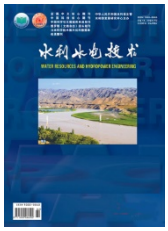


水利水电技术(中英文)
Water Resources and Hydropower Engineering
ISSN 1000-0860,CN 10-1746/TV

《水利水电技术(中英文)》网络首发论文

题目：破碎化背景下滹沱河流域碳储量与生境质量的时空演变特征及交互效应

作者：周正，刘哲，赵进勇，赵录杰，任志雄，丁洋，于子铖，耿少笛

收稿日期：2025-07-08
网络首发日期：2025-09-22
引用格式：周正，刘哲，赵进勇，赵录杰，任志雄，丁洋，于子铖，耿少笛．破碎化背景下滹沱河流域碳储量与生境质量的时空演变特征及交互效应[J/OL]．水利水电技术(中英文). https://link.cnki.net/urlid/10.1746.tv.20250919.1624.002

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2025-09-22 18:37:38　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/10.1746.tv.20250919.1624.002

破碎化背景下滹沱河流域碳储量与生境质量的时空演变特征及交互效应

周　正[1, 2]，刘　哲[3]，赵进勇[4]，赵录杰[3]，任志雄[3]，丁　洋[4]，于子铖[1, 2]，耿少笛[3]

（1. 河北工程大学 河北省智慧水利重点实验室，河北 邯郸　056038；2. 河北工程大学水利水电学院，河北 邯郸　056038；3. 河北省水利工程局集团有限公司，河北 石家庄　050000；4. 中国水利水电科学研究院，北京　100038）

摘　要：【目的】明晰生态用地破碎化背景下碳储量与生境质量的时空演变特征及交互效应对区域生态系统保护与管理具有重要意义。【方法】以滹沱河流域为研究对象，借助土地利用动态率、土地利用转移矩阵、综合景观破碎化指数，InVEST 模型、FRAGSTATS 4.2 软件及地理与时间加权回归（GTWR）模型等，定量分析生境质量与碳储量的时空演变特征，并探讨分析与生态土地综合景观破碎化的相关性。【结果】研究表明：（1）2000-2020 年，流域生态用地面积呈缩减趋势，生态用地综合景观破碎指数均值波动上升。（2）滹沱河流域生境质量呈下降趋势，从 2000 年的 0.42 下降到 2020 年的 0.38。生境质量较优区域主要集中在研究区的中部、西北边缘以及东南部。（3）滹沱河流域的碳储量呈现出逐渐下降的态势，从 2000 年的 320.23×10^6t 降至 2020 的 313.81×10^6t。（4）生态用地景观破碎化对生境质量与碳储量存在负效应影响，流域生境质量与碳储量相互作用具区域差异，总体正向关联但作用强度与格局分异。【结论】研究结果可为相似流域的生态土地保护、生境质量改善和生态系统恢复提供理论指导。

关键词：破碎化；生境质量；碳储量；GTWR 模型；影响因素

中图分类号：P333;X171.1　**文献标志码：A**

Spatiotemporal evolution characteristics and interaction effects of carbon storage and habitat quality in Hutuo River Basin under fragmentation

ZHOU Zheng[1,2]，LIU Zhe[3]，ZHAO Jinyong[4]，ZHAO Lujie[3]，REN Zhixiong[3]，DING Yang[4]，YU Zicheng[1,2]，GENG Shaodi[3]

(1.Key Laboratory of Intelligent Water Resources of Hebei Province，Hebei University of Engineering，Handan 056038，Hebei，China；2. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power，Hebei University of Engineering，Handan　056038，Hebei，China；3. Hebei Provincial Water Conservancy Engineering Bureau Group，Shijiazhuang　050000，Hebei，China；4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research，Beijing　100038，China)

Abstract：[Objective] Clarifying the spatiotemporal evolution characteristics of carbon storage and habitat quality in the context of ecological land fragmentation, as well as their interaction effects, is crucial for regional ecosystem protection and management. **[Methods]** Taking the Hutuo River Basin as the research object, the spatiotemporal evolution characteristics of habitat quality and

收稿日期：2025-07-08；**修回日期：**2025-08-25；**录用日期：**2025-08-27

基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFC321090004)；河北省自然科学基金项目(E2024402110)；河北省水利科技计划项目(2023-85)；河北工程大学创新基金项目(SJ2401002103)

作者简介：周正（2001—），男，硕士研究生，主要从事生态水工学的相关研究。E-mail：2410336486@qq.com

通信作者：于子铖（1993—），男，讲师，博士，主要从事河湖生态保护与修复、生态水工学等方面的研究。E-mail：yuzicheng@hebeu.edu.cn

carbon storage were quantitatively analyzed and their correlation with the comprehensive landscape fragmentation index of ecological land was explored by using the land use dynamic rate, land use transfer matrix, comprehensive landscape fragmentation index, InVEST model, FRAGSTATS 4.2 software, and geographically and temporally weighted regression (GTWR) model. **[Results]** The results showed that: (1) from 2000 to 2020, the area of ecological land in the river basin showed a decreasing trend, while the mean value of the comprehensive landscape fragmentation index for ecological land increased with fluctuations. (2) The habitat quality in the Hutuo River Basin exhibited a declining trend, dropping from 0.42 in 2000 to 0.38 in 2020. Regions with relatively high habitat quality were mainly concentrated in the central part, northwestern edge, and southeastern part of the study area. (3) Carbon storage in the Hutuo River Basin showed a gradual decreasing trend, falling from 320.23×10^6 t in 2000 to 313.81×10^6 t in 2020. (4) The fragmentation of ecological land had a negative effect on both habitat quality and carbon storage. The interaction between habitat quality and carbon storage exhibited significant regional differences, with an overall positive correlation but variations in the intensity and pattern of the interaction. [Conclusion] The findings can provide theoretical guidance for ecological land protection, habitat quality improvement, and ecosystem restoration in similar river basins.
Keywords：fragmentation；habitat quality；carbon storage；GTWR model；influencing factors

0 引　言

生态用地动态演化及结构特征受自然与人类活动双重约束，人类驱动的土地利用和土地覆盖（Land Use and Land Cover, LULC）变化是生态系统服务功能衰减的核心因素[1]。近几十年，经济社会发展与人类活动增强导致大量生态用地被挤占，城市化、工业化及农业现代化重塑土地利用格局，引发生态用地萎缩化、破碎化等结构性退化[2]。生态系统服务是特定景观格局与栖息地物质能量循环耦合的产物，生态用地破碎化通过改变景观格局影响栖息地支撑的生态系统服务[3]。区域尺度解析生态过程存在异质性，流域尺度生态与非生态用地的频繁转化扰动生态系统结构与功能，而破碎化背景下生态系统服务的动态变化特征仍需深化研究[4]。

在生态系统指标体系中，产水量、土壤保持、碳储量与生境质量是四大核心要素。已有研究表明[5]，产水量与土壤保持的变化显著受制于降水量等气候因子；而生态用地破碎化对生态系统的影响呈现显著差异——对土地利用敏感型生态系统存在线性与非线性的复杂作用，对气候因子敏感型系统的影响则相对微弱。就滹沱河流域而言，作为北方重要的生态廊道，近年来受城镇化扩张、农业开发等人类活动影响，生态用地破碎化问题日益突出，直接威胁到区域生物多样性维持与固碳功能稳定。已有研究证实，流域生境的破坏会直接影响当地生物多样性，而该流域在“双碳”目标推进与滹沱河生态修复工程规划实施的双重背景下，对生境质量改善和固碳能力提升有着更为迫切的现实需求。而生态用地破碎化作为人为干扰主导的景观过程，其对土地利用敏感型的碳储量与生境质量的作用更为显著且复杂，这正是当前流域生态修复中需要重点厘清的关键科学问题。基于此，本研究聚焦碳储量与生境质量展开深入探讨。生态用地作为维系二者功能的核心空间载体，其破碎化过程及形式直接影响“双碳”目标实现与生物多样性恢复。

近年来，模型软件在生态系统服务评估与研究中的作用日益重要。其中，InVEST 模型，作为一种广泛应用的生态系统服务评估工具，能够实现区域及全球范围内生态系统各要素的综合评估，为相关政策的制定提供科学依据[6]。InVEST 模型因其简便的技术特点而受到广泛青睐，尤其在栖息地质量评估和生态系统碳储存方面表现突出。目前，许多学者已采用先

进的模型对不同尺度的生境质量与碳储量进行研究，涉及的研究范围包括不同行政尺度、特定区域及流域等。例如，JIANG 等[7]以广西北部湾经济区为研究案例，结合土地利用及碳密度数据，运用 PLUS 与 InVEST 模型分析了 1980 至 2020 年间土地利用变化格局，并模拟了 2030 年三种不同情景下的土地利用空间格局、未来碳储量及其时空变化特征。探讨 1990-2050 年鄱阳湖流域土地利用和生境质量的时空变化趋势。TIAN 等[8]利用 1990-2020 年的土地利用、环境和社会经济数据，校准系统动力学和 PLUS 模型,预测到 2050 年的土地利用模式。基于历史和预测土地利用数据，利用 InVEST 模型评估栖息地质量。然而，现有研究多局限于生境质量等单一生态系统服务要素的时空动态解析，本研究创新性地构建“生态用地破碎化-生境质量-碳储量”协同分析框架，突破传统单一要素研究的认知局限[9]，实现对流域生态系统服务耦合机制的多维度解析。通过量化生态用地破碎化对生态系统服务的差异化影响效应，为流域生态系统服务精准提升与差异化管理提供方法论创新，为流域水利高质量发展提供方向。

基于上述背景与生态用地破碎化机理，本文以滹沱河流域为研究区，综合运用土地利用动态率、土地利用转移矩阵、综合景观破碎化指数、InVEST 模型、FRAGSTATS 4.2 软件及 GTWR 模型等多元方法与工具，实现了对生境质量与碳储量时空演变特征的定量解析，以及二者与生态用地综合景观破碎化相关性的深度探究（见图 1）。本研究将生态用地景观破碎化、生境质量与碳储量纳入统一分析框架，系统阐释了在人类活动强干扰背景下三者间的相互作用关系及时空演变规律，突破了单一要素研究的局限，为理解区域生态系统变化提供了更为全面的视角。

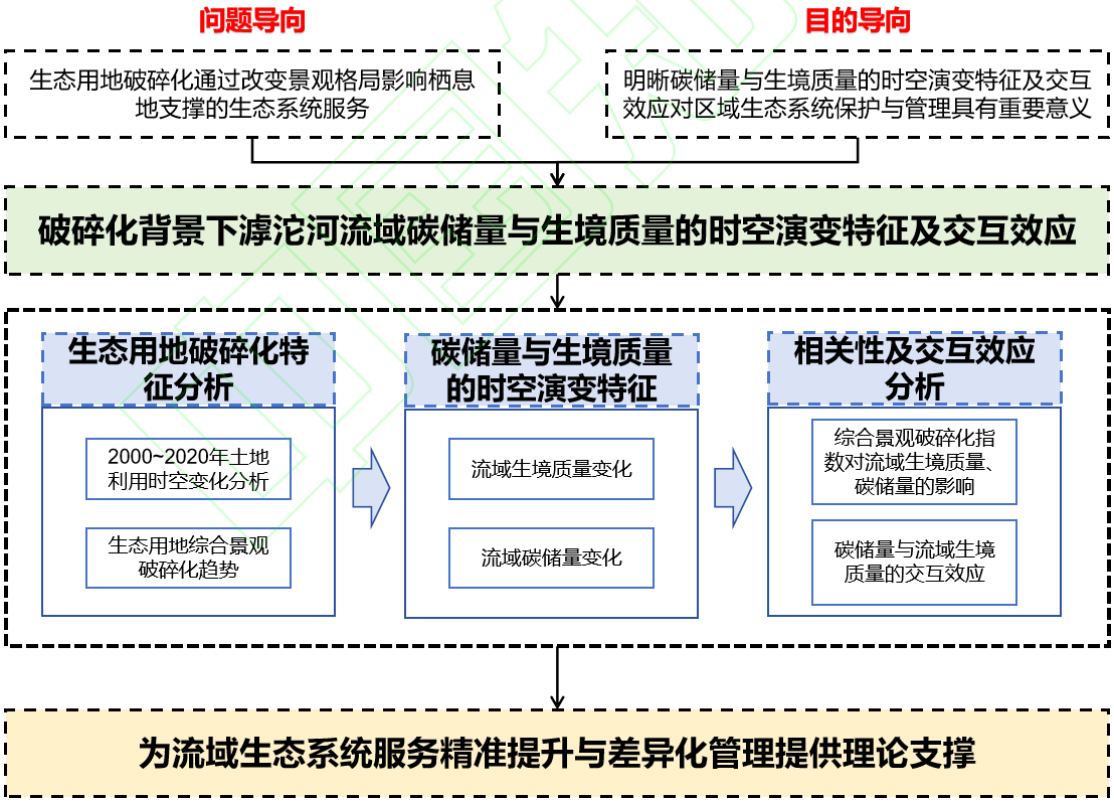


图 1　技术路线

Fig.1　Technical roadmap

1　研究区域与方法

1.1　研究区域

滹沱河流域（113.83° E—116.09° E、38.20° N—39.28° N）跨晋冀（见图 2），冀内自平山经黄壁庄水库至献县，为晋冀关键自然廊道，不仅是河北石家庄市与山西忻州市的“母亲河”，更在维系区域生态安全中占据不可替代的地位，同时也是山西与河北两省水鸟迁徙的重要“中转站”。流域属典型季节性河流，水文季节动态显著：6—9 月降水占全年 70%以上，河川径流量占比 65%~80%，形成汛期；11 月至次年 5 月径流量锐减，河道干湿交替致沿岸湿地“淹没—裸露”周期性变化，影响生态用地稳定性及物质能量循环。流域含晋冀 18 区县，哺育沿岸约 646 万人口，城镇化率 58.7%，GDP 约 8600 亿元。作为跨省生态屏障，其生态状况关乎晋冀生态安全与“双碳”目标，在区域可持续发展中地位关键。

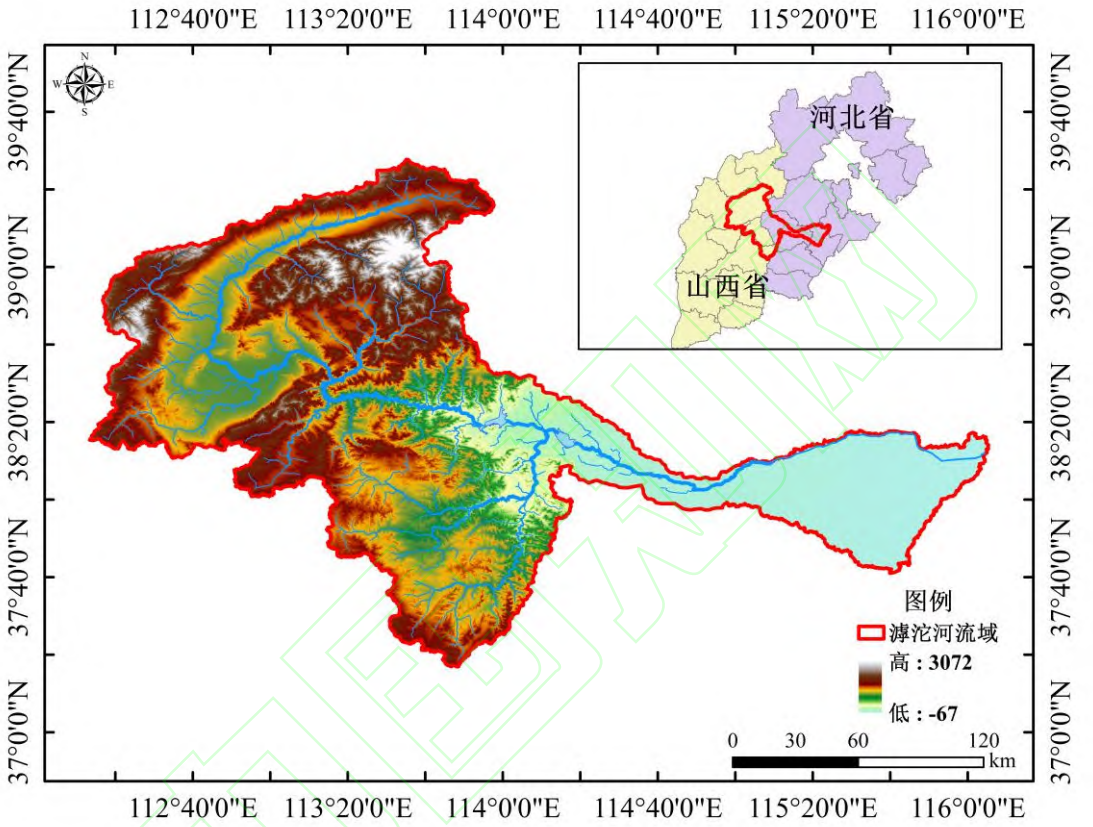


图 2　研究区域

Fig.2　Study area

1.2 数据收集

在本研究中，采取滹沱河流域 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 5 期 LULC 数据（空间分辨率为 30m），数据来源于地球资源数据云平台，根据中国遥感监测的 LULC 分类方案和研究区域的实际情况[10]，分为水、林地、农田、草地、未利用地和建设用地 6 种地类。目前，土地利用分类系统不包括明确的生态用地类别，根据以往的研究，本研究将林地、草地和水体划分为生态用地[11]。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态率

为了定量描述特定时间范围内某个/集成 LULC 类别中数量变化的程度和速度，引入了一个特定 LULC 类别的动态速率和整个 LULC 的年动态率[12]。给出了两个指标的公式，具体为

$$LC = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

$$LCG=\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta LU_{i-j}}{2\sum_{i=1}^{n}LU_i}\right)\times\frac{1}{T}\times 100\% \quad (2)$$

式中，*LC* 表示一个特定 LULC 类别的动态速率；U_a 和 U_b 分别表示一个特定 LULC 类别在初始和终末阶段的面积；*LCG* 是指集成 LULC 的动态速率；U_i 表示开始时 LULC 的区域；$\Delta U_{i\text{-}j}$ 指 LULC 在研究阶段转换为其他类别的领域的绝对值；*T* 代表研究期的持续时间，如果 *T* 以年表示，则 *LC* 和 *LCG* 分别指一个特定 LULC 类别和整个 LULC 的年动态率。

1.3.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵指在特定时间范围内，统计不同土地利用类型研究初期和末期之间相互转化的动态信息可以清晰地描述出各土地利用类型在空间上的分布和各时期的转移方向及数量，是研究土地利用动态特征的重要方法[13]。其模型为

$$S=\begin{bmatrix}\mathbf{S_{11}} & \cdots & \mathbf{S_{1n}}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \mathbf{S_{n1}} & \cdots & \mathbf{S_{nn}}\end{bmatrix} \quad (3)$$

式中，*n* 为土地利用类型数；S_{ij} 为从研究初期到末期第 i 类土地利用类型转化为第 j 类土地利用类型的面积。

1.3.3 综合景观破碎指数

景观结构组成的空间变化和特性反映在这些景观指数中[14-15]。在景观层面，根据以下两个原则选择指数：（1）应尽可能全面地纳入景观指数的类型和信息；（2）避免高度相关的指数。综合考虑景观斑块的规模、形状和数量，以及多样性和分散性，选择了景观形状指数（LSI）、香农多样性指数（SHDI）、景观划分指数（DIVISION）、分散指数（SPLIT）、聚集度指数（AI）、斑块密度指数（PD）7 个指数（见表 1）。本研究首先对刻画景观破碎化空间格局的各项参数进行归一化处理，以消除不同参数间的量纲差异。鉴于当前相关研究中尚未形成关于各指数权重分配的共识性结论，故采用等权重相加的方式将上述参数整合为一个能够揭示景观破碎化程度的综合指标。上述景观指数是使用 FRAGSTATS 4.2 软件计算。综合考量研究区面积规模、计算可行性及样本量充足性等关键因素，通过多方案网格构建实验的对比分析，最终选取 5km×5km 的网格尺度作为评价单元。该尺度不仅能够保障计算软件的顺畅运行，亦能确保样本量的统计有效性，据此共划分形成 1299 个评价单元。

表 1　选择景观指数概述

Table 1　Overview of selected landscape indices

类别	描述	公式
景观形状指数（*LSI*）	值越高形状越复杂	景观中所有斑块边界的总长度除以总面积的平方根。
景观划分指数（*DIVISION*）	它是两个随机选择的像素不在同一色块的概率	$DIVISION=\frac{\text{平均相邻斑块距离}}{\text{平均斑块大小}}$
香农多样性指数（*SHDI*）	描述了景观多样性。值越大景观的板块类型就越多样化。	$SHDI=-\sum_{i=1}^{s}PiLn(Pi)$
分散指数（*SPLIT*）	用于描述景观中斑块或区域的空间分散程度。	$SPLIT=\frac{\text{平均斑块中心点距离}}{\text{整个景观的平均距离}}$
平均欧氏最近邻指数（*ENN*）	是衡量同类型斑块间空间隔离程度的核心指标。值越大，隔离程度越高，潜在的功能连通性。	计算的是同一斑块类型中，每个斑块与其最近邻的同类型斑块之间的欧氏直线距离。

聚集度指数（*AI*）	是用于衡量景观斑块聚集程度的重要指标，数值范围为 0 到 100，值越小表示景观越离散，值越大则表示聚集度越高。	$\frac{\text{公共边界长度}}{\text{总面积}}$
斑块密度指数（*PD*）	它表示单位面积内斑块的数量，反映了景观被分割的程度和破碎化的水平。	$PD=\frac{N}{A}$

1.3.4InVEST 模型计算

InVEST 模型的生境质量模块以土地利用类型数据为基础[16-17]，建立威胁源与生境质量之间的联系，分析栖息地外威胁因素的影响程度和敏感性，从而得出研究区域内生境质量的分布特征。

InVEST 模型将生态系统的碳储量划分为 4 个基本碳库：地上生物碳、地下生物碳、土碳、死亡有机碳，计算其碳储量。

碳库数据优先参考已有文献[18-21]及 2010s 中国陆地生态系统碳密度实测数据集[22]，其包含了地上生物量碳密度、地下生物量碳密度和不同深度(0~20 和 0~100cm)土壤有机碳密度。通过对研究区年均降水和年均气温进行修正,得到河北省的碳密度数据，采用的碳密度值如表 2 所列。参照参考 InVEST 模型使用手册和河北省与山西省相似地区的研究[23-24]，选取三种威胁因子、确定了威胁权重、空间衰减类型、各土地类型对威胁源的敏感度和各土地利用类型的生境适宜度（见表 2 与表 3）。

表 2　滹沱河流域不同土地利用类型碳密度数值　　t·hm^{-2}

Table 2　Carbon density values of different land use types in Hutuo River Basin

t·hm^{-2}

lucode	LUL_name	C_above	C_below	C_soil	C_dead
1	耕地	4.12	0.41	111.78	1.24
2	林地	34.67	12.58	125.50	1.90
3	草地	0.92	8.89	70.61	0.10
4	水域	0.00	10.80	8.55	0.00
5	建设用地	7.61	6.16	28.52	0.00
6	未利用地	9.10	1.62	33.74	0.00

表 3　不同生境适宜度及其对不同威胁因子的敏感程度

Table 3　Different habitat suitability and its sensitivity to different threat factors

土地利用类型	生境适宜度	耕地	建设用地	未利用地	最大威胁距离	权重	衰减线性相关性
耕地	0.40	0.3	0.70	0.30	3.00	0.60	线性
林地	1.00	0.7	0.70	0.80	-	-	-
草地	0.75	0.5	0.80	0.30	-	-	-
水域	0.90	0.75	0.65	0.40	-	-	-
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	1.00	指数
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	6.00	0.30	线性

1.3.5 回归模型

受滞后效应影响，景观破碎化的动态变化未必会对栖息地质量与碳储量产生即时性作用。因此，构建包含多个时间序列的面板数据以表征栖息地质量、碳储量及景观破碎化的变化过程，成为解析其关联机制的必要前提。相较于传统的普通最小二乘（OLS）模型与地理加权回归（GWR）模型，地理时空加权回归（GTWR）模型能够同时整合空间异质性与时间动态特征，更精准地揭示变量间的复杂关联。基于此，本研究采用 GTWR 模型，旨在探究综合景观破碎化对栖息地质量与碳储量的影响效应。它的方程为

$$Y_m = \beta_0(u_i、v_i、t_i) + \sum_{k=1}^{m} \beta_k(u_i、v_i、t_i)x_{ik} + \varepsilon \quad （4）$$

式中，Y_m 表示因变量；m 是指样本数；u_i 和 v_i 和 t_i 分别指经度、纬度和时间；（u_i、v_i、t_i）表示具有空间坐标和时间节点的采样点 i；β_0（u_i、v_i、t_i）表示截距值；x_i 表示解释变量；β_k（u_i、v_i、t_i）是指 k^{th} 采样点 i 处的变量；ε 表示随机误差项。

2 结果分析

2.1 2000—2020 年土地利用时空变化分析

2.1.1 时间尺度

滹沱河流域在 2000 年至 2020 年期间土地利用结构整体较为稳定，主要以草地和森林为主。具体而言，2000 年至 2020 年，耕地面积总体呈下降趋势，而建设用地则呈现上升趋势。在非生态用地方面，滹沱河流域在 2005 年至 2010 年期间动态变化率较高，建设用地增长率为 6.66%，而耕地面积减少率为 0.71%（见表 4）。在生态用地方面，森林面积变化较小，基本保持稳定。水域面积则受人类活动与气候变化的双重影响，呈现动态波动趋势。草地面积逐年减少，其中 2015 年至 2020 年期间的动态变化率较为显著，降幅达到 0.74%。

表 4　2000—2020 年期间研究区域不同土地利用类型动态率　%

Table 4　Dynamic rates of different land use types in the study area (2000—2020)　%

土地利用类型	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020	2000—2020
耕地	-0.13	-0.71	-0.25	-0.20	-0.32
林地	0.02	-0.02	-0.06	0.06	0.00
草地	-0.03	-0.05	-0.05	-0.74	-0.22
水域	0.19	-3.33	0.73	-0.80	-0.81
建设用地	1.05	6.66	1.50	4.09	4.08
未利用地	-2.22	-18.40	428.90	12.44	7.96

综上所述，滹沱河流域整体生态用地面积呈下降趋势。具体而言，2000 年至 2020 年期间，草地和水域面积分别减少，动态变化率为-0.22%和-0.81%，而森林面积基本保持稳定。耕地面积有所减少，动态变化率为 0.32%；与此同时，建设用地和未利用地面积有所增加，动态变化率分别为 4.08%和 7.96%。此外，2000 年至 2020 年各个五年周期的综合土地利用动态变化率分别为 0.30%、1.73%、0.64%和 1.64%，其变化幅度相对较小，表明研究区土地利用在此期间经历了较为平稳的转变。

2.1.2 空间尺度

滹沱河流域土地利用类型空间变化可划分为两个关键阶段：2000—2010 年，变化集中于东部平原，以非生态用地间相互转化为特征；2010—2020 年，变化范围扩展至全流域（尤以南部显著），主导趋势为生态用地向非生态用地转化（见图 3），反映出不同时段土地利用结构的逐步调整与空间分布的扩展（见图 4）。2000—2020 年，耕地转出面积占比最大，

其中 950.28km^2 转化为建设用地，占耕地总流出面积的 81.22%；另有 85.73km^2 林地、273.25km^2 草地及 0.16km^2 水域转为建设用地，共同推动建设用地持续扩张。流域山区段的生态用地向非生态用地转换，已对生境质量与碳储量产生不利影响。

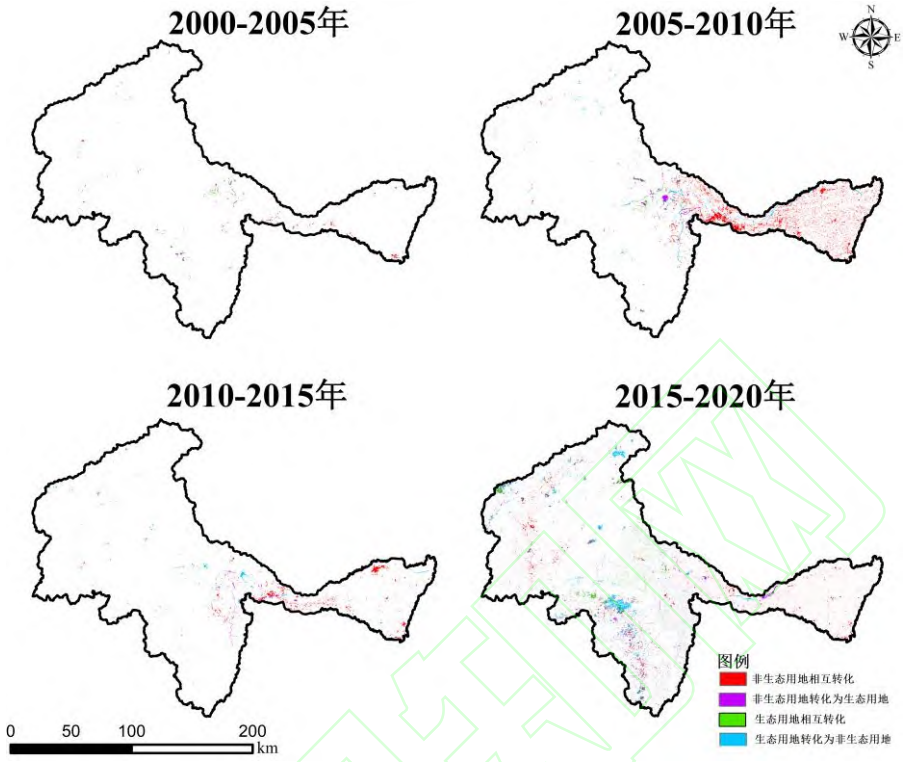


图 3　2000—2020 年滹沱河流域生态用地变化空间分布

Fig.3　Spatial distribution of ecological land changes in Hutuo River Basin (2000—2020)

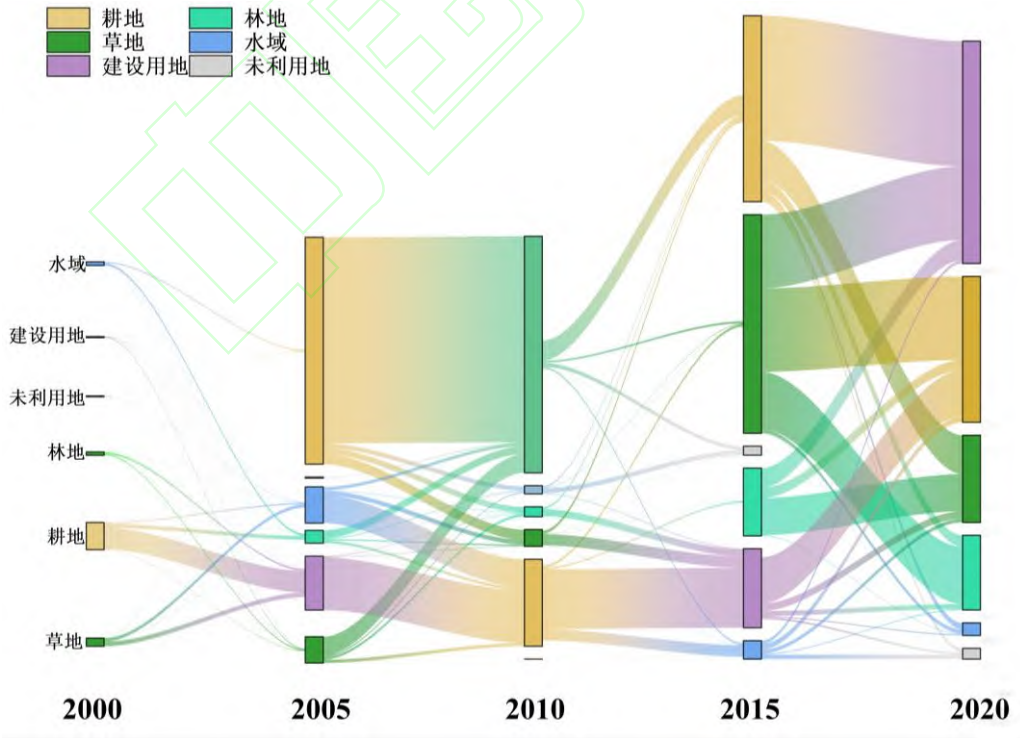


图 4　2000—2020 年滹沱河流域土地利用变化桑基图

Fig.4　Sankey diagram of land use changes in Hutuo River Basin (2000—2020)

2.2 生态用地综合景观破碎化趋势

生态用地综合景观破碎指数变化呈现三阶段特征：2000—2010 年均值从 1.83 降至 1.74；2010—2015 年升至 1.82；2020 年达峰值 1.86，整体呈波动上升趋势，表明研究区生态用地破碎化程度持续加剧。2000—2020 年期间，生态用地综合景观破碎化在空间维度呈现不同的变化。滹沱河流域山区段作为高值区域的集聚区，充分凸显了其区域复杂的景观异质性特征。具体而言，生态用地综合破碎化指数的最高值与较高值主要集中分布于流域山区的西北部与东南部，这一空间格局的形成与非生态用地的扩张密切相关，非生态用地的不断蔓延对生态用地区域形成持续分割，致使该区域破碎化程度加剧（见图 5）。2010—2020 年，山区生态用地破碎化态势加剧，与流域西南地区生态用地向非生态用地转化增强的趋势相吻合；流域东部土地利用类型以非生态用地为主，其生态用地破碎化指数持续处于最低水平，反映出研究区生态用地景观破碎化空间分布的离散化特征。

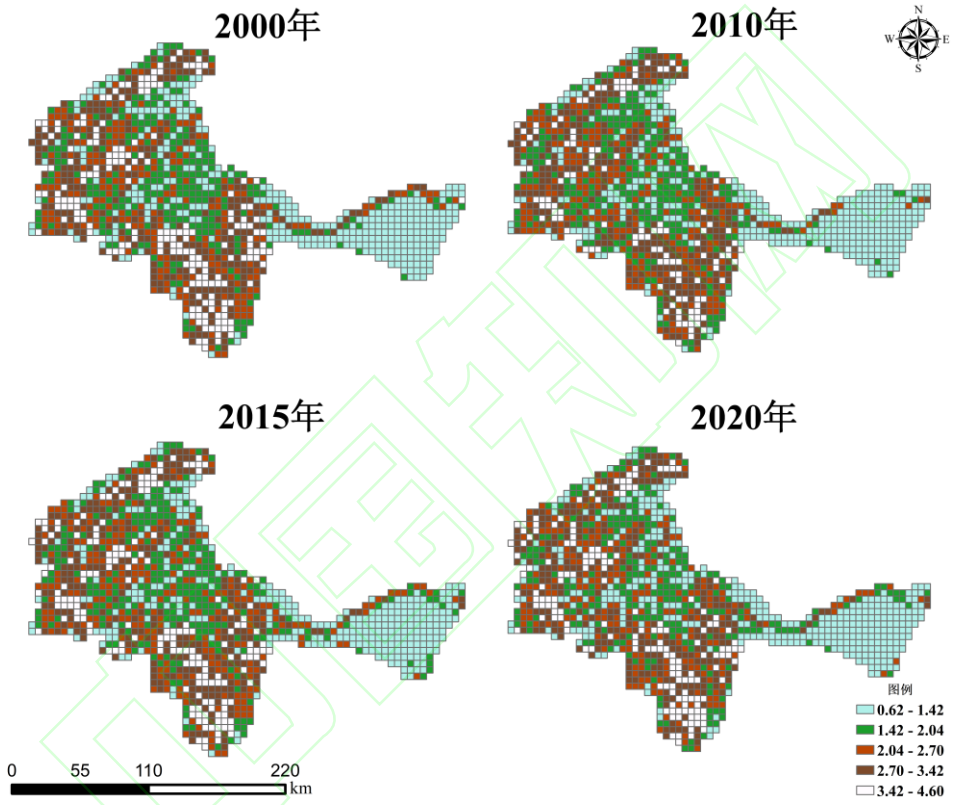


图 5　2000—2020 年滹沱河流域综合景观破碎指数空间分布

Fig.5　Spatial distribution of composite landscape fragmentation index in Hutuo River Basin (2000—2020)

2.3 流域生境质量变化

2000—2020 年，滹沱河流域生境质量呈明显下降趋势：平均生境质量指数从 2000 年的 0.42 逐步降至 2020 年的 0.38，反映流域生态系统质量整体退化。运用 ArcGIS 并参考相关研究，将生境质量划分为 5 级（I：0-0.2，II：0.2-0.4，III：0.4-0.6，IV：0.6-0.8，V：0.8-1）。结果表明，在 2000 年至 2020 年间，滹沱河流域的生境质量主要集中在II级，但这一等级的面积经历了先减少后增加的变化趋势，最终整体增加了 221.68km^2。相对而言，生境质量为V级的区域面积持续减少，而I级区域的面积则呈现出不断扩大的趋势，这表明高质量生境和低质量生境之间的空间分布发生了反向变化。滹沱河流域生境质量呈下降态势，尤以V级生境持续缩减与I级生境面积扩大为显著特征（见图 6）。结合土地利用类型变化分析可知，生境质量较差的建设用地面积不断增加，这一变化规律与张雪等[9]关于滹沱河历史生境质量呈下降趋势的研究结论一致，印证了滹沱河流域生境质量呈下降趋势。

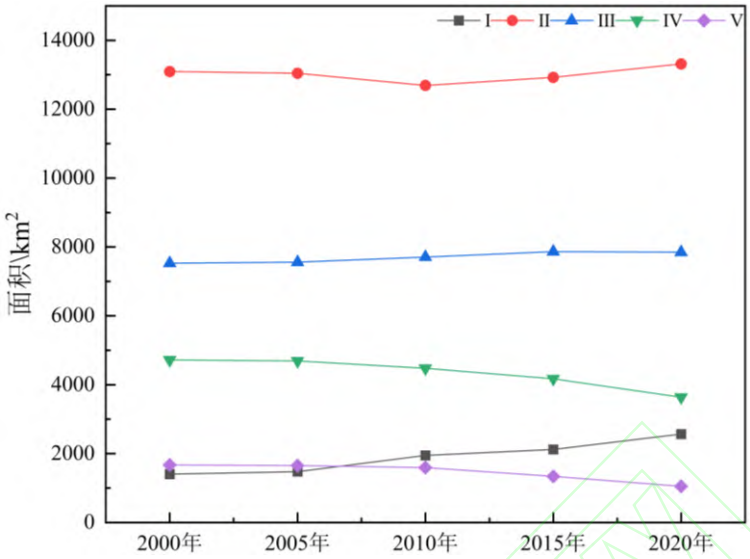


图 6 不同生境质量分区面积变化

Fig.6 Changes in area of different habitat quality zones

空间维度上，研究期间滹沱河流域的低生境质量区域主要分布于流域的东部、西北部和西南部，这些区域大多数被归类为II级生境质量（见图 7）。与此相比，V级和IV级生境质量区域主要集中在研究区的中部、西北边缘以及东南部，其中林地和草地是占主导地位的土地利用类型。2000—2020 年，低质量生境区域持续扩展，逐步侵蚀并分割高质量生境，加剧生境破碎化，这些低质量区域的扩展不仅直接导致了高质量生境区域的减少，还对高质量生境造成了严重的空间分割效应，进而加剧了生境的破碎化现象。其中建设用地周边生境质量下降尤为显著，凸显人类活动的深刻影响。综上，该空间变化趋势凸显生境质量的区域异质性特征，其中高质量生境核心区的保护尤为关键，亟需实施针对性保护措施以遏制滹沱河流域持续退化态势。

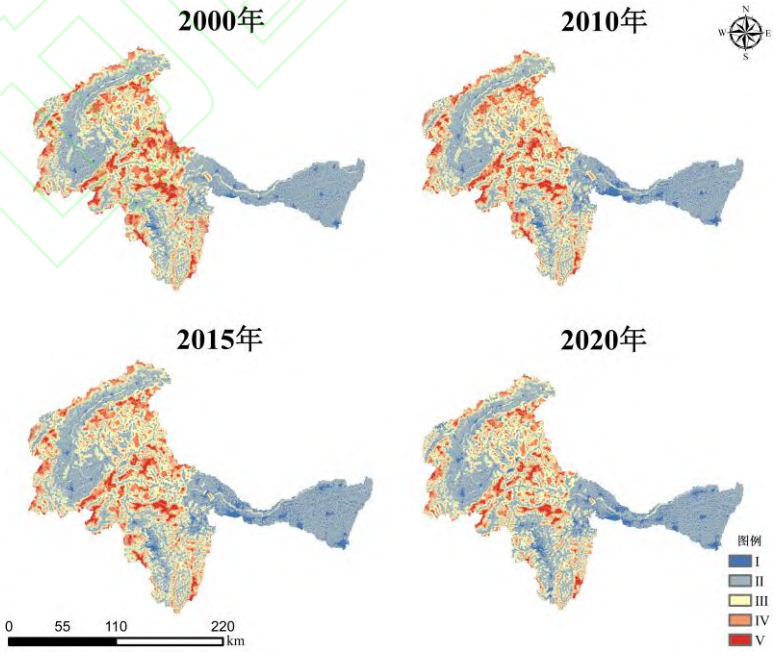


图 7 2000—2020 年滹沱河流域生境质量重要性分区

Fig.7 Zoning of habitat quality importance in Hutuo River Basin (2000-2020)

2.4 流域碳储量

2000—2020 年，滹沱河流域碳储量呈下降趋势，由 2000 年的 320.23×10^{6}t 降至 2020 年的 313.81×10^{6}t，其间各年份依次为 2005 年 319.74×10^{6}t、2010 年 316.84×10^{6}t、2015 年 315.54×10^{6}t。基于 ArcGIS 及自然间断点分级法，流域碳储量被划分为五级：I级（0-19.35）、II级（19.35-44.32）、III级（44.32-80.25）、IV级（80.25-117.40）、V级（117.40-174.65）。分析结果表明，2000—2020 年间，滹沱河流域碳储量主要集中在III级和IV级。具体来说，III级和IV级区域的面积均呈现下降趋势，但两者的变化特征存在明显差异。III级区域面积的减少过程相对平稳，而IV级区域面积则变化较为剧烈。与之相比，I级和V级区域的面积基本保持稳定，未出现明显变化；II级区域的面积则呈现持续增加的趋势（见图 8）。总体而言，滹沱河流域的碳储量呈现出逐渐下降的态势，尤其在II、III、IV级区域的面积变化中，可知流域固碳能力逐步退化的趋势。

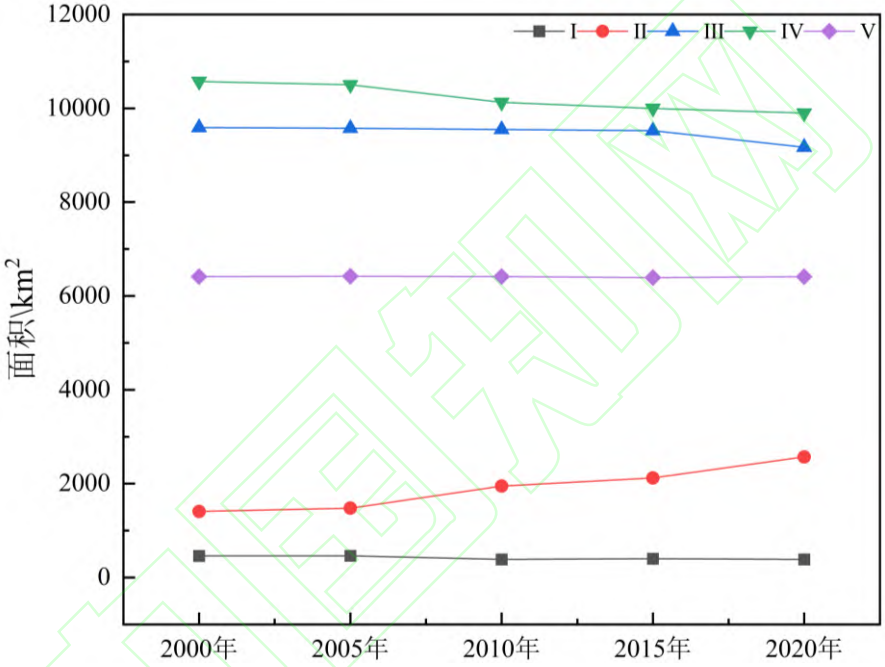


图 8　不同碳储量分区面积

Fig.8　Area of different carbon storage zones

从空间分布来看，V级和III级碳储量区域主要分布在流域的山区，土地利用类型以林地和草地为主（见图 9）。IV级碳储量区域则主要分布在平原和河谷地区，土地利用类型以耕地为主。低碳储量区域主要为建设用地，主要分布在流域平原地区，并随着时间推移不断向外扩展，形成多个聚集点。新增建设用地的主要来源为耕地转化，而耕地的固碳能力显著高于建设用地。这一土地利用类型的转化过程，构成了研究区碳损失的重要驱动因素，进而印证了滹沱河流域碳储量的下降态势。

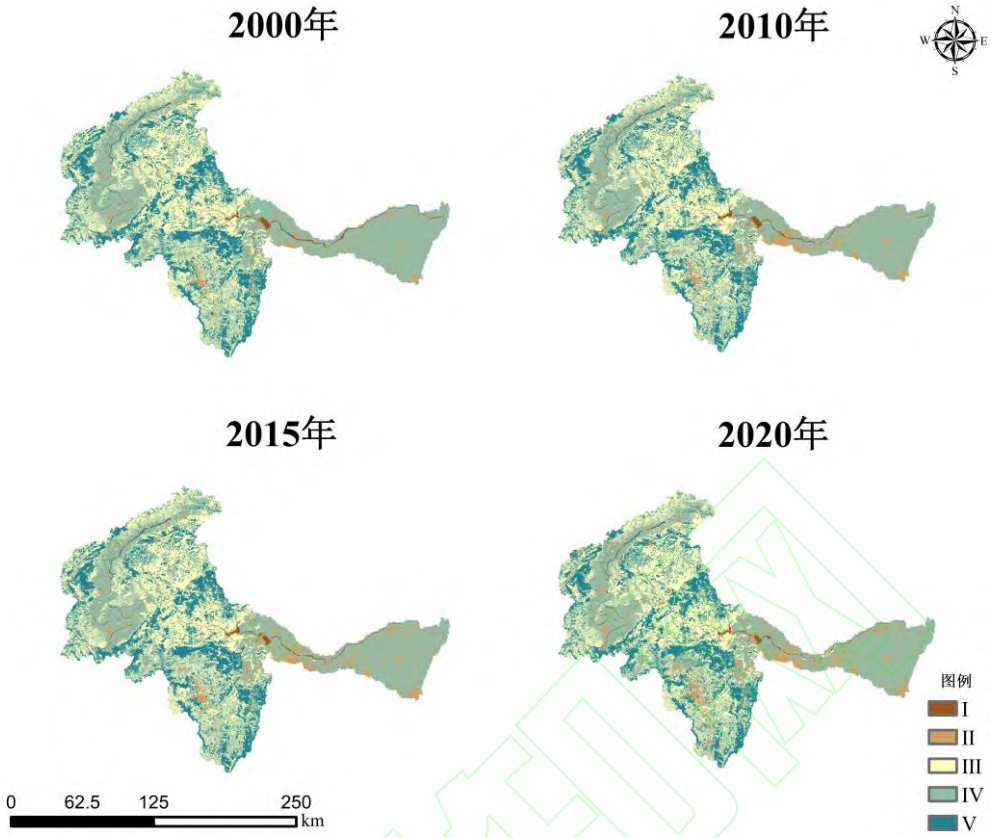
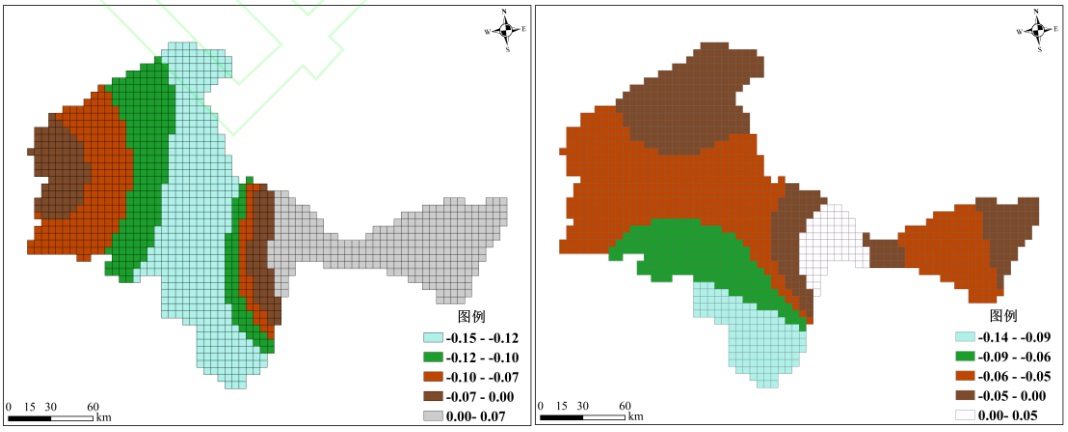


图 9　2000—2020 年滹沱河流域碳储量重要性分区

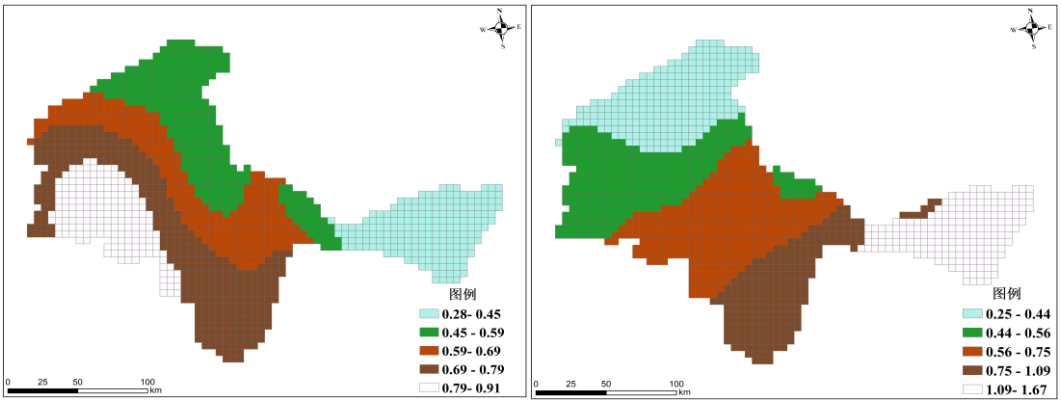
Fig.9　Zoning of carbon storage importance in Hutuo River Basin (2000-2020)

2.5 相关关系分析

本研究基于 5km×5km 网格探讨了流域栖息地质量、碳储量与生态用地综合景观破碎指数之间的关联。确定这些变量的 VIF 指数以防止解释变量之间的多重共线性，结果均小于 10。此外回归结果符合研究规定的标准，如生境质量与破碎化指数的 R^2 和 *AICc* 分别为 0.71 和-11816.70。在本研究中计算了每个解释变量系数的平均值并将其可视化，将 0 设置为区分积极与消极影响的阈值（见图 10）。



（a）综合景观破碎化指数对流域生境质量的影响（b）综合景观破碎化指数对流域碳储量的影响



（c）碳储量对流域生境质量的影响　　（d）生境质量对流域碳储量的影响

图 10　GTWR 模型分析结果图

Fig.10　Results of GTWR model analysis

生态用地景观破碎化对生境质量与碳储量的影响均存在显著空间分异特征，且均表现为消极作用。在生境质量影响维度，研究区山地核心区域形成负相关高值集聚区，影响强度呈中心向周边梯度衰减[25]。大面积连片生态用地构成区域主导土地利用格局，破碎化加剧会破坏生态系统空间结构完整性，削弱核心功能，最终导致生境质量下降。在碳储量影响维度，消极作用的空间梯度表现为自山区南部向北部递减[26]。这一特征源于生态过程的综合作用：尽管耕地等非生态用地具有一定固碳潜力，但在生态用地主导的山区生态系统中，破碎化会干扰森林与草地等生态用地的空间连续性，破坏碳库稳定性，进而可能阻碍碳循环关键环节的有效运行[27]。

流域生境质量与碳储量的相互作用存在显著区域分异，总体呈相互促进的正向关联，但作用强度与空间格局因影响方向和区域而异[28]。碳储量对生境质量的正向效应高值区集中于山区西南，呈西南向东北递减态势，低值区则位于流域平原城市区域；而生境质量对碳储量的正向效应高值区分布于流域平原城市区域，低值区位于山区西北段，整体呈向山区东北方向递增趋势[29]。

3 讨论

探究生态用地破碎化对生态系统服务的复杂影响机制，是当前生态学与景观生态学领域的重要研究课题。本研究通过解析 2000—2020 年间生境质量、碳储量与景观综合破碎化指数的关联性，揭示了三者的动态变化规律。这与相关研究中“20 年间流域生境质量平均值呈下降趋势”的结论相契合[9]。针对后续研究提及的不足，本研究将从土地利用和景观结构对区域生境质量的影响切入，深入探究景观要素的配置、组成及生态用地破碎化与生境质量变化之间的关联及驱动机制，进而开展深化研究与补充工作，同时引入碳储量进行协同分析，并结合研究区域实际情况，因地制宜地提出具有针对性的独特治理措施。值得注意的是，基于广义线性模型（GTWR）的分析结果表明，生态用地破碎化过程对生境质量及碳储量的影响存在非线性特征，这一结论与既往多采用简单线性分析或非定量方法的研究形成鲜明对比，为理解生态用地破碎化的生态效应提供了新的方法论视角。

滹沱河流域因独特的地理位置，形成“城市群发展-山区生态保护”的矛盾格局，其生态用地破碎化及衍生的生境质量与碳储量变化呈现显著异质性特征，治理路径亦具创新性。在破碎化机制与影响特征上，该流域不仅是传统生态用地缩减主导的破碎化模式，更多的是以人为干扰导致山区大面积生态斑块分离为核心驱动，形成特殊的加剧机制[30]。山区段优越的

生态基底本底，使破碎化影响具有更强敏感性，引发的生境质量下降与固碳能力减弱呈现空间异质性——连片生态用地结构完整性存在阈值，破碎化突破临界值后，核心功能削弱呈空间扩散，且流域南部因生态系统脆弱性叠加人为干扰，成为负相关指数最高的敏感区[31]。

针对这些独特特征，在治理方面也需采取差异化策略。在滹沱河流域构建“分级优先+双向协同”的差异化框架。针对破碎化影响高值区，通过“生态保护红线-分级保护区-缓冲区”三级分级体系，该体系需紧密衔接碳储量与生境质量相互作用异质性分区图所揭示的空间关联规律，通过差异化保护策略强化对原生优质生态基底的维护，突破传统单一保护模式；对产生较大隔离的生态用地，通过生态廊道建设修复斑块隔离，基于景观生态学中的“斑块-廊道-基质”理论，优先识别破碎斑块间的关键连接节点，结合碳储量功能强弱与生境连通需求，规划构建“主廊道-次廊道-连接带”三级网络体系，强化空间连通性的靶向修复，效缓解人为干扰导致的斑块分离[32]；针对滹沱河城市集群平原地区的生态修复，采用生态用地斑块镶嵌技术，通过梯度化布局实现生态功能向全域的系统性辐射。并且提出“生态旅游介导的保护-发展耦合”机制：利用流域生态旅游带动经济发展，将旅游收益反哺生态保护，构建“经济收入-生态投入-质量提升”的正向反馈环，破解山区保护与经济发展的二元对立，为流域尺度生态脆弱区的可持续发展提供了创新性范式。

然而本研究仍存一定局限性，需在后续研究中完善：其一，研究区域代表性有限，选取滹沱河流域为研究区虽可为北方类似生态破碎化现象提供参考，但碳储量与生境质量对用地破碎化的响应特征可能因全球不同区域景观格局异质性存在差异[33-34]；其二，尺度效应影响尚未充分厘清，生态过程研究中区域空间尺度与网格单元粒度为关键变量，不同尺度或粒度下结果可能差异显著[35]，故有必要在不同区域、尺度开展多案例比较研究以验证完善结论；其三，研究视角有待拓展，纳入栖息地其他动态变化（如自然区域维护或恢复过程）可更系统解析破碎化综合影响，且未来应将生态用地破碎化程度降低或稳定区域的效应纳入比较分析框架以增强结论全面性；其四，研究方法存在改进空间，采用的广义线性模型（GTWR）难以直接推导出解释变量与因变量响应曲线具体表达式[36-37]，因此开发更精细检验方法以明确栖息地破碎化效应的精确函数形式及关键控制点，将是未来方法学创新的重要方向。

4 结论

为探究滹沱河流域生态用地破碎化背景下生境质量与碳储量的时空演变，本研究基于2000—2020 年土地利用类型，创新性地整合土地利用动态度、土地利用转移矩阵、综合景观破碎化指数及 InVEST 模型，结合 GTWR 模型的定量分析，在方法上形成“格局分析-过程模拟-机制解析”的完整链条，其研究结论如下：

（1）滹沱河流域整体生态用地面积呈下降趋势，流域山区段存在生态用地转换为非生态用地，这些土地变化对流域生境质量与碳储量产生不利影响。基于生态用地综合景观破碎指数计算表明：2000—2020 年该指数均值由 1.83 升至 1.86，揭示研究区生态用地景观破碎化程度持续加剧，该量化分析的价值在于，精准捕捉了破碎化进程的阶段波动性，为解析生态用地动态与生境质量、碳储量的关联提供了关键参数支撑。

（2）基于 InVEST 模型的量化分析显示，2000—2020 年滹沱河流域生境质量呈显著下降趋势，从 0.42 降至 0.38，其中V级生境持续缩减与I级生境面积扩张的关联变化，揭示流域生境质量的退化轨迹。同期流域碳储量亦呈递减态势，固碳总量由 320.23×10^6t 降至 313.81×10^6t，且II、III、IV级固碳区域的面积变化印证了固碳能力的逐步退化。揭示出滹沱河流域历史生境质量与碳储量的变化趋势。

（3）滹沱河流域生态用地破碎化对生境质量、碳储量呈消极影响且空间分异显著：生境质量影响中心向周边衰减，碳储量影响南强北弱。二者总体正向关联，作用强度与格局因方向和区域而异。流域因“发展-保护”矛盾，破碎化以山区斑块分离为核心驱动，南部为敏感

区。治理采用“分级优先+双向协同”框架及生态旅游耦合机制，具创新范式。

参考文献

[1] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献: 在 2025 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 1-12.
LI G Y. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 national water conservancy work conference[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 1-12.
[2] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障[J]. 水利发展研究, 2024, 24(3): 1-3.
LI G Y. Improved water security for China efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(3): 1-3.
[3] 王嘉伟, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 生态输水背景下黑河流域生态系统服务的时空演变特征及驱动力研究[J]. 干旱区地理, 2025, 48(8): 1406-1420.
WANG J W, DONG G T, JIANG X H, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and driving forces of ecosystem services in the Heihe River Basin under the context of ecological water conveyance[J]. Arid Land Geography, 2025, 48(8): 1406-1420.
[4] NASIM N K M, SHARMA A, POONIA M, et al. Assessment of temporal dynamics of land use and landscape fragmentation in the wardha river sub-basin and their potential implications for ecological connectivity and habitat quality[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2025, 53(8): 2465-2480.
[5] LI D H, YANG Y X, XIA F, et al. Exploring the influences of different processes of habitat fragmentation on ecosystem services[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 227: 104544.
[6] 黄贤峰, 杨永菊, 武艺, 等. 1990—2017 年喀斯特自然保护区土地利用变化对生境质量的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 345-351.
HUANG X F, YANG Y J, WU Y, et al. Land use change and its impact on habitat quality in karst nature reserve from 1990 to 2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 345-351.
[7] JIANG H X, CUI Z, FAN T S, et al. Impacts of land use change on carbon storage in the Guangxi Beibu Gulf Economic Zone based on the PLUS-InVEST model[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 6468.
[8] TIAN C, ZHONG J, YOU Q H, et al. Land use modeling and habitat quality assessment under climate scenarios: A case study of the Poyang Lake basin[J]. Ecological Indicators, 2025, 172: 113292.
[9] 张雪, 韦锐, 齐清, 等. SSPs-RCPs 典型情景下滹沱河流域土地利用及生境质量时空演变[J/OL]. 环境科学, 2025: 1-18. (2025-03-10).[10] 李亚敏, 郑丽芝, 李军, 等. 滹沱河生态补水效果及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2024, 43(11): 3423-3432.
LI Y M, ZHENG L Z, LI J, et al. Ecological water replenishment effect in Hutuo River and driving factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(11): 3423-3432.
[11] PU J, SHEN A R, LIU C X, et al. Impacts of ecological land fragmentation on habitat quality in the Taihu Lake basin in Jiangsu Province, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111611.
[12] PENG J, ZHAO M Y, GUO X N, et al. Spatial-temporal dynamics and associated driving forces of urban ecological land: A case study in Shenzhen City, China[J]. Habitat International, 2017, 60: 81-90.
[13] 杨庆骅, 齐子萱, 赵耀, 等. 多尺度景观格局变化对北江流域土壤侵蚀风险的影响分析[J/OL]. 环境科学, 2025: 1-20. (2025-04-02).
[14] 张任菲, 肖萌, 刘志成. 京津冀地区景观破碎化的时空异质性及驱动因素研究[J]. 生态环境学报, 2025, 34(3): 461-473.
ZHANG R F, XIAO M, LIU Z C. Spatio-temporal heterogeneity and driving factors of landscape fragmentation in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(3): 461-473.
[15] LI J J, WANG J X, DU Y Z, et al. Assessing landscape fragmentation and its driving factors in arid regions: A case study of the Manas River, China[J]. Ecological Indicators, 2025, 171: 113253.
[16] 高江波, 左丽媛, 王欢. 喀斯特峰丛洼地生态系统服务空间权衡度及其分异特征[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7829-7839.
GAO J B, ZUO L Y, WANG H. The spatial trade-offs and differentiation characteristics of ecosystem services in karst peak-cluster depression[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7829-7839.
[17] AHMADI MIRGHAED F, SOURI B. Effect of landscape fragmentation on soil quality and ecosystem services in land use and landform types[J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(12): 330.
[18] 张坤, 吴新萍, 刘永强, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的新疆碳储量时空演变与预测[J/OL]. 干旱区研究, 2025: 1-11. (2025-06-30). https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GHQJ20250627005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
ZHANG K, WU X P, LIU Y Q, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Xinjiang using the PLUS-InVEST model[J/OL]. Arid Zone Research, 2025: 1-11. (2025-06-30). https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GHQJ20250627005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
[19] 李瑾璞, 夏少霞, 于秀波, 等. 基于 InVEST 模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 854-861.
LI J P, XIA S X, YU X B, et al. Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem in Hebei Province based on InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(7): 854-861.
[20] 张鹏, 李良涛, 苏玉姣, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的邯郸市碳储量空间分布特征研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 338-348.
ZHANG P, LI L T, SU Y J, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of carbon storage in Handan City based on PLUS and InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 338-348.
[21] 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.
[22] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据, 2019, 4(1): 86-92.
XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s)[J]. China Scientific Data, 2019, 4(1): 86-92.
[23] 刘书雅, 张安兵, 王贺封, 等. 华北平原生境质量与景观格局时空演变及预测[J]. 西北林学院学报, 2025, 40(2): 236-250.
LIU S Y, ZHANG A B, WANG H F, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality and landscape pattern in the North China Plain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2025, 40(2): 236-250.
[24] 田文涛, 都沁军. 基于生态系统服务权衡协同关系的河北省优先优化区域识别[J/OL]. 环境科学, 2025: 1-30. (2025-03-10). https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202411226.
TIAN W T, DU Q J. Priority optimization region identification in Hebei Province based on ecosystem services tradeoff synergies[J/OL]. Environmental Science, 2025: 1-30. (2025-03-10). https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202411226.
[25] HU J Y, ZHANG J X, LI Y Q. Exploring the spatial and temporal driving mechanisms of landscape patterns on habitat quality in a city undergoing rapid urbanization based on GTWR and MGWR: The case of Nanjing, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109333.

[26] MUKHOPADHYAY A, HATI J P, ACHARYYA R, et al. Global trends in using the InVEST model suite and related research: A systematic review[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2025, 25(2): 389-405.
[27] JIAO J J, CHENG Y, HONG P H, et al. Impact of fragmentation on carbon uptake in subtropical forest landscapes in Zhejiang Province, China[J]. Remote Sensing, 2024, 16(13): 2393.
[28] 王硕, 盛艳, 范淑花, 等. 基于 InVEST 模型的窟野河流域碳储量变化对土地利用格局的响应[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 149-158.
WANG S, SHENG Y, FAN S H, et al. Response of carbon storage changes to land use pattern in Kuye River Basin based on InVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 149-158.
[29] 王晓燕, 聂磊, 胡淑恒, 等. 巢湖流域生态系统服务时空演变及其社会-生态驱动因子研究[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 2025: 1-23. (2025-04-29). https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SJWJ20250428004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
WANG X Y, NIE L, HU S H, et al. Research on spatiotemporal evolution of ecosystem services and their socio-ecological driving factors in Chaohu Lake Basin[J/OL]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025: 1-23. (2025-04-29).
[30] 王舒民, 刘招, 管子隆, 等. 油坊沟流域典型生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 71-85.
WANG S M, LIU Z, GUAN Z L, et al. Study on the trade-offs and synergistic relationships of typical ecosystem services in the Youfanggou Watershed[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 71-85.
[31] 常玉旸, 高阳, 谢臻, 等. 京津冀地区生境质量与景观格局演变及关联性[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 848-859.
CHANG Y Y, GAO Y, XIE Z, et al. Spatiotemporal evolution and spatial correlation of habitat quality and landscape pattern over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 848-859.
[32] 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. Carbon storage function in Yongding River Basin based on the FLUS-InVEST model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(9): 13-25.
[33] JIANG S M, FENG F, ZHANG X N, et al. Driving factors of fragmentation in urban landscapes: Local contributions, spatial relationships, and causal effects[J]. Ecological Indicators, 2025, 174: 113454.
[34] RIEB J T, BENNETT E M. Landscape structure as a mediator of ecosystem service interactions[J]. Landscape Ecology, 2020, 35(12): 2863-2880.
[35] MITCHELL M G E, BENNETT E M, GONZALEZ A. Strong and nonlinear effects of fragmentation on ecosystem service provision at multiple scales[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(9): 094014.
[36] LIU X X, YU D Y, LI X Y. Identifying ecological compensation standard and influencing factors based on ecosystem service externality[J]. Ecological Frontiers, 2025, 45(4): 1029-1041.
[37] DANG H E, DENG Y J, HAI Y F, et al. Integrating geodetector and GTWR to unveil spatiotemporal heterogeneity in China’s agricultural carbon emissions under the dual carbon goals[J]. Agriculture, 2025, 15(12): 1302.