

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.10

基于组合权重 TOPSIS 模型的新乡市水资源承载力评价

邓全成¹, 平建华^{2,3}, 梅雪梅^{2,3}, 吕鹏⁴, 苗长汀⁴

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 地热与生态地质研究中心, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 4. 新乡市水利局, 河南 新乡 453000)

摘要: 为了准确评价新乡市水资源承载力状况, 构建了由“水资源-社会-经济-生态”组成的水资源承载力评价指标体系, 采用熵值法和层次分析法相结合的组合权重赋权的 TOPSIS 模型对新乡市 2006-2018 年的水资源承载力进行综合评价, 并对评价结果进行障碍度分析。结果表明: 2006-2018 年新乡市水资源承载力在逐年提升, 中间虽有所降低, 但整体上呈现逐年增强的趋势。新乡市水资源承载力发展的主要障碍因子集中在生态和水资源维度方面, 生态环境用水率是阻碍水资源承载力提升的第一障碍因子; 产水模数是阻碍水资源承载力提升的第二障碍因子; 供水模数、引黄水量和城市污水处理率是阻碍水资源承载力提升的第三障碍因子。今后新乡市的发展需要注重生态环境的保护和引黄水量利用效率的提高, 同时要促进节水产业和第三产业的发展。

关键词: 水资源承载力; 组合权重; TOPSIS 模型; 障碍度模型; 新乡市

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)05-0081-07

Evaluation of water resources carrying capacity of Xinxiang City based on combined weight TOPSIS model

DENG Quancheng¹, PING Jianhua^{2,3}, MEI Xuemei^{2,3}, LÜ Peng⁴, MIAO Changting⁴

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Geothermal and Ecological Geology Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. Xinxiang Municipal Water Resources Bureau, Xinxiang 453000, China)

Abstract: To accurately evaluate the carrying capacity of water resources in Xinxiang City, a water resources carrying capacity assessment index system composed of “water resources – society – economy – ecology” was constructed, and TOPSIS was used to combine the entropy method and the analytic hierarchy process to assign weights. The water resources carrying capacity of Xinxiang City from 2006 to 2018 was comprehensively evaluated using this model, and then the evaluation results were analyzed by the obstacle degree model. The evaluation results showed that the water resources carrying capacity of Xinxiang City has been increasing year by year from 2006 to 2018. Although there were decreases in the span of time, the overall situation showed an improving trend; the obstacle degree results showed that the main obstacles hindering the development of Xinxiang City’s water resources carrying capacity were mainly the ecological and water resources dimensions. Eco-environmental water use rate was the principal obstacle factor hindering the improvement of water resources carrying capacity, water production modulus came the second, whereas water supply modulus, water use of the Yellow River and treatment rate of domestic sewage were the tertiary factors. In the future, more attention should be paid to the ecological environment protection and the improvement of the utilization efficiency of water use of the Yellow River for the development of Xinxiang City. At the same time, it is necessary to promote the development of water-saving industries and tertiary industries.

Key words: water resources carrying capacity; combined weight; TOPSIS model; obstacle degree mod-

收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2022-03-14

作者简介: 邓全成(1997-), 男, 青海民和人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

通讯作者: 平建华(1976-), 男, 河南新郑人, 博士, 教授, 研究方向为地下水系统与水资源系统工程。

2.2 数据来源及评价指标体系构建

本文所采用的数据资料来源于历年《新乡市水资源公报》以及新乡市统计年鉴。综合考虑研究区的实际情况以及评价指标的有效性,参照全国水资源供需分析中的指标,根据水资源承载力的定义和内涵,本研究将水资源承载力作为目标层,以水资源、社会、经济和生态作为准则层对新乡市的水资源承载力进行综合评价研究,准则层之间既独立,又相互影响,共同反映出区域水资源承载力的综合状况^[27-28]。各准则层共选取 20 个具体评价指标作为指标层反映新乡市水资源承载力的特征信息,建立的新乡市水资源承载力评价指标体系见表 1。

表 1 新乡市水资源承载力评价指标体系

| 目标层 A | 准则层 B | 指标层 C/ 单位 | 属性 |
|----------|--------------------|--|----|
| 水资源承载力 A | 水资源 B ₁ | 人均水资源量 C ₁ /m ³ | + |
| | | 产水模数 C ₂ /(m ³ ·km ⁻²) | + |
| | | 供水模数 C ₃ /(m ³ ·km ⁻²) | + |
| | | 引黄水量 C ₄ /m ³ | + |
| | | 引调水工程供水量占比 C ₅ /% | + |
| | 社会 B ₂ | 城镇化率 C ₆ /% | + |
| | | 人口密度 C ₇ /(人·km ⁻²) | - |
| | | 人口自然增长率 C ₈ /‰ | - |
| | | 城镇居民恩格尔系数 C ₉ /% | - |
| | | 人均日生活用水量 C ₁₀ /m ³ | - |
| | 经济 B ₃ | 农业灌溉耗水率 C ₁₁ /% | - |
| | | 万吨粮用水量 C ₁₂ /m ³ | - |
| | | 万元 GDP 用水量 C ₁₃ /m ³ | - |
| | | 万元工业增加值用水量 C ₁₄ /m ³ | - |
| | | 第三产业产值占比 C ₁₅ /% | + |
| | 生态 B ₄ | 生态环境用水率 C ₁₆ /% | + |
| | | 城市污水处理率 C ₁₇ /% | + |
| | | 建成区绿化覆盖面积 C ₁₈ /hm ² | + |
| | | 人均绿地面积 C ₁₉ /hm ² | + |
| | | 污水排放量 C ₂₀ /10 ⁴ t | - |

对表 1 中各评价指标的选取及意义说明如下。

水资源子系统:水资源子系统是水资源承载力综合评价的载体,选取指标时考虑水资源的自然禀赋条件的同时也要考虑研究区水资源开发利用的实际情况。人均水资源量和产水模数可以体现区域自然地理条件与水资源的协调程度;供水模数指标反映了区域的供水状况;引黄水量和引调水工程供水

量占比等指标能够反映出区域内的供水结构及水资源的开发利用情况。

社会子系统:城镇化率则体现了社会发展水平与城乡结构;人口密度反映了人口分布的疏密程度;人口自然增长率反映的是区域内人口自然增长的趋势和速度;人均日生活用水量则表征出社会-人口系统对水资源的需求数量;城镇居民恩格尔系数能反映出城镇居民的消费水平。

经济子系统:指标选取要综合考虑发展规模和用水效率等。万元 GDP 用水量和万吨粮用水量等指标可以体现出水资源的经济效益;第三产业产值占比可以体现出区域经济结构的优化程度;农业灌溉耗水率和万元工业增加值用水量可以体现各产业的用水效率及各产业对水资源的依赖程度。

生态子系统:良好的生态系统可以促进水资源与经济社会的健康发展,而生态环境的恶化会使它们发展失衡。生态环境用水率可以体现该地区生态环境对水资源的依赖度;污水排放量反映了水体和环境的受污染情况;城市污水处理率在一定程度上可以反映出地区处理生态环境污染问题的能力;而人均绿地面积和建成区绿化覆盖面积反映了地区的生态环境保护能力。

2.3 研究方法

(1)TOPSIS 法。TOPSIS 法是通过计算评价方案与正理想解和负理想解的加权欧氏距离来得到评价方案与最佳方案的接近程度,然后对众多评价对象整体排序进而确定相对优劣的评价方法。TOPSIS 法在水资源承载力评价中的应用主要分为两种:一是直接用 TOPSIS 法进行水资源承载力评价^[17];二是先用指标赋权法(如熵权法^[27]、组合权重法^[20]等)进行赋权,而后再用加权的 TOPSIS 法进行水资源承载力评价。

(2)权重方法。主观赋权法的随机性和权重偏差较大,而客观赋权法的客观性强,容易忽视决策者对指标的重视程度。为了弥补主、客观赋权法的缺点及不足,不少专家学者提出了组合权重方法进行指标权重计算。例如,将熵权法和改进的 AHP(analytic hierarchy process)法结合^[29]、改进的 AHP 法与变异系数法组合^[30]、改进的熵权法与变异系数法组合^[31]等。本文应用 AHP 法计算指标主观权重,用熵权法计算指标客观权重,然后用加法合成法和乘法合成法分别合成组合权重,最后再对两个组合权重进行均值化,得到最终的组合权重。

3 结果与分析

3.1 水资源承载力变化趋势及原因

3.1.1 评价指标权重及水资源承载力得分值计算

参考前人主观赋权时的成果和经验^[12,15,20,32]和地区水资源管理部门在水资源管理与规划中对不同指标的重视程度,用层次分析法对各指标主观赋权,并进行一致性检验,用熵值法对指标客观赋权,并将两者进行组合得到指标权重,一致性检验结果及各指标权重分别见表2和3。本文采用组合权重值和评价指标来共同构造标准化决策矩阵,计算出2006-2018年新乡市水资源承载力各准则层及综合得分

值,如表4所示。

表2 指标主观赋权一致性检验结果

| 项目 | 矩阵维数 n | 特征向量 λ_{\max} | 平均随机一致性指标 RI | 一致性指标 CI | 一致性比率 CR |
|-----|-------------|--------------------------|-------------------|---------------|---------------|
| 目标层 | 4 | 4.11 | 0.89 | 0.04 | 0.04 |
| 水资源 | 5 | 5.24 | 1.12 | 0.06 | 0.05 |
| 社会 | 5 | 5.22 | 1.12 | 0.05 | 0.05 |
| 经济 | 5 | 5.21 | 1.12 | 0.05 | 0.05 |
| 生态 | 5 | 5.20 | 1.12 | 0.05 | 0.04 |

注: $CR = CI/RI$, 当 $CR < 0.1$ 时满足一致性要求。

表3 水资源承载力各评价指标权重计算结果

| 目标层 A | 准则层 B | B 对 A 的权重 | 指标层 C | C 对 B 的权重 | C 对 A 的权重 |
|----------|--------------------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|
| 水资源承载力 A | 水资源 B ₁ | 0.34 | 人均水资源量 C ₁ | 0.14 | 0.05 |
| | | | 产水模数 C ₂ | 0.34 | 0.11 |
| | | | 供水模数 C ₃ | 0.23 | 0.08 |
| | | | 引黄水量 C ₄ | 0.20 | 0.07 |
| | | | 引调水工程供水量占比 C ₅ | 0.09 | 0.03 |
| | 社会 B ₂ | 0.11 | 城镇化率 C ₆ | 0.31 | 0.03 |
| | | | 人口密度 C ₇ | 0.14 | 0.02 |
| | | | 人口自然增长率 C ₈ | 0.16 | 0.01 |
| | | | 城镇居民恩格尔系数 C ₉ | 0.14 | 0.02 |
| | | | 人均日生活用水量 C ₁₀ | 0.25 | 0.02 |
| | 经济 B ₃ | 0.12 | 农业灌溉耗水率 C ₁₁ | 0.09 | 0.01 |
| | | | 万吨粮用水量 C ₁₂ | 0.10 | 0.01 |
| | | | 万元 GDP 用水量 C ₁₃ | 0.38 | 0.04 |
| | | | 万元工业增加值用水量 C ₁₄ | 0.17 | 0.02 |
| | | | 第三产业产值占比 C ₁₅ | 0.26 | 0.04 |
| | 生态 B ₄ | 0.43 | 生态环境用水率 C ₁₆ | 0.33 | 0.25 |
| | | | 城市污水处理率 C ₁₇ | 0.30 | 0.07 |
| | | | 建成区绿化覆盖面积 C ₁₈ | 0.10 | 0.04 |
| | | | 人均绿地面积 C ₁₉ | 0.09 | 0.03 |
| | | | 污水排放量 C ₂₀ | 0.18 | 0.05 |

3.1.2 水资源承载力综合评价价值变化趋势 根据表4绘制2006-2018年新乡市水资源承载力综合评价价值变化曲线,如图2所示。综合表4、图2以及相关参数的计算结果,对新乡市水资源承载力综合评价价值的变化趋势分析如下。

(1)2006-2018年新乡市水资源承载力综合评价价值整体呈波动上升的态势,综合评价价值从2006年

的0.1695提升到了2018年的0.7465,仅在2012和2017年有小幅度的下降。其中2017年为枯水年,新乡市的人均水资源量和产水模数为研究期间最低值,分别为182.38 m³和12.67 × 10⁴ m³/km²,但农业灌溉耗水率达到了95.85%,为研究期间的最大值,第三产业产值占比也小于2016和2018年,导致该年份水资源承载力综合评价价值有所降低。

(2)2006 - 2010 年为“十一五”规划期,工业化和城镇化发展迅速,社会经济规模不断扩大,水资源短缺以及用水水平对经济社会发展的限制作用逐渐凸显,该阶段新乡市的水资源承载力综合评价价值相对较低;2011 - 2015 年为“十二五”规划期,我国经济高速发展,城镇化进程继续加快,水资源用水水平和生态环境状况制约了经济社会的发展,使得这一期间新乡市水资源承载力综合评价价值提升速度较为缓慢;2016 - 2018 年在“十三五”规划期间,我国提出经济新常态发展思路和经济高质量发展理念,水资源用水水平不断提高,生态环境保护也得到了改善,新乡市水资源承载力综合评价价值总体提升速度明显加快,只是由于前述原因,2017 年评价价值略有降低。

表 4 2006 - 2018 年新乡市水资源承载力各准则层及综合评价值

| 年份 | 综合 | 水资源 | 社会 | 经济 | 生态 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2006 | 0.1695 | 0.3038 | 0.4279 | 0.2410 | 0.1126 |
| 2007 | 0.1779 | 0.2302 | 0.5360 | 0.3757 | 0.1428 |
| 2008 | 0.1837 | 0.2914 | 0.5021 | 0.3757 | 0.1666 |
| 2009 | 0.2109 | 0.3289 | 0.5146 | 0.4243 | 0.1967 |
| 2010 | 0.2185 | 0.4012 | 0.4149 | 0.4266 | 0.2078 |
| 2011 | 0.2297 | 0.4213 | 0.5061 | 0.4394 | 0.2091 |
| 2012 | 0.2171 | 0.3341 | 0.5800 | 0.4798 | 0.2111 |
| 2013 | 0.2285 | 0.2949 | 0.6352 | 0.5266 | 0.2312 |
| 2014 | 0.2385 | 0.3261 | 0.5919 | 0.6059 | 0.2170 |
| 2015 | 0.2538 | 0.3143 | 0.5530 | 0.7675 | 0.2415 |
| 2016 | 0.4355 | 0.6566 | 0.4541 | 0.9307 | 0.3686 |
| 2017 | 0.4319 | 0.4655 | 0.5063 | 0.7953 | 0.4251 |
| 2018 | 0.7465 | 0.4332 | 0.5514 | 0.9404 | 0.9064 |

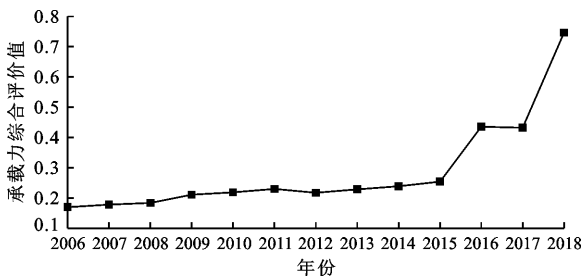


图 2 2006 - 2018 年新乡市水资源承载力综合评价价值变化曲线

3.1.3 各子系统水资源承载力评价价值变化趋势 图 3 为 2006 - 2018 年新乡市各子系统水资源承载力评价价值变化曲线。结合相关参数的计算结果对图 3 分析如下。

(1)2006 - 2018 年新乡市水资源子系统承载力的评价价值波动较大,基本呈“W”型变化趋势。其中 2006 - 2007、2011 - 2013、2014 - 2015 和 2016 - 2018 年评价价值下降,2007 年降低至 0.189 2,为研究期间的最低值;2007 - 2011、2013 - 2014 和 2015 - 2016 年

评价价值提升,2016 年增长至 0.656 6,为研究期间最高值。导致 2007 年水资源承载力下降的主要原因是该年份供水模数减小至 $19.62 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,为研究期间最低值;2013 年水资源承载力下降的主要原因是人均水资源量和产水模数较低,产水模数为研究期间最低值 $11.91 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$;2017 和 2018 年水资源承载力下降的主要原因是虽然这两年的供水模数有所增加,但人均水资源量和产水模数较低,2017 年人均水资源量和产水模数为研究期间最低值,分别为 182.38 m^3 和 $12.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。评价指标的变化导致了水资源子系统承载力评价价值出现波动。

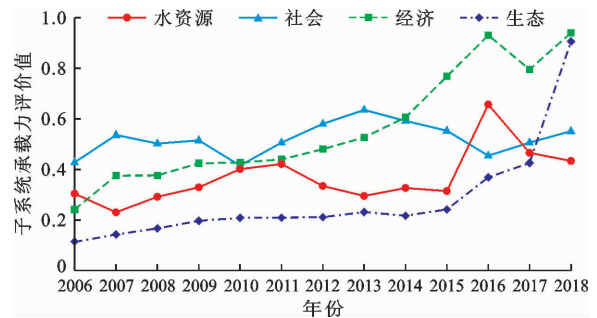


图 3 2006 - 2018 年新乡市各子系统水资源承载力评价价值变化曲线

(2)2006 - 2018 年新乡市社会子系统承载力的评价价值趋于稳定,基本保持在 0.4 ~ 0.6 之间。这主要是因为城镇化虽带动了社会整体发展,提高了生活水平,但同样也带来了人口压力和用水压力。城镇化率从 2006 年的 36.3% 增长到 54.3%;人口密度在 2018 年时增加到了 $697 \text{ 人}/\text{km}^2$,比 2006 年的 $645 \text{ 人}/\text{km}^2$ 增加了 8.1%;2018 年人均日生活用水量为 184.3 m^3 ,比 2006 年的 110.0 m^3 增加了 67.5%。因此,导致社会子系统承载力的评价价值稳定在一定的范围里。

(3)研究期间,新乡市经济子系统承载力评价价值呈增大趋势,2006 年其值最低,为 0.241 0;2018 年达到最高值,为 0.940 4。这是由于万元 GDP 用水量等用水效率指标得到明显提高,同时,产业结构的调整与优化使第三产业产值占比由 2006 年的 36% 增加到了 2018 年的 51%,农田灌溉亩均用水量在 2018 年减少至 244.05 m^3 ,比 2006 年的 283.65 m^3 减少了 14.0%。因此,经济子系统承载力提升程度大。

(4)2006 - 2018 年新乡市生态子系统的承载力呈上升趋势。2006 年其值最低,为 0.112 6;2018 年达到最高值,为 0.906 4。这主要是由于近年来人们的环保意识不断加强,生态环境用水量明显增加,生态环境用水率从 2006 年的 0 增加到了 2018 年的

6.81% ;2018年建成区绿化覆盖面积增加到了5 005 hm^2 ,比2006年的3 535 hm^2 增加了41.6%,绿地涵养能力明显提高。同时,城市污水处理能力也得到提升,2018年的污水处理率相比于2006年提升了32.09%,水生态治理方面的投资逐渐增加,生态承载力得到提升。但是,由于新乡市生态系统的脆弱性,生态保护工作仍须高度重视,持之以恒。

3.2 水资源承载力障碍度分析

为了辨识出新乡市水资源承载力的主要影响因素,引入了障碍度诊断模型,因子的障碍度值越大,说明该因子对水资源承载力的阻碍作用越强。通过计算出障碍度较高的12个评价指标作为障碍因子进行识别分析,2006-2018年新乡市水资源承载力主要障碍因子障碍度变化曲线见图4。在图4所示的12个障碍因子中,人均水资源量、产水模数、供水模数、引黄水量、引调水工程供水量占比等指标属于水资源维度;生态环境用水率、城市污水处理率、建成区绿化覆盖面积和污水排放量等指标属于生态环境维度;万元GDP用水量、第三产业产值占比和城镇化率等指标属于社会、经济维度。由图4可知,阻碍新乡市水资源承载力发展的主要因子集中在水资源和生态环境维度,其中,生态环境用水率为阻碍水资源承载力提升的第一障碍因子;产水模数为第二障碍因子;供水模数、引黄水量和城市污水处理率为第三障碍因子。

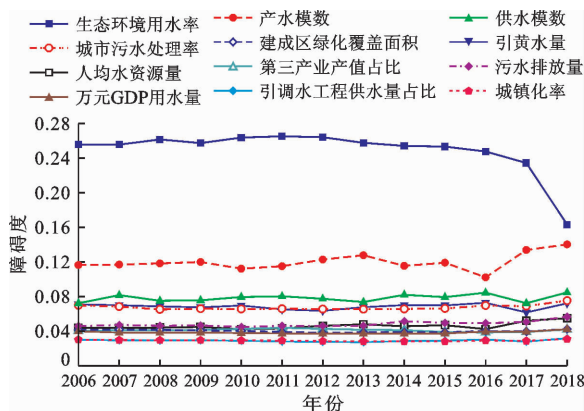


图4 2006-2018年新乡市水资源承载力主要障碍因子障碍度变化曲线

在水资源维度方面,新乡市需要积极进行引黄调蓄工程的续建及改造工作,提高引黄水量的利用率,以增加新乡市的可利用水量,减少地下水用量,缓解地下水超采压力。同时,需要进行节水型城市建设,提高水资源的利用率;在生态环境维度方面,应控制生态环境用水量,提高城市污水处理能力,提高中水回用率;在社会、经济维度方面,应积极调整优化产业

结构,提高用水效率。

4 讨论

(1) 指标选取方面:林龙圳等^[27]选择了水土保持综合治理面积、人工造林面积等能反映沙漠地区特征的指标;田相俊等^[33]选择了矿区氟化物超标、矿区地下水水位变化等能反映矿区特征的指标。本文选取了引黄水量、引调水工程供水量占比、农业灌溉耗水率和人均绿地面积等指标,这些指标能反映出研究区引黄灌区和农业发展城市等特征。一是因为新乡市临近黄河,区内引黄灌区较多,是农业发展大市。同时,引黄供水量的占比也在38%~51%,引黄水量的利用直接影响新乡市的供水能力以及农业的发展。同时,引黄水利用率的提升和农业灌溉耗水率的降低,可以用引黄水量置换当地超采的地下水,缓解当地的水资源压力;二是因为新乡市作为农业大市,耕地面积约占总面积的40%,绿化覆盖面积和绿地面积较少,增加绿化面积能减弱生态脆弱性。所以,水资源承载力评价时选取的指标符合新乡市当前水资源开发利用的现状以及社会经济的要求。

(2) 指标权重方面:李少朋等^[19]认为影响水资源承载力的影响因素集中在水资源和生态环境子系统;左其亭等^[20]认为产水模数是影响黄河流域水资源承载力发展的首要障碍因子。本文中生态环境用水率和产水模数的指标权重分别为0.25和0.11,相比其他指标的权重值偏大。通过指标回溯可知,最近几年新乡市进行水生态文明城市建设试点工程,生态环境用水量逐年增加,生态环境用水率从2006年的0增加到了2018年的6.81%;新乡市属于资源型缺水,社会经济发展对水资源的依赖性仍然很强,水资源承载力在丰、枯水年的变化波动依然很大。在面临极端缺水的情况时,应急水源的保障能力仍需提高,供水结构还需要优化调整。同时,引黄水量的分控管理措施不够,引黄水量占总供水的比例虽大,但对于新乡市的水资源承载力的提升没有发挥到应有的作用,引黄水量指标权重对于水资源承载力提升的贡献率相对较小。

5 结论

(1) 采用组合权重的TOPSIS模型对新乡市水资源承载力进行综合评价的结果表明,新乡市水资源承载力评价价值从2006年的0.1695提升至2018年的0.7465,水资源承载力整体上逐渐增强。

(2) 障碍度模型分析结果显示,阻碍新乡市水资

源承载力发展的障碍因子主要集中在水资源和生态环境系统。生态环境用水率为阻碍水资源承载力提升的第一障碍因子;产水模数为第二障碍因子;供水模数、引黄水量和城市污水处理率为第三障碍因子。

(3)新乡市要加强水资源管理,优化各产业用水结构,大力推进全社会节水,精准施策,精细化用水过程,提升引黄水的利用率,继续推进建设引黄设施的安全保障体系,科学开展生态保护与修复工程,合理进行生态补水,逐步消除环境风险,以进一步提升地区的水资源承载能力。

参考文献:

- [1] 童纪新,顾希.基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(1):122-125.
- [2] 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.
- [3] 左其亭.水资源承载力研究方法总结与再思考[J].水利水电科技进展,2017,37(3):1-6+54.
- [4] 高亚,章恒全.基于系统动力学的江苏省水资源承载力的仿真与控制[J].水资源与水工程学报,2016,27(4):103-109.
- [5] 左其亭,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.
- [6] 张建威,黄茂兴.黄河流域经济高质量发展与生态环境耦合协调发展研究[J].统计与决策,2021,37(16):142-145.
- [7] 于钊,尚熲廷,姚梅,等.水足迹与主成分分析法耦合的新疆水资源承载能力评价[J].水文,2021,41(1):49-54+34.
- [8] 范嘉炜,黄锦林,袁明道,等.基于子系统熵权模型的珠三角水资源承载力评价[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):100-105.
- [9] 王建华,姜大川,肖伟华,等.水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J].水利学报,2017,48(12):1399-1409.
- [10] 左其亭,张培娟,马军霞.水资源承载能力计算模型及关键问题[J].水利水电技术,2004,35(2):5-8+11+94.
- [11] 惠泱河,蒋晓辉,黄强,等.二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J].地理研究,2001,20(2):191-198.
- [12] 王正选,邱金亮,王静,等.基于改进模糊集对评价法的水资源承载力评价——以龙川江流域为例[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):70-75.
- [13] 屈小娥.陕西省水资源承载力综合评价研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):91-97.
- [14] 栾芳芳,夏建新.区域水资源承载力理论与方法对比[J].水资源与水工程学报,2013,24(3):116-120.
- [15] 赵丹,刘东,武秋晨.基于DPSIR-TOPSIS模型的区域农业水资源系统恢复力评价[J].中国农村水利水电,2014(7):52-56.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 傅春,李雅蓉.江西省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J].人民长江,2019,50(8):109-114.
- [19] 李少朋,赵衡,王富强,等.基于AHP-TOPSIS模型的江苏省水资源承载力评价[J].水资源保护,2021,37(3):20-25.
- [20] 左其亭,张志卓,吴滨滨.基于组合权重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.
- [21] 叶飞,方国华,金菊良.基于灰色聚类集对分析法的水资源承载力评价模型[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):30-36.
- [22] SUN Xiubo, GUO Changhai, CUI Jian. Research on evaluation method of water resources carrying capacity based on improved TOPSIS model[J]. La Houille Blanche, 2020, 106(5): 68-74.
- [23] 熊雪珍,何新玥,陈星,等.基于改进TOPSIS法的水资源配置方案评价[J].水资源保护,2016,32(2):14-20.
- [24] 余灏哲,李丽娟,李九一.京津冀水资源承载力风险评估模型构建研究[J].地理研究,2021,40(9):2623-2637.
- [25] YANG Tao, ZHANG Qian, WAN Xuhao, et al. Comprehensive ecological risk assessment for semi-arid basin based on conceptual model of risk response and improved TOPSIS model—A case study of Wei River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 719: 137502.
- [26] 宰松梅,温季,仵峰,等.河南省新乡市水资源承载力评价研究[J].水利学报,2011,42(7):783-788.
- [27] 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),2020,54(4):640-648.
- [28] 康健,王建华,王素芬.海河流域农业水资源承载力评价研究[J].水利水电技术,2020,51(4):47-56.
- [29] 孙雅茹,董增川,刘森.基于改进TOPSIS法的盐城市水资源承载力评价及障碍因子诊断[J].中国农村水利水电,2018(12):101-105.
- [30] 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.
- [31] 刘晓君,付汉良.基于变权信息熵改进TOPSIS法的水资源承载力评价——以陕西省地级城市为例[J].水土保持通报,2015,35(6):187-191.
- [32] 刘志明,周召红,王永强,等.区域水资源承载力及可持续发展综合评价研究[J].人民长江,2019,50(3):145-150.
- [33] 田相俊,李翠平,曹志国,等.基于TOPSIS法的西部矿区水资源承载力综合评价[J].矿业研究与开发,2020,40(9):170-175.