

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.011; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.011.

刘迪, 郭琳, 陈海, 等. 黄河流域生态系统服务与居民福祉的多类型关系及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 372-382, 391.

Liu Di, Guo Lin, Chen Hai, et al. Multi-type relationships between ecosystem services and resident well-being and their driving factors in Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 372-382, 391.

黄河流域生态系统服务与居民福祉的多类型关系及驱动因素

刘迪^{1,2}, 郭琳¹, 陈海³, 史琴琴⁴, 吴孔森^{1,2}

(1. 河南师范大学 旅游学院, 河南 新乡 453007; 2. 河南省太行山文化与旅游研究院, 河南 新乡 453007;

3. 西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 4. 山西财经大学 资源型经济转型发展研究院, 太原 030006)

摘要: [目的] 厘清黄河流域生态系统服务与居民福祉的多类型关系及其驱动因素, 为推进黄河流域生态保护和高质量发展提供科学参考。[方法] 以黄河流域(河南段)为例, 运用空间自相关、耦合协调度、相对发展度3种方法测度2000—2022年生态系统服务和居民福祉多类型关系的时空演变特征, 采用随机森林模型探究3类关系驱动因素差异, 在分区基础上提出差异化空间治理方案。[结果] (1) 研究区生态系统服务价值小幅波动下降, 呈现西南高、东北低的空间分布特征; 居民福祉指数波动上升, 呈现三核驱动、两翼滞后的空间分布格局, 区域差异逐渐缩小。(2) 生态系统服务—福祉空间关联由显著正向空间集聚逐渐转为随机分布, 且东北部平原农区L—L模式集聚; 耦合协调性逐渐提升, 呈西南高、东北低的空间特征; 相对发展状态存在非均衡性, 逐步向良性互动方向演进。(3) 生态系统服务—福祉多类型关系驱动因素存在明显不同。地形起伏度起决定性作用, 其他因素则各有侧重。(4) 生态系统服务—福祉多类型关系的组合存在空间异质性。[结论] 研究区生态系统服务与福祉多类关系及其驱动因素空间差异明显, 需聚焦区域核心矛盾, 制定差异化治理路径, 通过多维关系协同优化实现人地系统可持续发展。

关键词: 生态系统服务; 居民福祉; 关系类型; 随机森林; 黄河流域(河南段)

中图分类号: K901

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0372-11

Multi-type relationships between ecosystem services and resident well-being and their driving factors in Yellow River Basin

Liu Di^{1,2}, Guo Lin¹, Chen Hai³, Shi Qinqin⁴, Wu Kongsen^{1,2}

(1. School of Tourism, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China;

2. Henan Provincial Institute of Taihang Mountain Culture and Tourism, Xinxiang, Henan 453007, China;

3. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 4. Institute of

Resource-Based Economic Transformation Development, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China)

Abstract: [Objective] This study clarifies the multi-type relationships between ecosystem services (ES) and resident well-being in the Yellow River Basin and their driving factors, aiming to provide scientific references for promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. [Methods] Taking the Henan section of the Yellow River Basin as a case study, spatial autocorrelation, coupling coordination degree, and relative development degree were employed to measure the spatiotemporal evolution characteristics of multi-type relationships between ecosystem services and resident well-being from 2000 to 2022. A random forest model was used to investigate the differences in driving factors among these three types of relationships, and differentiated spatial governance strategies were proposed based on zoning. [Results] (1) The ecosystem service

收稿日期: 2025-04-08

修回日期: 2025-04-27

接受日期: 2025-05-05

资助项目: 河南省哲学社会科学规划项目“黄河滩区(河南段)生态移民的生计能力演化及其福祉效应研究”(2024CJJ023)

第一作者: 刘迪(1993—), 男, 河南郑州人, 博士, 讲师, 研究方向为生态系统服务与人类福祉。E-mail: 2022136@htu.edu.cn

通信作者: 史琴琴(1990—), 女, 山西临汾人, 博士, 副教授, 研究方向为生态系统服务与区域发展。E-mail: shiqinqin_1314@126.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

value in the study area showed a slight fluctuating decline, with a spatial distribution pattern of higher values in the southwest and lower values in the northeast. Meanwhile, the resident well-being index showed a fluctuating upward trend, exhibiting a spatial distribution pattern characterized by three core-driven areas with two wings lagging behind, and regional disparities gradually narrowed. (2) The spatial association between ecosystem services and well-being gradually transitioned from significantly positive clustering to random distribution, with low—low (L—L) pattern clustering observed in the agricultural area of the northeastern plain. The coupling coordination degree gradually improved, exhibiting a spatial pattern of higher values in the southwest and lower values in the northeast. The relative development state demonstrated non-equilibrium state, gradually evolving toward a positive interactive trajectory. (3) The driving factors of multi-type relationships between ecosystem services and well-being exhibited notable similarities and differences. Terrain undulation played a decisive role, while other factors had varying emphases. (4) The combinations of multi-type relationships between ecosystem services and well-being exhibited spatial heterogeneity. **[Conclusion]** The multi-type relationships between ecosystem services and well-being, along with their driving factors, show pronounced spatial differences in the study area. It is essential to focus on the region's core conflicts and develop differentiated governance strategies, thereby achieving sustainable development of the human-land system through coordinated optimization of these multidimensional relationships.

Keywords: ecosystem service; resident well-being; relationship types; random forest; Yellow River Basin (Henan section)

生态系统服务(Ecosystem Service, ES)是自然生态系统提供给人类的各种惠益,人类福祉(Human Well-being, HWB)则是表征生活水平的多维概念,人类通过利用自然生态系统的各种资源和服务来提升人类福祉。21世纪以来,全球工业化与城镇化进程加速引致了生态系统的过度退化,直接威胁粮食安全、水资源供给和公共卫生等人类福祉底线^[1]。中国政府始终将增进人类福祉作为社会主义建设的核心目标,同时将生态文明建设提升至国家战略高度,统筹推进生态保护与民生改善。在此背景下,厘清ES与人类福祉的关系及其协同路径成为当前研究的热点问题^[2]。目前,研究者大多聚焦单一关系模式探索两者的时空演变及驱动机制,取得了丰硕的研究成果^[3]。然而已有研究表明,ES与人类福祉的关系十分复杂,会随指标、研究区和时空尺度而变,仅从单一关系类型出发,难以表征其复杂的内在机理,更缺乏针对性空间管控措施^[4]。鉴于此,本文以ES与福祉权衡及其变化明显的黄河流域(河南段)为例,分析该区域ES与福祉的多类型关系,探讨ES与福祉的多类型关系协同调控路径,以期ES与福祉关系研究提供新思路。

千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)框架发布以来,ES与福祉的关系研究成为生态学和地理学的核心议题之一,相关研究主要聚焦3个方面。首先,ES和福祉的定量测度是揭示两者关系的基础。采用物质法、价值法、

能值法评估ES已得到学界广泛应用^[5];同时,基于人类发展指数、需求层次理论、能力理论以及MA福祉框架等构建指标体系已经成为评估人类福祉的主流方法^[6]。目前,在ES与福祉关系研究中,ES测度以价值量法为主,福祉评估则采用更加简化的多维指标^[7]。其次,ES和福祉关系的定量揭示。ES与人类福祉之间具有高度非线性复杂关系^[8],现有研究针对两者的定量关系测度大多关注数值相关关系、空间相关关系、耦合协调关系以及相对发展关系等多种类型^[9]。例如,有研究采用地理加权回归系统分析了中国县域ES与福祉关系,结果表明两者局部尺度关系存在显著空间异质性^[10];也有研究利用Spearman相关性探究ES与福祉的关系^[11];同时,基于“生态—福祉”弹性系数模型的研究表明ES供需平衡与居民福祉的耦合关系会随着空间尺度、时间范围变化表现出不同类型^[12]。当前对于ES与福祉的研究多聚焦单一关系,亟需整合多类型关系进行系统性比较,以更好地理解ES与福祉关系的内在逻辑。最后,ES与福祉关系驱动因素的探究。目前,ES与福祉关系驱动因素研究存在一些不足。一方面,系统性定量分析相对匮乏,已有研究多采用系统动力学模型、时空地理加权回归等方法探讨ES与福祉关系的驱动因素,但受研究区域与要素类型限制,其结论的区域适用性存在差异^[13-14];另一方面,现有成果多局限于单一影响路径解析,例如,有研究采用结构方程模型发现供给服务对福祉有显著积极影响^[15];亦有研究

通过回归分析发现家庭规模、教育水平和生态补偿是产生高福祉—低ES依赖的关键因素^[16],却尚未系统解析多维交互机制的差异。因此,本文考虑多维关系视角,揭示ES与居民福祉关系的差异化驱动因子,提出多类型关系作用下ES与福祉的协同调控路径,从而实现区域差异化空间治理。

作为生态脆弱区与经济发展区的交互区域,黄河流域肩负着生态保护和民生增进的双重责任。尤其是人口高度集聚区与重要粮食主产区的黄河流域(河南段),ES与居民福祉的供需矛盾异常尖锐。厘清黄河流域(河南段)ES与居民福祉的多类型关系及驱动因素,提出针对性空间调控路径,对提高当地居民福祉、筑牢黄河流域生态屏障具有重要战略意义。鉴于此,本文以黄河流域(河南段)为研究区,利用空间自相关、耦合协调模型及相对发展度对ES与居民福祉的多类型关系进行系统分析,利用随机森林模型探究不同关系的驱动因素,以期ES与福祉的关系揭示提供理论认识,同时为黄河流域统筹生态保护与福祉改善提供可操作的空间治理路径。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域(河南段)地处黄河中下游交界区域,总面积为3.62万km²,占河南省面积的21.68%,涵盖郑州市、洛阳市等7个地市45个县区(图1)。2022年经济总量与常住人口分别占全省50.85%和42.06%。地势西高东低,处山地、丘陵与平原的过渡地带,气候具有很强的脆弱性和不稳定性,城市内涝、干旱等气象灾害频发。西南山地丘陵区生物多样性丰富,承担重要的水源涵养与生态屏障功能,却因地形阻隔与交通基础设施滞后,居民生活水平低于全省均值。东部滩区地形平坦,土壤肥沃,是国家粮食生产核心区,却面临耕地资源紧张、生态空间缩减等突出问题。综上,研究区生态保护与经济发展矛盾突出,为探究ES与福祉的多类型关系及其驱动因素提供了较好的研究平台。

1.2 数据来源

研究数据主要包括黄河流域(河南段)的地理环境数据和社会经济数据。环境要素数据中2000年、2010年及2022年的土地利用数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>),该数据基于Landsat遥感影像为数据源,空间分辨率为30m;DEM数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),空间分辨率为30m;气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>),空间分辨率为1km;NDVI数据和行政区划数据源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为30m;PM2.5数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。社会经济数据主要来自《河南统计年鉴》、河南省人口普查公报、黄河流域(河南段)所涉城市的城市统计年鉴与国民经济及社会发展统计公报,缺失数据通过线性内插获取。地理坐标系统一采用GCS_Xian_1980。

cn),空间分辨率为1km;NDVI数据和行政区划数据源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为30m;PM2.5数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。社会经济数据主要来自《河南统计年鉴》、河南省人口普查公报、黄河流域(河南段)所涉城市的城市统计年鉴与国民经济及社会发展统计公报,缺失数据通过线性内插获取。地理坐标系统一采用GCS_Xian_1980。

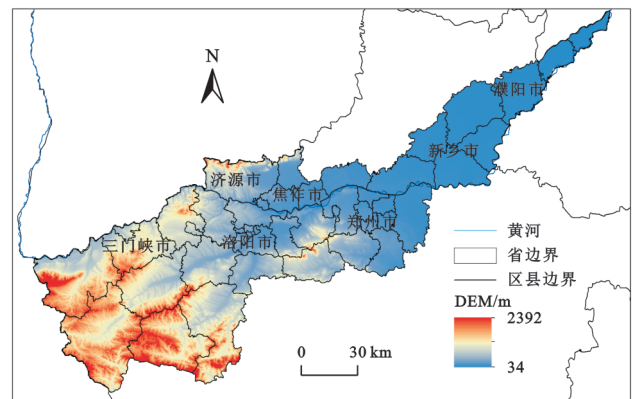


图1 研究区地理位置与数字高程
Fig. 1 Geographical location and digital elevation of the study area

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值评估

本文采用谢高地提出的当量因子法评估黄河流域(河南段)生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)^[17]。根据土地利用类型将研究区生态系统划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6种用地类型,并以2015年改进的中国不同生态系统单位面积ESV当量表为依据^[18],计算黄河流域(河南段)ESV(表1)。其中耕地当量对应农田当量,单位面积耕地ESV取粮食单产市场价值的1/7,以此作为耕地ESV系数。结合黄河流域(河南段)的农作物具体情况,选取稻谷、小麦、大豆和玉米作为主要粮食作物。林地当量对应森林当量,未利用地对应荒漠当量,草地水域分别取对应当量,默认建设用地不提供ESV^[18]。

2.2 居民福祉评估

本文基于马斯洛人类需求理论,综合研究区特征,从物质需求、经济需求、健康需求、社会需求、环境需求出发构建居民福祉指标体系(表2)^[19]。其中,物质需求是人类生存发展所依赖的基本物质条件,选取3个指标分别反映居民对粮食、蔬菜和水资源需求的满足情况。经济需求指居民所拥有的经济资源,3个指标分别反映居民财富水平、城乡发展均衡

性与公正性、居民生活水平与消费结构。健康需求维度的 3 个指标主要说明医疗与养老的保障,从而反映居民健康需求的满意程度。社会需求反映人们对文化与教育方面的需求,选取万人中小学数量、中学在校学生人均专职教师数、百人公共图书馆藏书,反

映居民接受教育的程度及文化水平。环境需求是居民对生活环境舒适度、满意度的需求。生活污水与垃圾处理率说明居民对生态环境的保护程度,PM2.5 用于衡量空气质量。在指标体系构建基础上使用熵权法进行指标聚合和居民福祉指数的计算。

表 1 生态系统服务价值当量表
Table 1 Ecosystem service value equivalents

生态系统服务类型		单位面积生态系统服务价值/(元·hm ⁻²)				
一级分类	二级分类	耕地	林地	草地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	834.28	187.90	172.87	496.06	7.52
	原料生产	187.90	435.93	255.54	278.09	22.55
调节服务	气体调节	668.92	1435.56	909.44	1007.14	82.68
	气候调节	353.25	4291.64	2397.60	2217.22	75.16
	水文调节	1127.40	2810.98	1758.74	47531.18	157.84
支持服务	废物处理	105.22	1255.17	789.18	3442.33	233.00
	土壤保持	390.83	1743.71	1104.85	1217.59	97.71
文化服务	生物多样性	127.77	1593.39	1007.14	3915.84	90.19
	美学景观	60.13	698.99	443.44	2487.80	37.58

表 2 居民福祉指标体系及权重
Table 2 Indicator system and weights of resident well-being

一级指标	二级指标	单位	权重	方向
物质需求	人均粮食占有量	kg/人	0.074	+
	人均蔬菜消耗量	kg/人	0.022	+
	人均水资源占有量	t/人	0.038	+
经济需求	人均 GDP	万元/人	0.137	+
	城乡居民人均可支配收入比	无量纲	0.108	+
	恩格尔系数	%	0.138	-
健康需求	万人拥有卫生床位数	张/万人	0.071	+
	城镇基本养老保险参保人数占比	%	0.069	+
	城镇职工基本医疗保险参保人数占比	%	0.062	+
社会需求	万人中小学数量	所/万人	0.080	+
	中学在校学生人均专职教师数	位/人	0.049	+
	百人公共图书馆藏书	册/百人	0.021	+
环境需求	生活污水处理率	%	0.055	+
	生活垃圾处理率	%	0.019	+
	PM 2.5 浓度	μg/m ³	0.057	-

注:表中权重采用熵权法计算。

2.3 双变量空间自相关

空间自相关检验常用于分析某种现象在空间上是否存在集聚特征,本文采用双变量全局与局部空间自相关对 ESV 和居民福祉的空间关联特征进行分析。公式如下:

全局 Moran's I 指数:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (1)$$

式中: I 表示双变量全局空间自相关系数; n 为县区数量; x_i 和 y_i 分别表示第 i 个县区的 ESV 和居民福祉水平; \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示 ESV 和居民福祉均值; w_{ij} 表示空间权重矩阵; s² 表示标准差。当 1 ≥ I > 0 时, 数据呈空间正相关, 值越大空间相关性越明显; 当 -1 ≤ I < 0 时, 数据呈空间负相关, 值越小空间差异越大; 当 I = 0 时, 数据呈随机分布。

局部 Moran's I 指数:

$$I_i = z_i^x \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j^y \quad (2)$$

式中: I_i 表示第 i 个县区的双变量局部空间自相关指数; z_i^x 和 z_j^y 分别表示 i 城市 ESV 和 j 城市居民福祉的方差归一化值; w_{ij} 表示空间权重矩阵; n 为县区数量。

2.4 耦合协调度

耦合协调度用于衡量系统间的权衡/协同状态。本文采用耦合协调模型揭示黄河流域(河南段)ESV 与居民福祉耦合协调关系的时空演化特征。公式如下:

$$C = \frac{2\sqrt{CT \times RW}}{CT + RW} \quad (3)$$

$$T = \alpha CT + \beta RW \quad (4)$$

$$R = \sqrt{C \times T} \quad (5)$$

式中: C 为耦合度; T 为综合协调指数; R 为耦合协调度; CT 为 ESV 标准化数值; RW 为居民福祉标准化数值; α 和 β 为权重系数, 表示 ESV 与居民福祉的相对重要性程度, 本文设定 $\alpha = \beta = 0.5$ 。本文将 ESV—福祉耦合协调类型划分为 5 类: 低耦合 ($R \leq 0.2$)、较低耦合 ($0.2 < R \leq 0.4$)、中耦合 ($0.4 < R \leq 0.6$)、较高耦合 ($0.6 < R \leq 0.8$)、高耦合 ($0.8 < R$)。

2.5 相对发展度

相对发展度用于反映系统间的相对发展状态。本文采用相对发展度反映 ESV 与居民福祉相对发展水平。公式如下:

$$\mu = CT/RW \quad (6)$$

式中: μ 为相对发展度; CT 和 RW 分别为 ESV 与居民福祉水平指数。借鉴相关研究^[20], 将相对发展关系分为 3 种类型: ES 滞后 ($\mu < 0.6$)、均衡发展 ($0.6 \leq \mu \leq 1.2$)、福祉滞后 ($\mu > 1.2$)。

2.6 随机森林模型

随机森林(Random Forest, RF)是目前热门的机器学习算法之一, 可用于数据分类、回归和预测等。RF 在回归分析时能够评估每个自变量的作用, 因此常被用于评估多个自变量对因变量的影响。本文分别以各年份空间聚类、耦合协调度、相对发展度为因变量, 以驱动因素为自变量构建 RF, 获得各驱动因素

重要性, 随后选择 Mean Decrease Gini 系数作为最终结果, 该值越大表示该变量的重要性越大。参考前人研究成果^[21], 将影响因素划分为自然因素和社会经济因素两个维度。自然因素通过约束 ES 供给能力影响福祉的空间分异, 在二者协同发展中起基础性作用。选取年降水量、年均温、地形起伏度、NDVI 进行表征。(1) 年降水量 (X_1) 与年均温 (X_2) 决定区域水热条件, 调控农产品生产效率与居民生活环境质量;(2) 地形起伏度 (X_3) 通过制约土地利用强度与资源流动效率, 影响 ES 与福祉分布;(3) NDVI (X_4) 量化植被覆盖密度, 直接关系到土壤保持、生物多样性等 ES 能力。社会经济因素通过提升资源利用效率与革新政策干预模式, 驱动二者关系演变。选取以下指标进行表征:(1) 人口密度 (X_5) 反映资源消耗强度与公共服务需求矛盾;(2) 规模以上工业企业个数 (X_6) 用于衡量工业化水平, 在拉动就业的同时, 可能加剧生态污染, 进而影响系统协调;(3) 第三产业占 GDP 比重 (X_7) 体现经济结构绿色化程度;(4) 城镇化率 (X_8) 用于表征城乡转型进程, 其空间扩张可能挤压生态空间, 但基础设施改善可以提高民生质量;(5) 公共财政支出与生产总值比值 (X_9) 表征政府调控力度, 高比值区域易通过生态补偿与公共服务投入缓解发展矛盾。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值的时空分异

研究期内黄河流域(河南段)ESV 总量分别为 547.21 亿元、553.92 亿元、535.88 亿元, 呈小幅波动下降趋势。从空间差异看(图 2), ESV 呈现西南高、东北低的梯度分异格局。高值区分布在西南山地丘陵区, 植被覆盖率高, 尤其是受人类活动影响较小的卢氏县、栾川县和嵩县的 ESV 最高。低值区分布在东部平原地区, 尤其是滑县、延津县和郑州地区, 受城市扩张和人类活动的影响, 土地开发利用强度大, 植被覆盖率低, 因此 ESV 偏低。

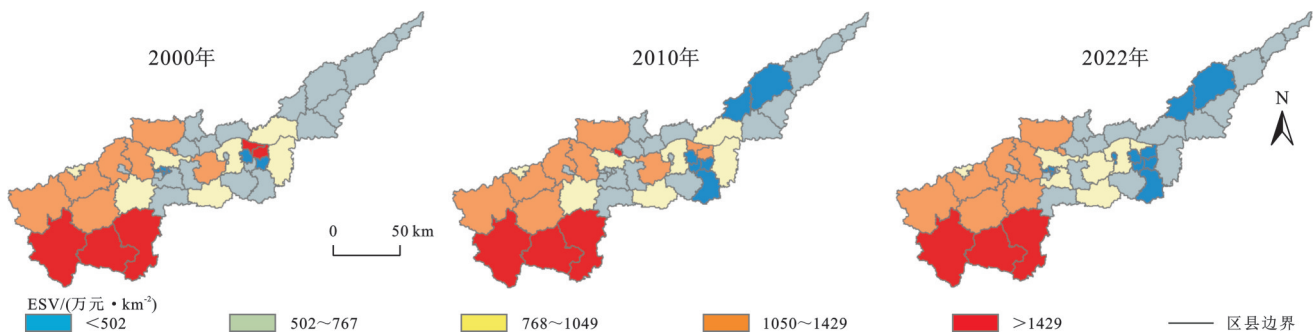


图 2 黄河流域(河南段)ESV 县域尺度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ESV at county scale in Yellow River Basin (Henan section)

3.2 居民福祉的时空分异

研究期内居民福祉整体呈“W型”波动增长趋势(图3),福祉指数由2000年的0.40增至2022年的0.49,增幅22.50%。从具体维度看,经济需求在居民福祉中发挥基础作用,主导福祉的整体趋势;物质需求在研究期内波动较小,保持稳定,这得益于民生保障体系的逐步完善;环境需求总体增长73.02%,说明生态政策成效显著;社会需求指数于2002年达到峰值0.09,2003年后呈缓慢增长趋势,累计增长6.76%;健康需求在2011年后波动加剧,这与医疗服务供需调整及突发公共卫生事件有关。

从空间分布看(图4),研究区居民福祉水平呈“三核驱动、两翼滞后”的分异格局,以郑州中原区、洛阳涧西区、三门峡湖滨区为高值核心,福祉水平向外围递减;东北部以滑县、长垣市为代表的平原农耕区与西南部以卢氏县、灵宝市为代表的生态屏障区作为两翼,福祉水平显著低于核心区。从时序演变看,

福祉水平变化分为两阶段,2000—2010年中部高值区收缩而两翼福祉水平提升,区域差异缩小;2010—2022年核心区辐射范围扩大,低值区面积进一步缩减。总体而言,研究期内区域总体福祉水平与空间均衡度有所提升。

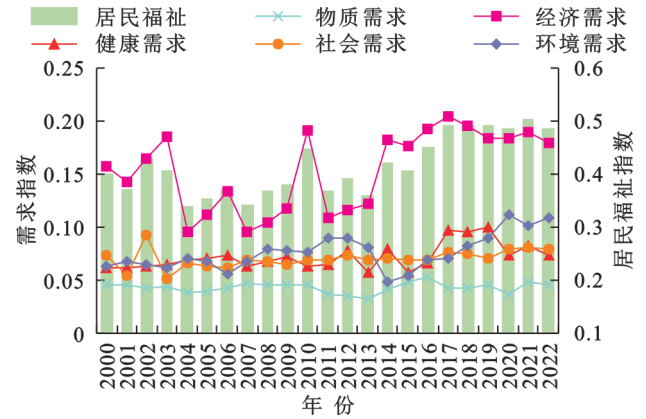


图3 黄河流域(河南段)居民福祉指数变化
Fig. 3 Changes in resident well-being index in Yellow River Basin (Henan section)

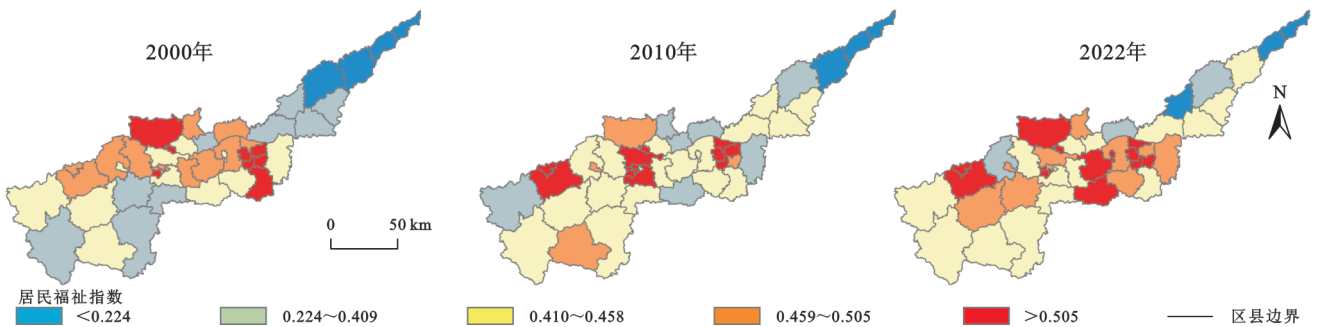


图4 黄河流域(河南段)居民福祉指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of resident well-being index in Yellow River Basin (Henan section)

3.3 ES与居民福祉的关系

3.3.1 空间相关性分析 研究期内全局Moran's I指数从0.14持续下降至0.05, p值从0.03上升至0.24,说明ESV与福祉的空间关联性显著弱化。局部空间分析(图5)显示研究区空间聚类模式为低—低、高一高、低—高一高3种。研究期内不显著区域占比从62.22%增至80.00%,主要分布在中西部地区,这印证了全局Moran's I指数得出的ESV—福祉空间

关联性持续弱化的结论。低—低聚类模式变化不大,分布在东北部新乡、安阳和濮阳平原农区,长期农业超载严重削弱ES,导致“生态—福祉”双低陷阱;高一高聚类模式数量递减,主要出现在洛阳周边的新安县、孟津区、郑州惠济区和金水区,依托黄河生态优势与城市经济辐射维持双高特征;低—高聚类模式位于快速城镇化区域,随着生态修复政策的实施,该模式面积显著减少。

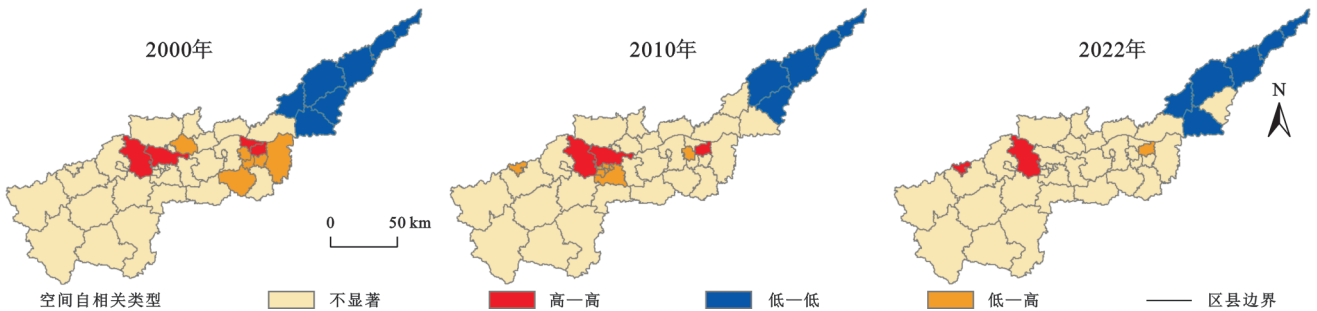


图5 黄河流域(河南段)ESV与居民福祉LISA空间聚类图

Fig. 5 LISA spatial clustering of ESV and resident well-being in Yellow River Basin (Henan section)

3.3.2 耦合协调度分析 研究区ESV与居民福祉耦合协调性整体呈上升趋势(图6)。研究期内高/较高耦合区占比从40.00%升至48.89%,中耦合区由22.23%增至35.56%,低/较低耦合区由37.78%降到15.56%。其中,西北部部分区县通过产业结构优化提升至高耦合阶段;洛阳市部分区县经过生态治理由低耦合变为中耦合;而郑州中原区和管城区因城镇化加速下降至低耦合,说明发展模式差异对系统

的协调性具有关键影响。从空间差异看,二者的耦合协调性呈“西南高,东北低”的分布格局,高耦合区集中分布在西南山地,依托生态优势维持高耦合;较高耦合区分布在中部沿黄带,经济开发对生态环境造成一定压力;低耦合区零星分布于快速城镇化的核心区域,经济集聚导致生态脆弱;较低耦合区主要分布在东北部平原农区,因农业超载导致ESV-福祉失衡。

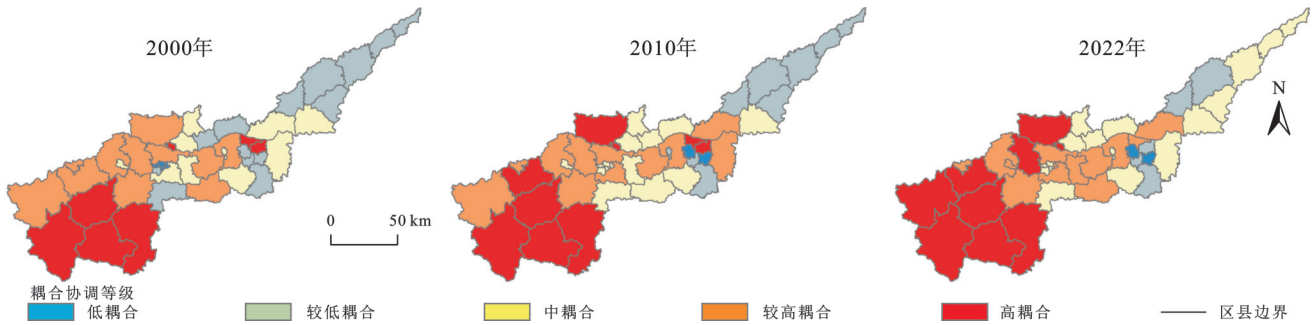


图6 黄河流域(河南段)ESV与居民福祉耦合协调度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of coupling coordination degree of ESV and resident well-being in Yellow River Basin (Henan section)

3.3.3 相对发展度分析 研究区ESV-福祉的协同发展呈现非均衡性,逐步向良性互动方向演进(图7)。研究期内,福祉滞后区占比由20.00%降至15.56%,均衡发展区由26.67%上升到31.11%,ES滞后区占比保持稳定,整体居民福祉有所提升。从空间分布看,ESV-福祉的相对发展状况存在明显地域差异。

福祉滞后区主要分布在西南山区,生态环境良好,但生态优势未能有效转化为民生效益,造成福祉滞后;ES滞后区呈双核分布,东北部平原农区因高强度农业集约化与城市扩张,造成水土资源超载与面源污染,中部洛阳与郑州地区受快速城市化影响,土地利用强度大,且生态保护与修复滞后,导致ES滞后。

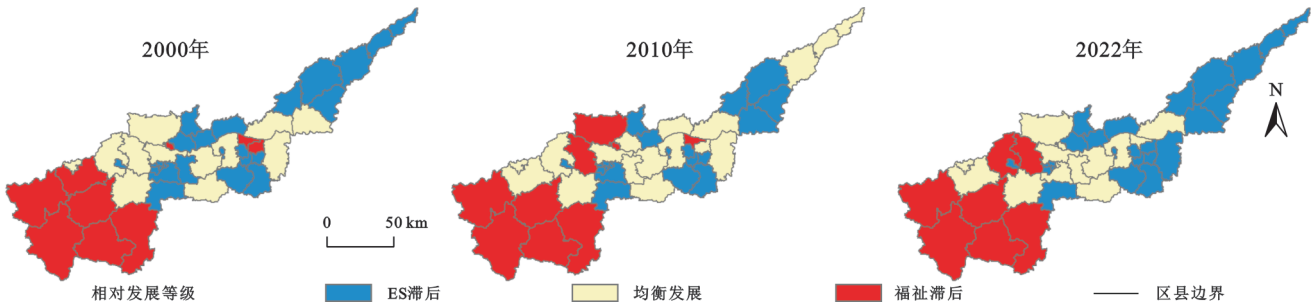


图7 黄河流域(河南段)ESV与居民福祉相对发展度空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of relative development degree of ESV and resident well-being in Yellow River Basin (Henan section)

3.4 影响因素分析

利用RF获取ESV与居民福祉多类型关系的驱动因素重要性排名(图8),发现不同类型关系受不同因素主导,具体如下:(1)从局部空间自相关分析,地形起伏度始终是主导局部空间集聚的核心因子。研究期内NDVI与降水量的重要性分别从第2,3位降至第5,9位,自然要素约束力持续减弱;城镇化率从未位跃至第2位,城市面积的快速扩张引致生态破碎,助推L—H模式集聚。公共财政支出占比重要性较为稳定,第三产业占比波动较大。(2)从耦合协调

性角度分析,地形起伏度与人口密度是关键影响因素。2000—2010年地形占主导地位,2022年人口密度跃居首位,可能是因为人口密集区面临高资源消耗和高公共服务需求的双重压力,导致ES—福祉协调难度大。NDVI排名小幅度波动;第三产业占比由第9位上升至第6位,体现了经济转型的作用;公共财政支出与生产总值比值的排名波动下降,需进行政策革新以维持调控效能。(3)从相对发展角度分析,地形起伏度的影响持续增强,成为关键影响因素,其他自然因素影响较弱。规模以上工业企业

个数排名提升,而第三产业占比的重要性始终较低,说明产业协同存在短板。人口密度在2000—2010年

位于第一名,研究期末略有下降,是核心驱动因素之一,城镇化率排名波动上升。

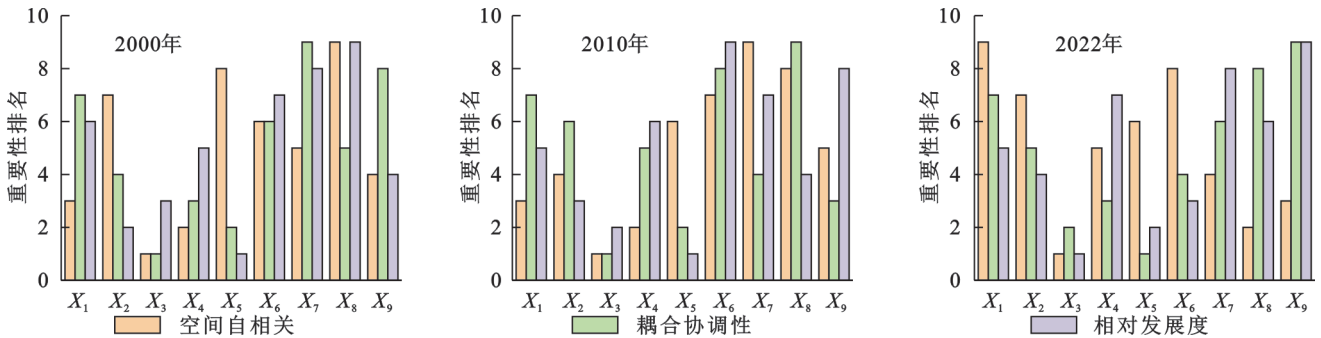


图 8 局部空间自相关、耦合协调度、相对发展度驱动因素重要性排名

Fig. 8 Importance ranking of driving factors for local spatial autocorrelation, coupling coordination degree, and relative development degree

3.5 多维关系影响下的空间分区

实现ES与福祉多类型关系的嵌套是识别区域核心矛盾的关键环节。与以往研究不同,本文尝试打破单一维度分区局限,将ES与居民福祉的空间自相关、耦合协调性和相对发展度三重维度关系进行嵌套,构建多维关系影响下的分区格局。利用R语言klaR包进行K-Modes聚类分析,通过手肘法确定最佳聚类数 $k=6$ (图9)。图9中,空间自相关结果分为4类:不显著(1)、H—H聚类(2)、L—L聚类(3)、L—H聚类(4);耦合协调性结果合并为3类:高耦合与较高耦合合并为高耦合(I)、中耦合(II)、低耦合与较低耦合合并为低耦合(III);相对发展度结果分为3类,ESV滞后(A)、均衡发展(B)、福祉滞后(C)。

K-Modes聚类识别出六大区域:(1)生态屏障区,位于西南山区的卢氏县、栾川县等区县,ESV与福祉呈现弱关联、高耦合、福祉滞后的特征,生态优

势和民生改善错位,需要重点破解生态价值转化的关键难题;(2)发展制衡区,位于黄河沿线的宜阳县、洛龙区、巩义市等区县,表现为弱关联、高耦合、均衡发展的格局,生态经济初步协调但空间关联弱,辐射能力不足,亟需强化区域协同机制;(3)协调示范区位于三门峡湖滨区,呈现H—H关联、高耦合、均衡发展模式,依托黄河湿地实现良性互动,可以扩大其示范效应;(4)经济核心区主要是郑州市及新郑市,两系统间弱关联、低耦合、ESV滞后矛盾突出,城镇化挤压生态空间导致生态赤字,需破解增长与保护两难困境;(5)粮食生产区主要分布于东北部平原,存在L—L关联、中耦合、ESV滞后特征,农业超载引发生态退化,亟需突破双低发展陷阱;(6)城乡过渡区毗邻郑州、洛阳等较大城市,两系统弱关联、中耦合,ESV滞后,面临城乡要素流动失衡加剧生态退化风险的现实困境。

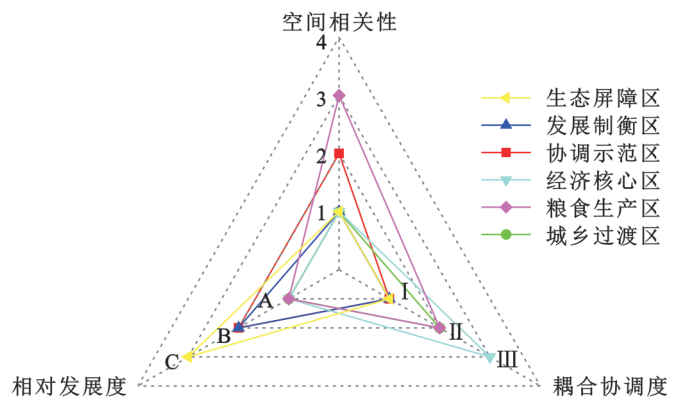
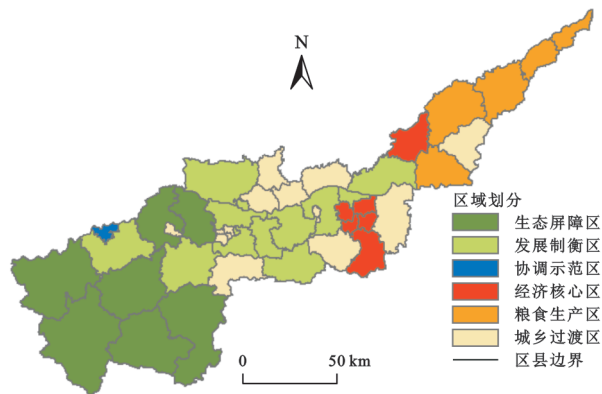


图 9 基于ESV—福祉多类型关系空间分区治理

Fig. 9 Spatial zoning governance based on multi-type relationships between ESV and well-being

4 讨论与结论

4.1 讨论

探究黄河流域(河南段)ES与居民福祉多类型关系的时空演变及其驱动因素、分区域揭示ES与福祉

的协同发展路径,对黄河流域高质量发展与民生福祉提升具有重要意义。本文与现有研究差别在于:(1)从研究视角来看,相较于现有研究多聚焦于ES与福祉的单一关系,本文探讨了ES与福祉的多类型关系,推动了ES与福祉关系研究领域的全面性。其中,空

间相关性用于揭示ES与福祉的空间关联模式,耦合协调性则量化二者协同程度的高低,相对发展度用于分析ES与福祉的优劣状态,三者结合能够实现分析维度的互补,既聚焦地理空间规律,又分析系统协同和相对矛盾。(2)从过程探究来看,针对传统分区方法多依赖单一指标的局限,本文基于K-Modes聚类算法,将3类关系维度作为分类变量,构建多维分区模型,通过矛盾组合,精准识别区域治理重难点。(3)从结果表征来看,不同类型ES与福祉关系的驱动因素存在异同,弥补了以往研究对于二者复杂关系的驱动因素的不足,为区域差异化治理提供案例依据。

4.1.1 ES与居民福祉多类型关系的时空差异 从时序变化看,ES与福祉多类型关系的变化趋势各有不同。ES与福祉的空间相关性显著弱化,多数县域呈现非协同演化特征。这种空间异质性的加剧可能会阻碍区域资源调配,对区域协同治理产生挑战。耦合协调性的显著改善与前人研究相一致^[22],高/较高耦合区占比提升至48.89%,低/较低耦合区降至15.56%,主要表现为西南山区实现生态保护与民生改善双赢,而郑州都市圈等经济发展核心区仍存在重发展、轻修复的失衡问题。值得注意的是,相对发展度虽整体趋向均衡,但东北部农区受耕地超载与城镇化加速双重压力导致生态赤字,造成ES滞后区占比波动较大,这与陈强强等在重点牧区的发现是一致的^[23]。

从空间格局来看,3类关系空间分异特征明显。空间相关性呈极端分异,东北部农区形成连片的L—L集聚带,H—H聚类模式零星分布、L—H聚类模式数量最少,造成该分布格局的根本原因是自然约束与人类活动造成空间冲突。耦合协调性呈梯度分异格局,西南山地凭借高森林覆盖率和生态补偿政策支持,协调度远高于东北部农区,而经济发展核心区耦合协调性最低,这印证了马随随等的研究,即生态资源较好的地区,耦合协调性相对较高,而城镇化快速推进的地区,耦合协调性较低^[24]。二者相对发展度形成三大典型区,即山区“生态优—民生弱”、平原“生态弱—经济滞”,沿黄带“经济—生态均衡发展”,这可能是由于山区缺乏绿色经济转化渠道,导致居民难以享受生态红利;农耕区与经济发展核心区因密集的工农业活动,造成生态破坏;沿黄带通过生态廊道建设初步实现产城融合,极大促进了生态—经济的协同发展,Wei等在西藏地区的研究也证实了这一点^[25]。

4.1.2 ES与居民福祉多类型关系影响因素的差异 研究区ES—福祉3种关系的驱动因素存在异同。相同点在于地形起伏度通过限制开发强度与资源流动,在3种关系中均发挥基础性作用,但也有研究发

现自然基底的影响力最弱,这可能是由于黄河流域(河南段)地形分异明显,自然基底作用显著,而甘肃县域生态脆弱、经济单一,人类活动与政策干预更为关键^[26]。不同点在于:(1)人口密度对耦合协调度和相对发展度具有较强的解释力,这是因为高人口集聚区域面临资源过度消耗与公共服务压力双重矛盾。这与梁秀琴等的研究一致,她认为在植被覆盖度相同的情况下,人口聚集程度会对耦合协调性产生较大影响^[27]。但是Cao等在对黄河中部城市进行分析时,发现工业结构与耦合协调之间的相关性最高,与本文的结论不同,这可能是由于地区生态和经济差异引起的^[28]。(2)城镇化率对于空间自相关的解释力较强,城市建设用地的快速扩张,造成生态环境退化,易形成L—H或L—L空间聚集模式。

4.1.3 多维关系组合对于分区治理的启示 本文借助K-Modes聚类,通过整合ES与福祉的空间关联性、耦合协调度及相对发展度3类关系,实现了多维关系嵌套的空间分区,并精准识别出六大功能区的差异化矛盾组合。针对各区域呈现的核心矛盾,结合区域自然条件和社会经济特征,提出差异化治理策略,通过多维关系协同优化,为黄河流域人地系统可持续发展提供可操作的科学路径。

生态屏障区需破解高ESV—低福祉矛盾,应依托生态资源,发展生态观光旅游、林下经济等绿色产业,实现生态产品价值转化;完善跨区域生态补偿机制,建立“山区—农区—城市”对口帮扶机制,推动资源要素跨区流动。发展制衡区需发挥中ESV—高福祉均衡优势,实施黄河滩区湿地修复工程,构建滨河生态廊道,加强ES的空间外溢和福祉的高质量发展,增强对周边县域的辐射带动能力。协调示范区需要在巩固现有生态保护与文旅融合成效的基础上,深化跨区域要素整合与制度创新,打造黄河流域生态经济协同发展标杆。经济核心区亟需扭转ESV滞后困境,可通过划定城市生态红线,加快口袋公园、立体绿化建设的方式,提高城市绿地率;加快产业绿色转型,推动传统制造业低碳改造,建立高耗能产业准入负面清单,控制工业污染。粮食生产区亟待突破双低发展陷阱,应大力推进农业绿色转型,发展农产品深加工与农旅融合,提升农业附加值;完善农业补贴,建立健全优质生态产品,加强乡村资源转化,提高农民群体的切身利益,助推乡村振兴和区域协调发展。城乡过渡区则需遏制低ESV—中福祉失衡趋势,通过严格控制建设用地的无序扩张,构建连接城乡的蓝绿廊道网络,增强过渡区的生态缓冲功能;承接绿色产业转移,培育新型服务业与低碳制造

业集群,统筹生态保护与经济动态平衡。

4.1.4 研究不足 本文采用价值当量法评估ESV,该方法基于土地覆被数据能够直观反映区域ESV,但未充分反映生态过程的空间异质性与人类活动的动态干扰,未来可尝试采用折旧率模型计算ES净价值。本文采用RF揭示了ES与福祉多类型关系关键因子的重要性排名,但未能刻画影响因子的区域差异,未来可结合SHAP模型或MGWR模型分析驱动因素的空间异质性,以期为实施区域差异化管控提供更加科学的参考。本文虽从多视角揭示了ES与福祉的多类型关系及其驱动因素,但缺乏对其内在驱动机理的探索,未来可结合结构方程模型或多层次模型,揭示多要素协同作用的动态路径及传导机制。

4.2 结论

(1) 研究期内ESV总量波动下降,空间分布呈西南高、东北低的差异格局。西南山地生态屏障功能显著,东北平原因农业超载与城镇化扩张导致生态退化。居民福祉指数呈“W型”波动上升,空间分异呈现“三核驱动、两翼滞后”的特征,且研究期内区域差异逐渐缩小,反映出区域民生改善与空间协同发展趋势。

(2) ES与福祉的多类型关系时空分异明显。从空间相关性来看,ESV—福祉空间关联由显著正向空间集聚逐渐转为随机分布,东北部平原农区L—L型模式集聚。从耦合协调状态看,ESV—福祉耦合协调性逐渐提升,空间上呈西南高、东北低的分异格局,西南山地依托生态基底实现高耦合,郑州都市圈因经济集聚导致生态脆弱。从相对发展度看,ESV—福祉协同发展存在非均衡性,但逐步向良性互动方向演进。

(3) ES与福祉多类型关系的驱动因素存在明显异同。相同点在于地形起伏度在3种关系中起决定性作用。不同点在于其他因素各有侧重,人口密度对于耦合协调度和相对发展度具有较强的解释力,但不能显著驱动空间聚集。相反,城镇化率对空间自相关的解释力较强。

(4) 基于K-Modes聚类识别的六大功能区,其多维类型组合存在显著空间异质性,需聚焦区域核心矛盾,制定差异化治理路径,实现生态保护与民生改善的协同增效。

参考文献(References):

[1] 邱坚坚,刘毅华,陈澄静,等.生态系统服务与人类福祉耦合的空间格局及其驱动方式:以广州市为例[J].自然资源学报,2023,38(3):760-778.
Qiu J J, Liu Y H, Chen C J, et al. Spatial structure and driving pathways of the coupling between ecosystem services and human well-beings: a case study of Guangzhou

[J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(3):760-778.
[2] 刘芦萌,郭建国.生态系统服务与人类福祉关系的研究框架、途径与方法[J].自然资源学报,2024,39(9):2044-2065.
Liu L M, Wu J G. Frameworks, approaches, and methods for studying the relationship between ecosystem services and human wellbeing [J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(9):2044-2065.
[3] 李佳桐,唐海萍,邝佛缘.国家公园生态系统服务与农牧户福祉的时空耦合分析:以祁连山国家公园为例[J].生态学报,2024,44(15):6527-6539.
Li J T, Tang H P, Kuang F Y. Spatial-temporal coupling analysis of ecosystem service and well-being of farmers and herdsmen: a case study of Qilian Mountain National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(15):6527-6539.
[4] Liu L M, Wu J G. Space cannot substitute for time in the study of the ecosystem services-human wellbeing relationship [J]. Geography and Sustainability, 2025,6(2):100221.
[5] 符琳蓉,任以胜,陆林,等.新安江流域生态系统服务福祉效应及实现路径研究:基于798份乡村居民问卷调查的实证分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(10):2109-2123.
Fu L R, Ren Y S, Lu L, et al. Effect of well-being of ecosystem services in Xin'an River Basin and the realization path: an empirical analysis based on 798 questionnaires of rural residents [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(10):2109-2123.
[6] 刘迪,陈海,王麒菲,等.黄土丘陵沟壑区村庄生态系统服务对人类福祉的影响机理:以陕西省米脂县为例[J].水土保持研究,2024,31(3):69-78.
Liu D, Chen H, Wang Q F, et al. Mechanisms of the impact of village ecosystem services on human well-being in the Loess Hilly and Gully Region: case study of Mizhi County, Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):69-78.
[7] 杨雪婷,邱孝枰,朱付彪,等.长江上游重点生态功能区生态系统服务福祉效应与层级差异研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(4):797-808.
Yang X T, Qiu X P, Zhu F B, et al. Impacts of ecosystem services on human wellbeing and hierarchical differences in key ecological function areas of Upper Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(4):797-808.
[8] 杨雪婷,邱孝枰,徐云,等.典型山区生态系统服务对居民福祉影响的空间差异及动态特征:以川西山区为例[J].生态学报,2021,41(19):7555-7567.
Yang X T, Qiu X P, Xu Y, et al. Spatial heterogeneity and dynamic features of the ecosystem services influence on human wellbeing in the West Sichuan Mountain Areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(19):7555-7567.
[9] Liu M X, Gao Y, Wei H J, et al. Profoundly entwined

- ecosystem services, land-use change and human well-being into sustainability management in Yushu, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(9):1745-1765.
- [10] Liu L M, Fang X N, Wu J G. How does the local-scale relationship between ecosystem services and human wellbeing vary across broad regions [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 816:151493.
- [11] Gao Y M, Zhang N J, Ma Q, et al. How is human well-being related to ecosystem services at town and village scales? A case study from the Yangtze River Delta, China [J]. *Landscape Ecology*, 2024, 39:126.
- [12] 张超正, 杨钢桥, 陈丹玲, 等. 长江中游生态系统服务供需平衡与居民福祉耦合的时空特征 [J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2):356-368.
Zhang C Z, Yang G Q, Chen D L, et al. Spatiotemporal coupling relationship between supply-demand balance of ecosystem services and welfare of residents in the Middle Reaches of the Yangtze River [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(2):356-368.
- [13] Yang Y, Yu C L, Liu M X, et al. Uncovering the coupling relationships and key factors linking ecosystem services to human well-being through system dynamics: a case study in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166:112408.
- [14] 李雪敏, 李同宁, 李道政, 等. 内蒙古县域生态系统服务与居民福祉耦合协调关系时空特征及影响因素研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(7):27-37.
Li X M, Li T N, Li D Z, et al. Spatial-temporal characteristics of county-range coupling coordination relationship between ecosystem services and human's well-being in Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(7):27-37.
- [15] Bi J, Lu M H, Liu F C, et al. Multi-scale urban ecosystem service changes and their impact mechanisms on human well-being [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 374:124117.
- [16] 王凤春, 郑华, 张薇, 等. 农户生计与生态系统服务关系的区域差异及驱动机制:以密云水库上游流域为例 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11):3872-3882.
Wang F C, Zheng H, Zhang W, et al. Regional differences and the driving mechanism of relationships between rural household livelihood and ecosystem services: a case study in upstream watershed of Miyun Reservoir, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11):3872-3882.
- [17] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5):911-919.
Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5):911-919.
- [18] 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 Y Q, Sun X Y. Spatiotemporal evolution and influencing factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(5):2767-2779.
- [19] 刘迪, 陈海, 张杰, 等. 黄土丘陵沟壑区村域客观福祉评估及其对农民主观福祉的影响:以陕西省米脂县为例 [J]. *地理科学*, 2023, 43(3):530-540.
Liu D, Chen H, Zhang J, et al. Village's objective well-being assessment and its impact on farmer's subjective well-being in the loess hilly and gully region: a case study of Mizhi County, Shaanxi Province, China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(3):530-540.
- [20] 陈昕, 廖凌云, 刘铠宇, 等. 国家公园社区社会与生态福祉空间耦合协调度分析:以武夷山国家公园A村为例 [J]. *生态学报*, 2024, 44(12):5159-5172.
Chen X, Liao L Y, Liu K Y, et al. Spatial coupling coordination of social and ecological well-being in national park communities: a case study of village A in Wuyishan National Park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12):5159-5172.
- [21] 孔凡斌, 金晨涛, 徐彩瑶. 罗霄山地区生态系统服务与居民福祉耦合协调关系变化及其影响因素 [J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2025, 49(1):245-254.
Kong F B, Jin C T, Xu C Y. Changes in the coupling coordination relationship between ecosystem services and residents' well-being and its influencing factors in the Luoxiao Mountain area [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2025, 49(1):245-254.
- [22] Zhang P P, Li X, Yu Y. Relationship between ecosystem services and farmers' well-being in the Yellow River Wetland Nature Reserve of China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146:109810.
- [23] 陈强强, 杨凌, 郝旭然. 甘南黄河水源补给区生态系统服务与农户生计耦合协调分析 [J]. *草地学报*, 2023, 31(8):2471-2480.
Chen Q Q, Yang L, Hao X R. Spatio-temporal analysis of coupling coordination between ecosystem service and farmers' livelihood in Gannan Yellow River Water Supply Area [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(8):2471-2480.
- [24] 马随随, 张华兵, 王清. 生态系统服务与农户生计的时空耦合关系研究:以里下河地区为例 [J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(3):79-88.
Ma S S, Zhang H B, Wang Q. Study on spatio-temporal characteristics of the coupling relationship between ecosystem services and farmers' livelihood: a case study of Li-xia-river region [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(3):79-88.