南太行地区碳储量与景观格局耦合协调演变*

李诗尧 李 翅

北京林业大学园林学院 北京 100083

摘要:【目的】评估碳储量和景观格局的地形梯度效应与协同发展关系，以期为南太行地区落实生态保护与双碳目标提供依据。【方法】以南太行地区为研究对象，基于地形位指数划分地形梯度，分析碳储量和景观格局的时空演变与地形梯度效应；运用耦合协调度模型计算二者协调发展水平，以及运用最优参数地理探测器探究耦合协调度的驱动因素。【结果】1）南太行的碳储量呈逐年降低趋势，平均碳储量随着地形梯度的升高而增加。2）伴随地形梯度提升，南太行山坡区段斑块景观格局趋向破碎分散，至陡坡区段转向集聚整合和优势分布。3）南太行碳储量与综合景观格局指数的耦合协调度以中高水平为主，尤其在西南山地地区表现为景观格局较为完整连续和碳储量较高的协同性。【结论】山地区域耦合协调度变化表现为景观格局大幅度破碎和碳储量小幅降低的非协调性，主要受到自然与社会因子的交互作用，人口分布与城镇发展对于二者的耦合关系产生重要影响。未来研究可以扩展景观格局指数类型，并引入更多自然、社会、经济等面板数据深入探究耦合协调度的影响因素。

关键词：碳储量；景观格局；地形梯度；耦合协调度；南太行地区

DOI：10.12169/zgcsly.2024.09.19.0002

Evolution of Coupling Coordination Between Carbon Storage and Landscape Pattern in the South Taihang Area

Li Shiyao Li Chi

(School of Landscape architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:【Objective】To evaluate the relationship between carbon storage and landscape pattern in terms of terrain gradient effects and collaborative development, with the aim to provide a basis for implementing ecological protection and achieving the "dual-carbon" goals in the South Taihang area.【Method】The South Taihang area was selected as the study area to classify terrain gradient based on topographic index, analyze the spatio-temporal evolution and terrain gradient effect of carbon storage and landscape pattern, calculate the coordinated development of carbon storage and landscape pattern using the coupling coordination model, and adopt Optimal Parameters-Based Geographic Detector (OPGD) model to explain the driving factors to coupling coordination degree.【Result】1) The carbon storage in the South Taihang area has gradually decreased, and the average carbon storage has increased with the rise of terrain gradient; 2) With the increase of terrain gradient, the landscape pattern of patches in the study area tend to be fragmented in hillside, and the pattern is more agglomerated and dominantly distributed in steep slope section; 3) The coupling coordination degree of carbon storage and comprehensive landscape pattern index is at medium and high levels, especially in the southwest mountainous areas, which is manifested as

收稿日期：2024-09-19

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（51978050）

第一作者：李诗尧（1996-），女，博士生，研究方向为城乡人居生态环境。E-mail：lsybjfu@foxmail.com

通信作者：李翅（1971-），男，博士，教授，研究方向为韧性城市与区域空间发展、国土空间规划与城市设计、绿色社区与低影响开发。E-mail：lichi@bjfu.edu.cn

a synergy between relatively complete and continuous landscape pattern and high carbon storage. 【Conclusion】 The coupling coordination variation in mountainous areas is manifested as the disharmony of significantly fragmented landscape pattern and slight carbon storage reduction. This is mainly affected by the interactions of natural and social factors, and population distribution and urban development have an important impact on the coupling relationship between carbon storage and landscape pattern. The future research could enlarge the landscape pattern index and introduce more panel data on nature, society and economics for more in-depth study of the influencing factors to coupling coordination degree.

Keywords: carbon storage; landscape pattern; terrain gradient; coupling coordination degree model; the South Taihang area

面对日益严重的气候异常与温室效应，绿色低碳成为缓解资源环境约束、经济社会结构转型与可持续发展的应对举措[1-2]。碳储存是指生态系统中植被与土壤吸收大气中温室气体的过程，是重要生态系统服务功能之一[3-4]。土地利用的转换导致植被分布变化，从而改变了景观格局特征，成为深刻影响陆地生态系统碳循环过程的重要因素[4-6]。景观格局则通过斑块的类型、形态、数量和空间结构特征反映自然环境变化，成为空间层面提升碳汇能力的策略依据[7-9]。区域土地利用与景观格局同样深受地形因素影响，地形梯度特征与碳储量之间存在显著关联[10]。因此，关注土地利用变化和地形特征，深入分析碳储量与景观格局的耦合协同关系，有助于从多维度揭示生态功能与空间形态变化与互动关系，提升区域的生态系统碳汇增量，并逐渐成为研究热点[3,11-13]。

目前，碳储量与景观格局研究大多聚焦于演变分析，在研究对象上包含流域、城市群、大型城市等不同尺度的绿色空间[3-5,9-12,14-15]；在内容上涵盖时序变化、空间分布、模拟预测与驱动因素[3,11,15-16]，并关注复杂地形因素，探讨地形梯度与碳储量的空间关系[9-12]；在分析技术方法上，Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs（InVEST）与 Fragstats 模型得到了成熟运用[3,15,10,12]；在二者的内在关联探究上，既包括基于数理统计层面的面板回归分析、相关性、灰色关联分析等方法[6,9,15-18]，也包括空间统计层面的双变量空间自相关、地理探测器、地理加权回归、权衡协同分析等方法[7,13,15-16]。研究普遍认为，相较于绿地面积，景观格局能起到更大的碳汇作用[19]，多项景观格局指数与碳储量紧密相关，二者之间存在互馈过程和协同关系，表征斑块破碎与人类活动扰动的指数相关性更高[9,15,19,20]。然而，对于二者的地形梯度分布规律、耦合协调关系与影响因素的定量研究仍然较为缺乏。

太行山脉绵延约 400 km，碳储量具有明显的垂直分异特征[21]。其中，南太行因其独特鲜明的地貌特征成为我国中部地区的生态屏障、碳汇来源与国家生态安全战略格局的关键节点。面对土地利用的剧烈转变所带来的植被退化、景观破碎化、区域碳通量与气候调节功能改变等问题[9,21-22]，自十八大以来河南、山西两省接连出台相关规划支持生态修复与绿色发展，南太行地区迎来绿色低碳发展的规划建设机遇。因此，立足复杂的地形变化，研究碳储量和景观格局的协调发展关系，对于南太行地区如期实现“双碳”目标具有重要价值。本文以南太行地区为例，分析 1980—2020 年碳储量和景观格局的动态演变与地形位梯度分布特征，并计算二者的耦合协调度数值，探究其驱动机制，从而为南太行整体绿色空间格局优化提供理论依据。

1　研究区概况

南太行地区（111°56′—114°45′E，34°53′—37°7′N）总面积约 31 272.49 km^2，地形起伏明显，地势西北高东南低。近 40 年来，南太行地区绿色空间总面积逐年下降，林地面积波动增加，草地面积平稳下降，尤其是近 10 年的耕地大量转为建设用地，反映了快速的城镇扩张对土地利用的压力以及生态环境的改变[23]。

2　研究方法

2.1　数据来源

考虑到南太行地区城镇化速度相对低于经济

发达地区，研究时段选择 1980、1990、2000、2010、2020 年 5 个年份，40 年的时间跨度能够涵盖土地利用转变与城镇建设的全过程，以 10 年为间隔能够更好地反映变化差异。土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心；行政区划、年降水量和年平均气温数据来自国家地球系统科学数据中心；高程数据来自地理空间数据云；夜间灯光数据来自国家青藏高原科学数据中心；人口、GDP 等社会经济数据来自各县（市、区）统计年鉴和国家地球系统科学数据中心。上述数据统一 WGS84 地理坐标，空间分辨率重采样为 1 km。

2.2 地形梯度划分

通过高程和坡度计算地形位指数，运用自然间断法将地形位指数划分为 5 个等级[10]，并以此为基础进行各梯度的景观格局指数和碳储量平均值统计。

2.3 碳储量与景观格局指数计算

运用 InVEST 碳储量模块计算研究区的碳储量[22]。运用 Fragstats 4.2 进行 6 项景观格局指数计算[7,9,15,17-20]。其中，聚合度（AI）、连通度（COHESION）、最大斑块指数（LPI）3 项指数增加表明景观斑块的团聚性、空间连通性和优势度有所增加，视作正向指标。边缘密度（ED）、景观形状指数（LSI）、斑块密度（PD）3 项指数增加表明景观斑块的破碎程度加剧、形态复杂度有所上升，视作负向指标。考虑景观格局指数之间表达信息有所重叠与正负向关系[24]，运用熵权法进行赋权并计算综合景观格局指数。

2.4 碳储量与综合景观格局指数耦合协调度计算

以县（市、区）作为分区统计单元，将碳储量与综合景观格局指数经过归一化计算与平移处理，运用耦合协调度模型计算研究区两个系统间的耦合协调发展水平[25]，计算公式如下：

$$C = 2 \times \sqrt{(U_1 \times U_2) / (U_1 + U_2)^2} \quad (1)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

式（1）~（3）中：C 为耦合度；U_1 为碳储量；U_2 为综合景观格局指数；T 为综合协调指数；α、β 为贡献系数，碳储量和综合景观格局指数发挥同等作用，均取值 0.5；D 为耦合协调度。

2.5 最优参数地理探测器

地理探测器通常用来探测自变量对因变量空间异质性解释力[7]。最优参数地理探测器（Optimal Parameters-based Geographical Detector，OPGD）是基于 R 语言的 GD 包，计算解释因子在设定间断范围内的所有影响解释力 q 值，并选择 q 值最高的参数组合作为最优参数，从而提升解释力[26]。考虑统计数据可获取性与植被生长影响因素，影响因素分析选择 2000、2010、2020 年份展开，以县（市、区）为统计分析单元，以社会经济因子（X1 人口密度、X2GDP、X3 夜间灯光数据）和自然环境因子（X4 年降水量、X5 年平均气温、X6 人均绿地面积）作为自变量，以耦合协调度为因变量，间断数量为 3~6 类，通过因子探测和交互探测解释耦合协调度变化情况[9,13,19-20]。

3 结果与分析

3.1 地形位梯度划分

南太行地区总体地势呈现“西北高-东南低”的分布格局，地形梯度呈现明显空间差异（图 1）。地形梯度划分为 5 个等级，其中 1 级以平原为主，主要在南太行东南部分的河南省县（市、区）带状分布；2 级和 4 级规模总量相近，2 级主要分布中部长治和晋城市中心城区的盆地地区；3 级分布最为广泛，在山前呈现过渡性特征；4 级和 5 级集中分布于两省交界的太行山区，顺应山脉走势形成明显的带状分布，表明山区地形变化复杂，起伏剧烈。

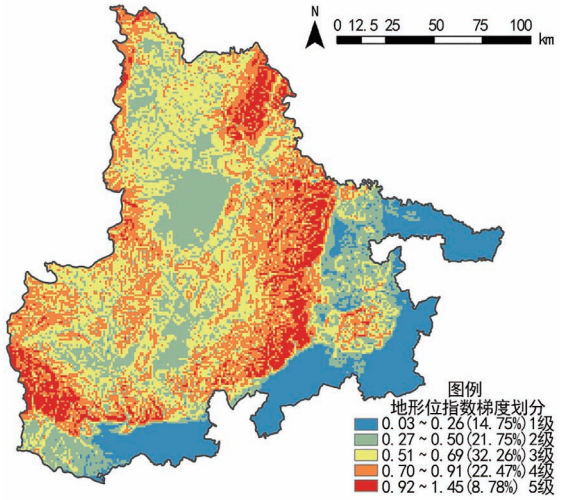


图 1 南太行地形梯度等级划分

3.2　碳储量时空演变与地形梯度效应

由图 2 可知，1980—2020 年，南太行地区的碳储量逐年降低，并在近 10 年快速降低。碳储量低值区域集中在中部和东南部城镇密集建设地带；高值区域集中在地区中南部山地区域，并且在南部山区大面积高值集聚分布；中高值区域在东部和西部边缘分散分布，且分散程度逐年增加。由图 3 可知，平均碳储量伴随地形梯度的升高而有所增加，其中 1 级梯度的平均碳储量显著低于其他地形位等级，4、5 级地形梯度的平均碳储量数值较高且逐年水平较为接近。40 年间，1 级和 3 级地形梯度的平均碳储量持续下降，2 级地形梯度先增后降，近 10 年均呈现快速下降趋势；4 级地形梯度先降后升，5 级地形梯度由小幅波动转为上升，共同表现为平均碳储量在近 10 年快速提升。

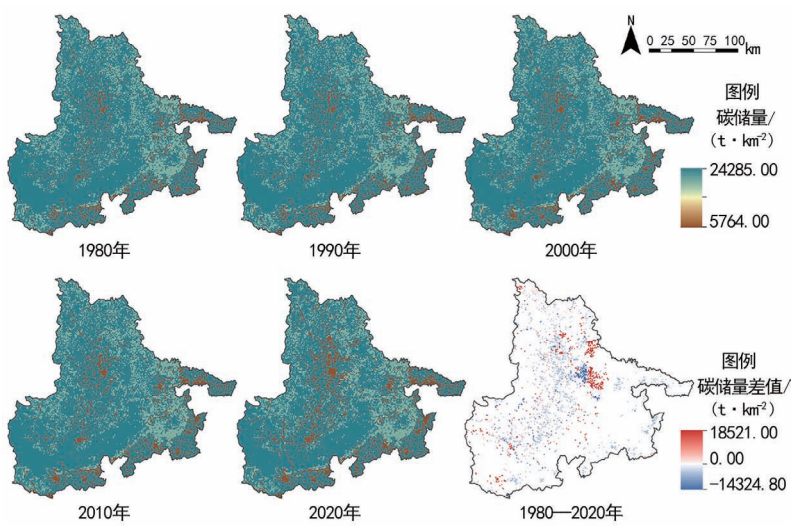


图 2　1980—2020 年南太行碳储量演变

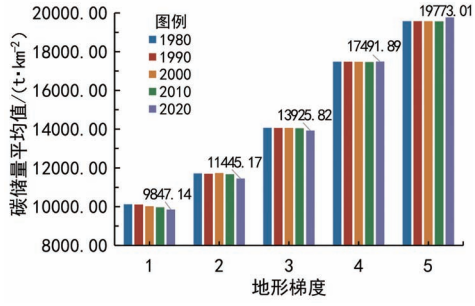


图 3　南太行平均碳储量地形梯度统计

3.3　景观格局时空演变与地形梯度效应

1980—2020 年南太行地区整体景观斑块的聚合性和连通性逐渐降低，中部和南部带状区域景观格局水平较高的范围逐渐缩减，破碎化区域由东西城镇组团向中部地区蔓延。前 30 年斑块演变程度较为稳定，近 10 年破碎化趋势有所加剧。在地形梯度分布上，正向和负向的景观格局指数表现出了伴随坡度提升景观格局由破碎转为集聚的分布特征。由图 4 可知，地形梯度 1 级和 5 级的景观格局指数平均值较为接近，景观斑块的完整连续和优势分布水平相对较高；地形梯度 2～4 级的景观格局指数平均值较为接近，景观格局更加分散破碎。AI、COHESION 和 LPI 伴随地形梯度提升平均值先降后增，ED、LSI 和 PD 伴随地形梯度提升呈现出相反趋势。各梯度的平均景观格局指数在 1980—2010 年变化水平相近，在 2 级和 3 级之间发生一定年份差异，表明 2～3 级地形梯度区间内景观斑块变化幅度更大。在 2010—2020 年，各地形梯度与其他年份表现出明显差异，在 1～4 级的破碎程度更加剧烈，在 5 级的连通整合性有所提升。相较山前平原地带的耕地和城镇用地斑块，以及山地陡坡地带的生态林草斑块，山坡区段的各类景观斑块分布混合，优势度和聚合水平都有所降低，景观格局趋于分散破碎，且近 10 年的破碎程度显著加剧。

3.4　碳储量与景观格局耦合协调度时空演变

1980—2020 年，南太行碳储量与综合景观格局指数的耦合协调度总体稳定在中高水平，呈平稳上升趋势，表明两个系统之间的依存关系较为紧密，协调发展水平较高（图 5）。西南地区的耦合协调度呈现高值组团集聚，尤其是位于太行山

脉南段的阳城县、泽州县和陵川县，表现为景观格局较为完整连续和碳储量较高的协同性。东部城镇组团的耦合协调度相对较低，如黎城县、平顺县、壶关县、林州市等地，表现为景观格局破碎分散和碳储量中高的非协调性。大多数城镇耦合协调度变化平稳，在中西部地区耦合协调度小幅度降低，表现为景观格局大幅度破碎和碳储量小幅降低的非协调性。北部和东南部地区呈现上升趋势，表现为景观格局和碳储量均呈现小幅度增降的协同发展趋势。

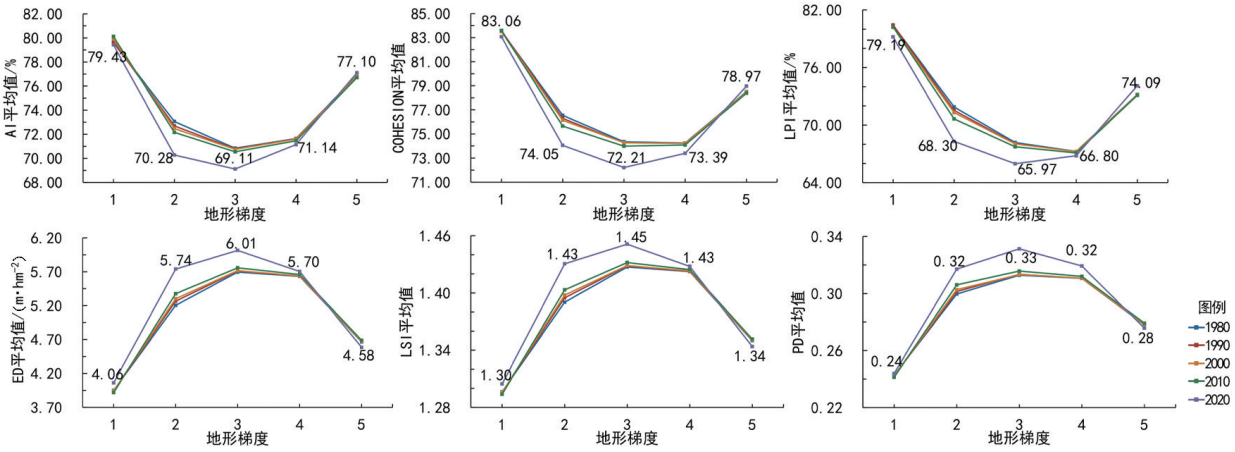


图 4 1980—2020 年南太行地形梯度平均景观格局

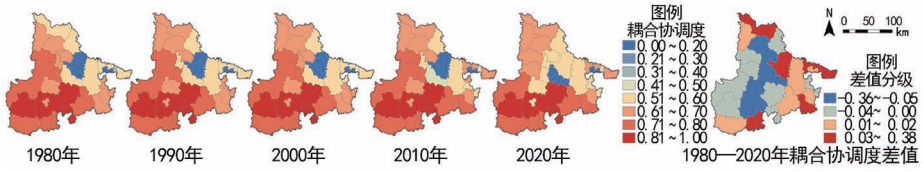


图 5 1980—2020 年南太行耦合协调度演变

3.5 碳储量与景观格局耦合协调度驱动机制

由图 6 可知，在单因子解释方面，X1 人口密度、X6 人均绿地面积、X3 夜间灯光和 X2GDP 对碳储量和综合景观格局指数的耦合协调度具有显著解释力。各项自然环境和社会经济指标具有相近的解释力，人口密度的解释力最强，是二者耦合协调度变化的主导因素；其次是人均绿地面积和夜间灯光，二者的解释力度相近，表明社会经济因素对于耦合协调度变化的作用影响更为显著。在双因子交互解释方面，变量之间两两交互的解释力大多为非线性增强和双因子增强，自然环境指标之间、自然与社会经济指标之间的交互解释力均有所提升，尤其是人口密度、人均绿地面积和年平均气温与其他因子叠加，表明碳储量和景观格局之间耦合协调度变化受到自然与社会因子的交互作用，城镇人口分布和社会建设发展对二者的关系影响力更为显著。

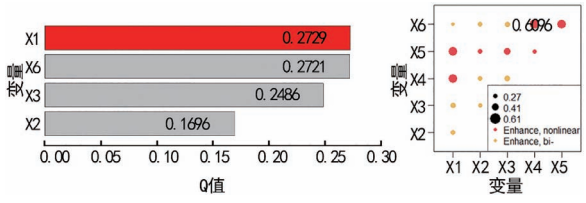


图 6 因子探测与交互探测结果

4 讨论

4.1 碳储量与景观格局的演变与地形梯度分布

地表能量转换与物质迁移深受地形特征驱动，不同地形环境下绿色空间所受到干扰强度存在差异，进而影响了景观格局与碳储量的时空分异特征。对比山地、流域、城镇群等区域的相关研究[5,9-11,19]，城镇化的快速发展导致各类绿色空间面积缩减、景观格局破碎和碳储量损失，平均碳储量往往伴随地形梯度的提升而增加，碳储量和景观格局的时空分异主要受到当地环境和人类活动强度的交互影响，本文研究也印证了上述结论。

南太行地区横跨豫晋两省，从两侧相对平缓的盆地和平原快速过渡至中部陡峭山地，伴随地形梯度升高，人类活动强度有所降低，山坡林草占比提升，各类绿地斑块的景观格局破碎趋势有所减缓，平均碳储量也有所增加。在南太行山前地形平缓地带，伴随城镇扩张和规模化农业生产，1~3 级地形梯度的景观格局破碎水平持续增加，平均碳储量快速下降。近 10 年梯度 4~5 级的碳储量和景观格局水平呈现较大提升，反映了南太行各地推行和验收生态保护修复工程的建设成效。

4.2　碳储量与景观格局的耦合协调度演变

地形特征影响着土地利用开发策略，进而改变了景观格局与区域生态系统服务供给，二者之间存在着密切关联。与其他地区的研究结果对比[9,20]，景观格局指数与碳储量二者在演变趋势总体上紧密依存，保持较高的耦合协调演变水平，局部地区会存在景观格局相对滞后的非协调性。在南太行地区，碳储量和综合景观格局指数协调关系同样持续较高水平并平稳上升，表现为二者均保持较高水平或同向演变的高协调性，但局部地区同样存在非协调性发展，表现为碳储量小幅衰减但滞后于景观格局破碎趋势。二者的协同关系主要受到人类活动带来的环境压力影响，也同样受到气温、降水等植被生长环境要素的制约。因此，为了提升南太行地区的生态建设综合水平，应当结合地形地貌特征，基于国土空间规划成果加强土地资源的集约利用，严格划定生态保护红线，通过大幅度优化林草生态用地的覆被分布与景观格局提升二者的耦合协调度，进而提升南太行地区的生态系统碳储潜力。

5　结论

1980—2020 年南太行地区平均碳储量伴随地形梯度的升高而增加，低值区域集中在中部和东南地形平缓的城镇密集地带，高值区域集中在地区中南部起伏山地区域，并且近 10 年平均碳储量快速提升。

1980—2020 年南太行地区景观格局总体上趋于分散破碎，破碎化区域由东西组团向中部地区持续蔓延，伴随坡度提升景观格局由破碎转为集聚。山前平原地带的耕地和城镇用地斑块与山地陡坡地带的生态林草斑块趋向优势分布和连通集聚，山坡区段的各类景观斑块趋于分散破碎。

南太行碳储量与综合景观格局指数的耦合协调度总体稳定在中高水平，二者紧密依存，在东部组团表现为景观格局破碎分散和碳储量中高的非协调性，在北部和东南部地区表现为共同小幅度增降的协同性。耦合协调度受到自然与社会因子的交互作用，城镇人口分布和社会建设发展对二者的关系产生重要影响。

未来研究可以增加生境质量、水土保持、水源涵养等多项生态系统服务指标的地形梯度分析，扩展景观格局指数类型，从而分析多个系统之间的耦合协调度变化水平，并引入更多自然、社会、经济等面板数据深入探究耦合协调度的影响因素，从而提升南太行生态系统服务能力与景观资源配置，为地区土地资源利用、生态保护与景观格局优化提供理论依据。

参考文献

[1]张子灿,张争光,李翅.高碳汇导向的绿色空间规划格局研究:以娄底市为例[J].建筑创作,2022(4):170-176.

[2]赵凯茜,李翅.能值分析方法在社区环境可持续发展评估中的应用[J].国际城市规划,2023,38(5):74-82.

[3]张禹森,董春.InVEST 模型的藏东南地区 1990—2020 年碳储量时空格局及演化研究[J].测绘科学,2023,48(8):153-162.

[4]赵双红,周冬梅,王得梅,等.基于 PLUS-InVEST 模型的渭河流域生态系统碳储量评估及多情景预测[J].应用生态学报,2024,35(8):2044-2054.

[5]许澳康,胡梦珺,石晶,等.石羊河流域生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J].中国环境科学,2024,44(6):3365-3375.

[6]TANG Z L, WANG Y T, FU M, et al. The role of land use landscape patterns in the carbon emission reduction: Empirical evidence from China [J]. Ecological Indicators, 2023, 156: 111176.

[7]高梦瑶,李翅.黄河下游城市区域绿色空间时空演变的规律与机制[J].北京林业大学学报,2023,45(3):113-126.

[8]LI X H, JIANG Y F, LIU Y Q, et al. The impact of landscape spatial morphology on green carbon sink in the urban riverfront area[J].Cities,2024,148:104919.

[9]朱诗柔,牟凤云,黄淇,等.2000—2030 年多级流域尺度下重庆市林地景观格局碳储量变化[J].水土保持通报,2024,44(3):356-366.

[10]张斌,夏秋月.武汉城市圈碳储量的地形梯度效应及脆弱性[J].水土保持研究,2023,30(5):443-452.

[11]王成武,罗俊杰,唐鸿湖.基于 InVEST 模型的太行山沿线地

区生态系统碳储量时空分异驱动力分析[J].生态环境学报,2023,32(2):215-225.

[12]周红韵,叶润成,韩会庆,等.山地城市土地利用变化对碳储量影响的情景模拟:以贵阳市为例[J/OL].华北水利水电大学学报(自然科学版)[2024-09-19].https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=HBSL20240424001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[13]冯一凡,冯君明,李翅.生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展[J].生态学报,2023,43(14):5648-5661.

[14]YUAN YY,TANG S Q,ZHANG J Q,et al.Quantifying the relationship between urban blue-green landscape spatial pattern and carbon sequestration:a case study of Nanjing's central city[J].Ecological Indicators,2023,154:110483.

[15]ZHANG H Y,LI X,LUO Y P,et al.Spatial heterogeneity and driving mechanisms of carbon storage in the urban agglomeration within complex terrain:Multi-scale analyses under localized SSP-RCP narratives[J].Sustainable Cities and Society,2024,109:105520.

[16]LIU S J,WANG Z J,WU W,et al.Effects of landscape pattern change on ecosystem services and its interactions in karst cities:a case study of Guiyang City in China[J].Ecological Indicators,2022,145:109646.

[17]冯君明,冯一凡,李翅,等.河势特征分界下的黄河滩区周边城镇生境质量与景观格局演变[J].生态学报,2023,43(16):6798-6809.

[18]杨婉清,杨鹏,孙晓,等.北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响[J].生态学报,2022,42(16):6487-6498.

[19]陈明,李若雯.县域绿色空间景观格局对碳汇的影响:以长三角为例[J].中国园林,2024,40(8):111-117.

[20]赵华,徐嘉兴,裴基龙,等.土地复垦区生态系统服务与景观格局耦合协调关系研究:以徐州潘安湖复垦区为例[J].生态经济,2022,38(10):221-227.

[21]秦耀伟,闫语,东嘉琪,等.燕山-太行山固碳量及经济生态指数分析[J/OL].环境科学[2024-09-19].https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202406146.

[22]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.

[23]李诗尧,李翅.南太行城镇群绿色空间时空演变与驱动因素分析[J].中国城市林业,2024,22(6):108-115.

[24]布仁仓,胡远满,常禹,等.景观指数之间的相关分析[J].生态学报,2005,25(10):2764-2775.

[25]汪伦焰,蒋赞美,李慧敏,等.河南省城市化与生态环境耦合协调状态的时空格局[J].水土保持通报,2021,41(5):311-318.

[26]SONG Y Z,WANG J F,GE Y,et al.An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis:cases with different types of spatial data[J].GIScience & Remote Sensing,2020,57(5):593-610.