

洞庭湖流域水资源承载力时空演变分析

邓正华^{1, 3} 戴丽琦¹ 邓冰^{2, 3} 邓丽萍¹¹

(1. 湖南理工学院 经济管理学院, 中国湖南 岳阳 414000;

2. 长沙理工大学 水利工程学院, 中国湖南 长沙 410000;

3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 中国湖南 长沙 410000)

【摘要】: 根据湖南省洞庭湖生态环境监测中心监测数据、湖南省水资源公报和湖南省统计年鉴, 构建洞庭湖流域水资源—水环境—社会经济三维评级指标体系, 采用层次分析法和熵权法组合赋权的 TOPSIS 模型, 对 2009—2018 年洞庭湖流域水资源承载力进行测算, 进而分析洞庭湖流域水资源承载力的时间演变和空间分布特征。结果表明: (1) 2009—2018 年, 洞庭湖流域水资源承载力整体由良好等级下降为合理等级, 其中藕池河、虎渡河、松滋河流域水资源承载力明显下降。(2) 2018 年洞庭湖流域水资源承载力空间分布存在明显差异, 澧水、西洞庭湖水资源承载力处于良好等级, 湘江、藕池河、虎渡河、松滋河、东洞庭湖处于超载等级, 沅水、资江与南洞庭湖水资源承载力处于合理等级, 洞庭湖流域水资源承载力空间分布排序依次为澧水>资江>洞庭湖区>沅水>湘江>松滋河>藕池河>虎渡河。最后根据洞庭湖流域水资源承载力时间演变与空间分布及其成因提出改善洞庭湖流域水资源承载力的政策建议。

【关键词】: 洞庭湖流域 水资源承载力 组合赋权 TOPSIS 模型

【中图分类号】: F062.9 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2021) 05-0186-07

水是人类社会赖以生存发展的重要资源之一, 随着人口的增长和经济的发展, 水资源短缺和水环境恶化问题日益严峻, 逐渐成为制约社会经济可持续发展的重要因素^[1]。水资源承载力是水资源对区域工农业生产和社会经济发展支撑能力的重要表征, 对区域水资源承载力的综合评价, 有助于掌握区域水资源与社会经济发展之间的互动关系, 为促进区域经济与可持续发展提供理论支撑和现实依据^[2-3]。目前关于水资源承载力的研究较为丰富, 主要集中于水资源承载力定义、影响因素、水资源承载力评价方法等方面。关于水资源承载力的定义, 惠洪河等认为水资源承载力是特定区域内水资源在特定发展阶段下, 对该区域社会经济发展的最大支撑能力^[4], 注重水资源对社会经济发展的作用; 许有鹏等认为水资源承载力是指在一定的社会经济水平下, 水资源的最大开发容量^[5], 更关注水资源本身的作用大小; 夏军等认为水资源承载力是能支撑人口规模和社会经济可持续发展的能力^[6], 注重水资源与社会经济之间的关系, 更为科学合理。水资源承载力的主要影响因素包括自然系统与社会系统。就自然系统而言, 水资源数量和水环境质量是决定水资源承载力的重要要素, 水环境质量越高, 水资源承载力越强^[7]。社会发展水平影响水资源开发利用的方式和程度, 不同的生产力水平和消费水平对水资源的数量和质量提出不同的要求, 对水资源承载力的影响不容忽视^[8]。在指标体系的构建上, 常基于“水资源—社会经济—生态环境”三方面构建综合评价指标体系^[9], 也有基于社会和

作者简介: 邓正华(1974-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为资源与环境经济。E-mail: 995469629@qq.com
基金项目: 湖南省社会科学成果评审委员会重大课题(XSP20ZDI002); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ40107); 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室开放基金项目

水资源系统的“驱动力—压力—状态—影响—响应”关系构建更为全面的指标体系^[10-12]；余灏哲从量、质、域、流的角度创新评价指标体系，对京津冀流域的水资源承载力进行了综合评价^[13]。在水资源承载力定量研究方面，常见的评价方法有常规趋势法、主成分分析法、模糊综合评价法、系统动力学方法、TOPSIS 模型等^[14-19]。以上方法各具特点，常规趋势法对水资源承载力影响因素之间相互作用的关系考虑不够全面，难以反映现状；模糊综合评价法可以对产生的离散过程进行综合处理，但信息利用率较低；主成分分析法可客观确定指标权重，但在评价参数的分级标准上又受到主观因素的影响。TOPSIS 模型能充分利用指标信息，客观、准确地评价不同评价对象的优劣程度，目前已充分应用于水资源承载力的研究。如何刚等运用 TOPSIS 综合评价法，研究分析了 2007—2016 年长江经济带的水资源承载力的动态变化和空间差异^[20]；林龙圳等应用基于熵权法的 TOPSIS 模型，分析评价了 2013—2018 年库布齐沙漠地区的水资源承载力状况，并提出改善建议^[21]。

以上研究表明，水资源承载力逐渐成为区域经济学和经济地理学的研究热点。大多数学者认为水资源承载力主要用来描述某一区域水资源与社会经济发展之间的相互关系，但对水资源承载力的定义没有形成共识。现有的研究多以水资源供求矛盾突出的缺水省域、市域为研究对象，对水资源比较丰富的地区或流域的水资源承载力研究文献不够。另外何刚、林龙圳等尝试运用 TOSIS 模型对水资源承载力进行了定量研究^[20-21]，但有如下几个问题待解决：一是水资源承载力评价指标多以社会经济—水资源指标体系为主，对具体的水环境控制性指标基本没有采用或体现；二是对各指标权重的确定方法较为单一，可能导致水资源承载力评价结果较为主观片面。

本文以洞庭湖流域水资源承载力为研究对象，首先明确水资源承载力的定义，认为水资源承载力指既定经济社会发展条件下，在一定的水环境约束下水资源对该区域社会经济可持续发展的最大支撑能力。以此为基础建立水资源系统—水环境系统—社会经济系统三维评价指标体系，特别是采用原湖南省环保厅洞庭湖生态环境监测中心各流域中心监测点的水环境监测数据，使水资源承载力的理论研究更加具有现实意义。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

洞庭湖位于湖南省东北部，长江中游荆江南岸，是长江流域重要的调蓄型湖泊。洞庭湖流域北有藕池口、松滋口、太平口（以下简称“三口”）分流长江水由藕池河、松滋河和虎渡河汇入洞庭；南有湘江、资江、沅江、澧水（以下简称“四水”）注入洞庭湖，经过湖泊调蓄，由岳阳市城陵矶注入长江。洞庭湖地势西高东低，分成东洞庭湖、西洞庭湖、南洞庭湖 3 个部分。随着湖区工业化、农业产业化和城镇化进程的推进，三峡工程运行后长江—洞庭湖江湖关系的演变，洞庭湖流域的水资源短缺和水环境恶化的问题日益成为洞庭湖区域经济发展的制约因素。洞庭湖流域作为国家级生态经济区、长江中游绿色发展示范创建区，其水资源与社会经济协调发展问题有待深入研究。特别是 2018 年习近平总书记在长江（洞庭湖）华龙码头视察时发表了“守护好一江碧水”“正确处理经济发展与环境保护关系”重要讲话之后，深入研究洞庭湖流域水资源承载力对于实现洞庭湖流域水资源与社会经济协调发展具有更重要的意义。

1.2 数据来源

本文所涉及的洞庭湖流域水资源及社会经济指标的数据来源于 2008—2019 年《湖南统计年鉴》《湖南省水资源公报》，洞庭湖流域水环境数据来源于原湖南省环保厅洞庭湖生态环境监测中心所提供的洞庭湖流域 10 个代表性水体监测站监测数据，各监测站点分布如下：S1 松滋河的新江口；S2 虎渡河的弥陀寺；S3 藕池河的管家铺；S4 湘江的朱婷镇；S5 资江的平口站；S6 沅水的观音寺；S7 澧水的石门新关；S8 洞庭湖东部的岳阳楼；S9 洞庭湖西面的小河嘴；S10 洞庭湖南岸的横岭湖（图 1）。

2 研究方法

2.1 指标体系构建

根据水资源承载力的定义及其评价指标体系的全面性、代表性、可比性和数据的可获得性原则，本文选取洞庭湖流域水资源系统、水环境系统和社会经济系统三维指标作为其水资源承载力评价体系的准则层指标，根据李玉照^[11]、左其亭^[1,24]所选择的水资源系统指标，包括人均水资源量、产业模数、河流通畅度和年均径流量 4 个指标；根据惠洪河^[42]、李高伟^[16]所选择的社会经济系统指标，包括人口密度、污水处理设施投入、GDP、万元工业增加值用水量和万元农业增加值用水 5 个指标；根据河流、湖泊地表水质检测的最新国家标准，水环境系统的检测指标主要有总磷含量（TP）、水体总氮含量（TN）、水体化学需氧量（COD）、水体溶解氧含量（DO）4 个指标。

2.2 组合赋权法

为更准确反映洞庭湖流域水资源系统、水环境系统和社会经济系统各指标的权重，本文将层次分析法主观赋权与熵权法客观赋权相结合，确定其组合权重。

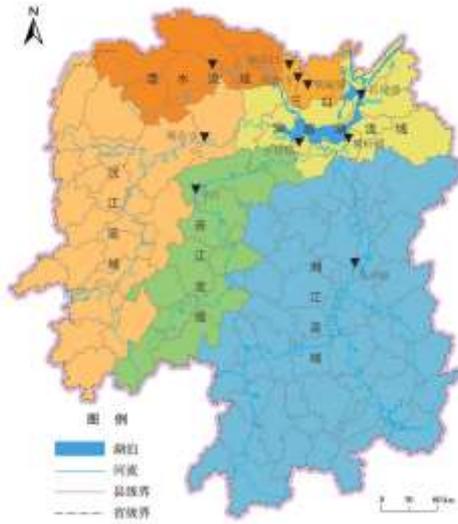


图 1 洞庭湖流域及监测点分布图

层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）由美国学者 T.L. Saaty 提出，可以实现定量与定性的结合，以确定各评价指标的主观权重^[22]。其具体计算步骤如下：第一步，建立判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ ，其中 a_{ij} 的取值范围为 1~9。第二步，计算判断矩阵的最大特征向量。根据公式 $Uw = \lambda_{\max}w$ ，可得判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 和对应的特征向量 w 。第三步，一致性检验。当一致性比率 $CR < 0.1$ 时，表明判断矩阵通过一致性检验，经过归一化处理，得到各指标权重 w'_i 。

熵权法可根据各评价指标提供的信息确定其客观权重，避免主观赋权的随意性造成的结果偏差，主要计算步骤如下：

第一步，数据标准化处理。构建原始数据矩阵： $Z=(z_{ij})_{n \times m}$ ，对数据进行标准化处理：

正/负向指标的标准化公式分别为：

$$\begin{aligned} r_{ij} &= (z_{ij} - \min z_{ij}) / (\max z_{ij} - \min z_{ij}) \\ r_{ij} &= (\max z_{ij} - z_{ij}) / (\max z_{ij} - \min z_{ij}) \end{aligned} \quad (1)$$

第二步，计算各指标的信息熵（式中： f_{ij} 为指标的特征比重）：

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}; f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (2)$$

第三步，计算可得各指标的熵权：

$$w_i'' = (1 - H_i) / \left(m - \sum_{i=1}^m H_i \right) \quad (3)$$

利用公式 (4)^[23] 确定最终的组合权重：

$$W_i = w_i' w_i'' / \sum_i w_i' w_i'' \quad (4)$$

2.3 TOPSIS 模型

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 即逼近理想解排序法，是对多目标决策进行综合评价的方法之一，基本思路是测算评价对象与最优解、最劣解的相对距离并进行排序。其具体评价步骤：

在标准化矩阵 $R = (r_{ij})$ 的基础上确定各指标的最优解 Y^+ 与最劣解 Y^- 。确定各评价对象最优解 Y^+ 和最劣解 Y^- 之间的距离记作 D^+ 和 D^- ，计算方法为：

$$\begin{aligned} D_j^+ &= \sqrt{\sum_{i=1}^m [W_i (\max y_{ij} - y_{ij})]^2} \\ D_j^- &= \sqrt{\sum_{i=1}^m [W_i (\min y_{ij} - y_{ij})]^2} \end{aligned} \quad (5)$$

最后计算贴近度：

$$T_j = D_j^- / (D_j^+ + D_j^-) \quad (6)$$

式中： T_j 的取值范围为 $[0 \sim 1]$ ，当 T 越大，越接近理想解，资源承载力越大； T 越小，离理想解越远，资源承载力越小，据此可以判断资源承载力的高低，确定优劣排序。综合参考众多学者研究的成果^[24-25]，将最终的计算结果 T 划分为 5 个等级，分别

表示水资源承载力的严重超载、超载、合理、良好、优质 5 个等级。

3 结果分析

3.1 计算结果

根据层次分析法计算步骤， $CR=0.0257<0.1$ ，通过一致性检验，得到指标主观权重。计算各指标在不同评价年的客观权重，最后用公式（4）计算得各指标组合权重。

根据组合权重的计算结果，利用公式（5）~（6），计算可得各流域水资源承载力的评价结果。

3.2 洞庭湖流域水资源承载力时间演变分析

样本考察期内，洞庭湖全流域水资源承载力均值由 2009 年的 0.472 下降至 2018 年的 0.415（图 2）。其中洞庭湖水资源承载力由 2009 年的 0.509 下降至 0.456，由良好等级下降为合理等级，呈稳中下降趋势。三口流域水资源承载力均值由 2009 年的 0.413 下降至 2018 年的 0.305，水资源承载力评价等级由合理下降为超载状态（图 3）；湘江流域水资源承载力值由 2009 年的 0.291 上升为 2018 年 0.397，湘江流域水资源承载力评价等级由严重超载上升为超载状态；其他流域水资源承载力小幅下降趋势（图 4）。根据图 2、图 3 和图 4 可以将洞庭湖流域水承载力时间演变过程分为两个阶段：

第一阶段为 2009—2014 年，洞庭湖流域的水资源承载力由 2009 年 0.472 下降至 0.398，由合理下降为超载等级，该时段内洞庭湖流域水资源承载力总体呈现下降趋势。主要原因是 2009—2014 年湖南省 GDP 总量由 13060 亿增加到 27037 亿元，增速为 7.9%，万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量分别为 135m^3 、 83m^3 ，工业废水入湖总氮、总磷及化学氧量排放总量由分别 85.6 万 t、6.7 万 t、110 万 t 增加到 98.4 万 t、8.3 万 t、131.6 万 t，而受三峡工程运行影响，2009—2014 年洞庭湖水资源总径流量由 2013 亿 m^3 下降为 1898 亿 m^3 。藕池河、松滋河、虎渡河的水资源承载力分别由 2009 年的 0.421、0.404、0.413 下降至 2014 年的 0.345、0.332、0.337，水资源承载力等级由合理等级下降至超载等级，主要原因是三口流域水资源总径流量由 478 亿 m^3 下降为 363 亿 m^3 ，河流断流时间由 69 天上升为 129 天；湘江流域水资源承载力值由 2009 年的 0.291 上升为 2014 年的 0.359，由严重超载等级上升为超载等级，主要原因是湘江流域是湖南省有色金属、钢铁、煤炭、食品加工等传统工业集聚区，5 年工业废水排放总量 8309 万 t，约占洞庭湖流域总废水排放量的 82%，但工业污染排放呈现逐年下降趋势，使湘江流域水资源承载力等级有一定的改善。

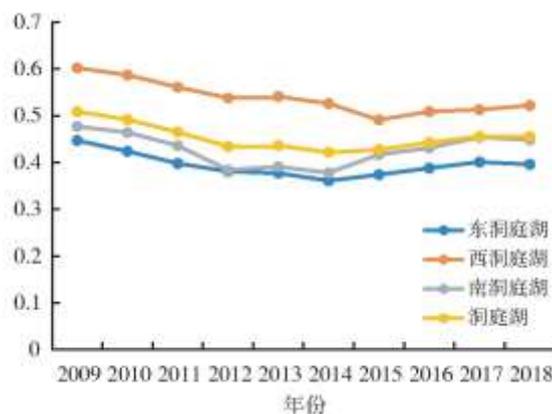


图 2 2009—2018 年洞庭湖水资源承载力状况

第二阶段为2015—2018年，洞庭湖流域水资源承载力值波动区间为0.398~0.415，呈小幅波动的状态，洞庭湖各流域的水资源承载力之间的差异逐步缩小。主要原因是洞庭湖生态经济区规划实施及长株潭两型实验区建设，政府公共政策在统筹协调经济发展与环境保护中起到关键作用，特别是洞庭湖流域有色金属开采与冶炼、石油化工、造纸、电力能源等大用水产业布局调整与优化政策，洞庭湖生态环境专项治理政策使社会经济系统与水环境系统得到优化，使洞庭湖流域的水资源承载力逐步上升，但受江湖关系影响流域水资源供给总量持续下降，对水资源承载力有一定的负向效应。

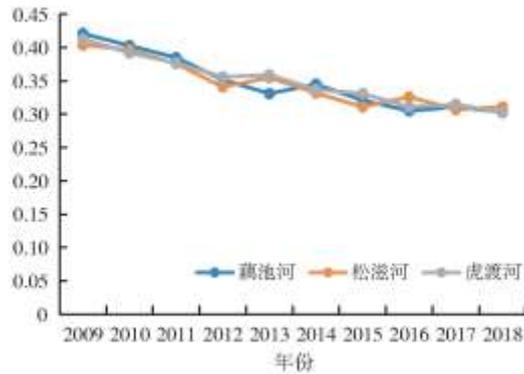


图3 2009—2018年三口流域水资源承载力状况

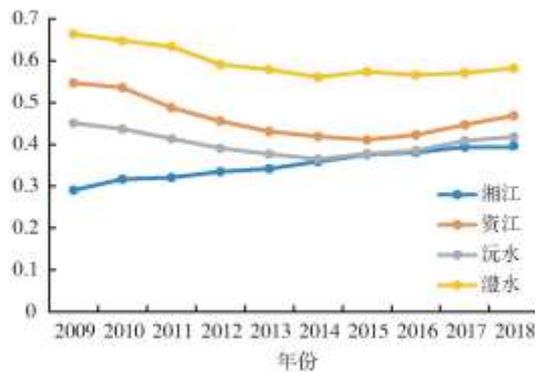


图4 2009—2018年四水流域水资源承载力状况

3.3 洞庭湖流域水资源承载力空间分布分析

从洞庭湖流域水资源承载力评价结果可以看出，2018年，藕池河、松滋河、虎渡河、湘江以及东洞庭湖区域的水资源承载力处于超载状态，其承载力值分别为0.303、0.311、0.302、0.397、0.396；资江、沅江、南洞庭湖区域处于合理状态，承载力值分别为0.469、0.418、0.448；澧水和西洞庭湖的水资源承载力为良好状态，承载力值分别为0.582和0.522，2018年洞庭湖流域水资源承载力总体排名为澧水>西洞庭湖>资江>南洞庭湖>沅水>湘江>东洞庭湖>松滋河>藕池河>虎渡河。为更直观地体现2009与2018年洞庭湖流域水资源承载力的空间差异，利用ArcGIS绘制水资源承载力等级空间分布对比图（图5）。

三口流域水资源总量指标中人均水资源、河流通畅度、产水模数、年均径流量分别为1873m³、286天/年、3348m³/km²、年均径流量57亿m³，水资源总量指标对三口流域水资源承载力产生了较大影响；水环境总量指标中总氮含量，万元农业增加值用水量为359m³/万元，农业面源污染对该流域总氮的贡献率超出70%，对水资源承载力状况造成不利影响。以长沙、株洲、湘潭、衡

阳为代表的湘江流域城市人口密度达到 655 人/km, GDP 总量达到 18842.38 亿元, 是湖南省钢铁、石化、能源、工程机械等主导产业的集中区, 工业污水排放总量较大, 使湘江流域总氮、总磷、化学需氧量等水环境指标含量超标, 对湘江流域水资源承载力状况具有明显的负向作用。随着入湖水量减少, 东洞庭湖水体自净能力下降, 污染物累积明显, 总磷全年平均值范围处于 0.063~0.127mg/L, 超出湖库Ⅲ类水质限值, 对该区域水资源承载力形成较大压力。

4 结论与政策建议

本文在构建洞庭湖流域水资源承载力综合评价指标体系基础上, 运用组合赋权 TOPSIS 模型, 分析了洞庭湖流域水资源承载力时间演变与空间分布特征, 探讨了洞庭湖流域水资源承载力的影响因素, 主要研究结论如下: (1)2009—2018 年, 洞庭湖水资源承载力由良好等级下降为合理等级, 其中藕池河、虎渡河、松滋河流域水资源承载力明显下降。(2)2018 年洞庭湖流域水资源承载力的空间分布存在明显差异, 澧水、西洞庭湖水资源承载力处于良好等级, 湘江、藕池河、虎渡河、松滋河、东洞庭湖处于超载等级, 沅水、资江与南洞庭湖水资源承载力处于合理等级, 洞庭湖流域水资源承载力空间分布依次为澧水>西洞庭湖>资江>南洞庭湖>沅水>湘江>东洞庭湖>松滋河>藕池河>虎渡河。

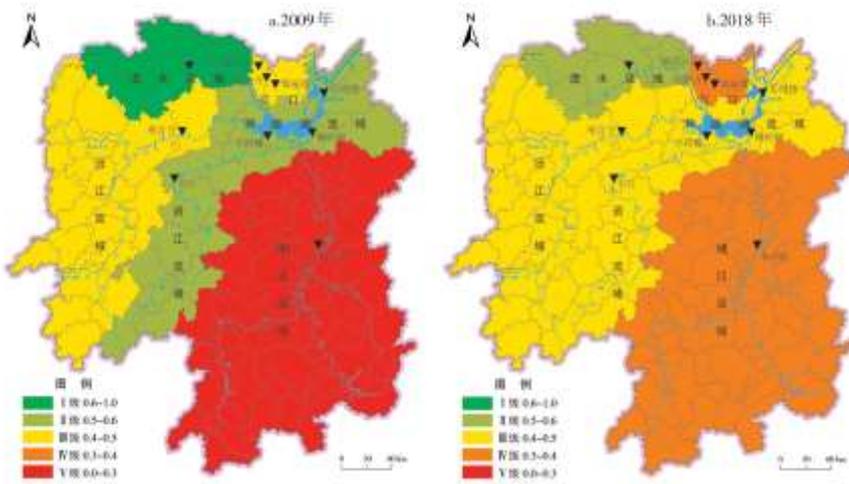


图 5 2009、2018 年洞庭湖流域水资源承载力等级分布对比图

洞庭湖流域水资源承载力研究为洞庭湖生态经济区和长江中游绿色发展示范区建设提供政策依据。本文提出如下改善和提升洞庭湖流域水资源承载力的政策建议: (1)加强三口流域水利工程建设。疏挖松滋河、虎渡河和藕池河主干河道, 增加和恢复三口流域汇入洞庭湖的水量, 减少主干河道断流时间; 实施湖区垸内沟渠清淤疏浚工程, 恢复垸内河湖沟渠连通性和输水能力, 打通毛细血管, 解决水流不动、不畅及淤积严重的问题。(2)采用“源头减少—过程控制—末端治理”的方式消减洞庭湖流域工业、农业和生活污染排放。优化湘江流域产业布局, 引导石化、工程机械、农副产品加工等产业及其配套产业向岳阳、益阳地区转移; 鼓励产业园区生态化布局和产业集聚发展, 通过园区循环式生产、产业循环式组合减少工业生产入湖污染排放; 加强洞庭湖区造纸、石化等重污染企业污水排放监管与治理, 鼓励重点企业实行清洁生产和工业用水循环利用; 突出农业面源污染治理, 减少化肥和农药使用, 大力推广高效、低毒、低残留的化学和生物农药; 加大城乡污水污染集中处理力度, 加快城镇及农村生活污水集中处理设施建设与改造, 实现城市、重点乡镇以及沿湖农村污水处理设施建设全覆盖。

参考文献:

[1]左其亨, 张修宇. 气候变化下水资源动态承载力研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4):387-395.

-
- [2]李冰,董增川,杭庆丰,等.盐城市水资源承载状态量化研究[J].水利经济,2019,37(1):65-69.
- [3]彭岳津,卞荣伟,邢玉玲,等.我国用水总量确定的方法与结果[J].水利经济,2018,36(2):36-43.
- [4]惠泱河,蒋晓辉,黄强,等.水资源承载力评价指标体系研究[J].水土保持通报,2001,1(1):30-34.
- [5]邓晓军,许有鹏,翟禄新,等.城市河流健康评价指标体系构建及其应用[J].生态学报,2014,34(4):993-1001.
- [6]夏军,左其亭.中国水资源利用与保护40年(1978-2018年)[J].城市与环境研究,2018(2):18-32.
- [7]胡文敏,欧阳绿茵,付钰珊,等.水资源、水环境、水生态承载力评价研究综述[J].产业科技创新,2020,2(26):109-111.
- [8]张爱国,李鑫,张义明,等.城市水资源承载力评价指标体系构建——以天津市为例[J/OL].安全与环境学报,https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2020.0650.
- [9]李少朋,赵衡,王富强,等.基于AHP-TOPSIS的江苏省水资源承载力评价[J/OL].水资源保护,http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20200723.1209.004.html.
- [10]朱一中,夏军,王纲胜.张掖地区水资源承载力多目标情景决策[J].地理研究,2005(5):732-740.
- [11]李玉照,刘永,颜小品.基于DPSIR模型的流域生态安全评价指标体系研究[J].北京大学学报:自然科学版,2012,48(6):971-981.
- [12]陈洋波,陈俊合,李长兴,等.基于DPSIR模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J].水利学报,2004,2(7):98-103.
- [13]余灏哲,李丽娟,李九一,等.基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J].资源科学,2020,42(2):358-371.
- [14]Cui Y, Feng P, Jin J, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method[J]. Entropy, 2018, 20(5):359-368.
- [15]曲耀光,樊胜岳.黑河流域水资源承载力分析计算与对策[J].中国沙漠,2000(1):2-9.
- [16]李高伟,韩美,刘莉,等.基于主成分分析的郑州市水资源承载力评价[J].地域研究与开发,2014,33(3):139-142.
- [17]袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等.改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J].水资源保护,2017,33(1):52-56.
- [18]Feng L H, Zhang X C. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China[C]//Mathematics and Computer in Simulation. Published by Elsevier B V, 2008:269-278.
- [19]Yang Z, Song J, Cheng D. Comprehensive evaluation and scenario simulation for the water resources carrying capacity in Xi'an city, China[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 230(5):221-233.
- [20]何刚,夏业领,秦勇,等.长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J].水土保持研究,2019,26(1):287-292,300.

-
- [21]林龙圳, 李达, 林震. 基于熵权-TOPSIS 模型的库布齐沙漠地区水资源承载力评价[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2020, 7(7):1-15.
- [22]刘媛媛, 王绍强, 王小博, 等. 基于 AHP-熵权法的孟印缅地区洪水灾害风险评估[J]. 地理研究, 2020, 39(8):1892-1906.
- [23]闫岩, 雷国平, 谢英楠. 基于 AHP 和熵权法的土地利用生态效益研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6):134-139.
- [24]左其亨, 张志卓, 吴滨滨. 基于 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.
- [25]雷勋平, 邱广华. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1):314-323.