



# 潮汐河口生态航道评价研究—— 以长江口南槽航道为例<sup>\*</sup>

李蕙<sup>1</sup>, 季岚<sup>1</sup>, 刘红<sup>1</sup>, 石进<sup>2</sup>, 封学军<sup>3</sup>, 任华堂<sup>4</sup>

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 2. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003;  
3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 4. 中央民族大学 生命与环境科学学院, 北京 100081)

**摘要:** 为检验潮汐河口生态航道建设水平, 开展潮汐河口生态航道评价研究。根据潮汐河口自然条件、生态环境、航道属性等特征, 分析潮汐河口生态航道内涵特征, 提出生态航道评价指标体系, 并以长江口南槽航道为例选取适宜指标进行航道健康水平评价。结果表明, 航道治理一期工程实施后南槽航道健康指数 0.884 6, 为良好状态; 工程后南槽河势条件、航道条件明显改善, 通航条件和涉水功能的状态良好, 生境与生物状况处于中等水平, 与河口整体生态环境背景状态一致; 南槽生态航道建设成效显著。

**关键词:** 潮汐河口; 长江口南槽; 生态航道; 评价指标体系

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0138-07

## Waterway ecological evaluation of tidal estuary: a case on waterway of South Passage of the Yangtze River Estuary

LI Hui<sup>1</sup>, JI Lan<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>1</sup>, SHI Jin<sup>2</sup>, FENG Xue-jun<sup>3</sup>, REN Hua-tang<sup>4</sup>

(1. CCCC Shanghai Waterway Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China;  
2. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, MOT, Shanghai 200003, China;  
3. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
4. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To test the ecological waterway construction level in the tidal estuary, we carry out the evaluation study. According to the natural conditions, ecological environment and channel attributes of tidal estuary, we analyze the connotation characteristics of tidal estuary ecological waterway and put forward an evaluation indicator system for it. Taking the South Passage of the Yangtze River Estuary as a case, we select appropriate indicators and evaluate the waterway health index. The results show that the waterway healthy index value of the South Passage after the first phase of navigation channel regulation project is 0.884 6, reaching good level. The regulation project greatly improves the conditions of river regime and enhances the channel conditions. Navigating conditions and water-related function are pretty good. Habitat and biological conditions are in the middle level, consistent with the ecological environment background state of the Yangtze River Estuary. The effect of ecological waterway construction in South Passage is remarkable.

**Keywords:** tidal estuary; South Passage of the Yangtze River Estuary; ecological waterway; evaluation indicator system

收稿日期: 2022-02-24

\*基金项目: 交通运输行业重点科技项目(2019-MS5-106)

作者简介: 李蕙(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事生态航道、生态湿地研究与设计。

通讯作者: 刘红(1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事航道工程研究与设计。E-mail: liuhongshiw@163.com

航运具有占地少、成本低、能耗小、污染小、运量大、效益高等特点,在我国交通运输体系中占据重要地位<sup>[1]</sup>。当前生态文明建设新形势下,对航运发展提出了“生态化”“绿色化”新要求。建设生态航道成为大势所趋,将是未来我国交通运输发展的重点和构建绿色生态交通运输体系的重要内容。

近年来,随着航道生态保护理念的形成,航道工程生态保护与修复技术不断深化,生态航道理论逐渐发展,其理论核心基本形成共识,即作为一种新型航道建设模式,生态航道具有绿色低碳、和谐生境、生态文化等内涵,通过协调航运功能、生态功能和其他社会服务功能的相互关系,实现生态系统健康与可持续发展<sup>[2-3]</sup>。在生态航道理论研究的基础上,生态航道评价研究有所发展。刘金林等<sup>[4]</sup>提出生态航道系统是达到“人水和谐”状态的河道系统,并分析生态足迹法和灰色关联法两种生态航道评价方法的适用性;朱孔贤等<sup>[5]</sup>依据施工生态性、航道生态性、航运环保性、航道可持续性与社会适宜性 5 个准则对生态航道层次分析评价指标体系进行了探索研究;李天宏等<sup>[6-7]</sup>、匡舒雅等<sup>[8]</sup>分别针对长江中游荆江河段和南京—浏河口河段从航运、输水泄洪、输沙、供水、自净、生态以及景观娱乐 7 大功能出发构建了指标体系,采用不同方法对航道健康水平进行评价。然而已有的生态航道评价研究主要集中在内河航道,潮汐河口尚未见报道。

与内河相比,潮汐河口地处海陆交汇地带,水沙交换频繁、河床冲淤多变,潮滩湿地广布,生物多样性丰富,其生态航道建设面临更复杂的自然条件和更脆弱的生态环境。当前适用于内河的生态航道符合性评价指标体系不具备普适性,无法准确、定量评价潮汐河口航道的“健康状况”,一定程度上影响了潮汐河口生态航道的建设过程。本文综合生态系统发展和航道建设双重要求,在分析潮汐河口生态航道内涵的基础上,研究建立适应于潮汐河口自然和生态环境的生

态航道评价指标体系,解决了评价指标片面性、零散性问题,可为潮汐河口生态航道评价提供一种新思路,也为生态航道建设与管理提供依据。

## 1 潮汐河口生态航道评价指标体系

### 1.1 潮汐河口生态航道内涵特征

生态航道在河口治理中是流域性的系统工程,须遵循区域自然、生态环境的特点,将生态的理念贯穿于航道设计、建设、运营的全过程,保证航运畅通以及河口生态系统可持续发展。

综合潮汐河口生态系统发展和航道建设双重要求,潮汐河口生态航道须满足“航运通畅、生态友好、资源节约、协调发展”的内涵特征。保障航运通畅是生态航道建设运营的基础,航运通畅的范畴主要包括:航道尺度稳定、航道通过能力强、航运设施齐全、航标效能高质、船舶航行安全等。坚持“生态友好”是生态航道建设运营的核心,应在航道平面布置、整治建筑物工程和疏浚工程等方面采用生态化设计,并开展绿色施工、生态监管,保证航道建设与周边生态系统的协调与稳定。资源节约是生态航道建设运营的重点,应采取绿色施工措施,促进资源优化配置和高效利用,减少废弃物产生,拓展疏浚土资源化利用途径,尽可能提高航道效能。保持协调发展是生态航道建设运营的前提,航道建设应与供水安全、防洪排涝、水环境保护和生态保育等多目标协同,促进河口区域整体功能不断提升。

### 1.2 潮汐河口生态航道评价指标

从生态航道内涵特征出发,基于潮汐河口自然条件、生态环境、航道属性等特点,本文提出河势条件、航道条件、通航条件、生境、生物、景观、资源利用、绿色施工、节能减排、涉水功能、设计建设、运维管理等 12 个准则层,下属 52 个评价指标层及其说明,基本涵盖了潮汐河口生态航道建设的总体情况和一般特点,为潮汐河口生态航道评价提供了量化的技术评价指标体

系, 见表 1。在开展具体潮汐河口生态航道评价时, 宜根据河口自身情况在该指标体系中选择适

合本航道特征的指标层或进行局部微调, 开展生态航道评价。

表 1 潮汐河口生态航道评价指标体系

内涵	准则层	指标层	指标说明
航运通畅型 A <sub>1</sub>	河势条件 B <sub>1</sub>	河势控制效果 C <sub>1</sub>	从固滩、稳槽、导流、限流、增深、拦沙、减淤等方面定性分析
		深槽整治效果 C <sub>2</sub>	可用深槽容积变化率表征
		滩面整治效果 C <sub>3</sub>	可用滩体面积(体积)变化率、窜沟容积变化率表征
		流速变化率 C <sub>4</sub>	可用航槽流速变化率、滩面流速变化率表征
		纳潮量变化率 C <sub>5</sub>	可用主航道所在的汊道纳潮量变化率表征
	航道条件 B <sub>2</sub>	汊道分流比 C <sub>6</sub>	潮汐分汊河口航道可采用分流比变化值表征
通航条件 B <sub>3</sub>	航运条件 A <sub>1</sub>	通航深度保证率 C <sub>7</sub>	采用《水运工程质量检验标准》 <sup>[9]</sup> 规定的方法计算
		航槽宽度保证率 C <sub>8</sub>	反映工程实施后航道尺度提升的效果
		航槽单宽潮流量变化率 C <sub>9</sub>	反映工程实施后航道内动力改善的效果
		对临近航道影响 C <sub>10</sub>	可通过工程实施后临近航道维护量增量表征
		航道疏浚维护比 C <sub>11</sub>	可用年维护量与航道年均货运量比值表征
	生境 B <sub>4</sub>	航行条件变化 C <sub>12</sub>	可用工程后风流压偏角、横流等变化值表征
生态友好型 A <sub>2</sub>	生态友好型 A <sub>2</sub>	通航安全指数 C <sub>13</sub>	根据事故总数、碰撞事故数、特大事故数等多要素综合计算 <sup>[10]</sup>
		航标效能 C <sub>14</sub>	采用《海区航标效能验收规范》 <sup>[11]</sup> 规定的方法计算
		锚地服务区配置率 C <sub>15</sub>	可用实配数量与应配数量的比值表征
		生态基底改善度 C <sub>16</sub>	定性分析评价水生生物(底栖生物为主)生境改善程度
		生态流量满足度 C <sub>17</sub>	可参考《河湖健康评价指南》 <sup>[12]</sup>
	生物 B <sub>5</sub>	水文环境 C <sub>18</sub>	可用流速、波浪、浊度等水文特征指标表征
资源节约型 A <sub>3</sub>	生态友好型 A <sub>2</sub>	沉积环境 C <sub>19</sub>	可用粒度参数、表层沉积物综合指数、沉积物污染指数等指标表征
		活动通道 C <sub>20</sub>	定性分析评价工程对重要水生生物洄游等活动的影响程度
		水生生物健康指数 C <sub>21</sub>	可参考《近海海洋生态健康评价指南》 <sup>[13]</sup> 规定的方法计算
		植被 C <sub>22</sub>	可用植被总面积、植被覆盖增长率、生物量、多样性指数等指标表征
		浮游生物 C <sub>23</sub>	可用浮游动物(植物)物种数、多样性指数、生物量等指标表征
	景观 B <sub>6</sub>	底栖生物 C <sub>24</sub>	可用底栖生物物种数、多样性指数、生物量等指标表征
资源节约型 A <sub>3</sub>	资源节约型 A <sub>3</sub>	鱼类 C <sub>25</sub>	可用鱼类物种数、多样性指数、生物量、完整性指数等指标表征
		鸟类 C <sub>26</sub>	可用鸟类物种数、多样性指数、丰富度等指标表征
		重要物种 C <sub>27</sub>	定性分析评价重要物种存活情况、种群稳定情况及生境适宜性等
		外来物种 C <sub>28</sub>	可用外来入侵物种种类、数量、入侵面积及对本地物种危害等表征
		景观破碎度 C <sub>29</sub>	可用景观破碎率、景观优势度、景观形状指数等指标表征
	资源利用 B <sub>7</sub>	景观多样性 C <sub>30</sub>	可用香农-维纳多样性指数表征
		景观舒适度 C <sub>31</sub>	定性分析评价景观连通性、与环境协调性、配置舒适性等方面
绿色施工 B <sub>8</sub>	资源节约型 A <sub>3</sub>	疏浚土利用率 C <sub>32</sub>	可用疏浚土利用方量与疏浚土总量的比值表征
		可回收材料利用率 C <sub>33</sub>	可用回收再利用的废弃材料量与总废弃物量的比值表征
		绿色装备利用率 C <sub>34</sub>	可用节能清洁装备数量与总装备数量的比值表征
		整治建筑物绿色施工 C <sub>35</sub>	可从施工装备、材料、方法、工艺及施工安排等方面定性评价
		疏浚工程绿色施工 C <sub>36</sub>	可从疏浚工法、精度与频次、疏浚土处置等方面定性评价
	节能减排 B <sub>9</sub>	航标工程绿色施工 C <sub>37</sub>	可从航标建设与保养工艺、材料、能源使用等方面定性评价
		护岸工程绿色施工 C <sub>38</sub>	可从施工工法、自然材料、施工工艺与安排等方面定性评价
LNG 等新能源应用 C <sub>41</sub>	绿色施工 B <sub>8</sub>	绿色能源利用率 C <sub>39</sub>	可用航道建设与维护过程中使用的绿色能源比例表征
		能耗下降率 C <sub>40</sub>	反映航道建设与维护过程中节能降耗的程度
	LNG 等新能源应用 C <sub>41</sub>		可用船舶利用液化天然气(LNG)新能源动力的比例表征

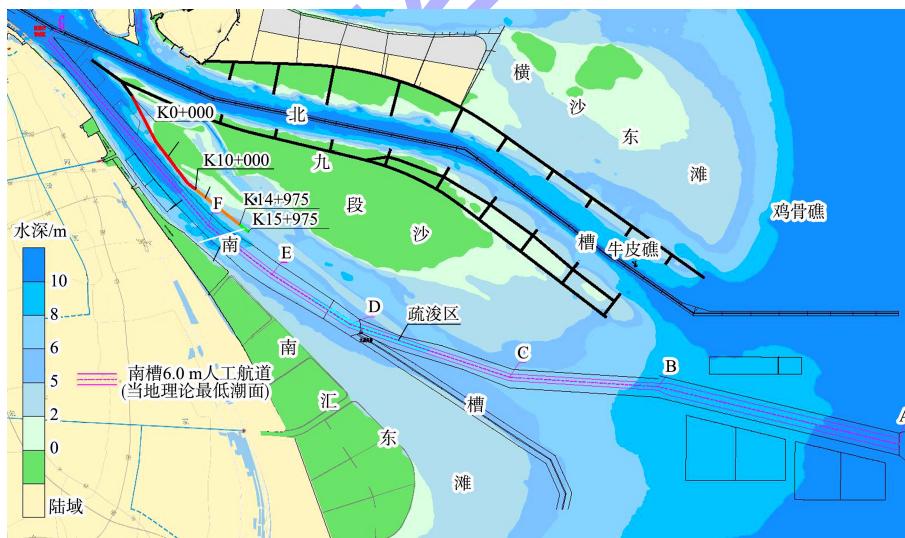
续表1

内涵	准则层	指标层	指标说明
协调发展型 A <sub>4</sub>	涉水功能 B <sub>10</sub>	水质环境 C <sub>42</sub>	可用水质参数、水质综合指数等指标表征
		功能区水质达标率 C <sub>43</sub>	可用水功能区水质标准的满足程度比例表征
		富营养化程度 C <sub>44</sub>	可用富营养化指数、营养状态指数、营养状态质量指数等指标表征
	设计建设 B <sub>11</sub>	水资源开发利用率 C <sub>45</sub>	反映水资源有效开发利用和科学管理的程度
		盐水入侵影响程度 C <sub>46</sub>	可用水体氯度变化值、咸水入侵增加时间、最大不可取水时间等表征
		防洪排涝影响程度 C <sub>47</sub>	可用沿程水位变化值等指标表征
运维管理 B <sub>12</sub>	生态航道运维管理体系 C <sub>50</sub>	设计理念及保障机制 C <sub>48</sub>	从设计理念、平面布置、生态环保体系和应急处理机制等方面评价
		生态环境保护与修复 C <sub>49</sub>	从环保宣传与培训、环境保护措施、生态修复与补偿措施等方面评价
	生态监测与评估 C <sub>51</sub>	生态航道运维管理体系 C <sub>50</sub>	从建设维护方案、生态环保运行体系、环境污染应急预案、环保监理与巡查等方面评价
		生态监测与评估 C <sub>51</sub>	从监测方案、监测计划、定量评估、综合性研究等方面评价
		生态航道信息化水平 C <sub>52</sub>	从信息化、自动化技术、数字化管理方式及先进培训方式等方面评价

## 2 长江口南槽生态航道评价

长江口南槽航道上接南港航道、下至南槽灯船，全长约 86 km，作为辅航道，是长江口船舶入海的重要通道。按照长江口南槽航道治理工程总体方案分期实施：一期工程建设 6.0 m(水深)航道，后续工程建设 8.0 m(水深)航道。一期工程航道建设内容包括：沿江亚南沙南缘向下游建设 1 条护滩堤，上游顺接长江口 12.5 m 深水航道分

流鱼嘴南线堤，总长约 16 km；航道基建疏浚段长约 14 km，挖槽宽度 600 m，疏浚底高程 -6.0 m，并配备导助航及相关配套设施。整治建筑工程于 2018 年 12 月底正式开工建设，工程总工期 2.5 a，其中整治建筑物建设工期为 1.5 a，疏浚工程于 2019 年 10 月开工，2020 年 6 月整体工程交工后进入 1 a 的试运行期。



注：K0+000—K15+975 为江亚南沙护滩堤，总长 15.975 km，其中，K0+000—K10+000 段高程 2.0 m，K10+000—K14+975 段高程 1.5 m，下段 300 m 为过渡段，尾部 700 m 长为 2 m 高护滩堤（上海城建吴淞基地）。根据 2016 年地形测图绘制。

图 1 评价区域位置

### 2.1 南槽生态航道评价指标体系构建

根据长江口南槽航道的自然条件、生态环境和航道属性等特征，在潮汐河口生态航道评价指标库中选取 19 个代表性指标，针对河势条件、航

道条件、通航条件、生境、生物、绿色施工、涉水功能、设计建设、运维管理 9 个方面建立南槽生态航道评价指标体系（表 2），评估南槽航道治理一期工程后航道整体健康状况。

表 2 南槽生态航道评价指标

准则层	指标层	获得方法
河势条件	河势控制效果	定性评价工程实施后对长江口滩槽格局的影响
航道条件	通航深度保证率	报告期内大于设计通航深度标准的时间占报告期日历时间的百分率
	航道疏浚维护比	航道年维护量占航道年均货运量的百分率
	对深水航道的影响	工程后深水航道回淤增量占工程前深水航道年平均回淤量的百分率
通航条件	航行条件变化	工程后风流压角与工程前风流压角的差值
	通航安全指数	根据事故总数、碰撞事故数、特大事故数、死亡人数、沉船艘数、直接经济损失等因素及其权重综合确定
	航标效能	根据航标准确性、完整性、适应性、可靠性、先进性、环保性、标准化、成熟度、附近水工设施、维护水平、管理手段等因素及其权重综合确定
生境条件	沉积物综合指数 <sup>[14]</sup>	各单项指标标准指数的等权平均, 单项指标标准指数计算依据海洋沉积物质量一类标准
生物状况	水生生物健康指数	根据生物评价指标均值及长江口赋值要求进行的赋值与评价指标个数的比值
	植被覆盖增长率	滩涂植被面积增加量占工程前植被总面积的百分率
	重要物种生境状况	定性评价存活状况、生境条件及种群稳定情况
绿色施工	绿色施工技术	定性评价: ①整治建筑物施工运用新装备、新材料, 提高资源利用率; ②整治建筑物创新施工方法和工艺, 提高施工效率; ③施工机械功率与负载相匹配, 符合机械设备管理制度, 机械能耗低; ④采用先进工法, 控制超挖及漏挖、欠挖, 保证精确疏浚精度; ⑤疏浚土全程无污染化处置, 运输、装载等环节采取环保措施
涉水功能	水质综合指数	各单项指标标准指数的等权平均, 单项指标标准指数计算依据海水水质一类标准
	防洪影响程度	用高潮位变化量表示, 即工程后高潮位与工程前高潮位的差值
	生态航道设计理念及保障机制	定性评价: ①航道设计主动避让生态红线和生态敏感区; ②航道治理与湿地保护相结合; ③开展生态研发与设计, 建筑物适宜生物栖息; ④建立生态环境保护体系和应急处理机制; ⑤设计方案经过工程监理及第三方环保单位的审核认可
设计建设	生态环境保护与修复	定性评价: ①采取生态保护措施, 减少对生物影响; ②加强船舶污染物防治, 落实固体垃圾处理措施和污水控制措施; ③制定严格作业规程, 加强施工人员环保宣传与培训; ④陆上作业采取生态环保措施, 施工作业避免进入红线区; ⑤委托专业机构定期开展增殖放流等生态补偿措施
	生态航道运维管理体系	定性评价: ①制定详细的生态航道建设维护方案及实施细则; ②规范船舶航行行为, 减少对水生生物的误伤; ③开展航道疏浚土有益利用研究与实践; ④施工单位建立施工期和试运行期生态环保运行体系, 定期进行环境污染应急演练; ⑤航道管理部门在营运期开展定期巡查与环境保护管理
运维管理	生态跟踪监测与评估	定性评价: ①制定详细的生态环境监测计划, 开展持续性跟踪监测; ②做好数据采集及分析, 及时掌握周边生态环境的动态变化; ③针对周边生态敏感区域, 安排针对性监测, 及时分析工程影响; ④对生态补偿效果进行定量监测与科学评估; ⑤积极推进航道工程建设与生态环境的协同综合研究
	生态航道信息化水平	定性评价: ①项目管理应用建筑信息模型(BIM)技术; ②采用远程监控、办公自动化(OA)等信息技术; ③施工工地应用自动监测手段进行智能化监控; ④整治建筑物采用自动化、数字化管理方式; ⑤施工班组开展环保教育的虚拟现实(VR)培训

## 2.2 指标计算与标准划分

根据已有的规范和文献等资料, 结合长江口南槽航道治理一期工程建设特点, 确定各个定量指标的计算方法; 结合航道规划、设计、施工建

设各方代表及相关研究领域的专家意见, 制定了定性指标评价内容, 见表 2。本文采用 5 级分值评分法, 将航道各个指标状态划分为优、良、中、差、劣 5 个级别, 划分标准见表 3。

表 3 南槽生态航道指标评分标准

分值	河势控制效果	通航深度保证率	航道疏浚维护比	对深水航道的影响	航行条件变化	通航安全指数
5(优)	很好	≥98%	≤5%	≤5%	减小 5°及以上	>1.50
4(良)	较好	90%~98%	5%~10%	5%~10%	减小 2°~5°	1.05~1.50
3(中)	一般	80%~90%	10%~20%	10%~15%	不变(0°)	0.95~1.05
2(差)	差	70%~80%	20%~25%	15%~20%	增加 2°~5°	0.80~0.95
1(劣)	极差	<70%	>25%	>20%	增加 5°及以上	≤0.8

续表 3

分值	航标效能	沉积物综合指数	水生生物健康指数	植被覆盖增长率	重要物种生境状况	绿色施工技术
5(优)	>8.5	<0.2	42<~50	≥6%	很好	满足 5 点
4(良)	8.0~8.5	0.2~0.4	34~42	4%~6%	较好	满足 4 点
3(中)	7.5~8.0	0.4~0.7	26~34	2%~4%	一般	满足 3 点
2(差)	6.5~7.5	0.7~1.0	18~26	0%~2%	差	满足 2 点
1(劣)	≤6.5	≥1.0	10<~18	<0%	极差	满足少于 2 点

分值	水质综合指数	防洪影响程度	生态航道设计理念及保障机制	生态环境保护与修复	生态航道运维管理体系	生态跟踪监测与评估	生态航道信息化水平
5(优)	<0.2	≤1 cm	满足 5 点	满足 5 点	满足 5 点	满足 5 点	满足 5 点
4(良)	0.2~0.4	1~2 cm	满足 4 点	满足 4 点	满足 4 点	满足 4 点	满足 4 点
3(中)	0.4~0.7	2~5 cm	满足 3 点	满足 3 点	满足 3 点	满足 3 点	满足 3 点
2(差)	0.7~1.0	5~10 cm	满足 2 点	满足 2 点	满足 2 点	满足 2 点	满足 2 点
1(劣)	≥1.0	>10 cm	满足少于 2 点	满足少于 2 点	满足少于 2 点	满足少于 2 点	满足少于 2 点

### 2.3 评价结果

以南槽航道治理一期工程为评价对象,搜集整理工程相关报告、南槽水域生态环境监测资料、行业主管部门公报和年鉴、文献研究等资料,通过指标定量计算和专家定性打分,获得各个指标的评分结果。

根据层次分析法<sup>[15]</sup>设计专家打分表,向航道设计与管理、生态环境、水文水资源、水利水电、长江口水产等领域的专家学者咨询意见。将专家打分两两比较形成矩阵,通过层次分析法获得判

断矩阵的一致性比率 CR,利用群决策层次分析对 CR 进行归一化处理得到专家权重,再与准则权重加权得到各准则综合权重。

采用基于本桶理论的综合指数法,通过对数函数对指标得分  $I_i$  和权重  $w_i$  的加权结果进行加法转换,计算航道健康指数  $HI = \sum_{i=1}^n (\log_5 I_i w_i)$ , 检视南槽航道各方面现状健康情况。各指标得分及南槽航道健康水平计算结果见表 4。

表 4 各指标得分及南槽航道健康水平计算结果

准则层	指标层	计算结果	评分结果	指标权重	准则权重	各准则健康水平 HI
河势条件	河势控制效果	很好	5	0.197 5	0.197 5	1.000 0
	通航深度保证率	100%	5	0.079 6		
航道条件	航道疏浚维护比	3.04%	5	0.028 8	0.150 6	1.000 0
	对深水航道的影响	0	5	0.042 3		
通航条件	航行条件变化	0°	3	0.029 6		
	通航安全指数	1.5	4	0.070 8	0.149 1	0.825 8
	航标效能	8.1	4	0.048 7		
生境条件	沉积物综合指数	0.408	3	0.117 6	0.117 6	0.682 6
	水生生物健康指数	27	3	0.038 0		
生物状况	植被覆盖增长率	4%	4	0.022 4	0.127 3	0.714 1
	重要物种生境状况	一般	3	0.066 8		
绿色施工	绿色施工技术	满足 5 点	5	0.051 2	0.051 2	1.000 0
	水质综合指数	0.479	3	0.045 5	0.091 0	0.841 3
涉水功能	防洪影响程度	1cm	5	0.045 5		
	生态航道设计理念及保障机制	满足 5 点	5	0.031 7	0.064 7	1.000 0
设计建设	生态环境保护与修复	满足 5 点	5	0.033 0		
	生态航道运维管理体系	满足 5 点	5	0.025 9		
运维管理	生态跟踪监测与评估	满足 5 点	5	0.016 1	0.051 0	0.975 6
	生态航道信息化水平	满足 4 点	4	0.009 0		

经计算, 南槽航道健康指数为 0.884 6, 按照优(1.00)、良(0.86)、中(0.68)、差(0.43)、劣(0.00)5 个级别进行等级划分, 表明南槽航道健康状况为良好( $>0.86$ )状态。

南槽航道治理工程实施后, 南槽河势条件、航道条件明显改善, 处于优秀状态; 通航条件、涉水功能状态接近良好。南槽航道治理一期工程在设计建设、施工和运营过程中绿色节能、生态环境保护、生态修复补偿、运维管理等措施落实到位, 未对南槽自然环境造成不良影响, 没有破坏航道区域的其他功能。在航道整治工程的守护作用下, 江亚南沙湿地稳定性和生物多样性有所改善。但是整体而言, 南槽航道区域生境与生物状况受河口整体生态环境背景状态影响, 依然属于中等水平。

鉴于生态航道评价采用多指标体系, 指标权重通过专家打分获得, 具有一定的不确定性, 因此本文采用单因素轮换 OAT (the one-at-a-time) 法<sup>[16]</sup> 对评价结果稳定性进行检验, 进行检验(表 5)。可以看出, 评价结果对准则总权重的 20%~90% 幅度波动敏感性不高, 航道健康水平指数均在 0.88 左右, 均处于良水平, 该评价结果具有较高的稳定性和可靠性。

表 5 权重  $w$  浮动 20% 和 90% 的航道健康指数变化

准则层	权重 $w$ 浮动 20%		权重 $w$ 浮动 90%	
	1.2w 时的 HI	0.8w 时的 HI	1.9w 时的 HI	0.1w 时的 HI
河势条件	0.890 3	0.879 0	0.910 2	0.859 1
航道条件	0.888 7	0.880 5	0.903 1	0.866 2
通航条件	0.882 6	0.886 7	0.875 4	0.893 9
生境条件	0.879 3	0.890 0	0.860 4	0.908 9
生物状况	0.879 7	0.889 6	0.862 3	0.907 0
绿色施工	0.885 9	0.883 4	0.890 2	0.879 0
涉水功能	0.883 8	0.885 5	0.880 7	0.877 5
设计建设	0.886 2	0.883 0	0.891 8	0.877 5
运维管理	0.885 6	0.883 7	0.889 0	0.880 2

### 3 结论

1) 综合航道建设和生态系统可持续发展双重要求, 潮汐河口生态航道须满足“航运通畅、生态友好、资源节约、协调发展”的内涵特征。

2) 根据潮汐河口自然条件、生态环境及航道

特征, 本文提出河势条件、航道条件、通航条件、生境、生物、景观、资源利用、绿色施工、节能减排、涉水功能、设计建设、运维管理 12 个准则层, 下属 52 个指标层及其说明, 构建生态航道评价指标体系, 用以评价潮汐河口生态航道建设水平。

3) 在潮汐河口生态航道评价指标体系中选择 19 个代表性指标, 开展长江口南槽航道健康水平评价。结果表明, 南槽航道治理一期工程实施后极大改善了南槽河势条件、航道条件和通航条件, 航道护滩堤有利于保护江亚南沙湿地、维持九段沙湿地稳定和九段沙局部区域生物多样性增加, 南槽生态航道建设效果显著, 航道整体处于良好( $>0.86$ )状态。但是由于护滩堤规模有限, 工程对于南槽整体生境和生物状况的提升作用不明显。受河口生态环境背景状态影响, 南槽航道区域生境与生物状况处于中等水平。

4) 未来南槽航道后续工程可考虑进一步将航道整治与湿地保护联动布局, 处理好航道建设与河口生态系统发展之间的关系, 完善生态型整治建筑物的研发和设计, 积极探索航道疏浚土有益利用的新途径, 进一步巩固生态航道建设成效、深化生态航道建设内涵。

### 参考文献:

- 吴澎.中国内河航运发展的机遇与挑战[J].水运工程, 2010(2): 11-15.
- 倪晋仁, 刘怀汉, 谷祖鹏.长江“黄金航道”整治技术研究与示范[J].中国环境管理, 2017, 9(6): 112-113.
- 刘怀汉, 刘奇, 雷国平, 等.长江生态航道技术研究进展与展望[J].人民长江, 2020, 51(1): 11-15.
- 刘金林, 张世宝, 王二平.生态航道系统内涵及评价方法[J].华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 80-83.
- 朱孔贤, 蒋敏, 黎礼刚, 等.生态航道层次分析评价指标体系初探[J].中国水运(航道科技), 2016(2): 10-14.
- 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[J].应用基础与工程科学学报, 2017, 25(2): 221-234.