

鄂尔多斯市产水量与碳储量时空演变及关联分析

刘瑞华^{1,2}, 左其亭^{1,2}, 杨智楷¹

(1. 郑州大学水利与交通学院; 2. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院)

摘要:基于 InVEST 模型分析了 2010—2022 年鄂尔多斯市产水量与碳储量的时空演变特征,并利用地理时空加权回归模型(GTWR)与空间自相关分析探究了产水量与碳储量影响因素的空间集聚特征及两者的空间异质性。结果表明:产水量与碳储量的莫兰指数均值为 0.351,呈现高产水量-高碳储量与低产水量-低碳储量的集聚特征;多年平均产水量达 27.965 亿 m³,年际波动显著,主要受土地利用类型、蒸散发和碳储量影响;碳储量呈增长态势,由 2010 年的 11.566 亿 t 增长至 2022 年的 11.949 亿 t,主要受土地利用类型和产水量影响。

关键词:产水量;碳储量;InVEST 模型;GTWR 模型;空间自相关分析;鄂尔多斯市

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2026)05-0058-09

Spatiotemporal evolution and correlation analysis of water yield and carbon storage in Ordos City//Liu Ruihua¹, Zuo Qiting^{1,2}, Yang Zhikai¹ (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University; 2. Yellow River Institute for Ecological Protection and Regional Coordinated Development, Zhengzhou University)

Abstract: The spatiotemporal evolution characteristics of water yield and carbon storage in Ordos City from 2010 to 2022 were analyzed using the InVEST model. The geographically and temporally weighted regression (GTWR) model and spatial autocorrelation analysis were used to investigate the spatial clustering characteristics of influencing factors and the spatial heterogeneity between water yield and carbon storage. The results show that the mean Moran's index of water yield and carbon storage was 0.351, exhibiting high water yield-high carbon storage and low water yield-low carbon storage clustering patterns. The multi-year average water yield was 2.7965 billion m³ with significant interannual fluctuations, and it was primarily influenced by land use type, evapotranspiration, and carbon storage. Carbon storage showed an increasing trend, rising from 1.1566 billion tons in 2010 to 1.1949 billion tons in 2022, and was mainly affected by land use type and water yield.

Key words: water yield; carbon storage; InVEST model; GTWR model; spatial autocorrelation analysis; Ordos City

鄂尔多斯市是我国重要的能源化工基地,也是北方防沙带生态屏障的重要区域,其资源开发与生态保护的协调发展对实现区域可持续发展具有重要意义。产水量与碳储量作为表征区域水文调节能力和生态固碳效能的关键指标^[1],展现出显著的协同与权衡特征^[2]。中国提出的“碳中和”目标^[3]正深刻重构国土空间格局与资源管理模式,其中土地利用变化通过改变地表覆被特征,既影响降水-径流转化机制^[4],又调控着生态系统碳源与碳汇动态^[5],这种双重影响在流域尺度呈现出复杂的空间异质性。研究产水量与碳储量的时空变化及其关联,对保护区域水资源安全、固碳减排和维持生态系统稳定意义重大。

InVEST 模型因其集成了产水量、碳储量等多类生态系统服务模块,所需数据易于获取,参数较少且运算速度快,结果可空间化直观呈现,近年来已在产水服务与碳储量评估方面得到大量应用。例如:Halder 等^[6]、Gashaw 等^[7]和常建波等^[8]分别利用 InVEST 模型对印度西孟加拉邦洪泛区、上青尼罗河流域和黄河流域的产水量进行了评估;Meza-Mori 等^[9]、Yang 等^[10]、郑海岳等^[11]分别使用 InVEST 模型对秘鲁安第斯山脉、黄河三角洲和淮南市的碳储量进行了多情景模拟,均验证了该模型在生态系统服务量化中的适用性。土地利用类型的变化通过改变植被覆盖类型,不仅直接调控着固碳效率,还通过冠层截留、蒸散发调节等水文过程间接影响产水能

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211301);国家自然科学基金项目(52279027)

作者简介:刘瑞华(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:liuruihua2024@163.com

通信作者:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn

力。丛中笑等^[12]发现森林生态系统虽具有显著的固碳优势,但其高蒸散特性与对径流的阻滞作用,会对流域产水量产生影响,而产水量波动又通过水分胁迫影响植被生产力,进而对碳储量产生影响,形成复杂的反馈回路^[13]。因此,在“碳中和”目标下,合理制定土地利用制度对水资源的可持续利用极为关键^[14]。目前对鄂尔多斯市产水量与碳储量的研究^[15-16],多聚焦于二者的权衡协同关系,但对其时空演变的影响机制探讨不深,尤其缺乏对各影响因素的空间异质性分析。因此,系统揭示产水量与碳储量时空分异规律、识别关键影响因素并探究其作用的空间变异性,对明晰区域生态系统服务功能、促进可持续发展具有重要的理论与实践意义。

本文集成 InVEST 模型、空间自相关方法和地理时空加权回归 (geographically and temporally weighted regression, GTWR) 模型,分析鄂尔多斯市产水量与碳储量的时空变化特征,以期对鄂尔多斯市水资源管理及“双碳”目标实现提供参考。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

鄂尔多斯市(图 1)位于内蒙古自治区西南部,全市总面积为 86 752 km²,行政区域包括东胜区和

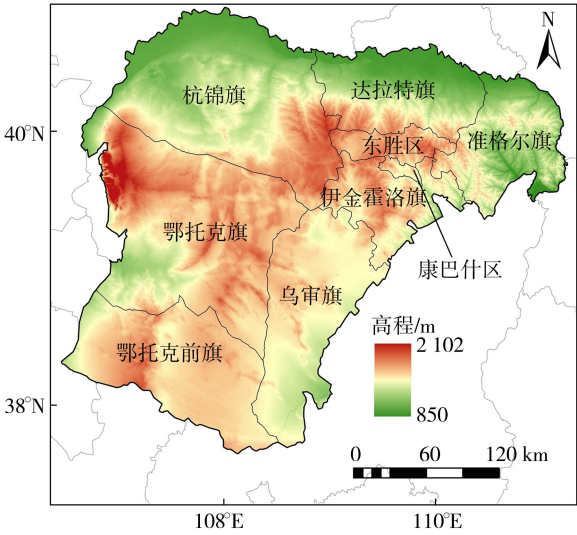


图 1 鄂尔多斯市概况

康巴什区 2 个市辖区及鄂托克前旗、鄂托克旗、杭锦旗等 7 个旗。作为国家主体功能区规划确定的重点开发区域,鄂尔多斯市不仅是我国最大的煤炭生产基地,更是北方防沙带生态安全屏障的关键核心区域。鄂尔多斯市年产水量呈波动趋势,干旱频发加上城市不断扩张,水资源供需矛盾日益尖锐。近年来,当地大规模植树种草,并发展新能源,生态系统碳储量稳步增长。鄂尔多斯市地处中温带大陆性干旱及半干旱气候区,降水量少,蒸发旺盛,风沙频繁,生态较为脆弱。作为国家重要能源基地,鄂尔多斯市煤炭资源丰富,同时承担着向华北、华东等地区供应能源的重要任务。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 InVEST 模型数据

InVEST 模型涉及的关键参数包括降水、蒸散发、植物根茎深度、植物可利用含水率、土地利用类型、生物物理量系数及碳密度等。其中,降水量和蒸散发数据分辨率为 1 km,来源于国家地球科学数据中心;植物根茎深度以土壤深度表示,分辨率为 90 m,来源于文献[17];植物可利用含水率数据分辨率为 250 m,来源于国际土壤参考信息中心;土地利用数据采用武汉大学发布的 30 m 分辨率土地利用数据集;生物物理量参数来源于文献[18];碳密度数据来源于文献[19];水资源总量数据用于 InVEST 模型产水量模块参数 Z 的率定,来源于内蒙古水资源公报。通过 ArcGIS 平台进行数据预处理,将土地利用数据重分类为农田、林地、草地、水域、未利用土地与建设用地 6 类,并将降水量和蒸散发等数据由逐月数据处理为逐年栅格数据,统一重采样为 30 m 分辨率。所有数据均采用 Albers_Conic_Equal_Area 投影。

1.2.2 GTWR 模型数据

基于前人研究成果和研究区特征^[19-20],选取了如表 1 所示的 10 个具有代表性的产水量和碳储量影响因素,涵盖自然、人类活动和地形等方面。为确保空间一致性,所有数据均采用 Albers_Conic_Equal_Area 投影,数据处理在 ArcGIS 平台中完成,根据文献[21]

表 1 产水量与碳储量影响因素及数据来源

数据名称	分辨率	数据来源
植被归一化系数	30 m	MOD13A3 数据 (https://www.earthdata.nasa.gov/)
降水量、蒸散发	1 km	国家地球科学数据中心 (https://www.geodata.cn/)
高程、坡度、坡向	90 m	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)
人口密度	1 km	LandScan 数据集 (https://landscan.ornl.gov)
降水量	1 km	国家青藏高原数据中心 (https://data.tpd.cn/)
土壤种类	1 km	全球土壤数据库 (https://www.fao.org/)
国内生产总值	1 km	资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)
土地利用	30 m	武汉大学 30 m 土地利用数据集 (https://doi.org/10.5281/zenodo.12779975)

与研究区状况构建规则渔网网格进行空间离散,并提取相关栅格数据值至网格点,再利用提取的点数据进行 GTWR 模型运算,最终将模型运算结果空间聚合至旗(区)级行政区划单元,以更清晰地揭示鄂尔多斯市各旗(区)影响因素的空间分异特征。

2 研究方法

2.1 产水量计算

2.1.1 产水量估算

InVEST 模型通过构建生态过程与土地利用的耦合关系实现服务功能评估。其中产水量模块基于 Budyko 水热平衡理论,采用下垫面特征修正的水量平衡方程进行空间化模拟,其计算公式如下^[22]：

$$Y_{xj} = (1 - E/P_x)P_x \tag{1}$$

式中： Y_{xj} 为栅格单元 x 内第 j 类土地覆被的产水强度,mm; P_x 为栅格单元 x 内空间化年降水量,mm; E 为由改进的 Zhang-Enke 模型计算获得的实际年蒸发量,mm,详细算法见文献[23]。

2.1.2 产水量率定

通过对鄂尔多斯市产水量的迭代计算,结合水资源公报数据进行验证后发现,当参数 Z 取值为 10 时,模型模拟结果与实际数据呈现出良好的拟合效果(表 2),表明该参数取值能够较好地反映研究区的水文特征。

表 2 产水量率定结果

年份	实际值/亿 m ³	模拟值/亿 m ³	误差/%
2010	20.78	22.60	8.8
2013	20.43	21.23	3.9
2016	37.20	38.46	3.4
2019	26.29	25.89	1.5
2022	31.75	31.66	0.3

2.2 区域碳储量计算

InVEST 碳储量模块可量化并可可视化区域碳储量的空间分布,总碳储量由地上生物碳储量、地下生物碳储量、土壤碳储量和死亡有机碳储量组成。

在使用 InVEST 模型计算碳储量时,碳密度数据是关键参数,通常通过实地调研并查阅相关资料获得。参考文献[19]确定研究区各土地利用类型的碳密度取值,如表 3 所示。

表 3 鄂尔多斯市各土地利用类型碳密度

土地利用类型	碳密度/(t/hm ²)			
	地上	地下	土壤	死亡有机物
农田	3.02	42.74	98.13	0
林地	22.46	61.38	75.86	0
草原	18.70	45.81	90.43	3.8
水域	1.59	0	0	0
未利用土地	0.69	0	70.61	0
建设用地	1.32	9.37	28.42	0

2.3 空间自相关分析

空间自相关分析采用统计方法量化空间单元间的关联程度,揭示其空间分布特征。本文首先采用全局莫兰指数对产水量与碳储量的整体空间集聚特征进行分析,以判断研究区产水量与碳储量在空间上是否存在显著的自相关性。全局莫兰指数 I 的取值范围为 $[-1,1]$,当 $I>0$ 时表示空间正相关,即高值与高值、低值与低值趋于集聚;当 $I<0$ 时表示空间负相关,即高值与低值趋于离散;当 I 趋近于 0 时则表示空间随机分布。在此基础上,进一步采用局部莫兰指数识别碳储量与产水量的局部空间聚类模式,具体包括高产水量-高碳储量集聚、低产水量-低碳储量集聚、高产水量-低碳储量异常和低产水量-高碳储量异常 4 种类型,从而更细致地揭示空间异质性特征。

2.4 GTWR 模型

GTWR 模型是对地理加权回归模型(GWR)的进一步发展。GTWR 模型融合时空维度,分析回归系数的时空非平稳性,统一解释地理现象的时空差异机制。

借鉴已有研究^[24-25]选取影响因素,采用 GTWR 模型探讨水文、经济、地形与人口等因素对产水量与碳储量的影响,模型输入的影响因素包括人口密度(x_1)、高程(DEM, x_2)、坡度(x_3)、坡向(x_4)、降水量(x_5)、植被归一化指数(NDVI, x_6)、国内生产总值(GDP, x_7)、蒸散发(x_8)、土壤种类(x_9)、土地利用类型(x_{10})、产水量(x_{11})、碳储量(x_{12})。水文因素直接影响产水量大小,地形因素通过影响汇流和土壤持水能力作用于产水量,并制约植被类型与土壤碳储量;经济与人口活动深刻影响产水量与碳储量,建设用地扩张破坏植被减少碳储量,同时改变下垫面可能减少产水量,人口增长加剧用水需求,对水资源构成压力。在分析产水量影响因素时,自变量为 $x_1 \sim x_{10}$ 、 x_{12} ;在分析碳储量影响因素时,自变量为 $x_1 \sim x_{11}$ 。

3 结果与分析

3.1 产水量时空变化特征

表 4 为 2010—2022 年鄂尔多斯市产水量的变化情况,这 13 年的多年平均产水量为 27.965 亿 m³,2016 年达到峰值 38.457 亿 m³,较最低值 2013 年的 21.226 亿 m³ 增幅显著,整体来看,鄂尔多斯市产水量呈现波动上升趋势。

研究期间各旗(区)产水量呈现显著时空分异,其中乌审旗作为主要产水区,2022 年产水量达到 7.105 亿 m³,而康巴什区产水量最低,仅为 0.145 亿 m³。2013—2016 年全市产水量出现显著

增长,产水量的显著增长受益于降水增加及“三北防护林”等生态修复工程对水源涵养能力的提升^[26]。杭锦旗增幅最大,达到258.5%,可能源于其境内库布齐沙漠治理工程大幅改善了区域水文条件^[27]。2016—2019年产水量普遍下降,鄂托克旗降幅超过50%,这可能与气候干旱叠加地下水管控政策实施有关^[20,28]。各旗(区)产水动态差异明显,杭锦旗表现为剧增锐减的波动特征,东胜区在低基数基础上波动较大,2013年增长41.2%,2019年下降36.6%。2022年各旗(区)产水量可分为3个梯队,第一梯队为乌审旗和达拉特旗,年产水量超过5亿m³,第二梯队包括准格尔旗和鄂托克前旗,年产水量介于3亿~5亿m³之间,其余旗(区)归为第三梯队,各区域差异本质上反映了自然条件与人为干预强度的空间分异。

表4 鄂尔多斯市各旗(区)产水量

行政区	产水量/亿 m ³				
	2010 年	2013 年	2016 年	2019 年	2022 年
伊金霍洛旗	1.993	2.013	3.299	2.617	3.050
乌审旗	5.765	5.551	7.803	5.768	7.105
鄂托克旗	2.700	1.847	4.754	2.304	3.670
杭锦旗	2.559	1.536	5.507	2.240	2.691
准格尔旗	2.525	2.773	3.951	3.055	3.551
鄂托克前旗	2.709	2.713	4.413	3.490	4.955
达拉特旗	3.763	4.012	7.598	5.689	5.786
东胜区	0.468	0.661	0.931	0.590	0.702
康巴什区	0.119	0.120	0.201	0.137	0.145
合计	22.601	21.226	38.457	25.89	31.655

3.2 碳储量时空变化特征

表5为鄂尔多斯市碳储量的变化情况,可见2010—2022年各旗(区)碳储量呈现显著的差异化演变特征,总碳储量增长了0.383亿t,从2010年的11.566亿t增长到2022年的11.949亿t,主要得益于其生态修复与保护措施的有效实施。

表5 鄂尔多斯市各旗(区)碳储量

行政区	碳储量/亿 t				
	2010 年	2013 年	2016 年	2019 年	2022 年
伊金霍洛旗	0.815	0.822	0.821	0.820	0.818
乌审旗	1.512	1.578	1.594	1.577	1.638
鄂托克旗	2.785	2.751	2.799	2.828	2.918
杭锦旗	2.105	2.144	2.189	2.195	2.180
准格尔旗	1.137	1.137	1.137	1.135	1.132
鄂托克前旗	1.695	1.728	1.734	1.722	1.736
达拉特旗	1.136	1.147	1.152	1.148	1.150
东胜区	0.326	0.323	0.323	0.322	0.322
康巴什区	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055
合计	11.566	11.685	11.804	11.802	11.949

鄂托克旗作为碳储量最高的区域,从2.785亿t持续增长至2.918亿t,虽在2013年短暂下降,但整体增幅达到4.7%,凸显生态保护成效,该旗的碳储量增长主要得益于退耕还林、沙地植被恢复等生态

工程提升了植被碳汇能力^[29]。乌审旗碳储量在2010年为1.512亿t,经历波动后,到2022年达到1.638亿t,累计增长8.3%,其中2019年的阶段性下降与后续加速增长形成鲜明对比,这主要得益于乌审旗依托毛乌素沙地治理工程实现了生态系统碳储量的稳定增长^[30]。杭锦旗呈现阶梯式攀升后再回落的特征,2019年达到2.195亿t峰值后微降,最终较2010年增长3.6%。鄂托克前旗碳储量呈波动上升态势,从2010年的1.695亿t增长至2022年的1.736亿t,累计增长约2.4%,其中2016年达到1.734亿t阶段性高点后小幅回调,2022年回升至峰值水平。准格尔旗和达拉特旗波动幅度较小,东胜区则持续缓降,2022年碳储量较2010年减少1.2%,康巴什区始终为550万t,为各旗(区)的最低值。东胜区的碳储量下降与城市扩张挤占生态空间、硬化地表增加直接相关。伊金霍洛旗碳储量变化呈现特殊趋势,在2013年达到0.822亿t峰值后逐年递减,形成倒U形曲线,2022年较峰值下降0.5%。这一演变格局或与生态工程实施、土地利用转型及城市化进程的交互作用密切相关。

3.3 产水量与碳储量空间自相关分析

本文基于GeoDa与ArcGIS平台开展鄂尔多斯市产水量与碳储量空间关联性分析,结果如图2与表6所示。莫兰指数均值为0.351($p<0.05$, $Z>2.58$),证实产水量与碳储量存在弱正向空间依赖关系。

表6 莫兰指数及显著性检验

年份	莫兰指数	P 值
2010	0.376	0.001
2013	0.311	0.001
2016	0.350	0.001
2019	0.307	0.001
2022	0.411	0.001

鄂尔多斯市产水量与碳储量以高产水量-高碳储量和低产水量-低碳储量的协同关系为主要空间分布格局,东胜区、康巴什区、乌审旗、鄂托克旗常年呈现这种协同关系的正相关分布,但局部呈现显著异质性,如准格尔旗呈现高产水量-低碳储量的特征,与整体协同趋势形成反差;东北部东胜区、康巴什区因建设用地扩张与降水不足的双重压力,地表硬化影响产汇流过程,植被退化降低碳储量,致使产水量与碳储量均处于较低水平,呈现低产水量-低碳储量的双低格局;乌审旗源于其良好植被覆盖、优质土壤及科学的生态保护措施,呈现高产水量-高碳储量协同效应。值得注意的是,统计显著的空间关联区($p<0.05$)仅占全域一部分,表明产水量与碳储量空间分布关系受多尺度影响因素非线性调控,如局

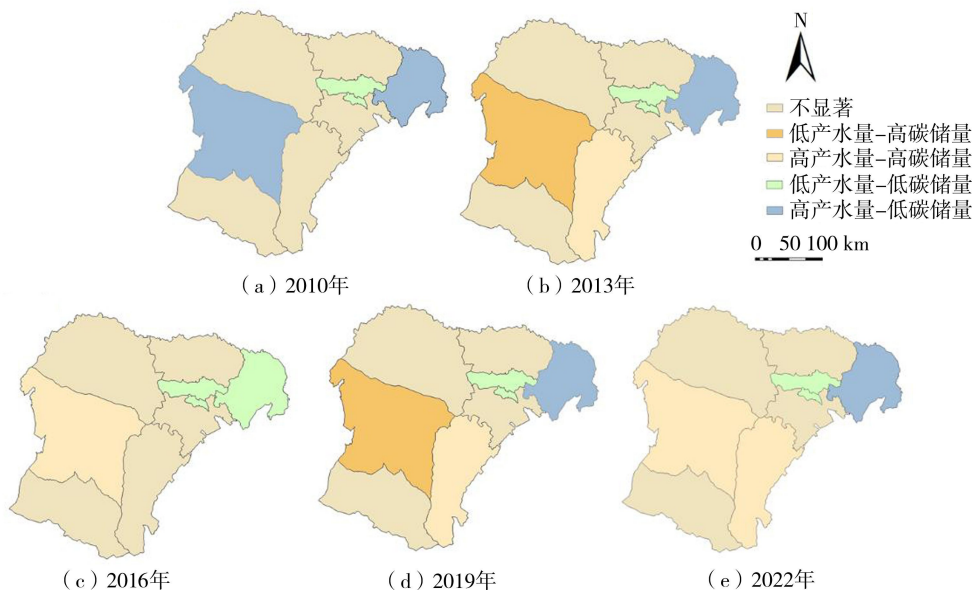


图2 Lisa 集聚图

部人类干扰可能打破大尺度自然协同机制。这一结果凸显了全域协同-局部权衡的复杂性,需差异化制定生态管理策略。在全域协同区强化生态保护,维护自然过程主导的机制,在人类活动密集区实施适应性调控,在关键过渡带建立动态监测体系,实行管控以缓冲生态压力。

3.4 产水量与碳储量影响因素分析

3.4.1 影响因素线性回归分析

本文基于生态系统服务协同机制理论,以产水量与碳储量为因变量,开展回归分析。自变量涵盖地形地貌、气候要素、植被指数、社会经济及土地覆被格局等多维驱动要素。采用方差膨胀因子(VIF, 阈值为7.5)和显著性检验($\alpha=0.05$)预筛选变量后,产水量影响因素中DEM(VIF为95.602)、土壤种类(VIF为24.95)存在严重多重共线性,坡向($p=0.066$)、人口密度($p=0.325$)、NDVI($p=0.091$)未通过显著性检验,最终保留降水量(VIF为1.316, $p<0.001$)、蒸散发(VIF为1.630, $p<0.001$)、土地利用类型(VIF为6.310, $p=0.041$)、坡度(VIF为1.228, $p<0.001$)、碳储量(VIF为1.253, $p<0.001$)5个主要影响因素;碳储量影响因素中DEM(VIF为94.908)、土壤种类(VIF为119.421)共线性严重, GDP($p=0.464$)、坡向($p=0.734$)、人口密度($p=0.053$)未达显著水平,最终筛选出NDVI(VIF为1.168, $p<0.001$)、产水量(VIF为2.089, $p<0.001$)、土地利用类型(VIF为6.281, $p=0.013$)与年降水量(VIF为1.335, $p<0.001$)4个主要影响因素。

3.4.2 GTWR 模型性能检验

本文采用校正决定系数(R^2)衡量模型的解释力,并以赤池信息准则(AIC)量化模型效能。通过

对比普通最小二乘法(OLS)、GWR和GTWR3种建模方法,验证GTWR模型的性能,结果表明(表7),GTWR模型在解析时空异质性方面具有显著优势。

表7 产水量与碳储量影响因素的模型诊断结果对比

模型	产水量		碳储量	
	AIC	R^2	AIC	R^2
OLS	5421.14	0.955	5627.09	0.998
GWR	5266.03	0.990	5487.44	0.999
GTWR	5256.28	0.995	5469.15	0.999

3.4.3 产水量影响因素时空演变分析

图3为鄂尔多斯市产水量影响因素在时空维度上的变化趋势,土地利用类型、碳储量和蒸散发是产水量变化的主要影响因素。

a. 土地利用类型对产水量的影响空间分异显著。南部乌审旗、鄂托克前旗呈现负向影响,东北部区域在早期表现为正向影响但逐渐减弱,这可能与当地植被覆盖变化对地表渗透的影响有关^[31]。

b. 碳储量对产水量的影响总体呈现负向影响,并且这种影响自南向北逐渐增强。2010年鄂托克前旗与伊金霍洛旗曾短暂表现出正向影响,但到2022年整个区域已全面呈现负向影响。

c. 蒸散发对产水量的影响主要表现为负向影响,负向影响梯度自乌审旗向北至达拉特旗递增,并在2022年达到峰值,这与同期东胜区、康巴什区建设用地快速扩张导致的不透水面面积增加存在显著关联^[32]。

d. 坡度对产水量的影响在2010—2022年以负向影响为主导,但2016年和2019年在杭锦旗出现短暂的正向影响区,值得注意的是,康巴什区在整个研究期持续保持坡度负影响高值特征,从空间演变趋势来看,东胜区及周边区域的坡度负向影响呈现

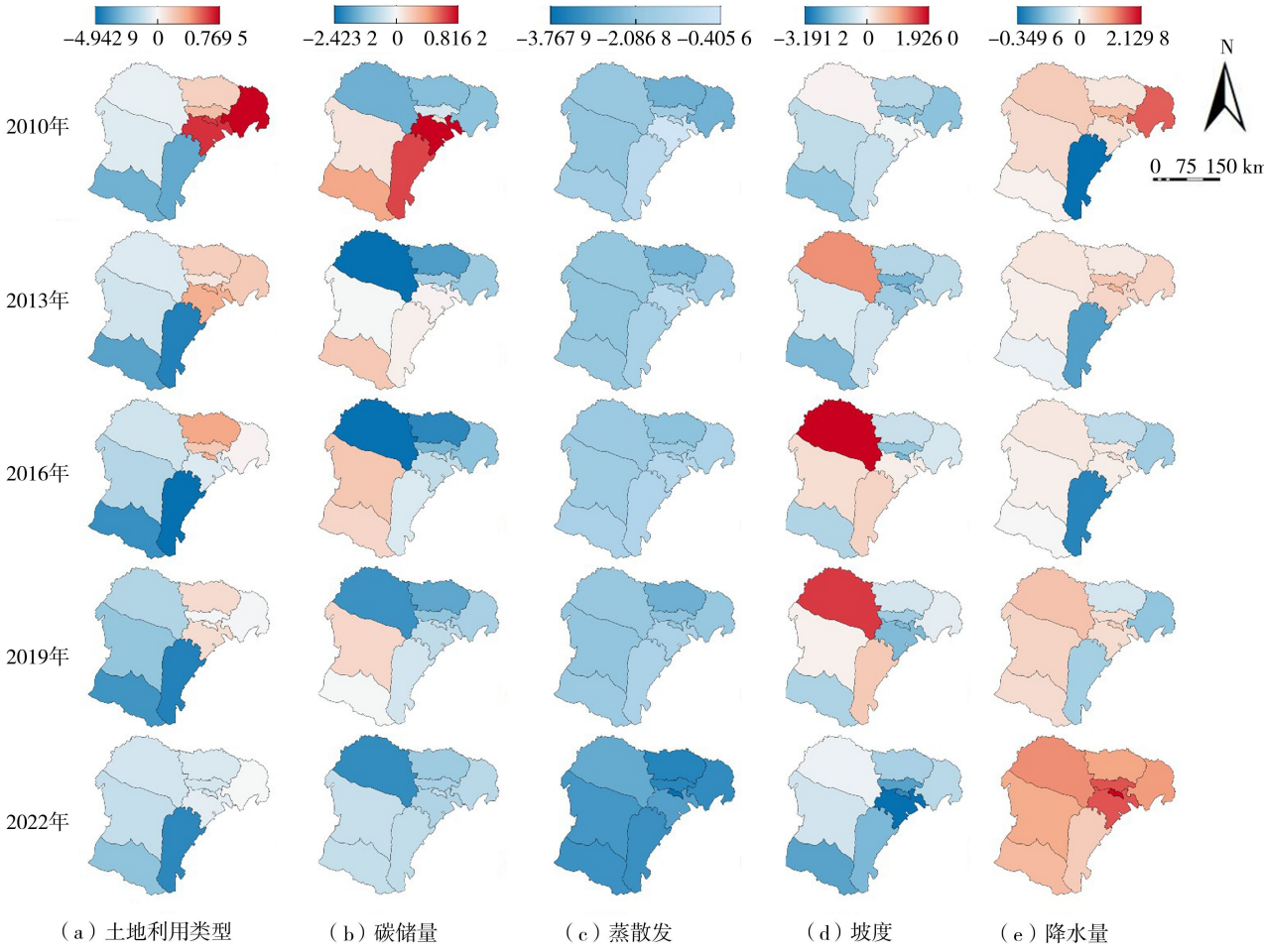


图3 产水量影响因素回归系数的时空演变

持续增强趋势,而杭锦旗、鄂托克旗等地的负向影响则存在波动。

e. 降水量对产水量的影响以正向为主,但存在空间分异。中部区域正向影响相对较强,2010—2019年部分区域曾出现负向影响,2022年全区域转为正向并显著增强。

3.4.4 碳储量影响因素时空演变分析

图4为鄂尔多斯市碳储量影响因素在时空维度上的变化趋势,土地利用类型与产水量是碳储量变化的主要影响因素。

a. 土地利用类型变化对碳储量的影响呈现东西分异特征,西部杭锦旗、鄂托克旗表现为正向影响高值区,而东部准格尔旗、伊金霍洛旗、乌审旗则以负向影响为主。值得注意的是,准格尔旗因煤炭开采等人类活动干扰^[33],长期保持负向影响高值区的特征,凸显高强度土地利用对碳汇功能的显著抑制作用。

b. 产水量对碳储量的影响整体表现为负向影响,且空间分异显著,2010—2022年东北部达拉特旗、准格尔旗持续为负向影响高值区,而西南部鄂托克旗、鄂托克前旗的影响强度相对较低,这种空间格

局可能与区域植被覆盖和土壤水文特性的空间差异有关^[34]。

c. NDVI对碳储量的影响虽持续为正向影响,但其强度在研究期内呈现先降低后增加的趋势。空间分布上,东北部达拉特旗、东胜区为高值区,西南部鄂托克前旗则为低值区,这种差异可能受气候变化背景下植被空间分布的影响。

d. 降水量对碳储量的调控呈现西北与东南分异,西北部杭锦旗西部主要表现为负影响,东南部伊金霍洛旗、乌审旗东部则以正影响为主导,这一分布格局是区域降水量的时空波动及土地利用类型的演变共同驱动导致的。

3.4.5 产水量与碳储量相互作用分析

产水量与碳储量之间存在相互影响关系,这种关联性本质上源于两者对土地利用类型变化的共同响应及其生态系统服务功能的耦合机制。碳储量的估算以土地利用类型为基础,通过建立其与碳密度的对应关系,利用空间分析量化生态系统的碳储量。产水量的核算则通过土地利用类型关联降水量、蒸散发、土壤渗透系数等水文参数,结合降水-径流转化机制,实现区域产水量的空间异质性评估。土地

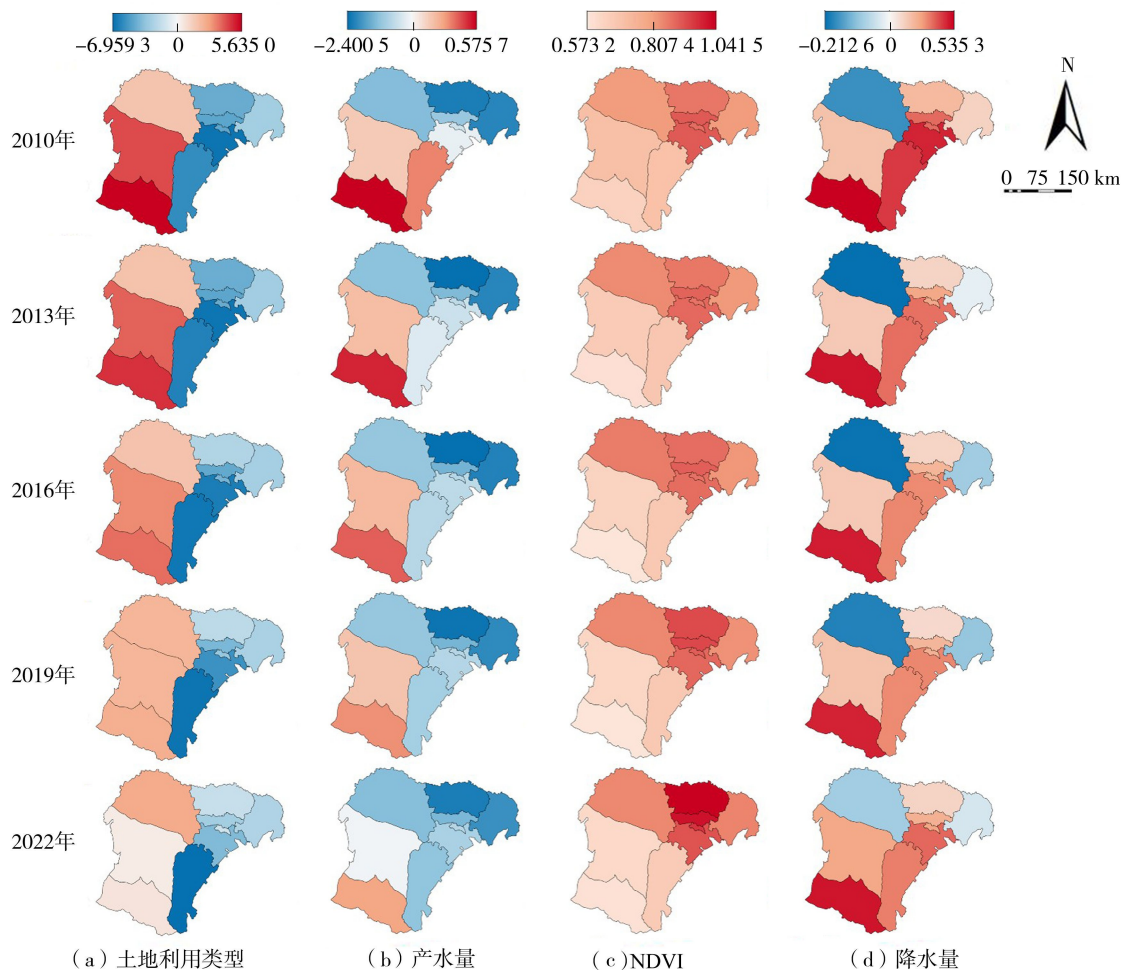


图4 碳储量影响因素回归系数的时空演变

利用类型演变直观体现碳源与碳汇的时空变化,也显著影响区域产水量的变化,当某区域林地占比提升时,既会通过植被增强碳汇能力,又会因植被蒸散发增强而减少地表产流。这种关系在甘肃省^[35]及石羊河流域^[36]的研究中得到验证。

4 结 论

a. 2010—2022 年碳储量与产水量的莫兰指数均值为 0.351,变化幅度较小。这表明碳储量与产水量在空间分布上整体相关性较弱,不过存在较为广泛的正相关聚集区域。

b. 2010—2022 年鄂尔多斯市产水量呈波动变化,多年平均产水量为 27.965 亿 m^3 ,主要受土地利用类型、蒸散发和碳储量影响;总碳储量增长了 0.383 亿 t,从 2010 年的 11.566 亿 t 增长到 2022 年的 11.949 亿 t,主要受土地利用类型和产水量影响。

参考文献:

[1] 王金凤,徐洁,徐基良,等. 黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能评估[J]. 北京林业大学学报,2024,46(7):90-100. (Wang Jinfeng, Xu Jie, Xu Jiliang, et al.

Evaluation of ecosystem service function of national nature reserves of the Yellow River Basin[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 90-100. (in Chinese))

[2] 王蓓,赵军,胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7582-7595. (Wang Bei, Zhao Jun, Hu Xiufang. Analysis on trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7582-7595. (in Chinese))

[3] 胡志坚,刘如,陈志. 中国“碳中和”承诺下技术生态化发展战略思考[J]. 中国科技论坛, 2021(5): 14-20. (Hu Zhijian, Liu Ru, Chen Zhi. Strategic thinking on the ecological development of technology under China's "carbon neutrality" commitment[J]. Forum on Science and Technology in China, 2021(5): 14-20. (in Chinese))

[4] 祁玉馨,胡远东. 哈尔滨市产水量时空变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 294-303. (Qi Yuxin, Hu Yuandong. Spatial-temporal variation and driving forces of water yield in Harbin City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 294-303. (in Chinese))

[5] 彭卓越,梁煜彬,方红远,等. 南水北调东线江苏-山东

- 段受水区的碳储量时空演变与驱动因子[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1080-1090. (Peng Zhuoyue, Liang Yubin, Fang Hongyuan, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon stock in water-receiving area of Jiangsu-Shandong section of Eastern Route of South-to-North Water Transfers Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1080-1090. (in Chinese))
- [6] Halder S, Das S, Basu S. Estimation of seasonal water yield using InVEST model: a case study from West Bengal, India [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(14): 1293.
- [7] Gashaw T, Worqlul A W, Dile Y T, et al. Evaluating InVEST model for simulating annual and seasonal water yield in data-scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin; implications for water resource planners and managers[J]. Sustainable Water Resources Management, 2022, 8(5): 170.
- [8] 常建波, 朱博文, 闫宝伟. 黄河流域产水量时空变化及归因分析[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(8): 113-122. (Chang Jianbo, Zhu Bowen, Yan Baowei. Spatial and temporal variability of water yield in Yellow River Valley and attribution analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(8): 113-122. (in Chinese))
- [9] Meza-Mori G, Nematollahi S, Guerra C A A, et al. Integrating MaxEnt and InVEST modeling methods to identify priority areas for the conservation of emblematic and endemic wildlife in the Peruvian Tropical Andes[J]. Global Ecology and Conservation, 2025, 62: e03626.
- [10] Yang Xiaoyang, Wang Chunjuan, Liu Chao, et al. Assessing the spatio evolution of carbon sequestration and optimizing ecological restoration strategies using the InVEST model: a case study of the Yellow River Estuary, China[J]. Marine Environmental Research, 2025, 209: 107204.
- [11] 郑海岳, 王磊, 魏涛, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的淮南市土地覆盖模拟与碳储量评估[J]. 环境科学, 2025, 46(8): 4754-4764. (Zheng Haiyue, Wang Lei, Wei Tao, et al. Land cover simulation and carbon stock assessment in Huainan City based on FLUS-InVEST model [J]. Environmental Science, 2025, 46(8): 4754-4764. (in Chinese))
- [12] 丛中笑, 刘金花, 孙增禹, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的黄河流域九省(区)碳储量变化分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(12): 24-30. (Cong Zhongxiao, Liu Jinhua, Sun Zengyu, et al. Analysis of carbon stock changes in nine provinces (regions) of the Yellow River Basin based on PLUS and InVEST models[J]. Yellow River, 2024, 46(12): 24-30. (in Chinese))
- [13] 闫奕飞, 白强, 孙虎, 等. 黄河流域植被变化和产水服务的时空特征分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 130-139. (Yan Yifei, Bai Qiang, Sun Hu, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of vegetation cover and water production services in the Yellow River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 130-139. (in Chinese))
- [14] 左其亭, 吴青松, 马军霞, 等. “双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 8-14. (Zuo Qiting, Wu Qingsong, Ma Junxia, et al. Research framework and prospects of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 8-14. (in Chinese))
- [15] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571-1581. (Wu Wenhuan, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City [J]. Progress in Geography, 2017, 36(12): 1571-1581. (in Chinese))
- [16] 王语馨, 郑颖, 高永, 等. 鄂尔多斯市典型生态系统服务时空演变特征及权衡/协同关系[J]. 应用生态学报, 2025, 36(6): 1661-1670. (Wang Yuxin, Zheng Ying, Gao Yong, et al. Spatio-temporal variations and trade-offs/synergies of typical ecosystem services in Ordos City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(6): 1661-1670. (in Chinese))
- [17] Yan Fapeng, Wei Shangguan, Zhang Jing, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. Scientific Data, 2020, 7(1): Art2.
- [18] Li Mingyue, Liang Dong, Xia Jun, et al. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112212.
- [19] 王宏亮, 杜越洋, 吴健生, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的鄂尔多斯市土地利用模拟及碳储量评估[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2024, 55(6): 570-578. (Wang Hongliang, Du Yueyang, Wu Jiansheng, et al. Landuse scenario simulation and carbon storage assessment in ordos city based on PLUS-InVEST model[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2024, 55(6): 570-578. (in Chinese))
- [20] 王思楠, 吴英杰, 王宏宙, 等. 基于地理探测器的鄂尔多斯干旱时空变化驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2024, 41(12): 1981-1991. (Wang Sinan, Wu Yingjie, Wang Hongzhou, et al. Spatial and temporal drivers of drought analysis using the geodetector in Ordos [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(12): 1981-1991. (in Chinese))
- [21] 安全. 基于渔网算法的喀斯特流域水系特征提取与地貌发育阶段识别研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [22] 陶洁怡, 章锦河, 郭丽佳, 等. 三江源国家公园水源涵养服务时空演变特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2025, 45(3): 1226-1238. (Tao Jieyi, Zhang Jinhe, Guo Lijia, et

- al. Spatiotemporal change and driving factors of water conservation in Sanjiangyuan National Park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3): 1226-1238. (in Chinese))
- [23] 孙珪,徐长春,任正良,等.塔里木河流域产水量时空分布及驱动因素分析[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(8): 114-122. (Sun Qi, Xu Changchun, Ren Zhengliang, et al. Spatiotemporal variation in water yield and their underlying mechanisms in Tarim River Basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(8): 114-122. (in Chinese))
- [24] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731-2739. (Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2731-2739. (in Chinese))
- [25] 李曼,吴东丽,何昊,等.1990—2020 年黄河流域碳储量时空演变及驱动因素研究[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(3): 333-344. (Li Man, Wu Dongli, He Hao, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Yellow River Basin from 1990 to 2020 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(3): 333-344. (in Chinese))
- [26] 陈赛赛,孙艳玲,杨艳丽,等.三北防护林工程区植被景观格局变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12): 85-90. (Chen Saisai, Sun Yanling, Yang Yanli, et al. Analysis on the vegetation landscape pattern changes in the Three-North Shelter Belt Program [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(12): 85-90. (in Chinese))
- [27] 郭彩赞,韩致文,李爱敏,等.库布齐沙漠生态治理与开发利用的典型模式[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 112-118. (Guo Caiyun, Han Zhiwen, Li Aimin, et al. The typical models of ecological management and development and utilization in the Hobq Desert [J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(1): 112-118. (in Chinese))
- [28] 邓恩松,丁国梁,万亚筱.新时期鄂尔多斯市机电井取地下水管理思路[J]. *内蒙古水利*, 2024(3): 5-6. (Deng Ensong, Ding Guoliang, Wan Yaxiao. Management ideas for the exploitation and use of groundwater by electromechanical wells in Ordos in the new era [J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2024(3): 5-6. (in Chinese))
- [29] 多化豫,袁云梅.鄂尔多斯市退耕还林工程效益分析[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(4): 42-45. (Duo Huayu, Yuan Yunmei. Ordos City in 2014, returning farmland to forest project benefit analysis [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2016, 37(4): 42-45. (in Chinese))
- [30] 李悦,赵红霞,胡尔查,等.毛乌素沙地生态系统碳储量时空变化及其驱动因素分析:以乌审旗为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2025, 41(1): 99-113. (Li Yue, Zhao Hongxia, Hu Ercha, et al. Spatio-temporal dynamics and driving factors of carbon storage in the Mu Us Sandy Land: a case study in Wushen Banner [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025, 41(1): 99-113. (in Chinese))
- [31] 何亮,梁海荣,李钢铁,等.近 20 年杭锦旗植被覆盖变化特征及驱动力分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 587-596. (He Liang, Liang Hairong, Li Gangtie, et al. Analysis on the characteristics of changes and driving forces of vegetation cover in Hangjin County in recent 20 years [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5): 587-596. (in Chinese))
- [32] 张宇,陈宇轩,高志鹏,等.基于土地利用变化的鄂尔多斯市生态系统服务价值时空演化特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2025, 39(2): 131-140. (Zhang Yu, Chen Yuxuan, Gao Zhipeng, et al. Characteristics of spatio-temporal evolution of ecosystem service value in Ordos City based on land-use change [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, 39(2): 131-140. (in Chinese))
- [33] 刘雄,张万林,王霞.准格尔旗开发建设项目水土流失防治对策[J]. *中国水土保持*, 2000(5): 32-33. (Liu Xiong, Zhang Wanlin, Wang Xia. Countermeasures for soil and water loss prevention and control in development and construction projects in Zhungeer Banner [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2000(5): 32-33. (in Chinese))
- [34] 王俊枝,萨日盖,窦银银,等.2000—2022 年鄂尔多斯高原人类活动对植被覆盖变化的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2025, 41(4): 509-516. (Wang Junzhi, Sa Rigai, Dou Yinyin, et al. Effects of human activities on vegetation cover changes in the Ordos Plateau during 2000-2022 [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2025, 41(4): 509-516. (in Chinese))
- [35] 任玺锦,裴婷婷,陈英,等.基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J]. *生态科学*, 2021, 40(4): 66-74. (Ren Xijin, Pei Tingting, Chen Ying, et al. Impact of land use change on carbon storage in Gansu Province based on carbon density correction [J]. *Ecological Science*, 2021, 40(4): 66-74. (in Chinese))
- [36] 赵亚茹,周俊菊,雷莉,等.基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3789-3799. (Zhao Yaru, Zhou Junju, Lei Li, et al. Identification of drivers for water yield in the upstream of Shiyang River based on InVEST model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3789-3799. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-07 编辑:熊水斌)