环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 45 卷　第 4 期
2024 年 4 月 15 日

目　次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ……杨清可，王磊，朱高立，李颖，范业婷，王雅竹（1869）
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ……郑琰，蒋雪梅，肖玉杰（1879）
基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ……张江艳（1888）
基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径：以南京某国家级开发区为例 ……李慧鹏，李荔，殷茵，何文太，宿杰，赵秋月（1898）
高校碳排放核算与分析：以北京A高校为例 ……曹睿，封莉，张立秋（1907）
北京市制造业减污降碳协同效应分析和驱动因素 ……俞珊，韩玉花，牟洁，张双，张增杰（1917）
碳排放权交易价格与全要素生产率：来自中国的证据 ……吴雪萍（1926）
中国城市$PM_{2.5}$和PM_{10}时空分布特征和影响因素分析 ……李江苏，段良荣，张天娇（1938）
2017~2021年苏皖鲁豫交界区域$PM_{2.5}$和O_3时空变化特征及影响因素 ……陈伟，徐学哲，刘文清（1950）
疫情管控期西安$PM_{2.5}$和O_3污染特征及成因分析 ……原晓红，张强，李琦，谢文豪，刘跃廷，樊亭亭，姜旭朋（1963）
苏南五市秋冬季$PM_{2.5}$化学组成特征和空间差异 ……冯蔚，丁峰，尚玥，谢鸣捷（1975）
湖北咸宁细颗粒物$PM_{2.5}$来源 ……罗怡，朱宽广，陈璞珑，田军，谢旻，战杨志豪，赵润琪（1983）
邢台氨减排对京津冀$PM_{2.5}$改善的溢出效益 ……边泽君，闻超玉，郎建垒，范晓菡，夏祥晨，周颖（1994）
聊城市冬季$PM_{2.5}$载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ……张敬巧，朱瑶，曹婷，燕丽，王淑兰，刘铮（2003）
高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ……郭淑政，叶春翔，林伟立，陈熠，曾立民，尹晴晴，刘雪莉（2011）
北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例：高新技术产业的环境影响 ……王洁，姚震，王敏燕，陈速敏，龙腾，王海林，李红，郭秀锐，郝江虹，聂磊（2019）
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ……雷丽娟，张懿，罗伊娜，张潇，冯淼（2028）
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险 ……葛林科，李璇艳，曹胜凯，郑金帅，张蓬，朱超，马宏瑞（2039）
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ……王亮，邓雪娇，王潇磊，李明，刘奕尧，娄亚敏，涂响，张坤锋（2054）
藏东多曲河流域锶富集水化学特征及控制因素 ……李敬杰，连晟，王明国，张智印，张涛（2067）
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ……张炎炎，辛存林，郭小燕，张博，陈宁，史延飞（2080）
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ……孟令华（2096）
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ……张子燕，伏永朋，王宁涛，谭建民，刘亚磊（2107）
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ……王晓燕，韩双宝，张梦南，尹德超，吴玺，安永会（2118）
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ……刘楠，陈盟，高东东，吴勇，王橦橦（2129）
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ……许万璐，范一凡，钱新（2142）
抚仙湖子流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ……王延杰，梁启斌，王艳霞，侯磊，陈奇伯，王伟，李晓琳，高俊淑（2150）
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 ……曲思彤，单苏洁，王崇铭，吴玲予，李大鹏，黄勇（2160）
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ……刘振海，张展华，袁语欣，朱盼盼，陈威，张彤（2171）
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ……孙漱玉，黄梦鑫，孔强，张焕新，刘继伟（2185）
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ……练建军，谢诗婷，吴培，孟冠华，陈波（2195）
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ……马锋锋，薛之一，赵保卫（2203）
土地利用影响下无定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ……郭善嵩，胡恩，丁一桐，张嘉渭，孙长顺，卢悦，潘保柱（2211）
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ……喻江，王淳，龙永，刘贵花，李春杰，范国权，于镇华（2223）
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ……刘双羽，蒙俊杰，邱小琮，周瑞娟，李霖（2233）
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ……郭有顺，余仲，郝文彬，孟凡刚（2246）
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ……胡健双，王燕，周政，汪雅琴，王秉政，李激（2259）
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ……郑亚平，张俊华，田惠文，朱航成，刘舒，丁亚鹏（2268）
基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ……叶淼，朱琳，刘旭东，黄勇，陈蓓蓓，李欢（2280）
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ……叶子壮，王松燕，陆潇，史多鹏，吕慎强，李嘉，杨泽宇，王林权（2292）
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ……王长远，马啸驰，郭德杰，刘新红，马艳，罗佳（2304）
土壤盐分变化对N_2O排放影响：基于Meta分析 ……黄艺华，余冬立，史祯琦，胡磊，潘永春（2313）
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ……郑慧玲，郑辉峰（2321）
基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ……张哲，时振钦，朱文博，孙梓欣，赵体侠，邓文萍，刘志强（2332）
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ……徐凤璟，黄懿梅，黄倩，申继凯（2342）
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ……赵宇航，殷浩凯，胡雪纯，解文艳，刘志平，周怀平，杨振兴（2353）
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 ……鲁泽让，陈佳钰，李智贤，李永梅，罗志章，杨锐，田明洋，赵吉霞，范茂攀（2363）
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ……周波，李晓光，童思陈，吕旭波，郭朝臣，雷坤（2373）
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ……张欣悦，肖启涛，谢晖，刘臻婧，邱银国，罗菊花，徐向华，段洪涛（2385）
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ……柳晓婉，刘杏认，高尚洁，李贵春（2394）
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ……马义淑，曹亚鑫，牛敏，张明罡，程曼，文永莉（2406）
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ……张佳琦，潘瑜春，高世臣，赵亚楠，景胜强，周艳兵，郜允兵（2417）
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 ……李军，李旭，李开明，焦亮，台喜生，臧飞，陈伟，脱新颖（2428）
西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ……张海琳，张雨，王顶，谢军，张跃强，张宇亭，王洁，石孝均（2440）
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ……廖泽源，李杰芹，沈智杰，李彩霞，罗程钟，梅楠，张成，王定勇（2450）
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ……魏洪斌，罗明，向垒，查理思（2461）
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ……刘龙宇，杨世利，赵黄诗雨，常凯威，余江（2473）
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ……张瑶，王天齐，牛硕，杨阳，陈卫平（2479）

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟

张哲[1], 时振钦[1,2,3], 朱文博[1,2,3*], 孙梓欣[1], 赵体侠[1], 邓文萍[1], 刘志强[1]

(1. 河南大学地理与环境学院, 开封 475004; 2. 河南大学区域发展与规划研究中心, 开封 475004; 3. 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004)

摘要: 在生态文明建设高质量的发展环境下, 探究国土空间规划视角下土地利用合理规划与碳减排关系有重大现实意义. 山地生态系统作为自然、社会和经济的综合生态系统, 对区域生态环境质量提高和可持续发展具有重要影响. 以河南省伏牛山区为研究对象, 采用InVEST与CA-Markov模型预测2000~2030年多情景下伏牛山生态系统碳储量的时空分布差异. 结果表明: ① 2000~2020年, 伏牛山地耕地和林地大面积减少, 水域和建设用地增加. 自然增长情景下耕地持续减少; 耕地保护情境下耕地面积减少速度得到有效缓解; 生态保护情景下, 林地草地面积得到了有效保护. ② 2000~2020年, 伏牛山地生态系统碳储量减少2.62×10^6 t; 自然增长情景下, 生态系统碳储量持续减少; 耕地保护情景稍有缓解; 生态保护措施有效缓解了碳损失. ③碳储量随海拔升高呈驼峰状变化, 随着坡度升高而呈现增加的趋势. 因此, 在未来伏牛山地区国土空间规划中, 可综合考虑生态保护与耕地保护情景, 在增加碳储量的同时也保证了粮食生产.

关键词: 土地利用; 生态系统碳储量; InVEST模型; 情景模拟; 伏牛山

中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2024)04-2332-10 **DOI:** 10. 13227/j. hjkx. 202306203

Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model

ZHANG Zhe[1], SHI Zhen-qin[1,2,3], ZHU Wen-bo[1,2,3*], SUN Zi-xin[1], ZHAO Ti-xia[1], DENG Wen-ping[1], LIU Zhi-qiang[1]

(1. College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Research Center of Regional Development and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China; 3. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Region, Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In the context of high-quality development of ecological civilizations, exploring the relationship between rational land use planning and carbon reduction from the perspective of territorial spatial planning has significant practical implications. Mountainous ecosystems, as comprehensive ecosystems encompassing nature, society, and economy, have a crucial impact on improving regional ecological environment quality and ensuring sustainable development. This study focused on the Funiu Mountains in Henan Province and utilized the InVEST and CA-Markov models to predict the spatio-temporal distribution differences in carbon stocks in the Funiu Mountain ecosystem from 2000 to 2030 under multiple scenarios. The results indicated the following: ① From 2000 to 2020, extensive reductions in cultivated land and forests occurred in the Funiu Mountains, whereas water construction and land use increased. Under the natural growth scenario, cultivated land continuously decreased, but this decrease was effectively mitigated under the farmland conservation scenario. Furthermore, the scenario of ecological protection effectively preserved the area of forests and grasslands. ② From 2000 to 2020, the carbon stock of the Funiu Mountain ecosystem decreased by 2.62×10^6 t. Under the natural growth scenario, the carbon stock continued to decline, whereas the farmland conservation scenario provided slight relief, and the implementation of ecological protection measures effectively alleviated carbon losses. ③ Carbon stock exhibited a hump-like change with increasing elevation, and it showed an increasing trend with higher slopes. Therefore, in future territorial spatial planning in the Funiu Mountains, it is advisable to comprehensively consider scenarios of ecological protection and cultivated land protection, thereby simultaneously increasing carbon storage and ensuring grain production.

Key words: land use; ecosystem carbon storage; InVEST model; scenario simulation; Funiu Mountains

为缓解温室气体排放带来的负面影响, 我国提出了“双碳”目标. 碳储存是自然生态系统提供的重要服务[1], 植被储存了大量的碳, 从而减少了碳排放对全球气候变化的影响[2,3]. 据统计, 自工业革命以来, 因土地利用变化引起的碳排放约占人类活动引发的碳排放量的30%[4]. 因此, 分析与预测土地利用变化与碳储量的关系, 合理进行国土空间规划对于生态环境保护和可持续发展具有重要意义.

生态系统服务作为人类生存和发展的基础, 创造和维持着地球生命系统[5]. 自然资源利用和管理方式差异会导致生态系统功能发生变化, 通过对不同区域生态系统服务之间的权衡关系进行研究发现, 不同的生态系统服务在同一区域形成相互权衡或协同的关系不同, 同一服务在不同区域之间的关系也不同[6,7]. Jopke等[8]的研究表明, 生态系统服务中的固碳服务在大尺度上多表现为协同关系, 而在中小尺度多表现为权衡关系[9]. 不同尺度环境的环境条件或生态系统服务供给与需求的空间不匹配是导致差

收稿日期: 2023-06-25; **修订日期:** 2023-07-14
基金项目: 河南省科技研发专项(222300420130 K22029Y)
作者简介: 张哲(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为伏牛山区生态系统功能评估, E-mail: zhangz21@henu. edu. cn
* 通信作者, E-mail: zhuwenbo@henu. edu. cn

异的主要原因[10]. 山地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分，其碳储量空间变异大，物质迁移快，生物量和物种多样性丰富，因此山地生态系统碳储量的分布特征和控制因素不同于低地生态系统. 随着人口的增长，对山地生态系统服务的需求不断增加[11~14]，而土地利用/土地覆被变化的加剧也伴随着许多生态系统服务的变化. 例如，Martínez等[15]评估了墨西哥安提拉瓜盆地高原云雾森林地区土地利用变化对生态系统服务的影响. 结果表明，1973~2003年云雾林面积减少了50%，生态系统服务价值下降了24%. Lemenih等[16]分析了埃塞俄比亚林地管理与胶和树脂生产系统的变化，以及影响管理和生产系统的社会经济和生物物理因素的变化，并在研究区构建了森林管理措施对森林生态系统服务的影响曲线. 山地生态系统作为自然、社会和经济的综合生态系统，将面临经济发展与生态保护之间的矛盾和挑战[17]. 因此，加强促进山地生态系统服务功能可持续利用的研究是当前政府和学术界关注的热点问题.

样地实测、3S遥感技术和模型模拟等方法是对生态系统碳储量进行测算的常用方法. 样地实测法精度较高，但仅适用于范围较小的区域，在中大尺度实施难度较大，且无法反映碳储量的动态变化[18,19]. 如董凌勃等[20]通过测定土壤样品计算黄土高原碳储量，结果表明退耕还草政策的实施使得黄土高原碳储量显著提升. 遥感反演可以进行大尺度下碳储量的估算，但多用于计算特定物种的生物量. 如黄绍霖等[21]通过野外样地调查和ALOS遥感影像对样地马尾松林进行碳储量遥感估算，为我国森林碳汇研究提供马尾松林的基础数据. 模型法能够模拟、预测和评估全球、国家和区域等不同尺度下的碳储量[22,23]，赵俊芳等[24]基于遥感数据和FORCCHN模型模拟了20多年来东北地区森林生态系统净初级生产力(NPP)的时空分布格局及演变趋势，结果表明该地区森林生态系统碳储量增加显著. 生态系统服务评估与权衡(InVEST)模型应用最为广泛. 国内外相关学者如刘洋等[25]、朱文博等[26]、Piyathilake等[27]和Babbar等[28]均采用InVEST模型评估潜在碳储量，验证了InVEST模型的准确性，为生态系统服务功能优化、区域生态安全和地区可持续发展提供依据. PLUS、FLUS和Markov模型等是土地利用模拟最常用的模型. CA-Markov模型因较强的空间变化模拟和长时期预测的能力，具有较高的精度和科学性[29]，已被广泛应用于国土空间规划模拟. Wang等[30]使用CA-Markov方法对康涅狄格河流域29个城镇2001~2011年的土地利用/土地覆盖变化进行模拟，结果显示预测与实测数据具有高度一致性.

伏牛山位于秦岭-大巴山一线的最东端，处在中国南北过渡带边缘，地貌复杂，资源丰富，对于生物物种的迁移具有非常重要的意义，是维护河南省东部平原生态平衡的天然屏障. 随着该地区经济发展，城镇化进程加快，土地利用覆被剧烈变化[31]，引起了生态系统碳储量和气候调节功能变化，影响人类社会经济发展[32,33]. 本研究结合InVEST和CA-Markov模型，分析不同土地利用情景下伏牛山地生态系统碳储量时空分布差异，探究土地利用变化及地形因素对碳汇的影响，以期为伏牛山区国土空间规划提供决策依据，也为提高生态系统碳储量提供科学建议.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

伏牛山(110°30′~113°30′E、32°45′~34°20′N)位于河南省西部(图1)，是秦岭延伸到河南省境内的一条主要山脉. 地势西高东低，海拔高度介于60~2 200 m，地形起伏较大，面积约2万km². 伏牛山脉处在我国亚热带向暖温带的过渡带，区域内气候类型复杂，具有四季分明、雨热同期和自然灾害复杂、频繁的特点. 年均温13.6~15.1℃，年均降水量700~1 000 mm，植被类型属暖温带落叶阔叶林和北亚热带常绿落叶混交林过渡类型，山地垂直带谱明显，是典型的生态地理环境脆弱地带.

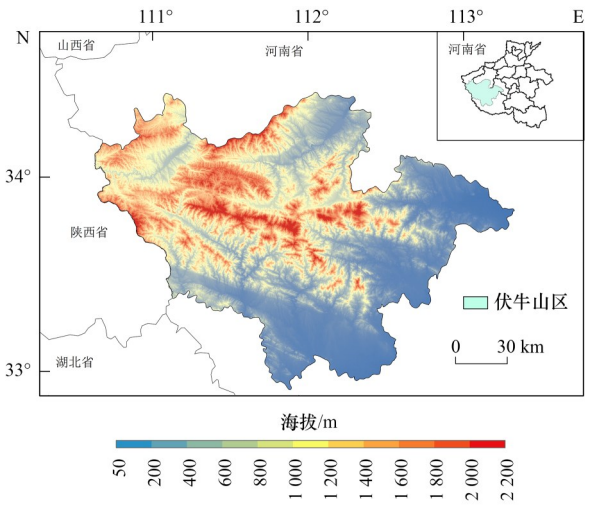

图1　伏牛山地理位置及地形分布示意

Fig. 1　Location and topographic map of Funiu Mountains

1.2　数据来源

伏牛山区域生态系统碳储量计算所需的数据来源与获取方法见表1. 对获取的原始数据进行整理，将不同分辨率栅格数统一重采样为30 m，坐标系为Krasovsky_1940_Albers.

表 1 土地利用驱动因子及数据来源

Table 1 Land use driving factors and data sources

因素	数据类型	分辨率/m	数据来源与获取
自然因素	2000~2020年均降水	1 000	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
	2000~2020年均气温	1 000	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
	河流	1 000	黄河下游科学数据中心(http://henu.geodata.cn)
	2000、2010和2020年土地利用/覆被	30	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	DEM	30	地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
	坡度	30	ArcGIS10.8坡度工具获取
社会因素	2000、2010和2020年道路数据	1 000	黄河下游科学数据中心(http://henu.geodata.cn)
	2000、2010和2020年人口	1 000	黄河下游科学数据中心(http://henu.geodata.cn)

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化模拟

IDRISI软件是依托克拉克大学研究与开发的遥感与地理信息系统结合应用的系统，包括空间分析、土地利用变化分析和元胞自动机土地动态变化等300多个专业模块，本研究基于IDRISI 17.0软件对伏牛山地土地利用进行预测.本实验中以2000年和2010年土地利用数据为首期和末期数据，误差设置为0.15，模拟2020年土地利用变化情况，并通过CROSSTAB工具对模拟结果进行验证，结果表明模拟具有较高的可信度.通过对不同土地利用类型的转化率进行调控，生成新的土地利用图集对2030年土地利用类型进行预测.本研究共设定了3种情景.

(1)自然增长情景(S1) 基于2000~2020年土地利用变化转移矩阵为土地适宜性图集，不加限制条件，模拟自然状态下2030年土地利用情况.

(2)耕地保护情景(S2) 基于国家耕地保护政策，通过多标准评价模块mce(multi-criteria evaluation)降低耕地转出率，即通过限制建设用地的扩张速度，控制耕地向林草地等其它用地类型的转换，制作土地利用适宜性图集，预测研究区耕地保护情景下的土地利用.

(3)生态保护情景(S3) 基于生态环境高质量发展战略.通过多标准评价模块mce制作土地利用适宜性图集，即限制研究区内林地和草地的转出并且降低建设用地转入概率，预测研究区生态保护情景下的土地利用.

1.3.2 生态系统碳储量模拟

InVEST模型能够模拟不同土地覆被情景下生态服务系统物质量的变化，评估结果的表达更为直观[34].InVEST模型将生态系统的碳储量划分为地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳这4个部分，由于凋落物碳密度所占比例较小，本研究默认其为0.其计算公式如下：

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil}$$

式中，C_{total}为生态系统总碳储量(t·hm^{-2})，C_{above}、C_{below}和C_{soil}分别表示地上生物碳、地下生物碳和土壤碳(t·hm^{-2}).

本研究采用InVEST 3.11.0模型估算伏牛山地生态系统碳储量.其中，耕地、林地和草地碳密度数据来自李克让等[35]和解宪丽等[36]的研究结果，并结合不同地类的根茎比修正[37,38]；水域、建设用地和未利用地碳密度数据根据揣小伟等[39]的研究得到.根据陈光水等[40]和Alam等[41]研究中的碳密度修正公式进一步修正，最后通过张静静[42]和刘宜锋等[43]对伏牛山地的研究结果对比，得到更为准确的碳密度数据(表2).

表 2 伏牛山地各土地利用类型碳密度/t·hm^{-2}

Table 2 Carbon density of different land use types in Funiu Mountains /t·hm^{-2}

类型	C_{above}	C_{below}	C_{soil}
耕地	2.02	0.76	99.97
林地	47.25	14.46	117.72
草地	1.2	2.46	92.13
水域	0.04	0	57.28
建设用地	0.60	0	51.55
未利用地	0.01	0	52.68

2 结果与分析

2.1 伏牛山地土地利用动态变化

根据2000、2010和2020年土地利用数据的空间分布表明(表3)，林地、耕地和草地是伏牛山地区的主要用地类型，分别约占研究区土地面积的57%、29%和9%，3类土地利用类型面积约占研究区总面积的95%.建设用地、水域和未利用地面积较小，占研究区总面积的5%左右，且20年来各地类所占比例变化不大.

表4为2000~2020年伏牛山地土地利用转移矩阵，研究时段耕地面积发生剧烈变化，共减少102.62 km^2，占土地变化面积的81.17%，主要转变为建设用地和水域；林地转出面积大于转入面积，减少7.09 km^2，主要转变为建设用地.草地面积减少6.80 km^2，主要转变为水域和建设用地；建设用地和

表 3　2000～2020 年伏牛山土地利用面积及比例

Table 3　Area and proportion of land use in Funiu Mountains from 2000 to 2020

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
耕地	6 264.17	28.86	6 209.77	28.61	6 161.23	28.39
林地	12 513.34	57.66	12 508.47	57.64	12 506.25	57.63
草地	1 899.79	8.75	1 893.86	8.73	1 892.98	8.72
水域	454.27	2.09	495.68	2.28	498.44	2.30
建设用地	565.20	2.60	588.86	2.71	637.26	2.94
未利用地	5.09	0.02	5.23	0.02	5.23	0.02

水域转入面积大于转出面积，分别增加 72.09 km² 和 44.29 km²，且转入地类绝大部分来自耕地；未利用地转入面积大于转出面积，增加 0.14 km²，增幅为 0.11%；总体来看，伏牛山地土地利用变化呈现出耕地、林地和草地减少，建设用地、水域和未利用地增加的特点.

表 4　2000～2020 年伏牛山地土地利用转移矩阵/km²

Table 4　Land use transfer matrix in Funiu Mountains from 2000 to 2020/km²

2000 年	2020 年							
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计	转出总计
耕地	6 156.49	0.05	0.22	41.43	65.65	0.00	6 263.85	107.36
林地	1.28	12 505.92	0.03	1.43	4.55	0.14	12 513.34	7.42
草地	0.09	0.00	1 892.67	4.82	2.20	0.00	1 899.79	7.12
水域	3.26	0.27	0.06	450.25	0.31	0.00	454.16	3.90
建设用地	0.11	0.00	0.00	0.51	564.55	0.00	565.18	0.62
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.09	5.09	0.00
总计	6 161.23	12 506.25	1 892.98	498.44	637.26	5.23	21 701.40	—
转入总计	4.74	0.33	0.31	48.19	72.71	0.14	—	126.42

1)“—”表示无数据

2.2　伏牛山地土地利用变化情景分析

图 2 和表 5 展示了伏牛山地区不同情景下的土地利用模拟结果及各地类变化差值. 可见，伏牛山地土地利用动态变化差异不显著. 耕地面积在自然增长和生态保护情景下依旧呈减少态势，分别减少 102.61 km² 和 116.61 km²，在耕地保护情景下得到了有效控制，仅减少 17.78 km²；在生态保护情景下林地得到了有效的保护，面积达到 12 550.19 km²；草地面积在自然增长情景和耕地保护情景下均呈减少趋势，分别减少了 11.87 km² 和 27.99 km²，在生态保护情景下扩张速度较缓；建设用地面积在 3 种情景下均呈扩张态势，由于耕地保护情景和生态保护情景分别加强了对耕地和林草地的保护，限制建设用地的转入，因此两种情景下建设用地的扩张速度得到有效遏制，面积分别增加 63.77 km² 和 75.02 km²；受 2000~2020 年水域变化影响，不同情景下水域面积呈持续扩张态势；未利用地面积在 3 种情景下基本维持不变，分别为 7.52、7.52 和 7.49 km².

2.3　伏牛山地生态系统碳储量、碳密度动态变化

通过 InVEST 模型 Carbon 模块计算（图 3），伏牛山地 2000 年和 2020 年生态系统平均碳密度分别为 144.44 t·hm⁻² 和 143.56 t·hm⁻²；碳储量分别为

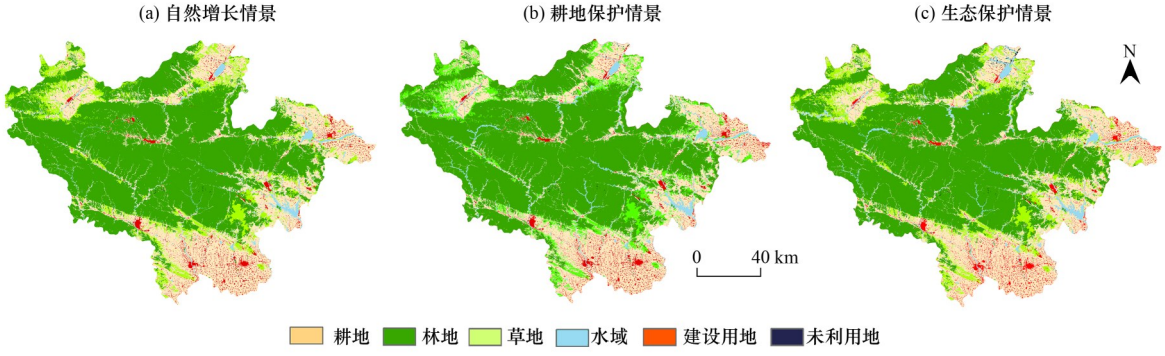

图 2　2030 年伏牛山地区不同情景下土地利用模拟结果

Fig. 2　Simulation results of land use under different scenarios in Funiu Mountains area in 2030

表 5 2030 年伏牛山区 3 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/km^2

Table 5 Land use area in Funiu Mountains in 2030 under three scenarios and its difference with the land use area in 2020/km^2

土地利用类型	自然变化情景		耕地保护情景		生态保护情景	
	2030 年	2020~2030 年	2030 年	2020~2030 年	2030 年	2020~2030 年
耕地	6 058.62	−102.61	6 143.46	−17.78	6 044.62	−116.61
林地	12 495.40	−10.85	12 426.90	−79.34	12 550.19	43.95
草地	1 881.12	−11.87	1 864.99	−27.99	1 893.56	0.57
水域	557.70	59.26	546.23	47.79	567.70	69.26
建设用地	701.04	63.77	712.29	75.02	637.84	0.57
未利用地	7.52	2.29	7.52	2.29	7.49	2.26

3.13×10^8 t 和 3.10×10^8 t. 期间，伏牛山地生态系统平均碳密度降低了 0.88 t·hm^{-2}，碳储量减少了 2.62×10^6 t. 在自然增长情景下，伏牛山地生态系统碳密度和碳储量仍快速下降，碳储量和碳密度分别为 3.09×10^8 t 和 143.11 t·hm^{-2}. 相比较 2020 年共减少 6.47×10^5 t 和 0.46 t·hm^{-2}；耕地保护情境下，生态系统碳密度、碳储量较自然增长情景有所提升，但与 2020 年仍呈下降趋势，碳储量和碳密度预测值分别为 3.10×10^8 t 和 143.11 t·hm^{-2}，相较于 2020 年，该情景下碳储量和碳密度分别减少 4.50×10^5 t 和 0.39 t·hm^{-2}；生态保护情景下，2030 年伏牛山地生态系统碳储量预测为 3.10×10^8 t，碳密度为 143.20 t·hm^{-2}. 相较于 2020 年碳储量和碳密度分别减少 3.92×10^5 t 和 0.36 t·hm^{-2}，与自然增长情景相比碳储量损失幅度显著减少. 由此可见，2020~2030 年在自然增长情景下，伏牛山碳储量将持续下降，在耕地保护和生态保护情景下下降速度减缓，碳损失得到有效控制.

为了更清楚地反映伏牛山地区碳储量的空间变化，将碳储量增加量大于 5% 的区域定义为增长区域，减小量大于 5% 的区域定义为碳储量减少区域，将变化值介于±5% 之间的定义为基本不变区域. 由表 6 可知，2000~2020 年，大部分地区的碳储量基本不变，占总面积的 99.42%；碳储量减少的面积仅占总面积的 0.56%；碳储量增加的面积占总面积的 0.02%. 模拟情景中碳储量变化区域较剧烈，碳储量变化的区域占总面积的 1.53%、1.31% 和 1.25%，以碳储量减少为主. 变化区域的原因主要为土地类型由碳密度较高的林地、草地转变为以碳源为主的建设用地，造成部分地区碳储量降低；而土地利用类型由碳源地转变为碳汇地会使碳密度升高，其中碳汇地的流失面积大于增加面积，造成研究区整体碳储量的下降.

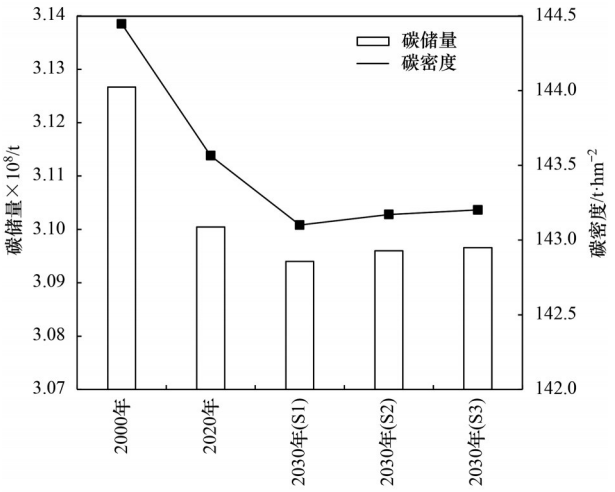

图 3 2000、2020 和 2030 年各情景下伏牛山区碳储量和碳密度变化

Fig. 3 Changes in carbon storage and carbon density under different scenarios in Funiu Mountains in 2000, 2020, and 2030

表 6 2000 ~ 2020 年和 2020 ~ 2030 年不同情景下碳储量变化统计

Table 6 Statistics on carbon storage changes under different scenarios from 2000 to 2020 and from 2020 to 2030

研究年份	减少 (<−5%)		不变 (±5%)		增加 (>5%)	
	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%
2000~2020	121.75	0.56	21 575.79	99.42	3.85	0.02
2020~2030(S1)	316.69	1.46	21 369.02	98.47	15.69	0.07
2020~2030(S2)	279.15	1.29	21 416.18	98.69	6.06	0.03
2020~2030(S3)	257.02	1.18	21 430.13	98.75	14.24	0.07

2.4 地形因子对伏牛山地碳储量的影响

海拔和坡度是分析地形因子的两大指标，随着海拔的抬升温度变化影响着植被的生长，坡度的变化也影响着植被覆盖和生物生存，进而改变山地生态系统碳储量，因此选取该因素分析对伏牛山地碳储量的影响.

将海拔高度以每 200 m 为一个单元对碳储量进行统计，通过对不同情景下海拔高度碳密度统计(图 4)与各海拔碳储量和面积(图 5)可以看出：随着海拔抬升，伏牛山地生态系统碳密度呈现逐渐增

加的趋势，碳储量和海拔区间面积均呈现驼峰状变化趋势.低海拔时，用地类型主要为生态系统碳密度较低的建设用地、耕地等，并且其面积较小，碳储量也较少.海拔200~400 m时，碳密度随海拔迅速增大，同时该海拔段面积最大，因此碳储量大.此后碳储量仍呈现迅速增加的趋势，主要原因是，该区域温度适宜、降水丰富，主要以耕地、林地、草地等用地类型，植被覆盖率较高，受人类活动影响较小，所占面积也逐渐增大，因此碳储量丰富；海拔达到1 000 m时单元碳储量达到最大值，低于该海拔面积约占到75%，约占总碳储量的69%.高海拔时用地类型主要为碳密度的林地，植被类型多样物种丰富，生态系统碳密度持续增大并逐渐增加到最高值，但单元面积逐渐减小，因此碳储量相应减少.

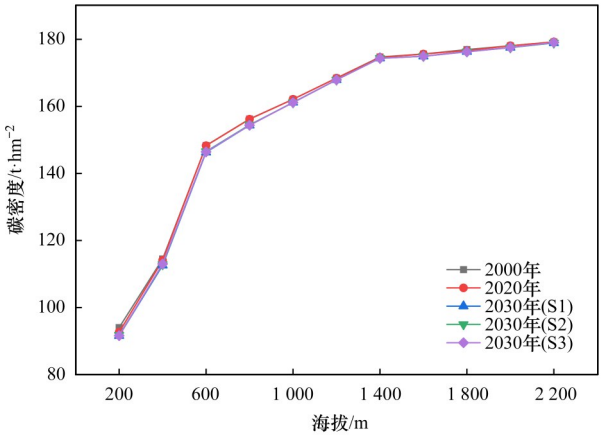

图4　碳密度的海拔变化

Fig. 4　Elevation change of carbon density

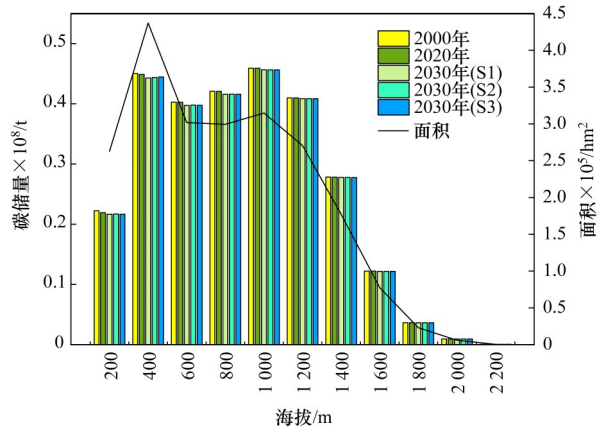

图5　不同海拔梯度的碳储量及面积变化

Fig. 5　Changes in carbon storage and areas at different altitude gradients

以每1°坡度为一个单元对碳密度进行统计后(图6)，可以发现研究区碳密度随坡度增加而增加.根据研究区状况，将研究区坡度变化分为4个梯度：<5°(缓坡)、5°~15°(中坡)、15°~25°(陡坡)和>25°(急陡坡).

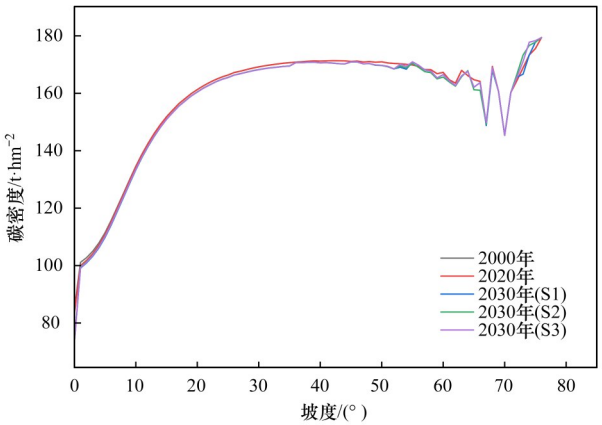

图6　碳密度的坡度变化

Fig. 6　Slope changes in carbon density

通过不同梯度下碳储量及面积统计可以看出(图7)，随着坡度升高，伏牛山地生态系统碳储量呈增多态势且不同情景下碳储量变化趋势基本相同.坡度在0~5°时，坡度平缓，利于城镇开发建设及农田耕种，土地利用类型多为建设用地等碳源用地，因此平均碳密度最低，同时所占面积也最小，因此碳储量较低.坡度在5°~15°之间，坡度变陡，不适宜人类居住，用地类型主要为耕地、草地及林地，生态系统平均碳密度升高，所占面积最大(32.12%)，碳储量迅速增加；坡度在15°~25°之间多为碳储量较高的林地草地，生态系统碳密度进一步增加，碳储量持续增加；坡度达到25°以上时，用地类型多为林地，生态系统碳密度基本趋于平缓，但在55°之后出现剧烈波动.究其原因为：大于25°以上的区域不适合人类活动，多为林草地，植被覆盖完整度较好且面积较大，因此碳储量高；坡度达55°以上区域时生态环境复杂，陡峭的悬崖不利于土壤保持，多为裸露的岩石，植被生长状况分化严重，因此碳密度出现剧烈波动.坡度大于5°的区域占总面积的85%，碳储量约占总量的89%，是伏牛山区巨大的碳库.

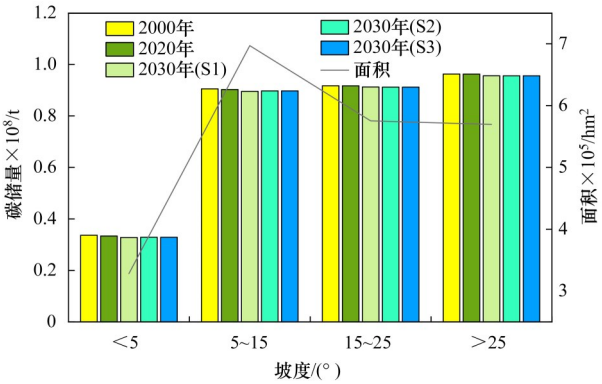

图7　不同坡度梯度的碳储量和面积变化

Fig. 7　Carbon storage and area changes in different slope gradients

3 讨论

3.1 碳储量的估算

InVEST模型通过模拟不同土地覆被情景计算生态服务系统碳储量，计算结果受不同地类碳密度值影响，因此选择合理的碳密度值是模拟准确的关键因素.本研究所使用的生物量碳密度和土壤碳密度是依据前人的研究结果并通过碳密度修正公式计算所得.本研究使用的耕地土壤碳密度2.02 t·hm^{-2}与靳熙[44]的研究，发现河南省耕地表层平均土壤有机碳密度为2.39 t·hm^{-2}接近；森林土壤碳密度117.72 t·hm^{-2}与张静静[42]的研究发现伏牛山地植被土壤层平均碳密度为92.95 t·hm^{-2}较为相近；建设用地和未利用地的土壤碳密度与李豪杰[45]的研究中河南省建设用地和未利用地的土壤碳密度相近；此外，本文还通过徐丽等[46]创建的碳密度数据集进行了验证.综上，本研究所使用的碳密度数据是相对准确和可靠的，但由于碳密度数据受气候和人为活动等干扰[47]，在未来的研究中要加强对不同土地利用类型碳密度的实时监测以提高模拟准确性.但碳密度值并不是恒定的，不同碳库的固碳影响因素不同.植被碳库和土壤碳库是陆地生态系统碳的主要碳库，植被碳库通过光合作用储存有机物，气候、地形以及植被年龄结构等因素是影响植被碳库的主要因素.土壤碳库主要依靠土壤微生物分解动植物残体储存有机物，土壤类型、植被覆盖率等是影响土壤固碳的主要因素[48].因此，未来的研究要优化碳密度修正方法，更加详细地对生物量碳和土壤碳库进行估算，并加强对不同土地利用类型碳密度监测，结合实测数据对碳密度进行验证，有利于模拟精度的提高.

3.2 模型模拟

CA-Markov模型充分发挥了两种模型的优势，提高了预测精度，但仍存在一定的不足：土地利用/土地覆被变化是一个复杂的过程，受多因素影响[49]，本文所选的驱动因子为较容易获得的自然因子，如DEM、坡度和距离等因素作为模拟土地利用的驱动因子，然而随着社会经济的发展，国土空间规划、耕地保护红线以及城市发展等政策因素也对土地利用变化有很大的影响[50,51].因此，为了进一步提高土地利用模拟的准确性，需将结合政策制定更为合理的土地利用转化需求作为工作重点.

InVEST模型中的碳模块依据土地利用类型测算碳储量，本研究中将土地利用类型分为六类，认为每种土地利用类型碳密度是均一的，忽视了土地利用类型内碳密度的空间异质性，因此评估结果随着地类变化而变化[52].未来应更新实地调查数据，及时补充土地利用类型内部空间异质性，细分土地利用类型，以提升模拟结果的准确性.

3.3 伏牛山生态系统碳储量变化的原因

近20年来，碳储量呈下降趋势，主要原因是农田和林地生态系统面积减少.LULC的变化显著影响了陆地生态系统，尤其是林地生态系统的碳储量变化.农田和林地转换为其他土地后，农田和林地生态系统的碳储量下降.森林和农田贡献了最大的碳储量，它们面积的减少导致了碳储量的损失.这一结果与侯建坤等[47]的研究结果一致.但在这一阶段，受南水北调政策的影响，水域面积也在不断扩大，在一定程度上占用了生态服务用地，造成了碳储量的损失.森林生态系统面积减少，伏牛山陆地生态系统碳储量呈减少趋势.

伏牛山地区有10余个自然保护区，包括伏牛山国家级自然保护区、宝田曼国家级自然保护区、南阳恐龙蛋化石群国家级自然保护区和省县自然保护区.对于保护区而言，人工林的建设有利于林地的恢复.对于非保护区，由于林地保护较少，人类活动程度较大，特别是城市化的快速发展，研究表明，保护区的损失主要是由于城市土地扩张[53].Sadat等[54]的研究结果也发现，城市开发和建设用地对附近阔叶林碳储量的减少有相当大的影响.

LULC变化对伏牛山区土壤侵蚀有重要影响，植被覆盖的减少加剧了土壤侵蚀.黄硕文等[55]的研究表明伏牛山土壤侵蚀呈东南向西北递减的空间格局，侵蚀强度中等及以上的区域逐年增加.刘天可等[56]的研究也表明，河南省土壤侵蚀主要发生在陡坡耕地和生产建设集中的地区，阻碍了植被生长，也限制了区域农业的可持续发展.

3.4 伏牛山生态系统可持续发展的建议

根据伏牛山地区生态系统碳储量模拟结果，未来10 a碳储量的减少主要是由于林地和农田的减少.伏牛山地区由8个城市化快速发展的县域组成.对于这些可持续发展程度较低的城市，伏牛山地区首先要牢牢把握发展和生态保护两条底线，将退耕还林和生态修复工程作为长期规划.

一方面，退耕还林计划有利于增加伏牛山地区植被覆盖度和碳储量，减少薄土层大坡度陡坡耕作，加强中海拔地区的生态恢复，恢复林地和草地，有利于增加碳储量[57].另一方面，土壤有机碳是陆地生态系统的主要碳库.加强污染防治，限制污染物排放，尤其要重视水土流失严重地区的保护[58].因此，模拟不同情景下的碳储量可以帮助政府制定更科学的LULC规划和可持续的区域发展政

策.为实现碳中和目标，未来伏牛山地区土地利用结构优化，可统筹考虑耕地保护和生态保护，控制低海拔地区建设用地扩张，加强耕地保护；在高海拔地区实施生态修复，对陡坡实施退耕还林还草，在保障粮食安全的同时碳储量也将得到提高.

3.5　不足与展望

本研究探讨了土地利用/覆被变化与生态系统碳储量之间的关系，但碳储量变化与植被类型、人类活动有很大关系，未来应探索多个因素对山地碳储量动态变化的影响，更全面地对山地生态系统碳储量影响因素进行研究.此外，由于数据采集数量有限，本研究仅对2000~2020年土地利用变化进行分析.在未来，还应继续对南北过渡带及相关地区进行长期观察，包括山地碳储量与地形变化的关系研究，以提高山地生态系统碳储量研究精度.

4　结论

（1）2000~2020年，伏牛山地耕地和林地大面积减少，水域和建设用地增加.自然增长情景下耕地面积仍持续减少，建设用地增加；耕地保护情景下耕地面积减少速度得到有效缓解；生态保护情景下，林地草地面积得到了有效保护.

（2）2000~2020年，伏牛山地生态系统碳储量减少2.62×10^6 t；2030年自然增长情景下，生态系统碳储量持续减少；耕地保护情景稍有缓解；生态保护情景有效缓解了碳储量损失，生态系统碳储量达到了3.10×10^8 t.

（3）碳密度与碳储量随地形因子变化而发生显著变化.碳密度呈现随海拔升高而升高，随坡度增加而增加的趋势；碳储量呈现随海拔升高呈驼峰状变化，随着坡度升高而增加的趋势.

参考文献：

[1] 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.

[2] Xu L, Yu G R, He N P, *et al*. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: A synthesis[J]. Scientific Reports, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-20764-9.

[3] 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 Chinese Academy of Sciences, 2015, **30**(6): 848-857.

[4] Zhu E Y, Deng J S, Zhou M M, *et al*. Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **646**: 930-939.

[5] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis[R]. Washington, 2005.

[6] Asadolahi Z, Salmanmahiny A, Sakieh Y, *et al*. Dynamic trade-off analysis of multiple ecosystem services under land use change scenarios: Towards putting ecosystem services into planning in Iran [J]. Ecological Complexity, 2018, **36**: 250-260.

[7] 钱彩云，巩杰，张金茜，等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报，2018，**73**(5)：868-879.
Qian C Y, Gong J, Zhang J X, *et al*. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(5): 868-879.

[8] Jopke C, Kreyling J, Maes J, *et al*. Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns[J]. Ecological Indicators, 2015, **49**: 46-52.

[9] Xue H, Li S Y, Chang J. Combining ecosystem service relationships and DPSIR framework to manage multiple ecosystem services[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(3), doi: 10.1007/s10661-015-4303-2.

[10] 孙泽祥，刘志锋，何春阳，等.中国快速城市化干燥地区的生态系统服务权衡关系多尺度分析——以呼包鄂榆地区为例[J].生态学报，2016，**36**(15)：4881-4891.
Sun Z X, Liu Z F, He C Y, *et al*. Multi-scale analysis of ecosystem service trade-offs in urbanizing drylands of China: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(15): 4881-4891.

[11] 王鹏涛，张立伟，李英杰，等.汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J].地理学报，2017，**72**(11)：2064-2078.
Wang P T, Zhang L W, Li Y J, *et al*. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the upper reaches of Hanjiang River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(11): 2064-2078.

[12] Strand J, Soares-Filho B, Costa M H, *et al*. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon forest's ecosystem services[J]. Nature Sustainability, 2018, **1**(11): 657-664.

[13] Cademus R, Escobedo F J, McLaughlin D, *et al*. Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among timber production, carbon sequestration, and water yield in *Pinus elliotii* forests in southeastern USA[J]. Forests, 2014, **5**(6): 1409-1431.

[14] 王吉鹏，吴艳宏.磷的生物有效性对山地生态系统的影响[J].生态学报，2016，**36**(5)：1204-1214.
Wang J P, Wu Y H. Phosphorus bioavailability in mountain ecosystems: characteristics and ecological roles[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(5): 1204-1214.

[15] Martínez M L, Pérez-Maqueo O, Vázquez G, *et al*. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico [J]. Forest Ecology and Management, 2009, **258**(9): 1856-1863.

[16] Lemenih M, Wiersum K F, Woldeamanuel T, *et al*. Diversity and dynamics of management of gum and resin resources in Ethiopia: A trade-off between domestication and degradation [J]. Land Degradation & Development, 2014, **25**(2): 130-142.

[17] 赵宇鸾，张颖，李秀彬.黔桂岩溶山区土地利用冲突强度演变及其空间分异特征[J].中国岩溶，2017，**36**(4)：492-500.
Zhao Y L, Zhang Y, Li X B. Evolution and spatial variation of land use conflict intensity in Qian-Gui karst Mountainous areas [J]. Carsologica Sinica, 2017, **36**(4): 492-500.

[18] Huang Q X, Robinson D T, Parker D C. Quantifying spatial-temporal change in land-cover and carbon storage among exurban

residential parcels [J]. Landscape Ecology, 2014, **29**(2): 275-291.

[19] 张萌萌, 刘梦云, 常庆瑞, 等. 1985—2015年陕西黄土台塬表层土壤有机碳空间分布[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(11): 2032-2045.
Zhang M M, Liu M Y, Chang Q R, *et al*. Spatial distribution of organic carbon in topsoil of the loess tableland in Shaanxi Province during 1985-2015 [J]. Journal of Natural Resources, 2018, **33**(11): 2032-2045.

[20] 董凌勃, 海旭莹, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地植物群落动态对生态系统碳储量的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(23): 8559-8569.
Dong L B, Hai X Y, Wang X Z, *et al*. Effects of plant community dynamics on ecosystem carbon stocks since returning farmlands to grasslands on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(23): 8559-8569.

[21] 黄绍霖, 徐涵秋, 林娜, 等. 亚热带地区马尾松林碳储量的遥感估算——以长汀河田盆地为例[J]. 生态学报, 2013, **33**(10): 2992-3001.
Huang S L, Xu H Q, Lin N, *et al*. Remote-sensing estimate of the carbon storage of subtropical Pinus massoniana forest in the Hetian Basin of County Changting, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(10): 2992-3001.

[22] Jiang W G, Deng Y, Tang Z H, *et al*. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models [J]. Ecological Modelling, 2017, **345**: 30-40.

[23] 王慧敏, 曾永年. 青海高原东部土地利用的低碳优化模拟: 以海东市为例[J]. 地理研究, 2015, **34**(7): 1270-1284.
Wang H M, Zeng Y N. Land use optimization simulation based on low- carbon emissions in eastern part of Qinghai Plateau [J]. Geographical Research, 2015, **34**(7): 1270-1284.

[24] 赵俊芳, 曹云, 马建勇, 等. 基于遥感和FORCCHN的中国森林生态系统NPP及生态服务功能评估[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(9): 1585-1592.
Zhao J F, Cao Y, Ma J Y, *et al*. Evaluation of NPP and ecological service function of China's forest ecosystem based on remote sensing and FORCCHN[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(9): 1585-1592.

[25] 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.

[26] 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.

[27] Piyathilake I D U H, Udayakumara E P N, Ranaweera L V, *et al*. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva province, Sri Lanka[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, **8**(2): 2213-2223.

[28] 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.

[29] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, **10**(5): 635-639.
Ouyang Z Y, Wang R S, Zhao J Z. Ecosystem services and their economic valuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, **10**(5): 635-639.

[30] Wang H, Stephenson S R, Qu S J. Modeling spatially non-stationary land use/cover change in the lower Connecticut River Basin by combining geographically weighted logistic regression and the CA-Markov model [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2019, **33**(7): 1313-1334.

[31] 高会, 刘金铜, 朱建佳, 等. 基于可持续发展的太行山区生态系统服务垂直分类管理[J]. 自然杂志, 2018, **40**(1): 47-54.
Gao H, Liu J T, Zhu J J, *et al*. Ecosystem services management based on vertical variation for sustainable development of Taihang Mountain areas [J]. Chinese Journal of Nature, 2018, **40**(1): 47-54.

[32] Zhu W B, Zhang X D, Zhang J J, *et al*. A comprehensive analysis of phenological changes in forest vegetation of the Funiu Mountains, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, **29**(1): 131-145.

[33] 李文青, 赵雪雁, 杜昱璇, 等. 秦巴山区生态系统服务与居民福祉耦合关系的时空变化[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(10): 2522-2540.
Li W Q, Zhao X Y, Du Y X, *et al*. Spatio-temporal changes of the coupling relationship between ecosystem services and residents' well-being in Qinba Mountains Area [J]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(10): 2522-2540.

[34] Bhagabati N K, Ricketts T, Sulistyawan T B S, *et al*. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans[J]. Biological Conservation, 2014, **169**: 147-156.

[35] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学D辑, 2003, **33**(1): 72-80.

[36] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, **41**(5): 687-699.
Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al*. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, **41**(5): 687-699.

[37] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, **16**(5): 497-508.
Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, **16**(5): 497-508.

[38] 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.
Piao S L, Fang J Y, He J S, *et al*. Spatial distribution of grassland biomass in China[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, **28**(4): 491-498.

[39] 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. 资源科学, 2011, **33**(10): 1932-1939.
Chuai X W, Huang X J, Zheng Z Q, *et al*. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu province[J]. Resources Science, 2011, **33**(10): 1932-1939.

[40] 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 中国森林的地下碳分配[J]. 生态学报, 2007, **27**(12): 5148-5157.
Chen G S, Yang Y S, Xie J S, *et al*. Total below ground carbon allocation in China's forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(12): 5148-5157.

[41] 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.

[42] 张静静. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡研究[D]. 开封：河南大学, 2019.
Zhang J J. Quantification of tradeoffs on forest ecosystem services in Mount Funiu region[D]. Kaifeng: Henan University, 2019.

[43] 刘谊锋, 田耀武. 伏牛山森林土壤有机碳储量的垂直分布及其影响因素[J]. 陕西林业科技, 2021, **49**(1): 9-15.
Liu Y F, Tian Y W. Vertical distribution of forest soil organic carbon storage in Funiu Mountain and its relationship with influencing factors [J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2021, **49**(1): 9-15.

[44] 靳熙. 河南省耕地表层土壤有机碳储量估算与尺度效应分析[D]. 郑州：郑州大学, 2014.
Jin X. Estimation of the organic carbon storage in cultivated surface soil and analysis of its scale effect in Henan Province [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.

[45] 李豪杰. 基于高密度剖面的河南省土壤有机碳储量精确估算[D]. 郑州：郑州大学, 2016.
Li H J. Accurate estimate of soil organic carbon storage in Henan Province based on high-density profiles [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.

[46] 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.

[47] 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.

[48] 宋丽亚, 胡克, 孙爽, 等. 基于InVEST模型的辽宁省海岸带碳储量时空变化研究[J]. 现代地质, 2022, **36**(1): 96-104.
Zhu L Y, Hu K, Sun S, *et al*. Research on the spatiotemporal variation of carbon storage in the coastal zone of Liaoning Province based on InVEST Model[J]. Geoscience, 2022, **36**(1): 96-104.

[49] 王晓, 于兵, 李继红. 土地利用和土地覆被变化对土壤有机碳密度及碳储量变化的影响——以黑龙江省大庆市为例[J]. 东北林业大学学报, 2021, **49**(11): 76-83.
Wang X, Yu B, Li J H. Effects of land use and land cover change on soil organic carbon density and carbon storage: A case study of Daqing, Heilongjiang Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, **49**(11): 76-83.

[50] 庄子薛, 谢梦晴, 张文萍, 等. 基于FLUS-InVEST模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测——以成德眉资地区为例[J]. 风景园林, 2022, **29**(5): 38-44.
Zhuang Z X, Xie M Q, Zhang W P, *et al*. Temporal and spatial changes and multi-scenario simulation prediction of carbon storage based on FLUS-InVEST model: A case study of Chengdu-Deyang-Meishan-Ziyang area[J]. Landscape Architecture, 2022, **29**(5): 38-44.

[51] 谢宇剑, 沈正平, 赵洁. 基于土地利用变化情景的徐州市生态系统碳储量评估[J]. 国土与自然资源研究, 2022, (4): 13-21.
Xie Y J, Shen Z P, Zhao J. Evaluation of ecosystem carbon storage in Xuzhou City based on land use change scenarios[J]. Territory & Natural Resources Study, 2022, (4): 13-21.

[52] 彭舜磊, 陈昌东, 李磊, 等. 宝天曼自然保护区栓皮栎林人工恢复与天然恢复效果比较[J]. 水土保持研究, 2016, **23**(6): 265-270.
Peng S L, Chen C D, Li L, *et al*. Comparison of community characteristics between Quercus variables forests through artificial restoration and natural restoration in Baotianman Nature Reserve [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, **23**(6): 265-270.

[53] Wang C Y, Li T Z, Guo X H, *et al*. Plus-InVEST study of the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration's land-use change and carbon storage [J]. Land, 2022, **11**(10), doi: 10.3390/land11101617.

[54] Sadat M, Zoghi M, Malekmohammadi B. Spatiotemporal modeling of urban land cover changes and carbon storage ecosystem services: Case study in Qaem Shahr County, Iran [J]. Environment, Development and Sustainability, 2020, **22**(8): 8135-8158.

[55] 黄硕文, 李健, 张欣佳, 等. 河南省近十年来土壤侵蚀时空变化分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, **38**(2): 232-240.
Huang S W, Li J, Zhang X J, *et al*. Analysis of spatial and temporal changes in soil erosion in Henan Province over the last ten years [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, **38**(2): 232-240.

[56] 刘天可, 袁彩凤. 基于RUSLE模型的河南省黄河流域土壤侵蚀研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, **41**(3): 7-13.
Liu T K, Yuan C F. Study on soil erosion of the Yellow River Basin in Henan Province based on RUSLE model[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, **41**(3): 7-13.

[57] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, *et al*. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering [J]. Nature Sustainability, 2018, **1**(1): 44-50.

[58] 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等. 基于InVEST模型和PLUS模型的环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.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 45 No. 4

Apr. 15, 2024

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China ····· YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, *et al.* (1869)

Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency ····· ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)

Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition ····· ZHANG Jiang-yan (1888)

Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing ····· LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, *et al.* (1898)

Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University ····· CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)

Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing ····· YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, *et al.* (1917)

Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China ····· WU Xue-ping (1926)

Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Chinese Cities ····· LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)

Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021 ····· CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)

Analysis of the Characteristics and Causes of $PM_{2.5}$ and O_3 Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period ····· YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, *et al.* (1963)

$PM_{2.5}$ Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter ····· FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, *et al.* (1975)

Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei ····· LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, *et al.* (1983)

Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric $PM_{2.5}$ Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region ····· BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, *et al.* (1994)

Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in $PM_{2.5}$ During Winter in Liaocheng City ····· ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, *et al.* (2003)

Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa ····· GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, *et al.* (2011)

VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries ····· WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, *et al.* (2019)

Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes ····· LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, *et al.* (2028)

Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment ····· GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, *et al.* (2039)

Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River ····· WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, *et al.* (2054)

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang ····· LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, *et al.* (2067)

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China ····· ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, *et al.* (2080)

Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes ····· MENG Ling-hua (2096)

Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin ····· ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, *et al.* (2107)

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin ····· WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, *et al.* (2118)

Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City ····· LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, *et al.* (2129)

Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network ····· XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)

Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed ····· WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, *et al.* (2150)

Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus ····· QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, *et al.* (2160)

Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects ····· LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, *et al.* (2171)

Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation ····· SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, *et al.* (2185)

Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism ····· LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, *et al.* (2195)

Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar ····· MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)

Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin ····· GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, *et al.* (2211)

Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake ····· YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, *et al.* (2223)

Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River ····· LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, *et al.* (2233)

Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers ····· GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, *et al.* (2246)

Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process ····· HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, *et al.* (2259)

Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area ····· ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, *et al.* (2268)

Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost ····· YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, *et al.* (2280)

Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field ····· YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, *et al.* (2292)

Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics ····· WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, *et al.* (2304)

Effect of Different Soil Salinities on N_2O Emission: A Meta-analysis ····· HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, *et al.* (2313)

Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area ····· ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)

Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model ····· ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, *et al.* (2332)

Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction ····· XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, *et al.* (2342)

Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning ····· ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, *et al.* (2353)

Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity ····· LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, *et al.* (2363)

Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall ····· ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, *et al.* (2373)

Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity ····· ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, *et al.* (2385)

Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil ····· LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, *et al.* (2394)

Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in *Pinus tabuliformis* Forest in Taiyue Mountain ····· MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, *et al.* (2406)

Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites ····· ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, *et al.* (2417)

Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou ····· LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, *et al.* (2428)

Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China ····· ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, *et al.* (2440)

Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing ····· LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, *et al.* (2450)

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines ····· WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, *et al.* (2461)

Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil ····· LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, *et al.* (2474)

Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems ····· ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, *et al.* (2480)