

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.05.02

# 黄河流域十大孔兑地区多维水资源承载力分析

崔彩琪<sup>1</sup>, 段利民<sup>1,2,3</sup>, 潘浩<sup>1</sup>, 苗平<sup>4</sup>, 王瑞东<sup>5</sup>, 芦小燕<sup>5</sup>, 刘廷玺<sup>1,2,3</sup>

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010018; 3. 黄河流域内蒙古段水资源与水环境综合治理协同创新中心, 内蒙古呼和浩特 010018; 4. 鄂尔多斯市河湖保护中心, 内蒙古鄂尔多斯 017010; 5. 鄂尔多斯市水文勘测局, 内蒙古鄂尔多斯 017010)

**摘要:** 针对黄河流域内蒙古段十大孔兑地区地下水超采、“粮能争水”导致的黄河流域局部地区水资源短缺问题, 基于“量、质、域、流”多维水资源承载力评价框架, 利用层次分析法和熵权法对评价指标进行主、客观组合赋权, 应用 TOPSIS 模型对区域水资源承载力进行多维度综合分析。结果表明: 2000—2020 年研究区水资源综合承载力呈上升趋势, 但整体处于临界可承载状态; 水资源维度承载力: 量 > 流 > 质 > 域, 水资源承载子系统承载力: 利用方式 > 载体 > 承载对象。总体来看, 国家最严格水资源管理制度“三条红线”的刚性约束以及河(湖)长制的全面推行, 倒逼区域水资源“质”和“流”维度承载力提升, 但持续高强度的水资源开发利用, 使得“量”和“域”维度承载力下降显著; 未来需要进一步优化农业与工业用水格局, 重点解决“粮能争水”问题, 加大对现有河湖水资源引入等措施来实现经济社会的可持续发展与水资源荷载平衡。

**关键词:** 多维水资源承载力; 评价指标体系; 量-质-域-流; TOPSIS 模型; 黄河十大孔兑

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2023)05-0012-08

## Multi-dimensional water resources carrying capacity of the Ten Kongdai region in the Yellow River Basin

CUI Caiqi<sup>1</sup>, DUAN Limin<sup>1,2,3</sup>, PAN Hao<sup>1</sup>, MIAO Ping<sup>4</sup>, WANG Ruidong<sup>5</sup>, LU Xiaoyan<sup>5</sup>, LIU Tingxi<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, China; 3. Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in Inner Mongolia of the Yellow River Basin, Hohhot 010018, China; 4. Ordos River and Lake Protection Center, Ordos 017010, China; 5. Ordos Hydrological Survey Bureau, Ordos 017010, China)

**Abstract:** Ten Kongdai region in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin is facing the shortage of water resources caused by the overexploitation of groundwater and the predicament of “food and energy competing for water”. In view of this problem, the multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation framework of “quantity – quality – domain – flow” was constructed, and the evaluation indicators were weighted subjectively and objectively using analytic hierarchy process and entropy weight method. Then the TOPSIS model was used to carry out the multi-dimensional comprehensive analysis of the regional water resources carrying capacity. The results show that the comprehensive carrying capacity of water resources in the study area showed an upward trend from 2000 to 2020, but the overall carrying capacity was in a critical carrying state; water resources dimension carrying capacity is ranked as follows: quantity > flow > quality > domain, and water resources subsystem carrying capacity is ranked as follows: water use pattern > carrier > carrying object. Overall, the rigid constraints of the “three red lines” of the country’s most stringent water resources management system and the full implementation of the river and

收稿日期: 2023-03-16; 修回日期: 2023-09-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201200); 内蒙古自治区“科技兴蒙”行动重点专项(KJXM-EEDS-2020005); 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0009); 内蒙古农业大学基本科研业务费专项(BR221012)

作者简介: 崔彩琪(1998—), 女, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 研究方向为水资源配置。

通讯作者: 段利民(1982—), 男, 内蒙古锡林郭勒人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源、寒旱区生态水文等研究。

lake chief system have forced the regional water resources to increase their carrying capacity in the “quality” and “flow” dimensions. However, continued high-intensity water resources development and utilization have significantly reduced the carrying capacity of the “volume” and “domain” dimensions. In the future, it is necessary to further optimize the water use pattern of agriculture and industry, focus on solving the problem of “food and energy competing for water”, and increase the diversion of the existing river and lake water resources to achieve sustainable social and economic development and water resources load balance.

**Key words:** multi-dimensional water resources carrying capacity; evaluation index system; quantity – quality – domain – flow; TOPSIS model; Ten Kongdui region in the Yellow River Basin

## 1 研究背景

《“十四五”重点流域水生态环境保护规划》中提出了以水环境、水资源、水生态“三水”统筹的水生态环境保护思路<sup>[1]</sup>,当“三水”中任何“一水”出现问题,都会使整个水生态系统失去平衡,难以维系。水资源是水环境和水生态的纽带和载体,水资源在“量-质-域-流”任何一个物理维度上的过度消耗,都会引发其超载,从而影响水环境和水生态系统的健康<sup>[2]</sup>,制约区域经济社会的可持续发展<sup>[3]</sup>。

水资源承载力反映了一个地区水资源的支撑能力,是水资源与社会经济、生态环境之间协调程度的重要度量指标<sup>[4]</sup>,也是区域经济社会发展受水资源制约的阈值<sup>[5]</sup>。国外关于水资源承载力是以“水资源供需比”<sup>[6]</sup>、“可持续发展”<sup>[7]</sup>等概念为目标,利用评价模型<sup>[8]</sup>来进行深入研究。长久以来,水资源承载力一直是我国水资源领域的研究热点,传统研究多集中于水量<sup>[9]</sup>和水质<sup>[10]</sup>两个维度,如:高伟等<sup>[11]</sup>建立了水量-水质耦合的水生态承载力模型;褚雅君等<sup>[12]</sup>从水量和水质角度出发,建立了以水量、水质为约束条件的水资源承载力模型。现阶段,水资源系统受到的干扰方式远不止水量、水质两个维度,因此,全面科学地对水资源承载力做出合理评价,具有重要意义。水资源承载压力主要来自用水量、排污量、水域面积的占用和河道生态流量等方面,同时,生态环境系统的稳定也需要水资源在数量、质量、空间和流场的支撑<sup>[2]</sup>。王建华等<sup>[13]</sup>从水资源、经济社会、水生态、水环境综合角度出发,最早提出了以水量、水质、水域、水流4个维度为基础,以此构建水资源承载力评价指标体系;Han等<sup>[14]</sup>以水量、水质、水域面积和流量为基础,建立了水资源承载系统的风险评估模型;Zhang等<sup>[15]</sup>将水生态、水质、水量和用水量四个维度纳入分布式层次评价模型,建立了水资源承载力模型;周云哲等<sup>[16]</sup>从水资源系统结构出发,构建了“量、质、域、流”4个维度的评价指标体

系,并采用正态云模型,对区域水资源荷载状况进行了评价;唱彤等<sup>[17]</sup>基于水资源承载力“水量-水质-水生栖息环境-连通性”四维表征,构建了水资源承载力评价指标体系。

黄河流域作为我国第二大流域,水资源短缺问题一直限制着流域的可持续发展,2019年,黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略<sup>[18]</sup>。十大孔兑地区位于黄河“几”字弯最北端,地貌特征由南到北分为黄土丘陵沟壑区、库布齐沙漠区和黄河南岸冲积平原区三大自然单元<sup>[19]</sup>，“粮能争水”问题长期存在,加之用水效率偏低,更加剧了区域水资源短缺的局面。基于此,本文从水资源、社会经济、水生态、水环境综合角度出发,以水量、水质、水域、水流4个维度为基础,构建多维水资源承载力评价指标体系<sup>[20]</sup>,采用层次分析法和熵权法对指标进行主客观组合赋权<sup>[21]</sup>,并应用优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)评价模型<sup>[22]</sup>对区域进行多维水资源承载力综合计算分析,为黄河流域十大孔兑地区的水资源合理开发利用提供基础支撑。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

十大孔兑是由南向北并列流入黄河的十条季节性支流(见图1),所在行政区包括鄂尔多斯市达拉特旗全部、东胜区、杭锦旗和准格尔旗的小部分地区,总面积为 $1.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,地理坐标为东经 $108^\circ 47' \sim 110^\circ 58'$ ,北纬 $39^\circ 47' \sim 40^\circ 30'$ 。该区域属典型大陆性气候,冬季严寒漫长,夏季炎热短促,冬春季风大沙多,夏秋季暴雨、洪水频繁。区域内降水蒸发年际变化较大,且分布不均匀,多年平均降水量为292 mm,蒸发量为2200 mm( $\Phi 20 \text{ cm}$ 口径蒸发皿),季节性河流特征明显,河道比降较大,水土流失造成径流含沙量大,使得流域内砒砂岩、黄土、风沙土分布广泛,导致地表水资源难以得到有效利用。地区现状总人口

为37.5万,国民生产总值为 $319.7 \times 10^8$ 元,城市化率为57.8%,农田灌溉面积约为 $8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,灌溉用水量占区域水资源开发利用量的比例高达80%以上,且以开发利用地下水为主,占比65%以上。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 水资源承载力评价指标体系构建

(1)水资源承载力系统解析。水资源承载系统由承载主体和承载客体组成,两者相辅相成。承载主体,即承载体,是以流域水循环为基础的水资源系统,包括水资源(水量)、水环境(水质)、水生态(水域、水流)三要素<sup>[23]</sup>;承载客体,即承载对象与利用

方式,是支撑社会经济系统和生态环境系统的基础。“量、质、域、流”4个维度相互联系、又相互制约,任何一方超载,都会导致整个水生态系统失衡。因此,在水循环系统框架下,水资源承载力可以对“量、质、域、流”4个维度进行分析与调控<sup>[24]</sup>,以此来协调生态环境和经济社会之间的发展,促进水资源的高效利用。

(2)水资源承载力评价指标体系。本文以水量、水质、水域、水流4个维度的概念为基础框架,密切结合黄河流域十大孔兑地区实际情况,构建出多维水资源承载力综合评价指标体系,如图2所示。

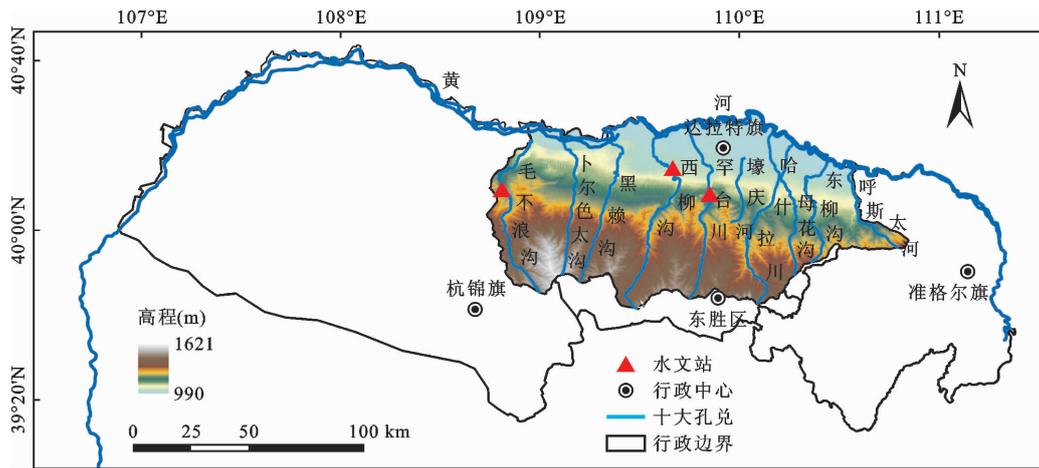


图1 黄河十大孔兑概况图

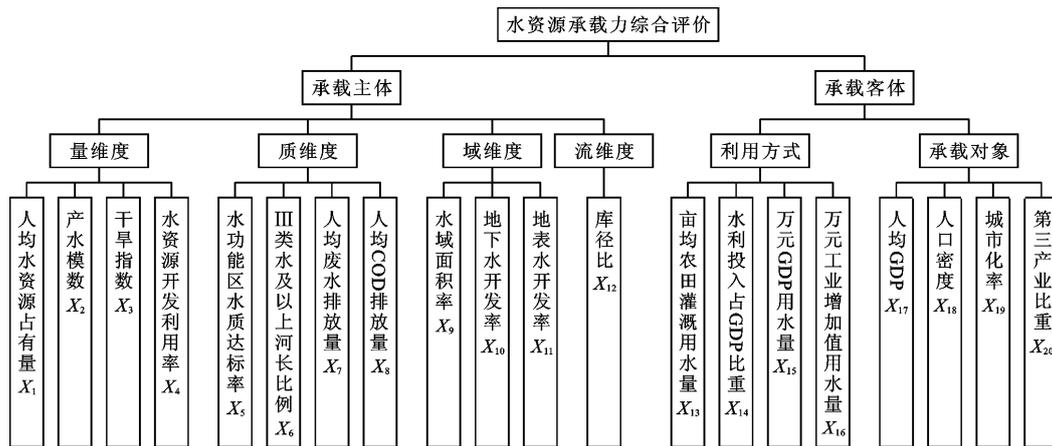


图2 多维水资源承载力综合评价指标体系

### 2.2.2 水资源承载力评价模型

(1)评价指标赋权。评价指标权重的确定对于水资源承载力计算至关重要,如果只是采用某一种赋权方法计算权重,其结果会产生一定的误差。为了避免产生误差,故采用主、客观组合赋权法,该方法可以考虑到各指标的变化程度,有效地避免了人为因素的影响,可以客观地反映出指标的重要性。主观权重由

专家评价确定各指标的权重,即采用层次分析法确定<sup>[21]</sup>;客观权重通过数值方法计算各指标的权重,即采用熵权法确定<sup>[25]</sup>;经过两种方法计算出各自权重,将其代入公式(1),得到组合权重  $W$ 。

$$W = \alpha W_{i1} + (1 - \alpha) W_{i2} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为组合系数,一般情况取值为0.5<sup>[26]</sup>;  $W_{i1}$ 为客观权重;  $W_{i2}$ 为主观权重。

(2)TOPSIS 多目标决策分析。TOPSIS 模型是一种进行多目标决策分析的有效方法,其通过计算各评价指标与正、负理想解之间的距离进行排序。该方法计算方便灵活,评价结果准确,具有很好的适用性,详细计算过程见文献[22]。对于计算出的多维水资源承载力综合评价指数,参考已有文献<sup>[27]</sup>将水资源承载力评价等级划分为 5 个等级,用于表示区域水资源承载力状况,评价等级划分标准见表 1。

表 1 水资源承载力评价等级划分标准

评价指数范围	评价等级	水资源承载力等级
[0,0.2)	I	严重超载
[0.2,0.4)	II	超载
[0.4,0.6)	III	临界可承载
[0.6,0.8)	IV	弱可承载
[0.8,1.0)	V	可承载

### 2.3 数据来源

本研究基础数据主要来源于 2000—2020 年《鄂尔多斯市水资源综合利用与保护规划》《鄂尔多斯市“四水四定”方案》《鄂尔多斯市第三次国土调查主要数据公报》《鄂尔多斯市水资源公报》《鄂尔多斯市统计年鉴》等。

## 3 结果与分析

### 3.1 权重计算结果

以 2000—2020 年黄河流域十大孔兑地区的各评价指标数据为基础,利用层次分析法、熵权法分别对 20 个指标进行主、客观赋权,并计算出组合权重,结果见表 2。

由表 2 可以看出,承载系统上,层次分析法和熵权法计算出的权重值有所差异,但两种方法均得到承载体 > 承载对象 > 利用方式的权重排序;维度上,层次分析法为质 > 流 > 域 > 量,熵权法为流 > 质 > 域 > 量。为了平衡两者计算的权重,取二者的平均值作为最终组合权重值。

### 3.2 水资源承载力综合评价分析

通过层次分析法、熵权法对 20 个评价指标进行组合赋权,确定最终权重值,并利用 TOPSIS 评价模型计算出多维水资源承载力指数,再根据水资源承载力评价等级划分标准(表 1),确定出 2000—2020 年十大孔兑地区水资源承载力评价等级结果,如表 3 所示。评价等级越高,表明水资源承载能力越强。在此基础上,对结果进行多维度综合评价分析。

表 2 水资源承载力评价指标权重计算结果

指标层	熵权权重	层次分析权重	组合权重
人均水资源占有量 $X_1$	0.024	0.013	0.018
产水模数 $X_2$	0.022	0.011	0.016
干旱指数 $X_3$	0.035	0.021	0.028
水资源开发利用率 $X_4$	0.000	0.014	0.007
水功能区水质达标率 $X_5$	0.061	0.012	0.036
Ⅲ 类水及以上河长比例 $X_6$	0.024	0.024	0.024
人均废水排放量 $X_7$	0.055	0.120	0.088
人均 COD 排放量 $X_8$	0.061	0.120	0.090
水域面积率 $X_9$	0.081	0.021	0.051
地下水开发率 $X_{10}$	0.017	0.027	0.022
地表水开发率 $X_{11}$	0.029	0.027	0.028
库径比 $X_{12}$	0.075	0.035	0.055
亩均农田灌溉用水量 $X_{13}$	0.000	0.058	0.029
水利投入占 GDP 比重 $X_{14}$	0.080	0.085	0.082
万元 GDP 用水量 $X_{15}$	0.033	0.064	0.049
万元工业增加值用水量 $X_{16}$	0.052	0.041	0.047
人均 GDP $X_{17}$	0.081	0.067	0.074
人口密度 $X_{18}$	0.113	0.071	0.092
城市化率 $X_{19}$	0.081	0.070	0.076
第三产业比重 $X_{20}$	0.076	0.099	0.088

表 3 2000—2020 年十大孔兑地区水资源承载力评价等级结果

年份	量维 度	质维 度	域维 度	流维 度	承载 对象	承载 体	利用 方式	综合
2000	IV	II	III	I	III	III	IV	III
2001	IV	II	I	I	III	II	IV	III
2002	IV	III	I	I	III	II	IV	III
2003	V	III	I	I	III	II	IV	III
2004	V	III	I	I	III	II	IV	III
2005	IV	III	II	II	III	III	III	III
2006	IV	III	II	III	III	III	III	III
2007	IV	III	II	III	III	III	III	III
2008	IV	III	II	III	II	III	II	III
2009	I	III	IV	IV	II	III	III	III
2010	II	IV	III	IV	II	III	III	III
2011	III	III	I	IV	II	II	III	II
2012	V	III	II	V	III	III	III	III
2013	IV	III	II	V	III	III	III	III
2014	IV	III	II	V	III	III	III	III
2015	III	III	II	V	III	III	III	III
2016	IV	V	II	V	III	III	III	III
2017	III	V	II	V	IV	III	III	III
2018	IV	V	II	V	IV	III	III	III
2019	IV	V	II	V	IV	III	III	III
2020	IV	V	II	V	IV	III	III	III

3.2.1 维度承载力分析 图3为2000—2020年黄河流域十大孔兑地区的“量、质、域、流”水资源承载力指数演变规律。

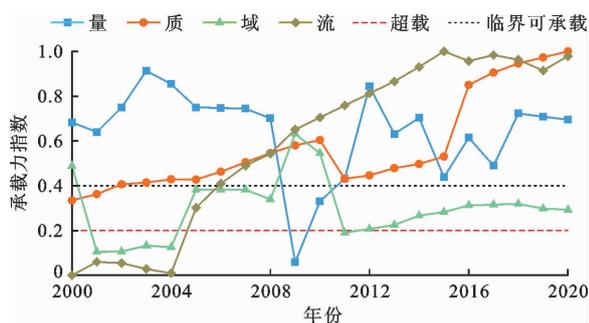


图3 2000—2020年十大孔兑地区“量、质、域、流”水资源承载力指数演变规律

由图3可以看出,量和域维度承载力变化趋势波动较大,质和流维度承载力总体呈上升趋势,尤以流维度提升最为明显。结合表3评价等级结果来看,研究区水资源维度承载力排序为量>流>质>域。对图3中所示的4个维度水资源承载力指数变化特征具体分析如下:

(1)量维度在2000—2020年承载力指数波动变化明显,总体呈下降趋势;2003年承载力指数达到峰值,使得水资源承载力处于可承载状态;2009年承载力指数最小,仅为0.06,水资源承载力严重超载;2011年之后承载力状态保持在临界可承载之上。在量维度的各评价指标中,干旱指数指标权重占比最大,对量维度承载力指数的影响也最大,且属逆向指标,与量维度存在明显的负响应关系。年降水量是当地自产水资源的主要补给来源,产水模数和人均水资源占有量属正向指标,与量维度存在明显的正响应关系。2003年干旱指标值最小(2.01),该年份量维度承载力指数达到0.91,为最大值;2009年人均水资源占有量为 $327.1\text{ m}^3$ ,产水模数为 $1.44 \times 10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$ ,均为最小值,对应的量维度承载力指数也处于最低值;2011—2020年期间研究区域人均水资源占有量达到 $1\ 000\text{ m}^3$ 以上,地表水资源量和地下水资源量的增加在一定程度上改善了量维度的承载力状态。

(2)从质维度来看,水资源承载力指数在2011—2015年处于下降的区段,但整体呈上升趋势,从临界可承载逐步发展到可承载状态,表明区域内水环境质量在逐步提升。水功能区水质达标率和Ⅲ类水及以上河长比例属正向指标,水质达标率代表了流域或区域内河湖水体质量<sup>[23]</sup>,河长比例代表

了河水水质的情况,这两项指标值均保持增长;人均废水排放量和人均COD排放量指标权重占比大,且属逆向指标,指标值越大表明废水和污染物排放越严重,人均废水排放量从2000年的 $2.6\text{ m}^3$ 减少到2020年的 $0.22\text{ m}^3$ ,人均COD排放量从 $9.74\text{ kg}$ 减少到 $3.13\text{ kg}$ ,这与我国强有力的“最严格的水资源管理政策”关系密切,“三条红线”的设置倒逼流域水环境质量改善。

(3)域维度下的水资源承载力指数经历两次上升阶段,于2011年后趋于平稳,承载状况从临界可承载下降到超载,其中在2001—2004年和2011年处于严重超载状态。2009年承载力为弱可承载状态,但2011年迅速下降至严重超载状态,通过对各评价指标的分析可知,2009年研究区地表水和地下水开发率分别为3.99%和34.14%,域维度水资源承载力指数达到最大值,但2011年地表水和地下水开发率分别达到55.35%和76.06%,高强度的水资源开发导致地下水位下降、河湖水体得不到有效补给,进而直接影响到区域域维度的承载力水平。2011年之后,对区域地下水超采区以及周边地区的农牧产业结构进行了调整<sup>[28]</sup>,适当减少了农作物灌溉用水量,大力实施节水灌溉,压缩地下水开采率,逐步达到地下水开采补给平衡,从而缓解了水资源承载力状况。今后仍需减少地下水的开采,合理开发区域内的河流、湖泊等水域。

(4)流维度承载力指数在研究时段内呈上升趋势,且增幅较大,水资源承载力状况从严重超载提高到了可承载。分析流维度的各评价指标,库径比由2000年的0.16减小到2020年的0.02,库径比越小表明水利工程对河流自然径流的干扰性越弱,流维度承载力越好。2000—2004年流维度承载力指数低于0.2,处于连续严重超载状态,说明这一期间区域内的水库及上游区淤地坝工程对河道径流的拦蓄调节作用较大,从而导致中下游区河道径流量处于较低的水平。2005年开始,一方面由于水利工程年久失修,蓄水量越来越少,另一方面因河(湖)长制的全面推行,使得河道环境不断改善,河流长度持续增加,河流生态基流得到满足,流维度承载力不断得以提升。

综合以上4个维度的评价结果分析来看,水量、水质、水域、水流都会影响水资源承载力状态,由于域维度承载力处于超载状态,改善域维度承载力问题刻不容缓,对此提出的措施是减少地下水的开采,合理开发河湖水资源;流与质维度整体承载力呈上

升趋势,且处于临界可承载状态,未来仍需保障水环境质量,避免废水和污染物的排放,减小水利工程对河湖径流的调控能力<sup>[29]</sup>。

3.2.2 承载系统分析 图4为2000—2020年黄河流域十大孔兑地区水资源承载系统的承载力指数演变规律。从表3评价等级结果来看,研究区水资源承载系统的3个子系统承载力排序为利用方式>承载体>承载对象,且3个子系统承载力状况均为临界可承载。

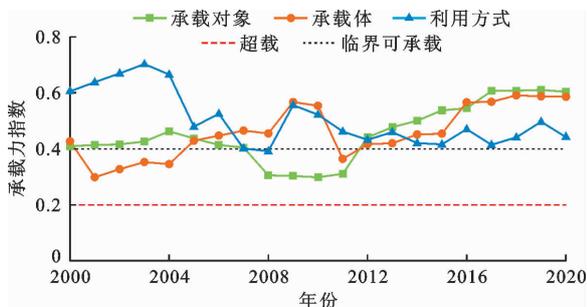


图4 2000—2020年十大孔兑地区水资源承载系统承载力指数演变规律

承载对象是阻碍水资源承载子系统发展的首要因素,由图4可知,2000—2020年承载对象的承载力指数整体呈上升趋势。由具体评价指标来看,该区域人均GDP由2000年的 $0.96 \times 10^4$ 元增长到2020年的 $8.59 \times 10^4$ 元,相应城市化率由32.0%提升至57.8%、第三产业比重从32.1%提升为42.7%,其中第三产业比重指标的权重较大,对承载对象的承载力指数变化影响较大,且这3项指标均属正向指标,指标值的增长使得承载对象的承载力状态由临界可承载上升为弱可承载。对经济社会系统而言,提升承载对象子系统的水资源承载力会促进经济社会实现水资源荷载平衡<sup>[16]</sup>。

承载体承载力是量、质、域、流4个维度承载力的综合体现,由图4可以看出,2000—2020年承载体承载力指数总体呈上升趋势,个别年份存在起伏,基本处于临界可承载水平。但2010—2011年承载体承载力状况从临界可承载变为超载,从4个维度上分析其原因,该阶段干旱指数从4.8升高至7.0,人均COD排放量从9.494 kg增大至31.294 kg,地表水开发率从5.8%提高至55.3%,地下水开发率从51.1%提高至76.1%,而这几项指标均属逆向指标,与各维度存在明显的负响应关系,这些指标的增大使得承载体承载力指数减小。质和流维度承载力的逐步提升是区域多年来水污染和水生态等综合治

理的结果,对承载体承载力的提升具有显著的效果,但也无法抵消量与域维度承载力指数下降对流域承载体承载力的决定性影响。

利用方式子系统承载力指数总体呈下降趋势,其评价指标中的水利投入占GDP比重由2000年的0.66%下降至2020年的0.18%,由此表明,该区域水利行业发展并没有得到有效重视,使得利用方式承载力由弱可承载下降至临界可承载。黄河流域十大孔兑地区“粮能争水”问题突出,工业用水量与农田灌溉用水量在不断增加,这也减弱了利用方式的水资源承载力,用水过度导致对水资源需求过大,降低了水资源的平衡能力。未来需要合理分配农业与工业用水量,实施高效节水灌溉,加大水利设施投入,加强水资源的管理与利用等环节,进而提升水资源管理水平。

3.2.3 水资源承载力综合分析 图5为2000—2020年黄河流域十大孔兑地区的水资源综合承载力指数演变规律。



图5 2000—2020年十大孔兑地区水资源综合承载力指数演变规律

由图5可知,研究区水资源综合承载力指数总体呈上升趋势,承载力状况为临界可承载,仅在2011年承载力处于超载状态。对研究时段内研究区水资源综合承载力的变化状况分析如下:在维度方面,质与流维度承载力指数整体呈上升趋势,从2000—2020年各指标值变化来看,水质达标率由70%提升至82%、河长比例由64%提升至77%、库径比由0.16下降至0.02,各指标值的变化使得质维度承载力状态从超载提升为可承载,流维度承载力状态从严重超载提升为可承载,说明质与流维度承载力状况的变化为水资源、经济社会系统提供了优质条件;在承载系统方面,承载对象承载力指数呈上升趋势,对经济社会和生态环境起到支撑作用,经济提升又能促进区域水资源可持续发展,这也使得该区域综合水资源承载力得到提升。2011年万元GDP用水量的增加和人均COD排放量的增加导致

水资源承载力下降至超载状态,生态环境用水与经济社会排污量的增加会影响水生态与水环境功能,导致水循环系统减弱和水环境质量下降,从而造成水资源综合承载力指数下降。尽管节水和用水效率提高,但水资源压力形势仍旧严峻,所以区域经济发展应与水环境和生态环境保护相协调。

## 4 讨论

(1)黄河流域水资源短缺,供需矛盾突出,水资源承载力研究分析可为区域水资源合理开发利用提供基础支撑。如何构建评价指标体系是水资源承载力研究的基础,左其亭等<sup>[30]</sup>从水资源、生态环境和经济社会3个准则层来构建评价指标体系;张宁宁等<sup>[31]</sup>从水资源承载力的内涵出发,基于“量、质、域、流”多个维度来构建评价指标体系,该两篇文献得出的区域水资源综合承载力基本一致,但前者仅考虑了水量、水质维度,分析出水量是影响黄河流域区域水资源承载力的因素,而后者从水量、水质、水域、水流4个维度考虑,得出改善黄河流域区域水资源承载力的关键是水量、水域、水流。本文通过结合该两篇文献,构建出黄河流域十大孔兑地区多维水资源承载力评价指标体系,总结出水量、水质、水流、水域均会影响区域水资源承载力的大小,但水域是关键影响因素,过度开发水域空间会导致水生态的崩溃,从而影响经济社会的可持续发展。总的来说,水量、水质是影响水资源承载力大小的承载主体,但水域、水流也是影响水资源承载力大小的主要约束因素,多维度构建评价指标体系可以全面评价和分析区域水资源承载力,也为水资源承载力研究提供了逻辑性和理论支撑。

(2)确定评价指标权重是进行水资源承载力研究的关键,如何选择全面的赋权方法也是至关重要的。谢蕾蕾等<sup>[26]</sup>通过熵权法对指标进行赋权,认为影响水资源承载力的因素主要是状态准则层下的人均水资源量,左其亭等<sup>[30]</sup>利用层次分析法和熵权法对指标进行组合赋权,得出产水模数是影响水资源承载力的首要障碍因子。本文利用层次分析法和熵权法对评价指标进行主、客观组合赋权,认为域维度评价指标是影响水资源承载力的主要因素,水域面积率指标的权重为0.051,比其他指标的权重略大。通过前面的分析,域维度水资源承载力处于一个超载的状态,尽管鄂尔多斯市落实了“四水四定”和深度节水控水的方案,但整个十大孔兑地区水域空间仍被过度开发,今后需减少对地下水资源的开采,加

大对地表水资源的利用,以及引入现有河湖水资源等措施来保持水资源与经济社会、生态环境的可持续发展。

## 5 结论

(1)2000—2020年黄河流域十大孔兑地区水资源综合承载力呈上升趋势,但整体水平不高,处于临界可承载状态。尽管节水和用水效率提高,但区域水资源仍然短缺,未来应集中扩大蓄水工程,确保水资源与经济社会的可持续发展。

(2)水资源承载力维度分析结果表明,维度承载力排序为量>流>质>域,水量、水质、水流、水域均为影响区域水资源承载力的因素,但域维度是现阶段阻碍水资源承载力发展的关键,需减少地下水资源开采,加大对地表水资源的利用。

(3)水资源承载子系统承载力排序为利用方式>承载体>承载对象,各子系统均处于临界可承载状态;其中利用方式子系统承载力指数在研究时段内呈下降趋势,由于“粮能争水”问题突出,未来需要进一步优化农业与工业用水格局;而承载对象承载力最弱说明人类经济社会在发展过程中影响了水资源承载能力,需加强经济社会发展,以此实现水资源荷载平衡。

### 参考文献:

- [1] 司马文卉,胡小凤,沈占峰,等. 大清河流域水生态安全评价指标体系构建[J]. 给水排水,2021,57(1):90-95+102.
- [2] 王建华,翟正丽,桑学锋,等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报,2017,48(9):1023-1029.
- [3] 张樾樾,曹正旭,张仁杰,等. 黄河三角洲生态经济区水资源承载力评价及趋势预测[J]. 世界地理研究,2022,31(3):549-560.
- [4] 董会忠,姚孟超,张峰,等. 京津冀水资源承载力模糊评价及关键驱动因素分析[J]. 科技管理研究,2019,39(23):93-102.
- [5] 范嘉炜,黄锦林,袁明道,等. 基于子系统熵权模型的珠三角水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):100-105.
- [6] LÓPEZ - LAMBRAÑO A A, MARTÍNEZ - ACOSTA L, GÁMEZ - BALMACEDA E, et al. Supply and demand analysis of water resources. Case study: irrigation water demand in a semi-arid zone in Mexico [J]. Agriculture, 2020, 10(8): 333.
- [7] TSANI S, KOUNDOURI P, AKINSETE E. Resource management and sustainable development: a review of the European water policies in accordance with the United Na-

- tions' Sustainable Development Goals [J]. Environmental Science & Policy, 2020, 114: 570 - 579.
- [8] BORGOMEIO E, MORTAZAVI - NAEINI M, HALL J, et al. Risk, robustness and water resources planning under uncertainty [J]. Earth's Future, 2018, 6(3): 468 - 487.
- [9] 张晨光,文章,龚健,等.可持续发展视角下基于水量供需平衡的水资源承载力分析——以青海省大通县为例[J].安全与环境工程,2022,29(2):237 - 247.
- [10] DING Lei, CHEN Kunlin, CHENG Shenggao, et al. Water ecological carrying capacity of urban lakes in the context of rapid urbanization: a case study of East Lake in Wuhan[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2015, 89 - 90(Parts A/B/C): 104 - 113.
- [11] 高伟,严长安,李金城,等.基于水量-水质耦合过程的流域水生态承载力优化方法与例证[J].环境科学学报,2017,37(2):755 - 762.
- [12] 褚雅君,许萍,王海东,等.基于区域水量-水质的水资源承载力研究[J].中国给水排水,2020,36(3):54 - 61.
- [13] 王建华,何凡.承载力视域下的水资源消耗总量和强度双控行动认知解析[J].中国水利,2016(23):34 - 35 + 40.
- [14] HAN Yan, ZHANG Shifeng, LV Aifeng. Risk assessment of the water resources carrying capacity: a case study in north China [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2018, 58(6): 1240 - 1254.
- [15] ZHANG Shanghong, XIANG Mengshi, YANG Jiasheng, et al. Distributed hierarchical evaluation and carrying capacity models for water resources based on optimal water cycle theory [J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 432 - 443.
- [16] 周云哲,栗晓玲,周正弘.基于“量-质-域-流”四维指标体系的水资源荷载状况评价——以黑河流域三地市为例[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):215 - 223 + 231.
- [17] 唱彤,郦建强,金菊良,等.面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J].水资源保护,2020,36(1):44 - 51.
- [18] 薛澜,杨越,陈玲,等.黄河流域生态保护和高质量发展战略立法的策略[J].中国人口·资源与环境,2020,30(12):1 - 7.
- [19] 刘璐,郭月峰,姚云峰,等.十大孔兑上游土壤侵蚀空间分布及动态变化[J].水土保持研究,2021,28(4):34 - 41 + 47.
- [20] 丁相毅,石小林,凌敏华,等.基于“量-质-域-流”的太原市水资源承载力评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):9 - 20.
- [21] 杜雪芳,李彦彬,张修宇.基于TOPSIS模型的郑州市水资源承载力研究[J].人民黄河,2022,44(2):84 - 88.
- [22] 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.
- [23] 余灏哲,李丽娟,李九一.基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J].资源科学,2020,42(2):358 - 371.
- [24] 张丽洁.黄河流域水资源承载力评价研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [25] 刘玘玘.基于熵权TOPSIS-耦合协调度-灰色关联度的长江经济带水资源承载力综合评价[J].武汉大学学报(工学版),2023,56(5):532 - 541.
- [26] 谢蕾蕾,邢凯悦,位艳佳.黄河中下游沿黄城市水资源承载力贴适度空间结构及作用机理[J].水资源与水工程学报,2023,34(1):50 - 57.
- [27] 徐政华,曹延明.基于熵权TOPSIS模型的长春市水资源承载力评价[J].安全与环境学报,2022,22(5):2900 - 2907.
- [28] 卢方园,贾德彬,高瑞忠,等.内蒙古荒漠草原灌区水资源承载力评价研究[J].灌溉排水学报,2022,41(8):39 - 44.
- [29] 马睿,李云玲,何君,等.我国水资源承载力分析及分区管控对策[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(2):209 - 217.
- [30] 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.
- [31] 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.