

集装箱港口多期投资优化决策模型研究^①

匡海波¹, 牛文元²

(1. 大连海事大学交通运输管理学院, 大连 116026;

2. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190)

摘要: 以集装箱港口综合成本为主要优化目标, 在分析运营效率、生态承载力、港口损益等约束下, 借助动态规划建立集装箱港口多期投资优化决策理论模型, 解决现有的集装箱港口投资优化决策理论忽视港口运营效率、生态承载力等可持续发展能力的弊端, 从而防止港口资源的巨大浪费和对生态环境的破坏, 具有现实指导意义。

关键词: 港口; 投资优化; 运营效率; 生态承载力; 动态规划

中图分类号: F830.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2012)05-0076-07

0 引言

随着经济高速增长和对外贸易快速发展, 集装箱运输已成为国际贸易的主要运输形式。当今国际航运中心都是以国际集装箱枢纽港作为核心, 集装箱吞吐量已成为衡量港口作用和地位的主要标志, 各港竞争最重要的组成部分。自2000年以来, 中国港口集装箱运输发展速度极快, 年均复合增长率保持在15%以上, 为适应经济发展的需要以及集装箱船舶大型化的发展, 中国集装箱码头建设加快, 对集装箱码头的投资力度不断加大。但在这个过程中, 国内港口出现了盲目扩张、分工不明确、低水平重复建设, 造成港口岸线资源使用不合理等现象^[1-3], 而且这类由港口投资规划不合理造成的现象和问题, 随着我国港口的快速发展显得更加突出。

现有集装箱港口优化投资理论研究的对象主要是集中于港口内泊位、码头、装卸设备等基础方面的投资优化^[4]。杨兴晏^[5]从分析港口营运过程的成本费用入手, 以港、航双方的综合成本最小为目标, 介绍了包括泊位成本、装卸设备成

本、人工成本及船舶停泊成本等因素的综合成本模型, 并举例说明如何用该模型确定集装箱码头装卸设备最佳投资规模及装卸设备数量。黎继子等^[6]尝试用遗传算法与神经网络结合, 对港口泊位投资的可行性进行衡量, 并建立了相应的泊位投资决策模型, 并结合实例计算分析得出满意的结果。丁以中^[7]将模拟与整数规划相结合, 提出了适用于具有多码头的集装箱港口装卸设备的动态投资优化方法, 以港口内各集装箱码头的总成本最小为目标, 从整体最优的观点出发对各码头进行统筹安排, 得到港口装卸设备分码头、分年度的投资计划, 因此更接近港口实际。汪传旭和蒋良奎^[8]为了对区域港口内陆运输网络进行优化决策, 运用双层规划模型对区域港口物流系统中内陆集散中心和运输网络的选择进行决策。Allahviranloo 和 Afandizadeh^[9]在考虑货运量、投资成本、装卸能力以及港口运输网络以及世界主要船型等约束条件下, 利用模糊整数规划模型对集装箱港口不同时期船型及泊位投资进行优化。这类研究从理论上界定了集装箱港口投资

① 收稿日期: 2010-08-05; 修订日期: 2012-01-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70873014).

作者简介: 匡海波(1965—), 男, 辽宁新民人, 博士后, 教授. Email: dlutkhh@139.com

的重点方向, 为港口规划建设起到一定作用。

尽管对集装箱港口的投资优化理论与模型的研究取得一定进展, 但当前理论和策略仍存在不足之处, 主要体现在以下两个方面: 一是现有对集装箱港口投资优化决策的研究缺乏考虑港口的可持续发展能力, 忽视了港口所在地的生态承载力等问题^[10-11]。二是传统的港口投资优化理论侧重港口自身成本和收益, 没有考虑港口运营效率对优化港口投资策略的影响^[12-14]。

基于以上分析, 本文从整体优化多期投资策略角度出发, 利用动态规划方法, 建立基于动态规划^[15-16]的集装箱港口投资优化模型, 以便弥补现有港口投资优化理论与模型的不足。

1 集装箱港口投资优化研究原理

集装箱港口投资具有规模大、建设和回收周期长的特点^[17], 集装箱港口投资规划的周期也比较长, 因此本文建立基于动态规划的多期投资优化理论与模型。它的原理是: 以港口综合成本为主要优化目标, 在运营效率、港口损益、生态承载力等约束下, 借助动态规划建立集装箱港口投资优化决策理论与模型, 解决现有的港口投资优化决策理论忽视港口运营效率、生态承载力等可持续发展能力的弊端, 从而防止港口资源的巨大浪费和对生态环境的破坏, 见图 1。



图 1 集装箱港口多期投资优化理论与模型

Fig. 1 Container port multi-period investment optimization theory and model

2 集装箱港口多期投资优化模型

2.1 模型假设及主要参数

集装箱港口发展离不开内陆和海向腹地日益强大的支撑作用。因此, 集装箱港口多期投资优化模型主要以港口与腹地之间发生的集装箱流量为基础, 体现港口中转功能 (包括陆地—海洋、海洋—海洋和海洋—陆地 3 种模式), 比较稳定的港口航线。

基本参数:

K —港口投资规划划分为 k 个阶段 ($k = 0, 1, 2, \dots, K$), 一般根据泊位建设周期进行划分, 如 3 或 5 年为 1 个阶段;

N —区间跨的年数;

$\langle day \rangle$ —集装箱港口每年的工作日数;

l —集装箱泊位类型 ($l = 1, 2, \dots, L$), 如表示 4000TEU、8000TEU 等, 本文中假定 L 数据越大泊位类型越多;

T_l —对应泊位类型的集装箱船型大小, 4000、6000、8000、10000、12000TEU 等;

b_l —第 l 类型泊位的建造、设备成本 (万元, 包括初始挖掘成本、吊桥等设备的成本);

m_{l1} —投入使用后第 l 类型泊位每个时段内的运营成本占泊位建造、设备成本 b_l 的比例;

m_{l2} —投入使用后第 l 类型泊位每个时段内的疏浚成本占泊位建造、设备成本 b_l 的比例;

q_{l0} —初始 0 时刻第 l 类型泊位的数量;

r —年利率, 由于规划周期较长, 此处利率取值可以参考 10 年、20 年等长期国债利率设定;

η_k —第 k 时段内泊位充分利用、因忙碌导致船方等待时间过长的临界比率, 此比率不小于 1, 可据港口以及航运市场有关数据确定;

j —集装箱港口航线 ($j = 1, 2, \dots, J$);

c_{kj} —第 k 时段内航线 j 的集装箱单位运输成本 (元/TEU)。大部分航线比较固定, 可以根据港口的历史数据以及航运市场有关数据确定和预测;

x_{kjl} —第 k 阶段内航线 j 对应泊位 l 船舶数量 (艘), 可根据港口历史统计资料和市场调查做出的集装箱流量、流向, 结合国家或腹地的相关政策、资源分布、经济布局调整、国际航运市场发展趋势等方面综合考虑, 从而评估预测确定其数量。

λ_{kl} —第 k 阶段内港口对泊位 l 的船型 T_l 装卸能力 (天)。由装卸货的天数、为船型工作的装卸吊桥的数量及效率、日工作小时数等确定;

R_k —第 k 个区间段内单位集装箱装卸净收益 (元/TEU) 根据装卸收益减去成本统计得出;

A_l —集装箱港口自然条件(岸线长度、生态承载等) 限制所建第 l 类泊位的最大数,由港口管理当局根据港口环境、城市规划等因素综合评估确定.

中间决策变量:

C_{trans} —规划期间运输成本(元);

C_{fac} —规划期间集装箱港口总建造、设备成本(元);

C_{ope} —规划期间集装箱港口总运营成本(元);

$\langle Inc \rangle$ —规划期间集装箱港口总收益(元);

d_k —第 k 阶段内港口集装箱总量.

最终决策变量:

q_{lk} —在第 k 时段内集装箱港口第 l 类型泊位需要新建的数量(个).

2.2 目标函数的确定

本文主要从港口相关方全方位角度考虑港口投资规划,将港口综合成本最小化作为目标函数.港口综合成本主要包括运输成本、建造设备成本和运营成本3类,反映了船方、货方和港口自身的全面成本目标,其表达式为

$$\text{Min } (C_{trans} + C_{fac} + C_{ope}) \quad (1)$$

运输成本主要体现了船方或货方行为和目标,整个规划期内运输成本表达式为

$$C_{trans} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{1}{(1+r)^{nk}} c_{kj} T_l x_{kjl} \quad (2)$$

式(2)为此集装箱港口船方或货方的运输成本总和的净现值.

假设建造、设备成本发生在每个时段内的初始时刻,那么建造、设备成本为

$$C_{fac} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{1}{(1+r)^{n(k-1)}} b_l q_{lk} \quad (3)$$

式(3)为此集装箱港口规划期间建造、设备成本总和的净现值.

同样,假设泊位维护成本发生每个时段内的初始时刻,那么港口运营疏浚成本为

$$C_{ope} = \sum_{l=1}^L \left[b_l (m_{l1} + m_{l2}) \times \sum_{k=1}^K \frac{1}{(1+r)^{n(k-1)}} (q_{l0} + q_{l1} + \dots + q_{lk}) \right] \quad (4)$$

式(4)为总维护成本和年航道疏浚成本(包括与基础设施以及基础设施使用相关的成本)总和的净现值.

港口投资从国家角度出发还需要考虑许多其他的因素,例如港口发展带动区域发展从而提高就业率,以及其他的设备成本(道路、仓库、伸臂堆垛机等).本文目标是寻求最优的泊位投资计划,所以计算的项目仅仅考虑了与船型、泊位等相关的成本因素,不考虑与规划不直接相关的间接因素.

2.3 约束条件的确定

本模型考虑了4个约束条件:港口运营效率、生态承载力、成本收益和整数约束.

2.3.1 港口运营效率约束

事实上,港口投资还要考虑港口运营效率,每个泊位要充分得以利用,换句话说,就是要保证港口在实际运营中既要保持非“晒码头”,又保持非“排长队”的状态,也就是每个阶段内港口运营效率最大化.由于大型船舶只能在大型泊位停靠,而较小型的船舶不仅可以在较小型泊位,也可以在大型泊位停靠,因此要保证港口的非“晒码头”状态,则有

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J x_{kjl} \lambda_{kL} &\geq n \langle day \rangle (q_{l0} + \sum_{i=0}^k q_{Li}) \\ \sum_{j=1}^J x_{kj(L-1)} \lambda_{k(L-1)} + \sum_{j=1}^J x_{kjl} \lambda_{kL} &\geq n \langle day \rangle \times \\ &\left[(q_{(L-1)0} + \sum_{i=0}^k q_{(L-1)i}) + (q_{l0} + \sum_{i=0}^k q_{Li}) \right] \\ \dots \\ \sum_{j=1}^J x_{kj1} \lambda_{k1} + \sum_{j=1}^J x_{kj2} \lambda_{k2} + \dots + \sum_{j=1}^J x_{kjl} \lambda_{kL} &\geq \\ n \langle day \rangle \left[(q_{10} + \sum_{i=0}^k q_{1i}) + (q_{20} + \sum_{i=0}^k q_{2i}) + \dots + \right. \\ &\left. (q_{l0} + \sum_{i=0}^k q_{Li}) \right] \\ \forall k & \quad (5) \end{aligned}$$

同样为保证港口运营的非“排长队”状态,则有

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J x_{kjl} \lambda_{kL} &\leq n \langle day \rangle \eta_k (q_{l0} + \sum_{i=1}^k q_{Li}) \\ \sum_{j=1}^J x_{kj(L-1)} \lambda_{k(L-1)} + \sum_{j=1}^J x_{kjl} \lambda_{kL} &\leq n \langle day \rangle \eta_k \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left[\left(q_{(L-1)0} + \sum_{i=0}^k q_{(L-1)i} \right) + \left(q_{L0} + \sum_{i=0}^k q_{Li} \right) \right] \\ & \dots \\ & \sum_{j=1}^J x_{kj1} \lambda_{k1} + \sum_{j=1}^J x_{kj2} \lambda_{k2} + \dots + \sum_{j=1}^J x_{kjL} \lambda_{kL} \leq n \langle day \rangle \eta_k \times \\ & \left[\left(q_{10} + \sum_{i=0}^k q_{1i} \right) + \left(q_{20} + \sum_{i=0}^k q_{2i} \right) + \dots + \right. \\ & \left. \left(q_{L0} + \sum_{i=0}^k q_{Li} \right) \right] \\ & \forall k \end{aligned} \tag{6}$$

2.3.2 生态承载力约束

集装箱港口泊位投资应该考虑环境成本。由于集装箱港口泊位投资建设的特殊性,它对港口周边环境的影响巨大,几乎不存在恢复的可逆性。港口的生态承载力取决于港口的岸线长度、海域生物生存环境维护成本、可能发生污染事故数量、产生的交通噪声等^[10-11]。换句话说,集装箱港口投资规划建设规模是有限制的,不能超过港口生态承载力所承受的最大规模。

不妨记集装箱港口投资规划建设规模为 W , 港口生态承载力所承受的规模函数为 $f(c_1, c_2, c_3, c_4, \dots)$ 其中: c_1 表示岸线长度; c_2 表示生物生存环境; c_3 表示污染事故; c_4 表示交通噪声 等等。

那么,集装箱港口投资规划建设规模不能超过港口生态承载力所承受的最大规模,即

$$W \leq f(c_1, c_2, c_3, c_4, \dots) \tag{7}$$

因此,在集装箱港口投资规划建设中重点考

$$\begin{aligned} \text{Min} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{1}{(1+r)^{nk}} c_{kj} T_l x_{kjl} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{1}{(1+r)^{n(k-1)}} b_l q_{lk} + \right. \\ \left. \sum_{l=1}^L \left[b_l (m_{1l} + m_{2l}) \sum_{k=1}^K \frac{1}{(1+r)^{n(k-1)}} (q_{l0} + q_{l1} + \dots + q_{lk}) \right] \right\} \end{aligned} \tag{13. a}$$

约束条件

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J x_{kj}^L \lambda_k^L \geq n \langle day \rangle \left(q_{L0} + \sum_{i=0}^k q_{Li} \right) \\ & \sum_{j=1}^J x_{kj(L-1)} \lambda_{k(L-1)} + \sum_{j=1}^J x_{kjL} \lambda_{kL} \geq n \langle day \rangle \left[\left(q_{(L-1)0} + \sum_{i=0}^k q_{(L-1)i} \right) + \left(q_{L0} + \sum_{i=0}^k q_{Li} \right) \right] \\ & \dots \\ & \sum_{j=1}^J x_{kj1} \lambda_{k1} + \sum_{j=1}^J x_{kj2} \lambda_{k2} + \dots + \sum_{j=1}^J x_{kjL} \lambda_{kL} \geq n \langle day \rangle \left[\left(q_{10} + \sum_{i=0}^k q_{1i} \right) + \left(q_{20} + \sum_{i=0}^k q_{2i} \right) + \dots + \left(q_{L0} + \sum_{i=0}^k q_{Li} \right) \right] \\ & \forall k \end{aligned} \tag{13. b}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J x_{kjL} \lambda_{kL} \leq n \langle day \rangle \eta_k \left(q_{L0} + \sum_{i=1}^k q_{Li} \right) \sum_{j=1}^J x_{kj(L-1)} \lambda_{k(L-1)} + \sum_{j=1}^J x_{kjL} \lambda_{kL} \leq \\ & n \langle day \rangle \eta_k \left[\left(q_{(L-1)0} + \sum_{i=1}^k q_{(L-1)i} \right) + \left(q_{L0} + \sum_{i=0}^k q_{Li} \right) \right] \end{aligned}$$

虑生态的承载力,从而达到有效保护岸线资源和生态环境的目的。由于集装箱港口投资建设主要集中在泊位建设上,根据式(7),本文将生态承载力约束条件假设简化为

$$q_{l0} + \sum_{k=1}^K q_{lk} \leq A_l \quad \forall l \tag{8}$$

2.3.3 成本收益约束

对于港口投资来说,在投入的成本要在一定阶段内收回,本文假设在规划期间内港口投资的成本至少能保持收支平衡,同时假设每一阶段收益在此阶段末才得以全部实现,即有

$$\langle Inc \rangle - (C_{fac} + C_{ope}) \geq 0 \tag{9}$$

式(9)中港口运营收益 $\langle Inc \rangle$ 为

$$\langle Inc \rangle = \sum_{k=1}^K \frac{1}{(1+r)^{nk}} R_k d_k \tag{10}$$

其中

$$d_k = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L T_l x_{kjl} \quad \forall k \tag{11}$$

式(10)表示集装箱港口运营收益只在每个规划阶段末才得以实现下的净现值之和。

2.3.4 整数规划约束

$$q_{lk} \in Z^+ \tag{12}$$

其中 Z^+ 表示大于等于 0 的整数。

2.4 优化模型

综合上述的目标函数和约束条件,可得到基于动态规划港口投资优化决策模型为

$$\dots$$

$$\sum_{j=1}^J x_{kj1} \lambda_{k1} + \sum_{j=1}^J x_{kj2} \lambda_{k2} + \dots + \sum_{j=1}^J x_{kjL} \lambda_{kL} \leq n \langle day \rangle \eta_k \left[\left(q_{10} + \sum_{i=0}^k q_{1i} \right) + \left(q_{20} + \sum_{i=0}^k q_{2i} \right) + \dots + \left(q_{l0} + \sum_{i=0}^k q_{li} \right) \right]$$

$$\forall k \tag{13. c}$$

$$q_{l0} + \sum_{k=1}^K q_{lk} \leq A_l \quad \forall l \tag{13. d}$$

$$\sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{(1+r)^{nk}} R_k \left(\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L T_l x_{kjl} \right) \right] \geq \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{1}{(1+r)^{n(k-1)}} b_l q_{lk} +$$

$$\sum_{l=1}^L \left[b_l (m_{l1} + m_{l2}) \sum_{k=1}^K \frac{1}{(1+r)^{n(k-1)}} (q_{l0} + q_{l1} + \dots + q_{lk}) \right] \tag{13. e}$$

$$q_{lk} \in Z^+ \tag{13. f}$$

基于动态规划的集装箱港口投资优化决策模型(13)体现了3个特点:一是反映了运营效率在港口投资优化的作用.解决了现有理论和实践中缺乏对港口运营效率的分析而导致港口投资不能完全有效优化,避免了港口闲置和过于繁忙的问题.二是考虑到了集装箱港口的生态承载力.把集装箱港口生态承载力纳入投资优化理论和模型内,反映了以人为本、保护环境的现实情况,从而有效地优化了投资策略.三是体现了集装箱港口投资损益平衡的原则.直接地控制了港口投资成本,解决了实践中盲目投资追求规模、忽略港口运营收益的弊端,从而有效地反映了集装箱港口运营规律.

2.5 模型的求解及实现

模型(13)是多期动态整数规划模型,可以采用回溯法进行求解,具体参考文献[15].也可以简化成整数线性规划模型来求解,从而保证了本模型的程序实现.

3 实例分析

假设在2009年某集装箱港口对2010-2019泊位投资进行规划,共分为两个阶段($n=5, K=2, k=1(2010-2014), k=2(2015-2019)$)其航线仅1条,即 $j=1$.通过深入调查研究,港口规划部门确定了所需要数据,详见表1-5.同时按照港口集装箱历史经营情况,得出运营成本和疏浚成本约占建设成本的比例 m_{11} 和 m_{12} 分别为2%和1%;年利率 $r=5\%$; $\eta_k=1.5$;港口每年的工

作日数 $\langle day \rangle = 250$ 天.

将以上数据带入港口群投资优化投资模型(13)中,运用Matlab软件求解,得到了此港口群在10年(2010-2019)规划期间集装箱港口泊位 q_{lk} 投资规划最优结果见表6.

表1 航线单位集装箱运输成本 c_{kj} (元/TEU)

Table 1 Different routes unit cost of container transport c_{kj} (元/TEU)

航线 j	阶段 k	
	1	2
1	60	100

表2 单位集装箱装卸净收益 R_k (元/TEU)

Table 2 Container handling unit net R_k (元/TEU)

阶段 k	1	2
R_k	15	10

表3 不同泊位船型装卸能力 λ_{kl} (d)

Table 3 Ship loading and unloading capacity of different berths λ_{kl} (d)

泊位船型 l	阶段 k	
	1	2
1	2	1
2	3	2

表4 第 k 阶段内航线 j 对应泊位 l 船型的数量 x_{kjl} (艘)

Table 4 The k phase route j corresponds to the number of ship berths x_{kjl} (Ship)

航线 j	泊位类型 l	阶段 k	
		1	2
1	1	7 250	15 000
	2	1 200	2 250

表5 集装箱港口其它相关数据

Table 5 Port planning time investment other data

泊位 $l(l = 1, 2)$	建造、设备成本 b_l / 亿元	现有泊位 q_{l0} / 个	泊位最大个数 A_l
4000 TEU	1	10	25
12000 TEU	2	2	12

表6 集装箱港口投资优化结果 q_{lk} Table 6 Investment optimal results q_{lk}

泊位船型 l	阶段 k	
	1	2
1	0	2
2	0	1

4 结束语

本文以港口投资成本、运营效率为主要优化目标, 在分析港口损益、生态承载力、供给需求

等约束下, 借助随机规划建立了单个港口投资优化决策理论模型, 解决现有的港口投资优化理论忽视运营效率、生态承载力等可持续发展能力的弊端. 本文主要创新点为:

1) 反映了运营效率在港口投资优化的作用. 解决了现有理论和实践中缺乏对港口运营效率的分析而导致港口投资不能完全有效优化, 避免了港口闲置的问题, 同时提高了现有模型的精确度, 增加了决策的科学性.

2) 考虑到了港口的生态承载力. 把港口生态承载力纳入港口投资优化策略内, 这就更直接的反映了以人为本、保护环境现状要求, 从而有效地优化了投资策略.

3) 体现了集装箱港口投资损益平衡的原则. 直接地控制了港口投资成本, 解决了实践中盲目投资追求规模、忽略港口运营收益的弊端, 从而有效地反映了集装箱港口运营规律.

参考文献:

- [1]舒洪峰. 中国当前港口投资潜在风险分析[J]. 中国港口, 2006, (2): 23-24.
Shu Hongfeng. China's current port investment potential risk analysis[J]. China Ports, 2006, (2): 23-24. (in Chinese)
- [2]宗 术. 中国港口投资潜在风险和投资价值分析[J]. 交通建设与管理, 2006, (9): 4-6.
Zong Shu. Chinese port investment potential risks and investment value analysis[J]. Transportation Construction Management, 2006, (9): 4-6. (in Chinese)
- [3]Goss R O. Towards an economic appraisal of port investment[J]. Journal of Transport Economics and Policy, 1967, 1(2): 249-272.
- [4]Meersman H M A. Port investments in an uncertain environment[J]. Research in Transportation Economics, 2005, 13(1): 279-298.
- [5]杨兴晏. 利用综合成本研究集装箱码头设备投资的最佳规模[J]. 港工技术, 1995, (2): 17-21.
Yang Xingyan. Use of a comprehensive cost of the best container terminal equipment, the scale of investment[J]. Port Engineering Technology, 1995, (2): 17-21. (in Chinese)
- [6]黎继子, 倪武帆, 方呈祥. 基于遗传算法的神经网络港口投资辅助决策[J]. 中国管理科学, 2000, 8(1): 56-60.
Li Jizi, Ni Wufan, Fang Chengxiang. Artificial neural network model of harbor investment aided decision-making by genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2000, 8(1): 56-60. (in Chinese)
- [7]丁以中. 基于模拟与整数规划方法的多码头集装箱港口装卸设备投资优化模型及其在上海港的应用[J]. 上海海事大学学报, 2006, 27(S1): 21-26.
Ding Yizhong. Simulation and integer programming based on multi-terminal container port handling equipment investment model and its application in Shanghai[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2006, 27(S1): 21-26. (in Chinese)
- [8]汪传旭, 蒋良奎. 基于双层规划的区域港口内陆运输网络优化决策[J]. 管理工程学报, 2008, 22(4): 67-71; 81.
Wang Chuanxu, Jiang Liangkui. Bi-level programming based optimization on regional port inland transportation network[J]. Journal of Industrial Engineering Management, 2008, 22(4): 67-71; 81. (in Chinese)

- [9] Allahviranloo M, Afandizadeh S. Investment optimization on port's development by fuzzy integer programming [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 186(1): 423–434.
- [10] 张利鸣, 李树兵, 龚辉, 等. 环境风险分析在港口规划环境影响评价中的应用 [J]. *中国航海*, 2006, (2): 91–95.
Zhang Liming, Li Shubing, Gong Hui, et al. Application of environmental risk analysis in harbor master plan environmental impact assessment [J]. *Navigation of China*, 2006, (2): 91–95. (in Chinese)
- [11] 刘磊, 马铭锋, 杨帆. 我国部分港口规划存在的环境问题分析及对策建议 [J]. *中国水运*, 2007, 7(2): 21–24.
Liu Lei, Ma Mingfeng, Yang Fan. Countermeasures responding to environmental problems in nation's part ports planning [J]. *China Water Transport*, 2007, 7(2): 21–24. (in Chinese)
- [12] 匡海波, 李和忠. 中国港口 X-效率测度 [J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(2): 1–9.
Kuang Haibo, Li Hezhong. Chinese port X-efficiency measurement [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2009, 29(2): 1–9. (in Chinese)
- [13] Koh Y K. Optimal investment priority in container port development [J]. *Maritime Policy & Management*, 2001, 28(2): 109–123.
- [14] Shneerson D. Investment in port systems: A case study of the Nigerian ports [J]. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1981, 15(2): 201–216.
- [15] Lew A, Mauch H. *Dynamic Programming* [M]. New York: Springer-Verlag, 2007.
- [16] 邱玉琢, 陈森发. 基于改进 PSO 的综合运输网络管理多目标优化 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(6): 43–50.
Qiu Yuzhuo, Chen Senfa. Multi-objective optimization of comprehensive transportation network management based on modified particle swarm algorithm [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(6): 43–50. (in Chinese)
- [17] Wayne K T. An economic theory of the port [J]. *Research in Transportation Economics*, 2006, 16(1): 43–65.

Multi-period decision-making optimization model for container port investment

KUANG Hai-bo¹, NIU Wen-yuan²

1. School of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: With container port operational efficiency, ecological carrying capacity, profit and loss and soon, as the constraints, with comprehensive port investment cost as the main optimization objective, a dynamic programming decision-making model for a single port investment was established. It resolved the optimization of the existing investment decision-making model which ignore variables such as operational efficiency, ecological carrying capacity of the sustainable development capacity and so on. This model can help prevent the enormous waste of port resources and the destruction of the ecological environment.

Key words: containers port; investment optimization; operational efficiency; ecological carrying capacity; dynamic programming