基于“碳汇功能-生态敏感性”关联矩阵的生态保护分区研究*

左 翔 刘 晖 王晶懋 杜 伊 张晓彤

西安建筑科技大学建筑学院 西安 710055

摘要：【目的】为统筹修复生态问题和增强碳汇功能的发展需求，建立系统化、差异化的生态保护区划方案，实现城乡空间碳汇功能的有效修复。【方法】以西安高铁东城片区为研究对象，使用 InVEST 模型和综合指标权重法评价分析 2017 和 2020 年的固碳量和生态敏感性变化，建立“碳汇功能-生态敏感性”关联矩阵判别生态保护分区方法和差异化的碳汇功能修复、保护策略体系。【结果】根据碳汇功能和生态敏感性程度差异识别出 4 类分区：保护区面积为 131.77 hm^2，占比 3.70%；修复区面积为 1 544.83 hm^2，占比 43.43%；保育区面积为 794.05 hm^2，占比 22.32%；调节区面积为1 086.28 hm^2，占比 30.54%。4 类分区应分别采取“外拓保汇”“减灾稳汇”“提质增汇”和“协同创汇”的优化策略。【结论】西安东南城乡交错带的碳汇功能和生态敏感性具有显著的城乡分异和梯度变化特征，且城乡分异特征随时间推移显著增大。碳汇功能的压力主要来自城市拓展带来的人为干扰和黄土台塬边坡的滑坡风险。4 类分区差异化策略的提出，为修复城乡空间碳汇功能提供区划的空间指引和方案寻优途径，提升了生态分区的准确性和效率。

关键词：碳汇；生态修复；空间距离指数；InVEST 模型；规划策略

DOI：10.12169/zgcsly.2024.12.31.0002

Research on Ecological Restoration Zoning Based on Carbon Sink Function-Ecological Sensitivity Correlation Matrix

Zuo Xiang Liu Hui Wan Jingmao Du Yi Zhang Xiaotong

(School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract：【Objective】In order to integrate the development needs of ecological restoration and carbon sink enhancement, a systematic and differentiated ecological conservation zoning plan should be established to effectively restore the carbon sink functions of urban and rural areas. 【Method】The study takes the Xi'an High Speed Railway East City Area as the research object to analyze carbon sequestration and ecological sensitivity changes between 2017 to 2020, establish the correlation matrix of "carbon sink function-ecological sensitivity" using the inVEST model and the comprehensive index weighting method, and identify the ecological conservation zones and a differentiated strategy system for restoration and conservation of carbon sink functions .【Result】Four zones are identified based on differences in carbon

收稿日期：2024-12-31

* 基金项目：国家自然科学基金项目（51878531）；陕西省自然科学基础研究基金青年人才项目（2021JQ-513）；陕西省自然科学基金一般项目（2023-JC-QN-0525）；陕西省社会科学基金年度项目（2023J002）；渭南市海绵城市建设专题研究服务项目（20230759）

第一作者：左翔（1993- ），男，博士生，主要研究方向为风景园林规划与设计。Email：493967380@ qq. com

通信作者：刘晖（1968- ），女，博士，教授、博士生导师，主要研究方向为西北脆弱生态环境景观规划设计理论与方法。E-mail：249600425@ qq. com

sink functions and ecological sensitivity: Protection zone covers 131.77 ha, accounting for 3.70%; restoration zone covers 1 544.83 ha, accounting for 43.43%; conservation zone covers 794.05 ha, accounting for 22.32%; and regulation zone covers 1 086.28 ha, accounting for 30.54%. The four types of zones should adopt the optimization strategies of "maintain and expand carbon sinks", "reduce natural disasters and stabilize carbon sinks", "Improving quality to increase carbon sink", and "synergistic creation of carbon sink", respectively. 【Conclusion】 The carbon sink function and ecological sensitivity of the urban-rural transition zone in southeast Xi'an are characterized by significant urban-rural differentiation and gradient changes, and the urban-rural differentiation characteristics increase significantly with time. The pressure on the carbon sink function mainly comes from the anthropogenic interference caused by urban expansion and the landslide risk of loess tableland slopes. The proposing of differentiation strategies for the four types of zones provides spatial guidance and optimal solutions for restoring the carbon sink functions of urban and rural spaces, and improves the accuracy and efficiency of ecological zoning.

Keywords: carbon sink; ecological restoration; spatial distance index; inVEST model; planning strategy

中国70%以上的碳排放来源于城市[1]，如何修复城市生态系统，构建稳定的碳汇功能，对国家“碳达峰”“碳中和”战略目标的达成具有重要意义。相较自然生态系统，城市生态系统的碳汇功能更为脆弱、低下，不仅面临高强度人为干扰，还受到气候变化、自然灾害等多种生态问题的影响和抑制。修复碳汇功能过程片面追求绿化覆盖率指标的提升，忽略城市生态系统结构和功能的关联性、复合性、突变性，可能导致碳汇效益低下，损害社会经济发展机会。只有系统解析城市生态功能和问题，探索差异化、多目标的城市生态保护和修复途径才能找到碳汇功能修复、增强的最优解。

目前协同不同生态要素和影响因子的碳汇功能保护的应用研究主要有以下几类。1）基于碳汇与其他生态系统服务的空间邻近关系和特征，实现分区规划，如戴菲等[2]使用自组织特征映射（SOM）聚类模型识别生态系统服务簇，根据其与碳汇发育程度的关系，提出了基于碳汇能力提升的生态系统服务簇分区规划策略。2）基于对碳汇功能关联的生态过程作用机理，进行固碳能效测度和规划策略构建，如李智广等[3]基于水土保持措施产生效益碳汇增量的机理，提出了区域水土保持碳汇能力评估指标，以监测、估算和统计区域水土流失防治措施及其效益碳汇功能；刘颂等[4]基于绿地、水体、土壤的碳汇功能协同作用，提出面向增汇减碳的城市蓝绿基础设施规划设计策略。3）基于碳汇供需平衡原理，进行生态布局规划。如宋苑震等[5]基于碳汇与碳排用地平衡对国土空间碳循环的影响机理，提出了以限制、减少碳排用地（减排），保护、增加碳汇用地（增质）为特征的复合型用地格局优化策略。

以上研究反映出基于关联生态要素和过程机理实现“增汇、促汇”的路径特征，有利于提升策略的有效性。但城市环境中不仅存在促进碳汇功能的“正面”因素和机制，亦存在抑制、损害碳汇功能的负面因素，如气候变化、地质灾害和人为干扰等，忽略它们将极大程度增加规划建设的风险和成本、削弱措施的有效性和全面性。为此，本研究基于“服务-问题”框架，建立“碳汇功能-生态敏感性”关联矩阵的生态保护分区方法，并以西安市高铁东城片区为对象，开展面向碳汇功能保护和修复的生态分区研究。以期健全城市“增汇减碳”导向下的生态规划策略方法体系，为系统化、差异化地修复城乡空间碳汇功能提供最优区划方案。

1 研究区概况

研究区位于西安市东南市郊的灞桥区红旗街道（109.02°—109.08°E，34.25°—34.19°N），长宽皆为6 km，面积为36 km^2（图1）。东侧为白鹿原，西南有凤栖原，中间为谷地，浐河自南向北从中穿过。存在低海拔黄土塬、冲沟、平原、河湖、林地、草地等多样地貌景观。研究区是西安“东拓”建设前沿，地跨西安绕城高速两侧，范围内包含建成区、农业区和自然地带，具有典型

的城乡交错带特征。目前已被西安市规划为高铁东城片区规划的核心区，面临高铁站及配套商、住、医、教设施等高强度建设，生态保护和城市建设矛盾突出。

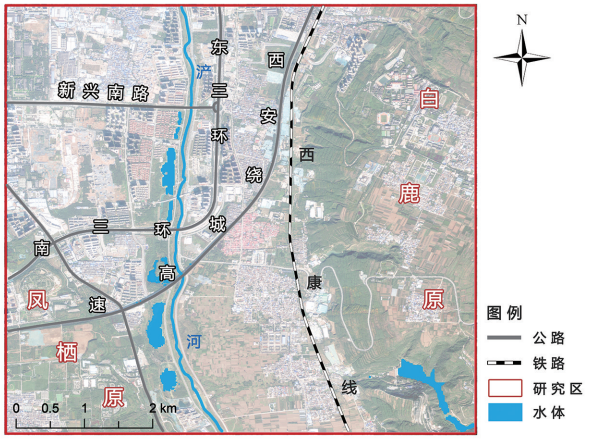


图 1　研究区概况

2　研究方法

2.1　数据来源

本研究使用的 2017 年土地利用数据源自鹏城实验室 FROM-GLC10 数据集[6]（https://data-starcloud.pcl.ac.cn/zh/resource/1），2020 年土地利用数据来自武汉大学 CRLC 数据集[7]（https://github.com/LiuGalaxy/CRLC），分辨率都为 10 m；年均实际蒸散量、年均降水量、土壤侵蚀数据来自中国科学院成都山地灾害与环境研究所，分辨率 30 m。高分二号卫星影像数据来自陆地观测卫星数据服务平台（http://36.112.130.153:7777/DSSPlatform/productSearch.html），分辨率 3.2 m；地质灾害点空间分布数据来自地质云网站（https://geocloud.cgs.gov.cn/）。数字高程数据 DEM 来自欧空局的 Copernicus GLO-30 DEM 数据集，分辨率 30 m（https://panda.copernicus.eu/panda）。

2.2　碳汇功能评价

研究采用 InVEST 模型的碳储存模块测算研究区碳汇功能[8-9]。由于各土地利用类型的地上植被、地下植被和土壤碳密度值和死亡有机质碳密度会受区域气候和土壤类型等因素影响[10-11]，故参考本地区同类研究中的同种土地利用的 4 部分碳密度[12]，采用 Alam 等[13]、Giardina 和 Ryan[14]及陈光水等[15]提出的方法修正土壤 4 部分碳密度，得到研究区不同土地利用类型各部分碳密度（表 1）。之后将该表和土地利用数据输入 InVEST 碳储量模块运行，计算完毕后将输出碳储量栅格图。考虑分位数法在减少极端值影响、非均匀数据的适用性上的优势，选择分位数法按碳储量从高到低将研究区分为高碳汇区、中碳汇区、低碳汇区，得到碳汇功能分区图。

表 1　研究区不同土地利用类型各部分碳密度

t · hm^{-2}

土地利用类型	地上植被碳密度	地下植被碳密度	土壤碳密度	死亡有机质碳密度
耕地	4.22	31.73	79.58	0.74
林地	10.54	45.57	114.30	1.95
草地和灌木	8.78	34.02	73.57	0.46
湿地	7.75	18.78	147.52	0.00
水域	0.08	0.00	0.00	0.00
建设用地	0.62	0.00	76.92	0.00
裸地	0.32	0.00	30.97	0.00

2.3　生态敏感性评价

在低海拔黄土台塬区，对固碳功能存在影响的生态问题主要包括：水土流失、植被退化、气候响应、人为干扰、地质灾害[16-20]。其中水土流失敏感性使用归一化的土壤侵蚀量（USLE）表征[21]；植被退化敏感性由归一化植被指数（NDVI）的倒数表征，该指标使用 ENVI 软件分析卫星影像得到；气候响应由气候指数（CI）表示，该指数为年平均实际蒸散量与降水量的归一化比值[22]。人为干扰敏感性使用归一化的人为影响强度（HAI）表征[23]；研究区发生的地质灾害为滑坡、泥石流、洪涝，因此地质灾害敏感性评价选择了坡度、地形起伏度、距水体距离、距地质灾害点距离 4 个因子进行评价，综合因子权重法[24]将结果进行等权重叠加。生态敏感以生态敏感度 ESI 表征，基于以上 5 类指标，采用空间距离指数法[25]计算得到 ESI，其结果作归一化处理[26]。最后使用分位数法将研究区按照生态敏感度从高到低分为高敏感区、中敏感区、低敏感区，得到生态敏感性分区图。

2.4　二维关联矩阵判别

关联矩阵法是由 H. Chestnut 提出的一种用于多指标评估的综合量表法[27]，该方法将复杂的多

目标问题分解为两指标的重要度对比[28]，并采用矩阵的形式根据权重综合评定每一方案的优劣程度，以数值方式显示综合评价结果[29]，使评价过程简化、清晰[30]。已较多被应用在城市生态环境评价研究中[26,31]。本研究使用二维关联矩阵建立碳储量和生态敏感性的关联，进行以碳汇功能提升和关联生态问题修复为目的的生态保护分区判别。

将碳储量和生态敏感性的分区数据导入 ArcGIS 平台，从综合碳汇功能提升和关键生态问题修复视角，构建“碳汇功能-生态敏感性”二维关联判断矩阵（表 2），完成碳汇功能保护分区划分：保护区碳汇功能极强，生态系统最稳定，对区域生态系统固碳功能极其重要；修复区碳汇功能高度重要，同时局部生态问题突显，需要采取修复提升；保育区碳汇功能重要，但生态系统脆弱，受到干扰后易受发生退化，需要采取保育控制措施；调节区碳汇功能一般，建设强度大、生态空间占比低，是重要的可持续发展协调区。

表 2 碳汇功能修复分区二维关联矩阵

生态敏感性分区	低碳汇区	中碳汇区	高碳汇区
低度敏感区	低敏感-低碳汇区（调节区）	低敏感-中碳汇区（调节区）	低敏感-高碳汇区（保护区）
中度敏感区	中敏感-低碳汇区（调节区）	中敏感-中碳汇区（保育区）	中敏感-高碳汇区（修复区）
高度敏感区	高敏感-低碳汇区（调节区）	高敏感-中碳汇区（保育区）	高敏感-高碳汇区（修复区）

3 结果与分析

3.1 碳汇功能特征分析

由表 3 可知，2020 年研究区共有 364 753.79 t 碳储量，较 2017 年增加 4 631.60 t。各类型用地的碳密度变化不大，研究区碳汇量的变化主要受到用地类型面积变化的影响。表 4 显示，碳汇主要增量来自耕地向林地的转化（增加 8 026.33 t）和不透水面向耕地的转化（增加 7 307.07 t）。草地和灌木、耕地向不透水面的转化使碳汇量分别减少了 9 684.01 和 3 058.29 t，是最大的碳汇减量来源。从碳汇量占比（表 3）来看，2020 年碳储量占比最大的为不透水面（39.23%），较 2017 年增加 2.47 个百分点；其次为耕地（35.75%）和林地（20.77%），分别增加了 12.28 和 7.48 个百分点；草地和灌木的碳储量占比为 4.24%，下降了 21.98 个百分点；湿地和水体的碳储量占比较小，分别为 0.02%和 0.001%，较 2017 年占比变化不大。裸地在 2017 年有 935.84 t 碳储量，到 2020 年该土地利用类型完全转化消失。

从碳密度（表 3）来看，湿地碳密度在所有用地类型中最大（两个年份分别为 175.44 和 171.35 $t \cdot hm^{-2}$），但由于面积占比极小（分别为 0.003%和 0.01%），导致碳储量仅占 0.004%和 0.015%。草地和灌木的碳密度也达到了较高水平（两个年份分别为 116.83 和 115.78 $t \cdot hm^{-2}$），同样因面积占比由 22.49%下降至 3.72%，其碳储量占比仅为 4.24%，可见这两类土地类型对提升研究区碳汇功能的潜力没有充分发挥，仍有较大提升空间。

表 3 各个土地利用类型的面积及碳汇功能统计

土地利用类型	2017 年					2020 年				
	面积/hm^2	面积占比/%	碳储量/t	碳储量占比/%	碳密度/($t \cdot hm^{-2}$)	面积/hm^2	面积占比/%	碳储量/t	碳储量占比/%	碳密度/($t \cdot hm^{-2}$)
不透水面	1 707.12	47.51	132 369.83	36.76	77.54	1 843.46	51.26↑	143 087.31	39.23↑	77.62
耕地	727.02	20.23	84 536.93	23.47	116.28	1 124.88	31.28↑	130 379.52	35.75↑	115.91↓
林地	277.58	7.73	47 843.52	13.29	172.36	439.02	12.21↑	75 762.31	20.77↑	172.57
草地和灌木	808.18	22.49	94 416.91	26.22	116.83	133.59	3.72↓	15 467.30	4.24↓	115.78↓
湿地	0.09	0.003	15.79	0.004	175.44	0.31	0.01↑	53.12	0.02↑	171.35↓
水体	43.11	1.20	3.37	0.001	0.08	54.73	1.52↑	4.23	0.001↑	0.08
裸地	29.91	0.83	935.84	0.26	31.29	0	0↓	0	0↓	—

注：↑代表数据较 2017 年增加；↓代表数据较 2017 年减少。

表 4　2017—2020 年土地类型转化导致的碳汇量变化　t

2017 年	2020 年						
	不透水面	耕地	林地	草地和灌木	湿地	水体	碳汇量变化
不透水面	0.00	7 307.07	885.47	500.38	20.31	−894.97	7 818.27
耕地	−3 058.29	−156.02	8 026.33	44.41	0.95	−11.73	4 845.64
林地	−537.59	−1 836.72	0.00	−1 051.14	0.01	−119.38	−3 544.83
草地和灌木	−9 684.01	−174.16	3 489.81	10.22	2.06	−481.78	−6 837.87
湿地	−1.80	−0.78	0.00	0.00	0.00	−10.22	−12.80
水体	126.79	69.84	555.01	8.93	0.00	0.00	760.58
裸地	1 097.65	245.28	106.95	163.37	5.60	−17.79	1 601.06

为了解碳汇功能的城乡梯度特征，在西安绕城高速公路两侧生成宽 400 m 的缓冲带作为样带，分别统计各样带平均碳密度（$t \cdot hm^{-2}$）。研究区共生成 19 个有效样带（图 2）。按照城区到郊区方向（西北至东南）依次将样带编为 1 至 19 号，西安绕城高速公路位于 9 和 10 号样带之间的分界线上。经统计（图 3）：两个年份的碳密度均呈现出从城区到郊区逐渐上升趋势，碳密度的最低值均出现在 3 号样带上，最高值均出现在 18 号样带上。根据《西安城市总体规划（2008—2020 年）》，绕城高速公路是西安市主城东南片区的城、郊用地分界线，因此以它为界限将研究区分为城区（1~9 号样带）和郊区（10~19 号样带）进行统计可知，城区在两个年份的平均碳密度分别为 88.80 和86.80 $t \cdot hm^{-2}$，郊区分别为 110.06 和 114.81 $t \cdot hm^{-2}$，碳密度西北至东南跨越城郊分界线后有明显提升，这说明城郊之间在碳汇功能的供给模式上有明显差异。

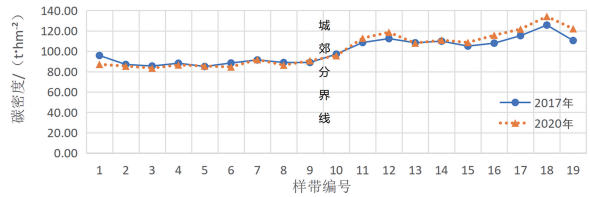


图 3　样带碳密度变化

根据碳汇功能分区（图 4），2017 年和 2020 年研究区呈现出高碳汇区主要分布在郊区，中碳汇主要分布在城区，低碳汇主要分布在河湖水体、停车场和在建工地的特征。经统计（表 5），2020 年研究区低碳汇区和中碳汇区面积占比较 2017 年分别下降 0.52 和 16.39 个百分点，高碳汇区面积增加 16.91 个百分点，总体上呈现出低等级碳汇分区向高等级转化的特征。在城区，两个年份中碳汇区占比始终最大（69.68% 和 74.53%）。在郊区，2017 年以中碳汇区面积占比最大（66.47%），而到了 2020 年高碳汇区的面积占比上升为最大（62.63%），可以看出 2017 和 2020 年郊区与城区的碳汇功能差异显著增大。

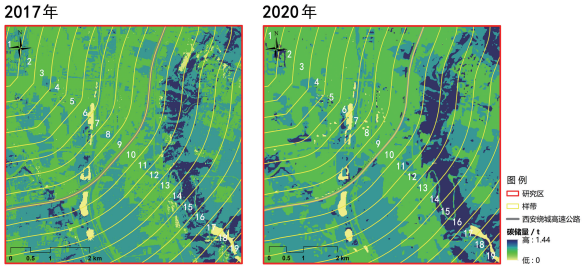


图 2　碳储量分布图

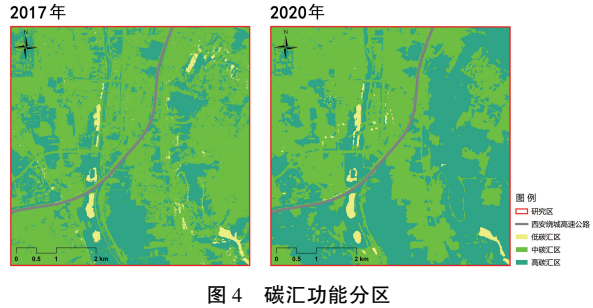


图 4　碳汇功能分区

表 5　碳汇功能分区面积占比统计

分级	年份	研究区		城区		郊区	
		面积/hm^2	面积占比/%	面积/hm^2	面积占比/%	面积/hm^2	面积占比/%
低碳汇区	2017	73.02	2.03	17.83	1.24	55.15	2.56
	2020	54.25	1.51	23.85	1.66	30.38	1.41
中碳汇区	2017	2 434.14	67.75	1 001.06	69.68	1 431.25	66.47
	2020	1 849.13	51.36	1 071.77	74.53	776.33	35.96
高碳汇区	2017	1 085.85	30.22	417.80	29.08	666.92	30.97
	2020	1 697.02	47.13	342.45	23.81	1 352.05	62.63

3.2 生态敏感性特征分析

对 2 期生态敏感性的多因子分析结果（图 5）进行统计发现，研究区各因子归一化评分的均值的变化程度由大到小依次为：地质灾害>植被退化>人为干扰>气候影响≈土壤侵蚀，说明地质灾害、植被退化、人为干扰是生态敏感性变化的主要影响因子（图 6）。生态敏感性分级结果（图 7）显示：2017 年低度敏感区主要分布在西北部建成区、白鹿原西侧村庄、工业用地以及浐河滩地，斑块较破碎；中度敏感区主要分布在台塬边坡底的过渡区、坡面冲沟和塬面上的村庄、校园、公园；高度敏感区主要分布在台塬边坡林地，塬面耕地，浐河西岸的公园、景区绿地。2020 年各级敏感性分区的分布位置与 2017 年基本一致，城区的低敏感度区斑块向四周扩张，连续性增大；郊区则出现高敏感度区斑块向周围扩张，连续性增大的趋势。总体上，2020 年的低度和中度敏感区的占比较 2017 年分别减少 0.16 和 0.04 个百分点，高度敏感区面积占比增加了 0.21 个百分点。整体上表现出敏感性级别增高的趋势。

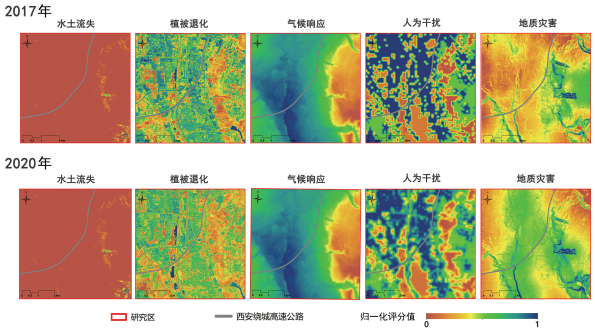


图 5 生态敏感性多因子分析

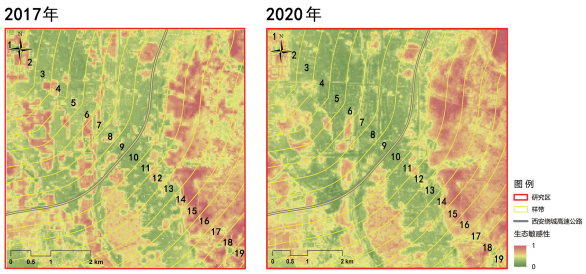


图 6 生态敏感性评价

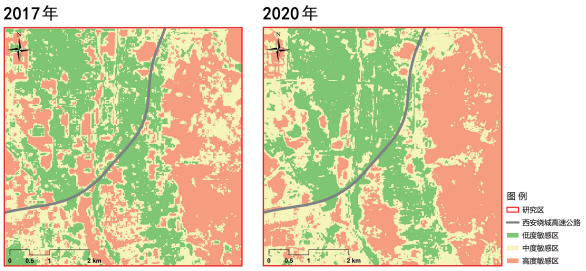


图 7 生态敏感性分区分布格局

分别统计城区和郊区的生态敏感度分区面积占比（表 6），得到 2017 年城区低、中、高度敏感区的面积占比分别为 1.24%、69.68%、29.08%，郊区的面积占比分别为 2.56%、66.47%、30.97%，城、郊区的生态敏感度分区面积比例的差异不明显。2020 年城、郊区的中度敏感区面积分别为 31.85%和 34.24%，占比接近。城区的低度敏感区面积占比高出郊区 40.19 个百分点；高度敏感区占比为低于郊区 37.8 个百分点。这说明 2020 年城区的生态敏感性较郊区明显偏低，生态敏感性的城、郊差异较 2017 年明显加大。在城郊梯度带上，两年份的生态敏感度均值都呈现出先小幅下降再逐渐升高的趋势（图 8），其中城区 2020 年的生态敏感度折线低于 2017 年；郊区两年份的生态敏感度较接近。

表 6 生态敏感性分区面积占比统计

生态敏感性分区	年份	研究区		城区		郊区	
		面积/hm²	面积占比/ %	面积/hm²	面积占比/ %	面积/hm²	面积占比/ %
低度敏感区	2017	1 189.10	33.33	17.83	1.24	55.15	2.56
	2020	1 179.94	33.17	814.88	57.29	365.06	17.10
中度敏感区	2017	1 189.02	33.33	1 001.06	69.68	1 431.25	66.47
	2020	1 183.99	33.29	453.07	31.85	730.92	34.24
高度敏感区	2017	1 189.02	33.33	417.80	29.08	666.92	30.97
	2020	1 193.01	33.54	154.40	10.86	1 038.60	48.66

3.3 生态保护分区格局分析

通过建立“碳汇功能-生态敏感性”二维关联矩阵判别出 4 种生态保护分区（图 9），即保护区、修复区、保育区和调节区。表 7 显示：2017 年保护区、修复区、保育区和调节区的平均碳密度分别为 119.49、132.07、97.40 和 75.15 t · hm^{-2}，各分区的平均碳密度差异明显。保护区和调节区的生态敏感度较低且大小相近，分别为 0.28 和

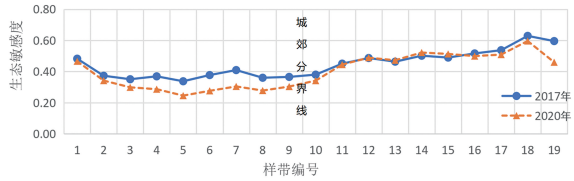


图 8　样带生态敏感度变化

0.27，修复区和保育区的生态敏感度较高，分别为 0.57 和 0.49；2020 年各分区的平均碳密度和生态敏感度水平与 2017 年基本一致，各分区的碳汇功能和生态敏感性特征同样具有明显数值差异。

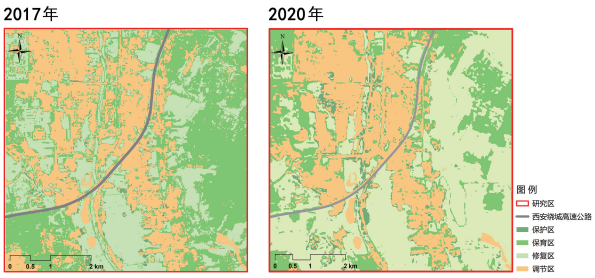


图 9　生态保护分区分布

1）保护区。2020 年保护区面积为 131.77 hm^2，面积占比 3.70%，较 2017 年增加 1.36 个百分点，主要分布在地形平缓的河谷带公园、高质量林地，是面积占比最小的分区。这一区域生态本底良好，碳汇功能和生态系统抗扰性较强，应以较为严格保护性策略维持碳汇功能稳定；可结合河流生态红线划定、防护林带建设、景区公园的保护性规划，在维持高碳汇用地稳定性的同时，采用用地置换等方式逐渐拓展核心面积，并在外侧建设碳汇用地缓冲带，减缓建设用地的侵蚀和人为活动干扰。此策略可总结为“外拓保汇”。

2）修复区。2020 年修复区面积为 1 544.83 hm^2，占比为 43.43%，是面积占比最大的分区，较 2017 年增加 15.50 个百分点，说明区域在新建高碳汇用地的同时忽略了生态压力疏解。修复区主要分布在绕城高速路东南侧，包括台塬塬面及边坡上的草地、建成区边缘的耕地和林地、浐河沿岸、高绿化率的居住区。该分区具有较强碳汇功能的同时面临更多生态压力，碳汇功能更易受到人为或灾害扰动而发生退化。应以修复性策略为主，建植适生植物群落，减少径流冲刷，促进根系固土；在黄土冲沟等敏感性较高的地方可辅以生态工程措施，拦、蓄、排结合，降低滑坡、水土流失风险。控制建设强度，减少生态扰动；加强耕地保护、推进坡地生态退耕。此策略可总结为“减灾稳汇”。

3）保育区。2020 年保育区面积为 794.05 hm^2，面积占比 22.32%，较 2017 年减少 14.68 个百分点，主要分布于研究区东、西侧村庄、仓库园区、交通附属绿地等。此区域碳汇功能中等，生态风险比保护区大，应加强现状植被的保护利用和退化风险防治；提高土地利用效率，拓展绿色空间，建立新的增汇节点；加强高碳汇植物引种种植，调整垂直结构，合理种植密度，促进植物碳代谢过程；提高耐胁迫型植物应用，注重植物群落的抗扰性和自维持能力构建。此策略可总结为“提质增汇”。

4）调节区。2020 年调节区面积为 1 086.28 hm^2，面积占比 30.54%，较 2017 年减少 2.19 个百分点，主要分布在西北部城区、浐河沿岸的居住区、商业区以及白鹿原西侧工业园区。调节区以低碳汇功能为特征，植被覆盖度较低、居住人口多、建筑密度大，碳汇功能供需矛盾突出，承受人为干扰和自然条件双重压力。应结合城市人居需求改善碳汇功能，探索建设兼顾景观和生态功能的蓝绿基础设施；利用生态过程的协同效应创造新的碳汇增长点；串联现状绿地等碳汇节点，建设高碳汇网络；以体系化生态设施建设提升城市生态系统碳汇能力。此策略可总结为“协同创汇”。

表 7　生态保护分区指标特征

指标	年份	保护区	修复区	保育区	调节区
平均碳密度/（$t \cdot hm^{-2}$）	2017	119.49	132.07	97.40	75.15
	2020	117.61	130.92	79.07	74.22
生态敏感度	2017	0.28	0.57	0.49	0.27
	2020	0.22	0.53	0.43	0.21
面积/hm^2	2017	83.32	994.24	1 317.13	1 164.91
	2020	131.77	1 544.83	794.05	1 086.28

4 讨论

本研究使用“碳汇功能-生态敏感性”关联矩阵来判别生态保护分区，并非是为了实现差异化分区而强行建立关联，而是基于客观存在的碳汇相关生态作用和过程原理。例如：植物净光合速率与固碳量呈现极显著的正相关[32]；碳汇表征指标净生态系统生产力 NEP 与降水呈现正相关关系[33]；土壤有机碳库在水土流失过程的各阶段都受到侵蚀影响[34]，以碳汇生态过程机理作为内在逻辑建立的联矩阵，提升了低碳城建中多目标问题评价的科学性，而基于目标量化的分析途径也使建设方案的精准性和有效性得到提高。

多项碳储量动态的研究证明土地利用变化是碳储量变化的主导因子，如 1990—2020 年三峡库区不同土地利用类型相互转换导致碳储量净减少 6.66×10^6 t[35]。2000—2020 年咸阳市土地利用转移导致碳储量减少 17.32×10^4 t[36]，这与本研究土地类型变化影响碳汇量的分析结论一致，但本研究区的碳储量在土地利用变化后增长了 4 631.58 t，说明不同地区土地开发利用策略的差异可能对碳汇功能产生显著影响，而土地利用规划可能是能源、经济结构调整之外实现“碳达峰”的重要途径。石铁矛等[37]分析沈阳市一环到三环区域的植被地上碳储量（AGC）后发现，城市碳汇量具有由中心向外围逐渐递增的趋势，这与本研究中“城区碳汇功能弱于郊区”的研究结论一致，说明碳汇功能的城乡差异和梯度特征可能广泛存在于我国许多城市中，这些城市在“国土空间生态修复规划”中应当重视修复策略与碳汇功能的城乡梯度相匹配、融合。此外，本研究中高敏感区主要分布在台塬边坡、冲沟区域，这与李建军等[38]、徐恩凯等[39]等对黄土区的生态敏感性分析结果一致。此现象与该区域土质松软、坡度较大导致滑坡、崩塌、水土流失风险增大有关。黄土区城市在开展低碳城乡建设中，应当注意这一碳汇风险源地的修复。

作为西安市东拓建设重要的节点，研究区未来将面临高强度的建设，为区域碳汇功能的保护带来最大变数。能否在城市建设区拓展和碳汇功能构建之间找到平衡点是区域实现绿色低碳发展的关键。作为以高铁东站为核心的城市片区，未来应在碳汇功能保护分区的基础上围绕城市交通枢纽的职能，探索结合高碳汇功能的 TOD（transit-oriented development）发展模式，探索细化碳汇功能分区、系统化建设的途径，建立碳汇功能节点和网络，实现精细化调控。

5 结论

不透水面、耕地、林地碳储量占比较大，草地和灌木、湿地两种高碳密度用地类型面积占比太小，碳汇潜力未得到充分开发。草地和灌木、耕地向不透水面的转化是 2017—2020 年碳汇减少的主要因素。

研究区碳密度具有从城区到郊区逐渐上升的梯度变化特征，且城郊之间在碳汇功能的供给模式上有显著差异。

研究区中碳汇区主要分布在城区、高碳汇区主要分布在郊区、低碳汇区面积占比较小的特征，且城乡碳汇功能差异随时间推移显著增大。

高度敏感区主要分布在台塬边坡、塬面以西北部建成区内的绿地，城区生态敏感性较郊区明显偏低。2017—2020 年研究区生态敏感度呈增高趋势，城、郊生态敏感性的差异加大。

基于“碳汇功能-生态敏感性”二维关联矩阵识别出 4 种生态保护分区类型，各分区应采取“保汇外拓”“减灾稳汇”“提质增汇”“协同创汇”的优化策略。

参考文献

[1] CAI B, CUI C, ZHANG D. et al. China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015 and uncertainty analysis[J]. Applied Energy, 2019, 253: 113579.

[2] 戴菲, 江佩宜, 文晨. 基于生态系统服务簇分析的城市生态空间碳汇能力综合提升[J]. 风景园林, 2023, 30(11): 96-104.

[3] 李智广, 王隽雄, 王海燕. 区域水土保持碳汇能力评估的指标体系[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(1): 64-72.

[4] 刘颂, 白钊成, 柳迪子, 等. 城市蓝绿基础设施多尺度增汇减碳能效测度研究进展和规划策略[J]. 风景园林, 2025, 32(1): 1-9.

[5] 宋苑震, 覃盟琳, 袁倩文, 等. 碳平衡导向下北部湾城市群碳汇用地布局优化研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(5): 1071-1082.

[6] GONG P, LIU H, ZHANG M, et al. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected

in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017[J]. Science Bulletin,2019,64(6):370-373.

[7] LIU Y, ZHONG Y, MA A, et al. Cross-resolution national-scale land-cover mapping based on noisy label learning: a case study of China[J]. International Journal of Applied Earth Observation And Geoinformation,2023,118:12.

[8] 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.

[9] 边蕊,赵安周,刘宪锋,等.关中平原城市群土地利用变化对碳储量的影响[J].环境科学,2024,45(6):3260-3269.

[10] FU Q, XU L, ZHENG H, et al. Dynamics of carbon storage in response to urbanization: a case study in the Su-Xi-Chang Region, China[J]. Processes,2019,7(11):836.

[11] 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.

[12] 程明月,姬广兴,黄珺嫦,等.基于 PLUS-InVEST 模型的陕西省多情景土地覆盖模拟与碳储量评估[J/OL].环境科学,1-17[2024-12-25]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202409068.

[13] 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(2):67-76.

[14] GIARDINA C P, RYAN M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. Nature,2000,404(6780):858-861.

[15] 陈光水,杨玉盛,刘乐中,等.森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J].亚热带资源与环境学报,2007,2(1):34-42.

[16] 傅伯杰,刘彦随,曹智,等.黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J].中国科学院院刊,2023,38(8):1110-1117.

[17] 曹璞源,胡胜,邱海军,等.基于模糊层次分析的西安市地质灾害危险性评价[J].干旱区资源与环境,2017,31(8):136-142.

[18] 张彦军,郭胜利,南雅芳,等.水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响[J].生态学报,2012,32(18):5777-5785.

[19] 李军,曹明明,邱海军,等.基于 GIS 的西安市土地生态环境敏感性评价研究[J].西北大学学报(自然科学版),2014,44(1):121-126.

[20] 安韶山,胡洋,王宝荣.黄土高原植被恢复中土壤有机碳稳定机制研究进展[J].应用生态学报,2024,35(9):2413-2422.

[21] 余恩旭,张明芳,蒋志魏,等.岷江上游土壤侵蚀时空演变特征及其成因分析[J].水土保持研究,2023,30(1):1-10.

[22] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].地理研究,2016,35(4):664-676.

[23] 刘世梁,刘芦萌,武雪,等.区域生态效应研究中人类活动强度定量化评价[J].生态学报,2018,38(19):6797-6809.

[24] 胡胜,曹明明,李婷,等.基于 AHP 和 GIS 的陕西省地震次生地质灾害危险性评价[J].第四纪研究,2014,34(2):336-345.

[25] 赵正媛,张云龙,李婷,等.基于空间距离指数的青藏高原生态敏感性综合评价及时空演变分析[J].生态学报,2022,42(18):7403-7416.

[26] 包玉斌,黄涛,王耀宗,等.基于生态重要性与敏感性的六盘山区生态保护修复分区[J].干旱区地理,2023,46(11):1778-1791.

[27] FISHER G J, WING O. Computer recognition and extraction of planar graphs from the incidence matrix[J]. IEEE Transactions On Circuit Theory,1966,13(6):116-154.

[28] 程宪宝,佟艳芬.基于关联矩阵法的高校教材选用方案研究[J].微型电脑应用,2016,32(3):57-59.

[29] AMER-YAHIA S, SRIVASTAVA D, SUCIU D. Distributed evaluation of network directory queries[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering,2004,16(4):474-486.

[30] 武晓峰,闻星火.高校实验室安全工作的分析与思考[J].实验室研究与探索,2012,31(8):81-84.

[31] 熊善高,秦昌波,于雷,等.基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究:以南宁市为例[J].生态学报,2018,38(22):7899-7911.

[32] 郝鑫杰,李素英,王继伟,等.呼和浩特市 13 种绿化植物固碳释氧效率的比较研究[J].西北植物学报,2017,37(6):1196-1204.

[33] 刘文利,姜亮亮,刘冰,等.中国植被碳源/汇时空演变特征及其驱动因素[J].生态学报,2024,44(4):1456-1467.

[34] LAL R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. Environment International,2003,29(4):437-450.

[35] 毛永发,周启刚,王陶,等.耦合 PLUS-InVEST-Geodector 模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因[J].长江流域资源与环境,2023,32(5):1042-1057.

[36] 陈秋计,谢米米,南丹丹,等.基于 PLUS-InVEST 模型的咸阳市生态系统碳储量时空演变与预测[J/OL].自然资源遥感,1-11[2024-12-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.P.20241211.1325.016.html.

[37] 石铁矛,李沛颖,汤煜.碳中和背景下城市碳汇功能及提升策略:以沈阳核心区为例[J].中国园林,2022,38(3):78-83.

[38] 李建军,苏志珠,王言荣.基于 GIS 的万荣县生态敏感性评价与区划[J].中国农业资源与区划,2014,35(5):48-54.

[39] 徐恩凯,周梓滢,胡永歌.黄土丘陵沟壑区生态修复和植物景观营造模式与策略:以郑州市滨黄河区域为例[J].风景园林,2022,29(5):75-81.