

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.026

时空异质性视角下长江经济带水环境承载力 评估及其驱动因子探究

何伟军^{1,2}, 孟旭¹, 孔阳², 张晓燕¹

(1. 三峡大学经济与管理学院, 湖北宜昌 443002; 2. 河海大学商学院, 江苏南京 211100)

摘要:基于水资源-水环境-社会经济耦合系统,构建了长江经济带水环境承载力综合评价指标体系,运用熵权-TOPSIS法测度其2010—2019年的水环境承载力,采用标准差椭圆、全局莫兰指数以及地理探测器等方法探究其时空格局演变和主要驱动因子。结果表明:长江经济带水环境承载力由大到小依次为下游、上游和中游,排名前三的省(市)依次是上海、浙江、重庆;水环境承载力省际不存在空间依赖性,其标准差椭圆呈现稳定的东西向空间分布格局和西南走向,重心分布于湖南岳阳与湖北荆州之间;水环境承载力的首要驱动因子是万元GDP用水量,社会经济子系统对水环境承载力影响程度最大,其次为水环境和水资源子系统,且不同区域的主要驱动因子存在显著空间异质性。

关键词:长江经济带;水环境承载力;空间异质性;熵权-TOPSIS法;地理探测器;标准差椭圆
中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0215-09

Evaluation of water environmental carrying capacity of Yangtze River Economic Belt and its driving factors exploration from perspective of spatial-temporal heterogeneity // HE Weijun^{1,2}, MENG Xu¹, KONG Yang², ZHANG Xiaoyan¹ (1. College of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Based on the coupling system of water resources, water environment, and socio-economy, a comprehensive evaluation index system of water environmental carrying capacity (WECC) of the Yangtze River Economic Belt (YREB) was constructed. The entropy-TOPSIS method was used to measure WECC from 2010 to 2019, and the standard deviation ellipse, global Moran's index, and Geodetector method were combined to explore the spatial-temporal evolution pattern and main driving factors of WECC. Results show that WECC presents a descending trend in an order of downstream, upstream, and midstream of the YREB, with top three provinces (municipalities) of WECC in the YREB being Shanghai, Zhejiang, and Chongqing; there is no provincial spatial dependence of WECC in the YREB, and the standard deviation ellipse of WECC presents a stable east-west spatial distribution pattern and a trend of movement in the southwest direction, with its geographical center located between Yueyang City in Hunan Province and Jingzhou City in Hubei Province; the primary driving factor of WECC is water consumption per ten thousand CNY of GDP, the socio-economy subsystem has the greatest influence on WECC, followed by the water environment subsystem and water resources subsystem, and the main driving factors of different regions have significant spatial heterogeneity.

Key words: Yangtze River Economic Belt; water environmental carrying capacity; spatial heterogeneity; entropy-TOPSIS method; Geodetector; standard deviation ellipse

水环境承载力是衡量区域社会经济发展与水资源环境协调发展程度的重要指标^[1]。气候变化和

人类活动使得水资源短缺和水环境恶化问题愈发严峻,许多区域(流域)的水环境承载力已难以支

基金项目:国家社科基金重大项目(2019ZDA089);中央高校基本科研业务费专项(B220203012);江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX21_0445)

作者简介:何伟军(1965—),男,教授,博士,主要从事水资源技术经济及管理研究。E-mail: weijunhe@ctgu.edu.cn

通信作者:孔阳(1992—),男,博士研究生,主要从事水环境承载力和水足迹研究。E-mail: ykong1519@163.com

撑社会经济的可持续发展。水环境承载力概念是在承载力和水环境容量基础上发展而来^[24],与水资源承载力相似,表征对象都是自然水系统,区别在于水资源承载力侧重于体现水环境在“水量”上的要求,即水体供给水资源的能力,而水环境承载力则是一个综合概念,综合反映了自然水系统提供水资源供给、水环境纳污和水生态服务功能的能力。因此,水资源承载力可视为水环境承载力的一个分量。

目前关于水环境承载力的相关研究主要集中在国内,国外对于水环境承载力的直接研究较少,大都将其归纳到可持续发展领域进行研究^[5-6]。国内相关研究主要集中在水环境承载力评价^[7-8]、水环境承载力预测及预警^[9]等方面,而对水环境承载力影响因素分析的研究较少^[10]。就水环境承载力评价而言,现有研究主要涉及城市、区域以及流域 3 个尺度,主要以干旱、半干旱、水污染严重地区为主,极少关注水资源相对富集但生态环境较脆弱的地区,例如长江流域。水环境承载力评价的研究方法主要概括为单指标评价和指标体系评价两大类,单指标评价法较为局限,往往只能针对某种特定资源或特定污染物进行评价,因而仅能反映地区承载力的某一特定方面;相比较而言,指标体系评价法糅合了多个指标,可以较为全面地反映不同指标对地区承载力的实质影响差异,因而使用较为广泛。指标体系评价法主要包括主成分分析法、投影寻踪评价模型、模糊综合评价、熵权法、集对分析等,该类方法的关键在于指标体系构建的科学性、全面性和可操作性。此外,现有的影响因素分析研究主要集中于水环境承载力时间或空间单一维度,将水环境承载力时空格局和空间依赖性纳入相关研究的较为少见,研究结果通常难以同时反映水环境承载力的时空异质性及其动态变化,所提改进路径往往缺乏针对性。因此,有必要基于时空视角开展区域水环境承载力动态评估,探究其空间关联关系及动态转移特征,识别其提升路径,从而为差异化“以水定产”政策的制定提供重要参考。

长江经济带是我国区域协调发展和生态文明建设的战略要地,肩负着推动全国高质量发展的重任,现阶段沿江流域的水生态环境状况仍不理想^[11]。多年观测显示,长江经济带以全国 21% 的国土面积排放了 40% 以上的废水总量,单位面积 COD、NH₃-N、SO₂、NO_x、挥发性有机物排放强度是全国平均水平的 1.5~2.0 倍^[12]。2019 年 I~Ⅲ类水质占比 91.7%,与 2016 年相比增长 9.4 个百分点,长江水质达到近 20 年以来最优^[13],水环境状况有所改

善。然而,长江经济带水生生态状况堪忧,表现出显著的空间异质性,部分国控断面水质无法稳定达标,劣 V 类断面尚未完全消灭,水环境压力依然较大^[14]。当前,长江经济带面临经济高质量发展与水生态环境保护双重压力,水环境承载力难以实现对社会经济发展的可持续支撑,与此同时,不同子区域间的水生态环境状况时空差异显著且可能存在空间关联。长江大保护背景下,如何在发展经济的同时实现水生态环境保护和水资源可持续利用已成为长江经济带可持续发展亟需破解的难题。因此,客观评估长江经济带水环境承载力现状及其时空演变特征,并探究其提升路径,对长江经济带差异化政策的制定具有重要参考意义,也是促进长江经济带高质量发展和保障水安全的重要前提。

本文从水资源-水环境-社会经济耦合系统出发,构建了长江经济带水环境承载力评价指标体系,结合熵权-TOPSIS 法、标准差椭圆 (standard deviational ellipse, SDE) 和全局莫兰指数 (I) 等方法,综合分析长江经济带 2010—2019 年水环境承载力时空动态变化,并借助地理探测器模型探究水环境承载力的主要驱动因子,以期对长江经济带水环境承载力的提升和经济高质量发展提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 熵权-TOPSIS 法

熵权-TOPSIS 法是一种利用熵权法确定指标权重,并通过 TOPSIS 模型对决策目标进行排序的综合评估方法^[15],因其客观科学、易于操作等优点而被广泛使用。本文综合考虑多位学者对水环境承载力的评价标准,将水环境承载力划分为 5 种状态^[8,16],具体标准见表 1。

表 1 水环境承载力评价标准

Table 1 Evaluation standard of water environmental carrying capacity		
水环境承载力	评判等级	等级说明
[0,0.3)	低级	水环境承载力严峻
[0.3,0.4)	警戒	水环境承载力超载
[0.4,0.5)	中级	水环境承载力合理
[0.5,0.6)	良好	水环境承载力协调
[0.6,1]	优质	水环境承载力优秀

1.1.2 SDE 与重心模型

SDE 是定量分析点要素空间分布特征的常用方法,可从全局角度定量解释地理要素空间分布的中心性、展布性、方向性和空间形态等特征^[17]。本文的 SDE 重心由长江经济带 11 省(市)水环境承载力评估值以及各省(市)的地理位置加权计算

而来,通过比较椭圆重心与研究区域地理中心的相对位置以及重心自身的偏移情况来研究要素各部分的变化情况。

1.1.3 空间自相关

全局莫兰指数反映整体空间范围内的空间依赖程度,取值范围介于-1和1之间^[18]。当全局莫兰指数不为0且通过显著性检验时,意味着长江经济带各省(市)的水环境承载力在此年份存在空间自相关关系。本文综合考虑了空间距离和经济强度构建了经济-空间距离空间权重矩阵,如下式所示:

$$w_{ij} = \left(\frac{D_i}{D_j} \right)^{1/2} / d_{ij} \quad (i \neq j) \quad (1)$$

式中: w_{ij} 为经济-空间距离空间权重矩阵元素; d_{ij} 为区域 i 和 j 的空间距离; D_i 和 D_j 分别为区域 i 和 j 的 GDP。本文还基于省会城市之间的空间距离和地理“质点”(利用国家地理中心大地原点的界定方法确定)之间的空间距离分别构建了2个空间权重矩阵。对比分析基于上述3个空间权重矩阵计算得到的全局莫兰指数,以确保空间自相关关系的准确性。

1.1.4 地理探测器

地理探测器是一种用于分析某种现象的空间异质性,并且探索这种异质性背后驱动因素的统计学方法^[19]。地理探测器可以克服自变量间的共线性,探求因变量在空间分布上的相似程度^[20]。本文利用地理探测器中的因子探测,测定水环境承载力驱动因子及其作用大小,具体计算公式为

$$q = 1 - \sum_{h=1}^L (N_h \sigma_h^2) / (N \sigma^2) \quad (2)$$

式中: q 为驱动因子对水环境承载力的驱动力; h 为指标分层数,采用 K-means 聚类法将各探测因子等分为3层; N_h 和 N 分别为第 h 层和全区水环境承载力评价单元数; σ_h^2 、 σ^2 分别为第 h 层和全区水环境承载力的方差。

1.2 指标体系构建

通过文献调研,对相关文献中的水环境承载力指标体系进行归纳统计,共得到95个水资源指标、115个水环境指标、76个社会经济指标。为确保指标筛选的科学性和客观性,结合指标来源、领域专家咨询、词频分析,删除意义相近、频次低于4、数据获取难的指标,得到25个水环境承载力相关指标,构建了长江经济带水环境承载力综合评价指标体系,如图1所示。

1.3 数据来源

采用的面板数据时间跨度为2010—2019年,每年数据均包含11个省(市)的25个指标数据,样本

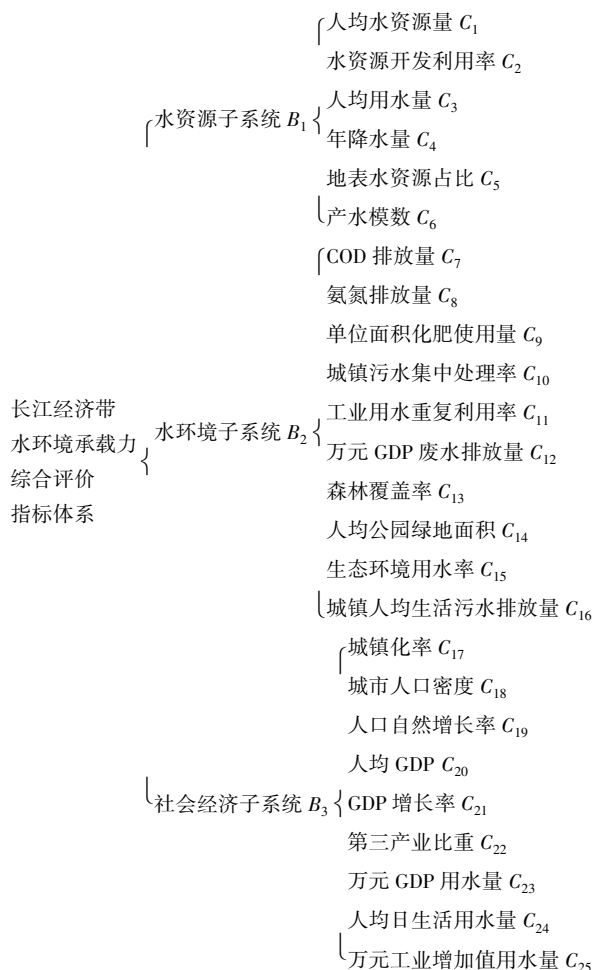


图1 长江经济带水环境承载力综合评价指标体系

Fig.1 Comprehensive evaluation index system of water environmental carrying capacity for Yangtze River Economic Belt

量为275个。具体指标包含水资源、水环境和社会经济3个方面,其中水资源开发利用率、人均水资源量、地表水资源占比、年降水量、产水模数等水资源相关指标的数据来源于长江经济带各省(市)《水资源公报》(2010—2019),人均用水量来源于《中国水利统计年鉴》;COD排放量、氨氮排放量、城镇污水集中处理率、人均公园绿地面积等生态环境类指标数据来源于《中国环境统计年鉴》(2011—2020)和各省(市)《统计年鉴》(2011—2020);城市人口密度、人均GDP、第三产业比重等社会经济类指标数据来源于各省(市)《统计年鉴》(2011—2020)。除单位面积化肥使用量、生态环境用水率、万元工业增加值用水量等是通过上述原始数据计算得到外,其他指标数据均是直接通过上述数据库查阅得到。针对部分省份极少数缺乏数据的指标,采用线性插值法对其补充完善。

2 结果与分析

2.1 长江经济带水环境承载力评价及分析

长江经济带上、中、下游各省(市)2010—2019

年水环境承载力评估结果如图 2 所示,水环境承载力由大到小依次为下游、上游和中游,省际差异显著。这是因为水环境承载力是水资源-水环境-社会经济复合系统相互作用而呈现出来的一个综合性指标,自然环境的好坏并不是水环境承载力高低的充分条件,除了自然环境外,水环境承载力还受到技术水平和社会治理水平的调控,具有动态变化的特征。长江经济带中、上游省(市)更接近长江流域的水源地,水资源禀赋更高,但其经济社会发展水平、技术水平、社会治理水平等相较于下游省(市)存在巨大劣势,使得最终呈现出了上述结果。水环境承载力水平位列前三的分别是上海、浙江、重庆,3 省(市)长年保持优质等级的水环境承载力;而承载力平均值最低的 3 个省依次为湖南、安徽、江西,均在 0.33 左右,处于水环境警戒等级。具体来说,浙江省与上海市地处长三角地区,经济发展水平较高,社会生产生活中非常注重集约高效利用水资源,并投入大量资金用于绿色创新技术研发和生态环境治理,使得自然水系统提供的水环境承载力与经济社会发展所带来的压力渐趋协调,因而水环境承载力总体在空间分布上处于优质态势。江苏是下游地区唯一的水环境承载力逐年下降的省份,其水环境子系统得分明显低于另外两个子系统,原因是以苏锡常为代表的地区大量承接上海市的第二产业,经济飞速发展的同时伴随着大量的水污染和工业耗水,加之节水治污效果不显著,直接导致江苏水环境承载力显著低于上海和浙江。中游地区水资源虽然丰富,但是其水环境子系统和社会经济子系统得分在长江经济带中均为最低,综合表现为水环境承载力一直濒临低级线。11 个省(市)中仅湖南省水环境承载力较长一段时间内均处于低级或警戒状态,水环境和经济发展水平成为制约湖南水环境承载力提高的原因之一。从原始数据来看,湖南省的 COD 排放量、氨氮排放量、万元 GDP 用水量都位居 11 个省(市)前

列,存在水资源消耗巨大、利用效率低、污染严重等问题,加之城市污水处理能力不足,由此降低了其水环境承载力。

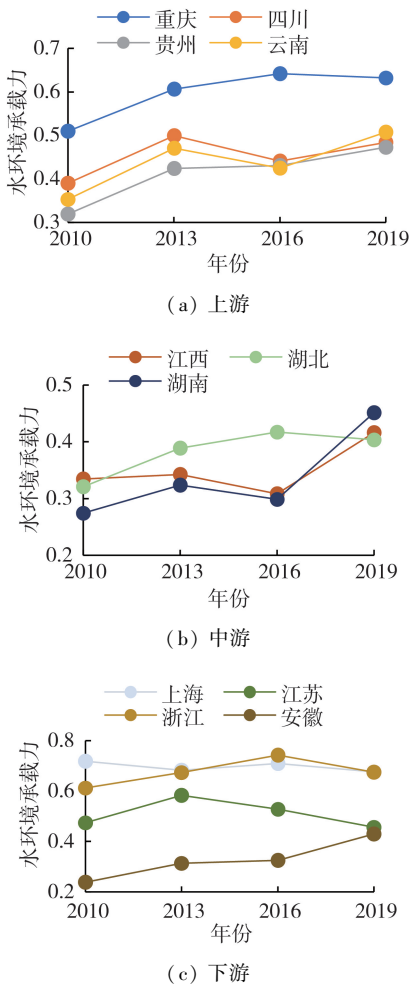


图 2 各省(市)水环境承载力评估结果

Fig. 2 Evaluation results of water environmental carrying capacity in different provinces

长江经济带各省(市)水环境承载力等级分布情况如表 2 所示,长江经济带水环境承载力的变化趋势大体分为 3 个阶段:增长期(2010—2013 年)、波动下降期(2014—2016 年)、反弹期(2017—2019

表 2 各省(市)水环境承载力等级分布

Table 2 Distribution of water environmental carrying capacity grade of different provinces

年份	上海	江苏	浙江	安徽	江西	湖北	湖南	重庆	四川	贵州	云南
2010	优质	中级	优质	低级	警戒	警戒	低级	良好	警戒	警戒	警戒
2011	优质	中级	优质	警戒	警戒	警戒	低级	良好	警戒	警戒	警戒
2012	优质	良好	优质	警戒	警戒	警戒	警戒	优质	中级	警戒	警戒
2013	优质	良好	优质	警戒	警戒	警戒	警戒	优质	中级	中级	中级
2014	优质	中级	优质	警戒	警戒	警戒	警戒	优质	中级	良好	中级
2015	优质	良好	优质	警戒	警戒	警戒	警戒	优质	中级	中级	中级
2016	优质	良好	优质	警戒	警戒	中级	低级	优质	中级	中级	中级
2017	优质	中级	优质	警戒	警戒	警戒	警戒	良好	中级	中级	中级
2018	优质	中级	优质	中级	中级	中级	警戒	优质	中级	中级	中级
2019	优质	中级	优质	中级	中级	中级	中级	优质	中级	中级	良好
均值	优质	良好	优质	警戒	警戒	警戒	警戒	良好	中级	中级	中级

年)。2010—2013 年,上、中、下游水环境承载力均呈较大幅度上升。这得益于 2012 年初国务院下发《关于实行最严格水资源管理制度的意见》,“三条红线”及其严格考核促使各地积极降低人类活动给自然水系统所施加的压力,进而使得整个地区水环境承载力均有不同程度的提高。2014—2016 年,长江经济带水环境承载力呈小范围波动下降趋势,除安徽外,下游及上游其他省(市)处在水环境承载力中级以上等级,但是中游地区,尤其是江西、湖南省,水环境承载力处于警戒等级或由警戒等级降至低级。多年“经济先行”的粗放型发展对水生态环境造成了严重破坏,短期内难以修复,这也是长江经济带 2014—2016 年水环境承载力停滞不前的重要原因之一。2017—2019 年,长江经济带 11 个省(市)水环境承载力均呈较大幅度回升且达到 10 年来的最大值,原因是基于近年来的严格水资源管理,上游和中游省(市)凭借后发优势,推动经济增长与水资源利用协调发展,而下游省(市)经过多年产业结构优化,用水结构和水污染治理得到大幅优化,从而使整个区域水环境承载力得以提升。

2.2 长江经济带水环境承载力空间格局分析

2.2.1 水环境承载力空间集聚特征

借助 Geoda 1.16 软件构造 3 种不同的空间权重矩阵,获得长江经济带水环境承载力 2010—2019 年的全局自相关莫兰指数(表 3),其中 p 值为所观测到的空间模式由某一随机过程创建而成的概率,一般来说,在 90% 置信度下,即 $p < 0.01$ 时,可以认为莫兰指数显著有效。通过结果对比分析可知,2010—2019 年长江经济带全局莫兰指数值基本小于 0,且均未通过显著性检验,这表明长江经济带各省(市)水环境承载力不存在显著空间自相关关系,表现出空间异质性和独立性。针对不同全局莫兰指数,经济-空间距离空间权重矩阵对应的全局莫兰指数(I_1)2013 年从正值转变成负值,表明长江经济带

由“高-高”集聚和“低-低”集聚类型逐渐转变为“高-低”集聚和“低-高”集聚类型。从省(市)来看,下游的上海市自身水环境承载力高,与其相邻的浙江省水环境承载力也较高,呈现出“高-高”集聚特征,上海市对周边地区的水环境承载力表现为扩散效应;“高-低”集聚区主要在上游的重庆市和中游的湖南省,“高-低”集聚区对周边水环境承载力低的省(市)表现为极化效应,此类省(市)数量较少。省会城市距离空间权重矩所对应的全局莫兰指数(I_2)和质点距离空间权重矩所对应的全局莫兰指数(I_3)在研究期间均为负值,表明长江经济带水环境承载力一直保持“高-低”集聚或“低-高”集聚特征,但年际间存在一定的波动性,反映出水环境承载力全局空间格局关系特征尚未形成稳态。由于以上 3 种全局莫兰指数均未通过显著性检验,因此,从整体来看,长江经济带水环境承载力在研究区间内不存在显著的空间依赖性。无论是水环境承载力高的上海和浙江,还是水环境承载力相对较低的中游 3 省,都不能倚赖周围省(市)生态环境的正外部性而产生“搭便车”心理,当务之急尽力提高本地的水环境承载力等级。

2.2.2 长江经济带水环境承载力空间偏移演变

为准确揭示长江经济带 2010—2019 年水环境承载力空间演化趋势,结合 ArcGIS 中的中位数中心和 SDE 的重心偏移及 SDE 分布等情况进行度量,结果如图 3 所示。将长江经济带当作一个平面,水环境承载力的重心相当于这个地理平面的质心,研究水环境承载力重心的偏移情况,可以分析出长江经济带上、中、下游水环境承载力的空间分布格局变化。

从长江经济带水环境承载力的椭圆分布形状来看,其东-西半轴始终大于南-北半轴,呈明显东西分布格局,这与长江经济带地理空间分布一致。研究期内,长江经济带水环境承载力的椭圆方位角 θ 始

表 3 水环境承载力全局莫兰指数

Table 3 Global Moran's index of water environmental carrying capacity

年份	全局莫兰指数			全局莫兰指数 p 值		
	I_1	I_2	I_3	I_1	I_2	I_3
2010	0.008	-0.140	-0.150	0.174	0.527	0.386
2011	0.002	-0.137	-0.145	0.204	0.565	0.443
2012	0.018	-0.139	-0.156	0.149	0.559	0.357
2013	-0.007	-0.115	-0.117	0.262	0.820	0.776
2014	-0.070	-0.097	-0.079	0.713	0.969	0.722
2015	-0.050	-0.104	-0.096	0.541	0.955	0.943
2016	-0.033	-0.113	-0.113	0.414	0.846	0.826
2017	-0.037	-0.116	-0.115	0.432	0.799	0.803
2018	-0.056	-0.106	-0.096	0.589	0.928	0.950
2019	-0.106	-0.092	-0.074	0.945	0.898	0.667

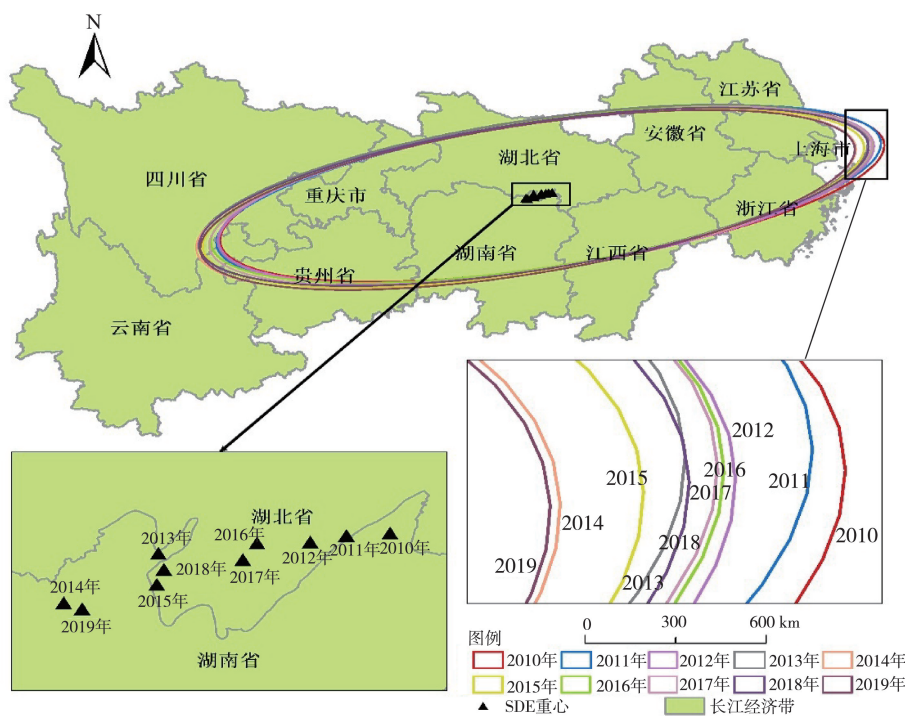


图3 水环境承载力的重心偏移与 SDE 发展趋势分布

Fig.3 Center of gravity shift and SDE development trend distribution of water environmental carrying capacity

终在 77° 左右,变化范围在 1° 以内,这表明长江经济带水环境承载力重心偏移的方向相对稳定,基本上在同一条直线上移动。结合长江经济带水环境承载力 SDE 的移动轨迹和相关参数可知,研究期内,SDE 的重心分布于湖南岳阳临湘市与湖北荆州监利市之间,其中 2010—2014 年呈现严格的西南走向(湖南→湖北→湖南),2014—2016 年反向移动(湖南→湖北),2016—2019 年再次呈现严格的西南走向(湖北→湖南)。长江经济带水环境承载力的 SDE 重心先后朝着“西南→东北→西南”方向动态移动,表明 2010—2014 年上中游水环境承载力整体增量大于下游,2014—2016 年上、中游水环境承载力整体增量小于下游,2016—2019 年上、中游水环境承载力整体增量大于下游。综上,长江经济带 2010—2019 年水环境承载力重心总体呈现向西南方向移动趋势,整体最终向西南方偏移了 74.8 km,其中以 2012—2013 年和 2018—2019 年偏移量最大,分别为 14.2 km 和 11.9 km,表明长江经济带上、中游省(市)的水环境承载力总体呈稳步提升状态,打破了“东强西弱”的初始空间分布格局。究其原因,依托水资源禀赋优势,上、中游省(市)近年来大力发展经济,提高社会治理水平,不断积极研发和引进先进的节水治污管理理念和治理技术,最终使得水环境承载力实现增长,区域水环境承载力省际差异呈现缩小态势。

2.3 长江经济带水环境承载力驱动因子探测

根据上述长江经济带水环境承载力时空分布特征分析,不同时段水环境承载力的空间分异性差异较大。因此,采用地理探测器模型探测驱动因子对长江经济带水环境承载力空间分异特征的驱动力大小。在使用地理探测器之前,先利用 K-means 聚类将驱动因子 C 分为 3 类(层),将连续变量转化为类别变量,再利用 Geodetector 软件探测长江经济带水环境承载力驱动因子大小并排序。长江经济带总体及上、中、下游探测结果如表 4、表 5 所示,其中 q 值为因子 C 对水环境承载力的驱动力,表 4 只列出了 2010、2013、2016、2019 年前 10 位的主要驱动因子,结果表明不同驱动因子对水环境承载力的影响具有显著时空异质性。

从均值来看,整个样本期内各驱动因子对长江经济带水环境承载力的影响程度由大到小依次为:万元 GDP 用水量(C_{23})、城镇化率(C_{17})、城镇人均生活污水排放量(C_{16})、人均 GDP(C_{20})、GDP 增长率(C_{21})、第三产业比重(C_{22})、人口自然增长率(C_{19})、生态环境用水率(C_{15})、万元 GDP 废水排放量(C_{12})和水资源开发利用率(C_2)。

从各子系统驱动因子的变化趋势来看,社会经济子系统中万元 GDP 用水量常年位于第一,这表明长江经济带水环境承载力与用水强度存在最紧密关联;水环境子系统中城镇人均生活污水排放量、生态

表 4 长江经济带水环境承载力驱动因子探测结果

Table 4 Detection results of driving factors of water environmental carrying capacity in Yangtze River Economic Belt

排名	驱动因子					驱动因子 q 值				
	2010 年	2013 年	2016 年	2019 年	均值	2010 年	2013 年	2016 年	2019 年	均值
1	C_{23}	C_{23}	C_{23}	C_{23}	C_{23}	0.90	0.76	0.90	0.91	0.85
2	C_{15}	C_{20}	C_{16}	C_{17}	C_{17}	0.75	0.60	0.79	0.66	0.62
3	C_{20}	C_{19}	C_{20}	C_8	C_{16}	0.74	0.59	0.70	0.63	0.60
4	C_{17}	C_{17}	C_{17}	C_7	C_{20}	0.73	0.59	0.67	0.61	0.59
5	C_{16}	C_{16}	C_{19}	C_{22}	C_{21}	0.61	0.59	0.55	0.60	0.51
6	C_{19}	C_{21}	C_{22}	C_{16}	C_{22}	0.51	0.58	0.43	0.56	0.50
7	C_5	C_{22}	C_{25}	C_9	C_{19}	0.50	0.44	0.35	0.43	0.43
8	C_2	C_{12}	C_{14}	C_{20}	C_{15}	0.50	0.42	0.33	0.42	0.37
9	C_{22}	C_2	C_8	C_{14}	C_{12}	0.48	0.32	0.32	0.35	0.32
10	C_{21}	C_{15}	C_{15}	C_{15}	C_2	0.42	0.31	0.31	0.35	0.31

表 5 各区域水环境承载力驱动因子探测结果

Table 5 Detection results of driving factors of water environmental carrying capacity in different regions

排名	驱动因子			驱动因子 q 值		
	上游	中游	下游	上游	中游	下游
1	C_{17}	C_{11}	C_{23}	0.92	0.72	0.84
2	C_5	C_{10}	C_{20}	0.87	0.60	0.72
3	C_{20}	C_{20}	C_{11}	0.83	0.59	0.72
4	C_{11}	C_2	C_{10}	0.82	0.59	0.70
5	C_{23}	C_{21}	C_{16}	0.77	0.56	0.58
6	C_2	C_{17}	C_{21}	0.64	0.55	0.50
7	C_6	C_6	C_{12}	0.58	0.55	0.42
8	C_{14}	C_{25}	C_{24}	0.57	0.52	0.37
9	C_3	C_{12}	C_7	0.56	0.52	0.36
10	C_1	C_7	C_9	0.53	0.48	0.33

环境用水率和万元 GDP 废水排放量驱动力持续上升,说明污水废水排放强度和生态环境用水对长江经济带水环境承载力的空间分异性有较强影响;水资源子系统中水资源开发利用因子驱动力显著,意味着水资源的不断开发对自然水系统功能的发挥具有一定支撑作用。

分时段来看,2010—2019 年长江经济带的水环境承载力呈现出社会经济因子影响力占主导地位转向水环境因子影响力和社会经济因子影响力不相上下、水资源因子驱动力稳步提升的变化趋势。氨氮排放量、COD 排放量较 2019 年之前显著提升,同时人均 GDP、GDP 增长率、人口自然增长率的驱动力开始减弱,即社会经济子系统的影响力不断降低。

如表 5 所示,社会经济发展水平的影响程度在上、中、下游地区依次递增;中游省份水环境子系统对水环境承载力的影响强于上游和下游省(市),城镇污水集中处理率、万元 GDP 废水排放量和 COD 排放量对中下游地区水环境承载力的提升具有很强的推动作用,但对上游地区影响不大;水资源子系统中地表水资源占比、人均用水量 and 人均水资源量对

上游省(市)水环境承载力的影响较大,却对中、下游地区的影响非常小。总的来说,长江经济带上、中、下游水环境承载力的驱动因子重要性排序明显不同,呈现出显著的空间异质性。

3 结 论

a. 从承载等级评估来看,长江经济带水环境承载力整体呈现提升态势,由大到小依次为下游、上游和中游。水环境承载力省际差异显著,均值位列前三的分别是上海、浙江和重庆,位列最后 3 位的依次为湖南、安徽、江西。

b. 从时空格局演化来看,长江经济带水环境承载力的重心总体呈现向西南方向移动趋势,长江经济带上中游省(市)的水环境承载力呈稳步提升状态,区域间差距缩小;长江经济带各省(市)的水环境承载力不存在显著空间自相关关系,水生态环境治理合力还未形成,水环境承载力整体水平仍然偏低,有较大提升空间。

c. 从驱动因子分解来看,万元 GDP 用水量是水环境承载力的最主要驱动因子,水环境子系统中城镇人均生活污水排放量、生态环境用水率和万元 GDP 废水排放量对长江经济带水环境承载力有较大影响;上、中、下游水环境承载力驱动因子的重要程度呈现出显著空间异质性。

参考文献:

- [1] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报, 1998, 13(1): 58-62. (CUI Fengjun. The carrying capacity of municipal water environment and its case study [J]. Journal of Natural Resources, 1998, 13(1): 58-62. (in Chinese))
- [2] 张万顺, 李琳, 彭虹, 等. 面向水环境改善的城市河网动态水环境容量[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 167-175. (ZHANG Wanshun, LI Lin, PENG Hong, et al. Dynamic

- water environment capacity of urban river network for water environment improvement [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 167-175. (in Chinese))
- [3] 华祖林,程浩森.一种考虑容量沿程变化的水环境容量计算方法[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(6):505-510. (HUA Zulin, CHENG Haomiao. A method for estimating water environmental capacity based on its variation along river [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43 (6): 505-510. (in Chinese))
- [4] 门宝辉,牛晓赞,刘灿均,等.滦河承德段水环境容量计算及初始分配[J].水资源保护,2022,38(2):168-175. (MEN Baohui, NIU Xiaoyun, LIU Canjun, et al. Calculation and initial allocation of water environmental capacity in Chengde section of Luanhe River [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38 (2): 168-175. (in Chinese))
- [5] AIT-AOUDIAM N, BEREZOWSKA-AZZAG E. Water resources carrying capacity assessment: the case of Algeria's capital city [J]. *Habitat International*, 2016, 58: 51-58.
- [6] RIJSBERMAN M A, VAN DE VEN F H M. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20(3): 333-345.
- [7] 万炳彤,赵建昌,鲍学英,等.基于SVR的长江经济带水环境承载力评价[J].中国环境科学,2020,40(2): 896-905. (WAN Bingtong, ZHAO Jianchang, BAO Xueying, et al. Evaluation of water environment bearing capacity of Yangtze River Economic Belt based on SVR model [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40 (2): 896-905. (in Chinese))
- [8] 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. (HE Gang, XIA Yeling, QIN Yong, et al. Evaluation and spatial-temporal dynamic change of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26 (1): 287-292. (in Chinese))
- [9] 刘丹,王烜,曾维华,等.基于ARMA模型的水环境承载力超载预警研究[J].水资源保护,2019,35(1):52-55. (LIU Dan, WANG Xuan, ZENG Weihua, et al. Research on overload warning of water environment carrying capacity based on ARMA model [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1): 52-55. (in Chinese))
- [10] 崔丹,李瑞,陈岩,等.基于结构方程的流域水环境承载力评价:以湟水流域小峡桥断面上游为例[J].环境科学学报,2019,39(2):624-632. (CUI Dan, LI Rui, CHEN Yan, et al. An evaluation of the water environmental carrying capacity using structural equation modeling: a case study of the upstream areas of Xiaoxia Bridge section in Huangshui River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(2): 624-632. (in Chinese))
- [11] 李焕,黄贤金,金雨泽,等.长江经济带水资源人口承载力研究[J].经济地理,2017,37(1):181-186. (LI Huan, HUANG Xianjin, JIN Yuze, et al. Population carrying capacity of water resources in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Economic Geography*, 2017, 37 (1): 181-186. (in Chinese))
- [12] 胡锐,李娜,廖琪,等.长江经济带沿江化工企业问题与对策分析[J].环境与可持续发展,2019,44(5):43-47. (HU Rui, LI Na, LIAO Qi, et al. Analysis on the problems and countermeasures of the chemical enterprises along the Yangtze River Economic Zone [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44 (5): 43-47. (in Chinese))
- [13] 郝吉明,王金南,张守攻,等.长江经济带生态文明建设若干战略问题研究[J].中国工程科学,2022,24(1): 141-147. (HAO Jiming, WANG Jinnan, ZHANG Shougong, et al. Several strategic issues for the construction of ecological civilization in Yangtze River Economic Belt [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24 (1): 141-147. (in Chinese))
- [14] 杨荣金,孙美莹,张乐,等.长江经济带生态环境保护的若干战略问题[J].环境科学研究,2020,33(8):1795-1804. (YANG Rongjin, SUN Meiyang, ZHANG Le, et al. Strategic issues of ecological environment protection in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33 (8): 1795-1804. (in Chinese))
- [15] 马雪莹,邵景安,徐新良.基于熵权-TOPSIS的山区乡镇通达性研究:以重庆市石柱县为例[J].地理科学进展,2016,35(9):1144-1154. (MA Xueying, SHAO Jing'an, XU Xinliang. Rural transportation accessibility in mountainous areas based on the entropy-weight TOPSIS method: a case study of Shizhu County, Chongqing Municipality [J]. *Progress in Geography*, 2016, 35 (9): 1144-1154. (in Chinese))
- [16] 田培,张志好,许新宜,等.基于变权TOPSIS模型的长江经济带水资源承载力综合评价[J].华中师范大学学报(自然科学版),2019,53(5):755-764. (TIAN Pei, ZHANG Zhihao, XU Xinyi, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on variable weight TOPSIS model [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)* 2019, 53 (5): 755-764. (in Chinese))
- [17] 赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986. (ZHAO Lu, ZHAO Zuoquan. Projecting the spatial variation of economic based on the specific ellipses in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34 (8): 979-986. (in

- Chinese))
- [18] 张国俊,王珏哈,吴坤津,等. 中国三大城市群经济与环
境协调度时空特征及影响因素[J]. 地理研究,2020,39
(2): 272-288. (ZHANG Guojun, WANG Juehan, WU
Kunjin, et al. Spatial-temporal characteristics and
influencing factors of coordination between economic and
environmental development of three major urban
agglomerations in China [J]. Geographical Research,
2020,39(2):272-288. (in Chinese))
- [19] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学
报, 2017, 72 (1): 116-134. (WANG Jinfeng, XU
Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J].
Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116-134. (in
Chinese))
- [20] 舒天衡,任一田,申立银,等. 大型城市消费活力的空间
异质性及其驱动因素研究:以成都市为例[J]. 城市发
展研究, 2020, 27 (1): 16-21. (SHU Tianheng, REN
Yitian, SHEN Liyin, et al. Study on spatial heterogeneity of
consumption vibrancy and its driving factors in large city:
a case of Chengdu City [J]. Urban Development Studies,
2020,27(1):16-21. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-02-24 编辑:施业)

(上接第 144 页)

- [72] 路剑飞,于吉涛,陈子桑. 中长期水文预报的模型辨识
及预测研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2012,
51(2): 107-112. (LU Jianfei, YU Jitao, CHEN Zishen.
Model identification and prediction research of medium
and long-term hydrologic forecast [J]. Acta Scientiarum
Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012, 51 (2): 107-
112. (in Chinese))
- [73] SINHA T, SANKARASUBRAMANIAN A, MAZROOEI A.
Decomposition of sources of errors in monthly to seasonal
streamflow forecasts in a rainfall-runoff regime[J]. Journal
of Hydrometeorology, 2014, 15(6): 2470-2483.
- [74] PENN C A, CLOW D W, SEXSTONE G A, et al. Changes
in climate and land cover affect seasonal streamflow
forecasts in the Rio Grande headwaters[J]. Journal of the
American Water Resources Association, 2020, 56 (5):
882-902.
- [75] KWON H H, DE ASSIS DE SOUZA FILHO F, BLOCK P,
et al. Uncertainty assessment of hydrologic and climate
forecast models in northeastern Brazil [J]. Hydrological
Processes, 2012, 26(25): 3875-3885.
- [76] CROCHEMORE L, RAMOS M H, PAPPENBERGER F.
Bias correcting precipitation forecasts to improve the skill
of seasonal streamflow forecasts[J]. Hydrology and Earth
System Sciences, 2016, 20(9): 3601-3618.
- [77] MAZROOEI A, SINHA T, SANKARASUBRAMANIAN A,
et al. Decomposition of sources of errors in seasonal
streamflow forecasting over the U. S. Sunbelt [J]. Journal
of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120 (23):
11809-11825.
- [78] SHI Yuzhi, ZHOU Huicheng. Research on monthly flow
uncertain reasoning model based on cloud theory [J].
Science China Technological Sciences, 2010, 53 (9):
2408-2413.
- [79] DECHANT C M, MORADKHANI H. Toward a reliable
prediction of seasonal forecast uncertainty: addressing
model and initial condition uncertainty with ensemble data
assimilation and sequential Bayesian combination [J].
Journal of Hydrology, 2014, 519: 2967-2977.
- [80] KOSTER R D, WALKER G K, MAHANAMA S P P, et al.
Soil moisture initialization error and subgrid variability of
precipitation in seasonal streamflow forecasting [J].
Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(1): 69-88.
- [81] MAHANAMA S, LIVNEH B, KOSTER R, et al. Soil
moisture, snow, and seasonal streamflow forecasts in the
United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13
(1): 189-203.
- [82] 刘章君,郭生练,许新发,等. 贝叶斯概率水文预报研究
进展与展望[J]. 水利学报, 2019, 50 (12): 1467-1478.
(LIU Zhangjun, GUO Shenglian, XU Xinfu, et al. Bayesian
probabilistic hydrological forecasting: progress and
prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50
(12): 1467-1478. (in Chinese))
- [83] KRZYSZTOFOWICZ R. Bayesian system for probabilistic
river stage forecasting [J]. Journal of Hydrology, 2002, 268
(1/2/3/4): 16-40.
- [84] 张铭,李承军,张勇传. 贝叶斯概率水文预报系统在中
长期径流预报中的应用 [J]. 水科学进展, 2009, 20
(1): 40-44. (ZHANG Ming, LI Chengjun, ZHANG
Yongchuan. Application of the Bayesian statistic
hydrological forecast system to middle- and long-term
runoff forecast [J]. Advances in Water Science, 2009, 20
(1): 40-44. (in Chinese))
- [85] 杨涛,徐炜,姜宏广. 基于 Box-Cox 算法的中期径流贝
叶斯概率预报方法 [J]. 水电能源科学, 2018, 36 (6):
17-21. (YANG Xun, XU Wei, JIANG Hongguang.
Medium-term runoff Bayesian probability forecasting
method based on box-cox model [J]. Water Resources and
Power, 2018, 36(6): 17-21. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-01-30 编辑:施业)