



多目标协同下长江上游航道承载力评价*

刘 鑫¹, 王 丽², 万 宇², 杜洪波², 杨胜发², 李文杰^{1,2}

(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. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 为了进一步深化长江航道承载力的相关研究, 探求航道的提升潜力, 基于生态、经济、水资源配置和防洪多目标协同下航道承载力概念, 以长江上游广阳坝河段为例, 根据航段特性, 结合影响因素互适机理, 针对性地选择评价指标, 初步构建航道承载力评价模型体系, 分析计算该河段 3.5、4.5 及 6.0 m 航道水深下航道承载力综合评价值。结果表明, 6.0 m 航道水深下承载力状态最佳; 广阳坝河段在综合考虑上述目标影响后, 对于航道水深还有一定的提升空间。

关键词: 航道承载力; 航道水深; 评价模型; 评价指标

中图分类号: U 692

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0171-06

Evaluation of waterway bearing capacity of the upper Yangtze River under multi-objective cooperation

LIU Xin¹, WANG Li², WAN Yu², DU Hong-bo², YANG Sheng-fa², LI Wen-jie^{1,2}

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

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to further deepen the relevant research on the bearing capacity of the Yangtze River channel and explore the improvement potential of the channel, we combine with the concept of ecological, economic, water resources allocation and flood control multi-objective coordination of the channel bearing capacity, take Guangyangba waterway of the upper reaches of the Yangtze River as an example, combine with the channel characteristics and the mutual adaptation mechanism of influencing factors, target selection of the evaluation indicators, preliminarily construct the channel bearing capacity evaluation model system of Guangyangba waterway, and analyze and calculate the comprehensive channel bearing capacity under the channel depths of 3.5 m, 4.5 m and 6.0 m. The results show that the bearing capacity is the best under the 6.0 m channel depth. Guangyangba waterway has a certain amount of depth for improvement after comprehensively considering the influence of the above targets.

Keywords: waterway bearing capacity; channel depth; evaluation model; evaluation indicator

长江黄金水道建设作为推动长江经济带发展的首要任务, 对推动整个流域经济协调发展具有十分重要的战略意义。当前, 长江黄金水道面临

着防洪、航运、发电、供水、生态等水资源综合利用的新需求, 在新需求下长江航运尺度究竟能开发到多大、如何合理规划长江航运建设等问题

收稿日期: 2020-09-01

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079013); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402103)

作者简介: 刘鑫(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为河床演变。

通讯作者: 李文杰(1984—), 博士, 男, 教授, 研究方向为航道水沙运动基础理论及生态智能航道。E-mail:

li_wj1984@163.com

还未完全解决。

目前，国内外对于航道承载力方面的研究还比较少。Hijdra 等^[1]认为每条内河航道都有其自身的承载能力，传统航道多是以通航为目的进行重点开发的，当前航道建设应进行多方面的考量，走更可行、高效的再开发道路，充分发挥航道潜力。刘怀汉等^[2]对长江黄金航道承载力及提升潜力提出研究构想和展望。赵艺为等^[3-5]将长江航道承载力定义为长江航道在多因素约束及多目标协同下的最大航道尺度与最优通过能力，初步构建了长江航道承载力影响因素体系，并对承载力的协同发展中的互适性内涵及互适发展规律进行归纳总结。马驰等^[6]根据航道资源的属性，归纳其含义为在实现水资源综合高效保护利用的条件下，某一地区的航道在特定的社会经济和科学技术发展阶段，在多因素约束和多目标协同下所能开发的最大航道尺度。李文杰等^[7]将航道承载力定义为：在一定时期、一定河段内，航道在某个尺度下承载社会经济可持续发展的能力。归纳而言，航道承载力水平最终可体现在航道尺度上，是航道基于自然禀赋，在一个特

定的时期内，在一定社会经济与技术条件下，响应生态、航运、水资源配置、防洪等多目标协同需求下能够开发的最大航道尺度。

本文以长江上游广阳坝河段为例，在其自然航道条件的基础上，结合影响因素互适机理，根据航段特性，基于生态、经济、水资源配置及防洪多个目标，针对性选取评价指标，构建评价模型体系，结合层次分析法和专家调查法，对河段的现状、提升一级及深化后的河段航道承载力进行计算，得到 3.5、4.5 及 6.0 m 这 3 个航道水深下的承载力评价情况，探求航道开发的最佳水深，以期为长江上游航道开发建设提供参考。

1 河段概况与航道承载力的影响因素

广阳坝河段(图1)位于长江上游航道里程631~641 km, 属于朝天门—涪陵河段的上段, 流经重庆主城, 是典型的山区河流, 地形和水流条件十分复杂, 目前航道等级为Ⅲ级, 航道维护尺度为3.5 m×100 m×800 m(水深×航宽×弯曲半径, 下同), 拟建设航道标准4.5 m×150 m×1 000 m。

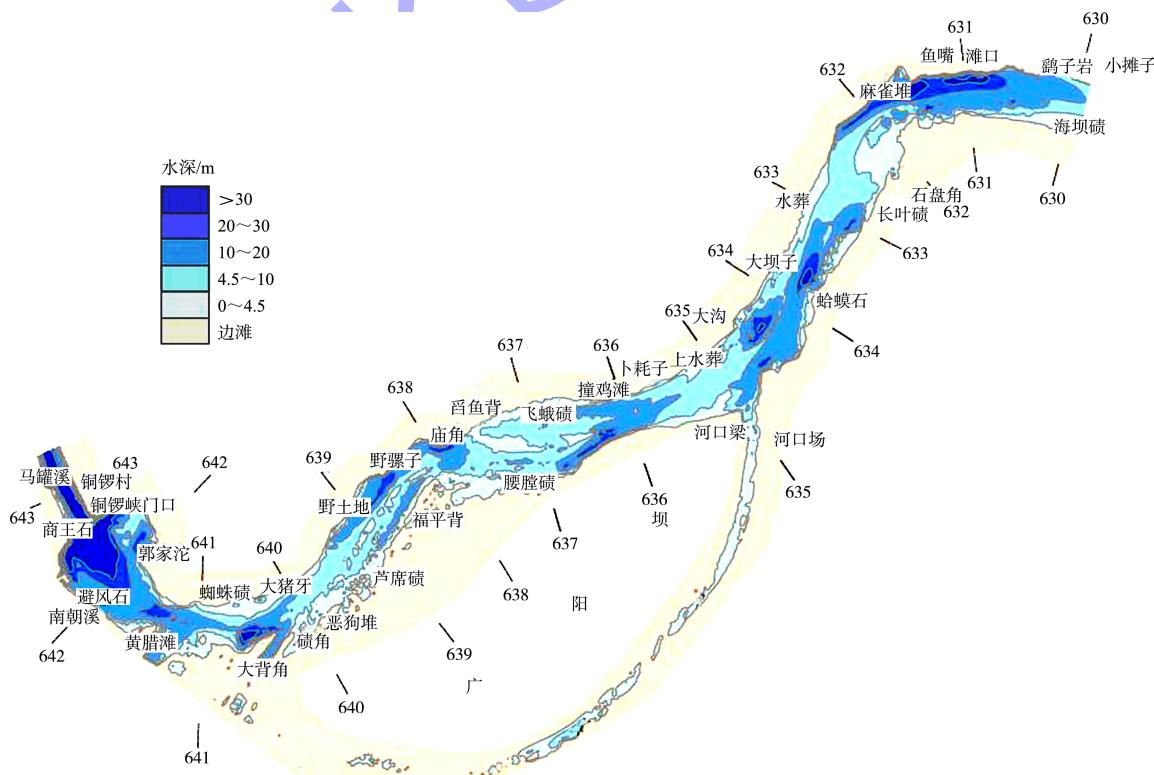


图 1 广阳坝河段 2017 年 11 月河势与水深分布

经济是航道等级提升的重要驱动因素。工程河段航道水运需求主要受长江上游区域社会经济发展的影响,故该工程经济影响的重点区域是长江上游重庆市、四川省、云南省和贵州省,航运需求大;同时随着航道等级提升和船舶大型化趋势,会带来船舶运输成本效益的降低。因此,经济是航道承载力的重要影响因素之一。

生态是河流可持续发展的重要保证。河段位于长江上游,是四大家鱼的重要繁殖区域,在航道开发时须考虑在航道建设及船舶运营过程中对岸坡植被、河床、水生生物及水质带来的影响,故生态是航道承载力的约束因素之一。

从资源配置方面,广阳坝河段横穿重庆市中心,该河段上有两个取水口,一个I级引用水源保护地,对城镇进行生活及工农业供水。该河段上还有中嘴东港码头及桥梁,而生产和生活等取水可造成河段流量的减少、通航水位降低。水资源的合理配置也是影响航道承载力的重要因素。

防洪安全是航道建设发展的重要保证。河段位于重庆主城区,人口密度大,防洪标准高,为100 a一遇,也是航道承载力的重要约束因素。

2 航道承载力评价模型

2.1 模型体系构建及指标选取

2.1.1 生态子目标 U_1

该目标反映的是航道建设或船舶运营过程中对河段生态的影响,主要通过生境 A_1 和节能减排 A_2 两个一级指标进行评价。一级指标生境共包含5个二级指标,分别是生态需水满足度 B_1 、岸坡植被覆盖率 B_2 、水生物栖息地适宜度 B_3 、河床人为改变率 B_4 、水生生物多样性 B_5 ;节能减排由二级指标船舶石油类排放 B_6 体现。

生态需水满足度是指天然河道最小流量占河道生态需水最小流量百分比,该指标对河流生态系统的稳定性和多样性具有重要意义。目前,计算河流生态需水的计算方法主要有水文学法、水力学法、栖息地评价法、整体分析法等^[8]。由于有较长的历史流量资料,此处选取水文学法中的

蒙大拿法^[9],计算公式如下:

$$EW = W_{dmin}/W_R \quad (1)$$

式中: EW 为生态需水满足度; W_{dmin} 为河道日径流量最小值; W_R 为河道生态需水量,一般将多年平均流量的10%~30%作为生态需水量。

岸坡植被覆盖率是指一个区域内的所有植被(包括草本、木本植被)所占面积与该区域的实际面积的比值,用百分数表示。此处利用卫星地图和样方测量法^[10]对植被覆盖率进行计算。

水生物栖息地适宜度是用来定量描述水生生物对生境的偏好程度与生境因子之间关系的指标。此处选取易雨君等^[11]建立的栖息地适宜度模型方程计算,公式如下:

$$HSI = (I_{dz} I_v I_T)^{1/3} \quad (2)$$

式中: HSI 为水生物栖息地适宜度; I_{dz} 为水位涨幅; I_v 为流速; I_T 为水温。

河床人为改变率 B_4 是指人为调整河床形态和水沙流路,即通过疏浚、整治、开挖等人类活动造成的河床改变面积占原始河床面积的比率。

水生生物多样性是一个描述自然界多样化程度的广泛的概念,包括所有动物、植物、微生物物种和它们所拥有的基因,以及所形成的生态过程和所有的生态系统。水生生物多样性的丰富程度通常以某地区的物种数来表达,该指标能够有效反映人类活动对水生生物的影响^[12-14]。

船舶石油类排放是指在船舶运营过程中石油类物质的排放量。船舶在运营过程中不可避免地会造成石油类污染,该指标能有效反映船舶运营对水质的影响。此处可用代表船型单位能耗表示。

2.1.2 经济子目标 U_2

经济子目标是长江航道承载力研究的驱动力,在承载力研究中,主要由货运需求 A_3 下的航运需求满足率 B_7 及水运成本 A_4 下的水运运输成本降低率 B_8 体现。

航运需求满足率是指实际航运与航运物流总需求的比值,是能够直接反映航道承载经济持续性发展需求的量化指标。

水运运输成本降低率即航道等级提高后降低

的运输成本与现状航道等级下所对应的运输成本的比值, 该指标可直观反映目前航运水平下的航运物流成本水平。

2.1.3 水资源配置子目标 U_3

水资源配置子目标是水资源可持续利用的根本保证。水资源配置目标的承载状态由供水配置 A_5 下的工农业与生活供水保障率 B_9 和时空配置 A_6 下的水资源时空配置水量保证率 B_{10} 进行评价。

工农业与生活供水保证率是指对于工农业及居民生活用水, 预期供水量在多年供水中能够得到充分满足的年数出现的概率。目前居民用水的供水保证率较高, 一般在 95% 以上, 工业用水的供水保证率在 90% 以上。农村供水(以农村人口、乡镇企业为对象的供水)由于地域广大并受经济条件、自然条件的限制, 供水保证率相对较低。

水资源时空配置水量保证率是指在现状水沙、河势条件下, 不实施整治工程情况时, 水量满足某一航道尺度的保证率, 以多年流量或水位系列进行保证率统计。该指标反映水量对航道的供给情况。

2.1.4 防洪子目标 U_4

防洪是内河航道可持续发展的重要防线与要

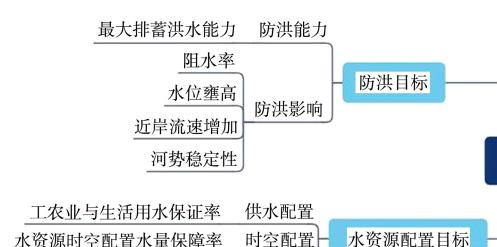


图 2 航道承载力评价模型体系

2.2 权重及评分标准确定

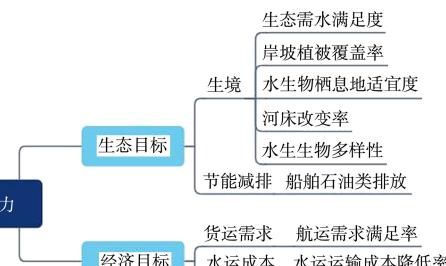
权重由主观和客观两种判断法确定, 主观判断包括专家会议法、层次分析法、二项系数加权法等; 客观判断法包括熵值法、灰色系统、模糊

求, 它是沿江城市经济社会安全发展的重要保证。防洪子系统的承载状态主要通过防洪能力 A_7 和防洪影响 A_8 两个一级指标进行评价。其中, 防洪能力由最大排蓄洪水能力 B_{11} 这个二级指标体现; 防洪影响则是包含阻水率 B_{12} 、水位壅高 B_{13} 、近岸流速增加 B_{14} 以及河势稳定性 B_{15} 这 4 个二级指标。

最大排蓄洪水能力是指河道通过排和蓄等方式能够安全处理的最大洪水量级, 可根据《防洪标准》得到。

阻水率是涉水建筑物挡水面积和河流天然过流面积的比值, 用来衡量河道中涉水建筑物拦阻来水的能力, 阻水率越高, 相应的拦蓄河水的能力就越强; 水位壅高指因水流受阻而产生的水位升高现象; 近岸流速即靠近河岸处的水流流速, 一般情况下, 江河一般是中间的水流湍急, 靠近岸边水流较缓, 深水一侧流速大, 浅水一侧流速小; 河势稳定性是指河道水流的平面形式及发展趋势的稳定性, 包括河道水流动力轴线的位置、走向以及河弯、岸线和沙洲、心滩等分布与变化的稳定性。以上 4 个指标结果都可根据工程前后的数学模型^[15-16] 得到。

故航道承载力评价模型体系及指标如图 2 所示。



函数等方法。本文选择层次分析法与熵值法组合确定指标权重^[17-18]。

评分标准由相关规范和专家打分法^[19] 得到, 各指标的权重及评分标准见表 1。

表1 评价模型个指标权重及评分标准

| 子目标层 | 权重 | 指标层 | | | | 评分标准 | | | | |
|----------------|--------|----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | 一级 | 权重 | 二级 | 权重 | 5分 | 4分 | 3分 | 2分 | 1分 |
| U ₁ | 0.2454 | A ₁ | 0.7975 | B ₁ | 0.2167 | ≥90% | ≥80% | ≥70% | ≥60% | ≥50% |
| | | | | B ₂ | 0.2232 | ≥50% | ≥40% | ≥30% | ≥20% | ≥10% |
| | | | | B ₃ | 0.2000 | >80% | >60% | >40% | >20% | ≤20% |
| | | | | B ₄ | 0.1620 | ≤5% | ≤10% | ≤20% | ≤40% | >40% |
| | | | | B ₅ | 0.1981 | 优 | 良 | 中 | 差 | 劣 |
| U ₂ | 0.3445 | A ₂ | 0.2025 | B ₆ | 1.0000 | ≤2.0 g/(t·km) | ≤2.3 g/(t·km) | ≤2.6 g/(t·km) | ≤3.0 g/(t·km) | >3.0 g/(t·km) |
| | | | | A ₃ | 0.5720 | B ₇ | 1.0000 | >300% | >200% | >150% |
| | | | | A ₄ | 0.4280 | B ₈ | 1.0000 | ≥30% | ≥20% | ≥10% |
| U ₃ | 0.1340 | A ₅ | 0.5087 | B ₉ | 1.0000 | 100% | ≥93% | ≥70% | ≥57% | <57% |
| | | | | A ₆ | 0.4913 | B ₁₀ | 1.0000 | ≥98% | ≥90% | ≥80% |
| | | | | A ₇ | 0.2000 | B ₁₁ | 1.0000 | 1 | 2 | 3 |
| U ₄ | 0.2746 | A ₈ | 0.8000 | B ₁₂ | 0.2500 | ≤1% | ≤3% | ≤5% | ≤10% | ≤15% |
| | | | | B ₁₃ | 0.2500 | ≤1 cm | ≤3 cm | ≤5 cm | ≤10 cm | ≤15 cm |
| | | | | B ₁₄ | 0.2500 | ≤0.01 m/s | ≤0.03 m/s | ≤0.05 m/s | ≤0.08 m/s | ≤0.10 m/s |
| | | | | B ₁₅ | 0.2500 | 优 | 良 | 中 | 差 | 劣 |

2.3 模型计算原理

初步建立模型体系后还需运用功效函数描述系统各要素对系统的影响。设 t 为生态、经济、水资源配置、防洪子系统, U_t 为子系统对总系统的贡献度, λ_{ij} 为第 i 个序参量中第 j 个影响因子的权重, X_{ij} 为第 i 个要素的第 j 个影响因子标准化后的功效函数值。各子系统对总系统的贡献值利用下式计算:

$$U_t = \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} X_{ij} \quad (3)$$

表2 航道承载力评价等级分值分布

| 承载力评价值 | 0≤U≤1 | 1<U≤2 | 2<U≤3 | 3<U≤4 | 4<U≤5 |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 评价等级 | 完全不可承载 | 不可承载 | 临界可承载 | 可承载 | 完全可承载 |

3 航道承载力计算

根据上述计算模型及评分标准,对长江上游广阳坝河段3种航道尺度进行试算,通过分析试算结果

综合考量以上4个子目标承载水平,航道综合承载力评价值按照以下公式计算:

$$U = \sum_{t=1}^4 U_t \quad (4)$$

式中: U 为航道承载力综合评价指数。

根据式(4),最终得到航道承载力综合评价值确定航道承载力的水平现状。其中各评价等级对应的分值见表2。

找到多目标协同下航道开发的最适宜尺度,以期为长江上游航道的建设提供一定参考。3.5、4.5及6.0 m 航道水深下航道承载力计算过程及结果见表3。

表3 各航道水深下航道承载力计算过程及结果

| 二级指标 | 评价分值 | | | 一级指标 | 效用函数 | | | 子目标 | 效用函数 | | |
|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| | 3.5 m | 4.5 m | 6.0 m | | 3.5 m | 4.5 m | 6.0 m | | 3.5 m | 4.5 m | 6.0 m |
| B ₁ | 4 | 4 | 4 | | | | | | | | |
| B ₂ | 4 | 4 | 4 | | | | | | | | |
| B ₃ | 4 | 4 | 5 | A ₁ | 4.2 | 4 | 4.2 | U ₁ | 3.93 | 4.00 | 4.36 |
| B ₄ | 5 | 4 | 4 | | | | | | | | |
| B ₅ | 4 | 4 | 4 | | | | | | | | |
| B ₆ | 3 | 4 | 5 | A ₂ | 3 | 4 | 5 | | | | |

续表 3

| 二级指标 | 指标层 | | | | | | 子目标 | 子目标层 | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|--|--|--|
| | 评价分值 | | | 一级指标 | 效用函数 | | | 效用函数 | | | | | |
| | 3.5 m | 4.5 m | 6.0 m | | 3.5 m | 4.5 m | 6.0 m | 3.5 m | 4.5 m | 6.0 m | | | |
| B ₇ | 3 | 4 | 5 | A ₃ | 3 | 4 | 5 | U ₂ | 2.14 | 2.86 | | | |
| B ₈ | 1 | 2 | 5 | A ₄ | 1 | 2 | 5 | | | | | | |
| B ₉ | 4 | 4 | 4 | A ₅ | 4 | 4 | 4 | U ₃ | 4.49 | 4.00 | | | |
| B ₁₀ | 5 | 4 | 3 | A ₆ | 5 | 4 | 3 | | | | | | |
| B ₁₁ | 5 | 5 | 5 | A ₇ | 5 | 5 | 5 | U ₄ | 3.60 | 3.40 | | | |
| B ₁₂ | 4 | 4 | 4 | A ₈ | 4 | 3.25 | 3 | | | | | | |
| B ₁₃ | 3 | 2 | 3 | | | | | | | | | | |
| B ₁₄ | 5 | 3 | 1 | | | | | | | | | | |
| B ₁₅ | 4 | 4 | 4 | | | | | | | | | | |

由式(3)、(4)计算可得, 3.5 和 4.5 m 航道水深下承载力综合评价指数分别为 3.46 和 3.49, 航道承载力水平属于可承载阶段, 满足当前航道承载力的发展需求; 6.0 m 航道尺度下航道承载力综合评价指数 $U=4.20$, 航道承载力水平属于完全可承载阶段, 表明该河段的经济驱动性强, 供给能力完全可以承载生态、经济驱动及河流多功能利用的多目标需求, 可以为航道承载力的潜力提升提供余量。

4 结语

1) 本文在总结分析航道承载力概念的基础上, 结合上游航道特性、社会经济情况, 分析影响河段航道承载力的因素, 即生态、经济、水资源配置、防洪, 并在此基础上构建了多目标协同下的航道承载力评价模型体系。

2) 计算广阳坝河段 3.5、4.5 及 6.0 m 航道水深下的航道承载力, 结果表明前两者的航道水深已不能满足经济目标的需求, 且其航道承载力水平均低于 6.0 m 航道水深下的航道承载力水平, 航道仍有进一步的尺度提升潜力。在综合考虑生态、经济、水资源配置、防洪多个因素影响下, 河段航道可开发的最佳水深为 6 m。

3) 以上研究可为长江上游的航道开发建设提供一定的参考, 但影响航道承载力的因素颇多, 本文根据河段特性, 有限地选取部分重要影响因素建立航道承载力评价模型, 该模型能否应用于长江中下游的航道承载力计算还有待更进一步的研究。

参考文献:

- [1] HIJDRA A, ARTS J, WOLTJER J. Do we need to rethink our waterways? Values of ageing waterways in current and future society [J]. Water resources management, 2014, 28(9): 2599-2613.
- [2] 刘怀汉, 杨胜发, 曹民雄. 长江黄金航道整治技术研究构想与展望 [J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 17-27.
- [3] 赵艺为, 张培林. 长江航道承载力概念研究 [J]. 水运工程, 2018(3): 124-128, 165.
- [4] 赵艺为, 张培林, 陈沿伊. 长江航道承载力影响因素体系构建 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9): 1498-1504.
- [5] 赵艺为, 张培林, 陈沿伊, 等. 长江航道承载力影响因素互适性内涵研究 [J]. 物流技术, 2018, 37(10): 40-47.
- [6] 马驰, 左利钦, 陆彦, 等. 长江下游航道承载力指标与评价方法研究 [J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 85-93.
- [7] 李文杰, 李伟明, 杨胜发, 等. 航道承载力内涵及评价方法研究: 以长江上游航道为例 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(10): 74-80.
- [8] 林炜, 褚丽. 河道内生态需水量研究 [J]. 山西建筑, 2018, 44(14): 211-212.
- [9] 徐志侠, 董增川, 周健康, 等. 生态需水计算的蒙大拿法及其应用 [J]. 水利水电技术, 2003(11): 15-17.
- [10] 赵阳, 张泽聪, 韩会玲. 关于大凌河河岸稳定性的研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(3): 54-58.
- [11] 易雨君, 乐世华. 长江四大家鱼产卵场的栖息地适宜度模型方程 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(S1): 117-122.
- [12] 崔淑霜. 长江物种保护立法研究 [D]. 重庆: 西南政法大学, 2019. (下转第 217 页)