

黄河中下游沿黄城市水资源承载力贴近度 空间结构及作用机理

谢蕾蕾¹, 邢凯悦², 位艳佳¹

(1. 华北水利水电大学 数学与统计学院, 河南 郑州 450046; 2. 东南大学 数学学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 采用贴近度测度黄河中下游 31 个沿黄城市水资源承载力, 分析承载力贴近度的空间特征和空间作用机理。结果表明: 黄河中下游流域城市水资源承载力整体偏低, 尤其是下游流域沿黄城市的水资源供需矛盾尖锐; 从空间结构特征全局看, 31 个沿黄城市水资源承载力整体呈现空间自相关特征, 从局部看, 大部分城市无分异特征, 但中游流域出现热点区域, 下游流域尤其是河南省出现低洼区域; 通过沿黄城市水资源承载力贴近度空间作用机理分析, 中游流域沿黄城市水资源承载力受到驱动力(D)、压力(P)、状态(S)、影响(I)、管理(M) 5 个因素的影响, 且城市之间存在空间虹吸效应, 水资源表现出空间竞争, 而不是空间协同发展。下游流域沿黄城市水资源承载力只受到驱动力(D)、状态(S)、影响(I) 3 个因素的作用。研究成果可为沿黄城市加强水资源的管理、优化城市发展模式提供参考。

关键词: 水资源承载力; DPSIRM 模型; 贴近度; 空间统计分析; 黄河中下游沿黄城市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0050-08

Spatial structure and function mechanism of water resources carrying capacity closeness of cities along the middle and lower reaches of the Yellow River

XIE Leilei¹, XING Kaiyue², WEI Yanjia¹

(1. School of Mathematics and Statistics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Mathematics, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The method of closeness degree was used to measure water resources carrying capacity of cities along the middle and lower reaches of the Yellow River, so as to investigate the spatial characteristics and function mechanism of water resources closeness degree. The results show that the carrying capacity of urban water resources in the middle and lower reaches of the Yellow River is generally low, resulting in the acute contradiction between the supply and demand of urban water resources in most cities in this area, especially the ones in the lower reaches. From the perspective of spatial structure characteristics, the water resources carrying capacity of 31 cities along the Yellow River presents spatial autocorrelation characteristics as a whole, and most cities show no differentiation characteristics, except that there are a few hot spots in some cities in the middle reaches of the basin and some low-lying areas in some cities in the lower reaches, especially in Henan Province. The analysis of the spatial function mechanism of urban water resources carrying capacity closeness shows that the urban water resources carrying capacity in the middle reaches of the basin is affected by five factors, namely, driving force (D), pressure (P), state (S), influence (I) and management (M). Moreover, water resources is in a state of spatial competition rather than spatial coordinated development, due to the spatial siphon effect between cities. However, the urban water resources carrying capacity in the lower reaches is only affected by D , S and I . The research results can provide some reference for the decision-making of strengthening water resources man-

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2022-07-05

基金项目: 2022 年河南省高校人文社会科学研究一般项目(2022-ZZJH-415); 2020 年教育部人文社会科学研究青年基金项目(20YJC630124)

作者简介: 谢蕾蕾(1982-), 女, 辽宁丹东人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为水文水资源统计分析。

agement and optimizing urban development mode in cities along the Yellow River.

Key words: water resources carrying capacity; DPSIRM model; closeness degree; spatial statistical analysis; cities along the middle and lower reaches of the Yellow River

1 研究背景

水资源是重要的基础性自然资源,也是支撑经济社会发展的战略性资源^[1]。黄河流域是中国第二大流域,水资源短缺问题一直是限制黄河流域高质量发展的主要障碍。黄河流域生态保护和高质量发展已经上升为国家战略,摸清黄河流域水资源的家底,对黄河流域水资源承载力作出正确判断和评价,不仅是合理利用和配置水资源的基础,同时也是区域经济社会可持续发展的关键所在。

1921年Park等首次提出了承载力的概念,并在资源评价领域得到应用,1989年施雅风院士等率先提出水资源承载力的概念^[2],随后众多学者在该领域开展了大量研究,主要集中于水资源承载力的概念^[3-5]、综合评价指标体系^[6-7]、评价和测度方法^[7-11]、支撑能力和支撑规模^[9-11]等方面。资源承载力综合评价方法起源于经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)和联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)共同提出的压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型,后有经过联合国可持续发展委员会提出的驱动力-状态-响应(driving force-state-response, DSR)模型、欧洲环境署提出的驱动力-压力-状态-影响-响应(driving force-pressure-state-impact-response, DPSIR)模型,王飞等^[6]还引入“管理”子系统构建了驱动力-压力-状态-影响-响应-管理(driving force-pressure-state-impact-response-management, DPSIRM)模型用于水资源综合评价。

随着黄河流域生态保护和高质量发展的推进,对黄河流域水资源承载力的研究也逐渐增加,但总量偏少,且主要集中在水资源利用效率^[12-13]、承载力测度^[14-21]和动态预测^[16-17]等方面。已有研究多针对省域水资源进行分析,由于指标对接和数据获取上存在困难,鲜见有针对主要流经城市或县域的分析。另一方面,现有研究多将视角聚集在水资源承载力的时间变化特征和趋势上,针对空间分布和作用机理的研究相对偏少和简单。

本研究基于DPSIRM模型框架构建黄河流域水资源承载力综合评价指标体系,测度2018年黄河中下游流域31个沿黄城市水资源承载力贴近度水平,

在对水资源承载力空间聚集和分异特征进行分析的基础上,进一步研究水资源承载力影响因素的作用机理。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河流域总面积为 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,共流经青海、四川、宁夏、甘肃、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9省(自治区)。黄河流域沿黄城市多属于资源型缺水地区,随着城镇化进程的加快和气候条件的改变,黄河流域用水量不断增加,尽管黄河流域地表水开发利用率已高达83%,但水资源承载力面临的挑战和承受的压力已成为制约流域发展最大的问题。2019年9月,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上,将推进水资源节约集约利用作为黄河流域生态保护和高质量发展的主要目标之一,并提出要把水资源作为最大的刚性约束,坚持“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”。因此本文选取人口更为密集的黄河中下游内蒙古、陕西、山西、河南、山东5省(自治区)作为研究对象,通过对该5省(自治区)31个沿黄城市水资源承载力的科学评价以及对空间分布结构和因素作用机理的分析,为各流经区域经济社会发展模式和水资源管理措施的改革提供一定参考。

2.2 数据来源

本文采用的数据均来源于2018年内蒙古、陕西、山西、河南、山东5省(自治区)的统计年鉴、水资源公报,以及31个沿黄城市的统计年鉴、水资源公报、水资源规划及各城市统计局、环保局等相关部门公报。缺失数据采用相近5年份均值插补的方法进行填充。

2.3 研究方法

以优化的从优隶属度方法为基础,构建贴近度指标测度黄河中下游沿黄城市的水资源承载力;采用莫兰指数(Moran's I)和LISA(local indicator of spatial association)指数判断沿黄城市水资源承载力的空间等级、空间结构特征;利用空间回归模型探讨水资源承载力子系统的空间作用机理。

2.3.1 贴近度测度方法 鉴于黄河中下游沿黄城市水资源承载力评价指标的不确定性,采用模糊物

元的思想进行承载力分析,构建包含 31 个城市、15 个指标的复合模糊物元。在创造特征值矩阵之前,将原始数据减去最小值,保证所有指标值均为正,从而得到黄河中下游沿黄城市水环境承载力指标矩阵,如公式(1)所示。

$$\mathbf{X} = (x_{ij})_{31 \times 15} \quad (1)$$

式中: x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 31; j = 1, 2, \dots, 15$) 为第 i 个样本(城市)第 j 个指标经过平移后的数值。

由于评价指标有正向指标和逆向指标之分,因此在计算隶属度时针对不同类型的指标采用不同的相对性计算公式,得到模糊量值,如公式(2)、(3)所示。

$$\text{正向指标: } y_{ij} = x_{ij} / \max(x_{ij}) \quad (2)$$

$$\text{逆向指标: } y_{ij} = x_{ij} / \min(x_{ij}) \quad (3)$$

由此,可得复合模糊物元 $\mathbf{R}$, 如公式(4)所示。

$$\mathbf{R} = (y_{ij})_{31 \times 15} \quad (4)$$

式中: y_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 31; j = 1, 2, \dots, 15$) 为第 i 个样本在第 j 个指标上对应的模糊量值。

在公式(4)基础上构造标准模糊物元 $\mathbf{R}_0$, 其中标准模糊物元由复合模糊物元中各评价指标从优隶属度的最大值或最小值确定。其中正向指标以最大值作为最优,逆向指标以最小值作为最优,由此得到标准模糊物元向量,如公式(5)所示。

$$\mathbf{R}_0 = (y_j^*)_{15 \times 1} \quad (5)$$

$$y_j^* = \begin{cases} \max(y_{ij}) & \text{正指标} \\ \min(y_{ij}) & \text{逆指标} \end{cases} \quad (6)$$

式中: y_j^* ($j = 1, 2, \dots, 15$) 为第 j 个指标的标准模糊物元。

以公式(5)、(6)确定的标准模糊物元为基础,计算其余复合模糊物元对应各指标差的平方,得到差平方复合模糊元 $\mathbf{R}_\Delta$, 如公式(7)所示。

$$\mathbf{R}_\Delta = (\Delta_{ij})_{31 \times 15} \quad (7)$$

式中: $\Delta_{ij} = (y_j^* - y_{ij})^2$ ($i = 1, 2, \dots, 31; j = 1, 2, \dots, 15$), 为第 i 个样本在第 j 个指标上对应的差平方复合模糊元。

以公式(7)为基础计算贴近度指标,如公式(8)所示,指标数值越大表示越接近标准水平。

$$k_i = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^{15} w_j \Delta_{ij}} \quad (8)$$

式中: k_i 为评价样本(城市)与标准水平(最优状态)之间的贴近程度; w_j ($j = 1, 2, \dots, 15$) 为利用熵权法计算得到的各个指标的权重值。

2.3.2 空间结构测度方法 空间结构特征的测度主要从全局自相关性和局部分异性两个维度进行。

通常采用 Moran's I 指数来检验判断指标的空间全局自相关性, Moran's I 指数的计算如公式(9)所示。

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{s^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij}} \quad (9)$$

式中: y_i, y_j 分别为第 i, j 个城市的水资源承载力贴近度; m 为城市数量, 本研究中 $m = 31$; s^2 为城市群水资源承载力贴近度矩阵的方差; w_{ij} 为空间权重矩阵元素。

Moran's I 指数是空间相关性的一个衡量指标, 该指标得以应用的基础是计算数值的显著性检验。Moran's I 指数的显著性检验采用 Z 分数作为检验统计量, 零假设为空间位置在一定区域内呈现完全随机(均匀)分布, 根据检验得到的伴随概率(P 值)可判断空间随机分布特征的显著性, 并确定空间自相关性的强弱。研究采用 queen 准则下的二进制邻接矩阵作为空间权重矩阵, 并对数据进行标准化处理以消除临接单元不等的问题, 以此为基础计算 Moran's I 指数并进行显著性检验。

空间分析常用 LISA 指数反映观测指标的局部空间分异性特征。LISA 指数集群分析是通过计算 LISA 指数值确定高值聚集区、低值聚集区, 计算结果正值为聚集, 负值为异化, 一般通过绘制 LISA 图反映局部空间聚集和分异状况。LISA 图共包含 5 种情况: “无明显关系”表示该区域和周围的区域属性值的聚集情况没有明显的特征; “高-高”(热点区)表示该区域和周围区域的属性值均偏高; “低-低”(冷点区)表示该区域和周围区域的属性值均偏低; “高-低”(孤立区)表示该区域的属性值偏高而周围的属性值偏低; “低-高”(塌陷区)表示该区域的属性值偏低而周围的属性值偏高。“高-高”和“低-低”表示的是一种空间正相关、空间聚集的概念, “低-高”和“高-低”则表示的是一种空间负相关、空间异常的概念。

2.3.3 空间回归模型 传统的回归模型假设因变量与自变量在同一空间维度上, 并未充分考虑不同空间维度上可能会出现溢出或虹吸效应, 而资源问题本身就带有非常显著的空间区位特征, 因此利用空间计量方法, 从空间的角度探讨水资源承载力变化的影响因素作用机理, 更为深刻和合理。常用的空间计量经济模型包括空间滞后模型(spatial autoregressive model, SAR)和空间误差模型(spatial error model, SEM)。模型形式的选择根据 LM(La-

grange multiplier) 检验的结果进行判定。

空间滞后模型(SAR)考虑因变量的空间相关性,即因变量的变化不仅与自变量有关,还与相邻区域的因变量有关。模型的基本形式如公式(10)所示。

$$y = \rho Wy + X\beta + \varepsilon$$

(10)

式中: y 为因变量列向量、 X 为自变量矩阵、 W 为空间权重矩阵,反映因变量的各个单元之间的空间连接关系; ρ 为空间滞后变量 Wy 的系数,是对空间对象扩散或溢出程度的衡量,如果 ρ 显著,表明因变量之间存在一定的空间依赖性; β 为与自变量 X 相关的参数向量; ε 为随机误差项向量。

空间误差模型(SEM) 适用于当空间依赖性是由于忽略某自变量所产生的情况下,自变量与因变

量之间的空间作用关系研究。模型的基本形式如公式(11) 所示。

$$y = X\beta + \lambda W\varepsilon + \mu$$

(11)

式中: λ 为空间自回归结构 $W\varepsilon$ 的系数,一般有 $0 \leq \lambda < 1$; μ 为随机扰动项向量。其余变量含义同上。

3 结果与分析

3.1 水资源承载力综合评价指标体系

在 DPSIRM 模型框架基础上,依据独立性、系统性、科学性等原则,根据黄河中下游沿黄城市经济社会发展特性,选取 15 个指标构建黄河中下游流域沿黄城市水资源承载力综合评价指标体系,并通过熵权法测度各指标权重,如表 1 所示。

表 1 黄河中下游流域沿黄城市水资源承载力综合评价指标体系

目标层	准则层	指标层	单位	方向	权重
黄河中下游 流域沿黄城 市水资源承 载力	驱动力(D)	人口密度(x_1)	人/km ²	逆向指标	0.0382
		城镇化率(x_2)	%	正向指标	0.0868
		人均 GDP(x_3)	元	正向指标	0.0985
	压力(P)	第一产业用水量(x_4)	10 ⁸ m ³	逆向指标	0.0133
		第二产业用水量(x_5)	10 ⁸ m ³	逆向指标	0.0319
		人均日生活用水量(x_6)	m ³	逆向指标	0.0583
	状态(S)	水资源总量(x_7)	10 ⁸ m ³	正向指标	0.0494
		人均水资源量(x_8)	m ³	正向指标	0.1040
		耕地有效灌溉面积(x_9)	km ²	正向指标	0.0905
		年降水量(x_{10})	mm	正向指标	0.0939
		造林面积(x_{11})	m ²	正向指标	0.1592
	影响(I)	万元 GDP 能耗降低率(x_{12})	%	正向指标	0.0568
		污水处理厂集中处理率(x_{13})	%	正向指标	0.0264
	响应(R)	公共供水普及率(x_{14})	%	正向指标	0.0277
		建成区绿化覆盖率(x_{15})	%	正向指标	0.0651

DPSIRM 系统将水资源承载力评价分为驱动力(D)、压力(P)、状态(S)、影响(I)、响应(R) 和管理(M)6 个影响因素:驱动力(D) 反映水资源发展变化的驱动因素,主要从人口和经济驱动两个方面衡量;压力(P) 反映水资源的需求和使用带来的挑战,从居民生活和经济发展两个维度考量水资源的使用压力;状态(S) 主要反映水资源的各种供给状态,包括资源总量和来源;影响(I) 反映水资源供需矛盾引起的水资源与经济社会关系变化,从增加供给和减少消耗两个方面衡量;响应(R) 体现应对水资源供需矛盾所采取的措施,通过污水处理率来反映;管理(M) 是指加强水资源承载的政策管理调控,主要体现在行政管理的方法和措施效果上。

对于指标的方向性,需要考虑到研究区域的实际

经济社会和资源发展状况。黄河中下游城市多数人口密集,经济社会发展程度相对不高,因此本研究将人口密度作为逆向指标,将城镇化率作为正向指标。

3.2 黄河中下游流域沿黄城市水资源承载力贴适度

根据公式(1) ~ (8) 计算得到 2018 年 31 个沿黄城市的水资源承载力贴适度,计算结果见表 2。将贴适度指标分为 5 级,Ⅰ级贴适度的取值范围为[0.8,1.0],Ⅱ级贴适度的取值范围为[0.6,0.8),Ⅲ级贴适度的取值范围为[0.4,0.6),Ⅳ级贴适度的取值范围为[0.2,0.4),Ⅴ级贴适度的取值范围为[0,0.20),贴适度指标值越大表示水资源承载力水平越高。根据表 2 采用等权平均法可计算出内蒙古自治区和陕西省的沿黄城市平均水资源贴适度分别为 0.420 4 和 0.406 2,均处于Ⅲ级,水资源承载

力达到中等程度,其余 3 个省份沿黄城市的平均水资源贴适度均处于Ⅳ级水平,水资源承载力相对较弱,尤其是河南省沿黄城市水资源承载力的平均值仅为 0.2708,严重偏低。具体到城市,鄂尔多斯市水资源承载力较强,处于Ⅱ级状态,贴适度处于Ⅲ级状态的沿黄城市共有 7 个,且主要集中于黄河中游的内蒙古自治区、山西省和陕西省,处于下游的河南省和山东省沿黄城市水资源承载力整体偏弱,水资源的供需矛盾已达到较为尖锐的程度。

表 2 黄河中下游流域沿黄城市水资源承载力贴适度

区域	城市	贴适度
内蒙古自治区	呼和浩特	0.3749
	包头	0.4141
	鄂尔多斯	0.6380
	乌海	0.2264
	巴彦淖尔	0.4488
山西省	太原	0.2777
	晋中	0.3486
	运城	0.3090
	忻州	0.4163
	临汾	0.3499
陕西省	吕梁	0.4386
	太原	0.2777
	渭南	0.3062
	延安	0.4396
	榆林	0.4728
河南省	郑州	0.2653
	开封	0.2669
	洛阳	0.3052
	新乡	0.2747
	焦作	0.2567
山东省	濮阳	0.2363
	三门峡	0.3059
	济源	0.2558
	济南	0.3087
	淄博	0.3125
	东营	0.4033
	济宁	0.3654
	泰安	0.3232
	德州	0.3598
	聊城	0.3094

3.3 黄河中下游流域水资源承载力空间特征

3.3.1 水资源承载力的空间等级特征 水资源承载力贴适度依附于空间地理区位,贴适度指标分级并未考虑到空间地理区位的影响,而黄河流域各城市水资源与地理区位存在着复杂的空间作用关系。因此利用空间分析技术,根据城市的空间结构关系,利用自然段点法,将 31 个城市划分为 3 个空间集群,分别为水资源承载力较强区域、中等区域和较弱区域。利用 ArcGIS 软件对各城市水资源承载力贴适度空间等级分布状况进行可视化分析,如图 1 所示。

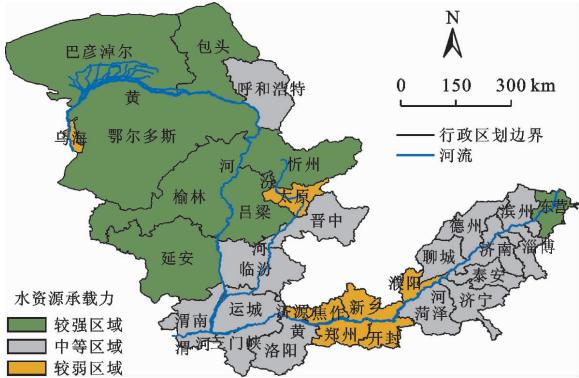


图 1 黄河中下游沿黄城市水资源承载力的 3 级分类

由图 1 可以看出,水资源承载力较强区域包括 8 个城市,主要位于黄河中游的内蒙古自治区,以及陕西省和山西省的部分城市,另外位于黄河下游入海口的东营市凭借较优的地理位置,也跻身于水资源承载力较强的区域。水资源承载力较弱的区域包括 8 个城市,主要集中在河南省境内,同时还包括太原市,值得注意的是,水资源承载力较弱区域包括两个省会城市,在缺乏外部资源支持的基础上,省会城市要实现经济社会的高速发展,必定会对各种资源造成巨大压力,从而降低了城市资源的承载力水平。其余的 15 个城市为水资源承载力的中等水平集群,主要分布于山西省和山东省境内。

3.3.2 水资源承载力的空间结构 根据公式(9)经过计算得到 31 个沿黄城市水资源承载力贴适度的全局 Moran's I 指数值为 0.348,Z 得分值为 3.224 8,P 值为 0.002。按照判别规则,在 5% 的显著性水平下,拒绝零假设,即 31 个中下游沿黄城市水资源承载力贴适度呈现显著空间正相关性,由此推断中下游沿黄城市的水资源承载力可能存在局部的空间集聚和分异特征。

利用 Geoda 软件计算黄河中下游主要流经城市水资源承载力贴适度的 LISA 指数值,并绘制 LISA 图,如图 2 所示。

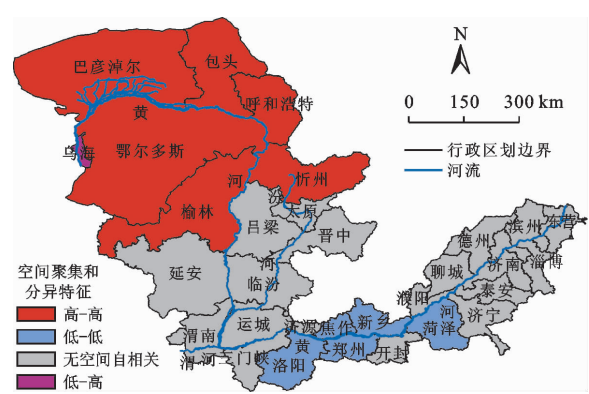


图 2 黄河中下游沿黄城市水资源承载力局部空间相关分析 LISA 图

图 2 显示,黄河中下游 31 个沿黄城市呈现出 4 种显著的空间聚集和分异特征集群。包头市、巴彦淖尔市、呼和浩特市、鄂尔多斯市、榆林市及忻州市表现出“高-高”的分布特征,这一区域位于黄河中游流域,几乎覆盖了内蒙古自治区的全部沿黄城市,且 6 个城市均具有较高的水资源承载力贴适度指标值,形成了水资源承载力的高值热点区域。同样位于内蒙古自治区的乌海市,呈现出显著的“低-高”分布特征,从水资源承载力贴适度的数值上看,乌海市贴适度是所有沿黄城市中最低的,由此形成了水资源承载力的塌陷区域。位于黄河下游的郑州市、洛阳市、焦作市、新乡市和菏泽市呈现“低-低”的分布特征,这些沿黄城市普遍人口密度大,经济发展水平相对较高,由此对水资源承载造成了较大的压力,且由于地域的相邻关系,形成了显著的水资源承载力低洼区域。其他的沿黄城市水资源承载力之间不具有显著的相关作用关系,即城市并未呈现出显著的空间分异特征。

3.3.3 水资源承载力的空间回归关系 通过前述研究可知,黄河中下游流域沿黄城市水资源承载力在总体上存在空间自相关性,在局部上存在空间聚集和分异性。为了探究水资源承载力空间分布特征的形成原因,引入空间因素构建空间计量经济模型,分析黄河中下游沿黄城市水资源承载力的影响因素作用机理。

以 31 个沿黄城市水资源承载力贴适度为因变量,以各城市 D 、 P 、 S 、 I 、 R 和 M 6 个影响因素的指数值为自变量,采用“共享边或角”的规则建立对称性空间权重矩阵,首先构建空间经典线性回归(ordinary least squares, OLS)模型,通过对模型残差进行空间自相关检验和 LM-lag 和 LM-error 诊断,判定适宜的空间计量经济模型形式。

由于黄河中游与下游流域城市水资源承载力分布特征差异较为显著,因此在作用机理分析部分,分为中下游、中游和下游流域 3 个模块进行空间计量模型的形式判定、构建、参数估计和进一步优化。

表 3 显示了对于 3 种流域模块的空间计量模型选择参数的检验结果。由表 3 可以看出,对于中下游流域沿黄城市的模型形式判定,3 种检验伴随概率(P 值)均不显著,因此选择空间经典线性回归(OLS)模型;对于中游流域沿黄城市的模型形式判定, Moran's I 检验和 LM-error 检验的 P 值不显著,而 LM-lag 检验的 P 值显著,根据模型设定规则,最终选择空间滞后(SAR)模型;对于下游流域沿黄城市的模型形式判定, Moran's I 检验的 P 值显著,但 LM-lag 和 LM-error 检验的 P 值均不显著,因此选择空间误差(SEM)模型。

表 3 空间计量模型的形式判定参数检验结果

流域	Moran's I - error	LM - lag	LM - error
中下游流域	0.1955	0.3812	0.6190
中游流域	0.8367	0.0200	0.5600
下游流域	0.0292	0.1869	0.4793

对不同流域分别构建 OLS、SAR 和 SEM 模型,进行参数估计与检验的结果如表 4 所示。

经过计算,黄河中下游沿黄城市水资源承载力贴适度影响因素的 OLS 回归方程为:

$$y = 0.1470 + 0.5677D + 0.8963S + 0.8729I \quad (12)$$

黄河中游主要沿黄城市水资源承载力贴适度影响因素的 SAR 回归方程为:

$$y = 0.1883 + 0.8040D + 0.9563P + 0.7565S + 0.8123I - 0.6649M - 0.1401Wy \quad (13)$$

黄河下游主要沿黄城市水资源承载力贴适度影响因素的 SEM 回归方程为:

$$y = 0.1422 + 0.6572D + 0.7374S + 1.9079I + 0.6617W\epsilon \quad (14)$$

3 个模型的拟合优度分别为 0.970 8、0.990 6 和 0.991 3,可见构建的空间模型对沿黄城市水资源承载力相关数据有较高贴合度,模型对数据信息的提取达到分析的要求。3 种模型中,对水资源承载力起显著作用的因素各不相同,其中响应(R)因素在各个模型中均未通过显著性检验,响应因素反映对水资源安全和高效利用情况,但由于指标获取的困难,未能搜集到足够的指标用于测度响应因素,这也是

该因素不显著的主要原因。

对于黄河中游流域模型,水资源承载力水平贴近度空间滞后项的系数 ρ 为 $-0.140\ 1$,表明黄河中游流域沿黄城市之间存在空间作用关系,但是呈现的是虹吸效应,水资源表现出空间竞争,而不是空间协同发展。黄河下游流域模型中,空间自回归结构系数 λ 为 $0.661\ 7$,且显著,说明对于下游沿黄城市,存在被该模型忽视的自变量,在控制这些因素的影响后,模型对自变量与因变量之间空间作用机理的描述更为精准和客观。

水资源承载力贴近度影响因素中,驱动力(D)在 3 种流域的空间计量模型中均对水资源承载力呈现积极作用,并在中游流域模型中表现出最强的作用力度;状态(S)因素在 3 种流域模型中均呈现出

对水资源承载力贴近度的促进作用,在中下游流域模型中,状态因素是作用强度最大的核心因素;影响(I)因素在 3 种流域模型中均显示出较强的积极作用,其中黄河下游流域模型中影响(I)因素的作用强度达到 $1.907\ 9$,是其他模型作用强度的 2 倍以上;压力(P)因素只在中游流域的空间计量模型中对水资源承载力具备积极作用,且参数值较大,即在其他因素不变的条件下,压力(P)分指数每变动一个单位,可引起贴近度同向变动 $0.956\ 3$ 个单位,接近 $1:1$ 的驱动作用。管理(M)因素只在黄河中游沿黄城市的 SAR 模型中对因变量起显著作用,但是呈现消极影响,这反映出黄河中游沿黄城市的公共服务和生态建设严重滞后于水资源承载力的发展,水资源管理力度和效率亟需提升。

表 4 空间计量模型参数估计和检验结果

变量	中下游(OLS 模型)		中游(SAR 模型)		下游(SEM 模型)	
	参数值	P 值	参数值	P 值	参数值	P 值
截距	0.1470	0.0000	0.1883	0.0000	0.1422	0.0000
D	0.5677	0.0000	0.8040	0.0000	0.6572	0.0000
P	0.4067	0.0518	0.9563	0.0000	-0.0845	0.2632
S	0.8963	0.0000	0.7565	0.0000	0.7374	0.0000
I	0.8729	0.0000	0.8123	0.0000	1.9079	0.0000
R	0.1056	0.8528	0.1488	0.7806	0.3756	0.2636
M	-0.2283	0.1891	-0.6649	0.0106	-0.1357	0.0927
ρ			-0.1401	0.0018		
λ					0.6617	0.0000
拟合优度	0.9708		0.9906		0.9913	

4 讨 论

水资源承载力是对区域水资源综合评价的具体体现,水资源承载力的提升不仅有利于水资源的高效利用,而且可以促进区域经济社会的可持续发展。本文在 DPSIRM 框架下对黄河中下游 31 个沿黄城市的水资源承载力进行测度,评价结果与已有研究成果^[15-21]基本一致,其中左其亭等^[15]将水资源承载力评价分为水资源、社会经济、生态环境 3 个子系统,部分研究^[17-20]以该评价指标体系为基础进行优化,虽然采用的评价模型不尽相同,但是均得出黄河中下游沿黄城市水资源短缺、水资源承载力面临危险的基本结论。

本文利用空间统计分析技术探讨 31 个沿黄城市水资源承载力的空间结构及影响因素。结果表明

黄河中下游沿黄城市水资源空间分布不均,这与卢亚丽等^[17]、汪伦焰等^[18]的研究一致。在水资源承载力影响因素的探讨中,不同学者^[15,18]采用的模型各不相同,但几乎都是以实际观测变量为影响因素,且普遍未关注到空间维度的作用。本文将 6 个子系统的评估值作为影响因素,在概念的边界上更为宽泛,同时强调空间分析视角,对影响因素作用的测算和评估更为合理。

黄河中下游沿黄地区多属于水资源相对匮乏的区域,且水资源承载力不存在空间溢出效应。一个地区资源禀赋很难在短时期内发生改变,可行的办法是通过结构调整,加速新旧动能转换,依靠智能化、绿色化发展模式加强和优化水资源的管理,实现有限资源的高效利用,这已成为提升城市水资源承载力最高效、合理、便捷的途径。

由于资料的有限性,本研究仅针对2018年黄河中下游沿黄城市的水资源承载力空间结构和作用机理进行分析,且在构建DPSIRM框架时,由于统计口径的差异导致部分指标无法纳入模型。今后可进一步优化指标选取,并开展水资源承载力时空演变的综合作用机理分析。

5 结 论

(1)黄河中下游沿黄城市水资源承载力贴近度整体偏低。黄河上游的内蒙古自治区沿黄城市水资源承载力贴近度相对较高,但是也仅达到中等水平。下游流域的大部分沿黄城市呈现出较低的水资源承载力状态,这些城市水资源的供需矛盾已达到比较尖锐的程度。

(2)黄河中下游沿黄城市水资源承载力空间格局较为简单。从全局视角看,流经城市水资源承载力存在显著的正向自相关关系;从局部分异视角看,大部分城市之间并无显著分异性,但中游流域个别沿黄城市呈现高值聚集特征,下游流域特别是河南省部分沿黄城市出现承载力低洼区域特征。

(3)对黄河中下游沿黄城市水资源承载力贴近度空间作用机理分析表明,中游流域沿黄城市水资源承载力受到驱动力(D)、压力(P)、状态(S)、影响(I)、管理(M)5个因素的影响,且城市之间存在空间虹吸效应,水资源表现出空间竞争,而不是空间协同发展。下游流域沿黄城市水资源承载力只受到驱动力(D)、状态(S)、影响(I)3个因素的作用。

参考文献:

- [1] 郭倩,汪嘉杨,张碧.基于DPSIRM框架的区域水资源承载力综合评价[J].自然资源学报,2017,32(3):484-493.
- [2] 张爱国,李鑫,张义明,等.城市水资源承载力评价指标体系构建——以天津市为例[J].安全与环境学报,2021,21(4):1839-1848.
- [3] 武毅,李祥,马中雨,等.基于支持向量机的山东省水资源承载力评价[J].安全与环境学报,2021,21(2):893-901.
- [4] 袁汝华,王霄汉.基于Pythagoras-TOPSIS法的长三角水资源承载力综合评价分析[J].科技管理研究,2020,40(15):71-79.
- [5] 吴琼,常浩娟.我国各地区水资源承载力差异研究[J].数学的实践与认识,2020,50(16):73-81.
- [6] 王飞,张爱国,陈国鹰,等.基于DPSIRM模型的河北省水资源承载力评价[J].水电能源科学,2021,39(7):57-60+116.
- [7] 石晓昕,袁重乐,钱会,等.基于DPSIR-TOPSIS模型的河北省水资源承载力评价及障碍因素研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):92-99.
- [8] 李辉,金菊良,童芳,等.基于联系数的安徽省水资源承载力评价及空间差异诊断分析[J].水电能源科学,2018,36(7):22-27.
- [9] 郭维红,黄珺嫦,张二超.基于SD模型的河南省水资源承载力模拟研究[J].河南农业大学学报,2020,54(4):689-697.
- [10] 李辉,金菊良,吴成国,等.基于联系数的安徽省水资源承载力动态诊断评价研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):42-49.
- [11] 金菊良,何飘,张浩宇,等.减法全邻联系数及其在区域水资源承载力趋势分析中的应用[J].西北大学学报(自然科学版),2020,50(3):438-446.
- [12] 张永凯,孙雪梅.黄河流域水资源利用效率测度与评价[J].水资源保护,2021,37(4):37-43+50.
- [13] 路瑞,赵琰鑫.基于水资源生态足迹的黄河流域水资源利用评价[J].人民黄河,2020,42(11):48-52+134.
- [14] 张宁宁,栗晓玲,周云哲,等.黄河流域水资源承载力评价[J].自然资源学报,2019,34(8):1759-1770.
- [15] 左其亭,张志卓,吴滨滨.基于组合权重TOPSIS模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J].水资源保护,2020,36(2):1-7.
- [16] 赵雨婷,张新海,杨国宪,等.基于系统动力学的黄河流域水资源动态预测研究[J].中国水利,2020(19):40-43.
- [17] 卢亚丽,徐帅帅,司保江,等.黄河流域九省(区)水资源环境承载力动态演变特征研究[J].人民黄河,2021,43(11):103-108.
- [18] 汪伦焰,黄昕,李慧敏.基于CW-FSPA的黄河流域九省水资源承载力评价研究[J].中国农村水利水电,2021(9):67-75.
- [19] 唐家凯,丁文广,李玮丽,等.黄河流域水资源承载力评价及障碍因素研究[J].人民黄河,2021,43(7):73-77.
- [20] 张宁宁,栗晓玲,周云哲,等.黄河流域水资源承载力评价[J].自然资源学报,2019,34(8):1759-1770.
- [21] 张丽洁,康艳,栗晓玲.基于正态云模型的黄河流域水资源承载力评价[J].节水灌溉,2019(1):76-83.