

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0131

LIU Hongyu, LIU Youcun, MENG Lihong, et al. Research progress of entropy weight method in water resources and water environment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1):299–306. [刘红雨, 刘友存, 孟丽红, 等. 熵权法在水资源与水环境评价中的研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1):299–306.]

熵权法在水资源与水环境评价中的研究进展

刘红雨¹, 刘友存^{2,3}, 孟丽红⁴, 焦克勤⁵, 朱明勇^{2,3}, 陈燕奎^{2,3}, 张鹏飞^{2,3}

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 嘉应学院 地理科学与旅游学院, 广东 梅州 514015; 3. 嘉应学院 广东省山区特色农业资源保护与精准利用重点实验室, 广东 梅州 514015; 4. 赣南师范大学 地理与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 5. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 随着人口增长和经济社会的发展, 水资源的供需矛盾日益增多, 对水资源进行合理开发、高效利用、优化配置、全面节约、有效保护、综合治理是至关重要的新任务。熵权法是研究水资源可持续利用的重要方法, 可以剔除指标体系中对评价结果贡献较小的指标, 减少人为因素对于主观权重的影响, 其计算结果真实准确, 能够客观地反映水资源与水环境的现状, 因此被广泛应用于水资源与水环境评价中, 从而为水资源的高效利用及水环境的综合评价提供科学依据。本文对熵权法的由来及在水资源与水环境评价中的发展进程进行了探讨, 重点对熵权法在水资源量、水资源承载力、水环境质量和水生态环境评价四个方面的应用进行了讨论和总结, 并发现熵权法在水资源与水环境评价中有着良好的应用前景; 同时, 针对当前熵权法在水资源与水环境评价中存在的不足, 提出了改进建议, 为水资源与水环境评价的研究方向提供了新思路。除此之外, 对熵权法的未来进行了展望: 熵权法可与其他方法创新结合共同使用, 构建合理全面的评价指标体系, 在水资源利用发展趋势、时空格局演变等领域推广应用。

关键词: 熵权法; 水资源承载力; 水环境评价; 研究进展

中图分类号: TV213.4; X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)01-0299-08

0 引言

熵权法作为多属性决策的主要方法之一^[1], 目前在水资源与水环境评价中得到了广泛应用, 并取得了一系列的研究成果^[2]。熵权法应用较广^[3-5], 该方法所使用的数据是决策矩阵, 而所确定的属性权重反映了属性值的离散程度, 符合数学意义, 而且计算过程简便, 避免了人为因素对于权重的干扰^[6]。研究表明, 相比于综合指数法、模糊综合评价法、可变模糊评价法、层次分析法等^[7], 熵权法在水资源与水环境评价方面具有明显的优势^[8], 它克服了传统评价方法中由人为主观因素赋权形成的偏差, 更加符合实际, 有利于水资源的合理规划和利用^[9-10]。

1 信息熵理论

1.1 信息熵理论的发展

熵是信息理论中一个非常重要的概念, 首先由德国物理学家 Wolff^[11]于1865年提出来, 它是衡量一个随机变量取值的不确定性程度。国内对信息熵的研究始于1984年^[12], 并在1986年将信息熵首次引入环境分析领域^[13]。黄克中等^[14]1996年利用最大信息熵分析, 验证了一维点源稳定态扩散污染物的浓度场公式, 并推导出污染带长公式。但信息熵在环境领域的广泛应用较晚, 直到张妍等^[15]2005年采用基于信息熵的分析方法, 建立了一套包括输入熵、代谢熵和输出熵的城市生态系统演化分析指标体系。最近, 谢涛等^[16]2019年提出在冰川地貌下

收稿日期: 2020-12-29; 修订日期: 2021-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41861002); 江西省自然科学基金项目(20202BABL203031); 广东省教育厅重点基金项目(2021ZDZX4046); 广东省自然科学基金面上项目(2022A1515011068)资助

作者简介: 刘红雨, 硕士研究生, 主要从事流域水资源与水环境研究. E-mail: liuhongyua@126.com

通信作者: 刘友存, 特聘教授/博导, 主要从事流域水资源与水环境方面的教学研究工作. E-mail: liuyoucun@126.com

对信息熵提出相关的修正系数并对泥石流作危险性评价。从2010—2019年有关熵权法在知网和SCI文献收录的情况(图1),可以发现熵权法在水资源与水环境领域研究的应用越来越受到人们的广泛关注。

1.2 熵权法的基本特性

熵权法是利用信息熵计算出各指标权重,从而为多指标综合评价提供依据的计算方法。在具体应用过程中,熵权法依据各指标的变化程度,采用信息熵计算各指标的熵权,再对各指标的权重进行修正,从而得到客观的指标权重。同时,熵权法是一种适用于多对象和多指标的综合评价方法,而对于某一项指标,用熵权法判断它的离散程度,信息熵值越小,离散程度越大,对综合评价的影响(即权重)就越

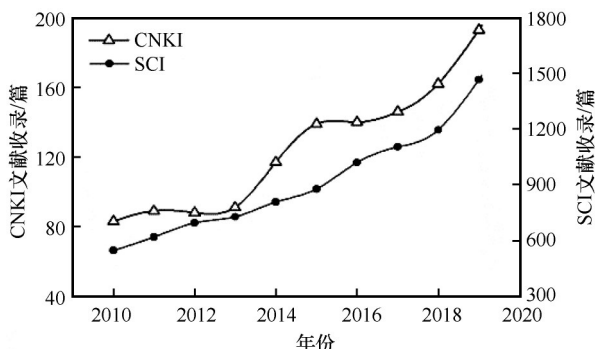


图1 熵权法在CNKI和SCI文献收录的情况
Fig. 1 Entropy weight method included in CNKI and SCI literatures

大。相较其他方法,熵权法不仅精度较高,客观性更强,而且能够更好地解释所获得的结果^[17]。表1简单介绍了各种权重确定方法的优点和不足。

表1 权重确定方法的优劣势对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of weight determination methods

权重确定方法	优点	缺点
专家调查法	有利于发挥专家对评价指标重要性的经验判断力,进而最大限度地发挥专家的主动性和创造性	主观性过强,增加了决策者的负担
层次分析法	简洁实用、所需定量数据信息少;综合考虑各评价因子的贡献,评价结果能全面地反映综合情况	指标过多时数据统计量大,权重难以确定;特征值和特征向量精确求法较复杂
主成分分析法	可剔除评估指标之间的相关影响;可减少指标选择的工作量;计算工作量小,节省工作时间	要求前几个主成分贡献率较高;主成分因子负荷的符号有正负时,综合评价函数意义不明确
离差法	考虑了决策者的偏好,又在一定程度上保证了决策的客观性,同时充分利用各方案属性值的数量特征	需要遵循理论进行计算,但有时得到的计算结果没有实际意义,无法解释
熵权法	能够选取有效的指标,权重确定全部来源于决策矩阵,客观性更强;计算过程简便	只能和其他方法模型结合使用来计算权重,不能单独进行评价

熵权法主要计算步骤如下:

(1)构建 m 个事物 n 个评价指标的判断矩阵 $R=(x_{ij}), (i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m)$ 。

(2)将判断矩阵归一化处理,得到归一化判断矩阵 B

$$B=(b_{ij})=\frac{x_{ij}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}(i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m) \quad (1)$$

式中: x_{\max} 、 x_{\min} 分别为同指标下不同事物满意程度的最大值和最小值。

(3)根据熵的定义, m 个评价事物 n 个评价指标,可以确定评价指标的熵为

$$H_i=-\frac{1}{\ln m}\left[\sum_{j=1}^m(f_{ij}\ln f_{ij})\right] i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m \quad (2)$$

$$f_{ij}=\frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^m b_{ij}} \quad (3)$$

(4)计算评价指标的熵权 W

$$W=(\omega_i)_{1\times n} \quad (4)$$

$$\omega_i=\frac{1-H_i}{n-\sum_{i=1}^n H_i}, \text{ 且满足 } \sum_{i=1}^n \omega_i=1 \quad (5)$$

2 熵权法在水资源与水环境中的应用研究

随着熵权理论的不断发展与完善,熵权法已被广泛应用于地学领域的研究中。同时,熵权法同各种方法结合进行使用(表2)^[18],已被广泛应用于水资源与水环境的评价与估算中,并已取得了令人瞩目的成果。

2.1 熵权法在水资源量评价中的应用

熵权法在水资源量的评价中,因其计算过程简便和计算结果准确,学者们已进行了大量研究。早期孟宪萌等^[30]以山东省为研究区建立了熵权模糊综合评判模型,结果表明基于熵权改进的DRASTIC

表2 熵权法结合的模式
Table 2 Model combined with entropy weight method

	方法	优点
熵权模糊物元模型	以事物名称 N ,特征 c 及其量值 r 组成的有序三元组 $R=(N,c,r)$ 组作为描述事物的基本元。模糊物元即其中量值具有模糊性 ^[22]	适用于水资源开发利用评价,评价结果更接近于实际情况,更为科学合理 ^[23]
熵权改进TOPSIS模型	将评价对象的最优解和最劣解的评价公式进行标准化处理,用以确定具体指标实际值在该指标权重中所处的状况	能够充分利用原始数据、计算过程数据丢失量较小、几何意义直观且不受参考序列选择的干扰 ^[24]
熵权改进DRASTIC模型	DRASTIC评价指标根据各个指标脆弱性影响程度进行赋权,再加权求和 ^[25]	该方法符合实际,操作简单,广泛应用于地下水脆弱性评价 ^[26]
熵权扩展集对分析模型	将各评价指标与评价标准构成一个集对,计算不同评价因子对应的各级水质的联系度的比较,将加权平均联系度最大值所对应的水质级别作为最终评价结果 ^[27]	相比于内梅罗指数法无法客观描述水质等级之间的过渡,基于熵权的集对分析法可以分析单个指标的数值和评价标准之间的数量关系 ^[28] ,可以广泛应用于水质评价中
熵权改进层次分析模型	采用三标度(0,1,2)对指标进行两两比较,建立比较矩阵,确定判断矩阵	该方法具有自调节功能,不需要进行一致性检验,其标度值具合理性和良好的判断传递性,在比较判断过程中准确性高 ^[29]
熵权-正泰云模型	云模型数值特征值中 Ex 、 En 和 He 分别用于反映水质评价的不确定性、水质综合评价中概念的模糊性和云模型的离散程度	可以定性描述指标隶属度、权重等的中心值,实现了定性概念的定量转化,且兼顾模糊性与随机性的特征
熵权法灰色关联度模型	确定多指标决策域的集合后进行无量纲化求绝对差序列计算关联度,然后用熵权法确定权重	较对样本数量和规律性没有限定,避免量化结果与定性分析结果不符的情况

模型能够真实客观地反映地下水脆弱性。罗军刚等^[31]以陕西省西安市为例建立了基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型,其结果与采用主观权重、熵权和综合权重三种赋权方法获得的水资源短缺风险评价结果基本一致。随后,黎枫等^[32]、Li等^[33]、Won等^[34]、刘倩倩等^[35]采用熵权法分别对塔里木河三源流地区、黄河流域、韩国十二个主要流域、江苏省淮河流域进行了实证研究,上述研究均表明评价结果与实际情景相似,归因于熵权法对水资源评价的可靠性。随后,学者们将熵权法和其他数学模型进行融合在水资源配置的和谐性^[36]、水资源可持续利用^[37]、水资源安全^[38]、水资源脆弱性^[39]等方面展开了深入研究,均取得良好的效果。

2.2 熵权法在水资源承载力评价中的应用

相较于模糊综合评价法、可变模糊评价法、极大熵原理等方法,熵权法因其对水资源承载力评价所确定的权重更客观,精度高,受到了学者的广泛认同并开展了大量的研究^[40]。如陈南祥等^[41]应用熵权对南水北调中线工程河南省受水区11个市县水资源可持续承载力进行了评价;吕平等^[42]结合灰色关联分析和熵权法,对2008年黑龙江省佳木斯市水安全问题进行了分析;周荣兴等^[43]以安徽省为例,建立了基于熵权组合权重的区域水资源承载力和相应的等级标准预警模式。在此基础上,近期学

者们又将熵权法和其他数学模型进行综合开展水资源承载力研究,如蒋汝成等^[44]基于熵权法-正泰云模型,对2006—2016年和2020年云南省水生态承载力进行了评价,评价结果与模糊评价法和投影寻踪法的评价结果基本一致,但是该模型兼具了模糊性和随机性;此外,熵权-灰色关联度模型^[45]、熵权-模糊综合评价模型^[46]等方法也被运用于重庆喀斯特地区、沈阳市、河南省^[47]等区域的水资源承载力研究中,且取得良好的评价结果。综上,熵权法相比于模糊综合评判法、层次分析法、主成分分析法等评价方法,能更好地反映水资源的动态变化,客观真实地反映数据实际情况,可真实有效的评估水资源承载力。

2.3 熵权法在水环境质量评价中的应用

水环境质量的评价方法多种多样,如模糊数学法、系统聚类分析法、人工神经网络分析法、灰色聚类分析法、综合污染指数法和热力学方法等。而将熵权法引入水质评价,不仅可以减少主观权重对评价结果的影响,而且计算简便易行,同时评价结果更加符合实际^[48]。近十年来,学者们采用熵权法对不同区域进行了水环境质量评价的实证分析。如黄少彬等^[49]以广东省深圳市龙岗河为例,运用熵权法并结合协调度指标达标法建立了河流水环境评价。李冰等^[50]基于2011—2012年鄱阳湖出水口月

度水质资料,提出了动态模糊物元模型(D-FME)并进行全面、连续地评价水质状况,结果表明该模型揭示了水质的全面连续性变化。孟东芳等^[51]应用熵权扩展集对分析模型对西安市浅层地下水水质进行评价。Hasan等^[52]利用熵权法对横河下游盆地流域地下水水质进行评价。国际上,学者们也先后采用熵权法对印度婆罗门江^[53]、尼日利亚工业区^[54]、伊朗中部高原亚德兹的水质进行了评价^[55],均取得可靠性较高的评价结果。总之,应用熵权法进行水质评价,不仅考虑了多个样本间的相互联系,而且所获得的结果符合实际,是一种有效、准确地确定权重的方法,可以作为水质评价的技术支撑,并且具有良好的应用前景。

2.4 熵权法在水生态环境评价中的应用

水生态环境的影响因素涉及多个方面,包括自然、社会和经济等。因此,所采用的评价方法和所选取的指标不同,所得到的评价结果亦然不同。因其实用性与可靠性,熵权法在水生态环境评价中亦得到了广泛的应用。如罗斌等^[56]以四川省2008—2012年水质资料为例,采用熵权法对水生态环境安全状况进行了评价,结果表明四川省地表水、地下水和人均水资源量是比较丰富的,但环境水匮乏综合指数则逐年呈现下降趋势。基于熵权的模糊综合水生态环境安全评价指标体系,丁晓文等^[57]对广东省江门市鹤山饮用水源地水生态环境安全进行了评价,结果与水源生态安全状况相符,表明该评价方法是确定水生态环境安全水平的一种有效可行的方法。

在此基础上,后续其他学者结合熵权法和其他数学方法对不同地区的水生态环境进行了评价研究。如田俊峰等^[58]应用熵权法结合模糊可变集合模型对某城市的水安全状况进行综合评价,结果显示该市近年来水安全形势均处于“基本安全”与“不安全”之间,并且逐年有所改善,评价与实际情况相符。张有贤等^[59]采用了熵权-层次分析法对兰州市2010—2017年水环境安全状况进行评价,结果表明2010—2017年兰州市水环境安全总体呈明显下降趋势,表明兰州市水环境安全状况逐步改善。就国外而言,也有学者开展了实证研究,如Singh等^[60]以印度阿萨姆邦的Beki河饮用水安全为例,运用熵权法进行了分析评价,结果表明重金属对人类健康风险具有一定影响。鉴于此,应用熵权法对水生态环境进行评价,可以同时兼顾横向评价和纵向评价,

对于水生态安全恶化趋势明显的评价更加准确,有利于对水生态系统保护和区域水生态功能分区。

3 总结与展望

如何选择最优化的数学方法对水资源和水环境进行评价一直是研究者和决策者深入思考的问题。相比较其他数学方法,熵权法在水资源与水环境评价方面具有明显的优势。本文对熵权法在水资源量、水资源承载力、水环境质量和水生态环境评价四个方面的应用进行了总结和评述,发现将熵权法应用于水资源与水环境分析研究中,能够减少人为因素对于权重的影响,全面提高了评价的科学性,但亦有一定的改进空间。展望熵权法今后在该领域的进一步发展,归结起来有以下几个方面:

(1)熵权法与多种方法集合创新。熵权法评价结果中各评价对象的评价值分布比较集中,在提供准确的优劣次序方面有一定的缺陷。基于此,在今后的应用中,可以将熵权法和密切值法、菲罗模型等多种数学方法结合使用,即利用熵权法确定评价指标的权重,增加评价的客观性,评价过程中应用密切值法和菲罗模型,可以提供准确的优劣次序,便于评价对象之间的定量比较。

(2)构建合理的评价指标体系。影响区域水资源和水环境的因素有很多,如社会经济因素、水资源状况因素以及生态环境因素等,因此水资源和水环境评价指标的选取非常关键。在指标的选取中要结合熵权法的优势和特点,基于前人评价指标体系构建的基础,遵循全面性、科学性、可操作性、时效性等原则,同时根据研究区水资源和水环境特征,构建合理的全面的评价指标体系。

(3)应用范围的拓展。目前熵权法主要在水资源和环境评价等方面应用广泛,与面向对象技术、GIS系统、决策支持系统、大数据、遥感技术等结合,也是未来熵权法发展的方向之一。随着熵权法本身的发展和人们不断的探索和尝试,熵权法把最优化理论与水资源理论有机地结合起来,将逐步渗透水资源领域的各个角落,在水资源利用发展趋势、时空格局演变等领域具有一定的推广应用前景。

参考文献(References):

- [1] Wei T. Evaluating index system and methods of regional water resources sustainable utilization[J]. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(3): 246-254.
- [2] Jia Guiyi, Quan Yongqing, Li Zhiheng, et al. Geo-hazards as-

- essment for the Gansu segment in Bailongjiang River Basin by using combination weighting method[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1227-1236. [贾贵义, 全永庆, 黎志恒, 等. 基于组合赋权法的白龙江流域甘肃段地质灾害危险性评价[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1227-1236.]
- [3] Jian Fuhui, Song Xiaoyu, Yu Wenbao. Construction of the evaluation system of water asset price with fuzzy comprehensive assessment indexes: taking Zhangye Prefecture in Heihe River Basin as an example[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 567-572. [简富诤, 宋晓谕, 虞文宝. 水资源资产价格模糊数学综合评价指标体系构建——以黑河中游张掖市为例[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(2): 567-572.]
- [4] Gang Shenting, Jia Tao, Deng Ying'er, et al. Assessment of groundwater quality in Hamatong drainage basin by using model of set pair analysis based on entropy weight method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(9): 23-27. [刚什婷, 贾涛, 邓英尔, 等. 基于熵权法的集对分析模型在蛤蟆通流域地下水水质评价中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(9): 23-27.]
- [5] Chen Wei, Xia Jianhua. An optimal weights combination method considering both subjective and objective weight information [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2007, 37(1): 17-22. [陈伟, 夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. *数学的实践与认识*, 2007, 37(1): 17-22.]
- [6] Yang Yuhong. Elements of information theory [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2008, 103(481): 429.
- [7] Liu Youcun, Zou Jieping, Yin Xiaoling, et al. Review on HSPF model in watershed hydrology and water environment research [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(1): 225-232. [刘友存, 邹杰平, 尹小玲, 等. HSPF模型在流域水文与水环境研究中的进展[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 225-232.]
- [8] Gao Hongkai, Zhao Fang. A review of global hydrological models: The opportunities, challenges and outlook [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 224-233. [高红凯, 赵舫. 全球尺度水文模型: 机遇、挑战与展望[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 224-233.]
- [9] Wan Zhehui, Wang Shen, Feng Sunlin, et al. Application of entropy-weight Bayesian model in water environment quality assessment of Shanxi Reservoir [J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(3): 55-57, 62. [万哲慧, 王坤, 冯孙林, 等. 熵权贝叶斯模型在珊溪水库水环境质量评价的应用[J]. *节水灌溉*, 2018(3): 55-57, 62.]
- [10] Zhang Jian, Shu Longcang, Zhang Chen, et al. Comprehensive index based entropy and weight for groundwater quality evaluation [J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(8): 30-32. [张鉴, 束龙仓, 张琛, 等. 基于熵权的综合指数法在地下水水质评价中的应用[J]. *水电能源科学*, 2010, 28(8): 30-32.]
- [11] Wolff S L. Rudolph Clausius: a pioneer of the modern theory of heat [J]. *Vacuum*, 2013, 90: 102-108.
- [12] Liu Huawen. Research on feature selection algorithm based on information entropy [D]. Changchun: Jilin University, 1984. [刘华文. 基于信息熵的特征选择算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 1984.]
- [13] Xiao Defeng. Fuzzy random information entropy of criteria for environmental quality [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1986, 6(2): 157-165. [肖德锋. 环境质量评价中的模糊信息熵原理[J]. *环境科学学报*, 1986, 6(2): 157-165.]
- [14] Huang Kezhong, Jiang Tao. Maximum communication entropy theory of transverse spreading of the plume in uniform open channel flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 27(5): 61-68. [黄克中, 江涛. 明渠均匀流污染带的最大信息熵理论[J]. *水利学报*, 1996, 27(5): 61-68.]
- [15] Zhang Yan, Yang Zhifeng, He Mengchang, et al. Analyses on evolution of urban complex ecosystem based on information entropy [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(8): 1127-1134. [张妍, 杨志峰, 何孟常, 等. 基于信息熵的城市生态系统演化分析[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(8): 1127-1134.]
- [16] Xie Tao, Yin Qianfeng, Gao He, et al. Risk assessment of glacial debris flow along the Tianshan Highway based on geomorphic information entropy [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(2): 400-406. [谢涛, 尹前锋, 高贺, 等. 基于地貌信息熵的天山公路冰川泥石流危险性评价[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(2): 400-406.]
- [17] Olgwang T, Cho D I. Olympic rankings based on objective weighting schemes [J]. *Journal of Applied Statistics*, 2021, 48(3): 573-582.
- [18] Li Yanli, Su Weici, Yang Ji, et al. Assessment of water environment security in Chongqing using Fussy Evaluation Model based on Entropy Weight Method [J]. *Yangtze River*, 2017, 48(9): 25-29. [李艳丽, 苏维词, 杨吉, 等. 基于熵权模糊综合模型的重庆市水环境安全评价[J]. *人民长江*, 2017, 48(9): 25-29.]
- [19] de P Rodrigues da Silva V, Belo Filho A F, Singh V P, et al. Entropy theory for analysing water resources in northeastern region of Brazil [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, 62(7): 1029-1038.
- [20] Zhi Lushuang, Xue Huifeng. A study on vulnerability of urban water resource based on entropy weight method: a case study of Guangdong Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5): 322-329. [职璐爽, 薛惠锋. 基于熵权法的城市水资源脆弱性研究——以广东省为例[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 322-329.]
- [21] Wang Yan, Meng Lingshuang. Risk evaluation on water resources carrying capacity based on entropy weighting ideal point method [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(4): 142-146, 207. [王彦, 孟令爽. 基于熵权理想点的水资源承载力风险评价[J]. *人民长江*, 2019, 50(4): 142-146, 207.]
- [22] Shen Yirong, Xie Jiancang. Fuzzy matter-element model for evaluating of water safety based on entropy weight and TOPSIS and application [J]. *Systems Engineering*, 2014, 32(7): 143-148. [申毅荣, 解建仓. 基于熵权和TOPSIS法的水安全模糊物元评价模型研究及其应用[J]. *系统工程*, 2014, 32(7): 143-148.]
- [23] Du Xianzeng, Yuan Yuliang, Meng Yu, et al. Comprehensive health evaluation of Huaihe River mainstream based on compound fuzzy matter element-entropy weight combination model [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 145-151. [杜现增, 袁榆梁, 孟钰, 等. 基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮河干流健康综合评价[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 145-151.]
- [24] Xu Yang, Chen Jing, Xia Huan, et al. Evaluation of water resource carrying capacity in Huai'an City based on DPSIR-improved TOPSIS model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(4): 47-52, 62. [许杨, 陈菁, 夏欢, 等. 基于DPSIR-改进TOPSIS模型的淮安市水资源承载力评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(4): 47-52, 62.]
- [25] Zhang Zhen, Wen Zhonghui, Lu Chengpeng, et al. A modified DRASTIC model for assessment of groundwater vulnerability and its application [J]. *Water Resources Protection*, 2014,

- 30(6): 13-18. [张珍, 温忠辉, 鲁程鹏, 等. 改进的 DRASTIC 地下水脆弱性评价模型及应用[J]. 水资源保护, 2014, 30(6): 13-18.]
- [26] Yu Linhong, Tao Zhibin, Hu Shengtao, et al. Application of DRASTIC model to groundwater vulnerability assessment[J]. Yellow River, 2020, 42(Suppl 1): 45-46, 50. [于林弘, 陶志斌, 扈胜涛, 等. DRASTIC 模型在地下水脆弱性评价中的应用[J]. 人民黄河, 2020, 42(增刊1): 45-46, 50.]
- [27] Meng Xianmeng, Hu Heping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 257-262. [孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 257-262.]
- [28] Wang Wenchuan, Li Qingmin, Xu Dongmei, et al. Water quality evaluation model based on set pair analysis and triangular fuzzy number coupling[J]. Water Resources Planning and Design, 2018(11): 44-47. [王文川, 李庆敏, 徐冬梅, 等. 基于集对分析与三角模糊数耦合的水质评价模型[J]. 水利规划与设计, 2018(11): 44-47.]
- [29] Li Yuping, Zhu Chen, Zhang Luxuan, et al. Ecological security assessment and countermeasures of water environment based on improved analytic hierarchy process: a case study of Xingtai City[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(2): 310-316. [李玉平, 朱琛, 张璐璇, 等. 基于改进层次分析法的水环境生态安全评价与对策——以邢台市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 310-316.]
- [30] Meng Xianmeng, Shu Longcang, Lu Yaoru. Modified DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment based on entropy weight[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 94-99. [孟宪萌, 束龙仓, 卢耀如. 基于熵权的改进 DRASTIC 模型在地下水脆弱性评价中的应用[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 94-99.]
- [31] Luo Jungang, Xie Jiancang, Ruan Benqing. Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1092-1097, 1104. [罗军刚, 解建仓, 阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1092-1097, 1104.]
- [32] Li Feng, Chen Yaning, Li Weihong, et al. The application of set pair analysis based on entropy weight to evaluation of sustainable water resources utilization: a case study in the three sources of Tarim River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 723-730. [黎枫, 陈亚宁, 李卫红, 等. 基于熵权的集对分析法在水资源可持续利用评价中的应用——以塔里木河三源流地区为例[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 723-730.]
- [33] Li X G, Wei X, Huang Q. Comprehensive entropy weight observability-controllability risk analysis and its application to water resource decision-making[J]. Water SA, 2012, 38(4): 573-580.
- [34] Won K, Chung E S, Choi S U. Parametric assessment of water use vulnerability variations using SWAT and fuzzy TOPSIS coupled with entropy[J]. Sustainability, 2015, 7(9): 12052-12070.
- [35] Liu Qianqian, Chen Yan. Assessing the vulnerability of basin water resources based on entropy weight method: a case study of Huaihe River basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(9): 10-17. [刘倩倩, 陈岩. 基于熵权法的流域水资源脆弱性评价——以淮河流域为例[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 10-17.]
- [36] He Guohua, Wang Ni, Xie Jiancang, et al. Establishment and application of fuzzy comprehensive assessment model for harmony of water allocation based on entropy weight[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 214-220. [何国华, 汪妮, 解建仓, 等. 基于熵权的水资源配置和谐性模糊综合评价模型的建立及应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 214-220.]
- [37] Zhang Jie, Deng Xiaojun, Zhai Luxin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water resources sustainable utilization based on entropy weight in Guangxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 385-389, 396. [张杰, 邓晓军, 翟禄新, 等. 基于熵权的广西水资源可持续利用模糊综合评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 385-389, 396.]
- [38] Wang Youzhen. Application of entropy weight matter-element model in water resources safety evaluation: a case study in Taiyuan City[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2018, 26(6): 4-7. [王有振. 熵权物元模型在水资源安全评价中的应用——以太原市为例[J]. 水利技术监督, 2018, 26(6): 4-7.]
- [39] Liu Xiaomin, Liu Zhihui, Sun Tianhe. Evaluation of water resources vulnerability in Hebei Province based on entropy weight method[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(4): 33-35, 39. [刘晓敏, 刘志辉, 孙天合. 基于熵权法的河北省水资源脆弱性评价[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 33-35, 39.]
- [40] Cui Dan, Li Rui, Chen Yan, et al. An evaluation of the water environmental carrying capacity using structural equation modeling: a case study of the upstream areas of Xiaoxia Bridge Section in Huangshui River basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(2): 624-632. [崔丹, 李瑞, 陈岩, 等. 基于结构方程的流域水环境承载力评价——以湟水流域小峡桥断面上游为例[J]. 环境科学学报, 2019, 39(2): 624-632.]
- [41] Chen Nanxiang, Wang Yanhui. Fuzzy comprehensive evaluation of sustainable carrying capacity of water resources based on entropy weight[J]. Yellow River, 2007, 29(10): 44-46. [陈南祥, 王延辉. 基于熵权的水资源可持续承载力模糊综合评价[J]. 人民黄河, 2007, 29(10): 44-46.]
- [42] Lv Ping, Liu Dong, Zhao Feifei. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Jiansanjiang branch bureau[J]. Advanced Materials Research, 2011, 204: 834-837.
- [43] Zhou Rongxing, Pan Zhengwei, Jin Juliang, et al. Forewarning model of regional water resources carrying capacity based on combination weights and entropy principles[J]. Entropy, 2017, 19(11): 574.
- [44] Jiang Rucheng, Gu Shixiang. Application of entropy weight-normal cloud model in carrying capacity evaluation of water ecological environment in Yunnan Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(3): 118-123. [蒋汝成, 顾世祥. 熵权法-正态云模型在云南省水生态承载力评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 118-123.]
- [45] Su Pinren, Guan Dongjie, Yang Sha. Dynamic change evaluation of water resources capacity in Karst area of Chongqing[J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(8): 203-208. [苏品任, 官冬杰, 杨莎. 重庆喀斯特地区水资源承载力动态变化评价[J]. 绿色科技, 2018(8): 203-208.]
- [46] Liu Wenwen. Application of fuzzy entropy weight comprehensive evaluation model in comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Shenyang City[J]. Heilongjiang

- Hydraulic Science and Technology, 2018, 46(9): 130-134. [刘雯雯. 模糊熵权综合评价模型在沈阳市水资源承载力综合评价中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(9): 130-134.]
- [47] Chen Haitao, Xu Jiahao. Evaluation of water resources carrying capacity in Henan Province based on entropy-weight fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Pearl River, 2020, 41(1): 48-53, 116. [陈海涛, 徐嘉豪. 基于熵权模糊综合评价模型的河南省水资源承载力评价[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 48-53, 116.]
- [48] Qian Bao, Zhu Yuxin, Wang Yuxiao, et al. Can entropy weight method correctly reflect the distinction of water quality indices? [J]. Water Resources Management, 2020, 34(11): 3667-3674.
- [49] Huang Shaobin. Application of water-environmental evaluation in theory of entropy[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(8): 179-182, 194. [黄少彬. 基于熵理论的河流水环境评价及应用[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(8): 179-182, 194.]
- [50] Li Bing, Yang Guishan, Wan Rongrong, et al. Dynamic water quality evaluation based on fuzzy matter-element model and functional data analysis, a case study in Poyang Lake[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(23): 19138-19148.
- [51] Meng Dongfang, Tong Feng, Wang Xiyang. Application of entropy weight extended set pair analysis model on Xi'an City shallow groundwater quality assessment[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(11): 55-60. [孟东芳, 童锋, 王喜英. 熵权扩展集对分析模型在西安市浅层地下水水质评价中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(11): 55-60.]
- [52] Hasan M S U, Rai A K. Groundwater quality assessment in the Lower Ganga Basin using entropy information theory and GIS [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 123077.
- [53] Sahoo M M, Patra K C, Swain J B, et al. Evaluation of water quality with application of Bayes' rule and entropy weight method[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2017, 21(6): 730-752.
- [54] Ukah B U, Ameh P D, Egbueri J C, et al. Impact of effluent-derived heavy metals on the groundwater quality in Ajao industrial area, Nigeria: An assessment using entropy water quality index (EWQI) [J]. International Journal of Energy and Water Resources, 2020, 4(3): 231-244.
- [55] Amiri V, Kamrani S, Ahmad A, et al. Groundwater quality evaluation using Shannon information theory and human health risk assessment in Yazd Province, central plateau of Iran[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(1): 1108-1130.
- [56] Luo Bin, Jiang Shizhong, Zheng Yuerong, et al. Application of water poverty index based on the entropy weight method to water security evaluation of Sichuan Province[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2016, 39(4): 608-611. [罗斌, 姜世中, 郑月蓉, 等. 基于熵权法的水匮乏指数在四川省水安全评价中的应用[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2016, 39(4): 608-611.]
- [57] Ding Xiaowen, Chong Xiao, Bao Zhengfeng, et al. Fuzzy comprehensive assessment method based on the entropy weight method and its application in the water environmental safety evaluation of the Heshangshan drinking water source area, Three Gorges reservoir area, China [J]. Water, 2017, 9(5): 329.
- [58] Tian Junfeng, Wu Li. Variable fuzzy sets based on entropy in regional water security evaluation [J]. Henan Science, 2018, 36(5): 676-682. [田俊峰, 吴丽. 基于熵权的模糊可变集合在区域水安全评价中的应用[J]. 河南科学, 2018, 36(5): 676-682.]
- [59] Zhang Youxian, Li Erqiang, Luo Dongxia, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water environment safety of Lanzhou based on AHP-entropy weight method [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(2): 709-718. [张有贤, 李二强, 罗东霞, 等. 基于AHP-熵权法的兰州市水环境安全模糊综合评价[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 709-718.]
- [60] Singh K R, Dutta R, Kalamdhad A S, et al. Information entropy as a tool in surface water quality assessment [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(1): 1-12.

Research progress of entropy weight method in water resources and water environment

LIU Hongyu¹, LIU Youcun^{2,3}, MENG Lihong⁴, JIAO Keqin⁵,
ZHU Mingyong^{2,3}, CHEN Yankui^{2,3}, ZHANG Pengfei^{2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. School of Geography and Tourism, Jiaying University, Meizhou 514015, Guangdong, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Conservation and Precision Utilization of Characteristic Agricultural Resources in Mountainous Areas, Jiaying University, Meizhou 514015, Guangdong, China; 4. School of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 5. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the population growth and the economic and social development, the contradiction between supply and demand of water resources is on the increase day by day. It is a crucial new task to save, protect, manage, rationally develop, efficiently utilize and optimize allocation of water resources comprehensively. As an important way to study the sustainable utilization of water resources, entropy weight method can eliminate small contribution to the evaluation results in the index system of indicators, reduce the influence of human factors on the subjective weight, and thus more accurate calculation results are achievable, which can objectively reflect the status quo of water resources and water environment. For this reason, the method is widely used in the evaluation of water resources and water environment, which will provide scientific basis for efficient utilization of water resources and comprehensive evaluation of water environment. This article explored the origin of the entropy weight method and development process in the evaluation of water resources and environment, discussed and summarized the four applications of the entropy weight method in water resources quantity, water resources carrying capacity, water environmental quality and water ecological environment assessment and found the entropy weight method shows a good application prospect in the evaluation of water resources and water environment. Meanwhile, in view of the shortcomings of entropy weight method in water resources and water environment assessment, some improvements are suggested, which will provide new ideas for the research direction of water resources and water environment assessment. In addition, the future of entropy weight method is forecasted: by combining the entropy weight method with other methods innovatively, a reasonable and comprehensive evaluation index system can be built, and applied in the development trend of water resources utilization and spatio-temporal pattern evolution.

Key words: entropy method; carrying capacity of water resources; water environment assessment; research progress

(责任编辑: 陈仁升)