

文章编号:1671-1637(2012)02-0084-09

港口交通资源承载力预测预警模型

焦宇,康与涛,尹小贝,汪金辉,许乐平

(上海海事大学 海洋环境与工程学院,上海 201306)

摘要:根据航道交通容量计算方法,建立了航道资源静态承载力模型,基于锚地规模计算方法和基准判定参数,建立了锚地资源承载力分级模型。应用排队理论,将港口码头泊位的服务强度与航道资源、锚地资源的承载力模型相融合,构建了港口交通资源承载力综合预测预警模型,并以中国南方某港口进行实例验证。计算结果表明:应用预测预警模型,2008年与2010年的航道资源承载力指数分别为0.405与0.608,锚地资源承载力综合指数分别为1.489与0.600,2008年的港口码头服务强度为0.565,计算结果与事实相符;按照货物吞吐量的增长速度,预计到2015年,最小、最大航道资源承载力指数分别为0.593与0.796,预计到2020年,最小、最大航道资源承载力指数分别为0.685与0.944;基于现有锚地资源,预计到2015年,水深小于5m的最大锚地资源承载力指数为0.177,水深在5~10m的最大锚地资源承载力指数为1.037,水深大于10m的最大锚地资源承载力指数为1.294,预计到2020年,水深小于5m的最大锚地资源承载力指数为0.210,水深在5~10m的最大锚地资源承载力指数为1.231,水深大于10m的最大锚地资源承载力指数为1.535;预计到2015年,港口码头的最小泊位服务强度为0.858,预计到2020年,港口码头的最小泊位服务强度为0.994。

关键词:港口工程;资源承载力;排队理论;航道资源;锚地资源;泊位资源;预测预警

中图分类号:U651.3

文献标志码:A

Forecasting and early-warning model of port traffic resource carrying capacity

JIAO Yu, KANG Yu-tao, YIN Xiao-bei, WANG Jin-hui, XU Le-ping

(School of Ocean Environment and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the calculation method of channel traffic capacity, the static carrying capacity model of channel resource was set up. According to the computing method of anchorage scale and basic judgment parameter, the classification model of anchorage resource carrying capacity was put forward. On the basis of queuing theory, the service strength of port berth and the carrying capacity models of channel resource and anchorage resource were fused, the comprehensive forecasting and early-warning model of port traffic resource carrying capacity was built, and example verification was carried out through case port in Southern China. Calculation result shows that by using the proposed model, channel resource carrying capacity indexes in 2008 and 2010 are 0.405 and 0.608 respectively, comprehensive anchorage resource carrying capacity indexes in 2008 and 2010 are 1.489 and 0.600 respectively, the service strength of port berth in 2008 is 0.565, and the calculation results are consistent with the fact. With the increase speed of cargo throughput, the minimum and maximum of channel resource carrying capacity indexes will

收稿日期:2011-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51109127);上海海事大学科研基金项目(20100077)

作者简介:焦宇(1981-),男,河南汝州人,上海海事大学讲师,工学博士,从事水运安全研究。

be 0.593 and 0.796 respectively in 2015, and will be 0.685 and 0.944 respectively in 2020. Based on the existing anchorage resource, while water depth is below 5 m, the maximum anchorage resource carrying capacity indexes will be 0.177 and 0.210 respectively in 2015 and 2020. While water depth is from 5 m to 10 m, the maximum anchorage resource carrying capacity indexes will be 1.037 and 1.231 respectively in 2015 and 2020. While water depth is more than 10 m, the maximum anchorage resource carrying capacity indexes will be 1.294 and 1.535 respectively in 2015 and 2020. The minimum service strengths of port berths will be 0.858 and 0.994 respectively in 2015 and 2020. 5 tabs, 7 figs, 19 refs.

Key words: port engineering; resource carrying capacity; queuing theory; fairway resource; anchorage resource; berth resource; forecasting and early-warning

Author resume: JIAO Yu(1981-), male, lecturer, PhD, +86-21-38282517, yujiao@shmtu.edu.cn.

0 引言

随着全球经济一体化进程的加快,特别是近几年港口货物吞吐量跳跃式的发展,港口经济已经成为推动地区经济发展的重要支柱,作为运输系统和国际贸易的重要组成部分的港口也将迎来日益广阔的发展前景^[1]。在港口规划、发展和建设的同时,港口交通资源的承载力问题日益突出,港口码头的服务水平和效率、港口岸线资源与港口海域资源日益短缺与社会经济发展的矛盾不断加剧。资源的承载力具有可增强性和有限性,港口交通资源在一定区域、时域空间内会达到极限阈值。探索如何提高这个阈值以及在此阈值内如何合理实现资源的优化配置,对推动港口经济的可持续发展具有重要意义。

在关于资源承载力的研究中,Duarte等采用物理-生物地球化学耦合模型研究了海湾水域资源的承载力,通过统计分析计算出当前水域资源承载状态面临的压力^[2];Zhang等以北京市现有水资源量和日益增长的水资源需求量为研究对象,应用情景分析法研究了压力指标和承压指标,指出北京市现有的水资源调节能力远不足以支撑日益增长的人口数量^[3];Daniel等建立了物理-生态系统承载力模型,研究了旅游资源环境的承载力问题,为生态系统的科学管理提供了新方法^[4]。从以上分析可以看出,关于承载力方面的研究大多集中在土地资源承载力、水环境承载力、旅游环境承载力与生态城市承载力等方面,而对港口资源承载力的关注鲜少。周崇喜等从船舶通过能力和船舶容量2个方面对航道通航能力与饱和度进行了分析,确定了航道通航能力与饱和度的评定方法^[5-7];Lam基于航道容量角度研究了海上运输供应链问题^[8];陈胜铨等基于锚地容量的概念,提出了锚泊面积的计算方法,并采用

层次分析法和模糊综合评价方法分析了锚地资源分布的合理性^[9-10];邵俊岗等基于排队理论建立了排队模型,并分析了航道的通过能力、锚地资源的科学规划和码头泊位的运营能力^[11];马勇等基于排队理论计算分析了运营能力对航道容量的影响,利用排队论的动态计算特点实现对受限航道饱和度的动态定量分析^[12-14],但没有建立港口运营能力和航道容量相互关系的数学模型,缺乏二者之间相互制约关系的论证;中国港口普遍存在着泊位数量的发展速度跟不上船舶数量的增大幅度这一客观事实,使得锚地规模问题成为日趋突出的矛盾,刘敬贤等基于排队论计算了与港口运营能力相适应的锚地规模(容量),并结合港口运营能力数据对比分析了锚地容量数据^[15],但没有建立数学关系模型来论述两者之间的制约关系。

从以上分析可以看出,目前针对港口交通资源承载力方面的研究较少,研究概念不够明确,导致研究对象局限于单因素层面。在分析港口交通资源承载力时,不能综合涵盖港口交通资源的诸多因素及其之间的相互关系。本文提出了港口交通资源承载力的概念。在考虑港口码头泊位资源与航道资源、锚地资源相互关系的基础上,建立了港口交通资源承载力预测模型与情景分析预警模型,并通过实例分析对模型进行验证。

1 港口交通资源承载力

1.1 相关概念

荷兰著名学者 Wepster 将海上交通定义为指定区域内个别船舶运动的组合或船舶行为的总体。港口交通资源是指船舶运动所处的空间与条件,包括航行水域、港口水域和航路3方面。航行水域是船舶运动的场所或空间,由港口水域和航路组成;港

口水域一般包括港池或停泊区、各类锚地、进出口水道或航道、调头区; 航路是海洋、江河、湖泊、港湾等水域内供船舶安全航行的通道, 应具备所要求的充分水深、宽度与比较好的水文气象条件。

本文提出港口交通资源承载力的定义, 即为在一定时期和范围内, 港口交通资源能够支撑该港口与其水域维系其自身安全、快捷和清洁发展的能力。根据此定义, 引伸出港口交通资源承载力的特性与内涵, 表现为以下 2 点。

(1) 承载力的可增强性。区域资源的可开发性与管理手段的可提高性, 使港口交通资源在现有承载力水平上能够加以提高。

(2) 承载力的有限性。受到区域资源、自然资源的限制, 承载力水平不可能无限制地提高。承载力具有极限值, 在一定的弹性限度内, 交通资源的利用是良性的, 一旦超过极限, 港口交通资源便会失去对经济发展的支撑功能。

港口交通资源承载力包括海上航道资源承载力、锚地资源承载力和港口码头泊位资源承载力。

为衡量港口交通资源承载力的大小, 本文引入港口交通资源承载力水平的概念, 是指海上指定区域在一定的发展阶段内, 交通资源承载力满足交通需求的程度。港口交通资源承载力水平表现为交通资源容量对港口交通资源需求量的承压能力, 因此, 港口交通资源的承载力可以采用压力指标与承压指标的比值即承载力指数来衡量: 压力指标是指港口交通资源承载的主体, 包括货物吞吐量, 船舶流量等; 承压指标是指港口海域的现有航道资源、锚地资源、港口码头泊位资源与一定的管理手段等。

1.2 模型描述

本文构建了港口交通资源承载力指标体系, 用来计算海上航道资源、锚地资源的承载力指数。据此, 航道资源承载力指数可表示为货物吞吐量与航道货物通过能力的比值, 锚地资源承载力指数可表示为锚地需求面积与锚地资源面积(实际可用面积)的比值。

以上航道资源和锚地资源承载力指数的计算方法是基于静态方法计算航道的通航能力和锚地容量, 是研究港口交通资源承载力的基础。然而, 航道资源和锚地资源的承载力不是孤立存在的, 二者之间存在着相互联系和制约的关系, 比如航道的通航能力强, 可承载较大的年货物吞吐量, 但如果锚地资源少, 承载力低, 就会造成航道资源和锚地资源的不平衡状况。而船舶的压船、堵船现象与港口码头的

运营能力和服务水平(服务水平表现为码头泊位的服务强度)是紧密相关的, 有必要综合考虑多方面因素建立数学模型。本文应用排队理论建立港口交通资源承载力模型, 模型结构见图 1。

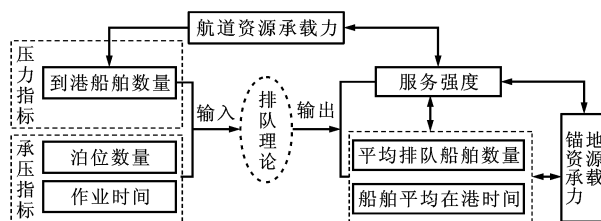


图 1 模型结构

Fig. 1 Model structure

2 港口交通资源承载力量化模型

根据港口交通资源承载力的定义, 选定 8 类影响港口交通资源承载力的因素, 分别为海域面积、港口岸线长度、码头泊位数量、货物吞吐量、航道容量、锚地面积、水文气象条件、管理手段与能力、辅助设施与设备等。

货物吞吐量是港口交通资源承载力的压力因素, 其余 7 类因素均为港口交通资源承载能力的承压因素。海域面积和港口岸线长度不能直接影响港口交通资源承载力, 只能通过其包含可能被开发为航道资源、锚地资源与码头泊位资源等潜在的承压指标因素来体现。管理手段与能力、辅助设施与设备表现为提高锚地资源、航道资源利用率与码头泊位作业的效率等。

2.1 航道资源承载力模型

2.1.1 航道实际交通容量

航道实际交通容量是指在基本交通容量的基础上, 考虑航路条件、交通状态、恶劣天气、海况等诸多因素对船舶交通影响后的实际值, 所以航道实际交通容量要小于航道基本交通容量, 即

$$R_1 = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 \eta_7 R_0 \quad (1)$$

式中: R_1 为航道实际交通容量(艘); R_0 为航道基本交通容量(艘); η_1 为大雾影响系数; η_2 为风浪影响系数; η_3 为航道影响系数; η_4 为非运输船舶阻尼系数; η_5 为船舶上下行货物不平衡系数; η_6 为船舶事故影响系数; η_7 为掉头区影响系数。

2.1.2 警戒区交叉航道最小容量

多条航道(进出港航道与港内航道)往往在警戒区形成交汇(图 2), 此时, 航道最小容量 R 为

$$R = \min\{R_a, R_z, R_b\} \quad (2)$$

式中: R_a 为进港航道容量(艘); R_z 为警戒区容

量(艘); R_b 为港内航道容量(艘)。

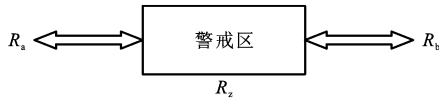


图 2 警戒区航道容量

Fig. 2 Channel capacity of warning area

2.1.3 航道货物通过能力

在船舶通过能力一定的条件下,航道货物通过能力主要跟船舶实载率与船型结构比例有关,因此,在计算出航道实际交通容量后,结合港口货物吞吐量数据,便可以计算航道货物通过能力。作为航道容量的另外一种形式,航道年货物通过能力为

$$T = R_1 D \sum_{i=1}^4 \beta_i \chi_i \varphi_i \quad (3)$$

式中: T 为航道年货物通过能力(t); D 为标准船型平均载重(t); β_i 为第 i 种船型的平均实载率(%); χ_i 为第 i 种船型所占的比例(%); φ_i 为第 i 种船型装卸货率(%); i 为 1~4 代表 4 种船型,分别为杂货船、油船、集装箱船和液化气船。

2.1.4 航道资源承载力指数

港口航道资源的承载力指数 I_h 为

$$I_h = \frac{T_0}{T} = \frac{T_0}{R_1 D \sum_{i=1}^4 \beta_i \chi_i \varphi_i} \quad (4)$$

式中: T_0 为港口的年货物吞吐量(t)。

2.2 锚地资源承载力模型

对于锚地资源承载力来说,可能存在有不同水深等级的锚地服务于不同吨位船舶的问题,因此,所建立的模型必须能够反映锚地水深等级的变化,根据权重形成锚地资源综合承载力指数。某一水深锚地的资源承载力指数为

$$I_j = \frac{A_{0,j}}{A_j} = \frac{c_j N_j (t_j/30) S_j}{l A_{1,j}} = \frac{4c_j N_j (t_j/30) (\epsilon + L_j + L_0)^2}{l A_{1,j}} \quad (5)$$

式中: I_j 为第 j ($j=1, 2, \dots, n$) 种水深锚地的资源承载力指数; $A_{0,j}$ 为第 j 种水深锚地的需求面积(m^2); A_j 为第 j 种水深锚地的实际可用面积(m^2); l 为锚地面积利用率(%); $A_{1,j}$ 第 j 种水深锚地的总面积(m^2); c_j 为第 j 种水深锚地的比例(%); N_j 为第 j 种水深锚地月均锚泊船舶数量(艘); t_j 为在第 j 种水深锚地的船舶平均锚泊时间(d); S_j 为在第 j 种水深锚地锚泊的 1 艘船舶占用的锚地面积(m^2); L_j 为在第 j 种水深锚泊船舶的平均长度(m); L_0 为船舶投放锚链长度(m); ϵ 为雷达定位误差(m)。

按照锚地水深等级对锚地资源进行分类之后,将会出现浅水锚地资源超载而深水锚地资源仍有空余的现象。小型船舶固然要锚泊在相应的浅水锚地,但也可以锚泊在深水锚地,即当某种水深的锚地资源不足而相邻水深的锚地资源充足时,2 种锚地资源承载力指数计算可合并计算,以二者总的锚地需求面积和总的锚地实际面积的比值来表示。令 σ 为锚地资源承载力红色预警值,当且仅当 $I_j \geq \sigma$ 且 $I_{j+1} < \sigma$ 时,第 j 种水深和第 $j+1$ 种水深锚地资源的联合承载力指数 $I_{j,j+1}$ 为

$$I_{j,j+1} = \frac{A_{0,j} + A_{0,j+1}}{A_j + A_{j+1}} \quad (6)$$

由以上分析可知,不同水深等级的锚地资源综合承载力指数 I_m 为

$$I_m = \sum_{j=1}^n a_j I_j \quad (7)$$

式中: a_j 为第 j 种水深锚地资源承载力指数的权重。

按照锚地水深划分船型比例,在一定程度上反映了该港口锚泊船型的现状和未来趋势,因此,可以选取船型比例作为不同水深等级的锚地资源承载力指数的权重。

2.3 泊位资源承载力模型

排队模型是一个抽象的马尔可夫链模型^[16],依据排队论模型思想,本文将船舶到离港与码头装卸过程视为 1 个排队系统,并以此分析港口码头泊位资源的承载力。

2.3.1 排队规则

本文将船舶到港过程视为泊松流,在港口排队服务系统中,排队规则为船舶依次接受服务;不论排队时间多长,船舶都不得中途离港;1 个泊位只能同时服务 1 艘船舶,并且船舶吨位不超过泊位的靠泊能力;船舶和泊位具有普遍性,不允许存在特定船舶和特定泊位。

2.3.2 指标计算模型

参考文献[11],港口码头泊位服务强度为

$$\rho = \frac{\lambda}{C\mu} \quad (8)$$

式中: ρ 为码头泊位的服务强度,反映港口码头的泊位利用率,一般情况下, $\rho < 1$,当 $\rho \geq 1$ 时将出现无限排队现象; C 为码头泊位数量; λ 为每天到港船舶的平均数量(艘·d⁻¹); μ 为每天服务完毕的船舶数量(艘·d⁻¹)。

码头泊位全部空闲的概率 P 为

$$P = \left[\sum_{k=0}^{C-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k + \frac{1}{C!} \frac{1}{1-\rho} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^C \right]^{-1} \quad (9)$$

式中: k 为码头空闲泊位数量。

在港待泊的平均排队船舶数量 M 为

$$M = \frac{(C\rho)^c \rho}{C!(1-\rho)^2} P \quad (10)$$

船舶在港平均排队时间 W 是指从船舶到达时刻起到开始接受全部服务所经历的时间, 即

$$W = M/\lambda \quad (11)$$

根据以上分析, 最终得出港口通过能力评价指标有 4 个, 分别为港口码头泊位服务强度、平均排队船舶数量(艘)、平均排队时间(d)与码头泊位空闲概率(%). 其中, 以下 3 个指标集中反映了港口码头泊位的资源承载力: 港口服务强度为介于(0,1]之间的常数, 反映码头泊位的繁忙程度, 该指标综合反映了码头作业效率和到港船舶数量之间的关系; 平均排队船舶数量反映了港口待泊的船舶数量; 平均排队时间反映船舶待泊等待时间, 与锚地资源承载力相关, 平均排队船舶数量和平均排队时间直接影响锚地资源的承载力。

2.4 港口交通资源综合承载力预警模型

2.4.1 模型描述

当对比航道资源承载力指数和码头泊位资源承载力指数(主要表现为码头泊位服务强度)时, 压力指标均为年货物吞吐量, 年货物吞吐量越大, 航道越拥挤, 码头泊位越繁忙, 因此, 在相同的年货物吞吐量下, 若航道资源承载力指数先出现预警, 则相对于码头泊位资源承载力而言, 航道资源是薄弱环节, 是资源承载力的瓶颈; 若码头泊位服务强度先达到 1.000, 则相对于航道资源而言, 码头泊位资源承载力是薄弱环节, 是资源承载力的瓶颈。

当对比锚地资源承载力指数和码头泊位资源承载力指数(主要表现为码头泊位服务强度)时, 对于码头泊位资源承载力指数而言, 压力指标为年货物吞吐量, 根据排队理论可计算出码头泊位服务强度、平均排队船舶数量与船舶平均排队时间, 而依据平均排队船舶数量和平均排队时间可计算出锚地需求面积, 即锚地资源承载力的压力指标, 进而计算锚地资源承载力指数。当码头泊位服务强度小于 1.000 而锚地资源承载力指数出现预警时, 锚地资源是制约发展的瓶颈; 当锚地资源承载力指数尚未出现预警而码头泊位服务强度不小于 1.000 时, 则码头泊位资源是制约发展的瓶颈。

排队等待船舶的锚地需求面积 A_q 为

$$A_q = MSW \quad (12)$$

式中: S 为锚泊的 1 艘船舶所占用的锚地面积(m^2)。

由以上分析得

$$I_{q,j} = \frac{A_{q,j}}{A_j} = \frac{M_j W_j S_j}{l A_{1,j}} \quad (13)$$

$$I = \min\{I_j, I_{q,j}\} \quad (14)$$

式中: $I_{q,j}$ 为第 j 种水深锚地排队等待船舶的承载力指数; $A_{q,j}$ 为在第 j 种水深锚地排队等待船舶的需求面积(m^2); M_j 为在第 j 种水深锚地待泊的平均排队船舶数量(艘); W_j 为在第 j 种水深锚地锚泊的船舶在港平均排队时间(d); I 为港口交通资源综合承载力指数。

2.4.2 分级模型

本文依据文献[17-19]提出的港口交通资源承载力预警分级思想, 选取中国南方某港口作为实例, 咨询相关专家, 确定港口航道资源、锚地资源与港口泊位资源的承载力预警分级标准。依据航道资源、锚地资源承载力指数的大小, 建立红、黄、蓝、绿色 4 种级别的承载力预警标准, 分别见表 1、2。

表 1 航道资源承载力预警标准

Tab. 1 Early-warning standard of channel resource carrying capacity

指数范围	等级	承载状态	状态描述
$I_h \leq 0.600$	绿色	弱载	航道通行畅通, 服务水平很高
$0.600 < I_h \leq 0.800$	蓝色	适载	航道忙碌, 但通行畅通, 服务水平较高
$0.800 < I_h \leq 0.900$	黄色	高载	航道交通繁忙, 出现船舶等待进港现象, 服务水平较差
$I_h > 0.900$	红色	超载	航道严重拥堵, 造成船舶等待时间长, 服务水平极差

表 2 锚地资源承载力预警标准

Tab. 2 Early-warning standard of anchorage resource carrying capacity

指数范围	等级	承载状态	状态描述
$I_m \leq 0.750$	绿色	弱载	锚地面积完全满足船舶的锚泊要求, 锚地富余面积大
$0.750 < I_m \leq 0.850$	蓝色	适载	锚地面积满足锚泊船舶的需求, 有一定的锚地富余面积
$0.850 < I_m \leq 0.950$	黄色	高载	锚地锚泊船舶密度大, 出现拥挤现象
$I_m > 0.950$	红色	超载	锚泊船舶严重拥挤, 出现船舶无处锚泊现象

若 $\rho \geq 1.000$, 则码头服务水平不足, 形成无限排队现象, 为红色警报; 若 $\rho < 1.000$, 则依据式(14)计算出 I , 按照表 2 中锚地资源的承载力指标分级标准进行预警, 综合考虑 ρ 和 I , 港口交通资源承载力综合预警标准见表 3。

3 计算结果分析

本文以中国南方某港口为例, 应用 MATLAB 软件进行模型验证和算例分析。首先, 以该港口 2008、2010 年的历史数据为基础, 将计算结果与实

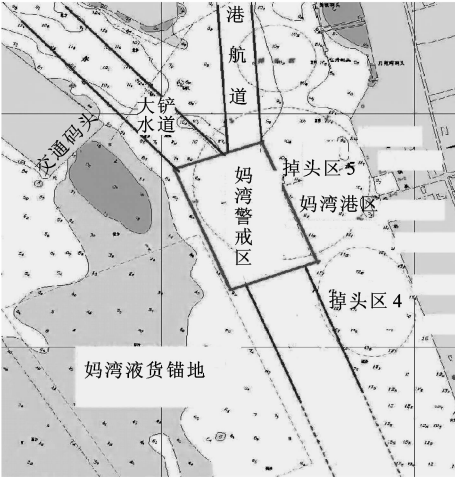
表 3 综合预警标准

Tab. 3 Comprehensive early-warning standard			
指数范围	等级	承载状态	状态描述
$\rho < 1.000$ 且 $I \leq 0.750$	绿色	弱载	排队等待船舶数量很少,锚地面积完全满足船舶的锚泊要求,锚地富余面积大
$\rho < 1.000$ 且 $0.750 < I \leq 0.850$	蓝色	适载	排队等待船舶少,锚地面积满足排队船舶的需求,有一定的锚地富余面积
$\rho < 1.000$ 且 $0.850 < I \leq 0.950$	黄色	高载	锚地锚泊排队等待船舶密度大,出现拥挤现象
$\rho \geq 1.000$ 或 $I > 0.950$	红色	超载	产生无限排队现象或排队等待船舶数量较大,出现锚地面积不足与船舶无处锚泊现象

际情况进行对比分析,检验模型的可靠性。其次,采用情景分析法,依据该港口的《港口总体规划研究报告》所做出的未来(2015、2020 年)货物吞吐量预测值(工况 2)作为预警模型的压力指标,并于该预测数据基础上分别提高 15%和降低 15%,形成工况 1(货物吞吐量高增长情景)和工况 3(货物吞吐量低增长情景)2 种货物吞吐量的发展预测情景,对该港口 2015、2020 年的不同经济发展状况下的港口交通资源承载力作出预测预警。本文 3 种工况是指未来不同经济发展状况(体现为港口货物吞吐量的增长速度)下港口交通资源的承载力状况,因此,从工况 1、2 到工况 3,体现的是在未来港口货物吞吐量高、中、低 3 个不同的增长速度下的资源承载力状况。

以该港口航道基本参数为基础,计算港口所有航道、警戒区单元通航容量,根据航道和警戒区的拓扑关系与单元通航容量数据,确定瓶颈通航容量,计算静态航道资源承载力。当计算航道交汇于警戒区(图 3)的通航容量时,依据式(2)处理。根据锚泊船舶所占据的水域面积计算所需锚泊面积,对锚地资源按照水深等级进行合理分级,量化计算锚地资源静态承载力状况。将港口码头泊位按照吨位进行分级,在区分不同级别吨位的泊位数量、平均作业时间、对应吨位的到港船舶数量等数据的基础上,分别计算码头泊位服务强度、平均排队船舶数量和平均排队时间等指标。基于前文建立的港口交通资源承载力综合预警模型,分析港口服务强度和航道通航能力的关系,以及锚地资源承载力、平均排队船舶数量和平均排队时间之间的制约关系。

表 4、5 分别为锚地资源承载力指数与码头泊位服务强度计算结果,图 4 为航道资源承载力指数,图 5、6 分别为不同水深等级锚地资源承载力指数(工况 2)与不同工况下锚地资源承载力指数的对比。



(a) 妈湾警戒区



(b) 蛇口警戒区

图 3 警戒区

Fig. 3 Warning zones

表 4 锚地资源承载力指数

Tab. 4 Anchorage resource carrying capacity indexes						
年份	工况	$T_0/10^8 \text{ t}$	I_j			I_m
			水深小于 5 m	水深 5~10 m	水深大于 10 m	
2008		2.110	0.141	0.686	3.586	1.489
2010		2.800	0.139	0.647	0.793	0.600
2015	1	4.300	0.177	1.037	1.294	0.961
	2	3.700	0.152	0.893	1.114	0.827
	3	3.200	0.132	0.772	0.963	0.715
2020	1	5.100	0.210	1.231	1.535	1.140
	2	4.400	0.181	1.062	1.324	0.984
	3	3.700	0.152	0.893	1.113	0.827

从表 4、5 与图 4~6 可以看出,2008 年该港口的航道承载力指数为 0.405,为绿色预警级别,处于弱载状态,2010 年为 0.608,为蓝色预警级别,处于适载状态。从港口实际运营情况看,2008 年航道通

表 5 码头泊位服务强度

Tab. 5 Service strengths of berths

年份	工况	$T_0/10^8 \text{ t}$	ρ	$M/\text{艘}$	W/d	I
2008		2.110	0.565			
2015	1	4.300	>1.000			
	2	3.700	0.994	155.000	1.012	0.899
	3	3.200	0.858	0.867	0.007	
2020	1	5.100	>1.000			
	2	4.400	>1.000			
	3	3.700	0.994	155.000	1.012	0.899

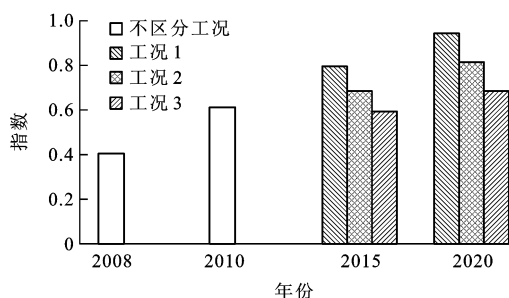


图 4 航道资源承载力指数对比

Fig. 4 Comparison of channel resource carrying capacity indexes

行畅通,2010 年航道较忙碌,但通行畅通。2008 年,港口水深小于 10 m 的锚地富余,而水深大于 10 m 的锚地则严重不足(承载力指数为 3.586),致使锚地综合承载力指数出现红色预警(综合承载力指数为 1.489)。2009 年,该港口新增 30 km² 深水锚地,并从 2010 年开始投入使用,使得水深大于 10 m 的锚地面积满足锚泊船舶的需求,对应预警级别为蓝色,降为适载状态(承载力指数为 0.793),有一定的锚地空余面积,锚地资源综合承载力指数为 0.600,呈现弱载状态。2008 年码头泊位服务强度相对较低,为 0.565,处于弱载状态,平均排队船舶数量和平均排队时间都处于极低值,综合预警为绿色级别,同 2008 年该港口现实运行状态相符。综合以上数据分析,可见本文模型准确和可靠。

从图 4 可以看出,在工况 1 中,2015 年的航道资源承载力指数为 0.796,仍保持在蓝色适载状态,2020 年的为 0.944,出现红色预警;在工况 2 中,2020 年的航道资源承载力指数为 0.815,出现黄色预警,处于高载状态。工况 1 对应的货物吞吐量增长率同 2008 年至 2010 年的增长率接近。该港口可以通过规划调整,保证未来的货物吞吐量增长率回落至合理值,以缓解资源承载力面临的压力,从工况 2、3 可以看出调整后的承载力明显回落。但从

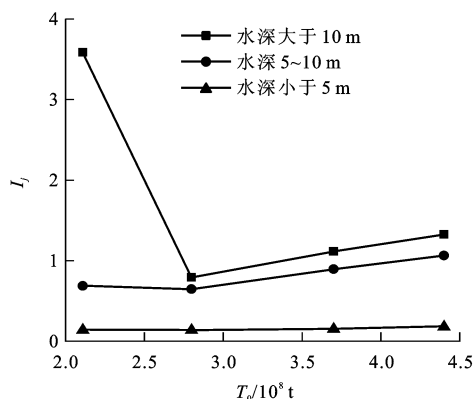


图 5 不同水深锚地资源承载力指数

Fig. 5 Anchorage resource carrying capacity indexes with different water depths

整体来看,航道资源承载力并不是该港口交通资源承载力的瓶颈。

从表 4 可以看出,水深在 5 m 以下的锚地充足,到 2020 年,承载力指数都将低于绿色预警值 0.750;水深在 5~10 m 的锚地略显不足,到 2015 年将至少出现黄色预警(工况 2 的锚地资源承载力指数为 0.893),甚至红色预警(工况 1 的锚地资源承载力指数为 1.037);水深大于 10 m 的锚地资源严重匮乏,2015 年最小锚地资源承载力指数为 0.963,严重超载,不足以满足该港口城市未来经济高速发展的要求,急需开辟新的深水锚地资源。从图 5 也可以看出,虽然该港口从 2010 年起新增了 30 km² 的深水锚地,但未来 10 年水深大于 10 m 的锚地资源依然匮乏,锚地资源承载力指数一直较大;水深在 5~10 m 之间的锚地资源也略显不足;水深小于 5 m 的锚地资源充足,完全能保证 2020 年港口经济发展的需求。

从表 5 可以看出,2008 年,该港口码头的泊位服务强度为 0.565,较少出现船舶排队等待现象。若按照工况 2 的货物吞吐量发展速度,到 2015 年即会出现黄色预警(港口交通资源综合承载力指数为 0.899),甚至红色预警(无限排队)。其主要原因为锚地资源不足,此时码头泊位服务强度为 0.994,属于正常运营,平均排队船舶数和排队时间都很小;到 2020 年,港口交通资源综合承载力指数出现红色预警,造成无限排队,即码头泊位服务强度大于 1.000,而此时锚地资源承载力指数同时也大于红色预警值。对于锚地资源综合承载力指数而言,到 2015 年出现蓝色预警,为 0.827,到 2020 年出现红色预警,为 0.984。对于航道资源承载力而言,到 2020 年只出现了黄色预警,为 0.815。据此分析可

知,在该港口交通资源承载力的3个因素中,按照制约港口经济发展程度的强弱来看,依次为锚地资源、码头泊位资源和航道资源。

鉴于锚地资源的紧张状况,依据当地海事部门的规划建议,将该港口一定面积的海域拟规划为新增的锚地资源,按照本文模型重新计算扩充后的锚地资源综合承载力指数,结果见图7,从中可以看出,若按照该规划开辟锚地资源,2015、2020年的锚地综合承载力指数均降到0.600以下,保证了未来10年该港口的货物吞吐量增长需求。结合图6、7可以看出,该港口现有锚地资源是未来港口经济发展的瓶颈,必须从港口海域资源中开辟新的锚地资源,消除锚地资源紧张的状况。

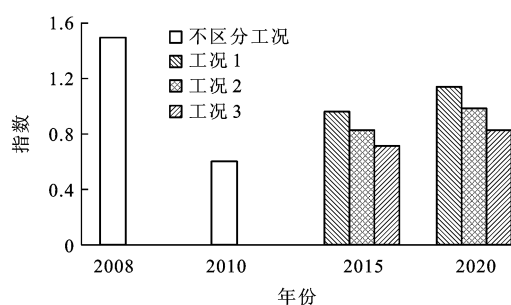


图6 锚地资源综合承载力指数对比

Fig. 6 Comparison of comprehensive anchorage resource carrying capacity indexes

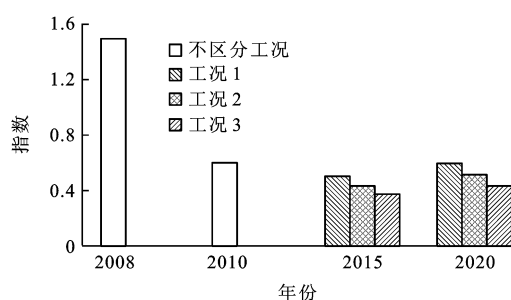


图7 扩充后的锚地资源综合承载力指数

Fig. 7 Comprehensive anchorage resource carrying capacity indexes after extending

4 结 语

本文提出了港口交通资源承载力概念,建立了港口航道资源、锚地资源和码头泊位资源承载力专项评估模型与港口交通资源综合承载力的计算模型,并进行了模型验证和算例分析。结果表明,港口交通资源承载力综合预测预警模型准确描述了当前港口交通资源的承载力状况,同时可基于不同经济发展速度和不同的资源规划条件,进行港口未来交通资源承载力的预测预警,为港口交通资源的科学

规划和发展提供支持。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 崔彭杰. 港口建设环境承载力评价指标体系及计算[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.
CUI Peng-jie. Evaluation index system and calculation of port construction environmental carrying capacity[D]. Yangling: Northwest A and F University, 2008. (in Chinese)
- [2] DUARTE P, MENESES M, HAWKINS A J S, et al. Mathematical modelling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters[J]. Ecological Modelling, 2003, 168(1): 109-143.
- [3] ZHANG Ying-xuan, CHEN Min, ZHOU Wen-hua, et al. Evaluating Beijing's human carrying capacity from the perspective of water resource constraints[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(8): 1297-1304.
- [4] DANIEL A Z, ALLAN T, WILLIAMS A N. Recreation carrying capacity estimations to support beach management at Praia de Faro, Portugal[J]. Applied Geography, 2011, 31(3): 1075-1081.
- [5] 周崇喜. 内河航道船舶通航能力研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
ZHOU Chong-xi. The research of the interior water route's navigation ability[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] 罗松森,郑道昌,刘桂云,等. 虾峙门航道船舶通航能力评估[J]. 宁波大学学报:理工版,2007,20(3):410-413.
LUO Song-miao, ZHENG Dao-chang, LIU Gui-yun, et al. Estimation of navigation capacity for Xiashimen Channel[J]. Journal of Ningbo University: Natural Science and Engineering Edition, 2007, 20(3): 410-413. (in Chinese)
- [7] 李国帅. 虾峙门航道通航能力及饱和度的研究[D]. 大连:大连海事大学,2008.
LI Guo-shuai. Study on the traffic ability and saturation of Xiashimen Channel[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008. (in Chinese)
- [8] LAM J S L. Patterns of maritime supply chains: slot capacity analysis[J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(2): 366-374.
- [9] 陈胜铨. 港口锚地合理配布和优化设计的研究[D]. 大连:大连海事大学,2007.
CHEN Sheng-cuo. The research on the reasonable layout and optimal design of port anchorage[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007. (in Chinese)
- [10] 邢政. 秀山东锚地容量及安全性研究[D]. 大连:大连海事大学,2011.
XING Zheng. Safty assessment study on Xiushan east anchorage waters of navigation environment [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- [11] 邵俊岗,许小兵,王煜,等. 洋山港区运营阶段的港口通过能力[J]. 上海海事大学学报,2008,29(4):25-28.

- SHAO Jun-gang, XU Xiao-bing, WANG Yu, et al. Handling capacity of operation phase in Yangshan Port Area[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2008, 29(4): 25-28. (in Chinese)
- [12] 马 勇. 基于排队论的 T 型航路船舶交通通过能力研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- MA Yong. Research on vessel traffic pass through capacity of T-type channel based on queuing theory[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008. (in Chinese)
- [13] 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): 261-268.
- LIU Jing-xian, HAN Xiao-bao, YI Xiang-ping. Capacity analysis of restricted channels based on the queuing theory[J]. Navigation of China, 2008, 31(3): 261-268. (in Chinese)
- [14] SHABAYEK A A, YEUNG W W. A simulation model for the Kwai Chung container terminals in Hong Kong[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 140(1): 1-11.
- [15] 刘敬贤, 李昌伟, 刘 文. 基于排队论的锚地规模论证分析[J]. 航海工程, 2009, 38(4): 158-161.
- LIU Jing-xian, LI Chang-wei, LIU Wen. Anchoring zone scale analyzes based on the queuing theory[J]. Ship and Ocean Engineering, 2009, 38(4): 158-161. (in Chinese)
- [16] SINGER M, DONOSO P. Assessing an ambulance service with queuing theory [J]. Computers and Operations Research, 2008, 35(8): 2549-2560
- [17] 赵景丽. 基于排队论的沿海港口航道通过能力及服务水平研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- ZHAO Jing-li. Research on channel transit capacity and service level of sea port based on queuing theory[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese)
- [18] 计明军, 陈 哲, 王清斌. 集装箱船舶支线运输航线优化算法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(4): 68-75.
- JI Ming-jun, CHEN Zhe, WANG Qing-bin. Optimization algorithm of branch transportation route for container ship[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(4): 68-75. (in Chinese)
- [19] 郑士源. 干散货运输船舶投资订购的内在影响机制[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 87-94.
- ZHENG Shi-yuan. Intrinsic influence mechanisms of dry bulk ship investment and ordering [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 87-94. (in Chinese)

(上接第 75 页)

- [4] KOPITS E, CROPPER M. Traffic fatalities and economic growth[R]. Washington DC: World Bank Group, 2003.
- [5] AN Wu-mei. Macroscopical analysis and modeling in traffic safety[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002.
- [6] YE Xing-cheng. A systemic research on the road safety[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [7] LIU Yun-tong. A fuzzy-based model for macroscopic evaluation of road traffic safety[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(S1): 169-175.
- [8] PAGE Y. A statistical model to compare road mortality in OECD countries [J]. Accident Analysis and Prevention, 2001, 33(3): 371-385.
- [9] XU Ting, SUN Xiao-duan, WANG Wei-li, et al. Highway accidents statistical analysis with panel data model[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(4): 495-499.
- [10] State Statistical Bureau. China Statistical Yearbook in 2010[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.
- [11] International Road Federation. World road statistics[D]. Washington DC: International Road Federation, 2009.
- [12] Japan Automobile Manufacturers Association. World motor vehicle statistics in 2010 [R]. Tokyo: Japan Automobile Manufacturers Association, 2011.
- [13] World Bank Group. World development indicators[R]. Washington DC: World Bank Group, 2009.
- [14] PAULOZZI L J, RYAN G W, ESPITIA-HARDEMAN V E, et al. Economic development's effect on road transport-related mortality among different types of road users: a cross-sectional international study[J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39(3): 606-617.
- [15] SCUFFHAM P A, LANGLEY J D. A model of traffic crashes in New Zealand[J]. Accident Analysis and Prevention, 2002, 34(5): 673-687.
- [16] LI Ju-ping. Mechanism improvement for road traffic accidents identification[J]. Journal of Chang'an University: Social Science Edition, 2009, 11(3): 26-29, 35.
- [17] QIAO Xiang-ming, XU An, SHU Wei. Developing tendency forecast of road traffic accident in China[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 64-66.
- [18] YANG Shao-wei, WANG Hai-jun, ZHANG Chi, et al. Relation between possible speed and traffic accident[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 34-38.