

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息	(4506, 4678, 4741)

中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估

陈宁¹, 辛存林^{1,2*}, 唐道斌¹, 张亮¹, 辛顺杰³

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070; 3. 兰州大学资源与环境学院, 兰州 730030)

摘要: 土地利用/覆盖变化(LUCC)是导致陆地生态系统碳储量变化的主要因素, 研究未来不同情景下的土地利用和碳储量变化过程, 有助于制定科学的土地利用政策和提高区域陆地生态系统碳储量. 研究构建了 GMMOP-PLUS-InVEST 模型, 通过多源数据分析了 2000~2020 年中国西北地区土地利用和碳储量的变化特征, 并预测了自然发展(ND)、经济发展(ED)、生态保护(EP)和综合发展(CD)情景下的 2030 年中国西北地区土地利用和碳储量. 结果表明: ①2000~2020 年, 草地面积减少了 $1\,680.99 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 耕地、林地、水域、湿地、建筑用地和未利用地面积分别增加了 201.19×10^4 、 208.47×10^4 、 91.54×10^4 、 51.30×10^4 、 157.40×10^4 和 $971.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$. ②2000~2020 年, 土壤和地下碳储量减少, 死亡有机物和地上碳储量增加, 总碳储量减少了 $677.97 \times 10^6 \text{ t}$, 草地退化是碳储量减少的主要原因. ③与 2020 年相比, ND 情景总碳储量减少了 $63.12 \times 10^6 \text{ t}$, ED、EP 和 CD 情景总碳储量分别增加了 759.19×10^6 、 804.57×10^6 和 $817.89 \times 10^6 \text{ t}$, CD 情景是最优的发展模式. 研究结果可以为区域土地利用规划及增加陆地生态系统碳储量提供参考依据.

关键词: 土地利用/覆盖变化; 碳储量; 多情景; 中国西北地区; 陆地生态系统; GMMOP-PLUS-InVEST 模型

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4655-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202210083

Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China

CHEN Ning¹, XIN Cun-lin^{1,2*}, TANG Dao-bin¹, ZHANG Liang¹, XIN Shun-jie³

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Lanzhou 730070, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730030, China)

Abstract: Land use/cover change (LUCC) is the main factor leading to the change in carbon stock of terrestrial ecosystems. Studying the process of land use and carbon storage change under different scenarios in the future will help to formulate scientific land use policies and increase regional terrestrial ecosystem carbon storage. The GMMOP-PLUS-InVEST model was constructed to analyze the change characteristics of land use and carbon storage in northwest China from 2000 to 2020 through multi-source data and to predict the land use and carbon storage in northwest China in 2030 under the scenarios of natural development (ND), economic development (ED), ecological protection (EP), and comprehensive development (CD). The results showed that: ① from 2000 to 2020, the area of grassland decreased by $1\,680.99 \times 10^4 \text{ hm}^2$, and the area of cultivated land, forest land, water area, wetland, construction land, and unused land increased by 201.19×10^4 , 208.47×10^4 , 91.54×10^4 , 51.30×10^4 , 157.40×10^4 , and $971.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$, respectively. ② From 2000 to 2020, soil and underground carbon storage decreased, dead organic matter and aboveground carbon storage increased, and total carbon storage decreased by $677.97 \times 10^6 \text{ t}$. Grassland degradation was the main reason for the decrease in carbon storage. ③ Compared to that in 2020, the total carbon storage in the ND scenario was reduced by $63.12 \times 10^6 \text{ t}$, and the total carbon storage in the ED, EP, and CD scenarios increased by 759.19×10^6 , 804.57×10^6 , and $817.89 \times 10^6 \text{ t}$, respectively; the CD scenario was the optimal development model. These results can provide a reference for regional land use planning and the increase of terrestrial ecosystem carbon storage.

Key words: land use/cover change; carbon storage; multi-scenario; northwest China; terrestrial ecosystem; GMMOP-PLUS-InVEST model

全球气候变化是当今人类社会所面临最严峻的挑战之一, 它对生态环境和社会经济的可持续发展有着深远影响^[1]. CO_2 等温室气体大量排放是全球气候变暖的主要原因^[2], 陆地生态系统通过植物光合作用能够吸收大气中的 CO_2 并将其转化为稳定的有机碳存储下来^[3], 是减少大气中 CO_2 浓度最为经济可行的方式之一^[4]. 然而, 土地利用/覆盖变化(LUCC)通过改变生态系统的结构和功能来影响区域碳储量^[5], 是陆地生态系统碳储量变化的主要因素^[6], 由 LUCC 导致的碳排放是仅次于化石燃料燃烧的碳排放来源^[7]. LUCC 往往受到经济和生态等多种因素综合影响, 制定合理的土地利用优化方案能够有效增加陆地生态系统碳储量^[8]. 因此, 深入

挖掘区域 LUCC 对陆地生态系统碳储量的影响机制, 探索土地利用优化方案以提高未来陆地生态系统碳储量, 这对于区域可持续发展及减缓全球气候变化具有重要的意义.

目前, 国内外学者对于 LUCC 与碳储量间的关系进行了大量研究, 有学者利用簿记法(bookkeeping)^[9]、IPCC 清单法^[10]、CASA 模型^[11]、GLO-PEM 模型^[12] 和 InVEST 模型等基于区域不同土地利用类型特征进行了碳储量评估, 如: 陈耀亮

收稿日期: 2022-10-09; 修订日期: 2022-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972020)

作者简介: 陈宁(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用优化及碳储量评估, E-mail: 172088575@qq.com

* 通信作者, E-mail: xincunlin@163.com

等^[13]利用簿记法估算了中亚地区碳储量,并指明森林的退化是导致中亚地区碳储量下降的主要原因;Li 等^[14]利用 InVEST 模型评价了生态工程对黄土高原地区碳储量的影响,结果表明生态工程的实施能够有效增加区域碳储量,由于 InVEST 模型输入参数简单、适用性和准确性较高,能够有效揭示 LUCC 与碳储量之间的关系而被广泛应用^[15]. 但是,目前的研究大多集中在利用 InVEST 模型探索 LUCC 对碳储量的影响机制,却没有综合考量各项土地利用指标,将提升区域碳储量纳入未来土地利用优化当中. 此外,土地利用优化通常涉及多个目标相互竞争的复杂过程,尤其是生态脆弱区的土地利用优化往往需要在经济发展和生态保护中权衡^[16]. 对于未来土地利用优化的方法主要可以分为两类:数量结构优化和空间布局优化^[17],以往的研究大多关注的是其中一个方面^[18,19]. 灰色多目标决策 (GMMOP) 模型能够解决土地利用数量结构优化过程中多目标冲突问题,并能准确预测各种土地利用类型的数量^[20],而 CA-Markov^[21]、CLUE-S^[22]、FLUS^[23] 和 PLUS 等土地利用预测模型能够优化土地利用空间布局,其中,PLUS 模型能够精确地模拟多种土地利用类型斑块变化过程中的非线性关系,具有很高的模拟精度^[24]. 所以,将 GMMOP、PLUS 和 InVEST 模型集成不仅能够实现区域土地利用数量结构和空间布局上的双重优化,而且还能最大限度地增加未来陆地生态系统碳储量.

因此,本文以中国西北地区为研究区,利用 GMMOP-PLUS-InVEST 模型,分析了区域尺度上的 LUCC 对碳储量的影响,并预测了不同土地利用优化情景下的 2030 年中国西北地区的碳储量,探索了西北地区的最优土地利用优化方案,并提出了合理的土地利用优化建议,以期为中国西北地区的高质

量发展提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国西北地区 (73°41′ ~ 111°15′ E, 31°39′ ~ 49°33′ N) 位于中国西北部,在行政区划上包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区 5 个省及自治区 (图 1),总面积约 308 万 km²^[25]. 气候以温带季风气候和温带大陆性气候为主、局部为高寒气候,降水量由东至西、由南向北递减,地形以高原、平原和盆地为主,地貌以高原、草原和荒漠居多^[26]. 由于该地区降水量少,蒸发量大,植被覆盖率低,土地沙化和荒漠化严重,是典型的生态脆弱区,再加上近年来大力发展经济,不断加剧的人类活动对其生态环境造成了巨大压力,经济和生态协调稳定发展成为了亟待解决的问题.

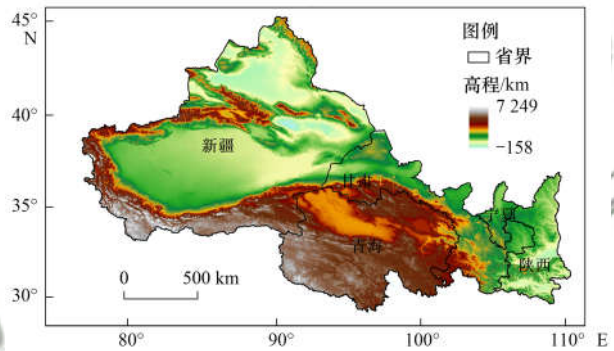


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源

1.2.1 土地利用模拟数据

主要包括 2000、2010 和 2020 年 3 期土地利用数据,社会经济和气候环境两类共 11 项驱动因子数据以及统计年鉴数据 (表 1). 其中,2010 年和 2020

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据类型	数据名称	数据格式	数据来源
省级行政区划	研究区边界	矢量数据	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
土地利用数据	土地利用数据	栅格 30 m 分辨率	GlobeLand30 (http://www.globallandcover.com)
社会经济因子	GDP	栅格 1 km 分辨率	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
	人口	栅格 1 km 分辨率	
	距离铁路	矢量数据	OpenStreetMap (https://www.openhistoricalmap.org)
	距离国道	矢量数据	
	距离省道	矢量数据	
气候环境因子	DEM	栅格 90 m 分辨率	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn)
	Slop	栅格 90 m 分辨率	
	年平均降水	栅格 1 km 分辨率	中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn)
	年平均气温	栅格 1 km 分辨率	
	土壤类型	栅格 1 km 分辨率	
	土壤侵蚀	栅格 1 km 分辨率	
统计年鉴	GDP	分省统计数据	国家统计局 (http://www.stats.gov.cn)

年的土地利用数据经第三方验证,总体精度 OA 值分别为 0.84 和 0.86,Kappa 系数分别为 0.78 和 0.82^[27]. 本文将土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、湿地、建筑用地和未利用地共 7 种土地利用类型,并将土地利用和驱动因子数据重采样为 100 m 分辨率进行土地利用模拟.

1.2.2 碳密度数据

碳密度数据来源于国家生态科学数据中心 (<http://www.cnern.org.cn>)并参考了部分学者的研究成果^[28,29],将其归纳为全国范围的碳密度数据. 本文根据 Alam 等^[30]和陈光水等^[31]提出的碳密度修订方法对全国碳密度数据进行修正后得到研究区

碳密度数据(表 2).

1.3 研究方法

本文构建的 GMMOP-PLUS-InVEST 模型框架主要由 3 部分组成(图 2). 首先,GMMOP 模型算法能够优化未来的土地利用数量结构,目的是使不同情景下受到社会经济和生态约束的土地利用情景达到目标最大化. 其次,PLUS 模型能够优化土地利用空间布局,它不仅可以将预测的土地利用数量进行合理的空间分配,而且还可以在土地利用发展过程中纳入空间发展和限制政策. 最后,InVEST 模型通过估算区域碳储量,能够探索 LUCC 对碳储量的影响机制,最终制定科学的土地利用优化方案.

表 2 研究区不同土地利用类型碳密度/t·hm⁻²

Table 2 Carbon density of different land use types in study area/t·hm⁻²

土地利用类型	地上生物碳密度	地下生物碳密度	土壤碳密度 ¹⁾	死亡有机物碳密度
耕地	1.17	0.18	74.55	1.90
林地	19.62	4.88	85.94	0.84
草地	0.19	1.94	69.17	0.04
水域	0.06	0	0	0
湿地	1.59	3.85	119.99	0
建筑用地	0.49	5.35	0	0
未利用地	0.25	0	5.84	0

1) 土壤碳密度为 0~100 cm 土层深度的平均碳密度

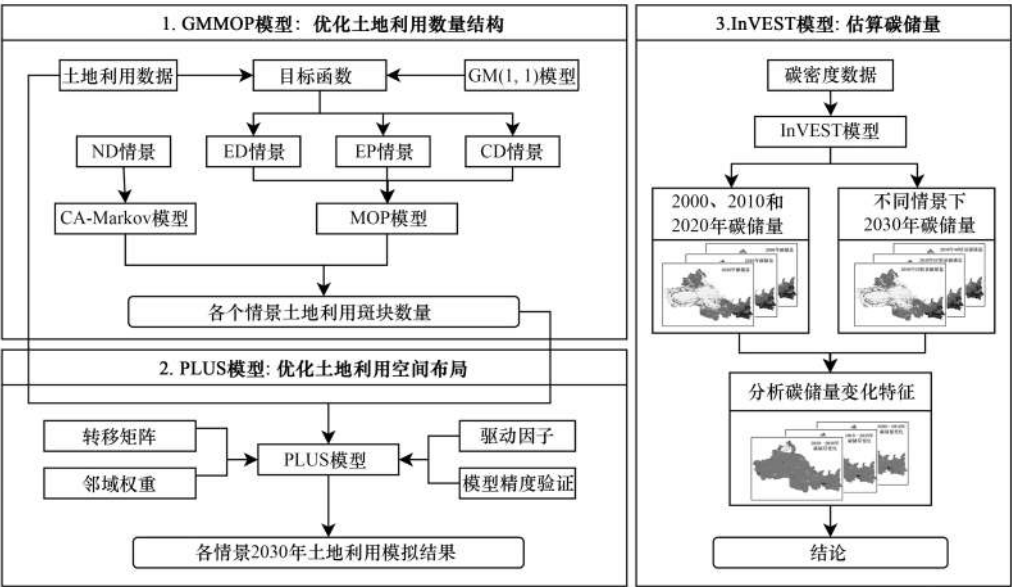


图 2 模型框架
Fig. 2 Model frame

1.3.1 GMMOP 模型优化土地利用数量结构

GMMOP 模型是由 GM(1,1) 和 MOP 模型集成得到的^[32]. 其中,GM(1,1)模型用于预测未来不同土地利用类型价值系数并用于设定目标函数,MOP 用于求解不同情景下的多目标优化问题,最终得到 ED、EP 和 CD 情景下 2030 年各土地利用类型面积.

(1) 土地利用价值计算 本文以 GM(1,1)预测得到的 2030 年单位面积农业、林业、畜牧业、渔业和第二产业与第三产业创造的经济价值作为耕地、林地、草地、水域和建筑用地的经济价值系数^[16],未利用地的经济价值系数为 0,湿地的经济价值系数为草地和水域的均值^[33]. 利用各土地利用类型单位面积内产生的生态系统服务价值作为生态价值系

数^[24],研究区生态系统服务价值参考了谢高地等^[34]的生态系统服务价值当量表,并根据 Dai

等^[35]提出的修订方法对其修订得到研究区 2030 年生态价值系数.土地利用类型价值系数如表 3 所示.

表 3 2030 年土地利用类型价值系数/元·hm⁻²

Table 3 Value coefficient of land use type in 2030/Yuan·hm⁻²

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	湿地	建筑用地	未利用地
经济价值系数	68 387.48	2 850.43	8 095.61	2 558.02	5 326.82	3 224 574.19	0.00
生态价值系数	12 863.36	45 787.05	19 001.95	73 842.20	89 180.53	0.00	2 263.30

(2)土地利用情景设定与目标函数构建 本文为了协调经济发展和生态保护之间的矛盾,设定了未来 4 种土地利用情景,ND 情景是没有政策干预的基线,ED、EP 和 CD 场景是 3 种受到优化条件约束的优化情景.

①ND 情景利用 PLUS 模型的 CA-Markov 模块,预测了 2030 年每种土地利用类型面积.

②ED 情景以经济发展为目标,使得研究区经济价值最高.

$$F_1(X) = \text{Max} \sum_{k=1}^7 A_k X_k \quad (1)$$

③EP 情景以生态保护为目标,使得研究区生态价值最高.

$$F_2(X) = \text{Max} \sum_{k=1}^7 B_k X_k \quad (2)$$

④CD 情景以生态和经济协调发展为目标,使得研究区综合价值最高.

$$F_3(X) = \text{Max}[F_1(X), F_2(X)] \quad (3)$$

式中, A_k 和 B_k 分别为生态和经济价值系数(元·hm⁻²), $F_1(X)$ 、 $F_2(X)$ 和 $F_3(X)$ 分别为经济、生态和综合价值(元), X_k 为土地利用类型 k 的面积(hm²).

设定约束条件:

①总面积约束. 保证优化情景各土地利用类型总面积等于研究区面积.

$$\sum_{k=1}^7 X_k = 308\,187\,363 \quad (4)$$

②经济价值增长约束. 保证优化情景的区域经济价值不小于 ND 情景.

$$\sum_{k=1}^7 X_k A_k \geq \sum_{k=1}^7 W_k A_k \quad (5)$$

③生态价值增长约束. 保证优化情景的区域生态价值不小于 ND 情景.

$$\sum_{k=1}^7 X_k B_k \geq \sum_{k=1}^7 W_k B_k \quad (6)$$

④碳储量增长约束. 保证优化情景的陆地生态系统碳储量不低于 ND 情景.

$$\sum_{k=1}^7 X_k C_k \geq \sum_{k=1}^7 W_k C_k \quad (7)$$

⑤植被覆盖度约束. 植被覆盖度基于“生态绿色当量”计算,满足绿色等效的土地利用类型包括耕地、林地和草地,其系数分别为 0.46、1 和 0.49^[36],保证优化情景的植被覆盖度不小于 ND 情景.

$$\frac{0.46X_1 + X_2 + 0.49X_3}{308\,187\,363} \geq \frac{0.46W_1 + W_2 + 0.49W_3}{308\,187\,363} \quad (8)$$

⑥景观多样性约束. 为了降低生态风险,维护生物多样性,保证优化情景的林地、草地、水域和湿地面积总比例不小于 ND 情景.

$$\frac{X_2 + X_3 + X_4 + X_5}{308\,187\,363} \geq \frac{W_2 + W_3 + W_4 + W_5}{308\,187\,363} \quad (9)$$

⑦耕地红线约束. 由于我国实施了严格的耕地保护政策,优化情景耕地面积应不小于 ND 情景.

$$X_1 \geq W_1 \quad (10)$$

⑧模型准确性约束. 由于 CA-Markov 模块在预测 ND 情景土地利用面积时有较高的精度,因此其它情景在满足以上约束的同时还应以 ND 情景为基准,保证各土地利用类型在 ND 情景的 20% 范围内变化^[16].

$$0.8W_k \leq X_k \leq 1.2W_k \quad (11)$$

式中, X_k 和 W_k ($k=1,2,\cdots,7$) 分别为优化情景和 ND 情景的耕地、林地、草地、水域、湿地、建筑用地和未利用地面积(hm²), C_k 为土地利用类型 k 的总碳密度(t·hm⁻²).

1.3.2 PLUS 模型优化土地利用空间布局

本文利用 PLUS 模型预测得到的 2020 年土地利用数据与实际 2020 年土地利用数据进行对比验证,OA 值为 0.89, Kappa 系数为 0.81,该模型用于研究区的未来土地利用模拟具有较高精度^[24],模型具体设置如下.

(1)邻域权重 邻域权重表示不同土地利用类型的扩张能力,由于同时间尺度各土地利用类型面积(TA)的变化量可以较好反映各自的扩张能力^[37],本文利用 2000~2020 年的 TA 变化量的无量纲值计算得到邻域权重,如表 4 所示.

(2)转移规则矩阵 土地利用转移规则矩阵表示土地利用类型之间的转换规则,当一种土地利用

类型不能转换成另一种时,矩阵对应值为 0,反之为 1,本文设置的土地利用转移矩阵,如表 5 所示。

表 4 邻域权重

Table 4 Neighborhood weight

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	湿地	建筑用地	未利用地
邻域权重	0.709 7	0.712 4	0	0.668 4	0.653 2	0.693 2	1

表 5 不同情景下土地利用转移规则矩阵¹⁾

Table 5 Land use transfer rule matrix under different scenarios

	ND 情景							ED 情景							EP 情景							CD 情景						
	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G
A	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
C	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
F	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
G	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

1) A:耕地,B:林地,C:草地,D:水域,E:湿地,F:建筑用地,G:未利用地

1.3.3 InVEST 模型计算碳储量

InVEST 模型的 Carbon 模块将陆地生态系统碳储量分为地上生物、地下生物、土壤和死亡有机物碳库,它能够估算不同土地利用情景下的陆地生态系统碳储量^[15],每种土地利用类型的 4 个碳库对应着不同的碳密度,陆地生态系统的碳储量是通过每种土地利用类型的总碳密度乘以它们对应的面积得到,计算公式如下:

$$C_k = C_{k_above} + C_{k_below} + C_{k_soil} + C_{k_dead} \quad (12)$$

$$C_T = \sum_{k=1}^n Area_k C_k \quad (13)$$

式中, C_{k_above} 、 C_{k_below} 、 C_{k_soil} 和 C_{k_dead} 分别为土地利用类型 k 的地上生物、地下生物、土壤、死亡有机物碳库的碳密度($t \cdot hm^{-2}$), C_k 和 $Area_k$ 分别为土地利用类型 k 的总碳密度($t \cdot hm^{-2}$)和面积(hm^2), C_T 为总碳储量(t), n 为土地利用类型总数量。

2 结果与分析

2.1 2000 ~ 2020 年中国西北地区土地利用时空变化

从面积占比来看,中国西北地区主要土地利用

类型为未利用地和草地,其次为耕地、林地、水域、建筑用地和湿地。从面积变化来看(表 6),2000 ~ 2020 年耕地、林地、水域、湿地、建筑用地和未利用地面积分别增加了 201.19×10^4 、 208.47×10^4 、 91.54×10^4 、 51.30×10^4 、 157.40×10^4 和 $971.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$,草地面积减少了 $1\,680.99 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。从 LUCC 空间格局来看(图 3),草地面积变化主要集中在新疆北部、甘肃南部及青海大部分区域;水域在新疆中北部有明显的增加;建筑用地面积变化主要集中在各省会城市及周边区域,特别在陕西的中部地区变化显著,其它土地利用类型变化较小。从土地利用动态度^[38]来看,2000 ~ 2020 年西北地区大力发展经济使得建筑用地变化最为强烈,面积显著增加,湿地、水域、林地和耕地也随着生态保护政策的实施,面积小幅度增加。

2.2 2000 ~ 2020 年中国西北地区碳储量时空变化

从碳储量的数量变化来看(图 4),2000 ~ 2020 年中国西北地区总碳储量显著减少,总减少量为 $677.97 \times 10^6 \text{ t}$,其中 2000 ~ 2010 年减少了 $589.49 \times 10^6 \text{ t}$,2010 ~ 2020 年减少了 $88.48 \times 10^6 \text{ t}$,总体来说

表 6 2000 ~ 2020 年土地利用面积变化及其动态度

Table 6 Land use area change and its dynamic from 2000 to 2020

土地类型	2000 ~ 2020 年各土地利用类型面积 $\times 10^4 / \text{hm}^2$			2000 ~ 2020 面积变化及动态度	
	2000 年	2010 年	2020 年	面积变化 $\times 10^4 / \text{hm}^2$	动态度/%
耕地	2 690.16	2 748.10	2 891.35	201.19	0.37
林地	1 757.30	1 947.20	1 965.77	208.47	0.59
草地	11 368.55	10 085.80	9 687.56	-1 680.99	-0.74
水域	757.16	785.69	848.71	91.54	0.60
湿地	101.95	108.62	153.25	51.30	2.52
建筑用地	105.67	126.74	263.06	157.40	7.45
未利用地	14 037.95	15 016.59	15 009.04	971.09	0.35

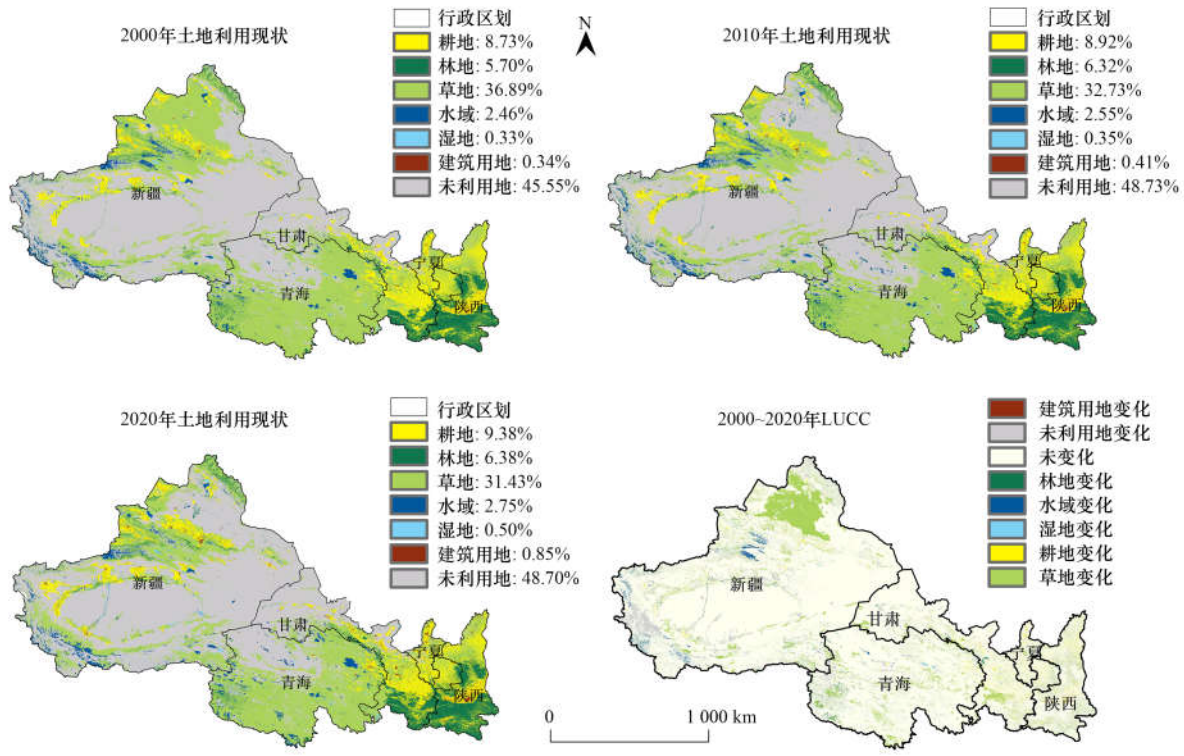


图3 土地利用时空变化

Fig. 3 Spatial and temporal changes in land use

西北地区的总碳损失速率减缓;土壤碳储量和地下碳储量分别减少了 715.32×10^6 t 和 11.68×10^6 t, 死亡有机物碳储量和地上碳储量分别增加了 4.9×10^6 t 和 44.13×10^6 t. 从碳储量空间分布特征来看(图5),中国西北地区碳储量空间上呈现明显东南高西北低的差异,其中,总碳储量较大区域主要集中在陕西、宁夏、青海和甘肃的南部以及新疆的西北部地区;新疆的西北部地区由于草地大量退化使得碳储量显著减少,甘肃和青海也出现不均匀的局部碳储量减少现象,此外,新疆的西部和沙漠绿洲交错带以及甘肃的南部碳储量出现明显的增加,陕西和宁夏的碳储量较为稳定,无明显变化.

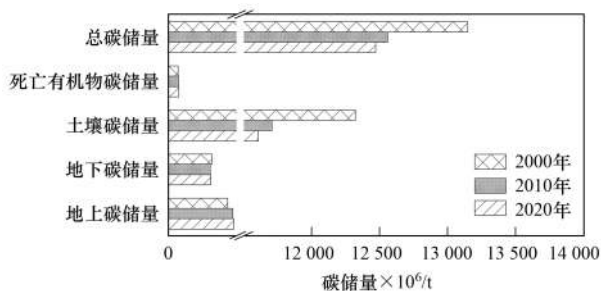


图4 各类碳储量变化

Fig. 4 Changes in various types of carbon storage

2.3 碳储量对LUCC的响应

由于不同土地利用类型的碳密度不同,所以不同土地利用类型转换后会导致区域陆地生态系统碳储量发生变化.因此,本文量化了2000~2020年中

国西北地区各土地利用类型变化对陆地生态系统碳储量的影响(表7).结果表明,2000~2020年中国西北地区的耕地、林地、草地和湿地变化导致了碳储量减少,在此期间,草地转换成为未利用地、建筑用地和水域导致总碳储量损失了 $1\,101.09 \times 10^6$ t, 草地面积大量转换成未利用地是总碳储量减少的主要原因;耕地转换成建筑用地、草地、水域和未利用地导致总碳储量损失 87.49×10^6 t;林地转换成草地、耕地、水域、建筑用地和未利用地导致总碳储量损失 130.04×10^6 t;湿地转换成耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用地导致总碳储量损失 40.54×10^6 t;水域、建筑用地和未利用地的转换分别增加了 68.10×10^6 、 15.58×10^6 和 597.52×10^6 t 总碳储量.

2.4 未来不同情景下土地利用及碳储量变化

本文将2030年研究区土地利用状况及碳储量与2020年进行了对比分析(图6和表8).结果表明,ND情景下,草地和未利用地面积减少,其余土地利用类型面积增加,草地面积变化主要集中在新疆北部和青海东部区域,总碳储量减少 63.12×10^6 t. ED情景下,未利用地和草地面积减少,甘肃和陕西南部草地出现明显的退化,但新疆和甘肃的大部分区域未利用地朝着林地、耕地和湿地转换,各类碳储量都显著增加,总碳储量增加 759.19×10^6 t. EP情景下,中国西北地区加大生态保护力度,耕地、

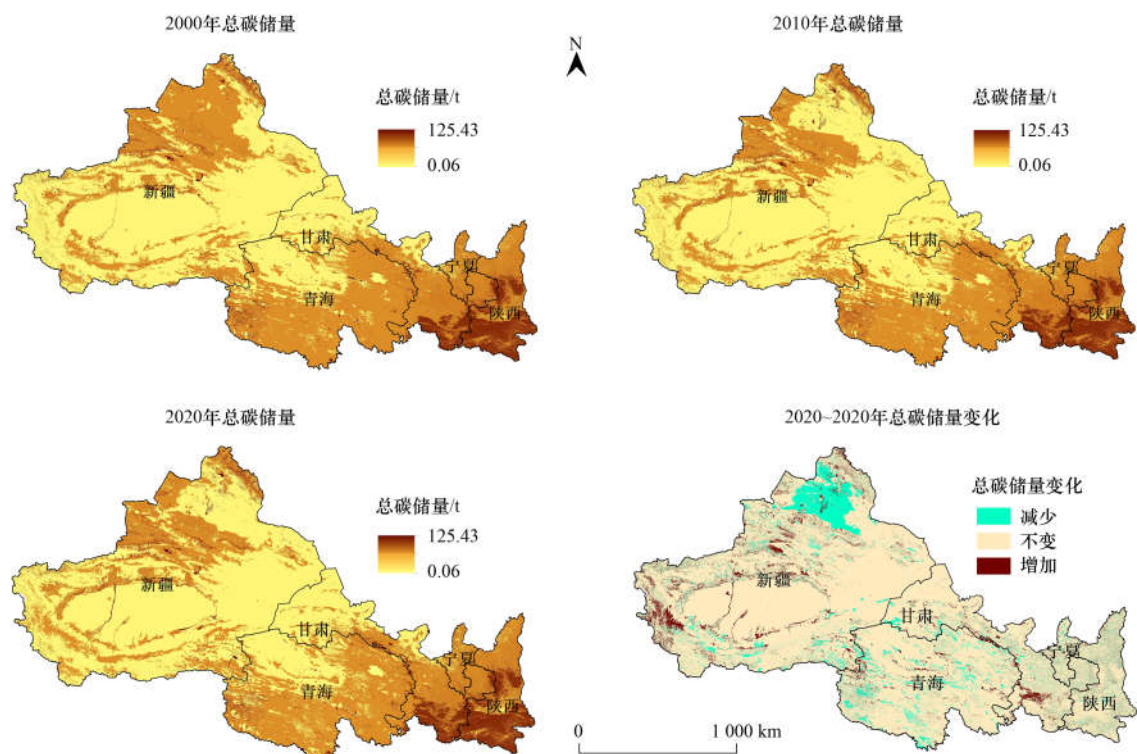


图5 总碳储量时空变化
Fig. 5 Temporal and spatial changes in total carbon storage

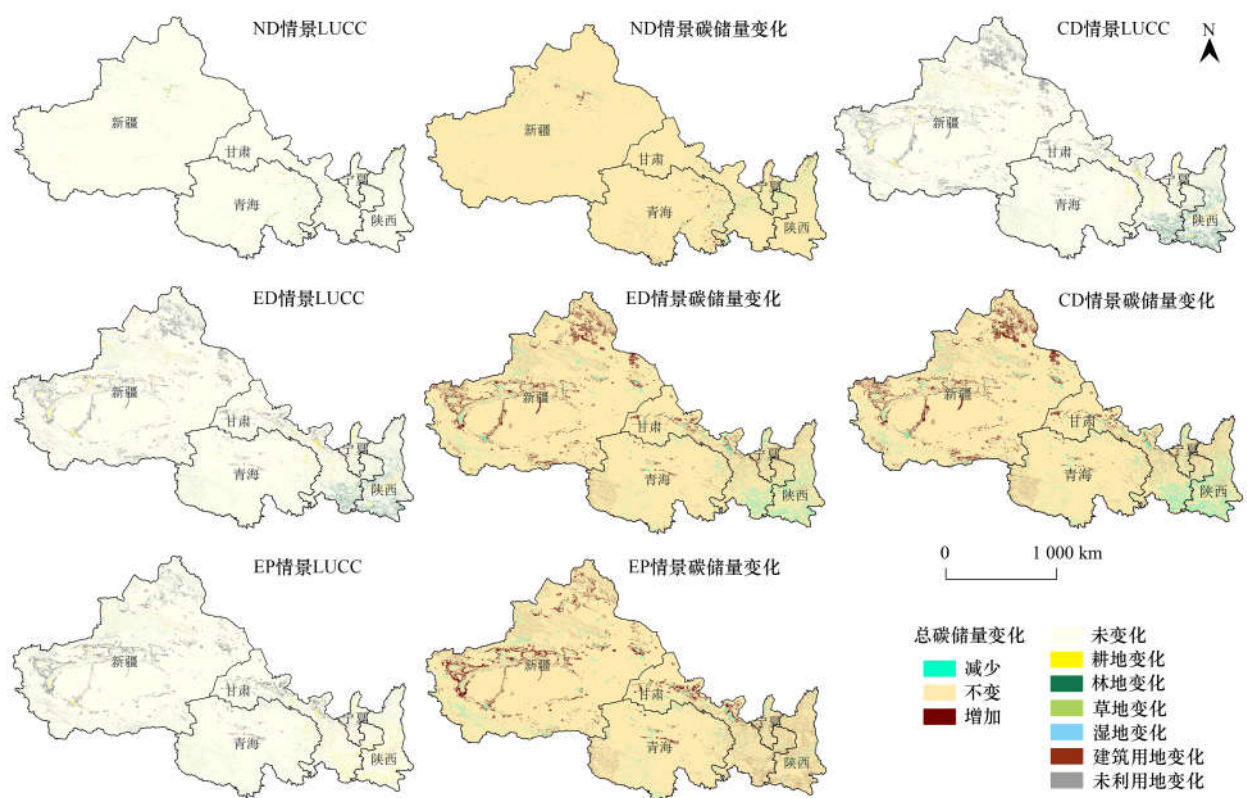


图6 不同情景下土地利用及碳储量空间变化
Fig. 6 Spatial change in land use and carbon storage under different scenarios

林地、水域和湿地面积大量增加,未利用地和草地面积依然减少,各类碳储量都呈现增加趋势,总碳储量增加 804.57×10^6 t。CD 情景下,中国西北地区经济

济和生态协调发展,草地和未利用地面积大量减少,其余土地利用类型面积增加,各类碳储量都呈现增加趋势,总碳储量增加了 817.89×10^6 t,该情景下的

表 7 2000 ~ 2020 年土地利用和碳储量变化矩阵¹⁾

Table 7 Land use and carbon stock change matrix from 2000 to 2020

2000 年		2020 年						
		耕地	林地	草地	水域	湿地	建筑用地	未利用地
耕地	A	2 379.95	55.57	114.90	8.46	1.96	117.99	11.33
	B	1 851.60	18.61	-7.42	-6.58	0.93	-84.91	-8.12
林地	A	49.30	1 502.42	149.76	8.71	4.62	1.72	40.76
	B	-16.51	1 671.90	-59.82	-9.69	0.65	-1.81	-42.87
草地	A	297.39	350.51	8 704.10	146.79	54.01	35.96	1 779.81
	B	19.21	139.99	6 209.50	-104.63	29.21	-23.55	-1 161.32
水域	A	7.07	2.66	60.87	552.28	6.84	0.69	126.75
	B	5.50	2.96	43.39	0.33	8.57	0.04	7.64
湿地	A	4.98	0.60	23.98	11.14	51.92	0.85	8.50
	B	-2.37	-0.08	-12.97	-13.96	65.12	-1.01	-10.14
建筑用地	A	19.40	0.27	1.99	0.31	0.04	82.60	1.06
	B	13.96	0.28	1.31	-0.02	0.04	4.82	0.00
未利用地	A	133.27	53.74	631.96	121.01	33.87	23.26	13 040.84
	B	95.57	56.53	412.35	-7.30	40.42	-0.06	794.19
总计	A	511.40	463.35	983.46	296.42	101.33	180.46	1 968.20
	B	115.36	218.29	376.84	-142.18	79.84	-111.30	-1 214.82

1) A 和 B 分别为不同土地利用类型 2000 ~ 2020 年的面积($\times 10^4 \text{ hm}^2$)和总碳储量($\times 10^6 \text{ t}$)变化量

表 8 2020 ~ 2030 年不同情景下土地利用和碳储量变化¹⁾

Table 8 Changes in land use and carbon storage under different scenarios from 2020 to 2030

项目	2020 年实际值	ND 变化值	ED 变化值	EP 变化值	CD 变化值
耕地面积	2 891.35	140.49	743.09	746.86	744.56
林地面积	1 965.77	11.13	314.77	399.95	405.98
草地面积	9 687.56	-321.86	-271.44	-331.94	-324.19
水域面积	848.71	46.83	135.47	223.91	169.70
湿地面积	153.25	31.48	67.85	65.99	66.34
建筑用地面积	263.06	116.78	192.75	147.90	192.50
未利用地面积	15 009.04	-24.84	-1 182.49	-1 252.68	-1 254.89
地上碳储量	479.68	4.25	69.08	85.35	86.71
地下碳储量	309.05	2.01	24.36	24.88	27.72
土壤碳储量	11 606.18	-72.02	649.09	676.93	686.04
死亡有机物碳储量	75.32	2.63	16.65	17.42	17.43
总碳储量	12 470.23	-63.12	759.19	804.57	817.89

1) 正数、0 和负数分别为面积($\times 10^4 \text{ hm}^2$)和碳储量($\times 10^6 \text{ t}$)增加、不变和减少

中国西北地区碳储量高于其它情景。

3 讨论

3.1 模型的优势与局限性

目前,对于 LUCC 与碳储量的综合研究主要是基于模型模拟^[39],将增加区域碳储量纳入土地利用优化过程通常需要多个模型集成来共同完成,集成模型在探索区域陆地生态系统结构和功能方面具有很大的优势,同时也是土地利用规划的重要工具^[16]. 本文构建的 GMMOP-PLUS-InVEST 模型能够克服单一模型的缺陷,它以提高区域碳储量为目标,通过设定约束条件,充分将经济和生态因素纳入未来土地利用数量结构和空间布局优化过程,对区域经济和生态进行了权衡,为土地利用决策提供了新的视角. 需要注意的是该模型在实际的土地利用优化过程中还需要与当地的土地利用规划政策相结

合^[40],在碳储量估算中应该充分考虑各种土地利用类型碳密度年际变化对碳储量估算的影响,虽然基于以往的研究结果可以看出区域碳密度数据年度变化较小,对大尺度陆地生态系统碳储量估算无显著影响^[28,41],但利用年际实测数据会极大提高模型估算碳储量的精度. 本文利用 GMMOP-PLUS-InVEST 模型对中国西北地区未来土地利用进行了优化,优化情景下的碳储量均大于 ND 情景,特别是对区域经济发展和生态保护进行权衡后的 CD 情景碳储量达到了最大值,这足以表明该模型在解决未来多目标土地利用优化及碳储量估算问题时具有很好的性能,能够成为探索未来陆地生态系统结构和功能的有利工具.

3.2 中国西北地区碳储量演变机制

LUCC 是生态系统对人类活动的响应^[42],在全球范围内 LUCC 正在加剧陆地生态系统的碳损

失^[43],2000~2020 年中国西北地区草地面积大量转换为未利用地导致总碳损失达到了 $1\,161.32 \times 10^6\text{ t}$ (表 7),尤其在新疆的西北部地区出现大规模由草地退化引起的碳储量减少现象,这与 Zhang 等^[44]研究的结果一致,主要原因是在全球性气候变暖的情况下,该地区气候变暖,降水量减少,持续干旱,草原生物灾害发生十分频繁,再加上过度的放牧使得草地受到严重破坏,大面积草地退化成为未利用地使得总碳储量下降,预计到 2030 年 ND 情景下的中国西北地区碳储量还会继续减少.然而,未来的碳储量在同一地区的不同土地利用优化情景之间存在显著差异,2030 年中国西北地区 EP 情景下的碳储量远大于 ED 情景,主要原因是国家在西北地区大力实施了退耕还林、天然林保护、退牧还草和耕地保护等一批重点生态保护工程^[45],极大地减缓了碳损失速率.在 EP 情景下即使在黄土高原和西北沙漠绿洲交错带地区,生态保护政策也能明显地增加区域碳储量^[46] (图 6),所以生态保护政策是增加陆地生态系统碳储存的重要保障^[47].但是,生态保护政策的严格实施必定会与经济的快速发展需求相矛盾,而土地利用优化是权衡这一矛盾的重要手段,如 CD 情景下,中国西北地区以生态和经济协调发展为目标,耕地、林地和湿地面积快速增长,草地退化速率减慢,碳储量达到最大值.对于西北地区来说,土地利用优化过程中增加植被覆盖度是提升碳储量的

关键,据以往的研究表明,中国西北地区的土壤碳密度仅占全国平均水平的 23.65%,但土壤碳密度会随着植被覆盖度的增加随之增加^[48];不同土地利用类型对碳储量的贡献也具有明显的差异,在优化情景下,增加植被覆盖度被作为优化目标纳入土地利用优化之中,使得各类碳储量均大幅度增加,所以植被覆盖度的增加能够加快提升区域碳储量.但是,中国西北地区常年干旱少雨,生态环境脆弱,自然生长的草木植被易受到水资源的约束,植被退化现象一直存在^[49],未来水资源仍然是制约中国西北地区碳储量增加的重要因素.

3.3 中国西北地区可持续发展策略

不同土地利用结构的碳储量、生态价值和经济价值差异性显著(表 9),权衡区域经济、生态和碳储量,制定土地利用优化方案,是保证西北地区可持续发展的重中之重.在 ED 情景下,经济价值达到最大,大规模的经济增长增加了土地资源的消耗,建筑用地大规模扩张导致生态系统服务能力下降^[50],总碳储量和生态价值都低于 EP 情景;EP 情景下,严格的生态保护政策控制了建筑用地增长,耕地和林地面积大幅度增加,生态价值达到最大值,但是经济价值低于 ED 情景;CD 情景下,经济和生态协调发展,耕地和林地面积增加,草地面积退化减缓,总碳储量和总价值均大于其它情景,这是最优的发展模式.

表 9 各情景的碳储量和价值¹⁾
Table 9 Carbon storage and value of each scenario

土地利用结构	总碳储量 $\times 10^6/\text{t}$	生态价值 $\times 10^8/\text{元}$	经济价值 $\times 10^8/\text{元}$	总价值 $\times 10^8/\text{元}$
ND 情景	12 407.11	42 399.82	151 690.08	194 089.90
ED 情景	13 229.41	45 378.01	180 477.15	225 855.16
EP 情景	13 274.80	46 278.55	166 038.92	212 317.47
CD 情景	13 288.12	45 920.15	180 399.66	226 319.81

1) 总价值为生态价值和经济价值之和

综合优化情景的发展模式,未来中国西北地区可持续发展策略如下:①科学制定土地利用规划方案.土地利用规划的目的在于合理利用土地资源,促进经济生态协调稳定发展,它是土地利用规划的核心内容,CD 情景下的碳储量和总价值均高于其它情景,该情景的优化方案可以为西北地区土地利用规划提供科学参考.②严格实施生态保护政策.政策需要加强草地、林地和耕地的保护,防止草地退化,提倡退耕还林,提高植被质量,优化作物类型,生态的良性发展是提高区域碳储量和保证可持续发展的重要手段.③加快中国西北地区的经济转型.积极探索绿色产业发展,优化农业生产模式,大力生产生态产品,科学布局城镇工业生产空间,形成绿色低碳和安

全高效的经济发展模式.

4 结论

(1)2000~2020 年,中国西北地区土地利用变化具体特征为草地在新疆西北部地区大量转换成未利用地,总面积减少了 $1\,680.99 \times 10^4\text{ hm}^2$,耕地、林地、水域、湿地、建筑用地和未利用地面积分别增加了 201.19×10^4 、 208.47×10^4 、 91.54×10^4 、 51.30×10^4 、 157.40×10^4 和 $971.09 \times 10^4\text{ hm}^2$,建筑用地扩张最为剧烈.

(2)2000、2010 和 2020 年中国西北地区总碳储量分别为 $13\,148.20 \times 10^6$ 、 $12\,558.70 \times 10^6$ 和 $12\,470.23 \times 10^6\text{ t}$,2000~2020 年中国西北地区总碳

储量、土壤碳储量和地下碳储量显著减少,死亡有机碳储量和地上碳储量却略有增加,总碳损失为 677.97×10^6 t,碳储量减少主要是耕地、林地、草地和湿地变化导致的,其中草地退化是碳储量减少的主要因素。

(3)2020~2030年中国西北地区不同情景下土地利用和碳储量变化具有明显的差异,ND情景下草地面积继续减少,总碳储量减少了 63.12×10^6 t,ED、EP和CD优化情景下总碳储量分别增加 759.19×10^6 、 804.57×10^6 和 817.89×10^6 t,CD情景是最优的发展模式。

参考文献:

- [1] Sokolov Y I. Risks of global climate change[J]. *Issues of Risk Analysis*, 2021, **18**(3): 32-45.
- [2] Hopf H, Krief A, Matlin S A, *et al.* Climate change: reasons, requirements, and realities[J]. *Nachrichten aus der Chemie*, 2022, **70**(3): 11-14.
- [3] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, **52**(6): 1010-1020.
- Piao S L, He Y, Wang X H, *et al.* Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: methods, progress and prospects[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(4): 641-651.
- [4] 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, 875.
- 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 Chinese Academy of Sciences*, 2015, **30**(6): 848-857, 875.
- [5] Wang K, Li X, Lyu X, *et al.* Optimizing the land use and land cover pattern to increase its contribution to carbon neutrality[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(19): 4751-4771.
- [6] 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.
- [7] Foley J A, DeFries R, Asner G P, *et al.* Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, **309**(5734): 570-574.
- [8] Wang G Z, Han Q, De Vries B. The multi-objective spatial optimization of urban land use based on low-carbon city planning[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107540.
- [9] Friedlingstein P, Jones M W, O'Sullivan M, *et al.* Global carbon budget 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2019, **11**(4): 1783-1838.
- [10] Sun W L, Liu X H. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China[J]. *Forest Ecosystems*, 2020, **7**(1): 4.
- [11] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(4): 811-841.
- [12] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach[J]. *Journal of Biogeography*, 1995, **22**(4-5): 815-835.
- [13] 陈耀亮, 罗格平, 叶辉, 等. 1975-2005年中亚土地利用/覆被变化对森林生态系统碳储量的影响[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(3): 397-408.
- Chen Y L, Luo G P, Ye H, *et al.* Sources and sinks of carbon caused by forest land use change from 1975 to 2005 in central Asia[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(3): 397-408.
- [14] 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.
- [15] Wang Z, Zeng J, Chen W X. Impact of urban expansion on carbon storage under multi-scenario simulations in Wuhan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(30): 45507-45526.
- [16] Wang Y, Li X M, Zhang Q, *et al.* Projections of future land use changes: multiple scenarios-based impacts analysis on ecosystem services for Wuhan city, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, **94**: 430-445.
- [17] Liu Y L, Tang W, He J H, *et al.* A land-use spatial optimization model based on genetic optimization and game theory[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, **49**: 1-14.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Zhao X Q, Li S N, Pu J W, *et al.* Optimization of the national land space based on the coordination of urban-agricultural-ecological functions in the Karst areas of southwest China[J]. *Sustainability*, 2019, **11**(23), doi: 10.3390/su11236752.
- [21] Subedi P, Subedi K, Thapa B. Application of a hybrid cellular automaton-Markov (CA-Markov) model in land-use change prediction: a case study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida[J]. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **1**(6): 126-132.
- [22] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, *et al.* Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model[J]. *Environmental Management*, 2002, **30**(3): 391-405.
- [23] 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**, doi: 10.1016/j.landurbplan.2017.09.019.
- [24] 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.compenurbsys.2020.101569.
- [25] 李哲, 丁永建, 陈艾姣, 等. 1960—2019年西北地区气候变

- 化中的 Hiatus 现象及特征[J]. 地理学报, 2020, **75**(9): 1845-1859.
- Li Z, Ding Y J, Chen A J, *et al.* Characteristics of warming hiatus of the climate change in Northwest China from 1960 to 2019[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(9): 1845-1859.
- [26] 孙才志, 魏亚琼, 赵良仕. 干旱区水—能源—粮食纽带系统协同演化——以中国西北地区为例[J]. 自然资源学报, 2022, **37**(2): 320-333.
- Sun C Z, Wei Y Q, Zhao L S. Co-evolution of water-energy-food nexus in arid areas: Take Northwest China as an example[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(2): 320-333.
- [27] Chen Y H, Wang J, Xiong N N, *et al.* Impacts of land use changes on net primary productivity in urban agglomerations under multi-scenarios simulation[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(7), doi: 10.3390/rs14071755.
- [28] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, *et al.* Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(16): 4021-4026.
- [29] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, **29**(6): 1018-1029.
- Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, **29**(6): 1018-1029.
- [30] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: a regional carbon sequestration study[J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, **89**: 67-76.
- [31] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, **2**(1): 34-42.
- Chen G S, Yang Y S, Liu L Z, *et al.* Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, **2**(1): 34-42.
- [32] Zhang H B, Zhang X H. Land use structural optimization of Lilin based on GMOP-ESV[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, **21**(S3): s738-s742.
- [33] 曹帅, 金晓斌, 杨绪红, 等. 耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J]. 自然资源学报, 2019, **34**(6): 1171-1185.
- Cao S, Jin X B, Yang X H, *et al.* Coupled MOP and GeoSOS-FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan district[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(6): 1171-1185.
- [34] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, **23**(5): 911-919.
- Xie G D, Zhen L, Lu C X, *et al.* Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, **23**(5): 911-919.
- [35] Dai X, Wang L C, Huang C B, *et al.* Spatio-temporal variations of ecosystem services in the urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **115**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106394.
- [36] Liu Y F, Ming D P, Yang J Y. Optimization of land use structure based on ecological GREEN equivalent[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2002, **5**(4): 60-67.
- [37] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置——以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J]. 生态学报, 2019, **39**(12): 4284-4298.
- Wang B S, Liao J F, Zhu W, *et al.* The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: a case study of land use simulation of urban agglomeration of the golden triangle of southern Fujian in 2030[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(12): 4284-4298.
- [38] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, **73**(5): 789-802.
- Liu J Y, Ning J, Kuang W H, *et al.* Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(5): 789-802.
- [39] Zhu G F, Qiu D D, Zhang Z X, *et al.* Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **127**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107770.
- [40] 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, **41**(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, **41**(10): 4052-4065.
- [41] 赫晓慧, 徐雅婷, 范学峰, 等. 中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(6): 2965-2976.
- Hao X H, Xu Y T, Fan X F, *et al.* Temporal and spatial variation and prediction of regional carbon storage in Zhongyuan urban agglomeration[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2965-2976.
- [42] Kalantari Z, Ferreira C S S, Page J, *et al.* Meeting sustainable development challenges in growing cities: coupled social-ecological systems modeling of land use and water changes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **245**: 471-480.
- [43] 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.
- [44] Zhang R P, Liang T G, Guo J, *et al.* Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-21089-3.
- [45] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, *et al.* China's response to a national land-system sustainability emergency[J]. *Nature*, 2018, **559**(7713): 193-204.
- [46] Liu Q, Yang D D, Cao L, *et al.* Assessment and prediction of carbon storage based on land use/land cover dynamics in the tropics: a case study of Hainan Island, China[J]. *Land*, 2022, **11**(2), doi: 10.3390/land11020244.
- [47] Standish R J, Prober S M. Potential benefits of biodiversity to Australian vegetation projects registered with the emissions reduction fund—is there a carbon-biodiversity trade-off? [J]. *Ecological Management & Restoration*, 2020, **21**(3): 165-172.
- [48] Zhang K, Dang H, Tan S, *et al.* Change in soil organic carbon following the 'grain-for-green' programme in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2010, **21**(1): 13-23.
- [49] Feng X M, Fu B J, Lu N, *et al.* How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**, doi: 10.1038/srep02846.
- [50] Li C, Wu Y M, Gao B P, *et al.* Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **132**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108328.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)