

黄河流域水资源价值时空演化规律及未来预测研究

吴 正¹, 张金亿², 黎佳文^{2,3}, 田贵良^{1,2,4}

(1. 河海大学经济与金融学院; 2. 河海大学商学院; 3. 荷语鲁汶大学地理与旅游系; 4. 河海大学长江保护与绿色发展研究院)

摘要:为科学核算黄河流域水资源价值以支撑精细化管理和高质量发展,从动态视角出发,以水资源价值指数表征水资源价值,分析了黄河流域水资源价值时空演化趋势;运用地理探测器(GD)识别驱动因子,采用遗传算法(GA)优化 XGBoost 模型的关键参数,构建了 GD-GA-XGBoost 模型,对 2022—2026 年黄河流域水资源价值进行预测。结果表明:水资源价值呈现显著的时空分异特征,时序上呈增长、稳定、下降的“倒 U 形”趋势,空间上,上游地区水资源价值持续较高,以高-高集聚为主,中游地区先上升、后下降,集聚类型多变,下游地区水资源价值整体偏低,以低-低集聚为主;年降水量、平均高程、平均坡度等水资源供给因素始终占主导地位,需求因素初始解释力均不高,但逐渐增强,多因子交互作用呈动态变化;预测 2022—2026 年水资源价值总体呈下降趋势,未来水资源供需矛盾可能得到缓解。

关键词:水资源价值;价值指数;模糊综合评价;地理探测器;GD-GA-XGBoost 模型;黄河流域

Study on spatiotemporal evolution and future prediction of water resources value in the Yellow River Basin// Wu Zheng¹, Zhang Jinyi², Li Jiawen^{2,3}, Tian Guiliang^{1,2,4}(1. School of Economics and Finance, Hohai University; 2. Business School, Hohai University; 3. Division of Geography and Tourism, KU Leuven; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University)

Abstract: To scientifically assess water resources value in the Yellow River Basin and support refined management and high-quality development, from a dynamic perspective, this study used a value index to represent water resources value and analyzed its spatiotemporal evolution trend. By applying the Geodetector (GD) to identify driving factors and using genetic algorithm (GA) to optimize key parameter of the XGBoost model, a GD-GA-XGBoost model was constructed and used to predict water resources value in the Yellow River Basin from 2022 to 2026. The results show that water resources value exhibits significant spatiotemporal differentiation. Temporally, it follows an inverted U-shaped trend characterized by growth, stabilization, and then declining. Spatially, upstream areas maintains consistently high water resources value, dominated by high-high clustering; midstream areas first rise and then decline, with diverse clustering patterns; downstream areas generally have relatively low water resources value, primarily characterized by low-low clustering. Water resources supply factors, such as annual precipitation, mean elevation, and mean slope, consistently play dominant roles. While demand-side factors initially show limited explanatory power but gradually increase in influence, with multi-factor interactions undergoing dynamical changes. Predictions indicate an overall downward trend in water resources value from 2022 to 2026, suggesting potential alleviation of future water resources supply-demand conflicts.

Key words: water resources value; value index; fuzzy comprehensive evaluation; Geodetector; GD-GA-XGBoost model; the Yellow River Basin

水资源是基础性自然资源和战略性经济资源^[1-2]。然而,黄河流域以仅占全国 2.6%的水资源总量,支撑了 12%的人口和 17%的耕地,同时还需兼顾高水平生态保护,长期处于极高的水压力之下^[3-4]。但中国长期执行福利水价,其现行水价难以反映水资源实际价值^[5],水价的节水杠杆作用未能

充分发挥,导致流域水资源浪费和污染现象不断加剧。事实上,价格是价值的货币化表现,水价应围绕水资源价值上下波动^[6-7]。因此,全面评估地区水资源价值可为水价、水资源税额标准等的制定提供有力支撑,也为水市场的发展奠定基础。

水资源价值本质上是水资源在自然、社会、经济

基金项目:国家社会科学基金后期资助项目(24FJYB041);江苏省社会科学基金项目(24EYC001)

作者简介:吴正(1993—),男,副研究员,博士,主要从事水资源税与水资源价值研究。E-mail:20240934@hhu.edu.cn

通信作者:田贵良(1982—),男,教授,博士,主要从事资源与环境经济学及绿色金融研究。E-mail:tianguiliang@hhu.edu.cn

和生态系统中所体现的综合效用,包括自然稀缺性形成的资源价值,以及社会效益、经济产出、生态服务等多维贡献,具有系统性与区域差异性。水资源价值的核算^[8]始于20世纪70年代,其中,影子价格法^[9]和供求定价模型^[10]等考虑了水资源的社会经济价值,但未反映生态和环境方面的价值;而边际机会成本法^[11]、可计算一般均衡模型^[12]、能值法^[13]等考虑了水资源价值的多个维度,但模型构建复杂,可操作性差。近年来,随着对水资源系统不确定性、模糊性和多维交互特征认识的深入,模糊综合评价方法受到关注。该方法可以评估具有可比性的水资源价值指数,用以表征地区水资源价值水平,并可进一步结合经济主体承受能力,用于水价计算。目前,该方法正逐渐运用于水资源资产负债表编制^[14]、生态补偿量计算^[15]等领域。与现有水资源价值评价方法相比,模糊综合评价方法能较好地契合水资源系统的模糊性与复杂性,且限制条件少、数据可得性强、计算简便^[16]。

部分学者通过分析水资源价值分异的原因发现,人口密度^[13]和水域占比^[17]是影响水资产或水生态服务价值的重要因素,但未从供需视角进行过系统分析。目前对水资源价值预测的研究较少,如Liu等^[18]预测了中国及其九大流域2020年和2030年工业用水和生产用水的影子价格,为水价制定提供参考;Zhang等^[19]则基于水资源供需预测和水资源综合价值提出黄河流域水分配方案,但相关研究普遍缺乏前瞻性。

基于此,本文利用模糊综合评价方法测算黄河流域53个地级市2011—2021年水资源价值指数,以此表征水资源价值水平,通过地理探测器(GD)模型揭示水资源价值时空分异的驱动机制,利用经遗传算法(GA)优化的XGBoost模型预测2022—2026年水资源价值,并进一步讨论水资源价值在水价、水资源税等政策工具中的应用,实现理论测度的落地转化,以为流域高质量发展提供有效路径。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

考虑到黄河流域地区经济社会发展与黄河的关联性和行政单元的完整性,以及部分地级行政区数据缺失或不可获取等因素,选取具有代表性且数据完整的53个地级市作为研究对象,研究区概况如图1所示。黄河流域上游全年降水较少,多年平均径流量约占全流域的54%,且水质较好,但用水方式较为粗放,水资源利用效率较低。中游地区增加的水量占黄河水量的42.5%,但人口密度较大,水

资源开发利用强度大,水资源供需矛盾较显著。下游地区年降水量较上游与中游更大,利用效率相对较高,但其主要依赖中游来水,且由于人口密集、经济发达,水资源供需矛盾也较为突出。

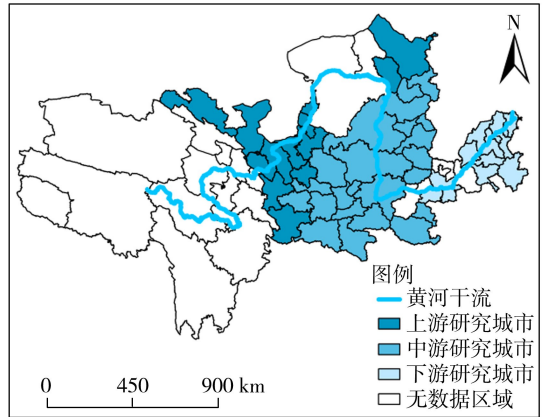


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

a. 统计数据。统计数据来源于2011—2021年《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》《黄河年鉴》,各省市相关年份统计年鉴、发展年鉴、经济社会调查年鉴、水资源公报、水利发展统计公报、国民经济和社会发展统计公报等以及中国经济金融研究数据库,缺失数据采用多重插补法补全。

b. 矢量数据。数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)提供的30m分辨率数据,通过ArcGIS3D分析工具获取平均坡度和平均高程等地形参数。

c. 空间遥感数据。归一化植被指数(NDVI)数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn)。夜间灯光数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。

2 研究方法

2.1 水资源价值评估方法

2.1.1 评价指标选取

水资源价值的形成具有系统性,体现自然、社会、经济与生态4个系统相互作用。自然条件决定水资源基础禀赋,体现稀缺性价值;社会因素决定水资源价值需求侧逻辑,其核心在于人口压力与用水规模对稀缺性的放大效应;经济因素揭示水在生产体系中的边际效益与利用效率,是衡量水资源价值的另一重要维度;生态维度体现水资源在水质净化、生态维持等服务中的关键作用,体现其对环境质量和区域可持续发展的贡献价值。基于上述价值生成

机理,参考姜文来等^[20-21]的相关研究,从自然、社会、经济和生态4个维度选取了13个指标,构成了黄河流域水资源价值评价指标体系,如图2所示(图中“+”“-”分别表示正向和负向指标)。各指标权重由熵值法确定^[22-24]。

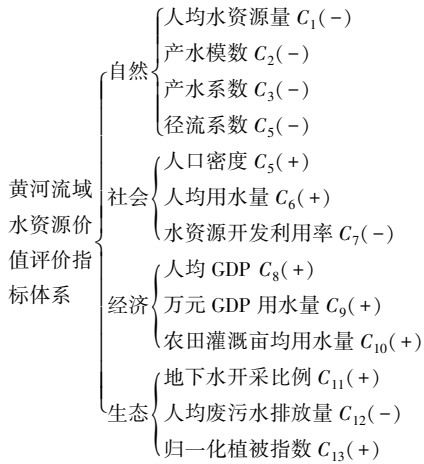


图2 黄河流域水资源价值评价指标体系

Fig.2 Evaluation indicator system of water resources value in the Yellow River Basin

2.1.2 模糊综合评价方法

采用模糊综合评价方法测度黄河流域水资源价值^[20],具体步骤为:①设定水资源价值评价指标的分级标准,如表1所示;②依据表1确定各城市不同指标对各评价等级的隶属度,结合指标权重,计算得到黄河流域各城市水资源价值模糊综合评价矩阵;③结合向量 $S=(5,4,3,2,1)$ 计算得到水资源价值指数,用以表征2011—2021年黄河流域53个地级市水资源价值水平。指数值越大表示水资源价值越高;反之,表示水资源价值越低。

2.2 时空特征分析方法

2.2.1 核密度估计

核密度估计^[25]是研究空间分布非均衡性的重要工具之一,可分析样本分布情况及动态演进趋势。本文基于常用的高斯核函数进行估计,直观展示各城市水资源价值的高低、集聚程度、极化趋势以及区域内差异程度。

2.2.2 空间自相关分析

空间自相关分析^[26]能有效捕捉观测值之间因

空间位置邻近而产生的依赖关系,模型可分为全局和局部空间自相关两种类型。莫兰指数(Moran's I)是用来度量空间相关性的重要指标。本文运用全局莫兰指数判断黄河流域城市水资源价值的空间自相关性,并进一步运用局部莫兰指数反映具体集聚情况。

2.3 驱动机制分析方法

2.3.1 最优参数GD

GD是探测空间分异性并揭示驱动力的一种统计学方法,本文采用Song等^[27]改进的最优参数GD对变量进行最优离散化并确定最佳分类,使得结果更加可靠。此外,采用因子探测器探测所选影响因素对黄河流域水资源价值时空分异的解释力,采用交互探测器探究不同影响因素交互作用的强弱。

2.3.2 影响因子选取

水资源价值时空分异受供给与需求端双重驱动。在供给层面,自然地理条件和人工开发利用状况是主要影响因素。自然地理条件包括年降水量、平均高程和平均坡度,三者共同决定水资源自然禀赋、空间分布及储存难易程度。人工开发利用状况涉及供水综合生产能力、污水集中处理率和科技创新能力。其中,供水综合生产能力指按供水设施取水、净化、送水、出厂输水干管等环节设计能力计算的综合生产能力,科技创新能力以人均专利授权量表征,这些因素通过影响基础供给、污水处理、节水及非常规水源开发等环节,最终决定水资源实际供应量。在需求层面,经济社会发展与产业结构是主要影响因素。经济社会发展包括城镇化率、经济发展水平和社会消费水平。其中,经济发展水平以城市夜间灯光数据均值表征,社会消费水平以社会消费品零售总额与地级市生产总值的比值表征,三者的提高通常伴随较大用水压力,从而影响水资源消耗规模。产业结构涉及农业发展水平、工业化水平、产业高级化水平及外商投资水平,分别以粮食产量、工业增加值与地级市生产总值的比值、第三产业增加值与第二产业增加值的比值以及外商直接投资额表征。由于不同产业的用水方式具有显著差别,导致水资源利用效率存在明显不同,从而影响水资源

表1 黄河流域水资源价值评价指标分级标准

Table 1 Classification standards for evaluation indicators of water resources value in the Yellow River Basin

等级	C_1/m^3	$C_2/(万 m^3/km^2)$	C_3	C_4	$C_5/(人/km^2)$	C_6/m^3	$C_7/\%$	$C_8/万元$	C_9/m^3	C_{10}/m^3	$C_{11}/\%$	C_{12}/m^3	C_{13}
高	150	15	0.25	0.10	1000	800	10	10	55	500	55	5	0.8
较高	250	20	0.35	0.20	800	700	20	8	45	400	45	10	0.7
中等	400	35	0.45	0.35	600	600	30	6	35	300	35	20	0.6
较低	600	60	0.55	0.45	500	500	40	4	30	200	25	35	0.4
低	1200	80	0.65	0.55	350	300	100	2	20	100	10	50	0.2

价值。黄河流域水资源价值时空分异驱动因子指标体系如图3所示。

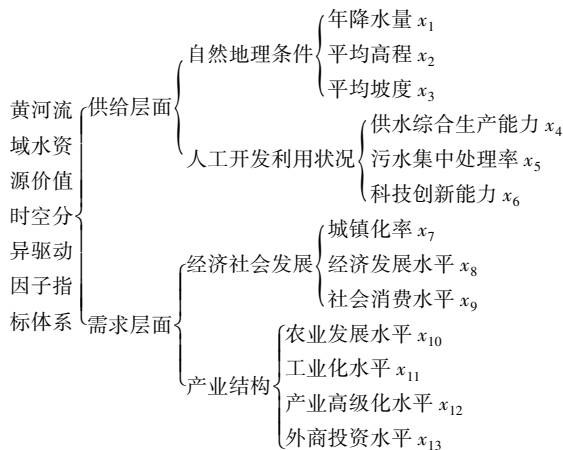


图3 黄河流域水资源价值时空分异驱动因子指标体系

Fig. 3 Indicator system of driving factors for spatiotemporal differentiation of water resources value in the Yellow River Basin

2.4 水资源价值预测方法

XGBoost 是一种提升算法^[28-29],常用于回归、分类等任务,能够捕捉变量间复杂的非线性关系。其通过将多个简单模型(通常是决策树)组合在一起,逐步改进模型预测能力,并在目标函数中引入正则化项,有效抑制过拟合,具有高准确性与强泛化能力。但其预测过程封闭,属于传统的“黑箱”模型。因此,本文构建 GD-GA-XGBoost 模型对黄河流域水资源价值进行预测,将最优参数 GD 与 XBoost 模型结合用以提升模型的可解释性,并通过 GA^[30]搜索 XGBoost 的最佳超参数组合,进一步提升模型的预测精度与稳定性,模型预测流程如图4所示。XGBoost 模型基学习器数量、学习率、树深度、最小叶节点样本权重取值范围分别为 300~1 200、0.01~0.18、3~10 和 1~10;GA 算法的参数包括最大迭代次数、种群规模、交叉概率、变异概率,数值分别为

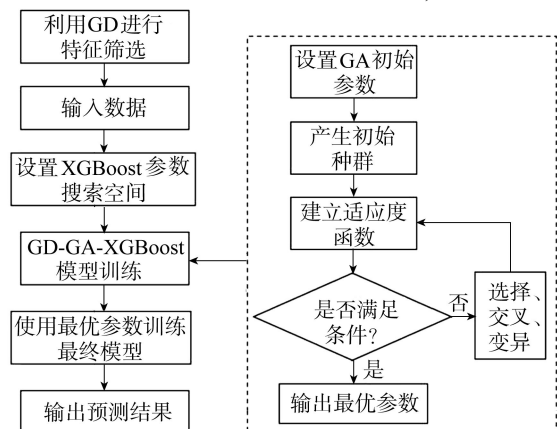


图4 GD-GA-XGBoost 模型预测流程

Fig. 4 GD-GA-XGBoost model prediction process

25、20、0.9 和 0.3。在给定搜索空间和 GA 参数配置下,GD-GA-XGBoost 模型的最优超参数组合中,基学习器数量、学习率、树深度、最小叶节点样本权重分别为 522、0.14、3 和 10。该参数组合使模型结构相对简单,在有效抑制过拟合的同时保持较好的预测性能。

本文通过计算均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) 和决定系数 (R^2) 来评价模型预测能力。

3 结果与分析

3.1 水资源价值的时空演化规律

3.1.1 时间演化规律

利用箱线图分析黄河流域 53 个地级市 2011—2021 年水资源价值时间演化特征,结果如图5所示。从 25%~75%分位区间和 1.5 倍四分位距范围来看,水资源价值指数呈现离散、集中、离散的演化进程,表示地区间水资源价值差异先减小后增大。从中位数和平均值看,2011—2012 年水资源价值指数中位数与平均值均大幅增长,2012—2019 年小幅度增减变化,2019 年后大幅下降,表明黄河流域水资源价值整体经历增长、稳定、下降的“倒 U 形”变化。这是由于 2012 年多个城市年降水量较 2011 年下降,导致水资源稀缺性骤然加剧,水资源价值大幅提升。2012—2019 年各城市水资源总量大多小幅波动,水资源价值变化也不大。2019 年黄河流域生态保护和高质量发展战略被提出后,各城市注重节水与高效用水,水资源利用效率得到提升,加之新冠疫情冲击使得水资源需求量下降,水资源价值开始降低。2021 年多个城市出现降水量增加,导致水资源价值进一步下降。此外,除 2011 年、2014 年、2019 年外,其余年份均出现异常值,表明由于自然地理区位或地区发展方式的差异,一些地区的水资源价值存在极端值。

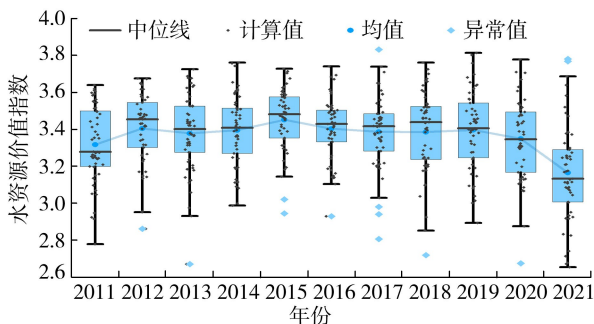


图5 2011—2021 年水资源价值指数箱线图

Fig. 5 Boxplot of water resources value index from 2011 to 2021

对 2011—2021 年黄河流域 53 个地级市水资源

价值进行核密度分析,结果如图6所示。从曲线位置来看,水资源价值指数分布曲线的重心随时间演进呈现先向高值区移动,稳定后再向低值区移动的趋势,印证了上文分析中水资源价值整体先上升、后稳定、再下降的趋势。从主峰分布形态来看,其随着时间推移由宽变窄、再变宽,峰高大致呈上升—下降的“倒V形”演化趋势,表明地区间水资源价值差异由大变小的特征。从波峰数目来看,2016年出现短暂双峰现象,主峰在水资源价值指数高值区,侧峰在价值指数低值区,这是因为该年黄河流域下游河南、山东两省出现洪涝,导致相关城市水资源价值降低,形成低值区侧峰;而中上游水资源量较为稳定,因此主峰仍位于高值区。

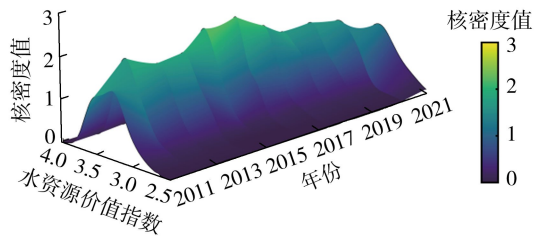


图6 2011—2021年水资源价值指数核密度分析结果

Fig. 6 Kernel density analysis results of water resources value index from 2011 to 2021

3.1.2 空间演化规律

图7为2011—2021年黄河流域53个地级市水资源价值指数空间分布,水资源价值指数分布总体呈上游与中游较高、下游较低态势。具体而言,上游水资源价值始终保持较高水平,原因是上游水资源总量较低,导致水资源稀缺性较高。2011—2015年中游水资源价值逐渐上升,分布趋于均匀,这是因为2011年以来,中游人口密度增加,水资源需求随之

上升;2015—2019年中游部分城市水资源价值缓慢下降,这与节水政策的推进有关;2021年中游水资源价值大面积下降,这与多城市降水量增加有关,表明水资源价值短时间骤变依然与自然因素高度相关。下游水资源价值波动较大,2011—2013年水资源价值下降,2013—2017年上升,2017—2021年大幅下降,这与下游水情年际变化大、经济发展变化快、政策响应密切相关。值得注意的是,中卫、开封、乌兰察布水资源价值始终较高,这是因为中卫与乌兰察布是严重缺水型城市,且发展畜牧业等高耗水产业;开封虽然水资源相对丰富,但农业发达,水资源需求高。

通过构建空间邻接权重矩阵对黄河流域53个地级市2011—2021年水资源价值指数进行全局自相关分析,计算得到全局莫兰指数、 Z 值和 P 值,如表2所示。全局莫兰指数用于判断水资源价值的空间相关方向和程度, Z 值用于衡量空间自相关偏离随机分布的程度, P 值用于检验空间自相关关系的统计显著性。由表2可以看出,除2015年外,其余年份全局莫兰指数均为正,说明黄河流域水资源价值分布整体存在空间依存关系。该空间依存关系在2011—2014年减弱,2016年后加强。这是因为研究初期城市发展步调开始出现差异,相邻城市水资源价值的正向关联性随之减弱。2017年党的十九大报告指出实施区域协调发展战略,2019年习近平总书记提出黄河流域生态保护和高质量发展战略,要求实施全流域协同治理,这使得流域各城市均加强水资源管理,尤其是下游经济相对发达的高耗水城市,进一步强化了水资源刚性约束机制,使相邻城市水资源价值正向关联性增强。

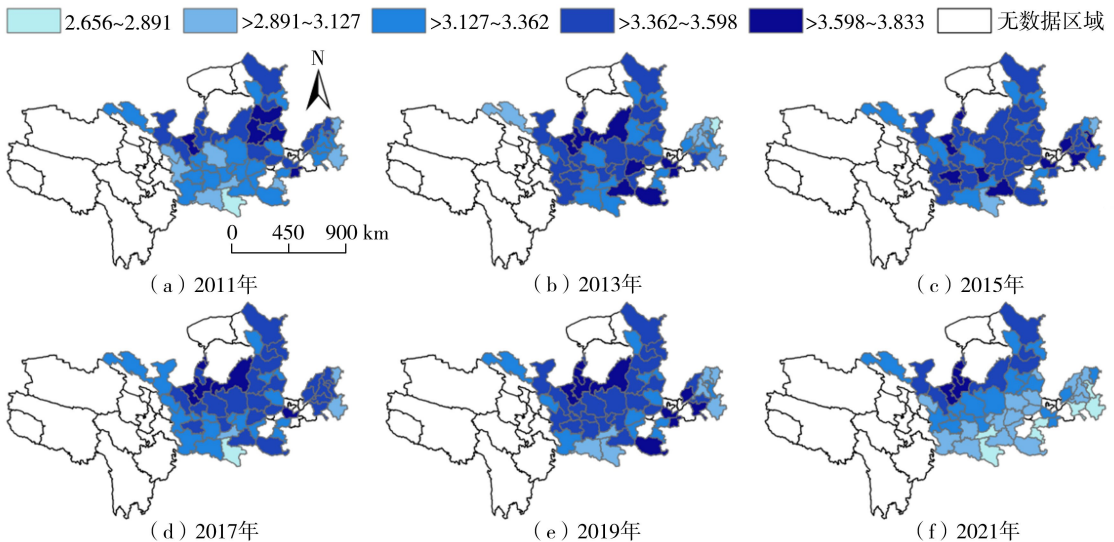


图7 2011—2021年水资源价值指数空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of water resources value index from 2011 to 2021

表 2 2011—2021 年水资源价值指数全局自相关分析结果

Table 2 Results of global auto correlation analysis of water resources value index from 2011 to 2021

年份	全局莫兰指数	Z 值	P 值
2011	0.3513	3.7185	0.0002
2012	0.2034	2.2556	0.0241
2013	0.2391	2.6354	0.0084
2014	0.0915	1.1106	0.2667
2015	-0.0304	-0.1127	0.9102
2016	0.1077	1.2814	0.2000
2017	0.2251	2.4806	0.0131
2018	0.3370	3.6055	0.0003
2019	0.2233	2.4351	0.0149
2020	0.3816	4.0597	0
2021	0.6071	6.3134	0

对 2011 年和 2021 年黄河流域 53 个地级市水资源价值指数进行局部空间自相关分析,结果表明,2011 年 38% 的城市表现为高-高集聚,主要位于宁夏、内蒙古和山西;34% 的城市表现为低-低集聚,主要位于甘肃、陕西、河南和山东。到 2021 年,高-高集聚保持较高水平,城市占比仍为 38%,主要位于甘肃、宁夏、内蒙古、陕西北部、山西中部和北部;低-低集聚显著加强,城市占比为 43%,主要位于山西南部、陕西中部和南部、河南和山东。可以发现上游城市始终以高-高集聚为主,下游城市以低-低集聚为主,中游城市集聚特征动态变化,这与流域上、中、下游的水资源禀赋、用水状况以及区域协调发展战略的提出息息相关。

3.2 水资源价值时空分异驱动机制

3.2.1 单因子探测结果

利用因子探测器量化黄河流域 53 个地级市不同影响因子对水资源价值时空分异的解释力,结果如表 3 所示。可以发现,供给侧因子中,年降水量、平均高程、平均坡度等处于主导地位。尤其是年降水量,除 2015 年外,其他年份的解释力均超过 0.3,2021 年跃升至 0.677,这是因为 2021 年秋季黄河流域降水较常年同期偏多 1.7 倍。供水综合生产能力的解释力自 2017 年起明显增强,这与当时供水管网修缮改造举措高度相关。需求侧因子在 2021 年前解释力均不强,但呈上升趋势,2021 年经济发展水

表 3 不同影响因子对水资源价值时空分异的解释力

Table 3 Explanatory power of different influencing factors on spatiotemporal differentiation of water resources value

年份	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}
2011	0.399**	0.298*	0.263*	0.206	0.063	0.375**	0.222	0.140	0.173	0.092	0.242	0.324**	0.250
2013	0.313**	0.329*	0.475**	0.269	0.181	0.296*	0.208	0.366**	0.205	0.115	0.076	0.188	0.241
2015	0.237	0.232**	0.264*	0.238	0.280*	0.148	0.168	0.185	0.234	0.188	0.248	0.256	0.130
2017	0.388**	0.267	0.289	0.302**	0.111	0.229	0.168	0.275	0.244	0.208	0.152	0.214	0.163
2019	0.362**	0.252	0.368**	0.439**	0.193	0.178	0.217	0.198	0.270	0.131	0.160	0.166	0.070
2021	0.678**	0.560**	0.205	0.288**	0.225	0.335**	0.296*	0.340**	0.414**	0.269	0.187	0.157	0.511**

注: *、**、*** 分别表示通过 10%、5% 和 1% 的显著性水平检验。

平、社会消费水平和外商投资水平的解释力大幅提升,这可能是因为新冠疫情期间社会经济发生波动,地区用水需求剧烈变化,从而使得上述因子成为当年水资源价值空间分异的重要驱动力。

3.2.2 多因子交互作用

进一步对黄河流域 53 个地级市 13 个因子进行交互探测,结果如图 8 所示。具体来看,探测的 6 年期间每年最主要的交互作用分别为:年降水量与供水综合生产能力(2011 年)、平均坡度与农业发展水平(2013 年)、年降水量与社会消费水平(2015 年)、经济发展水平与社会消费水平(2017 年)、平均坡度与供水综合生产能力(2019 年)、年降水量与科技创新能力(2021 年),上述作用的解释度均超过 0.75。可以发现,年降水量、平均坡度和供水综合生产能力等水资源供给相关因子与其他因子存在较强且频繁的交互作用,一定程度上说明水资源供给因素是水资源价值空间分异更重要的影响因素。同时,交互作用大多发生于水资源供给与需求因素之间,表明水资源价值的空间分异不是单一自然地理条件、供水能力或经济社会发展作用的结果,而是多因子交互的结果。

3.3 水资源价值预测

3.3.1 预测效果

以 2011—2021 年水资源价值指数作为标签值,分别以由 GD 筛选出的 9 个通过 5% 置信度检验的影响因子(年降水量、平均高程、平均坡度、供水综合生产能力、科技创新能力、经济发展水平、社会消费水平、产业高级化水平、外商投资水平)作为特征值和选取所有影响因子作为特征值,以 2011—2018 年的数据为训练集,2019—2021 年的数据为测试集进行模型训练,均通过 GA 寻优得到 XGBoost 模型最佳参数,两个模型的预测精度如表 4 所示。通过 GD 进行特征选择的 GD-GA-XGBoost 模型测试集的 RMSE、MAE 和 R^2 分别为 0.1407、0.1083 和 0.7097,均优于不进行特征筛选的 GA-XGBoost 模型,表明以 GD 进行特征选择的模型充分考虑了水资源价值的重要影响因素,解释力较强,并且因子的

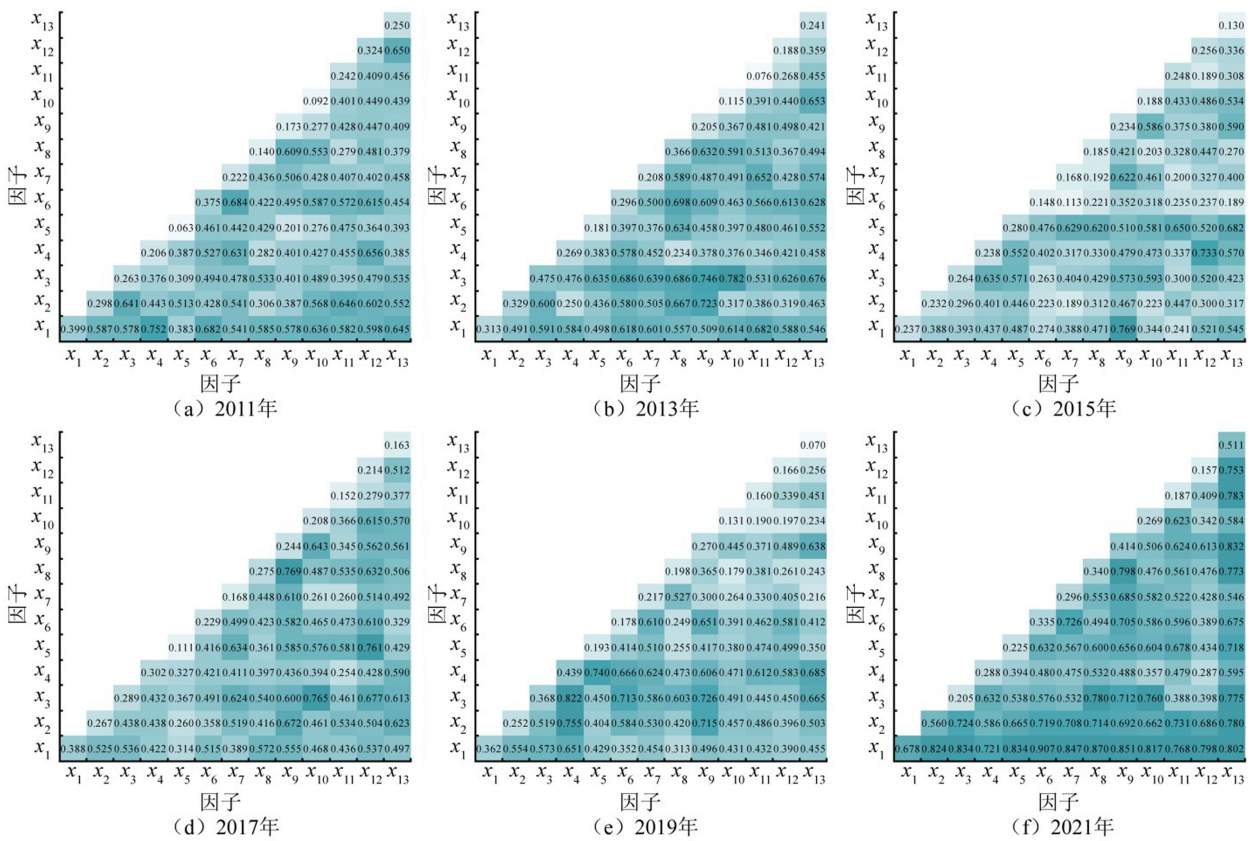


图 8 水资源价值影响因子交互作用解释力

Fig. 8 Explanatory power of influencing factor interaction effects of water resources value

表 4 模型预测精度比较

Table 4 Comparison of model prediction accuracy

模型	数据集	RMSE	MAE	R^2
GA-XGBoost	训练集	0.088 7	0.067 5	0.799 7
	测试集	0.152 1	0.117 7	0.660 7
GD-GA-XGBoost	训练集	0.082 8	0.062 7	0.825 4
	测试集	0.140 7	0.108 3	0.709 7

精简可减少噪声影响,降低模型复杂度,能较为精准地预测水资源价值指数。

利用 GD-GA-XGBoost 模型对黄河流域 53 个地级市 2022—2026 年的水资源价值指数进行预测后,运用模糊综合评价法计算其中 30 个具有完整数据的地级市 2022 年和 2023 年水资源价值指数,将其作为实际值与模型预测值进行对比,进一步验证预测模型的可靠度,实际值与预测值的对比如图 9 所示。可以发现 2022 年预测值误差率的最大值为 20.32%,2023 年误差率均在 20% 范围内,数值均较小,进一步验证 GD-GA-XGBoost 模型预测的可靠度。

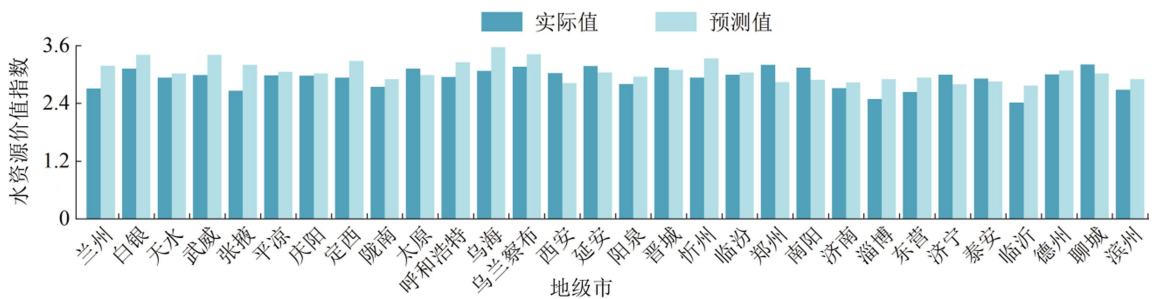
3.3.2 预测结果

黄河流域 53 个地级市 2022—2026 年水资源价值指数预测结果如图 10 所示。分析发现,2022—2026 年黄河流域上、中、下游水资源价值均呈现下降趋势。这可能是因为未来水资源刚性约束制度进一步加强,配置更加科学,利用效率不断提升,水资

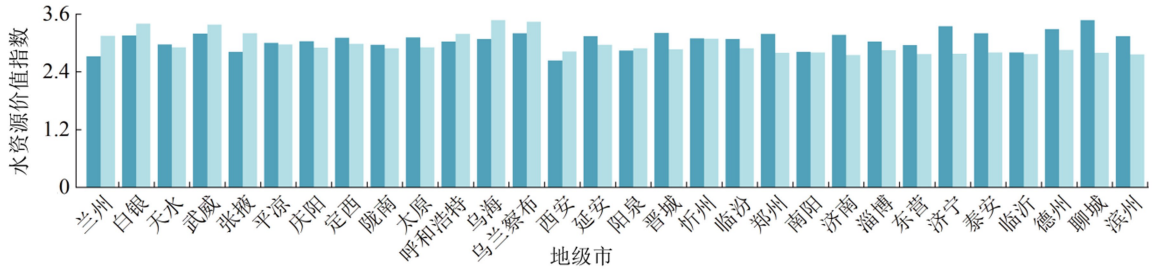
源供需矛盾得到缓解,从而使水资源价值下降。总体来看,水资源价值预测值整体呈现从上游到下游逐渐下降的态势。上游地区水资源价值始终处于较高水平,2022—2026 年小幅度下降,这可能是由于上游地区水资源的稀缺性始终较高、水质较好,且多地主要发展农牧业,对水资源需求较高,因此水资源价值居高不下。中游地区 2022—2023 年水资源价值下降幅度较小,2024—2026 年下降较多,可能是因为中游地区水资源供需矛盾相对较为突出,但通过逐渐优化水资源管理,水资源得到更好地配置与利用,水资源价值逐渐下降。下游地区水资源价值始终较低,2022—2023 年下降幅度较大,2024 年起趋于稳定,这可能与下游地区经济发展水平高、科技创新能力强以及政策响应更快有关。这些因素能够较好地推动节水工作,提升水资源利用效率,因此水资源价值先较快下降,之后在较为科学的用水模式下保持较低水平。

4 讨论

水资源价值由自然供给、社会需求、经济利用与生态服务共同决定,具有显著的综合性与模糊性,很难用简单的“有价值”或“无价值”来评价。模糊综合评价方法较好地契合了这一特征,将多维因素纳



(a) 2022年



(b) 2023年

图9 黄河流域30个地级市水资源价值指数实际值与预测值对比

Fig. 9 Comparison of actual and predicted water resources value index for 30 prefecture-level cities in the Yellow River Basin

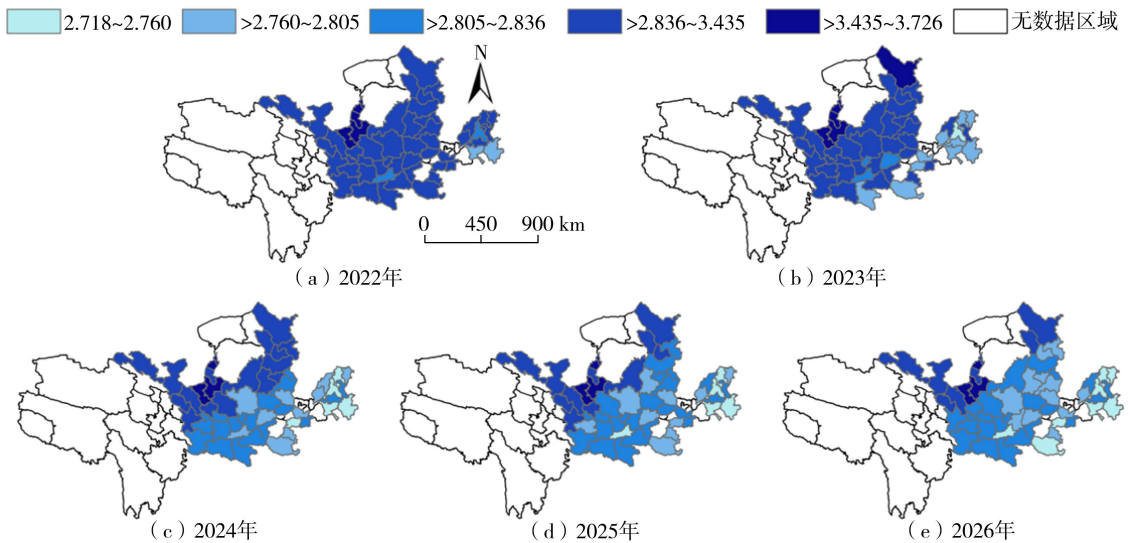


图10 2022—2026年水资源价值指数预测分布

Fig. 10 Spatial distribution of predicted water resources value index from 2022 to 2026

入同一评价框架,利用模糊关系合成原理得到综合价值指数,能够较好地反映水资源的真实价值水平。在我国水资源约束加剧、利用效率偏低、水价长期偏离资源价值的背景下,仅靠行政手段难以充分缓解供需矛盾,也难以激发节水行为。构建以“价值—价格—行为”传导链条为核心的现代治理机制,需要以能够量化资源稀缺性及其多维效用的指标体系为基础。本文计算得到的水资源价值指数既能反映区域水资源的真实稀缺性与供需压力,也包含了经济社会属性与生态服务功能,因此可作为水价形成机制的核心依据,推动水价向资源价值回归,强化对节水和结构调整的激励作用。

具体来看,基于本文计算得到的水资源价值指

数,可结合经济主体的水价承受能力,制定反映地区真实水资源价值的水价,进一步放大水价的杠杆作用。同时,可结合行业对用水权基准价的承受能力,制定用水权基准价格。价格是交易的动力,反映用水权真实价值的价格体系能够有效激励和推动用水权市场发展。此外,本文计算得到的水资源价值指数还可用于指导水资源税额标准、水资源资产负债表、水生态补偿机制的制定,以及进一步推动水金融交易实施,从而有助于形成基于价值引导的现代化水治理模式。

5 结论

a. 黄河流域水资源价值时空分异特征明显。

在时间上,研究区整体呈现增长、稳定、下降的“倒U形”变化趋势。在空间上,上游地区水资源价值较高,以高-高集聚为主;中游地区水资源价值先上升、后下降,集聚类型多变;下游地区呈下降、上升、下降趋势,以低-低集聚为主。

b. 驱动机制方面,年降水量、平均高程、平均坡度等水资源供给相关因子始终占主导地位,需求相关因子前期解释力不强,但呈上升趋势,反映出人类活动对水资源价值的影响逐渐加强。交互作用大多发生于水资源供给与需求因素之间,且较为频繁。

c. 预测的2022—2026年黄河流域城市水资源价值整体呈下降趋势,呈现上游到下游逐渐下降的态势,表明未来水资源供需矛盾可能得到缓解,但地区价值分异仍较大。

参考文献:

[1] 刘静,宣柯扬,余钟波,等. 中国耗水结构综合分析及其驱动力研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 127-138. (Liu Jing, Xuan Keyang, Yu Zhongbo, et al. Comprehensive analysis of water consumption structure in China and study on its driving forces[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 127-138. (in Chinese))

[2] 赵业馨,仇蕾,许长新. 苏皖两省水资源利用效率的时空分异研究[J]. 水利经济, 2024, 42(3): 36-44. (Zhao Yexin, Qiu Lei, Xu Changxin. Spatial and temporal differentiation of water resources use efficiency in Jiangsu Province and Anhui Province[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(3): 36-44. (in Chinese))

[3] 谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 10-17. (Xie Lingfeng, Yang Xiaoli, Wu Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 10-17. (in Chinese))

[4] 王幸,张晓力,刘翔宇. 黄河流域环境规制对水资源利用效率的影响研究[J]. 水利经济, 2024, 42(6): 43-49. (Wang Xing, Zhang Xiaoli, Liu Xiangyu. Research on impact of environmental regulations on water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 43-49. (in Chinese))

[5] 冯欣,姜文来,刘洋,等. 水资源价值模糊数学模型研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1834-1848. (Feng Xin, Jiang Wenlai, Liu Yang, et al. Progress of research on fuzzy mathematical model of water resources value [J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1834-1848. (in Chinese))

[6] 杨秋宇,关全力. 新疆农业水价综合改革对农业用水效

率的影响[J]. 水利经济, 2025, 43(1): 62-68. (Yang Qiuyu, Guan Quanli. Impact of integrated reform of agricultural water pricing system in Xinjiang on agricultural water use efficiency[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(1): 62-68. (in Chinese))

[7] 姜文来,刘洋,冯欣. 中国农业水价综合改革进展评价[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(5): 141-147. (Jiang Wenlai, Liu Yang, Feng Xin. Evaluation of progress of comprehensive reform of agricultural water pricing in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 141-147. (in Chinese))

[8] 刘丹妮,贾玲,沙金霞,等. 自然资源资产核算研究进展与展望[J]. 水利经济, 2024, 42(6): 14-24. (Liu Danni, Jia Ling, Sha Jinxia, et al. Research progress and prospect of natural resource asset accounting [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 14-24. (in Chinese))

[9] 吴凤平,李滢. 基于买卖双方影子价格的水权交易基础定价模型研究[J]. 软科学, 2019, 33(8): 85-89. (Wu Fengping, Li Ying. Research on the basic pricing model of water rights trading based on the shadow price of buyers and sellers [J]. Soft Science, 2019, 33(8): 85-89. (in Chinese))

[10] 李铁男,董鹤,陈娜,等. 黑龙江省农业水权转换价格测算与分析:以庆安县为例[J]. 水利发展研究, 2019, 19(6): 13-19. (Li Tienan, Dong He, Chen Na, et al. Calculation and analysis of the conversion price of agricultural water rights in Heilongjiang Province: taking Qing'an County as an example [J]. Water Resources Development Research, 2019, 19(6): 13-19. (in Chinese))

[11] Tilmant A, Marques G, Mohamed Y. A dynamic water accounting framework based on marginal resource opportunity cost [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(3): 1457-1467.

[12] 王松林,和吉,刘增进,等. 基于动态CGE模型的灌区影子水价计算[J]. 人民黄河, 2008, 30(9): 61-62. (Wang Songlin, He Ji, Liu Zengjin, et al. Shadow price calculation of dynamic CGE model-based irrigation area [J]. Yellow River, 2008, 30(9): 61-62. (in Chinese))

[13] 李淑琴,沈菊琴,黄昕,等. 基于“量—价”框架的长江经济带水资源资产核算及驱动因素分析[J]. 自然资源学报, 2025, 40(2): 550-568. (Li Shuqin, Shen Juqin, Huang Xin, et al. Water resources asset accounting and driver analysis in the Yangtze River Economic Belt based on the “quantity-value” framework [J]. Journal of Natural Resources, 2025, 40(2): 550-568. (in Chinese))

[14] 杨艳昭,陈玥,宋晓谕,等. 湖州市水资源资产负债表编制实践[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 908-918. (Yang Yanzhao, Chen Yue, Song Xiaoyu, et al. Compilation of a water resource balance sheet for Huzhou City [J].

- Resources Science, 2018, 40(5) : 908-918. (in Chinese))
- [15] 李怀恩, 庞敏, 肖燕, 等. 基于水资源价值的陕西水源区生态补偿量研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2010, 40(1) : 149-154. (Li Huaen, Pang Min, Xiao Yan, et al. A study on ecological compensation quantity based of water resource value in Shaanxi water source area [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2010, 40(1) : 149-154. (in Chinese))
- [16] 冯欣, 刘子萱, 姜文来. 基于模糊数学模型的中国农业用水价值研究[J]. 中国农业资源与区划, 2025, 46(6) : 36-47. (Feng Xin, Liu Zixuan, Jiang Wenlai. The agricultural water value in China based on fuzzy mathematical model [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(6) : 36-47. (in Chinese))
- [17] Xiu Yuan, Wang Ni, Peng Fangxu, et al. Spatial-temporal variations of water ecosystem services value and its influencing factors: a case in typical regions of the Central Loess Plateau [J]. Sustainability, 2022, 14(12) : 7169.
- [18] Liu Xiuli, Chen Xikang, Wang Shouyang. Evaluating and predicting shadow prices of water resources in China and its nine major river basins [J]. Water Resources Management, 2009, 23(8) : 1467-1478.
- [19] Zhang Fengyi, Wu Zening, Di Danyang, et al. Water resources allocation based on water resources supply-demand forecast and comprehensive values of water resources [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 47: 101421.
- [20] 姜文来. 水资源价值模型研究[J]. 资源科学, 1998, 20(1) : 35-43. (Jiang Wenlai. A study on model of water resources value [J]. Resources Science, 1998, 20(1) : 35-43. (in Chinese))
- [21] 贾亦真, 沈菊琴, 王晗, 等. 兰州市水资源价值模糊评价研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(9) : 68-73. (Jia Yizhen, Shen Juqin, Wang Han, et al. Research on fuzzy evaluation of water resources value in Lanzhou City [J]. Yellow River, 2018, 40(9) : 68-73. (in Chinese))
- [22] 李继清, 黄可, 陈思雨, 等. 基于 GAMS 的水库群调度及风险补偿研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(6) : 10-19. (Li Jiqing, Huang Ke, Chen Siyu, et al. Research on reservoir group scheduling and risk compensation based on GAMS [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6) : 10-19. (in Chinese))
- [23] 孔令婷, 钱真, 刘敏. 基于熵权 TOPSIS 评价法的上海市应对太湖流域超标准洪水调度策略研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(3) : 55-61. (Kong Lingting, Qian Zhen, Liu Min. Study on scheduling strategies in Shanghai City for managing over-standard floods from the Taihu Basin based on entropy-weighted TOPSIS evaluation method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(3) : 55-61. (in Chinese))
- [24] 张晓峰, 石永杰, 刘俊, 等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3) : 80-87. (Zhang Xiaofeng, Shi Yongjie, Liu Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3) : 80-87. (in Chinese))
- [25] 黄磊. 1998—2021 年长江上游地区环境压力的时空格局特征[J]. 地理学报, 2024, 79(5) : 1192-1210. (Huang Lei. Spatio-temporal pattern of environmental pressure in the upper reaches of the Yangtze River from 1998 to 2021 [J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(5) : 1192-1210. (in Chinese))
- [26] 张晨钰, 王伟, 黄莉, 等. 高度城镇化背景下深圳市易涝点驱动因子分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(2) : 35-45. (Zhang Chenyu, Wang Wei, Huang Li, et al. Analysis of driving factors for waterlogging points in Shenzhen City under high urbanization background [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2) : 35-45. (in Chinese))
- [27] Song Yongze, Wang Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data [J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(5) : 593-610.
- [28] 张慧玲, 张虹, 孙德亮. 融合 XGBoost-SHAP 的重庆市乡村生态旅游资源竞争力测度研究[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(3) : 585-599. (Zhang Huiling, Zhang Hong, Sun Deliang. Competitiveness measurement of rural ecotourism resources in Chongqing with integrating XGBoost-SHAP [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(3) : 585-599. (in Chinese))
- [29] 马春辉, 侯媛媛, 杨杰, 等. 基于 RUN-XGBoost 算法的土石坝渗流预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2) : 72-78. (Ma Chunhui, Hou Yuanyuan, Yang Jie, et al. Seepage prediction model of earth-rockfill dams based on RUN-XGBoost algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2) : 72-78. (in Chinese))
- [30] Yun K K, Yoon S W, Won D. Prediction of stock price direction using a hybrid GA-XGBoost algorithm with a three-stage feature engineering process [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 186: 115716.

(收稿日期: 2025-10-05 编辑: 施业)