

长江中游地区用水效率评价及时空差异分析

匡佳丽,唐德善

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为科学评估长江中游地区的用水效率,从综合、工业、农业、生活和生态用水5个方面遴选出13个评价指标,构建基于MCW-灰色TOPSIS的用水效率评价模型,采用G1法、熵权法和变异系数法交叉融合的混合交叉赋权法求得指标权重,将TOPSIS法与灰色关联度分析相结合评价2015-2019年长江中游地区3省用水效率情况,并从5个方面分析长江中游地区3省用水效率的时空差异。结果表明:长江中游地区用水效率在时间序列上呈现较稳定上升的趋势,在空间序列上,湖南、湖北两省在评价期内的用水效率较高,江西省用水效率偏低,且3个省份在5个方面的相对贴适度表现差异很大,通过分析其原因揭示了长江中游地区存在的主要用水问题,可为区域用水效率研究及节水工作提供理论依据。

关键词: 用水效率; 混合交叉赋权(MCW); 灰色TOPSIS模型; 时空差异分析; 长江中游地区

中图分类号:TV213

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)03-0065-07

Evaluation and spatio-temporal difference analysis of water use efficiency in the middle reaches of the Yangtze River

KUANG Jiali, TANG Deshan

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the water use efficiency (WUE) in the middle reaches of the Yangtze River, 13 evaluation indexes were selected from the five dimensions of comprehensive, industrial, agricultural, domestic and ecological water use to construct the WUE evaluation model based on MCW-grey TOPSIS. The weight of each index was calculated by the mixed cross-weighting (MCW) method of G1 method, entropy weight method and coefficient of variation method. TOPSIS method and grey relational degree analysis were combined to evaluate the WUE of the three provinces in the middle reaches of the Yangtze River from 2015 to 2019, and the spatio-temporal differences of WUE in the three regions were analyzed from the five dimensions mentioned above. Results show that the efficiency of regional WUE level in the middle reaches of Yangtze river presented a steady upward trend in time series; the WUE of Hunan Province and Hubei Province were higher during the evaluation period on space sequence, whereas that of Jiangxi province was lower; furthermore, the relative closeness of the three regions differentiated greatly in all the five dimensions. According to the analysis, the main problems of water use in the middle reaches of the Yangtze River are revealed, which can provide a theoretical basis for the research of regional water use efficiency and application of water saving measures.

Key words: water use efficiency; mixed cross-weighting (MCW); grey TOPSIS model; spatio-temporal difference analysis; the middle reaches of Yangtze River

1 研究背景

水是维系人类正常生活、生产必不可少的物质

资源,同时也是现代化城市建设与高质量可持续发展的战略资源。然而,在全球气候变化和城市化进程加快的大背景之下,水资源短缺问题形势严峻。

收稿日期:2021-09-01; 修回日期:2022-02-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405805-04)

作者简介:匡佳丽(1998-),女,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为水利水电系统规划与工程经济。

通讯作者:唐德善(1955-),男,江苏泰州人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水利水电系统规划与管理。

城市化是目前经济社会发展的必然趋势,伴随着人口的不断扩张,人口高度集中化现象越来越普遍,区域用水压力逐年增加,供、用水之间的矛盾日益凸显;同时,现阶段水资源开发利用不合理、水资源管理粗放以及水资源污染等问题进一步加剧了水资源短缺的危机,在一定程度上威胁着人类的生存与发展。长江中游地区水资源总量较丰富,但仍存在资源型、发展型及工程型缺水现象,制约了部分地区经济与行业的发展。因此,评价长江中游地区水资源利用效率、分析不同片区时空差异对贯彻落实“节水优先”的治水方针、改善用水现状、推进长江中游地区可持续发展具有重要意义。

关于水资源利用效率问题,国内外学者已开展了一系列的研究工作。目前,针对水资源利用效率评价的研究手段主要分为两类,即基于目标规划模型的效率测算与基于指标体系的综合评价,基于目标规划模型的效率测算方法有数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)^[1-4]、随机前沿分析法(stochastic frontier analysis, SFA)^[5]及 SBM 模型(slack based model)^[6-8]等,基于指标体系的综合评价方法有熵权模糊物元法^[9]、云模型^[10-12]、主成分分析结合 Copula 函数法^[13]、WCA-MEPP 模型^[14]等。总体来看,以往对区域水资源利用效率的研究大多以省、市或流域为研究对象,研究地区群的较少,并且对地区群的用水效率研究以宏观层面的居多,而考虑地区群内部差异的研究还不够深入;并且研究区域多集中在长江三角洲等发达地区。鉴于此,本文在前人研究的基础上,建立全面用水效率评价指标体系,利用 MCW-灰色 TOPSIS 模型评价长江中游地区群 2015-2019 年的用水效率,分析不同片区的时空差异,以期揭示长江中游不同地区的主要用水问题,研究结果可为水资源管理部门提供理论参考依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

长江中游地区包括湖北、湖南和江西 3 省,位于我国中南部,承东启西、连接南北,区位优势,凭借长江经济带及“中部崛起”等战略,逐渐成为长江上、中、下游协调发展的重要依托和东、中、西部地区共同发展的传导区,在我国“四大板块”战略布局中占据着重要的地位^[15-16]。其全域面积为 $56.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,地形地貌复杂多样,以丘陵山地为主。区域管辖范围包括 325 个县级行政单元,人口众多,经

济活跃,2019 年 3 省常住人口总数占全国常住总人口总数的 12.5%,人口密度约为全国平均水平的 2 倍,城镇化率达 58.55%,长江中游地区群的经济总量仅次于长三角城市群、珠三角城市群以及京津冀城市圈,经济增速高于全国平均水平。在城市化与工业化迅速发展的背景之下,长江中游地区作为重要战略腹地,面临着越来越大的用水压力,此外区域内环境污染风险突出,据生态环境部监测数据显示,2019 年全年湖北省有 2 个断面水质严重污染,湖南省部分饮用水水源地出现水质不达标现象,资源型、发展型缺水问题凸显。

2.2 数据来源

数据来源于 2015-2019 年《湖南省水资源公报》《湖北省水资源公报》《江西省水资源公报》及湖南、湖北和江西 3 省的统计年鉴。

2.3 研究方法

2.3.1 构建评价指标体系 水资源利用效率指标体系一般由综合、工业、农业、生活和生态用水 5 个方面构建,与此相关的定性和定量指标多达 200 多个^[17],若全部纳入指标体系进行系统性分析太过繁杂且不合实际。因此,在选取评价指标时以定量指标为主,兼顾代表性、科学性、可行性与适用性原则,并结合参考文献[18]、[19],参考长江中游地区 3 个省份水资源公报中主要的用水指标,综合筛选地区的代表性和适用性指标。综合用水指标选取用水弹性系数、人均综合用水量和单方水 GDP 产出量;工业用水指标选取万元工业增加值用水量和工业用水耗水率;农业用水指标选取农田灌溉水有效利用系数、农田灌溉耗水率和单方灌溉水粮食产量;生活用水指标选取城镇人均生活用水量和农村人均生活用水量;考虑到长江中游地区的水资源可持续利用要求和污染情况,选取人均 COD 排放量、水资源可持续利用性指标和生态环境用水比例作为生态用水指标。构建的长江中游地区用水效率评价指标体系如表 1 所示,其中指标性质“+”、“-”分别代表越大越优型指标及越小越优型指标。

2.3.2 采用 MCW 法确定指标权重 用水效率评价中指标赋权的合理性对评价结果影响很大,其赋权方法主要有主观、客观和组合赋权法 3 种。组合赋权法虽结合了决策者的主观意愿和指标的数据信息,但其组合系数往往仍是人为主观确定,最终权重带有一定的主观随意性。本文将主观赋权的 G1 法与客观赋权的熵权法、变异系数法相融合,构造一种改进的混合交叉赋权方法(mixed cross-weighting,

MCW)。首先由专家对评价准则层进行重要性排序;再用熵权法确定各指标的客观权重,每个准则层中相应的目标层排序由熵权法确定的权重大小代替 G1 法中主观确定的相对序关系而确定;其次运用变异系数法计算各准则层中用水效率指标的变异系数,并以此计算每个准则层中相邻指标之间的重要性程度;最后采用 G1 法确定最终权重的方法计算

混合交叉权重,作为长江中游地区用水效率评价指标的权重。改进的 MCW 法能使主、客观权重有效地进行本质融合,专家对准则层的重要性进行排序弥补了客观数据的偏差,而熵权法确定的权重大小代替 G1 法的人为主观排序,修正了 G1 法人为偏好占比大的主观随意性,权重分配结果更为灵活合理。具体步骤如下:

表 1 长江中游地区用水效率评价指标体系

目标层	准则层	指标层/单位	指标说明	性质
长江中游地区用水效率	综合用水效率 A	用水弹性系数 A_1	用水总量增长率/GDP 增长率	-
		人均综合用水量 A_2 / m^3	总用水量/总人口	-
		单方水 GDP 产出量 $A_3 / \text{元}$	GDP/总用水量	+
	工业用水效率 B	万元工业增加值用水量 B_1 / m^3	区域工业用水量/工业增加值	-
		工业用水耗水率 $B_2 / \%$	工业耗水量/工业用水量	-
	农业用水效率 C	农田灌溉水有效利用系数 $C_1 / \%$	灌溉量/总引水量	+
		农田灌溉耗水率 $C_2 / \%$	农业耗水量/农业用水量	-
		单方灌溉水粮食产量 C_3 / kg	粮食总产量/农田灌溉用水量	+
	生活用水效率 D	城镇人均生活用水量 $D_1 / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	城镇生活用水量/城镇人口	-
		农村人均生活用水量 $D_2 / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	农村生活用水量/农村人口	-
	生态用水效率 E	人均 COD 排放量 $E_1 / (\text{g} \cdot \text{d}^{-1})$	COD 总排放量/人口	-
		水资源可持续利用性指标 $E_2 / (\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	(水资源总量 - 用水量)/总人口	+
		生态环境用水比例 $E_3 / \%$	生态环境用水/总用水量	+

(1) 专家对评价指标体系准则层进行重要性排序。

(2) 熵权法计算客观权重。

① 数据标准化处理

对于正向指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (1)$$

$(i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n)$

对于逆向指标:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (2)$$

$(i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n)$

式中: r_{ij} 为标准化后的数据; x_{ij} 为原始数据; $\max(x_i)$ 和 $\min(x_i)$ 分别为第 i 个指标的最大值和最小值。

则标准化矩阵为 $\mathbf{R} | r_{ij} |_{m \times n}$ 。

② 计算各项指标的熵值 e_i 和权重 v_i

$$\text{熵值: } e_i = \frac{-\sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln m} \quad (3)$$

$$p_{ij} = (1 + r_{ij}) / \left(\sum_{j=1}^m (1 + r_{ij}) \right) \quad (4)$$

$$\text{权重: } v_i = \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (0 \leq v_i \leq 1, \sum_{i=1}^n v_i = 1) \quad (5)$$

式中: p_{ij} 为第 i 个指标下第 j 个样本值占有所有样本值的比重。

(3) 根据专家意见及熵权法计算得到的权重大小确定评价指标的重要性程度排序。

根据专家意见,确定 5 个准则层的主观优先排序,继而构建准则层中各指标的相对序关系,记为 $X_1 > X_2 > \cdots > X_{k-1} > X_k > X_{k+1} > \cdots > X_n$ 。

(4) 计算各评价指标的变异系数值 C_k 。

第 k 个评价指标的变异系数值 C_k 的计算公式如下:

$$\sigma_k = \sqrt{\sum_{i=1}^m (X_k - \bar{X}_k)^2 / m}, \quad (k = 1, 2, \cdots, m) \quad (6)$$

$$C_k = \sigma_k / \bar{X}_k \quad (7)$$

式中: σ_k 、 $\bar{X}_k$ 分别为第 k 个指标标准化后数据的标准差和平均值; m 为每个准则层的指标数。

(5) 由专家确定相邻准则层 X_{k-1} 与 X_k 的重要性程度之比,采用评价指标的变异系数值确定每个准则层中相邻指标间的重要性程度 r_k ,两者计算公式一致,具体如下:

$$r_k = \begin{cases} \frac{C_{k-1}}{C_k} & (C_{k-1} \geq C_k) \\ 1 & (C_{k-1} < C_k) \end{cases} \quad (8)$$

(6) 根据公式(8) 计算而得的 r_k 值,运用 G1 法求权重的方法可确定准则层下第 m 个指标对该准则层的混合交叉权重 w_m 为:

$$w_m = [1 + \sum_{k=2}^m (\prod_{j=k}^m r_j)]^{-1} \quad (9)$$

则第 $m-1, m-2, \dots, 2$ 个指标的权重值为:

$$w_{k-1} = r_k w_k \quad (k = m, m-1, \dots, 3) \quad (10)$$

准则层对目标层的权重同理可由上述方法确定。最后将计算得出的准则层对目标层权重、指标层对准则层权重对应相乘,即得到指标层对目标层的混合交叉权重。

2.3.3 TOPSIS - 灰色关联算法确定理想解 TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) 法与灰色关联算法都可以判断多属性指标的优劣,综合两种算法确定理想解,对用水效率进行评价,可以得到更为科学合理的评价结果^[20]。将标准化矩阵 R 与权重向量 w 相乘,得到加权标准化矩阵 Z 如下:

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = (w_i r_{ij})_{m \times n} \quad (11)$$

确定最优样本 z^+ 与最差样本 z^- :

$$z^+ = \left\{ \max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \right\} = [z^+(1), z^+(2), \dots, z^+(n)] \quad (12)$$

$$z^- = \left\{ \min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \right\} = [z^-(1), z^-(2), \dots, z^-(n)] \quad (13)$$

计算每个样本至最优样本、最差样本的欧式距离 d_j^+, d_j^- :

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i (z_{ij} - z_i^+)^2} \quad (14)$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i (z_{ij} - z_i^-)^2} \quad (15)$$

计算每个样本至最优样本、最差样本的灰色关联度 γ_j^+, γ_j^- :

$$\gamma_j^+ = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\min_i \min_j |z_{ij} - z_i^+| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_i^+|}{|z_{ij} - z_i^+| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_i^+|} \quad (16)$$

$$\gamma_j^- = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\min_i \min_j |z_{ij} - z_i^-| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_i^-|}{|z_{ij} - z_i^-| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_i^-|} \quad (17)$$

式中: ρ 为分辨系数,通常情况下 ρ 取 0.5。

2.3.4 计算相对贴近度 对 TOPSIS 法确定的欧式距离和灰色关联度进行无量纲化处理,如公式(18)~(21)所示:

$$D_j^+ = \frac{d_j^+}{\max d_j^+} \quad (18)$$

$$D_j^- = \frac{d_j^-}{\max d_j^-} \quad (19)$$

$$R_j^+ = \frac{\gamma_j^+}{\max \gamma_j^+} \quad (20)$$

$$R_j^- = \frac{\gamma_j^-}{\max \gamma_j^-} \quad (21)$$

由此计算每个样本的相对贴近度 η_j :

$$\eta_j = (\alpha_1 R_j^+ + \alpha_2 D_j^-) / [(\alpha_1 R_j^+ + \alpha_2 D_j^-) + (\alpha_1 R_j^- + \alpha_2 D_j^+)] \quad (22)$$

式中: α_1 和 α_2 均属于 $[0, 1]$, 且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, 一般情况下,取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。

相对贴近度代表地区用水效率与理想状态之间的差距,其值在 0~1 之间,越趋近于 1,说明地区用水效率越高,越接近于理想状态。为了更加直观科学地分析评价结果,参考相关规范和规划,采用等距划分,将用水效率评价的相对贴近度划分为 5 个等级,如表 2 所示。

表 2 用水效率评价的相对贴近度分级标准

相对贴近度	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
用水效率等级	低	较低	中等	较高	高

3 结果与分析

利用公式(1)、(2)对长江中游地区 3 省 2015 - 2019 年的用水效率评价指标原始数据进行标准化

处理后,采用混合交叉赋权(MCW 法)计算出 13 个评价指标的权重。

首先根据专家意见,综合 A、工业 B、农业 C、生活 D 和生态用水效率 E 5 个准则层的主观排序为

$A > B > C > D > E$,相邻准则层之间的重要性程度之比 r_k 的理性赋值依次为: $r_2 = A/B = 1.4, r_3 = B/C = 1.2, r_4 = C/D = 1.2, r_5 = D/E = 1.1$,然后依次按照公式(3)~(10)进行计算,具体权重计算过程及结果见表3。

由表3可知,工业用水耗水率(B_2)、人均综合用水量(A_2)、单方水GDP产出量(A_3)和万元工业增加值用水量(B_1)所占权重较大,这些指标也是湖北、湖南和江西3省水资源公报及《最严格水资源管理制度考核办法的通知》中主要的用水考核指标。因此,最终权重结果与现有考核体系基本一致,说明指标赋权是合理的。

根据前文所述方法,计算2015–2019年长江中游地区湖北、湖南和江西3省用水效率各评价指标的相对贴近度。

应用公式(11)~(15)计算得出每个样本至最

优样本、最差样本的欧式距离 $d_j^+、d_j^-$:

$d_j^+ = (0.065, 0.056, 0.056, 0.056, 0.041, 0.055, 0.053, 0.049, 0.054, 0.047, 0.081, 0.080, 0.078, 0.077, 0.076)$

$d_j^- = (0.037, 0.048, 0.048, 0.046, 0.065, 0.050, 0.056, 0.063, 0.055, 0.061, 0.021, 0.024, 0.021, 0.022, 0.030)$

应用公式(16)~(17)计算得出每个样本至最优样本、最差样本的灰色关联度 $\gamma_j^+、\gamma_j^-$:

$\gamma_j^+ = (0.562, 0.621, 0.630, 0.618, 0.743, 0.605, 0.652, 0.695, 0.661, 0.716, 0.554, 0.586, 0.563, 0.560, 0.596)$

$\gamma_j^- = (0.796, 0.713, 0.708, 0.717, 0.622, 0.713, 0.675, 0.648, 0.684, 0.633, 0.844, 0.809, 0.798, 0.794, 0.770)$

最后根据公式(18)~(22)计算出湖北、湖南和江西3省2015–2019年各年份的相对贴近度,由以上计算和相对贴近度分级标准可得出2015–2019年长江中游地区3省用水效率评价值及用水效率等级,如表4及图1所示。

表3 长江中游地区用水效率各指标权重计算

准则层	重要性之比 r_k	准则层权重	指标层	熵权法权重	指标重要性程度排序	相邻指标的重要性比值	权重 w_m 的确定	最终权重
A	1.4	0.307	A_1	0.056	A_2	1.000	0.350	0.092
			A_2	0.105	A_3		0.350	0.107
			A_3	0.058	A_1		0.300	0.107
B	1.2	0.219	B_1	0.062	B_2	1.290	0.563	0.096
			B_2	0.107	B_1		0.437	0.124
			C_1	0.054	C_3		0.390	0.050
C	1.2	0.183	C_2	0.087	C_2	1.214	0.334	0.061
			C_3	0.089	C_1		0.275	0.071
			D_1	0.113	D_1		0.500	0.076
D	1.1	0.152	D_2	0.064	D_2	1.000	0.500	0.076
			E_1	0.069	E_2		0.422	0.040
			E_2	0.075	E_1		0.289	0.059
E		0.138	E_3	0.059	E_3	1.000	0.289	0.040

表4 2015–2019年长江中游地区3省用水效率评价值及等级表

省份	2015年		2016年		2017年		2018年		2019年	
	评价值	等级	评价值	等级	评价值	等级	评价值	等级	评价值	等级
湖北	0.430	中等	0.505	中等	0.507	中等	0.500	中等	0.618	较高
湖南	0.508	中等	0.545	中等	0.581	中等	0.540	中等	0.588	中等
江西	0.349	较低	0.372	较低	0.363	较低	0.366	较低	0.406	中等

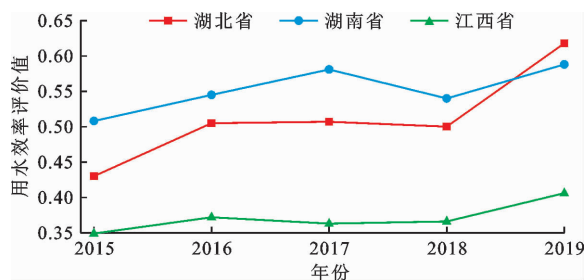


图1 2015—2019年长江中游地区3省用水效率评价价值变化趋势

4 讨论

4.1 长江中游地区用水效率总体评价

由图1及表4可以看出,2015—2019年间长江中游地区用水效率水平总体呈现较稳定上升的动态变化趋势,且2019年3省的用水效率评价价值明显增大。出现这种变化的原因有:近年来推行的节约用水管理办法、节水型社会建设及最严格水资源管理制度等一系列政策取得了良好的效果;政府、科研单位及流域管理机构在流域水量分配、确立用水控制指标上做了大量的工作;开展水权试点,深化完善水权交易管理制度,激发了节水内在动力;“节水护水”等宣传活动提高了人们的用水节水意识。

但同时也注意到,2015—2019年长江中游地区3省的用水效率等级在较低~较高之间,多年用水效率评价均值为0.479,总体用水效率等级为中等,说明长江中游地区仍然存在许多用水问题,节水工作需要不断创新完善。评价期内湖北省用水效率评价均值为0.512,湖南省用水效率评价均值为0.552,江西省用水效率评价均值为0.371,3省的用水效率评价价值均以2019年为最高,2018年略有降低。这是由于2018年水资源可持续利用性指标较低、农田灌溉耗水率较高,而其主要原因是受到2018年长江中游地区降水量减少带来的水资源总量锐减的影响。湖南省用水效率在2015—2018年均均为3个省份中的最高水平,湖北省紧居其后并在2019年居于首位,而江西省用水效率最低,且明显低于其他两个省份。因此,分析3个省份在各方面具体表现的差异性,能有效揭示长江中游地区存在的用水问题。

4.2 长江中游地区用水效率时空差异分析

为科学直观地分析长江中游3省用水效率的时空差异,并揭示其内在根源,对指标体系内部进行分析,绘制了2015—2019年用水效率准则层相对贴近

度的雷达图,如图2所示。

由图2可以看出,在综合用水、生态用水、生活用水、农业用水和工业用水这5个方面,长江中游地区3省的用水效率在时间维度和空间维度上均有显著的变化。

湖南省在5个方面发展较为均衡,尤其在工业用水效率和生活用水效率方面表现较为突出。说明湖南省“十三五”期间的节水工作取得了明显成效,用水效率提升速度加快,但截至2019年,其农田灌溉水有效利用系数仅为0.5349,与世界先进水平的0.7~0.8差距仍较大,因此推进科技节水创新,探索农业节水新举措、新技术应是该省下一步节水工作的重点。

湖北省在2016—2019年各方面表现也较为均衡,2015年其生活用水效率表现出了较高的水平,但随后其生活用水效率在评价时期内略有下降,2019年其综合用水效率增长较为明显。这是由于湖北省地处长江经济带中心位置,经济发展迅速,吸引了大量外来人口,导致生活用水量相对增大,而“十三五”期间湖北省节水工作成效显著,在增大城市供水能力的同时有效控制了公共管网漏损率,不断提高水资源循环回收利用率,所以2019年湖北省总体水资源利用效率达到了较高的水平。

江西省用水效率在5个方面差异较大,其生态用水效率较高,而其他几个方面虽表现为逐年上升趋势,但增速缓慢,在长江中游地区中处于偏低的状态。江西省境内水资源丰富,但水资源开发效率偏低,公众节水意识淡薄,人均生活用水量虽有所下降,但降幅不大,这说明政府对提升生活用水效率方面投入强度不足;另外,江西省为农业大省,以种植水稻为主,农业耗水量很大,其农田灌溉用水量占全省水资源总利用量的60%以上,而农田灌溉水有效利用系数低于全国平均水平,在长江中游地区也处于较低水平,因此,加快建设节水型灌区,提高节水灌溉率,改变粗放的取水用水方式,应是今后提高农业用水效率的重点;在长江中游地区3个省份中,江西省工业用水效率一直处于最低且与湖北、湖南两省差距较大,从数据分析中发现其万元工业增加值用水量处于中等偏下水平,省内部分火电、钢铁等工业企业耗水量很大,在生产工艺及关键环节存在用水效率低下、中水回用少等问题。

因此,强化节水意识、依靠科技进步推动节水措施以及完善节水激励机制应是提升长江中游地区用水效率的有效途径。

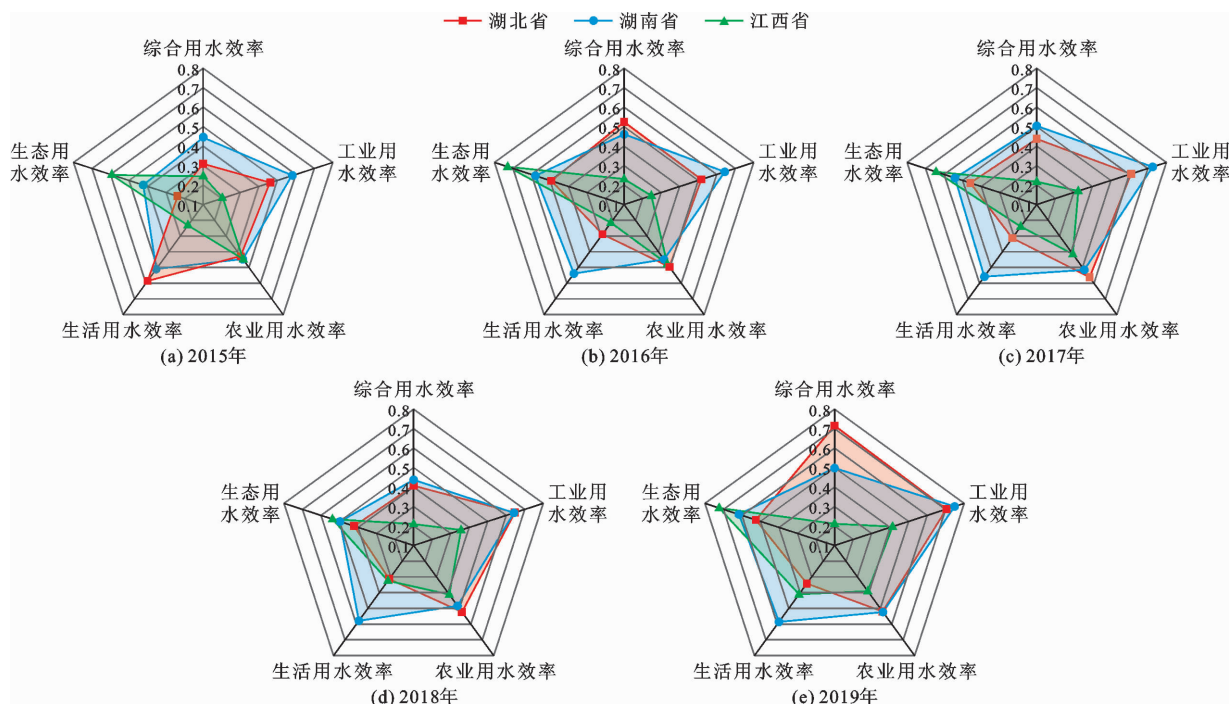


图2 长江中游地区用水效率准则层相对贴适度雷达图

5 结论

本文基于综合、工业、农业、生活和生态用水5个方面构建评价指标体系综合评价了长江中游地区3个省份2015–2019年用水效率的总体情况并进行了时空差异分析,研究结果表明:

(1)在研究期内长江中游地区用水效率总体呈现较稳定上升的动态变化趋势,总体用水效率评价均值为0.479,总体用水效率等级为中等,在空间尺度上用水效率差异较大,3个省份的等级均值排序为湖南省>湖北省>江西省,其中用水效率最高的湖南省评价均值达0.552,而江西省仅为0.371。

(2)从5个准则层相对贴适度方面分析长江中游地区用水效率的时空差异,评价期内湖北、湖南两省在综合、工业、农业、生活和生态用水效率5个方面表现较为均衡,而江西省用水效率在5个方面中差异较大,主要表现为生态用水效率较高,综合、工业、农业、生活4个方面的用水效率偏低,但是其整体差异度在时间尺度上呈现出逐渐缩小的趋势。

(3)本文通过构建评价指标体系并运用MCW–灰色TOPSIS模型科学客观地评价了长江中游地区的用水效率水平,评价结果符合基本实际情况,研究方法对其他地区群用水效率差异研究有一定的借鉴作用,但本文在空间分区上相对宏观,今后可进一步细化分区,深入研究其时空差异性。

参考文献:

- [1] 何楠,袁胜楠,王军. 基于DEA–Malmquist模型的黄河流域水资源利用效率评价[J]. 人民黄河,2021,43(5): 7–11.
- [2] 任俊霖,李浩,伍新木,等. 长江经济带省会城市用水效率分析[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(5):101–107.
- [3] 杜书,梁彦庆,张梦,等. 河北省农业水资源利用效率时空分异特征及影响因素研究[J]. 节水灌溉,2021(6): 74–80.
- [4] 张振龙,孙慧,苏洋,等. 中国西北干旱地区水资源利用效率及其影响因素[J]. 生态与农村环境学报,2017,33(11):961–967.
- [5] 王济干,李颖秋. 基于SFA–ESDA的长江三角洲地区全要素水资源利用效率研究[J]. 水利经济,2021,39(2): 9–16+95.
- [6] 张炜,刘聪. 基于SBM模型的陕西省水资源利用效率测度[J]. 水电能源科学,2018,36(3):21–25.
- [7] 李静,马潇臻. 资源与环境双重约束下的工业用水效率——基于SBM–Undesirable和Meta–frontier模型的实证研究[J]. 自然资源学报,2014,29(6):920–933.
- [8] 高新才,殷颂葵. 西北地区城市水资源利用效率时空演变及俱乐部趋同分析[J]. 经济经纬,2021,38(2):5–13.
- [9] 孟钰,杜琼英,管新建,等. 黄河流域水资源利用效率评估及空间分异研究[J]. 中国农村水利水电,2020(10): 12–16.

(下转第80页)

- [30] TURNER J, LU Hua, WHITE I, et al. Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability[J]. *Nature*, 2016, 535(7612): 411–415.
- [31] KOSAKA Y, XIE Shangping. The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(9): 669–673.
- [32] DAI Aiguo, FYFE J C, XIE Shangping, et al. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 555–559.
- [33] STEINMAN B A, FRANKCOMBE L M, MANN M E, et al. Response to comment on “Atlantic and pacific multidecadal oscillations and northern hemisphere temperatures” [J]. *Science*, 2015, 350(6266): 1326–1326.
- [34] YAO Shuailei, LUO Jingjia, HUANG Guang, et al. Distinct global warming rates tied to multiple ocean surface temperature changes[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 486–491.
- [35] ZHANG Lei, HAN Weiqing, SIENZ F. Unraveling causes for the changing behavior of the tropical Indian Ocean in the past few decades [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(6): 2377–2388.
- [36] 梁珑腾, 马 龙, 刘廷玺, 等. 1951–2014 年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2149–2166.
- [37] 方 欣, 刘小楝, 岳大鹏. 毛乌素沙地 1960–2018 年气候变化特征及影响因子分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 163–169.
- [38] GAO Feng, WU Tongwei, ZHANG Jie, et al. Shortened duration of global warming slowdowns with elevated greenhouse gas emissions [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(2): 225–237.
- [39] BOZKURT D, RONDANELLI R, MARIN J C, et al. Recent near-surface temperature trends in the Antarctic Peninsula from observed, reanalysis and regional climate model data[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(5): 59–75.
- [40] XU Chen, HOU Meiting, YAN Xiaodong, et al. Temporal variability of seasonal warming rates in China[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(S1): E1597–E1607.

(上接第 71 页)

- [10] 张瑶兰, 史毅超, 许继良. 基于博弈论-云模型的金华市用水效率综合评价[J]. *中国农村水利水电*, 2021(3): 53–57+62.
- [11] 罗 凯, 唐德善, 唐 彦. 基于熵权-正态云模型的农业用水效率评价[J]. *中国农村水利水电*, 2020(10): 159–163.
- [12] 蔡怡馨, 王 静, 刘鹏玲, 等. 利用组合模型评价云南省水资源利用效率[J]. *人民黄河*, 2015, 37(5): 58–61.
- [13] 李浩鑫, 邵东国, 尹 希, 等. 基于主成分分析和 Copula 函数的灌溉用水效率评价方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 96–102.
- [14] 胡林凯. 基于 WCA-MEPP 模型的云南省水资源利用效率动态评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(4): 75–81+87.
- [15] 王圣云, 翟晨阳, 顾筱和. 长江中游城市群空间联系网络结构及其动态演化[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(3): 353–364.
- [16] 陈立恒, 龚 健, 王 雄, 等. 长江中游地区生态系统服务平衡与城镇化的空间关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5546–5556.
- [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.
- [18] 杨丽英, 许新宜, 贾香香. 水资源效率评价指标体系探讨[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(Z1): 642–646.
- [19] 朱兆珍, 梁 中. 我国省域水资源利用效率评价研究[J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2015, 17(3): 72–78+92.
- [20] 孙国营, 陕振沛, 孙新杰, 等. 基于 TOPSIS-灰色关联方法的水资源配置评价模型研究[J]. *节水灌溉*, 2019(7): 68–71+76.