

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221750

滇中城市群用水效率时空分析

容 祎, 邹 进, 李 阳, 周齐彬, 刘安友, 何 潇

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为准确评价滇中城市群的用水效率, 从综合、工业、农业、生活、生态用水 5 个方面选择 14 个指标, 构建评价指标体系; 采用层次分析法得主观赋权, 熵权法得客观赋权, 博弈论法得到组合权重; 建立 TOPSIS 评价模型, 计算滇中城市群 2011~2020 年用水效率相对贴适度及各准则层的贴适度, 并在评价样本中加入全国平均数据作为结果优劣判别标准。结果表明, 在空间分布上, 昆明市用水效率最高, 曲靖市、玉溪市次之, 均为良好水平, 红河州、楚雄州最低, 且这两者低于全国平均用水效率, 为较差水平; 在时间序列上, 除曲靖市外, 总体上用水效率为上升趋势, 曲靖市在 2016 年前为下降走向, 2016 年缓慢回升。通过分析其变化原因, 提出了每个城市的用水效率短板, 可为滇中城市群改善用水结构, 提升用水效率提供参考。

关键词: 滇中城市群; 用水效率; 博弈论权重; TOPSIS 模型

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0045-04

1 概况

滇中城市群是国家重点培育的 19 个城市群之一, 包括云南省昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄彝族自治州及红河哈尼族彝族自治州北部的七个县市。国土面积占全省的 29%, 人口占全省的 44.2%, GDP 占全省的 63.8%, 是云南省经济最发达, 人口最集中的区域。然而水资源短缺严重影响到该区域的可持续发展, 人均水资源量仅约 700 m³, 降水时空分布不均, 滇池、星云湖、杞麓湖污染严重, 属于资源型缺水、工程型缺水、水质型缺水并存的状态。为提高滇中城市群的用水效率, 通过建立用水效率评价指标体系, 将全国平均数据纳入评价样本, 采用博弈组合权重-TOPSIS 方法评价滇中城市群 2011~2020 年的用水效率, 并以全国平均用水效率作为评价结果优劣标准, 在时间和空间尺度上进行分析; 研究结果对于滇中城市群补上用水短板, 提高用水效率, 改善用水结构, 落实最严格水资源管理制度, 实现可持续发展有积极意义。

2 数据与方法

2.1 数据来源

滇中城市群用水数据来源于 2011~2020 年《云南省水资源公报》, 经济、人口数据来源于各地发展统计公报。考虑到数据的准确性与易获取性, 用红河州代替红河州北部七县作为评价对象。全国平均数据来源于《中国水资源公报》。

2.2 研究方法

2.2.1 评价指标体系

参考现有研究成果^[1,2]及现有数据, 遵从科学性、可操作性的原则, 从综合用水、农业用水、工业用水、生活用水、生态用水五方面建立滇中城市群用水效率评价指标体系, 见表 1。非常规水资源的利用是解决城市资源型缺水的有效途径^[3], 对于滇中城市群来说主要是污水和雨水的资源化利用, 这两者供水比例越高, 说明用水效率越高。

2.2.2 博弈论组合赋权方法

各指标权重对用水效率评价结果影响显著, 为获得合理的指标权重, 采用层次分析法得到主观权重, 熵权法求得客观权重, 再使用博弈论方法在不同权重之间寻求妥协, 最小化各权重与最优权重之间的偏差, 从而得到一个相对均衡协调的组合权重^[4]。层次分析法是最常用的主观赋权方法, 具体步骤见文献^[5], 所求权重记为 w_1 。熵权

收稿日期: 2022-08-24, 修回日期: 2022-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41061053)

作者简介: 容祎(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: 1138193543@qq.com

通讯作者: 邹进(1973-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: Jone_zou@163.com

表 1 评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system

目标层	准则层	指标层	指标属性
用水效率评价	综合用水	万元 GDP 用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	负
		人均综合用水量/(m ³ ·人 ⁻¹)	负
		综合耗水率/%	负
工业用水	万元工业增加值用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	非常规水资源供水比例/%	正
		工业用水占比/%	负
农业用水	每公顷灌溉用水量/(m ³ ·hm ⁻²)	万元第一产业增加值用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	负
		农业用水占比/%	负
生活用水	城市人均用水量/(L·d ⁻¹ ·人 ⁻¹)	农村人均用水量/(L·d ⁻¹ ·人 ⁻¹)	正
		生活用水占比/%	正
生态用水	城市污水处理率/%	生态用水占比/%	正
			正

法与博弈论组合赋权法步骤如下。

(1)熵权法。首先标准化数据。构造评价样本矩阵 X , 共有 n 个待评价对象, 每个对象具有 m 个指标:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于正向指标:

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

对于负向指标:

$$z_{ij} = \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (3)$$

得到标准化矩阵 Z :

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

计算 m 项指标的熵值 e_i 和权重 ω_i :

$$e_i = \frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (5)$$

$$p_{ij} = (1 + z_{ij}) / \left[\sum_{j=1}^m (1 + z_{ij}) \right] \quad (6)$$

$$\omega_i = (1 - e_i) / \left(n - \sum_{i=1}^n e_i \right) \quad (7)$$

式中, p_{ij} 为 i 指标下 j 样本所占样本总值的比重; ω_i 为所求权重, 记为 w_2 。

(2)博弈论求组合权重 w 。 w 的计算公式为:

$$w = \lambda_1 w_1 + \lambda_2 w_2 \quad (8)$$

式中, w_1 为层次分析法所得权重; w_2 为熵权法所得权重; λ_1, λ_2 均为系数。

以博弈论思想建立目标函数, 以 w 与 w_1, w_2 之间的离差和最小为目标, 寻求最佳的线性组合系数 λ_1^*, λ_2^* 。此时得到的 w^* 为最佳权重。

目标函数为:

$$\min(\|w - w_1\|_2 + \|w - w_2\|_2) \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)并对其求一阶导数, 得到:

$$\begin{cases} \lambda_1 w_1 w_1^T + \lambda_2 w_1 w_2^T = w_1 w_1^T \\ \lambda_1 w_2 w_1^T + \lambda_2 w_2 w_2^T = w_2 w_2^T \end{cases} \quad (10)$$

求出 λ_1, λ_2 。将 λ_1, λ_2 进行归一化处理, 即:

$$\begin{cases} \lambda_1^* = |\lambda_1| / (|\lambda_1| + |\lambda_2|) \\ \lambda_2^* = |\lambda_2| / (|\lambda_1| + |\lambda_2|) \end{cases} \quad (11)$$

即可得到最优组合权重 w^* :

$$w^* = \lambda_1^* w_1 + \lambda_2^* w_2 \quad (12)$$

2.2.3 TOPSIS 法

TOPSIS 法主要步骤包括指标正向化、数据标准化、最优解与最劣解计算、计算距离评分。指标同向化与矩阵标准化于熵权法求权重过程中已完成。利用式(4)中标准化矩阵 Z 确定最优解和最劣解。最优解为 Z^+ , 由 Z 中每列元素的最大值构成。最劣解为 Z^- 由每列中元素的最小值构成, 即:

$$\begin{cases} Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_m^+) \\ Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_m^-) \end{cases} \quad (13)$$

计算各评价对象与最优解、最劣解的接近距离 D_i^+, D_i^- 分别为:

$$\begin{aligned} D_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j^* (Z_j^+ - z_{ij})^2} \\ D_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j^* (Z_j^- - z_{ij})^2} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, ω_j^* 为博弈论法计算出的组合权重。

计算评价对象的相对贴近度 C_i 为:

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (15)$$

$0 < C_i < 1, C_i$ 越接近 1 表示评价对象越优。

3 结果与分析

3.1 指标权重

使用层次分析法求得权重 w_1 , 熵权法求得权重 w_2 。代入式(10)~(12)求得 $\lambda_1^* = 0.589, \lambda_2^* = 0.411$, 即可得到最后的组合权重 w_j^* 。具体权重见表 2。

3.2 评价结果

根据式(13)~(15)计算各城市用水效率的相对贴近度 C 值, 以全国平均水平作为评价结果分级标准。高于当年全国平均水平者为较好, 低者

表 2 各指标权重
Tab. 2 Weight of each indicator

指标	熵权法 层次分析 组合		
	权重	法权重	权重
万元 GDP 用水量/($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	0.031	0.255	0.163
人均综合用水量/($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	0.082	0.163	0.130
综合耗水率/%	0.109	0.016	0.054
非常规水资源供水比例/%	0.068	0.036	0.049
万元工业增加值用水量/($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	0.036	0.115	0.082
工业用水占比/%	0.040	0.025	0.031
每公顷灌溉用水量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	0.030	0.113	0.079
万元第一产业增加值用水量/($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	0.033	0.107	0.077
农业用水占比/%	0.099	0.046	0.068
城市人均用水量/($\text{L} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$)	0.047	0.015	0.028
农村人均用水量/($\text{L} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$)	0.084	0.015	0.043
生活用水占比/%	0.120	0.034	0.069
城市污水处理率/%	0.052	0.033	0.041
生态用水比例/%	0.169	0.028	0.086

则为较差,接近者为一般。各城市贴进度及分级结果见表 3,发展变化趋势见图 1,平均用水效率贴进度见图 2。

表 3 评价结果
Tab. 3 The evaluation results

时间	昆明		曲靖		玉溪		楚雄		红河		全国平均 C
	C	水平	C	水平	C	水平	C	水平	C	水平	
2011	0.489	较好	0.493	较好	0.377	较好	0.270	较差	0.264	较差	0.298
2012	0.533	较好	0.522	较好	0.362	较好	0.296	较差	0.242	较差	0.307
2013	0.587	较好	0.479	较好	0.371	较好	0.315	一般	0.291	较差	0.316
2014	0.598	较好	0.451	较好	0.406	较好	0.293	较差	0.353	较好	0.339
2015	0.623	较好	0.423	较好	0.397	较好	0.304	较差	0.364	较好	0.359
2016	0.665	较好	0.420	较好	0.416	较好	0.324	较差	0.372	较差	0.390
2017	0.670	较好	0.433	较好	0.451	较好	0.360	较差	0.370	较差	0.413
2018	0.656	较好	0.438	一般	0.455	较好	0.339	较差	0.417	较差	0.440
2019	0.714	较好	0.473	较好	0.495	较好	0.371	较差	0.414	较差	0.466
2020	0.758	较好	0.465	较差	0.532	较好	0.358	较差	0.400	较差	0.516
平均	0.629	较好	0.460	较好	0.426	较好	0.323	较差	0.349	较差	0.384

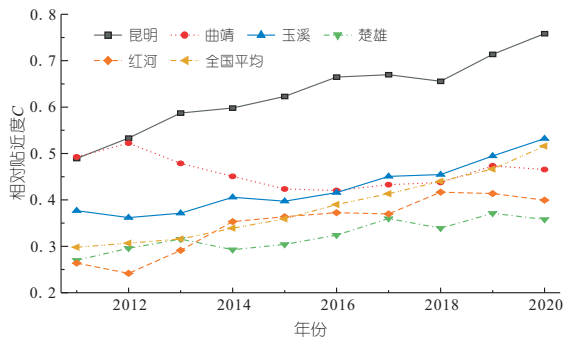


图 1 相对贴进度结果

Fig. 1 Relative closeness results

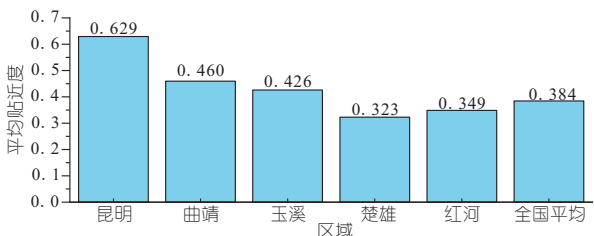


图 2 平均用水效率贴进度

Fig. 2 Average closeness of water use efficiency

由表 3 及图 1、2 可知,滇中城市群中昆明、玉溪、楚雄、红河的用水效率呈波动上升态势,曲靖

市则为先下降再缓慢上升走势。昆明市用水效率最高,仅在 2011 年略低于曲靖市,之后实现较快增长,10 年平均用水效率为 0.629,远高于 0.384 的全国平均水平。曲靖市在 2012 年达到最高用水效率 0.522,2012~2016 年持续下降,2016 年后开始缓慢回升,2020 年比 2019 年下降,甚至低于同年全国平均水平,年平均用水效率为 0.46。玉溪市在 2016 年前效率低于曲靖市,2016 年后整体上用水效率高于曲靖市,最终 10 年平均用水效率为 0.426,高于全国平均,但低于曲靖市。楚雄州用水效率总体水平较低,最高为 2019 年的 0.371,平均用水效率为 0.323,低于全国平均水平。红河州 2012 年用水效率为评价样本中最低值 0.242,之后增长较大,在 2018 年达到最大值 0.417,年平均用水效率为 0.349,高于楚雄州,低于全国平均水平。

总体上看,昆明市在滇中城市群中用水效率最高,曲靖市和玉溪市次之,两者差距不大,楚雄州和红河州用水效率较低,低于全国平均水平,有很大提高空间。

为探究各市用水效率差异的根源,计算各准则层的相对贴进度。结果见图 3。

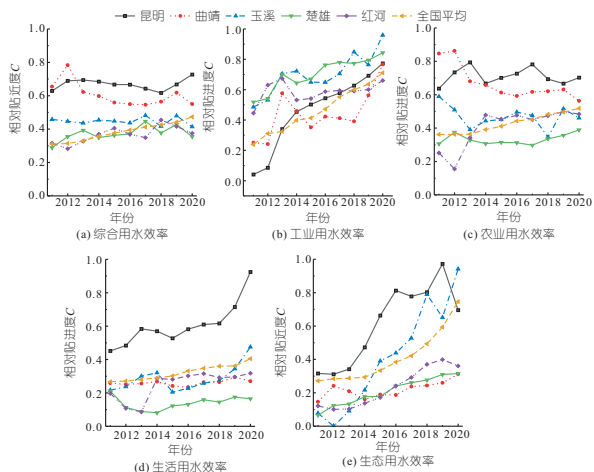


图 3 滇中城市群准则层相对贴进度

Fig. 3 Relative proximity of urban group guidelines layer in central Yunnan

昆明市综合用水、农业用水、生活用水、生态用水效率较高,工业用水效率较低,原因在于昆明市工业基础最好,冶金、造纸、纺织等高耗水企业较多,随着《昆明市工业节水指导意见》的推进,产业升级,淘汰落后产能等措施的执行,昆明市工业用水效率不断提高,2013 年超过全国平均水平,2020 年位于第三位,仅次于玉溪市、楚雄州。总的来说,昆明市各方面用水效率较高,应继续提高工业用水效率,增大生态环境用水比例与非常规水资源供水比例。

曲靖市综合用水与农业用水效率位于城市群内部第二位,但在 2012 年后出现持续下降。在 2009~2012 年连续干旱的特殊时期,曲靖市整体用水效率较高,2012 年后,农业进入恢复发展期,灌溉量增加,农业用水比例恢复,导致效率下降。工业用水效率波动较大,10 年中有 6 年低于全国平均水平。曲靖市工业增长期以煤炭和烟草为主,2015 年后不断升级转型,引入硅、铝、生物资源等产业,实现工业用水效率较大提升。生态用水、生活用水效率较低,一直低于同期全国平均,主要体现在农村人均用水量偏低,生态用水比例偏小。下一步曲靖市应着眼于提高农业用水效率,增加生态环境用水量,改善农村供水条件。

玉溪市综合用水效率、生活用水效率相对平缓,生态与工业用水效率增长较快,农业用水效率在全国平均水平上下浮动。农业用水效率出现波动,说明应继续加强高标准农田、田间水利建设,扩大高效节水范围。生活用水效率也偏低,2015 年后长期低于全国平均,但一直为增长走势。2012 年生态用水效率为最低值,此后发展较快,2015 年超过全国平均,2020 年达到最大值。玉溪市用水效率短板为生活用水、农业用水,需在这两方面加大投入,同时为保护抚仙湖,治理星云湖、杞麓湖,生态环境用水比例和总量应进一步提高。

楚雄州用水效率整体上较低,除工业用水效率外,其余四项均低于全国平均水平。农业上基础设施薄弱,耕地有效灌溉率低,灌区现代化改造处于起步阶段。生活上,城乡供水体系尚未建成,农村集中供水工程建设标准低。生态用水上,污水收集处理设施建设滞后,生态环境用水比例较低。根据《楚雄州“十四五”水安全保障规划》,楚雄州正常来水年份缺水率 20% 以上,急需从各方面提升用水效率,改善用水结构。

红河州用水效率情况与楚雄州较为类似,综合用水效率接近全国平均水平,农业用水与工业用水前期有一些起伏,在 2020 年均达到了全国平均水平。生态用水与生活用水 10 年间均低于全国平均水平。存在资源型短缺,季节性缺水,调控能力差;农田水利基础薄弱,渠系配套建设缓慢,局部水污染严重等问题。红河州应从这几方面入手,补全短板,全面提高用水效率。

4 结 论

a. 在 2011~2020 年,除曲靖市外四市用水效率为上升趋势,曲靖市为上升、下降、再上升的走势。昆明市平均用水效率最高,增长最快,曲靖市第二,玉溪市第三,这三者为较好水平。楚雄州、红河州整体用水效率较低,低于全国平均水平,为较差水平。

b. 各州市均需加大生态用水比例,除昆明市外需采用扩大节水灌溉面积,改善农田水利设施,推进农村供水保障体系建设等措施来提高用水效率。

参 考 文 献:

- [1] 刘志,罗朝晖,陈丹,等. 基于 CNKI 数据库的水资源利用效率评价研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2014,36(3):32-36.
- [2] 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.
- [3] 刘杨梅. 云南省城市非常规水资源综合利用设想——以昆明市为例[C]//云南省水利学会. 云南省水利学会 2013 年度学术交流论文集,2013:48-54.
- [4] 鲁佳慧,唐德善. 基于博弈论组合赋权的水环境综合治理效果评价[J]. 水利水运工程学报,2018(6):105-111.
- [5] 李石琳,侯新月,黄旭升,等. 基于层次分析法的水利发展资金绩效评价指标体系权重研究[J]. 水利科学与寒区工程,2022,5(3):125-128.

Spatial-temporal Analysis of Water Use Efficiency in Central Yunnan Urban Agglomeration

RONG Yi, ZOU Jin, LI Yang, ZHOU Qi-bin, LIU An-you, HE Xiao

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to evaluate the water use efficiency of the central Yunnan urban agglomeration accurately, 14 indicators were selected from five aspects of comprehensive, industrial, agricultural, living and ecological water use, and the evaluation index system was constructed. The subjective weights were obtained by analytic hierarchy process. The entropy weight method was used to determine objective weights. The game theory method was adopted to get the combination weight. The TOPSIS evaluation model was established to calculate the relative closeness degree of water use efficiency and the closeness degree of each criterion layer in central Yunnan urban agglomeration from 2011 to 2020, and the national average data was added to the evaluation sample as the criterion for judging the results. The results show that in terms of spatial distribution, Kunming has the highest water use efficiency, followed by Qujing and Yuxi, both of which are at a good level, and Honghe and Chuxiong have the lowest water use efficiency, both of which are lower than the national average water use efficiency, at a poor level; In terms of time series, except for Qujing City, the overall water use efficiency shows an upward trend. Qujing City shows a downward trend before 2016 and slowly recovers in 2016. By analyzing the causes of the changes, this paper put forward the shortcomings of water use efficiency in each city, which can provide reference for improving water use structure and water use efficiency in central Yunnan urban agglomeration.

Key words: central Yunnan urban agglomeration; water use efficiency; game theory weights; TOPSIS model