林地、草地、水田、旱地、水域、建设用地和未利用地共9类用地。

1.2.2 碳密度数据

普定县土地利用碳密度数据主要参考前人研究获得(表1),参考的文献研究区范围主要在我国中南部区域。由于不同学者得到的碳密度数据有所差异,

为避免选取的研究区碳密度数据相差过大,在参考相关文献时,遵循尽量选择同一作者数据的原则,以保证数据一致性与科学性。

1.2.3 土地利用模拟数据

土地利用变化驱动因素包括气候和环境数据7个,社会经济数据8个(表2)。

2 研究方法

2.1 InVEST模型的碳储量计算

利用InVEST模型Carbon模块,结合土地利用数据和碳密度数据估算县域碳储量。InVEST模型Carbon模块中假设每个土地利用类型生态系统对应一个由地上生物碳密度、地下生物碳密度、死亡有机质碳密度和土壤有机质碳库碳密度组成的该地区陆地生态系统的总碳密度^[25]。碳储量的计算见式(1)和式(2):

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

表1 普定县土地利用类型碳密度(以C计)/t·hm⁻²
Table 1 Carbon density of land use types in Puding County/t·hm⁻²

土地利用类型	碳密度				文献
	地上	地下	土壤	死亡有机物	
有林地	31.92	6.38	146.82	3.50	[38]
其他林地	35.03	7.01	91.70	3.50	[38]
灌木林地	26.60	67.50	94.00	3.50	[39]
草地	0.82	0.87	89.20	1.00	[40]
水田	5.42	1.96	146.24	1.00	[41]
旱地	3.29	0.59	109.68	1.00	[41]
水域	0.00	0.00	0.00	0.00	[42]
建设用地	0.00	0.00	111.26	0.00	[43]
未利用地	0.74	0.13	69.92	0.00	[42]

表2 土地利用模拟预测数据
Table 2 Land use simulation prediction data

数据类型	数据名称	分辨率/m	数据来源
气候和环境因素	高程	30	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
	坡度	30	由地理空间数据云获得的DEM提取(http://www.gscloud.cn)
	坡向	30	由地理空间数据云获得的DEM提取(http://www.gscloud.cn)
	年降水量	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
	年均气温	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
	土壤类型	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
	NDVI	500	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
社会经济因素	夜间灯光	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
	GDP	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
	人口数量	100	Worldpop(https://www.worldpop.org/)
	到居民点距离	1 000	国家基础地理信息中心(https://www.webmap.cn/)
	到铁路距离	1 000	OpenSteeetMap(https://www.openstreetmap.org/)
	到公路距离	1 000	OpenSteeetMap(https://www.openstreetmap.org/)
	到政府所在地距离	1 000	OpenSteeetMap(https://www.openstreetmap.org/)
	到县中心距离	1 000	OpenSteeetMap(https://www.openstreetmap.org/)

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

式中, i 为某种土地利用类型; $C_{i\text{-above}}$ 为土地利用类型的地上碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); $C_{i\text{-below}}$ 为地下碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); $C_{i\text{-soil}}$ 为土壤碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); $C_{i\text{-dead}}$ 为死亡碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); C_{total} 为陆地生态系统总的碳储量(t); S 为土地利用类型的面积(hm^2); n 为土地利用类型的数量。

2.2 基于格网的 GeoDa 空间自相关分析

空间自相关分析主要用来衡量事物空间要素属性间的聚集或离散的程度。首先,利用 ArcGIS 10.8 软件的 create fishnet 工具建立普定县 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的格网,将计算得到的碳储量数据与格网链接,从而获得每个格网的碳储量值。其次,利用 GeoDa 模型,基于获得的普定县碳储量格网,进行碳储量空间自相关分析。

2.3 基于 PLUS 模型的土地利用变化模拟

PLUS 作为一种斑块生成的土地利用变化模拟模型,可以很好识别和诊断出各土地利用类型变化的

诱因,模拟出多类土地利用斑块级变化^[30]。该模型包括土地扩张分析策略(LEAS)和多类随机斑块种子机制(CARS)模块。其中 LEAS 模块是为了提取初始 2 期土地利用变化间的用地扩张部分,对其扩张部分进行采样,再利用随机森林算法挖掘与获取各类用地的的发展概率和驱动因素的贡献率;CARS 模块是结合随机种子生成和阈值递减机制,在 LEAS 模块中获取的发展概率约束下模拟斑块自动生成。本研究利用 PLUS 模型,基于 2010 和 2020 年土地利用数据,首先,运用 LEAS 模块挖掘 2010~2020 年用地的扩张情况,其次,基于土地利用情景设置下得到的土地利用转移概率矩阵(表 3),运行 Markov 模型预测得到 2060 年自然演变、生态保护和经济发展情景下各用地类型的需求数量;最后,使用 CARS 模块,通过设置领域权重(表 4)和过渡矩阵的约束,使各土地利用数量满足 2060 年的需求。模拟 2060 年自然演变、生态保护和经济发展情景下的土地利用空间分布格局。

表3 不同情景下土地利用转移概率矩阵

Table 3 Land use transition probability matrix for different scenarios

土地利用情景	土地利用类型	有林地	其他林地	灌木林地	草地	水田	旱地	水域	建设用地	未利用地
自然演变	有林地	0.62	0.00	0.12	0.07	0.00	0.18	0.00	0.01	0.00
	其他林地	0.51	0.03	0.11	0.11	0.00	0.22	0.00	0.02	0.00
	灌木林地	0.16	0.09	0.66	0.00	0.00	0.04	0.01	0.04	0.00
	草地	0.05	0.00	0.46	0.14	0.00	0.30	0.01	0.04	0.00
	水田	0.00	0.00	0.06	0.00	0.63	0.14	0.01	0.15	0.00
	旱地	0.06	0.00	0.30	0.00	0.00	0.52	0.00	0.10	0.00
	水域	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.02	0.00
	建设用地	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.37	0.00	0.58	0.00
	未利用地	0.37	0.00	0.29	0.00	0.00	0.10	0.10	0.03	0.12
生态保护	有林地	0.63	0.00	0.12	0.07	0.00	0.18	0.00	0.01	0.00
	其他林地	0.51	0.03	0.11	0.11	0.00	0.22	0.00	0.01	0.00
	灌木林地	0.16	0.09	0.67	0.00	0.00	0.04	0.01	0.02	0.00
	草地	0.05	0.00	0.47	0.14	0.00	0.30	0.01	0.02	0.00
	水田	0.00	0.00	0.08	0.00	0.65	0.15	0.01	0.11	0.00
	旱地	0.08	0.00	0.40	0.00	0.00	0.44	0.00	0.07	0.00
	水域	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.02	0.00
	建设用地	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.37	0.00	0.58	0.00
	未利用地	0.37	0.00	0.29	0.00	0.00	0.10	0.10	0.03	0.12
经济发展	有林地	0.62	0.00	0.12	0.07	0.00	0.18	0.00	0.02	0.00
	其他林地	0.51	0.03	0.11	0.11	0.00	0.22	0.00	0.03	0.00
	灌木林地	0.15	0.09	0.65	0.00	0.00	0.04	0.01	0.05	0.00
	草地	0.05	0.00	0.46	0.13	0.00	0.29	0.01	0.05	0.00
	水田	0.00	0.00	0.06	0.00	0.60	0.14	0.01	0.19	0.00
	旱地	0.06	0.00	0.30	0.00	0.00	0.51	0.00	0.12	0.00
	水域	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.02	0.00
	建设用地	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.38	0.00	0.59	0.00
	未利用地	0.37	0.00	0.29	0.00	0.00	0.10	0.10	0.03	0.12

表4 领域因子参数

Table 4 Domain factor parameters

土地利用类型	有林地	其他林地	灌木林地	草地	水田	旱地	水域	建设用地	未利用地
权重	0.301	0.002	0.331	0.002	0.004	0.420	0.315	0.330	0.001

2.4 土地利用情景设置

(1)自然演变情景 延续2010~2020年发展趋势,保持原有转移概率和领域权重不变,不考虑其他规划政策对土地利用变化的约束影响。

(2)生态保护情景 加强对有林地和灌木林地等生态用地的保护。在自然发展情景下,将有林地、灌木林地、其他林地和草地向建设用地转移概率减少50%,旱地和水田向有林地、灌木林地和其他林地转移概率增加30%,旱地和水田向建设用地转移概率减少30%。

(3)经济发展情景 主要考虑社会经济发展,将耕地以及林地、草地、未利用地和水域向建设用地转移概率提高20%,建设用地向林地、草地、未利用地和水域转移概率减少30%。

3 结果与分析

3.1 土地利用及其转移变化

由表5和图3可知,普定县近50年以建设用地变化率高达151.08%,1973~2020年建设用地面积净增加96.55 km²,其中84.60%来源于旱地、水田与灌木林地。建设用地在1989~2003年变化最为剧烈,变化率为34.97%,主要因该期间普定经济快速发展,进行了一系列的基础设施和城镇化建设^[20];2003~2020年变化率下降至11.13%,说明普定建设用地的扩张得到有效控制,土地变化总体逐渐趋于缓和。1973~2020年其他林地面积缩减最为严重,占比下降78.50%,主要向有林地和灌木林地转移。旱地和水田次之,除相互转化之外,同时受到建设用地和灌木林地的大量侵

表 5 1973~2020 年土地利用变化面积与单一土地利用变化率¹⁾

Table 5 Land use change area and single land use dynamic attitude from 1973 to 2020

土地利用类 型	1973~1989年		1989~2003年		2003~2010年		2010~2020年		1973~2020年	
	面积变化	变化率								
有林地	-54.00	-2.79	29.13	3.11	57.41	8.54	54.35	3.54	86.88	1.53
其他林地	-29.91	-1.59	25.97	2.12	-27.15	-3.42	-61.09	-7.08	-92.17	-1.67
灌木林地	-202.82	-4.74	74.87	8.13	98.32	10.09	93.04	3.92	63.40	0.50
草地	-12.43	-1.05	8.24	0.96	11.62	2.39	-49.31	-6.08	-41.88	-1.21
水田	95.85	4.33	-21.89	-0.67	-72.13	-4.86	-50.91	-3.64	-49.08	-0.76
旱地	177.04	3.19	-133.68	-1.82	-87.43	-3.2	-25.37	-0.84	-69.44	-0.43
水域	1.85	1.87	10.74	9.54	-4.80	-3.65	7.44	5.32	15.25	5.24
建设用地	2.59	11.92	19.35	34.97	23.04	14.13	51.56	11.13	96.55	151.08
未利用地	25.23	16.84	-12.99	-2.68	1.08	0.72	-19.72	-8.69	-6.40	-1.45

1)面积变化单位为 km²,变化率单位为%

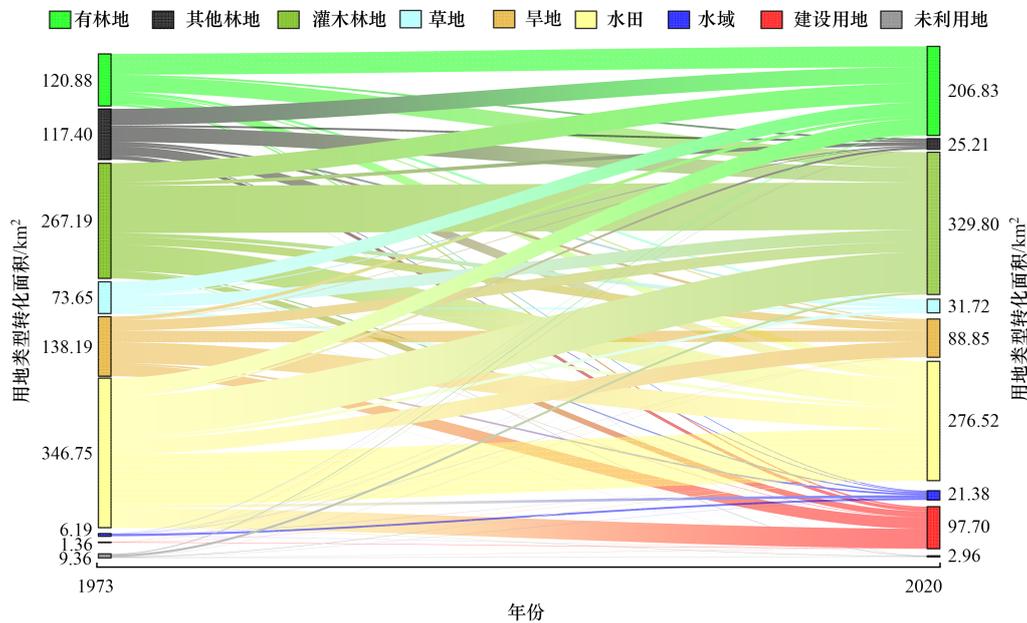


图 3 1973~2020 年普定县土地利用转移矩阵桑基

Fig. 3 Sankey diagram of land use transfer matrix in Puding County from 1973 to 2020

占,说明建设用地的快速扩张以及生态恢复工程的实施都会对研究区粮食安全造成一定的影响.

3.2 碳储量时空分布情况

普定县 1973、1989、2003、2010 和 2020 年碳储量分别为: 158.68×10^5 、 141.96×10^5 、 150.22×10^5 、 158.34×10^5 和 165.29×10^5 t, 呈现波动上升趋势, 累计增加 6.61×10^5 t (图 4). 1973~1989 年碳储量呈现下降趋势, 主要因地上、地下根系及死亡碳库碳储量大幅下降, 减少总量达 21.63×10^5 t, 这可能与该时期研究区人口膨胀及陡坡开垦等毁林开荒活动有关^[36]; 1989~2020 年地上、地下根系和死亡碳库碳储量变化态势发生改变, 碳储量增加 26.76×10^5 t, 这与该时期研究区致力于保护修复生态脆弱区, 进行退耕还林和石漠化综合治理等生态修复工程有关^[36], 研究区的碳储存能力逐渐增强.

碳储量总体呈现“东北和西南高, 中南部低”的空间分布特征(图 5). 由图 5(f)可知, 研究区 1973~2020 年碳储量主要在西南和东北部显著增加, 中南部损失较为严重, 表明东北和西南部为核心碳储区. 研究区碳储量时空变化趋势主要分为两个阶段: ①1973~1989 年东北部区域碳储量明显减少, 该区域由“碳汇”转变“碳源”; ②1989~2020 年东北和西南部的碳储量大幅上升. 中南部碳储量在研究时段内一直呈现减少态势, 该区域是普定县经济发展中心区域, 建设用地扩张迅速.

3.3 区域碳储量差异空间自相关分析

运用 GeoDa 软件对普定县历史 5 个时期的碳储量时空差异进行全局空间自相关分析. 由图 6 可知, 普定县 1973、1989、2003、2010 和 2020 年碳储量 Moran's I 值分别为 0.454、0.475、0.488、0.537 和

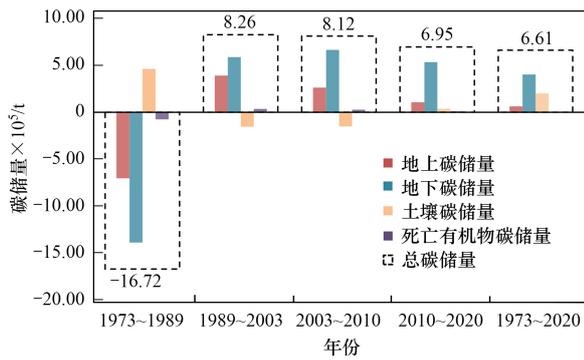


图4 1973~2020年普定县基本碳库碳储量变化

Fig. 4 Changes in basic carbon pool carbon storage in Puding County from 1973 to 2020

0.576,呈上升趋势.说明碳储量在空间上表现出正相关,且随着时间推移,聚集态势逐渐增强.从数量上看,更多的点位于第一象限和第三象限内,说明碳储量高值区与高值区或低值区与低值区在空间分布上更易聚集.结果表明,5个时期碳储量在东北部呈现“高-高”聚集分布特征,在中南部表现“低-低”聚集的空间分布特征(图7).碳储量高值区土地利用类型以有林地和灌木林地等生态用地为主,低值区在建设用和旱地集中连片分布的县城中心.

3.4 土地利用变化情景分析

构建区域土地利用情景模拟模型,经过多次调试,PLUS模型最佳的模拟效果总体精度为87.4%,Kappa系数82.3%,说明模拟得到的2020年土地利用现状图和真实地物分布较为一致,能够满足研究需要.模拟得到研究区2060年自然演变、生态保护和

经济发展情景下土地利用类型分布及各类用地类型变化情况(图8),结果表明,2060年3种情景下土地利用变化延续了已有的变化特征,其中有林地、其他林地、灌木林地、水域和建设用地呈扩张趋势,草地、水田、旱地和未利用地面积有所减少(表6).自然演变情景下,水田减少幅度最大,降幅达58.99%,灌木林地面积增加34.98 km²;生态保护情景设定了退耕还林等生态保护措施,灌木林地面积变化最大,为79.71 km²,灌木林地主要侵占旱地和有林地得以发展;经济发展情景下,建设用地面积上升48.62 km²,其扩张主要占用水田,在中部呈放射状向西部扩张,在西部沿河流两侧呈轴式扩张发展.

3.5 不同情景下的碳储量的时空变化特征

2060年普定县自然演变、生态保护和经济发展情景下的碳储量分别为 168.23×10^5 、 170.69×10^5 和 166.40×10^5 t,3种情景下碳储量均有所增加,说明研究区未来生态系统服务功能将持续向好.从碳库角度分析可知,3种情景下土壤碳库占据明显主导地位,占比均在70%左右,但均呈现减少趋势,其中旱地和水田面积下降是土壤碳库均呈现减少态势的主要原因.自然演变情景下,因其地下根系碳库碳储量上升 2.11×10^5 t,碳储量总体上升 2.93×10^5 t;生态保护情景下碳储增量最大,为 5.40×10^5 t,其增量约为自然演变情景的5倍,其中,地下根系碳库碳储增量达 5.05×10^5 t,土壤碳库碳损失量为 2.50×10^5 t,说明该情景下旱地和水田的消失伴随着土壤碳库碳储量的减少;经济发展情景下,

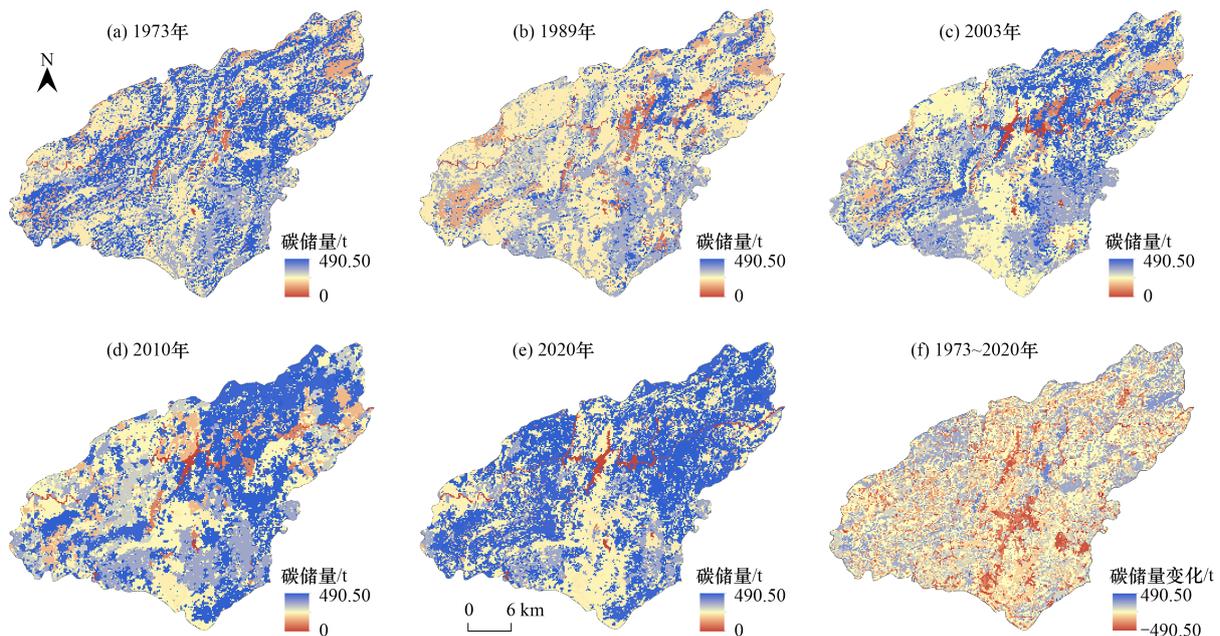


图5 1973~2020年普定县碳储量空间分布及碳储量空间变化分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon storage in Puding County from 1973 to 2020

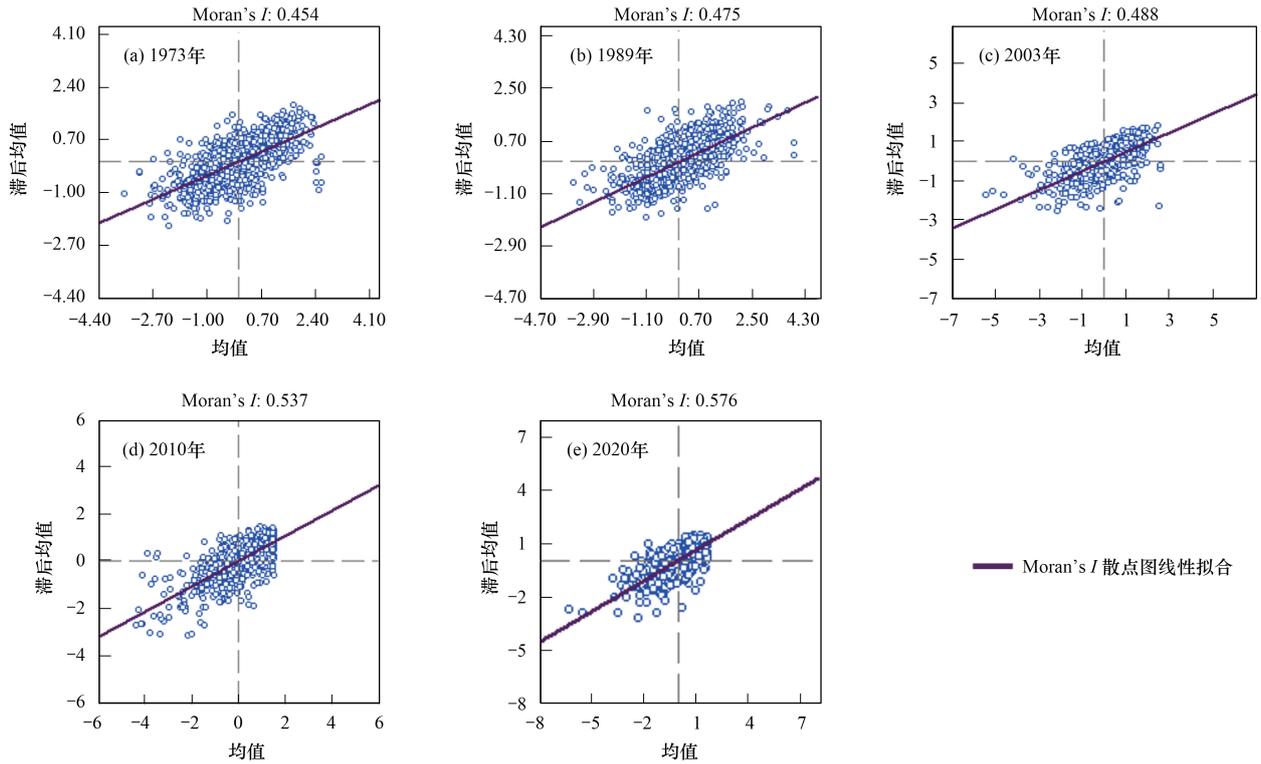


图6 1973~2020年普定县碳储量全局自相关分析Moran散点图

Fig. 6 Moran scatter plot of global autocorrelation analysis of carbon storage in Puding County from 1973 to 2020

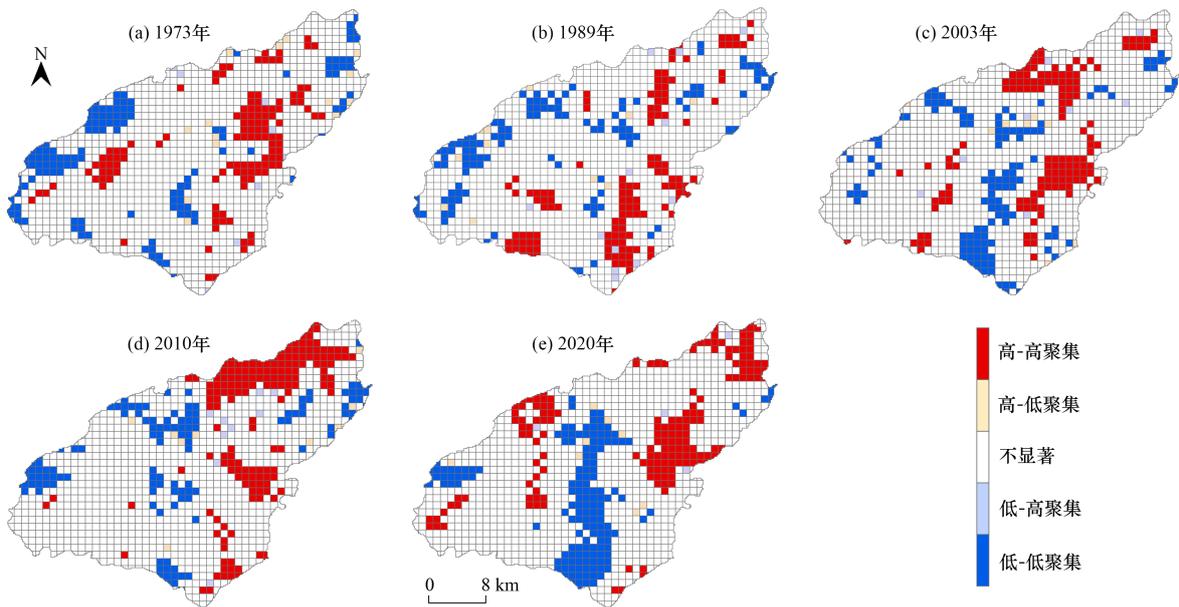


图7 1973~2020年普定县碳储量LISA集聚

Fig. 7 LISA accumulation of carbon storage in Puding County from 1973 to 2020

碳储量仅上升 1.11×10^5 t, 其中土壤碳库碳储量下降 1.12×10^5 t (图9), 表明经济发展情景下不利于碳储量的增加。

从空间分布来看, 普定县碳储量呈现“东西高-中间低”的空间分布特征(图10), 表明东和西部区域是研究区的主要碳汇功能区。采用分区统计和自然断点法, 将研究区碳储量划分为高增加、基本不变及高减少3个级别(图11)。3种情景下, 碳储量基本不变的

区域表现为随时间变化碳储量较为稳定, 均占70%以上。高增加和高减少区占比范围在12%~16%之间。自然演变情景下, 碳储量高增加区主要呈零星点状分布, 高减少区集中交错在东南与西南部; 生态保护情景下, 碳储量高增加区域主要分布在西南部区域, 高减少区在东部区域分布较为聚集; 经济发展情景下, 碳储量高减少区整体占比为15.36%, 高增加占比为12.61%。

表 6 2060 年普定县不同情景下用地类型变化情况
Table 6 Changes in land use types under different scenarios in Puding County in 2060

土地利用类型	自然演变情景 面积变化/km ²	生态保护情景 面积变化/km ²	经济发展情景 面积变化/km ²
有林地	29.56	26.05	19.52
其他林地	3.26	12.31	6.88
灌木林地	34.98	79.71	16.31
草地	-10.41	-7.38	-10.63
水田	-52.58	-71.56	-59.23
旱地	-23.58	-69.97	-21.82
水域	1.46	1.77	1.48
建设用地	22.30	34.43	48.62
未利用地	-2.14	-2.39	-2.13

3.6 多情景模拟下土地利用变化对碳储量的影响差异

如图 12 可知,自然演变情景下,水田碳储量下降 7.96×10^5 t,有林地和灌木林地碳储量共上升 10.50×10^5 t. 生态保护情景下,灌木林地碳储增量高达 14.05×10^5 t,水田碳储量流失最多,为 10.89×10^5 t,其次为旱地,旱地碳储量下降 7.65×10^5 t,这主要与灌木林地大量侵占旱地和水田有关. 经济发展情景下,建设用地扩张 48.62 km^2 ,其碳储量增加 5.32×10^5 t,建设用地扩张主要占用水田致使水田碳储量损失严重,表明建设用地扩张会造成区域碳储量下降,形成区域碳源. 3 种情景下其他林地、草地以及未利用地的碳储量变化相对稳定,对生态系统碳汇能力影响甚微. 因此 2060 年普定县主要因大量旱地向灌木林地转移,使得部分区域从碳源区转变为碳汇区,提升了区域的固碳能力. 但未来建设用地仍在持续扩张,研究区中部区域建设用地侵占水田仍会造成一定的碳流失问题.

4 讨论

4.1 土地利用和碳储量变化特征

本研究结果表明,近 50 年普定县土地利用变化主要表现为旱地、水田和灌木林地转为建设用地,旱地转为灌木林地,建设用地在中南部中心城区以及各乡镇迅速扩张,这与秦罗义等^[36]研究的结果一致,主要由于城镇化发展,城镇联动和城乡融合发展的全面推进,加上研究区特殊的地质地貌结构,地形起伏大,因此,地形相对平坦的旱地和水田更容易成为建设用地的侵占对象. 以 1989 年为拐点研究区碳储量呈现“先减再增”变化趋势,碳储量整体增加,在空间上表现为“东北和西南部上升,中南部下降”的变化特征,其高值区域在东北部出现聚集,碳储量低值区域在中南部聚集,这主要与普定县南部和北部向

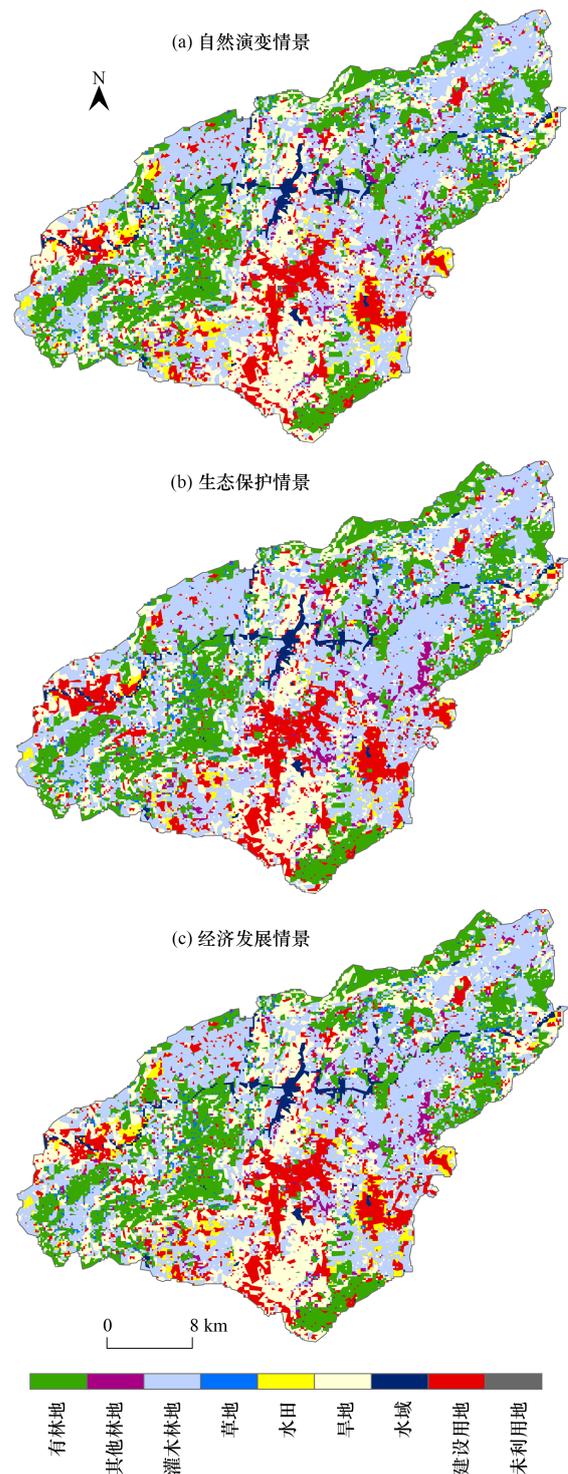


图 8 2060 年普定县不同情景下土地利用类型分布
Fig. 8 Distribution of land use types under different scenarios in Puding County in 2060

中部三岔河谷倾斜的地势有关,东北与西南部人口稀疏及海拔相对较高,地形起伏较大,降水量充沛使得东北和西南部的植被覆盖情况较好^[44]. 多情景模拟结果表明,2060 年普定县在自然演变、生态保护和经济情景下的碳储量均呈增加趋势,空间上持续呈现“东和西高-中间低”的分布特征. 普定县碳储量虽整体有所上升,但碳储量整体偏低,可能是源

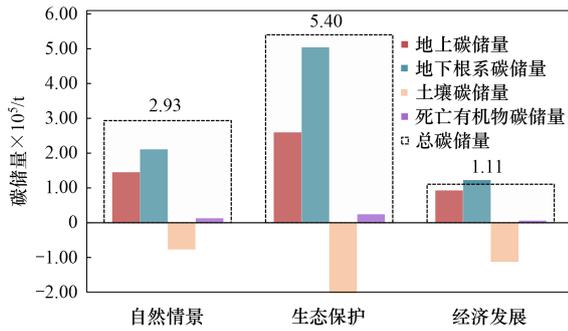


图 9 2060 年不同情景下普定县基本碳库碳储量变化
Fig. 9 Changes in basic carbon pool carbon storage in Puding County under different scenarios in 2060

于喀斯特山地基岩裸露大且土层浅薄,影响了整个区域碳储存能力。

4.2 碳储量对土地利用变化的响应

由碳储量对土地利用变化的动态响应情况可知,区域碳储量因旱地向灌木林地等生态用地转移有所增加,可能是因为研究区旱地多为坡耕地,在退耕还林生态恢复工程下,碳密度较低的旱地更容易被碳密度较高的灌木林地占用,因此,旱地转移表现出更为强烈的碳汇作用,这与朱文博等^[2]研究的结果相似.普定县中南部中心城区发展迅速,建设用地大量侵占地势较为平坦且集中分布的水田用地^[45],降低了水田碳库碳储量,从而引起总碳排放量的增加,使得水田转出表现为碳源,这与丁长欢等^[46]研究的结果相一致.水田相较于旱地有利于碳储量的增加,这可能因水田能够在一定程度抑制土壤有机碳的矿

化,而旱地的耕作方式会在一定程度上破坏土壤团聚体结构的稳定性造成的.研究区不同情景下地下根系碳库碳储量增值量最大,灌木林地碳储量上升最为显著,本研究的结果与 Zhao 等^[10]研究的基本一致,实施生态保护措施对提升区域碳储量的增加具有正向作用.此外,研究发现建设用地扩张会造成区域土壤碳库碳储量流失,这与李义平^[43]研究的结果一致,可能与建设用地扩张大量占用水田,致使水田碳储量显著减少有关.因此,研究区在未来的开发建设中,要以核心碳储区为重点,保护生态资源,同时,减缓中部城市中心建设用地的扩张,合理规划土地利用,实现低效建设用地的再开发,提高土地利用的集约化能力,持续推进石漠化治理等一系列生态保护措施,形成城镇化低碳发展的土地利用格局。

4.3 不确定性分析

耦合 PLUS 模型与 InVEST 模型能够较为直观地反映未来碳储量的变化与固碳潜力,但 PLUS 模型中存在领域因子等经验性参数设置,使得模型模拟结果存在不确定性.此外,在土地利用变化驱动因子选取时忽略了基本农田控制线和城市边界控制线等政策因素的影响,对模拟精度造成一定影响.伴随区域社会经济的发展,当地各项相关政策无疑会对未来土地利用变化趋势产生重大影响^[30],因此,今后在进行土地利用变化模拟研究中应当考虑相关政策因素的影响,以提高模型模拟的准确性. InVEST 模型虽然能够直观展现普定近百年来各地类转化对碳储量的

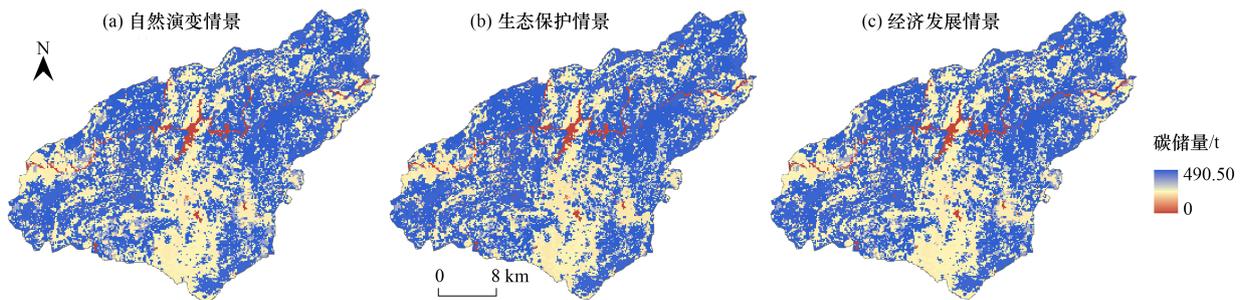


图 10 普定县 2060 年不同情景下碳储量空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of carbon storage under different scenarios in Puding County in 2060

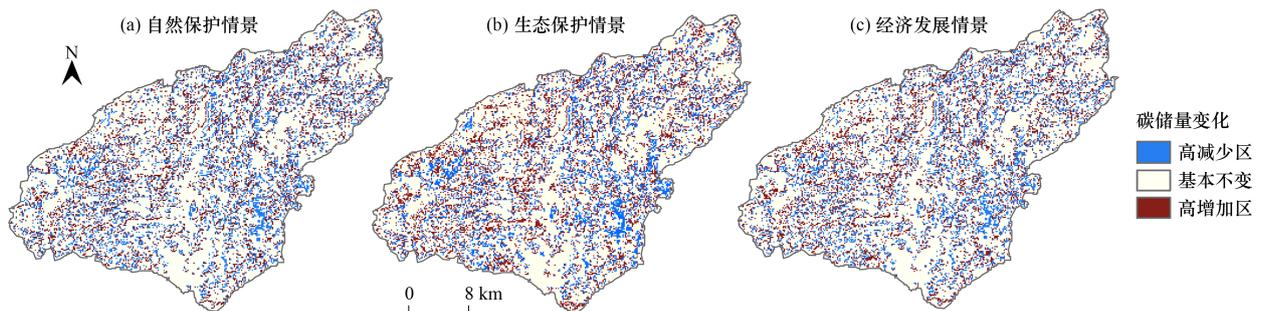


图 11 普定县 2020~2060 年不同情景下碳储量变化

Fig. 11 Changes in carbon storage under different scenarios in Puding County from 2020 to 2060

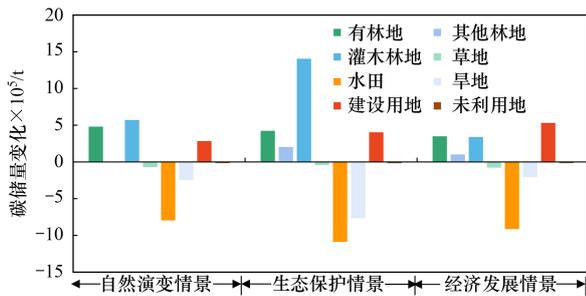


图 12 2060年普定县不同情景下用地类型碳储量变化

Fig. 12 Changes in carbon storage of land use types under different scenarios in Puding County in 2060

影响,但其所需的土地利用类型碳密度受时间推移等因素影响,存在动态变化特征,由于实测土地利用类型碳密度数据缺乏,且获取难度大,本研究主要参考相近研究区的土地利用碳密度,其准确性还有进一步提升的空间,未来应当加强对碳密度数据获取的时效性,以提高碳储量定量化评估的准确性.因此,如何综合考虑多方面的影响因素是提高土地利用变化模拟精度的关键之一.

5 结论

(1)1973~2020年碳储量共增加 6.61×10^5 t,灌木林地和有林地扩张是导致区域碳储量增加的主要原因.碳储量呈现“东和西部上升,中部下降”的空间变化特征,其高值区在东北部灌木林地和有林地分布区域聚集,低值区在水域及建设用地广泛分布的中南部区域聚集.

(2)1973~2020年普定县土地利用变化主要表现为建设用地快速扩张,有林地和灌木林地占比波动上升,旱地和水田大幅下降.2060年自然演变、生态保护和经济发展情景下土地利用变化延续了历史变化特征.

(3)2060年自然演变、生态保护和经济发展情景下的碳储量均呈有所增加,始终表现出“东西高-中间低”的空间分布特征,其中,生态保护情景碳储量上升最为明显,增量为 5.40×10^5 t,说明进行生态工程建设,可增加区域碳储量.普定县主要因大量旱地向灌木林地转移,使得部分区域从碳源区转变为碳汇区,但未来建设用地扩张不可避免,建设用地侵占水田仍会造成部分区域碳储量减少.

参考文献:

[1] 段巍岩, 黄昌. 河流湖泊碳循环研究进展[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(8): 3792-3807.
Duan W Y, Huang C. Research progress on the carbon cycle of rivers and lakes[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(8): 3792-3807.

[2] 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.

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.

- [3] Piyathilake I D U H, Udayakumara E P N, Ranaweera L V, *et al.* Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva Province, Sri Lanka [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, **8**(2): 2213-2223.
- [4] Ghafoor G Z, Sharif F, Shahid M G, *et al.* Assessing the impact of land use land cover change on regulatory ecosystem services of subtropical scrub forest, Soan Valley Pakistan [J]. Scientific Reports, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-14333-4.
- [5] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应——以贵州省为例[J]. 中国土地科学, 2021, **35**(11): 101-111.
Chen M J, Wang Q R, Bai Z K, *et al.* Transition of “production-living-ecological” space and its carbon storage effect under the vision of Carbon neutralization: A case study of Guizhou Province [J]. China Land Science, 2021, **35**(11): 101-111.
- [6] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, **39**(6): 1896-1906.
Lu Y Y, Xu X L, Li J C, *et al.* Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model [J]. Arid Zone Research, 2022, **39**(6): 1896-1906.
- [7] 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.
Luo S Q, Hu X M, Sun Y, *et al.* Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled Plus-Invest model [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, **31**(2): 300-314.
- [8] Li J Y, Gong J, Guldmann J M, *et al.* Carbon dynamics in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau from 1990 to 2030 using landsat land use/cover change data [J]. Remote Sensing, 2020, **12**(3), doi: 10.3390/rs12030528.
- [9] Lai L, Huang X J, Yang H, *et al.* Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010 [J]. Science Advances, 2016, **2**(11), doi: 10.1126/sciadv.1601063.
- [10] Zhao M M, He Z B, Du J, *et al.* Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models [J]. Ecological Indicators, 2019, **98**: 29-38.
- [11] Zhai H, Lv C Q, Liu W Z, *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), doi: 10.3390/rs13163331.
- [12] 段璇瑜, 龚文峰, 孙雨欣, 等. 海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J]. 水土保持通报, 2022, **42**(5): 301-311.
Duan X Y, Gong W F, Sun Y X, *et al.* Land use change and its impact on temporal and spatial evolution of carbon storage in Coastal Zone of Hainan Island [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, **42**(5): 301-311.
- [13] 吴楠, 陈凝, 程鹏, 等. 安徽省陆地生态系统碳储量变化对未来土地覆被情景的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2023, **32**(2): 415-426.
Wu N, Chen N, Cheng P, *et al.* Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem responses to land cover change under five

- future Scenarios in Anhui Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, **32**(2): 415-426.
- [14] 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 等. 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5253-5262.
- Hou J K, Chen J J, Zhang K Q, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the source region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and its response to different future scenarios [J]. Environmental Science, 2022, **43**(11): 5253-5262.
- [15] 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 生态与农村环境学报, 2023, **39**(1): 41-51.
- Sun X X, Xue J H, Dong L N. Spatio-temporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, **39**(1): 41-51.
- [16] Xu L, Yu G R, He N P. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, **29**(1): 49-66.
- [17] Houghton R A, House J I, Pongratz J, *et al.* Carbon emissions from land use and land-cover change [J]. Biogeosciences, 2012, **9**(12): 5125-5142.
- [18] Zhou J J, Zhao Y R, Huang P, *et al.* Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of Inland River Basin in Arid Area, China [J]. Ecological Indicators, 2020, **118**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106803.
- [19] Xiang M S, Wang C J, Tan Y X, *et al.* Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Western Sichuan Plateau [J]. Scientific Reports, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-12175-8.
- [20] 韩敏, 徐长春, 隆云霞, 等. 西北干旱区不同土地利用情景下的碳储量及碳源/汇变化模拟与预估[J]. 水土保持通报, 2022, **42**(3): 335-344.
- Han M, Xu C C, Long Y X, *et al.* Simulation and prediction of changes in carbon storage and carbon source/sink under different land use scenarios in arid region of northwest China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, **42**(3): 335-344.
- [21] 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的杭州湾生态系统碳储量[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3343-3352.
- Ding Y, Wang L Z, Gui F, *et al.* Ecosystem carbon storage in Hangzhou Bay Area based on InVEST and PLUS models [J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3343-3352.
- [22] 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.
- Guo X M, Chuai X W, Zhang M, *et al.* Spatio-temporal analysis of land-use change and the impact on terrestrial ecosystems carbon storage in Yangtze River City Group [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, **28**(2): 269-280.
- [23] 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.
- Xiang S J, Zhang Q, Wang D, *et al.* Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000-2020 [J]. Journal of Natural Resources, 2022, **37**(5): 1198-1213.
- [24] 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 等. 中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(8): 4655-4665.
- Chen N, Xin C L, Tang D B, *et al.* Multi-scenario land use optimization and carbon storage assessment in northwest China [J]. Environmental Science, 2023, **44**(8): 4655-4665.
- [25] 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 [J]. Journal of Natural Resources, 2020, **35**(4): 826-844.
- [26] 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.
- Zhang Y, Shi X Y, Tang Q. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(1): 360-373.
- [27] 王超越, 郭先华, 郭莉, 等. 基于 FLUS-InVEST 的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响——以呼包鄂榆城市群为例[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(8): 1667-1679.
- Wang C Y, Guo X H, Guo L, *et al.* Land use change and its impact on carbon storage in northwest China based on FLUS-Invest: A case study of Hu-Bao-Er-Yu urban agglomeration [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(8): 1667-1679.
- [28] 周杰, 张学儒, 牟风云, 等. 基于 CA-Markov 的土壤有机碳储量空间格局重建研究——以泛长三角地区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(7): 1565-1575.
- Zhou J, Zhang X R, Mu F Y, *et al.* Spatial pattern reconstruction of soil organic carbon storage based on CA-Markov-A case study in Pan-Yangtze River Delta [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(7): 1565-1575.
- [29] 徐森, 李思亮, 钟君. 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 752-761.
- Xu S, Li S L, Zhou J. Effects of land use on riverine dissolved inorganic carbon (DIC) and $\delta^{13}C_{DIC}$ in a Karst River Basin, southwestern China [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 752-761.
- [30] Liang X, Guan Q F, 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**, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569.
- [31] 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 F, Zhang Y, Guo Y, *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.
- [32] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测——以广东省为例[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(10): 4827-4839.
- Lin T, Yang M Z, Wu D F, *et al.* Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model-A case study in Guangdong Province [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(10): 4827-4839.
- [33] 孙方虎, 方凤满, 洪炜林, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J]. 水土保持学报, 2023, **37**(1): 151-158.
- Sun F H, Fang F M, Hong W L, *et al.* Evolution analysis and

- prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, **37**(1): 151-158.
- [34] 古圳威, 刘京, 陈怡, 等. 陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟[J]. *环境科学*, 2023, **44**(8): 4666-4678.
- Gu Z W, Liu J, Chen Y, *et al.* Analysis and simulation of the spatiotemporal evolution of habitat quality and carbon storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(8): 4666-4678.
- [35] 赵敏, 狄东睿, 黄光伟, 等. 乌江流域经济与人口空间格局演变及耦合特征[J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(6): 298-310, 321.
- Zhao M, Di D R, Huang G W, *et al.* Evolution and coupling between economic and population spatial pattern in Wujiang River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(6): 298-310, 321.
- [36] 秦罗义, 白晓永, 王世杰, 等. 近40年来贵州高原典型区土地利用变化及驱动机制[J]. *山地学报*, 2015, **33**(5): 619-628.
- Qin L Y, Bai X Y, Wang S J, *et al.* History of land use change and driving mechanism of typical Guizhou plateau region during 40 years [J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(5): 619-628.
- [37] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 等. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J]. *生态学报*, 2019, **39**(18): 6577-6585.
- He X J, Wang L, Ke B, *et al.* Progress on ecological conservation and restoration for China Karst [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(18): 6577-6585.
- [38] 邹文涛, 何友均, 叶兵, 等. 基于InVEST模型的钱江源国家公园生态系统碳储量研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, **41**(3): 120-128.
- Zou W T, He Y J, Ye B, *et al.* Study on carbon storage of ecosystem in Qian Jiangyuan National Park based on InVEST model [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, **41**(3): 120-128.
- [39] 李默然, 丁贵杰. 贵州黔东南主要森林类型碳储量研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, **33**(7): 119-124.
- Li M R, Ding G J. Study on carbon storage of main forest types in southeast part of Guizhou Province [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, **33**(7): 119-124.
- [40] 黄从红. 基于InVEST模型的生态系统服务功能研究——以四川宝兴县和北京门头沟区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- Huang C H. Ecosystem services evaluation based on the InVEST model: Case studies in Baoxing County, Sichuan and Mentougou District, Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [41] 罗怀良, 袁道先, 陈浩. 南川市三泉镇岩溶区农田生态系统有机碳密度[J]. *生态环境*, 2008, **17**(5): 2014-2018.
- Luo H L, Yuan D X, Chen H. Organic carbon density of farmland ecosystem in karst area of Sanquan Town, Nanchuan City [J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(5): 2014-2018.
- [42] 郜红娟, 韩会庆, 张朝琼, 等. 乌江流域贵州段2000-2010年土地利用变化对碳储量的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2016, **34**(1): 48-53, 84.
- Gao H J, Han H Q, Zhang C Q, *et al.* Effects of land use change on carbon storage in Wujiang River of Guizhou Province from 2000-2010 [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2016, **34**(1): 48-53, 84.
- [43] 李义平. 基于地表覆被变化的黔东南碳储量时空动态变化研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- Li Y P. Spatiotemporal dynamic change of carbon storage in southeast Guizhou based on surface cover change [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [44] 王毅, 郭跃. 喀斯特地貌区植被覆盖与地形因子的空间关系分析——以贵州普定县为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(1): 157-167.
- Wang Y, Guo Y. Analysis of spatial correlation between vegetation coverage and terrain factors in karst landform—Taking Puding area in Guizhou for example [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(1): 157-167.
- [45] 韩会庆, 杨广斌, 张凤太. 基于地貌特征的贵州省土地利用时空变化分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, **39**(5): 99-105.
- Han H Q, Yang G B, Zhang F T. Spatio-temporal analysis of land use changes in Guizhou Province based on landform characteristics [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2015, **39**(5): 99-105.
- [46] 丁长欢, 慈恩, 邵景安, 等. 近30年黔西喀斯特区典型县域农田土壤有机碳动态研究——以贵州普定县为例[J]. *中国岩溶*, 2015, **34**(3): 281-291.
- Ding C H, Ci E, Shao J A, *et al.* Dynamics of soil organic carbon in cropland of karst regions in western Guizhou Province during last 30 years: A case study of Puding County, Guizhou Province [J]. *Carsologica Sinica*, 2015, **34**(3): 281-291.

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i>	(617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang	(626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i>	(635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i>	(645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i>	(655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i>	(668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i>	(678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i>	(700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i>	(709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i>	(721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i>	(732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i>	(744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang	(755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i>	(768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i>	(780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i>	(792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i>	(802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong	(813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i>	(826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i>	(837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo	(844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i>	(854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i>	(862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i>	(873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i>	(885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i>	(898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i>	(909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i>	(929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i>	(940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i>	(952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as an Example	LI Yue, LUO Hong-fen	(961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i>	(974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing	(983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i>	(992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i>	(1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong	(1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i>	(1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i>	(1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i>	(1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i>	(1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i>	(1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i>	(1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i>	(1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i>	(1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	(1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i>	(1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i>	(1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i>	(1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i>	(1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i>	(1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i>	(1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i>	(1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang	(1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li	(1222)