DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220921001 文章编号:1672-9331(2023)02-0092-12
引用格式:傅泽鼎,胡旭跃,黄草,等.基于SPR模型湖南省水资源承载力评估研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(2):92-103.
Citation: FU Zeding, HU Xuyue, HUANG Cao, et al.Evaluation and comparison of water resources carrying capacity in Hunan Province based on SPR model[J].J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci),2023,20(2):92-103.

基于SPR模型湖南省水资源承载力评估研究

傅泽鼎[1],胡旭跃[1],黄草[1],陈帮[1],李美芳[2,3],游宇驰[1]

(1.长沙理工大学 水利与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.中南林业科技大学 生态环境管理与评估中心,湖南 长沙 410004;3.中南林业科技大学 环境科学与工程学院,湖南 长沙 410004)

摘 要:【目的】水资源承载力是区域可持续发展的基础,也是核心竞争力的重要指标,对其进行量化评估与比较是厘清区域发展能力的关键环节。**【方法】**该文基于湖南省水资源承载力评估目标,选取状态、压力、响应共3个因子层、12项关键指标,以湖南省各市州为单元,采用熵权法,构建湖南省水资源承载力评估指标体系。该文采用湖南省2012—2021年的统计数据均值为原始值,对湖南省14个市州的水资源承载力进行综合评价和比较,为制定湖南省水资源相关政策和合理调度水资源提供数据支持。**【结果】**湖南省水资源整体上并不匮乏。在评价因子层中,压力的权重最低,约占20%,状态和响应各占约40%;郴州和怀化市在水资源调蓄和涵养能力上具备的优势最大,长株潭地区用水压力最大,但其具备产业结构和水资源开发利用率方面的优势。**【结论】**湖南省整体上水资源的使用压力和状态尚在可承受范围内。总体而言,该省的水资源承载力最高和最低的地区均主要由其自然条件主导,而水资源承载力居中的地区主要由其产业结构和水资源开发利用率主导。提升水资源开发利用率、兴修水利工程对水资源进行合理配置能有效提高湖南省水资源承载力。

关键词:水资源承载力;SPR模型;权重;湖南省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A

0 引言

水资源是人类赖以生存和发展的重要基础资源。人口增长和经济社会繁荣发展对水资源开发利用提出了更高的要求。自从2017年中国开展第三轮全国水资源评估以来,水资源环境、水资源承载力与水安全等问题上升为中国的国家战略,各级政府必须统筹做好水资源、水环境、水生态的综合治理与评估工作。同中国大部分地区一样,湖南省水资源短缺的矛盾也日益尖锐,发生在2022年的大规模旱灾更凸显了水资源的结构性矛盾。因此,对湖南省水资源承载力进行研究具有十分重大的现实意义。

水资源承载力是指在特定发展时期水资源对区域各产业的最大支撑能力[1]。探究水资源承载力及其合理开发策略,一直是水资源研究与关注的焦点[2-3],其目标是在实现经济社会可持续发展的同时,确保水资源系统处于健康状态。

层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)、多目标决策法、模糊综合评判法、主成分分析法、系统动力学方法是常用的水资源承载力评价方法。张自英等[4]采用AHP,构建了台州市水资源安全评价体系,运用"压力-状态-响应"(pressure-state-response,PSR)模型对台州市的水资源安全进行评价,通过分析因子层的变化得出了该地的水资源合理利用的优化方案及政策建议。袁汝华等[5]采用结合2个模型和熵权法的综合模型对位

收稿日期:2022-09-21;**修回日期:** 2023-01-03; **接受日期:** 2023-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52179004);湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2191);湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-40)

通信作者:胡旭跃(1961—)(ORCID:0000-0003-0492-3593),男,教授,主要从事水利工程与环境工程方面的研究。E-mail:huxuyue62@163.com

于长三角地区的25座城市的水资源承载力进行综合评价，这2个模型分别是驱动力-压力-状态-影响-响应（driving-pressure-state-impact-response，DPSIR）模型及结合了毕达哥拉斯模糊集理论、逼近理想解的排序模型（technique for order preference by similarity to an ideal solution，TOPSIS）。由于该综合模型采用了较多的评价单元，充分地发挥了DPSIR、TOPSIS和熵权法的优势，得到了很多有价值的改进该地区水资源开发措施的建议。赵军凯等[6]利用灰色系统理论和熵权法构建了开封市的水资源承载力评价模型，得到了相对客观的模糊评价结论。干旱地区的水资源供需均十分明确，故在这些地区采用主成分分析法的效果最好，可信度最高。程国栋[7]基于主成分分析法对中国西北地区的水资源承载力进行了评价。王丽等[8]利用主成分分析法降低所选评价指标的维数，并评价临海市水资源承载力水平，在指标选取和权重确定方面进行了很多创新。余灏哲等[9]构建基于量-质-域-流内涵的水资源承载力综合评价指标体系，利用AHP、熵权法组合赋权，并借助TOPSIS模型进行分析，针对北京、天津及河北三地不同区域的特点对其水资源承载力进行了评估。神经网络模型的预测精确度高，且其与水资源承载力评价的多输入模式相契合。薛晴等[10]采用耦合神经网络的系统动力学方法预测了江苏省的水资源承载力。刘雁慧等[11]采用基于熵权法的综合评价方法探讨了2000—2015年的中国水资源承载力，采用Mann-Kendall趋势法分析其时空变化特征，采用时序分析法预测其未来发展趋势。从这些研究中不难发现，根据研究区域特点，合理选择预测方法是提高预测精确度的关键，王美慧等[12]利用AHP获取指标主观权重，利用熵权法获取指标客观权重，并将这二者与属性权重结合得到最终的组合权重，采用灰色聚类分析法对江苏省水资源承载力进行了评价。在复杂的计算过程中，中心点三角白化权函数的使用极大地减少了计算量。

近些年，也有很多学者对湖南省资源环境承载力进行了研究。邓正华等[13]采用AHP和熵权法组合赋权的TOPSIS模型，按流域分析了湖南省各地的水资源承载力。主客观组合赋权和TOPSIS是被广泛采用的水资源承载力评价方法，但是其评价以流域为单元，这使得在最终评价成果中缺失了对社会经济层面的分析。CAO等[14]对湖南省各市州的生态环境承载力进行评估与比较，其指标选取范围广泛，代表性强。傅晓华等[15]对湖南省“两山论”实践效果进行量化评估与比较，使抽象的政策实践效果得以量化。傅晓华等[16]还对洞庭湖区域水环境绩效进行了量化评估与预测，选取的指标具有地区针对性和代表性，得出了符合实际情况的结论。邹君等[17]对湖南省水资源的脆弱性进行评估，分析了生态环境治理评价中水资源的重要性。付宏渊等[18]运用多变量时间序列模型，建立了洞庭湖区域地下水资源的预测模型，从时间序列的角度分析了该地区地下水资源的变化趋势及其原因。

这些研究主要依赖于某一具体的评价模型，在指标的选择上倾向于全面性，尽可能多地采纳了与资源环境相关的指标因子，这导致评价指标特征不明显，针对性不足，不同资源类的最终评价结果趋同。本研究基于湖南省水资源的状态、压力和响应这3个关键性水资源特征因子采集关键指标，对湖南省水资源承载力进行评估与比较。同时，将传统的PSR模型改进为“状态-压力-响应”模型（state-pressure-response，SPR）模型，SPR模型更符合水资源从生成到使用，再到保护的现实逻辑顺序。基于该模型筛选的关键指标具有明确的“亲水性”，更适合水资源承载力评估，得到的结论更针对具体区域的水资源供求关系和发展效率，可为湖南省水资源相关政策的制定与合理调度提供更可靠的数据支持。

1　区域概况

1.1　区域地理

湖南省地处中国中部的长江中游地区，位于东经108°47′～114°15′，北纬30°08′～24°38′，辖14个市州，如图1所示。

1.2　水文气候特征

湖南省处于典型大陆亚热带季风性湿润气候区，多年平均降水量为1 200～1 700 mm，雨量充沛，地表水资源量为1 500～2 200亿 m^3。湖南省河网密布，长度超过5 km的河流有5 341条，河流总长度超过9万km。受大气环流和地形等多因素影响，湖南省水资源在空间上具有分布不均的特征。在人口密度高、工农业发达的长株潭和中

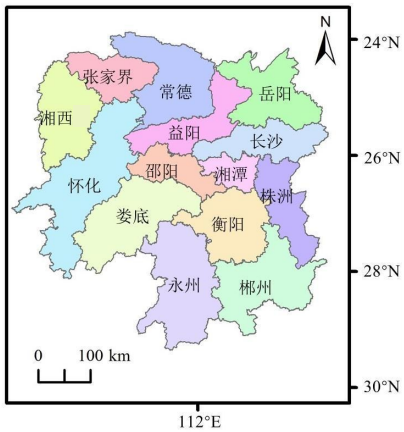


图1 研究区域图

Fig. 1 Location map of study area

部丘陵地区,水资源相对匮乏;在人口密度相对小的东部、南部和西部山区,水资源相对丰富。近年来,湖南省季节性缺水也日趋严重,加之水污染状况尚未得到有效控制和水利设施相对薄弱等因素,湖南省水资源矛盾日益突出,这制约了社会经济发展和人民生活质量提升。

1.3 经济社会状况

湖南省位于长江中游经济带,下辖13个地级市和1个自治州,总面积为21.18万km^2。根据2021年的《中国统计年鉴》,该省总人口为6 645万人,其中,城镇人口3 904.6万人,占总人口的58.76%,略低于63.89%的全国平均水平。地区生产总值为41 781.49亿元,人均GDP为62 900元,低于80 976元的全国平均水平。在产业结构上,湖南省第一、二、三产业生产总值的占比分别为10.1%、38.2%、51.7%,与2020年相比,三次产业的生产总值分别上涨了3.7%、4.7%、2.9%,其中,第二产业的生产总值增幅最大。

1.4 水资源现状

湖南全省97.6%的面积属长江流域,2.4%的面积属珠江流域。湘江、资江、沅江和澧水四水以及汨罗江、新墙河等从东、南、西三个方向汇入洞庭湖,经城陵矶注入长江。

在水资源总量上,中国的多年平均降水量为625 mm,而根据2012—2021年《湖南省水资源公报》,湖南省多年平均降水量为1 454 mm,降水较为丰富,折合年平均水量为3 079亿m^3。地表平均水资源总量为1 688亿m^3,折合年径流深为797 mm,全省平均水资源总量为1 694亿m^3。在出入境水量上,湖南省的多年平均入境水量为1 257亿m^3,其中长江四口的年平均入境水量为807亿m^3,三峡水库蓄水后的年平均入境水量为498亿m^3,年平均出境水量为2 829亿m^3。湖南省降水在时空分布上的差异性较大,空间上主要有3个高值区和2个低值区,3个高值区分别为南岭-罗霄山脉、雪峰山脉和八大公山地区,2个低值区为洞庭湖区和衡邵干旱走廊。湖南省汛期多年平均降水量占全省多年平均降水量的68.9%,连续4个月最大降水量的发生时间大多集中在5—8月,这4个月的降水量占全年总降水量的53.6%。

总之,湖南省有"一湖四水",雨水充沛,丰富的水资源一直为该省的区域经济社会发展提供了可靠的基础保障。但随着人口压力增加和城镇化水平提高,水资源消耗也逐年增加,湖南省水资源在空间上分布不均,旱涝灾害频繁交替出现,降水量差异明显[19-20],这些都导致湖南省水生态和水环境污染问题越来越严重。

2 建模和关键指标筛选与计算

2.1 模型构建

在各种资源的综合承载力评估中,DPSIR是使用较普遍的模型。在该模型中,除响应效应外,其他层次均以单向逻辑关系为主。DPSIR模型适用于多因子评估,较少用于区域评估与对比。"多区域+多因子"的区域评估需要的指标较多,且指标间有关联。水资源承载力评估也是如此。若采用DPSIR模型对其进行评估会使评价结论不够清晰。故部分学者采用PSR模型来评估水资源承载力。该模型的3个层次间有较强的因果逻辑关系,其对单个因子的评估也更客观,因而更易被评估者和评估对象所接受。

就逻辑关系而言,驱动力因子需先作用于压力因子,然后才能作用于状态因子。故与DPSIR模型相比,PSR的逻辑关系发生了变化。该变化对于环境、气候等宽幅变化或关系链条繁杂的评估不会有太大影响。因为繁杂关系本身就可能蕴含了因果关系。但在耕地、森林等具体资源的评估中,单链条的因果关系更突出,关键指标也更易被识别,因而PSR模型更为合适。在水资源承载力评估中,由于水资源状态在支撑区域内是承载力基础,应把水资源状态作为承载力评估的逻辑起点。水资源使用造成的压力,即水资源能否维持"三生"(生产、生活、生态)的需求,体现为水资

源承载力在现实状态中的好坏。针对此状态的具体情况，要制定相关措施，即维持水资源状态不受胁迫的调控措施，即为响应。因此，三个层次的顺序应该是状态、压力、响应。好的响应促成好的状态，好的状态可承担更大的压力，形成正反馈；反之，则为恶性循环的负反馈。因此，本文调换PSR模型的因子层顺序，将其转换为SPR模型，如图2所示。SPR模型更适合湖南省水资源承载力评估的理论逻辑和实际情况，其内在逻辑更能体现水资源经济属性依赖于生态属性这一特征，也更符合“绿水青山就是金山银山”的环保内涵。

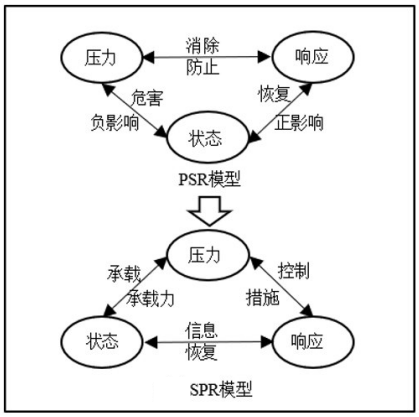


图2　PSR与SPR模型示意图

Fig. 2　A schematic diagram of PSR and SPR model

2.2　关键指标筛选

水资源承载力评价关键指标的筛选需根据SPR模型的理论框架进行，必须能反映水资源、生态环境、经济社会系统的主要特征及内在联系。关键指标体系必须满足系统性、代表性、区域性等原则。评价指标过多会干扰关键指标的权重；指标过少则会降低评价的真实性，导致结论缺乏准确性。本文先借其他研究者的成果统计常用指标的频率[9-12]，再在湖南省相关研究成果的基础上进一步筛选[13-16]，得到12个关键指标，见表1。

本文以湖南省的14个地级行政区划作为评价单元，以水资源状态表征水资源涵养与调蓄能力；水资源压力主要体现在用水量与用水结构方面；水资源响应则包括水资源开发利用率等对改善其状态与减轻压力有关联的方面。

2.3　数据处理与计算

2.3.1　数据来源

本文数据来源于2012—2021年的《湖南省水资源公报》《湖南省统计年鉴》、各市州的统计年鉴和水资源公报，个别缺失的数据采用均值法补齐。某些特定年份的统计数据可能因偶然因素发生异常波动，如仅采用某一年的数据进行评价和分析，可能会造成结果失真，缺乏说服力和参考价值。为避免这种状况的发生，采用2012—2021年连续10年数据的平均值作为原始样本数据。

表1　水资源承载力关键指标体系

Table 1　Key index system of water resources carrying capacity

因子层	指标层	单位	指标释义
水资源状态（S）	水资源总量（S_1）	亿m^3	水资源富饶度、持续补充能力、涵养能力、调蓄能力等
	年降水量（S_2）	mm	
	森林覆盖率（S_3）	%	
	大中型水库库容（S_4）	亿m^3	
水资源压力（P）	总用水量（P_1）	亿m^3	农业、工业等生产领域和生态环境的用水量，河湖补水的水资源量
	农业用水量（P_2）	亿m^3	
	工业用水量（P_3）	亿m^3	
	生态环境用水量（P_4）	亿m^3	
水资源响应（R）	城市化率（R_1）	%	城市化水平，水资源使用效率，水资源使用过程中的处理和综合开发利用效率
	万元GDP耗水量（R_2）	m^3/万元	
	污水处理率（R_3）	%	
	水资源开发利用率（R_4）	%	

2.3.2　数据处理

1）标准化处理。

由于评价指标原始数据的数量级和量纲各不相同，需对其进行标准化计算，统一数量级和量纲。本文选用极差法来进行原始数据的标准化。标准化后的评价指标见表2。评价指标的值有正负之分，正向指标值越大，表示水资源承载力越强；负向指标值越大，表示水资源承载力越弱，评价指标值也可能为零。熵值法在赋权计算过程中需要对指标取对数，故将各标准化值加上0.001。Z_{ij}为标准化处理后的指标值，其表达式为：

$$Z_{ij}=\begin{cases}\dfrac{\max x_{ij}-x_{ij}}{\max x_{ij}-\min x_{ij}}+0.001, & \text{正向指标}\\[2ex] \dfrac{x_{ij}-\min x_{ij}}{\max x_{ij}-\min x_{ij}}+0.001, & \text{负向指标}\end{cases}\tag{1}$$

式中：x_{ij}为第i个城市第j项指标原始数值；i为参与评价的城市数量，$i=1,2,\cdots,n$；j为评价指标数，$j=1,2,\cdots,m$。

2）权重计算方法。

本文采用TOPSIS熵值法确定评价指标的权重。熵值法是较成熟、应用广泛的方法，且被大多数研究者认可，其最大的好处是可排除权重确定过程中主观因素的影响[21-22]。该方法先计算

第j项指标下第i个城市的特征比重(贡献度)S_{ij},其表达式为:

$$S_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} Z_{ij}},\ j = 1,2,\cdots,m \tag{2}$$

再计算第j项指标的熵值H_j,其表达式为:

$$H_j = -\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n} S_{ij}\ln S_{ij},\ j = 1,2,\cdots,m \tag{3}$$

然后,根据熵值H_j计算差异性系数E_j的值,其表达式为:

$$E_j = 1 - H_j,\ j = 1,2,\cdots,m \tag{4}$$

最后,计算第j项指标的权重W_j,其表达式为:

$$W_j = \frac{E_j}{\sum_{j=1}^{m} E_j},\ j = 1,2,\cdots,m \tag{5}$$

3)综合结果计算方法。

采取熵值法为各评价指标赋权后,再按照加权求和综合评分法,计算湖南省各市州水资源承载力因子层得分H_i和综合总得分K_i:

$$H_i = \sum_{i=1}^{n} K_i,\quad K_i = \sum_{j=1}^{m} W_j Z_{ij} \tag{6}$$

式中:K_i为影响水资源承载力的第i个评价因子得分;W_j、Z_{ij}分别为某市州的第j项指标的权重和标准化值;H_i为某市州的水资源承载力的综合总得分。

2.3.3 计算结果

1)根据上述方法与公式计算得出因子层与指标层的权重,见表2。

表2 因子层和指标层权重

Table 2 Weight of the factor layer and index layer

目标层	因子层	权重	指标层	指标属性	权重
水资源承载力	水资源状态(S)	0.409	水资源总量(S_1)	+	0.051 5
			年降水量(S_2)	+	0.055 1
			森林覆盖率(S_3)	+	0.092 8
			大中型水库库容(S_4)	+	0.209 4
	水资源压力(P)	0.202	总用水量(P_1)	−	0.078 3
			农业用水量(P_2)	−	0.046 7
			工业用水量(P_3)	−	0.051 0
			生态环境用水量(P_4)	−	0.026 2
	水资源响应(R)	0.389	城市化率(R_1)	+	0.145 2
			万元GDP耗水量(R_2)	−	0.073 7
			污水处理率(R_3)	+	0.077 3
			水资源开发利用率(R_4)	+	0.092 8

2)将计算所得权重乘以各地区各指标得到归一化矩阵,将综合得分乘以100,得到各市州综合值,即可得到湖南省各市州的水资源承载力综合评价结果,见表3。利用表3中的结果,计算得到湖南省水资源承载力综合得分为38.29。

表3 湖南省各市州的水资源承载力综合评价结果

Table 3 Results of comprehensive evaluation on water resources carrying capacity of each city in Hunan Province

市州	水资源状态(S)	水资源压力(P)	水资源响应(R)	综合得分	排名	贴近度
长沙	7.95	2.77	33.79	44.51	4	0.47
株洲	11.55	11.34	22.65	45.54	3	0.42
湘潭	0.94	12.11	26.84	39.89	6	0.40
衡阳	6.13	6.95	14.52	27.60	13	0.27
邵阳	13.63	10.56	3.52	27.71	12	0.26
岳阳	5.89	3.95	16.61	26.45	14	0.29
常德	11.40	3.51	17.74	32.65	10	0.34
张家界	14.74	20.22	8.07	43.03	5	0.37
益阳	14.99	10.73	9.01	34.73	8	0.33
郴州	36.19	10.98	10.93	58.10	1	0.57
永州	18.19	10.71	7.96	36.87	7	0.33
怀化	35.75	14.48	3.70	53.93	2	0.50
娄底	3.67	14.88	12.46	31.01	11	0.29
湘西	14.82	18.40	0.82	34.05	9	0.32

3 结果分析

3.1 目标层综合评价

3.1.1 目标层评价方法选用

TOPSIS是一种对多目标决策进行综合评价的方法。本文采用该方法对目标层进行分析,对湖南省水资源承载力的时空演变进行整体分析与综合比较。其具体计算式为:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left[W_i\left(\max y_{ij} - y_{ij}\right)\right]^2},\ j = 1,2,\cdots,m \tag{7}$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left[W_i\left(\min y_{ij} - y_{ij}\right)\right]^2},\ j = 1,2,\cdots,m \tag{8}$$

$$T_j = D_j^-/(D_j^+ + D_j^-),\ j = 1,2,\cdots,m \tag{9}$$

式(7)~(9)中:y_{ij}为原矩阵标准化后的R中各值;D_j^+和D_j^-分别为各评价对象到最优解和最劣解的差值;T_j为贴近度。依据式(9)计算出贴近度T_j,见表3。根据相关文献的研究成果[13]与本文前期研究成果,综合确定评价等级,见表4。

表4　湖南省水资源承载力评价等级

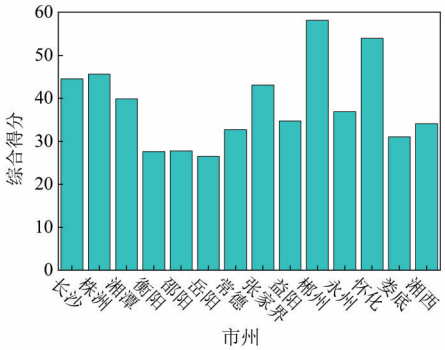
Table 4　Evaluation standard of water resources carrying capacity of Hunan Province

贴近度	[0.0,0.3)	[0.3,0.4)	[0.4,0.5)	[0.5,0.6)	[0.6,1.0]
等级	严重超载	超载	合理	良好	优秀

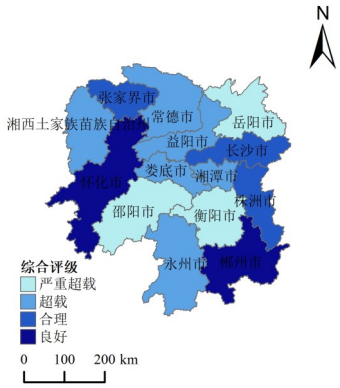
3.1.2　空间分析

由表3可知，TOPSIS模型计算的贴近度范围为(0.2,0.6)。由表4可知，湖南省各市州的水资源承载力目标层没有处于优秀区间的。依据表3，分别使用ArcGIS和Origin软件绘制湖南省水资源承载能力的空间分布图和柱状图，如图3所示。

从图3可以看出，湖南省西北和东南地区的水资源承载力更强，中部地区的承载能力稍弱。从整体上看，湖南省的水资源承载力呈“川”字形分布。具体而言，郴州的水资源承载力最好，怀化的次之，且这两市在水资源调蓄和涵养能力上也具备较大优势。这说明水库库容和水资源开发利用率对地区水资源承载力提升作用明显。长沙、株洲、湘潭三市的城镇化率比其他地区的大，三市的水资源承载力的排名也较靠前。



(a) 综合得分



(b) 空间效果图

图3　湖南省水资源承载力综合评价图

Fig. 3　Comprehensive evaluation map of water resources carrying capacity of Hunan Province

3.1.3　时间分析

1）采用Origin软件绘制各市州2012—2021年综合评分随年份的变化曲线，如图4所示。从图4可以看出，湖南省水资源承载力总体保持稳定，岳阳、益阳的排名下降较大。这表明湖南省的水资源合理配置措施起到了初步的作用，各地水资源承载力差距有所缩小。

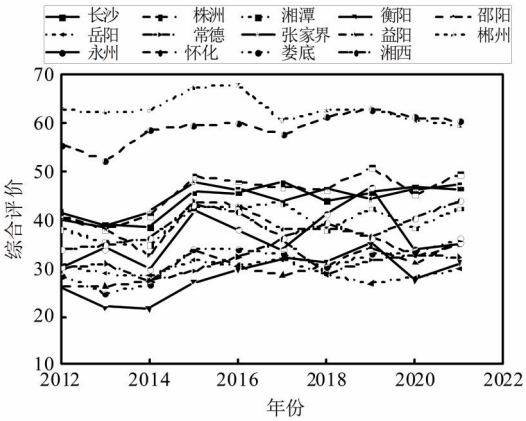


图4　湖南省水资源承载力变化曲线(2012—2021年)

Fig. 4　Change curve of water resources carrying capacity of Hunan Province from 2012 to 2021

2）为验证均值计算的可靠性，图5是采用Origin软件绘制的2012—2021年这10年间指标权重逐年变化的百分比堆积图。从图5可看出，部分指标权重波动明显，但总体上未背离各自均值，故综合评价时采用均值作为原始数据更客观、更接近实际状况。

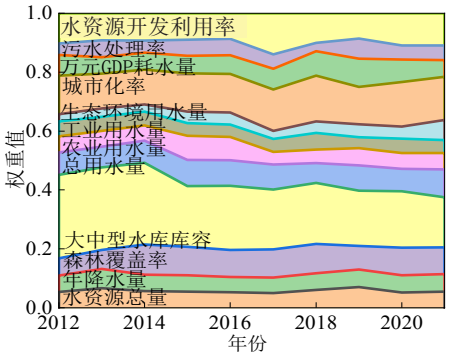


图5　指标逐年权重变化堆积图

Fig. 5　The annual accumulation chart of index weight change

在关键指标中，大中型水库库容、城市化率和水资源开发利用率的权重较大，表明湖南省水资源承载力受此三个指标的影响较大。但大中型水库库容的权重逐年降低，而水资源开发利用率的权重逐年上升，表明这10年来水库调度和合理开发利用对提升湖南省水资源承载力发挥了重要作用。

3.2 因子层分析

3.2.1 因子层评价方法选用

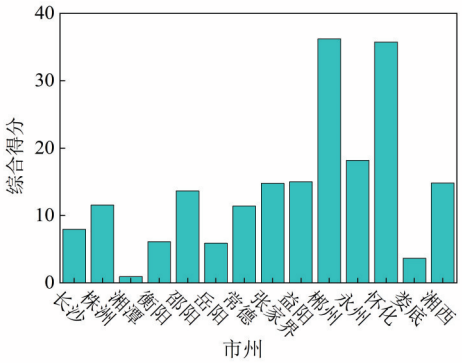
借鉴本文前期研究成果制作因子层评价标准。为使每组组内指标数据方差最小,采用自然分段法得到具体分段范围,即评价等级,见表5。

表5 湖南省水资源承载力因子层评价等级

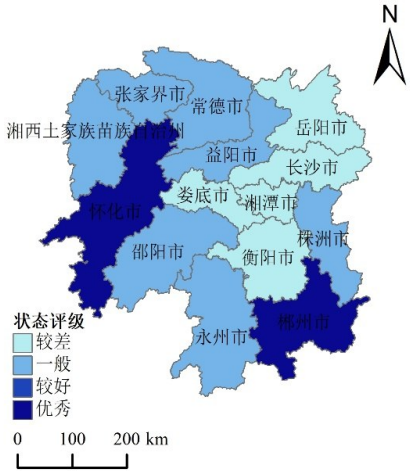
Table 5 Evaluation standard of factor layer of the water resources carrying capacity of Hunan Province

因子层	较差	一般	较好	优秀
S	[0,10)	[10,20)	[20,30)	[30,40]
P	[0,5)	[5,10)	[10,15)	[15,20]
R	[0,8)	[8,15)	[15,22)	[22,30]

分别使用ArcGIS和Origin软件绘制因子层分值的空间分布图和柱状图,如图6~8所示。需要指出的是,该分析仅基于评价对象间的对比,并不代表其绝对值。因此,岳阳虽在洞庭湖区的水资源状态评价中得分较高,但该市水资源压力指标和响应指标得分较低,故其总体评价等级仍较低。



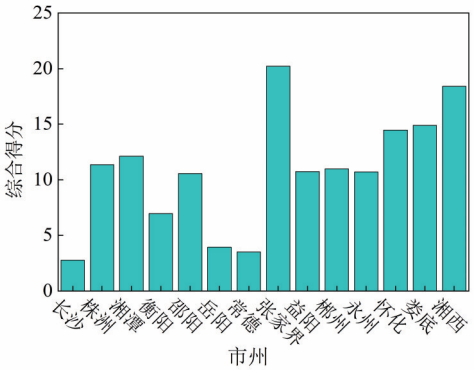
(a) 综合得分



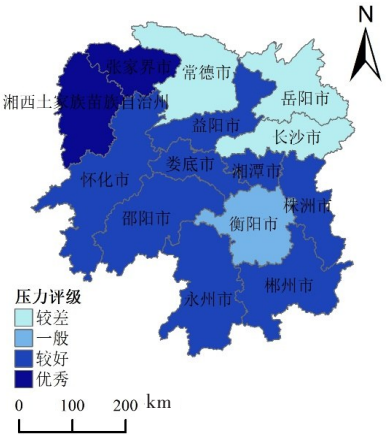
(b) 空间效果图

图6 湖南省水资源承载力支撑指标

Fig. 6 Supporting index of water resources carrying capacity of Hunan Province



(a) 综合得分



(b) 空间效果图

图7 湖南省水资源承载力使用指标

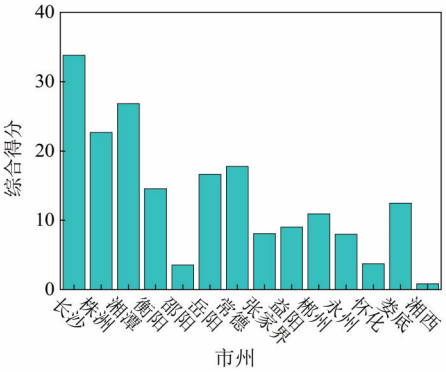
Fig. 7 Utilization index of water resources carrying capacity of Hunan Province

3.2.2 水资源状态(*S*)

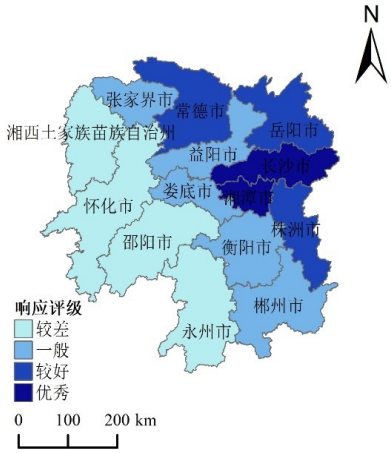
从图6可看出,就水资源状态而言,郴州、怀化得分最高,其次为永州,中部的娄底、湘潭得分最低。该项得分也与森林覆盖率呈正相关关系。

3.2.3 水资源压力(*P*)

从图7可看出,长沙、岳阳、常德、衡阳4市的水资源压力评级较高,表明其耗水量比其他市州的高。张家界和湘西的水资源压力评级相对较低,这与湘西工业发展现状有关。其他市州则表现一般。



(a) 综合得分



（b）空间效果图

图8　湖南省水资源承载力控制指标

Fig. 8　Control index of water resources carrying capacity of Hunan Province

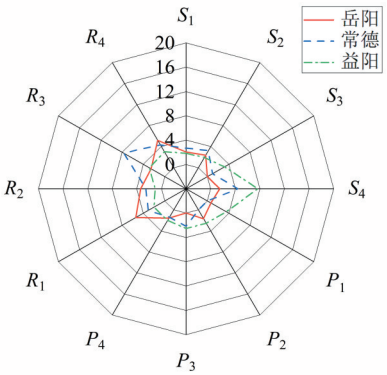
3.2.4　水资源响应（R）

从图8可看出，就水资源承载力控制指标而言，长沙、株洲和湘潭这3市的得分最高，其次为岳阳和常德，总体呈由东向西逐步减弱的趋势。这表明长株潭和洞庭湖地区对水资源响应政策的执行力更强，而湘西、湘西南地区对水资源响应政策的执行力有待提高[23]。

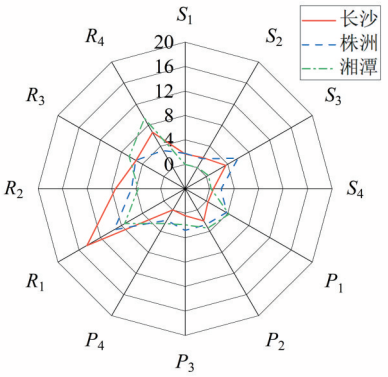
3.3　指标层分析

3.3.1　指标层评价方法选用

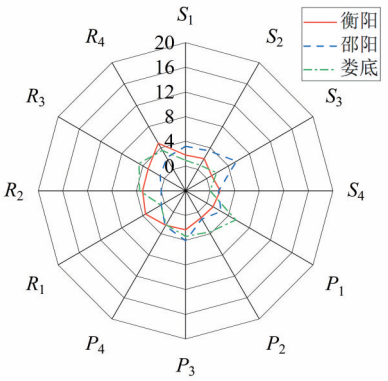
以12项关键指标得分为依据，使用Origin软件绘制各市州的水资源承载力雷达图，进行优劣势指标分析。为便于区域间的比较与分析，将湖南省分为五大区域：洞庭湖区（岳阳、常德、益阳）、长株潭区（长沙、株洲、湘潭）、湘中区（衡阳、邵阳、娄底）、大湘南区（郴州、永州）和大湘西区（怀化、湘西、张家界），具体如图9所示。



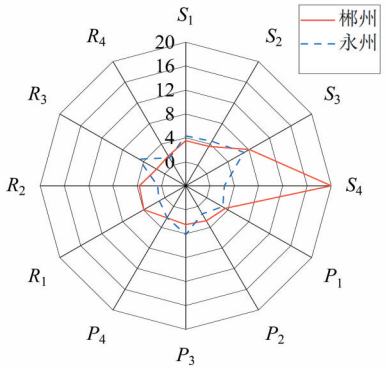
（a）洞庭湖区



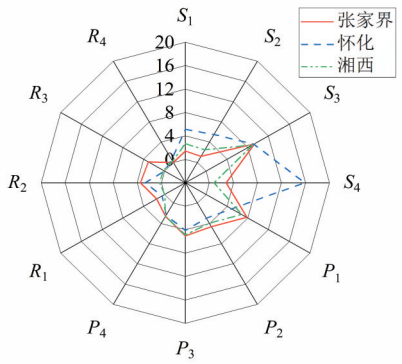
（b）长株潭区



（c）湘中区



（d）大湘南区



（e）大湘西区

图9　湖南省水资源承载力指标雷达图

Fig. 9　Radar chart of water resources carrying capacity index of Hunan Province

3.3.2 优劣势指标筛选

基于图9,每组选择1~2个优势或劣势指标,在这些指标中筛选出得分较突出的市州进行比较,从整体上展现湖南省水资源承载力关键指标的基本情况,结果见表6。

表6 湖南省各区域水资源优劣势指标

Table 6 Advantage and disadvantage index of each area in Hunan Province

区域	市州	优势指标	劣势指标
洞庭湖区	岳阳	R_1、R_4	S_3、P_3
	常德	R_3	P_1、P_2
	益阳	S_4	
长株潭区	长沙	R_1、R_2、R_4	P_1、P_3、P_4
	株洲	S_3、P_1、P_3	
	湘潭	R_1、R_3、R_4	S_1、S_2、S_4
湘中区	衡阳		
	邵阳		R_2
	娄底		S_4
大湘南区	郴州	S_3、S_4	
	永州	S_3	
大湘西区	张家界	S_3、P_1、P_3	R_4
	怀化	S_1、S_2、S_3、S_4	R_1、R_3
	湘西	S_1、P_1	R_1、R_2、R_3、R_4

3.3.3 优势指标分析

水资源承载力评价基于各单项指标得分和指标权重。森林覆盖率(S_3)作为优势指标出现了6次,大中型水库库容(S_4)、城市化率(R_1)、污水处理率(R_3)和水资源开发利用率(R_4)都出现了3~4次。水资源压力指标得分都比较低。湖南省各地整体水文气候条件相近,降雨径流相差不大,所以在水资源状态中,表征水资源涵养和调蓄能力的森林覆盖率和大中型水库库容的权重较大,其作为优势指标出现的次数也最多。其次,水资源压力指标所占权重相对较低,也很少出现优势或劣势指标,这表明各市州用水量均在合理范围内。大部分水资源响应指标都作为优势指标多次出现,且权重较高,这表明各地在水资源政策制定和管理措施执行等方面存在显著差异,且远离长沙的地区往往表现得更差一些。

3.3.4 区域比较与分析

以区域为评价单元可以发现,洞庭湖区承担了湖南省主要的农业生产任务,其水资源的压力大,水资源压力指标是该地的劣势指标。但同时该地作为国家生态经济区,管理措施的执行力也较强。长株潭区作为国家两型社会综合改革试验区,对水资源管理措施的执行力度最大。长沙水资源压力大,湘潭水资源状态差;湘中区的水资源承载力没有优势指标,却存在少量劣势指标,水资源承载力也相对差一些;大湘南区水资源状态良好,状态优势明显,没有劣势指标,整体水资源承载力较为优良,是湖南省理想的调水区;大湘西区水资源的状态不错,压力也最小,但相对偏远,导致其响应力度不够,水资源开发需求也最为迫切。

4 结论

湖南省多年平均降水量为1 454 mm,降水充沛,即使是在湖南的降水低值区,多年平均降水量也在1 000 mm左右,远高于全国625 mm的多年平均降水量。以此区域特征为前提,基于前述分析与比较,得到湖南省水资源承载力的评价结论:

1)总体而言,湖南省的水资源承载力由其自然条件主导,产业结构和水资源开发利用率是其次的主导力量,这说明区域发展的主观能动性是水资源承载力的重要驱动力。这一点也充分体现在空间特征上。郴州和怀化的水资源承载力最好,这与其所辖的南岭山脉区和雪峰山脉区的降水量大有关,且这两个市恰好是湖南省森林覆盖率最高的市。长沙、株洲和张家界的水资源承载力也较好,但各地原因不同。长沙主要归因于响应措施得力,株洲和张家界则归因于该地的水资源丰富且压力较小;岳阳、邵阳和衡阳的水资源承载力较差,这三市恰好位于洞庭湖区和衡邵干旱走廊的降水低值区,且这些地区的森林覆盖率也较低。

2)在因子层中,压力的权重约为20%,状态和响应均约为40%,这说明湖南省水资源在整体上并不匮乏,但存在结构性矛盾。从水资源的状态来看,郴州和怀化的最好,娄底和湘潭的最差;从水资源的压力来看,长沙、湘潭和岳阳的最大,湘西和张家界的最小;水资源的响应总体上呈由东向西递减的格局。在评价因子层中,压力的权重最小,这表明湖南省的水资源可以满足现有生产和生活的需求,提升水资源利用率是提高水资源承载力的关键。

3)水利工程对水资源的调蓄能大幅提高水资源承载力。湖南省属于典型大陆季风性气候区,水、光、热分布季节集中,故对水资源进行涵养与

合理调度是提升该省水资源承载力最直接、最有效的方法。在指标层方面，体现大中型水库库容、森林覆盖率、水资源开发利用率的权重较大。在区域优势方面，郴州和怀化两市在水资源调蓄和涵养上有较大优势。

4）产业结构在一定程度上影响着水资源承载力。具体来看，长沙的用水压力最大，湘潭的水资源量最少，但长株潭地区具备的产业结构优势和水资源开发利用率优势极大地提升了该地区的水资源承载力。岳阳的水资源虽然充足，但其农业用水量和生态用水量大，且水资源开发利用率较低，导致岳阳总体水资源承载力不足。

[参考文献]

[1] 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，2001，21(1)：30-34.DOI：10.3969/j.issn.1000-288X.2001.01.008.
XI Yanghe, JIANG Xiaohui, HUANG Qiang, et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21 (1) : 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.1000-288X.2001.01.008.

[2] 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. DOI：10.3880/j. issn. 1004-6933.2021.03.004.
LI Shaopeng, ZHAO Heng, WANG Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 20-25. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.004.

[3] 王晶，耿燕，郑雪.基于PSR-MDS模型的水资源承载力评价研究：以河北省为例[J].人民长江，2021，52(3)：81-86. DOI：10.16232/j. cnki. 1001-4179.2021.03.014.
WANG Jing, GENG Yan, ZHENG Xue. Study on water resources carrying capacity evaluation based on PSR-MDS model: case of Hebei Province[J]. Yangtze River, 2021, 52 (3) : 81-86. DOI: 10.16232/j. cnki. 1001-4179.2021.03.014.

[4] 张自英，潘万贵，黄涛，等.水资源安全综合评价与预测：基于浙江省台州市实证分析[J].水资源与水工程学报，2017，28(4)：70-74.DOI：10.11705/j.issn.1672-643X.2017.04.12.
ZHANG Ziying, PAN Wangui, HUANG Tao, et al. Comprehensive evaluation and prediction of water security: an empirical analysis based on Taizhou city of Zhejiang Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(4): 70-74.DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2017.04.12.

[5] 袁汝华，王霄汉.基于Pythagoras-TOPSIS法的长三角水资源承载力综合评价分析[J].科技管理研究，2020，40（15）：71-79. DOI：10.3969/j. issn. 1000-7695.2020.15.010.
YUAN Ruhua, WANG Xiaohan. Comprehensive evaluation and analysis of water resources carrying capacity in Yangtze River Delta based on pythagoras-TOPSIS method [J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40 (15) : 71-79. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7695.2020.15.010.

[6] 赵军凯，李九发，戴志军，等.基于熵模型的城市水资源承载力研究：以开封市为例[J].自然资源学报，2009，24(11)：1944-1951.DOI：10.3321/j.issn：1000-3037.2009.11.009.
ZHAO Junkai, LI Jiufa, DAI Zhijun, et al. Study on urban water resources carrying capacity based on entropy model: a case study of Kaifeng City[J].Journal of Natural Resources, 2009, 24(11) : 1944-1951. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2009.11.009.

[7] 程国栋.承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J].冰川冻土，2002，24(4)：361-367.DOI：10.3969/j.issn.1000-0240.2002.04.003.
CHENG Guodong. Evolution of the concept of carrying capacity and the analysis framework of water resources carrying capacity in northwest of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24 (4) : 361-367. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2002.04.003.

[8] 王丽，毕佳成，向龙，等.基于"五水共治"规划的水资源承载力评估[J].水资源保护，2016，32(2)：21-25. DOI：10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.005.
WANG Li, BI Jiacheng, XIANG Long, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on plan of co-governance on five water categories[J].Water Resources Protection, 2016, 32 (2) : 21-25. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.005.

[9] 余灏哲，李丽娟，李九一.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.DOI：10.18402/resci.2020.02.14.
YU Haozhe, LI Lijuan, LI Jiuyi. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Beijing, Tianjin and Hebei based on quantity-quality-domain-flow[J].Resources Science, 2020, 42(2): 358-371.DOI: 10.18402/resci.2020.02.14.

[10] 薛晴，杨侃.基于BP神经网络-系统动力学耦合模型的江苏省水资源承载力预测与调控研究[J].水利水电技术(中英文)，2022(11)：86-99.
XUE Qing, YANG Kan. Study on forecast and regulation of water resources carrying capacity in Jiangsu Province based on GA-BP-SD coupling model[J].Water Resources and Hydropower Engineering, 2022(11): 86-99.

[11] 刘雁慧,李阳兵,梁鑫源,等.中国水资源承载力评价及变化研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(5):1080-1091.DOI:10.11870/cjlyzyyhj201905008.
LIU Yanhui, LI Yangbing, LIANG Xinyuan, et al. Study on evaluation and change of water resources carrying capacity in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28 (5): 1080-1091. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201905008.

[12] 王美慧,唐德善,尚静.基于组合赋权结合中心点三角白化权函数的水资源承载力评价[J].水文,2022,42(4):38-43.DOI:10.19797/j.cnki.1000-0852.20210052.
WANG Meihui, TANG Deshan, SHANG Jing. Water capacity evaluation based on combination weighting method and center-point triangular whitenization weight function[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(4): 38-43.DOI:10.19797/j.cnki.1000-0852.20210052.

[13] 邓正华,戴丽琦,邓冰,等.洞庭湖流域水资源承载力时空演变分析[J].经济地理,2021,41(5):186-192.DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2021.05.020.
DENG Zhenghua, DAI Liqi, DENG Bing, et al. Spatial-temporal evolution of water resources carrying capacity in Dongting Lake basin[J]. Economic Geography, 2021, 41(5):186-192.DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2021.05.020.

[14] CAO J, LIU W X, YANG W L, et al. Evaluation of ecological environment competitiveness of Hunan Province based on prefecture level cities[J]. Agricultural Science & Technology, 2020, 21(3):45-52.

[15] 傅晓华,王赫,梁颖宜,等.湖南践行"两山论"效果测评与比较研究[J].湖南工业大学学报,2022,36(3):59-69.DOI:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.03.009.
FU Xiaohua, WANG He, LIANG Yingyi, et al. Evaluation and comparative study on the implementation the "theory of two mountains" in Hunan Province[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36 (3): 59-69. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-9833.2022.03.009.

[16] 傅晓华,阳文林,傅泽鼎,等.基于PSR模型的洞庭湖区水环境治理绩效评价[J].生态经济,2022,38(8):168-175. DOI: 10.14088/j. cnki. issn0439-8114.2020.11.038.
FU Xiaohua, YANG Wenlin, FU Zeding, et al. Performance evaluation of water environment management in Dongting Lake area based on PSR model [J]. Ecological Economy, 2022, 38(8): 168-175. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2020.11.038.

[17] 邹君,段维维,邓运员,等.居民感知视角下的湖南农村生活水资源系统脆弱性评价[J].农业现代化研究,2019, 40 (1): 145-152. DOI: 10.13872/j. 1000-0275.2018.0102.
ZOU Jun, DUAN Weiwei, DENG Yunyuan, et al. Evaluation of the vulnerability of rural living water resource system in Hunan from the perspective of residents' perception [J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(1): 145-152. DOI: 10.13872/j.1000-0275.2018.0102.

[18] 付宏渊,邱祥,曾铃,等.基于多变量时间序列(CAR)模型的洞庭湖区域地下水资源量预测[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2014,11(3):40-47.DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2014.03.007.
FU Hongyuan, QIU Xiang, ZENG Ling, et al. Groundwater resources prediction based on multivariate time series CAR model in Dongting Lake area [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2014, 11(3): 40-47.DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2014.03.007.

[19] 李景保,卢承志,梁成军.湖南省水安全问题研究[J].水利学报,2003, 34(7): 52-57, 63. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2003.07.010.
LI Jingbao, LU Chengzhi, LIANG Chengjun. Study on water security problem in Hunan Province[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(7): 52-57, 63. DOI: 10.3321/j.issn: 0559-9350.2003.07.010.

[20] 李静芝,朱翔,李景保,等.基于系统动力学的湖南省水资源供需系统模拟研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(1):46-52.
LI Jingzhi, ZHU Xiang, LI Jingbao, et al. Simulation of water resources supply and demand system in Hunan Province based on system dynamics[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(1):46-52.

[21] 杨国华,崔彬.熵权法在水资源可持续利用评价中的应用[J].数学的实践与认识,2011,41(19):8-12.DOI:10.3969/j.issn.1000-0860.2007.11.001.
YANG Guohua, CUI Bin. The application of entropy weight method to evaluation of the sustainable utilization of water resources [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(19): 8-12.DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2007.11.001.

[22] 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.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. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0131.

[23] 彭世良,余德清,张永忠,等.洞庭湖区生态修复现状及应对策略[J].国土资源导刊,2022,19(2):1-6.
PENG Shiliang, YU Deqing, ZHANG Yongzhong, et al. Current situation and countermeasures of ecological restoration in Dongting Lake Area [J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(2):1-6.

Evaluation and comparison of water resources carrying capacity in Hunan Province based on SPR model

FU Zeding[1], HU Xuyue[1], HUANG Cao[1], CHEN Bang[1], LI Meifang[2,3], YOU Yuchi[1]

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Ecological Environment Management and Assessment Center, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: [**Purposes**] Water resources carrying capacity (WRCC) is an important index for measuring the basic requirements for regional sustainable development and core competitiveness. Quantitative evaluation and comparison of WRCC is the key to clarify the regional development capacity. [**Methods**] Twelve key indices from three factors layers (the SPR model), i.e., support state, use pressure, and control responre were selected based on the evaluation target of WRCC in Hunan Province. The evaluation index system of WRCC in Hunan Province was established using the method of entropy weight with a unit of prefecture level city. The averaged statistics from 2012 to 2021 was used as the original value to comprehensively evaluate and compare the advantages and disadvantages of WRCC of 14 prefecture level cities in Hunan Province, so as to provide data support for improving WRCC of Hunan Province. [**Findings**] Results showed that the water resources in Hunan Province were not deficient on the whole. Among the evaluation factor layers, pressure has the lowest weight (about 20%), while support and response has a weight of 40% respectively. Chenzhou and Huaihua have greater advantages in water resources conservation and storage capacity. Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region is under the greatest water use pressure, but has advantages in industry and water resources development efficiency. [**Conclusions**] The overall water use pressure and the relative state of water resources in Hunan is within the tolerable range. The region with the highest and lowest WRCC is mainly controlled by its natural conditions, while the region with a middle WRCC is mainly controlled by the industrial structure and development and utilization efficiency. Improving the water use efficiency, and rational allocation of water resources through hydraulic engineering can effectively improve the WRCC in Hunan Province.

Key words: water resources carrying capacity; SPR model; the weight; Hunan Province

Manuscript received: 2022-09-21; **accepted**: 2023-01-03; **revised**: 2023-01-17

Foundation item: Project (52179004) supported by the national science and technology fund project; Project (2019SK2191) supported by key research and development projects of Hunan Province; Project (XSKJ2019081-40) supported by science and technology project of water conservancy in Hunan Province

Corresponding author: HU Xuyue (1961—) (ORCID: 0000-0003-0492-3593), male, professor, research interest: hydraulic engineering and environmental engineering. E-mail: huxuyue62@163.com

(责任编辑:李脉;校对:石月珍;英文编辑:黄志勇)