

胡彩霞,王语尚,翁士创等.2007—2020年东江流域水资源承载力评价分析[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

2007—2020年东江流域水资源承载力评价分析

胡彩霞^{1,2,3},王语尚⁴,翁士创^{2,3*},赵钰洁^{2,3}

(1. 珠江水文水资源勘测中心,广东 广州 510610;2. 水利部珠江水利委员会水文局,广东 广州 510610;3. 东江流域水资源与生态环境野外科学观测研究站,广东 惠州 516100;4. 华南师范大学,广东 广州 510631)

摘要:东江流域作为粤港澳大湾区的重要供水来源,其水资源状况直接关系到区域发展。为识别制约其承载能力的关键因素,保障粤港澳大湾区的长期供水稳定,本研究对2007—2020年东江流域水资源承载力进行了综合评价与分析,以期对流域水资源的可持续管理提供参考;以2007—2020年为研究时段,采用DPSIR模型,结合熵权-TOPSIS方法对东江流域水资源承载力进行综合评价分析,并引入障碍度模型深入探索主要制约要素的演变;研究期内东江流域水资源承载力指数介于0.38至0.58,整体呈波动上升趋势,但稳定性较弱。综合分析表明,以P子系统为代表的人类活动用水情况呈改善态势,但R子系统恶化表明人类活动扩张存在显著的生态负面效果,D、S、I等与自然因素相关的子系统更是呈现不稳定波动。结合障碍度分析发现,限制承载力发展的主要障碍已由早期的用水强度过大逐步转变为湿地覆盖率萎缩、人口规模扩张与年降水量年际波动三大因素导致的不稳定变化;据此,东江流域未来水资源管理重点需从加强节水转向生态修复与供需平衡管控,以修复生态系统增强自然缓冲能力,保持流域水资源的长期稳定供给。

关键词:DPSIR;水资源承载力;熵权-TOPSIS法;障碍度模型

中图分类号:TV213.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-12

水资源是维系和促进人类经济社会可持续发展的重要基础资源^[1],为实现水资源的可持续利用,同时满足社会经济发展的要求,必须科学评估水资源的承载力,以在发展与节约之间取得平衡。其中,水资源承载力表现为在一定阶段内,在满足生态需水前提下可利用水量所能够支撑该地区人口、资源与环境发展的最大社会经济规模,是一个度量区域社会经济发展受水资源制约的阈值^[2]。长久以来,水资源承载力评价都对区域经济社会健康发展和水生态保护起着重要的参考作用。

目前,已有大量的评价指标模型被用于生态环境评价的研究工作:如PSR(Pressure-State-

Response)模型、DSR(Driver-State-Response)模型、DPSR(Driver-Pressure-State-Response)模型、DPSIR(Driver-Pressure-State-Impact-Response)模型等^[3]。其中,DPSIR模型作为综合分析和描述环境问题与社会发展的关系而发展出来的通用模型^[4],因其能够为复杂系统分析提供清晰的逻辑框架^[5],有效地关联水资源承载力系统中的多个子系统并分析生态环境与人为因素之间的耦合关系^[6],已被广泛应用于各类环境管理和生态评价领域^[7]。在国内的水资源系统管理研究中,DPSIR模型被广泛应用并与多种量化评价方法相结合,进一步增强了实用性与可操作性^[5]。同时,大量学者已将

基金项目:广东省科技计划项目(2024B1212040001、2023B1212070031)

收稿日期:XXXX-XX-XX **修回日期:**XXXX-XX-XX

作者简介:胡彩霞(1986—),女,硕士,高级工程师,主要从事水文水资源调查评价工作。

通信作者:翁士创(1977—),男,硕士,正高级工程师,主要从事水文水资源、水资源保护与管理工作。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

DPSIR 模型应用于市域^[8]、城市群^[9]、省域^[10]等多个尺度的水资源承载力评价中,并结合障碍度模型分析了主要障碍因子,证实了该评价模型在揭示水资源系统内部结构性矛盾、识别关键约束因素方面的优越性,有效助力提升城市水资源节约、水环境保护与水灾害防治的保障能力。

在使用评价体系的过程中,权重计算与综合评价方法的选取都会影响评价结果的科学性与可靠性。熵权法作为一种客观赋权法,减少了主观加权方法带来的不准确性,提升了权重确定的客观性和科学严谨性,常与 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 方法一同用于各类评估研究中^[11-12]。在水资源领域,熵权-TOPSIS 结合的方法具有指标和数据限制较小、赋权过程相对客观、流程清晰简便等优势,被广泛应用于各地区的水资源承载力评价当中^[10, 13-17]。

广东省东江作为珠江流域三大水系之一,是粤港澳大湾区生产生活用水的保障^[18]。然而长期以来,水资源时空分布不均这一难题一直困扰着广东,东江流域的几次枯水威胁到了深圳、香港等城市的供水安全^[19],带来了严重的社会问题。为此,《粤港澳大湾区发展规划纲要》就已经提出“加强珠江流域水资源统一调度,强化水资源安全保障”^[20],建设了东深供水、深圳东部供水、珠江三角洲水资源配置等大型引调水工程。由于现有的水资源承载力研究关注东江流域较少,为了进一步确保东江流域水资源合理使用,辅助广东省水资源配置管理,本研究采用 DPSIR 模型结合熵权-TOPSIS 模型评价东江流域的水资源承载力,并使用障碍度模型分析其背后的关键障碍因素,为广东省推进流域水资源可持续利用提供理论支撑与决策参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

东江是珠江流域三大水系之一,发源于江西省寻乌县桎髻钵山,流域范围在东经 113°52′~115°52′、北纬 22°38′~25°14′,包含东江三角洲在内的流域面积约为 3.5 万 km²。东江流域内有新丰江、枫

树坝、白盆珠、天堂山和显岗共 5 座大型水库。作为香港特区以及广东省广州东部、深圳、河源、惠州、东莞等地的主要供水水源,东江总供水人口近 4000 万,但供水区域人均水资源量约 800 m³,仅是全国人均的 1/3,进行有效的水资源承载力评价对支撑该地区的经济和社会可持续发展十分重要。受限于数据获取,本研究区域不包含香港特别行政区和东江三角洲部分。

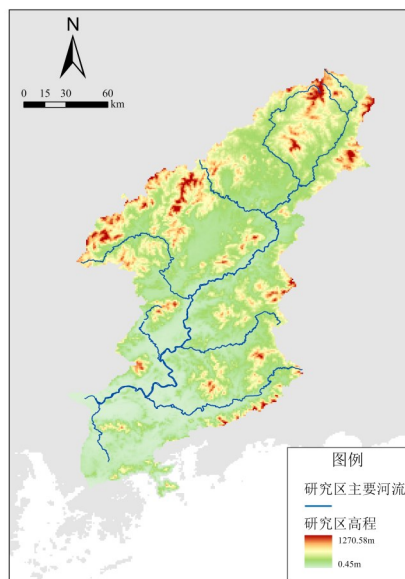


图1 研究区概况

Fig. 1 Study area

1.2 东江流域水资源承载力评价模型

为了客观、系统地评价东江流域的水资源承载力情况,本研究参考过往研究方法,使用 DPSIR 模型结合熵权-TOPSIS 方法构建了东江流域水资源承载力评价模型。

1.2.1 DPSIR 模型

DPSIR 模型作为广泛应用于水环境研究中的模型,其能从系统的角度全面、综合地考虑人与水环境的相互作用,并运用于评价相关的研究中。本研究参考过往研究,对各个子系统的指标做出了如下选取,具体指标数据来源见表 1,具体模型计算公式如下。

$$WRCC = \sum_{i=1}^n w_j * r_{ij} \quad (1)$$

式中:WRCC 表示水资源承载力指数,从 0 到 1 表示

承载力从弱至强; r_{ij} 来自针对每个指标 j 在所有年份的数据向量标准化后第 i 年的标准化值; w_j 为指标 j 的权重,由熵权法计算得出。

驱动力(Driving, D)子系统是表征推动水资源发展变化的重要因素,是促使水资源系统变化的关键动力^[4, 21]。本研究选取了流域内总人口数量和流域内人均GDP两个指标表示促使水资源变化的重要人类活动因素。已有研究证明,更高的经济水平有利于节水技术的开发与水资源管理水平的完善^[6],故将人均GDP设定为正向指标。对于GDP增长所带来的水资源负面影响,则由万元GDP用水量等其他指标于压力子系统部分进行分析。而流域内人口增长将直接增加生活用水需求,因此将人口总数设定为负向指标。

压力(Pressure, P)子系统是表征驱动力作用之后直接施加在水资源系统上的促使其变化发展的压力,具体表现为人类活动对水资源的直接影响。本研究选用万元GDP用水量、万元工业增加值用水量、农田灌溉亩均用水量和人均综合用水量综合表征东江流域人类活动对水资源可能的不良影响。

状态(State, S)子系统是表示水资源系统在压力下的状态。本研究选用年降水量、产水模数、总供水量和人均水资源量表示东江流域的水资源状况。

影响(Impact, I)子系统是表示水资源系统状态变化反作用于人类社会的影响。本研究考虑东江流域内水库的重要性的和水库的水质威胁^[22-23],参考国家《地表水环境质量标准》选取了水库水质中总氮、总磷、高锰酸盐3个指数的I-Ⅲ类年占比和生态环境用水量反映人类活动对水资源造成的影响。

响应(Response, R)子系统表征了人类为减轻前四个子系统对整个水资源系统的负面影响,而对水资源系统开发利用采取的管理措施。本研究根据东江流域相关的生态保护政策,选取了森林覆盖率和湿地覆盖率以反映东江流域的人类活动响应措施。其中,湿地通过提供水文缓冲维持水资源系统稳定^[24];而森林则在多种途径影响水循环过

程^[25],对流域内水资源系统起到了保护作用^[26]。

表1 DPSIR 指标选取与属性

Tab. 1 Indicator Selection and Attributes of the DPSIR Framework

目标层	准则层	指标层	属性
水资源承载力水平	驱动力子系统	人均GDP	正
		流域内人口总数	负
		万元GDP用水量	负
	压力子系统	万元工业增加值用水量(含火电)	负
		农田灌溉亩均用水量	负
		人均综合用水量	负
	状态子系统	年降水量	正
		产水模数	正
		总供水量	正
	影响子系统	人均水资源量	正
		水库-TN (I-Ⅲ类水比例)	正
		水库-TP (I-Ⅲ类水比例)	正
	响应子系统	水库-PI (I-Ⅲ类水比例)	正
		生态环境用水量	正
		森林覆盖率	正
		湿地覆盖率	正

1.2.2 熵权-TOPSIS法模型

TOPSIS模型常与熵权法一起被用于评价分析中,这两个方法的组合被广泛认为能减少主观因素的影响,据此本研究使用熵权法完成各指标权重计算,并通过TOPSIS模型进行水资源承载力评价分析。其中,熵权法的计算公式如下:

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (2)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m (f_{ij} \times \ln f_{ij}) \quad (3)$$

$$k = 1/\ln m \quad (4)$$

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (5)$$

式中: r_{ij} 来自针对指标 j 在所有年份的数据向量标准化后第 i 年的标准化值; f_{ij} 为指标的特征比重; E_j 则为指标 j 的信息熵; w_j 为指标 j 的权重; m 为评价的总年份数; n 为评价的指标总数。

TOPSIS 模型能够综合考虑各指标与其理想状态间的差距, 是一种全面有效、适合非线性复杂系统的评估方法^[16]。TOPSIS 模型的贴近度的计算流程如下, 首先构造加权矩阵 v_{ij} , 其具体计算公式如下:

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (6)$$

然后分别确定正、负向指标的正负理想解 S_j^+ 与 S_j^- , 其中, 正向指标的计算公式如下:

$$\begin{cases} S_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} \{v_{ij}\} (j = 1, 2, \dots, n) \\ S_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} \{v_{ij}\} (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (7)$$

负向指标的计算公式如下:

$$\begin{cases} S_j^+ = \min_{1 \leq i \leq m} \{v_{ij}\} (j = 1, 2, \dots, n) \\ S_j^- = \max_{1 \leq i \leq m} \{v_{ij}\} (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

之后计算不同年份到正、负理想解的距离:

$$Sd_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j^+ - v_{ij})^2} (i = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

$$Sd_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j^- - v_{ij})^2} (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

其中, Sd_i^+ 和 Sd_i^- 表示不同年份到正负理想解的距离, 最终由此计算贴近度 η_i :

$$\eta_i = \frac{Sd_i^-}{Sd_i^+ + Sd_i^-} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式中: η_i 与 1 越接近, 表示评价结果越优。

1.3 障碍度评价模型

通过综合考虑指标权重与指标实际表现和理想状态之间的差距, 障碍度模型可以客观地评价水资源承载力中各因子在不同年份的障碍程度, 从而识别对水资源承载力产生主要阻碍的因素。障碍

度越大, 表明该指标对系统发展的制约作用越强; 反之, 障碍度越小则制约作用越弱。为了更准确地分析影响水资源承载力的重要因素, 本研究通过障碍度模型来计算各个指标在每一年对水资源承载力的影响情况^[27]。

$$C_{ij} = \frac{w_j \times (1 - r_{ij})}{\sum_{j=1}^n w_j \times (1 - r_{ij})} \times 100\% \quad (12)$$

式中: C_{ij} 表示指标 j 第 i 年的障碍度值。 r_{ij} 来自针对指标向量 j 在所有年份的数据向量标准化后第 i 年的标准化值, 即指标的实际表现, 此式中通过 $(1 - r_{ij})$ 计算其与取值为 1 的理想状态下差距, 以反映指标偏离理想状态的程度; w_j 为指标 j 的权重, 为全面考虑各指标在整体水资源承载力系统中的作用, 此处权重采用流域内整体水资源评价结果中的各指标权重结果。

1.4 数据来源

根据过往研究^[21-23]的指标选取, 本研究为统一研究区域与时间序列跨度, 综合数据来源的限制, 选取了 2007—2020 年 16 个指标用来评价东江流域的水资源承载力, 具体数据来源如下: 人均 GDP (万元)、流域内人口总数 (人) 等人口经济数据来自开放空间人口统计数据与研究网 (<https://hub.worldpop.org/>), 其在同类数据的中国乡镇级别精度验证研究中表现最佳, R^2 计算结果为 0.91^[28]; 万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量 (含火电)、农田灌溉亩均用水量、人均综合用水量、年降水量、产水模数、总供水量、人均水资源量和生态环境用水量等 9 项自然、工业水资源数据来源于广东省水资源公报; 流域内水库中 TN、TP、PI 三项化学指标 I—III 类比例数据来源于 2000—2023 年中国湖泊和水库的逐月高分辨率水质数据集 (https://figshare.com/articles/dataset/High_Resolution_Water_Quality_Dataset_of_Chinese_Lakes_and_Reservoirs_from_2000_to_2023/27626286/2), 其抽样 R^2 检验结果为 0.65 至 0.76, 能有效捕捉水质的时空变化^[29]; 流域内森林覆盖率来源于 1985—2025 年中国每年 30 m 土地覆盖数据集 (<https://zenodo.org/records/>

12779975)^[30],其在同类土地利用数据的中国境内抽样精度对比研究中分类准确率最佳,达到了 $86.98 \pm 0.76\%$ ^[31];湿地覆盖率来源于全球30 m湿地地图GWL_FCS30数据(<https://zenodo.org/records/7340516>),其拥有更精细的湿地分类,在全球范围内随机抽样的分类准确率达到86.44%^[32]。除水质数据外,其余栅格数据均统一投影并重采样至1 km分辨率,使用东江流域矢量掩膜裁剪以统一范围,并计算东江流域范围的面均值数据作为最终指标数据。水质数据以各水库逐月水质数据为基础,依据地表水环境质量标准对各站点的水质成分进行等级划分,并统计各站点全年中水质达到Ⅰ—Ⅲ类标准的月份数占全年总月份数的比例,最后以所有站点达标月份占比的平均值作为流域整体三项

指标的达标率。

2 研究结果

2.1 东江流域水资源承载力评价

结果表明,研究期内流域水资源承载力评价指标介于0.38~0.58,平均值为0.48。为判断其长期变化趋势,采用Mann-Kendall非参数趋势检验和Sen's斜率计算对结果进一步分析。结果显示, $p=0.03$,Sen's斜率为0.01,表明评价指数在研究期内整体呈波动上升趋势(图2)。期间,评价指数出现明显的年际起伏,说明水资源承载力受降水变率等自然因素干扰较大,系统韧性和稳定性仍存在明显不足;但总体趋势表明,流域水资源系统尚能在经历暂时压力后重新恢复,长期改善态势基本确立。

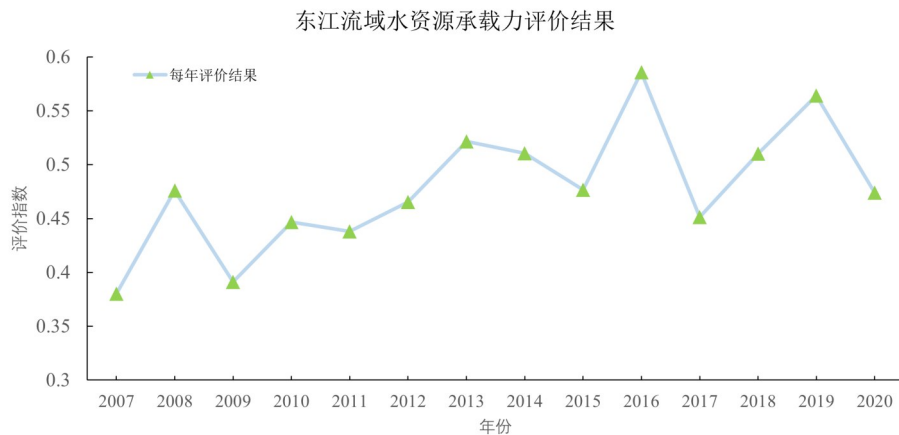


图2 东江流域水资源承载力评价结果

Fig. 2 Evaluation results of water resources carrying capacity in the Dongjiang River Basin

2.2 东江流域水资源承载力各子系统评价结果

为进一步分析各子系统评价情况,本研究使用水资源承载力指数计算公式,结合DPSIR中各项属性指标,重新使用熵权-TOPSIS法模型对每个子系统进行了单独的评价分析,得到了各个系统的评价指数,其评价结果从0至1表示子系统情况从劣至优。为判断各子系统长期变化趋势,采用Mann-Kendall非参数趋势检验和Sen's斜率计算对结果进一步分析。根据DPSIR模型各子系统综合评价结果(图3),五大子系统在研究期内呈现出不同的变化规律。结合承载力总评价结果分析,推测子系统

内在的交互机制共同塑造了东江流域水资源承载力整体波动特征。

趋势分析显示,D子系统显著性 $p=0.13$,在研究期内无显著趋势,整体评价指数于0.43~0.58的区间内浮动,未出现剧烈波动。具体分析,D子系统评价指数于2007—2013年在0.43~0.48小幅震荡,反映出该阶段子系统内部的动力与压力处于相对稳定状态;2014—2019年间指数有所抬升,在0.50~0.58区间浮动,2017、2018年达到峰值0.57,这表明随着人均GDP的持续提升与人口规模的进一步扩大,社会经济活动对水资源系统提供的动力大于

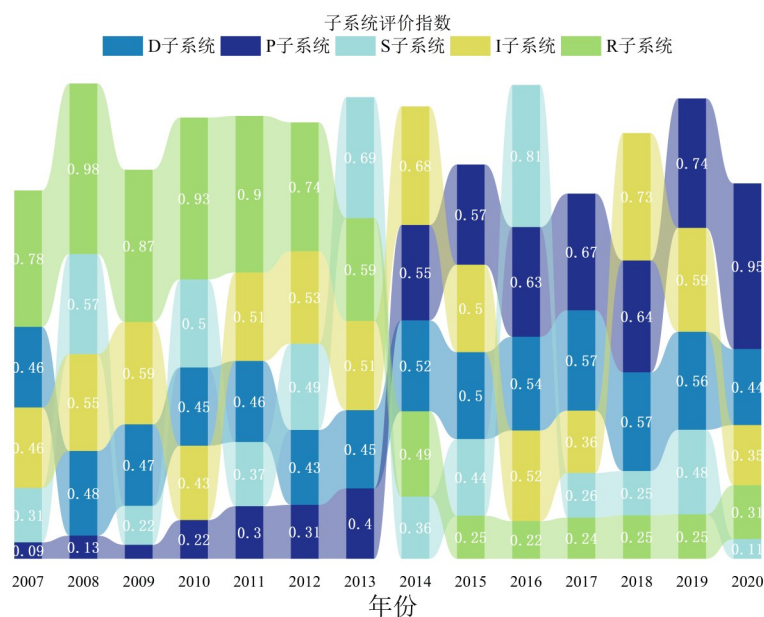


图3 东江流域水资源承载力各子系统评价结果

Fig. 3 Evaluation results of each subsystem of water resources carrying capacity in the Dongjiang River Basin

压力,使子系统指数维持较高的水平;2020年指数回落至0.44,可能与当年因疫情使经济活动受到剧烈冲击有关。总体而言,D子系统对承载力变化的贡献较为稳定,并非导致承载力波动的主要驱动因素。

P子系统的趋势分析显著性 $p < 0.001$,Sen's斜率为0.06,其在研究期内呈现出大幅改善的趋势。该子系统评价指数从2007年的研究期内最低值0.09开始,呈现了稳定上升的趋势,至2020年跃升至0.95,成为研究期内改善幅度最大、评价结果最好的子系统。

S子系统趋势分析显著性 $p = 0.44$,其结果不显著,其在研究期内年际波动显著。在2014和2015年,该子系统的起伏变化直接与东江流域水资源总体评价起伏变化同向,由此推测,S子系统是承载力剧烈波动的重要原因。

I子系统趋势分析显著性 $p = 1$,其结果不显著,其在研究期内总体相对稳定,少有剧烈变化。该子系统评价指数在研究期内大部分年份围绕0.5上下浮动;在2017、2018年,该子系统评价指数剧烈降低,表明流域内水质同样受自然因素的制约。

R子系统趋势分析显著性 $p = 0.01$,Sen's斜率为-0.07,其在研究期内呈剧烈恶化的趋势。数据显示,R子系统评价指数从2011年持续下滑,并在2015年后持续低位徘徊。尽管于2020年有所回升,但依旧远低于研究前期水平。这一趋势深刻揭示出,随着东江流域城镇化建设快速推进与土地利用方式的深刻变化,流域内局部区域的森林与湿地面积遭受侵占,生态系统的水源涵养、径流调节和洪峰削减功能持续弱化,生态响应能力大幅下降。R子系统的急剧衰退与承载力在2015年之后难以维持稳定的现象高度契合,表明生态响应能力的持续丧失已成为制约东江流域水资源承载力改善的最关键短板之一。

2.3 东江流域水资源承载力各指标障碍度评价结果

障碍度分析结果(图4)进一步揭示了制约流域水资源承载力提升的关键因素及其动态变化规律。其中,年降水量障碍度均值为0.12,在16项指标中位列第二,在2011、2014、2017、2018、2020年均跃居当年首位,在2009、2012、2015年位列第二,共有8个年份排名前三。这表明年降水量是研究期内最

为持续的障碍因素,枯水期内对承载力构成显著制约;产水模数障碍度与年降水量协同波动,共同放大了气候变化的自然背景约束。人均综合用水量的障碍度呈先上升后下降的趋势,万元 GDP 用水量与万元工业增加值用水量障碍度则持续下降,这反映了随着节水政策的深入推进,流域内节水成效显著。湿地覆盖率障碍度由 2007 年的 0.03 持续攀升至 2016 年的 0.20,且在此后持续围绕 0.10 维持高位,取代人均综合用水量成为后期制约承载力提升的首要障碍。同时,流域内人口总数障碍度则呈现

单调上升趋势,人口规模扩张对承载力的累积制约效应日益凸显。总供水量障碍度呈先下降后上升的趋势,反映了流域随着经济发展,供给政策的作用日渐减弱,而供给侧约束逐渐突出。I 子系统中,水库中 TP、PI(I-III 类水比例)和生态环境用水指标变化不明显,各年障碍度均值较低。而水库 TN(I-III 类水比例)指标则障碍度在 2016、2017、2020 年连续位居第 2 位,障碍度最高达 0.16,表明近年来 TN 浓度超标问题对流域水资源系统的制约日益突出。

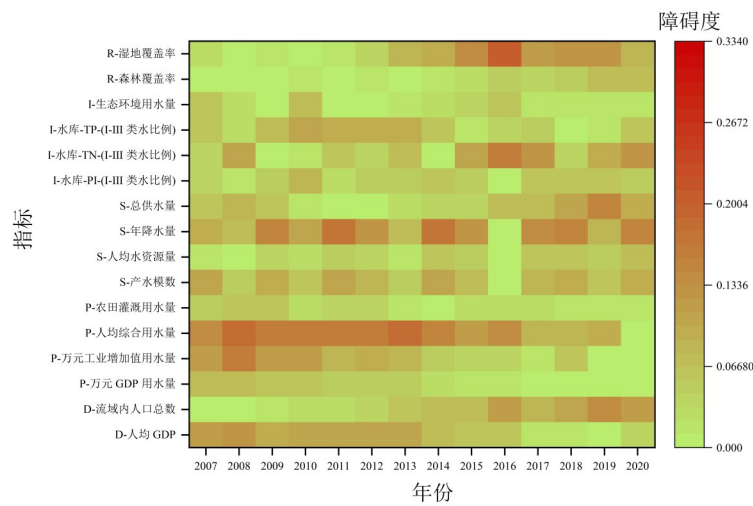


图 4 东江流域水资源承载力各指标障碍度分析结果

Fig. 4 Obstacle degree analysis results of each indicator for water resources carrying capacity in the Dongjiang River Basin

综合子系统与各指标分析结果发现,D 子系统的两项核心指标呈现出方向相反的变化:人均 GDP 障碍度由 2007 年的 0.11 持续降低,反映出经济增长带来的驱动力持续增强,属人类活动的积极影响;而流域内人口总数障碍度则持续攀升,表明人口规模扩张对承载力的累积制约效应日益显著,二者相互抵消。而在 2020 年,由于疫情冲击导致经济活动受抑,人均 GDP 对系统的驱动减弱,导致 D 子系统评价指数回落至 0.44。因此,D 子系统的小幅波动状态为经济增长正向驱动与人口增长负向压力长期平衡的结果。P 子系统的改善趋势反映了流域内节水策略的深入推进:除农田灌溉用水量外,P 子系统各项指标障碍度在研究期内持续下降。然

而,流域内承载力评价指数的波动也反映了 P 子系统大幅改善无法带动流域整体承载力同步提升,流域内承载力稳定性依然存在不足,由此判断单纯依赖需求侧改善无法从根本上解决流域内目前主要矛盾。S 子系统在研究期内波动显著。其中最大制约属年降水量指标,其在多个年份处于障碍度首位。由于 S 子系统与年降水量波动方向一致,表明 S 子系统的剧烈波动主要由气候驱动的降水量所主导。同时,该子系统中总供水量指标障碍度先下降再提升,反映出随经济发展,供给侧压力逐步凸显;而产水模数、人均水资源量指标障碍度则呈现波动变化,与年降水量的起伏一致,推测主要受自然因素影响。I 子系统中大部分指标障碍度均值较低,

子系统整体趋势不明显,其波动主要反映在TN浓度指标障碍度的波动上升,成为限制流域内承载力稳定性的重要指标之一。R子系统内两项指标障碍度在研究期内均有所上升,反映出人类活动扩张对生态空间的持续侵占。R子系统的恶化也与TN浓度的上升、流域内承载力难以维持稳定的现象相契合,表明生态问题也已成为制约流域水资源承载力的核心问题之一。

综上所述,推测东江流域水资源承载力的制约格局在研究期内发生了结构性的转变:初期以人均综合用水量为代表的用水强度类指标是最主要障碍,而后期核心障碍已逐步演变为湿地覆盖率萎缩、人口规模扩大和年降水量年际波动三大因素导致的不稳定波动。该现象表明,东江流域水资源承载力的核心问题已从用水效率不足转向基于生态响应能力较差与自然因素剧烈变化导致的供给侧不足。其中,以人口增长为核心的人类活动规模扩张是导致承载力持续承压的长期主导因素,年降水量与产水模数的年际不稳定性则构成重要的自然背景约束,而湿地覆盖率的持续萎缩则加剧了自然因素的影响程度。

3 讨论

3.1 东江流域水资源承载力的综合分析

基于DPSIR模型的综合评价结果表明,2007—2020年东江流域水资源承载力指数在0.38~0.58区间内呈波动上升趋势,但各年间指数的显著波动揭示出系统稳定性较为薄弱。进一步的子系统评价分析与各指标障碍度分析显示,制约东江流域水资源承载力的主导因素已由早期的用水强度问题逐步向人口持续增长、湿地与绿地面积萎缩等多重因素转移,反映出该流域水资源系统所面临的压力结构正在发生深层次转变。

其中,D子系统尽管长期保持相对稳定,但各指标障碍度分析表明流域内人口总量与经济发展规模之间已趋向极限;从动态演变机制来看,流域内人口增长在早期推动了经济扩张,进而促进了节水技术的研发应用与相关政策的完善;然而,当人口

规模突破水资源承载阈值后,人口红利效应将逆转为人口负担效应^[33],致使水资源供需矛盾持续加剧。这一机制与Sun等^[34]的研究结论高度契合:用水效率的技术性提高往往被需求总量的规模扩张所抵消。结合障碍度分析的结果与P子系统改善、S子系统波动显著的情况,可以推测东江流域节水技术与政策措施的边际效益已接近饱和阈值,单纯依赖需求侧改进的政策空间正在收窄。东江流域未来的水资源管理策略不仅仅要保持现有的节水成果,更要重视供给侧与需求侧有效协调管控,以从根本上缓解流域水资源的稳定性问题。

与此同时,经济活动的持续扩张导致区域内大量湿地与绿地被转化为建设用地,进而显著削弱了东江流域水资源系统的生态缓冲能力,这是造成R子系统长期衰退的重要原因。在全球尺度上,Asselen等^[35]已证实城镇化进程是湿地面积持续丧失的主导驱动力之一;而Wang等^[36]对北京湿地水资源承载力的研究进一步表明,城市湿地面积的持续收缩对区域水资源支撑能力具有显著的削弱效应。同时,森林区域的萎缩阻碍了流域内水质与水量的改善^[37]。综合TN浓度障碍度的持续上升与过往研究,流域水环境质量仍存在恶化风险^[38]。二者的变化使水资源承载力更易受降水波动影响。由此可见,R子系统的持续退化将在很大程度上消解P子系统通过政策与技术手段所取得的改善成果,形成制约流域水资源承载力稳定的关键阻碍。

综合上述分析,本研究提出以下建议以推动东江流域水资源承载力的系统性提升:第一,应建立以平衡供给侧与需求侧为核心的区域水资源配置体系,加强跨区域协调供水,以缓解人口增长对供需平衡的结构性破坏。第二,应进一步加强湿地与绿地生态系统的长效保护与修复政策,严格落实生态保护红线管控与生态补偿制度,遏制城镇发展对水资源缓冲区的侵占,从而增强水资源系统的韧性,提高流域水资源系统在气候变化加剧背景下的稳定性。

3.2 研究局限与未来展望

本研究在指标选取与数据获取方面仍存在一

定局限性:本研究在影响子系统中主要采用水库水质指标,对面源污染入河总量、河道生态流量保障程度等指标的覆盖尚不充分,可能导致I子系统的综合评价存在主观偏差;受限于数据获取来源,本研究的研究期跨度较短、各子系统指标选取无法全面涵盖自然和人为因素,对研究结果的可靠性有一定影响。未来研究可进一步引入遥感数据与高分辨率气候模式输出,提升指标体系的时空精度,为东江流域水资源长效管理提供更为精准的决策支撑。

4 结论

本研究基于DPSIR模型,结合熵权-TOPSIS方法与障碍度模型,对2007—2020年东江流域水资源承载力进行了系统评价。研究表明,东江流域水资源承载力整体呈波动上升趋势,但稳定性较差。子系统评价分析显示,D子系统变化相对稳定;P子系统在节水政策持续推进下呈显著改善趋势;S、I子系统受自然因素影响存在不同程度的波动;R子系统因经济开发而持续衰退。进一步的障碍度分析表明,流域内水资源承载力的核心障碍已经发生了变化:由早期的用水强度为主,逐步转向湿地覆盖率萎缩、人口规模扩张与年降水量年际波动三大因素主导的供需矛盾。基于上述结果,东江流域未来水资源管理的重点需从加强节水转向生态修复与供需平衡管控并重的综合治理格局,以实现流域水资源的长期可持续利用。

参考文献:

- [1] 李原园,曹建廷,黄火键,等. 国际上水资源综合管理进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 127-137.
Li Yuanyuan, Cao Jianting, Huang Huojian, et al. International progresses in integrated water resources management [J]. Advances in Water Science, 2018, 29 (1): 127-137. (in Chinese)
- [2] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002(3): 262-269.
Xia Jun, Zhu Yizhong. The Measurement of Water Resources Security: Research and Challenges of Water Resources Carrying Capacity [J]. Journal of Natural Resources, 2002(3): 262-269. (in Chinese)
- [3] 邓湔丹,叶露锋,刘丽香,等. 城市生态安全研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 248-259.
Deng Haodan, Ye Lufeng, Liu Lixiang, et al. Review of urban ecological security research [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 248-259. (in Chinese)
- [4] 曹红军. 浅评DPSIR模型[J]. 环境科学与技术, 2005 (S1): 110-111,126.
Cao Hongjun. An Initial Study on DPSIR Model [J]. Environmental Science & Technology, 2005 (S1): 110-111,126. (in Chinese)
- [5] Zare F, Elsayah S, Bagheri A, et al. Improved integrated water resource modelling by combining DPSIR and system dynamics conceptual modelling techniques [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 27-41.
- [6] 吴丹,刘孟瑶. 基于DPSIR模型的黄河中游水资源与经济协调发展评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(2): 91-96.
Wu Dan, Liu Mengyao. Evaluation on the Coordinated Development of Water Resources and Economy in the Middle Reaches of the Yellow River Basin Based on the DPSIR Model [J]. Yellow River, 2023, 45(2): 91-96. (in Chinese)
- [7] 乔友凤,李奕曼,陈义忠,等. 京津冀地区城镇化与水资源可持续利用的演变及匹配特征[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(3): 64-73,82.
Qiao Youfeng, Li Yiman, Chen Yizhong, et al. Evolution and matching characteristics of urbanization and water resources sustainable utilization in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34 (3): 64-73,82. (in Chinese)
- [8] 朱逸凡,何宏,张文静,等. 基于DPSIR-TOPSIS模型的长春市水资源脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 174-180.
Zhu Yifan, He Hong, Zhang Wenjing, et al. Water Resource Vulnerability Assessment of Changchun City Based on DPSIR-TOPSIS Model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 174-180. (in Chinese)
- [9] 徐盼盼,陈硕,马浩苑,等. 基于DPSIR模型的秦岭北麓陕西城市群水安全评估及驱动因子识别[J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(2): 143-153.
Xu Panpan, Chen Shuo, Ma Haoyuan, et al. Assessment of Water Security and Identification of Driving Factors for Shaanxi Urban Agglomeration in the Northern Foothills of Qinling Mountains, China Based on DPSIR Model [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(2): 143-153. (in Chinese)

- [10] 石晓昕, 袁重乐, 钱会, 等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的河北省水资源承载力评价及障碍因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 92-99.
- Shi Xiaoxin, Yuan Chongle, Qian Hui, et al. Evaluation and obstacle factors of water resources carrying capacity in Hebei Province based on DPSIR-TOPSIS model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32 (5) : 92-99. (in Chinese)
- [11] Jing Xiaodong, Tao Shengting, Hu Hao, et al. Spatio-temporal evaluation of ecological security of cultivated land in China based on DPSIR-entropy weight TOPSIS model and analysis of obstacle factors [J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112579.
- [12] Li Xuefen. TOPSIS model with entropy weight for eco geological environmental carrying capacity assessment [J]. Microprocessors and microsystems, 2021, 82(3): 103805.
- [13] 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.
- Lin Longzhen, Li Da, Lin Zhen. Evaluation of water resources carrying capacity in Kubuqi Desert Area based on entropy weight and TOPSIS model [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2020, 54 (4) : 640-648. (in Chinese)
- [14] 王江, 李靖, 魏红义, 等. 基于 TOPSIS 法的区域水资源承载力预测评价: 以陕西省关中地区为例[J]. 水土保持研究, 2008 (3): 161-163.
- Wang Jiang, Li Jing, Wei Hongyi, et al. The Forecast Evaluation of Water Resources Carrying Capacity of Regional Water Resources Based on TOPSIS Model: A Case Study of Guanzhong Region in Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008 (3) : 161-163. (in Chinese)
- [15] 夏欢, 陈菁, 许杨, 等. 基于改进 TOPSIS 模型的连云港市水资源承载力研究[J]. 节水灌溉, 2019(2): 86-90, 95.
- Xia Huan, Chen Jing, Xu Yang, et al. A Study on Water Resources Carrying Capacity in Lianyungang Based on the Improved TOPSIS Model [J]. Water Saving Irrigation, 2019 (2) : 86-90, 95. (in Chinese)
- [16] Liu Zufa, Zhang Bowen. Evaluating water resources carrying capacity of Pearl River Delta by entropy weight-TOPSIS model [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 967775.
- [17] 张东明, 赵霞. 甘肃省水资源承载力多维动态评价与趋势预测[J]. 人民珠江, 2026, 47(6): 17-28.
- Zhang Dongming, Zhao Xia. Multidimensional Dynamic Assessment and Trend Prediction of Water Resources Carrying Capacity in Gansu Province [J]. Pearl River, 2026, 47 (6) : 17-28.
- [18] 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 等. 东江源流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5053-5063.
- Chen Youliang, Zou Wenmin, Liu Xinggen, et al. Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed [J]. Environmental Science, 2022, 43 (11) : 5053-5063. (in Chinese)
- [19] 涂新军, 陈晓宏, 刁振举, 等. 珠江三角洲 Copula 径流模型及西水东调缺水风险分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 162-168.
- Tu Xinjun, Chen Xiaohong, Diao Zhenju, et al. Copula runoff model and risk of water shortage in west-to-east water transfer of Pearl River Delta, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (18) : 162-168. (in Chinese)
- [20] 张赵毅, 何艳虎, 谭倩, 等. 粤港澳大湾区城市群水资源配置模型[J]. 水力发电学报, 2022, 41(9): 31-43.
- Zhang Zhaoyi, He Yanhu, Tan Qian, et al. Water resources allocation model of urban agglomeration in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(9): 31-43. (in Chinese)
- [21] 白杨. 基于多源数据融合分析与预测广东珠江流域水资源安全研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- Bai Yang. Analysis and Prediction of Water Resources Security in the Pearl River Basin based on Multi-source Data Fusion [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024. (in Chinese)
- [22] Yang Jun, Su Ruijun, Wang Yanbo, et al. Evaluation of Water Security in a Water Source Area from the Perspective of Nonpoint Source Pollution[J]. Sustainability, 2025, 17(11): 4998.
- [23] 鄧坤, 黄廷林, 李楠, 等. 东江源水库沉积物污染特征及其对上覆水的影响[J]. 环境生态学, 2025, 7(9): 25-31, 40.
- Zhi Kun, Huang Tinglin, Li Nan, et al. Pollution characteristics of sediments in Dongjiang Source Reservoir and their effects on the overlying water [J]. Environmental Ecology, 2025, 7 (9) : 25-31, 40. (in Chinese)
- [24] Granata F, Nunno F D. Pathways for hydrological resilience: strategies for adaptation in a changing climate [J]. Earth Systems and Environment, 2026, 10(1): 203-31.
- [25] Yang Qichun, Almendinger J E, Zhang Xuesong, et al. Enhancing SWAT simulation of forest ecosystems for water resource assessment: A case study in the St. Croix River basin [J]. Ecological Engineering, 2018, 120: 422-431.

- [26] Zhang Biao, Li Wenhua, Xie Gaodi, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1416–1426.
- [27] Yang Mingyue, Qu Deye, Shen Yue, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Zhangye City based on combined weights and TOPSIS modeling[J]. *Water*, 2023, 15(24): 4229. DOI:10.3390/W15244229.
- [28] Bai zhongqiang, Wang Juanle, Wang Mingming, et al. Accuracy assessment of multi-source gridded population distribution datasets in China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1363. DOI: org/10.3390/su10051363.
- [29] Luan Shilong, Pan Huixiao, Shen Ruoque, et al. High resolution water quality dataset of chinese lakes and reservoirs from 2000 to 2023[J]. *Scientific Data*, 2025, 12(1): 572–583.
- [30] HUANG X, YANG J. The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2023[J]. *Earth Syst Sci Data*, 2023, 15(8): 3907–3925.
- [31] Xu Xiaolin, Li Dan, Liu Hongxi, et al. Comparative validation and misclassification diagnosis of 30-meter land cover datasets in China[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(22): 4330.
- [32] Zhang Xiao, Liu Liangyun, Zhang Tingting, et al. GWL_FCS30: a global 30 m wetland map with a fine classification system using multi-sourced and time-series remote sensing imagery in 2020[J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(1): 265–283.
- [33] Liu Huiyuan, Xia Jun, Zou Lei, et al. Comprehensive quantitative evaluation of the water resource carrying capacity in Wuhan City based on the “human – water – city” framework: Past, present and future[J]. *Journal of cleaner production*, 2022, 366: 132847.
- [34] Sun Shikai, Wang Yangbin, Liu Jing, et al. Sustainability assessment of regional water resources under the DPSIR framework [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 532: 140–148.
- [35] Asselen S V, Verburg P H, Vermaat J E, et al. Drivers of wetland conversion: a global meta-analysis[J]. *PloS one*, 2013, 8(11): e81292.
- [36] Wang Changhai, Hou Yilie, Xue Yongji. Water resources carrying capacity of wetlands in Beijing: Analysis of policy optimization for urban wetland water resources management [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1180–1191.
- [37] Vettorazzi C A, Valente R A. Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 255–267.
- [38] 谢晓倩, 王晗, 刘海振. 珠江区水资源现状与问题分析[J]. *人民珠江*, 2024, 45(S2): 7–9.
- Xie Xiaoqian, Wang Han, Liu Haizhen. Current Situation and Problem Analysis of Water Resources in Pearl River Region [J]. *Pearl River*, 2024, 45(S2): 7–9. (in Chinese)

Evaluation and Analysis of Water Resources Carrying Capacity in the Dongjiang River Basin from 2007 to 2020

HU Caixia^{1,2,3}, WANG Yushang⁴, WENG Shichuang^{2,3*}, ZHAO Yujie^{2,3}

(1. Pearl River Hydrology and Water Resources Survey Center, Guangzhou 510610, China; 2. Hydrology Bureau of Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510610, China; 3. Guangdong Provincial Observation and Research Station for Water Resources and Ecological Environment in Dongjiang River Basin, Huizhou 516100, China; 4. South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: The Dongjiang River Basin serves as a critical water supply source for the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, and its water resources conditions have direct implications for regional sustainable development. To identify the key constraints limiting water resources carrying capacity (WRCC) in this basin and ensure long-term water supply stability for the Greater Bay Area, a comprehensive evaluation covering the period from 2007 to 2020 was conducted, with the aim of providing an empirical basis for long-term water resources management strategies in the watershed. Using annual data spanning 2007 – 2020, this study comprehensively evaluated and analyzed the WRCC of the Dongjiang River Basin by integrating the DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response) conceptual framework with an entropy-weighted TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) approach. The DPSIR framework was adopted to systematically organize evaluation indicators across five interrelated subsystems, thereby capturing the complex interactions between anthropogenic activities and natural hydrological processes. The entropy weighting method

was employed to objectively determine indicator weights based on the information content of observed data, minimizing subjective bias in the composite scoring process. The TOPSIS procedure subsequently assessed annual WRCC performance by calculating each year's relative closeness to an ideal solution. To further diagnose the dominant restricting factors, an obstacle degree model was applied for each year under review, enabling in-depth exploration of the temporal evolution of major constraining factors over the study period. The WRCC index of the Dongjiang River Basin ranged from 0.38 to 0.58 throughout the study period, exhibiting an overall fluctuating upward trend, but with relatively weak stability. Comprehensive analysis revealed an improving trend in human water use as represented by the P subsystem; however, the deterioration of the R subsystem indicated significant negative ecological effects associated with the continued expansion of human activities, while the D, S, and I subsystems associated with natural factors exhibited pronounced unstable fluctuations. Combined obstacle degree analysis found that the primary constraints on carrying capacity development shifted markedly over time — from early dominance by water use intensity indicators toward a pattern of instability driven by three compounding factors: the contraction of wetland coverage, the expansion of population scale, and heightened interannual variability in precipitation. These findings suggest that future water resources governance in the Dongjiang River Basin should strategically reorient its focus from conventional water-saving and demand-side control measures toward an integrated paradigm encompassing ecological restoration and dynamic demand – supply balance regulation, in order to rehabilitate degraded ecosystems, strengthen the basin's natural hydrological buffering capacity, and sustain a stable and reliable long-term water supply under mounting socioeconomic and climatic pressures.

Keywords: DPSIR; Water resources carrying capacity; Entropy-weighted TOPSIS; Obstacle degree model

(责任编辑:高天扬)