河西走廊生态系统服务价值时空演变特征及其影响因素

杜金浩[1], 柴宗刚[1], 兰吉涛[2]
(1.兰州交通大学 建筑与城市规划学院, 甘肃 兰州 730070; 2.西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘　要: [目的]探究河西走廊生态系统服务价值时空演变规律与驱动机制,为干旱区生态恢复与可持续发展提供科学依据。[方法]基于2000—2023年土地利用数据、地区粮食产量和价格等数据,修正获得河西走廊生态系统服务价值系数表,系统分析该地区生态系统服务价值的时空演变特征,并结合地理探测器和地理加权回归模型进一步分析各因素对地区生态系统服务价值的影响。[结果]①研究期地区土地利用类型以未利用地和草地为主,建设用地与水域的面积增长尤为显著。②研究期地区生态系统服务价值总量呈波动增长。其中,水域生态系统服务价值增幅最为明显,调节服务和支持服务占主导地位;生态系统服务价值呈"南高北低,东高西低"的空间分布格局。③地理探测器结果表明,社会经济因素解释力最强,自然因素次之;地理加权回归模型结果表明,土地利用程度综合指数与生态系统服务价值呈正相关。年降水量与生态系统服务价值以正相关为主,局部呈负相关。人口总数与生态系统服务价值以负相关为主,局部呈正相关。NDVI、高程与生态系统服务价值的相关性整体上表现为由东南部正相关转变为西北部负相关。[结论]河西走廊"山地-绿洲-荒漠"三大生态功能区生态系统服务价值空间差异显著。未来,为了保障区域生态安全与可持续发展,人们应该在南部祁连山区强化水源涵养与生态屏障功能;在中部绿洲区着力协调人类活动与生态用地的关系;在北部荒漠区则优先推动自然恢复。

关键词: 生态系统服务价值; 时空演变; 地理加权回归; 影响因素; 河西走廊
文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2026)03-0424-11　　**中图分类号:** X171.1

文献参数: 杜金浩, 柴宗刚, 兰吉涛.河西走廊生态系统服务价值时空演变特征及其影响因素[J].水土保持通报,2026,46(3):424-434. Du Jinhao, Chai Zonggang, Lan Jitao. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of ecosystem service value in Hexi Corridor [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):424-434.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.023　　**CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.023**

Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of ecosystem service value in Hexi Corridor

Du Jinhao[1], Chai Zonggang[1], Lan Jitao[2]
(1.*School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 2.*College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution patterns and driving mechanisms of ecosystem service value in Hexi Corridor were investigated in order to provide a scientific basis for ecological restoration and sustainable development in arid regions. [Methods] Based on land use data, regional grain yield and price data, and other data from 2000 to 2023, the ecosystem service value coefficient table for Hexi Corridor was revised. Subsequently, the spatiotemporal evolution characteristics of ecosystem service value in this region were systematically analyzed. The GeoDetector and geographically weighted regression models were employed to further analyze the influence of

收稿日期:2025-10-20　　**修回日期:**2025-12-15　　**采用日期:**2025-12-24
资助项目:2025年甘肃省校级研究生科研项目"绿洲城市空间扩张特征及其对水相关生态系统服务的影响:以疏勒河流域为例"(KYZZB2025037)
第一作者:杜金浩(2002—),男(汉族),甘肃省酒泉市人,硕士研究生,研究方向为区域规划。Email:19968714779@163.com。
通信作者:柴宗刚(1973—),男(汉族),甘肃省兰州市人,硕士,副教授,主要从事城乡规划方面的研究。Email:442060017@qq.com。

various factors on regional ecosystem service value. [Results] ① During the study period, land use types in the region were predominantly unused land and grassland, with particularly significant increases in the area of construction land and water bodies. ② The total ecosystem service value in the region showed an overall increasing trend with fluctuations during the study period. Among ecosystem service types, the value of water body ecosystem services showed the most pronounced increase, with regulating and supporting services dominating. The spatial distribution pattern of ecosystem service value exhibited a 'high in the south and low in the north, high in the east and low in the west'. ③ GeoDetector results indicated that socioeconomic factors provided the strongest explanatory power, followed by natural factors. Geographically weighted regression results revealed a positive correlation between the comprehensive land use degree index and ecosystem service value. Annual precipitation showed a predominantly positive correlation with ecosystem service value, with locally negative correlations. Total population exhibited a predominantly negative correlation with ecosystem service value, with locally positive correlations. NDVI and elevation demonstrated an overall pattern shifting from positive correlations in the southeast to negative correlations in the northwest. [Conclusion] Significant spatial differences in ecosystem service value exist across the three major ecological functional zones of the Hexi Corridor (mountainous, oasis, and desert regions). In the future, to ensure regional ecological security and sustainable development in the northern desert zone, people should enhance water conservation and ecological barrier functions preferably in the southern Qilian Mountains; focus on the coordinating of human activities with ecological land use in the central oasis zone; and give priority to promoting natural restoration.

Keywords: ecosystem service value; spatiotemporal evolution; geographically weighted regression; influencing factors; Hexi Corridor

生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)是评估生态系统对人类福祉贡献的重要量化指标[1],它不仅反映了生态系统功能和价值,还为区域生态管理、土地利用规划和可持续发展[2]提供了科学依据。随着全球生态环境问题的加剧,ESV 评估的重要性日益凸显,其研究逐渐成为生态学、地理学、环境科学和城乡规划等领域的研究热点[3]。ESV 评估源于国外学者对人与自然关系的深刻反思[4]。SCEP 报告[5]首次明确提出"生态系统服务"的概念。此后,经过 Holdren 等[6]的拓展,该领域理论不断深化。Costanza 等[4]于 1997 年正式提出 ESV 评估指标体系,为全球范围内 ESV 的量化与评估奠定了基础。进入 21 世纪后,面对气候变化与生态系统退化等挑战,联合国于 2001—2005 年实施千年生态系统评估,首次在全球尺度系统评估生态系统服务状态、变化及与人类福祉的关系[7],将生态系统服务的研究推向高潮。中国的 ESV 研究自 20 世纪末逐步兴起,尤其自 Costanza 等[4]的研究引入后迅速发展。欧阳志云等[8]、谢高地等[9]开展了系统性的探索工作,构建了适应中国实际情况的 ESV 评估框架。

ESV 评估途径主要分为能值化与币值化两类。能值化主要以太阳能值来表征生态系统服务的价值。币值化相较于前者运用较为广泛,其评估方法主要有两种:一是基于 Costanza 等提出的单位价值量来计算整个区域的价值量;另一种是通过模拟出物质量,再按照市场价值法和非市场价值法等换算成价值量[10]。其中,谢高地等[9,11]在 Costanza[4]研究的基础上,制定了中国 ESV 当量因子,极大地推动了中国相关研究的发展和实践进程。近年来,国内学者在 ESV 评估方面取得了显著进展,在流域[12]、行政区[2]及格网等[13]多种评价单元基础上,采用空间自相关分析等方法探索 ESV 的空间集聚与分异格局[13];在驱动机制研究中,地理探测器等模型[12,14]被广泛应用于探索 ESV 时空分异的影响因素;在互动关系研究中,多采用耦合协调度等模型评估 ESV 与城镇化等系统[15]的协调发展水平。现有成果扩展和深化了该领域的研究与实践,但仍存在不足。首先在研究视角上,多集中于国家或区域宏观尺度,针对生态系统结构独特、脆弱性突出的干旱区,尚缺乏系统深入的 ESV 核算与多尺度综合分析。其次在驱动机制方面,传统的相关性分析和回归分析方法在揭示影响因素时存在局限性,无法清晰指明变量间的因果方向,也难以识别具体因素的重要程度和空间异质性。

河西走廊作为中国西部重要的生态安全屏障和经济发展走廊[16],蕴含着巨大的生态系统服务价值。然而,在气候变化与人类活动的双重压力下,该地区面临水资源短缺与土地荒漠化等问题,生态系统服务功能受到严重威胁。在中国强调以高质量生态环境支撑区域高质量发展的背景下,深入研究河西走廊 ESV 时空分异特征及驱动机制,对加强区域生态

保护、巩固西北生态安全屏障具有重要的现实意义[16]。基于此,本研究以河西走廊为研究区域,依托土地利用数据与修订的ESV当量因子,系统评估该地区ESV时空格局。针对传统方法在因果识别与空间异质性解析方面的局限,引入地理探测器与地理加权回归模型,从而更全面、精细地揭示ESV的空间分异特征及形成机制,为干旱区生态恢复与可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河西走廊位于甘肃省西北部,地处黄河以西,东起乌鞘岭,西至星星峡,南倚祁连山和阿尔金山,北依龙首山、合黎山和马鬃山,东西长约1 200 km,南北宽50 km以上[16],呈西北-东南走向的狭长廊道地形。主要涉及武威、金昌、张掖、酒泉和嘉峪关5市。该区深处欧亚大陆腹地干旱区,属温带大陆性气候,降水稀少、蒸发强烈,自东向西递减;日照时间长,干燥度自东向西递增。地貌垂直分异显著,自南向北依次为祁连山区、中部绿洲区和北部荒漠区,形成典型的"山地-绿洲-荒漠"复合生态系统[17],三大生态功能区既相对独立又密切联系。南部祁连山区高寒湿润,是重要牧业与水源形成区;中部绿洲区光热资源丰富,为灌溉农业核心地带,但水资源制约显著;北部荒漠区干旱缺水,植被稀疏,生态环境严酷。在此背景下,科学评估河西走廊ESV,有助于揭示"山地-绿洲-荒漠"生态系统的空间分异与协同机制,为协调水资源利用、绿洲农业发展与生态保护提供科学依据,对推进干旱区内陆河流域可持续发展、落实生态补偿机制具有重要参考价值。

1.2 数据来源

本文数据包括时空变化特征分析数据和影响因素分析数据。①时空变化特征分析选取2000,2005,2010,2015,2020和2023年数据,包括:30 m×30 m空间分辨率的土地利用数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心;粮食作物播种面积及产量数据,来源于《甘肃省统计年鉴》;粮食价格数据,来源于《全国农产品成本收益资料汇编》。②影响因素分析基于2023年数据,涵盖自然因素与社会经济因素。参考已有研究[12,14],共选取12个影响因子。其中,自然因素包括高程(X_1)、坡度(X_2)、年平均气温(X_3)、年平均降水(X_4)、NDVI(X_5);社会经济因素包括人口总数(X_6)、人口密度(X_7)、土地垦殖率(X_8)、人均耕地面积(X_9)、土地利用程度综合指数(X_{10})、人均GDP(X_{11})、地均GDP(X_{12})。影响因素数据来源情况详见表1。

表1 影响因素数据来源

Table 1 Data sources of influencing factors

因素类型	数据名称	数据说明	分辨率	数据来源
自然因素	高程	高程	30 m×30 m	地理空间数据云
	坡度	坡度	30 m×30 m	地理空间数据云
	年平均气温	年平均气温	1 km×1 km	国家青藏高原科学数据中心
	年平均降水	年平均降水	1 km×1 km	国家青藏高原科学数据中心
	NDVI	NDVI	1 km×1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心
社会经济因素	人口总数	人口总数		甘肃省统计年鉴
	人口密度	人口总数/区域土地总面积		甘肃省统计年鉴
	土地垦殖率	耕地总面积/区域土地总面积		中国科学院资源环境科学数据中心
	人均耕地面积	耕地总面积/人口总数		中国科学院资源环境科学数据中心
	土地利用程度综合指数	根据土地利用分级指数计算		中国科学院资源环境科学数据中心
	人均GDP	GDP总量/区域常住人口		甘肃省统计年鉴
	地均GDP	GDP总量/区域土地总面积		甘肃省统计年鉴

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化特征分析

单一土地利用动态度是指在一定时间内对研究区的某一土地利用类型的动态变化情况进行统计[18],计算公式为

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

式中:K为某一土地利用类型的单一动态度;U_a为起始时间所研究土地利用类型的面积(hm^2);U_b为结束时间所研究的土地利用类型面积(hm^2);T为研究时长(a)。

综合土地利用动态度是指在一定时间范围内整个研究区域土地利用变化的总体情况和变化程度,可以表示总体土地变化趋势[18],计算公式为

$$S=\left[\frac{\sum_{j=1}^{n}\Delta S_{ij}}{2\sum_{i=1}^{m}S_i}\right]\times\frac{1}{T}\times 100\% \quad (2)$$

式中:S为土地利用类型的综合土地利用动态度;S_i为研究初期第i类土地类型的面积(hm²);ΔS_{ij}为i地类转化为j地类的面积(hm²)。

土地利用程度综合指数:是衡量区域受人类活动影响的土地利用集约化水平,指数值越高人类活动强度越大,指数值越低自然状态保持越好。采用与后续ESV空间分析一致的9 km×9 km格网尺度计算。计算公式[19]为

$$L_a=100\sum_{j=1}^{n}A_j\cdot C_j \quad (3)$$

式中:L_a为格网单元的土地利用程度综合指数;A_j为格网单元内第j级土地利用类型所代表的分级指数;C_j为格网单元内第j级土地利用类型所占的比值。

1.3.2　生态系统服务价值评估

结合谢高地等[9,11]的研究,结合统计年鉴与《全国农产品成本收益资料汇编》,计算得出河西走廊的年平均粮食单产量(7 548.82 kg/hm²)和粮食平均单价(1.47元/kg),确定河西走廊单位面积ESV系数表(表2)。

表2　河西走廊生态系统服务价值系数

Table 2　Ecosystem service value coefficients of Hexi Corridor　　单位:元/hm²

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	1 639.04	449.93	308.52	842.02	9.64
	原料生产	771.31	1 034.84	453.15	469.21	28.92
	水资源供给	38.57	533.49	250.68	8 381.59	19.28
调节服务	气体调节	1 291.95	3 393.77	1 590.83	1 831.87	125.34
	气候调节	694.18	10 155.61	4 203.65	4 132.95	96.41
	净化环境	192.83	3 020.97	1 388.36	5 984.10	395.30
	水文调节	520.64	7 346.75	3 075.61	85 872.75	231.39
支持服务	土壤保持	1 986.13	4 132.95	1 937.92	2 082.54	144.62
	维持养分循环	231.39	314.95	154.26	160.69	9.64
	生物多样性	250.68	3 766.57	1 764.38	6 703.99	134.98
文化服务	美学景观	115.70	1 651.89	780.95	4 312.92	57.85

由表2计算河西走廊ESV,计算公式[13]为

$$\mathrm{ESV}=\sum P_i\cdot A_i \quad (4)$$

式中:ESV为河西走廊生态系统服务总价值(元);P_i为单位面积第i类用地类型的生态系统服务价值〔元/(hm²·a)〕;A_i为河西走廊用地类型的面积(hm²)。

$$\mathrm{ESV}_j=\sum P_{ji}\cdot A_i \quad (5)$$

式中:ESV_j为单项生态系统服务价值(元);P_{ji}为单位面积上第i类用地类型的生态系统单项服务价值〔元/(hm²·a)〕。

1.3.3　基于格网的ESV空间表达

格网尺度可揭示ESV空间异质性,精细化表达土地利用信息,为探究其空间分异规律与驱动机制提供支撑[20],故采用格网分析ESV空间特征。尺度选择采用多尺度比较法[20],依次构建1,3,5,9和10 km边长格网进行试验。发现小尺度格网(1 km,3 km)精度高但数据冗余且易受局部地类波动干扰;5 km格网虽平衡了精度与效率,却难以适配研究区宏观格局分析需求。综合考虑数据分辨率(30 m)、研究区面积及自然地理特征等,最终选用9 km×9 km格网作为基本分析单元。该尺度可兼顾数据精度与分析效率,保留主要地类ESV特征并精准揭示ESV空间分异规律。格网尺度下ESV的计算公式[21]为

$$\mathrm{ESVP}_k=\sum_{i=1}^{n}A_{ik}\cdot Z_i \quad (6)$$

式中:ESVP_k为第k个格网的生态系统服务总价值(元);A_{ik}为第k个格网中第i种地类的面积(hm²);Z_i为第i种地类的ESV当量(元/hm²);n为该格网内包含的地类数量。

1.3.4　地理探测器

地理探测器可有效探测空间分异性,并揭示其背后驱动因子对某一现象的影响[22]。为避免后续OLS和GWR模型因纳入因子过多产生的多重共线性问题,参考已有研究[12,14]引入该模型对影响因子进

行初步筛选，保留高解释力因子进入后续模型。计算公式为

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{7}$$

式中：q为驱动因子对ESV大小解释力的指标，$q\in[0,1]$；L为驱动因子的分层数量；N为所要研究区域的样本单元数；N_h为次一级区域层级h的样本单元数；h为自然数；σ^2为整个研究区所有格网单元ESV值的方差；σ_h^2为第h层内格网单元ESV值的方差。

1.3.5 普通最小二乘法(OLS)

OLS作为经典的多元线性回归技术，通过最小化残差平方和来拟合因变量(y_i)对自变量(x_i)的线性函数关系。本文利用OLS模型分析ESV与关键影响因子之间是否存在显著的线性关系，计算公式[23]为

$$y_i=\beta+\sum_{z=1}^{n}\beta_z x_{iz}+\varepsilon_i \tag{8}$$

式中：y_i为因变量；β为截距项；β_z为第z个自变量x_{iz}的回归系数；x_{iz}为第z个自变量在空间单元i处的取值；ε_i为随机误差项。

1.3.6 地理加权回归(GWR)

GWR是一种考虑地理位置差异对模型参数影响的回归分析方法，是以OLS为基础，本研究旨在揭示格网尺度下ESV驱动因素的空间异质性特征[12]。计算公式为

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_m\beta_m(u_i,v_i)x_{im}+\varepsilon_i \tag{9}$$

式中：y_i为被解释变量；目标区域i的空间坐标为(u_i,v_i)；$\beta_0(u_i,v_i)$为地理位置相关的截距项；x_{im}为解释变量；$\beta_m(u_i,v_i)$为在地理位置i上的回归系数；m为解释变量个数。

2 结果与分析

2.1 河西走廊土地利用变化特征

2.1.1 土地利用和动态度分析

由表3可得，研究期内河西走廊土地利用类型以未利用地和草地为主，建设用地和水域快速增长，耕地和林地波动变化。未利用地始终是核心地类，研究期内比例虽有减少，但仍占区域总面积的65%以上，凸显出河西走廊整体生态的脆弱性；草地作为第二大地类，研究期内有所减少，面积比例始终维持在20%以上；建设用地剧烈扩张，单一动态度达4.583%，反映出该区域处于快速开发建设阶段；水域增长明显，比例从0.910%升至1.539%，动态度为3.004%，反映水域扩张趋势持续增强；耕地和林地在研究期内波动变化，其动态度为0.488%和−0.078%，说明耕地略有增加，林地略有下降。研究区域综合土地利用动态度为0.110%，表明河西走廊土地利用变化的整体速度和强度非常低，土地利用格局相对稳定。

表3 河西走廊2000—2023年土地利用类型面积比例及动态度

Table 3 Area proportion and dynamic degree of land use types in Hexi Corridor from 2000 to 2023

土地利用类型	面积比例/%						单一动态度/%
	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年	2000—2023年
耕 地	5.586	5.990	6.337	6.196	6.381	6.213	0.488
林 地	3.043	3.029	3.023	3.028	3.035	2.988	−0.078
草 地	21.673	21.611	21.503	21.606	21.543	21.124	−0.110
水 域	0.910	0.901	0.984	0.933	1.090	1.539	3.004
建设用地	0.438	0.460	0.518	0.596	0.710	0.900	4.583
未利用地	68.350	68.009	67.635	67.641	67.241	67.236	−0.071
综合动态度	—	—	—	—	—	—	0.110

2.1.2 土地利用程度综合指数分析

为清晰反映河西走廊土地利用程度综合指数的空间分布特征，根据自然断点法将其划分为低值区、较低值区、中值区、较高值区、高值区5个区间(图1)。结果表明，其空间分布呈现“南高北低、东高西低”的分布格局，清晰地反映了从北部荒漠区到中部绿洲区再到南部祁连山区的土地利用强度梯度。其高值区主要分布在城镇开发建设和耕地、草地利用程度较高的中部绿洲区；较高值区和中值区主要分布在南部植被覆盖度较高，生态类型丰富的祁连山区；较低值区和低值区主要集中分布在北部受自然条件限制，未得到充分利用的荒漠区。

2.2 生态系统服务价值时空特征

2.2.1 生态系统服务价值时间特征分析

根据修正的河西走廊ESV系数表(表2)，计算得到研究期间各地类ESV(图2)。ESV整体呈增长趋

势,研究期间共增长 170.14 亿元。研究期间,河西走廊 ESV 的增长主要依靠水域和耕地。尤其是水域,共增加 188.07 亿元,成为区域 ESV 总量提升的核心支持。在此期间林地、草地和未利用地的 ESV 均有不同程度的减少。从土地类型来看,河西走廊 ESV 总量能够持续增长,主要归因于水域 ESV 的提升。

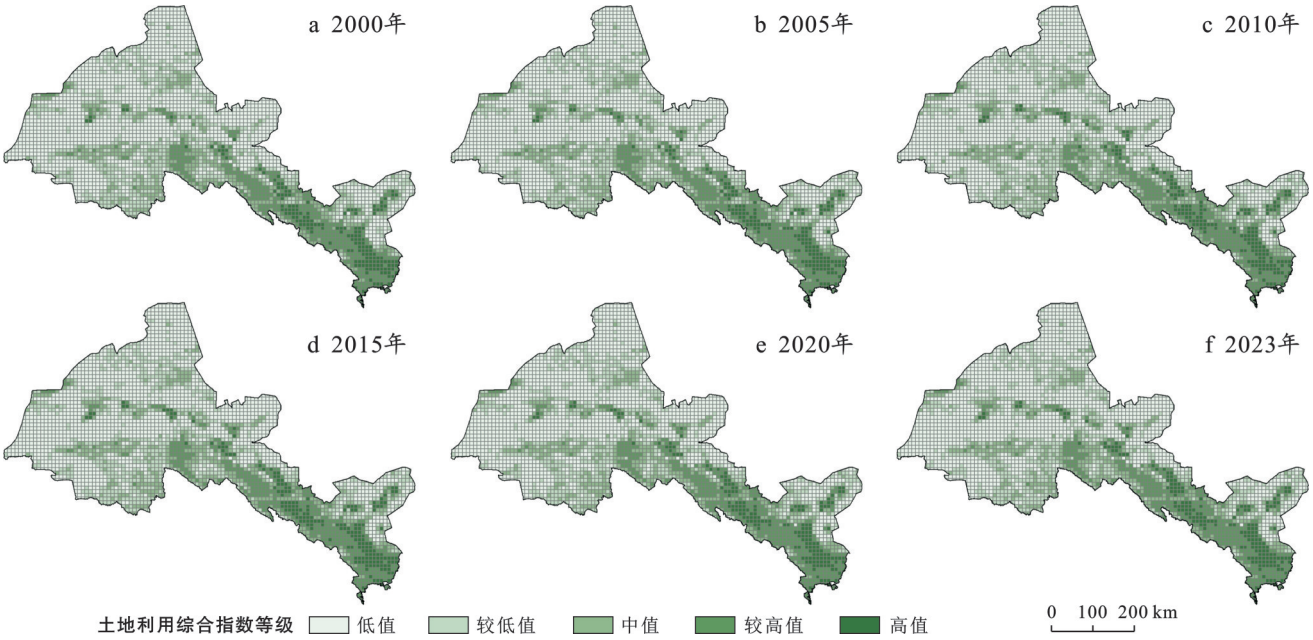


图 1　河西走廊 2000—2023 年土地利用程度综合指数

Fig.1　Spatial distribution of comprehensive land use degree index in Hexi Corridor from 2000 to 2023

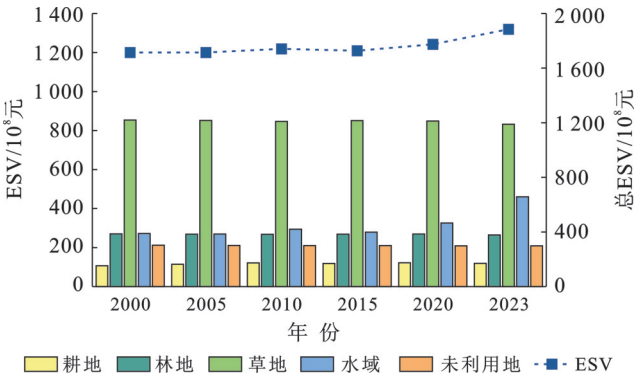


图 2　河西走廊 2000—2023 年土地利用类型生态系统服务价值(ESV)

Fig.2　Ecosystem service values (ESV) of land use types in Hexi Corridor from 2000 to 2023

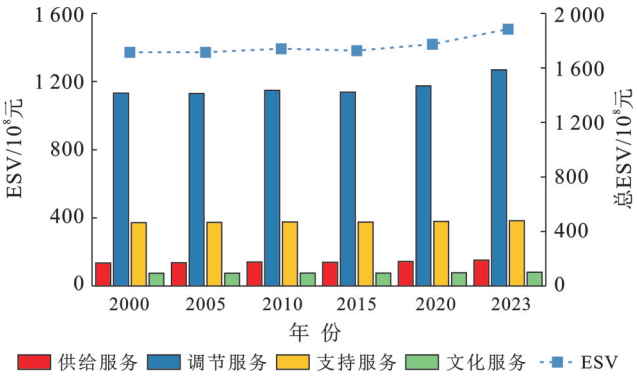


图 3　河西走廊 2000—2023 年各服务类型生态系统服务价值(ESV)

Fig.3　Ecosystem service value (ESV) by service type in Hexi Corridor from 2000 to 2023

从 ESV 的一级类型看(图 3),调节服务和支持服务是河西走廊 ESV 中最主要的类型,其价值量要远高于供给服务和文化服务。研究期各服务类型均有增长:调节服务增长 137.00 亿元,支持服务增长 10.61 亿元,供给服务增长 17.08 亿元,文化服务增长 5.45 亿元。调节服务占主导地位的原因在于其包含的水文调节和气候调节是河西走廊最主要的两项生态系统服务功能。从服务类型来看,河西走廊 ESV 增加主要依靠调节服务,其贡献率超过 60%。结合土地类型和服务类型分析可得,水域对该区域生态系统的改善有显著作用。

2.2.2　生态系统服务价值空间特征分析

为清晰反映河西走廊 ESV 的空间分布特征,根据自然断点法将 ESV 划分为低值区、较低值区、中值区、较高值区、高值区 5 个区间(图 4)。结果表明,ESV 空间分布在东部与西部、南部与北部呈现出极为明显的空间分布差异。由南部祁连山区到中部绿洲区再到北部荒漠区,其 ESV 逐步递减。其中,高值区域、较高值区与中值区主要分布在南部祁连山区和中部绿洲区,这些区域水域、草地、林地和耕地比例较高,对 ESV 的提升起关键作用;而低值区和较低值区主要集中于北部荒漠区,该区域未利用地广泛分布,其价值相对单一,且易发生水土流失、土地荒

漠化等问题，导致北部荒漠区ESV整体较低。

2.3 河西走廊生态系统服务价值影响因素

2.3.1 地理探测器结果与分析

基于地理探测器的结果如表4所示，12个初选因子均通过0.001水平的显著性检验，具备统计学分析意义。参考陈玉兰等[24]的q值分级体系，兼顾筛选精准性与全面性，本研究将$q>0.2$设为主要影响因子筛选阈值，可剔除低贡献因子并保留弱解释力有效驱动因子，避免关键因子遗漏或筛选范围泛化。经筛选，最终选取土地利用程度综合指数(X_{10})、年平均降水(X_4)、NDVI(X_5)、高程(X_1)、人口总数(X_6)、年平均气温(X_3)6个影响因子，开展后续分析。

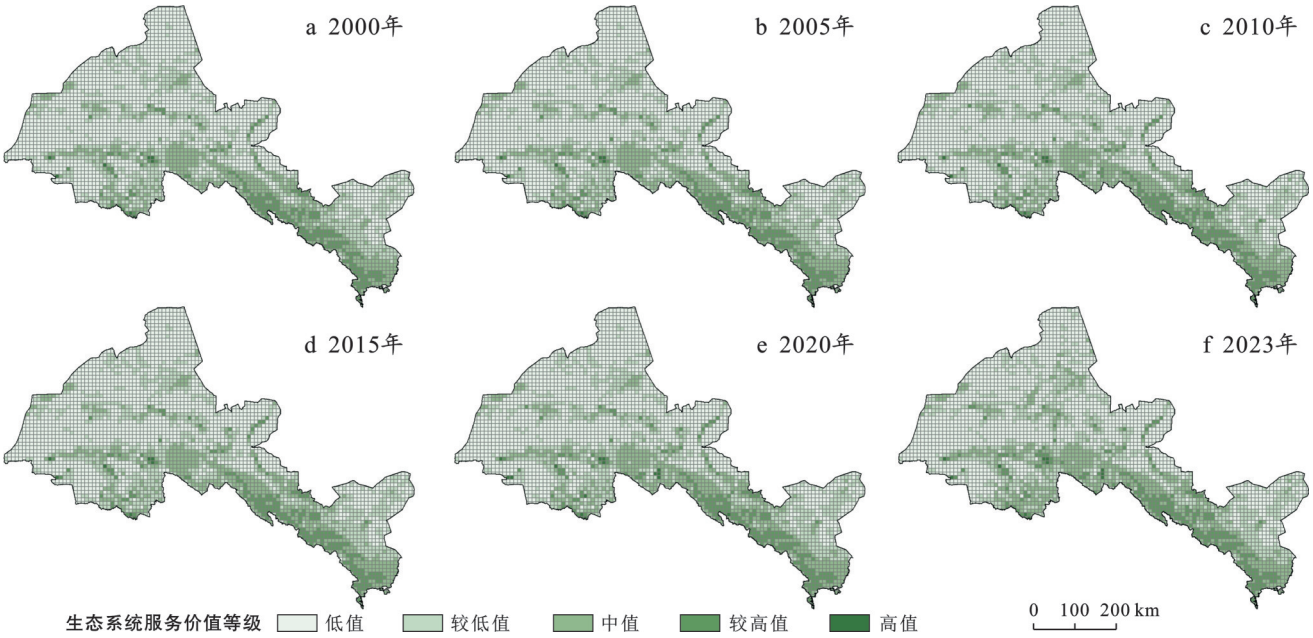


图4 河西走廊2000—2023年生态系统服务价值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecosystem service value in Hexi Corridor from 2000 to 2023

表4 地理探测器探测结果

Table 4 Results of geodetector analysis

探测因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
q值	0.236	0.148	0.228	0.406	0.304	0.230	0.149	0.102	0.143	0.504	0.168	0.122
p值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注：各探测因子符号及其对应名称分别为，高程(X_1)、坡度(X_2)、年平均气温(X_3)、年平均降水量(X_4)、NDVI(X_5)、人口总数(X_6)、人口密度(X_7)、土地垦殖率(X_8)、人均耕地面积(X_9)、土地利用程度综合指数(X_{10})、人均GDP(X_{11})、地均GDP(X_{12})。

2.3.2 OLS线性回归结果与分析

对6个主导因子进行OLS线性回归分析时，多重共线性会影响回归系数的有效性与解释力，需通过VIF进行检验。参考相关研究[12]，VIF阈值为7.5时可有效排除严重共线性，避免阈值过低过度剔除变量或过高残留共线性的问题，故本文采用VIF>7.5作为共线性判定标准。结果显示，年平均气温和高程之间存在多重共线性问题(VIF值均大于7.5)。剔除影响力较低的年平均气温进行二次回归分析。二次回归分析结果显示(表5)，各因子之间不存在多重共线性且联合F值通过0.001的显著性检验，模型具有统计学意义；Jarque-Bera结果显著，表明模型预测拟合存在局限(残差未正态分布)，需要引入GWR模型，以提升拟合效果。

2.3.3 基于GWR的影响因子空间异质性分析

考虑到OLS拟合结果不足，采用GWR模型进一步揭示各因子对因变量空间异质性的影响。构建GWR模型前需对ESV的空间关联性进行检验[14]。通过空间自相关分析发现，研究期内各年份Moran's I分别为0.656，0.654，0.654，0.651，0.640和0.644，表明河西走廊ESV存在显著空间集聚特征。基于OLS筛选后的5个主导因子进行GWR分析，结果详见表6。GWR模型的AICc值小于OLS模型、R^2和调整后的R^2值大于OLS模型，表明GWR模型的拟合度更优，因此选择GWR模型分析河西走廊ESV的影响因素。

通过构建GWR模型，获取各主导因子的回归系数，以此表征不同自变量对因变量的作用强度与作用方向。在此基础上，运用ArcGIS中的自然断点法

对主导因子的回归系数进行空间可视化表达,从而直观反映各影响因子作用的空间异质性特征。其结果如图5所示,由图5a可得,土地利用程度综合指数与ESV呈正相关,其回归系数由西北向东南递减。东南部呈现“高指数-低影响”特征,主要由于城镇开发建设和耕地、草地的利用程度高,较强的人类活动抑制了生态系统的自然恢复功能,导致生态提升空间有限。相比之下,西北部土地利用程度综合指数较低,但生态响应更敏感。该区域以未利用地为主,分布有祁连山水源涵养区和绿洲区,合理的土地利用调控与生态保护能促进生态系统服务。由图5b可得,年平均降水量与ESV以正相关为主,局部呈负相关。在河西走廊干旱区,降水作为关键限制性因子,其增多可补给水资源、促进植物生长与生态功能提升,进而显著提高ESV。负相关区域主要分布于酒泉市部分地区及武威市南部,这些区域地理环境特殊,生态系统先天脆弱、土壤保持能力弱,降雨量增多反而会加剧水土流失等问题,破坏原有生态平衡,使ESV核心功能下降。NDVI表征植被的覆盖程度,河西走廊NDVI总体偏低,呈“山区及绿洲区高、荒漠区低、自东南向西北递减”的空间分布格局[25]。由图5c可得,NDVI与ESV整体表现为自东南部正相关转变为西北部负相关。东南部山区降水充足,植被长势较好,NDVI对ESV呈正向促进作用。西北部自然条件脆弱、水资源匮乏、植被覆盖程度较低,导致NDVI与ESV整体呈负相关。由图5d可知,高程与ESV整体表现为,由东南部正相关向西北部过渡为负相关。酒泉市大部分区域呈负相关,但肃北县和玉门市部分区域因地处祁连山北坡,海拔升高带来更优的水热与植被覆盖,则呈显著正相关。相反,如民勤县等内陆干旱区则表现为典型负相关。正相关区域,高程通过改善水热条件,强化水源涵养、气候调节等生态功能,会对ESV产生积极影响。负相关区域,高程增加会加剧蒸发与土壤水分流失,导致植被退化与生态系统服务功能减弱。由图5e可得,人口总数与ESV整体呈负相关,局部呈正相关,且回归系数波动较大。负相关区域以河西走廊东南部和酒泉中部为主,人口数量增多会加剧对自然资源的消耗与生态空间的占用,进而抑制ESV;正相关区域集中于酒泉南部(阿克塞、肃北),该区域地广人稀,人类干扰程度要远低于河西走廊中部的农业市县。并且阿克塞和肃北作为重要生态功能区与水源涵养区,涵盖了祁连山西段冰川、高寒草甸等。其水源涵养与生物多样性维护等价值构成ESV核心,这也是系数波动显著的主要原因。

表5　OLS模型测算结果

Table 5　Estimation results of OLS model

变量	系数	标准差	t值	p值	VIF
截距	0.430 2	0.009 2	46.824 9	0.000 0*	—
土地利用程度综合指数(X_{10})	0.526 6	0.022 6	23.311 2	0.000 0*	2.277 2
年平均降水量(X_4)	0.143 7	0.011 9	12.039 7	0.000 0*	2.798 8
NDVI(X_5)	0.012 0	0.011 3	1.065 6	0.551 5	2.490 6
高程(X_1)	0.101 3	0.010 3	9.798 3	0.000 0*	2.096 9
人口总数(X_6)	−0.058 8	0.008 5	−6.927 2	0.000 0*	1.413 6

注:*表示在1%的水平上通过显著性检验。

表6　GWR和OLS模型对比结果

Table 6　Comparison results between GWR and OLS models

模型	AICc	R^2	调整后R^2
OLS	3 551.191 3	0.488 4	0.487 6
GWR	2 715.920 1	0.624 3	0.609 0

注:AICc为修正赤池信息准则(corrected Akaike information criterion),用于衡量模型拟合优度与复杂度的平衡,数值越小表示模型表现越优。

3　讨　论

河西走廊地处西北内陆干旱区,形成了独特的“山地-绿洲-荒漠”复合生态系统[17]。本研究揭示了该区域ESV呈现“南高北低、东高西低”的空间格局。这一格局是其复合系统结构在自然本底与人类活动双重驱动下,通过复杂的生态水文过程与社会经济过程共同作用的结果。以下将结合本研究结果,以三大生态系统为切入点进行讨论。

南部祁连山区是ESV的高值集中区,其高价值形成与维持的核心是高效的水文调节过程。该区域以调节服务为主导,冰川、积雪与林草植被共同构成的天然水源涵养体系是支撑高ESV的关键。GWR结果表明,ESV与降水量、NDVI整体呈正相关,这与刘越等[26]指出的祁连山水源涵养依赖山地降水与冰川融水的结论一致;中部绿洲区是人类活动的集中区,ESV变化体现人类干预的双重效应,核心机制是生态保护与开发建设间的动态平衡。一方面,生态

保护可提升植被生产力与生态承载力，从而协同增强供给与气候调节等服务，石福习等[17]的研究也支持这一正向机制。另一方面，本研究发现人口总数与ESV呈负相关，土地利用强度提升对ESV正向带动有限，表明建设用地无序扩张会挤占生态空间、破坏生态系统本底功能。因此，绿洲ESV变化实则反映了生态保护与地方发展需求的动态平衡。北部荒漠区ESV长期低位且对降水响应不敏感，根本机制在于其极其脆弱的生态本底抑制了生态系统的物质与能量流动，导致系统功能维持在低水平。本研究发现局部降水增多反而会引发水土流失等问题，表明在恢复能力很弱的系统中，仅改善单一要素反而可能破坏其脆弱的平衡，这与薛健等[16]对河西地区生态脆弱性的判断一致。在此机制下，大规模人工干预并不可行，应减少人为干扰以自然恢复为主，核心目标是遏制生态退化、维持系统基本稳定。

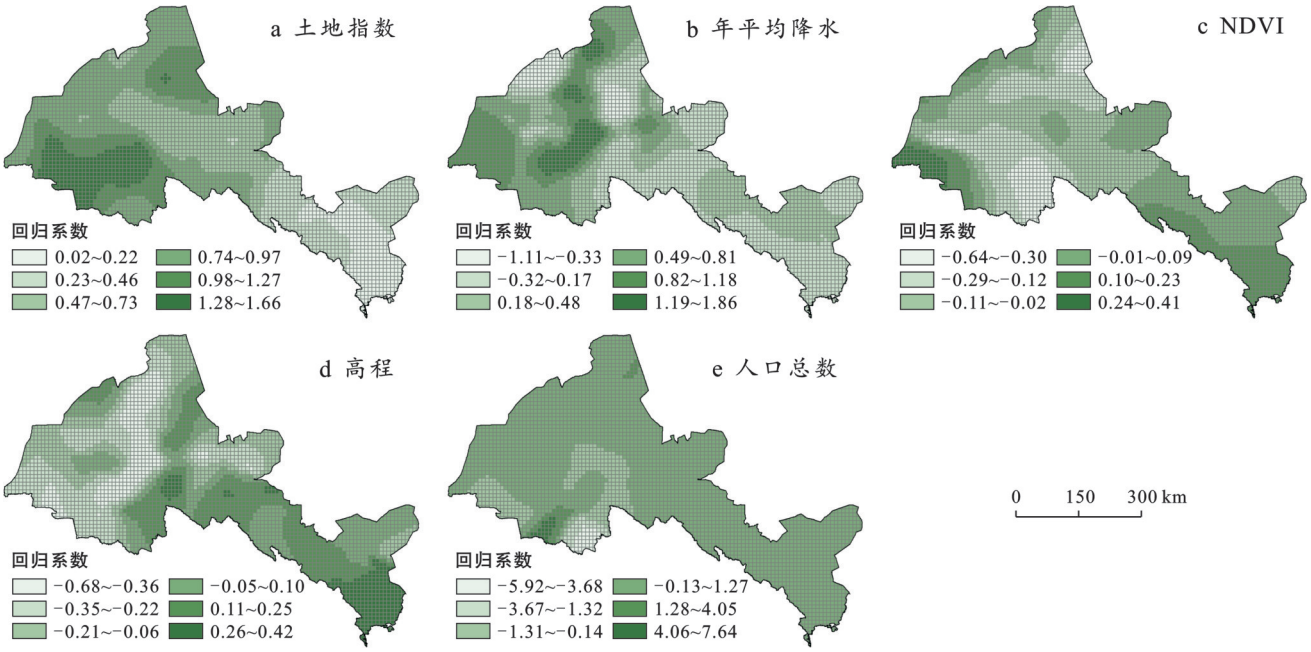


图5 基于GWR模型的各影响因子回归系数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of regression coefficients of influencing factors based on GWR model

需要强调的是，山区、绿洲与荒漠并非孤立单元，而是以水资源为纽带，构成“水源地—用水区—受影响区”的完整链条。祁连山作为水源涵养区是复合系统水源供给起点；绿洲的人类用水与土地利用方式决定水资源分配效率；而北部荒漠区所能获得的生态水量，正是其维系脆弱稳定的关键。本研究揭示的ESV空间分异格局正是该链条各环节综合作用的结果，姚礼堂等[27]的研究也印证了这一系统关联性。因此，需转向全域系统治理，统筹全流域水资源调配与生态保护，构筑生态过渡带，避免碎片化管理。

本研究对河西走廊ESV时空演变及驱动机制进行了探讨，但仍存在一些不足。①政策与管理因素因难以量化而未纳入影响因素分析，仅在讨论部分予以阐述，未来研究将探索其量化方法；②受数据精度所限，地下水、土壤湿度等变量未纳入分析，后续将寻求高精度数据进一步完善；③ESV评估基于通用当量因子，在刻画本地生态系统时可能存在偏差，未来将进一步优化该方法。

4 结 论

（1）2000—2023年河西走廊ESV总量呈增长趋势。从地类看，水域和耕地对ESV价值提升起主导作用，其中水域贡献最为突出，林地、草地和未利用地ESV有所下降。从服务类型看，调节服务与支持服务是ESV的主体组成部分，尤其是调节服务的增长主导了全区ESV的变化趋势，凸显出水域生态系统的关键作用及保护的迫切性。

（2）2000—2023年河西走廊ESV呈现“南高北低，东高西低”的空间分布特征，高值区、较高值区与中值区主要分布于南部祁连山区和中部绿洲区这些植被覆盖度较好的区域，低值区和较低值区主要分布于北部荒漠区。

（3）土地利用程度综合指数、年平均降水量、NDVI、高程和人口总数是影响河西走廊ESV的主要驱动因子，地区ESV变化是自然因素和社会经济因素共同作用的结果。地理加权回归结果表明，土地

利用程度综合指数与ESV呈正相关;年平均降水量与ESV整体呈正相关,局部呈负相关;NDVI、高程与ESV由东南部正相关转变为向西北部负相关;人口总数与ESV整体呈负相关。

参考文献(References)

[1] 刘世梁,董玉红,王方方,等.生态系统服务价值评估在生态修复中的应用[J].中国生态农业学报,2023,31(8):1343-1354.
Liu Shiliang, Dong Yuhong, Wang Fangfang, et al. Application of ecosystem service valuation in ecological restoration [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(8):1343-1354.

[2] 刘永强,廖柳文,龙花楼,等.土地利用转型的生态系统服务价值效应分析:以湖南省为例[J].地理研究,2015,34(4):691-700.
Liu Yongqiang, Liao Liuwen, Long Hualou, et al. Effects of land use transitions on ecosystem services value: A case study of Hunan Province [J]. Geographical Research, 2015,34(4):691-700.

[3] Kalinauskas M, Bogdzevič K, Gomes E, et al. Mapping and assessment of recreational cultural ecosystem services supply and demand in Vilnius (Lithuania) [J]. Science of the Total Environment, 2023,855:158590.

[4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1998,25(1):3-15.

[5] SCEP(Study of Critical Environmental Problems). Man's Impact on the Global Environment Assessment and Recommendations for Action [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1970.

[6] Holdren J P, Ehrlich P R. Human Population and the Global Environment: Population growth, rising per capita material consumption, and disruptive technologies have made civilization a global ecological force [J]. American Scientist, 1974,62(3):282-292.

[7] 张永民,赵士洞.千年生态系统评估项目的后续计划:将知识转化为行动的全球战略[J].自然资源学报,2010,25(3):522-528.
Zhang Yongmin, Zhao Shidong. The millennium ecosystem assessment follow-up: A global strategy for turning knowledge into action [J]. Journal of Natural Resources, 2010,25(3):522-528.

[8] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):607-613.
Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999,19(5):607-613.

[9] 谢高地,张钇锂,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001,16(1):47-53.
Xie Gaodi, Zhang Yili, Lu Chunxia, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China [J]. Journal of Natural Resources, 2001,16(1):47-53.

[10] 李双成.生态系统服务研究思辨[J].景观设计学,2019,7(1):82-87.
Li Shuangcheng. Reflections on ecosystem service research [J]. Landscape Architecture Frontiers, 2019,7(1):82-87.

[11] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(8):1243-1254.

[12] 王奕淇,孙学莹.黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素[J].环境科学,2024,45(5):2767-2779.
Wang Yiqi, Sun Xueying. Spatiotemporal evolution and influencing factors of ecosystem service value in the Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2024,45(5):2767-2779.

[13] 张剑飞,阳文锐,李晶晶,等.北京市生态系统服务价值时空变化及其驱动力[J].生态学报,2025,45(1):306-318.
Zhang Jianfei, Yang Wenrui, Li Jingjing, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of ecosystem services value in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(1):306-318.

[14] 耿甜伟,陈海,张行,等.基于GWR的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J].自然资源学报,2020,35(7):1714-1727.
Geng Tianwei, Chen Hai, Zhang Hang, et al. Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi Province based on GWR [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(7):1714-1727.

[15] Jing Xiaodong, Tian Guiliang, He Yuchen, et al. Spatial and temporal differentiation and coupling analysis of land use change and ecosystem service value in Jiangsu Province [J]. Ecological Indicators, 2024,163:112076.

[16] 薛健,李宗省,陈雪娇,等.2000—2020年河西地区生态系统服务功能时空变化与影响因素分析[J].环境生态学,2023,5(7):1-12.
Xue Jian, Li Zongxing, Chen Xuejiao, et al. Spatial and temporal variation of ecosystem service functions in the Hexi region from 2000 to 2020 and its influence factors analysis [J]. Environmental Ecology, 2023,5(7):1-12.

[17] 石福习,宋长春,赵成章,等.河西走廊山地-绿洲-荒漠

复合农田生态系统服务价值变化及其影响因子[J].中国沙漠,2013,33(5):1598-1604.
Shi Fuxi, Song Changchun, Zhao Chengzhang, et al. Dynamic of service value of farmland meta-ecosystem of mountain, oasis and desert and multiple regression analysis of the influence factors in the Hexi Corridor, Gansu, China [J]. Journal of Desert Research, 2013,33(5):1598-1604.

[18] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):81-87.
Wang Xiulan, Bao Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research [J]. Progress in Geography, 1999,18(1):81-87.

[19] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(2):105-111.
Zhuang Dafang, Liu Jiyuan. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China [J]. Journal of Natural Resources, 1997,12(2):105-111.

[20] 杨光宗,吕凯,李峰.基于格网尺度的南昌市土地利用变化及生态系统服务价值时空相关性分析[J].中国土地科学,2022,36(8):121-130.
Yang Guangzong, Lyu Kai, Li Feng. Spatial and temporal correlation analysis of land use change and ecosystem service value in Nanchang City based on grid scale [J]. China Land Science, 2022,36(8):121-130.

[21] 丁延龙,刘丽梅,刘斌,等.格网尺度下内蒙古库布齐七星湖国家沙漠公园生态系统服务价值时空演化特征[J].干旱区资源与环境,2024,38(9):106-114.
Ding Yanlong, Liu Limei, Liu Bin, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem service value in Inner Mongolia Kubuqi Qixing Lake National Desert Park at a grid scale [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024,38(9):106-114.

[22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[23] McMillen D P. Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships [J]. American Journal of Agricultural Economics, 2004,86(2):554-556.

[24] 陈玉兰,焦菊英,田红卫,等.黄土高原归一化植被指数与自然环境因子的空间关联性:基于地理探测器[J].生态学报,2022,42(9):3569-3580.
Chen Yulan, Jiao Juying, Tian Hongwei, et al. Spatial correlation analysis between vegetation NDVI and natural environmental factors based on geographical detector on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(9):3569-3580.

[25] 鲁晖.2000—2017年河西地区植被覆盖的时空过程分析[D].甘肃 兰州:兰州大学,2019.
Lu Hui. The study on the spatio-temporal process of vegetation coverage in Hexi region from 2000 to 2017 [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2019.

[26] 刘越,李雨珊,单姝瑶,等.甘肃祁连山国家级自然保护区水源涵养量的时空变化[J].草业科学,2021,38(8):1420-1431.
Liu Yue, Li Yushan, Shan Shuyao, et al. Spatiotemporal variability in the water conservation amount in Gansu Qilian Mountain National Nature Reserve [J]. Pratacultural Science, 2021,38(8):1420-1431.

[27] 姚礼堂,张学斌,周亮,等."山地-绿洲-荒漠"复合系统土地利用变化的生态系统服务权衡与协同效应:以张掖市为例[J].生态学报,2022,42(20):8138-8151.
Yao Litang, Zhang Xuebin, Zhou Liang, et al. Ecosystem service tradeoffs and synergies effects of land use change in mountain-oasis-desert complex system: A case study of Zhangye City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(20):8138-8151.

(上接第423页)

[29] 郑林子,门茂娟,郑咏杰.中国城市人类发展指数的空间测算与区域不平等[J].地理科学进展,2025,44(11):2352-2368.
Zheng Linzi, Men Maojuan, Zheng Yongjie. The spatial measurement of human development index and regional inequality in Chinese cities [J]. Progress in Geography, 2025,44(11):2352-2368.

[30] 邹利林,林程,王建英,等.中国城乡土地利用公平测评及时空跃迁与优化路径[J].地理学报,2025,80(11):2847-2868.
Zou Lilin, Lin Cheng, Wang Jianying, et al. Spatiotemporal characteristics and optimization path of land use equity between urban and rural areas in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2025,80(11):2847-2868.

[31] 王韧,钟颖宁,胡锡亮.中国农业保险高质量发展的时空格局及障碍因子识别[J].经济地理,2025,45(10):192-203.
Wang Ren, Zhong Yingning, Hu Xiliang. Spatiotemporal pattern and obstacle factor identification of high-quality development of agricultural insurance in China [J]. Economic Geography, 2025,45(10):192-203.