

晋西黄土高原矿区生态系统服务与居民福祉空间耦合特征

梁秀琴, 冯强, 段宝玲

(山西财经大学 资源环境学院, 山西 太原 030006)

摘要: [目的] 探析晋西黄土高原矿区生态系统服务与居民福祉空间耦合关系, 为推进资源密集地区生态环境与居民福祉协调发展提供科学依据。[方法] 以晋西三川河流域街镇为研究单元, 利用问卷调查、当量因子法、耦合协调度和地理探测器模型刻画该流域2020年生态系统服务和居民福祉的耦合度及耦合协调度空间特征, 并分析其驱动因子。[结果] ① 生态系统服务价值呈现“东高西低”的空间格局, 东西差异明显。② 居民福祉水平总体呈现“中部低, 东西高”的空间特征。③ 耦合协调度空间分布呈现“东高西低”的特征, 以协调状态为主, 其中良好协调比例58.9%。④ 耦合协调度在空间上的差异受多种因子的影响, 其中土地利用程度、植被覆盖度和年均降水量是耦合协调度空间分异的主要影响因子, 且植被覆盖度、土地利用程度与其他因子的交互作用对耦合协调度的影响显著。[结论] 三川河流域生态系统服务与居民福祉空间耦合特征差异明显, 主导影响因子为植被状况, 未来需整体科学规划生态空间, 重点关注流域中西部绿色开发和生态修复工作, 同时切实提升居民福祉水平。

关键词: 生态系统服务; 居民福祉; 矿区; 耦合协调; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0400-09

中图分类号: F062.2, X171.1

文献参数: 梁秀琴, 冯强, 段宝玲. 晋西黄土高原矿区生态系统服务与居民福祉空间耦合特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 400-408. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20221107.001; Liang Xiuqin, Feng Qiang, Duan Baoling. Spatial coupling characteristics of ecosystem services and residents' well-being at mining area of Loess Plateau in Western Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 400-408.

Spatial Coupling Characteristics of Ecosystem Services and Residents' Well-Being at Mining Area of Loess Plateau in Western Shanxi Province

Liang Xiuqin, Feng Qiang, Duan Baoling

(College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: [Objective] The spatial coupling relationship between ecosystem services and residents' well-being at mining area in the Western Shanxi Loess Plateau was studied in order to provide support for promoting the coordinated development of ecological environment and residents' well-being in resource-intensive areas. [Methods] We took towns in Sanchuan River basin in Western Shanxi Province as the research units, and applied questionnaire survey, equivalent factor method, coupling coordination degree and geographic detector model to describe the spatial characteristics of coupling degree and coordination degree of ecosystem services and residents' well-being of the basin in 2020, and to explore its driving factors. [Results] ① The spatial pattern of ecosystem service value showed high in the east and low in the west with obvious difference between the east and the west. ② The spatial pattern of residents' well-being showed low in the middle and high in the east and west. ③ The spatial distribution of coupling coordination degree showed a feature of high in the east and low in the west with coordination state being the main factor, good coordination accounted for 58.9%. ④ The spatial difference of coupling coordination degree was affected by many factors, among which

收稿日期: 2022-07-29

修回日期: 2022-10-28

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划项目“基于权衡特征的黄河中游生态系统服务供需调控策略研究: 资源均衡与福祉公平视角”(22YJAZH018); 山西省基础研究计划资助项目(20210302123481); 地表过程与资源生态国家重点实验室开放课题(2022-KF-02)

第一作者: 梁秀琴(1997—), 女(汉族), 山西省晋中市人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境管理。Email: lxqzt1005@163.com。

通讯作者: 冯强(1981—), 男(汉族), 辽宁省凌海市人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用和生态响应方面的教学与研究。Email: fengqiang921@163.com。

land use degree, vegetation cover degree and average annual precipitation were the main influencing factors, and the interaction between vegetation cover degree, land use degree and other factors had a greater impact on the coupling coordination degree. [Conclusion] The spatial coupling characteristics of ecosystem services and residents' well-being in Sanchuan River basin are obviously different, and the dominant influencing factor is vegetation status. In the future, it is necessary to plan ecological space scientifically, focus on green development and ecological restoration in the central and western parts of the basin, and effectively improve residents' well-being.

Keywords: ecosystem services; residents' well-being; mining area; coupling coordination degree; geographic detector

生态系统服务源于自然生态系统,对人类福祉的诸多方面存在贡献^[1],提供了社会发展的物质基石。但人类福祉与生态系统并非线性发展^[2],人类需求不断提高对生态系统造成难以挽回的损失,致使双方关系愈发紧张,严重影响区域的可持续发展^[3]。因此,生态系统保护在全球范围内引起了广泛关注^[4-6],促进生态系统服务与居民福祉协同提升成为既顺应时代发展又紧跟研究前沿的核心议题,也是实现人与自然和谐发展的理论基础。

生态系统合理的格局和健康的生态功能是维持生态系统服务的基础^[7],生态系统服务的出发点与落脚点是可持续的人类福祉。生态系统服务指人类从生态系统直接或间接获得的各种惠益^[8],福祉被认为是一种健康、幸福、良好积极的生活状态^[9]。自 2005 年进行千年生态系统评估后,众多学者在生态学、地理学或社会学等领域对生态系统服务和居民福祉的研究取得了丰硕成果,例如雄鹰等^[10]以广东省乐昌市为例,探讨南方丘陵山地农户福祉与生态系统服务关系;Ma 等^[11]研究秦岭地区的生态意识对农民福祉的影响,发现空气质量改善提高了农民的生活满意度;杨雪婷等^[12]研究表明供给与文化这两项生态系统服务对居民福祉影响较大。

多数研究聚焦于生态系统服务对居民福祉的作用和从不同尺度探讨两者的时空变化等^[13-14]方面,缺少对两者深层次耦合机制的探讨,而街镇作为居民生存发展的基本单元,从此视角切入的研究更为少见。

因此,在美丽中国建设不断深入的背景下,研究小尺度空间内生态系统服务与居民福祉的耦合关系,不仅能够定量描绘两者协调性的空间特征,而且能识别其背后的驱动因子,从而切实为当地可持续发展提供决策依据。总体来说,生态系统服务与福祉发展密不可分,两者的耦合研究逐渐成为当前研究的热点^[2]。

三川河流域位于黄土高原中部,是我国矿产资源密集区,具有生态脆弱叠加采矿干扰的双重特征。例如其柳林县是我国优质主焦煤生产地区,煤炭资源优质量大,因而采矿业成为其支柱产业,并且相关产

业也渗透到当地生态环境和居民生活的诸多方面。由此可见,该流域居民的生存发展与矿产资源密切相关,但经济利益提升的同时居民也饱受采矿所产生的危害。分析该流域生态系统服务价值和居民福祉的耦合关系、识别耦合协调度空间分布的主要影响因素对指导其绿色发展具有重要意义。

因此,本文通过当量因子法计算生态系统服务价值,构建居民福祉测量指标体系并进行问卷调查,探析生态系统服务价值与居民福祉水平,进而探讨 2020 年研究区生态系统与居民福祉的空间分异、耦合机制及其影响空间分异的主导因子。本文研究成果可为资源密集型生态脆弱区居民福祉保障和生态环境管理的政策制定提供理论支撑和实践参考。

1 研究区概况

三川河是黄河的一级支流,流经山西吕梁中部,流域面积 4 164 km²,是晋西的最大流域,包含吕梁离石区、柳林县、中阳县和方山县 4 县区的大多数地域。吕梁市在《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》中被确定为资源型城市,其中三川河流域煤矿资源储量占比较大,仅柳林县煤矿数量和产能占到吕梁市的 1/3,煤炭资源成为带动该流域经济发展的源泉,但同时也衍生资源枯竭、植被破坏和环境污染等生态问题。

另外,该地区是水土流失比较严重的区域,流域内植被覆盖度低、土地贫瘠、降水量年度变化大,影响到当地居民的经济与生态安全。总之,三川河流域由于自然和人为原因导致的生态问题日益突出,当前经济社会发展仍较为落后且生态环境脆弱。虽然近年来进行多次综合治理,但生态困境仍制约当地居民生存发展,因此探究生态系统服务与居民福祉有助于促进可持续发展。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本文研究时段为 2020 年,数据包括 3 部分:

①生态系统服务数据:土地利用数据、社会经济数据。
②福祉数据:入户调查数据、NDVI 数据。③其他数据:高程数据、行政区划数据。其中土地利用数据、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,高程数据源于地理空间数据云平台,并通过 ArcGIS 10.5 软件提取研究区的范围。社会经济数据源于《中国统计年鉴》《吕梁统计年鉴》《柳林县统计年鉴》《中阳县统计年鉴》《离石区统计年鉴》《方山县统计年鉴》和各区县政府网站公布的《国民经济和社会发展统计公报》与《中国农产品价格调查年鉴 2021》,运用 ArcGIS 10.5 软件进行数据分析,入户调查数据主要通过实地调查获得。

调查问卷内容包括 3 方面:居民的生活基本情况、对生活及环境条件的满意度与生态系统服务认知情况调查。调查区域涉及三川河流域 33 个街镇,调查人数基本与街镇居民人口数量相对应,调查对象以中年人为主,能够对生态系统服务具有深层次的感知。其次在调查过程中,对相关生态系统服务类型附图说明,问卷内容更为通俗易懂。本次调查时间为 2021 年 7 月,共收集 421 份有效调查问卷。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值测算

(1) ESV 地区修正。参考朱相君等^[15]的研究成果,采用以农田为基准的地区修正法对生态系统服务价值当量进行修正,将研究区农田粮食单位面积产量与全国农田粮食单位面积产量的比值 0.45 作为修订系数。

(2) 借鉴谢高地等^[16]改进后的中国陆地生态系统单位面积服务价值当量表,将单位面积当量服务价值确定为农田生态系统主要农作物单位经济价值的 1/7,计算公式为:

$$E_k = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i q_i p_i}{M} \quad (1)$$

$$VC_k = E_k \cdot Q_{ky} \quad (2)$$

$$ESV = \sum A_k \cdot VC_k \quad (3)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值(元); E_k 为单位面积生态系统服务的经济价值(元/hm²); VC_k 为第 k 种生态系统类型的单位面积生态系统服务价值(元/hm²); i 为作物种类; m_i 为 i 种作物种植面积(hm²); q_i 为 i 种作物的单位面积产量(kg/hm²); p_i 为 i 种粮食作物全国平均价格(元/kg); M 为粮食作物种植总面积(hm²); Q_{ky} 为 k 类土地利用类型 y 类生态系统服务功能的当量因子; A_k 为第 k 种生态系统类型的面积(hm²)。本文选择研究区主要农作物为玉米和谷子,其粮食作物单产分别为 4 126.55 和 1 588.61

kg/hm²,平均市场价格分别为 2.24 和 3.01 元/kg,最终确定标准生态系统的单位面积生态服务功能价值量为 595.33 元/hm²。

2.2.2 居民福祉评估

(1) 居民福祉指标体系。福祉本质指人类需要得到满足的程度^[17],表现出我们所追求的理想生活状态。本文的人类福祉指标体系以其含义和特征为基础,按照科学性、多维性和层次性等原则而构建,主要涵盖主、客观视角,客观指标主要为调查对象的基本生存情况,例如收入水平、用水量和交通条件等,通过实际调查了解;主观指标主要从生活满意度和认知情况方面进行调查。另外,指标权重通过熵值法计算,客观赋权可避免主观判定法产生的臆断性问题,表 1 为熵值法计算结果。

表 1 居民福祉度量指标体系

目标层	准则层	指标层	权重/%
基本物质福祉	生产生活资料	人均耕地面积(hm ² /人)	0.138
		食物供给满意度	0.007
		人均用水量(L/人)	0.025
		水源供给满意度	0.037
		燃料	0.043
	收入	就业状况满意度	0.011
		人均年收入(万元/人)	0.180
		收入满意度	0.022
		交通状况	距县城中心距离/km
安全与健康福祉	安全	人均居住面积(m ² /人)	0.016
		安全满意度	0.005
		植被覆盖度	0.037
		水土流失控制满意度	0.013
		空气状况满意度	0.032
		景色满意度	0.014
		废物处理满意度	0.024
		生态环境的满意度	0.017
		身体健康状况	0.023
		因矿开采患病人数/个	0.002
精神福祉	教育	家庭医疗支出强度/%	0.043
		社会保障满意度	0.018
		居民受教育程度	0.034
		中小学数量/所	0.030
		距离附近最近小学的距离/km	0.002
	距离附近最近中学的距离/km	0.003	
	家庭教育支出强度/%	0.172	
	教育资源满意度	0.021	
	社会关系	家庭关系满意度	0.003
		社会人际关系满意度	0.003

(2) 居民福祉测算。福祉得分通过综合得分法计算获得,在福祉指标权重确定之后,进行加权求和,计算居民综合福祉得分,计算公式为:

$$S = \sum_{j=1}^n W_j \cdot S_j \quad (4)$$

式中: S 表示人类福祉分数; n 为指标个数; j 为人类福祉指标; W_j 为 j 指标权重; S_j 为 j 指标的标准值。

2.3 研究模型

2.3.1 耦合协调度模型

(1) 耦合协调度是多个系统或要素间相互影响、彼此和谐一致的程度^[18]。本文根据三川河流域实际情况和前人的研究经验,建立生态系统服务与居民福祉耦合度与耦合协调度模型且进行分类,测算两者间的相互作用强度,其计算公式为:

$$C = \left\{ \frac{4f(x) \times g(y)}{[f(x) + g(y)]^2} \right\}^2 \quad (5)$$

$$T = af(x) + bg(y) \quad (6)$$

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (7)$$

式中: C 为耦合度; $f(x)$ 为居民福祉综合指数; $g(y)$ 为生态系统服务综合指数; T 为综合指数; a, b 为两系统系数,本文认为二者在发展中一致重要,此处 $a = b = 0.5D$ 为耦合协调度。

(2) 生态系统服务与居民福祉耦合度(C)及耦合协调度(D)等级划分。 C 值越大,表示两个系统之间的关联性越大,相互作用性越好^[19]。 D 的取值范围为 $[0, 1]$,该指标能更好地反映出两个系统之间的协调性,数值越大说明生态系统服务与居民福祉发展越协调,表 2 为 C 和 D 的等级划分。

表 2 耦合度及耦合协调度等级划分

耦合度取值	耦合阶段	耦合协调度取值	耦合协调阶段
0.8~1.0	高水平耦合	0.8~1.0	优质协调
0.5~0.8	磨合耦合	0.6~0.8	良好协调
0.3~0.5	拮抗耦合	0.5~0.6	初级协调
0~0.3	低水平耦合	0.3~0.5	轻度失调
—	—	0~0.3	严重失调

2.3.2 相对发展模型 相对发展模型能够体现两系统之间的相对发展情况^[20],其计算公式如下:

$$F = \frac{\frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(x_i)}}{\frac{g(y_i)}{\sum_{i=1}^n g(y_i)}} \quad (8)$$

式中: $f(x_i), g(y_i)$ 分别为 i 街镇的居民福祉综合指

数和生态系统服务综合指数;生态系统服务与居民福祉的相对发展类型可以区分为 3 类,居民福祉滞后型、同步发展型以及生态系统服务滞后型。参考相关研究,当 $F \leq 0.9$ 时,则发展类型为居民福祉滞后型;当 $0.9 < F \leq 1.2$ 时,居民福祉与生态系统服务同步发展;当 $F > 1.2$ 时,为生态系统服务滞后型。

2.3.3 地理探测器 地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的工具,可解释自变量对因变量的解释作用强度^[21],即探测影响耦合协调度空间异质性的主要因子,结果用 q 统计量表示,其计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2 \quad (9)$$

式中: q 为某因子的影响力,值域为 $[0, 1]$,值越大表示自变量对因变量的影响越大。 $h = 1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层; n_h, n 分别为层 h 和全区的样本数; $\sigma_h^2, n\sigma^2$ 分别为层 h 和全区 Y 值的离散方差。

考虑数据的获取程度,影响因子包括:人口集聚程度、人均耕地面积、人均用水量、人均年收入、年均降水量、植被覆盖度、土地利用程度。利用 ArcGIS 10.5 软件将 X (影响因子)与 Y (耦合协调度)的各项指标数据采用自然断点法进行分类后,通过地理探测器中的“因子探测”和“交互作用探测”功能,探析研究区生态系统服务与居民福祉耦合协调度空间分异的驱动因子及其交互作用。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值空间分布

结果显示,2020 年该流域生态系统服务价值呈现“东高西低”的空间格局(图 1),表现出较强的东西差异,这与植被分布的格局相似。高值区分布在流域东部即方山县及中阳县南部,形成该流域主要的生态输出区,包括信义镇、吴城镇、暖泉镇、马坊镇、北武当镇等。这得益于该地区较高的植被覆盖度和优越的自然条件,同时处于郊区或经济欠发达区,人口较少,生态系统状况较好。例如南部的中阳县 2020 年森林覆盖率达到 49.09%,远高于同期我国森林覆盖率 22.96%。低值区分布在流域中西部的离石区和柳林县,包括西属巴街道、莲花池街道、城北街道、薛村镇等,主要受制于城市扩张、矿区资源消耗和自然条件差等方面的相互作用,已有研究^[22-23]也表明经济发展和建设空间扩张会不断挤压生态环境空间,粗放式的城市开发短期内改善福祉,但导致的生态环境恶化将影响人类福祉的长期增长潜力,城市化快速发展必然对生态环境产生较大压力。

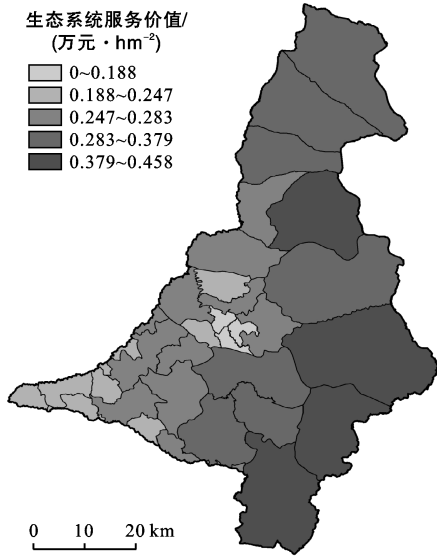


图 1 三川河流域生态系统服务价值空间分布

3.2 居民福祉空间分布

通过 Jenks 自然断点法将居民福祉水平分为 5 个等级,结果显示 2020 年该流域居民福祉水平总体呈现“中部低、东西高”的空间分异格局(图 2)。

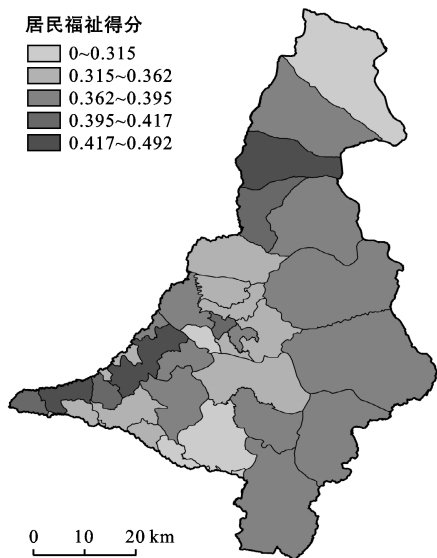


图 2 三川河流域居民福祉空间分布

高值区主要分布在方山县、离石区东部、中阳县东南部和柳林县中西部,前 3 个区域处于非矿区,存在共同特征即生态状况良好,这与该区域生态系统服务价值的分布特点相印证;而柳林县处于矿区,2020 年 GDP 为 220.5 亿元,占据吕梁市当年 GDP 的 14.3%,仅次于孝义市,这成为当地部分居民福祉较高的主要原因。低值区大致分布在流域中南部街镇,离石区福祉水平低主要与生态环境相关。该区域矿业发展满足居民基础生活资料需要,但这种满足以牺牲精神需

求为代价,而在居民物质生活满足后对生活质量要求较高,故而福祉水平较低;其次中阳县南部的乡镇福祉水平较低主要受生活条件限制。该区域经济水平低,人口少且交通不便利,同时自然资源转化为经济价值的途径单一,主要依靠农业生存,居民可获取的社会和生态资源有限,严重制约居民的生存与长期发展。

3.3 服务与居民福祉空间耦合协调特征

基于耦合协调度模型,计算三川河流域两系统的耦合度及耦合协调度并划分其协调状态。结果显示其耦合度呈现“南北高,中间低”的特征(图 3),另外流域内街镇大部分属于磨合耦合与高水平耦合,两者占比为 86.7%,而中西部属于低水平耦合,主要因为经济发展与生态环境状况协同发展困难。耦合协调度与生态系统服务价值空间分布格局相吻合,空间上呈“东高西低”的格局,存在 4 种类型:严重失调、轻度失调、初级协调和良好协调(图 3)。协调为该流域主要特征,其中良好协调比例 58.9%。协调区主要分布在流域东部,这些地区基本远离城市,森林资源丰富,生态状况良好,在政策指导和管理水平提升的背景下,管理者不断推出一系列措施促进生态系统服务与居民生产生活协调发展。失调区分布于中西部,并且中心街道及入河口乡镇处于严重失调。尽管该地区近年来不断实施减排、“煤改气”等环保项目,但经济发展方式不合理、环境负担过重成为其处于失调状态的主要原因。生态文明理念、政府决策和区位战略叠加效应等对于生态系统和居民福祉的耦合具有一定影响^[24],要试图改变不协调状态,必须改进发展模式,划定绿化底线,提高居民生态环保意识。该流域生态系统服务与居民福祉相对发展情况处于不同程度的失衡(图 3),街镇数量排序从大到小依次为生态滞后型、福祉滞后型和同步发展型。生态滞后区主要为流域中西部的 21 个街镇,经济发展依赖工矿业,生态状况较差,同时人口较多对资源消耗产生较大压力,生态高需求与低供给的相互作用导致该区域处于生态滞后型发展;福祉滞后型的乡镇有 9 个,主要分布在流域东部和南部。尽管这些地区生态状况较为良好,森林资源较为丰富,但受地形、产业发展和基础设施建设等方面的限制,生态资源红利难以持续释放,居民福祉状况落后于生态需求;同步发展型城镇以“点”状零星分布在流域内部,仅有 3 个乡镇生态与福祉处于较为匹配的状态。

3.4 耦合协调度驱动因子分析

三川河流域两系统的耦合协调度受到多因子的共同影响(表 3),各因子根据 q 值大小排序依次为:

土地利用程度(0.842) > 植被覆盖度(0.805) > 年均降水量(0.798) > 人口集聚程度(0.693) > 人均年收入(0.329) > 人均耕地面积(0.235) > 人均用水量(0.202)。其中耦合协调度受土地利用程度的影响最大,植被覆盖度与年均降水量次之且两者差距较小,而人均耕地面积与人均用水量对耦合协调度的影响最小。总之,根据因子指标选取和探测结果,表现为土地利用程度对耦合协调度的影响最大,解释力最强,人均用水量对其影响最小。交互探测主要表示不同因子联合对因变量的作用程度,地理探测器能够判断因子交互作用的方向及方式^[25],这是其优越于其他统计方法所在。结果表明任意两因子的交互值均大于单独因子的值(表 4),因此三川河流域两系统的

耦合协调度是由众多驱动因子共同作用的结果。植被覆盖度因子与其他任何因子交互后解释值都高于 0.950,其中植被覆盖度 ∩ 人口集聚程度的 q 值为 0.990,说明在相同植被覆盖条件下,人口集聚程度会对耦合协调度产生较大影响,土地利用程度与人均年收入交互后解释值也较高(0.992),另外人口集聚程度、人均年收入和年均降水量分别与其他因子的交互解释值均高于 0.8,其余因子交互程度虽然较低但也基本达到 0.7 以上。由此可以看出植被覆盖度、土地利用程度、人口集聚程度、人均年收入和年均降水量对促进该流域生态系统服务与居民福祉更高程度耦合协调具有关键作用,且植被覆盖度、土地利用程度与其他因子的交互作用对耦合协调度的影响显著。

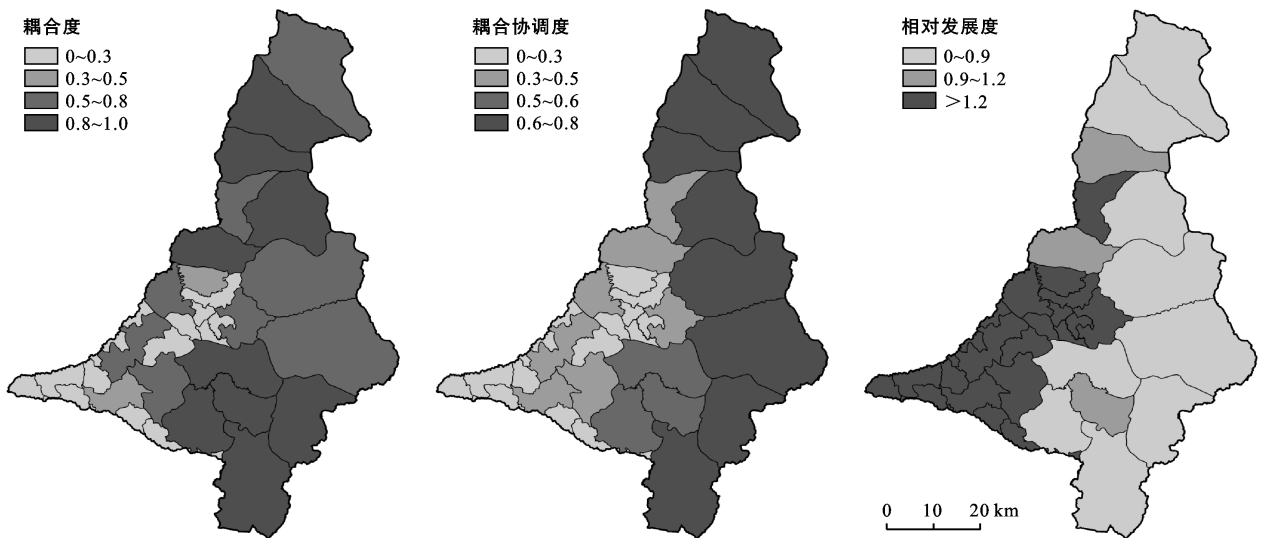


图 3 三川河流域生态系统服务福祉耦合度、耦合协调度及相对发展度空间分布

表 3 驱动因子探测结果

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
q	0.693	0.235	0.202	0.329	0.798	0.805	0.842
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 4 交互作用探测结果

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1	0.693						
X_2	0.918	0.235					
X_3	0.964	0.772	0.202				
X_4	0.886	0.805	0.878	0.329			
X_5	0.978	0.898	0.941	0.954	0.798		
X_6	0.990	0.986	0.955	0.978	0.984	0.805	
X_7	0.990	0.972	0.946	0.992	0.950	0.955	0.842

注: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$ 分别表示人口集聚程度、人均耕地面积、人均用水量、人均年收入、年均降水量、植被覆盖度、土地利用程度。

4 讨论

推动矿区生态系统服务与居民福祉的协同发展

成为实现现代化生态文明目标的关键。本文在测算研究区生态系统服务与居民福祉水平的基础上,通过耦合协调度模型、地理探测器探究耦合协调度在街镇

尺度下的空间差异及背后的驱动因子,较好地揭示了影响该流域耦合协调度的主要因子和因子组合,研究结果可为类似生态脆弱区实现人与自然和谐发展提供参考。

4.1 耦合协调度空间分异

生态系统服务与居民福祉的耦合协调度在空间范围内存在差异。首先高值主要分布于该流域东部,以森林、草地为主,生态环境状况与福祉状况高于平均水平,耦合协调度较高。但Wang^[26]认为怀来山盆地山区具有较高的调节服务(土壤保持和碳固持服务)、生境质量和森林游憩水平,而幸福感较差,与本文研究结果存在差异。原因为该区域的监管缺失将影响到调节服务和支持服务的可持续提供,而本文研究区东部山区经过合理规划、监管与保护,相对而言居民福祉水平并不低。其次,流域中西部耦合协调度较低,主要为矿业发展区,处于服务与福祉失调状态。研究表明:生态系统和经济发展之间存在协同与权衡关系^[27],资源开发推动经济发展短期内改善人类福祉,但长远来看将导致生态系统服务功能下降进而居民福祉降低。霍冉等^[28]认为新泰市采煤沉陷区处于“低服务高福祉”模式,生态系统服务恶化将损害居民福祉。Adams等^[29]认为过度开发生态系统服务可能对当地居民的主观福祉产生负面影响。根据上述分析可知,今后流域中西部需秉持开发与保护并存原则,积极实施矿区生态修复,满足居民基础生活及更高层次的追求,助推经济高质量发展。另外,该流域相对发展状况具有明显的东西差异,虽然东部居民福祉水平相对不低,但未与生态系统服务产生强协同效应,仍以福祉滞后型为主,因此在维护生态环境基础上需加强对东部乡镇居民生活状况的关注,提高其福祉水平。

4.2 耦合协调度影响因子

耦合协调度空间分异受多种因子的影响,其中土地利用程度和植被覆盖度位居前列,绿地面积较多的区域主要分布在东部,而土地利用程度较高区域集中于中西部,这是地势及资源差异所导致的结果,不同的生态环境与城市化进程势必会影响耦合协调度。另外交互探测结果显示除植被覆盖度和土地利用程度以外,人口集聚程度和人均年收入与其他因子的交互值也较高,上述结论与已有的研究结果具有一致性。例如胡蕾^[30]认为丽江市人均耕地面积对生态系统服务与居民收入耦合协调度有显著的正相关关系,生计资本的存量可能对耦合协调有积极作用。Zhang等^[31]认为社区体育公园的可及性对居民的主观幸福感有积极的影响。李昂等^[32]认为生态环境质量好转

和社会经济发展是促使生态系统服务与居民福祉协调的主要原因。郭力娜等^[33]认为建成区面积和收入等是影响辽宁省城镇化与生态环境质量耦合协调度的重要因子,但与本研究结果也有不同之处,该学者认为人均公园绿地面积和建成区绿化覆盖率的影响下降,主要原因为辽宁省环境治理与保护工作卓有成效。而本研究区生态系统服务在空间范围内差异明显,结果显示森林植被等生态要素是影响耦合协调度的主导因子,全域内生态治理与保护水平仍有待提高。

因此今后该流域应在保护自然资本要素、环境治理修复和绿色经济、社会服务水平提升两方面双管齐下,特别是通过鼓励生态投资项目有助于实现生态系统维护和居民福祉提升之间的协调平衡。另外研究区人均年收入远低于同期山西省人均水平,思考如何拓宽收入渠道和推进城乡一体化发展也是协调发展的重要方面。

4.3 不确定性分析

本文居民福祉指标虽然考虑社会、经济、人文等方面,但街镇尺度的数据来源有限,不同学者所考虑的福祉范围及指标也有所差异,指标体系等方面的差异使不同研究之间的可比性较差,统一的人类福祉研究方法还仍需探索。生态系统服务价值计算未纳入建设用地,同时不同评估方法所得结果也存在差异,根据研究区域寻找更适合的测算方式还有待探讨。另外本文仅从空间尺度对两系统耦合协调度进行划分,缺少时间尺度的测算,所提出的管理建议还尚显不足。本文通过地理探测器识别耦合协调度空间异质性的影响因子,探测结果可定量表现各驱动因子和因子组合对生态系统服务空间异质性的解释力度,但此方法也有一定缺陷。例如使用过程中在对连续的自变量因子进行离散化处理时没有明确的分类标准,离散化方式的不同会对最终的探测结果产生一定影响^[34]。在今后的研究中,一方面应关注时间序列的变化,这能够反映研究区生态系统价值的变化,另外对人类福祉的评价应更为全面,寻求更为可靠的分析方法对其相互作用机制进行深层次的剖析,以期提出更科学的协调发展建议。

5 结论与建议

5.1 结论

(1) 三川河流域生态系统服务价值呈现“东高西低”的分布格局,高值区主要为流域东部即方山县及中阳县南部的部分街镇,低值区为该流域中西部即柳林县和离石区的部分街镇。

(2) 居民福祉水平总体呈现“中部低,东西高”的空间分异格局。高值区主要分布于方山县、离石区东部、中阳县东南部和柳林县中西部,最高值为圪洞镇,低值区为流域中部及南部的部分街镇。

(3) 生态系统服务和居民福祉的耦合协调状态在街镇间分布存在差异,耦合协调程度的差异主要受社会发展水平及生态状况差异的影响。耦合度呈现“南北高,中间低”的特征,耦合协调度呈“东高西低”的空间格局,以协调状态为主,其中良好协调比例58.9%;同时中西部街镇处于生态滞后型,东部处于福祉滞后型,同步发展型城镇较少。

(4) 耦合协调度在空间上的差异受到多种因子的共同作用,其中土地利用程度、植被覆盖度、年均降水量的影响较大,是推进生态系统服务与居民福祉协调发展过程中应该关注的主要因子;交互探测结果显示植被覆盖度、土地利用程度与其他因子的交互作用对耦合协调度的影响显著。

5.2 建议

(1) 科学规划生态空间,推动生态保护与城市建设协调并进。流域中部需开展生态空间规划整治,提升用地效率,在流域中心发展快速区域探索构建“城市立体绿化”格局,可有效缩减与东部生态状况差距,推动生态保护与城市建设协调并进;对于高服务价值区要持续保护此地区的生态环境,另一方面积极推动自然资源实现价值化,满足居民生存发展需求。

(2) 加大政策倾斜,实现产业升级改造。生态系统管理的关键目标是在区域尺度上推进人与自然和谐,提高居民对生态系统的幸福感^[35-36]。协调区应在推进目前发展战略前提下探索新的发力点,从良好协调向高水平协调迈进,如南部地区利用生产优势推进木耳、核桃等农产品提质增效。对于失调区即中西部需重点关注生态质量,加大清洁治理、节能减排和打击破坏生态的力度,注重优美环境对居民福祉的积极作用,同时引进人才、绿色技术和科技投入并做到合理适配,推动产业升级;另外继续推进教育投资及宣传等相关工作,培育生态文化。

(3) 充分发挥资源优势,扩大特色种植品牌影响力,提升资源禀赋优势。交互探测结果表明植被覆盖度、土地利用程度和人均年收入等自然因子和社会经济因子是影响耦合协调度分布的重要因子,因此提出以下建议:首先提高对流域中西部植被覆盖的关注,提升生态价值;其次流域南部山区人均收入低,可利用本地区的资源特色,推广气候资源旅游或特色种植—生态旅游—健康经济相结合等模式,多途径、可持续实现生态资源红利健康转换;最后规范山区管

理,整合村镇,不仅能够提升基础设施资源利用率,更易于激发集体效应,形成稳固的特色产业链。

[参 考 文 献]

- [1] Rey-Valette H, Blayac T, Salles J M. Evaluating the contribution of nature to well-being: The case of ecosystem services related to fish-farming ponds in France [J]. *Ecological Economics*, 2022,191:107217.
- [2] 邱坚坚,刘毅华,袁利,等.人地系统耦合下生态系统服务与人类福祉关系研究进展与展望[J].*地理科学进展*, 2021,40(6):1060-1072.
- [3] 李成,赵洁.长三角城市群生态系统服务供需格局与影响因素研究[J].*生态经济*,2022,38(9):160-169,187.
- [4] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being*[M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [5] 联合国.改变我们的世界:2030年可持续发展议程[EB/OL].(2015-07-06)[2022-12-06]. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/9814>.
- [6] 高吉喜,李广宇,张怡,等.“十四五”生态环境保护目标、任务与实现路径分析[J].*环境保护*,2021,49(2):45-51.
- [7] 郭宗亮,刘亚楠,张璐,等.生态系统服务研究进展与展望[J].*环境工程技术学报*,2022,12(3):928-936.
- [8] 乔旭宁,张婷,杨永菊,等.渭干河流域生态系统服务的空间溢出及对居民福祉的影响[J].*资源科学*,2017,39(3):533-544.
- [9] Breslow S J, Sojka B, Barnea R, et al. Conceptualizing and operationalizing human wellbeing for ecosystem assessment and management [J]. *Environmental Science & Policy*, 2016,66:250-259.
- [10] 熊鹰,侯珂伦,郑偲睿,等.基于结构方程模型的南方丘陵山地农户福祉与生态系统服务关系:以广东省乐昌市为例[J].*热带地理*,2020,40(5):843-855.
- [11] Ma Li, Qin Yueting, Zhang Han, et al. Improving well-being of farmers using ecological awareness around protected areas: Evidence from Qinling Region, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021,18(18):9792.
- [12] 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.
- [13] Summers J K, Smith L M, Case J L, et al. A review of the elements of human well-being with an emphasis on the contribution of ecosystem services [J]. *Ambio*, 2012,41(4):327-340.
- [14] 刘家根,黄璐,严力蛟.生态系统服务对人类福祉的影响:以浙江省桐庐县为例[J].*生态学报*,2018,38(5):1687-1697.
- [15] 朱相君,薛亮.关中地区生态系统服务价值变化及其与经

- 济发展耦合关系[J].生态学杂志,2022,41(4):769-776.
- [16] 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.
- [17] 朱杰,卢春天,石金莲,等.自然保护区居民福祉的历时性:以陕西佛坪国家级自然保护区为例[J].生态学报,2019,39(22):8299-8309.
- [18] Bardram J E. Temporal coordination-on time and coordination of collaborative activities at a surgical department [J]. Computer Supported Cooperative Work, 2000,9(2):157-187.
- [19] 罗盛锋,孟淑云,黄燕玲.民族地区生态系统与旅游、乡村社会发展系统的时空耦合研究[J].生态经济,2021,37(12):135-144.
- [20] 董林玉,张霖,张翔.我国新型城镇化与医疗服务水平耦合协调度及空间相关性分析[J].中国卫生事业管理,2022,39(1):4-9.
- [21] 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.
- [22] 罗紫元,曾坚.资源环境保护下天津市用地空间增长模拟[J].地理研究,2022,41(2):341-357.
- [23] Liu Ranran, Dong Xiaobin, Wang Xuechao, et al. Study on the relationship among the urbanization process, ecosystem services and human well-being in an arid region in the context of carbon flow: Taking the Manas river basin as an example [J]. Ecological Indicators, 2021,132:108248.
- [24] 范在予,易筱雅,耿虹.黄河三角洲生态效率与城镇化效率的时空耦合研究:基于 2008—2017 年面板数据的实证分析[J].城市问题,2021,40(3):17-28.
- [25] 周润芳,孙建国,张卓.甘肃省榆中县地形对耕地分布影响[J].遥感信息,2020,35(4):148-154.
- [26] Wang Bojie, Tang Haiping, Xu Ying. Integrating ecosystem services and human well-being into management practices: Insights from a mountain-basin area, China [J]. Ecosystem Services, 2017,27(6):58-69.
- [27] 吴建寨,李波,张新时.生态系统服务价值变化在生态经济协调发展评价中的应用[J].应用生态学报,2007,18(11):2554-2558.
- [28] 霍冉,徐向阳,高俊莲,等.煤炭资源型城市生态系统服务空间特征及其与居民福祉关系[J].土壤通报,2020,51(1):31-39.
- [29] Adams H, Adger W N, Ahmad S, et al. Multi-dimensional well-being associated with economic dependence on ecosystem services in deltaic social-ecological systems of Bangladesh [J]. Regional Environmental Change, 2020,20(2):42.
- [30] 胡蕾,吴健,李海萍.生态系统服务与居民收入的耦合关系及影响因素:以丽江拉市海流域为例[J].生态学报,2018,38(18):6402-6411.
- [31] Zhang Zhengfeng, Wang Mengwei, Xu Ze, et al. The influence of Community Sports Parks on residents' subjective well-being: A case study of Zhuhai City, China [J]. Habitat International, 2021,117:102439.
- [32] 李昂,米长虹,杨琰琰,等.京津冀地区生态系统服务与居民福祉时空分异及耦合协调关系[J/OL].生态经济,2022(2022-07-27)[2022-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1193.F.20220726.1814.013.html>
- [33] 郭力娜,王刚,姜广辉,等.2005—2019 年辽宁省城镇化与生态环境质量耦合协调时空分异及影响因子研究[J].环境工程技术学报,2022,12(4):1123-1133.
- [34] 景海超,刘颖慧,贺佩,等.青藏高原典型区生态系统服务空间异质性及其影响因素分析:以那曲市为例[J].生态学报,2022,42(7):2657-2673.
- [35] 王大尚,郑华,欧阳志云.生态系统服务供给、消费与人类福祉的关系[J].应用生态学报,2013,24(6):1747-1753.
- [36] Wang Bojie, Tang Haiping, Zhang Qin. Exploring connections among ecosystem services supply, demand and human well-being in a Mountain-Basin system, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(15):5309.