

基于组合赋权-TOPSIS 法的引江济淮工程 河南受水区节水水平评价

王 敏¹, 冯跃华², 陶 洁³, 马 莉², 王 辉⁴, 杨浩晨^{1,5}, 李 赫³

(1.河南省水利科学研究院/河南省节水灌溉工程技术研究中心, 郑州 450003;

2.河南省豫东水利保障中心, 河南 开封 475000; 3.郑州大学 水利科学与工程学院, 郑州 450001;

4.河南省引江济淮工程有限公司, 郑州 450000; 5.河南省科达水利勘测设计有限公司, 郑州 450003)

摘 要:【目的】评价引江济淮工程河南受水区现状节水水平。【方法】从综合、农业、工业、生活、生态环境 5 个方面选取 11 项用水指标建立引江济淮工程河南受水区节水水平评价指标体系, 构建基于 AHP-CRITIC 法组合权重的 TOPSIS 模型, 对受水区 2020 年节水水平进行综合评价。【结果】受水区 9 个县区中, 评价分级为 I 级的有 1 个 (永城市), II 级 5 个 (梁园区、鹿邑县、睢阳区、柘城县、夏邑县), III 级 3 个 (郸城县、淮阳区、太康县)。节水水平 II 级 (较高) 以上的县区占比为 66.7%, 受水区整体节水水平较高。万元 GDP 用水量、节水灌溉率、城镇人均生活用水量、城镇公共供水管网漏损率、再生水利用率是制约受水区节水水平的主要影响因素。评价结果与受水区实际情况基本相符。【结论】基于 AHP-CRITIC 组合赋权的 TOPSIS 评价方法适用于评价引江济淮工程河南受水区现状节水水平, 评价结果与区域实际情况相符, 可为水资源优化调配提供参考。

关 键 词: 引江济淮工程; 节水水平; 指标体系; AHP-CRITIC 法; TOPSIS 法

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023294

OSID:



王敏, 冯跃华, 陶洁, 等. 基于组合赋权-TOPSIS 法的引江济淮工程河南受水区节水水平评价[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(3): 87-93.

WANG Min, FENG Yuehua, TAO Jie, et al. Using Weight-TOPSIS method to evaluate water saving levels in the beneficiary areas of the Yangtze-to-Huaihe water transportation project[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(3): 87-93.

0 引 言

【研究意义】引江济淮工程连通长江、淮河两大水系, 是跨流域、跨省的重大战略性水资源配置工程^[1]。河南段作为引江济淮工程的重要组成部分, 主要任务以城乡供水为主, 兼顾改善水生态环境, 工程实施后可有效保障当地城乡供水安全, 缓解工业缺水情况。节水是解决水资源短缺和改善水生态环境的重要举措^[2], 节水水平评价是摸清区域节水潜力、衡量节水成效的重要手段。根据“节水优先”方针和国家节水行动方案, 对引江济淮工程河南受水区的节水水平进行评价, 对于促进当地水资源合理开发利用, 提高节水管理水平, 保障水资源与社会、生态环境协调发展具有重要意义。

【研究进展】我国已发布了一系列关于节水水平评价的标准规范, 如《节水型社会评价指标体系和评

价方法》(GB/T28284-2012)、《节水型社会评价标准》、《国家节水型城市考核标准》等, 对区域节水评价起到了重要的指导作用。以往围绕节水水平评价的研究涵盖了节水型社会^[3-5]、节水型农业^[6-8]、节水型工业^[9-10]、节水型城市^[11]等不同领域, 常用的评价方法有层次分析法、熵权法、模糊综合评价法、TOPSIS 法、云模型, 以及结合不同方法形成的层次模糊综合评价法、熵权 TOPSIS 法等。朱永楠等^[12]对评价指标进行梳理并构建了南水北调受水区的节水指标体系; 唐怡等^[13]采用层次模糊综合评价模型评价了滇中地区的节水情况; 崔金涛等^[14]构建新疆节水评价模型, 并采用层次分析法确定了指标权重; 雪宝等^[15]基于熵权 TOPSIS 法进行了新疆兵团第二师的灌区灌溉用水效率评价; 张晓斌等^[16]采用 AHM-CRITIC 赋权的模糊综合评价方法对郑州市的城市综合节水水平进行了评价; 管新建等^[17]利用 TOPSIS 法和灰色关联度分析法评价了淮河流域 4 个片区的水资源利用效率。【切入点】以往节水水平评价的研究重点主要集中在行业节水方面, 对跨流域大型引调水工程方面的研究较少, 目前针对引江济淮工程河南受水区的

收稿日期: 2023-07-03 修回日期: 2023-11-13

基金项目: 引江济淮工程 (河南段) 工程科研服务项目 (HNYJJH/JS/FWKY-2021002); 河南省水利科技攻关计划项目 (GG202022)

作者简介: 王敏 (1975-), 女, 高级工程师, 主要从事节水灌溉及水资源方面研究。E-mail: wangmin371@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

节水水平评价尚未见报道。【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究以引江济淮工程河南受水区为研究对象,在区分用水行业的基础上建立节水水平评价指标体系,构建基于 AHP-CRITIC 组合赋权的 TOPSIS 模型,以 2020 年为基准年对受水区节水水平进行综合评价,以期进一步提高节水管理水平,为区域水资源优化调配提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

引江济淮工程河南受水区地处豫东平原,涉及周口市的郸城县、淮阳区、太康县、鹿邑县和商丘市的梁园区、睢阳区、柘城县、夏邑县、永城市,共计 9 个县区,总面积为 1.21 万 km²。受水区属暖温带大陆性季风气候,年平均降水量 743.5 mm,人均水资源量 308 m³,不足全国平均水平的 1/7。2020 年受水区总用水量为 15.67 亿 m³,其中生活用水量 2.76 亿 m³、工业用水量 2.23 亿 m³、农业用水量 9.95 亿 m³、生态用水量 0.73 亿 m³,占总用水量的比例分别为 17.6%、14.2%、63.5%、4.7%,受水区用水结构以农

业用水为主。2020 年受水区的三次产业占比例为 17.2:39.6:43.2,人均 GDP 介于 2.74~5.08 万元,其中淮阳区最低,永城市最高。总体来说,受水区水资源短缺、供需矛盾突出。

1.2 数据来源

本研究所用数据主要来源于 2020 年统计资料,其中取用水数据来源于省市水资源公报及省级水利统计年鉴;经济社会数据来源于省市统计年鉴;此外,本研究还采用了河南省用水统计调查直报管理系统及最严格水资源管理制度考核成果中的部分数据。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建及分级

遵循科学性、系统性、层次性和可操作性原则,基于《节水型社会评价指标体系和评价方法》,参考区域节水评价相关文献^[12-13,18-20],结合当地水资源条件及经济社会特征,从综合、农业、工业、生活、生态环境 5 个方面选择 11 项指标,构建节水水平评价指标体系,评价指标见表 1。

表 1 受水区节水水平评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system of water-saving level in the water-receiving area

目标层	准则层	指标层	计算方法	指标性质	指标数据								
					郸城县	淮阳区	太康县	鹿邑县	柘城县	梁园区	睢阳区	夏邑县	永城市
节水水平	综合 B ₁	人均综合用水量 C ₁ /m ³	区域用水总量/区域总人口数	-	216.3	193.6	193.5	134.4	187.1	176.9	156.4	220.6	161.0
		万元 GDP 用水量 C ₂ /m ³	区域用水总量/区域 GDP 值	-	63.7	71.0	58.2	30.5	51.9	33.5	45.9	60.3	31.7
	农业 B ₂	农田灌溉水有效利用系数 C ₃	净灌溉用水量/毛灌溉用水量	+	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
		节水灌溉率 C ₄ /%	节水灌溉工程面积/有效灌溉面积	+	13.7	18.9	18.4	33.4	15.3	51.8	25.0	42.9	35.6
	工业 B ₃	万元工业增加值用水量 C ₅ /m ³	工业用水量/工业增加值	-	21.8	21.8	21.8	19.9	15.4	16.3	25.2	16.2	24.9
		工业用水重复利用率 C ₆ /%	工业用水重复利用量/工业总用水量	+	92.8	92.8	92.8	92.8	92.3	92.3	92.3	92.3	91.5
	生活 B ₄	城镇人均生活用水量 C ₇ /(L d ⁻¹)	城镇生活用水总量/城镇人口	-	102.9	109.3	82.4	106.1	122.7	165.8	103.6	127.3	76.6
		农村人均生活用水量 C ₈ /(L d ⁻¹)	农村生活用水总量/农村人口	-	47.4	45.0	49.2	55.1	77.4	74.1	82.7	66.3	74.3
		城镇公共供水管网漏损率 C ₉ /%	城镇公共供水管网漏损水量/总供水量	-	38.0	9.3	9.8	15.4	3.9	15.7	21.6	19.5	7.9
	生态环境 B ₅	城镇污水处理率 C ₁₀ /%	城镇污水处理量/城镇污水排放量	+	99.0	97.4	99.3	96.9	91.6	98.5	98.5	91.3	96.5
		再生水利用率 C ₁₁ /%	再生水利用量/污水处理总量	+	0.0	0.0	16.6	18.8	32.2	56.2	56.2	49.8	53.6

注 “+”表示正向指标(越大越优型),“-”表示负向指标(越小越优型)。

各项评价指标中,综合指标反映了区域用水情况与经济社会发展之间的关系,其中人均综合用水量表征社会人口对水资源的利用情况,万元 GDP 用水量体现区域用水的总体经济效益;农业用水指标包括农田灌溉水有效利用系数和节水灌溉率,反映了农业用水效率和工程节水效率;工业用水指标包括万元工业增加值用水量和工业用水重复利用率,反映了工业用水效益;生活用水指标包括城镇人均生活用水量、农村人均生活用水量和城镇公共供水管网漏损率,反映

了生活用水情况和公共供水、用水效率;生态用水指标包括城镇污水处理率和再生水利用率,反映了水生态环境治理和节水水平。

参考节水相关的国家和行业标准,包括国家及河南省相关规划提出的节水指标规划值、先进值,以及相关期刊文献中提出的分级节水指标标准值^[3-4,16,21],并征询专家意见,将评价指标划分为 5 个等级,见表 2。

表 2 节水水平评价指标分级标准

Tab.2 Grading standards of water-saving level evaluation indexes

评价等级	C ₁ /m ³	C ₂ /m ³	C ₃	C ₄ /%	C ₅ /m ³	C ₆ /%	C ₇ /(L d ⁻¹)	C ₈ /(L d ⁻¹)	C ₉ /%	C ₁₀ /%	C ₁₁ /%
I级（高）	<180	<24	>0.7	>50	<15	>95	<60	<50	<10	>82.5	>18
II级（较高）	180~220	24~32	0.6~0.7	40~50	15~24.5	90~95	60~90	50~75	10~14.5	65~82.5	13.5~18
III级（一般）	220~247	32~45	0.5~0.6	28~40	24.5~32	85~90	90~120	75~100	14.5~17.5	47.5~65	9~13.5
IV级（较低）	247~270	45~75	0.45~0.5	15~28	32~50	80~85	120~150	100~130	17.5~20	30~47.5	5~9
V级（低）	>270	>75	<0.45	<15	>50	<80	>150	>130	>20	<30	<5

2.2 AHP-CRITIC 组合权重

采用 AHP-CRITIC 组合赋权方法确定指标权重。这种主客观组合赋权方法可以避免主观赋权人为因素的干扰以及客观权重偏离实际指标重要程度的误差，可以提高评价结果的真实性和准确性。

1) 层次分析法（AHP）是将复杂问题分解为不同层次，通过构建两两比较判断矩阵确定权重的方法。对准则层及指标层分别采用 1~9 标度法构造判断矩阵，采用方根法求出其特征向量及最大特征值，并进行一致性检验。详细计算方法参见文献[11]。

2) CRITIC 法在考虑指标变异性和冲突性的基础上，同时考虑了对比强度和关联性对指标的影响。首先对指标进行无量纲处理，进而通过计算标准差和相关系数以统计信息量，求出各评价指标的客观权重。计算方法参考文献[17]。

3) 将主客观权重采用乘法合成归一法进行耦合计算，确定各评价指标的组合权重。具体计算方法参考文献[21]。

2.3 TOPSIS 法

TOPSIS 法是通过检测评价对象与正、负理想解之间的距离来反映评价对象的优劣，具有原始数据信息利用充分、评价结果客观准确的优势。首先构建标准化决策矩阵，将组合权重与之相乘，得到加权决策

矩阵；进而确定各评价指标的正、负理想解，求出评价对象与正、负理想解之间的欧式距离；最后计算出各评价对象的相对接近度。相对接近度越大，表明越接近最优水平。计算方法参考文献[8]。

3 结果与分析

3.1 指标权重及综合评价等级确定

根据层次分析法计算出各项指标的主客观权重，根据 CRITIC 法求得客观权重，将主、客观权重耦合计算得到组合权重，结果见表 3。CRITIC 法和层次分析法的权重较为均衡，而组合权重更能突出指标的重要程度。各项评价指标中，农田灌溉水有效利用系数（C₃）和万元工业增加值用水量（C₅）的权重值最高，分别为 0.154 和 0.140。受水区内各县多为农业大县，用水结构中农业用水量占比高达 63.5%，农田灌溉水有效利用系数反映了受水区的农业用水效率，是影响受水区节水水平的关键因素；从受水区三次产业结构（17.2：39.6：43.2）来看，工业在受水区地位也很重要，万元工业增加值用水量作为反映工业用水效益的指标，对受水区节水水平具有重要影响。权重值最低的指标为农村人均生活用水量（C₈）和城镇人均生活用水量（C₇），分别为 0.049 和 0.056，说明生活用水指标对当地节水水平的影响较小。

表 3 各评价指标权重系数计算结果

Tab.3 Calculation result of weight coefficient of each evaluation index

方法	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁
AHP 权重	0.089	0.102	0.135	0.071	0.120	0.086	0.062	0.057	0.085	0.106	0.086
CRITIC 权重	0.091	0.090	0.106	0.085	0.108	0.075	0.084	0.079	0.093	0.105	0.083
组合权重	0.088	0.099	0.154	0.065	0.140	0.069	0.056	0.049	0.085	0.120	0.077

TOPSIS 综合评价等级的确定参见文献[21]，采用指标原始数据和指标分级临界值共同构建初始决策矩阵，经标准化处理后，将组合权重与之相乘，得到

加权决策矩阵，以此进行 TOPSIS 综合评价，求得各县区及指标分级临界值的相对接近度，并以 4 个分级临界值的相对接近度划分综合评价等级，结果见表 4。

表 4 受水区节水水平综合评价等级

Tab.4 Comprehensive evaluation grade of water-saving level in the water-receiving area

等级	I级（高）	II级（较高）	III级（一般）	IV级（较低）	V级（低）
评价标准	>0.75	0.59~0.75	0.41~0.59	0.16~0.41	<0.16

3.2 单指标节水水平分析

将受水区 9 个县区的各项指标值与表 2 中单项指标评价分级标准进行比较，结果见图 1。各项指标中，人均综合用水量在各县区的评价等级多为 I 级或 II 级，

仅在夏邑县为 III 级，单项指标节水水平较高；万元 GDP 用水量指标体现区域用水的总体经济效益，经济发展水平较高的地区用水效率较高^[22]，而受水区经济水平欠发达，该指标等级也普遍较低，在 9 个县区

中有 6 个县为Ⅳ级。农业节水方面，农田灌溉水有效利用系数在各县均为Ⅱ级，该指标等级较高，但各县的节水灌溉效率参差不齐，有 5 个县低于Ⅲ级，工程节水水平在一定程度上制约了农业整体节水水平。工业节水指标中，除睢阳区、永城市的万元工业增加值用水量为Ⅲ级外，其它均为Ⅱ级，工业节水水平整体较高。各县区之间的生活节水水平差异较大，农村人均生活用水量等级总体较高，9 个县中有 7 个县处于Ⅱ级以上，而城镇生活用水指标在各县

之间不均衡现象较为严重，梁园区、柘城县、夏邑县的城镇人均生活用水量低于Ⅲ级，郸城县、睢阳区、夏邑县的城镇公共供水管网漏损率低于Ⅲ级，这些县区的城镇生活节水水平有待进一步加强。生态环境方面，各县区的城镇污水处理率均为Ⅰ级，再生水利用率大多为Ⅰ级或Ⅱ级，仅郸城县、淮阳区处理后的污水未得到有效利用，再生水利用率为 0。总体来说，综合、农业、生活节水水平在各县之间不均衡，工业、生态节水水平较高但尚有一定的提升空间。

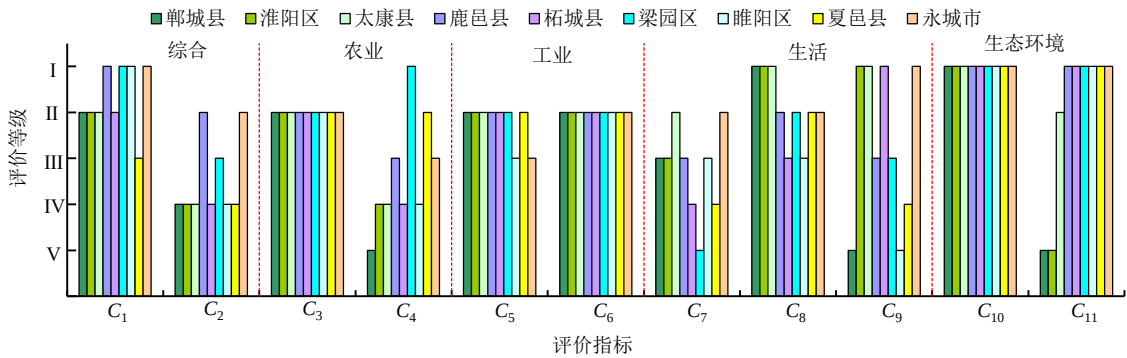


图 1 受水区各指标评价等级
Fig.1 Evaluation grade of each index in the water-receiving area

3.3 综合节水水平分析

基于 TOPSIS 综合评价法计算的各县区相对接近度以及表 4 的综合评价等级，得出受水区各县区的节水水平排名及分级（表 5），以及受水区节水水平空间分布（图 2）。受水区 9 个县按节水水平高低排序为：永城市>梁园区>鹿邑县>睢阳区>柘城县>夏邑县>太康县>淮阳区>郸城县。节水水平大致呈东高西低的空间格局，最东部的永城市相对接近度为 0.802，属于Ⅰ级评价范围，评价结果为“高”；中北部的梁园区、鹿邑县、睢阳区、柘城县和夏邑县属于Ⅱ级评价范围，评价结果为“较高”；西南部的郸城县、淮阳区、太康县属于Ⅲ级评价范围，评价结果为“一般”。评价结果为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级的县区数量分别为 1、5、3 个，节水水平为“较高”以上的县区占比达到 66.7%，整体而言，受水区节水水平较高。

表 5 受水区节水水平综合评价结果

Tab.5 Comprehensive evaluation results of water-saving level in the water-receiving area			
县区	相对接近度	排名	分级
郸城县	0.453	9	Ⅲ级
淮阳区	0.512	8	Ⅲ级
太康县	0.589	7	Ⅲ级
鹿邑县	0.722	3	Ⅱ级
柘城县	0.646	5	Ⅱ级
梁园区	0.726	2	Ⅱ级
睢阳区	0.679	4	Ⅱ级
夏邑县	0.605	6	Ⅱ级
永城市	0.802	1	Ⅰ级

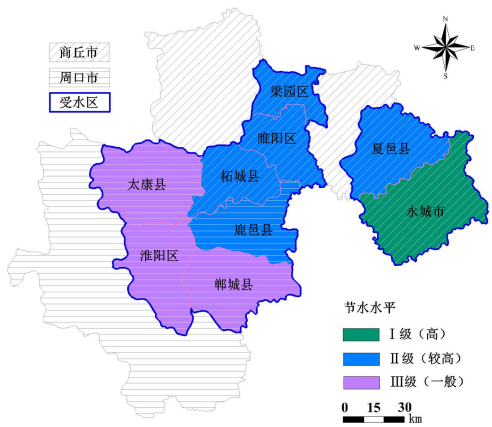


图 2 受水区节水水平空间分布
Fig.2 Spatial distribution of water-saving level in the water-receiving area

从各县区评价等级（表 5）和单项指标评价等级（图 1）来看，永城市综合评价等级为Ⅰ级，但其单项指标评价等级为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级的数量分别为 4、5、2 个；郸城县、淮阳区、太康县虽然综合评价等级为Ⅲ级，但在单项指标评价中也分别有 6、7、9 个Ⅱ级以上的指标，综合评价等级与单项指标评价等级分布并不一致。统计 11 项指标在 9 个县区的单项指标评价等级，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级的数量分别为 27、39、14、13、6 个，占比分别为 27.3%、39.4%、14.1%、13.1%、6.1%，其中评价等级低于Ⅲ级的指标占比为 19.2%，主要为万元 GDP 用水量、节水灌溉率、城镇人均生活用水量、城镇公共供水管网漏损率、再生水利用率，这些指标的存在制约了受水区节水水平，但由于占比

较小, 且权重值相对较低(介于0.056~0.099), 对综合评价结果未造成明显影响。各项评价指标中, 权重值较高的指标为农田灌溉水有效利用系数(0.154)和万元工业增加值用水量(0.140), 这2项指标在各县区的评价等级大部分为II级, 是决定受水区整体节水水平较高的关键性指标。

总的来说, 受水区节水水平和当地水资源条件、经济社会发展特征、节水管理水平有关, 水资源短缺现状激励了受水区节水水平总体较高, 农业发达和对工业的重视提高了相关指标值, 进而提升了农业和工业节水水平。受水区重视节水管理, 大力推动节水型社会建设, 永城市于2020年第三批被水利部命名为县域节水型社会建设达标县, 商丘市于2018年荣获“省级节水型城市”称号, 这些均是受水区节水水平较高的例证。

4 讨论

本研究对引江济淮工程河南受水区内的9县区进行了节水水平评价, 在评价方法上采用层次分析法和CRITIC法组合赋权的TOPSIS综合评价方法, 该方法在区域节水水平评价中的应用尚不多见。藏聪敏等^[18]采用对指标数据标准化后进行打分的方法, 将全国31个省(区、市)的节水水平进行了分类, 该方法对各指标之间的相互影响考虑不足; 周振民等^[11]、唐怡等^[13]通过构建模糊综合评价模型, 分别对郑州市、滇中地区的节水状况进行了评价, 这也是目前区域节水水平评价中较为常见的方法, 但其缺点是在隶属度和算法的选取方面容易受到主观影响。CRITIC权重有利于消除相关性和信息重叠, TOPSIS评价法具有信息失真小且求解过程客观的优势, 以此评价受水区节水水平可使评价结果更加客观合理。

本研究证实了受水区节水水平较高, 这与管新建等^[17]对淮河流域河南片区的水资源利用效率相对贴进度最高的计算结果相吻合; 但与藏聪敏等^[18]研究结果不一致, 这可能与评价对象及所选取的指标不同有关。在指标选取方面, 本研究根据受水区实际情况有所侧重。从受水区各县区基本是农业大县的特征出发, 选取了农村人均生活用水量指标; 考虑到引江济淮工程河南段供水工程兼具改善生态环境的目的, 选取了城镇污水处理率和再生水利用率指标。本研究对指标的选取更加符合受水区实际特征和引江济淮工程调水要求。

万元GDP用水量、节水灌溉率、城镇人均生活用水量、城镇公共供水管网漏损率、再生水利用率是制约受水区节水水平的主要影响因素。从研究结果来看, 各县区应在加强经济建设的基础上, 从农业、生

活等相对薄弱点出发, 进一步完善节水措施。对于节水灌溉率指标偏低的郸城县、淮阳区、太康县、柘城县、睢阳区, 建议加强推进喷灌、滴灌、低压管灌等节水灌溉工程建设; 对于城镇人均生活用水量指标偏低的梁园区、柘城县、夏邑县, 建议加强节水宣传教育, 提高公众节水意识; 对于城镇公共供水管网漏损率指标偏低的郸城县、睢阳区、夏邑县, 建议加强公共供水管网的更新改造和检修; 对于再生水利用率指标偏低的郸城县和淮阳区, 建议加强处理后的污水回用力度。

5 结论

1) 受水区整体节水水平较高, 农业灌溉水和工业用水的高效利用提高了受水区节水水平。

2) 从节水水平的主要制约指标来看, 各县区和行业节水水平不均衡, 在农业工程节水、生活节水方面尚存在一定的节水潜力。

3) 基于AHP-CRITIC组合赋权的TOPSIS评价方法可适用于评价引江济淮工程河南受水区现状节水水平, 评价结果与区域实际情况基本相符。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 雷晓辉, 张利娜, 纪毅, 等. 引江济淮工程年水量调度模型研究[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 1-7.
LEI Xiaohui, ZHANG Lina, JI Yi, et al. Research on annual water dispatch model of Yangtze-to-Huaihe river water diversion[J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 1-7.
- [2] 李慧, 丁跃元, 李原园, 等. 新形势下我国节水现状及问题分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 202-208.
LI Hui, DING Yueyuan, LI Yuanyuan, et al. Analysis of status quo and problems of water conservation in China in new situation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 202-208.
- [3] 王文川, 李磊, 徐冬梅. 基于博弈论可变集模型的节水型社会建设评价[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 117-121, 231.
WANG Wenchuan, LI Lei, XU Dongmei. Application of variable set model based on game theory in water-saving society construction evaluation[J]. Yangtze River, 2020, 51(4): 117-121, 231.
- [4] 赵金彩, 范思盈, 冯敬燕, 等. 黄河中下游地区水资源利用效率时空分异特征[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 37-44.
ZHAO Jincai, FAN Siying, FENG Jingyan, et al. Temporal and spatial variations of water resources utilization efficiency in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 50(6): 37-44.
- [5] 李嘉第, 陈晓宏, 郑冬燕, 等. AHP-模糊综合评价模型在节水型社会建设后评价中的应用[J]. 人民珠江, 2019, 40(1): 12-19.
LI Jiadi, CHEN Xiaohong, ZHENG Dongyan, et al. Application of AHP-fuzzy comprehensive evaluation model in the post evaluation for water-saving society establishment[J]. Pearl River, 2019, 40(1): 12-19.
- [6] FERRAZ S F B, DE PAULA LIMA W, RODRIGUES C B. Managing forest plantation landscapes for water conservation[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 301: 58-66.
- [7] 任盼, 费良军, 冯继利, 等. 基于模糊层次分析法的节水型生态灌区

- 综合评价[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 129-139.
- REN Pan, FEI Liangjun, FENG Chanli, et al. Fuzzy analytic hierarchy process for evaluating ecological health of water-saving irrigation districts[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 129-139.
- [8] 张立志, 王昕, 谢文鹏, 等. 基于组合权重-TOPSIS 法的灌区节水评价[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S2): 65-70.
- ZHANG Lizhi, WANG Xin, XIE Wenpeng, et al. Evaluation of water saving in irrigation district based on combination weight-TOPSIS method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(S2): 65-70.
- [9] WANG B H, SMALL M J, DZOMBAK D A. Improved efficiency reduces U.S. industrial water withdrawals, 2005–2010[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2015, 2(4): 79-83.
- [10] 刘志强, 赵毅, 潘荔. 基于层次分析法的火电企业节水水平综合评价[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(2): 45-50.
- LIU Zhiqiang, ZHAO Yi, PAN Li. Comprehensive evaluation of water saving and consumption level of thermal power enterprises based on analytic hierarchy process[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2021, 37(2): 45-50.
- [11] 周振民, 李延峰, 范秀, 等. 基于 AHP 和改进熵权法的城市节水状况综合评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 37-41.
- ZHOU Zhenmin, LI Yanfeng, FAN Xiu, et al. A comprehensive evaluation of urban water-saving situation based on AHP and improved entropy weight method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(2): 37-41.
- [12] 朱永楠, 王庆明, 任静, 等. 南水北调受水区节水指标体系构建及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 187-195.
- ZHU Yongnan, WANG Qingming, REN Jing, et al. The construction and application of water saving index system in the South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 187-195.
- [13] 唐怡, 谭程亮. 基于 AHP 和模糊综合评价模型的滇中地区节水评价[J]. 水资源开发与管理, 2021, 19(2): 26-30.
- TANG Yi, TAN Chengliang. Water saving evaluation of central Yunnan based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Water Resources Development and Management, 2021, 19(2): 26-30.
- [14] 崔金涛, 吐尔逊·买买提明, 张磊, 等. 基于层次分析法的新疆节水型社会建设综合评价[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S2): 129-132.
- CUI Jintao, TUERXUN · Maimaitiming, ZHANG Lei, et al. Comprehensive evaluation for water-saving society construction in Xinjiang based on analytic hierarchy process method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S2): 129-132.
- [15] 雪宝, 汤骅, 程泉, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的灌溉用水效率评价[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 82-89, 107.
- XUE Bao, TANG Hua, CHENG Quan, et al. Evaluating irrigation water efficiency using entropy weight-TOPSIS method: A case study[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(5): 82-89, 107.
- [16] 张晓斌, 傅渝亮, 汪顺生, 等. 基于 AHM-CRITIC 赋权的城市综合节水水平评价研究[J]. 人民长江, 2021, 52(8): 113-119.
- ZHANG Xiaobin, FU Yuliang, WANG Shunsheng, et al. Evaluation on urban comprehensive water saving level based on AHM-CRITIC weighting method[J]. Yangtze River, 2021, 52(8): 113-119.
- [17] 管新建, 秦海东, 孟钰. 基于 CRITIC-TOPSIS-灰色关联度的淮河流域水资源利用效率评估[J]. 节水灌溉, 2018(11): 73-76, 80.
- GUAN Xinjian, QIN Haidong, MENG Yu. Water use efficiency evaluation of Huai River basin based on CRITIC-TOPSIS-gray relation degree[J]. Water Saving Irrigation, 2018(11): 73-76, 80.
- [18] 臧聪敏, 王双银. 基于聚类分析及综合权重的全国节水水平评价[J]. 节水灌溉, 2019(9): 100-104.
- ZANG Congmin, WANG Shuangyin. National water-saving level evaluation based on cluster analysis and comprehensive weight method[J]. Water Saving Irrigation, 2019(9): 100-104.
- [19] 张欣, 张保祥, 李冰, 等. 基于用水定额的区域节水评价方法及应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 95-106.
- ZHANG Xin, ZHANG Baoxiang, LI Bing, et al. Evaluation and application of regional water saving based on water quota[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 95-106.
- [20] 匡佳丽, 唐德善. 长江中游地区用水效率评价及时空差异分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(3): 65-71, 80.
- KUANG Jiali, TANG Deshan. Evaluation and spatio-temporal difference analysis of water use efficiency in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(3): 65-71, 80.
- [21] 左其亨, 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.
- ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7.
- [22] 秦长海, 孙华月, 赵勇, 等. 中国经济社会消费水量、效率及其未来极值[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 76-86.
- QIN Changhai, SUN Huayue, ZHAO Yong, et al. Water consumption, efficiency and future extremum of accompanying China's social commodity consumption[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 76-86.

Using Weight-TOPSIS method to evaluate water saving levels in the beneficiary areas of the Yangtze-to-Huaihe water transportation project

WANG Min¹, FENG Yuehua², TAO Jie³, MA Li², WANG Hui⁴, YANG Haochen^{1,5}, LI He³

(1. Henan Provincial Water Conservancy Research Institute / Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research of Henan Province, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Yudong Water Conservancy Guarantee Center, Kaifeng 475000, China; 3. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. Henan Yangtze-to-Huaihe Water Diversion CO.LTD., Zhengzhou 450000, China; 5. Henan Keda Water Conservancy Survey and Design Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: 【Objective】 The Yangtze-to-Huaihe hydraulic project was initiated in 2016 to move water from the Yangtze River to the Huai River to alleviate water shortage in the latter. In this paper, we analyze water saving levels in the beneficiary areas located in Henan province. **【Method】** We selected 11 water-related indexes covering agriculture, industry, living and ecological environment in the comprehensive analysis to establish an index system to evaluate water-saving levels in the beneficiary areas. A TOPSIS model was then derived, based on the combined

weight of AHP-CRITIC method to evaluate water-saving levels in 2020. **【Result】** Among the nine counties we studied in the analysis, one county (Yongcheng) reached grade I, five counties (Liangyuan, Luyi, Suiyang, Zhecheng and Xiayi) reached grade II, and three counties (Dancheng, Huaiyang, Taikang) reached grade III water saving levels. Overall, water-saving levels in the beneficiary areas were higher. Water consumption per 10000-yuan GDP, water-saving irrigation rate, domestic water consumption per capita in urban areas, leakage losses from the water supply network in urban areas, and reclaimed water utilization were the factors that influenced the water-saving levels in the beneficiary areas. The evaluated results were consistent with the ground-truth data observed in the studied areas. **【Conclusion】** The TOPSIS method based on the AHP-CRITIC combination weighting is reliable for evaluating water-saving levels at regional scale. Our results provide guidelines for optimal allocation of the diverted water to the beneficiary areas in Henan province.

Key words: Yangtze-to-Huaihe water diversion project; water-saving level; index system; AHP-CRITIC method; TOPSIS method

责任编辑: 韩 洋

(上接第 51 页)

Spatial variation in drought and its determining factors in Shendong mining region

SHAO Tianyi¹, LI Wenhua^{2*}, BAO Siqin¹, WANG Nan³, MA Yating¹, SHEN Conglin⁴

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2. Inner Mongolia Geographic Information Center,

Hohhot 750306, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100089, China;

4. Forestry Station, Barenzhemu Town, Keyouzhong Banner, Xing'an League 029425, China)

Abstract: 【Objective】 The Shendong mining region is the largest coal mine in China. Extensive coal mining for many years has altered the geological landscape and disrupted ecology, leading to surface subsidence, drop of groundwater table, loss of soil moisture and nutrients, and landscape fragmentation in the region. This paper is to investigate the spatial variability in drought and its correlation to coal mining-induced collapses in the region.

【Method】 The analysis is based on temperature vegetation drought index (*TVDI*), and surface droughts measured from 2002 to 2018. Spatial variations in environmental factors and their effect on drought are analyzed using a geographical detector model by elucidating the response of drought to coal mining. **【Result】** *TVDI* had been consistently decreasing from 2002 to 2018, reaching the lowest point at 0.561 in 2018. Temporarily, May to August saw the most severe drought each year. Spatially, the southwest experienced higher drought severity than the northeast. The *q*-values obtained from the geographic detector analysis for precipitation, normalized vegetation index (*NDVI*), and soil type excepted 10% each year. Synergistic effects between these factors and others significantly improved the explanatory capacity of individual factors for spatial variation in the drought. The correlation coefficients between *TVDI* and precipitation and between *TVDI* and *NDVI* were -0.695 and -0.51, respectively. Average annual *TVDI* was higher in the subsidence areas than in the non-subsidence areas. **【Conclusion】** From 2002 to 2018, *TVDI* spatiotemporally varied in the region, and drought severity was higher and more prevalent in the southwest than in the northeast. Precipitation, *NDVI* and soil type are the factors that affected drought most. These factors combine to explain the spatiotemporal variation in *TVDI* more than by any signal factor. Furthermore, the interplay among precipitation, *NDVI*, soil type and other geographical factors impacts the spatial variation in *TVDI*. It is important to highlight that collapses in coal mining could have contributed to drought occurrence.

Key words: drought; temperature drought vegetation index; spatiotemporal variation; spatial heterogeneity; Shendong mining area

责任编辑: 韩 洋