

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)

粤港澳大湾区大气PM_{2.5}浓度的遥感估算模型 代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)

典型输送通道城市冬季PM_{2.5}污染与传输变化特征 代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)

郑州市夏季PM_{2.5}中二次无机组分污染特征及其影响因素 和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇 (48)

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)

2020年“三连击”台风对我国东部地区O₃污染的影响分析 花丛, 尤媛, 王晴, 张碧辉 (71)

北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)

机动车减排降碳综合评价体系综述 范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)

基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 杨峰, 张贵驰, 孙伟, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王焯嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)

中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估 襄殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)

太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估 张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)

水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈冈, 沈晓盛 (151)

长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)

珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)

富春江水库浮游植物功能群变化的成因 张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)

合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰 (218)

近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 王耕, 张芙蓉 (228)

光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)

大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)

西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)

不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)

基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉 (287)

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)

长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨浩, 高超 (314)

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)

不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)

氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)

重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)

基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)

基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)

铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)

天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)

基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍茂, 魏世强 (439)

生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)

人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)

聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响 牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霆, 刘淑丽 (470)

转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)

微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)

微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)

民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)

不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)

厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)

土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)

叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二革, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)

昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)

基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 黄福义, 周曙仟, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张娴 (576)

城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)

氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)

CO₂气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb²⁺吸附性能对比 江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

基于 InVEST 与 CA-Markov 模型的昆明市碳储量时空演变与预测

帕茹克·吾斯曼江^{1,2}, 艾东^{1,2}, 方一舒^{1,2}, 张益宾³, 李牧⁴, 郝晋珉^{1,2*}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193; 3. 清华大学建筑学院, 北京 100083; 4. 天津商业大学公共管理学院, 天津 300133)

摘要: 土地利用/覆被变化是引起陆地生态系统碳储量变化的重要驱动因素, 影响整个生态系统的碳循环过程. 以昆明市为研究案例, 在修正碳密度系数的基础上, 通过耦合 InVEST 模型碳储存模块和 CA-Markov 模型, 分析 2000~2020 年及“三线”约束下未来不同土地利用情景陆地生态系统碳储量变化的时空差异特征. 结果表明: ①昆明市土地利用类型主要以耕地、林地和草地为主, 土地利用转移也发生在三者之间. ②2000~2020 年, 昆明市碳储量整体表现为南低北高的空间分布特征, 碳储量逐年下降, 累计损失 5.27 × 10⁶ t, 林地和草地退化是碳储量减少的主要原因. ③2020~2030 年, 4 种情景碳储量均有所减少, 其中惯性发展情景碳储量下降最明显, 主要是建设用地快速扩张引起; 耕地保护情景相比惯性发展情景有效减缓了碳储量减少幅度; 生态保护情景则能够增强研究区固碳能力, 碳储量达到 262.49 × 10⁶ t, 但不能有效控制耕地面积的减少; 防止城市扩张情景有效抑制了建设用地无序扩张, 间接防止了碳储量进一步减少. 因此, 研究区可统筹考虑耕地保护情景、生态保护情景和防止城市扩张情景, 既能增加研究区碳汇空间, 又能保障粮食和生态安全.

关键词: 土地利用变化; 碳储量; InVEST 模型; CA-Markov 模型; 昆明市

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0287-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202302060

Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model

Paruke Wusimanjiang^{1,2}, Ai Dong^{1,2}, Fang Yi-shu^{1,2}, Zhang Yi-bin³, Li Mu⁴, Hao Jin-min^{1,2*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality, Ministry of Natural Resources, Beijing 100193, China; 3. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100083, China; 4. School of Public Management, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300133, China)

Abstract: Land use/cover change is an important driving factor for carbon stock changes in terrestrial ecosystems and affects the carbon cycle of the whole ecosystem. Taking Kunming City as a case study, based on the modified carbon density coefficient, this study analyzed the spatio-temporal characteristics of carbon storage changes in the terrestrial ecosystem under different land use scenarios from 2000 to 2020 and "three-line" constraints by coupling the carbon storage module of the InVEST model and CA-Markov model. The results showed that: ① cultivated land, forest land, and grassland were the main types of land use in Kunming City, and land use transfer also occurred among the three types. ② From 2000 to 2020, the overall carbon storage in Kunming City was low in the south and high in the north, and the carbon storage decreased yearly with a cumulative loss of 5.27 × 10⁶ t. The degradation of forest land and grassland was the main reason for the decrease in carbon storage. ③ From 2020 to 2030, the carbon storage of the four scenarios should decrease, and the decline in carbon storage in the inertia development scenario was the most obvious, which was mainly caused by the rapid expansion of construction land. The cultivated land protection scenario effectively slowed down the reduction in carbon storage compared with the inertia development scenario. The ecological protection scenario could enhance the carbon sequestration capacity of the study area, with carbon storage reaching 262.49 × 10⁶ t, but could not effectively control the reduction in cultivated land area. The scenario of preventing urban expansion effectively inhibited the disorderly expansion of construction land and indirectly prevented further reduction in carbon storage. Therefore, the cultivated land protection scenario, ecological protection scenario, and urban expansion prevention scenario can be considered comprehensively in the study area, which could not only increase the carbon sink space of the study area but also ensure food and ecological security.

Key words: land use change; carbon storage; InVEST model; CA-Markov model; Kunming City

气候变化是当前人类生存和可持续发展所面临的共同挑战, 受到世界各国人民和政府的高度关注^[1]. 陆地生态系统碳储存被认为是最经济可行和环境友好的减缓大气 CO₂ 浓度升高的绿色途径之一^[2], 其在维持全球碳平衡以及调节气候方面具有不可替代的作用, 是衡量区域生态系统服务功能的一项重要指标. 土地利用/覆被变化是影响碳储量变化的主要因素之一^[3], 其通过改变生态系统中结构、功能和能量循环进而影响区域碳储量^[4]. 因此, 量化土地利

用覆被变化与碳储量之间的响应关系对于研究陆地生态系统碳储存具有重要研究意义.

近年来, 国内外诸多学者从不同尺度和不同视角对陆地生态系统的碳储量及其时空变化和驱动因素展开了大量研究^[5-19], 为全球碳储量测算研究提供

收稿日期: 2023-02-08; 修订日期: 2023-03-11

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B00); 昆明市国土空间规划编制研究项目(201905511910343)

作者简介: 帕茹克·吾斯曼江(1992~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土地利用生态, E-mail: B20203210942@cau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jmhao@cau.edu.cn

了丰富的科学依据. Nogueira 等^[20]研究指出亚马逊河流域的碳损失主要是由热带森林植被减少引起;李瑾璞等^[21]分析得出河北省 1990~2015 年陆地生态系统碳储量累计减少 44.48×10^6 t, 建设用地扩张是导致其碳储量下降的主要原因; Han 等^[22]认为在实施退耕还林后, 黄土丘陵总碳储量显著提升. 王天福等^[23]评估了陕西省在实施退耕还林还草工程后生态系统碳储量整体增加了 9.19×10^{10} t. 综合以往研究可知, 在研究范围的选取上, 大多集中在国家和省级和流域等尺度较大的区域, 具体到市级的研究相对较少, 而城市既是国家经济发展中的主要推动力, 又是城镇化建设中的重要载体, 因此对其生态系统的保护尤为关键. 其次在研究视角的选择上, 多数研究在政策保护或工程影响层面进一步探究碳储量变化^[24-29], 但在国土空间规划视角下的碳储量研究还鲜见报道. 此外, 多数研究主要集中在对单一生态系统及其相互转型引致的碳储量的估算, 对综合生态系统碳储量估算的研究尚不多见.

在研究方法上相较于实地调查法^[30], 目前在研究土地利用覆被变化对碳储量影响中采用的方法主要是模型模拟法, 其中 InVEST (integrated valuation of ecosystem services and trade-offs) 模型以其成本低、评估精度高、参数获取灵活和生态系统服务功能评估结果的可视化表达等特点被广泛使用, 通常被用来预测未来不同情景下陆地生态系统碳储存和碳损失^[31-34]. 国内外相关学者采用 InVEST 模型与 Markov^[35]、FLUS^[36,37]、GeoSOS-FLUS^[38,39]、CLUE-S^[40,41] 和 CA-Markov^[42] 模型相结合, 模拟分析了自然、社会和经济等多种变化情景下的碳储量变化. 其中 CA-Markov (cellular automata-Markov) 模型由 CA (元胞自动机) 和 Markov (马尔科夫链) 两个模型组成, 组合了 CA 模型模拟复合系统空间变化和 Markov 模型可长时间预测的优点, 既提高了土地利用转移的模拟精度, 又可以有效模拟土地利用格局的空间变化, 具有较好的科学性和实用性.

昆明市是我国西南地区生态安全保护格局建设中重要组成部分, 由于其特殊的地理环境, 在碳储存、生物多样性、水源涵养和水土保持重要性保护方面承担着重要角色, 同时作为长江经济带的上游地区, 在推动长江经济带环境保护治理和生态修复过程中发挥着重要作用. 近年来, 昆明市生态环境质量不断下降, 尤其在当前环滇发展模式下造成了沿滇池周边生态环境极大的破坏. 据此, 本文以昆明市为例, 探讨基期与未来土地利用变化对碳储量变化影响, 可丰富生态系统碳储量的研究进展, 降低昆明市碳储量估算中的不确定性, 以期为提高昆明市生

态系统碳储量提供一定的科学建议, 并为昆明市下一轮国土空间规划提供决策依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

昆明市地处云贵高原中部, 高海拔和陡坡土地所占比重较大, 山地占 84%, 高原、丘陵约占 10%, 坝子 (盆地、河谷) 仅占 6%. 位于东经 $102^{\circ}10'$ ~ $103^{\circ}40'$, 北纬 $24^{\circ}23'$ ~ $26^{\circ}33'$, 在区位上北与四川省凉山彝族自治州相连, 南与玉溪市、红河哈尼族彝族自治州毗邻, 西与楚雄彝族自治州接壤, 东与曲靖市交界, 地势北高南低, 下辖 7 个市辖区、1 个县级市、6 个县 (图 1); 境内有长江、珠江和红河这三大水系, 北靠三台山、拱王山和梁王山这三大山脉, 南抱滇池, 是典型的高原湖滨山水城市, 日照较长、霜期较短、气候温和, 属北亚热带湿润季风气候. 昆明市土地利用率高, 人均耕地少, 耕地后备资源不足, 人地矛盾日益突出. 根据第三次国土调查成果, 土地总面积为 $21\,012.92$ km², 农用地约占全域土地面积 84.13%, 建设用地占 7.61%, 未利用地占 8.26%. 2020 年常住人口 846.01 万人, 城镇化率 73.6%, GDP 为 6 733.79 亿元.

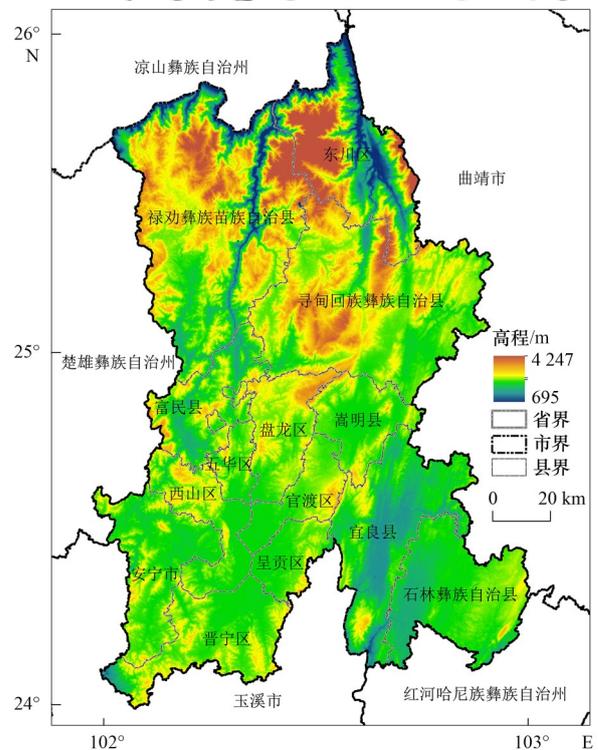


图 1 昆明市地理位置示意

Fig. 1 Location of Kunming City

1.2 数据来源及处理

土地利用类型数据: 本文遥感影像来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>), 选取 2000、

2010 年和 2020 年的 5 ~ 8 月空间分辨率为 30 m 的 Landsat5/Landsat8 遥感影像数据,通过 ENVI5.1 对其进行预处理并解译分类得到 3 期土地利用数据,分类总体精度介于 85.28% ~ 90.26%, Kappa 系数总体达 0.875 以上.

土地利用驱动因子:用于土地预测的数据分为自然因素和社会因素(表 1). GDP 和人口空间分布公里网格数据源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),气温和降水空间分布公里网格数据源于国家气象科学数据中心(<http://www.nmic.cn/>). 水系、主要道路(国道、省道、环路)和铁路数据由 Bigemap 软件下载,永久基本农田、行政边界和生态保护红线数据为昆明市自然资源与规划局

提供.

数据处理:①为简化分析土地利用变化并通过 InVEST 模型碳池计算碳储量变化,本文通过 ArcGIS10.7 重分类工具将昆明市 25 种土地利用覆被类型重新划分为 6 个一级地类,包括:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地. ②土地利用驱动因子提取. 利用数字高程数据,通过坡度和坡向分析工具生成坡度和坡向数据;分别对气温、降水、GDP 和人口数据进行投影矫正、裁剪等处理;距水系、主要道路和铁路距离均采用欧氏距离工具得到. ③对 3 期土地利用数据和各驱动因子数据进行统一投影、坐标系、行列数和分辨率,通过多次模拟调试结果,使用重采样功能将分辨率统一为 60 m × 60 m.

表 1 土地利用驱动因子及数据来源

Table 1 Land use driving factors and data sources

数据类型	数据名称	分辨率/m	数据来源
自然因素	DEM	30	地理空间数据云(https://www.gsccloud.cn)
	坡度	30	ArcGIS10.7 坡度工具获取
	坡向	30	ArcGIS10.7 坡向工具获取
	水系	1 000	Bigemap 软件下载(http://www.bigemap.com/)
	年均降水	1 000	国家气象科学数据中心(http://www.nmic.cn/)
	年均气温	1 000	国家气象科学数据中心(http://www.nmic.cn/)
社会因素	GDP	1 000	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)
	人口	1 000	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)
	主要道路(国道、省道和环路)	1 000	Bigemap 软件下载(http://www.bigemap.com/)
	铁路	1 000	Bigemap 软件下载(http://www.bigemap.com/)

1.3 研究方法

1.3.1 碳储量计算

InVEST 模型即“生态系统服务功能与权衡交易综合评价模型”,应用其中 Carbon 模块,使用土地利用覆被数据及 4 个碳库来估算在当前景观或一个时间段内的碳储量. InVEST 碳池中 4 个碳库包括:地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳. 碳储量计算公式为:

$$C_{totali} = \sum_{j=1}^n A_{ij} \times (C_{aj} + C_{bj} + C_{sj} + C_{dj}) \quad (1)$$

式中, C_{totali} 为区域 i 的总碳储量(t); A_{ij} 分别为区域 i 土地利用类型 j 的面积(hm^2); C_{aj} 、 C_{bj} 、 C_{sj} 和 C_{dj} 分别为土地利用类型 j 的地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度和死亡有机物碳密度($t \cdot hm^{-2}$); n 为土地利用类型数量.

1.3.2 碳密度修正

碳密度(单位面积碳储量)是 InVEST 碳储量计算模型中重要的输入参数之一,随气候和土壤性质,土地利用类型的不同而不同,这些影响因素的地域性差异会影响最终的研究结果,所以需对其进行修正. 地上和地下生物量碳密度均与年降水量和年均气温

呈正相关,土壤有机碳均与年降水量呈正相关,现有研究缺乏对土壤碳密度和年均气温关系的定量表达,因此只考虑土壤碳密度和降水量的关系修正. 本文根据 Alam 等^[43]、Giardina 等^[44]和陈光水等^[45]提出的碳密度修订方法[公式(2)、公式(3)和公式(5)]作为修正降水量和气温因子的公式;参照部分学者碳密度修正结果^[46,47],以全国和湖北省各地类碳密度值为参考值^[48-50],修正云南省各地类碳密度. 具体公式如下:

$$C_{SP} = 3.3968 \times P + 3996.1 \quad (R^2 = 0.11) \quad (2)$$

$$C_{BP} = 6.798e^{0.0054P} \quad (R^2 = 0.70) \quad (3)$$

$$C_{BT} = 28 \times T + 398 \quad (R^2 = 0.47, P < 0.01) \quad (4)$$

式中, C_{SP} 为根据年均降水量得到的土壤碳密度($t \cdot hm^{-2}$); C_{BP} 和 C_{BT} 分别为根据年均降水量和年均气温得到的生物量碳密度($t \cdot hm^{-2}$); P 为年均降水量(mm); T 为年均气温($^{\circ}C$). 分别将湖北省和云南省年均降水量和年均温代入上述公式(2000 ~ 2020 年,湖北省和云南省年均气温分别为 16.91 $^{\circ}C$ 和 16.07 $^{\circ}C$, 年均降水量分别为 1 160.48 mm 和 958.41 mm),二者相比即可得到修正系数,湖北省碳密度数据与修正系数的乘积为云南省碳密度数据. 具体公式为:

$$K_S = \frac{C'_{SP}}{C''_{SP}} \quad (5)$$

$$K_{BP} = \frac{C'_{BP}}{C''_{BP}} \quad (6)$$

$$K_{BT} = \frac{C'_{BT}}{C''_{BT}} \quad (7)$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT} \quad (8)$$

式中, K_S 和 K_B 分别为土壤碳密度修正系数和生物量碳密度修正系数; K_{BP} 和 K_{BT} 分别为生物量碳密度的降水因子和气温因子修正系数; C'_{SP} 和 C'_{BP} 分别为云南省根据降水因子得到的土壤碳密度值和生物量碳密度值; C''_{SP} 和 C''_{BP} 分别为湖北省根据降水因子得到的土壤碳密度和生物量碳密度值; C'_{BT} 和 C''_{BT} 分别为云南省和湖北省根据气温因子得到的生物量碳密度值. 具体修正后的云南省不同土地利用类型碳密度值如表 2 所示.

表 2 云南省不同土地利用类型碳密度值/ $t \cdot hm^{-2}$
Table 2 Carbon density values of different land use types
in Yunnan Province/ $t \cdot hm^{-2}$

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
耕地	16.83	11.12	75.89	2.11
林地	30.76	18.40	100.24	2.78
草地	14.59	17.50	87.13	2.42
水域	1.62	0	64.09	1.78
建设用地	7.77	1.55	34.36	0
未利用地	10.57	2.11	34.45	0.96

1.3.3 马尔科夫 CA-Markov 模型

马尔科夫链是利用概率论的理论方法来研究一个时期到另一个时期的土地利用变化,并以生成的转移概率矩阵为基础预测未来土地利用变化的趋势.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}, \quad \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (9)$$

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t \quad (10)$$

式中, S_{t+1} 和 S_t 分别为在 $t+1$ 和 t 时期土地利用状态; P_{ij} 为转移概率矩阵; n 为土地利用类型数量. CA 动力学模型可进行时空计算,该模型中时间、空间和状态是离散分布的;主要由元胞及其状态、元胞空间、元胞邻域和转换规则这 4 部分组成. CA 模型公式为:

$$S_t = f(S_{t_0}, N) \quad (11)$$

式中, S 为元胞空间; N 为每个元胞单元的邻域; t 和 t_0 为不同的两个时刻; f 为元胞状态演化规则函数. CA-Markov 模型是将两种模型进行耦合分析,弥补了二者不足,充分考虑了区域现实因素的影响和每种土地利用类型的空间分布和空间关系,确保预测未来

土地利用变化不是完全随机决定的,而是有其相应的相互转换规则和依据.

1.3.4 CA-Markov 模型情景设置及模拟过程

本文使用 IDRISI17.0 中集成的 CA-Markov 模块预测昆明市 2030 年不同情景下的土地利用变化.

(1) 运行模型前 将元胞大小即栅格大小设定为 $60 m \times 60 m$, 比例误差设为 0.

(2) 定义邻域 采用默认的 5×5 滤波器,即 1 个元胞周围 5×5 个元胞大小组成的空间对该元胞状态有显著影响.

(3) 建立适宜性图集 根据多标准评价 (multi-criteria evaluation, MCE) 模块中加权线性合并法生成各土地利用类型转移适宜性图像,标准分为约束条件和影响因子两类. 为响应滇池流域水环境保护治理“十四五规划”,将约束条件设为水域,因土地利用变化的形成和演变过程受自然因素、人口和社会经济因素的影响,选取:高程、坡度、坡向、气温、降水量、水系、GDP、人口、主要道路(国道、省道、环路)和铁路等 10 个因子作为影响土地利用变化的主要因素,由此得到每种土地利用类型的概率图集,最后运用 Collection editor 模块集成在一个图集.

(4) 模型检验 为了模拟结果的准确性,基于 2000 年和 2010 年土地利用数据和影响因素数据,设定迭代次数为 10,预测 2020 年土地利用情景,并通过 Crosstab 模块与 2020 年实际土地利用数据进行精度检验,模拟结果显示 Kappa 指数为 0.933 1,说明约束条件和影响因子具有较好的解释能力,可用于预测不同土地利用变化情景.

(5) 情景设置 国土空间规划作为我国重要的土地利用战略,通过调整土地利用类型和空间分布,可以很好地确定未来的土地利用. 依据最新国土空间规划中永久基本农田、生态保护红线和城镇开发边界这 3 条控制线的划定规则和理念,运用情景分析法,以 10 年为步长,分别设定:惯性发展情景 (IDS)、耕地保护情景 (FPS)、生态保护情景 (EPS) 和防止城市扩张情景 (PUES) 这 4 个情景. 惯性发展情景:基于 2010 ~ 2020 年土地利用转移概率矩阵,假定土地利用变化按现有趋势发展,即 2030 年土地利用空间格局由马尔科夫链自然演变而来,各地类相互转移不作任何限制(故未在表 3 中体现). 耕地保护情景:为保障粮食安全,“十四五”规划明确指出,要采取“长牙齿”的耕地保护政策;目前昆明市耕地后备资源不足和人均耕地面积持续减少,耕地保护使命亟需得到保障,因此该情景在参考昆明市永久基本农田划定数据的基础上,主要通过遏制耕地向其它地类转移,允许其它地类向耕地转移和相互转移,从而加强

对耕地的保护. 生态保护情景: 该情景以生态保护红线为主要参考数据, 将以生态功能为主导功能的地类加以严格保护, 具体禁止林地、草地和水域转为其它地类, 确保数量优势, 限制其大面积、大速率向其他地类转移, 以达到生态保护的目的. 防止城市扩张

情景: 城市建设用地的无节制扩张致使区域碳储量下降, 基于此, 该情景有意控制建设用地规模, 允许其转出但不允许由其它地类转入, 一定程度上, 本情景可进一步防止城市过度扩张, 能为区域碳储量带来正生态效益.

表 3 2020 ~ 2030 年不同情景土地利用转移矩阵¹⁾

Table 3 Land use transfer matrix in different scenarios from 2020 to 2030

	耕地保护情景						生态保护情景						防止城市扩张情景					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
A	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
B	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1
C	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1
D	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1
E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

1) A: 耕地, B: 林地, C: 草地, D: 水域, E: 建设用地, F: 未利用地; 1 表示允许发生转移, 0 表示不允许发生转移; 列中 A ~ F 为 2020 年土地利用现状类型, 行中 A ~ F 为 2030 年不同情景土地利用类型

2 结果与分析

2.1 2000 ~ 2020 年土地利用与碳储量时空变化特征

2000 ~ 2020 年, 昆明市陆地生态系统主要以林地和草地为主, 二者分布较为广泛(图 2), 占研究区总面积的 72% 以上, 禄劝县和寻甸县耕地面积最广, 因海拔北高南低, 水域主要分布在南部地区; 受三面临山、一面向水的自然地理格局影响, 建设用

地集中在中西部环滇池地区, 未利用地分布则较为分散, 呈点状分布在研究区各个区域. 研究期间, 各类用地均发生了变化. 耕地、林地和草地面积持续减少, 其中耕地面积变化最大, 相较于 2000 年减少了 25 163.28 hm², 降幅为 5.93%, 主要出现在呈贡区、安宁市和晋宁区; 水域、建设用地和未利用地面积存在不同程度增加, 其中建设用地扩张速度较快, 变化较为明显, 增加了 65 164.68 hm², 增幅为 134.32%.

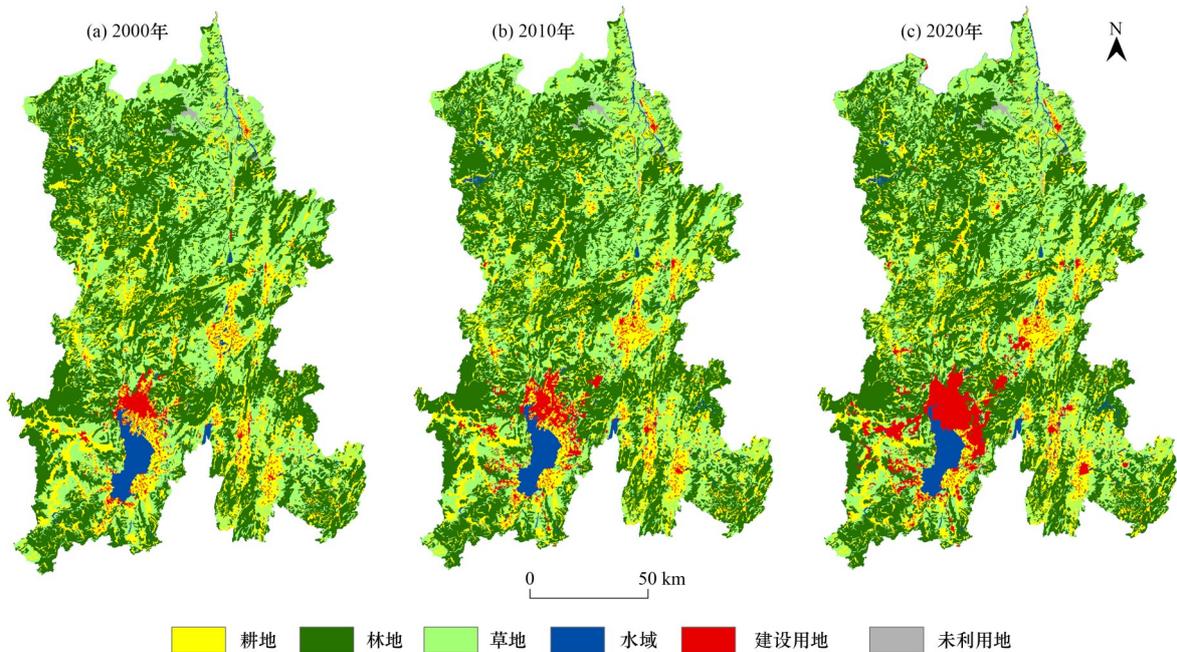


图 2 昆明市 2000、2010 和 2020 年土地利用变化

Fig. 2 Land use change map of Kunming City in 2000, 2010, and 2020

分析昆明市不同土地利用类型碳储量和单位面积的平均碳储量可知(表 4), 2000 年、2010 年和 2020

年昆明市陆地生态系统碳储量分别为 269.17×10^6 、 267.47×10^6 和 263.90×10^6 t, 呈持续减少的趋势, 累

计损失 5.27×10^6 t, 平均每年损失 0.26×10^6 t, 碳密度分别为 129.11、128.29 和 $126.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 下降了 $2.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2000~2020年, 昆明市碳储量主要以林地碳储量为主, 是最重要的碳库, 约占总碳储量的50%以上, 20年间, 伴随着土地利用类型的数量变

化, 碳储量也随之发生了不同程度的变化. 碳储量减少地类为耕地、林地和草地, 分别减少了 2.67×10^6 、 1.90×10^6 和 3.79×10^6 t, 其中草地碳储量减少量最多; 而水域、建设用地和未利用地的碳储量均有所增加, 但占比较小, 增幅不明显.

表4 昆明市不同时期各土地利用类型数量及碳储量变化

Table 4 Carbon storage of different land use types in different periods in Kunming City

年份	项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2000	面积/ hm^2	424 061.28	950 487.48	608 385.96	46 718.28	48 513.24	6 624.36	2 084 790.6
2000	碳储量 $\times 10^6/\text{t}$	44.93	144.65	74.00	3.15	2.12	0.32	269.17
2010	面积/ hm^2	420 844.32	948 464.64	591 437.52	48 137.40	68 913.72	6 993.00	2 084 790.6
2010	碳储量 $\times 10^6/\text{t}$	44.59	144.34	71.94	3.25	3.01	0.34	267.47
2020	面积/ hm^2	398 898.00	938 043.72	577 221.48	50 051.16	113 677.92	6 898.32	2 084 790.6
2020	碳储量 $\times 10^6/\text{t}$	42.26	142.75	70.21	3.38	4.97	0.33	263.90

从碳储量的空间分布及其变化看, 昆明市碳储量空间分布特征具有显著的空间异质性. 由图3可知, 昆明市2000~2020年碳储量呈“由南向北逐渐升高”的空间分布特征, 具体表现为碳储量高值区域主要分布在研究区北部山地林区, 该区域海拔较高, 植被覆盖率高, 碳密度均高于 $130.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在行政区划上, 位于禄劝县、寻甸县和东川区, 这些地区城市化程度较低, 土地利用类型以林地和草地为主, 碳储量低值区域主要分布在滇池周边的五华区 and 呈贡区, 碳密度最低为 $110.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 城市化程度较高, 土地利用类型主要以耕地和建设用地为主, 受人类活动影响较大, 碳储量维持在较低

水平.

为了更清楚地反映研究区碳储量变化, 对2000年和2020年这两个时期碳储量空间分布图进行差值计算, 重分类为3类: 增加、基本不变和减少. 由图3可知, 2000~2020年, 昆明市碳储量空间变化区域具有大聚集和零星分布的特点. 研究区大部分区域碳储量基本稳定, 其占比为90.67%, 5.14%的区域碳储量呈增加趋势, 零星分布在整个研究区内. 其次, 由于近年来受到昆明市环滇发展的影响, 碳储量减少区域主要围绕在滇池周边主城三区, 减少量从高到低依次为官渡区 (0.99×10^6 t)、呈贡区 (0.62×10^6 t) 和西山区 (0.54×10^6 t).

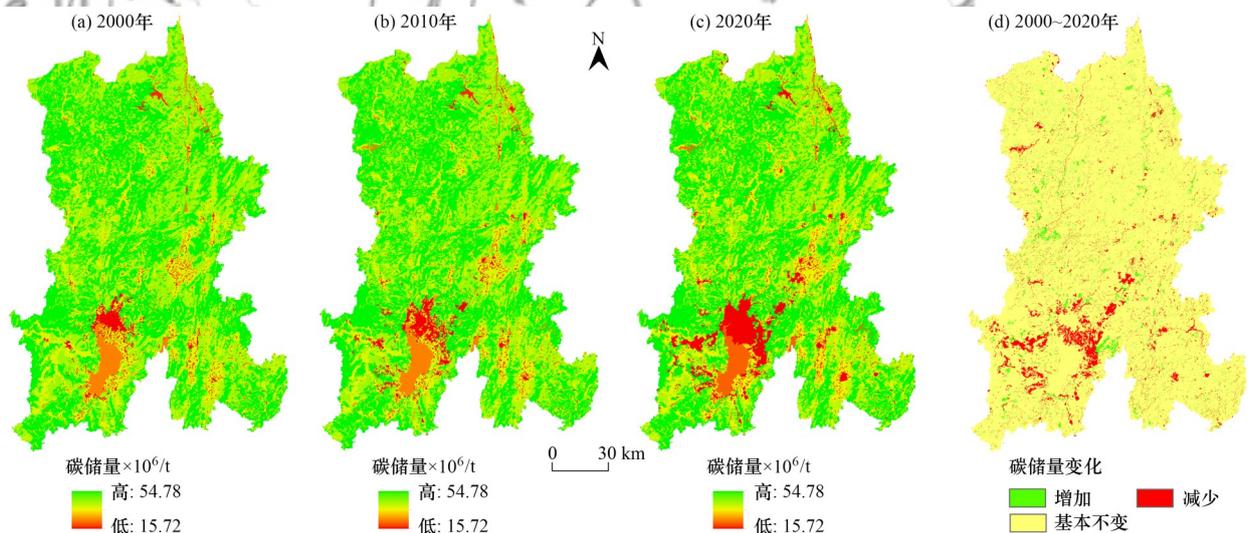


图3 昆明市2000、2010和2020年碳储量及其变化量的空间分布

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

2.2 2000~2020年土地利用转移及其对碳储量的影响

土地利用转移伴随着大量的碳交换. 运用 ArcGIS 10.7 栅格计算器得到昆明市2000~2020年土地利用转移矩阵(表5), 根据土地利用转移矩阵可以看

出, 2000~2020年, 由于社会经济发展需求日益提高, 昆明市耕地保护形势严峻, 建设用地侵占了大量耕地, 转出 $36 758.52 \text{ hm}^2$; 反之, 草地和林地是耕地的主要转入源, 共转出 $57 794.04 \text{ hm}^2$; 未利用地转入面积最少,

共转入 1 051. 2 hm², 其中 64. 76% 来源于草地, 19. 52% 来源于林地; 从转出方向看, 水域向建设用地和耕地转出最多, 分别转出 2 464. 2 hm² 和 2 023. 56 hm²; 林地和草地为主要相互转移地类, 其中林地净转入面积为 79 507. 8 hm², 草地转出占 64. 56%, 草地净转入 74 729. 16 hm², 林地转出占 65. 55%。

为进一步探究土地利用转移对昆明市碳储量变化的影响, 计算了 2000 ~ 2020 年土地利用转移而导致的碳储量变化情况(表 6)。受不同土地利用类型间

转移面积以及 4 种碳库碳密度差异的影响, 不同土地利用类型间的相互转移对碳储量的影响存在差异。2000 ~ 2020 年由于土地利用转移使得碳储量减少约 5. 27 × 10⁶ t, 主要是因为碳密度值最高的林地大面积向草地转移, 碳储量流失 5. 96 × 10⁶ t。相反, 林地作为陆地生态系统中最大的碳库, 林地的转入非常有利于碳储量的增加, 共流入 12. 1 × 10⁶ t, 相较于其余地类, 研究期内水域、建设用地和未利用地转入转出致使碳储量共损失 3. 35 × 10⁶ t。

表 5 昆明市 2000 ~ 2020 年土地利用转移矩阵/hm²

Table 5 Land use transfer matrix of Kunming City from 2000 to 2020/hm²

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	334 940.76	26 289.36	23 278.68	2 682.36	36 758.52	111.60
林地	27 766.80	858 535.92	48 987.72	4 096.80	10 895.04	205.20
草地	30 027.24	51 327.00	502 492.32	1 924.20	21 934.44	680.76
水域	2 023.56	511.56	816.84	40 867.56	2 464.20	34.56
建设用地	4 036.68	1 235.16	1 167.12	441.00	41 614.20	19.08
未利用地	102.96	144.72	478.80	39.24	11.52	5 847.12

表 6 昆明市 2000 ~ 2020 年碳储量转移矩阵 × 10⁶ t

Table 6 Carbon storage transfer matrix of Kunming City from 2000 to 2020 × 10⁶ t

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	35.49	4.00	2.83	-0.18	-1.61	-0.01
林地	-2.94	130.65	-5.96	-0.28	-0.48	-0.01
草地	-3.18	7.81	61.12	-0.10	-0.96	-0.03
水域	0.21	0.08	0.10	2.76	-0.11	-0.002
建设用地	0.43	0.19	0.14	0.03	1.82	0.001
未利用地	0.01	0.02	0.06	0.003	-0.001	0.28

与建设用地相似, 水域很少转为其他地类, 面积较 2020 年增加 13 235. 4 hm², 其增量来自于林地和草地的大面积转入。

与 2020 年相比, 耕地保护情景下耕地、水域和建设用地面积持续增加, 分别增加 3. 99%、0. 5% 和 3. 78%, 由于限制耕地转出为其他地类, 耕地面积增加至 482 004. 36 hm², 远超 2020 年昆明市耕地保有量目标(394 300 hm²); 禄劝县、寻甸县、嵩明县和宜良县成为全市耕地规模分布最大的区域, 是落实国家粮食安全、保障全市农产品稳定供给的区域。与此同时, 该情景下林地、草地和水域在 4 个情景中面积最小, 是因为过度强调耕地保护, 允许生态用地转出所致。

在生态保护情景下生态用地即林地、草地和水域的变化趋势与耕地保护情景相比发生了较大变化, 产生了相应的生态碳效应。林地、草地和水域面积迅速扩张, 所占研究区总面积的比例均比其他情景高, 分别为 46. 06%、28. 73% 和 3. 32%。在限制条件下, 由于采取了退耕还林还草、水源保护等措施, 耕地面积向生态用地大幅度转移, 共计转出 337 494. 6 hm²。其次, 由于未利用地大量开发利用, 4 种情景下其面积均呈减少趋势, 在生态保护情景中预测减少 1 524. 96 hm²。

防止城市扩张情景下, 禁止其他地类向建设用地转移, 2030 年其规模比 2020 年减少 21 074. 4 hm², 仅为 92 603. 52 hm², 有效缓解了建成区斑块急剧速度, 抑制了中心城区周边的建设用地进一步扩张, 呈现出填充式和紧凑式缩减趋势, 间接防止了滇池周围生态环境的破坏。

2. 3 多情景模拟下土地利用变化及碳储量潜力预测结果分析

国土空间规划是“双碳”目标实现的重要干预手段。近年来, 国土空间规划引起了碳汇能力的剧烈变化, 直接影响到“双碳”目标的达成, 因此对未来土地格局的模拟预测至关重要。除惯性发展情景外, 本文耕地保护、生态保护和防止城市扩张这 3 个情景是按照国土空间规划“三条控制线”(永久基本农田、生态保护红线和城镇开发边界)划定理念和底线思维设置。具体设置规则见 1. 3. 4 节。

2. 3. 1 土地利用变化模拟预测结果分析

基于 CA-Markov 模型和 10 个土地利用驱动因子, 以 2020 年为基期, 预测得到 2030 年昆明市不同情景土地利用变化。根据预测结果(图 4 和表 7), 在 4 个情景中, 惯性发展情景 2030 年建设用地面积达到峰值, 相比 2020 年增加近 2 倍, 为 248 780. 16 hm², 耕地、林地和草地是其扩张的主要对象, 从空间分布看, 主城五区城镇建设用地从同心圆式扩展逐渐向复杂不规则化演变, 并向西南和东北两翼方向拓展。

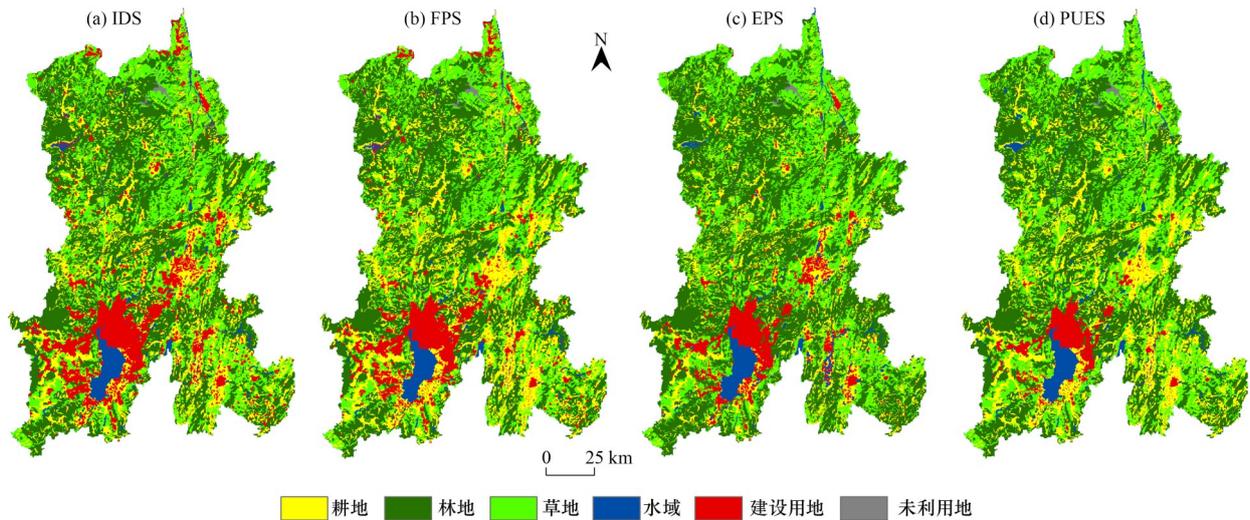


图4 昆明市2030年不同情景土地利用分布

Fig. 4 Land use distribution in different scenarios in Kunming City in 2030

表7 昆明市2020~2030年土地利用变化及面积比例

Table 7 Land use change and area proportion in Kunming City from 2020 to 2030

土地利用类型	2030年面积/hm ² (比例/%)				2020~2030年变化面积/hm ² (比例/%)			
	IDS	FPS	EPS	PUES	IDS	FPS	EPS	PUES
耕地	391 098.96 (18.75)	482 004.36 (23.12)	302 069.16 (14.49)	446 428.08 (21.41)	-7 799.04 (-0.38)	83 106.36 (3.99)	-96 828.84 (-4.64)	47 530.08 (2.28)
林地	831 114.72 (39.87)	814 864.32 (39.09)	960 470.28 (46.06)	877 202.64 (42.08)	-106 929.00 (-5.12)	-12 3179.40 (-5.90)	22 426.56 (1.07)	-60 841.08 (-2.91)
草地	544 011.48 (26.09)	528 527.88 (25.35)	599 211.72 (28.73)	592 821.00 (28.44)	-33 210.00 (-1.60)	-48 693.60 (-2.34)	21 990.24 (1.04)	15 599.52 (0.75)
水域	63 286.56 (3.04)	60 465.96 (2.90)	69 146.28 (3.32)	68 930.64 (3.31)	13 235.40 (0.64)	10 414.80 (0.50)	19 095.12 (0.92)	18 879.48 (0.91)
建设用地	248 780.16 (11.93)	192 490.56 (9.23)	149 076.72 (7.15)	92 603.52 (4.44)	135 102.24 (6.48)	78 812.64 (3.78)	35 398.80 (1.70)	-21 074.40 (-1.01)
未利用地	6 498.72 (0.31)	6437.52 (0.31)	5 373.36 (0.26)	6 804.72 (0.33)	-399.60 (-0.02)	-460.80 (-0.02)	-1 524.96 (-0.07)	-93.60 (0)

2.3.2 多情景下碳储量预测结果分析

采用 InVEST 模型 Carbon 模块分别计算并模拟预测昆明市 2030 年 4 种情景碳储量。数量分析结果显示,在 4 种情景中碳储量由大到小依次为生态保护情景 ($262.49 \times 10^6 \text{ t}$)、防止城市扩张情景 ($261.93 \times 10^6 \text{ t}$)、耕地保护情景 ($252.16 \times 10^6 \text{ t}$) 和惯性发展情景 ($249.54 \times 10^6 \text{ t}$)。

与 2020 年碳储量相比,4 种情景碳储量总量均有所下降,其中惯性发展情景碳储量大幅下降,减少了 $14.36 \times 10^6 \text{ t}$,这是由于该情景延续了历史转移概率,研究区经济增长迅速,建设用地急剧扩张,生态用地被大量占用所引起;在生态保护情景下,相比 2020 年碳储量仅减少 $1.41 \times 10^6 \text{ t}$,较其它情景损失最少,该情景采取了生态保护措施,限制了林地、草地和水域面积的转出,但碳储量减少是因为耕地减少所致;与

之相似的是防止城市扩张情景,在限制建设用地面积扩张的条件下,碳储量减少了 $1.97 \times 10^6 \text{ t}$;相较于惯性发展情景,耕地保护情景碳储量略微上升,增加了 $2.62 \times 10^6 \text{ t}$ 。综上分析,在生态保护政策和限制建设用地扩张的前提下,研究区碳储量下降受到明显控制,耕地保护情景碳储量下降则受到略微控制。因此至 2030 年,应在耕地保护的基础上采取一定的生态保护措施,有效防止建设用地进一步扩张,以减缓研究区碳储量的损失。

从行政区划和空间格局变化角度来看(图 5 和表 8),研究区 2030 年各情景碳储量具体分布情况略有不同,在惯性发展情景和耕地保护情景下较 2020 年出现明显空间变化,各区域碳储量总体呈减少趋势,2 种情景碳储量下降部分遍布整个区域,但绝大部分呈块状主要集中在主城五区(五华区、盘龙区、官渡

区、西山区和东川区),碳储量上升部分则呈点状零散分布于研究区内部,其中,作为滇中经济圈核心区域的安宁市碳储量下降最多,分别减少 $1.48 \times 10^6 \text{t}$ 和 $1.35 \times 10^6 \text{t}$. 与前 2 种情景相比,生态保护情景和防止城市扩张情景多数区域碳储量较为稳定. 生态保护情景下,碳储量减少区域主要分布在嵩明县、宜良县和晋宁区,共计减少 $1.12 \times 10^6 \text{t}$,碳储量增加区域则主要分布在富民县和东川区,共计增加 $0.08 \times 10^6 \text{t}$.

由于限制其它地类向建设用地转移,防止城市扩张情景碳储量空间变化最不明显,碳储量总体下降的原因则是生态用地即林地、草地和水域向耕地加速转移所致. 2000~2030 年,受制于地形海拔因素,禄劝县、寻甸县和东川区城市化速度缓慢,且拥有丰富的森林和生物资源,对于促进昆明市碳中和和维护生态系统的稳定具有重要的生态价值,是昆明市乃至云南省重要的碳汇区域.

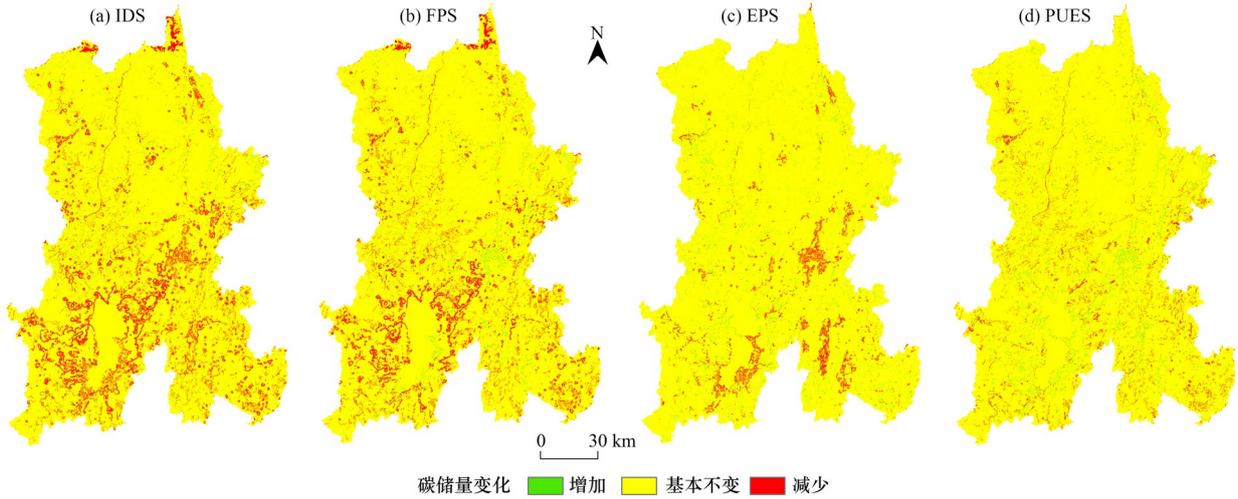


图 5 昆明市 2020~2030 年不同情景碳储量变化空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon storage change in different scenarios in Kunming City from 2020 to 2030

表 8 昆明市 2000~2030 年各区碳储量 $\times 10^6 \text{t}$

Table 8 Carbon reserves of different regions in Kunming City from 2000 to 2030 $\times 10^6 \text{t}$

行政区	2000年	2010年	2020年	IDS	FPS	EPS	PUES
五华区	4.66	4.71	4.53	4.17	4.16	4.54	4.51
盘龙区	11.24	11.25	11.06	10.31	10.43	11.03	10.89
官渡区	7.52	7.52	6.53	5.46	5.59	6.54	6.55
西山区	10.66	10.66	10.12	9.02	9.13	10.14	10.12
东川区	22.94	22.94	22.85	21.84	21.96	22.89	22.84
呈贡区	5.71	5.70	5.08	4.36	4.54	4.97	5.06
晋宁区	16.24	16.24	15.81	14.51	14.92	15.49	15.59
富民县	12.69	12.69	12.70	12.20	12.20	12.74	12.57
宜良县	24.75	24.75	24.35	23.15	23.40	24.06	24.08
石林县	21.15	21.15	20.93	19.62	19.79	20.77	20.49
嵩明县	9.98	9.98	9.70	8.78	9.39	9.19	9.75
禄劝县	57.61	57.62	57.44	56.00	55.99	57.54	57.03
寻甸县	47.01	47.01	46.66	45.47	45.88	46.46	46.48
安宁市	16.96	16.84	16.07	14.59	14.72	16.06	15.91

3 讨论

3.1 昆明市固碳潜力分析

土地利用与碳储量变化的综合评估可以清晰反映出昆明市的生态系统碳储存能力,有助于及时优化国土空间格局,管控生态脆弱区域,发挥固碳最大潜力. 2000~2020 年,昆明市土地利用变化加剧了陆地生态系统的碳损失,林地和草地面积的减少是碳

储量下降的主要原因. 受之前环滇发展影响,昆明城镇发展呈“摊大饼”式地不断扩张,高强度的人类开发活动进一步加深了对生态系统的破坏和优质耕地的侵占,出现了大规模建设用地占用耕地的现象. 究其原因是因为受三面临山、一面向水的自然地理格局影响,建设用地扩展方向较窄,只能占用较为平整的耕地所致,这与张薇等^[51]和金杰^[52]研究的结果一致. 值得注意的是,研究区北部禄劝县、寻甸县、东

川区、东南部石林县和宜良县自然环境良好,气候湿润、雨水丰沛、生物多样性丰富,林业资源禀赋较好,2000~2020年碳储量约占总碳储量的65%,鉴于此,该一区四县可作为碳储量优先保护区域。其次,滇池作为昆明市山水林田湖草生态系统的重要组成部分,近年来随着生态保护修复的力度不断加大,逐渐恢复了其原有的生态功能,未来也将成为研究区重要的固碳区域。综上分析,建议严格管控主城区建设用地扩张,落实耕地用途管制制度,巩固低碳储量区域固碳能力,重点关注研究区林草面积变化,通过自然为主人工为辅手段对林地、草地和水域等生态用地进行保护修复,扩大碳汇空间潜力,促进昆明市碳汇功能提质增效。

3.2 不同情景碳储量结果对未来规划的启示

本文模拟的情景是根据国土空间规划中永久基本农田红线、生态保护红线和城镇开发边界这3条管控红线的划定理念和底线思维所设置。通过预测不同情景昆明市陆地生态系统碳储量变化,为规划未来土地利用结构和碳储量演变趋势提供了新思路。本研究发现4个情景碳储量均呈减少趋势,惯性发展情景碳储量最低,建设用地面积扩张迅速,演变方向复杂无序,与当前城市核心区“东进、西拓、南控、北延、中优”以及实现远湖发展促进滇池流域内外协调的规划方向不符;耕地保护情景下林地、草地和水域面积最小,碳储量较2020年减少 11.74×10^6 t,降幅较大,相比其它情景生态保护情景碳储量最高且相对稳定,生态用地受到了一定保护,这是最优的发展模式;防止城市扩张情景建设用地面积最小,未利用地面积达到最大。

3条控制线的提出和划定以及当前中央对于生态保护及耕地保护的高度重视,使得今后城市空间形态变化区别于传统的仅基于自然地理格局和其他社会经济因素的自由发展,将向尊重自然地理格局的前提下,受各类管控红线等多方面因素制约的方向转型。“三线”坐落于同一空间,代表着多种土地功能的诉求,三者密不可分。文中生态保护情景只是单从碳汇角度出发的一种最优绿色发展模式,可为研究区自然资源可持续管理和低碳发展提供决策依据。

3.3 不足与展望

文中采用的碳密度是在前人的研究成果基础上根据研究区气象数据修正得到,因相关成果中研究湖北省碳储量的文献较为丰富,且数据精确可靠,因此本文以湖北省碳密度值作为参考值对云南省碳密度进行修正,省域之间对比修正,相比采用全国尺度碳密度进行区域性研究更有助于提高评估碳储量的

准确性。此外,目前还未有文献记载气温上升与土壤有机碳下降的定量关系表达,导致无法确定其具体修正系数,因此根据年降水量数据对土壤碳密度进行修正具有一定的局限性,未来还需考虑从多个因素修正陆地生态系统碳密度。

本文耦合的InVEST模型与CA-Markov模型降低了以往土地利用模拟和陆地生态系统碳储量模拟操作上的复杂性,可行性较强,研究结果较为准确。但也存在模型不可避免的误差性,今后研究还需加强以下几点:①提高土地栅格数据空间分辨率,以便提高碳储量预测结果的精度;②在模拟未来不同土地利用格局时,未考虑地方相关政策对土地利用变化的影响,使模拟结果具有一定不确定性;③InVEST模型碳储量模块侧重于不同土地利用类型间的碳密度差异,未考虑地类内部固碳机制差异以及植被年龄结构带来的固碳差异。未来还需从提高土地利用数据精度基础上,验证碳密度值的合理性,重点研究土地利用类型内部固碳机制以及不同植被不同年龄对碳密度的影响,以提高区域陆地生态系统碳储量评估的准确性。

4 结论

(1)2000~2020年,昆明市土地利用变化具体特征表现为耕地、林地和草地面积持续减少,其中耕地面积大幅减少,建设用地面积增加区域主要在滇池周围。

(2)2000~2020年,昆明市碳储量累计损失 5.27×10^6 t。林地是研究区主要碳汇空间,碳储量占总碳储量的50%以上。从空间分布来看,昆明市碳储量呈“由南向北逐渐升高”的空间分布特征,碳储量高值区分布在研究区北部,碳储量低值区域分布在主城区五区。

(3)2000~2020年,昆明市土地利用转型对碳储量的影响存在差异。耕地成为建设用地快速扩张的主要转入土地利用类型,耕地共转出 36758.52 hm^2 ,碳储量累计流失 1.61×10^6 t;其他土地利用类型向碳密度高的林地转移,有利于研究区碳储量的增加。

(4)2020~2030年,惯性发展情景:耕地、林地和草地大面积向建设用地转移,建设用地面积增加近2倍,向西南和东北两翼方向扩展;耕地保护情景:耕地面积远超2020年昆明市耕地保有量,禄劝县、寻甸县、嵩明县和宜良县成为全市耕地规模分布最大的区域;生态保护情景:生态用地占全域面积的78.11%,产生一定碳效益;防止城市扩张情景:有效缓解了建设用地面积增长速率,面积仅为 92603.52 hm^2 。

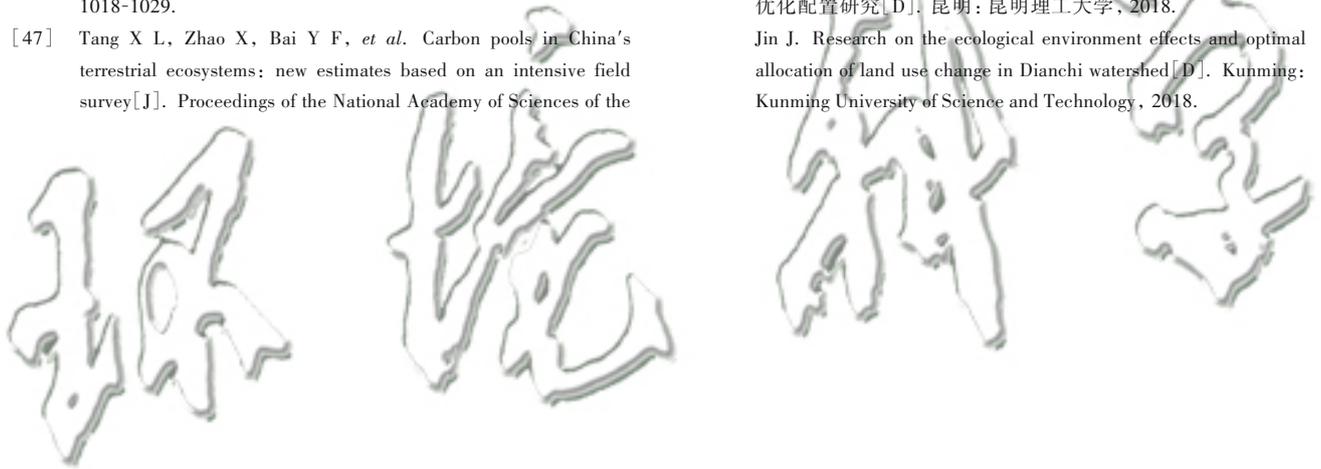
(5)2030年惯性发展情景碳储量最小,生态保护情景碳储量最大. 生态保护情景可缓解研究区碳储量减少趋势,为最优绿色发展模式. 其次,与2020年相比,惯性发展情景和耕地保护情景碳储量空间变化较为明显.

参考文献:

- [1] Sokolov Y I. Risks of global climate change [J]. *Issues of Risk Analysis*, 2021, **18**(3): 32-45.
- [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, 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.
- [3] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, *et al.* Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon [J]. *Nature*, 2000, **403**(6767): 301-304.
- [4] 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.
- [5] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, *et al.* The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 2009, **458**(7241): 1009-1013.
- [6] 张帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 661-668.
- Zhang S, Xu M X, Zhang Y F, *et al.* Effects of land use change on soil active organic carbon in deep soils in hilly loess plateau region of northwest China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 661-668.
- [7] 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.
- [8] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(12): 2995-3006.
- Huang X J, Zhang X Y, Lu X H, *et al.* Land development and utilization for carbon neutralization [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(12): 2995-3006.
- [9] Lyu R F, Mi L N, Zhang J M, *et al.* Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH-3r model and InVEST model [J]. *Ecological Research*, 2019, **34**(3): 380-393.
- [10] Houghton R A, Hackler J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia [J]. *Global Change Biology*, 1999, **5**(4): 481-492.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应——以贵州省为例[J]. *中国土地科学*, 2021, **35**(11): 101-111.
- Chen M J, Wang Q R, Bai Z K, *et al.* Transition of “production-living-ecological” space and its carbon storage effect under the vision of carbon neutralization: a case study of Guizhou province [J]. *China Land Science*, 2021, **35**(11): 101-111.
- [14] Yang H, Huang J L, Liu D F. Linking climate change and socioeconomic development to urban land use simulation: Analysis of their concurrent effects on carbon storage [J]. *Applied Geography*, 2020, **115**, doi: 10.1016/j.apgeog.2019.102135.
- [15] Nie X, Lu B, Chen Z P, *et al.* Increase or decrease? Integrating the CLUMondo and InVEST models to assess the impact of the implementation of the major function oriented zone planning on carbon storage [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **118**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106708.
- [16] 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.
- [17] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. *资源科学*, 2016, **38**(8): 1585-1593.
- Zhang Y, Xie Y C, Qi S S, *et al.* Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang watershed in Gansu based on InVEST model [J]. *Resources Science*, 2016, **38**(8): 1585-1593.
- [18] 帕茹克·吾斯曼江, 郝晋珉, 王楠, 等. 基于“三生”功能的土地利用转型及其生态环境效应——以尉犁县为例[J]. *干旱区地理*, 2021, **44**(6): 1612-1622.
- Wusimanjiang P, Hao J M, Wang N, *et al.* Land use transformation based on production-living-ecological functions and associated eco-environment effects: A case study in Yuli County [J]. *Arid Land Geography*, 2021, **44**(6): 1612-1622.
- [19] Gao J, Wang L C. Embedding spatiotemporal changes in carbon storage into urban agglomeration ecosystem management — A case study of the Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117764.
- [20] Nogueira E M, Yanai A M, De Vasconcelos S S, *et al.* Carbon stocks and losses to deforestation in protected areas in Brazilian Amazonia [J]. *Regional Environmental Change*, 2018, **18**(1): 261-270.
- [21] 李瑾璞, 夏少霞, 于秀波, 等. 基于 InVEST 模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, **36**(7): 854-861.
- Li J P, Xia S X, Yu X B, *et al.* Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem in Hebei province based on InVEST model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, **36**(7): 854-861.
- [22] Han X H, Zhao F Z, Tong X G, *et al.* Understanding soil carbon

- sequestration following the afforestation of former arable land by physical fractionation[J]. *CATENA*, 2017, **150**: 317-327.
- [23] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. *自然资源学报*, 2022, **37**(5): 1214-1232.
- Wang T F, Gong Z W, Deng Y J. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi province based on land use change[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(5): 1214-1232.
- [24] 郑树峰, 王丽萍, 臧淑英. 大兴安岭天保工程区生态系统服务变化研究[J]. *地理科学*, 2021, **41**(7): 1295-1302.
- Zheng S F, Wang L P, Zang S Y. The change of ecosystem services of natural forest protection project regions in the Da Hinggan mountains [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, **41**(7): 1295-1302.
- [25] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(4): 826-844.
- Deng Y J, Yao S B, Hou M Y, *et al.* Assessing the effects of the green for grain program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: A case study of Zichang county in hilly and gully region of Loess plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(4): 826-844.
- [26] 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 等. 天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征[J]. *生态学报*, 2021, **41**(13): 5093-5105.
- Zhang Y R, Liu X T, Gao W Q, *et al.* Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink (source) in the Natural Forest protection project region for the past 20 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(13): 5093-5105.
- [27] 李园园, 王蕾, 刘琪璟, 等. 新疆喀纳斯自然保护区森林碳储量及碳密度变化[J]. *干旱区研究*, 2019, **36**(5): 1136-1145.
- Li Y Y, Wang L, Liu Q J, *et al.* Changes of carbon storage and carbon density of forests in the Kanas national nature reserve, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2019, **36**(5): 1136-1145.
- [28] 季波, 何建龙, 王占军, 等. 宁夏天然草地植被碳储量特征及构成[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(4): 1259-1268.
- Ji B, He J L, Wang Z J, *et al.* Characteristics and composition of vegetation carbon storage in natural grassland in Ningxia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(4): 1259-1268.
- [29] Elzen M D, Fekete H, Höhne N, *et al.* Greenhouse gas emissions from current and enhanced policies of China until 2030: Can emissions peak before 2030? [J]. *Energy Policy*, 2016, **89**: 224-236.
- [30] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2021, **41**(17): 6786-6799.
- Li M Y, Shanguan Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(17): 6786-6799.
- [31] 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.
- [32] He C Y, Zhang D, Huang Q X, *et al.* Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, **75**: 44-58.
- [33] 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.
- [34] 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.compenurbysys.2020.101569.
- [35] 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.
- [36] 邵壮, 陈然, 赵晶, 等. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *生态学报*, 2022, **42**(23): 9456-9469.
- Shao Z, Chen R, Zhao J, *et al.* Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(23): 9456-9469.
- [37] 张伟伟, 魏璐瑶, 金星星, 等. 基于 FLUS-UGB 的县域土地利用模拟及城镇开发边界划定研究[J]. *地球信息科学学报*, 2020, **22**(9): 1848-1859.
- Zhang S W, Wei L Y, Jin X X, *et al.* The land use simulation and delimitation of urban development boundary in county area based on FLUS-UGB [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, **22**(9): 1848-1859.
- [38] 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.
- [39] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2799-2809.
- Zhang K Q, Chen J J, Hou J K, *et al.* Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with InVEST and GeoSOS-FLUS model [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2799-2809.
- [40] 雷军成, 刘纪新, 雍凡, 等. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的五马河流域生态系统服务多情景评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, **33**(12): 1084-1093.
- Lei J C, Liu J X, Yong F, *et al.* Multi-scenario ecosystem service assessment of Wuma river valley based on CLUE-S and InVEST models [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, **33**(12): 1084-1093.
- [41] 郭洪伟, 孙小银, 廉丽姝, 等. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(9): 2899-2906.
- Guo H W, Sun X Y, Lian L S, *et al.* Response of water yield function of ecosystem to land use change in Nansi lake basin based on CLUE-S model and InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(9): 2899-2906.
- [42] 周杰, 张学儒, 牟风云, 等. 基于 CA-Markov 的土壤有机碳储量空间格局重建研究——以泛长三角地区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(7): 1565-1575.

- Zhou J, Zhang X R, Mou F Y, *et al.* Spatial pattern reconstruction of soil organic carbon storage based on CA-Markov—a case study in Pan-Yangtze river delta [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(7): 1565-1575.
- [43] 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.
- [44] Giardina C P, Ryan M G, Hubbard R M, *et al.* Tree species and soil textural controls on carbon and nitrogen mineralization rates [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(4): 1272-1279.
- [45] 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 belowground carbon allocation in China's forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(12): 5148-5157.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响——以湖北省为例[J]. *生态学报*, 2019, **39**(2): 672-683.
- Ke X L, Tang L P. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(2): 672-683.
- [50] 张平平, 李艳红, 殷浩然, 等. 中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J]. *自然资源学报*, 2022, **37**(5): 1183-1197.
- Zhang P P, Li Y H, Yin H R, *et al.* Spatio-temporal variation and dynamic simulation of ecosystem carbon storage in the north-south transitional zone of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(5): 1183-1197.
- [51] 张薇, 刘森, 戚与珊. 基于 CLUE-S 模型的昆明市域土地利用预案模拟[J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(6): 1655-1662.
- Zhang W, Liu M, Qi Y S. Land-use scenarios simulation based on the CLUE-S model in Kunming[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(6): 1655-1662.
- [52] 金杰. 滇池流域土地利用变化的生态环境效应及其约束下的优化配置研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- Jin J. Research on the ecological environment effects and optimal allocation of land use change in Dianchi watershed[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.



CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-ru, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Apportionment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)