

DOI:10.12170/20200209001

杜雪芳,李彦彬,张修宇. 黄河下游生态型引黄灌区水资源承载力研究[J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 22-29. (DU Xuefang, LI Yanbin, ZHANG Xiuyu. Study on water resources carrying capacity of ecological diversion irrigation district in the lower reaches of the Yellow River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(2): 22-29. (in Chinese))

黄河下游生态型引黄灌区水资源承载力研究

杜雪芳,李彦彬,张修宇

(华北水利水电大学,河南 郑州 450046)

摘要: 黄河流域生态型灌区建设是当下生态文明建设的重要组成部分,以生态型灌区水资源承载力理论为研究基础,采用模糊集对分析法对黄河下游典型引黄灌区进行水资源承载力综合评价。评价结果表明,2010—2013年大功灌区水资源承载力形势不容乐观,2014—2016年大功灌区近三分之二的区域水资源承载力形势有较大好转,直至2017年大功灌区整体水资源承载力达到承载状态。

关 键 词: 生态型灌区;模糊集对分析法;水资源承载力;引黄灌区

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)02-0022-08

农业作为国民经济的基础,支撑着国民经济社会的稳定发展。近年来,随着我国新兴农产业不断壮大,农村经济得到了飞速发展。据统计,我国高效经济作物三分之一以上产于大中型灌区,出口农产品更多依赖于灌区。灌区发展模式应遵循自然生态演变规律和社会经济发展的方向,朝着现代化生态型灌区迈进。引黄灌区是黄河下游农业经济发展和生态建设的重要基础设施,对保障下游两岸供水及粮食安全具有重要作用。目前,黄河下游共建有引黄灌区86处,其中大型灌区有48处,设计灌溉面积6 269万亩(约 $4.18 \times 10^4 \text{ km}^2$)。近年来,黄河水资源供需矛盾不断加剧,部分灌区的地下水漏斗仍有扩大的趋势,抑制了引黄灌区的可持续发展^[1]。许多学者针对灌区水资源承载力、水资源高效配置、水安全评价等方面已经开展了大量研究^[2-3],但对黄河流域生态型灌区的研究相对较少。目前,黄河流域生态保护和高质量发展已上升为国家战略,为了实现美丽乡村的建设目标,使灌区水资源得到合理高效利用,建设生态型灌区势在必行。

1 生态型灌区水资源承载力基础理论

1.1 生态型灌区内涵

生态型灌区是以生态文明建设和经济社会协调发展为基础的复合型生态系统,灌区生态系统健全、功能完善、效益显著、资源利用率高,具有先进的生产力水平。生态型灌区建设的目的是为了优化农业生产结构、改善人居环境质量、修复脆弱的生态系统,使整个灌区生态系统持续稳定地发展,并形成良性循环^[4]。生态型灌区水资源承载力是基于变化环境和人类活动的影响,在特定发展阶段,以可持续发展为原则,以促进生态环境良性循环为前提,把经济和社会的发展与现代技术相融合,在满足水资源合理配置和高效利用的条件下,水资源支撑社会经济系统可持续发展的能力^[5-6]。

收稿日期: 2020-02-09

基金项目: 河南省科技攻关项目(192102110201);河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2016GGJS-075);河南省高等学校重点科研项目(20A570004)

作者简介: 杜雪芳(1994—),女,河北邯郸人,博士研究生,主要从事农业水资源方面研究。E-mail: 928101510@qq.com

通信作者: 张修宇(E-mail: zhangxiuyu@ncwu.edu.cn)

1.2 灌区特点

生态型灌区水资源系统以农业增产为主,同时承担灌区内水安全、水生态环境协调发展的任务。灌区基本特点表现在:①现代性,灌区建设过程中将社会经济发展与现代技术相融合,强化灌区信息化建设,实现灌区的综合管理规划;②发展性,灌区的建设和发展是一个动态演变过程,管理机制和管理能力逐步实现现代化,各方面的发展能够与时俱进,具备先进的社会生产力;③协调性,生态型灌区建设可以很好地促进资源开发利用与生态环境保护之间的关系,使生态型灌区优势得到最大化体现^[7]。

1.3 灌区水资源承载力影响因素

社会经济的发展对水资源系统的影响逐渐增强,原有的自然水资源系统循环被破坏,水循环过程已经从“自然”一元驱动过渡到“自然-人工”二元水循环^[8]。水资源形成和时空分布受社会经济发展影响显著,当人水矛盾产生时,可以通过采取技术手段干预,使水资源问题得到有效解决,并使水资源系统的循环再次适应社会经济的发展。

过去在灌区建设和运行方面,各地对水资源的开发利用和管理不够重视,灌区生态系统功能恶化,致使我国农业生态经济的可持续发展受到影响。对水资源承载力影响较大的因素,大致可以分为三类:一是水资源系统本质特征;二是人类活动能力及意识形态;三是定义“是否可承载”的目标差异。生态型灌区建设没有统一化的标准,在建设时需要考虑当地社会经济发展情况、灌区工程建设、灌溉制度及管理水平、生态环境现状、引调水来源等影响因素^[7]。主要考虑的影响因素有以下4种。①生态环境因素:全球气候变暖导致植株蒸散发量增加,作物需水量也随之增大,加之农田中化肥等养料的使用对地下水体和灌区河湖水造成不同程度的污染。生态型灌区的建设与可持续发展,生态环境因素起到决定性作用^[9]。②社会经济因素:灌区生产力水平影响着灌区经济发展和社会效益,同时关系到灌区内人民生活水平和幸福感。③灌区工程建设和管理因素:工程设施的建设和管理影响着灌区水资源利用效率,是建设生态型灌区的基础工作。完备的灌区工程设施和高质量的灌溉管理可在提高灌区粮食生产的同时有效排除灌区安全隐患^[10]。④可持续发展因素:生态型灌区生产和发展的可持续性灌区建设的初心,生态型灌区的建设有效促进“社会经济-水资源-生态环境”复合大系统实现良性的循环发展。

2 生态型灌区水资源承载力评价方法和评价模型

水资源承载力主要评价方法有:经验公式法^[11]、综合评判法^[12-13]和系统动力学法^[14-15]三大类。灌区水资源承载能力综合评价就是定量描述灌区所在区域的水资源开发利用状况^[16]。本文选用综合评判法中的模糊集对分析评价法对大引黄灌区进行生态水资源承载力评价。

2.1 模糊集对分析法

1989年,我国学者赵克勤基于哲学中的对立统一和普遍联系的观点提出了集对分析理论。该理论的核心思想是对不确定性系统的两个有关联的集合构建集对,再对集对的特性做同一性、差异性和对立性分析,然后建立集对的同异反联系度^[15-17]。

评价生态型灌区水资源承载力,实际上是具有确定性的评价标准与不确定性的评价因子权重相结合的决策过程,在处理水循环系统中确定与不确定性问题时可以采用模糊集对分析评价模型。为充分考虑等级标准边界的模糊性和各评价指标的影响力,对一般集对分析改进后提出模糊集对分析法(fuzzy set pair analysis assessment method,简称FSPAAM法)^[18-20]。较一般集对分析而言,模糊集对分析法综合考虑了等级边界的模糊性,对所选特征性指标进行权重计算,使得计算结果更加准确,客观性更强。

2.2 模糊集对评价模型

从系统性和代表性的角度选择水文水资源系统评价指标体系并确定等级评价标准,具体评价过程如下:

(1)构建评价指标体系。分析影响灌区发展的因素,建立生态型灌区水资源承载力评价指标体系 $x_i(i=1, 2, 3, \dots, m; m$ 为评价指标数)。

(2)建立评价等级标准。确定评价等级标准有标准法、参考法、专家判断法,根据研究区实际情况,综合考虑确定生态型灌区水资源承载力评价等级标准 $s_k(k=1, 2, 3, \dots, K; K$ 为评价等级数)。

(3)构造集对计算联系度。将评价样本第 i 指标值 $x_i(i=1, 2, 3, \dots, m)$ 看成一个集合,第 k 级等级标准看成集合 B_k ,则 A_i 和 B_k 构成一个集对 $H(A_i, B_k)$ 。为了提高评价结果的分辨率,评价时将 B_k 视为1级评价标准构成的集合 B_1 ,由式(1)和(2)计算模糊联系度。

模糊联系度计算式如下:

①反向指标(越小越优指标),当 $K>2$ 时集对的 K 元联系度为($s_1 \leq s_2 \leq \dots \leq s_{k-1}$):

$$\mu_{A_i \sim B_1} = \begin{cases} 1 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J & x_i \leq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2 - 2x_i}{s_2 - s_1} + \frac{2x_i - 2s_1}{s_2 - s_1}I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J & s_1 < x_i \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 0 + \frac{s_2 + s_3 - 2x_i}{s_3 - s_1}I_1 + \frac{2x_i - s_1 - s_2}{s_3 - s_1}I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J & \frac{s_1 + s_2}{2} < x_i \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ \dots & \dots \\ 0 + 0I_1 + \dots + \frac{2s_{k-1} - 2x_i}{s_{k-1} - s_{k-2}}I_{k-2} + \frac{2x_i - s_{k-2} - s_{k-1}}{s_{k-1} - s_{k-2}}J & \frac{s_{k-2} + s_{k-1}}{2} < x_i \leq s_{k-1} \\ 0 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 1J & s_{k-1} < x_i \end{cases} \quad (1)$$

②正向指标(越大越优指标),当 $K>2$ 时集对的 K 元联系度为($s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_{k-1}$):

$$\mu_{A_i \sim B_1} = \begin{cases} 1 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J & x_i \geq s_1 \\ \frac{2x_i - s_1 - s_2}{s_1 - s_2} + \frac{2s_1 - 2x_i}{s_1 - s_2}I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J & \frac{s_1 + s_2}{2} \leq x_i < s_1 \\ 0 + \frac{2x_i - s_2 - s_3}{s_1 - s_3}I_1 + \frac{s_1 + s_2 - 2x_i}{s_1 - s_3}I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J & \frac{s_2 + s_3}{2} \leq x_i < \frac{s_1 + s_2}{2} \\ \dots & \dots \\ 0 + 0I_1 + \dots + \frac{2x_i - 2s_{k-1}}{s_{k-2} - s_{k-1}}I_{k-2} + \frac{s_{k-2} + s_{k-1} - 2x_i}{s_{k-2} - s_{k-1}}J & s_{k-1} \leq x_i < \frac{s_{k-2} + s_{k-1}}{2} \\ 0 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 1J & x_i < s_{k-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I 为差异度系数, $I \in [-1, 1]$; J 为对立度系数,一般情况下 $J = -1$ 。

(4)评价样本集合指标联系度的计算:

$$\mu_{A \sim B} = \sum_{i=1}^m \omega_i \mu_{A_i \sim B_1} = \sum_{i=1}^m \omega_i a_i + \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,1} I_1 + \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,2} I_2 + \dots + \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,k-2} I_{k-2} + \sum_{i=1}^m \omega_i c_i J \quad (3)$$

式中: ω_i 为指标 i 的权重; a_i 为指标 x_i 与该指标第 k 级标准 s_k 的同一度; $b_{i,1}$ 为指标 x_i 与该指标第 k 级标准 s_k 相差一级的差异度, $b_{i,2}$ 为指标 x_i 与该指标第 k 级标准 s_k 相差两级的差异度,其余类推; c_i 为指标 x_i 与该指标第 k 级标准 s_k 相差 $k-1$ 级的对立度。

令 $f_1 = \sum_{i=1}^m \omega_i a_i$, $f_2 = \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,1}$, \dots , $f_{k-1} = \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,k-2}$, $f_k = \sum_{i=1}^m \omega_i c_i$,则式(3)可以变为:

$$\mu_{A \sim B} = f_1 + f_2 I_1 + \dots + f_{k-1} I_{k-2} + f_k J \quad (4)$$

式中: f_1 为评价样本隶属于1级标准的可能性; f_k 为评价样本隶属于 k 级标准的可能性。

(5)水资源承载力综合评价。为避免联系度差异不确定分量系数(I_1, I_2, \dots, I_{k-2})确定时的主观性影响评价结果,采用置信度准则判断评价样本所属等级:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda, k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

式中: λ 为置信度,取值不宜过大或过小,一般建议为 $[0.50, 0.70]$ ^[18]。

3 应用实例

大功引黄灌区位于黄河下游豫北平原区,灌区主要涉及安阳市内黄县、鹤壁市浚县、省直管县滑县、新乡市长垣县和封丘县,共 3 市 5 县的部分地区(见图 1),总设计灌溉面积 18.9 万 hm²。灌区渠首设计引水流量 70 m³/s,同时设有 12 个应急取水口,可以在枯水期保障灌区的正常供水。本文评价数据来源于河南省水资源公报、河南省第 3 次全国水资源调查评价开发利用阶段性成果及各行政区(区)水资源数据资料,其中包含灌区有效水利用系数、水资源开发利用率、浅层地下水超采率、生态环境用水率、平均城镇化率、人均 GDP 等相关的数据信息。

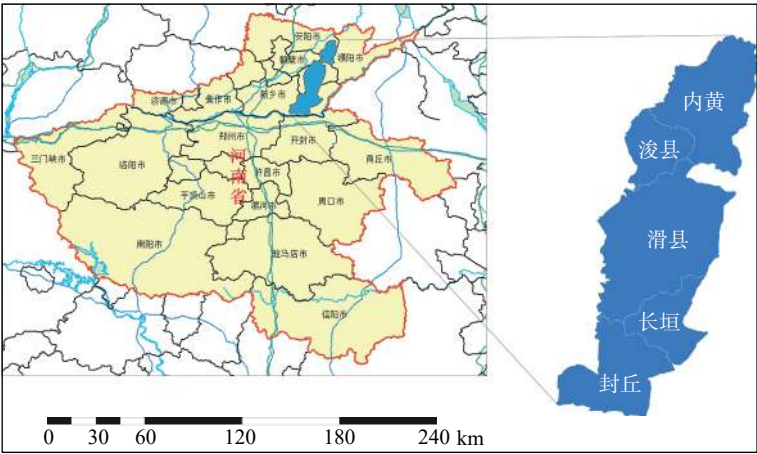


图 1 河南省大功引黄灌区概化图
Fig. 1 General map of Dagong Yellow River diversion irrigation area in Henan Province

3.1 评价指标分级标

本文遵循系统性、动态性、典型性、综合性等原则,结合相应的衡量标准和研究区实际情况,最终确定适于生态型灌区水资源承载力的评价指标(见表 1)。

表 1 评价指标分级标准
Tab. 1 Grading standard of evaluation index

目标层	系统及权重	指标层	分级				指标权重	指标类型
			1级	2级	3级	4级		
生态型灌区 水资源承载力	社会经济系统(0.296 6)	平均城镇化率 X_1 (%)	<35	35~40	40~55	>55	0.027 6	-
		人均GDP X_2 (元/人)	50 000	30 000~50 000	10 000~30 000	10 000	0.082 8	+
		有效灌溉面积率 X_3 (%)	60	40~60	20~40	20	0.186 2	+
	水资源系统(0.372 4)	灌溉水有效利用数 X_4	0.65	0.60~0.65	0.55~0.60	0.55	0.165 5	+
		人均水资源可利用量 X_5 (m ³ /人)	>500	400~500	300~400	<300	0.041 4	+
		水资源开发利用率 X_6 (%)	<40	40~60	60~70	>70	0.165 5	-
		缺水率 X_7 (%)	<10	10~20	20~30	>30	0.027 6	-
	生态环境系统(0.331 0)	浅层地下水超采率 X_8 (%)	<10	10~17.5	17.5~25	>25	0.055 2	-
		生态环境用水率 X_9 (%)	>5	3~5	1~3	<1	0.248 2	+

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
注: 指标类型中“+”为正向指标,对灌区发展起积极作用;“-”为负向指标,抑制灌区的发展。

根据灌区社会经济、水资源、生态环境发展现状,参考相似灌区指标等级划分标准,将指标分为 4 个等级,其中 1 级为承载、2 级为临界承载、3 级为超载、4 级为严重超载;采用层次分析法确定指标权重,并根据 9 项指标属性与水资源承载力的关系确定指标类型。评价指标分级标准、指标权重及指标类型见表 1。

3.2 评价结果

设大功引黄灌区水资源承载力评价指标值构成集合 A , 9 个指标的 1 级标准构成集合 B , 各集对联系度计算结果见表 2(以 2015 年为例)。根据置信度准则评判灌区水资源承载力所属等级,即由式 (4)~(5) 计算 h_k 值,取 $\lambda=0.55$ 。得到浚县 2015 年水资源承载力 $h_1=0.085<0.55$, $h_2=0.504<0.55$, $h_3=0.650>0.55$,由置信度准则可判断出浚县 2015 年水资源承载力评价结果为超载。

表 2 2015 年各集对 $H(A_i, B_1)$ 的联系度计算
Tab. 2 Calculation of association degree of each set pair $H(A_i, B_1)$ in 2015

联系度	滑县				内黄				浚县			
	a	b_1	b_2	c	a	b_1	b_2	c	a	b_1	b_2	c
1	0	1.000	0	0	0	0	0.320	0.680	0	0.760	0.240	0
2	1.000	0	0	0	0	0	0	1.000	0	0.711	0.289	0
3	0	0	0.888	0.112	0	0.474	0.526	0	0	0.670	0.330	0
4	0	0	0	1.000	0	0	0	1.000	0.235	0.765	0	0
5	1.000	0	0	0	1.000	0	0	0	0.290	0.710	0	0
6	0	0	0	1.000	0	0	0	1.000	0	0	0	1.000
7	0	0	0	1.000	0	0	0	1.000	0	0	0.904	0.096
8	1.000	0	0	0	0	0.120	0.880	0	0	0	0.178	0.822
9	0	0	0	1.000	0	0	0	1.000	0	0	0	1.000

联系度	长垣				封丘			
	a	b_1	b_2	c	a	b_1	b_2	c
1	0	0	0.480	0.520	0	0.560	0.440	0
2	0.292	0.708	0	0	0.868	0.132	0	0
3	0	0.256	0.744	0	0	0.212	0.788	0
4	1.000	0	0	0	1.000	0	0	0
5	1.000	0	0	0	1.000	0	0	0
6	0.030	0.970	0	0	0	0	0	1.000
7	0	0	0	1.000	0	0	0.342	0.658
8	0.243	0.757	0	0	0	0.822	0.178	0
9	0	0	0	1.000	0	0	0	1.000

依据前述方法,可以得出大功引黄灌区近八年水资源承载力综合评价结果,详见图 2。图中 4 个柱状条分别代表水资源承载力 4 种状态,若 4 种状态中某一状态值达到或超过置信度(0.55),则该年当地水资源承载力为这一状态。由图 2 可知,2010—2013 年大功引黄灌区水资源承载力整体状态为严重超载,说明在此期间对水资源没有足够重视,灌区水资源开发已经远超灌区可利用水资源量,导致水资源可持续性差,承载能力很弱;河南省开始实施最严格水资源管理制度后,2014 年灌区内长垣和封丘地区水资源承载力情况开始有较好的转变,到 2015 年灌区整体摆脱了严重超载的窘境,2017 年除内黄、浚县外,灌区水资源承载力有所好转,水资源形势较为稳定。

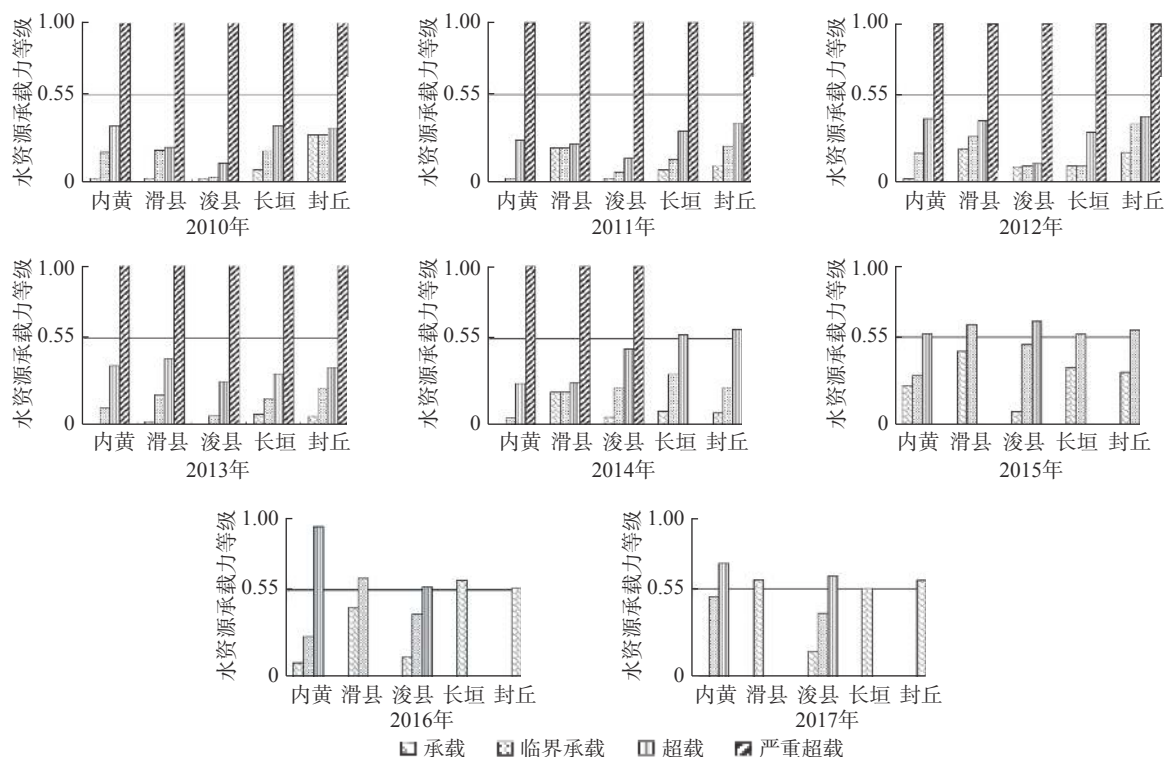


图2 2010—2017年大功引黄灌区水资源承载力综合评价结果

Fig. 2 Results of comprehensive assessment of water resources carrying capacity in Dagong irrigation area from 2010 to 2017

经过近几年对水资源开发利用、规划调度及管理等方面的不断改进,灌区整体水资源承载状况得到改善。滑县从2007年开始引黄水量约7 000万 m^3 ,除满足正常供水外,将多余水量储蓄到引黄调蓄水库中(库容480万 m^3),解决了十几万亩农田灌溉问题,改善了40多万亩农田用水条件,并为县城大工业提供充足水源,改善了县城生态环境,同时对县域经济社会可持续发展起到重要的支撑作用。但内黄、浚县两地仍处于水资源超载区,分析其原因可能是当地为满足社会经济发展需求,多年的地下水超采使地下水漏斗的扩张没有得到有效遏制,加之两县处于大功灌区渠系下游末端,上游供水指标无法满足下游用水需求,导致当地水资源承载力无法得到显著增长。按照生态型灌区建设标准以及国家对生态文明建设的重视,管理部门应进一步完善大功引黄灌区内水资源调度和水资源调配等相关工作,确保生活用水和工业用水的同时,实现汛期有水补源、非汛期有水灌溉。本文评价结果与灌区现状水资源承载力状况相符。

4 结 语

按水资源承载力评价准则,选取能够代表生态型灌区水资源承载力的评价指标,采用模糊集对分析理论对灌区进行水资源承载力综合评价,结果表明2015—2017年灌区水资源承载力相比2013年之前有大幅提升。为了达到生态型灌区的建设标准,大功引黄灌区作为黄河下游重要的大型灌区应以水资源可持续利用为中心,加强生产、生活、生态用水之间的合理调配,加大生态建设力度,以确保“社会经济-水资源-生态环境”复合大系统良性运转。此外,在今后的研究中,应该着重考虑计算评价指标权重和模型优化方面的研究工作,以便更好地权衡计算时主观性与客观性对评价指标权重的影响,从而提高评价结果的可靠性,使研究结论更具有指导意义。

参 考 文 献:

- [1] 郑利民, 王军涛, 郭卫新, 等. 黄河下游引黄灌区现代化建设的思考[J]. 可持续发展, 2019, 9(1): 75-82. (ZHENG Limin, WANG Juntao, GUO Weixin, et al. Consideration on modernization of Yellow River irrigation area in the lower reaches of the Yellow River[J]. Sustainable Development, 2019, 9(1): 75-82. (in Chinese))
- [2] 段春青, 邱林, 黄强, 等. 灌区农业水资源承载力模型研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 135-138. (DUAN Chunqing, QIU Lin, HUANG Qiang, et al. Research on quantitative model of water resources carrying capacity in irrigation area[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2005, 33(4): 135-138. (in Chinese))
- [3] 齐学斌, 黄仲冬, 乔冬梅, 等. 灌区水资源合理配置研究进展[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 287-295. (QI Xuebin, HUANG Zhongdong, QIAO Dongmei, et al. Research advances on thereasonable water resources allocation in irrigation district[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 287-295. (in Chinese))
- [4] 杨培岭, 李云开, 曾向辉, 等. 生态灌区建设的理论基础及其支撑技术体系研究[J]. 中国水利, 2009(14): 32-35, 52. (YANG Peiling, LI Yunkai, ZENG Xianghui, et al. Ecological irrigation district: studies on theory basis and supporting technical system[J]. China Water Resources, 2009(14): 32-35, 52. (in Chinese))
- [5] 左其亭, 张修宇. 气候变化下水资源动态承载力研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 387-395. (ZUO Qiting, ZHANG Xiuyu. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 387-395. (in Chinese))
- [6] 张修宇, 杜雪芳, 徐建新, 等. 基于生态的大功引黄灌区水资源承载力分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(6): 49-52, 57. (ZHANG Xiuyu, DU Xuefang, XU Jianxin, et al. Analysis of water resources carrying capacity in Dagong Yellow River diversion irrigation area based on ecology[J]. Yellow River, 2019, 41(6): 49-52, 57. (in Chinese))
- [7] 王维. 生态灌区综合评价指标体系与评价方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 10-26. (WANG Wei. Research on comprehensive evaluation index system and evaluation method of ecological irrigation district[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 10-26. (in Chinese))
- [8] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226. (WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1219-1226. (in Chinese))
- [9] 徐建新, 张泽中, 李彦彬. 生态灌区建设面临十大问题[J]. 中国水利报, 2010(6): 1-2. (XU Jianxin, ZHANG Zezhong, LI Yanbin. Ten major problems in ecological irrigation area construction[J]. China Water Conservancy Journal, 2010(6): 1-2. (in Chinese))
- [10] MEINZEN-DICK R, RAJU K V, GULATI A. What affects organization and collective action for managing resources? Evidence from canal irrigation systems in India[J]. World Development, 2002, 30(4): 649-666.
- [11] 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. (WANG Jianhua, ZHAI Zhengli, SANG Xuefeng, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1023-1029. (in Chinese))
- [12] 雷宏军, 刘鑫, 潘红卫, 等. 灌区现状水资源承载力评价方法应用比较[J]. 中国农学通报, 2013, 29(2): 178-182. (LEI Hongjun, LIU Xin, PAN Hongwei, et al. Evaluation on the status quo water resources carrying capacity of irrigation district by two methods[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(2): 178-182. (in Chinese))
- [13] 金菊良, 沈时兴, 张浩宇, 等. 基于全偏确定度的区域水资源承载力动态评价[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 38-49. (JIN Juliang, SHEN Shixing, ZHANG Haoyu, et al. Dynamic evaluation of regional water resources carrying capacity based on full partial certainty degree[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 38-49. (in Chinese))
- [14] ZHANG X Y, ZUO Q T. A study on concept of water resource carrying capacity under climate change and its computing methods[C]//Proceedings of the 5th International Yellow River Forum on Ensuring Water Right of the River's Demand and Healthy River Basin Maintenance. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2015: 99-105.
- [15] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 9-42, 162-187. (ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000: 9-42, 162-187. (in Chinese))

- [16] ZHANG X Y, YANG Q X, DU X F, et al. Application of set pair analysis model based on maximum similarity rules in groundwater level prediction[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 121: 244-249.
- [17] 王志良, 李楠楠, 张先起, 等. 基于集对分析的区域水资源承载力评价[J]. *人民黄河*, 2011, 33(4): 40-42. (WANG Zhiliang, LI Nannan, ZHANG Xianqi, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on set pair analysis[J]. *Yellow River*, 2011, 33(4): 40-42. (in Chinese))
- [18] 王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 11-32, 72-90. (WANG Wensheng, LI Yueqing, JIN Juliang, et al. Set pair analysis for hydrology and water resources systems[M]. Beijing: Science Press, 2010: 11-32, 72-90. (in Chinese))
- [19] 王宏伟, 张鑫, 邱俊楠. 模糊集对分析法在水资源安全评价中的应用[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(10): 209-214. (WANG Hongwei, ZHANG Xin, QIU Junnan. Application of fuzzy set pair analysis method in safety evaluation of water resources[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(10): 209-214. (in Chinese))
- [20] 门宝辉, 刘焕龙. 基于模糊集对分析的京津冀水资源可持续利用评价[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(4): 79-88. (MEN Baohui, LIU Huanlong. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei based on fuzzy set pair analysis[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(4): 79-88. (in Chinese))

Study on water resources carrying capacity of ecological diversion irrigation district in the lower reaches of the Yellow River

DU Xuefang, LI Yanbin, ZHANG Xiuyu

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The construction of ecological irrigation area in the Yellow River Basin is an important part of the current ecological civilization construction. Based on the theory of water resources bearing capacity of ecological irrigation area as the research basis, the fuzzy set pair analysis method is used to comprehensively evaluate the water resources carrying capacity of typical irrigation areas in the lower Yellow River in this paper. The evaluation results show that water resources carrying capacity was not optimistic in Dagong Irrigation District from 2010 to 2013 and it witnessed a great improvement in the nearly two-thirds district from 2014 to 2016. It was until the year of 2017 that Dagong Irrigation District satisfied its overall water resources carrying capacity.

Key words: ecological irrigation area; fuzzy set pair analysis method; carrying capacity of water resources; Yellow River diversion irrigation area