

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.014

# 基于中国运营者视角的海外港口群集装箱 枢纽港选址模型

孙祎峥<sup>1,2</sup>, 封学军<sup>1</sup>, 陈汨梨<sup>1,3</sup>, 张艳<sup>1</sup>, 雷智鹞<sup>1</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 中国水利电力对外有限公司, 北京 100011)

**摘要:** 针对基于港口评价和基于运筹优化两类选址方法的局限性, 从中国运营者的视角出发, 构建了同时考虑港口群物流网络总成本最低和枢纽港供给条件最优的海外港口群集装箱枢纽港选址模型, 并采用二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解。以非洲西海岸港口群为案例, 应用构建的选址模型对不同情境下的集装箱枢纽港选址方案进行了模拟分析, 并基于枢纽港加权选择概率得出了港口群内集装箱枢纽港建设的优先级顺序。案例模拟结果表明: 该选址模型能够综合两类选址方法的优点, 且可以基于 NSGA-II 算法实现高效求解, 所得选址结果更符合中国运营者的利益; 基于中国运营者视角, 在非洲西海岸港口群中, 以丹吉尔港和德班港为首的部分港口具有枢纽价值。

**关键词:** 集装箱枢纽港; 港口群; 选址方法; 中国运营者视角; NSGA-II 算法; 非洲西海岸

中图分类号: U651.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)01-0111-10

## Site selection model of container hub ports for overseas port cluster based on the perspective of Chinese port and shipping enterprises

SUN Yizheng<sup>1,2</sup>, FENG Xuejun<sup>1</sup>, CHEN Mili<sup>1,3</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, LEI Zhiyi<sup>1</sup>

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;

3. China International Water & Electric Corporation, Beijing 100011, China)

**Abstract:** In response to the limitations of two types of site selection methods based on port evaluation and operations research optimization, from the perspective of Chinese port and shipping enterprises, a model for selecting container hub ports in overseas port clusters was established, considering both the lowest total cost of logistics network and the optimal supply conditions of hub ports. The model was solved using the second-generation non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). Taking the port cluster on the West Coast of Africa as a case study, the constructed model was applied to conduct a simulation analysis of the container hub port selection schemes under different scenarios, and the priority sequence for the construction of container hub ports within the port cluster was determined based on the hub port weighted selection probability. The results demonstrate that the model can integrate the advantages of the two site selection methods and can be solved efficiently based on the NSGA-II algorithm, making the obtained site selection results more in line with the interests of Chinese operators. Moreover, from the perspective of China, some ports led by the Port of Tangier and the Port of Durban possess hub value among the port cluster on the West Coast of Africa.

**Key words:** container hub port; port cluster; site selection methods; the perspective of Chinese port and shipping enterprises; NSGA-II algorithm; the West Coast of Africa

随着我国对外贸易交流的不断深化, 海外港航市场的拓展开正如火如荼地进行, 我国的港航相关企业逐渐由海外港口群中基本的建设者向多元的运营者转变<sup>[1]</sup>。在枢纽经济、规模效应等作用的推动下, 集装

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600203)

作者简介: 孙祎峥(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水运工程经济规划研究。E-mail: 211303020032@hhu.edu.cn

通信作者: 封学军(1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事水运工程经济规划研究。E-mail: fxj@hhu.edu.cn

引用本文: 孙祎峥, 封学军, 陈汨梨, 等. 基于中国运营者视角的海外港口群集装箱枢纽港选址模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 111-120.

SUN Yizheng, FENG Xuejun, CHEN Mili, et al. Site selection model of container hub ports for overseas port cluster based on the perspective of Chinese port and shipping enterprises[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(1): 111-120.

箱由于“门到门”的运输方式和班轮航线相对固定的特点,成为参与全球贸易程度最高的海运货种,其枢纽港在港口群中的战略地位愈发重要。明晰海外港口群中各个港口的功能定位,加强集装箱枢纽港的选址布局优化研究,是整合运输资源、降低贸易物流成本、减少港口间恶性竞争、提高区域产业和区域经济核心竞争力的重要战略手段,能够为我国与相关区域开展更深入的贸易往来提供高效的物流系统保障。因此,基于中国运营者的视角,如何科学、合理地选择、建设、运营海外集装箱枢纽港受到了业界的广泛关注。

现有集装箱枢纽港选址的研究方法可分为基于港口评价的选址方法和基于运筹优化的选址方法两大类<sup>[2]</sup>。基于港口评价的选址方法是指通过分析影响枢纽港选址的因素,对港口的枢纽潜力进行综合评价,以达到港口属性定位效果的一类方法。Notteboom<sup>[3]</sup>运用多准则分析法,从港口用户、码头运营商和社会三个角度,在南非有限的备选港口中筛选最具潜力的港口作为枢纽港;陈汨梨等<sup>[4]</sup>选取度中心性、介数中心性和港口集装箱吞吐量为指标构建了港口综合评价指标体系,采用熵权法与灰色关联法相结合的方法,给出了海运网络节点的重要度评估模型,可实现集装箱海运网络的关键枢纽节点识别;王晓强<sup>[5]</sup>利用模糊综合评价方法,考虑了区位交通条件、自然条件、腹地经济条件、项目条件、社会效益等5类因素的影响,对江苏沿海港口进行了评价,以确定港口开发建设的优先级;张洪雨<sup>[6]</sup>详细分析了BP神经网络方法在枢纽港选址中的应用原理,在建立枢纽港评价指标体系的基础上通过BP神经网络结构设计,并应用模型学习训练的结果确定合适的枢纽港口。基于运筹优化的选址方法是指以传统物流枢纽的选址模型为基础,结合航运的特点进行修正,再使用智能求解算法实现枢纽港优化选址的一类方法。Aversa等<sup>[7]</sup>以包含了运输费用和港口端费用的航运系统总成本最小为目标,构建了混合整数规划模型用于南美洲东海岸的枢纽港选择;Sun等<sup>[8]</sup>构建了一种两阶段模型,通过计算各节点成为枢纽的概率,探索了从尚未建设港口的区域中寻找潜在枢纽港位置的方法;陈康等<sup>[9]</sup>针对港口分布密度较低的地区,放松枢纽港备选区域有限且离散的限制,构建了半连续型选址模型,并设计了基于Frank-Wolfe算法的遗传算法用于模型求解;吴旗韬等<sup>[10]</sup>基于轴辐式网络模型和不同航线方向港口间运输数据的分析,发现网络中最优的枢纽港设置情况会随折扣系数和航线方向的不同而出现差别。总体看,基于港口评价的选址方法虽然能从宏观的角度判断各港口的枢纽潜力,但因忽略了与运输网络相关的诸多问题,使得单独应用于集装箱枢纽港选址决策时缺乏足够的科学性;基于运筹优化的选址方法虽然关注到运输网络的优化,但忽视了港口条件、经济、政治等其他多重因素的影响,且学者们常以航运公司的视角展开研究,优化的仅仅是海运系统的广义成本,未能将“腹地、港口、海洋”3个运输阶段统一纳入考量。

针对上述局限,本文基于中国运营者的视角,既考虑区域港口群枢纽港供给条件的优化,又着眼于降低整个港口群物流网络的系统总成本,构建海外港口群集装箱枢纽港选址模型,基于二代非支配排序多目标遗传算法(non-dominated sorted genetic algorithm-II, NSGA-II)设计相应的求解算法,并以非洲西海岸港口群为例分析不同情境下枢纽港选址方案和各港口作为枢纽港的建设优先级,以期为中资企业在海外有关区域进行集装箱枢纽港选址和运营提供参考。

## 1 模型构建

### 1.1 模型描述

在港口群物流网络系统中,集装箱货物的运输过程应包含“腹地、港口、海洋”3个阶段<sup>[11]</sup>,即港口群物流网络是一个二级物流网络,不仅包含出发港(到达港)与目的港(始发港)之间的海运网络系统,还包括各个出发港(到达港)与其腹地之间的陆运网络系统。同时,港口节点的作业过程也应纳入考虑。以出口集装箱为例,在腹地运输系统中,集装箱货物先通过内陆运输至相应的出发港;在港口节点,集装箱货物完成装卸作业等相关流程;而在海运系统中,航运企业往往优先选择区域港口群的枢纽港进行挂靠,因而枢纽港的集装箱可以直接通过干线运输至目的港,而支线港的集装箱往往需要经过与其连接的枢纽港进行中转,再通过干线运输实现与目的港的集装箱运输过程,呈现出较为典型的轴辐式运输网络结构。另一方面,随着枢纽港对港口相关产业的带动作用日益突出,集装箱枢纽港的选址不仅关乎着整个物流网络的高效运转,也与区域的经济发展息息相关。“物流成本低但港口发展程度差”或“港口发展程度好但物流成本高”的方案均不能满足枢纽港的选址要求<sup>[12]</sup>。因此,决策者在进行集装箱枢纽港选址时需要综合考虑区域港口群发展现状和港口物流网络成本,以实现港口群运输资源的合理配置和网络优化。

基于此,本文构建的海外港口群集装箱枢纽港选址模型从宏观的角度研究区域港口群的全局物流网络,假定在某个有集装箱运输需求的腹地区域内存在多个集装箱港口和若干腹地,腹地的集装箱运输需求已知,港口群物流网络如图 1 所示。通过模型求解,可以在区域港口群中选择一定数量的港口作为枢纽港,并将其余支线港分配到各枢纽港,以达到降低港口群物流网络总成本的同时兼顾枢纽港供给条件优化的效果。

### 1.2 模型假设

为了将实际问题理论化,本文作出如下假设:①轴辐式海运网络呈现常见的单分配模式,即一个支线港有且仅有一个枢纽港与之相连,仅在一个枢纽港完成中转过程,支线港之间不进行集装箱运输;②不考虑各港口及航线的容量限制;③港口对腹地的集装箱货物存在充分竞争;④为简化计算,不考虑腹地内的多式联运系统。

### 1.3 模型方程及约束条件

以港口群物流网络总成本最小和枢纽港供给条件最优为目标函数,构建双目标模型方程。其中,港口群物流网络总成本包括了陆运成本、港口作业成本和海运成本 3 个部分,而枢纽港供给条件最优是指港口群内枢纽港潜力评价(以下简称“枢纽潜力值”)的和最大。双目标模型方程及其约束条件分别如式(1)(2)和式(3)~(7)所示。

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 \tag{1}$$

$$\max Q = \sum_{j \in J} Q_j X_j \tag{2}$$

$$m = p + r \tag{3}$$

$$\sum_{h \in H} Z_{jh} = 1 \tag{4}$$

$$\sum_{j \in J} X_j = p \tag{5}$$

$$Z_{jh} \in \{0, 1\} \tag{6}$$

$$X_j \in \{0, 1\} \tag{7}$$

其中  $C_1 = \sum_{v \in V} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \tau_{ij} c_{ij,v} L_{ij,v} P_{ij,v} W_i$       $C_2 = \sum_{j \in J} [c_{teu,j} + 2 \sum_{h \in H} (1 - X_j) c_{teu,h} Z_{jh}] W_j$

$$C_3 = \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} (c_s L_{jh} + \lambda c_s L_{hd}) Z_{jh} W_j = c_s \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} (L_{jh} + \lambda L_{hd}) Z_{jh} W_j$$

式中: $C$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别为港口群物流网络系统的总成本、陆运成本、港口作业成本和海运成本; $Q$  为枢纽港供给条件; $V$ 、 $I$ 、 $J$ 、 $H$  分别为港口群物流网络系统中陆路运输方式、腹地、沿海港口和枢纽港构成的集合; $Q_j$  为港口  $j$  的枢纽潜力值,通过构建集装箱枢纽港潜力评价指标体系计算得到; $X_j$  为决策变量(取 0 或 1),当取 1 时表示港口  $j$  是枢纽港,取 0 时表示港口  $j$  不是枢纽港; $\tau_{ij}$  为关税系数,表示区域内部跨境运输的影响; $c_{ij,v}$  为腹地  $i$  与港口  $j$  通过陆路运输方式  $v$  进行运输的单位集装箱陆运成本; $L_{ij,v}$  为腹地  $i$  与港口  $j$  通过陆路运输方式  $v$  进行运输的运输距离; $P_{ij,v}$  为腹地  $i$  的货主选择港口  $j$  以陆路运输方式  $v$  进行集装箱进出口的概率; $W_i$  为腹地  $i$  的集装箱运输需求量; $W_j$  为港口  $j$  的集装箱货运量; $c_{teu,j}$  为港口  $j$  的单位集装箱作业成本; $Z_{jh}$  为决策变量(取 0 或 1),当取 1 时表示港口  $j$  被分配至枢纽港  $h$ ,取 0 时表示港口  $j$  没有被分配至枢纽港  $h$ ; $c_s$  为海运支线航线的单位集装箱海运成本; $L_{jh}$  为港口  $j$  与枢纽港  $h$  之间的海运距离; $L_{hd}$  为枢纽港  $h$  与目的港  $d$  之间海运距离; $\lambda$  为海运规模效应折扣系数,通过海运干线航线与支线航线单位集装箱运输成本的比值确定,  $0 < \lambda < 1$ ; $m$ 、 $p$ 、 $r$  分别为港口群中所有港口、枢纽港及支线港的数量。

式(1)目标函数为最小化港口群物流网络总成本,即陆运成本、港口作业成本和海运成本 3 个子成本之和最小;式(2)目标函数为最大化所有被确定为枢纽港的枢纽潜力值之和;式(3)限制枢纽港和支线港之和应等于研究范围内港口的总数;式(4)表明海运网络为单分配轴辐式结构,即一个支线港只能与一个枢纽港相连;

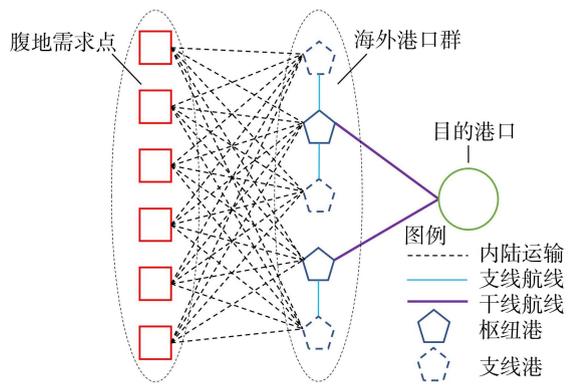


图 1 港口群物流网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of port group logistics network

式(5)表示港口群中共需设置  $p$  个枢纽港(可根据不同选址情境变化);式(6)、式(7)为决策变量约束。

参数  $W_j, P_{ij,v}, c_{ij,v}$  的计算公式为

$$W_j = \sum_{v \in V} \sum_{i \in I} W_i P_{ij,v} \quad (8)$$

$$P_{ij,v} = \gamma_{i,v} T_j (\tau_{ij} c_{ij,v} L_{ij,v})^{-\beta} / \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} \gamma_{i,v} T_j (\tau_{ij} c_{ij,v} L_{ij,v})^{-\beta} \quad (9)$$

$$c_{ij,v} = (\eta X_j - X_j + 1) c_{i,v} \quad (10)$$

式中:  $\gamma_{i,v}$  为运输方式  $v$  在腹地  $i$  所承担的货运分担率;  $T_j$  为港口  $j$  的规模水平, 通常用集装箱吞吐量表示;  $\beta$  为距离衰减系数, 常取为  $2^{[13]}$ ;  $\eta$  为陆运规模效应折扣系数,  $0 < \eta < 1$ ;  $c_{i,v}$  为腹地  $i$  的集装箱通过陆路运输方式  $v$  进行运输的单位基础运价。

式(8)表示各港口的集装箱货运量源于腹地内选择该港口运输的集装箱货运量总和; 式(9)借鉴 Huff 模型的思想模拟港口腹地存在重叠、交叉条件下货主的港口选择行为; 腹地货主选择港口的意愿与货物运输的效用成正比, 港口规模越大、运输阻抗(通常用与运输成本相关的函数或变量表示)越小, 则货物运输的效用越大<sup>[14]</sup>; 式(10)表示枢纽港相比支线港更具备陆路运输成本优势。

## 2 求解方法

### 2.1 NSGA-II 算法流程

在海外港口群枢纽港选址问题中, 由于某些港口的特殊区位优势, 使得单独考虑物流成本最小和港口条件最优目标下的枢纽港集合往往并不完全一致, 某一子目标性能的改善有可能导致另一子目标性能的降低。因此, 模型的最优解往往不只有一个, 而是由一些并无优劣之分的 Pareto 最优解<sup>[15]</sup> 组成。基于此, 本文采用多目标遗传算法 NSGA-II<sup>[16-17]</sup> 进行模型算法设计和求解。不同于传统多目标优化方法, NSGA-II 算法能够更加直接而具体地呈现出优化某个子目标对其他子目标的影响, 为有关问题的机理性探讨提供了更多便利。NSGA-II 算法的流程如图 2 所示。

### 2.2 Pareto 最优解的评价分析

本文定义目标实现率来分析 Pareto 解集中的点在各目标函数上的优化情况。目标实现率是指目标函数在模型中的求解计算值与其单目标状态下最优值的接近程度, 以二者之间的比值表示。目标实现率越接近 1, 表明该解在相应目标函数上离最优值越近, 优化程度越好。因此, 在处理多目标优化问题前, 需要将模型退化为单目标优化问题进行求解, 以得到模型在单目标状态下最优值, 并可继续选取遗传算法作为单目标优化问题的求解算法。得到目标实现率后, 通过结合决策偏好及实际要求, 确定各目标的相对重要程度, 并做出最终的选址决策。

## 3 案例分析

非洲西海岸是我国最早进行海外港口投资建设的地区, 在我国海外港航市场的投资格局中占据着极其重要的战略地位。本文选择非洲西海岸港口群作为案例, 以沿岸 28 个代表性港口为研究对象展开分析, 研究范围及代表性港口的具体分布如图 3 所示。

### 3.1 港口枢纽潜力值的确定

为了定量表示各港口成为集装箱枢纽港的潜力, 从港口自身条件、港口发展环境、所在国家与我国的双边关系等 3 个方面构建集装箱枢纽港潜力评价指标体系, 如图 4 所示, 其中运输网密度采用港口所在国家的公路、铁路、水路运输网络总里程与国土面积的比值表征, 疫情后贸易恢复程度采用港口所在国与我国在 2022 年和 2020 年的双边贸易额的比值量化。

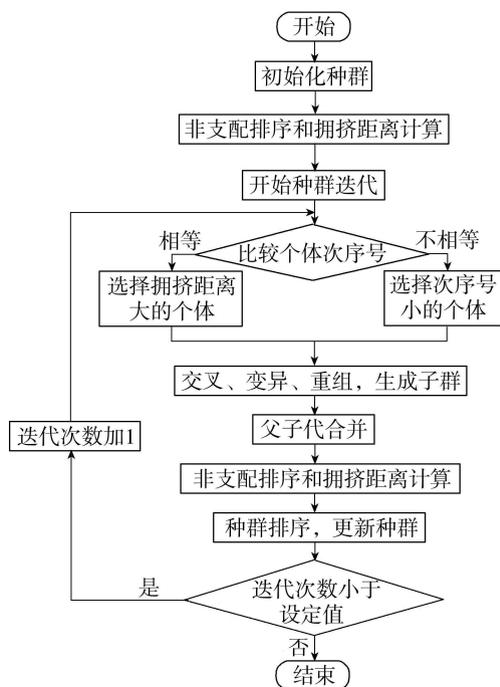


图 2 NSGA-II 算法流程

Fig. 2 Flow chart of NSGA-II algorithm



图 3 研究范围及代表性港口分布

Fig. 3 Research scope and representative port distribution

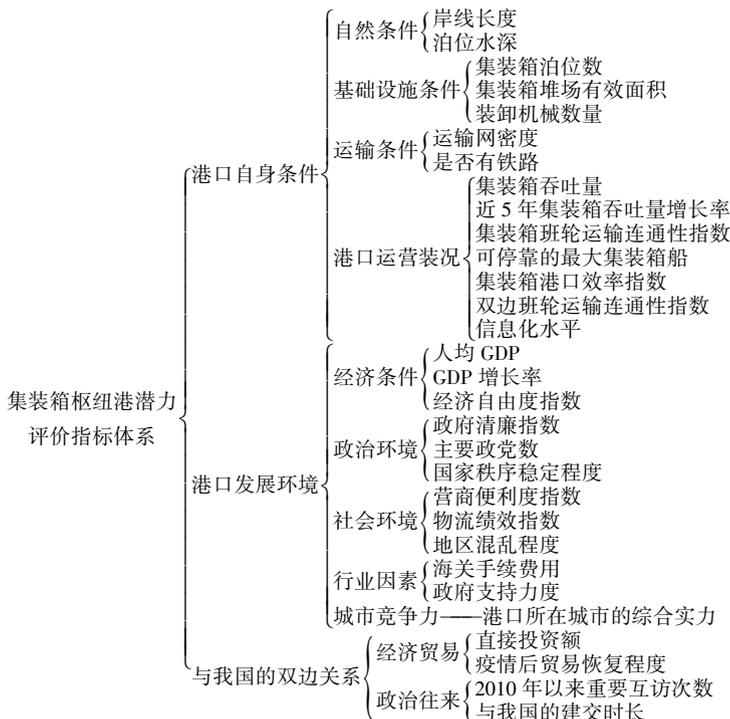


图 4 集装箱枢纽港潜力评价指标体系

Fig. 4 Potential evaluation index system of container hub port

从世界银行、联合国商品贸易组织、西非发展银行、中国商务部、中国外交部和各港口官网等数据库2020—2022年公开报告中搜集有关数据,并运用熵权-TOPSIS法<sup>[18-19]</sup>对枢纽潜力值进行评价计算,结果如表1所示。

表1 枢纽潜力值计算结果

Table 1 Calculation results of hub potential value

港口	枢纽潜力值	港口	枢纽潜力值	港口	枢纽潜力值	港口	枢纽潜力值
丹吉尔(1)	0.6551	洛美(8)	0.4275	圣佩德罗(15)	0.3473	班珠尔(22)	0.2834
德班(2)	0.5776	拉各斯(9)	0.3960	黑角(16)	0.3348	巴塔(23)	0.2784
开普敦(3)	0.5305	阿比让(10)	0.3873	阿尔及尔(17)	0.3342	科纳克里(24)	0.2752
伊丽莎白(4)	0.4989	鲸湾港(11)	0.3869	科托努(18)	0.3105	杜阿拉(25)	0.2629
库哈(5)	0.4971	达喀尔(12)	0.3819	弗里敦(19)	0.3059	蒙罗维亚(26)	0.2556
卡萨布兰卡(6)	0.4690	罗安达(13)	0.3619	利伯维尔(20)	0.2959	努瓦克肖特(27)	0.2446
特马(7)	0.4471	哈科特(14)	0.3495	奥兰(21)	0.2944	比绍(28)	0.2015

注:括号中数字为港口编号,后续表格中均以编号代表港口。

单从枢纽潜力值计算结果来看,丹吉尔港、德班港等摩洛哥和南非两国的港口排名相对靠前,成为集装箱枢纽港的潜力较大,这主要与这两国在研究区域相对突出的综合国力优势密不可分;其次,特马港、洛美港、拉各斯港和阿比让港等几内亚湾沿岸港口的自身运营状况也比较优越,且与我国具有良好的合作基础,成为该地区集装箱枢纽港的可能性也较大。

### 3.2 集装箱枢纽港选址分析

#### 3.2.1 基础数据准备

a. 集装箱运输需求量。考虑非洲西海岸区域内各国与我国之间的集装箱进出口需求,相关数据采用多因素动态分析方法进行估算<sup>[20]</sup>。同时,在保证数据完整性的前提下,以次级行政区(省、州、区等)为基本腹地单元,进一步将各国的集装箱运输需求量以各国次级行政区占全国的人口比例折算为各腹地的集装箱运输需求量,并将各次级行政区的省会或首府作为腹地的“质心”,以方便后续陆运距离数据的获取。

b. 集装箱运输成本。在陆运系统中,非洲西海岸地区属于铁路基础设施发展较为落后的地区,其大部分地区的铁路运输成本与公路运输成本相差较小,铁路运输承担的货运分担率可忽略不计<sup>[21]</sup>;根据世界银行的相关报告<sup>[22]</sup>,取集装箱陆运基础运价为1.5美元/(TEU·km),而陆运规模效应折扣系数取0.8,如涉及跨境运输,关税系数取1.2,否则取1。在海运系统中,根据对非洲西海岸航运市场的调研,取0.2美元/(TEU·n mile)为支线航线的集装箱运输成本。

c. 港口的单位集装箱作业成本。非洲西海岸地区的港口集装箱作业成本普遍较高,根据调研,取枢纽港的集装箱作业成本为300美元/TEU,而支线港的集装箱作业成本为350美元/TEU。

d. 运输距离。以GIS为工具,获取各腹地与各港口间的陆运距离;通过港口网(www.ports.com)搜集海运距离,其中,中国大陆的沿海港口以吞吐量大于2000万TEU的港口(上海、宁波舟山、深圳、青岛、广州、天津)为代表。

#### 3.2.2 模型求解过程

利用MATLAB R2020b对模型进行计算,NSGA-II算法的种群规模设置为100,最大迭代次数设置为300,交叉概率取0.8,变异概率取0.2。

为模拟多种情境下的集装箱枢纽港选址要求,将腹地的集装箱运输需求量分为东向(非洲西海岸—中国)、西向(中国—非洲西海岸)2类,并分别求解枢纽港数量 $p$ 设置为2~10、海运规模效应折扣系数 $\lambda$ 取值为0.6、0.7、0.8、0.9时的集装箱枢纽港选址方案(总计 $2 \times 9 \times 4 = 72$ 种情境)。以腹地的集装箱运输需求量为西向、枢纽港设置数量为5、海运规模效应折扣系数取值为0.8时的情境为例,说明模型的求解过程。

首先,求解模型在单一目标函数下的选址结果,如表2所示。

其次,求解模型在港口群物流网络总成本最小和枢纽港供给条件最优的双目标函数状态下的Pareto解集,如图5所示。图5中的Pareto解集共有10个点,代表10种集装箱枢纽港选址方案。港口群物流网络总成本随着枢纽港供给条件的改善而

表2 单一目标函数下的选址结果

Table 2 Site selection results under single objective function

求解目标	枢纽港选址方案	函数值
港口群物流网络总成本最小	2,7,8,9,17	$1.211 \times 10^{10}$ 美元
枢纽港供给条件最优	1,2,3,4,5	2.7592

提高,无法直接从 Pareto 解集得到理想的结果。为进一步分析,计算每个选址方案的目标实现率,如表 3 所示。

可以看出,模型中的两个目标函数在 Pareto 解集中呈现明显的“背反”现象,决策变量无法在两个目标函数下同时取得最优解。为此,采用目标函数加权的方法确定最终结果,按下式计算各方案整体目标实现率的加权值:

$$\theta = \mu_1\theta_1 + \mu_2\theta_2 \quad (11)$$

式中: $\theta$  为方案整体的目标实现率加权值; $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为港口群物流网络总成本最小和枢纽港供给条件最优的目标权重( $\mu_1 + \mu_2 = 1$ )及对应的目标实现率。

考虑到成本问题仍然是港口群集装箱枢纽港选址问题中被关注的核心问题,设定  $\mu_1 = 0.7$ 、 $\mu_2 = 0.3$ , 则各方案的加权结果如表 4 所示。

由表 4 可知,方案 6 的目标实现率加权值最高,表现最为优秀,可作为此情境下的港口群集装箱枢纽港选址方案,即丹吉尔、德班、开普敦、特马、洛美这 5 个港口被最终确定为此情境下的集装箱枢纽港。

### 3.2.3 求解结果分析

重复上述操作过程,可以得到模型在 72 种情境下的非洲西海岸港口群集装箱枢纽港选址结果,如表 5 所示。

当枢纽港数量设置为 2~6 时,西向运输需求和东向运输需求的集装箱枢纽港最优选址方案均较为稳定,随着枢纽港设置数量的增加,依次有港口在此前枢纽港集合的基础上成为新的枢纽港,且不会随着海运规模效应折扣系数的改变而发生变化,反应了非洲西海岸不同情境下的集装箱枢纽港建设需求。

当枢纽港数量设置为 7~10 时,西向运输需求和东向运输需求的集装箱枢纽港最优选址方案均呈现出一定的不稳定性,枢纽港集合中的部分港口具有可替代性,个别枢纽潜力值更高的港口将随着海运规模效应折扣系数的增大而更适宜作为集装箱枢纽港。这主要是因为海运规模效应折扣系数的增大会导致枢纽港的成本优势被削弱,枢纽港供给条件对集装箱枢纽港选址结果的影响相对得到加强,反映了非洲西海岸各港口间激烈的竞争关系。

总体而言,西向运输需求和东向运输需求下的非洲西海岸集装箱枢纽港选址情况大体相同,但各港口的优先级顺序会发生变化。具体来看,在西向运输需求下,丹吉尔港、德班港、开普敦、特马港、洛美港和拉各斯港等传统门户港口是集装箱枢纽港建设的重点发展对象;而在东向运输需求下,罗安达港和黑角港也应得到足够的重视。

由于不同参数取值情境下的集装箱枢纽港集合存在差异,为了综合衡量各集装箱港口的枢纽战略价值, Sun 等<sup>[8]</sup> 将枢纽港选址问题转化为概率问题,并引入选择概率进行讨论。本文将西向和东向的集装箱需求量作为权重,定义枢纽港加权选择概率并进一步开展分析,其计算公式为

$$P_j = w_w N_{wj} / N_w + w_e N_{ej} / N_e \quad (12)$$

式中: $P_j$  为港口  $j$  的枢纽港加权选择概率; $w_w$ 、 $w_e$  为西向和东向运输需求的权重,可根据西向和东向运输需求量与所有运输需求量的比值确定,经计算,分别为 0.59 和 0.41; $N_{wj}$ 、 $N_{ej}$  分别为港口  $j$  在西向和东向运输需

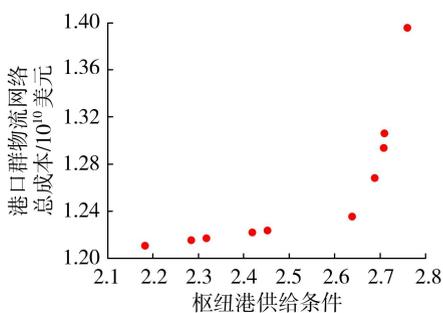


图 5 Parto 解集分布

Fig. 5 Pareto solution set distribution

表 3 选址方案及目标实现率

Table 3 Location scheme and target realization rate

方案序号	枢纽港选址方案	目标实现率/%	
		港口群物流网络总成本最小	枢纽港供给条件最优
1	2,7,8,9,17	100.00	79.09
2	2,5,7,8,17	99.61	82.76
3	2,6,7,8,9	99.49	83.98
4	1,2,5,7,8	99.09	87.64
5	2,3,6,7,8	98.95	88.85
6	1,2,3,7,8	98.01	95.60
7	1,2,3,5,8	95.47	97.41
8	1,2,3,5,7	93.59	98.12
9	1,2,3,4,7	92.69	98.19
10	1,2,3,4,5	86.74	100.00

表 4 各选址方案目标实现率的加权结果

Table 4 Weighted results of target realization rate of each site selection scheme

方案编号	目标实现率加权值/%	方案编号	目标实现率加权值/%
1	93.73	6	97.29
2	94.56	7	96.05
3	94.84	8	94.49
4	95.66	9	94.34
5	95.92	10	90.72

表5 非洲西海岸集装箱枢纽港选址结果

Table 5 Location results of container hub ports on the West coast of Africa

$p$	$\lambda$	港口群物流网络总成本/ $10^{10}$ 美元		枢纽港供给条件		枢纽港选址方案	
		西向	东向	西向	东向	西向	东向
2	0.6	1.1941	0.9978	1.233	1.233	1,2	1,2
	0.7	1.2524	1.0366	1.233	1.233	1,2	1,2
	0.8	1.3106	1.0755	1.233	1.233	1,2	1,2
	0.9	1.3687	1.1144	1.233	1.233	1,2	1,2
3	0.6	1.1328	0.9761	1.680	1.763	1,2,7	1,2,3
	0.7	1.2013	1.0168	1.680	1.763	1,2,7	1,2,3
	0.8	1.2948	1.0575	1.680	1.763	1,2,7	1,2,3
	0.9	1.3558	1.0982	1.680	1.763	1,2,7	1,2,3
4	0.6	1.1197	0.9578	2.210	2.098	1,2,3,7	1,2,3,16
	0.7	1.1896	1.0023	2.210	2.098	1,2,3,7	1,2,3,16
	0.8	1.2572	1.0417	2.210	2.098	1,2,3,7	1,2,3,16
	0.9	1.3254	1.0813	2.210	2.098	1,2,3,7	1,2,3,16
5	0.6	1.0955	0.9344	2.638	2.460	1,2,3,7,8	1,2,3,13,16
	0.7	1.1648	0.9781	2.638	2.460	1,2,3,7,8	1,2,3,13,16
	0.8	1.2360	1.0213	2.638	2.460	1,2,3,7,8	1,2,3,13,16
	0.9	1.3131	1.0644	2.638	2.460	1,2,3,7,8	1,2,3,13,16
6	0.6	1.0855	0.9133	3.034	2.907	1,2,3,7,8,9	1,2,3,7,13,16
	0.7	1.1545	0.9570	3.034	2.907	1,2,3,7,8,9	1,2,3,7,13,16
	0.8	1.2224	1.0000	3.034	2.907	1,2,3,7,8,9	1,2,3,7,13,16
	0.9	1.2899	1.0432	3.034	2.907	1,2,3,7,8,9	1,2,3,7,13,16
7	0.6	1.0664	0.8962	3.396	3.203	1,2,3,7,8,9,13	1,2,3,7,13,16,20
	0.7	1.1355	0.9399	3.396	3.294	1,2,3,7,8,9,13	1,2,3,7,11,13,16
	0.8	1.2039	0.9836	3.421	3.334	1,2,3,7,8,9,10	1,2,3,7,8,13,16
	0.9	1.2716	1.0273	3.503	3.334	1,2,3,6,7,8,9	1,2,3,7,8,13,16
8	0.6	1.0495	0.8924	3.783	3.590	1,2,3,7,8,9,10,13	1,2,3,7,11,13,16,20
	0.7	1.1307	0.9368	3.783	3.721	1,2,3,7,8,9,10,13	1,2,3,7,8,11,13,16
	0.8	1.1990	0.9827	3.865	3.763	1,2,3,6,7,8,9,13	1,2,3,6,7,11,13,16
	0.9	1.2707	1.0253	3.890	3.803	1,2,3,6,7,8,9,10	1,2,3,6,7,8,13,16
9	0.6	1.0453	0.8907	4.165	3.977	1,2,3,7,8,9,10,12,13	1,2,3,7,10,11,13,16,20
	0.7	1.1140	0.9346	4.165	3.977	1,2,3,7,8,9,10,12,13	1,2,3,7,10,11,13,16,20
	0.8	1.1980	0.9818	4.252	4.017	1,2,3,6,7,8,9,10,13	1,2,3,7,8,11,13,16,20
	0.9	1.2655	1.0239	4.252	4.199	1,2,3,6,7,8,9,10,13	1,2,3,6,7,8,9,13,16
10	0.6	1.0438	0.8900	4.499	4.381	1,2,3,7,8,9,10,12,13,17	1,2,3,7,8,9,10,13,16,25
	0.7	1.1133	0.9332	4.499	4.381	1,2,3,7,8,9,10,12,13,17	1,2,3,7,8,9,10,13,16,25
	0.8	1.1832	0.9807	4.634	4.587	1,2,3,6,7,8,9,10,12,13	1,2,3,6,7,8,9,10,13,16
	0.9	1.2522	1.0220	4.634	4.587	1,2,3,6,7,8,9,10,12,13	1,2,3,6,7,8,9,10,13,16

求下的数值试验中被选为集装箱枢纽港的次数; $N_w$ 、 $N_e$  分别为西向和东向运输需求下的数值试验总次数。

采用式(12)计算得到丹吉尔港、德班港、开普敦港、特马港、洛美港、罗安达港、拉各斯港、黑角港、阿比让港、卡萨布兰卡港、达喀尔港、鲸湾港、利伯维尔港、阿尔及尔港、杜阿拉港及其余港口的枢纽港加权选择概率,分别为 100%、100%、82.33%、75.22%、50.72%、48.64%、38.47%、31.89%、26.50%、17.17%、9.83%、7.97%、5.69%、3.28%、2.28%、0%。

可见,在非洲西海岸港口群中,丹吉尔港和德班港对于非洲西海岸与中国之间的集装箱运输而言至关重要,其枢纽港加权选择概率均达到了 100%;此外,开普敦港、特马港、洛美港、罗安达港、拉各斯港、黑角港、阿比让港、卡萨布兰卡港、达喀尔港、鲸湾港、利伯维尔港、阿尔及尔港和杜阿拉港的枢纽港建设优先级依次降低,是我国在非洲西海岸地区潜在的集装箱枢纽港。该结果与孙祎峥等<sup>[23]</sup>有关非洲西海岸集装箱枢纽港选址的研究结论基本一致。相较而言,在基于中国运营者视角的特殊条件下,阿比让港的枢纽价值略有下降,而黑角港的枢纽价值得到挖掘,这与阿比让港的服务重心在欧洲而黑角港所在的中西部非洲与我国的集装箱运输需求不断增长的发展现状基本相符;而其余港口在不同的研究中均体现了一定的枢纽价值。从客观实际来看,上述港口都是非洲西海岸地区地理位置优越且规模体量较大的港口,这也验证了模型的准确性和科学性。

## 4 结 语

本文从中国运营者视角出发,综合“腹地、港口、海洋”3个运输阶段成本,将港口评价和运筹优化两种方法组合构建了海外集装箱枢纽港选址模型,通过高效的NSGA-II算法进行求解,拓展了枢纽港选址方法。在以非洲西海岸港口群为案例的分析中,计算出了不同情境下的集装箱枢纽港优化选址结果,得到了港口群内的集装箱枢纽港建设优先级,发现了以丹吉尔港和德班港为首的部分港口的枢纽战略价值,可为中国港航企业在非洲西海岸集装箱枢纽港选址时提供方法支撑和决策参考。本文提出的集装箱枢纽港选址模型能够综合目前两类选址方法的优势,更加全面地反映港口的枢纽价值,并使得选址结果更符合中国运营者的利益。

受数据可得性等方面的限制,本文采用了相关参数替换或利用已知数据估计测算的方法获取有关数据,这在一定程度上影响了求解结果的精确程度。例如,模型中的距离衰减系数参考相关文献取2,但可以预见的是,该参数的高估或低估均会影响离贸易需求聚集区更近的港口(如案例中的拉各斯港)的腹地吸引潜能,对枢纽港选址结果产生一定的影响。后续研究可以进一步完善数据,在多分配混合轴辐式运输网络的模式下研究集装箱枢纽港选址问题,并将运输容量限制、多式联运等因素纳入考量,以实现更加精细化的港口群物流网络系统分析。

### 参考文献:

- [1] 刘长俭. 完善海外港口网络,推动共建:“一带一路”[J]. 科技导报,2020,38(9):89-96. (LIU Changjian. Improving the overseas port network and promoting the construction of the Belt and Road[J]. Science & Technology Review,2020,38(9):89-96. (in Chinese))
- [2] 曾锋,庄佩君,方蕾,等. 港口选择研究进展[J]. 宁波大学学报(理工版),2015,28(1):107-112. (ZENG Feng, ZHUANG Peijun, FANG Lei, et al. Research progress on port selection:review[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition),2015,28(1):107-112. (in Chinese))
- [3] NOTTEBOOM T. An application of multi-criteria analysis to the location of a container hub port in South Africa[J]. Maritime Policy & Management,2011,38(1):51-79.
- [4] 陈汨梨,李子剑,邓夕贵,等. 基于信息熵和灰色关联分析法的集装箱海运网络关键节点识别[J]. 中国港湾建设,2019,39(9):8-12. (CHEN Mili, LI Zijian, DENG Xigui, et al. Identification of key nodes in container maritime network based on information entropy and grey relational method[J]. China Harbour Engineering,2019,39(9):8-12. (in Chinese))
- [5] 王晓强. 江苏沿海港口开发的模糊评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(6):115-118. (WANG Xiaoqiang. Fuzzy assessment on Jiangsu coastal harbor development[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2000,28(6):115-118. (in Chinese))
- [6] 张洪雨. 海上丝绸之路背景下的境外枢纽港口选点分析[D]. 大连:大连海事大学,2015.
- [7] AVERSA R, BOTTER R C, HARALAMBIDES H E, et al. A mixed integer programming model on the location of a hub port in the East Coast of South America[J]. Maritime Economics & Logistics,2005,7(1):1-18.
- [8] SUN Zhuo, HENG Jianfeng. Finding potential hub locations for liner shipping [J]. Transportation Research Part B: Methodological,2016,93:750-761.
- [9] 陈康,金佳茹,姚媛媛,等. 基于半连续型选址模型的中国-西非航线枢纽港选址优化[J]. 系统管理学报,2018,27(5):928-937. (CHEN Kang, JIN Jiaru, YAO Yuanyuan, et al. Optimization of hub location in Sino-Western Africa liner network based on semi-continuous location model[J]. Journal of Systems & Management,2018,27(5):928-937. (in Chinese))
- [10] 吴旗韬,张虹鸥,叶玉瑶,等. 基于轴辐网络模型的中欧集装箱航线优化[J]. 中山大学学报(自然科学版),2012,51(6):131-138. (WU Qitao, ZHANG Hongou, YE Yuyao, et al. The hub-and-spoke container liner route between China and Northwest European[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012,51(6):131-138. (in Chinese))
- [11] JUNG P H, THILL J C. Sea-land interdependence and delimitation of port hinterland-foreland structures in the international transportation system[J]. Journal of Transport Geography,2022,99:103297.
- [12] 许长新. 港航经济系统论[M]. 北京:海洋出版社,2004.
- [13] 刘继生,陈彦光. 分形城市引力模型的一般形式和应用方法:关于城市体系空间作用的引力理论探讨[J]. 地理科学,2000,20(6):528-533. (LIU Jisheng, CHEN Yanguang. The gravitational models of fractal cities: theoretical basis and applied methods[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000,20(6):528-533. (in Chinese))
- [14] HUANG Guangyu, FENG Xuejun, CHEN Mili, et al. Spatial evolution model of port group hinterland from the perspective of

intermodal transport[J]. *Maritime Policy & Management*, 2023, 50(3):390-411.

- [15] 王松波. 考虑帕累托最优解的多目标优化进化算法[J]. 数学的实践与认识, 2022, 52(9):132-146. (WANG Songbo. Multi-objective optimization evolutionary algorithm considering Pareto optimal solution[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2022, 52(9):132-146. (in Chinese))
- [16] 汤岭, 王海军, 李致家, 等. 代理模型参数率定方法在 TOPKAPI 模型中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1):21-28. (TANG Ling, WANG Haijun, LI Zhijia, et al. Application of surrogate modeling parameter calibration method in TOPKAPI model[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(1):21-28. (in Chinese))
- [17] 黄显峰, 王宁, 刘志佳, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4):51-58. (HUANG Xianfeng, WANG Ning, LIU Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(4):51-58. (in Chinese))
- [18] 徐存东, 翟东辉, 张硕, 等. 改进的 TOPSIS 综合评价模型在河道整治方案优选中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(3):222-228. (XU Cundong, ZHAI Donghui, ZHANG Shuo, et al. Application of improved TOPSIS comprehensive evaluation model to optimization of river regulation schemes[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2013, 41(3):222-228. (in Chinese))
- [19] 杨志豪, 何建新, 李志华, 等. 基于 PPR-TOPSIS 分析法的沥青混凝土配合比方案优选[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2):82-88. (YANG Zhihao, HE Jianxin, LI Zhihua, et al. Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(2):82-88. (in Chinese))
- [20] 彭广益, 陈汨梨, 朱逸凡, 等. 基于改进生成系数法的西非外贸集装箱生成量测算[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(3):135-142. (PENG Guangyi, CHEN Mili, ZHU Yifan, et al. Calculation of west African foreign trade container production based on improved coefficient method[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2019, 36(3):135-142. (in Chinese))
- [21] BAYANE B M, QIU Yanjun, BEKHZAD Y. A review and analysis of railway transportation system in the economic community of West African States; towards the development of sustainable regional goal[J]. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 2020, 2(2):11-22.
- [22] The World Bank. Transport prices and costs in Africa; a review of the international corridors[EB/OL]. [2024-02-20]. <https://documents.worldbank.org>.
- [23] 孙祎峥, 王广生, 封学军, 等. 基于重力  $P$ -中值的非洲西海岸集装箱枢纽港选择[J]. 水道港口, 2023, 44(4):694-700. (SUN Yizheng, WANG Guangsheng, FENG Xuejun, et al. Selection of container hub ports along west coastline of Africa based on gravity  $P$ -median model[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2023, 44(4):694-700. (in Chinese))

(收稿日期:2024-03-06 编辑:熊水斌)

(上接第102页)

- [38] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1):2808-2812. (CONE Weiqing, PAN Mao, LI Tiefeng, et al. Quantitative analysis of critical rainfall-triggered debris flows[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Sup1):2808-2812. (in Chinese))
- [39] 娄路亮, 曾攀. 影响无网格方法求解精度的因素分析[J]. 计算力学学报, 2003, 20(3):313-319. (LOU Luliang, ZENG Pan. Factors affecting computational precision of MLS-based meshless method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2003, 20(3):313-319. (in Chinese))
- [40] 刘艳辉, 董力豪, 黄俊宝, 等. 基于 RF 和概率分级的滑坡临界降水阈值的确定方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(10):177-185. (LIU Yanhui, DONE Lihao, HUANG Junbao, et al. RF and probability grading-based determination method of landslide critical precipitation threshold[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(10):177-185. (in Chinese))
- [41] 杜若愚, 姚成, 刘玉环, 等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(6):25-32. (DU Ruoyu, YAO Cheng, LIU Yuhuan, et al. Grid-Xin'anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(6):25-32. (in Chinese))
- [42] 王尚庆, 徐进军, 罗勉. 三峡库区白水河滑坡险情预警方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(10):1218-1221. (WANG Shanqing, XU Jinjun, LUO Mian. Study on warning of dangerous state of Baishuihe landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(10):1218-1221. (in Chinese))

(收稿日期:2023-09-22 编辑:熊水斌)