

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
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	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

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

侯建坤¹, 陈建军^{1,2,*}, 张凯琪¹, 周国清^{1,2}, 尤号田^{1,2}, 韩小文^{1,2}

(1. 桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学广西空间信息与测绘重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 区域土地利用变化是导致生态系统碳储量变化的主要原因, 预测未来土地利用变化对碳储量的影响对于碳储功能的可持续发展具有重要意义。近年来, 在自然和人为因素的共同作用下, 黄河源区土地利用变化显著, 其碳储功能也相应发生改变。本研究结合 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型, 评估黄河源区 2000~2020 年以及不同情景下 2020~2040 年土地利用变化及其对碳储量的影响。结果表明: ① 2000~2020 年黄河源区碳储量整体呈上升趋势, 共增加 11.59×10^6 t。② 20 年间, 黄河源区土地利用变化以低覆盖度草地、建设用地和湿地的面积增加和高覆盖度草地、中覆盖度草地和未利用地面积减少为主, 未利用地大面积减少以及草地和湿地的面积增加是导致碳储量增加的主要原因。③ 2040 年自然变化情景下黄河源区生态系统碳储量为 871.34×10^6 t, 较 2020 年增加 3.92×10^6 t。生态保护情景下碳储量增幅明显, 较 2020 年增加 13.53×10^6 t。该研究结果可以为黄河源区土地利用管理决策以及碳储功能的可持续发展提供科学参考。

关键词: 生态系统碳储量; 黄河源区; 土地利用变化; InVEST 模型; GeoSoS-FLUS 模型

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5253-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201267

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

HOU Jian-kun¹, CHEN Jian-jun^{1,2,*}, ZHANG Kai-qi¹, ZHOU Guo-qing^{1,2}, YOU Hao-tian^{1,2}, HAN Xiao-wen^{1,2}

(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Regional land use change is the main cause of carbon storage changes in ecosystems. Predicting the impact of future land use changes on carbon storage is of great significance for the sustainable development of carbon storage functions. In recent years, under the combined action of natural and human factors, the land use in the source region of the Yellow River has changed significantly, and its carbon storage function has also changed accordingly. This study combined InVEST and GeoSoS-FLUS models to evaluate land use change and its impact on carbon storage in the source region of the Yellow River from 2000 to 2020 and from 2020 to 2040 under different scenarios. The results showed that: ① from 2000 to 2020, the carbon storage in the source region of the Yellow River showed an overall upward trend, with a total increase of 11.59×10^6 t. ② Over the past 20 years, the land use changes in the source region of the Yellow River included mainly the increase in the area of low-coverage grassland, construction land, and wetland and the decrease in the area of high-coverage grassland, medium-coverage grassland, and unused land, as well as the large-scale reduction of unused land and the reduction of grassland. The increase in the area of wetlands was the main reason for the increase in carbon storage. ③ Under the natural change scenario in 2040, the ecosystem carbon storage in the source region of the Yellow River was 871.34×10^6 t, an increase of 3.92×10^6 t compared with that in 2020. Under the ecological protection scenario, carbon storage increased significantly, with an increase of 13.53×10^6 t compared with that in 2020. The results of this study can provide a scientific reference for the decision-making of land use management and the sustainable development of carbon storage function in the source region of the Yellow River.

Key words: ecosystem carbon storage; source area of the Yellow River; land use change; InVEST model; GeoSoS-FLUS model

全球气候变化问题日益严重, 为人类生存与可持续发展带来重大挑战^[1]。陆地生态系统碳储存是全球碳储存的重要组成部分, 通过吸收和释放大气中的温室气体有效调节区域气候, 对于减缓全球气候变暖具有至关重要的作用^[2,3]。土地利用变化是影响生态系统碳循环过程的重要因素之一。土地利用变化会改变生态系统的结构、功能和能量循环, 由此导致的碳排放仅次于化石燃料的燃烧^[4,5]。黄河源区地处青藏高原东缘, 是中国典型的生态脆弱区。源区丰富的草地资源、水资源和湿地资源为黄河流域提供了重要的生态系统服务^[6,7]。然而过去几十年受自然和人为因素的影响, 黄河源区出现水

土流失加剧、草场退化和生态系统功能衰退等环境问题^[8,9]。近年来, 为加强三江源地区的生态保护建设, 中国政府在黄河源区先后实施了退牧还草、退牧还湿、禁牧封育、黑土滩治理和草原有害生物防控等生态保护工程^[10]。以上生态保护工程的实施促进了各类土地利用类型间的相互转移, 使得黄河源

收稿日期: 2022-01-23; 修订日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801030); 广西科技计划项目(桂科 AD19245032); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA281054); 广西八桂学者专项; 广西空间信息与测绘重点实验室项目(19-050-11-22)

作者简介: 侯建坤(1996~), 男, 硕士, 主要研究方向为黄河源区生态系统服务功能评估, E-mail: 2120201675@glut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chenjj@glut.edu.cn

区的土地利用结构及其碳储量发生了显著变化^[11,12]. 因此,有效且及时地评估黄河源区土地利用变化对生态系统碳储量的影响对于区域碳储功能的可持续发展具有重要意义.

目前评估土地利用变化对碳储量影响的方法包括实地调查法^[13]和模型模拟法^[14]. 相较于传统的实地调查法,模型模拟法可以评估不同尺度的碳储量变化并实现评估结果的空间可视化表达^[15~17],被广泛应用在区域尺度. 在众多评估模型中,InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) 模型以其需求数据少,运行速度快、评估精度高等特点得到广泛应用^[18~20]. 近年来,国内外学者应用 InVEST 模型从不同角度(城镇化、政策保护)、不同尺度(行政区划、流域)探究了土地利用变化对碳储量的影响. 如 Zhang 等^[21]从城镇化角度探讨了 1990~2015 年上海市土地利用变化对碳储量的影响,结果表明城镇化进程是导致碳储量减少的主要原因. 徐自为等^[22]分析了新疆尉犁县 2010~2016 年土地利用变化对区域碳储量的影响,结果表明林地的增加可以提高生态系统固碳能力. 以上研究表明,土地利用变化对生态系统碳储量的影响主要取决于生态系统类型以及不同类型土地利用类型间的转移方式.

探索不同情景下土地利用变化对生态系统碳储量的影响,可以提供量化和可视化的分布结果,有助于决策者制定合理的生态保护方案^[23~27]. 但现有研究多侧重于分析过去时期土地利用变化引起的碳储量变化,对未来土地利用变化进行多情景预测并分析其碳储量变化的研究尚不多见. 因此,本研究基于 2000~2020 年黄河源区的土地利用数据,采用 GeoSOS-FLUS 模型模拟未来自然变化和生态保护情景下的土地利用格局,并运用 InVEST 模型评估黄河源区 2000~2020 年以及 2040 年不同情景下土地利用变化对生态系统碳储量的影响,以期为黄河源区土地资源的合理配置以及碳储功能的可持续发展提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河源区位于青藏高原东北部(图 1),作为三江源之一,是青藏高原的重要组成部分,包含青海、甘肃和四川这 3 个省的部分城市. 黄河源区面积约为 12 万 km²,占黄河流域总面积的 16%^[28]. 其地理位置位于北纬 32°16'~36°09',东经 95°48'~103°28',地势起伏险峻,表现为西北高,东南低,海拔在 2 666~6 108 m 之间. 该区域地貌复杂多样,分

布有高山、盆地、山地、丘陵、沙漠和沼泽等^[29]. 黄河源区的植被类型以高寒草甸和高寒草原为主,占黄河源区总面积的 70%. 该区气候为典型的大陆性高寒气候,光照充足,日照强烈;雨量相对偏少,干湿季分明. 黄河源区年平均气温为 -4.2℃;多年年平均降水量为 270~540 mm^[30].

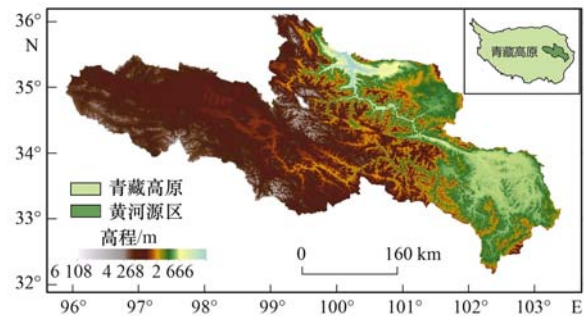


图 1 黄河源区位置及高程示意

Fig. 1 Location and elevation of the source region of the Yellow River

1.2 数据来源与处理

本研究所使用的黄河源区 2000、2010 和 2020 年土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/data>), 该数据包括 6 个一级类型和 25 个二级类型,是目前我国分类精度比较高的土地利用数据产品. 本文根据黄河源区实际情况和研究需要,将研究区土地利用类型重新分为耕地、林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、水域、建设用地、未利用地和湿地这 9 类,裁剪后得到三期黄河源区土地利用类型图,分辨率为 1 km×1 km.

本研究用于模拟未来土地利用变化的驱动因素包括地形、气候和社会经济因素. 地形因素包括高程、坡度和坡向,其中 DEM(digital elevation model)数据来自 ASTER GDEM(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),该数据以 Terra 卫星数据为数据源,由日本(METI)和美国(NASA)联合研制并免费面向公众分发,坡度、坡向数据是基于 DEM 数据由 ArcGIS 软件解析得来. 气候因素包括年均气温和年均降水,均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>). 社会经济数据包括人均 GDP 和人口密度,均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心. 为保证数据的一致性,将以上数据的空间分辨率统一重采样到 1km×1km,地理坐标系均采用 GCS_WGS_1984.

1.3 研究方法

1.3.1 基于 InVEST 模型的生态系统碳储量评估

本研究采用 InVEST 模型中的碳储存模块来评估黄河源区碳储量的变化. 该模块主要通过结合土

地利用数据和碳密度数据计算生态系统的碳储量. 它将生态系统碳储量划分为 4 个基本碳库: 地上植被碳库(C_{above})、地下植被碳库(C_{below})、土壤有机碳库(C_{soil})和死亡有机碳库(C_{dead}), 其中, 地上植被碳库包括地表以上所有存活植被(树皮、树干、树枝和树叶等)中的碳储量; 地下植被碳库是指植物存活根系中的碳储量; 土壤有机碳库一般是指矿物质土壤和有机土壤中的有机碳储量; 死亡有机碳库表示凋落物和已死亡植物中的碳储量. 碳储量计算公式为:

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

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

式中, i 为某种土地利用类型; C_i 为土地利用类型 i

的碳密度, $C_{i-above}$ 为土地利用类型 i 的地上植被碳密度($t \cdot hm^{-2}$); $C_{i-below}$ 为土地利用类型 i 的地下植被碳密度($t \cdot hm^{-2}$); C_{i-soil} 为土地利用类型 i 的土壤碳密度($t \cdot hm^{-2}$); C_{i-dead} 为土地利用类型 i 的死亡有机碳密度($t \cdot hm^{-2}$); C_{tot} 为生态系统的总碳储量(t); A_i 为土地利用类型 i 的面积(hm^2); n 为土地利用类型的数量, 本文 n 为 9. 本研究所使用的植被碳密度和土壤碳密度数据来自中国陆地生态系统碳密度数据集^[31], 为了尽可能覆盖研究区域, 共选取 347 个样本数据, 将所有样本中各类土地利用类型碳密度取均值作为最终碳密度, 死亡有机碳密度主要参考前人的研究结果^[32,33]. 具体碳密度数据如表 1 所示.

表 1 黄河源区各类土地利用类型碳密度/ $t \cdot hm^{-2}$

Table 1 Carbon density of various land use types in the source area of the Yellow River/ $t \cdot hm^{-2}$

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度
耕地	2.89	8.95	36.37	0.53
林地	46.2	11.95	47.48	0.65
高覆盖度草地	1.42	11.17	78.3	0.28
中覆盖度草地	0.95	7.53	65.31	0.18
低覆盖度草地	0.55	3.71	43.21	0.11
水域	0	0	0	0
建设用地	0	0	0	0
未利用地	0.1	0	31.3	0
湿地	3.78	10.1	127	0.72

1.3.2 基于 GeoSoS-FLUS 模型的未來土地利用变化模拟

本研究采用 GeoSoS-FLUS 模型预测黄河源区 2040 年不同情景下的土地利用变化, 该模型是由 Liu 等^[34] 基于 FLUS 模型原理开发的多类土地利用变化情景模拟模型, 已被广泛用于模拟全球和区域尺度的土地利用变化. 该模型主要包括以下 3 个方面.

(1) 计算适宜性概率 适宜性概率是指每种土地利用类型在每个像元上的出现概率, GeoSoS-FLUS 模型结合土地利用数据和气温、高程以及人口密度等多种驱动因子数据, 采用神经网络算法(ANN)来训练和估计各种土地利用类型的适宜性概率. 本研究以 2000 年黄河源区土地利用数据为基础, 采用随机取样的方法提取 3% 的栅格数据作为训练样本, 通过计算得到黄河源区每种土地利用类型的适宜性概率.

(2) 设置邻域因子参数和转移成本矩阵 土地利用类型的邻域因子参数代表该土地类型的扩张能力, 参数范围为 0~1, 越接近 1 代表该土地类型的扩张能力越强. 本研究对模型参数进行多次实验, 通

过对比不同参数设置的模拟结果, 最终将耕地、林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、水域、建设用地、未利用地和湿地的邻域因子分别设置为 0.7、0.7、0.6、0.6、0.9、0.6、0.8、0.5 和 0.7. 土地利用转移成本矩阵表示各地类间的转移规则, 当一种用地类型不允许转化为另一种时, 本研究将矩阵的对应值设为 0, 允许转化时设为 1, 参照 2000~2020 年的土地利用转移矩阵得到黄河源区土地利用转移成本矩阵(表 2).

(3) 模拟精度检验 为了确保模型可以适用于研究区域的土地利用变化模拟, 本研究采用 Kappa 系数和 FoM 值对模拟结果进行精度检验, 其中 Kappa 系数越大则表示模拟结果精度越高; 而 FoM 值越小则代表模拟精度越高.

1.3.3 未来情景设置

本研究设定了自然发展和生态保护两种情景, 情景的具体设置如下.

(1) 自然发展情景 该情景是历史土地利用变化趋势的延续. 以 2000~2020 年的土地利用转移概率矩阵为基础, 采用马尔科夫链预测黄河源区 2040 年自然变化情境下的各类型土地利用的面积. 该情

表 2 土地利用转移成本矩阵¹⁾
Table 2 Cost matrix of land use transfer

2020 年	2000 年								
	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	1	1	1	1	1	1	1	0	0
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1
d	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f	1	1	1	1	1	1	0	1	1
g	1	1	1	1	1	0	1	1	1
h	0	1	1	1	1	1	0	1	1
i	0	1	1	1	1	1	1	1	1

1) a 表示耕地, b 表示林地, c 表示高覆盖度草地, d 表示中覆盖度草地, e 表示低覆盖度草地, f 表示水域, g 表示建设用地, h 表示未利用地, i 表示湿地

景下各用地类型的邻域因子参数和转移成本矩阵不变, 与 2000 ~ 2020 年保持一致.

(2) 生态保护情景 该情景主要参考青海省 2010 年发布的土地利用总体规划^[35] 设置土地利用变化方式为生态保护优先, 即加强对林地、草地、水域和湿地的保护, 遏制草地退化以及建设用地扩张的趋势. 以自然发展情景下 2020 ~ 2040 年土地利用转移矩阵为基础, 将林地、草地、水域和湿地向未利用地和建设用地的转化面积减少 50%, 同时将高覆盖度草地和中覆盖度草地向低覆盖转移的面积减少 30% 得到生态保护情景下各类型土地利用的面积. 由于降低了建设用地、低覆盖度草地和未利用地的扩张强度, 因此分别将建设用地、低覆盖度草地和未利用地的邻域因子参数减小到 0.7、0.6 和 0.4, 其他地类的邻域因子参数不变. 另外, 该情景下各用地类型的转移成本矩阵依旧不变.

2 结果与分析

2.1 2000 ~ 2020 年黄河源区碳储量时空变化特征
黄河源区 2000 ~ 2020 年碳储量和碳密度呈现“先减少后增加”的波动状态, 2000、2010 和 2020 年黄河源区碳储总量分别为 855.83×10^6 、 852.82×10^6 和 867.42×10^6 t, 碳密度平均值为 69.61、69.36 和 $70.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 20 年间总碳储量和碳密度平均值分别增加了 11.59×10^6 t 和 $0.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2000 ~ 2010 年区域总碳储量减少了 30.1×10^6 t (表 3), 其中高、中、低覆盖度草地的碳储量分别减少 28.5×10^6 、 14.5×10^6 和 10.9×10^6 t, 占总碳储量损失的 98%. 2010 ~ 2020 年区域总碳储量增加了 14.59×10^6 t, 其中低覆盖度草地和湿地的碳储增量为 31.62×10^6 t 和 11.07×10^6 t, 占总碳储增量的 91%. 总体分析 20 年来草地、湿地和未利用地碳储量变化是黄河源区碳储量变化的主要贡献者.

表 3 黄河源区不同时期各土地利用类型碳储量变化 $\times 10^6$ / t

年份	耕地	林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	未利用地	湿地	碳储量变化
2000 ~ 2010	0.205	-0.97	-28.54	-14.51	-10.86	1.994	0.283	-30.06
2010 ~ 2020	0.307	3.858	-55.70	-47.34	31.617	-219.58	11.073	14.592
总变化	0.512	3.761	-84.24	-61.85	30.531	-199.64	11.356	11.586

从碳库角度来看 (图 2), 2000 ~ 2010 年 4 个碳库都处于减少状态. 土壤碳库 (SOC) 减少了 2.36×10^6 t, 占总损失量的 81.36%, 死亡有机碳库 (DOC) 损失最小, 仅减少 0.01×10^6 t. 2010 ~ 2020 年 4 个碳库都呈增加趋势, 其中土壤碳库 (SOC) 贡献最大, 碳储增量高达 9.75×10^6 t, 死亡有机碳库 (DOC) 的碳储增量最少, 仅增加了 0.13×10^6 t. 20 年间, 土壤碳库 (SOC) 在碳储存中占据主导地位, 增加了 7.38×10^6 t, 占总碳储增量的 63.7%, 死亡有机碳库 (DOC) 变化最小, 仅增加 0.11×10^6 t.

在空间分布上 (图 3), 黄河源区 2000 ~ 2020 年碳储量均呈“由西向东逐渐升高”的空间分布特征. 具体表现为碳储量高值区域主要分布在黄河源区东部的若尔盖县和玛曲县, 该区域主要土地利用类型为高覆盖度草地和湿地, 碳密度均高于 $91.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 碳储量低值区域主要分布在黄河源区西部和南部的玛多县和达日县, 相比其他区域, 该区域未利用地、低覆盖度草地和水域的面积占比较大, 碳密度最高为 $47.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2000 ~ 2020 年黄河源区碳储量空间变化较明显, 碳储量基本不变区域占区

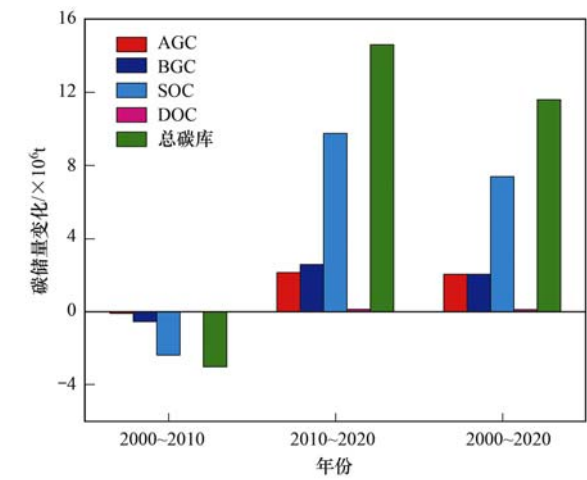


图2 黄河源区各碳库碳储量变化

Fig. 2 Variation in carbon storage in various carbon pools in the source region of the Yellow River

域总面积的比值最大(63.1%),碳储量增加区域所占比例较小(20.45%),碳储量减少区域所占比例最低(16.45%),各变化区交错分布。

2.2 2000 ~ 2020 年黄河源区土地利用变化及其对碳储量的影响

由图4可知,草地是黄河源区的主要用地类型,各覆盖度草地面积所占比重均高于18%,其次是林地和未利用地,所占比重均高于7%,水域和湿地所占比重较小,均超2%,耕地和建设用地所占比重极小,均小于1%。20年来,研究区内低覆盖度草地、耕地和建设用地扩张明显,面积分别增加22.31%、23.13%和237.84%。水域和湿地面积分别增加16.35%和14.04%,林地面积增加了354 km²,未利用地面积明显减少,降幅为48.19%,高覆盖度草地和中覆盖度草地面积分别减少4%和2.02%。

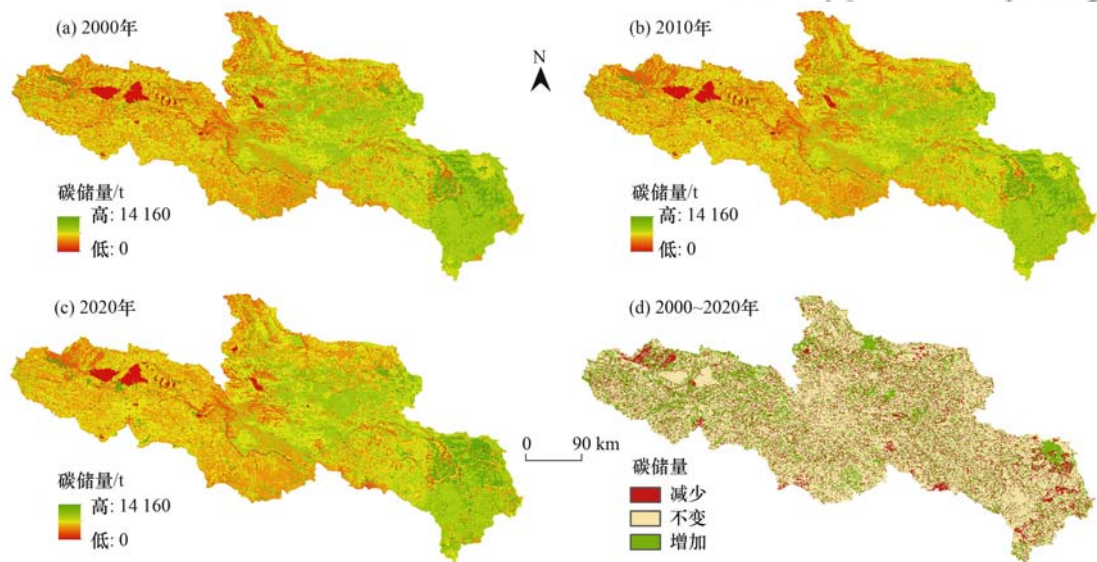


图3 2000、2010 和 2020 年黄河源区碳储量及其变化量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of carbon storage and its variation in the source region of the Yellow River in 2000, 2010, and 2020

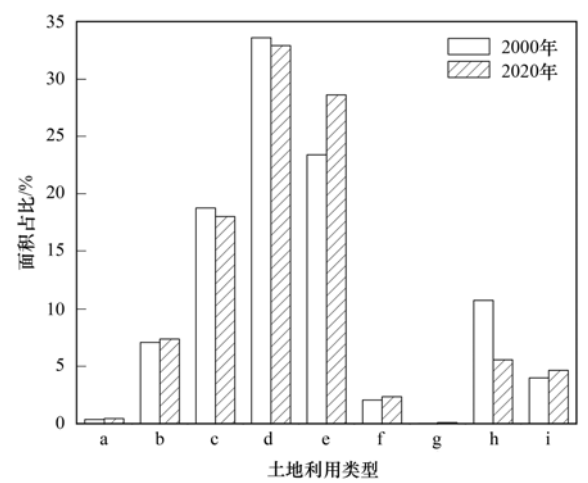
2000 ~ 2020 年黄河源区土地利用类型发生转移的面积共45 453 km²(表4),约占黄河源区总面积

的37%。其中未利用地转出(9 313 km²)导致的碳储量增加(24.31 × 10⁶ t)最大,主要转化为各覆盖度草

表4 2000 ~ 2020 年黄河源区各类土地利用转移矩阵¹⁾/km²

Table 4 Transition matrix of various land uses in the source region of the Yellow River from 2000 to 2020/km ²											
2020 年	2000 年									总计	转入总计
	a	b	c	d	e	f	g	h	i		
a	364	2	92	46	21	6	6	22	0	559	195
b	2	4 839	1 542	1748	681	49	1	126	66	9 054	4 215
c	9	1 225	15 880	2 313	1 378	73	2	370	902	22 152	6 272
d	31	1 638	2 337	27 970	5 176	198	4	670	422	40 446	12 476
e	22	857	1 623	6 694	19 573	194	7	5 836	377	35 183	15 610
f	13	20	184	266	229	1 930	1	200	41	2 884	954
g	13	1	53	24	11	0	14	3	6	125	111
h	0	101	194	1 240	1 340	31	0	3 880	49	6 835	2 955
i	0	16	1 175	981	357	48	2	86	3 043	5 708	2 665
总计	454	8 699	23 080	41 282	28 766	2 529	37	13 193	4 906	122 946	—
转出总计	90	3 860	7 200	13 312	9 193	599	23	9 313	1 863	—	45 453

1) a 表示耕地, b 表示林地, c 表示高覆盖度草地, d 表示中覆盖度草地, e 表示低覆盖度草地, f 表示水域, g 表示建设用地, h 表示未利用地, i 表示湿地



a 表示耕地, b 表示林地, c 表示高覆盖度草地, d 表示中覆盖度草地, e 表示低覆盖度草地, f 表示水域, g 表示建设用地, h 表示未利用地, i 表示湿地

图4 2000~2020年黄河源区土地利用面积占比
Fig. 4 Proportion of land use area in the source area of the Yellow River from 2000 to 2020

地(6 876 km²),其次是低覆盖度草地转化为中、高覆盖度草地的面积为6 554 km²,由此导致的碳储量增加为19.67×10⁶ t,各覆盖度草地转化为湿地的面积共2 513 km²,由此导致的碳储量增加为15.92×10⁶ t.中、高覆盖度草地转化为低覆盖度草地的面积共8 317 km²,由此导致的碳储量损失为24.74×10⁶ t,是该阶段碳储量损失的主要原因.

2.3 2040年黄河源区不同情境下土地利用变化及碳储量时空变化特征

2.3.1 不同情境下土地利用变化

以2000年黄河源区土地用数据为基础,采用GeoSOS-FLUS模型模拟得到2020年土地利用格局.通过对比2020年模拟结果和2020年实际土地利用格局获得模拟精度,结果显示Kappa系数为0.752,FoM值为0.413,故本研究选用GeoSOS-FLUS模型对黄河源区2040年的土地利用进行模拟具有可行性.

由表5可知,高覆盖度草地和中覆盖度草地的面积在自然变化情景下呈缩减态势,分别减少了345 km²和613 km²,而在生态保护情景下得到了有效的保护,分别增加了273 km²和1 409 km².低覆盖度草地在自然变化情景下呈扩张趋势,增加了1 465 km²,而在生态保护情景下由于减少了中、高覆盖度草地向低覆盖度草地的流转,导致低覆盖度草地面积减少了298 km².另外,生态保护情景下草地的总面积较自然变化情景增加了877 km².建设用地在自然变化情景下呈扩张趋势,增加了36 km²,在生态保护情景下扩展趋势得到遏制,仅增加了12 km².未利用地面积在两种情景下呈不同程度的减

少趋势,分别减少1 551 km²和2 418 km².耕地、林地、水域和湿地的面积在两种情景的变化趋势相似,皆呈扩张趋势.

表5 2040年黄河源区两种情景下的土地利用面积及其与2020年土地利用面积的差值/km²

Table 5 Land use area of the source region of the Yellow River in 2040 under two scenarios and its difference with the land use area in 2020/km²

土地利用类型	自然变化情景		生态保护情景	
	2040年	2020~2040年	2040年	2020~2040年
耕地	648	89	649	90
林地	9 266	212	9 271	217
高覆盖度草地	21 811	-345	22 429	273
中覆盖度草地	39 835	-613	41 857	1 409
低覆盖度草地	36 649	1 465	34 886	-298
水域	3 110	226	3 113	229
建设用地	161	36	137	12
未利用地	5 284	-1 551	4 417	-2 418
湿地	6 189	481	6 194	486

2.3.2 不同情境下碳储量时空变化特征

2040年自然变化情景下黄河源区碳储量和平均碳密度分别为871.34×10⁶ t和70.86 t·hm⁻²,较2020年两者分别增加3.92×10⁶ t和0.31 t·hm⁻²,生态保护情景下两者上升的幅度明显增加,分别增加13.53×10⁶ t和1.1 t·hm⁻².从碳库角度来看,自然变化情景下地上植被碳库(AGC)、地下植被碳库(BGC)、土壤碳库(SOC)和死亡有机碳库(DOC)分别增加1.14×10⁶、0.51×10⁶、2.21×10⁶和0.05×10⁶ t(图5),土壤碳库(SOC)的碳储量增加最大,占总碳储增量的56.39%,其次是地上植被碳库(AGC)和地下植被碳库(BGC),其占比分别29.22%和13.15%,死亡有机碳库(DOC)占比极小(1.24%),生态保护情景下4个碳库依

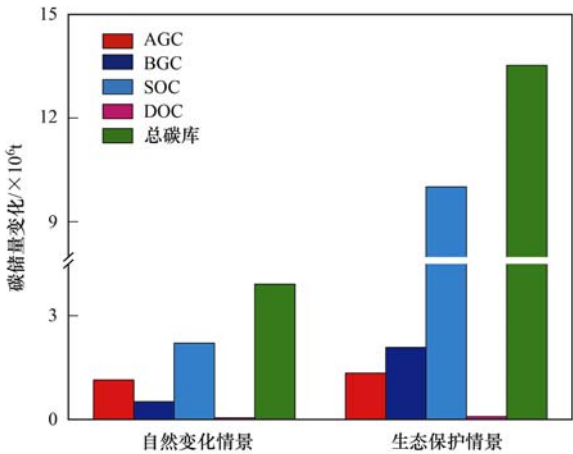


图5 2020~2040年两种情景下各碳库碳储量变化

Fig. 5 Changes in carbon storage in each carbon pool under two scenarios from 2020 to 2040

旧呈增加趋势,分别增加 1.34×10^6 、 2.08×10^6 、 10.01×10^6 和 0.08×10^6 t,土壤碳库(SOC)的占比显著提高,高达 74.02%,死亡有机碳库(DOC)的占比依旧最小。

2040 年黄河源区两种情景下碳储量皆呈“由西向东逐渐升高”的空间分布特征,但空间变化出现区域差异性(图 6)。两种情景下碳储量变化皆以不

变为主,所占比例均高于 79%,自然变化情境下,碳储量减少区和增加区所占比例分别为 7.46% 和 7.73%,在黄河源区东部和北部以增加为主,在西部以减少为主;生态保护情景下,碳储量减少区所占比例小幅增加(8.98%),碳储量增加区显著增加(11.85%),在黄河源区西部和南部两者交错分布,在东部和北部以增加为主。

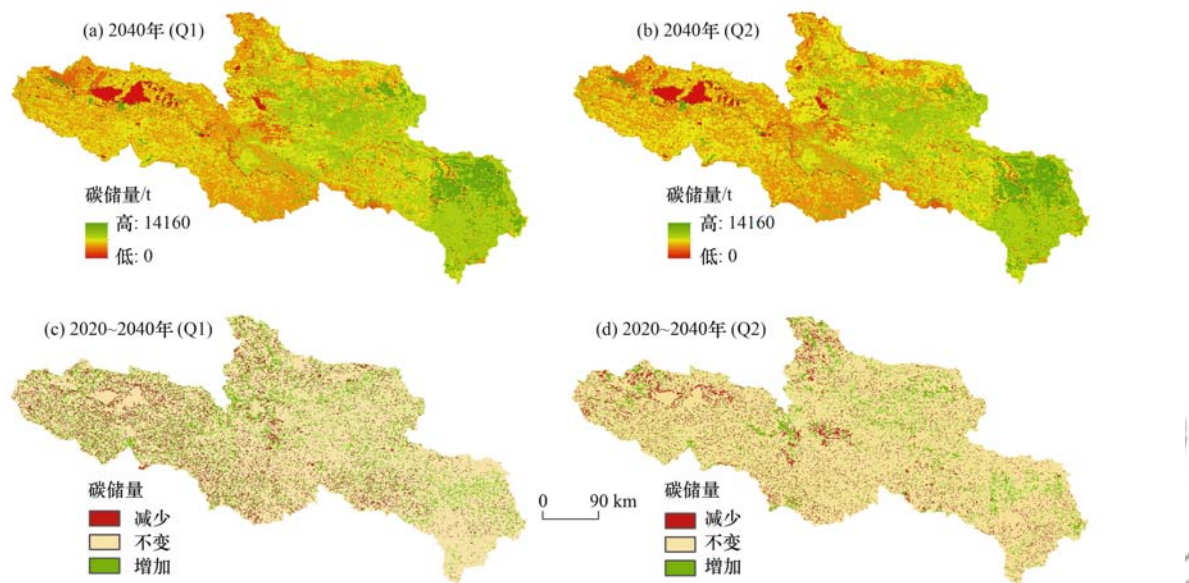


图 6 2040 年两种情景下黄河源区碳储量及其变化量的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of carbon storage and its variation in the source region of the Yellow River under two scenarios in 2040

3 讨论

3.1 碳密度数据对估算结果的影响

碳储量估算结果的准确性主要受输入参数数据的影响,因此选择合理的碳密度数据是模型模拟的关键。与以往研究大多采用其他相近区域或全国尺度的碳密度值的方法不同,本研究所使用的碳密度数据主要来自 2010 年代中国陆地生态系统碳密度数据集,选取了所有位于黄河源区的数据并取均值得到黄河源区碳密度数据。将本研究成果碳密度数据与相近区域通过实测方法得到的碳密度数据进行对比,吴雅琼等^[36]的研究发现青藏高原耕地土壤碳密度约为 $37.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,与本研究得到的耕地土壤碳密度($36.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)较为接近;朴世龙等^[37]的研究发现青海省草地地上和地下生物量碳密度为 $0.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $3.59 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,与本研究得到的低覆盖度草地地上和地下生物量碳密度($0.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $3.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)相一致;王振群^[38]的研究发现青海湖北岸不同草地类型土壤碳密度的平均值为 $67.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,略高于本研究得到的草地土壤碳密度的平均值($62.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$);袁杰^[39]研究发现祁连山黑河源区林地土壤碳密度约为 $45.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,与本研究

得到的林地土壤碳密度($47.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)较为一致。整体来看,本研究所使用的碳密度数据具有一定的准确性和可靠性,有利于提高碳储量估算结果的准确性。

3.2 土地利用变化对碳储量的影响

本研究结果表明,2000~2020 年黄河源区碳储量增加了 11.59×10^6 t,整体呈先减少后增加的趋势,表明黄河源区由碳源逐渐转变为碳汇,生态系统的固碳功能有所提高。杨洁^[40]的研究表明 2000~2018 年黄河流域碳储量整体呈增加趋势,与本研究结果相似。赵苗苗等^[41]的研究发现 2000~2010 年青海省生态系统碳储服务价值呈下降趋势,可以与本结果相互印证。由于模型设定的原因,碳储量的变化主要取决于区域内不同地类之间的相互转化。黄河源区是中国典型的生态脆弱区,其生态环境容易因外界的干扰而发生改变,而近年来退牧还草和草场治理等生态保护工程的实行也导致区域内土地利用发生显著变化^[42]。20 年来黄河源区草地、湿地和林地的面积显著增加,未利用地大幅减少,这表明由于一系列生态保护政策的实施,黄河源区的土地利用结构逐渐优化,生态环境有所改善,这与许茜等^[43]研究三江源土地利用变化的结果一致。本研究

结果表明大面积碳密度较低的未利用地转化为碳密度较高的草地和林地以及低覆盖度草地转化为中覆盖度草地和高覆盖度草地是黄河源区碳储量增加的主要原因,这一定程度上表明生态保护工程的实施有利于提高生态系统碳储量,与 Li 等^[44]从碳储功能视角分析黄土高原地区生态保护成效的结果一致。

3.3 未来土地利用格局优化建议

陆地生态系统碳储存是全球碳储存的主要组成部分^[45],其中草地、湿地和森林的碳储能力高于其他生态系统^[46]。草地是黄河源区的主要地类,其面积占比高达 70% 以上,同时,畜牧业作为黄河源区经济的支柱产业^[47],使得草地与人类活动的关系更加密切。因此,保护草地是实现黄河源区碳储功能可持续发展的关键。本研究生态保护情境下控制了高、中覆盖度草地向低覆盖度的转化,同时加强未利用地向草地和林地的转变。结果显示,生态保护情景下,黄河源区 2040 年碳储增量为 13.53×10^6 t,而在自然变化情境下碳储增量为 3.92×10^6 t。结合不同情境下碳储量变化可知,黄河源区未来应重点保护草地资源,防止草地退化。注重以低碳为导向的土地利用结构优化方式,通过设立禁牧保护区、未利用地开发和加强草地法制管理等手段促进低覆盖度草地和未利用地向高覆盖度草地和湿地的转变,同时需完善草地变化监测网络,巩固草地生态建设成果。

3.4 研究的局限性

首先,土地利用变化是一个复杂的过程,受多种社会经济和自然驱动因素的影响。本研究选取 DEM、坡度、坡向、年均降水、年均气温和 GDP 作为模拟未来土地利用格局的驱动因子,虽然这些因素对各类土地利用类型有较好的拟合效果,最终模拟的结果也具有较高的精度,但却忽略了如生态保护红线以及城市发展边界等政策因素对土地利用变化的影响。为了进一步提高未来土地利用模拟的准确性,应当将相关政策因素加入驱动因子体系。其次,本研究所使用的碳密度数据的时间跨度为 2010~2014 年,未考虑不同土地利用类型碳密度的时间变化。同时,InVEST 模型的碳储量模块只考虑不同土地利用类型的碳密度变化,忽视了相同土地利用类型内部碳密度的空间异质性。因此在未来的研究中应当结合实测数据对碳密度进行验证。

4 结论

(1)2000~2020 年黄河源区碳储量整体呈由西向东逐渐增加的空间分布特征。20 年间碳储量整体呈上升趋势,共增加 11.59×10^6 t,增加的碳储量主

要储存在土壤碳库。未利用地大面积减少以及草地和湿地的面积增加是导致碳储量增加的主要原因。

(2)2000~2020 年黄河源区土地利用变化以低覆盖度草地、建设用地的面积增加和高覆盖度草地、中覆盖度草地和未利用地面积减少为主。自然变化情境下低覆盖度草地、建设用地的面积继续增加,高覆盖度草地、中覆盖度草地和未利用地面积继续减少;生态保护情境下高覆盖度草地和中覆盖度草地转为增加趋势,建设用地扩张趋势得到遏制,扩张的幅度减少。

(3)2040 年自然变化情景下和生态保护情境下,黄河源区碳储量分别为 871.34×10^6 t 和 880.95×10^6 t,与 2020 年相比,两种情境下生态系统碳储量分别增加 3.92×10^6 t 和 13.53×10^6 t,生态保护情境下碳储量的增幅更为显著,控制草地退化和建设用地扩张可以有效提高生态系统碳储量。

参考文献:

- [1] 徐冠华,刘琦岩,罗晖,等. 后疫情时代全球气候变化的应对与抉择[J]. 遥感学报, 2021, 25(5): 1037-1042.
Xu G H, Liu Q Y, Luo H, et al. Responses and choices of global climate change in the post-epidemic era[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(5): 1037-1042.
- [2] 方精云,于贵瑞,任小波,等. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 848-857.
Fang J Y, Yu G R, Ren X B, et al. Carbon sequestration in China's terrestrial ecosystems under climate change-progress on ecosystem carbon sequestration from the CAS strategic priority research program[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 848-857.
- [3] Ito A, Nishina K, Noda H M. Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: An analysis using ISI-MIP data[J]. Polar Science, 2016, 10(3): 346-355.
- [4] Mendoza-Ponce A, Corona-Núñez R, Kraxner F, et al. Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico[J]. Global Environmental Change, 2018, 53: 12-23.
- [5] 马晓哲,王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907.
Ma X, Wang Z. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [6] 卢慧,丛静,刘晓,等. 三江源区高寒草甸植物多样性的海拔分布格局[J]. 草业学报, 2015, 24(7): 197-204.
Lu H, Cong J, Liu X, et al. Plant diversity patterns along altitudinal gradients in alpine meadows in the Three River Headwater Region, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(7): 197-204.
- [7] 尹云鹤,吴绍洪,赵东升,等. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响[J]. 地理研究, 2016, 35(1): 49-57.
Yi Y H, Wu S H, Zhao D S, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the Yellow River from 1981 to 2010[J]. Geographical

- Research, 2016, **35**(1): 49-57.
- [8] 王莺, 李耀辉, 孙旭映. 气候变化对黄河源区生态环境的影响[J]. 草业科学, 2015, **32**(4): 539-551.
Wang Y, Li Y H, Sun X Y. Impact of climate change on the eco-environment in the Yellow River Source [J]. Pratacultural Science, 2015, **32**(4): 539-551.
- [9] 孟宪红, 陈昊, 李照国, 等. 三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J]. 高原气象, 2020, **39**(6): 1133-1143.
Meng X H, Chen H, Li Z G, *et al.* Review of climate change and its environmental influence on the Three-River Regions [J]. Plateau Meteorology, 2020, **39**(6): 1133-1143.
- [10] 财政部驻青海专员办课题组. 关于三江源区生态环境建设资金绩效的调查报告[J]. 财政研究, 2004, (3): 7-9.
- [11] Yang J B, Wang Y C, Guo L, *et al.* Patterns and structures of land use change in the three rivers headwaters region of China [J]. PLoS One, 2015, **10**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0119121.
- [12] 胡光印, 金会军, 董治宝, 等. 黄河源区土地利用/覆盖变化 (LUCC) 研究[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(3): 573-581.
Hu G Y, Jin H J, Dong Z B, *et al.* Research of land-use and land-cover change (LUCC) in the source regions of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, **36**(3): 573-581.
- [13] Zhang C H, Ju W M, Chen J M, *et al.* Disturbance-induced reduction of biomass carbon sinks of China's forests in recent years [J]. Environmental Research Letters, 2015, **10**(11), doi: 10.1088/1748-9326/10/11/114021.
- [14] Sohl T L, Sleeter B M, Zhu Z L, *et al.* A land-use and land-cover modeling strategy to support a national assessment of carbon stocks and fluxes [J]. Applied Geography, 2012, **34**: 111-124.
- [15] Houghton R A, Nassikas A A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850-2015 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2017, **31**(3): 456-472.
- [16] Fu Y C, Lu X Y, Zhao Y L, *et al.* Assessment impacts of weather and land use/land cover (LULC) change on urban vegetation Net Primary Productivity (NPP): A Case Study in Guangzhou, China [J]. Remote Sensing, 2013, **5**(8): 4125-4144.
- [17] Han Q F, Luo G P, Li C F, *et al.* Modeling the grazing effect on dry grassland carbon cycling with Biome-BGC model [J]. Ecological Complexity, 2014, **17**: 149-157.
- [18] Faticchi S, Leuzinger S, Körner C. Moving beyond photosynthesis: from carbon source to sink-driven vegetation modeling [J]. New Phytologist, 2014, **201**(4): 1086-1095.
- [19] 杨园园, 戴尔阜, 付华. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架 [J]. 首都师范大学学报 (自然科学版), 2012, **33**(3): 41-47.
Yang Y Y, Dai E F, Fu H. The assessment framework of ecosystem service value based on InVEST model [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Sciences Edition), 2012, **33**(3): 41-47.
- [20] Clerici N, Cote-Navarro F, Escobedo F J, *et al.* Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes [J]. Science of the Total Environment, 2019, **6865**: 1181-1192.
- [21] Zhang F, Xu N, Wang C, *et al.* Effects of land use and land cover change on carbon sequestration and adaptive management in Shanghai, China [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2020, **120**, doi: 10.1016/j.pce.2020.102948.
- [22] 徐自为, 张智杰. 基于土地利用变更调查的 2010-2016 年新疆尉犁县生态系统碳储量时空变化 [J]. 环境科学研究, 2018, **31**(11): 1909-1917.
- Xu Z W, Zhang Z J. Spatiotemporal variation of carbon storage in Yuli County during 2010-2016 [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(11): 1909-1917.
- [23] Gomes E, Inácio M, Bogdzevič K, *et al.* Future land-use changes and its impacts on terrestrial Ecosystem services: a review [J]. Science of the Total Environment, 2021, **781**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146716.
- [24] 张丁轩, 付梅臣, 陶金, 等. 基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用变化情景模拟 [J]. 农业工程学报, 2013, **29**(12): 246-256.
Zhang D X, Fu M C, Tao J, *et al.* Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(12): 246-256.
- [25] 赵冬玲, 杜萌, 杨建宇, 等. 基于 CA-Markov 模型的土地利用演化模拟预测研究 [J]. 农业机械学报, 2016, **47**(3): 278-285.
Zhao D L, Du M, Yang J Y, *et al.* Simulation and forecast study of land use change based on CA-Markov model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, **47**(3): 278-285.
- [26] Jian K, Wang S N, Guo L X, *et al.* Spatial distribution simulation and trend analysis of land use in Sanya based on GeoSOS-FLUS model [J]. Urban and Regional Planning, 2020, **5**(4): 97-108.
- [27] Sun Q, Qi W, Yu X Y. Impacts of land use change on ecosystem services in the intensive agricultural area of North China based on Multi-scenario analysis [J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, **60**(1): 1703-1716.
- [28] 蓝永超, 鲁承阳, 喇承芳, 等. 黄河源区气候向暖湿转变的观测事实及其水文响应 [J]. 冰川冻土, 2013, **35**(4): 920-928.
Lan Y C, Lu C Y, La C F, *et al.* The fact of climate shift to warm-humid in the source regions of the Yellow River and its hydrologic response [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(4): 920-928.
- [29] 刘启兴, 董国涛, 景海涛, 等. 2000-2016 年黄河源区植被 NDVI 变化趋势及影响因素 [J]. 水土保持研究, 2019, **26**(3): 86-92.
Liu Q X, Dong G T, Jing H T, *et al.* Change trend of vegetation NDVI and its influencing factors in the source region of the Yellow River in the period from 2000 to 2016 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, **26**(3): 86-92.
- [30] 王根绪, 李琪, 程国栋, 等. 40a 来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应 [J]. 冰川冻土, 2001, **23**(4): 346-352.
Wang G X, Li Q, Cheng G D, *et al.* Climate change and its impact on the eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(4): 346-352.
- [31] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集 [J]. 中国科学数据, 2019, **4**(1): 86-92.
- 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): 86-92.
- [32] 赵忠贺, 刘高焕, 徐增让. 2001-2010 年西藏生态系统碳蓄积量数据集 [J]. 全球变化数据学报 (中英文), 2018, **2**(1): 67-71, 198-202.
Zhao Z H, Liu G H, Xu Z R. The ecosystem carbon storage dataset in Tibet (2001-2010) [J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2018, **2**(1): 67-71, 198-202.

- [33] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, **32**(10): 4052-4065.
- Liu Y, Zhang J, Zhou D M, *et al.* Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **32**(10): 4052-4065.
- [34] Liu X P, Liang X, Li X, *et al.* A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, **168**: 94-116.
- [35] 辛学磊. 基于生态足迹模型的青海省土地利用总体规划研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [36] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 等. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 362-367.
- Wu Y Q, Liu G H, Fu B J, *et al.* Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(2): 362-367.
- [37] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(4): 491-498.
- Pu S L, Fang J Y, He J S, *et al.* Spatial distribution of grassland biomass in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, **28**(4): 491-498.
- [38] 王振群. 土地利用方式和植被退化对青海湖北岸高寒草原土壤碳氮含量的影响[D]. 西宁: 青海大学, 2009.
- [39] 袁杰. 祁连山黑河源区土壤储碳蓄水能力及潜力研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2019.
- [40] 杨洁. 黄河流域草地生态系统服务功能及其权衡协同关系研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [41] 赵苗苗, 赵海凤, 李仁强, 等. 青海省1998-2012年草地生态系统服务功能价值评估[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(3): 418-433.
- Zhao M M, Zhao H F, Li R Q, *et al.* Assessment on grassland ecosystem services in Qinghai Province during 1998-2012[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(3): 418-433.
- [42] 邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 等. 2005-2009年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估[J]. 地理研究, 2013, **32**(9): 1645-1656.
- Shao Q Q, Liu J Y, Huang L, *et al.* Integrated assessment on the effectiveness of ecological conservation in Sanjiangyuan National Nature Reserve[J]. *Geographical Research*, 2013, **32**(9): 1645-1656.
- [43] 许茜, 李奇, 陈懂懂, 等. 近40a三江源地区土地利用变化动态分析及预测[J]. 干旱区研究, 2018, **35**(3): 695-704.
- Xu Q, Li Q, Chen D D, *et al.* Land use change in the Three-River Headwaters in recent 40 years[J]. *Arid Zone Research*, 2018, **35**(3): 695-704.
- [44] Li K M, Cao J J, Adamowski J F, *et al.* Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the InVEST model: A case study in Huining County, China[J]. *Environmental Development*, 2021, **39**, doi: 10.1016/j.envdev.2021.100641.
- [45] Tardieu L, Roussel S, Thompson J D, *et al.* Combining direct and indirect impacts to assess ecosystem service loss due to infrastructure construction[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **152**: 145-157.
- [46] Krogh L, Noergaard A, Hermansen M, *et al.* Preliminary estimates of contemporary soil organic carbon stocks in Denmark using multiple datasets and four scaling-up methods[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, **96**(1-3): 19-28.
- [47] 刘树超, 邵全琴, 杨帆, 等. 黄河源区放牧家畜数量及空间分布无人机遥感调查[J]. 地球信息科学学报, 2021, **23**(7): 1286-1295.
- Liu S C, Shao Q Q, Yang F, *et al.* Using UAVs remote sensing for population and distribution of grazing livestock in the source region of the Yellow River[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2021, **23**(7): 1286-1295.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
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	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)