

马语悦, 祝雪萍, 赵雪花, 等. 基于 WBM 评价模型的水生态承载力评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 267-275. MA Y Y, ZHU X P, ZHAO X H, et al. Evaluation of water ecological carrying capacity based on WBM evaluation model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 267-275. (in Chinese)

基于 WBM 评价模型的水生态承载力评价

马语悦¹, 祝雪萍¹, 赵雪花¹, 高学睿², 常柯¹

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为丰富水生态承载力研究方法, 将加权 Bonferroni 算子(weighted Bonferroni mean, WBM)应用于水生态承载力评价研究, 构建相应的 WBM 评价模型。通过建立水生态承载力评价指标体系, 运用层次分析法和改进熵权法确定指标权重, 再利用 WBM 评价模型进行承载力评价, 并将其与广泛应用的 TOPSIS 模型评价结果进行对比, 以太原市为例对方法的可靠性进行验证, 进一步采用障碍度模型识别影响水生态承载力的关键障碍因素。结果表明: 太原市 2009—2020 年水生态承载力状态于临界承载上下波动, 整体变化趋势不显著, 近年来呈良好态势发展; 水资源、水生态子系统承载状态波动较大; 通过与 TOPSIS 模型对比, 该评价模型评价结果较为一致, 表明 WBM 模型适用于水生态承载力综合评价; 制约该地区的障碍因素主要集中在水资源子系统。

关键词: 水生态承载力; 改进熵权法; WBM 评价模型; 障碍度模型

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0027

水生态承载力是近年新兴的科学概念, 是依据承载力理论, 综合考虑水资源和水环境等要素对水生态系统进行研究的一个综合性的概念^[1], 以可持续发展为原则, 强调水生态系统对人类经济社会的可持续承载^[2-3]。现有研究大多认为^[4], 水生态承载力是水资源与水环境承载力的有机结合和扩展, 将水生态系统问题与河流生态问题和社会经济发展问题相结合, 运用生态学和系统论等方法来衡量人类发展与自然生态的协调关系。国内外关于水生态承载力的概念尚未达成共识: 李靖等^[5]认为水生态承载力是反映流域水生态系统不断支撑经济社会发展规模的阈值; Yang 等^[4]认为水生态承载力随自然水生态系统的变化和人类社会经济的发展而变化; 张远等^[6]认为水生态承载力是反映水生态系统为人类社会活动提供生态服务产品的能力; Byron 等^[7]认为水生态承载力作为决策者和监督者的宏观调控工具之一, 可以反映水生态系统、社会和经济之间的作用和反思, 为决策者提供一些基础数据和分析结论。

目前有关水生态承载力评价的方法多数参考水

资源、水环境承载力研究, 包括系统动力学^[8]、模糊评价法^[9]、主成分分析法^[10-11]、生态足迹法^[12]、TOPSIS 模型^[13]和多目标评价^[14]、SMI-P 法^[15]等。Bonferroni 平均算子(Bonferroni mean, BM)是一种聚合算子, 由 Bonferroni^[16]引入, 它由算术平均值和乘积组成, 具有捕获参数之间相互关系的理想性质, 可以将多个参数聚集为一个参数^[17], 通过迭代运算能够较好地消除变量间的相互影响和相互依赖, 使得综合评价结果客观公正^[18]。Bonferroni 算子被认为是一种有用的平均聚合函数, 在多属性综合评价、模糊系统和多准则决策中具有较好的拓展和应用, 并引起了研究人员的大量关注^[19-21]。王伟明等^[18]将 CRITIC-G1 和 Bonferroni 算子结合, 提出新的学术期刊综合评价方法, 通过实例验证了方法的有效性和实用性。Xia 等^[22]将变量的权向量引入 BM, 提出加权 Bonferroni 算子(weighted Bonferroni mean, WBM), 考虑了变量本身的相对重要程度。

因此, 为尝试减弱指标间相关性对水生态承载力评价结果的影响, 丰富水生态承载力研究方法,

收稿日期: 2023-01-12 修回日期: 2023-03-06 网络出版时间: 2023-04-12

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1039.018.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A20613); 山西省科技创新人才团队专项资助(202204051002027); 山西省自然科学基金项目(202103021223113; 201901D111060)

作者简介: 马语悦(1995—), 女, 山西晋城人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 806184142@qq.com

通信作者: 祝雪萍(1985—), 女, 江西余江人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xpzhu01@163.com

本文将 WBM 引入水生态承载力评价研究体系,提出一种水生态承载力综合评价模型——WBM 评价模型,并以太原市为研究对象验证其可靠性,以期水生态承载力评价研究提供一种可选方法,为促进区域生态系统保护提供科学支撑。

1 研究区概况

太原市(37°27'N~38°25'N,111°30'E~113°09'E)位于山西省中部、晋中盆地北部地区,处于黄河分支——汾河分布范围,总面积 6 988 km²。2020 年太原市常住人口为 530.41 万人,全市实现地区生产总值(GDP)4 153.25 亿元,人均 GDP 为 78 302.63 元。

太原市多年平均降水量为 37.29 亿 m³,多年平均水资源量为 6.01 亿 m³,但近年来全市平均实际用水量为 7.25 亿 m³,难以满足城市发展需要。2003—2018 年太原市施行了一系列环保条例和工程建设,包括《太原市城市节约用水条例》《太原市兰村泉域水资源保护条例》《太原市晋祠泉域保护条例》、引黄入晋工程、汾河生态修复工程、太原市湿地公园建设等,这些工程建设及条例的实施对于太原市生态环境起到了改善作用。

2 研究方法

本文基于“目标层-准则层-指标层”框架建立水生态承载力指标体系,利用层次分析法和改进熵权法分别确定指标的主、客观权重,并通过乘法集乘法得到指标的组合同权重,建立 WBM 评价模型评价水生态承载力动态变化过程,并将其与广泛应用并认可的 TOPSIS 模型^[23]评价结果进行对比分析,最终结合障碍度模型辨识研究区关键障碍因素,分析 WBM 模型的适用性。

2.1 指标体系构建

考虑水生态承载力与城市水资源、生态、经济社会之间的相互关系,参考国家最严格水资源管理制度的“三条红线”,基于水生态承载力概念内涵,参考已有研究^[6,11]中建立的目标-准则-指标层级关系框架,以水生态承载力为目标层,水资源、水环境、水生态及水安全为准则层,并根据太原市实际情况建立评价指标体系,见表 1。

本研究所采用的太原市水生态评价指标数据根据《太原市水资源公报》《太原市国民经济和社会发展统计公报》《太原市环境状况公报》《山西省水资源公报》《山西省土地利用年鉴》等计算统计得到。

表 1 太原市水生态承载力指标体系

Tab. 1 Water ecological carrying capacity index system in Taiyuan City

准则层	指标层	效应
水资源 A	人均水资源量 A_1/m^3	+
	水资源开发利用度 $A_2/\%$	-
	供水模数 $A_3/(m^3 \cdot km^{-2})$	-
水环境 B	单位工业增加值污染物排放强度 $B_1/(m^3 \cdot 万元^{-1})$	-
	单位耕地面积化肥施用量 $B_2/(kg \cdot hm^{-2})$	-
	单位土地面积畜禽养殖量 $B_3/(头 \cdot km^{-2})$	-
	城镇生活污水排放强度 $B_4/(m^3 \cdot 万元^{-1})$	-
	水环境质量指数 B_5	-
	断面优于 III 类水质比例 $B_6/\%$	+
水生态 C	林草覆盖率 $C_1/\%$	+
	水域面积指数 C_2	+
	城市绿地面积指数 C_3	+
	生态基流保证率 $C_4/\%$	+
水安全 D	水文调节功能指数 D_1	+
	集中式饮用水水源地水质达标比例 $D_2/\%$	+

注:依据不同指标对水生态承载力具有不同的影响效应,将自身数值增长有助于提升承载力水平的指标定为正效应指标(+),相反为负效应指标(-)。

2.2 指标权重确定

采取主客观结合的方法,运用层次分析法和改进熵权法,分别计算各指标权重,通过乘法集乘法得到组合权重,作为最终的指标权重。

2.2.1 层次分析法

根据层次分析法的基本原理^[24]:依次构建准则层及各准则层指标的判断矩阵,并经过一致性检验,最终得到各评价指标的权重。

2.2.2 改进熵权法

传统熵权法中采用极值法进行指标的标准化处理,存在当指标进行标准化处理后为 0,将致使 $f_{ij}=0$,进而使得 $\ln f_{ij}$ 无意义的问题。李上等^[25]在研究统计指标标准化时指出,在指标数据的标准化处理中加入调整系数 k ,将指标数据转换为量纲一致且取值在 k 到 1 范围内的有限小数,可处理此问题。引入该思想,将其应用于水生态承载力评价指标的客观权重计算中。计算步骤如下:

将指标进行标准化,正效应指标、负效应指标公式分别见式(1)、(2),计算得到第 i 项指标的熵值 H_i 及熵权 w_{ei} ,见式(3)、(5)。

$$u_{ij}' = \frac{u_{ij} - \min(u_{ij})}{\max(u_{ij}) - \min(u_{ij})} \times (1 - k) + k \quad (1)$$

$$u_{ij}' = \frac{\max(u_{ij}) - u_{ij}}{\max(u_{ij}) - \min(u_{ij})} \times (1 - k) + k \quad (2)$$

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n (f_{ij} \ln f_{ij}) \quad (3)$$

$$f_{ij} = \frac{u_{ij}'}{\sum_{j=1}^n u_{ij}'} \quad (4)$$

$$w_{ei} = \frac{1 - H_i}{\sum_{k=1}^m 1 - H_k} \quad (5)$$

式中: u_{ij} 与 u_{ij}' 分别为第 i 项指标第 j 年的实际值与标准值, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n; k=0.01$ 。

2.2.3 乘法集成法

运用乘法集成法最终得到第 i 项指标的组合同权重 w_i , 见式(6)。

$$w_i = \frac{w_{si} w_{ei}}{\sum_{i=1}^m w_{si} w_{ei}} \quad (6)$$

式中: w_{si} 为通过层次分析法得到的第 i 项指标权重。

2.3 基于WBM的评价模型

本文首次将WBM引入水生态承载力评价研究体系,在合理考虑指标权重的同时,又可通过迭代运算削弱指标间的相关性对评价结果的影响。首先通过式(1)和(2)将指标进行标准化后得到 u_{ij}' 作为属性变量,并将主客观权重结合的组合权重 w_i 作为变量的权向量,通过迭代计算得到水生态承载力评价结果,更加合理地评价水生态承载力状态。计算公式^[22]为

$$S_{WBM} = \left(\sum_{i,r=1}^m w_i w_r u_{ij}'^p u_{rj}'^q \right)^{\frac{1}{p+q}} \quad (7)$$

式中: S_{WBM} 为水生态承载力评分值; u_{ij}' 与 u_{rj}' 分别为第 i 项指标与第 r 项指标第 j 年的标准值; w_i, w_r 分别为第 i 项、第 r 项指标的组合权重, $i=1, 2, \dots, m, r=1, 2, \dots, m; p=q=1$ 。

参考相关研究划分标准^[26-27],根据水生态承载力评分值进行状态等级划分,结果见表2。

表2 太原市水生态承载力状态等级划分

Tab. 2 Grade classification of water ecological carrying capacity in Taiyuan City

承载力评分值	[0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1.0]
承载状态	严重超载	超载	临界超载	安全承载	最佳承载

2.4 障碍度模型

城市水生态承载力分析既在于衡量区域水生态

系统与经济社会协同发展关系,也在于厘清影响水生态承载力的障碍因素,以便有针对性地提出合理建议,促进城市可持续发展。具体方法为引入因子贡献度、指标的偏离度和障碍度,据此构建障碍度模型进行分析识别,计算公式^[28]:

$$v_i = 1 - u_{ij}' \quad (8)$$

$$p_i = \frac{v_i w_i}{\sum_{i=1}^m v_i w_i} \times 100\% \quad (9)$$

$$P = \sum p_i \quad (10)$$

式中: 指标权重 w_i 为因子贡献度; v_i 与 p_i 分别为第 i 项指标的偏离度与障碍度; P 为各个子系统的障碍度。

3 结果与分析

3.1 指标权重

根据2.2节中方法计算太原市水生态承载力各指标权重见表3。由表3可知,人均水资源量 A_1 、供水模数 A_3 、生态基流保证率 C_4 及集中式饮用水水源地水质达标比例 D_2 等4项指标的组合权重相对较大。对于资源型缺水城市的太原市而言,水资源总量及水环境质量对本市水生态承载力的评价影响较为重要。

表3 太原市水生态承载力各指标权重

Tab. 3 Index weights of water ecological carrying capacity in Taiyuan City

指标代码	改进熵权法	层次分析法	组合权重
A_1	0.091 3	0.095 2	0.126 5
A_2	0.061 2	0.086 5	0.077 1
A_3	0.110 0	0.079 3	0.127 1
B_1	0.025 3	0.055 1	0.020 3
B_2	0.065 9	0.013 8	0.013 2
B_3	0.084 6	0.061 2	0.075 4
B_4	0.046 6	0.050 1	0.034 0
B_5	0.074 1	0.018 4	0.019 8
B_6	0.083 9	0.050 1	0.061 2
C_1	0.049 0	0.028 7	0.020 5
C_2	0.042 0	0.019 2	0.011 7
C_3	0.046 0	0.095 8	0.064 1
C_4	0.095 2	0.102 6	0.142 2
D_1	0.074 7	0.081 3	0.088 4
D_2	0.050 1	0.162 7	0.118 6
权重合计	1.000 0	1.000 0	1.000 0

3.2 水生态承载力评价结果及分析

对区域水生态承载力分水资源、水环境、水生态和水安全 4 个子系统进行评价,最后进行区域水生态承载力综合评价并与 TOPSIS 模型的评价结果

进行对比分析。

3.2.1 子系统评价

太原市水生态承载力子系统的评分值见图 1。

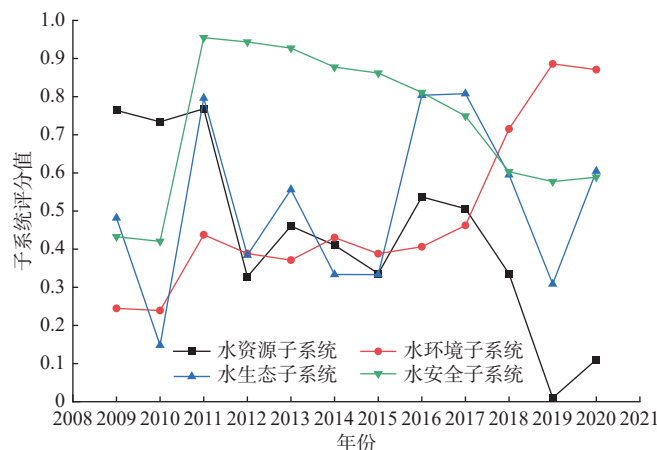


图 1 太原市水生态承载力子系统评分值

Fig. 1 Subsystems core of water ecological carrying capacity in Taiyuan City

由图 1 可知:水资源子系统整体波动较大,呈下降趋势,2009—2011 年水资源子系统处于安全承载状态,2019—2020 年水资源子系统处于严重超载状态,其余年份处于超载至安全承载;2019 年水资源子系统的评分值最低,分析其原因主要在于该年水资源 3 项指标均为研究期内最低值,则标准化后数值均为 0.01,使得迭代运算后得到的评分值达到最低;研究期内 A_1 变动较大, A_2 均未低于 100%,表明太原市水资源开发利用率高,水资源匮乏的问题未得到根本解决。

水环境子系统波动总体上升,从 2009 年的 0.244 9 波动上升至 2020 年的 0.870 8,承载状态由超载逐渐提升至安全承载;2018 和 2019 年水环境 6 项指标较 2017 均有所提升,致使水环境子系统在 2018 和 2019 年有明显的上升;研究期内单位工业增加值污染物排放强度 B_1 、单位土地面积畜禽养殖量 B_3 、城镇生活污水排放强度 B_4 及断面优于Ⅲ类水质比例 B_6 等 4 项指标状态均呈良好态势发展,水环境的改善促进了承载力的提。

水生态子系统整体上升但波动较大,林草覆盖率 C_1 和生态基流保证率 C_4 指标数据均明显波动,对水生态子系统影响较大;2010 年水生态子系统处于严重超载状态,2012、2014—2015、2019 年处于超载状态,2009、2013 和 2018 年处于临界超载状态,

2011 和 2020 年处于安全承载状态,2016—2017 处于最佳承载状态。

水安全子系统总体水平较高,2010—2011 年集中式饮用水水源地水质达标比例 D_2 由 2010 年的 75% 上升至 2011 年的 100%,并一直维持至 2020 年,水文调节功能指数 D_1 指标状态研究期内略微呈下降趋势,致使水安全子系统 2011 年有明显的上升,之后又逐步下降;2009—2010、2019—2020 年处于临界超载状态,2011—2018 年评分值总体水平较高,处于安全承载至最佳承载状态,研究期内年平均值为 0.728 9。

3.2.2 水生态承载力综合评价

太原市水生态承载力综合评分值见图 2。太原市水生态承载力水平近 12 年来波动较大,但整体变化趋势不明显,评分值在平均值 0.527 8 上下浮动,年际增减变化与图 1 中水资源子系统一致,表明太原市水生态承载力综合评分值受水资源子系统影响较大。研究期内太原市综合承载状态于临界超载状态上下波动,2019 年区域承载力综合评分值较低,处于超载状态,2011、2016 和 2017 年区域承载力综合评分值较高,处于安全承载状态,其余年份区域承载力处于临界超载状态。其中,2011 年区域水生态承载力综合评分值较高,该年太原市降水较大,水资源、水环境、水生态及水安全子系统状态均

较2010年有所提高,致使水生态承载力综合评分值呈良好态势发展。有较大提升。2019—2020年太原市水生态承载力



图2 太原市水生态承载力综合评分值

Fig. 2 Comprehensive score of water ecological carrying capacity in Taiyuan City

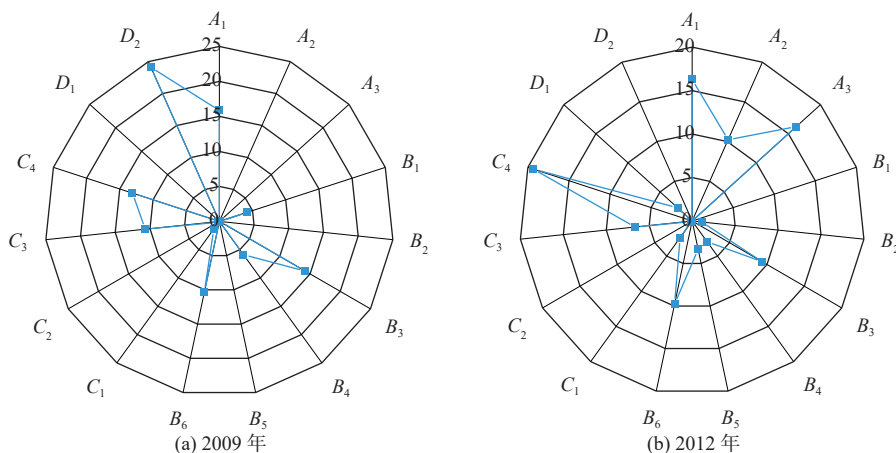
3.2.3 方法对比评价

与图2中TOPSIS模型的综合评分值对比可知:两种评价方法的结果总体相近,变化趋势不明显。两种方法得到2009—2018年承载状态整体均呈上升趋势,由于2019和2020两年WBM模型评分值较TOPSIS模型低,整个研究期内WBM模型综合评分值呈微弱下降, TOPSIS模型综合评分值呈微弱上升,但总体差异不大;且两种方法各年评分值较前一年变化的方向基本一致,变化幅度有所不同;进一步分析,WBM模型综合评分值整体变化趋势较缓,在0.4~0.8波动, TOPSIS模型综合评分值整体上升趋势较快,在0.3~0.8波动, WBM相较于TOPSIS评价结果波动幅度较小。总体看来,基于WBM模型用于水生态承载力评价得到的结果较为可靠。

3.3 障碍度分析

3.3.1 指标障碍度

运用障碍度模型对太原市水生态承载力指标体系内各指标进行诊断分析,从2009—2020年选取每年障碍度因素较大的前5名,统计出现频率大于5次的障碍因子。其中: A_3 出现次数最多(10次); A_1 和 C_4 出现9次; B_3 出现8次; A_2 和 B_6 出现6次。其中2009年、2012年、2015年和2020年的各指标障碍度波动较大,见图3。综合2009—2020年指标障碍度的发展趋势, B_3 、 B_6 的障碍度虽有所下降,但从主要障碍度因子出现频率及障碍度来看,包括 A_1 、 A_2 、 A_3 及 C_4 在内,以上6个指标一直是制约太原市水生态承载力的主要障碍因素。太原市仍需考虑增加全市水资源量,节约用水,提高水环境质量,进一步提升水生态承载状态。



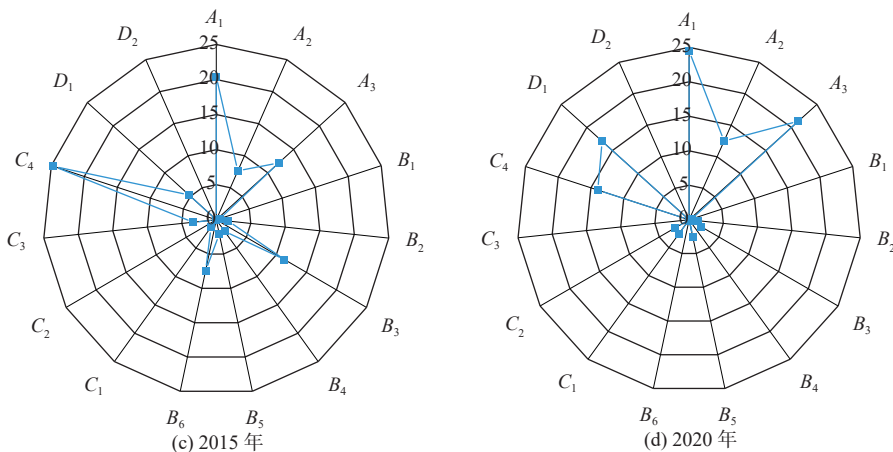


图 3 指标障碍度
Fig. 3 Obstacle degree of index

3.3.2 子系统障碍度

运用障碍度模型得到各子系统障碍度, 见图 4。研究期内: 水资源子系统障碍度较高, 且整体呈上升趋势, 研究期内平均障碍度为 38.71%; 水环境子系统研究期内障碍度逐渐降低, 平均障碍度为 26.09%; 水生态子系统研究期内平均障碍度为 23.71%; 水安全子系统障碍度较低, 研究期内平均障碍度为 11.50%。研究结果表明, 太原市水生态承载力的子系统障碍度主要仍在水资源子系统。因此水资源子系统对于承载力的提升尤为重要, 但水环境、水生态和水安全子系统也不可忽视, 共同促进太原市水生态承载力的发展。

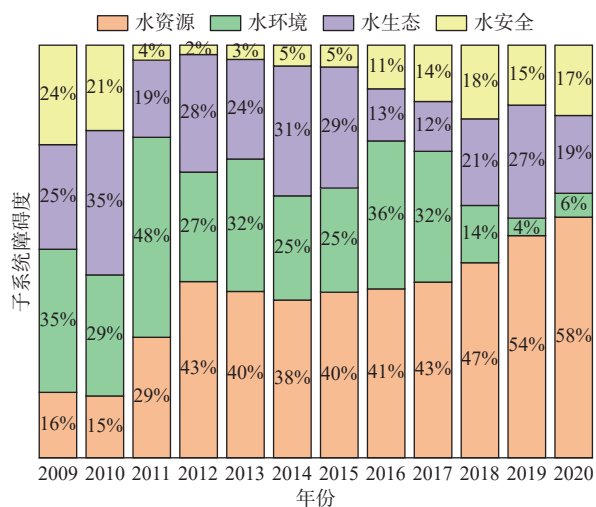


图 4 太原市水生态承载力各子系统障碍度
Fig. 4 Obstacle degree of water ecological carrying capacity subsystems in Taiyuan City

4 讨论

本研究将 WBM 模型首次运用到太原市水生态承载力评价中, 从评价结果来看, 采用的 WBM 模型

与 TOPSIS 模型的评价结果较为一致, 对比两个模型的评价结果及障碍度分析结果可知, 研究提出的 WBM 模型评价水生态承载力是客观且可行的, 符合太原市实际情况。此外, 根据 2018 年李茜茜等^[29]、2021 年赵磊等^[30] 及 2022 年丁相毅等^[31] 分别采用主成分分析法、熵权 TOPSIS 评价模型及 SMI-P 法针对太原市 2007—2014 年、2011—2018 年及 2009—2018 年的水资源承载力进行评价, 均得出太原市水资源承载力的发展呈波动上升趋势的结论, 与本文 2018 年之前时期的研究结论大体一致。前述文献指标体系均考虑了水环境、水生态相关指标, 于本文有较大参考意义, 表明本研究的评价结果符合客观实际。由此也表明了 WBM 模型在水生态承载力评价中的适用性和可靠性。

同时可知 2019 年以来, 由于水资源量减少, 使得太原市水生态承载力状态下降为临界超载状态。表明太原市在开展一系列生态修复措施的同时, 仍需“开源节流”, 进一步加大引黄水量、增加非常规水资源利用率, 同时大力推进节约用水, 通过保障太原市水资源状态促进水生态承载力的提升。

5 结论

建立研究区水生态承载力目标-准则-指标层框架指标体系, 采取主客观结合的方法, 即层次分析法和改进熵权法相结合, 得到各指标组合权重, 并将加权 Bonferroni 算子首次引入水生态承载力评价研究体系, 建立 WBM 评价模型, 对太原市水生态承载力进行综合评价。结果表明: 2009—2020 年太原市水生态承载力水平较为波动, 处于临界承载状态上下波动, 整体变化趋势不明显, 近年来呈良好态

势发展;与TOPSIS评价结果对比可知,WBM模型用于水生态承载力评价得出的结果较为可靠;太原市水生态承载力状态的障碍因素主要集中在水资源子系统。上述结果表明提出的模型具有合理性与可靠性,丰富了量化水生态承载力研究成果。本研究为削弱指标间相关性对水生态承载力评价的影响、客观量化水生态承载力提供了一种可选方法,但如何量化指标相关性对评价结果的影响尚有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 杜芳,彭剑峰,王亚俊,等.北运河北京段水生态承载力研究及关键控制要素识别[J].*环境科学研究*, 2021, 34(10): 2369-2379. DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.31](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.31).
- [2] 卢开东,王健健,马燮桃,等.基于DPSIR模型的芜湖市水生态承载力研究与建议[J].*环境工程技术学报*, 2022, 12(2): 538-545. DOI: [10.12153/j.issn.1674-991X.20210666](https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210666).
- [3] WOLVERTON S. Harvest pressure and environmental carrying capacity: An ordinal-scale model of effects on ungulate prey[J]. *American Antiquity*, 2008, 73(2): 179-199. DOI: [10.1017/S0002731600042244](https://doi.org/10.1017/S0002731600042244).
- [4] YANG J F, LEI K, QIAO F. An improved index system of regional water ecological carrying capacity evaluation: A case study of Tieling City, China[J]. *Sustainable Development of Industry and Economy*, 2014, 869-870: 627-633. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.869-870.627](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.869-870.627).
- [5] 李靖,周孝德.叶尔羌河流域水生态承载力研究[J].*西安理工大学学报*, 2009, 25(3): 249-255. DOI: [10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2009.03.001](https://doi.org/10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2009.03.001).
- [6] 张远,周凯文,杨中文,等.水生态承载力概念辨析与指标体系构建研究[J].*西北大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(1): 42-53. DOI: [10.16152/j.cnki.xdxbzr.2019-01-006](https://doi.org/10.16152/j.cnki.xdxbzr.2019-01-006).
- [7] BYRON C, BENGTON D, COSTA-PIERCE B, et al. Integrating science into management: Ecological carrying capacity of bivalve shellfish aquaculture[J]. *Marine Policy*, 2011, 35(3): 363-370. DOI: [10.1016/j.marpol.2010.10.016](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2010.10.016).
- [8] ZHANG Z, LU W X, ZHAO Y, et al. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 275: 9-21. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2013.11.031](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.031).
- [9] 黄琨,陈星.台州市椒江区水生态承载力量化与恢复潜力评估[J].*水电能源科学*, 2018, 36(4): 33-36.
- [10] 李云,张紫瑶,周维博.西安市2010—2018年水生态承载力评价[J].*水资源与水工程学报*, 2021, 32(6): 65-70. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2021.06.09](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2021.06.09).
- [11] LU L N, LEI Y L, WU T, et al. Evaluating water resources carrying capacity: The empirical analysis of Hubei Province, China 2008-2020[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144. DOI: [10.1016/j.ecolind.2022.109454](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109454).
- [12] ZHENG D C, LIN Z Y, WU F M. Measurement method of regional water resources carrying capacity based on ecological footprint[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2020, 187: 114-122. DOI: [10.5004/dwt.2020.25308](https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25308).
- [13] 岳启蒙,文倩,贺奕,等.水生态文明城市建设对城市水生态承载力的影响:以武汉市为例[J].*生态学报*, 2021, 41(14): 5586-5597. DOI: [10.5846/stxb2021102160445](https://doi.org/10.5846/stxb2021102160445).
- [14] DONG Z C, YANG G, FENG S N, et al. Analysis of the ultimate water resources carrying capacity in Yancheng, China[J]. *Water Supply*, 2021, 21(6): 3099-3113. DOI: [10.2166/ws.2021.102](https://doi.org/10.2166/ws.2021.102).
- [15] 左其亭,杨振龙,曹宏斌,等.基于SMI-P方法的黄河流域水生态安全评价与分析[J].*河南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 10-19. DOI: [10.16366/j.cnki.1000-2367.2022.03.002](https://doi.org/10.16366/j.cnki.1000-2367.2022.03.002).
- [16] BONFERRONI C. Sulle medie multiple di potenze[J]. *Bolletino Matematica Italiana*, 1950, 5(5): 267-270.
- [17] 骆丹丹,曾守楨. Pythagorean模糊幂Bonferroni集成算子及其决策应用[J].*计算机工程与应用*, 2020, 56(15): 58-65. DOI: [10.3778/j.issn.1002-8331.1912-0431](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1912-0431).
- [18] 王伟明,徐海燕,张发明.基于CRITIC-G1和Bonferroni算子的学术期刊综合评价研究[J].*情报理论与实践*, 2020, 43(5): 104-109. DOI: [10.16353/j.cnki.1000-7490.2020.05.018](https://doi.org/10.16353/j.cnki.1000-7490.2020.05.018).
- [19] YAGER R R. On generalized Bonferroni mean operators for multi-criteria aggregation[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2009, 50(8): 1279-1286. DOI: [10.1016/j.ijar.2009.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ijar.2009.06.004).

- [20] XU Z S, CHEN Q. A multi-criteria decision making procedure based on interval-valued intuitionistic fuzzy bonferroni means[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2011, 20(2): 217-228. DOI: 10.1007/s11518-011-5163-0.
- [21] WANG L, LI N. Pythagorean fuzzy interaction power Bonferroni mean aggregation operators in multiple attribute decision making[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2020, 35(1): 150-183. DOI: 10.1002/int.22204.
- [22] XIA M M, XU Z S, ZHU B. Generalized intuitionistic fuzzy Bonferroni means[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2012, 27(1): 23-47. DOI: 10.1002/int.20515.
- [23] 杜雪芳, 李彦彬, 张修宇. 基于TOPSIS模型的郑州市水资源承载力研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(2): 84-88. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.02.017.
- [24] 胡立刚. 基于层次分析法的贵州省六硐河健康评估研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019(9): 87-93. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.09.018.
- [25] 李上, 鲁鹏, 马婧文, 等. 面向行业的标准化统计指标体系研究[J]. *中国标准化*, 2021(3): 91-97. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5944.2021.03.010.
- [26] BU J H, LI C H, WANG X, et al. Assessment and prediction of the water ecological carrying capacity in Changzhou city, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123988. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123988.
- [27] 孙佳乐, 王颖, 辛晋峰. 汉江流域(陕西段)水生态承载力评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 80-86. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2018.03.14.
- [28] 李润卓, 赵雪花, 王畅. 桑干河流域水环境承载力评价[J]. *中国农村水利水电*, 2021(8): 43-46, 53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.08.008.
- [29] 李茜茜, 艾凯丽. 太原市水资源承载力研究[J]. *福建质量管理*, 2018(3): 215-216. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9604.2018.03.158.
- [30] 赵磊, 王立权, 戴长雷, 等. 基于DPSIRM模型的太原市水资源承载力研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(2): 109-115. DOI: 10.1905/j.issn.972-243X.2021.02.19.
- [31] 丁相毅, 石小林, 凌敏华, 等. 基于“量-质-域-流”的太原市水资源承载力评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 9-20. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0002.

Evaluation of water ecological carrying capacity based on WBM evaluation model

MA Yuyue¹, ZHU Xueping¹, ZHAO Xuehua¹, GAO Xuerui², CHANG Ke¹

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Water ecological carrying capacity is a comprehensive concept based on the theory of carrying capacity, considering water resources, water environment, and other factors to study the water ecosystem. It is based on the principle of sustainable development, covering water resources and the water environment, emphasizing the sustainable carrying capacity of water ecosystem to human society and economy. At present, the evaluation methods of water ecological carrying capacity mostly referred to the research of water resources carrying capacity and water environment carrying capacity, including SD, fuzzy evaluation method, TOPSIS model, and so on. The Bonferroni mean operator proposed by Bonferroni can effectively capture the correlation between input variables and can aggregate multiple input variables into one input variable. It is an aggregation operator between the maximum and the minimum. This method eliminated the mutual influence and interdependence between variables through iterative operation so that the comprehensive evaluation results can be fair. In recent years, the Bonferroni mean had been well expanded and applied in practical problems such as multi-attribute comprehensive evaluation and group decision-making. Xia et. al introduced the weight vector of the variable into Bonferroni mean and proposed the weighted Bonferroni mean, which considered the relative importance of the variable itself. Try to weaken the influence of the correlation between indicators on the evaluation results of water ecological carrying capacity and enrich the research methods of water ecological carrying capacity, the weighted Bonferroni mean operator was employed in the evaluation system of water ecological carrying capacity, and a comprehensive evaluation model of

water ecological carrying capacity-WBM evaluation model was established. Taiyuan City was taken as the research object to verify the reliability of WBM, to provide an alternative method for the evaluation of water ecological carrying capacity, and provide support for promoting regional ecosystem protection.

Based on the framework of 'target layer-criterion layer-index layer', the index system of water ecological carrying capacity was established. The analytic hierarchy process and the improved entropy weight method were used to determine the subjective and objective weights of the indicators, and the combined weights of the indicators were obtained by the multiplication integration method. The weighted Bonferroni mean evaluation model was established to evaluate the dynamic change process of water ecological carrying capacity, and it was compared with the widely used and recognized TOPSIS model evaluation results. The key obstacle factors in the study area were identified by the obstacle degree model, and the applicability of the weighted Bonferroni mean model is analyzed.

The evaluation index system and WBM model were applied to the evaluation of the water ecological carrying capacity in Taiyuan city. The results show that the water ecological carrying capacity in Taiyuan City fluctuates up and down in the critical overload state from 2009 to 2020. The overall trend of change was not obvious and had developed in a good way in recent years. For the four subsystems: The carrying capacity of water resources subsystem decreases from safe carrying capacity to severe overload, the carrying capacity of water environment subsystem increases from overload to optimal carrying capacity, the carrying capacity of water ecology subsystem fluctuates up, and down in the critical overload state, and the carrying capacity of water security subsystem decreases to critical overload. The water resources and water ecological subsystems had large fluctuations in their bearing status. The identification of the barrier factors showed that the barrier factors constraining the area were mainly concentrated in the water resources subsystem.

In comparison with TOPSIS evaluation results, it can be seen that the weighted Bonferroni mean model was reasonable and reliable for water ecological carrying capacity evaluation. The above results showed that the proposed model was reasonable and reliable, and enriched the research results of quantifying the water ecological carrying capacity. This study provided an optional method to weaken the influence of correlation between indicators on the evaluation of water ecological carrying capacity and to objectively quantify the water ecological carrying capacity, but how to quantify the influence of correlation between indicators on the evaluation results needed further study.

Key words: water ecological carrying capacity; improved entropy weight method; WBM evaluation model; obstacle degree