

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.011

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. (MA Chi, ZUO Liqin, LU Yan, et al. Study on the indexes and evaluation method of carrying capacity of the navigation channel in the lower Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(1): 85-93. (in Chinese))

长江下游航道承载力指标与评价方法研究

马 驰, 左利钦, 陆 彦, 陆永军

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 依托黄金水道建设长江经济带是国家重大发展战略。随着经济社会发展, 长江两岸对航道等级提出了更高需求, 航道承载能力成为迫切需要研究的问题。针对长江下游航道特点, 初步提出了航道承载力的内涵, 并初步建立了长江下游航道承载力评价体系和评价方法。根据长江下游湖口至南京河段航道约束因素分析, 基于“驱动力-状态-影响”(DSI)模型, 结合层次分析法, 将承载力评价指标分为目标层、准则层、要素层和指标层4个层次, 进而构建了长江下游航道承载力评价体系。构造了各层次判断矩阵并进行一致性检验, 探讨了航道承载力评价的量化方法, 从而确定了指标权重并对各类指标进行了标准化处理, 最后提出了航道承载力初步评价方法, 为长江下游的航道承载力评价提供依据。

关键词: 航道承载力; “驱动力-状态-影响”模型; 层次分析法; 指标体系; 长江下游

中图分类号: X37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)01-0085-09

长江素有“黄金水道”之称, 长江航道是我国综合运输体系中的重要组成部分, 依托黄金水道建设长江经济带是国家战略。随着我国经济社会的快速发展, 沿江地方经济对黄金水道需求迫切, 对航道等级提出了更高要求。在长江大保护的背景下, 为实现防洪、航运、发电、生态、供水等水资源综合目标下的长江航道高效利用, 航道承载能力和发展潜力成为当前迫切需要研究的问题。

承载力的研究最早出现于生态学领域, 随后延伸到资源和环境领域, 目前被广泛应用于自然、经济、社会等相关资源领域^[1-3]。如针对土地资源问题, 有关学者提出了土地资源承载力的概念与理论^[4]。针对日益突出的水资源问题, 我国学者于20世纪80年代末也提出了“水资源承载力”一词^[5]。承载力的研究方法主要有常规趋势法、系统动力学方法、多目标决策分析法与指标体系评价方法等。

国内外对于航道承载力的研究还很少, 目前主要集中在航道通过能力、航道整治技术研究等方面^[6]。在航道通过能力方面, 国内外学者通过研究总结了一些计算公式, 主要有西德公式、波兰公式和排队论等^[7-8]。近几年, 计算机仿真技术也被运用到航道通过能力的计算研究中^[9]。刘怀汉等提出了航道承载力的研究构想和展望^[10], 为航道承载力的研究提出了目标。但对航道承载力的内涵、评价体系和方法尚鲜有报道。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。主要包括以下几点内涵: 可持续发展是航道承载力的核心; 航道承载力是一个区域航道资源所固有的特征, 具有自然、社会的双重属性, 其大小既反映了当地航道资源对社会经济发展的支撑能力, 也反映了社会经济系统对航道资源系统开发深度的需求程度; 航道承载力具有明显的时间和空间差异, 不同的历史背景、开发状态、技术水平和水域有着明显的差别; 航道承载力从数学概念来讲是一个最大值的概念, 是特定条件下所能表

收稿日期: 2018-05-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402103, 2016YFC0402307)

作者简介: 马 驰(1996—), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事航道及河流动力学研究。

E-mail: 1471902639@qq.com 通信作者: 左利钦(E-mail: lqzuo@nhri.cn)

现出来的极限能力,而且这种极限不是任何时间、任何技术水平、任何管理水平下的绝对极限,而是一个随着生产力水平、航道整治技术和管理水平发生变化的相对极限。随着航道整治技术进步,如生态航道建设技术发展可能会减小对生态影响,航道承载力也会发生变化。

本文在分析长江下游湖口到南京干流河段航道约束条件的基础上,基于“驱动力-状态-影响”(DSI)模型,结合层次分析法和专家经验法,研究了长江下游航道承载力,以水资源综合利用为目标,初步提出了评价指标和体系,以期能为长江下游航道建设标准提供科学依据。

1 长江下游航道特点与承载力的约束因素

长江下游湖口到南京河段长 432 km,流经江西、安徽、江苏 3 个省份。以长江三角洲为龙头的长江下游地区是我国社会经济发展优良区域,其经济总量为全国 GDP 的 20%。优质的沿江经济和快速发展使得两岸城市对航运的需求大大提高,该段也成为长江繁忙航段(见图 1)。该河段流经平原地区,两岸地势平坦,河道宽窄相间,分汊河道众多是该段河流的主要特征。在狭窄河段,一般一岸或两岸有山丘或矾头控制,水深较深,河槽相对稳定;在放宽河段,水流分散,沙洲淤长,形成分汊。马当、东流、太子矶、黑沙洲等水道为主要碍航河段。分汊河段河势稳定是重要约束因素,包括主支汊分流比变化、滩槽稳定性、主流变化、岸坡稳定等。现状航道条件是航道承载力的基础。湖口至安庆航段目前维护水深为 4.5 m,正在进行航道水深提升至 6.0 m 的整治;安庆至芜湖航段目前维护水深为 6.0 m,芜湖至南京航段目前维护水深为 9.0 ~ 10.5 m^[11-12]。

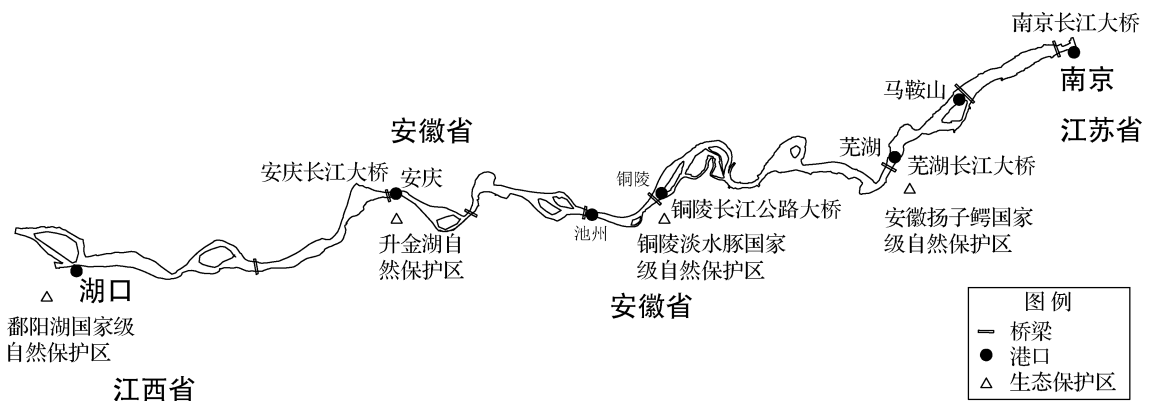


图 1 长江下游湖口到南京河段概况及主要桥梁、港口及保护区

Fig. 1 Sketch of Hukou to Nanjing reach and main bridges, ports and protected zones in lower Yangtze River

行洪安全是航道等级提升的重要约束因素。江西、安徽、江苏三省人口稠密,城市众多,年降水量大,对防洪提出了更高要求。沿江两岸地面高程普遍低于洪水位 5 ~ 6 m,最低超过 10 m,主要靠堤防防御洪水。因此,防洪影响是航道承载力的重要影响因素之一。

涉水工程众多也是长江下游河段的一大特征,如港口码头、桥梁、取排水口、水闸等。长江下游湖口到南京河段连接中部与长江三角洲地区,建设了大批港口。大型港口有安庆、池州、铜陵、芜湖、马鞍山、南京。长江下游湖口到南京河段有 19 座大桥,这些大桥在长江下游交通中扮演着至关重要的角色,桥梁净高和净宽是航道等级提升的重要制约因素。此段河道沿江企业及生活取排水口、水闸等涉水工程较多。桥梁、码头工程及其他涉水工程是影响航道承载力的约束因素之一。

维护生态平衡是航道可持续发展的重中之重。湖口到南京河段生态保护区主要分布在干流沿线及鄱阳湖附近,保护区类型主要为内陆湿地类、森林生态和野生动物类^[13](表 1)。生态影响是航道承载力的重要影响因素之一。

表 1 江西、安徽、江苏三省生态保护区分级统计^[13]

Tab. 1 Grading statistics of ecological protection zones in Jiangxi, Anhui and Jiangsu Provinces

地区	数量/个					面积/hm ²				
	国家级	省级	市级	县级	合计	国家级	省级	市级	县级	合计
江西	8	17	1	148	174	144 474	238 239	2 049	741 484	1 126 246
安徽	5	13	5	53	76	127 264	188 952	852	45 072	362 140
江苏	0	6	2	1	9	0	53 814	2 431	643	56 888
合计	13	36	8	202	259	271 738	481 005	5 332	787 199	1 545 274

2 长江下游航道承载力指标体系构建

2.1 指标体系的基本框架

要构建航道承载力评价指标体系,需选择一个能够对其进行全面描述的合理框架模型。在对可持续发展框架模型的研究中,加拿大统计学家 David Rapport 和 Tony Friend 提出了“压力-状态-响应”(PSR)模型^[14]。PSR 模型以因果关系为基础,较好地反映了自然、经济、社会和资源之间的相互依存和制约关系,在可持续发展、承载力评价、国家战略资源评价、生态系统健康评价等领域得到了广泛应用。随后联合国可持续发展委员会(UNCSD)提出了“驱动力-状态-响应”(DSR)模型,是对 PSR 模型的补充与完善^[15-16]。

基于航道承载力的内涵与特征,本文在 DSR 模型的基础上,将响应类指标改进为影响类指标。影响类指标不仅反映了周边环境对航道等级提升的反馈,而且还可以反作用于航道资源状态。因此,本研究采用“驱动力-状态-影响”框架模型(简称 DSI 模型)对长江黄金航道的开发利用现状进行综合分析和评价。“驱动力”反映了区域对于航道开发的需求程度,是航道开发利用的外部驱动因素。“状态”反映了航道自身的开发条件,影响开发模式和过程,是该区域航道的内在属性。“影响”是指为了满足航道需求,采取工程措施提升航道尺度后对自然条件的影响,是评价航道负荷的重要因素。

评价体系采用多层递进的结构体系,将长江黄金航道承载力评价指标分为 4 个层次(见图 2),自上而下依次为目标层、准则层、要素层、指标层。目标层(A)以航道承载力综合值为目标,衡量长江黄金航道对航道整治的支撑能力;准则层(B)包括评价模型的驱动力、状态、影响 3 个方面;要素层(C)和指标层(D)包含了评价长江黄金航道承载力的各类具体指标内容(见表 2)。

驱动力层主要考虑航道整治区域的社会需求程度,分为社会经济条件、政策需求以及水域区际交流 3 个指标。社会经济条件反映该区域内社会发展水平,能够直接体现区域经济对航运的需求,社会经济条件较好的区域对航道提升的需求越大。政策需求反映该区域内国家政策对航道提升的支持程度,政策需求越大,航道提升的驱动力就越大。水域区际交流反映了区域内航运的规模,能够直接体现区域内对航运的需求。水域区际交流越频繁的地区对航道尺度提升的需求越大。

状态层主要考虑航道及其周边区域自身的自然条件及开发状态,以体现对航道整治的影响,分为自然资源条件和制约工程两方面。自然资源条件包括水深和河势稳定。现状水深反映了区域内航道目前的开发状态及可开发潜力。河势稳定性反映了区域内航道的通航安全性,对于河势变化较大的区域,航道提升的难度会较大。本河段制约航道提升的工程主要是指桥梁,桥梁净高和预留通航孔宽度是否满足航道提升要求和限制航道承载能力。

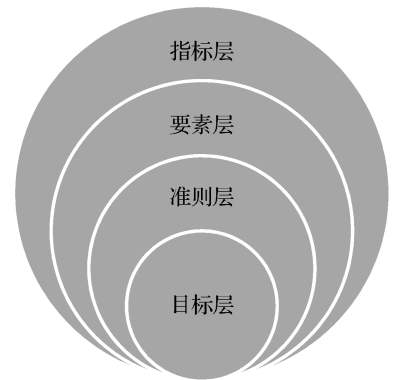


图 2 评价体系的 4 个层次

Fig. 2 Four levels of evaluation system

表 2 航道承载力评价指标体系

Tab. 2 Evaluation index system of the carrying capacity of navigation channels

目标层	准则层	要素层	指标层
航道承载力 (A)	驱动力(B1)	社会经济条件(C1)	区域经济增长率(D1)
		政策需求(C2)	国家战略(D2)
		水域区际交流(C3)	航运需求(D3)
	状态(B2)	自然资源条件(C4)	水深(D4)
			河势稳定性(D5)
		制约工程(C5)	桥梁(D6)
	影响(B3)	防洪影响(C6)	洪水位(D7)
			河堤前沿流速(D8)
			断面流量(D9)
			主支汊分流比(D10)
		河势稳定(C7)	滩槽演变趋势(D11)
			主流变化(D12)
			洲滩剖面形态(D13)
			岸坡稳定(D14)
			取排水口(D15)
			水闸(D16)
	水利工程(C8)	桥梁(D17)	
		码头(D18)	
	生态(C9)	生物多样性(D19)	
		栖息地多样性(D20)	
		生物丰度(D21)	
		硬化(D22)	

影响层主要从防洪、河势稳定、水利工程、生态 4 个方面考虑航道尺度提升对周边环境的影响。防洪影响包括洪水位和防洪大堤前沿流速变化 2 个方面,这直接影响行洪能力和大堤的稳定。河势稳定包括断面流量、主支汊分流比、滩槽演变趋势、主流变化、洲滩剖面形态、岸坡稳定等方面。水利工程主要包括取排水口、水闸、桥梁、码头等方面。生态影响包括生物多样性、栖息地多样性和生物丰度、硬化等方面。

2.2 指标筛选及权重确定

初步确定的指标可能存在定义有交叉、数量过多等问题,为了定量考核,便于航道承载力计算,结合各指标之间的相关性及专家意见,对初设指标中影响较为显著并易于进一步量化的指标进行筛选与调整。在指标体系中,各相关指标对航道承载力的重要性不同,为进一步计算航道承载力综合值,需要确定各相关指标的权重值。

本文采用层次分析法与专家调查法相结合的方法确定权重。根据专家问卷调查结果采用层次分析法确定各指标权重,主要有 4 步^[17]。

第 1 步,建立阶梯层次结构。本文将层次分析模型分为目标层、准则层、要素层以及指标层 4 层。

第 2 步,两两比较构造各层次的判断矩阵。请相关专家根据经验,对不同指标的重要性进行评分,再针对每个层次关系,构造两两比较的判断矩阵(见式(1))。

$$U = \begin{bmatrix} 1 & a_1/a_2 & \cdots & a_1/a_n \\ a_2/a_1 & 1 & \cdots & a_2/a_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n/a_1 & a_n/a_2 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U 为各下一级针对上一级的判断矩阵; $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为专家对各元素的重要性评分; n 为每一层中指标的数量。

第 3 步,层次单排序和一致性检验。在得到判断矩阵后,要对矩阵的一致性进行检验,检验包括次序一致性检验和满意一致性检验。次序一致性检验是指专家在判断各指标重要性时,各判断之间协调一致,不出现相互矛盾的结果。如 A 比 B 重要,B 比 C 重要,而 C 又比 A 重要这种明显违背常识的错误。进行满意一致性检验时,定义一致性指标:

$$I_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根。为更好地检验判断矩阵的满意一致性,引入平均随机一致性指标 I_{RI} 。对于 n 为 1~9 时, I_{RI} 的取值分别为 0,0.058,0.100,0.143,0.188,0.233,0.279,0.325 和 0.370。

定义 R_{CR} 为判断矩阵的一致性比率,

$$R_{CR} = I_{CI}/I_{RI} \quad (3)$$

若 $R_{CR} \leq 0.1$,则表明判断矩阵满足满意一致性,指标的权重分配合理。通过计算判断矩阵的特征向量,就可以确定各层次中对应指标的权重。

第 4 步,层次总排序和一致性检验。如果各层次判断矩阵都满足一致性,则总排序也满足要求。

根据上述方法,最终确定可量化筛选后的长江下游湖口到南京河段航道承载力评价指标(表 3)。在实际工程中可根据具体工程区域对各指标权重进行微调。

表 3 可量化指标筛选后长江下游航道承载力指标

Tab.3 Quantifiable evaluation index system of the carrying capacity of navigation channels in the lower Yangtze River after selection

目标层	准则层		要素层		指标层	
	指标	权重	指标	权重	指标	权重
航道承载力 (A)	驱动力(B1)	0.250	社会经济条件(C1)	0.537	区域经济增长率(D1)	0.561
			政策需求(C2)	0.463	水域区际交流(D2)	0.439
			自然资源条件(C3)	1.000	国家战略(D3)	1.000
	状态(B2)	0.250	制约工程(C4)	/	水深(D4)	0.505
			防洪影响(C5)	0.302	河势稳定性(D5)	0.495
			河势稳定(C6)	0.225	桥梁(D6)	/
	影响(B3)	0.500	生态(C7)	0.276	滩槽稳定(D8)	0.560
			水利工程(C8)	0.197	分流比(D9)	0.440
					洪水位(D7)	1.000
					生物丰度(D10)	1.000
					取排水口(D11)	1.000

3 长江下游航道承载力指标评价方法初步研究

3.1 指标标准化

在航道承载力评价体系中,不同指标的特性、单位及数量级存在显著的差异,无法进行直接比较和统一

计算,因此,需要对原有指标进行标准化计算,使每个变量都可以定量地用数字表达出来,并且在相对均匀化的范围之类。

3.1.1 状态类指标标准化方法 在航道承载力评价体系中,驱动力层和状态层指标均属于状态类指标。在状态类指标中对航道承载力起积极作用的称为正效应指标,这类指标数值越大对航道承载力越有利,反之则为负效应指标。

正效应指标标准化公式^[18]为:

$$y = 100 \times \begin{cases} 0, x \leq \min x \\ \frac{x - \min x}{\max x - \min x}, \min x < x < \max x \\ 1, x \geq \max x \end{cases} \quad (4)$$

负效应指标标准化公式为:

$$y = 100 \times \begin{cases} 1, x \leq \min x \\ \frac{\max x - x}{\max x - \min x}, \min x < x < \max x \\ 0, x \geq \max x \end{cases} \quad (5)$$

式中: y 为指标标准化计算后的数值; x 为原始数值; $\min x$ 和 $\max x$ 为各指标临界状态值。

从式(4)(5)可以看出,对于正效应指标,当指标值小于最小临界值时对航道承载力没有贡献,指标值大于临界值时,随着指标值的增大,对航道承载力的贡献逐渐增大,当增大到最大临界值时,对航道承载力的贡献达到最大,再增大不会增加贡献值。负效应指标正好相反,这与客观规律也是吻合的。

3.1.2 影响类指标标准化方法 由于影响类指标涉及内容以及规范标准的多样性,无法用统一的计算公式进行标准化。因此,参考规范标准以及长江下游实际情况,针对每一项指标进行定量描述。

洪水位:根据模型计算分析,研究设计洪水时航道提升工程引起洪水位的变化幅度。根据专家经验,当洪水位的变化超过10 cm时,对防洪已造成极大影响,因此,洪水位指标的极限值取10 cm。

滩槽稳定:滩槽稳定通过计算河道的宽深比(B/h)变化来评价。选取研究区域内的特征断面,该因素为影响类指标,不包括航道整治本身所在的滩槽。首先计算该断面的稳定宽深比,再通过数模计算分析航道提升整治工程实施后该断面河道宽深比的变化率,作为该指标的原始值。

分流比:根据模型计算分析航道提升整治工程实施后各汉分流比的变化率,作为该指标的原始值。该因素属于影响层,对航道整治本身的汉道不予考虑,而是对周边其他汉道的影响。以最佳分流比为参照,高于或低于最佳分流比都为负面影响,目前取最佳分流比为当前分流比或规划的分流比。参考长江下游航道整治工程经验,当分流比变幅达到5%时对分汉河道的稳定可能产生较大影响^[18],因此,分流比指标的极限值初步取为5%。

生物丰度:生物丰度用指示物种的栖息地适合度(HSI)变化来评价。栖息地适合度方程为 $HIS = \min(C_{Ad}, C_{Sp}, C_{Ha})$ 。 C_{Ad} 代表成鱼生存适合度, C_{Sp} 代表产卵适合度, C_{Ha} 代表孵化适合度^[19]。选取研究河段的指示物种,通过数模计算分析航道整治工程实施后栖息地适合度(HSI)大于0.8适合度指数面积的减少率,作为该指标的原始值。

取排水口:通过水流泥沙数模计算分析,研究区域内取排水口附近在航道整治之后的淤积变化率,作为该指标的原始值。

在得到影响类指标的原始值后,根据相关规范标准和专家经验对数据进行标准化处理,设置了5个等级(见表4)。

表 4 影响类指标标准化后的取值
Tab.4 Normalized value of impact indexes

评价指标	指标标准化评级				
	(80,100]	(60,80]	(40,60]	(20,40]	[0,20]
洪水位/cm	≤4	(4,6]	(6,8]	(8,10]	≥10
滩槽稳定/%	≤20	(20,40]	(40,60]	(60,80]	≥80
分流比/%	≤0.5	(0.5,1.5]	(1.5,3.0]	(3.0,5.0]	≥5.0
生物丰度/%	≤20	(20,40]	(40,60]	(60,80]	≥80
取排水口/%	≤20	(20,40]	(40,60]	(60,80]	≥80

3.2 综合分析方法

依据确定的指标权重以及标准化后各指标的定量描述,可以综合评价航道承载力。定义研究区域的航道承载力为 A , 则

$$A = \psi \sum_{i=1}^n W_i Y_i \tag{6}$$

式中: W_i 为指标权重; Y_i 为指标标准化后数值; ψ 为制约因子,取值为 0 或 1,制约因子对航道承载力起着制约作用,当桥梁净高或净宽达不到通航标准,制约因子取值为 0,航道承载力为 0,不可承载;反之,当制约因素符合标准时,制约因子取值为 1,对航道承载力没有影响。

航道承载力评价价值越大,表明研究区域内航道的可开发能力越强。根据航道承载力数值的大小,将航道承载力划分为 5 个等级(见图 3),由高到低分为完全可承载阶段、可承载阶段、临界承载阶段、不可承载阶段、完全不可承载阶段。完全可承载阶段表明研究区域的驱动力较强,自然资源条件状态较好,航道提升之后对航道及周边环境的影响较小;可承载阶段表明研究区域内航道开发条件没有完全可承载阶段那么好,但仍可以通过采取一些适宜的工程措施进行提升;临界承载阶段表明在现有的航道整治工程手段下,航道承载力已接近极限,可开发能力较弱;不可承载阶段表明研究区域驱动力较弱,自然资源条件状态较差,航道整治之后对周围环境影响较大,不适宜进行进一步开发;完全不可承载阶段表明研究区域内相关条件极差,不适宜进行航道开发。

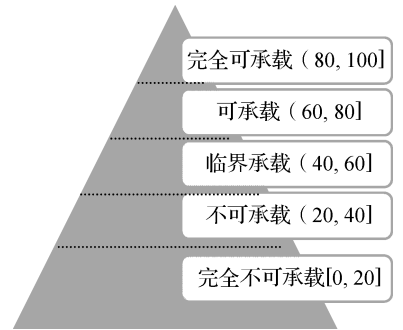


图 3 航道承载力等级划分

Fig. 3 Classification of the carrying capacity of navigation channels

4 结 语

随着沿江地方经济对黄金水道需求迫切,航道承载能力和发展潜力成为当前迫切需要研究的问题。本文根据长江下游湖口到南京河段特点,对航道承载力进行了初步研究,得到以下几点结论:

(1) 在总结分析承载力概念的基础上,结合长江下游航道特点,初步提出航道承载力的含义,即在实现水资源综合高效保护利用条件下,某一地区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。

(2) 结合长江下游社会经济、自然条件特征,分析了本河段航道承载力的约束因素。在此基础上,基于“驱动力-状态-影响”(DSI)模型,初步构建了长江下游湖口到南京河段的航道承载力评价指标体系。采用多层递进的结构体系,将评价指标分为 4 个层次:① 目标层,即航道承载力;② 准则层,即驱动力、状态、影响;③ 要素层,包含了社会经济条件、政策需求、水域区际交流、自然资源条件、碍航工程、防洪影响、河势稳

定、水利工程、生态影响等内容;④ 指标层,即主要评价指标的内容。

(3) 对湖口到南京河段的评价指标进行了筛选,并对影响类指标进行了标准化处理,对状态类指标根据相关规范和专家经验进行了定量描述,初步提出了航道承载力的综合分析方法,为建立长江下游的航道承载力评价平台提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 冯绍元,陈绍军,霍再林,等. 我国水资源承载力研究现状及展望[J]. 东华理工学院学报, 2006, 29(4): 301-306. (FENG Shaoyuan, CHEN Shaojun, HUO Zailin, et al. Review on the present situation and future prospect of water resources carrying capacity in China[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2006, 29(4): 301-306. (in Chinese))
- [2] 党丽娟,徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 341-348. (DANG Lijuan, XU Yong. Review of research progress in carrying capacity of water resource[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 341-348. (in Chinese))
- [3] 李东序. 城市综合承载力理论与实证研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008. (LI Dongxu. A theoretic and positive research on urban comprehensive carrying capacity[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [4] 祝秀芝. 土地综合承载力评价及预测研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013. (ZHU Xiuzhi. Evaluation and prediction of land resources comprehensive carrying capacity[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [5] 雷学东,陈丽华,余新晓,等. 区域水资源承载力研究现状与发展趋势[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(3): 10-14. (LEI Xuedong, CHEN Lihua, YU Xinxiao, et al. Some present situation and perspective in study on the regional carrying capacity of water resources[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2004, 15(3): 10-14. (in Chinese))
- [6] 邓小瑜,李引珍,赵亚玲. 港口航道通过能力研究综述[J]. 水运工程, 2011(3): 10-15. (DENG Xiaoyu, LI Yinzhen, ZHAO Yaling. Overview of research on traffic capacity of harbor channel[J]. Port and Waterway Engineering, 2011(3): 10-15. (in Chinese))
- [7] 董宇,姜晔,何良德. 内河航道通过能力计算方法研究[J]. 水运工程, 2007(1): 59-65. (DONG Yu, JIANG Ye, HE Liangde. Calculation method of inland waterway's throughput capacity[J]. Port and Waterway Engineering, 2007(1): 59-65. (in Chinese))
- [8] 刘敬贤,韩晓宝,易湘平. 基于排队论的受限航道通过能力计算[J]. 中国航海, 2008, 31(3): 261-264, 268. (LIU Jingxian, HAN Xiaobao, YI Xiangping. Capacity analysis of restricted channels based on the queuing theory[J]. Navigation of China, 2008, 31(3): 261-264, 268. (in Chinese))
- [9] 吴丹. 基于系统仿真的港口航道通过能力研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (WU Dan. Study on capability of port fairway with simulation approach[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [10] 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. (LIU Huaihan, YANG Shengfa, CAO Minxiong. Advances in 'Golden Waterway' regulation technologies of the Yangtze River[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 17-27. (in Chinese))
- [11] 乔飞,郑丙辉,雷坤,等. 长江下游及河口区水动力特征[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 389-397. (QIAO Fei, ZHENG Binghui, LEI Kun, et al. Hydrodynamics in the lower reaches of the Yangtze River and its estuary[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(3): 389-397. (in Chinese))
- [12] 仲伟斌. 长江下游湖口至浏河口河段支叉航道技术等级与航道尺度研究[J]. 水道港口, 2014, 35(2): 159-164. (ZHONG Weibin. Study on dimension and classification of tributary channel in Lower Yangtze River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(2): 159-164. (in Chinese))
- [13] 李红清. 长江流域自然保护区建设现状与生态保护[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(2): 150-155. (LI Hongqing. Construction status quo and eco-protection of natural conservation areas in the Changjiang River basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(2): 150-155. (in Chinese))
- [14] 皮家骏,欧阳澍,张带琴,等. 基于PSR—物元模型的水生态文明评价研究——以南昌市为例[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 55-61. (PI Jiajun, OUYANG Shu, ZHANG Daiqin, et al. Water ecological civilization evaluation based on

- PSR-matter element model; a case study of Nanchang City[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 55-61. (in Chinese))
- [15] 谈迎新, 於忠祥. 基于 DSR 模型的淮河流域生态安全评价研究[J]. *安徽农业大学学报(社会科学版)*, 2012, 21(5): 35-39. (TAN Yingxin, YU Zhongxiang. An ecological security evaluation of Huaihe River based on DSR[J]. *Journal of Anhui Agricultural University(Social Sciences Edition)*, 2012, 21(5): 35-39. (in Chinese))
- [16] 陈秀莲. 基于 DSR 模型的中国海洋战略资源安全评估和预测——以中国南海石油安全为例[J]. *世界地理研究*, 2017, 26(3): 46-58. (CHEN Xiulian. Assessment and prediction of China's ocean strategy resource safety based on DSR model-Take the South China Sea oil security for example[J]. *World Regional Studies*, 2017, 26(3): 46-58. (in Chinese))
- [17] 胡莹莹. 基于不同标度的判断矩阵一致性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008. (HU Yingying. Study on the judgment matrices' consistency of different scales[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [18] 张玮, 倪兵, 陈乾阳. 长江澄通河段通州沙西水道整治工程对分流比影响研究[J]. *水道港口*, 2013, 34(1): 39-44. (ZHANG Wei, NI Bing, CHEN Qianyang. Research on influence of regulation works on diversion ratio of Tongzhousha west channel in Chengtong reach, Yangtze River[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2013, 34(1): 39-44. (in Chinese))
- [19] 易雨君, 王兆印, 陆永军. 长江中华鲟栖息地适合度模型研究[J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 538-543. (YI Yujun, WANG Zhaoyin, LU Yongjun. Habitat suitability index model for Chinese Sturgeon in the Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4): 538-543. (in Chinese))

Study on the indexes and evaluation method of carrying capacity of the navigation channel in the lower Yangtze River

MA Chi, ZUO Liqin, LU Yan, LU Yongjun

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Relying on the golden waterway to build the Yangtze River Economic Belt is a major national development strategy in China. With the economic and social development, higher demands have been proposed on the Yangtze River navigation channel, therefore, it is urgent to study the carrying capacity of the navigation channel. Based on the characteristics of the lower Yangtze River, the concept of the carrying capacity of the navigation channel is proposed, and a preliminary evaluation system and an evaluation method are established. In this study, based on the analysis of the constraint factors of the navigation channel between the HuKou and Nanjing reaches in the lower Yangtze River, an evaluation system for the carrying capacity of the navigation channel was constructed using the “Driving force-State-Influence” (DSI) model and the analytic hierarchy method. This system includes four levels - the target level, the criteria level, the feature level, and the indicator level. In order to determine the index weight, a judgment matrix of each level was constructed and a consistency test was carried out. Then, the quantification method was discussed, the weight value for each index was given and the indexes were standardized. Finally, a preliminary comprehensive evaluation method for determining the carrying capacity of the navigation channel was proposed, to provide a basis for further evaluation of the carrying capacity of the navigation channel in the low reaches of the Yangtze River.

Key words: carrying capacity of navigation channel; “Driving force-State-Influence” (DSI) model; the analytic hierarchy method; index system; the lower Yangtze River