



长江干线航道整治建筑物技术状况 时空特征分析^{*}

孙 辉^{1,2}, 蒋仲廉^{1,2}, 应江龙^{1,2}, 余 珍³, 肖金龙³

(1. 武汉理工大学, 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学, 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;

3. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040)

摘要: 随长江干线航道基础设施体系的逐步完善, 航道整治建筑物养护问题受到广泛关注。以长江干线航道养护数据为基础, 通过泰尔指数、莫兰指数、标准距离等计算分析, 研究航道整治建筑物技术状况时空特征。结果表明: 航道整治建筑物数量及技术状况总体上逐年提升, 2019 年是泰尔指数转折发生年份; 丁坝和护滩带等整治建筑物的养护需要重点关注; 长江干线航道整治建筑物技术状况分布呈现显著的集聚效应, 上游航道整治建筑物技术状况分布相较中、下游更集中。

关键词: 航道整治建筑物; 时空分析; 泰尔指数; 莫兰指数; 标准距离

中图分类号: U617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0128-07

Temporal-spatial characteristics of technical status of channel regulation buildings in trunk stream of the Yangtze River

SUN Hui^{1,2}, JIANG Zhonglian^{1,2}, YING Jianglong^{1,2}, YU Zhen³, XIAO Jinlong³

(1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

3. Changjiang Waterway Institute of Planning and Design, Wuhan 430040, China)

Abstract: With the gradual improvement of the infrastructure system in the trunk stream of the Yangtze River channel, the problem of the maintenance of waterway regulation buildings is becoming more and more prominent. Based on the fundamental maintenance data of the Yangtze River channel, we calculate and analyze Thiel index, Moran index and standard distance to study the spatial-temporal characteristics of the technical status of channel regulation buildings. The results show that the number of channel regulation buildings and the technical condition grade is increasing by years, and 2019 is the turning point of the Thiel index. The maintenance of channel regulation buildings such as spur dike and beach protection belt need to be focused on. The distribution of the technical condition of channel regulation buildings in the trunk stream of the Yangtze River channel presents a significant clustering feature. In the upper reaches, the technical status of channel regulation buildings is more centralized compared to that of the middle and lower reaches.

Keywords: channel regulation building; spatial-temporal analysis; Thiel index; Moran index; standard distance

收稿日期: 2023-10-04

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52071250、51709220); 国家重点研发计划项目(2018YFB1600404)

作者简介: 孙辉 (1994—), 男, 硕士研究生, 从事航道基础设施数智化研究。

通讯作者: 蒋仲廉 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 从事水路交通安全与环境研究。E-mail: z.jiang@whut.edu.cn

航道整治建筑物广泛应用于内河航道治理工程中,在维护和提升航道尺度、改善通航条件等方面发挥了重要作用。随着航道整治建筑物数量的不断增加,整治建筑物维修和养护等技术问题受到广泛关注。JTS/T 320—2021《航道养护技术规范》^[1]新增了第五类航道整治建筑物技术状况,进一步完善了现有航道整治建筑物技术状况评价体系;JTS/T 324—2023《内河航道运行监测指南(试行)》^[2]阐明了航道通行状态监测和航道设施状态监测的主要内容。上述行业标准的发布,为我国内河航道设施养护能力提升、科学监测奠定了重要基础。

围绕航道整治建筑物技术状况影响因素及评价方法,国内外学者取得了一系列研究成果。张明进^[3]模拟不同工况下丁坝附近流场结构和压强分布,探明丁坝坝头和坝根等易水毁部位;Zhang等^[4]结合层次分析法和权重赋权法,提出一种综合评价模型,解决了丁坝服务状况相关的综合评价问题;李文杰等^[5]基于模糊贝叶斯网络,建立航道整治建筑物技术状况综合评价模型,量化长江上游航道整治建筑物的技术状况值;余青容等^[6]基于建筑信息模型(BIM)和地理信息系统(GIS)的航道整治建筑物维护分析方法,开展整治建筑物损毁的定量分析和评价;辛玮琰等^[7]通过总结长江中游丁坝、护滩、护岸的结构形式及作用区水沙特性,对比分析已有结果,提出针对建筑物运行损毁的研究新思路。

内河航道整治建筑物养护是一线航道管理部门的重要职责,也是建成“畅安优智美”的航道高质量发展体系的重要前提。本文结合长江干线航道养护基础数据,分析和研究整治建筑物技术状况时空特征,旨在为航道整治建筑物养护能力提升提供技术支撑。

1 研究区域概况

本文以长江宜宾合江门—太仓浏河口段的干线航道为研究区域,基于《长江干线航道养护基础资料汇编》^[8]获取了2017—2021年航道整治建筑物养护基础数据,见表1。经分析可知:1)已竣工航道整治建筑物由449处增加至564处,维护长度由367.42 km增加至454.8 km,整治建筑物数量呈现增长趋势;2)航道整治建筑物技术状况总体呈现向好趋势,为长江干线航道船舶通航安全、航运畅通奠定了良好基础。

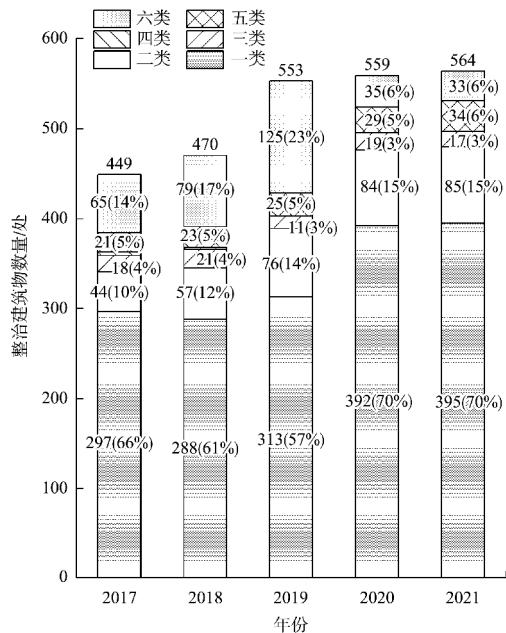
表1 2017—2021年长江干线航道整治建筑物基本情况

年份	整治建筑物数量/处	实际养护/处	维护长度/km
2017	449	424	367.42
2018	470	445	390.46
2019	553	528	453.90
2020	559	530	454.80
2021	564	530	454.80

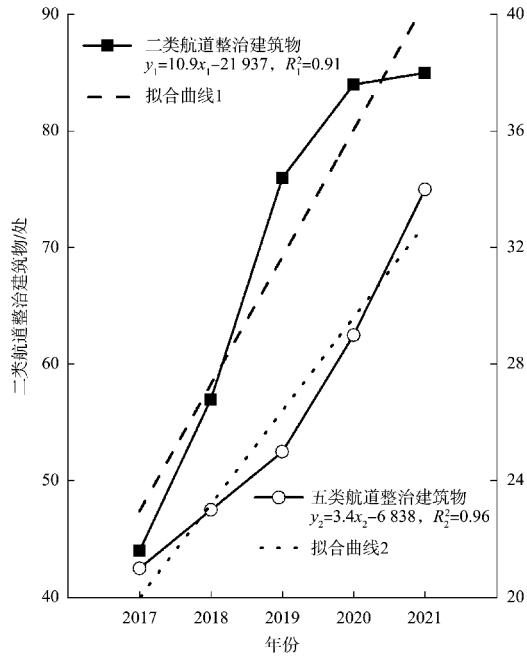
2 航道整治建筑物特征时序分析

2.1 航道整治建筑物技术状况

JTS/T 320—2021《航道养护技术规范》将航道整治建筑物技术状况分为5类,结合《长江干线航道养护基础资料汇编》,本文将正在维修、扩建或刚刚竣工的航道整治建筑物定义为第6类。2017—2021年长江干线航道各类整治建筑物数量及占比见图1a):长江干线航道整治建筑物数量逐年增加,其中2019年增幅最大(达83处)。一类航道整治建筑物占比最大,历年平均占比约为65%;二类航道整治建筑物呈逐年线性增加趋势,见图1b);三和四类航道整治建筑物占比相对较小,总体呈现减少趋势,其中2019—2021年四类整治建筑物为0处;五类航道整治建筑物的数量呈逐年线性增加($R^2 = 0.96$),平均占比约为4.8%;六类航道整治建筑物数量呈现先增加、后减少的趋势,其中2020—2021年数量显著减少。上述特征与航道工程规划建设进程、基础设施管理养护能力提升等因素相关。



a) 长江航道整治建筑物技术状况分类占比年际变化

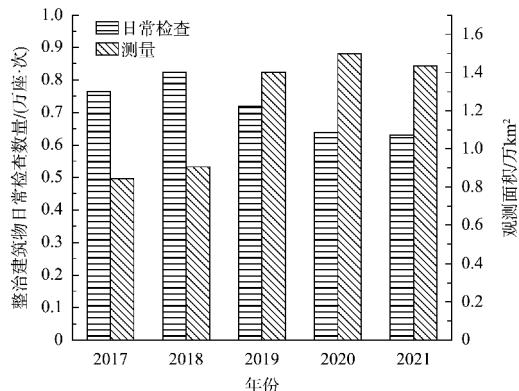


b) 长江干线二、五类航道整治建筑物数量变化

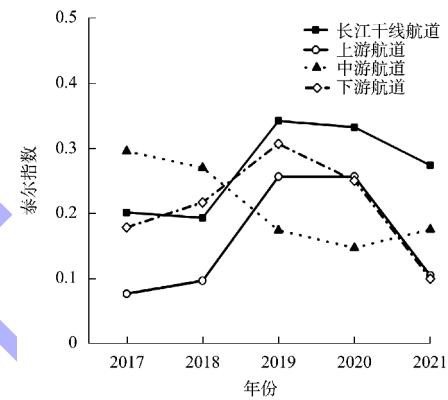
图 1 2017—2021 年长江航道整治建筑物技术状况

2.2 航道整治建筑物维护

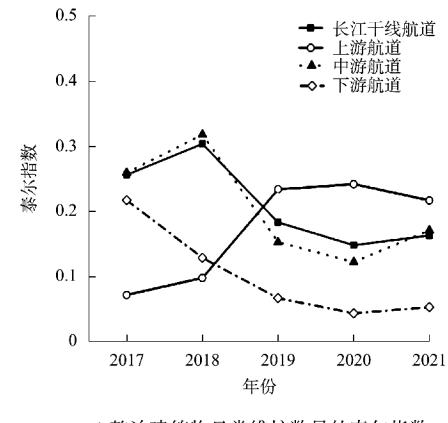
长江干线航道整治建筑物的维护工作直接关系整治建筑物所在河段的航道条件稳定与否，以及航道通航的安全。2017—2021 年，长江干线航道平均每年完成了航道整治建筑物检查 7 152 座·次，测量面积达 1.22 万 km²，航道整治建筑物的维护工作量见图 2a)。



a) 长江干线航道整治建筑物的维护工作量



b) 整治建筑物观测面积的泰尔指数



c) 整治建筑物日常维护数量的泰尔指数

图 2 2017—2021 年长江干线航道整治建筑物的维护工作量及泰尔指数

通过广义泰尔指数 GE(1)^[9] 对 2017—2021 年长江干线航道整治建筑物维护工作量总体与区域差异进行度量分析，其取值范围为 [0, 1]，数值越低表示差异性越小。其计算公式为：

$$T_h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_{ih}}{u} \ln \frac{y_{ih}}{u} \quad (1)$$

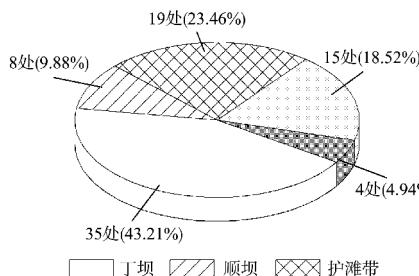
式中： T_h 为区域 h 的泰尔指数， n 为区域个数， y_{ih} 为区域 h 内航道管理机构 i 的航道整治建筑物

维护工作量, u 代表 y_{ih} 的均值。

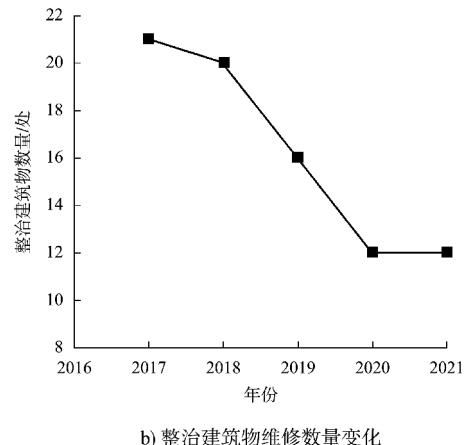
长江干线航道整治建筑物维护工作泰尔指数计算结果见图 2b)、c)。可以看出, 泰尔指数在 $[0.07, 0.35]$ 呈现波动态势, 即航道整治建筑物维护工作分布存在一定的不均匀性。在观测面积上, 上游航道的泰尔指数与长江干线航道整体趋势保持一致; 中游航道的泰尔指数逐年下降, 且差异趋于缩小; 而下游航道的泰尔指数呈现先增后减的趋势, 其中 2019 年为转折点。近年来, 航道整治建筑物日常维护座次的泰尔指数总体呈下降趋势(上游航道除外); 上游航道泰尔指数将呈现先增加后平稳的趋势, 区别于其他河段。由上游干线航道管理机构开展的整治建筑物日常维护数据可知: 2017—2019 年日常维护数量呈增加趋势, 而后至 2021 年趋于稳定。

2.3 航道整治建筑物维修

2017—2021 年不同类型整治建筑物维修数量分布见图 3a)。可以看出, 2017—2021 年长江干线航道共有 81 处航道整治建筑物得到维修。其中丁坝数量最多, 达到 35 处(占比 43.21%); 而其他类型的整治建筑物, 如堵坝、潜坝和齿坝等, 数量较少, 仅有 4 处(占比 4.94%)。2017—2021 年整治建筑物维修数量变化见图 3b)。可以看出, 航道整治建筑物维修数量呈下降趋势, 表明长江干线航道整治建筑物技术状况逐年向好。在航道整治建筑物养护工作中, 需要加强对丁坝、护滩带等基础设施的维护和管理, 以确保其结构完整性和功能稳定性; 对于其他类型的整治建筑物, 如堵坝、潜坝和齿坝等, 尽管其数量较少, 但仍需要开展定期检查和维护, 以保障其正常运行和安全性。



a) 整治建筑物维修类型分布



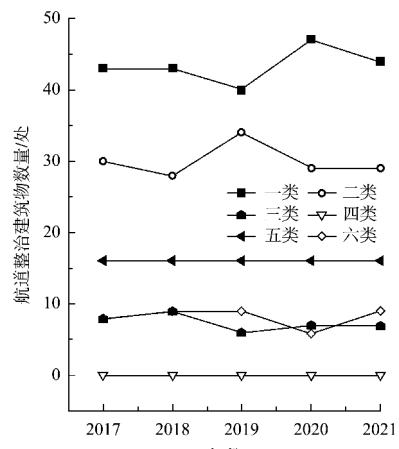
b) 整治建筑物维修数量变化

图 3 2017—2021 年长江干线航道整治建筑物维修状况

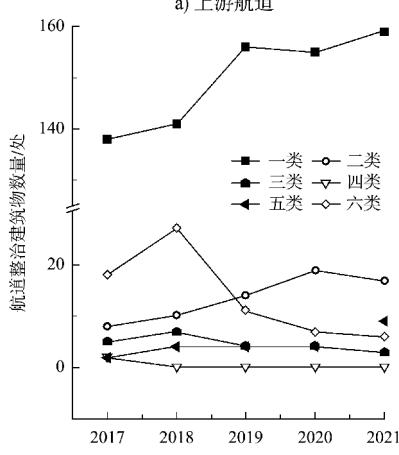
3 航道整治建筑物空间特征分析

3.1 航道整治建筑物空间特征

2017—2021 年, 长江干线航道上游的整治建筑物数量维持在 105 处左右; 中游数量分别在 2018 和 2021 年达到局部峰值, 下游数量呈稳步增长趋势。2017—2021 年长江干线航道不同河段航道整治建筑物数量分布见图 4。



a) 上游航道



b) 中游航道

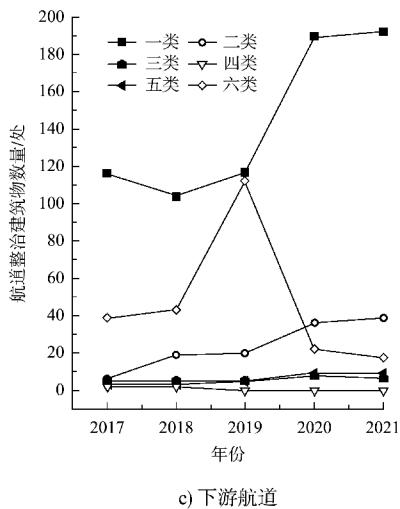


图 4 2017—2021 年长江不同河段航道整治建筑物技术状况分布

上游航道整治建筑物技术状况整体处于动态均衡状态，16 处位于三峡库区的建筑物已完成设计功能；每年整治建筑物维护数量 6~9 处，可满足上游航道运行需求。中游航道整治建筑物数量呈现稳步增长的趋势，三类航道整治建筑物数量长期在 3~7 处；四类整治建筑物数量仅有 2017 年嘉鱼—燕子窝河段航道整治工程中的 2 处护底带。下游航道一类航道整治建筑物数量呈现大幅增长的趋势，尤其是 2020 年，增加了 73 处；二类航道整治建筑物数量从 6 处增加到 39 处；四类航道整治建筑物仅在 2017 和 2018 年出现，均为戴家洲右缘下段守护工程中的 2 处护底带；五类航道整治建筑物数量较少，但在 2019 和 2020 年开始呈现明显的增长趋势。

3.2 空间特征分析

3.2.1 全局自相关分析

本文引入全局莫兰指数，用于长江干线航道整治建筑物空间相关关系分析，其取值范围为 $[-1, 1]$ ，计算公式为^[10]：

$$I = \frac{n' \sum_{i'=1}^{n'} \sum_{j=1}^{n'} W_{ij} (x_{i'} - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i'=1}^{n'} \sum_{j=1}^{n'} W_{ij} \sum_{i'=1}^{n'} (x_{i'} - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中： n' 为区域空间单元总数， $x_{i'}$ 和 x_j 为随机变量 x 在地理单元 i' 和 j 上的属性值， \bar{x} 为单元样本属性值的平均值， W_{ij} 为空间邻接关系权

重矩阵。

在莫兰指数检验中， P 值和 Z 值常用于验证空间分布模式是否由随机因素产生。其中， P 值表示数据与零假设的概率，当 P 值小于预定显著水平（如 0.05 或 0.01），则可拒绝零假设，认为数据表现有统计学意义； Z 值为莫兰指数与其期望值之间标准差的标准化值，代表了莫兰指数相较于标准正态分布的偏离程度。

借助 ArcGIS 空间统计工具，通过莫兰指数计算可知：生成的 P 值均小于显著水平 0.01，置信度达到了 99%； Z 值均超过了临界值 2.58，历年 I 值大于 0.23，见表 2。结果表明：长江干线航道整治建筑物技术状况分布呈现显著的集聚效应， Z 值和 I 值的变化表明空间集聚存在一定的波动性；2017—2019 年的 I 值、 Z 值均呈增大趋势，受航道基础设施养护能力提升等因素影响，自 2020 年起 I 值、 Z 值出现小幅反弹，表明航道整治建筑物技术状况分布呈现集聚特征。

表 2 长江干线航道整治建筑物技术状况莫兰指数与 Z 值

年份	I 值	Z 值
2017	0.265 6	11.333 8
2018	0.527 6	20.715 0
2019	0.709 6	31.560 2
2020	0.235 4	11.616 9
2021	0.417 0	19.016 6

3.2.2 标准距离分析

标准距离分析是通过计算每个点到其他点距离平均值的二次方根，可评估点在空间上的集中或分散程度，当距离小于某个阈值的点被认为是聚集点 D_s ，计算公式为^[11]：

$$D_s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (x_k - X)^2}{m} + \frac{\sum_{k=1}^m (y_k - Y)^2}{m}} \quad (3)$$

式中： m 为样本个数， (x_k, y_k) 为要素 k 的坐标， (X, Y) 为要素的聚集中心。

以航道里程为 X 坐标和航道整治建筑物长度为 Y 坐标进行标准距离分析，航道整治建筑物的分布范围在不同时间段内发生变化见表 3。2017—

2021 年, 航道整治建筑物聚集中心发生多次移动, 从监利移动至龙口。在 2020 年, 一类建筑物的聚集中心位置发生了大幅度移动, 从反嘴移动至邓家口; 三类建筑物的聚集中心位置逐步向下游方向偏移, 从石牌移动至藕池口, 其中 2019 年的偏移量最大; 除 2019 年之外, 六类航道整治建筑物主要集中在中游航道的宝子滩—太平口, 这与 2019 年大量建筑物竣工交付情况相符合。以 2021 年为例, 不同技术状况的航道建筑物的聚集中心分布见图 5。

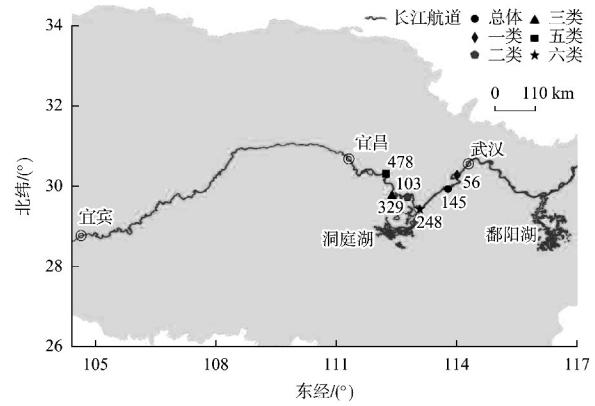


图 5 2021 年不同技术状况航道整治建筑物聚集中心分布

表 3 2017—2021 年长江干线航道整治建筑物技术状况聚集中心的航道里程

年份	总体	一类	二类	三类	四类	五类	六类
2017	313(中游)	200(中游)	374(上游)	58(上游)	1 041(下游)	184(上游)	9.5(中游)
2018	306(中游)	249(中游)	19(上游)	22(上游)	1 041(下游)	124(上游)	68(中游)
2019	150(中游)	228(中游)	68(上游)	575(中游)	-	55(上游)	578(下游)
2020	140(中游)	64(中游)	355(中游)	408(中游)	-	470(中游)	73(中游)
2021	145(中游)	56(中游)	329(中游)	403(中游)	-	478(中游)	248(中游)

3.2.3 椭圆分析

椭圆分析又称标准差椭圆, 常用于研究地理要素在不同方向上的分布情况和空间相关性。椭圆中心代表要素中心位置, 长轴和短轴分别表示要素分布方向和范围, 长轴和短轴差值越大, 说明要素的分布越具有方向性, 反之则越不具有方向性。椭圆中心坐标(x, y)、转角 θ 、长轴 δ_x 和短轴 δ_y 的计算公式为^[12]:

$$x = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (x_k - X')^2}{m}} \quad (3)$$

$$y = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (y_k - Y')^2}{m}} \quad (4)$$

$$\tan\theta =$$

$$\frac{\left(\sum_{k=1}^m x_k'^2 - \sum_{k=1}^m y_k'^2\right) + \sqrt{\left(\sum_{k=1}^m x_k'^2 - \sum_{k=1}^m y_k'^2\right)^2 + 4\left(\sum_{k=1}^m x_k' y_k'\right)^2}}{2 \sum_{k=1}^n x_k' y_k'} \quad (5)$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (x_k' \cos\theta - y_k' \sin\theta)^2}{m}} \quad (6)$$

$$\delta_y = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (x_k' \sin\theta + y_k' \cos\theta)^2}{m}} \quad (7)$$

式中: (x_k, y_k) 为要素 k 的坐标, (X', Y') 为区域重心坐标, x'_k 为 x_k 与 X' 之差, y'_k 为 y_k 与 Y' 之差。

以 2021 年数据为例, 不同技术状况类型航道建筑物聚集中心对应的航道里程、长轴、标准距离等参数见表 4, 其中上游航道整治建筑物的技术状况空间分布相对于中、下游更为集中。具体来说, 63% 左右的一类航道整治建筑物分布在上游航道里程 799~994 km 范围内, 损坏程度较明显的整治建筑物主要分布在上游航道里程 702~928 km 范围内, 上述区域成为未来整治建筑物养护工作重点区域; 中游航道整治建筑物与一、二、六类建筑物的聚集中心都在调关镇, 该河段的航道整治工程较为密集, 三类建筑物聚集中心处于碾子湾;

下游航道整治建筑物聚集中心位于航道里程 299 km 处, 其分布相对集中, 航道整治工作覆盖范围相对较小。

表 4 2021 年不同河段航道整治建筑物聚集中心及椭圆分析参数

航道区段	技术状况分类	聚集中心航道里程/km	标准距离/km	长轴/km	短轴/km
上游	一类	897	97	138	0.301
	二类	873	91	128	0.273
	三类	815	113	160	0.188
	五类	426	205	289	0.183
	六类	686	95	134	0.142
中游	一类	353	141	200	1.213
	二类	348	131	185	1.421
	三类	279	174	247	0.475
	五类	385	179	252	5.890
	六类	351	121	171	0.268
下游	一类	519	305	431	1.889
	二类	497	254	359	2.451
	三类	463	331	468	0.830
	五类	598	349	494	0.663
	六类	727	203	287	2.469

4 结论

1) 长江干线航道整治建筑物数量呈增加趋势, 其中一类建筑物数量占比最大, 三和四类建筑物占比相对较小且呈下降趋势; 航道整治建筑物检查数量和测量面积, 呈现逐年增加趋势, 上、中、下游航道泰尔指数处于[0.07, 0.35]区间内, 存在一定的不均匀性; 丁坝和护滩带等整治建筑物更易出现损毁现象, 其养护工作应得到更多关注。

2) 上游河段航道整治建筑物技术状况动态均衡, 每年整治建筑物维护数量为 6~9 处; 中游河段航道整治建筑物数量增长趋缓, 四类整治建筑物仅出现在 2017 年; 下游河段一类航道整治建筑物数量持续增长, 不同河段的航道整治建筑物养护策略应各有侧重。

3) 长江干线航道整治建筑物技术状况分布呈现显著的集聚效应, 历年莫兰指数均大于 0.23, 集聚中心在空间维度中存在一定的波动性, 上述特征为航道整治建筑物养护重点河段的确定提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 长江航道局, 东海航海保障中心. 航道养护技术规范: JTS/T 320—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [2] 长江航道规划设计研究院, 南京水利科学研究院, 中交水运规划设计院有限公司. 内河航道运行监测指南(试行): JTS/T 324—2023[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2023.
- [3] 张明进. 新水沙条件下荆江河段航道整治工程适应性及原则研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [4] ZHANG F, WANG P Y, MU P, et al. A comprehensive evaluation method for the service status of groins in waterways based on an AHP-improved CRITIC combination weighting optimization model [J]. Sustainability, 2022, 14(17): 10709.
- [5] 李文杰, 张浩游, 张文, 等. 基于模糊贝叶斯网络的长江上游航道整治建筑物技术状况评价研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(9): 112-118.
- [6] 余青容, 郭涛, 宋成果. 基于 BIM 和 GIS 的航道整治建筑物维护分析方法[J]. 水运工程, 2022(9): 152-155, 191.
- [7] 辛玮琰, 刘晓菲, 刘鹏飞, 等. 长江中游航道整治建筑物作用区水沙特性研究综述[J]. 水运工程, 2022 (7): 185-191.
- [8] 长江航道局. 长江干线航道养护管理基础资料汇编[G]. 武汉: 长江航道局, 2021.
- [9] ZHENG X, ZHU M, SHI Y, et al. Equity analysis of the green space allocation in China's eight urban agglomerations based on the Theil index and GeoDetector [J]. Land, 2023, 12(4): 795.
- [10] SONG Y, SONG J. Analysis of surface temperature in an urban area using supervised spatial auto correlation and Moran's I [J]. Earth science informatics, 2022, 15 (4): 2545-2552.
- [11] YAVORSKA O, BUN R A. Spatial analysis of COVID-19 spread in Europe using “center of gravity” concept[J]. Mathematical modeling and computing, 2022, 9 (1): 130-142.
- [12] WANG B, SHI W, MIAO Z. Confidence analysis of standard deviational ellipse and its extension into higher dimensional euclidean space[J]. Plos one, 2015, 10(3): 1-17.

(本文编辑 王璁)