

目 次

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

京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响

武爱彬^{1,2}, 陈辅国³, 赵艳霞², 秦彦杰², 刘欣², 郭小平^{1*}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 河北省科学院地理科学研究所, 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 石家庄 050011; 3. 河北地质大学土地科学与空间规划学院, 石家庄 050031)

摘要: 量化分析建设用地扩张对陆地生态系统碳储量的影响, 探索模拟建设用地扩张的优化方案以提高未来生态系统碳储量, 对区域可持续发展和生态文明建设具有重要的现实意义. 基于土地利用和地理空间数据, 利用生态系统服务与权衡综合评估(InVEST)模型和基于栅格的斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型, 以2 km网格为基本单元, 核算分析了京津冀城市群2000~2020年生态系统碳储量和格局演变, 拟合回归了建设用地变化和碳储量变化两者关系, 设置不同城市扩张发展情景对京津冀城市群2030年土地利用格局进行了模拟并分析了不同发展情景下2020~2030年建设用地扩张对碳储量的影响. 结果表明: ①京津冀城市群2000、2010和2020年生态系统碳储量(以C计)分别为2 088.02、2 106.78和2 121.25 Tg, 其中林地碳库占比最大. 研究期间碳储量减少的网格单元集中分布在北京、天津、石家庄和唐山等大城市周边, 建设用地扩张的区域是碳储量变化最为剧烈的区域. ②在建设用地占比10%以上的各等级网格单元区域, 建设用地扩张和碳储量变化回归拟合关系良好, 两者回归系数均呈现波动上升趋势. ③在自然发展、建设用地扩张增速减少15%和建设用地扩张增速减少30%这3种发展情景下, 2030年生态系统碳储量(以C计)分别为2 129.12、2 133.55和2 139.10 Tg. 2020~2030年建设用地扩张和碳储量变化两者回归拟合效果均明显优于2000~2010年和2010~2020年. 回归系数随着建设用地占比等级的增加均呈现波动增加的趋势. 在各建设用地占比等级区域, 回归系数值均呈现: 自然发展情景<建设用地扩张增速减少15%发展情景<建设用地扩张增速减少30%发展情景. 在“双碳”目标下, 京津冀城市群应优先选择建设用地扩张增速降低发展情景, 对建设用地的扩张应优先控制在建设用地占比较高的区域.

关键词: 碳储量; 建设用地扩张; InVEST模型; PLUS模型; 京津冀城市群

中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2024)05-2828-12 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202305221

Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

WU Ai-bin^{1,2}, CHEN Fu-guo³, ZHAO Yan-xia², QIN Yan-jie², LIU Xin², GUO Xiao-ping^{1*}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application/Institute of Geographical Sciences Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 3. School of Land Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: It is of great practical significance for regional sustainable development and ecological construction to quantitatively analyze the impact of construction land expansion on terrestrial ecosystem carbon storage and to explore the optimization scheme of simulating construction land expansion to improve future ecosystem carbon storage. Based on the land use and cover change (LUCC) and other geospatial data of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2020, this study utilized the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) model and the patch-generating land-use simulation (PLUS) model to assess and analyze the changes in ecosystem carbon stocks and spatial patterns regionally. In this study, we performed linear regression analysis to investigate the relationship between urban land expansion and changes in ecosystem carbon stocks for varying urban land proportion levels during two distinct time intervals, 2000-2010 and 2010-2020, which was conducted at a spatial resolution of 2 km. Three distinct urban land expansion scenarios were subjected to simulation to forecast the prospective land use pattern by 2030. Subsequently, we quantified the ramifications of these scenarios on ecosystem carbon stocks during the period from 2020 to 2030. The results were as follows: ① In the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration, the ecosystem carbon stocks exhibited notable variations over the study period, with values of 2 088.02, 2 106.78, and 2 121.25 Tg recorded for the years 2000, 2010, and 2020, respectively, resulting in a cumulative carbon sequestration of 33.23 Tg C during the study duration. It is noteworthy that forest carbon storage emerged as the dominant contributor, with an increase from 1 010.17 Tg in 2000 to 1 136.53 Tg in 2020. Throughout the study period, the spatial distribution of carbon stocks displayed relative stability. Regions characterized by lower carbon content were concentrated in the vicinity of the Bohai Rim region and in proximity to cities such as Beijing, Tianjin, and Shijiazhuang, as well as rural settlements. In contrast, grid units with moderate and high carbon stocks were predominantly situated in the western Taihang Mountain and the northern Yanshan Mountain. Additionally, there was a tendency of increasing carbon stocks in the Taihang Mountain and Yanshan Mountain region, whereas those surrounding major urban centers such as Beijing, Tianjin, Shijiazhuang, and Tangshan experienced a notable decline in carbon stocks. Such reductions were most pronounced in regions undergoing urban land expansion during the study period. ② In grid units with an urban land proportion exceeding 10% at each level, a strong correlation was observed between urban land expansion and changes in carbon stocks during both the 2000-2010 and

收稿日期: 2023-05-25; 修订日期: 2023-08-07

基金项目: 河北省科学院基本科研业务费试点项目(2023PF04)

作者简介: 武爱彬(1987~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为土地利用优化与碳储量评估, E-mail: wu.ai.bin@163.com

* 通信作者, E-mail: guoxp@bjfu.edu.cn

2010-2020 periods. The changes in urban land proportion adequately explained the variations in carbon stocks. However, the explanatory power of urban land on carbon stocks decreased during the 2010-2020 period, indicating that other factors played a more substantial role in influencing carbon stocks during this time. The regression coefficients for both periods exhibited a fluctuating upward trend. In comparison to that during the 2000-2010 period, the impact of urban land expansion on carbon stocks was relatively smaller during 2010-2020, indicating a weakening influence. ③ In light of three distinct development scenarios, namely natural development (Scenario I), a 15% reduction in the rate of urban land expansion (Scenario II), and a 30% reduction in the rate of urban land expansion (Scenario III), the projected ecosystem carbon stocks for the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in the year 2030 were estimated to be 2 129.12, 2 133.55, and 2 139.10 Tg, respectively. These projections indicated an increase of 7.88, 12.30, and 17.85 Tg in comparison to the current carbon stocks. All scenarios demonstrated that the terrestrial ecosystem would play a role of carbon sink, particularly with the greatest carbon sink observed in the scenario with a 30% reduction in urban land expansion. The fit performance between urban land expansion and carbon stock changes during the 2020-2030 period was significantly better than that during the 2000-2010 and 2010-2020 periods, and the regression coefficients showed a fluctuating increase with an increase in urban land proportion. Across grid units with different urban land proportion levels, the regression coefficients exhibited the order of Scenario I < Scenario II < Scenario III. In pursuit of the carbon peaking and carbon neutrality goals, the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration should prioritize scenarios with reduced rates of urban land expansion, especially in regions with higher urban land proportions.

Key words: carbon storage; construction land expansion; InVEST model; PLUS model; Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

2023 年联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 报告显示, 2011~2020 年 10 年间全球地表平均温度比 1850~1900 年高出 1.1℃, 人类活动排放的温室气体已被证实引起了全球变暖^[1]. 陆地生态系统是大气 CO₂ 重要的汇, 对全球碳循环和气候变化具有重要影响^[2]. 提高陆地生态系统碳储量是当前国际社会公认的最经济可行和环境友好的减缓大气 CO₂ 浓度升高的重要途径之一^[3]. 目前, 由于工业化和城市化的快速发展, 建设用地扩张导致不透水面的增加和自然植被的丧失, 对生态系统碳储量产生了重大影响^[4], 是区域碳储量变化的主要因素^[5]. 因此, 量化分析建设用地扩张对陆地生态系统碳储量的影响, 探索模拟建设用地扩张的优化方案以提高未来生态系统碳储量, 是近年来全球气候变化和可持续发展研究的热点领域之一.

目前, 国内外学者围绕陆地生态系统碳储量估算的方法主要可分为实地调查法、遥感技术法和模型估计这 3 类. 实地调查法包含样地清查法等, 通过调查样地内植被生物量推算到区域的碳储量^[6], 存在对人力物力要求高、空间代表性较差等问题^[7]. 遥感方法是通过分析卫星影像或激光雷达等遥感数据估算区域碳储量^[8], 其样点到区域尺度转换存在一定的不确定性. 模型估计包含了基于数据的 Bookkeeping 模型^[9]、基于光能利用率 CASA 模型^[10]和基于生态过程的 CENTURY 模型^[11]、Biome-BGC 模型^[12]、BEPS 模型^[13]等, 但目前模型结构、参数以及驱动因子仍存在较大不确定性, 不同模型预测的碳汇强度存在较大差异^[14]. 与其他生态系统碳储量核算方法和模型相比, 生态系统服务与权衡综合评估模型 (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs tool, InVEST) 基于土地利用数据和土地利用类型地上生物、地下生物、土壤和死亡有机质的碳密度对碳储量进行核算, 具备数据需求量少、空间表达明晰等优点^[15,16], 被广泛应用于省^[17]、

市^[18]、县^[19]等不同尺度和流域^[20]、山区^[21]、海岸带^[22]、黄土高原^[23]等不同地貌单元的土地利用变化对生态系统碳储量影响研究. 目前针对建设用地扩张对碳储量的影响研究中, 多数学者采用建设用地碳库与被侵占土地利用类型碳库间的差值来进行总体评估^[4,24,25], 缺少对碳储量变化和建设用地扩张两者空间关系的定量化研究, 不能有效指导未来低碳目标下土地利用优化布局. 目前对未来土地利用变化的空间模拟模型主要以元胞自动机模型 (cellular automata, CA) 为基础, 根据转化规则挖掘策略可以分为两类: 一类是基于转化分析策略的 CA 模型, 主要包括 logistic-CA^[26]和 ANN-CA^[24]等; 另一类是基于格局分析策略的 CA 模型, 主要包括 CA-Markov 模型^[22]、CLUE-S 模型^[27]、CLUMondo^[28]、FLUS 模型^[29]和基于栅格的斑块生成土地利用模拟 (patch-generating land use simulation, PLUS) 模型^[30]等. 其中, PLUS 模型在模拟过程中能挖掘土地利用变化机制, 填补城市发展中由空间规划政策引导土地利用变化的模拟需求, 模拟结果可以更好地支持空间规划政策实施, 被广泛应用于模拟未来时期土地利用变化与碳储量关系研究^[31~34]. 已有研究大多从自然发展、生态保护、耕地保护等角度设置未来发展情景进行模拟, 对比分析不同情景下碳储量的时空变化, 缺少从建设用地扩张角度设置未来发展情景以及定量分析不同发展情景下碳储量变化对建设用地扩张的响应.

综上, 本文以近 30 年处于城市化高速发展时期的京津冀城市群^[35]为研究对象, 围绕建设用地扩张分别设置了建设用地自然发展、建设用地增速降低 15% 和建设用地增速降低 30% 共 3 种未来发展情景, 利用 PLUS 模型模拟了 2030 年 3 种情景下的土地利用格局, 引入 InVEST 模型核算了研究区 2000、2010 和 2020 年以及 3 种情景下 2030 年生态系统碳储量空间分布, 汇总计算了 2 km 网格单元 2000~2010 年、

2010~2020年和3种情景下2020~2030年碳储量和建设用地变化值,利用线性回归模型定量分析了不同建设用地占比等级区域建设用地扩张对生态系统碳储量变化的影响,以期京津冀城市群协同发展和国土空间规划精准实施提供借鉴.

1 研究区概况

京津冀城市群位于华北平原北部,地跨北纬 $36^{\circ}03' \sim 42^{\circ}40'$,东经 $113^{\circ}27' \sim 119^{\circ}50'$ 之间,面积21.80万 km^2 ,北靠燕山山脉,南面华北平原,西倚太行山,东临渤海湾,包括北京市、天津市两个直辖市和河北省的石家庄市、保定市、唐山市、廊坊市、张家口市、承德市、衡水市、沧州市、邢台市、邯郸市等11个地级市,如图1所示.2021年京津冀城市群GDP达到9.64万亿元,占全国GDP总量的8.43%,据第七次全国人口普查结果显示,2020年京津冀地区城镇人口数量为7 572.68万人,占全国城镇人口数量的8.40%,与2000年相比,城镇人口数量增加了131.58%,处于城市快速扩张阶段.

2 材料与方法

2.1 InVEST模型估算碳储量

InVEST模型中carbon storage模块将陆地生态系统的碳储量划分为4个碳库:地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机质,其模块假定研究区每种土地利用类型的碳密度是唯一值,简化了碳转移和碳储量计算过程,公式如下:

$$C_{i_total} = C_i \times S_i \quad (1)$$

$$C_i = C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_dead} + C_{i_soil} \quad (2)$$

式中, i 为土地利用类型, C_{i_total} 为第*i*种土地利用类型的碳储量, S_i 为第*i*种土地利用类型的面积, C_i 为第*i*种土地利用类型的总碳密度, C_{i_above} 、 C_{i_below} 、

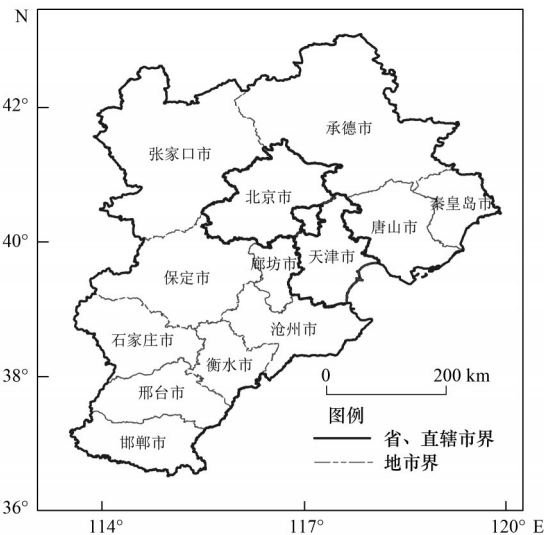


图1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

C_{i_dead} 和 C_{i_soil} 分别为第*i*种土地利用类型的地上生物碳密度、地下生物碳密度、死亡有机质碳密度和土壤碳密度.本研究结合2022年在河北省森林、草原、湿地和海岸带设置的327个样点采样实测数据(其中森林采样点分布在燕山-太行山山区,按照降雨量和林分类型分区设置;草地采样点分布在坝上高原地区,按照草地类型设置;湿地采样点设置在白洋淀和闪电河;海岸带采样点设置在秦皇岛沿海互花米草群落区和无植被潮滩区),河北省森林资源规划设计调查数据(2005年和2018年),参考21世纪10年代中国陆地生态系统地上碳密度数据集^[36]中在研究区范围内的499条碳密度数据(2004~2014年)和Wang等^[37]、廖珍梅等^[38]、邵壮等^[39]在京津冀区域生态系统碳储量的相关研究成果,修订得到京津冀城市群土地利用类型碳密度,如表1所示,将碳密度数据和土地利用数据输入InVEST模型,可得出京津冀区域2000、2010和2020年生态系统碳储量空间分布.

表1 京津冀城市群土地利用类型碳密度/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 1 Carbon density of different land use types in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

类型	耕地	森林	灌丛	草地	水域	未利用地	建设用地	沿海滩涂
地上生物	453	3 580	290	110	61	10	50	540
地下生物	91	907	199	261	0	2	0	90
土壤	7 000	15 140	9 400	6 290	1 716	2 263	3 217	6 150
死亡有机质	45	300	247	124	0	1	5	120

2.2 PLUS模型与驱动因子

PLUS模型主要由3部分构成:提取土地扩张、土地扩张分析策略(LEAS)和基于多个随机种子的CA(CARS).通过提取两期土地利用变化间各类用地扩张的部分,采用随机森林算法逐一对各类土地利用扩张和驱动力的因素进行挖掘.获取各类用地的

发展概率,及驱动因素对该时段各类用地扩张的贡献.结合随机种子生成和阈值递减机制,PLUS模型得以在发展概率的约束下,时空动态地模拟斑块的自动生成.研究综合考虑京津冀城市群土地变化特征和各类数据时空的可获取性和可量化性,参考已有研究经验,从自然条件和社会经济这2方面选取

了 15 个影响因素，数据来源和处理方式如表 2 所示. 利用 PLUS 模型模拟未来时期土地利用分布格局需要对模型模拟精度进行验证，基于京津冀城市群 2010 年土地利用数据，将研究区域 2020 年土地利用

结构作为模拟需求输入模型，模拟结果与 2020 年土地利用格局对比验证，经验证 Kappa 系数为 0.895，FoM 系数为 0.218，精度满足研究需求，可以利用该模型进行模拟.

表 2 土地利用模拟预测数据
Table 2 Data of land use simulation and prediction

类型	数据	分辨率/m	来源	处理
土地利用	京津冀区域 2000、2010 和 2020 年	30	中国土地覆被数据集(China land cover dataset, CLCD) ^[40]	将数量过少的湿地(小于 0.12 km ²)合并至水体地类,增加未覆盖到环渤海约 1 226 km ² 沿海滩涂区域;重分类为 1-耕地, 2-林地, 3-灌木, 4-草地, 5-水体, 6-荒地, 7-沿海滩涂, 8-建设用地
	与铁路距离 与高速公路距离 与一级道路距离 与二级道路距离 与三级道路距离	30	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org)	采用欧氏距离进行计算,输出 30 m 栅格
社会经济	与设区市级人民政府距离 与县(市、区)级人民政府距离		http://www.stats.gov.cn https://map.baidu.com	通过国家统计局官网获取各个级别行政区划名称,利用 POI 反查工具获取坐标,将坐标转化为 WGS84,采用欧氏距离进行计算,输出 30 m 栅格
	GDP(2010 年和 2020 年)	1 000	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)	重采样至 30 m
	人口(2010 年和 2020 年)			
	夜间灯光(2010 年和 2020 年)	1 000	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn) ^[40]	
自然条件	高程	30	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)	重采样至 30 m
	坡度	30		
	温度(2010 年和 2020 年)	1 000	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)	
	降水量(2010 年和 2020 年)	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)	
	土壤类型	1 000		

2.3 Fishnet空间分析

利用 ArcGIS 软件制作覆盖研究区的 2 km 的 Fishnet 图层，利用 Zonal Statistics As Table 功能分别统计出目标年每个网格内建设用地面积和生态系统碳储量，进而可得 2000 ~ 2010 年、2010 ~ 2020 年和

不同发展情景下 2020 ~ 2030 年对应指标的变化结果，将计算结果 Join 到 Fishnet 图层属性表，用于空间表达和分析. 为了量化分析不同区域建设用地扩张对碳储量变化的影响，将 2000、2010 和 2020 年网格单元内建设用地占比划分为 9 个等级，如图 2 所示.

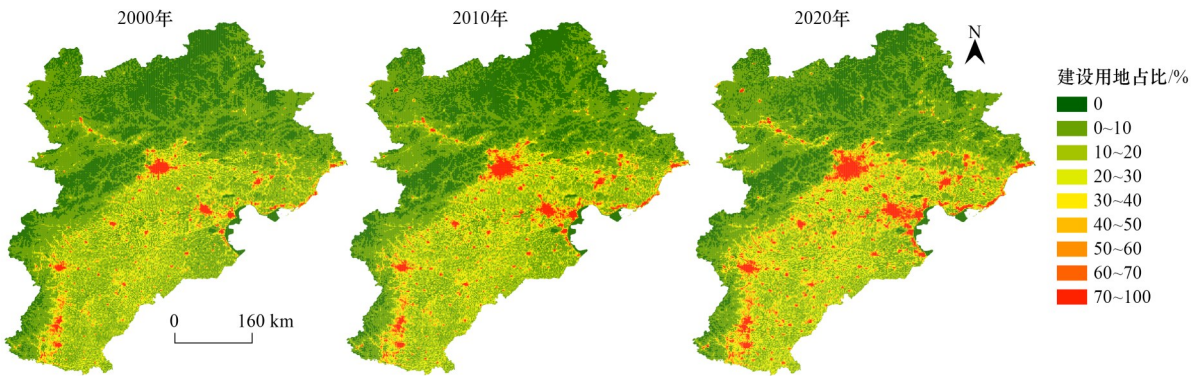


图 2 京津冀城市群 2000、2010 和 2020 年网格单元建设用地占比等级空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of grid unit construction land proportion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in 2000, 2010, and 2020

3 结果与分析

3.1 京津冀城市群 2000 ~ 2020 年土地利用与碳储量变化

京津冀城市群 2000 ~ 2020 年土地利用结构如图

3(a)所示，研究期间河北省土地利用类型以耕地、林地、草地和建设用地为主，其中耕地占比最大，其次为林地. 研究期间各土地利用类型面积变化如图 3(b)所示，2000 ~ 2010 年期间耕地面积减少了 10 086.15 km²，林地和建设用地的面积分别增加了

4 163.94 km²和 6 428.93 km², 其余地类面积变化较小; 2010~2020年期间耕地和草地面积分别减少了 5 094.99 km²和 5 391.99 km², 林地和建设用地面积分别增加了 3 630.85 km²和 7 011.57 km², 其余地类

面积变化较小. 与 2000 年相比, 2020 年研究区耕地、林地、草地和建设用地的变化比例分别为 -11.09%、12.51%、11.29% 和 48.05%, 建设用地是研究期间变化最为活跃的地类.

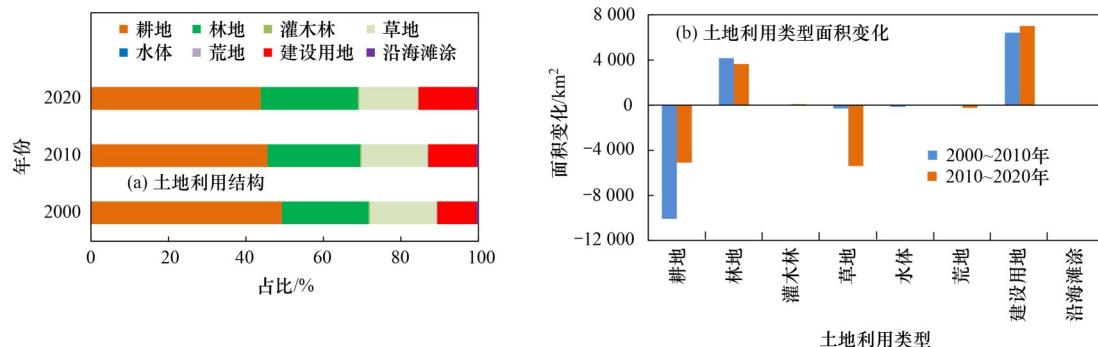


图3 京津冀城市群2000~2020年土地利用结构与土地利用类型面积变化

Fig. 3 Changes in land use structure and land type areas in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2020

利用 InVEST 模型计算京津冀城市群 2000、2010 和 2020 年生态系统碳储量空间分布, 汇总统计 2000、2010 和 2020 年研究区生态系统碳储量 (以 C 计, 下同) 分别为 2 088.02、2 106.78 和 2 121.25 Tg, 研究期间生态系统表现为碳汇, 共吸收了 33.23 Tg. 研究期间生态系统碳储量主要由耕地、林地、草地和建设用地碳库构成, 如图 4 所示, 其中林地和建设用地碳库呈增加趋势, 耕地和草地碳库呈减少趋势. 所有地类碳库中, 林地碳库占比最大, 由 2000 年 1 010.17 Tg 增加至 2020 年 1 136.53 Tg; 其次为耕地碳库, 由 2000 年 845.19 Tg 减少至 2020 年 751.46 Tg.

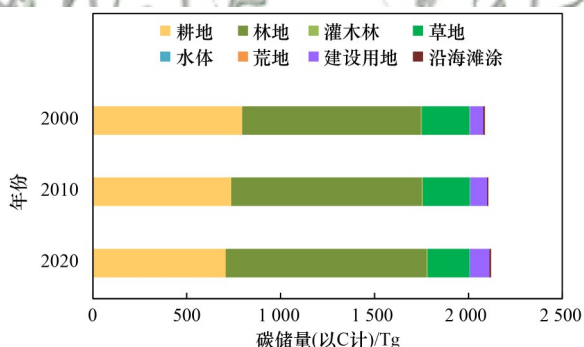


图4 京津冀城市群2000~2020年生态系统碳储量结构

Fig. 4 Carbon storage structure of ecosystem in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2020

将 2 km 网格单元的碳储量从 0~70 Gg 等间距划分 7 个等级, 结果如图 5 所示. 本研究期间碳储量分布格局保持稳定, 低碳储量等级 (0~10 Gg) 的网格单元集中分布在环渤海区域, 主要由于此区域土地利用类型主要为水域, 碳密度值最低; 较低碳储量等级 (10~20 Gg) 的网格单元集中分布在北京、天津、石家庄等城市和周边区域及农村居民点, 主要为建设用地集中分布区; 中低碳储量等级 (30~40

Gg) 的网格单元广泛分布在东南平原区和西北坝上高原区域, 主要土地利用类型为耕地; 中碳储量和高碳储量等级 (30 Gg 以上) 的网格单元集中分布在西部太行山区和北部燕山山区, 主要为林地和草地的集中分布区域. 2000~2010 年碳储量增加的网格单元主要分布在太行山-燕山山区; 碳储量无变化的栅格单元除在沿海滩涂区集中分布外, 在其他区域零星分布; 碳储量减少的网格单元集中分布在北京、天津、石家庄和唐山等大城市周边. 2010~2020 年网格单元碳储量变化分布基本与 2000~2010 年保持一致, 城市周边及县域中心表现为碳储量减少的网格单元范围在扩大. 综上, 研究期间建设用地扩张的区域是碳储量变化最为剧烈的区域, 表现了明显的碳储量减少.

3.2 京津冀城市群 2000~2020 年建设用地扩张对生态系统碳储量影响

为了量化分析建设用地变化对碳储量变化的影响, 对各建设用地占比等级网格单元 2000~2010 年和 2010~2020 年建设用地面积变化和生态系统碳储量变化汇总统计, 进行线性回归分析, 两者线性回归结果如图 6 和图 7 所示, 所有等级结果均通过了 t 检验, $P < 0.01$, 具备显著性. 结果显示在无建设用地等级的网格区域和建设用地占比 (0, 10%] 等级的网格区域, 回归方程 R^2 值小于 0.100, 两者拟合程度不高. 在其他等级网格单元区域, 回归方程 R^2 值在 0.400~0.700 区间, 两者拟合关系良好, 建设用地的变化能较好地解释碳储量的变化. 2010~2020 年两者回归方程 R^2 值在各等级均小于 2000~2010 年, 说明 2010~2020 年建设用地变化对碳储量变化影响的解释力在下降, 表明此期间碳储量受其他因素影响更多.

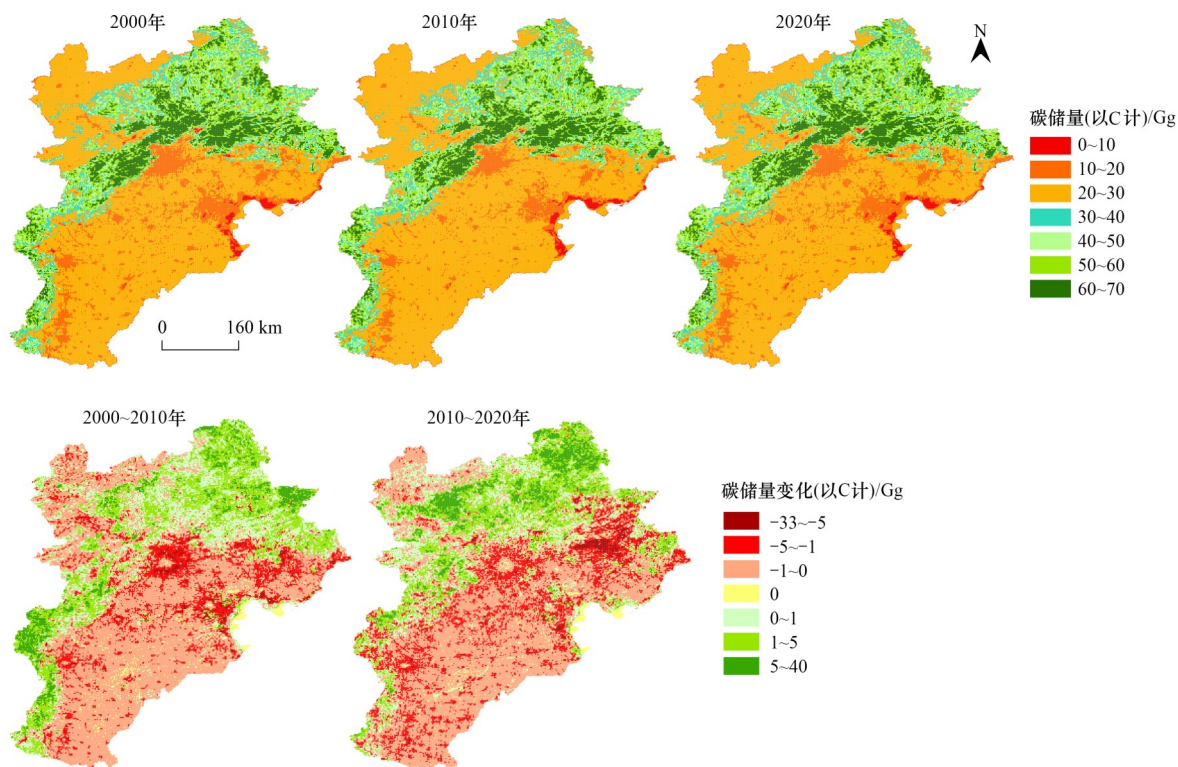


图5 京津冀城市群2000~2020年生态系统碳储量空间分布及变化

Fig. 5 Spatial distribution and change in ecosystem carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2020

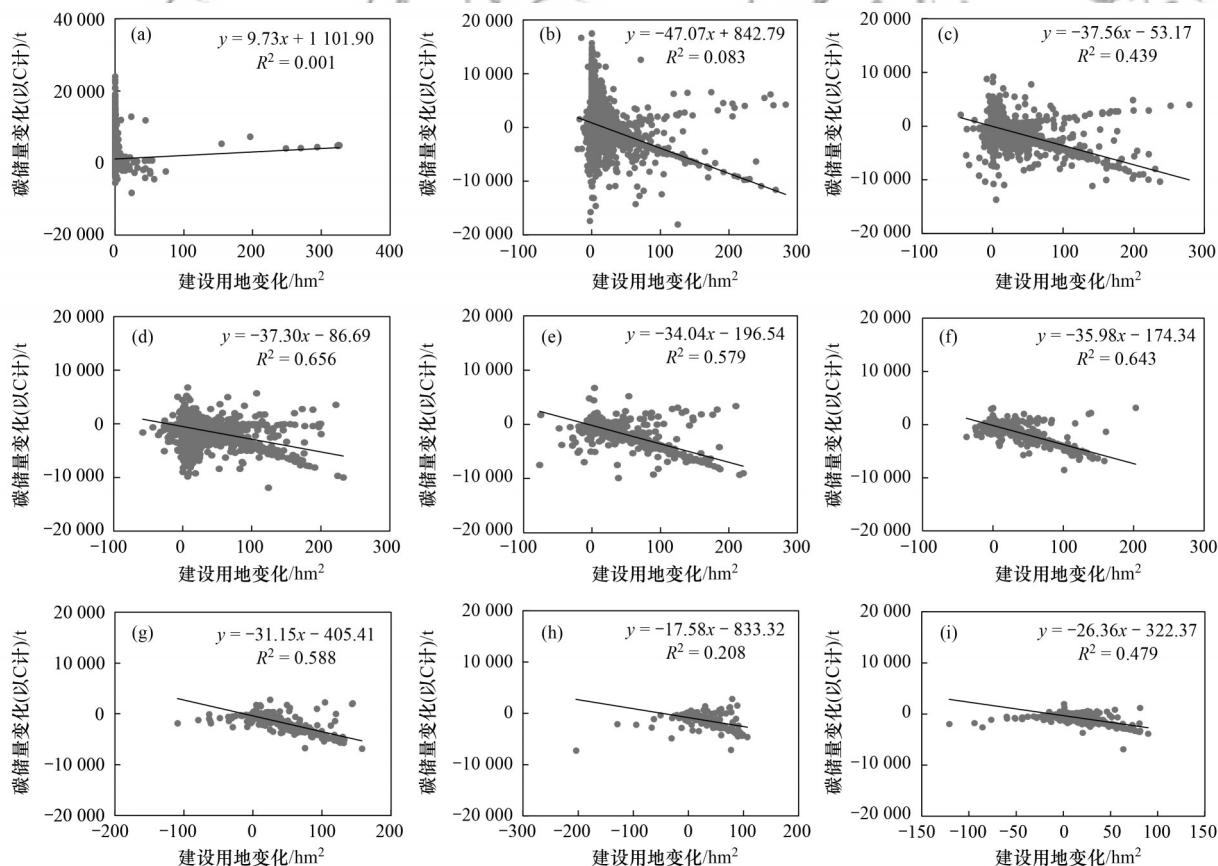
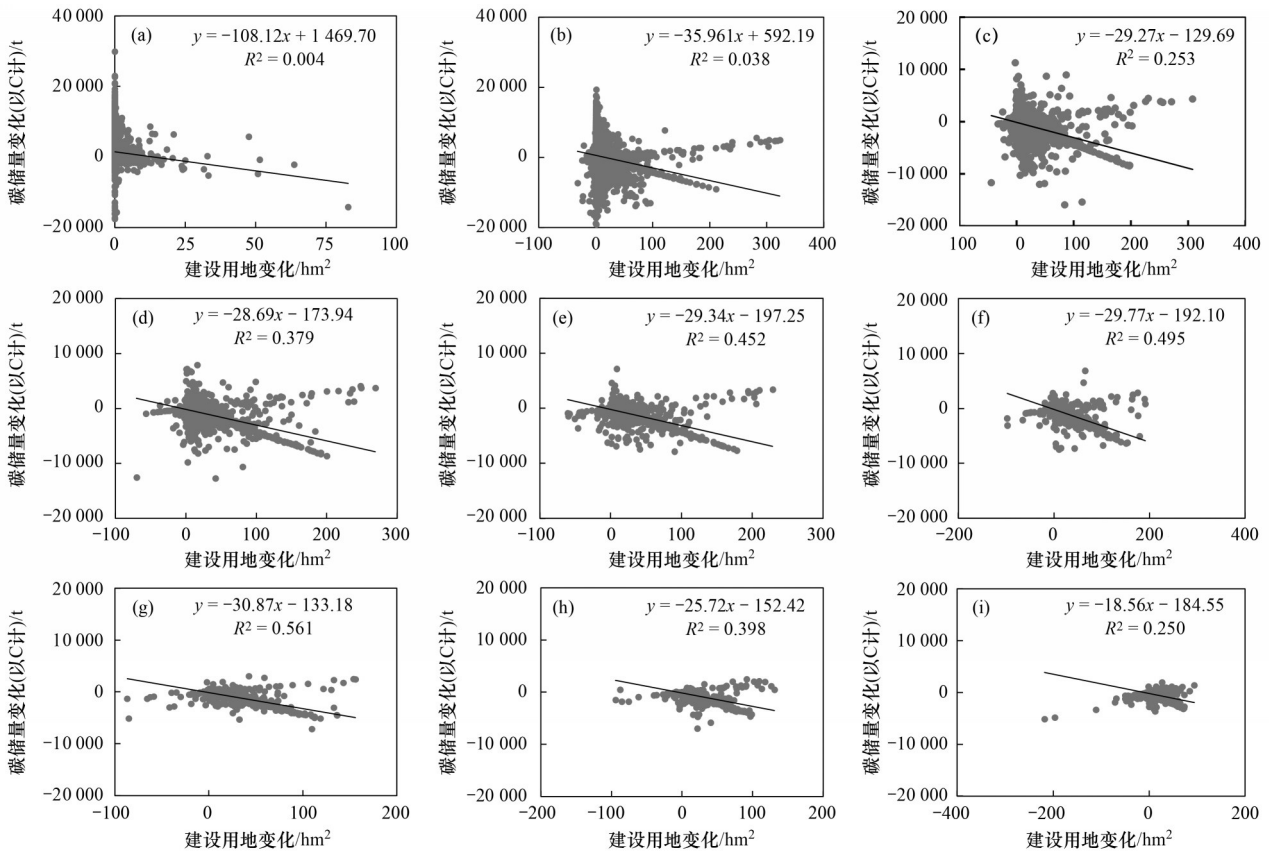


图6 京津冀城市群2000~2010年建设用地变化与碳储量变化回归方程

Fig. 6 Regression equation of construction land change and carbon storage change in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2010



(a)无建设用地网格,(b)建设用地占比0~10%网格,(c)建设用地占比10%~20%网格,(d)建设用地占比20%~30%网格,(e)建设用地占比30%~40%网格,(f)建设用地占比40%~50%网格,(g)建设用地占比50%~60%网格,(h)建设用地占比60%~70%网格,(i)建设用地占比70%~100%网格

图7 京津冀城市群2010~2020年建设用地变化与碳储量变化回归方程

Fig. 7 Regression equation of construction land change and carbon storage change in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2010 to 2020

2000~2010年和2010~2020年碳储量变化和建设用地面积变化两者回归方程系数如图8所示,随着网格内建设用地占比等级的增加,回归系数均呈现波动上升趋势,说明在建设用地占比等级更高的网格区域内,建设用地的扩张引起的碳储量变化值更小,尤其在建设用地占比超过60%的网格单元区域,建设用地的扩张引起的碳储量变化值明显

低于其他等级区域.总体来说,相对于2000~2010年,研究区域在2010~2020年建设用地扩张引起的碳储量变化更小,建设用地对碳储量的影响力在减弱.

由以上结果可知,与大城市及周边区域建设用地的扩张相比,在林地、草地、水域等地类周边建设用地占比较少的区域建设用地的扩张引起的碳储量扰动更大,在“双碳”发展目标下,对人口、经济、产业布局应优先考虑建设用地集中的周边区域,减少建设用地扩张对碳储量变化的影响.

3.3 京津冀城市群2030年不同建设用地扩张情景下土地利用格局模拟

为了进一步探索模拟建设用地扩张的优化方案以提高未来生态系统碳储量,利用PLUS模型对京津冀城市群2030年土地利用格局进行模拟.考虑到京津冀城市群2015~2021年常住人口年均增长率维持在-0.26%~0.19%,城镇化率在2021年已达到69.4%,高于全国平均水平,需要对2030年建设用地规模进行一定控制,因此对京津冀城市群2030年土地利用格局设定3种发展模拟情景: I.自然发展

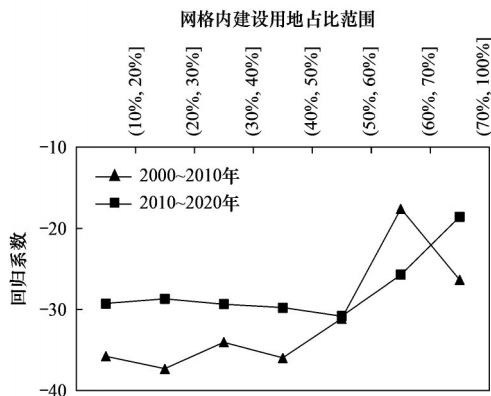


图8 京津冀城市群2000~2010年和2010~2020年建设用地变化与碳储量变化的回归系数

Fig. 8 Regression coefficient of construction land change and carbon storage change in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2010 and 2010 to 2020

情景、Ⅱ.建设用地增速降低 15% 发展情景和Ⅲ.建设用地增速降低 30% 情景。

PLUS 模型主要参数包含土地利用需求、转换矩阵和邻域权重等参数。自然发展情景下，不设置限制条件，基于 2010 ~ 2020 年土地利用转移情况利用 Markov 模型预测 2030 年京津冀城市群土地利用需求。在其他两种情景下，将生态保护区、生态

功能核心区以及水库、湖泊和一级河流区域设置为约束条件，限制其向其他地类转变；建设用地的新增数量需求将源自内部潜力的开发以及对未利用地的转化，与自然发展情景相比，降低耕地、林地和草地向建设用地的转移比例，适度提高耕地保留比例，3 种情景下 2030 年土地利用需求如表 3 所示。

表 3 京津冀城市群 2030 年不同模拟情景下各土地利用类型面积/km²

Table 3 Land use type areas of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in 2030 under different simulation scenarios/km²

情景	耕地	林地	灌木林	草地	水域	未利用地	沿海滩涂	建设用地
I	10 973.84	6 992.62	77.49	3 664.99	356.66	5.02	148.01	4 464.38
Ⅱ	11 028.70	7 006.34	77.78	3 685.90	356.65	5.52	148.01	4 374.10
Ⅲ	11 086.35	7 032.18	78.07	3 688.52	356.65	6.01	148.01	4 287.21

将京津冀城市群 2010 ~ 2020 年土地利用类型实际转移情况设定为自然发展情景下转移矩阵参数，

在此基础上，其他两种情景下设定水域和沿海滩涂不向建设用地转移，最终结果如表 4 所示。

表 4 京津冀城市群 2030 年不同模拟情景下土地利用转移矩阵¹⁾

Table 4 Simulated land use transfer matrix for 2030 in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration under different scenarios

	情景 I								情景 II								情景 III							
	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	F	G	H
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
F	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
G	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0
H	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1

1)“1”表示两个类型间发生转移，“0”表示不发生；字母 A ~ H 依次表示地类耕地、林地、灌木林、草地、水域、未利用地、沿海滩涂和建设用地

邻域权重参数取值范围为“0 ~ 1”，值越大表示该地类邻域影响越大。自然发展情景下地类邻域参数基于京津冀城市群 2010 ~ 2020 年土地利用类型

扩张面积占总土地扩张的比例设定，其他两种情景邻域参数结合情景设定和专家知识，最终设定结果如表 5 所示。

表 5 京津冀城市群 2030 年不同模拟情景下土地利用类型邻域参数

Table 5 Neighborhood parameters of land use types in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in 2030 under different simulation scenarios

情景	耕地	林地	灌木林	草地	水体	荒地	沿海滩涂	建设用地
I	0.250	0.235	0.015	0.168	0.038	0.001	0.000	0.293
Ⅱ	0.260	0.240	0.015	0.168	0.038	0.001	0.000	0.265
Ⅲ	0.270	0.245	0.015	0.168	0.038	0.001	0.000	0.240

不同发展情景下京津冀城市群 2030 年土地利用格局模拟结果如图 9 所示。3 种发展情景下土地利用分布格局基本一致，林地和草地集中分布在燕山和太行山区，耕地主要分布在东南平原区和西北坝上高原区域，建设用地集中分布在北京、天津、石家庄、邯郸、邢台等大城市周边及平原区农村居民点，水域主要分布在环渤海周边以及白洋淀、衡水湖两大湿地区域。与自然发展情景相比，其他两种情景下耕地、林地和草地分布空间在增加，建设用地扩张空间收缩，尤其在建设用地增速降低 30% 发

展情景下，北京、天津、石家庄等等大城市中心城区向外扩张的范围收敛，建设用地集约效果有一定体现。

3.4 京津冀城市群 2030 年不同模拟情景下建设用地扩张对碳储量的影响

将模拟结果输入 InVEST 模型，可计算京津冀城市群 2030 年不同建设用地扩张情景下生态系统碳储量分布格局。3 种发展情景下京津冀城市群 2030 年生态系统碳储量分别为 2 129.12、2 133.55 和 2 139.10 Tg，与 2020 年相比碳储量分别增加了 7.88、12.30 和

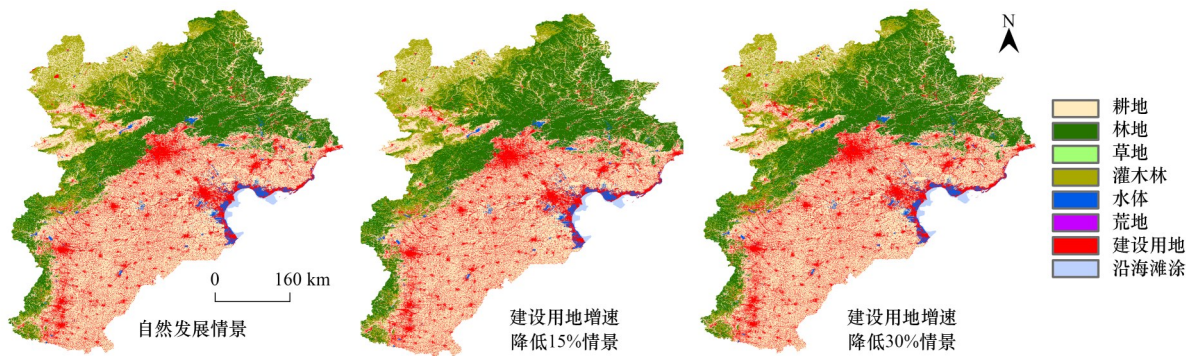


图9 京津冀城市群2030年不同模拟情景下土地利用分布格局

Fig. 9 Distribution pattern of land use in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in 2030 under different simulation scenarios

17.85 Tg, 表明3种发展情景下2020~2030年京津冀城市群生态系统均表现为碳汇, 其中在建设用地增速降低30%发展情景下碳汇量最大.

基于2 km 网格单元将3种模拟情景下2020~2030年建设用地变化面积与碳储量变化值进行回归分析, 最终结果如表6所示. 可知3种模拟情景下, 在建设用地占比10%以上等级的区域, 2020~2030年建设用地扩张变化与碳储量变化的拟合系数 R^2 值在0.525~0.819区间, 拟合效果明显优于2000~2010年和2010~2020年. 3种发展情景下回归系数随着建设用地占比等级的增加均呈现波动

增加的趋势, 说明建设用地占比更多的区域, 建设用地的扩张导致碳储量变化值更少, 这与2000~2010年和2010~2020年研究结果趋势保持一致. 其中, 在相同的建设用地占比等级区域, 回归系数值均呈现情景I<情景II<情景III, 说明自然发展情景下建设用地扩张导致的碳储量变化值最大, 建设用地增速降低30%发展情景下最小. 因此, “双碳”目标下为最大程度保持生态系统碳储量, 应优先选择建设用地增速降低30%发展情景, 同时建设用地的增长应优先控制在建设用地占比较大的区域.

表6 京津冀城市群2020~2030年建设用地扩张变化与碳储量变化线性回归结果
Table 6 Linear regression results of construction land expansion and carbon storage changes in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2020 to 2030

情景	参数	网格内建设用地占比范围						
		(10%,20%]	(20%,30%]	(30%,40%]	(40%,50%]	(50%,60%]	(60%,70%]	(70%,100%]
I	回归系数	-44.80	-42.05	-40.28	-38.08	-39.22	-27.08	-21.43
	R^2	0.753	0.801	0.819	0.796	0.714	0.692	0.647
II	回归系数	-36.05	-37.79	-37.67	-36.00	-37.52	-26.92	-20.94
	R^2	0.711	0.771	0.793	0.772	0.682	0.665	0.592
III	回归系数	-25.84	-29.29	-30.11	-27.73	-27.85	-20.86	-17.02
	R^2	0.632	0.732	0.768	0.739	0.643	0.62	0.525

4 讨论

本研究得出2000~2020年京津冀城市群建设用地呈快速扩张趋势, 研究期间增长了48.05%, 是研究区变化最活跃的地类, 这与张颖诗等^[35]对京津冀地区建设用地变化的研究结果一致. 耕地、林地和草地等地类向建设用地的转移导致了不透水面的增加和自然植被的减少, 直接影响了生态系统碳储量, 研究期间耕地和草地碳库呈减少趋势, 林地和建设用地碳库呈增加趋势, 研究区生态系统碳储量在2000~2020年增加了33.23 Tg, 表现为碳汇, 这与Piao等^[6]、杨元合等^[14]和方精云等^[41]学者对全国尺度陆地生态系统碳储量变化的研究结论保持一致. 巩晟萱等^[42]的研究结果表明京津冀区域生态系

统碳储量呈减少趋势, 与本研究结果相反, 主要是由不同LUCC数据源对林地面积判别差异引起. 林地作为研究区最大的碳库, 其面积变化值的大小直接影响整个生态系统碳储量. 巩晟萱等^[42]采用的地理空间数据云提供的LUCC数据显示, 2000年和2020年期间林地面积分别为44 679.92 km²和45 938.66 km², 增长了1 259.74 km², 本研究以CLCD数据源显示同时期林地数量分别为50 661.84 km²和56 999.03 km², 增长了6 337.18 km². 根据《中国林业和草原统计年鉴(2021年)》统计数据计算京津冀区域2020年森林面积为58 815 km², 本研究采用的数据更接近统计结果. 夏四友等^[43]基于Scientific Data发布的碳排放与碳固定数据研究表明, 京津冀区域2000~2017年碳固定呈增加趋势, 武爱彬等^[44]基于土地利

用碳排放系数法计算京津冀区域 2000~2020 年期间土地利用碳吸收在 (295 ± 2) 万 $t \cdot a^{-1}$, 这与本研究的结果趋势一致。

本研究基于 2 km 网格单元, 拟合回归分析了不同建设用地占比级别建设用地扩张对生态系统碳储量变化的影响, 结果表明在建设用地占比 10% 以上的各等级区域内, 两者都具有良好的回归性, 相对以往研究大多关注于建设用地转入和转出面积对碳储量的影响^[5, 45], 本研究结果可以为决策者提供精细化参考和建议。研究利用 PLUS 模型模拟了 3 种建设用地扩张情景下 2030 年京津冀城市群的土地利用格局, 并核算了生态系统碳储量变化情况, 研究结果可为“双碳”目标下国土空间规划的精准实施提供参考。基于 LUCC 数据和 InVEST 模型中碳密度系数可以快速核算和描述区域生态系统碳储量及空间分布, 但需注意碳密度系数设置的代表性与科学性, 尤其随着研究区尺度增大和研究时期跨度的增加, 应加大对碳密度空间异质性和动态性的研究。

5 结论

(1) 京津冀城市群 2000、2010 和 2020 年生态系统碳储量分别为 2 088.02、2 106.78 和 2 121.25 Tg, 研究期间共吸收了 33.23 Tg, 其中林地碳库占比最大, 由 2000 年 1 010.17 Tg 增加至 2020 年 1 136.53 Tg, 研究期间碳储量分布格局保持稳定, 低碳储量的网格单元集中分布在环渤海区域, 较低碳储量的网格单元集中分布在北京、天津、石家庄等城市和周边区域及农村居民点, 中碳储量和高碳储量的网格单元集中分布在西部太行山区和北部燕山山区。碳储量增加的网格单元主要分布在太行山-燕山山区, 碳储量减少网格单元集中分布在北京、天津、石家庄和唐山等大城市周边, 研究期间建设用地扩张的区域是碳储量变化最为剧烈的区域, 表现了明显的碳储量减少。

(2) 在建设用地占比 10% 以上的各等级网格单元区域, 2000~2010 年和 2010~2020 年期间建设用地扩张和碳储量变化拟合回归关系良好, 建设用地的变化能较好地解释碳储量的变化。2010~2020 年建设用地对碳储量影响的解释力在下降, 此期间碳储量受其他因素影响更多。2000~2010 年和 2010~2020 年两者回归系数均随建设用地占比等级的增加呈现波动上升趋势。相对于 2000~2010 年, 研究区域在 2010~2020 年建设用地扩张引起的碳储量变化更小, 建设用地对碳储量的影响力在减弱。

(3) 在自然发展、建设用地扩张增速减少 15% 和建设用地扩张增速减少 30% 这 3 种发展情景下,

京津冀城市群 2030 年生态系统碳储量分别为 2 129.12、2 133.55 和 2 139.10 Tg, 分别增加了 7.88、12.30 和 17.85 Tg, 均表现为碳汇, 在建设用地降低 30% 发展情景下碳汇量最大。在 3 种发展情景下, 2020~2030 年建设用地扩张和碳储量变化的回归拟合效果在各建设用地占比等级均明显优于 2000~2010 年和 2010~2020 年, 回归系数随着建设用地占比等级的增加均呈现波动增加的趋势。在各建设用地占比等级网格单元区域, 回归系数值均呈现自然发展情景<建设用地扩张增速减少 15% 发展情景<建设用地扩张增速减少 30% 发展情景。

参考文献:

- [1] IPCC. Synthesis report of the sixth assessment report [EB/OL]. <https://www.ipcc.ch/ar6-syr/>, 2023-05-27.
- [2] 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.
- [3] Dybala K E, Steger K, Walsh R G, *et al.* Optimizing carbon storage and biodiversity co-benefits in reforested riparian zones[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019, **56**(2): 343-353.
- [4] Liu X P, Wang S J, Wu P J, *et al.* Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(12): 6834-6844.
- [5] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估——以广东省为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, **32**(5): 22-28, 36.
- [6] Wu P J, Liu X P, Li X, *et al.* Impact of urban expansion on carbon storage in terrestrial ecosystems based on InVEST model and CA: a case study of Guangdong province, China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, **32**(5): 22-28, 36.
- [7] 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.
- [8] 刘良云, 宋博文. 陆地生态系统固碳速率立体监测方法: 进展与挑战[J]. *大气科学学报*, 2022, **45**(3): 321-331.
- [9] Liu L Y, Song B W. Calculating the carbon sequestration rate of terrestrial ecosystems: methods, progress and challenges [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, **45**(3): 321-331.
- [10] 赵苗苗, 赵娜, 刘羽, 等. 森林碳计量方法研究进展[J]. *生态学报*, 2019, **39**(11): 3797-3807.
- [11] Zhao M M, Zhao N, Liu Y, *et al.* An overview of forest carbon measurement methods[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(11): 3797-3807.
- [12] Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M, *et al.* Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere [J]. *Ecological Monographs*, 1983, **53**(3): 236-262.
- [13] 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 等. 长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1258-1266.
- [14] Wu Y F, Xu Y, Tang Y B, *et al.* Temporal and spatial characteristics of net CO₂ emissions and decoupling analysis in Yangtze river economic belt[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1258-1266.
- [15] 王兴玉, 张美玲. 基于 CENTURY 模型的甘南高寒草甸过去 50 年的碳收支时空分布分析[J]. *生态科学*, 2023, **42**(2): 211-218.
- [16] Wang X Y, Zhang M L. Spatial distribution analysis of carbon budget of Gannan alpine meadow in the past 50 years based on

- CENTURY model [J]. *Ecological Science*, 2023, **42** (2): 211-218.
- [12] 刘丽慧, 孙皓, 李传华. 基于改进土壤冻融水循环的 Biome-BGC 模型估算青藏高原草地 NPP [J]. *地理研究*, 2021, **40** (5): 1253-1264.
- Liu L H, Sun H, Li C H. Estimation of grassland NPP in the Qinghai-Tibet Plateau based on the improved Biome-BGC model considering soil freeze-thaw water cycle [J]. *Geographical Research*, 2021, **40**(5): 1253-1264.
- [13] Mao F J, Du H Q, Zhou G M, *et al.* Coupled LAI assimilation and BEPS model for analyzing the spatiotemporal pattern and heterogeneity of carbon fluxes of the bamboo forest in Zhejiang Province, China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **242**: 96-108.
- [14] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2022, **52** (4): 534-574.
- Yang Y H, Shi Y, Sun W J, *et al.* Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2022, **52**(4): 534-574.
- [15] Bagstad K J, Semmens D J, Waage S, *et al.* A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation [J]. *Ecosystem Services*, 2013, **5**: 27-39.
- [16] Posner S, Verutes G, Koh I, *et al.* Global use of ecosystem service models [J]. *Ecosystem Services*, 2016, **17**: 131-141.
- [17] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测——以广东省为例 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(10): 4827-4839.
- Lin T, Yang M Z, Wu D F, *et al.* Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model—A case study in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(10): 4827-4839.
- [18] 石晶, 石培基, 王梓洋, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 [J]. *环境科学*, 2024, **45** (1): 300-313.
- Shi J, Shi P J, Wang Z Y, *et al.* Spatial-temporal evolution and prediction of carbon storage in Jiuquan City ecosystem based on PLUS-InVEST model [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(1): 300-313.
- [19] 薛万来, 朱莎莎, 朱梦洵, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的永定河流域碳储量功能变化分析 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, **54**(9): 13-25.
- Xue W L, Zhu S S, Zhu M X, *et al.* Change analysis of carbon storage function in Yongding River Basin based on FLUS-InVEST model [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, **54**(9): 13-25.
- [20] Zhao J, Shao Z, Xia C Y, *et al.* Ecosystem services assessment based on land use simulation: a case study in the Heihe River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **143**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109402.
- [21] 段璇瑜, 龚文峰, 孙雨欣, 等. 海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响 [J]. *水土保持通报*, 2022, **42** (5): 301-311.
- Duan X Y, Gong W F, Sun Y X, *et al.* Land use change and its impact on temporal and spatial evolution of carbon storage in coastal zone of Hainan Island [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(5): 301-311.
- [22] Zhu L Y, Song R X, Sun S, *et al.* Land use/land cover change and its impact on ecosystem carbon storage in coastal areas of China from 1980 to 2060 [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **142**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109178.
- [23] Liang Y J, Hashimoto S, Liu L J. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050 [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106939.
- [24] Li L, Song Y, Wei X H, *et al.* Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: A case study of Wuhan, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **111**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106064.
- [25] 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.
- [26] Wang H J, Guo J Q, Zhang B, *et al.* Simulating urban land growth by incorporating historical information into a cellular automata model [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, **214**, doi: 10.1016/j.landurbplan.2021.104168.
- [27] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, *et al.* Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model [J]. *Environmental Management*, 2002, **30**(3): 391-405.
- [28] 谢一茹, 高培超, 叶思菁, 等. 面向土地变化模拟的 CLUMondo 模型: 回顾与展望 [J]. *地理信息世界*, 2022, **29** (3): 7-12.
- Xie Y R, Gao P C, Ye S J, *et al.* Review and prospect of land change simulation model CLUMondo [J]. *Geomatics World*, 2022, **29**(3): 7-12.
- [29] 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 in VEST and GeoSoS-FLUS models and its response to different future scenarios [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5253-5262.
- [30] 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.compenvurbysys.2020.101569.
- [31] 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的杭州湾生态系统碳储量 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3343-3352.
- Ding Y, Wang L Z, Gui F, *et al.* Ecosystem carbon storage in Hangzhou bay area based on InVEST and PLUS models [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3343-3352.
- [32] Wei Q Q, Abudurehman M, Halike A, *et al.* Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **145**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109632.
- [33] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估 [J]. *水土保持通报*, 2023, **43**(1): 378-387.
- Li J, Yang D H, Wu F Z, *et al.* Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming city based on PLUS and in VEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, **43**(1): 378-387.

- [34] 如克亚·热合曼, 阿里木江·卡斯木, 希丽娜依·多来提, 等. 天山北坡城市群碳储量时空变化及预测研究[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(12): 5905-5917.
- Reheman R, Kasimu A, Duolat X, *et al.* Temporal and spatial variation and prediction of carbon storage in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan mountains[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(12): 5905-5917.
- [35] 张颖诗, 冯艳芬, 郭冠华, 等. 近30年中国典型城市群建设用地扩张的时空特征及其对比——以京津冀城市群和粤港澳大湾区为例[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2022, **54**(1): 79-90.
- Zhang Y S, Feng Y F, Guo G H, *et al.* The spatio-temporal characteristics of construction land expansion in China's typical urban agglomerations in recent 30 years: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration and the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2022, **54**(1): 79-90.
- [36] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[DB/OL]. 北京: 国家生态科学数据中心, 2020. <http://school.freekaoyan.com/bj/nao1/2022/01-02/16411191021536370.shtml>, 2022-01-02.
- [37] Wang C, Zhan J Y, Chu X, *et al.* Variation in ecosystem services with rapid urbanization: a study of carbon sequestration in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2019, **110**: 195-202.
- [38] 廖珍梅, 杨薇, 蔡宴朋, 等. 大清河-白洋淀流域生态功能评价及分区初探[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(1): 131-140.
- Liao Z M, Yang W, Cai Y P, *et al.* Assessment and regionalization of ecological functions in the Daqing River-Baiyangdian lake basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(1): 131-140.
- [39] 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.
- [40] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, **13**(8): 3907-3925.
- [41] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 等. 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.
- [42] 巩晟萱, 张玉虎, 李宇航. 基于PLUS-InVEST模型的京津冀碳储量变化及预测[J]. 干旱区资源与环境, 2023, **37**(6): 20-28.
- Gong S X, Zhang Y H, Li Y H. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei region-A PLUS-InVEST model approach[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, **37**(6): 20-28.
- [43] 夏四友, 杨宇. 基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J]. 地理学报, 2022, **77**(3): 679-696.
- Xia S Y, Yang Y. Spatio-temporal differentiation of carbon budget and carbon compensation zoning in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration based on the Plan for Major Function-oriented Zones[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, **77**(3): 679-696.
- [44] 武爱彬, 赵艳霞, 郭小平, 等. 基于土地利用和夜间灯光数据的京津冀区域碳排放时空分异研究[J]. 地理与地理信息科学, 2022, **38**(6): 36-42.
- Wu A B, Zhao Y X, Guo X P, *et al.* Spatio-temporal differentiation of carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on land use and nighttime light data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2022, **38**(6): 36-42.
- [45] 李月, 罗红芬. 基于InVEST模型的黔中喀斯特地区建设用地扩张碳储量变化研究[J]. 西北林学院学报, 2024, **39**(1): 185-192, 199.
- Li Y, Luo H F. Carbon storage changes of construction land expansion in karst region of central Guizhou Province based on InVEST model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, **39**(1): 185-192, 199.

CONTENTS

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