

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的健康效益评价 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态学计量特征 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天采区复垦土壤碳循环功能基因的影响 赵蛟, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N₂O 排放及其功能基因的影响 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量表征及健康风险 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 靳磊, 李建设, 叶林 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量

丁岳¹, 王柳柱¹, 桂峰^{1*}, 赵晟¹, 朱望远²

(1. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 舟山 316022; 2. 浙江海大海洋勘测设计研究院有限公司, 舟山 316022)

摘要: 研究土地利用方式与生态系统服务碳储量的关系, 对于区域碳排放管理具有重要意义. 利用 InVEST 模型碳储量模块和 PLUS 模型, 探究并预测研究区 2000~2018 年和 2018~2030 年生态系统碳储量时空变化特征及其与土地利用方式之间的关系. 结果表明, 研究区 2000、2010 和 2018 年碳储量分别为 7.250×10^8 、 7.227×10^8 和 7.241×10^8 t, 呈先减后增趋势. 土地利用类型变化是导致生态系统碳储量变化的主要因素, 建设用地的快速扩张导致碳储量降低. 与土地利用类型相对应, 研究区碳储量空间分异显著, 并以碳储量分界线为界, 呈现“东北低西南高”特征. 预测结果显示, 至 2030 年碳储量为 7.344×10^8 t, 较 2018 年增加 1.42%, 林地面积的增长是主要原因.

关键词: 碳储量; InVEST 模型; PLUS 模型; 环杭州湾大湾区; 未来情景模拟

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3343-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204080

Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models

DING Yue¹, WANG Liu-zhu¹, GUI Feng^{1*}, ZHAO Sheng¹, ZHU Wang-yuan²

(1. School of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Zhejiang Haida Marine Survey Design Research Institute Co., Ltd., Zhoushan 316022, China)

Abstract: The study of the relationship between the land use and carbon storage of ecosystem services is of great significance to regional carbon emission management. It can provide an important scientific basis for the management of regional ecosystem carbon pools and the formulation of policies for emission reduction and foreign exchange increases. The carbon storage component of the InVEST model and the PLUS model were used to study and predict the temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the ecological system and their relationship with land use type for the periods of 2000-2018 and 2018-2030 in the research area. The results were as follows: the carbon storage in 2000, 2010, and 2018 in the research area was 7.250×10^8 , 7.227×10^8 , and 7.241×10^8 t, respectively, which suggested that it first decreased and then increased. The change in land use pattern was the main cause of changed carbon storage in the ecological system, and the fast expansion of construction land resulted in the decrease of carbon storage. With its correspondence to land use patterns, the carbon storage in the research area demonstrated significant spatial differentiation and was characterized by low storage in the northeast and high storage in the southwest according to the demarcation line of carbon storage. The resulting prediction was that the carbon storage in 2030 will be 7.344×10^8 t, with an increase of 1.42% compared with that in 2018, owing mainly to increased forest land. Soil type and population were the two driving factors with the highest contribution to construction land, and soil type and DEM had the highest contribution to forest land.

Key words: carbon storage; InVEST model; PLUS model; Greater Bay area around Hangzhou Bay; future scenario simulation

未来几十年全球所有地区的气候变化都将加剧,且人类行动可能决定未来的气候走向^[1]. 陆地生态系统作为地球三大碳库之一,通过释放和吸收大气中的 CO₂ 和 N₂O 等温室气体来调节区域气候^[2,3]. 土地利用变化是影响陆地生态系统碳循环的主要因素,其过程通常伴随着大量的碳交换,进而影响陆地生态系统的生产力与气候调节能力,研究碳储量与土地利用变化的响应关系及空间分布特征,可以为区域生态系统碳库管理和减排增汇政策制定提供重要科学依据^[4~7].

以模型法为主的碳储量估算法与传统的碳储量估算法相比,能反映出灵活尺度上碳储量变化与自然、人类活动的响应关系,操作简便, InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) 模型具有需求数据少、运行速度快和精度高的优点^[8,9],并可以实现碳储量空间分布与动态

变化的可视化制图,反映土地利用变化与碳储量之间关系,2007 年发布以来,已被广泛运用于不同国家与地区^[10~19].

预测未来土地利用变化对生态系统碳储量的影响,有助于提前制定科学合理的生态保护方案. 目前用于未来土地利用/土地覆被 (LULC) 情景规划的土地利用模型主要包括 CA-Markov、CLUE-S 和 FLUS 模型等,以上模型的弊端在于难以确定土地利用变化的潜在驱动因素,且无法动态捕捉多类土地利用斑块的演变,尤其是自然用地类型斑块. 而斑块级土地利用模拟模型 (patch-generating land use simulation model, PLUS)^[20,21] 可以通过用地扩张分

收稿日期: 2022-04-07; 修订日期: 2022-08-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0604902)

作者简介: 丁岳 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为沿海城市生态环境, E-mail: 1072560519@qq.com

* 通信作者, E-mail: fgui@zjou.edu.cn

析策略(LEAS),更好地挖掘各类土地利用变化的诱因,模拟多类土地利用斑块级的变化,从而更准确地表征未来不同政策情景下土地利用对潜在生态系统服务的影响,更适用于在未来土地演替加剧的情景下进行准确模拟未来土地利用发展潜力研究的要求。

这两种模型运行效果良好,应用广泛,但耦合 InVEST 模型和 PLUS 模型来预测未来土地利用时空格局并探究区域碳储量发展趋势的研究较少.我国是一个陆海兼备的大国,陆海统筹已上升至国家战略层面,湾区经济作为重要的滨海经济形态,对于国家绿色可持续发展意义重大.2017 年浙沪已有共同谋划推进“环杭州湾大湾区”建设的思路,在这努力达成双碳政策的关键时期,本文以环杭州湾大湾区七市为研究区,利用 2000、2010 和 2018 年的 3 期土地利用数据为基础,以 InVEST 模型碳储量模块估算 18 年间区域生态系统碳储量的变化,进而模拟 2030 年湾区的生态系统服务碳储量功能,以期为提高其生态系统服务功能、实现区域双碳目标提供研究依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

环杭州湾地区(湾区)位于我国华东地区(28°51'~31°53'N,118°21'~123°25'E,图 1),总面积约 5.2 万 km²,包括上海、杭州、宁波、绍兴、嘉兴、湖州和舟山这 7 个中心城市.杭州湾上游接入钱塘江,下游濒临东海,是典型的河口海湾,滩涂及渔业资源丰富.湾区以林地、耕地为主,属于亚热带

季风气候区,水热条件优越,年均降水量在 1 100 mm 以上,年均气温为 16℃,天然水环境状况较好,是我国河网密度最高的地区之一.地貌类型包括丘陵、低山和滨海平原,地势西南高东北低,自西南向东北倾斜,最高点为杭州天目山国家级自然保护区的清涼峰,土壤类型以红壤、黄壤、水稻土和滨海盐土等为主^[20~22],植被类型丰富,覆盖率较高。

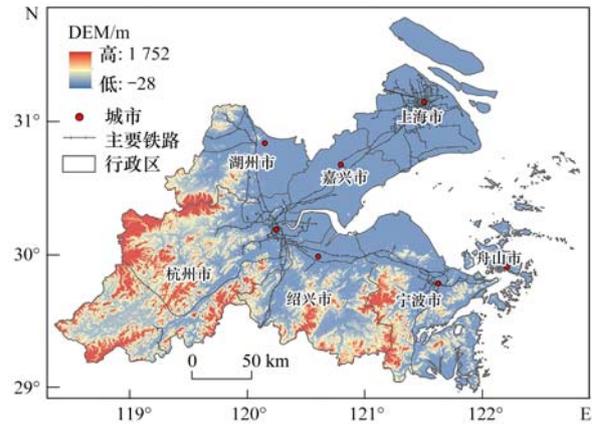


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源及研究方法

1.2.1 数据来源

土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,该数据包括 6 个一级类和 25 个二级类,是目前我国分类精度比较高的土地利用数据产品,根据研究区实际情况采用耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地为一级地类的 6 种类型,分辨率为 100 m × 100 m,其他数据来源如表 1 所示,地理坐标系均采用 GCS_WGS_1984。

表 1 数据来源及说明

Table 1 Data source and description

数据类型	数据名称	分辨率/m	数据来源
气候和环境数据	土地利用数据	100	中国科学院资源环境科学与数据中心
	DEM	30	NASA SRTM1 v3.0
	坡度	30	计算生成
	NDVI	500	中国科学院资源环境科学与数据中心
社会经济数据	年均降水	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心
	年均气温	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心
	土壤类型	1 000	HWSD v1.2
	人口	1 000	https://www.worldpop.org/
社会经济数据	GDP	1 000	全球变化科学研究数据出版系统
	到铁路距离	1 000	OpenStreetMap
	到高铁站距离	1 000	OpenStreetMap
	到高速公路距离	1 000	OpenStreetMap
	到河流距离	1 000	OpenStreetMap

1.2.2 研究方法

(1) 基于 InVEST 模型的生态系统碳储量评估

InVEST 模型碳储量模块将生态系统的碳储量划分为 4 个基本碳库:地上生物碳(土壤以上所有存

活的植物中的碳)、地下生物碳(存在于植物活根系统中的碳)、土壤碳(分布在有机土壤和矿质土壤中的有机碳)、死亡有机碳(凋落物、倒立或站立的已死亡树木中的碳).其计算公式如下:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}$$

式中, C_{total} 为流域总碳储量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); C_{above} 为地上部分碳储量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); C_{below} 为地下部分碳储量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); C_{soil} 为土壤碳储量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); C_{dead} 为死亡有机碳储量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$).

InVEST 模型碳储存模块的基本假设是: 将某一地类的碳密度视为常量, 用不同植被类型的碳密度

乘以对应的面积来计算区域植被碳储量^[9]. 由于不同学者得出碳密度存在较大差异, 尽可能选择以南方, 特别是以东南沿海、长三角地区为研究区的文献数据为参考, 土壤碳密度根据周杰等^[23]对于前人研究^[24-26]的结论取均值而来, 其他密度值取自刘咏梅等^[27]对相关临近地区研究密度值的修正, 最终得到不同土地利用类型的碳密度值(表 2).

表 2 研究区各土地利用碳密度参考值^[23,27]/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 2 Reference value of land use carbon density in the study area/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$

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	18.9	12.5	85.5	2.4
林地	36.3	7.3	125.8	3.4
草地	17.4	20.8	112.2	2.9
水域	0	0	81.1	0
建设用地	16.2	3.2	73	0
未利用地	24.3	4.9	74.6	2.2

(2) 基于 PLUS 模型的未来土地利用变化模拟

PLUS 模型是由中国地质大学 HPSCIL@CUG 实验室研发的一种斑块生成土地利用变化模拟的模型^[28,29], 该模型内置马尔可夫链模型, 通过分析潜在 LULC 随时间转移矩阵的可能性来衡量不同条件下的土地利用需求. PLUS 模型采用用地扩张分析策略 (LEAS) 和基于多类随机斑块种子的元胞自动机模型 (CARS). 与其他模型相比, PLUS 模型的优势在于可以确定土地扩张和景观动态的驱动因素, 以预测不同土地利用类型情景下的斑块演变^[30].

模型的验证以 2010 年土地类型作为训练集, 预测 2018 年土地类型分布, 总体精度为 93.3%, Kappa 系数为 89.3%, 表明模型预测和真实地物分布具有较高的一致性, 能够满足研究需要.

2 结果与分析

2.1 2000~2018 年湾区碳储量时空变化特征

研究区 2000、2010 和 2018 年的 3 期碳储量数据模拟结果见图 2, 由于土地利用栅格大小 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$, 图例中碳储量数据含义为每 hm^2 碳储量

最高为 172.89 t , 最低为 81.1 t ; 3 个时期区域碳储量区域差异和变化结果见图 3. 结果表明: 研究区 2000~2018 年碳储量共减少 $9\times 10^5\text{ t}$, 降幅 0.12%, 年均下降 $5\times 10^4\text{ t}$. 2000~2010 年降幅显著, 减少 $2.3\times 10^6\text{ t}$, 降幅 0.32%, 年均下降 $2.3\times 10^5\text{ t}$; 2010~2018 年碳储量增加 $1.4\times 10^6\text{ t}$, 增幅 0.19%, 年均增加 $1.75\times 10^5\text{ t}$.

湾区碳储量空间分布具有显著的空间异质性, 高低密度碳储量区域总体以长深高速与杭甬高速连线为界, 这条分界线将湾区分为东北区和西南区两个部分, 呈现出“东北低西南高”的碳储量空间分布格局. 东北区为低密度碳储量集中区, 主要分布在长深-杭甬高速以北的平原区, 人口密度大, 城市化程度较高, 水系丰富, 适合人类社会生产活动, 因而固碳能力相对较弱; 西南区主要是山区林地覆被, 高海拔和高覆盖的森林面积使其成为高密度碳储量地区, 水源涵养和森林资源占优, 同时限制了城镇建设用地的开垦扩张活动^[31-33].

2000~2010 年和 2010~2018 年陆地碳储量空间变化主要集中在各市城镇中心拓展区域及沿江、

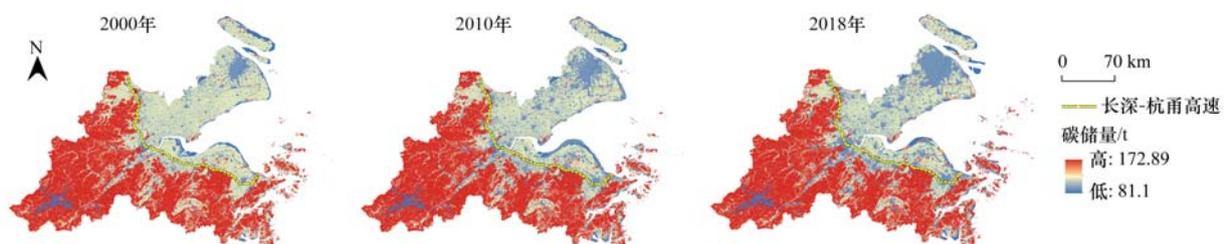


图 2 2000、2010 和 2018 年研究区碳储量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of carbon storage in the study area for 2000, 2010, and 2018

海岸地区. 2000~2010年碳储量显著下降的区域分布在上海市中心周围区县、嘉兴市区县中心周围、江干区和宁波奉化江、余姚江和甬江三江汇集周围区域,主要集中在东北部和中部,显著增加的区域主要分布在杭州湾南翼的萧山区、柯桥区北部和舟山市部分岛屿如桃花岛,这一时期建设用地扩张剧烈,各城市中心向外扩张明显,大量耕地转为建设用地,碳储量显著减少. 2010年后建设用地扩张能力相对下降,土地类型转移趋于稳定,区域碳储量下降也逐渐缓和,碳储量显著下降的区域主要在上海、杭州

市中心周围区县和曹娥江附近区域,宁波三江汇流区域仍零星地减少,如镇海区和鄞州区等;显著增加的部分集中在杭州湾北翼的浦东新区和南翼的上虞区、余姚市、慈溪市沿岸,舟山市整体碳储量有所提升. 西南区域覆被大量森林资源,高海拔限制了城镇扩张能力,碳储量相对稳定,东北区受城市发展影响,碳储量变动较大. 总体上,2000~2018年间湾区碳储量下降区域集中在上海、嘉兴、杭州和宁波这4个城市市区,上升区域分布在沿海海岸带、杭州湾南翼和舟山市.

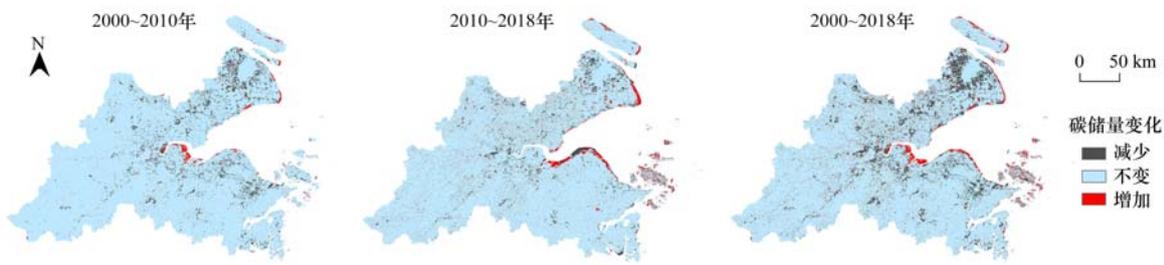


图3 研究区陆地碳储量空间变化

Fig. 3 Spatial variation in terrestrial carbon storage in the study area

2.2 2000~2018年湾区土地利用变化特征

湾区土地利用类型按面积从大到小依次为林地、耕地、建设用地、水域、草地和未利用地(表3),优势地类为耕地和林地,耕地主要分布在分界线东北区,林地主要分布在西南区,两者面积之和在研究期间呈下降趋势,3个时期分别为85%、79.44%和76.58%. 建设用地面积数量位居第三,占比分别为7.76%、14.06%和16.16%,18年间面积增长了108.25%. 从表4土地类型转移矩阵可知,2000~2010年在湾区

主要地类中,耕地成为湾区建设用地快速扩张的一大重要来源,转出2484.85 km²;林地主要向建设用地和耕地转出177.45 km²和112.95 km²;建设用地虽然有明显的扩张趋势,但是仍有46.46 km²转为了耕地,可能跟各地区的废旧宅基地复垦工作有关. 2010~2018年间,耕地仍是建设用地的主要转入源,转换面积为1704.37 km²,有402.56 km²和146.38 km²转为林地和水域;林地继续向建设用地和耕地分别转出180.67 km²和335.76 km².

表3 2000、2010和2018年各土地类型面积及所占比例

Table 3 Area and proportion of land use in 2000, 2010, and 2018

土地利用类型	2000年		2010年		2018年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	20 693.37	39.99	18 246.60	34.84	17 006.81	32.24
林地	23 539.13	45.49	23 353.38	44.60	23 387.29	44.34
草地	781.81	1.51	774.34	1.48	975.23	1.85
水域	2 702.6	5.22	2 616.59	5.00	2 479.5	4.70
建设用地	4 013.27	7.76	7 360.36	14.06	8 523.85	16.16
未利用地	12.33	0.02	14.27	0.03	375.28	0.71

2.3 土地利用变化对碳储量的影响

2000~2018年湾区各类土地均发生一定程度的变化,尤其是建设用地面积增长中有86.57%来自于耕地,7.40%来自林地和5.62%来自水域,耕地、林地的比例递减,其他地类虽然均有少量相互转换,但是占比波动较小,相对稳定. 2000~2010年

上海、杭州和宁波城市中心大量耕地转为建设用地,从而碳储量呈下降状态;2010~2018年,湾区海岸线和舟山市的大部分地区好转,这离不开湿地的生态恢复和造林行动. 综合来看,进入21世纪后,随着国家经济发展,该时期湾区城镇化速度加快,对于土地开发需求也较为强烈. 2010年后建设用地扩张

表 4 2000~2010 年和 2010~2018 年土地利用转移矩阵/km²Table 4 Transition matrix of land use for 2000-2010 and 2010-2018/km²

2000~2010 年	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	17 853.95	110.8	2.85	240.14	2 484.85	0.27
林地	112.95	23 183.27	34.79	27.76	177.45	1.93
草地	6.66	42.14	724.05	1.11	6.22	1.55
水域	222.11	9.54	12.41	2 335.7	122.3	0.01
建设用地	46.46	4.95	0.11	5.51	3 956.16	0
未利用地	0.03	0.22	0.01	0.01	1.56	10.5
2010~2018 年	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	15 942.13	402.56	43.79	146.37	1 704.37	0.16
林地	335.76	22 707.84	62.46	44.96	180.67	0.84
草地	22.06	55.54	675.6	7.4	11.23	0.08
水域	233.27	41.45	47	2137.72	149.58	0.02
建设用地	453.46	50.35	133.55	299.07	6 402.24	0.11
未利用地	1.08	1.51	0.07	0.42	1.15	9.98

趋于缓和,土地利用变化趋于平稳,这一时期新型城镇化战略的有效实施使得碳储量下降趋势逐步得到缓解。

3 未来自然发展场景模拟

3.1 土地利用变化模拟预测结果及分析

人类活动是土地利用变化的主要驱动力,其又受到自然因素的限制与社会经济因素的影响。在自然因素中地形因素、气候因素影响土地利用类型的分布与转化概率,人类倾向选择最佳的地形、气候区进行生产生活活动;在社会经济因素中,人类的活动又集中于经济发达、人口聚集、交通发达等具有一定生产优势的区域。选取社会经济和气候环境共 12 个驱动因子模拟 2030 年土地利用类型,并将规划交通对于地类转变的影响加入考虑,分别为:DEM、NDVI、坡度、气温、土壤类型、降雨、人口、GDP、到高铁站距离、到高铁距离、到铁路距离和到河流距离,并得到各驱动因子的贡献度(图 4),贡献度越高表示该驱动因子对于该种地类的变化影响越大。

从图 4 知对湾区建设用地贡献度最高的是土壤类型(0.193)、人口(0.191)和 GDP(0.106),其他因子对于建设用地扩张的影响比较均衡,浙沪土壤类型十分丰富,主要包括红壤、黄壤、水稻土、滨海盐土和潮土类等,而浙北冲积平原主要以水稻土为主,由于人多地少,浙江省早期便已出台耕地保护政策,在一定程度上限制了建设用地的开发;上海作为我国特大城市,在 2018 年末人口已达 2 423.78 万,城镇化率达 88.10% 居全国第一,带动周围城市在人口和 GDP 等迅速发展,浙江在全国省市中位列第五,是人口与 GDP 均在前列的经济大省,因此土壤类型、人口和 GDP 成为建设用地的前三驱动力。影响林地的主要是土壤类型(0.217)、DEM



图 4 驱动因子贡献度分布

Fig. 4 Distribution of contribution of driving factors

(0.212)和坡度(0.082),对耕地贡献度最大的是人口(0.228)、土壤类型(0.188)和降雨(0.149)。草地受人口(0.130)和 DEM(0.120)影响最大,其次便是 NDVI(0.034),而水域变化与人口(0.179)、GDP(0.162)和 DEM(0.120)紧密相关,未利用地受 DEM 影响很大(0.618),其占地面积一直不足 1%,均位于如天目山脉的高海拔区域。在交通规划因子

中,受到影响从大到小的土地利用类型分别为水域(0.172)、草地(0.167)、建设用地(0.139)、林地(0.129)、耕地(0.100)和未利用地(0.011),湾区水路纵横,地势平缓,适宜铺设铁轨,可以预见未来与交通轨道的相关性会更加密切。

模拟出的研究区 2030 年自然发展情境下用地状况(图 5),对比 2030 年土地分布[图 5(a)]与 2018 年土地利用[图 5(b)],建设用地进一步扩张,

扩张的区域主要分布在离市中心较远的区县,如青浦区、松江区、秀洲区、德清县和余杭区等.从 2018 年 8 523.85 km² 增加到 2030 年的 8 975.17 km²,面积增加 451.32 km²,年均增长 37.61 km²,动态度 0.44%;林地面积增加 42.04 km²,相比 2018 年增加了 0.18%;耕地面积减少放缓,预计下降 32.76 km²,低于 2000~2018 年土地类型变化程度,总体上未来湾区土地变化趋于稳定。

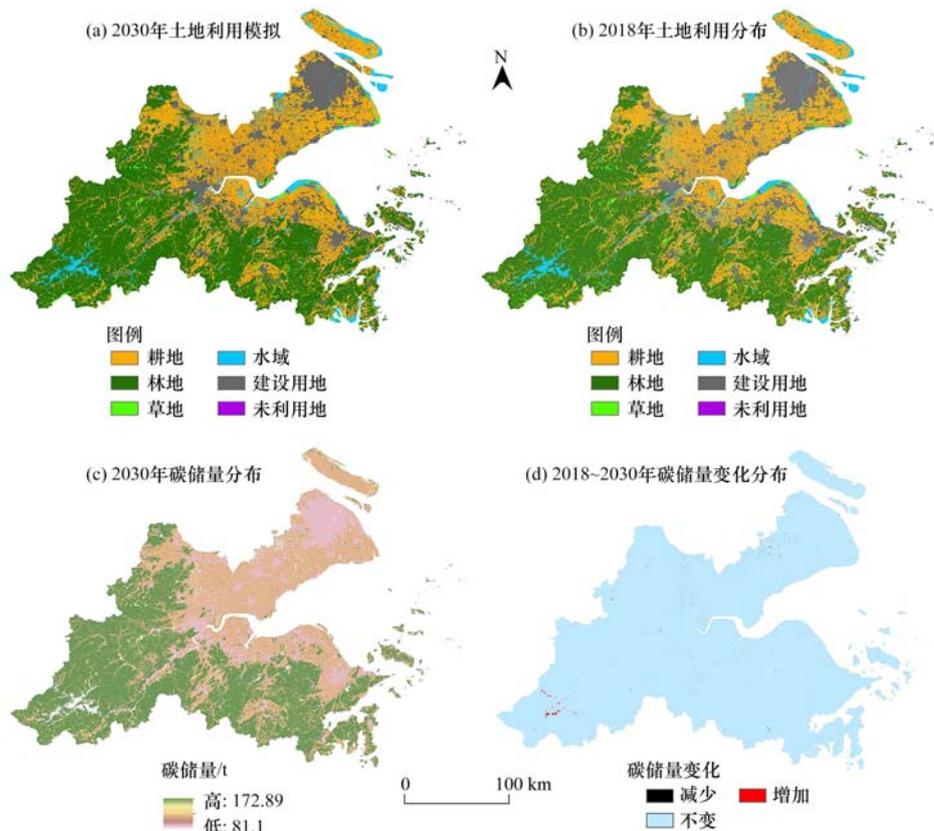


图 5 研究区 2018~2030 年对比

Fig. 5 Comparison chart of the study area from 2018 to 2030

3.2 碳储量预测结果及分析

从预测结果可知[图 5(c)], 2030 年碳储量为 7.344×10^8 t, 较 2018 年增加 1.42%, 主要原因是林地面积的增长[图 5(d)], 增长区域集中于千岛湖附近及嵊州市南部. 碳储量下降区域零星分布在上海市南部、嘉兴市北部和杭州湾南翼城市北部, 未来上海市和嘉兴市联系会更加密切, 整体融合, 各市、区县之间及河湖周围交界处建设用地仍会有持续缓慢扩张, 建城区的斑块聚集度提高, 散落在中心城区外围和周边区域的耕地在未来有较大的可能性会转为建设用地, 聚集成更大的斑块. 预测结果表明湾区在自然发展状态下已经处于一个比较稳定且上升的状态, 与 2018 年相比变化不大, 未来分界线以南区域受制于地形因素, 城市化缓慢, 拥有丰富的森林和生物资源, 对于保护中心城区的碳平衡和生态

系统的稳定具有非常重要的价值, 仍是湾区乃至长三角重要的碳汇区域。

4 讨论

4.1 湾区碳储量与土地利用变化的响应关系

土地利用变化是改变土壤有机碳含量的原因之一, 土地利用变化的区域也是陆地碳储量变化的热点区域^[34], 2000~2018 年湾区的碳储量总体波动幅度较小, 东北区大于西南区, 流失严重区正是经济发展迅速、城市化进程明显的地区, 比如上海市、杭州市和宁波市, 原城镇中心周围地区也是碳储量损失较为严重的地区. 其中建设用地扩张占用最多的是耕地, 西南部小部分地区(如淳安县和建德市)占用林地较多, 建设用地的固碳能力弱, 造成碳储量总量降低了 9×10^5 t. 但在建设用地面积扩张一倍有

余的状况下仍旧维持了降幅较小的固碳量,这取决于浙江省先进的生态理念和有效的治理措施。

经济的飞速发展让各市均有不同程度的建设用地扩张,上海市作为我国的经济中心,无论是城镇化率、人口和 GDP 均在全国一线行列,2018 年上海市出台的生态保护红线划定方案中,陆域生态保护红线面积为 89.11 km²,占比仅 1.30%,身处长江三角洲冲积平原,原优势地类为耕地,不可避免地需要牺牲耕地面积以建设城镇和容纳外来人口,因此上海固碳量一直处于下降趋势;其余六市属于浙江省,五市处于浙北区杭嘉湖平原和浙东区宁绍平原,可看出虽市区附近耕地集中转变为建设用地、降低了固碳量,但同时全域各处的碳储量均是提升状态(图 3),其实浙江省的生态意识和执行力在国内一直较为超前,自知人多地少的劣势,2002 年已经确立了建设生态省的目标,2003 年启动“千万工程”项目,这是一项以改善农村生产生活生态环境为重点的工程,期间五水共治、新型城镇化战略的叠加实施,极大促进了城乡建设用地、农用地的集约使用,改善农村人居环境,提高城市化的质量,因此从整个空间格局而言,总碳储量不降反升。

除了全域的生态有所提升外,碳储量提升区主要集中在 3 处,一处是上海和嘉兴海岸带,一处是杭州湾南岸区域,还有一处是舟山市。在前 10 a 中,上海为改善海岸带生态开发批准了滨海森林公园、炮台湾湿地森林公园等及九段沙湿地自然保护区和长江口中华鲟自然保护区等,略见成效,2010 年后,生态海岸带建设的启动,各市均需控制岸线的开发,以严格保护和整治修复为主,因此湾区海岸线生态质量整体上大有提升;杭州湾南岸属淤涨型岸滩,生物资源富集,近年来经济-生态主导的视角正契合了土地可持续发展的目标,最典型的是位于慈溪跨海大桥附近的杭州湾湿地公园,生态修复工程的有力实施使每年大量候鸟均在此中转飞去澳大利亚;舟山市碳储量上升的原因并不是由于林地的增加,一方面舟山属于群岛城市交通不便,削弱了经济影响,城市化进程稍慢,另一方面自 2006 年起推进的绿色生态舟山项目,让这个群岛城市增加了很多生态-休闲的基建,如景观防护林和海滨公园等,并于 2018 年成功建成“海上森林城市”,湾区七市中仅舟山碳储量为持续上升状态。

4.2 与已有研究的对比

作为生态系统服务功能的一个重要指标,碳储量可以在一定程度上反映区域生态系统服务功能的好坏。在前人的研究中以环杭州湾大湾区为研究区的文献较少,仅有的文献中对于湾区城市的选择也

并不一致。在对于长三角城市群的研究中,周杰等^[23]对于长三角地区碳储量研究的结论与本文相近,刘咏梅等^[27]研究了 2000 ~ 2015 年间长三角地区的碳储量分布,其得出对于上海沿海地区碳储量增加及宁波市碳储量下降的结论与本文的较为一致。2000 ~ 2010 年湾区碳储量减少反映出进入 21 世纪以来一线城市群在经济腾飞期难以兼顾生态环境与经济发展两方面造成的局面,生态环境的恶化与生态系统服务功能的下降在很多以市为研究区的研究中有所展现,通过模拟和预测 2030 年的土地利用类型空间分布和碳储量功能,发现 2030 年的碳储量提升至 7.334×10^8 t,相比 2018 年增加 1.42%,表明 PLUS 模型预测湾区在自然增长状态下生态系统服务功能相对稳定且有缓慢提升的趋势。

4.3 未来土地利用规划建议

从近年和预测结果来看,湾区的碳储量趋势向好,同时说明了政策的有力实施对于生态环境是十分必要的,2020 年底前,各市均已落实好三线一单的划分工作,在基本农田保护线、城镇便捷性和生态保护红线落实到位的前提下,市区应更注重绿色基础设施的配置和土地的高效利用,上海在过去十年产业升级迁出制造业工厂,因此污染问题改善,浙江六市应继续保护和修复林地,保证耕地的统一肥沃高效,深化美丽乡村建设,为双碳目标的达成蓄力。

应对气候变化,“做好碳达峰、碳中和工作”是我国“十四五”重点任务之一,虽然 InVEST 模型和 PLUS 模型均有一定的不确定性,但是其运算结果能清晰反映和预测湾区 2000 ~ 2030 年的碳储量时空变化。森林是陆地生态系统最重要的最大的碳库^[35,36],在利用 PLUS 模型模拟的 2030 年土地利用类型分布中,森林面积的增长使碳储量维持在稳定的水平,湾区处于中国东南沿海地区,水热条件优越,耕地中水稻土占比最大^[30,37~39],属于固碳能力较好的土类;考虑到浙江省森林林分以幼、中龄林为主,面积占全省的 76.76%,且天然林中接近 3/4 为乔木林,若对现有森林进行更好的经营和管理,可以大大增加浙江省森林的碳固存能力^[31,40~42]。未来的工作中还需加强各土地利用类型碳密度的实地的连续监测,以减小不同地类的空间异质性带来的误差;其次,本次预测中只考虑了自然情景下未来土地类型的趋势,未来研究中可以加入政策相关的情景设定如生态情景来进行探究,更具实用价值;增加并结合对于多领域跨学科的研究,综合考虑到环境和人为因素等的影响^[43,44]。

5 结论

(1) 2000~2018年湾区土地利用变化主要表现为耕地和少量林地转向建设用地; 2000、2010和2018年湾区碳储量分别为 7.250×10^8 、 7.227×10^8 和 7.241×10^8 t, 呈先减后增趋势。

(2) 湾区碳储量存在显著的空间分布特征, 长深和杭甬高速分界线将湾区分为东北区和西南区, 东北区为低碳密度区域, 包括上海、嘉兴、杭州、湖州、绍兴和宁波的北部; 西南区为高碳密度区域, 主要是杭州、宁波、湖州、绍兴南部和舟山。

(3) 预计2030年, 湾区碳储量为 7.344×10^8 t, 比2018年增加了 1.030×10^7 t, 约1.42%, 增加的地区主要出现在千岛湖附近区域, 主要是因为林地面积的增长, 碳储量下降区域零星分布在上海南部、嘉兴北部和杭州湾南翼城市的北部; 土壤类型和人口是对建设用地贡献度最高的两个驱动因素, 对于林地贡献度最高的是土壤类型和DEM, 预测结果表明湾区在自然发展状态下已经处于一个比较稳定的状态, 随着国民意识的提高和生态政策的倾斜加持, 相信湾区的生态系统服务价值会再有所提升。

参考文献:

- [1] 樊星, 秦圆圆, 高翔. IPCC第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(17-18): 44-48.
Fan X, Qin Y Y, Gao X. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 working group I report [J]. Environmental Protection, 2021, 49(17-18): 44-48.
- [2] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
- [3] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000[J]. Tellus B, 2003, 55(2): 378-390.
- [4] 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.
- [5] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 等. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 848-857.
Fang J Y, Yu G R, Ren X B, et al. Carbon sequestration in China's Terrestrial Ecosystems under Climate Change——Progress on Ecosystem Carbon sequestration from the CAS Strategic Priority Research program [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 848-857.
- [6] Vizcaino-Bravo Q, Williams-Linera G, Ashbjornsen H. Biodiversity and carbon storage are correlated along a land use intensity gradient in a tropical montane forest watershed, Mexico [J]. Basic and Applied Ecology, 2020, 44: 24-34.
- [7] DeFries R S, Field C B, Fung I, et al. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, 13(3): 803-815.
- [8] Houghton R A. Counting terrestrial sources and sinks of carbon [J]. Climatic Change, 2001, 48(4): 525-534.
- [9] 马良, 金陶陶, 文一惠, 等. InVEST模型研究进展[J]. 生态经济, 2015, 31(10): 126-131, 179.
Ma L, Jin T T, Wen Y H, et al. The research progress of InVEST model[J]. Ecological Economy, 2015, 31(10): 126-131, 179.
- [10] Nelson E, Sander H, Hawthorne P, et al. Projecting global land-use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with Simple Models[J]. PLoS One, 2010, 5(12), doi: 10.1371/journal.pone.0014327.
- [11] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 165: 6-18.
- [12] Jiang W G, Deng Y, Tang Z H, et al. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models [J]. Ecological Modelling, 2017, 345: 30-40.
- [13] Polasky S, Nelson E, Pennington D, et al. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota [J]. Environmental and Resource Economics, 2011, 48(2): 219-242.
- [14] 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.
- [15] 侯红艳, 戴尔阜, 张明庆. InVEST模型应用研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 62-67.
Hou H Y, Dai E F, Zhang M Q. A review on InVEST model for the evaluation of ecosystem service function [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2018, 39(4): 62-67.
- [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] 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.
- [18] 张世伟, 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.
- [19] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 等. FLUS-UGB多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20

- (4): 532-542.
Wu X X, Liu X P, Liang X, *et al.* Multi-scenarios simulation of urban growth boundaries in Pearl River Delta based on FLUS-UGB[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, **20**(4): 532-542.
- [20] 安玲玲, 吕晓男, 麻万诸, 等. 浙江省土壤有机碳密度与储量的初步研究[J]. *浙江农业学报*, 2014, **26**(1): 148-153.
An L L, Lyu X N, Ma W Z, *et al.* The density and storage of soil organic carbon in Zhejiang Province[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, **26**(1): 148-153.
- [21] 支俊俊, 荆长伟, 张操, 等. 利用 1:5 万土壤数据库估算浙江省土壤有机碳密度及储量[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(3): 683-689.
Zhi J J, Jing C W, Zhang C, *et al.* Estimation of soil organic carbon density and storage in Zhejiang Province of east China by using 1:50000 soil database[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(3): 683-689.
- [22] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, **41**(1): 35-43.
Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al.* Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, **41**(1): 35-43.
- [23] 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, Mu 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.
- [24] 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.
- [25] 周锐, 苏海龙, 王新军, 等. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测——以江苏省常熟市辛庄镇为例[J]. *资源科学*, 2011, **33**(12): 2262-2270.
Zhou R, Su H L, Wang X J, *et al.* Simulation of land use change in Xinzhuang Town under different scenarios based on the CLUE-S Model and Markov model[J]. *Resources Science*, 2011, **33**(12): 2262-2270.
- [26] 程先富, 谢勇. 基于 GIS 的安徽省土壤有机碳密度的空间分布特征[J]. *地理科学*, 2009, **29**(4): 540-544.
Cheng X F, Xie Y. Spatial distribution of soil organic carbon density in Anhui Province based on GIS[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, **29**(4): 540-544.
- [27] 刘咏梅, 朱彦蓉. 基于 InVEST 模型的长三角地区陆地生态系统固碳特征变化研究[J]. *南京晓庄学院学报*, 2020, **36**(6): 82-90.
Liu Y M, Zhu Y R. Research of carbon storage changes in terrestrial ecosystems based on InVEST model in the Yangtze River Delta Region[J]. *Journal of Nanjing Xiaozhuang University*, 2020, **36**(6): 82-90.
- [28] 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.
- [29] Shi M J, Wu H Q, Fan X, *et al.* Trade-Offs and Synergies of multiple ecosystem services for different land use scenarios in the Yili River Valley, China[J]. *Sustainability*, 2021, **13**(3), doi: 10.3390/su13031577.
- [30] 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.
- [31] 李银, 陈国科, 林敦梅, 等. 浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征[J]. *植物生态学报*, 2016, **40**(4): 354-363.
Li Y, Chen G K, Lin D M, *et al.* Carbon storage and its distribution of forest ecosystems in Zhejiang Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, **40**(4): 354-363.
- [32] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, *et al.* Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(19): 7565-7570.
- [33] 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 等. 汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估[J]. *生态学报*, 2013, **33**(3): 798-808.
Peng Y, Wang Y K, Fu B, *et al.* Spatial distribution of carbon storage function and seismic damage in Wenchuan earthquake stricken areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(3): 798-808.
- [34] 唐睿, 彭开丽. 土地利用变化对区域陆地碳储量的影响研究综述[J]. *江苏农业科学*, 2018, **46**(19): 5-11.
Tang R, Peng K L. Impact of land use change on regional land carbon storage: a review[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, **46**(19): 5-11.
- [35] 周国逸, 陈文静, 李琳. 成熟森林生态系统土壤有机碳积累: 实现碳中和目标的一条重要途径[J]. *大气科学学报*, 2022, **45**(3): 345-356.
Zhou G Y, Chen W J, Li L. Soil organic carbon accumulation in mature forest ecosystems: an important way to achieve the goal of carbon neutral[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, **45**(3): 345-356.
- [36] 张青青, 张桂莲, 伍海兵, 等. 城市森林土壤有机碳密度及影响因子变化研究[J]. *生态科学*, 2022, **41**(2): 204-210.
Zhang Q Q, Zhang G L, Wu H B, *et al.* Study on changes of soil organic carbon density and influencing factors in urban forest[J]. *Ecological Science*, 2022, **41**(2): 204-210.
- [37] 张靖, 同丽嘎, 李政海, 等. 内蒙古乌审旗有机碳库变化及其增汇调控途径[J]. *生态学报*, 2016, **36**(9): 2552-2559.
Zhang J, Bao T L G, Li Z H, *et al.* Analysis of organic carbon sink increment and management in Uxin Banner, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(9): 2552-2559.
- [38] 姚如男, 周清, 张伟畅, 等. 永州零陵区水稻土有机碳密度和储量估算研究[J]. *湖南农业科学*, 2015, (7): 27-29, 33.
Yao R N, Zhou Q, Zhang W C, *et al.* Estimation of organic carbon density and storage in paddy soil in Lingling[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015, (7): 27-29, 33.
- [39] 史利江, 郑丽波, 张卫国, 等. 上海土壤有机碳储量及其空间分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(12): 1442-1447.
Shi L J, Zheng L B, Zhang W G, *et al.* Reserves and spatial distribution characteristics of soil organic carbon in Shanghai city

- [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, **19**(12): 1442-1447.
- [40] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990 [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1999, **51**(2): 298-313.
- [41] 施德法, 陈冬基, 倪淑萍, 等. 杭州森林植被分布图及其说明[J]. 浙江林学院学报, 1989, **6**(1): 109-111.
Shi D F, Chen D J, Ni S P, *et al.* A map of forest types of Hangzhou and its caption [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 1989, **6**(1): 109-111.
- [42] 陈大钊, 朱安明, 赖江. 杭州森林生态服务功能等级综合评价[J]. 林业科技通讯, 2021, (9): 3-8.
Chen D Z, Zhu A M, Lai J. Comprehensive evaluation of forest ecological service function in Hangzhou [J]. Forest Science and Technology, 2021, (9): 3-8.
- [43] 王军德, 程玉菲, 金彦兆. 移民安置综合开发区土地利用变化及驱动力分析——以疏勒河中游干流区为例[J]. 水利水电技术, 2018, **49**(10): 46-51.
Wang J D, Cheng Y F, Jin Y Z. Analysis on land use variation and its driving force of comprehensive development region for immigrant settlement——a case of main stream region of Mid-Shulehe River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, **49**(10): 46-51.
- [44] 韩骥, 周翔, 象伟宁. 土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展[J]. 生态学报, 2016, **36**(4): 1152-1161.
Han J, Zhou X, Xiang W N. Progress in research on land use effects on carbon emissions and low carbon management [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(4): 1152-1161.

环 境 科 学

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)