

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221421

基于模糊综合评判模型的黑河中游水资源承载力评价

焦 娇¹, 胡广录^{1,2}, 李嘉楠³, 麻 进¹, 陈海志¹

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 评价黑河中游水资源承载力对促进该区域水资源的高效利用并推动经济可持续发展具有重要意义。为此, 选取 10 个主要评价指标, 并采用模糊综合评判模型定量分析了黑河中游 2000~2020 年水资源承载力动态变化状况。结果表明, 黑河中游水资源承载力综合评分值在 0.3~0.5 之间, 其中最高值出现在 2020 年, 达到 0.471, 整体水资源承载力处于中级阶段, 即可承载状态。黑河中游应调整用水结构, 加强发展节水型经济和生态环境保护, 以提高水资源的合理高效利用。

关键词: 黑河中游; 水资源承载力; 模糊综合评判模型; 熵权法

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0027-04

1 概况

黑河作为中国第二大内陆河, 穿越青海、甘肃和内蒙古三个省区, 其中黑河中游地处甘肃省河西走廊的中段, 干旱少雨, 水资源补给主要来自上游山区径流。黑河中游集中了整个流域 90% 以上的耕地、人口, 用水量超过流域用水总量的 80%, 是水资源的主要消耗区。1980 年代起中游用水量不断加大, 导致下游的内蒙古境内来水量锐减、河道干涸、植被枯萎、土壤沙化等生态环境问题凸显, 严重影响下游的生产、生活及生态环境安全。为此国家出台“九七分水方案”等措施限制中游用水、增加下游河道来水, 有效提高了中游水资源利用率。但作为内陆地区典型的干旱绿洲, 黑河中游对有限水资源的不合理利用导致区域经济社会发展受限的问题近年来一直存在。研究表明^[1,2], 水资源承载力是衡量缺水地区经济可持续发展和生态系统保护的重要指标。我国在水资源承载力方面的研究主要采用不同的评价方法和模型分析其在区域尺度的空间分布, 并取得大量成果。为此, 本文采用模糊综合评判模型对黑河中游 2000~2020 年的水资源承载力进行评价, 旨在反映区域水资源的承载状况及开发利用潜力,

为区域后续在水资源合理配置和高效利用方面提供科学依据, 以便更好促进区域经济社会可持续发展。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 模糊综合评判法

模糊综合评价法是利用模糊变化原理对受到多因素影响的事物或对象进行综合评价的一种方法^[2,3]。为尽量减少各种人为因素对结果的影响, 采取熵权法确定指标权重^[4]。模糊综合评判法计算步骤如下。

步骤 1 确定评价因素集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。

步骤 2 确定评语集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 。

步骤 3 确定各评价因素的权重 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。

步骤 4 构建评判矩阵 $R = [r_{ij}]_{n \times m}$ 。

步骤 5 确定模糊综合评判矩阵 $B = AR$ 。

步骤 6 得到模糊综合评分值 $T = 0.95B_1 + 0.05B_2 + 0.05B_3$ (B_1, B_2, B_3 分别为对应 V_1, V_2, V_3 等级的评价结果)。

据相关研究成果^[5-7]并结合黑河中游实际情况, 得到综合评分值的分级标准并确定出 10 个具有代表性的评价因子, 分别见表 1、2。

收稿日期: 2022-07-12, **修回日期:** 2022-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561102, 41867074); 甘肃省水利厅水资源费预算项目(甘水建管发[2019]255号)

作者简介: 焦娇(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: 1103855113@qq.com

通讯作者: 胡广录(1966-), 男, 博士、教授、硕导, 研究方向为生态水文及生态修复, E-mail: hgl0814@163.com

表 1 水资源承载力综合评分值 T 分级

Tab. 1 Grading of comprehensive score value of water resources carrying capacity

等级	取值范围	承载状况	承载状况描述
V级	0	不可承载	经济发展与水资源不协调,水资源无法满足生活生产需求
IV级	[0,0.3]	准不可承载	水资源问题比较突出,基本满足生活生产用水需求
III级	[0.3,0.6]	可承载	区域性缺水问题得到解决,需提高水资源利用率、调整经济结构
II级	[0.6,0.8]	良好可承载	水资源丰富,经济发展与水资源处在比较协调状态
I级	[0.8,1]	理想可承载	水资源、经济、社会、生态协调发展,可加大经济发展力度

2.2 数据来源

数据来源于甘州区、临泽县和高台县 2000~2020 年各年的《国民经济和社会发展统计公报》、《水资源公报》、《统计年鉴》及各县(区)政府部门官方网站的数据。

水资源承载力评价指标具体数据见表 3。

3 计算结果与分析

根据步骤 3 确定指标权重向量 $A=(0.078, 0.120, 0.107, 0.077, 0.165, 0.097, 0.065, 0.074, 0.122, 0.095)$ 。

表 2 评价指标体系与分级临界值

Tab. 2 Evaluation index system and grading critical value

评价指标	I 级 V_1	II 级 V_2	III 级 V_3	指标类型	计算公式
人均水资源量 $C_1/(m^3 \cdot a^{-1})$	>1400	$1400 \sim 700$	<700	+	水资源总量/总人口
水资源利用率 $C_2/\%$	<50	$50 \sim 75$	>75	-	总用水量/水资源总量
人均生活用水量 $C_3/(m^3 \cdot a^{-1} \cdot d^{-1})$	<100	$100 \sim 150$	>150	-	生活用水量/(总人口数 \times 365)
人口密度 $C_4/(a \cdot km^{-2})$	<100	$100 \sim 150$	>150	-	总人口/土地面积
农业灌溉定额 $C_5/(m^3 \cdot hm^{-2})$	<250	$250 \sim 500$	>500	-	农业灌溉用水量/耕地面积
农业灌溉水利用系数 C_6	>0.65	$0.5 \sim 0.65$	<0.5	+	渠系水利用系数 \times 田间水利用系数
万元工业增加值用水量 C_7/m^3	<50	$50 \sim 100$	>100	-	工业增加值/工业用水量
生态环境用水率 $C_8/\%$	>10	$5 \sim 10$	<5	+	生态环境用水量/水资源总量
年需水量模数 $C_9/(10^4 m^3 \cdot km^{-2})$	<1	$1 \sim 15$	>15	-	需水量/土地面积
年供水模数 $C_{10}/(10^4 m^3 \cdot km^{-2})$	<1	$1 \sim 15$	>15	-	供水量/土地面积

注：“+”表示评价指标为正反馈指标；“-”表示评价指标为负反馈指标。

表 3 水资源承载力评价指标数据

Tab. 3 Water resources carrying capacity evaluation index data set

评价指标	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
人均水资源量 C_1	1145.92	1117.47	1087.63	1135.93	1183.74
水资源利用率 C_2	94.80	102.01	98.43	97.81	80.26
人均生活用水量 C_3	122.42	99.02	134.42	144.20	134.88
人口密度 C_4	72.47	74.51	76.56	73.30	70.34
农业灌溉定额 C_5	508.87	514.00	523.07	393.33	333.87
农业灌溉水利用系数 C_6	0.49	0.52	0.51	0.56	0.61
万元工业增加值用水量 C_7	575.00	226.01	129.88	67.84	35.71
生态环境用水率 C_8	10.55	6.37	7.02	7.26	3.66
年需水量模数 C_9	19.48	17.64	19.91	15.90	12.98
年供水模数 C_{10}	16.30	17.22	16.08	15.79	13.57

各年评价指标对应不同等级的评判矩阵 R 为:

$$R_{2000} = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.71 & 0.00 \\ 0.00 & 0.19 & 0.81 \\ 0.05 & 0.95 & 0.00 \\ 0.76 & 0.24 & 0.00 \\ 0.00 & 0.47 & 0.53 \\ 0.00 & 0.42 & 0.58 \\ 0.00 & 0.03 & 0.97 \\ 0.59 & 0.41 & 0.00 \\ 0.00 & 0.65 & 0.35 \\ 0.00 & 0.42 & 0.58 \end{bmatrix}; R_{2005} = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.71 & 0.00 \\ 0.00 & 0.16 & 0.84 \\ 0.52 & 0.48 & 0.00 \\ 0.75 & 0.25 & 0.00 \\ 0.00 & 0.45 & 0.55 \\ 0.00 & 0.63 & 0.37 \\ 0.00 & 0.08 & 0.92 \\ 0.00 & 0.77 & 0.23 \\ 0.00 & 0.65 & 0.35 \\ 0.00 & 0.38 & 0.62 \end{bmatrix}$$

$$R_{2010} = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.71 & 0.00 \\ 0.00 & 0.17 & 0.83 \\ 0.00 & 0.81 & 0.19 \\ 0.74 & 0.26 & 0.00 \\ 0.00 & 0.42 & 0.58 \\ 0.00 & 0.59 & 0.41 \\ 0.00 & 0.23 & 0.77 \\ 0.00 & 0.90 & 0.10 \\ 0.00 & 0.65 & 0.35 \\ 0.00 & 0.43 & 0.57 \end{bmatrix}; R_{2015} = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.71 & 0.00 \\ 0.00 & 0.18 & 0.82 \\ 0.00 & 0.62 & 0.38 \\ 0.76 & 0.24 & 0.00 \\ 0.00 & 0.93 & 0.07 \\ 0.00 & 0.91 & 0.09 \\ 0.14 & 0.86 & 0.00 \\ 0.00 & 0.95 & 0.05 \\ 0.00 & 0.65 & 0.35 \\ 0.00 & 0.45 & 0.55 \end{bmatrix}$$

$$R_{2020} = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.71 & 0.00 \\ 0.00 & 0.35 & 0.65 \\ 0.00 & 0.80 & 0.20 \\ 0.77 & 0.23 & 0.00 \\ 0.16 & 0.84 & 0.00 \\ 0.21 & 0.79 & 0.00 \\ 0.68 & 0.32 & 0.00 \\ 0.00 & 0.33 & 0.67 \\ 0.00 & 0.65 & 0.35 \\ 0.00 & 0.60 & 0.40 \end{bmatrix}$$

以 2020 年为例,水资源承载力综合评价结果为:

$$B_{2020} = AR_{2020} = (0.078 \dots 0.095) \cdot$$

0.29	0.71	0.00
0.00	0.35	0.65
0.00	0.80	0.20
0.77	0.23	0.00
0.16	0.84	0.00
0.21	0.79	0.00
0.68	0.32	0.00
0.00	0.33	0.67
0.00	0.65	0.35
0.00	0.60	0.40

= (0.166, 0.604, 0.230)

2000~2020 年水资源承载力综合评价结果见表 4。图 1 为黑河中游 2000~2020 年各年水资源承载力综合评分值 T 。

表 4 水资源承载力综合评判矩阵 B

Tab. 4 Comprehensive evaluation result matrix B of water resources carrying capacity

年份	V_1	V_2	V_3
2000	0.118	0.437	0.444
2005	0.121	0.439	0.440
2010	0.061	0.487	0.452
2015	0.077	0.638	0.285
2020	0.166	0.604	0.230

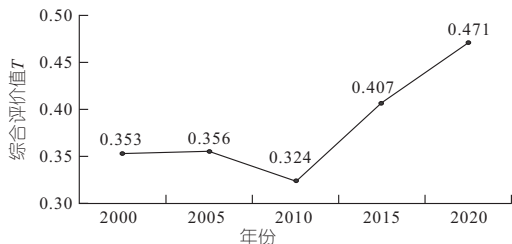


图 1 水资源承载力综合评分值

Fig. 1 Comprehensive score of water resources carrying capacity

由表 4 可知, 2000~2020 年, 黑河中游水资源承载力对 V_1 、 V_2 的隶属度总体上逐渐增大, 对 V_3 的隶属度从 2010 年起逐渐下降。由图 1 可知, 综合评分值 T 在 0.3~0.5 之间, 由表 1 可知属于 III 级, 处于可承载状态; 2020 年 T 值最高, 达到 0.471, 比 2000 年增长了 33.36%, 整体 T 值呈现先降后升的波动变化, 下降幅度小、上升幅度大, 总体处于向上态势。

4 讨论

根据研究区统计数据, 制作产业结构图和人口、耕地面积变化趋势图, 见图 2、3。

4.1 2000~2010 年水资源承载力变化

2000~2010 年间, T 值呈现出平稳并略有下降的趋势, 总体下降了 8.22%。结合研究区实际情况和现有研究成果, 自 2000 年后, 受到国家和地方政府调水政策及干旱少雨的气候条件等因素

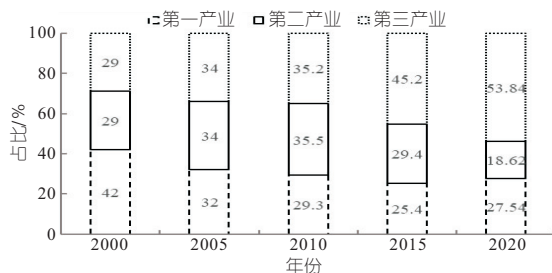


图 2 2000~2020 年产业结构

Fig. 2 Industrial structure from 2000 to 2020

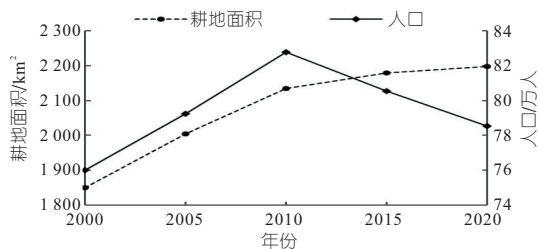


图 3 2000~2020 年耕地面积、人口变化

Fig. 3 Cultivated land area and population change from 2000 to 2020

的制约, 黑河中游用水被进一步压缩。由图 2 可知, 2000~2010 年间, 研究区产业结构由原来第一、二、三产业的 42:29:29 转为 29.3:35.5:35.2, 第一产业减少超过 30%, 二、三产业增加均超过 20%, 经济结构得到明显优化。由图 3 可知, 人口与耕地面积分别增加了 8.34% 和 15.34%, 对水资源承载力影响较大的人均生活用水量 C_3 和农业灌溉定额 C_5 两项因素也有所增大, 这两种变化共同导致区域生活用水和农业用水不断增加, 其中: ①农业用水。低产出、高耗水的传统农业模式(夏粮作物大田漫灌)使得水资源利用率较低, 农业需水量和耗水量均增大。②工业用水。一些新型工业企业增加迅速, 工业体量也不断增大, 工业需水量不断增加, 水资源开发利用不断上升, 特别是对地下水的过度开采曾一度超过警戒限。③生态用水。由于研究区是以灌溉农业为主的干旱缺水区域, 大量农业灌溉用水及迅速增加的工业用水挤占了生态用水, 使区域生态稳定性受到影响, 植被衰退, 荒漠化程度加剧, 一度威胁到区域生产生活的安全。

综上所述, 在诸多因素的共同作用下, 由于研究区水资源开发利用强度不断增大、水资源承载力呈现下降态势、可开发利用潜力不断减小, 虽仍处在可承载状态, 但接近临界值。

4.2 2010~2020 年水资源承载力变化

2010~2020 年 T 值呈现明显上升趋势, 增幅达 45.31%, 表明水资源开发利用的潜力逐年加大, 水资源利用率不断提高, 这与国家和地方政府扎实推进“节水型社会”建设, 节水意识深入人民

心,用水效率明显提高密不可分。由图 2 可知,2010~2020 年间,研究区不断优化产业结构,三种产业结构由原来 29.3 : 35.5 : 35.2 调整为 27.54 : 18.62 : 53.84,第三产业比重明显提升,主要耗水的一、二产业比重得到大幅下调。具体表现为:①生活用水方面。由于我国东部地区经济和科技的飞速发展,导致研究区出现人口外流现象,总人口数下降了 5.09%(图 3),生活用水量也有所减少。②农业用水方面。耕地面积虽出现小幅增加,但通过覆膜垄播、压夏增秋,加大大型灌区节水改造工程建设,增加低耗水、高收益经济作物种植面积等措施,使农业灌溉定额 C_5 明显减少,农业灌溉用水量得到有效控制。③工业用水方面。通过不断引进先进新兴产业,大力发展生态循环型工业,万元工业增加值用水量 C_7 减少 72.5%,工业用水量减少。同时通过提高生活污水处理再生水的循环开发利用及积极建设黑河湿地国家级自然保护区,改善区域水环境质量,有效提高水资源利用率。2015~2020 年生态环境用水率出现下降(表 3),反映了研究区在发展经济过程中虽加强了三种产业间对水资源的合理利用,却忽视了自然生态环境的基本需水要求,长期发展下去会影响区域经济的绿色、健康、可持续发展。

总而言之,2010~2020 年黑河中游水资源承载力呈现良性发展态势,开发潜力得到明显提高。但农业灌溉用水作为水资源承载的主要压力源,仍存在进一步压缩潜力,应加大推进节水型农业建设、提高灌溉用水效率。除此之外应合理规划用水空间与用水部门的需求,在确保经济快速发展的同时,修复严重受损的自然生态环境、提高水资源利用效率,实现区域社会、经济、生态三者协调、可持续发展。

Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in the Middle Reaches of the Heihe River Basin Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Model

JIAO Jiao¹, HU Guang-lu^{1,2}, LI Jia-nan³, MA Jin¹, CHEN Hai-zhi¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China;

3. Gansu Provincial Soil and Water Conservation Research Institute, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The evaluation of carrying capacity of water resources in the middle reaches of the Heihe River is important to promote the efficient use of water resources and sustainable economic development of the region. This paper quantitatively analyzed the dynamic changes of the water resources carrying capacity of the middle reaches of the Heihe River from 2000 to 2020 by selecting 10 evaluation indexes and using the fuzzy comprehensive evaluation model. The results show that the water resources carrying capacity of the region is between 0.3 and 0.5, with the highest value reaching 0.471 in 2020, and the water resources carrying capacities are in a bearable state. In order to improve the rational and efficient use of water resources, the middle reaches of the Heihe River should adjust the water use structure and strengthen the development of water-saving economy and ecological environmental protection.

Key words: the middle reaches of Heihe Basin; water resources carrying capacity; fuzzy comprehensive evaluation model; entropy weight method

5 结论

a. 黑河中游 2000~2020 年水资源承载力综合评分值 T 先降后升,水资源承载力总体上处于可承载状态,从 2010 年起呈现出向良好发展的态势,区域水资源可满足当下社会经济发展需要,仍具有可开发利用潜力。

b. 黑河中游水资源承载压力主要来源于农业灌溉用水,2010~2020 年区域通过发展节水农业、生态循环工业等措施有效地控制了农业用水和工业用水,改善水环境质量,水资源承载力得到提高。

c. 黑河中游生态用水占比低,区域生态稳定性受到影响,未来应增加生态用水量、修复生态环境,更好地推进经济、社会、生态三个系统协调发展。

参考文献:

- [1] 王正选,王静,杨婷婷,等.基于改进熵权法的水资源承载力评价——以曲陆坝区为例[J].水资源与水工程学报,2017,28(4):82-87.
- [2] 卜楠楠,唐德善,尹笋.基于 AHP 法的浙江省水资源承载力模糊综合评价[J].水电能源科学,2012,30(3):42-44,41.
- [3] 李治军,董智,陈末,等.基于模糊分析法的合肥市水资源承载力评价[J].水电能源科学,2020,38(2):44-46,43.
- [4] 韩运红,唐德善,李奥典,等.模糊熵权综合评价模型在阜阳市水资源承载力综合评价中的应用[J].水电能源科学,2015,33(5):26-29.
- [5] 谷红梅,贾丽,蒋晓辉,等.基于熵权物元可拓法的黑河中游水资源承载力评价[J].灌溉排水学报,2016,35(6):87-92.
- [6] 张兴榆,曹明明,黄贤金.基于综合评判模型的干旱半干旱地区水资源承载力评价研究:以黄河中游延安为例[J].南京大学学报(自然科学版),2008,44(6):674-682.
- [7] 安强,魏传江,贺华翔,等.基于模糊综合评价法的河南省中原城市群水资源承载力评价研究[J].节水灌溉,2019(12):65-71.