

# 长江中下游武安段生态航道评价

刘念 李天宏<sup>†</sup> 匡舒雅

水沙科学教育部重点实验室, 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; <sup>†</sup> 通信作者, E-mail: lth@pku.edu.cn

**摘要** 基于航道建设要素与河流生态系统保护相协调的基本思想, 建立长江中下游武汉-安庆段生态航道评价指标体系。利用层次分析法和能够反映木桶效应的综合指数评价法, 对该河段2018年生态航道健康水平进行评价。结果表明, 武汉-安庆段的生态航道健康指数为0.8145, 属于中等水平, 该航道的自净功能优秀, 航运、泄洪和景观娱乐功能良好, 生态功能较差, 后续航道建设和维护应该加强水生态保护与修复工作。

**关键词** 生态航道; 武汉-安庆段; 评价体系; 层次分析法

## Ecological Waterway Assessment of Wuhan-Anqing Reach of the Yangtze River

LIU Nian, LI Tianhong<sup>†</sup>, KUANG Shuya

Key Laboratory of Water and Sediment Sciences (MOE), College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; <sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: lth@pku.edu.cn

**Abstract** Based on the principle of the harmonious relationship between navigation and river ecosystem protection, an evaluation indicator system for Wuhan-Anqing Reach in the middle-lower of the Yangtze River was constructed. With analytic hierarchy process (AHP) and the comprehensive evaluation index method considering the bucket effect of individual function to the whole system health, the ecological health condition of Wuhan-Anqing Reach in the year of 2018 was evaluated. The results showed that the waterway health index was 0.8145, indicating a fair level. The self-purification function graded excellent, and the navigation function, flood discharging function as well as landscape & entertainment function were good, while the ecological function was poor. The results suggested that ecological protection and rehabilitation should be strengthened in the process of future waterway regulation projects.

**Key words** ecological waterway; Wuhan-Anqing Reach; assessment system; analytic hierarchy process

随着社会经济的快速发展, 对运输的需求不断增加。因运量大、占地少、成本低、污染轻和安全性高等优势, 河流航运受到国内外广泛关注<sup>[1]</sup>。然而, 航道工程建设以及流域内的人类活动对河流生态环境造成破坏<sup>[2]</sup>, 因此对河流航道进行科学管理刻不容缓。德国<sup>[3]</sup>、美国<sup>[4]</sup>和英国<sup>[5]</sup>等发达国家和地区对具有航运功能河流的评价和管理尺度不断扩展, 对河流的生态修复也从单一的结构修复发展为基于河流功能与动力学过程相结合的综合修复。在中国, 河道航运已经跨越大规模开发建设阶

段, 转而进入养护阶段<sup>[6]</sup>, 构建绿色内河水运体系成为当前航道建设的重点目标之一。许鹏山等<sup>[7]</sup>将生态学的概念引入航道建设中, 强调航道建设应当实现社会经济与生态保护的双赢。2015年以来, 绿色发展被纳入治国方略。在此背景下, 关于“生态航道”的概念探讨与评价研究逐渐受到关注。陈华和<sup>[8]</sup>指出, 生态河道不是原生河道, 而是在一定程度的人工干预下, 具有自我修复能力和可持续发展的生态河流廊道。严登华等<sup>[9]</sup>通过探讨生态航道建设的科学内涵和目标以及评价航道建设工程影响河

流生态环境的关键指标体系, 提出构建内河生态航道建设的技術框架。

长江航道是世界上运量最大、运输最繁忙的航道, 对长江经济带的发展以及打造沿江绿色生态廊道和综合立体交通走廊至关重要。近年来, 在流域经济发展要把生态保护摆在压倒性位置的政策下, 生态航道成为长江航道建设的重点发展方向<sup>[10]</sup>。李天宏等<sup>[11]</sup>和匡舒雅等<sup>[12]</sup>分别以长江中游的荆江段和下游的南京-浏河口段为研究对象, 借鉴倪晋仁等<sup>[13]</sup>提出的基于河流系统功能协调的河流健康评价思想, 提出“生态航道”的概念和评价指标体系。武汉-安庆段(简称武安段)是《水运“十三五”发展规划》中重点规划河段之一, 是连接长江中下游航运的核心枢纽。该河段多为分叉河道, 浅险碍航的滩段较多, 水深相对于下游较小, 存在航运条件无法满足经济发展需要的问题。近年来, 在该河段开展十余项航道整治工程, 对其进行生态航道评价, 有助于了解航道工程建设中河流生态系统的健康状况, 掌握长江中下游的生态航道发展状况, 为航道的可持续发展提供科学参考。

## 1 武安段航道概况

武安段西起武汉天兴洲长江大桥, 东至安庆皖河口, 连接长江的中游和下游, 全长约 386.5 km, 占长江干线航道长度的 1/7。微弯或弯曲的两汉或多分叉的河道众多, 洲滩冲淤、主流摆动明显, 各

汉道交替发展的河道演变现象突出<sup>[14]</sup>。

2018 年长江干线的年货物通过量达到 26.9 亿吨, 稳居世界内河首位<sup>[15]</sup>。从 2005 至 2017 年, 武安段的运输量占长江干线总运输量的比例从 13.4% 增至 20.8%, 预测 2020 年平均货物通过量将达到 5.1 亿吨。2014 年以前, 该段枯水期航道最小维护尺度为 4.0 m×100 m×1050 m<sup>[16]</sup>。2015 年开展长江中游戴家洲河段右缘下段守护工程以及长江中游湖广-罗湖洲河段航道整治工程后, 枯水期最小维护尺度提高至 4.5 m×200 m×1050 m, 完成“十二五”规划航道建设目标<sup>[17]</sup>。但是, 下游安庆-芜湖段的枯水期航道维护最小水深已达 6 米<sup>[18]</sup>, 与之相比, 武安段的水深明显偏低, 成为长江中游航运的“瓶颈”。为了与长江上、下游的航道水深相衔接, 充分发挥长江航运的整体效益, 交通运输部 2016 年 3 月印发的《水运“十三五”发展规划》中提出进一步提升武安段航道的尺度和技术标准, 打破航运瓶颈。

武安段 6 米水深航道整治工程的建设航道等级为 I 级, 建设标准为 6.0 m×200 m×1050 m, 部分重点碍航滩段航宽不小于 110 m, 保证率为 98%, 主要建设内容包括自上而下整治湖广-罗湖洲、沙洲、戴家洲、鲤鱼山、张家洲、马当和东流共 7 个碍航滩段(图 1), 工程完成后全线可通航 10000 吨级船舶。航道整治工程于 2018 年 10 月开工, 因此本研究以 2018 年为基线进行生态航道评价, 以便提供工程实施前的生态背景值, 有助于后续跟踪研究工程

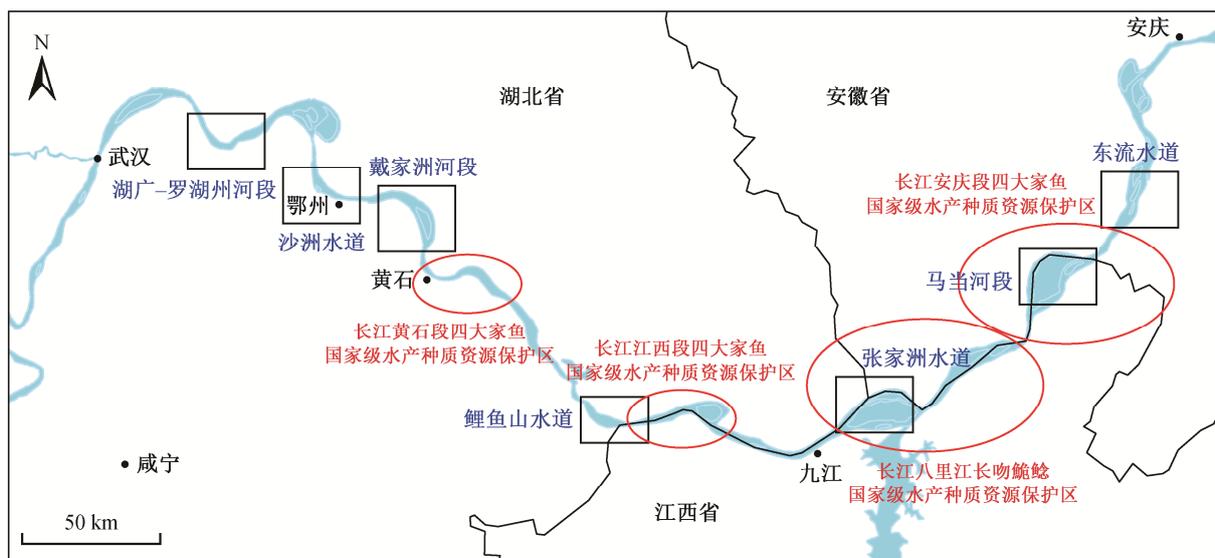


图 1 武安段航道整治工程位置  
Fig. 1 Locations of waterway regulation projects in Wuhan-Anqing Reach

实施前后的生态变化。

## 2 武安段生态航道评价方法

### 2.1 技术流程

狭义的航道指有尺度标准和设标界限的航槽，是一个在三维空间尺度上既有要求，又有限制的通道，一般由可通航水域、助航设施和水域条件组成<sup>[19]</sup>。广义的航道即河道或水道，包括常遇洪水水位线以下的基本河槽，但不包括堤防和河漫滩。河道由河道水体和河岸带两部分组成，河岸带是河道水体的外边界，是河道稳定的关键<sup>[20]</sup>。从河流生态系统保护这一目的出发，生态航道评价的对象不能局限于狭义的航道，而应是广义的航道。本文采用文献[11-12]的研究方法，即借鉴倪晋仁等<sup>[13]</sup>基于对河流系统功能的分析来评价河流健康的思想，对武安段进行生态航道评价，以便对武安段上、下游河段生态航道的变化进行对比。如图2所示，生态航道评价的技术流程主要包括河段功能分析、指标体系构建、指标权重分值计算和综合指数计算等步骤。

### 2.2 评价指标体系

武安段的主要功能包括航运功能、泄洪功能、输沙功能、供水功能、自净功能、生态功能和景观娱乐功能。对该河段的生态航道评价以这七大功能为基础，以科学性、代表性和可操作性为选择指标

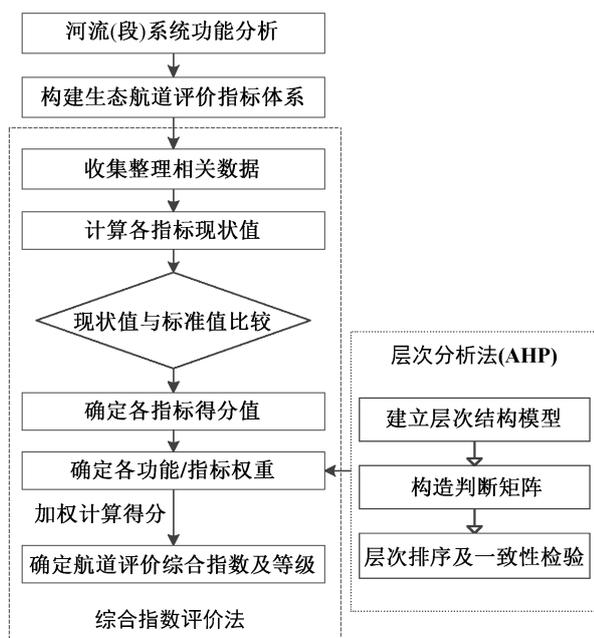


图2 生态航道评价技术流程  
Fig. 2 Framework of ecological waterway assessment methodology

的主要原则，构建包括目标层、准则层和指标层的生态航道评价指标体系(图3)。其中，目标层为武安段生态航道健康水平，准则层为上述七大河流生态系统功能，指标层为表征各项功能的评价指标。

与荆江河段<sup>[11]</sup>相比，武安段干流通航水域的水文地质条件和地形比较简单，因此不采用水系连通性来描述河段的航运功能。武安段的工程实施占用一定面积的河床，损失一部分底栖生物量，因此在评价武安段的生态功能方面新增底栖动物多样性指标。同时，为了更准确地描述武安段的自净功能，在航道评价方面选择了更多的水质指标。

### 2.3 数据获取及标准划分

基于武安段生态航道评价体系，收集2018年长江中下游武安段的相关资料。

1) 统计资料：中华人民共和国水利部、各省水利厅、长江水利委员会、长江航道局等相关单位编

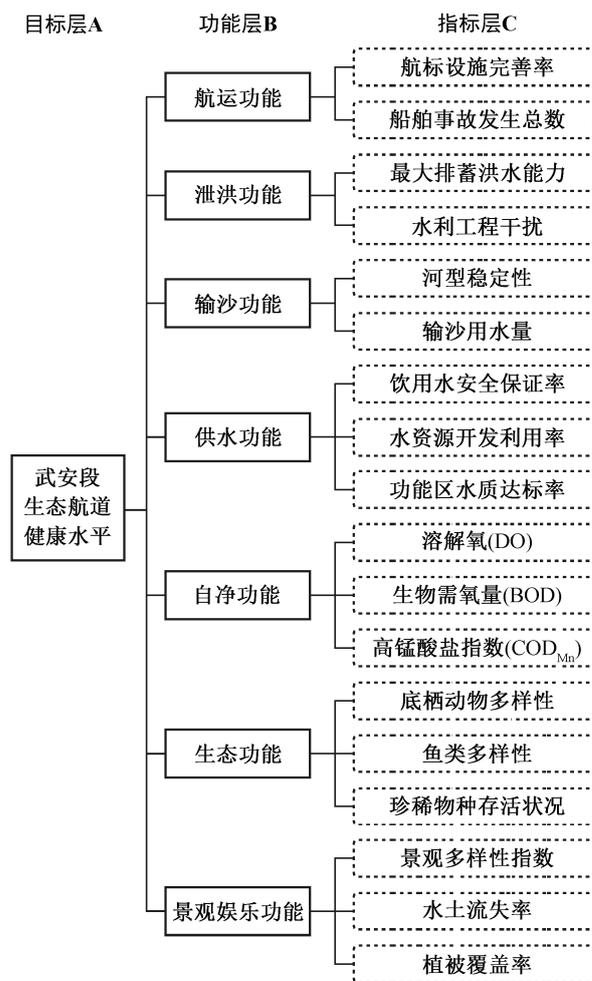


图3 武安段生态航道评价体系  
Fig. 3 Indicator system of Wuhan-Anqing Reach ecological waterway assessment

制的《中国河流泥沙公报》、《2018年中国水资源公报》、《长江泥沙公报(2018)》、《长江干线航道运行报告(2018年度)》和其他水资源公报以及长江海事局等网站公布的2018年险情搜救统计数据等资料。

2) 长江航道整治工程相关报告:《长江下游安庆河段航道整治二期工程竣工环境保护验收调查报告》、《长江下游东北水道航道整治工程竣工环境保护验收意见》和《长江干线武安段6米水深航道整治工程环境影响报告》等。

3) 自主监测数据:水质数据和鱼类监测数据由本研究组对相关断面的实地监测得到。

4) 其他相关资料:政府网站和统计公报中未提及的相关信息,通过查阅文献,提取有效信息。

各项评价指标的计算或获取方法参见文献[21]。指标的划分采用定性与定量相结合的方法,尽可能保证划分标准的科学性和代表性。定量指标主要依据国家相关法律、法规和行业标准以及相关文献资料;定性指标主要采用专家打分的方式,并参考相关文献。各单项指标的标准包括5个等级,具体的划分标准如表1所示。

## 2.4 评价指标的权重

利用层次分析法,对武安段生态航道评价指标体系中各项指标进行权重赋值。2018年2月,通过邮件和现场咨询等方式发放专家调查表,邀请行业内专家对长江中下游生态航道指标体系中的功能及指标进行两两比较打分,调查内容包括航运、泄洪、输沙、供水、自净、生态和景观娱乐7项功能以及对表征各项功能的子指标重要程度的评估,分值为1~10分;根据打分结果,构造A-B和B-C判断矩阵<sup>[31]</sup>,求取判断矩阵的最大特征值和特征向量,计算各判断矩阵的一致性,利用一致性指标C.I.和随机一致性比例C.R.,对判断矩阵进行一致性检验。

## 2.5 评价模型

生态航道评价模型采用综合指数评价法,计算得到的生态航道健康综合指数(waterway health index, WHI)利用木桶理论<sup>[32]</sup>进行修正,计算公式为

$$WHI_c = \sum_{i=1}^n (\log_5 I_i \times w_i),$$

式中,WHI<sub>c</sub>为基于木桶理论修正的生态航道健康综合指数, I<sub>i</sub>为第i个指标的得分值, w<sub>i</sub>为第i个指标相对于目标层的绝对权重。WHI<sub>c</sub>能够反映准则层(功

表 1 武安段生态航道评价指标划分标准  
Table 1 Evaluation standard of Wuhan-Anqing ecological waterway indicators

| 评价指标                                     | 5    | 4    | 3     | 2     | 1     | 划分依据                          |
|--|------|------|-------|-------|-------|-------------------------------|
| 航标设施完善率%                                 | ≥95  | ≥80  | ≥65   | ≥60   | <60   | 《内河通航标准》<br>(GB 50139—2004)   |
| 船舶事故发生总数                                 | ≤20  | ≤50  | ≤70   | ≤100  | >100  | 海事局历史统计数据                     |
| 最大排蓄洪水能力                                 | 千年一遇 | 百年一遇 | 50年一遇 | 20年一遇 | 10年一遇 | 《防洪标准》<br>(GB 50201—94)       |
| 水利工程干扰                                   | 无干扰  | 较小   | 一般    | 较大    | 强烈    |                               |
| 河型稳定性                                    | 顺直   | 弯曲   | 分汊    | 游荡    | —     | 文献[22]                        |
| 输沙用水量变化率/%                               | ≤10  | ≤20  | ≤30   | ≤50   | >50   | 文献[23]                        |
| 饮用水安全保证率/%                               | ≥95  | ≥90  | ≥80   | ≥70   | <70   | 文献[24]                        |
| 水资源开发利用率/%                               | <20  | <30  | <40   | <50   | ≥50   | 文献[11]                        |
| 功能区水质达标率/%                               | ≥90  | ≥80  | ≥60   | ≥40   | <40   | 文献[25]                        |
| DO/(mg·L <sup>-1</sup> )                 | ≥7.5 | ≥6   | ≥5    | ≥3    | ≥2    | 《地表水环境质量标准》<br>(GB 3838—2002) |
| BOD/(mg·L <sup>-1</sup> )                | ≤3   | ≤3   | ≤4    | ≤6    | ≤10   |                               |
| COD <sub>Mn</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | ≤2   | ≤4   | ≤6    | ≤10   | ≤15   |                               |
| 底栖动物多样性                                  | ≥3   | ≥2   | ≥1    | ≥0.5  | <0.5  | 文献[26]                        |
| 鱼类多样性                                    | ≥3   | ≥2   | ≥1    | ≥0.5  | <0.5  | 文献[26]                        |
| 珍稀物种存活状况                                 | 很好   | 较好   | 一般    | 差     | 极差    | 文献[27]                        |
| 景观多样性指数                                  | ≥3.5 | ≥1.5 | ≥1.0  | ≥0.5  | <0.5  | 文献[28]                        |
| 水土流失率/%                                  | <10  | <15  | <25   | <30   | ≥30   | 文献[29]                        |
| 植被覆盖率/%                                  | ≥50  | ≥40  | ≥30   | ≥20   | ≥10   | 文献[30]                        |

能层)对目标层(系统健康水平)贡献的非线性特征,其计算结果为浮点数,优、良、中、差、劣5个等级的区间范围依次为{1}、(1, 0.86]、(0.86, 0.68]、(0.68, 0.43]和(0.43, 0]。

### 3 评价结果与讨论

#### 3.1 评价结果及敏感性分析

根据权重计算结果(表2),结合各个指标的得分,计算得到武安段各项功能的健康指数(表3)。武安段基于木桶修正的生态航道健康综合指数WHI<sub>c</sub>值为0.8145,航道总体上处于“中等”健康水平。

由于基于多指标进行评价生态航道,不确定因素较多,尤其指标权重的优先级由专家打分得到,不确定性较大,因此有必要对权重进行敏感性分析,用于检验评价结果的稳定性。本文采用OAT(the one-at-a-time)法<sup>[33]</sup>进行敏感性分析,每次将一种功能的权重值增加或减少20%,其他功能的权重值按照权重之间的比例进行调整,保证各项权重之和始终为1,重新计算新权重下的生态航道健康指数。

对每种功能进行敏感性分析,结果见表4。可以看出,权重改变20%后,航道的WHI<sub>c</sub>值变化不

大,说明武安段生态航道评价结果具有较高的稳定性和可靠性。

#### 3.2 讨论

本文研究结果表明,武安段的航运、泄洪和景观娱乐功能都属于“良好”水平。航运功能的WHI<sub>c</sub>值较大(0.9508),航标设施完善率和船舶事故发生总数都保持在一个相对好的状态,尤其是船舶事故发生总数,依据长江海事局的险情分布统计数据,武安段2018年共发生险情23件,相比于2008年的139件明显减少。与航道泄洪能力相关的水利工程干扰方面,依据工程环境验收报告,各项工程都针对可能的环境风险和生态环境问题采取了有效的防范措施。景观娱乐功能方面,武安段的景观多样性指数较低,这是由于该河段滩槽格局较差,尚处于航运资源开发阶段,系统性的景观建设还未开展。

武安段的输沙功能和供水功能都属于“中等”水平。该河段的航道整治工程主要是对河段内的洲滩、浅滩及岸线等进行控制守护,水文情势变化较小,输沙用水量同比变化不大。区域供水功能的各项评价指标(饮用水安全保证率、水资源开发利用率和功能区水质达标率)同比差异较小。

表2 武安段生态航道指标权重  
Table 2 Weights of Wuhan-Anqing ecological waterway indicators

| 目标层 A       | 功能层 B  | 权重值(B-A) | 指标层 C                      | 权重值    |        |
|-------------|--------|----------|----------------------------|--------|--------|
|             |        |          |                            | C-B    | C-A    |
| 武安段生态航道健康水平 | 航运功能   | 0.1331   | 航标设施完善                     | 0.6449 | 0.0858 |
|             |        |          | 船舶事故发生总数                   | 0.3551 | 0.0473 |
|             | 泄洪功能   | 0.3073   | 最大排蓄洪水能力                   | 0.5671 | 0.1742 |
|             |        |          | 水利工程干扰                     | 0.4329 | 0.1330 |
|             | 输沙功能   | 0.1536   | 河型稳定性                      | 0.5590 | 0.0858 |
|             |        |          | 输沙用水量变化                    | 0.4410 | 0.0677 |
|             | 供水功能   | 0.1268   | 饮用水安全保证                    | 0.5581 | 0.0708 |
|             |        |          | 水资源开发利用                    | 0.1352 | 0.0171 |
|             |        |          | 功能区水质达标率                   | 0.3066 | 0.0389 |
|             | 自净功能   | 0.1353   | 溶解氧(DO)                    | 0.5182 | 0.0701 |
|             |        |          | 生物需氧量(BOD)                 | 0.2692 | 0.0364 |
|             |        |          | 高锰酸盐指数(COD <sub>Mn</sub> ) | 0.2127 | 0.0288 |
|             | 生态功能   | 0.1153   | 底栖动物多样性                    | 0.3119 | 0.0359 |
|             |        |          | 鱼类完整性指数                    | 0.4002 | 0.0461 |
|             |        |          | 珍稀物种存活状况                   | 0.2880 | 0.0332 |
|             | 景观娱乐功能 | 0.0288   | 景观多样性指数                    | 0.2117 | 0.0061 |
| 水土流失率       |        |          | 0.4081                     | 0.0118 |        |
|             |        |          | 植被覆盖率                      | 0.3802 | 0.0110 |

**表 3 武安段各项功能的健康指数评价结果**  
Table 3 Function health index of Wuhan-Anqing Reach

| 功能     | 权重     | WHI <sub>c</sub> | 等级 |
|--------|--------|------------------|----|
| 航运功能   | 0.1331 | 0.9508           | 良  |
| 泄洪功能   | 0.3073 | 0.8613           | 良  |
| 输沙功能   | 0.1536 | 0.6826           | 中  |
| 供水功能   | 0.1268 | 0.7615           | 中  |
| 自净功能   | 0.1353 | 1.0001           | 优  |
| 生态功能   | 0.1153 | 0.5315           | 差  |
| 景观娱乐功能 | 0.0288 | 0.8762           | 良  |
| 生态航道   | -      | 0.8145           | 中  |

**表 4 权重值增(减) 20% 时 WHI<sub>c</sub> 值的变化**  
Table 4 Fluctuation of WHI<sub>c</sub> with the increase or decrease of the weight by 20%

| 功能     | 减少 20%           |    | 增加 20%           |    |
|--------|------------------|----|------------------|----|
|        | WHI <sub>c</sub> | 等级 | WHI <sub>c</sub> | 等级 |
| 航运功能   | 0.8103           | 中  | 0.8187           | 中  |
| 泄洪功能   | 0.8103           | 中  | 0.8186           | 中  |
| 输沙功能   | 0.8193           | 中  | 0.8097           | 中  |
| 供水功能   | 0.8160           | 中  | 0.8129           | 中  |
| 自净功能   | 0.8087           | 中  | 0.8203           | 中  |
| 生态功能   | 0.8219           | 中  | 0.8071           | 中  |
| 景观娱乐功能 | 0.8141           | 中  | 0.8148           | 中  |

武安段的水体自净功能为“优等”。根据 2018 年本研究组对长江干流主要监测断面的采样分析数据,武安段监测点的 3 项水质指标均满足《地表水环境质量标准》(GB 3828—2002) II 类标准。

2018 年武安段主要监测断面采样分析数据表明,底栖动物和鱼类多样性状况都较差。本文研究结果表明武安段的生态功能较差,与实际情况相符。2006—2015 年,长江干线武汉至安庆河段共实施航道整治工程 17 项<sup>①</sup>,沉排、抛石及疏浚等施工作业改变了生物原有栖息环境,尤其对底栖生物影响最大,大部分底栖生物被掩埋,除少数存活外,绝大多数死亡。根据调查现状分析,虽然在工程结束后,利用人工鱼礁等措施能够恢复底栖动物的生物量,但这些生态补偿措施往往具有时滞性,短期内生态恢复效果不明显,因此有必要对底栖动物开展持续性的监测和系统性的生境修复。与下游的南京—浏河口段相比,武安段的鱼类多样性指数较低。

为了遏制水域生态环境恶化和水生生物多样性降低的趋势,2018 年国务院办公厅印发的《关于加强长江水生生物保护工作的意见》中明确指出,长江流域重点水域 2020 年实现常年禁捕。长江渔业的可持续发展应当“蓄”“养”并进,一方面实施禁捕政策,给鱼类创造尽可能多的生存繁衍机会,另一方面引导渔民退捕转产,创新鱼类养殖模式<sup>[34]</sup>。中华鲟、白鲟、达氏鲟和胭脂鱼等长江珍稀鱼类曾经是长江中重要的捕捞对象,如今已处于濒危状态<sup>[35]</sup>;青、草、鲢、鳙“四大家鱼”曾是长江最多的经济鱼类,如今种苗发生量不足 20 世纪 60 年代的 10%<sup>[36]</sup>。人类活动也压缩了江豚栖息地,使其种群分布严重碎片化,通讯交流受到干扰。农业农村部 2017 年 11 月 10 日至 12 月 31 日组织实施“2017 年长江江豚生态科学考察”,结果表明长江江豚急剧下降趋势已得到缓解,但其数量仍在下降,江豚极度濒危的状况没有得到改善。近年来,农业农村部陆续发布《长江江豚拯救行动计划(2016—2025)》、《中华鲟拯救行动计划(2015—2030)》和《长江鲟(达氏鲟)拯救行动计划(2018—2035)》等一系列计划,针对珍稀物种的就地保护、迁地保护、遗传资源保护与支撑保障 4 个方面的工作将持续进行。

#### 4 结论

本研究建立长江中下游武汉—安庆段的生态航道评价体系,并采用层次分析法和综合指数评价法对该河段 2018 年的生态航道健康水平进行评价。结果表明,武安段航道 2018 年处于中等健康水平,河段的自净功能优秀,航运、泄洪和景观娱乐功能处于良好状态,输沙和供水功能属于中等水平,但生态功能较差。后续航道整治工程中,应尽量采用生态工程方法,减少对水生生物的干扰,同时借助现代信息技术,加强对水体生态的动态监测。

#### 参考文献

- [1] PIANC. Towards a sustainable waterborne transportation industry [EB/OL]. (2011) [2019-10-22]. <https://www.pianc.org/publications/envicom/towards-a-sustainable-waterborne-transportation-industry>
- [2] 刘冰冰,李怡,吴宇雷,等.论内河航运的可持续

<sup>①</sup> 长江航道规划设计研究院,中交第二航务工程勘察设计院有限公司,长江重庆航运工程勘察设计院.长江干线武汉至安庆段 6 米水深航道整治工程初步设计.2018 年 7 月

- 发展. 水道港口, 2015, 36(2): 133-139
- [3] Frings R M, Hillebrand G, Gehres N, et al. From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews*, 2019, 196: 102830
- [4] Dubowy P J. Mississippi River ecohydrology: past, present and future. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2013, 13(1): 73-83
- [5] Bussi G, Whitehead P G, Bowes M J, et al. Impacts of climate change, land-use change and phosphorus reduction on phytoplankton in the River Thames (UK). *Science of The Total Environment*, 2016, 572: 1507-1519
- [6] 袁媛, 赵龙. 国内外内河航道养护发展比较分析. *中国水运(下半月)*, 2017, 17(1): 42-45
- [7] 许鹏山, 许乐华. 甘肃省生态航道建设思考. *水运工程*, 2010(9): 87-91
- [8] 陈华和. 浅谈生态河道建设. *黑龙江水利科技*, 2018, 46(7): 91-92
- [9] 严登华, 窦鹏, 崔保山, 等. 内河生态航道建设理论框架及关键问题. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(6): 73-81
- [10] 刘怀汉, 刘奇, 雷国平, 等. 长江生态航道技术研究进展与展望. *人民长江*, 2020, 51(1): 11-15
- [11] 李天宏, 丁瑶, 倪晋仁, 等. 长江中游荆江河段生态航道评价研究. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(2): 221-234
- [12] 匡舒雅, 李天宏. 五元联系数在长江下游生态航道评价中的应用. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(5): 97-105
- [13] 倪晋仁, 刘元元. 论河流生态修复. *水利学报*, 2006, 37(9): 1029-1037
- [14] 游强强. 湖广-罗湖洲河段6 m水深航道整治工程动床物理模型试验研究. *水运工程*, 2019(6): 111-118
- [15] 汪涛. 激流中的孤岛:长江“跑船人”的另类流动生活——基于铜陵“俞家船帮”人际关系和媒介使用的田野调查[D]. 合肥: 安徽大学, 2020
- [16] 林剑锋, 吴帆, 张明. 基于长江干线某航道整治工程突出岩土工程问题的探讨. *中国水运. 航道科技*, 2019(1): 21-26
- [17] 张淞元, 谢孝如, 吕志方. 基于生态足迹法的长江干线武汉至安庆段航道整治工程评价. *水运管理*, 2019, 41(5): 23-26
- [18] 中国交通新闻网. 长江武汉至安庆段6米水深航道整治工程全面开工建设[EB/OL]. (2018-12-24) [2019-11-22]. [http://www.zgjtb.com/2018-12/24/content\\_216930.htm](http://www.zgjtb.com/2018-12/24/content_216930.htm)
- [19] 庄辑. 航道的分类. *珠江水运*, 2008(9): 61
- [20] 杨丽蓉, 陈利顶, 孙然好. 河道生态系统特征及其自净化能力研究现状与发展. *生态学报*, 2009, 29(9): 5066-5075
- [21] Li T, Ding Y, Xia W. An integrated method for waterway health assessment: a case in the Jingjiang reach of the Yangtze River, China. *Physical Geography*, 2017, 39(1): 67-83
- [22] 范习超. 基于模糊粗糙集的河流结构健康评价模型的优化与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2016
- [23] 严登华, 何岩, 邓伟, 等. 东辽河流域河流系统生态需水研究. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 46-49
- [24] 王孟, 吴国平, 邱凉. 长江流域(片)重要饮用水水源地安全保障达标建设对策研究. *中国水利*, 2014(3): 43-45
- [25] 冯彦, 何大明, 杨丽萍. 河流健康评价的主评指标筛选. *地理研究*, 2012, 31(3): 389-398
- [26] 张娟, 鞠伟. 基于层次分析法的城市河流健康评价研究//第四届中国水生态大会论文集. 海宁, 2016: 560-565
- [27] 刘绍平, 陈大庆, 段辛斌, 等. 长江中上游四大家鱼资源监测与渔业管理. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(2): 183-186
- [28] 龚文峰, 范文义, 祝宁, 等. 哈尔滨城郊的景观格局及多样性. *东北林业大学学报*, 2006, 34(2): 50-53
- [29] 徐后涛. 上海市中小河道生态健康评价体系构建及治理效果研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016
- [30] 蔡守华, 胡欣. 河流健康的概念及指标体系和评价方法. *水利水电科技进展*, 2008, 28(1): 23-27
- [31] Saaty T. Decision making: the analytic hierarchy process // Schmold D L, Kangas J, Mendoza G A, et al. *The analytic hierarchy process in natural resource and environmental decision making*. Berlin: Springer, 2001: 15-35
- [32] 臧成丽. 基于木桶原理的综合评价方法研究及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2012
- [33] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(1): 9-16
- [34] 贾海燕, 雷俊山, 裴中平, 等. 长江安庆段鱼类资源调查及开发利用建议. *江西水产科技*, 2018(6): 55-56
- [35] 从历史游来的长江鱼类. *人民长江报*, 2019-08-31, 第4版
- [36] 邢帆. 10年禁渔, 保护的不只是鱼. *长江日报*, 2020-01-03, 第8版