

· 航道及通航建筑物 ·



长江航道整治建筑物服役状态时空分析与预测*

张帆^{1,2}, 王平义¹, 张斌¹, 刘怀汉³

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 长江师范学院, 重庆 408100; 3. 长江航道局, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为了能够优化航道基础设施有限的维护经费分配, 为整治建筑物维修预算的制定提供科学依据, 对 2017—2021 年长江干线航道整治建筑物的技术状况分类进行全面统计, 分别通过求期望和二次回归的方式对各管辖区域未来一年需要维修的建筑物数量进行预测。得到干线航道整治建筑物的服役状态时空分布特点, 并提出以辖区为单元的建筑物未来服役状态预测方法。结果表明: 整治建筑物技术状况类别占比的时间分布相对比较稳定, 逐年变化不大, 而空间分布受不同河段特定环境影响较大; 在长江上游河段的二和三类占比突出, 中、下游河段一类占比突出; 求期望法的预测精度受时序样本的波动程度影响较大, 而二次回归法受影响相对较小。

关键词: 航道整治建筑物; 服役状态; 技术状况分类; 时空分布; 小样本预测

中图分类号: U617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0084-07

Spatio-temporal analysis and prediction of service status of the Yangtze River channel improvement buildings

ZHANG Fan^{1,2}, WANG Pingyi¹, ZHANG Bin¹, LIU Huaihan³

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China; 3. Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430010, China)

Abstract: To optimize the allocation of limited maintenance funds for channel infrastructure and provide a scientific basis for the formulation of building maintenance budgets, statistics are conducted on improvement building technical condition categories from 2017 to 2021, and the number of improvement buildings requiring maintenance next year is predicted through expectation and quadratic regression. The spatio-temporal distribution characteristics of improvement building service status are analyzed, and a novel method of predicting future technical condition categories in each jurisdiction is proposed. The results show that the temporal distribution of technical condition categories is relatively stable, with little change from year to year, while the spatial distribution is greatly influenced by the specific environment of different reaches, with prominent proportions of 2nd and 3rd category buildings in the upper reach and prominent proportions of the 1st category buildings in the middle and lower reaches. Additionally, the prediction accuracy of the expectation method is strongly influenced by the fluctuation degree of the time series sample, but the quadratic regression method is less affected.

Keywords: channel improvement building; service status; technical condition category; spatio-temporal distribution; small sample prediction

收稿日期: 2023-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600403); 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2023B09); 重庆市研究生科研创新项目(CYB23251)

作者简介: 张帆(1987—), 女, 博士研究生, 从事港口及航道工程等方面的研究。

通讯作者: 王平义(1964—), 男, 博士, 教授, 从事港口及航道工程等方面的研究。E-mail: py-wang@163.com

航道整治建筑物作为重要的航道基础设施,对保证航道畅通和安全至关重要。近 30 年来,长江干线航道整治工程的投资已超过 400 亿元,但其维护周期长、需要年度运转,使巨大的维护经费需求与有限的管理资源分配之间矛盾突出^[1-2]。对整治建筑物服役状态的评判主要是基于结构安全和功能发挥,因此技术状况的评估和维修时机的判断成为管理决策的关键^[3]。随着长江航道建设的快速发展,整治建筑物的综合效益凸显,更加要求航道管理部门合理分配资源,确保维护工作的高效进行^[4-7]。因此,评估和预测整治建筑物服役状态在长江干线航道的区域分布具有重要意义。

目前,关于航道整治建筑物服役状态的研究多集中在个体或局部建筑物的评估,属于多属性决策(MCDM)问题。Jiang 等^[8]、Zhang 等^[9]、Wen 等^[10]、李文杰等^[11]和王平义等^[12]通过引入不同的理论方法建立评价指标集,根据个体整治建筑物当前的外观变形、损伤程度和功能运行情况等,对其服役状态指标进行综合评价;陈一梅等^[13]采用回归支持向量机理论对丁坝群的束水攻沙功能指标进行评价和预测。而有关航道整治建筑物整体区域未来状态的研究鲜有报道。

基于此,本文对近几年长江干线航道整治建筑物的技术状况评价结果进行统计分析,探究其在长江航道的时空分布规律,并针对管辖区域未来的维护情况提出结合求期望和二次回归的预测方法,旨在为航道整治建筑物维修预算的制定提供科学依据,有利于提高航道运行管理效率和资源分配的合理性。

1 长江干线航道整治建筑物服役状态时空分析

本文收集了 2017—2021 年长江航道局对长江干线航道整治建筑物技术状况评价资料,按照管辖区段和评价年份对技术状况的分类情况进行统计和分析。

1.1 长江干线航道整治工程维护情况

长江源远流长、水量充沛、终年不冻、水运条件优越,素有“黄金水道”的美誉。长江干线航道

上起云南水富、下至长江入海口,全长 2 843 km,其中 97%的河段航道均由长江航道局负责维护管理。为了整治滩险、维护航道等级,先后修建了多处航道整治建筑物,截至 2020 年,长江上、中、下游航道竣工交付的整治建筑物已多达 559 处,按照不同地理位置和环境特征,划分了若干管辖区段,其中除长江口以外长江航道局下属各个管辖区段见表 1。

表 1 长江干线航道管辖维护区段

管辖单位	维护航道长度/km	所属河段
长江宜宾航道局(宜宾局)	91.0	上游
长江泸州航道局(泸州局)	210.8	上游
长江重庆航道局(重庆局)	130.4	上游
长江涪陵航道局(涪陵局)	203.0	上游
长江万州航道局(万州局)	265.0	上游
长江宜昌航道局(宜昌局)	196.0	上、中游
长江荆州航道处(荆州处)	189.0	中游
长江岳阳航道处(岳阳处)	177.0	中游
长江武汉航道局(武汉局)	349.2	中、下游
长江九江航道处(九江处)	128.0	下游
长江芜湖航道处(芜湖处)	325.3	下游
长江南京航道处(南京处)	97.7	下游
长江镇江航道处(镇江处)	136.6	下游
长江上海航道处(上海处)	131.0	下游

注:长江口航道辖区未列出。

长江航道管理部门在每年枯水季对整治建筑物的技术状况进行评价,2017—2021 年期间根据 JTJ 287—2005《内河航道维护技术规范》^[14]等相关标准将航道整治建筑物的技术状况划分为 4 类,针对不同类型提出相应的维修建议,进而指导开展航道基础设施的维护工作,具体分类标准见表 2。

表 2 内河航道整治建筑物技术状况分类及维修标准

航道整治建筑物的技术状况描述	划分类别	维修建议
技术状况良好,功能发挥正常	一类	不维修
有少量变形,但不影响建筑物稳定和功能发挥	二类	暂缓维修
损坏较明显,尚能发挥整治功能但须及时修复	三类	维修
损毁严重或有明显缺陷,已经或即将失去整治功能	四类	维修
管辖范围内正在维修、改扩建或新交付的建筑物	暂不评价	无

注:被淹没、被覆盖或已完成设计功能的建筑物不再被维护,因此不参与评价和分类。

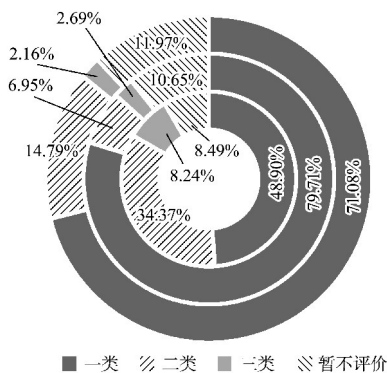
1.2 建筑物的不同技术状况类别占比的空间分布特点

为方便推广应用,对建筑物技术分类情况参数用统计占比表示,计算公式为:

$$P_{i,j} = N_{i,j} / \sum_{j=1}^m N_{i,j} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $P_{i,j}$ 为第 i 年统计的第 j 类建筑物数量占比, $N_{i,j}$ 为第 i 年统计的第 j 类建筑物数量。

根据式(1)和基础资料,首先统计出长江各河段各类别建筑物的历史平均占比情况(图1),分析其空间分布特点。



注:内、中、外环分别为上、中、下游。

图1 长江各河段航道整治建筑物在2017—2021年的历史平均分类占比

由图1可知,长江上游的一类建筑物占比接近1/2,二类占比约1/3,三类占比约有8.2%,暂不评价的建筑物占比每年平均约为8.5%;中游的一类占比超过总数的3/4,其次为暂不评价的占比,二和一类占比分别约为7.0%和2.7%;下游的一类占比接近总数的3/4,其次为二类和暂不评价的占比,一类占比约为2%。整体来看,各河段建筑物数量均以一类为主,二、三类和暂不评价的数量均较少,并且第四类建筑物数量为零。说明长江干线航道近些年对整治建筑物的管理维护比较及时。

从河段对比来看,一类建筑物在中游的统计占比最高,下游其次,上游最低;二类建筑物在上游的统计占比明显较高,下游其次,中游最低;三类建筑物在上游的统计占比也明显高于中下游。说明长江上游的建筑物服役状态整体一般,损毁发生频率较高,每年维修频率相对较高,中游的建筑物服役状态相比上游和下游表现整体良

好,损毁和维修发生频率不高,下游的建筑物服役状态整体较好,有部分损毁发生但不影响继续使用,维修频率相比上游较低。

1.3 各河段建筑物技术状况分类的逐年变化特点

根据式(1)和基础资料,分别计算出近几年长江各河段的整治建筑物技术状况分类占比,并对其逐年变化特点进行分析。

1.3.1 长江上游

长江上游航道整治建筑物2018—2021年技术状况类别统计情况见图2。可以看出,长江上游航道整治建筑物除早期有一类、二类增加和三类减少的小幅波动外,整体各类别占比较为稳定,逐年变化不大;建筑物维护总数基本保持不变。

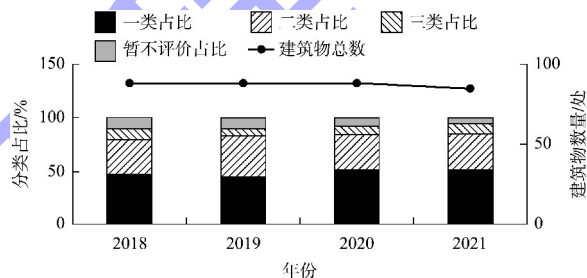


图2 长江上游航道整治建筑物2018—2021年技术状况类别统计情况

1.3.2 长江中游

长江中游航道整治建筑物2018—2021年技术状况类别统计情况见图3。可以看出,长江中游航道整治建筑物的三类占比逐年变化不大,二类占比有小幅逐年增加的趋势,一类和暂不评价的占比在2019—2021年变化不大,2019年的一类占比明显多于2018年,而暂不评价占比明显少于2018年,原因是2018年正在维修、改扩建或新交付的建筑物很大一部分在2019年已经参与评价;整治建筑物维护总数保持不变。

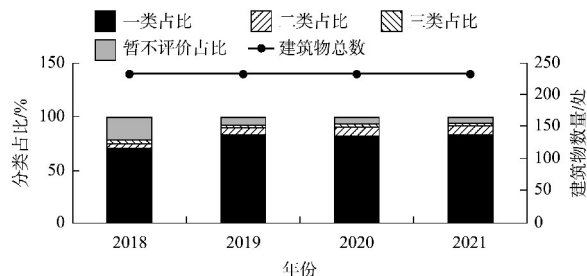


图3 长江中游航道整治建筑物2018—2021年技术状况类别统计情况

1.3.3 长江下游

长江下游航道整治建筑物 2017—2021 年技术状况类别统计情况见图 4。可以看出, 长江下游航道整治建筑物的三类和二类占比逐年变化不大, 一类和暂不评价的占比近五年变化较大, 其中 2019 年的一类占比明显少于其他年份, 而暂不评价占比明显多于其他年份, 其原因在于 2019 年新增建设和维修的建筑物数量较多, 因此对统计占比影响较大; 整治建筑物维护总数逐年增加。

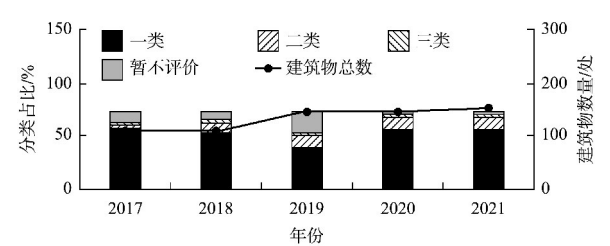


图 4 长江下游航道整治建筑物
2017—2021 年技术状况类别统计情况

综上可知, 长江干线航道整治建筑物服役状态的时空分布具有以下特点: 整体上, 各类别建筑物数量均以一类为主, 二、三类和暂不评价的建筑物较少; 空间分布受河段特定环境影响, 相同类别在上、中、下游的统计占比相差较大, 上游与中、下游相比尤其特殊, 上游二类 and 三类占比都较为突出, 中、下游一类占比较为突出; 时间分布相对比较稳定, 在长江各河段维护运转状态比较稳定时, 相同类别的统计占比逐年变化不大。

这些发现对于理解长江干线航道整治建筑物的维护需求和优先级具有重要意义。

2 航道整治建筑物未来服役状态辖区统计情况的预测

根据长江干线航道整治建筑物服役状态的分布特点, 本文针对管辖区域的未来维护情况提出 2 种预测方法: 求期望法和二次回归法。为了确保预测的准确性, 对预测样本集的范围划分应该尽量小, 同时为了满足统计可靠性, 每个样本集的样本个数应确保在 25 个以上, 表 1 分段统计的样本总数除了重庆局以外, 其余辖区均满足要求, 因此以辖区为单位样本集, 对各个管辖区段的技术状况分类情况进行统计和预测。

2.1 各辖区样本集不同类型样本的统计频率

预测之前首先需要计算出各辖区样本集中每一年不同类型样本的统计频率。根据基础资料 and 式(1)分别计算样本集不同类型样本的统计占比, 为了排除暂不评价建筑物对总体占比的干扰, 只对一、二、三类建筑物进行计算, 然后将百分比改为小数表示, 统计频率 ≤ 1.00 , 样本集内同一年份不同类型的统计频率之和为 1, 辖区样本集统一用管辖单位的简称, 结果见表 3。表中每个辖区都有 4~5 个历史年份的统计频率, 组成了预测用的时序样本集, 容量特点为小样本预测。

表 3 各段技术状况分类的统计频率

类别	年份	宜宾局	泸州局	重庆局	宜昌局	荆州处	岳阳处	武汉局	九江处	芜湖处	镇江处	上海处
一类	2017	—	—	—	—	—	—	—	0.93	0.79	—	1.00
	2018	0.62	0.47	0.50	1.00	0.89	0.82	0.96	0.80	0.74	—	0.95
	2019	0.71	0.37	0.54	0.97	0.87	0.87	0.95	0.79	0.65	—	0.91
	2020	0.75	0.45	0.57	0.91	0.87	0.83	0.94	0.84	0.73	0.86	0.80
	2021	0.69	0.48	0.50	0.91	0.89	0.84	0.94	0.92	0.72	0.82	0.80
二类	2017	—	—	—	—	—	—	—	0.04	0.21	—	0.00
	2018	0.25	0.43	0.36	0.00	0.08	0.08	0.00	0.16	0.22	—	0.05
	2019	0.21	0.56	0.38	0.03	0.10	0.09	0.03	0.15	0.33	—	0.09
	2020	0.17	0.45	0.36	0.06	0.10	0.15	0.02	0.13	0.26	0.06	0.20
	2021	0.23	0.45	0.30	0.06	0.11	0.13	0.02	0.08	0.28	0.08	0.20
三类	2017	—	—	—	—	—	—	—	0.02	0.00	—	0.00
	2018	0.13	0.10	0.14	0.00	0.03	0.10	0.04	0.04	0.04	—	0.00
	2019	0.08	0.07	0.08	0.00	0.03	0.04	0.02	0.06	0.02	—	0.00
	2020	0.08	0.09	0.07	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.01	0.08	0.00
	2021	0.08	0.07	0.20	0.03	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.10	0.00

2.2 通过求期望法预测辖区建筑物的技术状况分类

2.2.1 方法步骤

未来一年某类别的预测占比用历史年份统计频率的期望均值表示,计算公式为:

$$P_{p,j} = \sum_{i=1}^n P_{i,j}/n \times 100\% \quad (2)$$

式中: $P_{p,j}$ 为第 j 类建筑物的预测占比, n 为参与统计的总年份。

预计偏差用历史年份统计频率的标准差衡量,计算公式为:

$$P_{s,j} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{i,j} - P_{p,j})^2/n} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $P_{s,j}$ 为第 j 类建筑物的预计偏差。

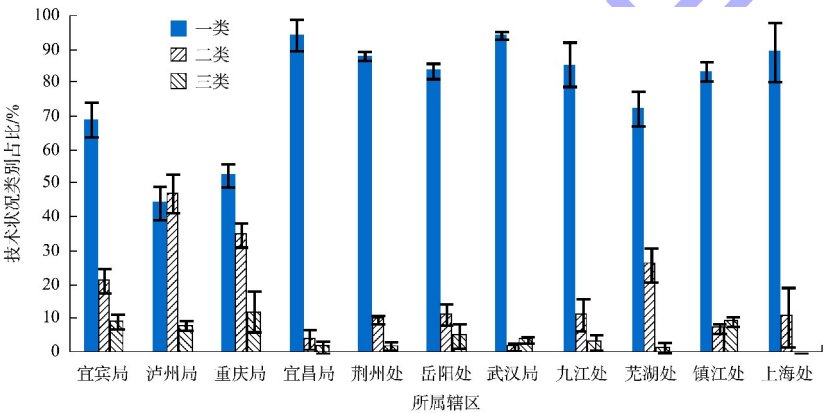
未来一年某类别建筑物的预测数量计算公式为:

$$N_{p,j} = P_{p,j}N_p \quad (4)$$

式中: $N_{p,j}$ 为第 j 类建筑物的预测数量, N_p 为预测年份的辖区建筑物总数。

2.2.2 应用计算

首先根据式(2)、(3)和表3计算得到各区段分类的占比预测分布情况,结果见图5。可以看出,重庆局的预测误差最大,原因为样本个数偏少。



注:图中误差棒选用区域样本标准差表达,表示预计偏差。

图5 未来一年各辖区整治建筑物技术状况分类占比预测情况

划分为三类及以下的建筑物需要进行维修,会产生维护费用,因此对于管理部门来说,辖区三类建筑物的预测情况更具有指导意义。假设下

一年各辖区的建筑物总数与2021年保持不变,结合图5预测结果,通过式(4)可以计算出未来一年各辖区三类建筑物的数量,计算结果见表4。

表4 辖区未来一年三类航道整治建筑物预测

所属辖区	预计占比/%	预计偏差/%	假定总数/处	预计数量/处	数量发生上限/处	数量发生下限/处
宜宾局	9.21	±2.21	26	2	3	2
泸州局	8.10	±1.40	44	4	4	3
重庆局	12.28	±6.08	10	1	2	1
宜昌局	1.56	±1.80	32	1	1	0
荆州处	1.95	±1.30	76	1	2	0
岳阳处	4.86	±3.66	55	3	5	1
武汉局	3.83	±0.93	46	2	2	1
九江处	3.03	±2.25	37	1	2	0
芜湖处	1.38	±1.64	81	1	2	0
镇江处	9.18	±1.44	49	5	5	4
上海处	0	0	41	0	0	0

注:由于建筑物占比和数量不可能为负值,因此当计算值为负时自动归零;且建筑物数量不能为小数,按四舍五入的方式归为整数。

2.3 通过二次回归法预测辖区建筑物的技术状况分类

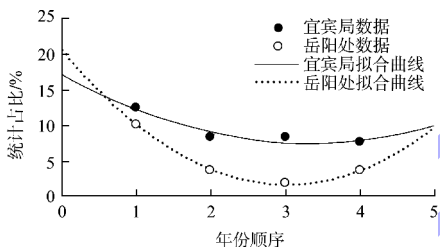
当逐年统计频率波动较大,导致标准差,即预计偏差较大时,可以通过二次曲线拟合法进行预测,具体做法如下。

将逐年统计占比在 Excel 中绘制成散点图,通过二次曲线进行回归拟合,拟合方程为:

$$y = ax^2 + bx - c \quad (5)$$

式中: a 、 b 、 c 为待拟合参数。求出拟合参数后,根据式(5)计算未来年份对应占比,作为某建筑物类型的预测占比。

以宜宾局和岳阳处为例,对区域三类建筑物的统计占比进行回归拟合和未来一年占比情况的预测,结果见图 6。



注:年份与统计占比的数值量级相差过大,拟合中为减小该影响,将横坐标表示为年份的顺序号。

图 6 典型辖区三类建筑物统计占比的回归拟合

宜宾局三类建筑物占比的拟合公式为: $y = 0.0088x^2 - 0.0585x + 0.1723$, $R^2 = 0.9212$, 拟合精度较高。岳阳处三类建筑物占比的拟合公式为: $y = 0.0206x^2 - 0.1246x + 0.2055$, $R^2 = 0.9984$, 拟合精度较高。

未来年份序号为 5,假定未来一年的建筑物总数与表 4 一致,则根据拟合公式和式(4)计算得到未来一年三类建筑物预测结果:宜宾局预计占比为 9.98%,预计数量为 3 处;岳阳处预计占比为 9.75%,预计数量为 5 处。

与表 4 结果相比,二次回归法的预测结果明显变大,弥补了求期望法中预计偏差过大的不足。因此,宜宾局和岳阳处的预测结果应以二次回归法为准。

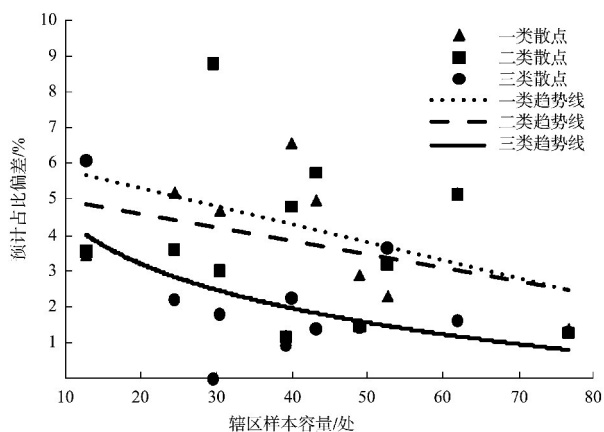
综合以上预测结果得出,未来一年辖区出现三类建筑物的情况镇江局、岳阳处和泸州局最多,宜宾局和武汉局其次,上海处为 0 座,其余各辖区均为 1 座,再结合预计数量的上、下限偏差,即可帮助长江航道局提前制定维修预算和划拨经费。

3 预测方法的对比与讨论

尽管航道整治建筑物的技术状况变化主要与预测年的来水来沙过程有关,但因其物理机制过于复杂,本文并未纳入考虑,还需要进一步研究。例如,滩段剧烈变化的水沙过程会造成丁坝局部冲刷和损毁变形,边界条件的改变又反向影响附近流速、水位和泥沙运动,进而影响航道整治功能。不过历史上每相邻几年的长江水文过程普遍具有相似的趋势,这一特点在梯级水库联合调度之后更加明显^[15-17],同时长江干线航道的建设规划是以年代为分隔,因此可以认为,每 10 年间包括水沙过程在内的辖区航道状态相对稳定,不会发生过大变化。这也是文中预测辖区整治建筑物未来维护情况的前提条件。实际中预测时间越临近,航道状态越相近,越远则相差越大,因此不适合预测时间跨度较大的情况,对未来一年服役状态进行预测较为符合工程实际。

对于本文的预测样本集来说,影响预测结果的因素包括:辖区样本容量、时序样本容量及波动程度,下面分别进行分析。

将所有辖区的样本容量与求期望法计算的预计偏差画成散点图(图 7),并求出一~三类建筑物的样本容量与预计偏差的相关性系数分别为-0.4、-0.3、-0.4,根据 Iversen 等^[18]对相关性系数的评判标准可知,辖区样本容量与求期望法的预计偏差具有中等程度的负相关关系;二次回归法的预测准确性与辖区样本容量的关系并不明确,但在小样本预测的前提下,样本容量越多越可靠。因此尽可能多地收集样本数量有助于提高预测结果的准确性。



注：辖区样本容量代表辖区样本集的样本数量，为历史年份的平均值。

图7 一~三类建筑物的辖区样本容量与预计偏差关系

求期望法中的预测精度用时序样本标准差表示，因此预测准确性受样本波动程度影响较大，当时序样本的波动程度较小时，预测精度较高，反之则会降低；二次回归法中的 R^2 代表拟合精度，能够在一定程度上反映出预测准确性，从宜宾局和岳阳处建筑物未来服役状态的计算结果可知，拟合精度并没有因样本波动程度大而降低，因此相比之下，二次回归法的预测准确性受时序样本波动程度的影响较小。

理论上时序样本容量越多，预测结果越准确，但实际中很难找到长时间序列的样本，并且辖区航道状态不可能逐年不变，因此越接近预测年份的数据，影响权重越大。本文通过2017—2021年的历史数据，对未来一年航道整治建筑物的服役状态进行预测是较为合理的，后续可将新产生的评价数据加入样本集，用所提出的预测方法继续修正结果，随之预测的准确性会越来越高。

综上可知，求期望法比较简单易操作，准确度较高，更易于在实际中进行推广；二次回归法可以弥补求期望法受时序样本的波动影响的不足。因此两者结合使用效果最佳。

4 结论

1) 本文通过对长江干线航道整治建筑物技术状况的时空分布进行统计和预测分析，发现其技术状况类别在时间上保持相对稳定，但空间分布受河段特定环境的显著影响。

2) 本文所提出的求期望法和二次回归法结合使用的预测方法，能够有效预测未来一年内各辖区建筑物的维修数量，有助于优化航道整治建筑物的维护预算和资源分配。研究成果不仅对长江干线航道管理具有指导意义，也可推广应用于其他内河航道。

致谢

感谢长江航道局为本文提供了所需的相关数据资料。感谢重庆交通大学杨成渝研究员、喻涛教授和韩林峰副教授对本文提出的指导意见。

参考文献：

- [1] 王帆, 张海泉, 黄蓓蓓. 2018年度长江干线航道整治建筑物维护效果评估研究[J]. 中国水运. 航道科技, 2020(5): 23-27.
- [2] WEHRLE R, WIENS M, SCHULTMANN F, et al. Level system for the resilience assessment of critical transport infrastructures using the example of waterways [J]. Bautechnik, 2020, 97(6): 395-403.
- [3] 交通运输部天津水运工程科学研究所, 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTS 304—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [4] REN J R, MAO G X, ZHANG F, et al. Research on investment decision-making in waterway engineering based on the hub economic index [J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1-19.
- [5] WANG X, SUN W L. Application and prospect of new technology in inland waterway regulation [C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of the 6th International Conference on Transportation Engineering. Reston: ASCE, 2019: 208-216.
- [6] LIU H H, LI X X. Research on the schema of Changjiang waterway maintenance management in the 'internet+' age [C]// Canadian Society for Civil Engineering. Proceedings of 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety. Banff: Canadian Society for Civil Engineering, 2017: 264-270.
- [7] 邓小娜. 长江航道整治建筑物维护经费测算方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.

(下转第121页)