

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹	(2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕	(2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪	(2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利	(2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬	(2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献	(2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛	(2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文	(2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元	(2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发	(2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫	(2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌	(2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮	(2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江	(2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升	(2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹	(2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红	(2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红	(2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁	(2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥	(2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚	(2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯	(2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟	(2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然	(2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高	(2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪	(2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂	(2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦	(2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬	(2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛	(2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻	(2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平	(2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家	(2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤	(2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏	(2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟	(2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰	(2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵	(2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇	(2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛	(2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰	(2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川	(2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明	(2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成	(2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平	(2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆	(2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧	(2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波	(3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒	(3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明	(3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅	(3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋	(3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博	(3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌	(3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华	(3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平	(3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽	(3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡	(3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪	(3119)

基于 SSP-RCP 情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量

崔写, 董燕*, 张露尹, 王荣耀

(昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘要: 探索未来气候变化情景下土地利用/覆盖变化(LUCC)和生态系统碳储量的空间分布, 可以为优化土地资源再分配和制定社会经济可持续发展政策提供科学依据. 研究整合了斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型和生态系统服务与权衡综合评价(InVEST)模型, 基于CMIP6提供的共享社会经济路径和代表性浓度路径(SSP-RCP)情景, 评估了黄土高原LUCC和生态系统碳储量的时空动态变化, 分析驱动因素对不同区域的影响程度, 探讨各区域碳储量空间相关性. 结果表明: ①未来3种情景LUCC变化模式相似, 耕地、草地和未利用地面积都有不同程度的减少, 建设用地急剧扩张, 3种情景下的增幅分别为29.23%~53.56% (SSP126)、34.59%~63.28% (SSP245)和42.80%~73.27% (SSP585). ②与2020年相比, 2040年SSP126情景碳储量增加 1.813×10^6 t, 其余情景持续下降; 到2060年, 3种情景草原碳储量分别减少 13.391×10^6 、 33.548×10^6 和 85.871×10^6 t. ③从空间相关性来看, 黄土高原碳储量在市域间存在相关性, 未来情景差异不显著, 热点分布在研究区中部及中部以北地区, 没有明显的冷点区域. ④土地利用变化会增加或损失碳储量. 林地、耕地和草地比其它土地类型有更多的碳储量, 增加它们的面积和限制向其它土地类型转换会增加生态系统碳储量.

关键词: CMIP6模型; PLUS模型; InVEST模型; 土地利用变化; 碳储量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2817-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202306165

Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios

CUI Xie, DONG Yan*, ZHANG Lu-yin, WANG Rong-yao

(Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Exploring the spatial distribution of land use/coverage (LUCC) and ecosystem carbon reserves in the future of climate change can provide a scientific basis for optimizing the distribution of land resources and formulating social economic sustainable development policies. In this study, we integrated the plaques generating land use simulation (PLUS) model and ecosystem services and weighing comprehensive evaluation (InVEST) model. Based on the CMIP6-based sharing socio-economic path and representative concentration path (SSP-RCP), we evaluated the Loess Plateau for time and space dynamic changes in LUCC and ecosystem carbon reserves, analyzed the impact of driving factors on different regions, and explored the correlation between carbon reserves in various regions. The results showed: ① In the future, the three scenarios were similar to the LUCC changes. The area of cultivated land, grassland, and unused land would be reduced to varying degrees, and the construction land had expanded sharply. The increase in the three scenarios was 29.23%-53.56% (SSP126), 34.59%-63.28% (SSP245), and 42.80%-73.27% (SSP585). ② Compared with that in 2020, the carbon reserves of SSP126 sites in 2040 increased by 1.813×10^6 t, and in the remaining scenarios it would continue to decline. By 2060, the grassland carbon reserves in the three scenarios decreased by 13.391×10^6 , 33.548×10^6 , and 85.871×10^6 t, respectively. ③ From the perspective of space correlation, the carbon reserves of the Loess Plateau were correlated between cities. The difference in future scenarios was not significant. The hotspots were distributed in the middle and north of the research area. There was no obvious cold spot area. ④ The changes in land use were predicted to increase or lose carbon reserves. Forestry, cultivated land, and grassland had more carbon reserves than other land types. Increasing their area and restrictions on the conversion of other land types should increase the ecosystem carbon reserves.

Key words: CMIP6 model; PLUS model; InVEST model; land use/cover change; carbon storage

全球气候变化是由排放二氧化碳等温室气体引起的^[1], 这对生态系统的过程和格局^[2,3]产生了巨大的影响. 它对全球生态环境、人类生存和经济发展产生了难以估量的影响, 成为全人类面临的重大挑战之一^[4-6]. 随着工业化进程的加快, 经济发展动力逐渐从农业转向工业和服务业, 受城市化水平不断提高的影响, 土地利用/覆盖(LUCC)发生了巨大变化. 这不仅对陆地生态系统功能产生了重大影响, 还直接影响了陆地生态系统的碳储量变化^[7,8]. 陆地生态系统碳储量的变化对全球生态系统的碳循环、大气中的二氧化碳浓度和全球气候变化有着深远的

影响^[9]. 目前, 缓解气候变化和温室效应的最环保、最有效的节能方式之一是增加陆地生态系统的碳储量, 通过减少大气中的二氧化碳含量, 从而对缓解全球变暖有重要作用^[10,11].

近年来对碳储量进行研究, 特别是对土地利用与碳储量变化关系的探索引起了众多学者的关注^[12,13]. 土地利用作为影响碳储量变化的主要驱动因

收稿日期: 2023-06-20; 修订日期: 2023-08-07

作者简介: 崔写(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为黄土高原生态系统服务功能评估, E-mail: 2214192509@qq.com

* 通信作者, E-mail: dongyanchina@sina.com

素,其变化会改变生态系统的组成与功能,对植被和土壤的固碳能力产生一定作用,从而影响到区域碳储量水平,对土地利用变化进行研究能够很好地分析土地利用对碳储量变化造成的影响^[14]。目前,碳储量定量变化的模型有多种,如 InVEST、ARIES 和 ESM 等。其中 InVEST 模型数据简单,操作方便,模拟准确,可以大尺度模拟碳储量的时空分布。该模型已被国外学者广泛应用于许多国家和重要地区,在中国的研究中显示出较强的适用性^[15-18]。众多专家学者运用多种模型模拟土地利用变化与碳储量的关系。其中,最近开发的先进的斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型保留了现有未来土地利用模拟模型的自适应惯性竞争和轮盘竞争机制的优点,通过随机森林(RF)算法准确模拟土地利用空间分布的变化。

以往的研究表明,影响生态系统碳储量的 LUCC 受到气候变化和社会经济发展的共同影响^[19, 20]。最新的耦合模型相互比较项目第 6 期(CMIP6)模型通过耦合共享社会经济路径(SSPs)和代表性浓度路径(RCPs),为研究人员提供了全球气候变化背景下的多种未来发展场景^[21, 22]。越来越多的研究开始使用 SSP-RCP 情景来预测未来土地利用需求的变化。有研究利用基于情景的方法来分析土地利用的变化评估框架来模拟中国的土地利用需求和土地利用的空间分布^[23]。Wang 等^[20]将系统动力学(SD)模型、斑块生成的土地利用模拟(PLUS)模型和生态系统服务和权衡的综合评价(InVEST)模型整合到一个研究框架中,模拟城市尺度 LUCC 和碳储量的动态分布。另一项研究预测了全球土壤侵蚀率,并评估了 3 种 SSP-RCP 情景下 2015~2070 年期间的全球土壤调节服务^[24]。此外, Li 等^[25]根据未来土地利用需求,模拟了 SSP-RCP 情景下中亚地区土地利用的时空分布,并综合评估了该地区的生态系统服务水平。然而,这些研究大多集中在全球、国家或城市尺度上的 LUCC 动态,这些方法对于区域尺度上的环境变量对 LUCC 的影响,可能并不有效。因此,在区域尺度上对未来 LUCC 和生态系统碳储量变化的评估仍然存在很大的不确定性。

在本研究中,利用 PLUS 模型和 InVEST 模型的综合模拟框架,模拟了在 3 种 SSP-RCP(SSP126、SSP245 和 SSP585)情景下,基于未来人口、经济、气候变化和土地利用需求的 LUCC 在研究区的时空分布模式,并定量评估了碳储量的分布变化、空间相关性以及各类驱动因素的重要性,以期为研究区域土地资源配置、生态环境管理和社会经济发展政策的制定提供了新的见解。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黄土高原地区位于 $33^{\circ}41' \sim 41^{\circ}16' \text{N}$, $100^{\circ}52' \sim 114^{\circ}33' \text{E}$ 之间,地处我国黄河中游,跨青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、陕西省、内蒙古自治区、山西省及河南省 7 个省区,总面积 64 万 km^2 ,约占我国陆地总面积的 6.7%,是世界上最大的黄土堆积区,区域平均黄土厚度 92.9 m^[26],受人类活动以及自然条件等多方面因素影响,土壤侵蚀与水土流失现象严重,多年平均侵蚀输沙模数在 $1\,921 \sim 3\,355 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 之间^[27],地形破碎且沟壑纵横(图 1)。

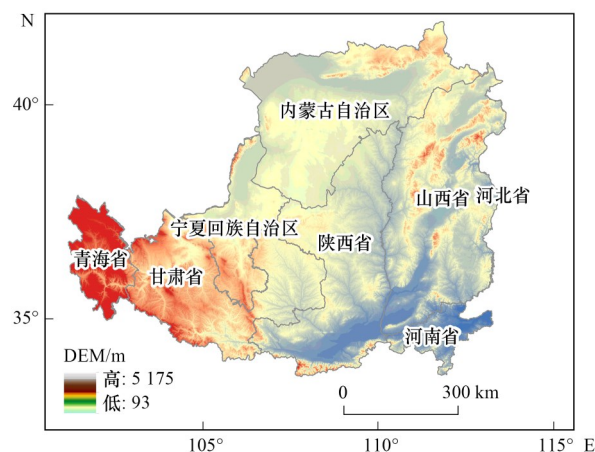


图 1 研究区地理示意

Fig. 1 Geographical representation of the study area

1.2 数据来源与预处理

本文涉及到的数据包括 LUCC 数据、社会经济数据、气候和环境数据,数据源如表 1 所示。所有驱动因子都在 ArcGIS 10.8 中进行数据预处理,严格保证数据坐标系(Krasovsky_1940_Albers)、分辨率($500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$)以及行列数统一。

1.3 研究思路与方法

本研究基于 SSP-RCP 的不同情景,集成 PLUS 模型和 InVEST 模型,模拟未来气候变化情景下的碳储量值。首先,根据选取的 15 个土地驱动因子(温度、降水、土壤类型、DEM、坡度、人口密度、GDP 和距离水、铁路、各级道路、高速公路与政府的距离),以 2000 年土地利用数据为基础,模拟 2020 年土地利用情况,并在实际数据对比下,验证精度。以 2020 年为起始数据,加入 SSP-RCP 不同情景下的未来人口、GDP、温度和降水数据,模拟 2040、2060 年的土地利用情况。最后,将模拟结果输入 InVEST 模型的碳模块,得到黄土高原碳储量值。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据类型	数据名称	分辨率/m	数据来源
气候和环境数据	土地利用数据	30	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	DEM	30	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
	坡度	30	由 DEM 计算生成
	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)
	年平均温度	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	年平均降水量	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	人口	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
社会经济数据	GPD	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	距主干道距离	1 000	开放街道地图(https://www.openstreetmap.org)
	距一级道路距离	1 000	开放街道地图(https://www.openstreetmap.org)
	距二级道路距离	1 000	开放街道地图(https://www.openstreetmap.org)
	距三级道路距离	1 000	开放街道地图(https://www.openstreetmap.org)
	距铁路距离	1 000	开放街道地图(https://www.openstreetmap.org)
	距高速公路距离	1 000	开放街道地图(https://www.openstreetmap.org)
	距政府距离	1 000	开放街道地图(https://www.openstreetmap.org)
	距水域距离	1 000	开放街道地图(https://www.openstreetmap.org)

1.3.1 基于 CMIP6 的未来气候情景

模式相互比较项目(coupled model intercomparison project, CMIP) 经过 5 个阶段发展成为一项重要的国际多模式气候研究活动^[28-30], 不仅开创了气候科学研究的新时代, 而且促进了国家和国际气候变化评估. 与 CMIP5 相比, CMIP6 结合了不同的 SSP-RCP 情景^[31,32], 强调了不同社会经济发展模式对气候变化的驱动作用.

考虑未来发展可能, 本文使用了 3 个 SSP-RCP 的模拟: SSP126 (SSP1 和 RCP2.6 的综合场景): 可持续性绿色发展路径, 它提出了可持续的社会经济发展和低水平的温室气体排放, 强调更具包容性的发展; SSP245 (SSP2 和 RCP4.5 的集成场景): 中间路径, 代表世界遵循社会经济和社会的中间道路和技术发展, 温室气体排放中等水平; SSP585 (整合了 SSP5 和 RCP8.5 的场景): 高端强迫路径, 其特征是资源密集型的快速开发和物质密集型的消费模式, 以及非常高的化石燃料使用水平和高温室气体排放^[33,34].

本研究考虑了未来气候变化情景下影响土地利用覆盖变化的 4 个驱动因素, 包括人口、GDP、温度和降水. 人口^[35]和 GDP^[36]数据分别来自 SSPs 未来气候变化情景的公里尺度网格数据. 先前的研究^[37]基于 MRI-ESM2-0 模式提供了 SSP126、SSP245 和 SSP585 情景的未来温度和降水数据^[38].

1.3.2 CMIP6 提供不同场景下的土地覆盖变化模拟

PLUS 模型是一个融合了基于土地扩展分析策略 (LEAS) 模型的规则挖掘框架和基于多类型随机斑块种子 (CARS) 模型的 CA 的未来土地利用/覆被变化模拟模型^[39], 该模型内置马尔可夫链模型^[40,41], 通过

分析潜在在 LUCC 随时间转移矩阵的可能性来衡量不同条件下的土地利用需求. 与其他模型相比, PLUS 模型的优势在于可以识别土地扩张和景观动态的驱动因素, 以预测不同土地利用类型情景下的斑块演变^[42].

1.3.3 基于 InVEST 模型的碳储量估算

InVEST 模型的碳储量模块可以在空间上直接整合土地利用变化和陆地生态系统碳储量动态, 从而评估研究区在过去到现在的土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响. 具体来说, InVEST 模型基于每种土地利用/覆盖类型的 4 种碳库 (地上、地下、土壤和死亡有机质) 的平均碳密度, 乘以对应面积计算生态系统碳储量. 碳储量的计算公式为:

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

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

式中, i 为土地利用类型, C_i 为各土地覆被类型单位面积碳储量总量 (10^6 t), C_{above} 为地上碳密度, C_{below} 为地下碳密度, C_{soil} 为土壤有机碳密度, C_{dead} 为死亡有机碳密度; C_{total} 为生态系统总碳储量, A_i 为各土地覆盖类型的面积. 根据以往的研究提供了 4 个不同土地利用类型碳库 (表 2) 数据^[43,44].

1.3.4 冷热点分析

Getis-Ord G_i^* 可用来分析碳储量的空间集聚特征, 能够清晰地可视化碳储量高值和低值的时空格局. 计算公式为:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_j^n W_{ij}(d) X_j}{\sum_j^n X_j} \quad (3)$$

表 2 黄土高原土地利用类型碳密度表/t·hm⁻²

Table 2 Carbon density table of land use types in the Loess Plateau/t·hm⁻²

土地利用类型	植被地上碳密度	植被地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
耕地	4.7	28.6	33.46	2.4
林地	30.55	34.66	82.29	7
草地	17.15	37.3	43.72	3.8
水域	3.25	0	0	0
建设用地	0	0	0	0
未利用地	0	0	17.6	0

式中， d 为距离， $W_{ij}(d)$ 为以距离规则定义的空间权重； X_j 为区域 j 的观测值；当 G_i^* 为正时表明高值空间集聚(热点区)，当 G_i^* 为负表明低值空间集聚(冷点区)。

2 结果与分析

2.1 不同情景下土地利用变化模拟与精度评估

模型的验证以研究区 2000 年土地利用数据作为训练集，预测 2020 年土地利用分布，Kappa 系数为 0.81，整体精度达到 0.87，具有较高的精度，该模

型建立了可靠的动态模拟，可用于预测未来土地利用。

基于 2000~2020 年的变化趋势，以 20 年为时间间隔，利用马尔可夫链估算 2040 年和 2060 年不同气候变化情景下的地类数，并以 CARS 作为模型的输入参数进行空间模拟。根据所选择的 SSP-RCP 情景，加入未来气温、降水、人口和 GDP 进行控制。针对不同情景选择不同的因子组合和扩展概率，最终模拟不同气候变化情景下土地利用的时空演变(图 2)。

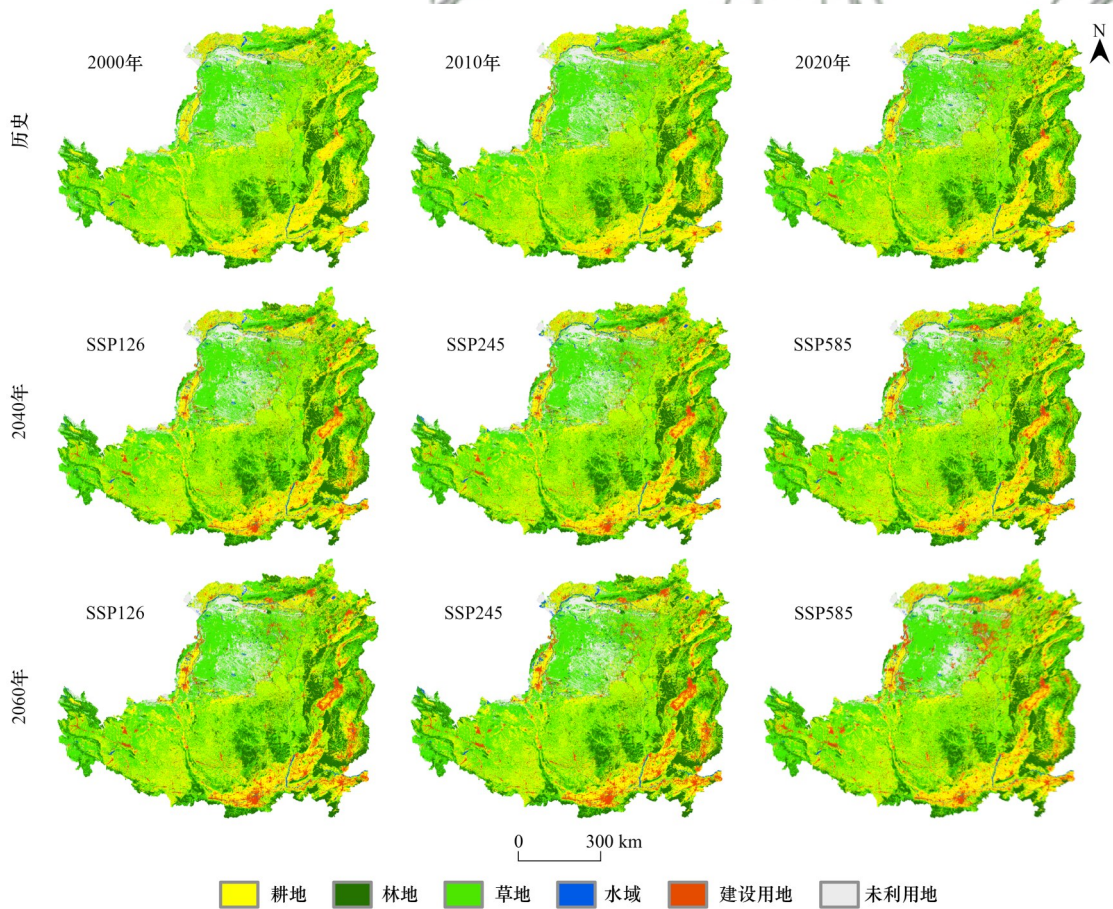


图 2 土地利用时空演变

Fig. 2 Spatiotemporal evolution map of land use

2000~2020 年，草地是面积最大的土地类型，约占总面积的 41%，其次是耕地和林地，分别占 31% 和 15%。随着城市化的发展，城市用地面积迅速

扩大，从 2000 年的 16 153.25 km²增加到 2020 年的 27 776.5 km²，增长率高达 72%。根据土地流向显示(图 3)，主要的转化方式是将草地改造成耕地或林

地. 由于农业发展需求或政策引导, 促使部分草地被开垦为耕地用于农作物的种植, 或者改造为林地进行植被恢复和防沙治理. 此外, 土地保护和生态恢复的需要, 耕地则主要被改造成草地. 人口增长、城市化和经济发展等因素驱动, 导致大量土地被用于基础设施建设, 用于满足城市化和经济社会发展的需求, 其它土地类型向建设用地转移, 面积急剧增加. 研究区主要以干旱和半干旱地区为主, 水源较为稀缺, 水域的转化和变化相对较少.

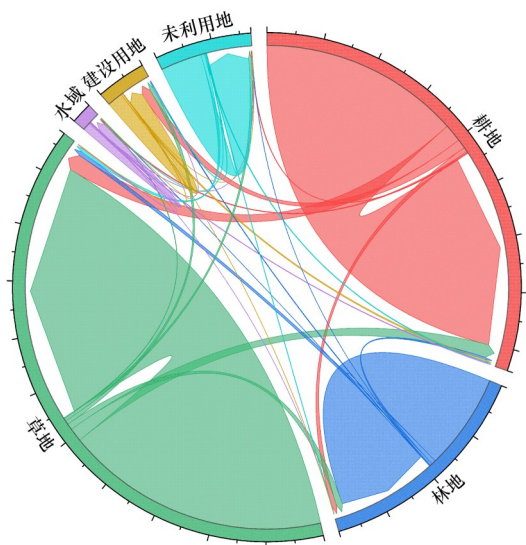


图3 土地流向
Fig. 3 Land flow direction

在未来, 3种不同的 SSP-RCP 场景表现出相同的趋势. 从耕地面积来看, SSP126、SSP256 和 SSP585 情景下耕地都有损失, 损失的程度依次放缓. 林地的变化与耕地的变化相反, 3种情景林地面积都增加, 这与未来黄土高原的气候趋向温暖湿润有关, 有利于树木生长, 促进林地面积的增长. 3种情景草地损失程度不同, 在未来全球气候变化的背景下, 黄土高原的气温有望上升, 干旱化和荒漠化进一步加剧, 对草地的生存造成不利影响. 由于未来降水的增加, 3种情景的水域面积将增加, 但增加的幅度不大, 因为黄土高原位于中国内陆地区, 缺乏直接的海洋补给, 水资源相对匮乏. 即使在未来气候变化导致的水资源增多的情况下, 黄土高原也无法像沿海城市一样快速扩大水域面积. 随着经济的发展, 3种情景的城市面积都在增加, 3种情景的增幅分别为 29.23%~53.56% (SSP126)、34.59%~63.28% (SSP245) 和 42.80%~73.27% (SSP585).

2.2 碳储量的时空格局

2000~2020 年, 黄土高原的碳储量呈下降趋势. 据研究数据显示, 20 年间减少了 44.1182×10^6 t. 这种下降趋势与气候变化密切相关. 近年来, 黄土高原

干旱频发和气温升高加剧了水分蒸发速度, 从而限制了植物的生长. 此外, 全球气候变暖也会导致更多的火灾和自然灾害, 从而进一步减少该地区的碳储量.

将黄土高原的碳储量值赋值到每一个栅格, 并按照市进行碳储量总和分区统计, 从空间分布上看 (图 4). 碳储量高值主要集中在中部以及中部偏北地区. 该区域主要为内蒙古自治区的鄂尔多斯市, 该地区加大了对生态环境的保护力度, 积极推动生态文明建设, 采取了一系列措施, 如退耕还林和荒漠化土地治理等, 促进了植被的恢复和生长. 低碳储量区域主要为河南省的济源市和郑州市、宁夏回族自治区的石嘴山市和青海省的海南藏族自治州, 地处北方草原带和荒漠区, 气候干燥, 降水量少, 加之人类活动和自然因素的影响, 导致植被覆盖率相对较低. 其中, 草原退化和沙漠化等因素是主要原因. 此外, 过度放牧、过度开发和森林砍伐等人类活动也对植被覆盖率造成了一定的影响.

未来, 在气候变化影响下, 3 种情景的碳储量与 2020 年相比都将发生不同程度的变化. 2040 年 SSP126 情景碳储量增加了 1.8138×10^6 t, 其余 2 种情景碳储量持续减少. 2060 年 3 种情景碳储量也有不同程度的减少, SSP585 情景碳储量减少了 139.8462×10^6 t, SSP245 和 SSP126 情景碳储量减少的速度依次放缓. 与 2020 年空间对比 (图 5), 3 种情景下, 由于研究区南部和东南部是农业经济发展比较快的地区, 随着社会经济的进步和城市化、工业化的推进, 人口和农田面积的不断增加, 导致大量森林被砍伐和土地被开垦, 原生态环境遭到破坏, 碳储量下降. 在 SSP126 和 SSP245 情景下, 碳储量空间变化表现出相似性, 内蒙古自治区包头市的北部是碳储量增加最明显的区域. 在气候变化条件下, 增加的降水量和气候变暖会提供更有利于植物生长的环境条件, 促进植物的生长和有机质的积累, 进而导致碳储量的增加. 在 SSP585 情景下, 碳储量增加和减少最明显的区域在内蒙古自治区鄂尔多斯市中部和东南地区, 根据气候情景预测, 鄂尔多斯市中部会受到更多的降水和适宜的温度条件, 有利于植被生长和有机物质的积累, 从而促进碳储量的增加. 而东南部可能面临更加干旱的气候条件, 导致植被覆盖度减少、生物量减少, 进而导致碳储量的减少.

2.3 碳储量空间相关性分析

由空间相关性分析, 未来 3 种情景碳储量莫兰指数均大于 0, 说明黄土高原碳储量空间分布表现

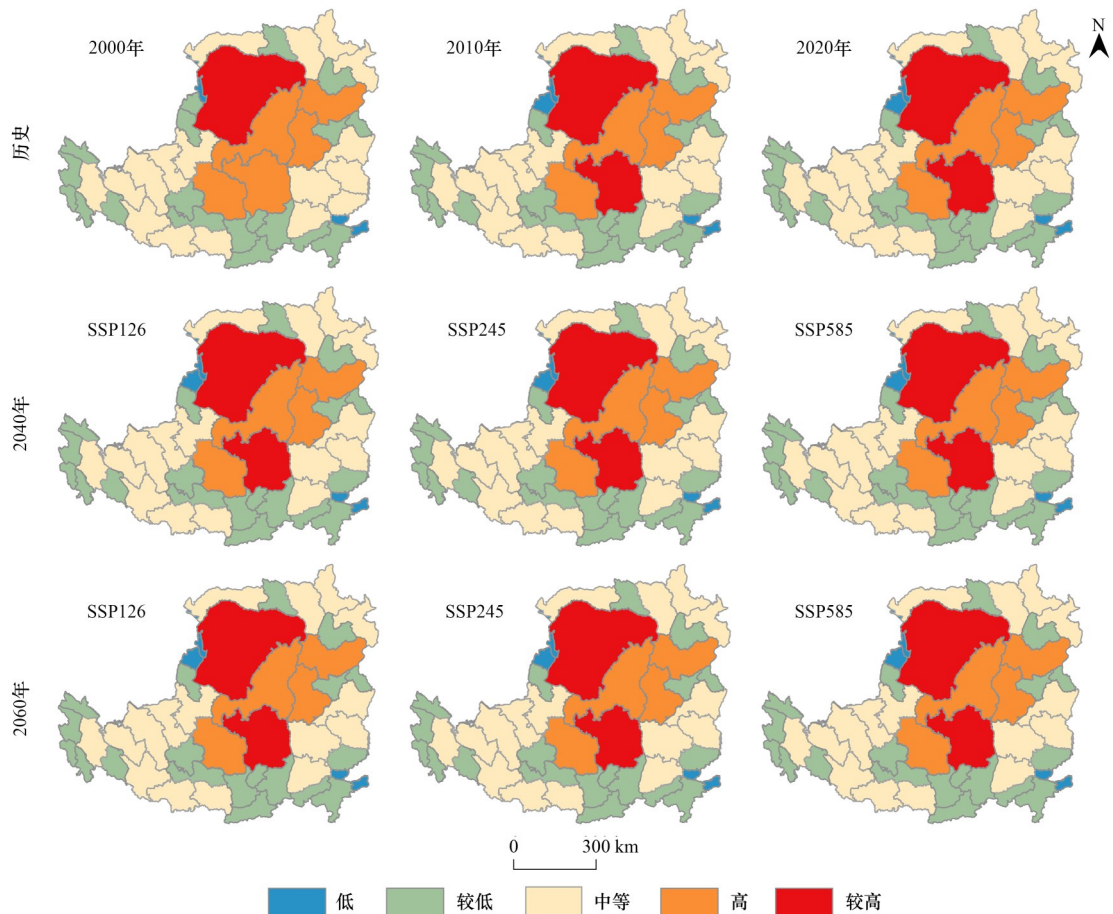


图4 历史及未来情景碳储量分布
Fig. 4 Distribution of carbon storage in historical and future scenarios

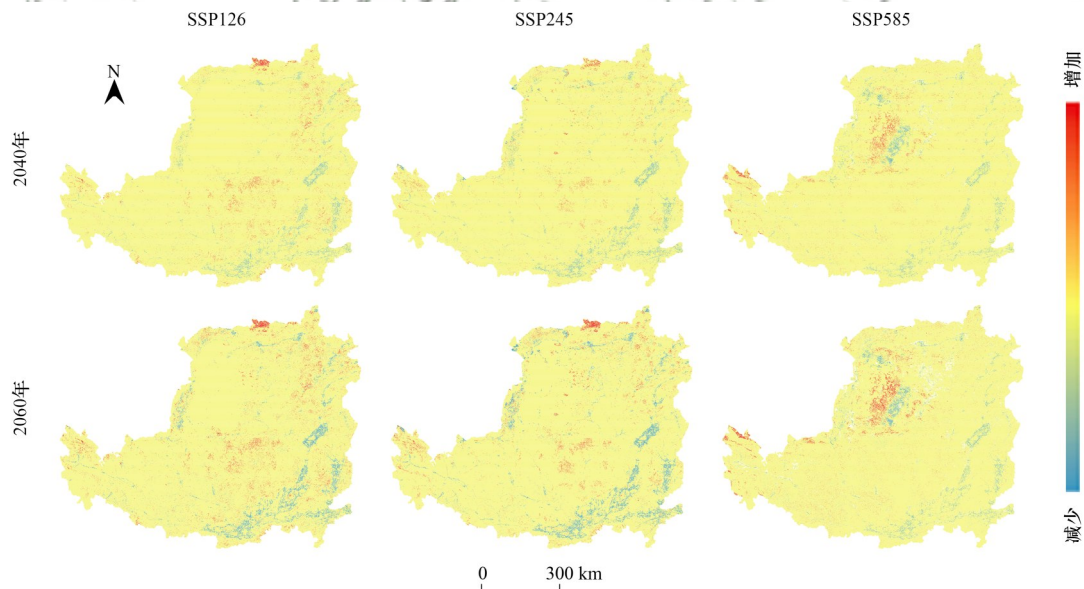


图5 相较于2020年未来时期碳储量变化分布

Fig. 5 Change and distribution of carbon storage in the future compared with that in 2020

出相似值聚类的现象.根据图6可知,热点区域主要集中在中部及中部以北地区,由于中部及中部以北地区相对于其他地区拥有更为丰富的植被覆盖,同时地形地貌复杂多样,包括丘陵和山地等,这种地

形地貌的特点使得土壤层次较为丰富,有利于有机质的积累和储存.没有明显的冷点区域,这源于退耕还林政策的实施,土地退化程度相对较低.对于不显著的区域,其主要原因是土地生态的破碎化.

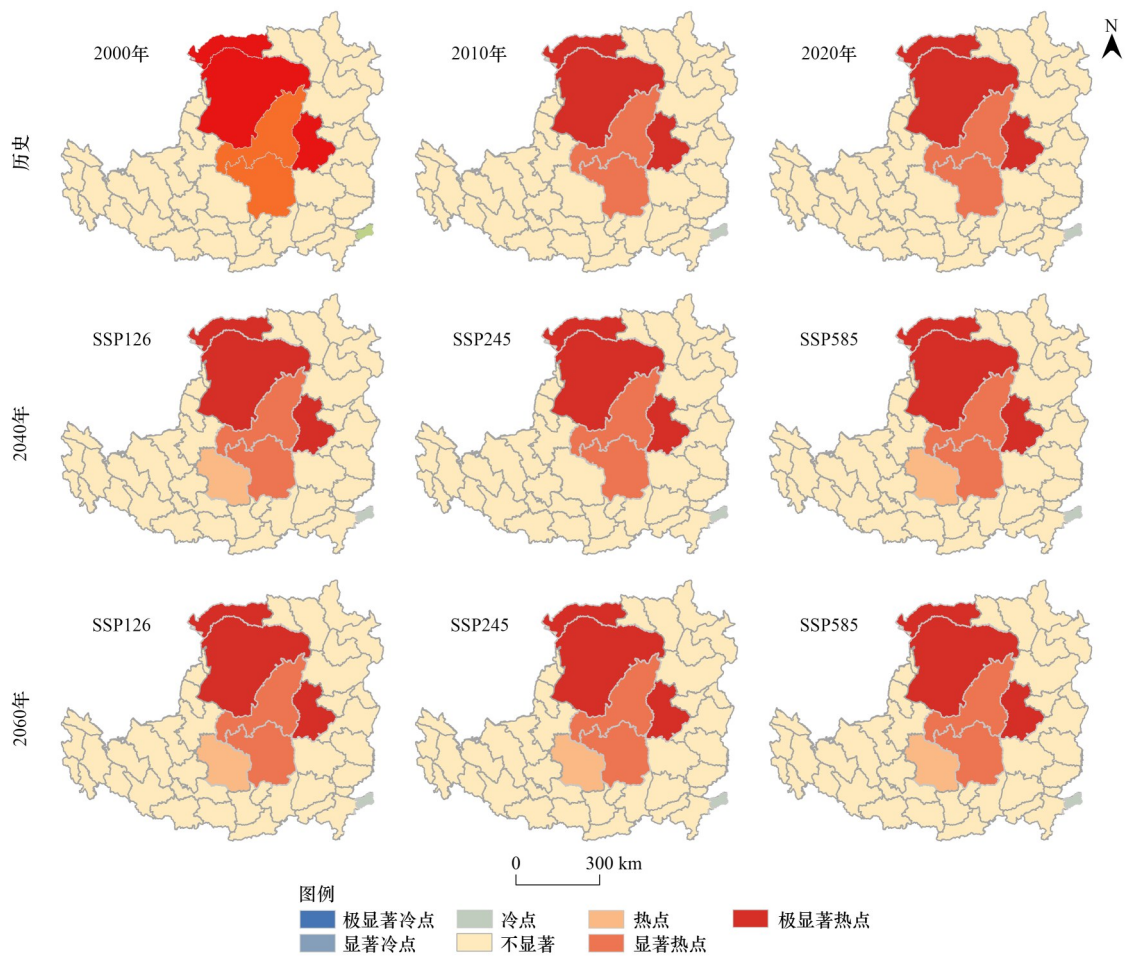


图 6 历史及未来气候变化下不同情景的冷热点分布
Fig. 6 Distribution of cold and hot spots under different scenarios of historical and future climate change

2.4 草原生态系统碳储量时空变化

黄土高原草原生态系统碳储量约占陆地生态系统碳储量的 47%. 因此, 草原生态系统碳储量的变化模式对陆地生态系统碳储量的变化具有重要影响. 由图 7 可知, 在 3 种情景下, 草原生态系统的碳储量与陆地生态系统的变化模式相似, 碳储量高值主要集中在中部及中部以北地区, 该地区草原植被覆盖相对较好, 草地面积广阔, 植被生长茂盛. 碳储量低值集中在东南部, 该地区土地开发和城市化进程加速了生态环境的破坏.

分析草原生态系统碳储量的变化(表 3). 2000 ~ 2020 年, 研究区草原生态系统碳储量呈先增后减的趋势. 2000 年以后, 黄土高原草原地区的管理措施得到了改善, 包括合理的放牧管理和科学的草地轮

牧制度等. 这些措施有助于保护草原植被, 减少过度放牧对植被的破坏, 从而促进草原生态系统碳储量的增加, 因此草原生态系统碳储量增加了 4.101×10^6 t. 2010 年以后, 随着社会经济的进步和人口大规模流动, 城市迅速扩张, 同时气温升高和降水减少等因素导致植被生长受限和土壤水分减少, 草原生态系统碳储量减少 11.565×10^6 t. 与 2020 年相比, SSP126、SSP245 和 SSP585 情景下的草原碳储量在未来两个时期呈减少趋势, 且减少的趋势不断增加. 到 2060 年分别减少 13.391×10^6 、 33.548×10^6 和 85.871×10^6 t. 3 个气候变化情景会导致草原生态系统受到更严重的干旱、高温和其他极端气候事件的影响. 这些不利的气候条件可能导致植被逐渐调亡, 减少了碳的固定和储存. 在 SSP245 和 SSP585 情景

表 3 草原碳储量变化 $\times 10^6$ t
Table 3 Change in grassland carbon storage $\times 10^6$ t

气候模式	总碳储量			碳储量变化		
	2020 年	2040 年	2060 年	2020~2040 年	2040~2060 年	2020~2060 年
SSP126	2 734.800	2 729.385	2 721.409	-5.415	-7.977	-13.391
SSP245	2 734.800	2 720.266	2 701.252	-14.533	-19.015	-33.548
SSP585	2 734.800	2 690.246	2 648.928	-44.553	-41.318	-85.871

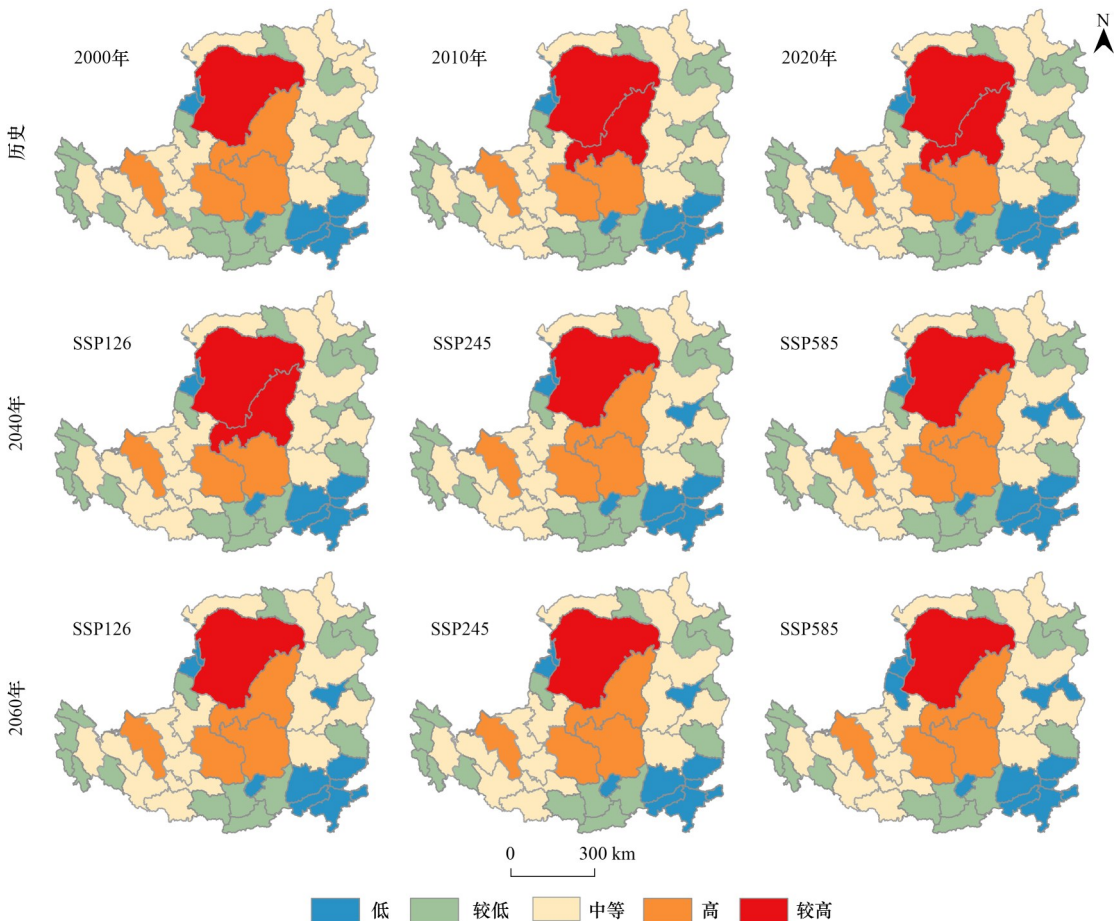


图7 历史及未来情景草原碳储量分布
Fig. 7 Distribution of grassland carbon storage in historical and future scenarios

中，温室气体的排放可能继续增加，这会进一步加剧气候变化，对草原生态系统造成负面影响，进而减少更多碳储量。

3 讨论

3.1 土地利用驱动分析

土地利用类型的变化会改变土地的生态系统结构和功能，并影响区域的固碳能力。因此，探讨了不同土地类型驱动因素的重要性。利用PLUS模型中随机森林分(RFC)算法来探求各项驱动因子对不同地类变化的贡献值，得到不同土地利用类型驱动因素的重要性(图8)。

本研究结果表明，对于耕地而言，人口密度对耕地的增长影响最大，随着人口的增加，对于耕地的需求也会随之增加。林地受坡度和降水的影响最大，坡度较大的地区人类活动强度低，对林地的干扰较弱，适宜林地的扩张；降水增加土壤水分，从而提高土壤肥力，有利于树木的生长。草地最主要的驱动因素是人口，由于人口增长和农业生产的进步，农民需要拥有更多的土地来种植作物，因此，草地逐渐被开垦为耕地，会导致草地面积减少。降

水和坡度对于水域的影响最大，水域的水量主要来自于雨水和地下水。在水域周围降水量越大，流入水域的水量就越大，从而对水域的水量带来直接的影响。而坡度决定了水的流动方向和速度，坡度越陡峭，水流速度越快，流入水域的水量就越大。伴随人口不断增长和城市化进程的加速，对建设用地的需求也日益增加。建设用地的开发和利用是为了满足人们居住、工作和娱乐等方面的需求，因此人口增加会直接导致建设用地的需求增加。人口对未利用地的影响也是非常显著的，由于人口增长和城市化加速，许多未被利用的土地正被用于建设和开发。

3.2 土地利用变化对碳储量的影响

本研究揭示了黄土高原2000~2020年自然情景下土地利用变化对碳储量的影响(图9)，结果显示，碳储量的变化存在明显的空间异质性^[45]。碳储量的变化是气候变化、人口增长、经济发展和生态利益等因素共同作用的结果。这一综合评估有助于人们提高对未来碳储量变化的认识，特别是由LUCC的变化引起的变化。

(1)林地、耕地和草地比其它土地类型有更多

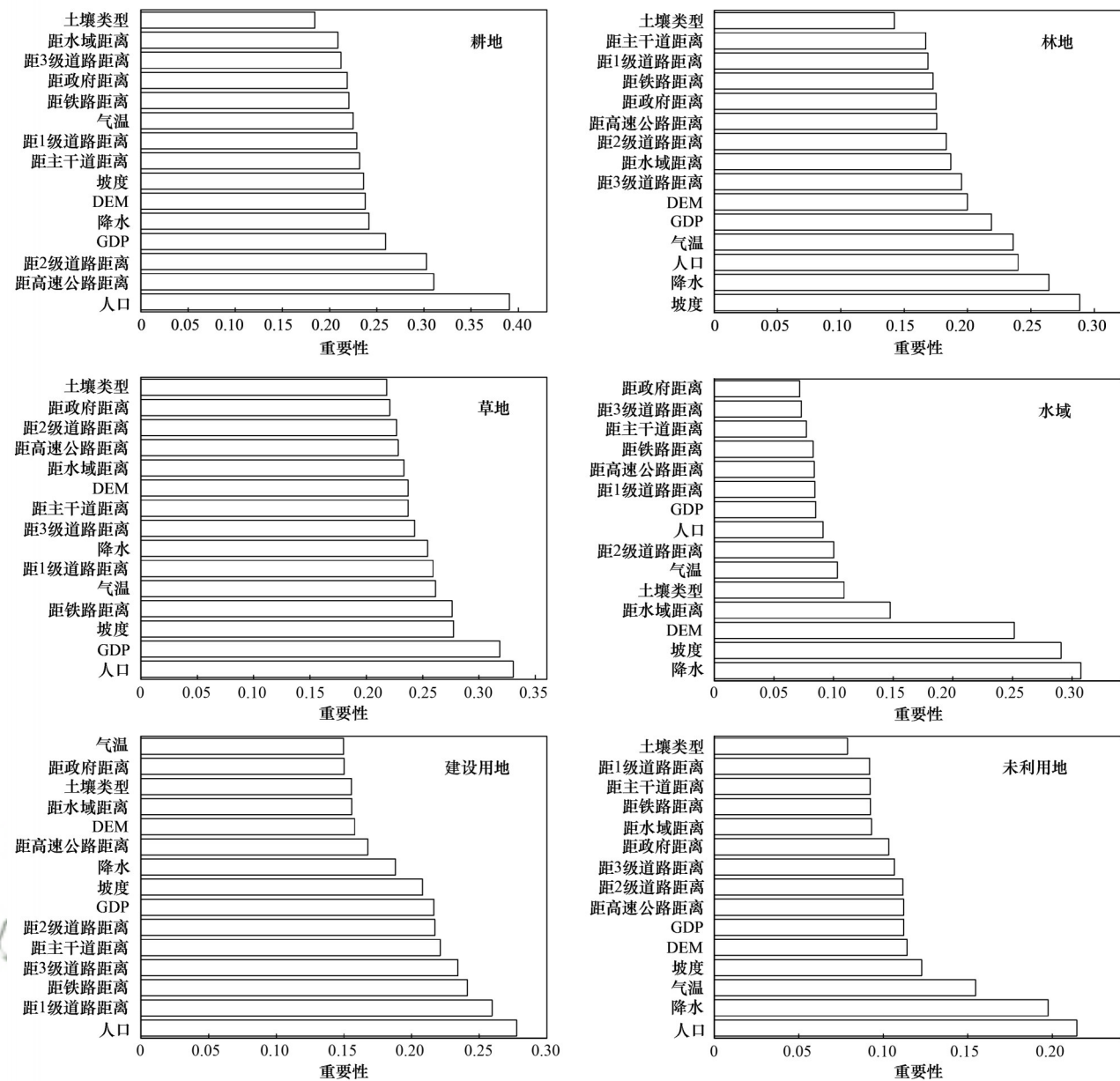


图 8 各驱动因子对土地利用类型增长贡献的重要性

Fig. 8 Importance of the contribution of various driving factors to the growth of land use types

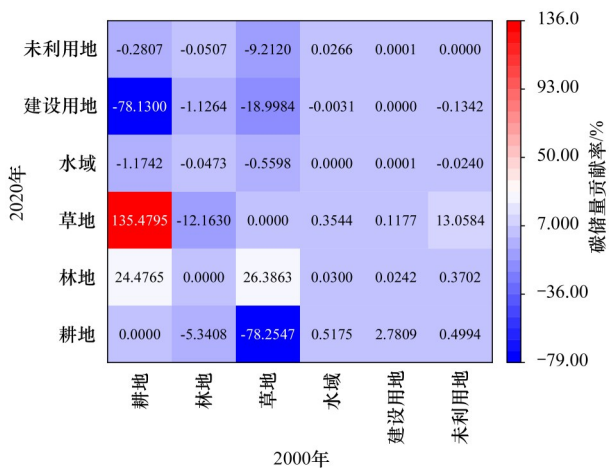


图 9 土地利用变化对碳储量影响

Fig. 9 Impact of land use change on carbon storage

的碳储量. 在本研究中, 耕地向草地转移对碳储量的贡献率最高, 其次是草地向林地转移和耕地向林地转移. 耕地向草地转移可以增加土地的植被覆盖率, 减缓水土流失, 提高土地肥力, 同时草地的根系能够促进土壤固碳, 从而使得碳储量贡献度最高. 草地向林地转移也能够进一步提高土地的植被覆盖率, 林木的生长速度较快, 能够吸收更多的二氧化碳, 碳储量会增加. 耕地向林地转移可以增加森林覆盖率, 提高森林的生态环境功能, 促进生态系统的恢复和重建, 从而使得碳储量得到进一步提高. 但是, 相对于草地向林地转移, 耕地向林地转移的难度较大, 需要进行大面积的土地改造和植被恢复, 因此其碳储量贡献度相对较低.

(2)未利用地、水域和建设用地所贡献的碳储量较小.所以,其它土地类型向它们进行转移都会损失碳储量,碳储量贡献率为负.其中,碳储量贡献率最小的是草地转为耕地,其次是草地转为建设用地和耕地转为建设用地,其它的土地利用类型之间的转移所引起的碳储量变化较小.草地向耕地进行转移会导致土地的植被覆盖率降低,水土流失加剧,土地肥力下降,使得碳储量大量减少.耕地向建设用地和草地向建设用地转移也会导致土地的植被覆盖率降低,生态环境受到破坏,从而影响碳储量的增加.城市化进程加快导致的建设用地扩张会使大量的土地被混凝土覆盖,树木被砍伐,碳储量也会减少.因此,草地向建设用地和耕地向建设用地转移的碳储量贡献度也相对较小.

4 结论

(1)未来3种情景土地利用变化总体模式相似,建设用地的迅速扩张,导致耕地、草地和未利用地面积都遭受了不同程度的减少,林地得到了有效保护.

(2)从空间相关性来看,未来3种情景下的莫兰指数均大于0,表明黄土高原碳储量空间分布表现出相似值聚类的现象.3种情景冷热点空间分布相似,热点分布在研究区中部和中部以北地区,没有明显的冷点区域.

(3)2020~2060年期间,黄土高原的草原生态系统碳储量在SSP126、SSP245和SSP585情景下均有不同程度减少,从2020年的 2734.8×10^6 t减少到2060年的 $2\ 720.408 \times 10^6$ 、 $2\ 701.251 \times 10^6$ 和 $2\ 648.928 \times 10^6$ t.

(4)土地利用变化会导致碳储量的增加和损失.林地、耕地和草地比其它土地类型有更多的碳储量,增加它们的面积和限制向其它土地类型转换会增加生态系统碳储量.

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), doi: 10.3390/su11143972.
- [2] Li S C, Zhang Y L, Wang Z F, et al. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions[J]. Ecosystem Services, 2018, **30**: 276-286.
- [3] Rodríguez-Echeverry J, Echeverría C, Oyarzún C, et al. Impact of land-use change on biodiversity and ecosystem services in the Chilean temperate forests[J]. Landscape Ecology, 2018, **33**(3): 439-453.
- [4] Fang J Y, Zhu J L, Wang S P, et al. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties[J]. Science China Earth Sciences, 2011, **54**(10): 1458-1468.
- [5] Cramer W, Guiot J, Fader M, et al. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean[J]. Nature Climate Change, 2018, **8**(11): 972-980.
- [6] Tian L, Fu W X, Tao Y, et al. Dynamics of the alpine timberline and its response to climate change in the Hengduan mountains over the period 1985 - 2015[J]. Ecological Indicators, 2022, **135**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108589.
- [7] Newbold T, Hudson L N, Hill S L L, et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity[J]. Nature, 2015, **520**(7545): 45-50.
- [8] Li S C, Bing Z L, Jin G. Spatially explicit mapping of soil conservation service in monetary units due to land use/cover change for the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Remote Sensing, 2019, **11**(4), doi: 10.3390/rs11040468.
- [9] 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, Zhang 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 In VEST and GeoSoS-FLUS models and its response to different future scenarios[J]. Environmental Science, 2022, **43**(11): 5253-5262.
- [10] Molotoks A, Stehfest E, Doelman J, et al. Global projections of future cropland expansion to 2050 and direct impacts on biodiversity and carbon storage[J]. Global Change Biology, 2018, **24**(12): 5895-5908.
- [11] Dybala K E, Steger K, Walsh R G, et al. Optimizing carbon storage and biodiversity co-benefits in reforested riparian zones[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, **56**(2): 343-353.
- [12] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, **74**(3): 446-459.
Zhu 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.
- [13] 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.
- [14] 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**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123333.
- [15] Li Y X, Liu Z S, Li S J, et al. Multi-scenario simulation analysis of land use and carbon storage changes in changchun city based on FLUS and InVEST model[J]. Land, 2022, **11**(5), doi: 10.3390/land11050647.
- [16] Xie L J, Bai Z K, Yang B Y, et al. Simulation analysis of land-use pattern evolution and valuation of terrestrial ecosystem carbon storage of Changzhi City, China[J]. Land, 2022, **11**(8), doi: 10.3390/land11081270.
- [17] Lahiji R N, Dinan N M, Liaghati H, et al. Scenario-based estimation of catchment carbon storage: Linking multi-objective land allocation with InVEST model in a mixed agriculture-forest landscape[J]. Frontiers of Earth Science, 2020, **14**(3): 637-646.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Wang Z Y, Li X, Mao Y T, *et al.* Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: a case study of Bortala, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **134**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108499.
- [21] Eyring V, Bony S, Meehl G A, *et al.* Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, **9**(5): 1937-1958.
- [22] Cook B I, Mankin J S, Marvel K, *et al.* Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios [J]. *Earth's Future*, 2020, **8**(6), doi: 10.1029/2019ef001461.
- [23] Dong N, You L, Cai W J, *et al.* Land use projections in China under global socioeconomic and emission scenarios: utilizing a scenario-based land-use change assessment framework [J]. *Global Environmental Change*, 2018, **50**: 164-177.
- [24] Borrelli P, Robinson D A, Panagos P, *et al.* Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070) [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(36): 21994-22001.
- [25] Li J Y, Chen X, Kurban A, *et al.* Coupled SSPs-RCPs scenarios to project the future dynamic variations of water-soil-carbon-biodiversity services in Central Asia [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **129**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107936.
- [26] Zhu Y J, Jia X X, Shao M G. Loess thickness variations across the Loess Plateau of China [J]. *Surveys in Geophysics*, 2018, **39**(4): 715-727.
- [27] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究 [J]. *地理学报*, 2015, **70**(9): 1503-1515.
- Gao H D, Li Z B, Li P, *et al.* The capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(9): 1503-1515.
- [28] Meehl G A, Boer G J, Covey C, *et al.* The coupled model intercomparison project (CMIP) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, **81**(2): 313-318.
- [29] Meehl G A, Covey C, Delworth T, *et al.* The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, **88**(9): 1383-1394.
- [30] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, **93**(4): 485-498.
- [31] O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, *et al.* The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, **9**(9): 3461-3482.
- [32] van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, *et al.* The representative concentration pathways: an overview [J]. *Climatic Change*, 2011, **109**(1): 5-31.
- [33] Yun X B, Tang Q H, Li J B, *et al.* Can reservoir regulation mitigate future climate change induced hydrological extremes in the Lancang-Mekong River Basin? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **785**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147322.
- [34] Hurtt G C, Chini L, Sahajpal R, *et al.* Harmonization of global land use change and management for the period 850 - 2100 (LUH2) for CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, **13**(11): 5425-5464.
- [35] Chen Y D, Guo F, Wang J C, *et al.* Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100 [J]. *Scientific Data*, 2020, **7**(1), doi: 10.1038/s41597-020-0421-y.
- [36] Murakami D, Yoshida T, Yamagata Y. Gridded GDP projections compatible with the five SSPs (shared socioeconomic pathways) [J]. *Frontiers in Built Environment*, 2021, **7**, doi: 10.3389/fbuil.2021.760306.
- [37] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, *et al.* Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011 - 2100 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **233**: 183-194.
- [38] Li S Y, Miao L J, Jiang Z H, *et al.* Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015-2099 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, **11**(3): 210-217.
- [39] 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.compenvurb.2020.101569.
- [40] Munsri M, Areendran G, Joshi P K. Modeling spatio-temporal change patterns of forest cover: a case study from the Himalayan foothills (India) [J]. *Regional Environmental Change*, 2012, **12**(3): 619-632.
- [41] Nor A N M, Corstanje R, Harris J A, *et al.* Impact of rapid urban expansion on green space structure [J]. *Ecological Indicators*, 2017, **81**: 274-284.
- [42] Zhang S H, Zhong Q L, Cheng D L, *et al.* Landscape ecological risk projection based on the PLUS model under the localized shared socioeconomic pathways in the Fujian Delta region [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **136**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108642.
- [43] 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(中英文网络版)*, 2019, **4**(1): 90-96.
- Xu L, He N P, Yu G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. *China Scientific Data*, 2019, **4**(1): 90-96.
- [44] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(17): 6786-6799.
- Li M Y, Shangguan Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(17): 6786-6799.
- [45] Tian L, Tao Y, Fu W X, *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), doi: 10.3390/rs14102330.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)