

## 枢纽港投资方案与安全运输通道同步优化模型

陈 康<sup>1</sup>, 王滋承<sup>2,3</sup>, Evans Ago TETTEH<sup>3</sup>, 杨华龙<sup>3</sup>, 杨忠振<sup>4</sup>

(1. 大连海事大学 航运经济与管理学院, 大连 116026; 2. 山东科技大学 经济管理学院, 青岛 266590;  
3. 大连海事大学 交通运输工程学院, 大连 116026; 4. 宁波大学 海运学院, 宁波 315211)

**摘 要** 针对西非大陆独特特性, 考虑货主与港口经营者博弈、各枢纽港间相互关系以及西非地缘风险等因素的影响, 基于用户均衡原理, 以区域综合运输成本最低为目标, 构建混合整数规划模型, 协同优化枢纽港投资方案 (包括枢纽港投资对象选择, 投资港口数, 投资额度) 以及内陆安全通道设计方案. 基于遗传算法提出一种遗传 Frank-Wolf 混合算法. 计算结果表明, 模型能够在考虑安全风险因素的要求下, 同步优化枢纽港投资对象选择、投资额度以及相应的内陆安全运输通道网络.

**关键词** 集装箱运输; 枢纽港; 安全风险; 网络优化

## Multi-port investment option problem with safe path setting

CHEN Kang<sup>1</sup>, WANG Zicheng<sup>2,3</sup>, Evans Ago TETTEH<sup>3</sup>, YANG Hualong<sup>3</sup>, YANG Zhongzhen<sup>4</sup>

(1. School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. College of Economics and Management, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 4. Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract** In this paper, the unique characteristics of West Africa was addressed. The game relationship between the owner and the port operator, and the relationship among the hub ports as well as the geography risk in West Africa were all considered. Accordingly, based on the principle of equilibrium, a mixed-integer model was established. The model could collaboratively optimize the hub port investment program (including the selection of investment targets, the amount of investment ports, and the investment quota) as well as the inland safe path setting scheme. The objective of this model was to minimize the regional integrated transportation costs. A genetic Frank-Wolf hybrid algorithm was proposed based on genetic algorithm to solve this model. The results show that the selection of investment targets in hub ports, the amount of investment ports, and the investment quota concerning security risks can be optimized by the proposed model, which can also simultaneously improve the corresponding inland safe path network.

**Keywords** container shipping; hub port; security risk; network optimization

## 1 引言

近年来, 伴随着“海上丝绸之路”战略的持续推进, 中国与西非各国在交通基础设施建设领域的合作不断加深. 为进一步促进双边贸易, 降低综合物流成本, 中国政府应西非各国的请求, 计划在西非沿海地区投资建设若干大型集装箱枢纽港, 以完善中国 - 西非贸易通道, 帮助西非各国打造现代陆海联运物流系统. 在此

**收稿日期:** 2017-08-03

**作者简介:** 陈康 (1982-), 男, 辽宁大连人, 博士, 副教授, 研究方向: 交通运输规划; 通信作者: 杨忠振 (1964-), 男, 辽宁锦州人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 交通运输规划, E-mail: Yangzhongzhen@nbu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金 (71402013, 71372088, 71431001); 教育部人文社科基金 (14YJC630010)

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (71402013, 71372088, 71431001); Humanity and Social Science Youth Foundation of Ministry of Education of China (14YJC630010)

**中文引用格式:** 陈康, 王滋承, Evans Ago TETTEH, 等. 枢纽港投资方案与安全运输通道同步优化模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(9): 2335-2347.

**英文引用格式:** Chen K, Wang Z C, Tetteh E A, et al. Multi-port investment option problem with safe path setting[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(9): 2335-2347.

背景下, 基于西非实际状况科学设置港口投资方案 (确定投资对象与投资额度) 成为中国政府亟待解决的关键问题。

与全球其他地区相比, 西非大陆的沿海地区具有两个显著特征。首先, 域内既有港口吞吐能力有限且关联性差, 港口发展水平均较低, 尚未形成区域性枢纽港口。这状况给投资方案的制定造成了较大困难, 决策者必须在众多发展水平较低的港口中进行评估和选择。因此, 合理确定并筛选投资港口 (包括投资港口的数量和位置) 便成为中国政府迫切需要解决的首要问题。其次, 目前在西非大陆局部区域还存在较为严重的安全问题 (例如政局动荡, 宗教矛盾以及种族冲突等)。这些问题严重威胁着西非内陆运输系统的可靠性, 给港口集疏运系统的稳定运营带来了巨大挑战, 迫使港口运营者不得不采取各种措施打造专用的货运集疏运安全运输通道。例如建设封闭且受军方保护的专用铁路线以提高内陆运输的安全性, 或与冲突各方展开直接谈判, 借助当地政治、部落或民兵力量确保货物运输的安全等。由于安全通道的设置与运营耗资大, 且与港口位置密切相关, 因此在确定港口投资方案时需考虑安全通道的设计问题。

综上, 本文提出的西非地区枢纽港投资方案设计问题本质上应属于一类特殊的选址问题。在该问题中, 决策者不仅需考虑多个枢纽节点 (枢纽港) 的选择 (作为投资对象), 并确定所需投资港口的数目与相应的投资额度, 还需考虑内陆安全通道设置与建设。在下文中, 将该问题简称为多港口投资方案与安全运输通道同步优化问题 (multi-port investment option problem with safe path setting, MPOP)。

MPOP 的本质是在多个备选港口中, 筛选出若干港口作为枢纽港予以投资, 因此 MPOP 也可被视为一种较为特殊的选址问题。针对此类问题, 国内外学者已经开展过许多有意义的研究。在非水运领域, 相关研究大致可分为: 城市交通设施选址问题研究<sup>[1,2]</sup>, 空港选址研究<sup>[3,4]</sup>, 以及火车与长途客车车站选址研究<sup>[5,6]</sup>。在水运领域, 有关文献更为丰富, 根据视角不同, 相关研究可分为两类: 一是基于政府视角, 针对国家或地区枢纽港选址或无水港选址问题的研究<sup>[7-11]</sup>。例如, Notteboom<sup>[12]</sup> 运用多准则分析方法, 从港口用户、码头运营商和社会三个角度出发, 在若干有限的备选港口中筛选最具潜力的港口作为集装箱枢纽港。Nam 和 Song<sup>[13]</sup> 对海运物流中的枢纽概念进行定义, 并将其运用到集装箱港口的枢纽选择中。Sun 和 Zheng<sup>[14]</sup> 建立两阶段模型, 计算分析各节点成为枢纽的潜力值, 找出具有成为枢纽潜力的节点。另一类则站在承运人的角度, 以班轮公司的航运网络为基础, 考虑班轮航线系统的枢纽港选址问题<sup>[15]</sup>。Aversa<sup>[16]</sup> 等人建立混合整数规划模型, 从南美东海岸的备选港口中选择集装箱枢纽港。Gelareh 和 Pisinger<sup>[17]</sup> 提出一种混合整数线性规划方法, 为远洋班轮公司设计运输网络及配船方案, 同时考虑枢纽港的选址问题, 并用算例证明该方法的有效性及其优越性。Zheng<sup>[18]</sup> 等人在考虑了多种集装箱箱型和转运时间限制的基础上, 研究轴辐式集装箱运输网络, 根据集装箱转运情况选择枢纽港与喂给港。上述研究大多以既有道路网络为基础, 将单一枢纽港选址作为研究对象, 而西非面临枢纽港的安全通道建设问题, 且需要考虑如何选择多个投资对象港 (即协同选址), 因此需对现有研究进行拓展与完善。

综上, 本研究将针对西非大陆的特征, 基于已有研究成果, 提出港口投资方案与安全运输通道同步优化模型。研究主要贡献如下: 1) 针对 MPOP 构造了一个双层混合整数优化模型并设计相关求解算法; 2) 实现了枢纽港口投资方案与内陆安全通道设计的同步优化。在下文中, 我们将首先引入问题描述 (第 2 节), 而后介绍模型构造 (第 3 节), 并在第 4 节中给出模型的求解算法, 最后在第 5 节中利用实际数据测试上述模型和算法的可靠性, 分析计算结果。

## 2 问题描述

MPOP 主要涉及两个利益相关方: 货主 (或其代理人) 与港口群投资经营人 (中国政府或其对外投资部门, 简称为港口投资经营人), 两者关系如图 1 所示。在上述关系中, 货主 (或其代理人) 负责制定货物的运输方案, 具体包括: 制定运输路线, 选择运输方式以及装卸货港口。港口投资经营人负责枢纽港与内陆安全通道的建设与运营决策: 投资港口的数量, 投资对象选择, 投资额度, 内陆运输通道网络设定、投资与运营。由于港口投资经营人为中国政府而非传统追利投资者, 因此枢纽港口建设的目标并非收益最大, 而是实现中国与西非各国利益的“多赢”, 即在确保基本投资收益的前提下, 降低中国 - 西非货物运输总成本。在 MPOP 中, 港口投资经营人与货主的决策行为相互关联, 相互影响。一方面, 前者的投资行为可改变港口与内陆运输系

统服务水平, 进而影响后者的运输路径选择行为; 另一方面, 后者的选择行为又决定了港口的货运需求量, 从而反作用于前者的投资行为. 在该互动关系中, 内陆安全运输通道因素至关重要. 其一, 安全通道的设置可直接改变货主的运输路径选择行为, 进而影响相关港口的货运需求. 其二, 由于内陆安全通道的设置和维护费用较高, 因此其对港口的综合运营成本也具有直接影响.

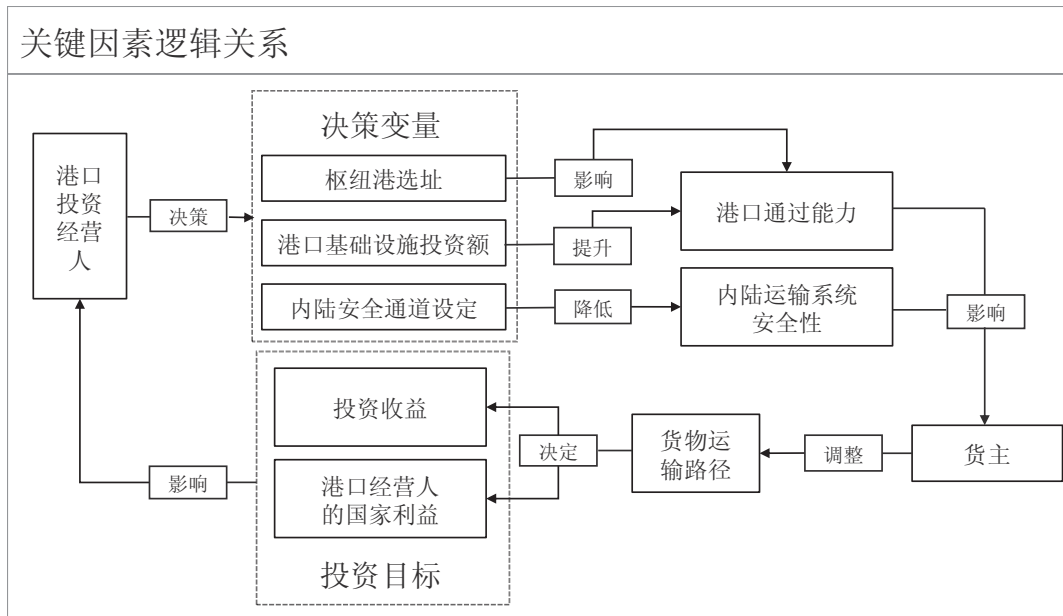


图 1 港口投资经营人与货主互动关系

基于以上分析, MPOP 可做如下描述: 基于港口投资经营人视角, 同步优化枢纽港投资方案 (投资对象的选择与数量, 相关的投资额度) 与安全通道网络设计, 对投资港口的数量和位置, 各港口的投资额度 (提升港口吞吐能力所投入的建设费用) 和内陆安全通道网络设计进行决策. 问题的最优解应满足港口投资经营人与货主利益均衡的条件, 即货主无法通过改变运输路径或改变进/出口港口, 进一步降低其广义综合运输成本 (运输时间、运输风险以及运输风险的线性组合), 港口投资经营人在保持基本收益率的前提下, 也无法通过追加或减少投资进一步降低区域广义运输总成本. 针对 MPOP, 本研究使用如图 2 所示的结构进行建模.

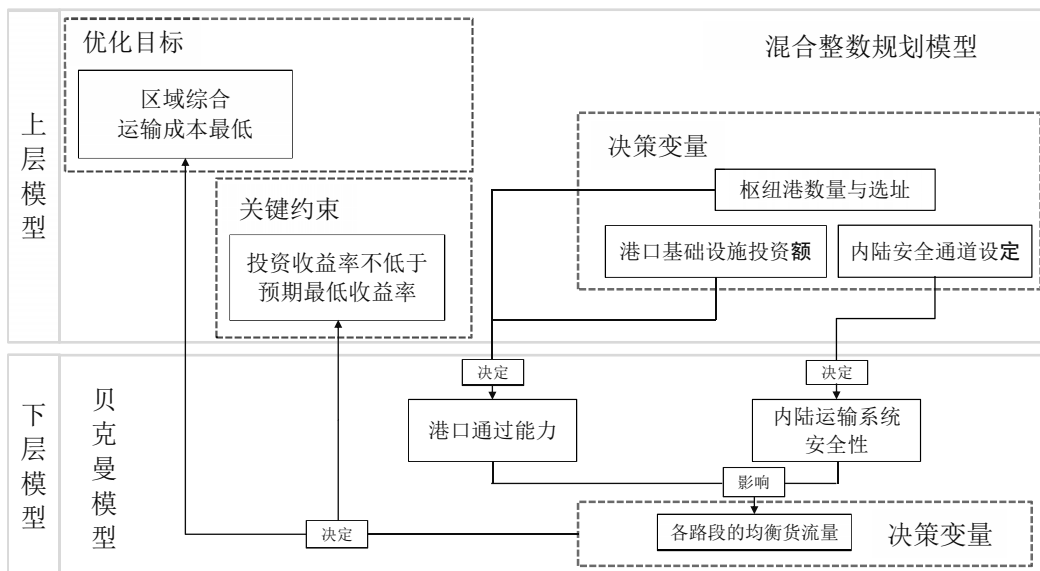


图 2 MPOP 双层结构

MPOP (MPOP Model) 为双层模型, 其上层为混合整数规划模型, 用于在确保港口投资经营人实际收

益率不低于预期收益率的前提下,以区域广义运输总成本最低为目标,优化投资港口的数量、投资对象选择、投资额度以及内陆运输通道网络设计方案;下层模型为交通流均衡分配模型(贝克曼模型),用于估算运输系统中各路段的均衡货流量,并据此评估系统的综合运输成本与港口收益,为上层模型的优化提供支持.该模型的最优解满足上文“均衡状态”的定义.

### 3 模型构建

#### 3.1 西非地区综合运输网络定义

令  $G_L = (N_L, A_L)$  为已知陆运网络,  $N_L$  与  $A_L$  分别为内陆运输路段集与城市节点集,令  $G_S = (N_S, A_S)$  为已知海运网络,其中  $N_S$  与  $A_S$  分别为海运路段集与港口节点集.令  $A_{LS}$  表示海陆链接路段集合,其元素称为海陆链接路段,该路段的作用是链接港口节点与其所隶属的城市节点,例如链接 Abidjan 港与 Abidjan 市.为简化问题,规定港口节点仅与其所隶属的城市节点相连.对于任意  $a \in A_{LS}$ ,令  $\phi_{city}(a)$  与  $\phi_{port}(a)$  分别表示海陆链接路段  $a$  所连接的城市与港口.由于  $a \in A_{LS}$  对应的港口都是唯一的,因此可以利用  $a$  刻画港口的某些性质.例如,在路段  $a$  上设置通过能力参数,以刻画港口  $\phi_{port}(a)$  的通过能力,或设置通过费用参数,以刻画港口  $\phi_{port}(a)$  的单位 TEU 作业费用等.向量  $(i, j)$  表示一个内陆运输或海陆链接路段,其中  $i, j$  表示某港口或某城市节点.

#### 3.2 港口投资经营人行为的数学建模

在 MPOP 中,主要考虑港口投资经营人的两种投资行为.一是以提升港口通过能力为目的的港口基础设施投资.由于该投资行为被视为港口投资经营人对海陆链接路段运输能力的投资,因此对该投资行为做如下描述.已知  $h$  为投资目标港口,  $h = \phi_{port}(a)$ ,  $a \in A_{LS}$ ,令  $v_a$  为路段  $a$  获得的投资额(即港口  $h$  获得的投资额),  $cp_{\phi_{port}(a)}^{cur}$  表示路段  $a$  初始通过能力(即港口  $h$  的初始通过能力),则  $v_a$  与路段  $a$  的通过能力(即港口  $h$  通过能力)函数关系定义如式(1)所示,其中  $\delta_1$  与  $\delta_2$  为待定系数.

$$cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a) = cp_{\phi_{port}(a)}^{cur}(1 + \delta_1 v_a^{\delta_2}), \quad a \in A_{LS}, \phi_{port}(a) = h. \quad (1)$$

二是以提升港口集疏运系统安全性为目的的内陆安全通道网络建设投资.令  $G^{IN} = (N^{IN}, A^{IN})$  表示内陆安全通道网络,其中  $N^{IN}$  与  $A^{IN}$  分别表示该网络的节点集与边集.  $G^{IN}$  由多条安全通道  $PA_l$  构成,记为  $G^{IN} = \{PA_l\}$ ,其中  $l$  为通道编号.规定  $PA_l$  需由若干内陆运输路段首尾链接形成,其一端为投资目标港口,另一端为内陆城市,  $PA_l = \{(i, j_1), (j_1, j_2), \dots, (j_{s-1}, j_s), \dots, (j_{s-1}, j_s), (j_s, h)\} \cup \{(h, j_s), (j_s, j_{s-1}), \dots, (j_s, j_{s-1}), \dots, (j_2, j_1), (j_1, i)\}$ .其中,  $i, j_s \in N_L$ ,  $(j_{s-1}, j_s), (j_s, j_{s-1}) \in A_L$ ,  $(j_s, h), (h, j_s) \in A_{LS}$ ,  $h = \psi_{port}(PA_l)$ ,  $i = \psi_{city}(PA_l)$ ,  $h \in H$ .函数  $\psi_{port}(PA_l)$  与  $\psi_{city}(PA_l)$  分别返回通道  $PA_l$  的港口以及内陆城市端点,集合  $H$  表示已知投资对象港口集.令  $f_{rik}(G^{IN})$  为内陆安全通道网络建设成本函数,其表达式如式(2)所示.

$$f_{rik}(G^{IN}) = \sum_{a \in A^{IN}} Dis_a \cdot LC_a \cdot f_{rik}^{sub}(IS_a). \quad (2)$$

其中,  $Dis_a$  表示路段  $a$  的实际长度,  $LC_a$  表示路段运输能力,  $IS_a$  为路段风险系数,  $f_{rik}^{sub}(IS_a)$  为地缘风险单位(美元/吨公里)投资费率函数,假设其为连续线性增函数,且当  $IS_a = 0$  时,函数值为 0.第二种投资行为对于运输网络的影响主要体现为降低内陆集疏运系统的风险.为刻画该影响,引入路段风险修正函数  $f_{rik}^{link}(a, G^{IN})$ ,如式(3)所示,其中若内陆路段  $a$  属于集合  $A^{IN}$ ,那么该路段的安全风险将修正为 0,否则将保持不变.

$$f_{rik}^{link}(a, G^{IN}) = \begin{cases} 0, & a \in A^{IN}, \\ IS_a, & a \notin A^{IN}. \end{cases} \quad (3)$$

#### 3.3 路段广义运输成本函数

##### 1) 陆运路段 ( $a \in A_L$ )

路段的单位广义运输成本主要取决于货运费、运输风险以及港口经营人的投资三个因素.本研究假设上述各因素的关系如式(4)所示.

$$u_a^L(G^{IN}, x_a) = \alpha_{L1} Dis_a + \alpha_{L2} x_a^{\alpha_{L4}} / LC_a + \alpha_{L3} f_{rik}^{link}(a, G^{IN}). \quad (4)$$

其中,  $u_a(\cdot)$  表示路段广义成本函数,  $\alpha_{L1} \sim \alpha_{L4}$  为正参数. 在式 (4) 中, 等式右侧第一项用于描述运输距离的影响, 第二项刻画了货运量与运费率之间的正相关关系, 第三项则体现了风险因素以及港口经营人投资行为对广义运输成本的影响.

2) 海运路段 ( $a \in A_S$ )

广义运输成本函数定义如下:

$$u_a^S(x_a) = \begin{cases} BC_a^S + \alpha_{S1}x_a/sc_a, & x_a \leq sc_a, \\ BC_a^S + \alpha_{S1}x_a/sc_a + M(sc_a - x_a)^2, & x_a > sc_a. \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\alpha_{S1}$  为调节参数.  $BC_a^S$  表示海运路段  $a$  的基础运输成本,  $sc_a$  表示海运路段  $a$  的运输能力,  $M$  为极大常数. 当  $x_a > sc_a$  时,  $M(sc_a - x_a)^2$  将发挥作用, 路段  $a$  的广义运输成本将大幅上升, 令部分货主选择其他运输路径.

3) 海陆链接路段 ( $a \in A_{LS}$ )

使用海陆链接路段的通过能力来表示港口的通过能力. 即若港口  $h$  为投资目标港口, 其对应的海陆链接路段为路段  $a(\phi_{port}(a) = h)$ , 则将该路段的通过能力视为港口的通过能力. 本研究假定该通过能力与港口投资额度有关, 港口投资额度、海陆链接路段的通过能力以及货主的广义运输成本  $u_a^{LS}(v_a, x_a)$  满足式 (6), 其中  $\alpha_1^{LS} \sim \alpha_3^{LS}$  为参数,  $M$  为极大正数.

$$u_a^{LS}(v_a, x_a) = \begin{cases} \alpha_1^{LS} cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a) + \frac{\alpha_2^{LS} x_a}{cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a)}, & x_a \leq cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a), \\ \alpha_1^{LS} cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a) + \frac{\alpha_2^{LS} x_a \alpha_3^{LS}}{cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a)} + M \left( cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a) - x_a \right)^2, & x_a > cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a). \end{cases} \quad (6)$$

3.4 构建 MPOPM

基于上述设定, 构建双层优化模型 MPOPM 的上层模型如式 (7) 至式 (11). 其中, 外生变量  $X^* = (x_a^*)$ ,  $x_a^*$  为运输网络中路段  $a$  上的均衡流量.  $X^*$  由下层模型求出, 决策变量  $X_k^S$  表示港口投资经营人的投资方案, 由投资港口选择集 (内陆运输网络设计方案向量  $G_k^{IN}$  与港口投资方案向量  $V_k$ ) 构成.  $G_k^{IN}$  与前文定义的  $G^{IN}$  基本相同, 差异在于引入了序号  $k$  表示方案编号,  $V_k$  则由各海陆链接路段投资额  $v_a^k$  组成. 令  $\Omega$  表示所有可行向量  $X_k^S$  构成的集合.  $z_U(\cdot)$  为综合运输网络广义运输成本合计函数.  $\rho_k$  为上层模型的决策变量, 若投资方案  $X_k^S$  被采用, 则  $\rho_k$  等于 1, 否则为 0.

$$\text{Min : } z_U(X^*) = \sum_{X_k^S \in \Omega} \rho_k z_U(X^*, X_k^S) \quad (7)$$

$$\text{s.t. : } \sum_{X_k^S \in \Omega} \rho_k = 1, \quad (8)$$

$$z_U(X^*, X_k^S) = \sum_{a \in A_L} u_a^L(G_k^{IN}, x_a^*) x_a^* + \sum_{a \in A_S} u_a^S(x_a^*) x_a^* + \sum_{a \in A_{LS}} u_a^{LS}(v_a^k, x_a^*) x_a^*, \quad (9)$$

$$\sum_{\phi_{port}(a) \in H_k} \left[ \alpha_1^{LS} cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a^k) + \frac{\alpha_2^{LS} x_a^*}{cp_{\phi_{port}(a)}^{inv}(v_a^k)} \right] x_a^* \geq \alpha_{exp} \left[ f_{rik}(G_k^{IN}) + \sum_{\phi_{port}(a) \in H_k} v_a^k \right], \quad (10)$$

$$v_a^k = 0, \quad \phi_{port}(a) \notin H_k, \quad (11)$$

$$X^* = (x_a^*), \quad a \in N_S \cup N_L \cup N_{LS},$$

$$X_k^S = (H_k, G_k^{IN}, V_k), \quad G_k^{IN} = (N_k^{IN}, A_k^{IN}), \quad A_k^{IN} \subseteq N_S,$$

$$V_k = (v_a^k), v_a^k \geq 0, \quad a \in A_{LS}.$$

式 (7) 为上层模型的目标函数, 用于最小化区域综合运输成本. 式 (8) 用于确保仅有一个投资方案被选出. 式 (9) 给出了函数  $z_U(\cdot)$  的表达式. 式 (10) 用于确保港口投资经营人的获益超过预期收益率  $\alpha_{exp}$ , 其不等式右端计算了港口投资经营人的收益, 左端则计算了投资总额. 式 (11) 用于确保仅有隶属于集合  $H_k$  的港

口可以获得基础设施投资. 下层模型表达式如下:

$$\text{Min} : z_L(X_k^S) = \sum_{a \in A_S} \int_0^{x_a} u_a^S(\omega) d\omega + \sum_{a \in A_L} \int_0^{x_a} u_a^L(G_k^{\text{IN}}, \omega) d\omega + \sum_{\phi_{\text{port}}(a) \in H_k} \int_0^{x_a} u_a^{\text{LS}}(v_a^k, \omega) d\omega \quad (12)$$

$$\text{s.t.} : \quad q_{ij} = \sum_c f_{ijc}, \quad (13)$$

$$x_a = \sum_i \sum_j \sum_c f_{ijc} \sigma_{ijac}, \quad (14)$$

$$x_a \geq 0, \quad f_{ijb} \geq 0, \quad \sigma_{ijac} = 0 \text{ or } 1.$$

下层模型用于根据给定的投资方案  $X_k^S$ , 计算出系统均衡货流分布向量  $X^*$ . 在该模型中,  $X_k^S$  为外生变量. 下层模型是一个贝克曼转换模型, 其目标函数没有具体经济学意义, 约束条件式 (13)、式 (14) 同经典 UE 均衡货流分配模型相同, 其中  $q_{ij}$  为点  $i$  至  $j$  的 OD 流量;  $f_{ijc}$  表示连接 OD 对  $i$ - $j$  的路径  $c$  上的流量;  $\sigma_{ijab}$  为 0~1 变量, 当 OD 对  $i$ - $j$  间的路径  $c$  包含路段  $a$  时取 1, 否则为 0.

## 4 算法设计

MPOPMA 改进自 Shintani 等<sup>[19]</sup> 构建的航线网络优化模型. 该模型的主要特征是: 通过引入“可行网络设计方案集”(例如本文的集合  $\Omega$ ), 简化了优化模型的约束系统, 并将网络设计问题转化为背包问题. 在此类建模思想下, 可行网络设计方案的全集被视为已知, 每个可行的网络设计方案是否被采用成为决策的核心. 由于可行方案集必然包含最优方案, 因此该类模型理论上可确保解出最优解. Shintani 等已经对该类模型的复杂性做过简要分析, 并指出该模型难以求出精确解. 鉴于此, 本文设计了基于遗传框架并融合 Frank-Wolf 算法的启发式算法 (MPOPMA), 算法基本流程如表 1 所示. 下面, 本研究着重介绍编码方法以及计算结果早熟问题处理等关键的技术要点.

表 1 MPOPMA 基本流程

Step 1:	创建初始种群, 其中每个个体均为一个可行枢纽港投资与内陆通道设计方案.
Step 2:	针对每个个体, 利用 Frank-Wolf 算法, 求解下层模型以获得货流均衡分配状态, 计算区域综合运输成本与港口投资收益率, 并据此作为评价个体优劣的依据.
Step 3:	检查当前算法是否已达到收敛标准, 否则执行 Step 4.
Step 4:	对种群实施选择, 交叉与编译操作并返回 Step 2.

### 4.1 编码方法

MPOPMA 的染色体由三组子染色体构成, 如图 3 所示. 其中, 子染色体 1 为一组 0~1 编码, 其基因位数由备选港口数确定. 在该子染色体中, 若  $i$  号基因取值为 1, 则表明编号为  $i$  的港口被选为投资对象港口. 例如在图 3 中, 子染色体 1 的 1 号与 2 号基因为 1, 因此港口 1 与港口 2 被选为投资对象港.

子染色体 2 为整数编码, 其基因位数与子染色体 1 相同, 每个基因的取值介于 0~100 之间, 用于表示港口基本投资单位的倍数. 这里, 基本投资单位是指一个基本的投资额度. 为了压缩解空间, 假定港口投资经营人对港口的投资额只能是上述基本额度的整数倍. 子染色体 2 的具体解码过程如下: 1) 根据实际, 预设单位投资强度对应的投资额度  $Inv$ ; 2) 读取子染色体 1, 获取不为 0 的基因编号  $i$ ; 3) 读取子染色体 2 编号  $i$  的基因, 获得投资倍数数值  $k$ ; 4) 计算投资强度  $k$  与  $Inv$  的乘积, 便获得港口  $i$  的实际投资额.

子染色体 3 的结构相对复杂, 为长度不定的整数序列, 每个基因的取值为 0~ $N$  间的整数 ( $N$  表示内陆城市总数), 但规定首尾基因的取值为 0, 形成类似于“0-XXX-0-XX-0-XX-0”的模式, 例如图 3 中, 子染色体 3 的编码为 0-41-0-23-0-3-0-0-434-0. 该编码用于刻画某个内陆安全通道网络, 具体的解码过程如下:

第一步, 初解码, 获得连续两个 0 基因之间的基因序列, 并将其视为构成内陆安全网络的若干通道或节点. 在上例中, 子染色体 3 确定的通道或节点信息包括: 通道 C4-C1, 通道 C2-C3, 节点 C3, 空集  $\emptyset$ , 通道 C4-C3-C4. 这里用 CX 代表通道, 在下文用 PX 代表港口节点; 另外, 产生  $\emptyset$  的原因是子染色体 3 的 9 号和 10 号基因均为 0.

第二步, 按照交替原则, 确定各通道/节点应连接的投资目标港口. 在上例中, 确定的投资对象港口为港口 P1 与港口 P3, 则根据交替原则可得: 通道 C4-C1 与港口 P1 链接 (C4-C1-P1); 通道 C2-C3 与港口 P3 链

接 (C2-C3-P3); 城市 C3 与港口 P1 链接 (C3-P1);  $\emptyset$  与港口 P3 链接, 但由于为空, 因此忽略; 通道 C4-C3-C4 与港口 P1 链接 (C4-C3-C4-P1).

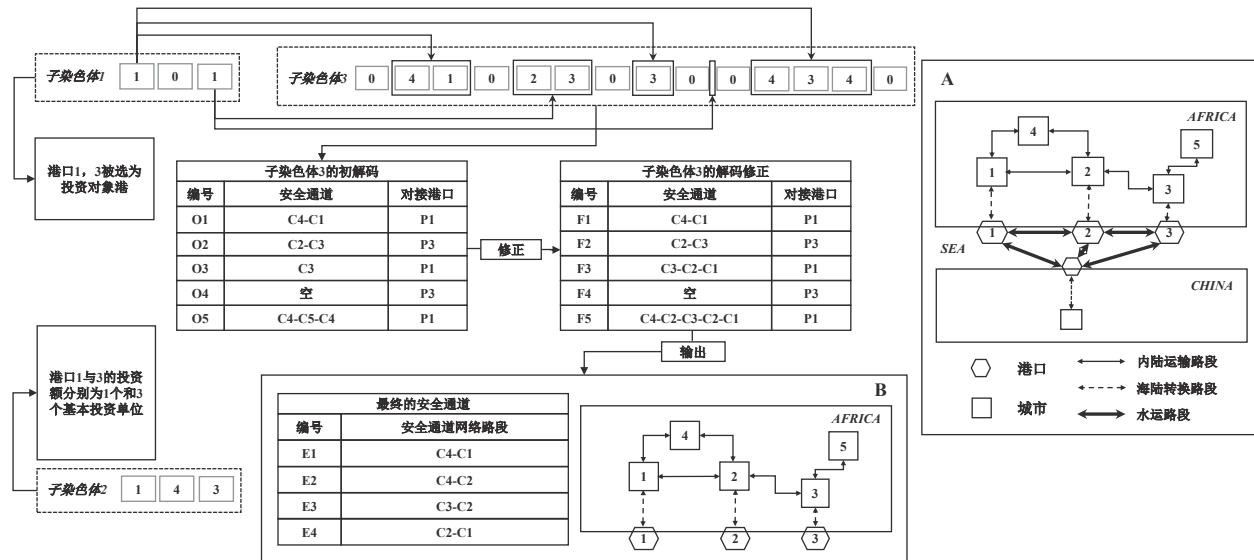


图 3 编码与解码过程

第三步, 根据通道/节点与港口的链接方案, 基于最短路原则, 对第二步获得的方案进行修正并补充必要节点, 获得可行的安全运输路径. 在上例中, 节点 C3 与港口 P1 无直接链接路径, 从而根据最短路原则, 补充节点 C2, 获得可行路径 C3-C2-C1-P1.

第四步, 路段合并, 获得安全通道的可行设计方案. 在上例中, 安全路径包括 C4-C1, C2-C3, C3-C2-C1, C4-C2-C3-C2-C1, 这些路径组合在一起获得构成网络的 4 条安全通道, 如图 3 中如由城市 4 至城市 1, 城市 2 至城市 3, 城市 1 与城市 2, 城市 4 与城市 2, 四条路段构成的网络.

### 4.2 早熟问题的处理

上述编码方法虽满足算法需要, 但由于编码长度不可控, 容易导致计算早熟. 对此, 本研究采用两个方法予以解决. 方法 1, 子染色体 3 的修订. MPOPMA 早熟的诱因之一是子染色体 3 编码长度具有不确定性, 因此考虑在计算过程中修订该子染色体, 以避免其长度失控. 以图 3 为例, 根据获得的安全通道设计方案: C4-C1, C4-C2, C3-C2 以及 C2-C1, 以长度最短为原则, 将子染色体 3 修正为: 0-41-0-42-0-32-0-21-0. 方法 2, 适应度值再标定. 该方法包括两个步骤. 首先, 利用式 (15) 对个体适应度值进行重新标定, 其中  $Avg$  表示当前种群的平均适应度值,  $Max$  为当前种群适应度的最大值. 而后, 利用式 (16), 对修订后的适应度值进行再处理, 其中  $\min(fit')$  表示当前种群中  $fit'_i$  的最小值.

$$fit'_i = \begin{cases} Avg/(Max - Avg)fit_i + (Max - 2Avg)/(Max - Avg), & \text{if } Max \neq Avg, \\ fit_i, & \text{if } Max = Avg. \end{cases} \quad (15)$$

$$fit''_i = \ln(fit'_i + \min(fit')). \quad (16)$$

## 5 计算实验

### 5.1 实验数据获取, 参数设定与实验方案设计

以西非大陆为实验区域, 货运 OD 根据区域内城市间的贸易数据与现有货运需求量估算得到, 贸易数据取自于中国商务部 2014-2016 年公开发布的统计报告. 在海陆运输网络方面, 首先基于现有的非洲主要海、铁、公路网络构建实际路网, 然后根据西非各国经济发展水平补充若干新的道路和港口, 从而获得图 4 所示的综合运输网络.

在标定路段风险方面, 首先根据 Yakovenko 等 [20] 的研究确定当前影响西非地区稳定的主要因素以及存在的问题, 并结合 Marc 等 [21] 的研究报告, 确定研究区域内各主要道路、城市以及港口周边的安全风险

程度;其次,基于 MapInfo 平台,初步作图并标定了各主要风险区域的范围与烈度;最后,为了确保标定的准确性,邀请了部分来自相关国家的学者对安全区域范围与危险等级做了评估和校正.通过上述努力,我们获得了西非地区安全风险程度示意图,如图 5 所示.



图 4 西非综合运输网络

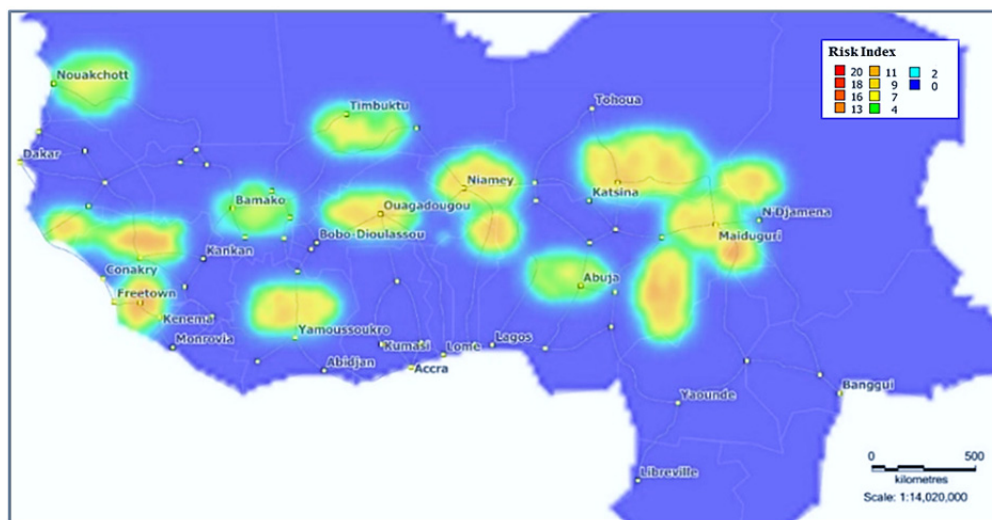


图 5 西非地区内陆区域风险等级标定

根据图 5 所示信息,对西非内陆运输路段的风险等级做了标定,获得各路段的风险等级系数  $IS_a$ . 本文将路段的风险设定为 20 个等级,0 级表示无风险,20 级表示风险极高.基于该设定绘制图 6,其中粗线条路段风险较高(风险等级超过 15),细线条路段风险较低(风险等级 12).

在模型参数设定方面,参数的筛选与设定主要源于我们对既有数据的调查和拟合,其中部分参数的获取存在较大困难,例如西非地区内陆道路阻抗函数的相关参数等,在计算时只能根据东南亚的相关数据予以推算.而在算法参数设置方面,实验种群规模设定为 1000,最大迭代次数为 1000,GA 算法交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1,算法停止阈值为 0.01(种群最大适应度与平均适应度的差值).

在实验方案设计方面,为了分析风险因素对西非港口投资方案及其安全通道设置的影响,设定了三种情景,分别为情景 1,非洲大陆无安全风险;情景 2,风险强度为现状值的 50%;情景 3,风险强度为现状值.通过分析上述三种不同状况,以讨论安全风险因素对西非地区综合运输系统的影响.

在实验结果呈现方面,我们的计算结果处理流程为:首先基于开发的 C++ 程序和设定好的参数环境,计算出优化后的枢纽港投资对象选择方案、相关的投资额度,内陆运输网络设计方案,以及相应的货流分布方



案 (即获得了运输网络中各路段上的货流量), 而后开展如下三方面的工作. 第一, 基于计算得出的货流均衡分布状况 (即获得了运输网络中各路段上的货流量), 绘制货流分布图 (如图 7, 图 8I 以及图 9I), 以分析相关枢纽港投入使用后, 货流的空间分布状况. 第二, 基于计算获得的内陆安全通道设计方案, 绘制内陆安全通道走行示意图 (图 8II 与图 9II), 用以展示枢纽港投资选择与内陆安全通道之间的关系. 第三, 为了展示风险因素对于计算结果的影响, 我们还将图 5 所给出的地区风险信息与货流分布状况结合, 绘制出图 8III 与图 9III, 以分析在不同风险强度下, 货流在运网上的空间分布差异.

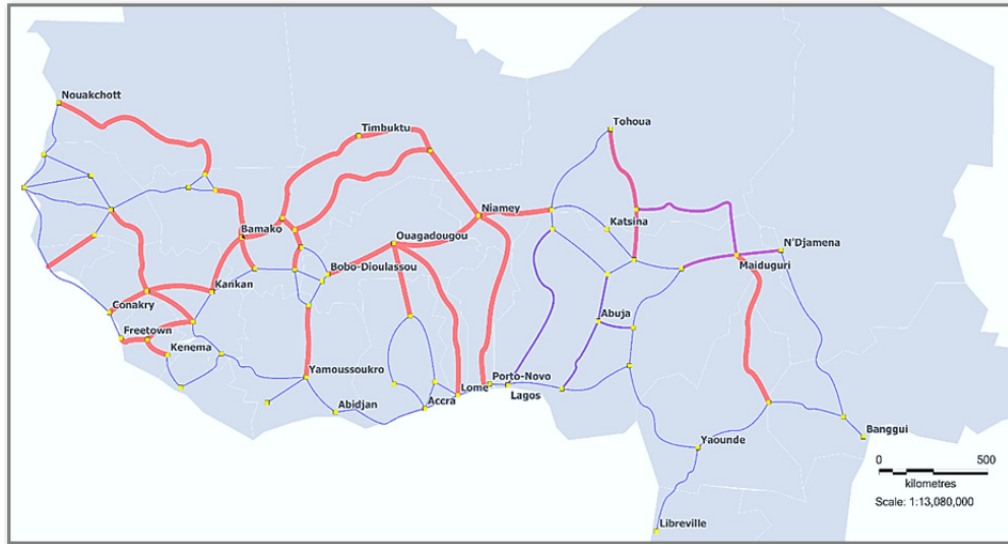


图 6 西非地区内陆运输路段风险等级标定

## 5.2 计算结果分析

### 5.2.1 情景 1 (0% 强度的安全风险)

当非洲大陆无地缘风险时, 根据本文构建的模型, 可以计算得出 Cotonou 港 (Hub Port 1), Abidjan 港 (Hub Port 2) 和 Freetown 港 (Hub Port 3) 为最佳枢纽港, 各港服务能力分别设定为 5000 TEU/周, 2600 TEU/周, 2400 TEU/周, 实际吞吐量分别为 4416 TEU, 2420 TEU, 2226 TEU, 分别为区域货物进出口总量的 27.08%, 15.24%, 14.02%. 因此, 可以得到情景 1 下安全风险因素对西非地区综合运输系统影响的示意图, 如图 7 所示.

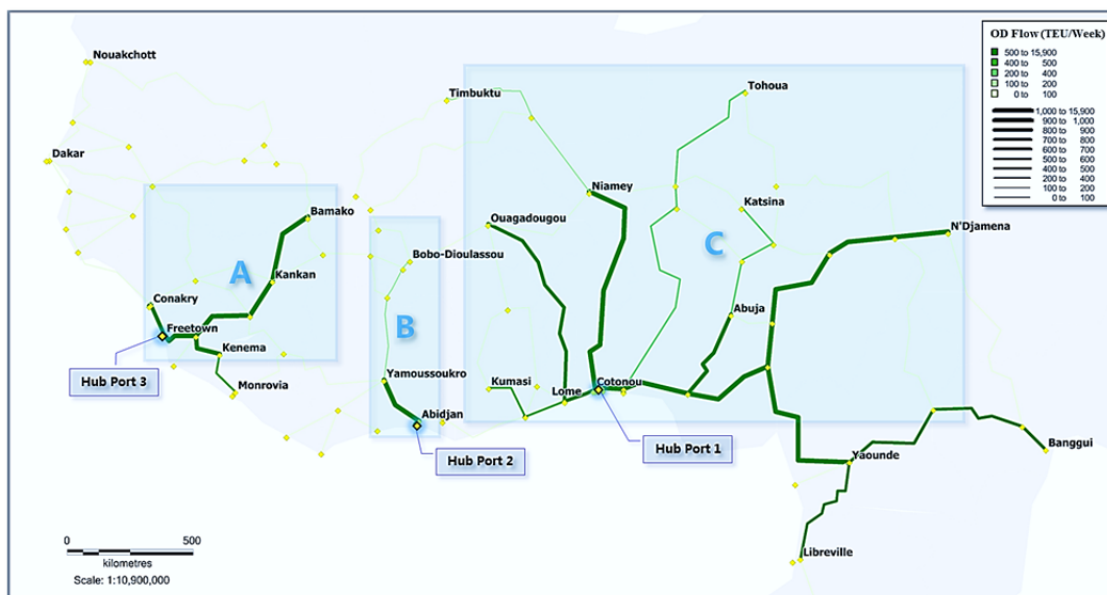


图 7 无风险情况下的枢纽港投资方案及其影响

由图 7 可见, 由于这三个枢纽港口的影响, 在西非地区大致形成了 3 大内陆集疏运系统. 其一, 为以 Conakry 为核心的西部内陆货运系统 (区域 A), 该系统服务的城市主要包括 Conakry, Bamako, Kenema, Kankan 以及 Freetown. 其二为以 Abidjan 为核心的中部地区货运系统 (区域 B), 主要服务 Bobo-Dioulassou, Yamoussoukro 以及 Abidjan. 其三为以 Cotonou 为核心的东部地区货运系统 (区域 C), 该系统最为重要, 服务东部地区的几乎所有大型城市. 该计算结果表明, 若西非地区的整体安全局势得到根本性改善, 则在其他因素不变的情况下, 西非东部地区的 Cotonou 港具有重大的投资价值, 具备发展成为区域核心港口的潜力; 而在东部地区, Freetown 港则更适合建设为枢纽港. 另外, 计算结果还表明此时港口投资经营人不必为任何港口设置安全运输通道, 这个结果符合预期.

### 5.2.2 情景 2 (50% 强度的安全风险)

如图 8-I 所示, 当安全风险强度为现状值的 50% 时, 最佳投资对象为 Dakar 港 (Hub Port 1), Monrovia 港 (Hub Port 2), Cotonou 港 (Hub Port 3) 以及 Libreville 港 (Hub Port 4), 各港口的服务能力分别设定为 600 TEU/周, 2600 TEU/周, 5500 TEU/周以及 2200 TEU/周. 此外, 需要为 Cotonou 港构建两条安全通道

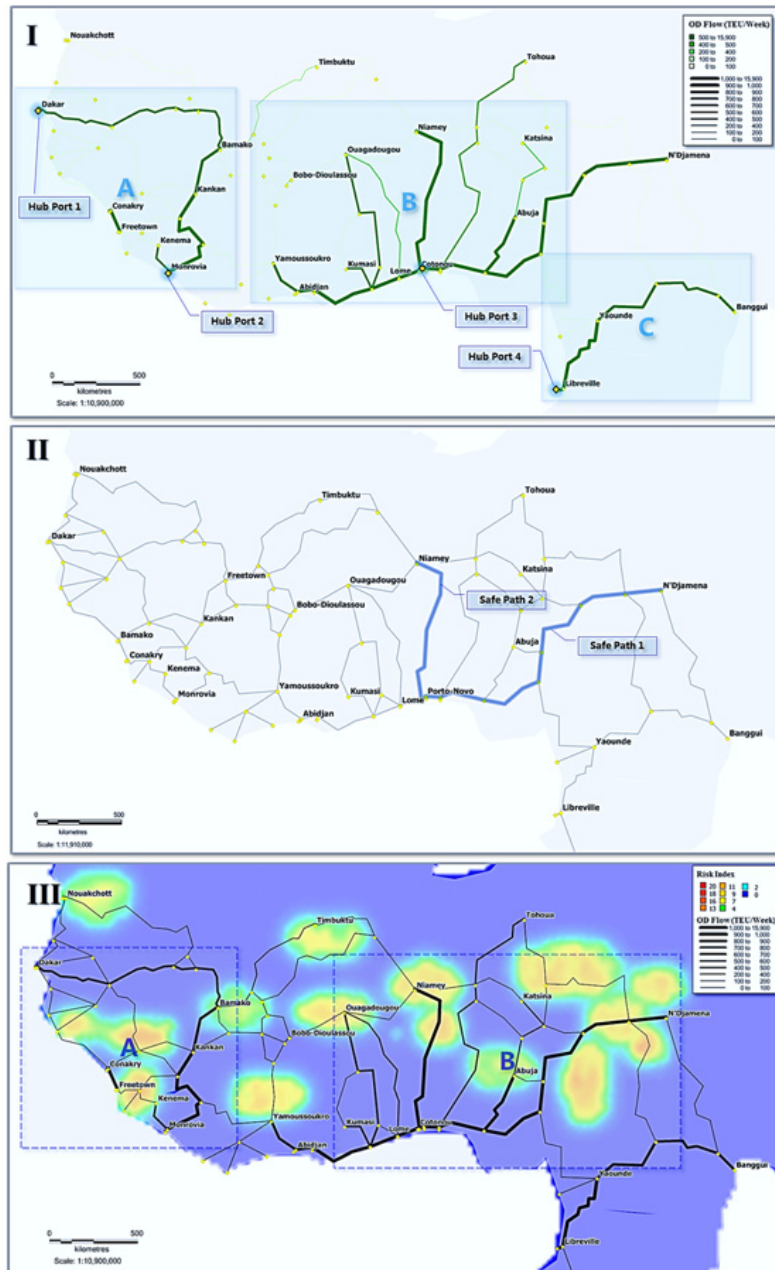


图 8 50% 风险状况的枢纽港投资与安全通道设计方案

(如图 8-II 所示), 一条为 Niamey 至 Cotonou 通道, 该通道的集装箱运量为 1112 TEU/周; 另一条为 N'Djamena 至 Lagos, 该通道最大风险路段的断面货流量为 1140 TEU/周. 该方案实施后, 4 个枢纽港的周实际吞吐量分别达到 545 TEU, 2423 TEU, 5469 TEU 以及 2025 TEU, 分别占总吞吐量的 3.44%, 15.26%, 34.43% 以及 12.75%, 并使得西非大陆形成了一个核心集疏运系统以及两个辅助集疏运系统. 核心集疏运系统如图 8-I 中的区域 B 所示. 在该系统中, 得益于安全通道的建设, Cotonou 港 (Port 3) 的辐射能力得到强化, 是此时西非地区中部货物进出口的重要门户港口. 而两个辅助集疏运系统则分别为图 8-I 中的区域 A 和区域 C, 主要服务西非大陆的东部和西部地区.

此外, 在图 8-III 中, 我们对对比展示了西非大陆风险区域分布以及内陆运输系统的货流分布情况. 可以发现, 如图 8-III 的区域 A 所示, 受高风险地区的阻隔, 与西非东部内陆地区有关的货运需求 (包括进口和出口需求) 未选择较为临近的 Freetown 港作为途经港口, 而是绕路选择了 Dakar 港 (Hub Port 1) 与 Monrovia 港 (Hub Port 2), 这与情景 1 (未考虑风险) 的情况有显著区别, 表明西非大陆东部地区的动荡局势对于该地区内陆运输系统的运作具有显著影响. 而中部地区由于构造了安全运输通道, 货流可以实现有效集中 (如图 8-III 区域 B 所示), 使 Cotonou 港 (Hub Port 3) 的区位优势得到充分发挥, 强化了该港在西非中部地区的核心地位.

### 5.2.3 情景 3 (100% 强度的安全风险)

如图 9-I 所示, 当安全风险强度为现状值的 100% 时, 最佳枢纽扩建港口集变为 Dakar 港 (Hub Port 1),

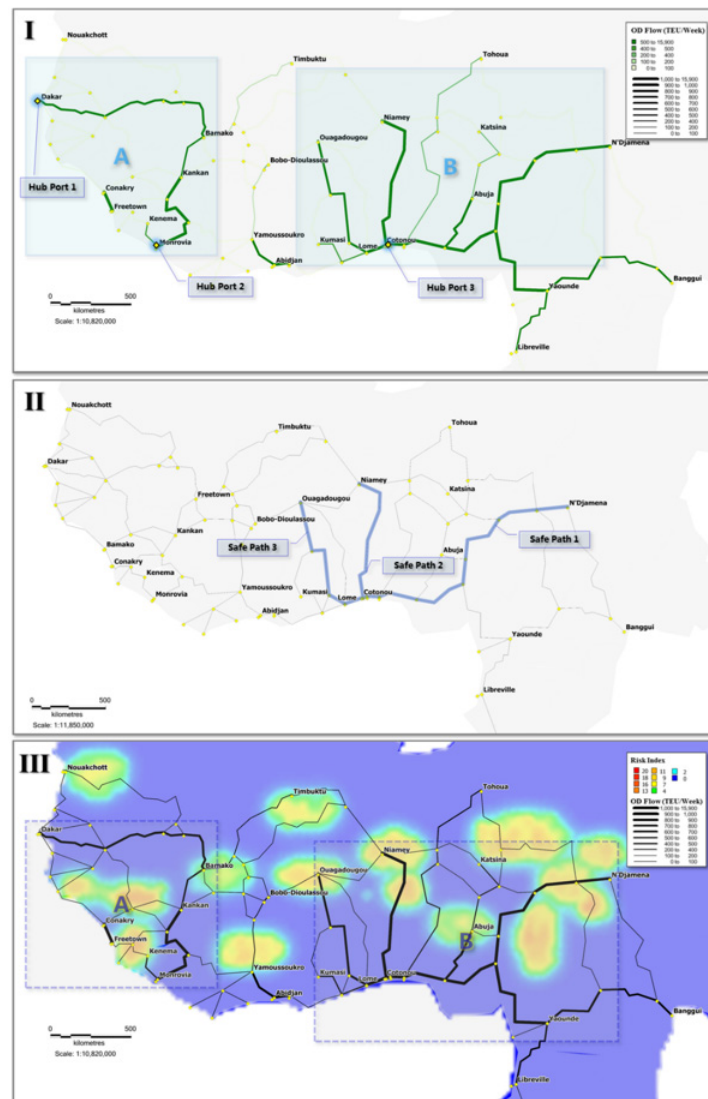


图 9 100% 风险状况的枢纽港投资与安全通道设计方案

Monrovia 港 (Hub Port 2) 以及 Cotonou 港 (Hub Port 3). 各港口的建设能力分别设定为 900 TEU/周, 2200 TEU/周, 9500 TEU/周, 实际完成的货运量分别为 784 TEU, 2118 TEU, 9151 TEU. 需为 Cotonou 港构建三条安全通道 (如图 9-II 所示), 分别为 N'Djamena 至 Cotonou 通道 (Safe Path 1), Niamey 至 Cotonou 通道 (Safe Path 2), Ouagadougou 至 Cotonou 通道 (Safe Path 3). 上述设计方案与情景 2 的优化方案大致类似, 不同之处在于 Libreville 港不再被作为投资对象港, 且增加了一条新的安全通道 (图 9-II 中的 Safe Path 3).

在上述方案中, Cotonou 港作为最佳枢纽扩建港口集之一, 周吞吐量超过了 9000 TEU, 占货运总需求量的比重高达 57.62%, 进一步表明了其在西非地区运输系统中的重要性. 此外, 上述方案使得西非大陆形成了两个彼此独立的货物运输系统. 一为以 Cotonou 港 (Hub Port 3) 为核心的东部货物运输系统; 另一个则是以 Bamako 为服务核心, 以 Dakar 港 (Hub Port 1) 与 Monrovia 港 (Hub Port 2) 为主要门户港口的西部货运系统. 货流分布状况与风险区域之间的关系与情景 2 的情况类似, 如图 9-III 所示.

## 6 结论

本文针对西非地区的特征, 提出了一种新的考虑风险因素的多枢纽港投资方案与安全通道设计双层优化模型. 该模型基于货主与港口投资经营人的内在互动关系, 对西非区域枢纽港的数量、投资对象选择、投资额度以及相关的内陆安全通道设计方案进行协同优化. 为求解该模型, 基于 GA 算法的结构, 设计了启发式算法, 并采取各种措施尝试改进算法的早熟问题. 在实验中, 我们应用上述模型和算法, 针对不同的内陆风险等级, 分析了多枢纽港投资方案与安全通道优化设计问题. 基于计算分析结果, 我们得出如下结论:

1) 对于中国政府而言, Cotonou 港具有重要的区位优势, 在任何风险等级下, 该港口都具有重要的投资价值, 是建设区域枢纽港的首选地区; 而 Dakar 港, Monrovia 港以及 Freetown 港的投资价值则受到安全因素的影响, 其基本规律是, 当区域安全风险显著降低时, Freetown 港更具有投资价值, 而当区域安全风险基本保持现状时, Dakar 港与 Monrovia 港更为重要.

2) 西非地区的安全风险因素对于货运需求的分布以及枢纽港投资选择具有一定影响, 但其影响程度根据地域不同而存在差异. 相对而言, 西非西部地区的枢纽港投资方案受到风险因素影响更大, 具体表现为: Freetown 港受周边地区安全情况不佳的影响, 无法充分发挥其区位优势, 导致大量货运需求选择运输距离更长的运输方案. 而在西非中西部地区, 由于沿海地区的安全状况相对较好, 使得该区域的枢纽港优化投资方案相对不易受到安全因素变化的影响.

3) 西非地区的运输系统应当拆分为东西两个并列的子系统, 其东部子系统应以 Bamako, Freetown, Conakry 等城市为主服务对象, 且不建议构建安全通道, 而西部子系统则应以 Cotonou, Lome 周边地区, Ouagadougou, Niamey, Abuja, Yaoundè 等内陆城市为服务对象, 根据风险程度构造内陆安全通道.

最后需要说明的是, 在本文中我们假定港口投资者只有一方, 而在现实中港口的投资者可能存在多方. 这意味着, 在港口投资决策过程中, 同属性港口之间 (即枢纽港) 可能存在不同程度的竞争或者合作, 而这种竞合关系势必会对最终的投资方案造成直接影响. 在研究内陆安全通道设定问题时, 如何充分考虑各方的竞争与合作关系, 可能是未来的重要研究方向.

## 参考文献

- [1] 王花兰, 刘宇成, 李子健. 绕城高速公路与城市轨道交通停车换乘设施选址模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(3): 46-52.  
Wang H L, Liu Y C, Li Z J. Location model of park-and-ride facilities of ring expressway and urban rail transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(3): 46-52.
- [2] Teye C, Bell M G H, Bliemer M C J. Urban intermodal terminals: The entropy maximising facility location problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 100: 64-81.
- [3] 杨忠振, 王璐, 陈刚. 基于供需双方利益的新空港选址及航线费率优化 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2009, 37(3): 132-137.  
Yang Z Z, Wang L, Chen G. Optimization of new airport location and airline rate considering suppliers' profit and users' utility[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(3):

- 132-137.
- [4] Hammad A W A, Akbarnezhad A, Rey D. Bilevel mixed-integer linear programming model for solving the single airport location problem[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017, 31(5): 1-5.
- [5] 朱晓宁, 席江月. 基于熵权-TOPSIS的城际铁路客运站选址研究[J]. *铁道运输与经济*, 2013, 35(10): 32-36.  
Zhu X N, Xi J Y. Study on location of intercity railway passenger station based on entropy weighting-TOPSIS[J]. *Railway Transport and Economy*, 2013, 35(10): 32-36.
- [6] Li Y, Zhao J, Cheng J. Integration optimization model and algorithm for passenger station location-task allocation problem in railway terminal[C]// *International Conference of Logistics Engineering and Management*, 2015: 2836-2842.
- [7] 常征, 齐壮, 吕靖. 考虑环境约束的双目标内陆港选址问题研究[J]. *系统工程学报*, 2014, 29(5): 662-671.  
Chang Z, Qi Z, Lü J. Research on bi-objective inland port location problem with the perspective of environmental constraints[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 29(5): 662-671.
- [8] 郑建风, 孙卓, 高薇, 等. 能力限制条件下内河集装箱枢纽港选址问题研究: 以长江为例[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(5): 1213-1220.  
Zheng J F, Sun Z, Gao W, et al. Capacitated hub port location problem in river shipping: The case of the Yangtze River[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(5): 1213-1220.
- [9] 梁承姬, 嘉颖斐, 徐德洪, 等. 两种模型在内陆无水港选址中的综合应用[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(1): 177-183.  
Liang C J, Jia J J, Xu D H, et al. Comprehensive application of two kinds models in inland dry port location[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2016, 35(1): 177-183.
- [10] 常征, 齐壮, 吕靖. 带有多重能力等级选择的内陆港选址问题研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(3): 184-191.  
Chang Z, Qi Z, Lü J. Inland port location problem with multiple capacity level choices[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(3): 184-191.
- [11] 张兆民, 韩彪. 产业转移背景下泛珠三角区域无水港选址研究[J]. *铁道运输与经济*, 2015, 37(1): 38-44.  
Zhang Z M, Han B. Study on dry port location in Pan-Pear river area against the background of industry transfer[J]. *Railway Transport and Economy*, 2015, 37(1): 38-44.
- [12] 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.
- [13] Nam H, Song D. Defining maritime logistics hub and its implication for container port[J]. *Maritime Policy & Management*, 2011, 38(3): 269-292.
- [14] Sun Z, Zheng J. Finding potential hub locations for liner shipping[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 93: 750-761.
- [15] Zheng J, Meng Q, Sun Z. Impact analysis of maritime cabotage legislations on liner hub-and-spoke shipping network design[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 234(3): 874-884.
- [16] 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.
- [17] Gelareh S, Pisinger D. Fleet deployment, network design and hub location of liner shipping companies[J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*, 2011, 47(6): 947-964.
- [18] Zheng J, Meng Q, Sun Z. Liner hub-and-spoke shipping network design[J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*, 2015, 75: 32-48.
- [19] Shintani K, Imai A. The container shipping network design problem with empty container repositioning[J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*, 2007, 43(1): 39-59.
- [20] Yakovenko M. The challenge of stability and security in West Africa[R]. *African Security Review*, 2016, 25(1): 104-105.
- [21] Marc A, Verjee N, Mogaka S. The challenge of stability and security in West Africa[R]. *World Bank Publications*, 2015.