

# 海上通道关键节点安全保障效率及 应急效率评价研究

高天航, 吕 靖\*

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为了能够全面系统地评价海上通道关键节点的安全保障效率及应急效率, 在两阶段DEA模型的基础上, 考虑负投入产出变量、决策者对于2种不同效率的偏好差异及效率分解, 构建了海上通道关键节点安全保障效率与应急效率评价模型, 并将其应用到16个海上通道关键节点的安全保障效率及应急效率评价中。研究结果显示, 龙目海峡和霍尔木兹海峡的效率始终是非有效的, 且随着 $\alpha$ 值的增加, 曼德海峡、苏伊士运河和望加锡海峡也会转变成非有效单元。除此之外, 朝鲜海峡, 霍尔木兹海峡和英吉利海峡3个关键节点的子系统效率值波动不明显, 安全保障系统占据主体, 而马六甲海峡和龙目海峡2个单元的子系统效率值存在部分不规律的变化。

**关键词:** 水路运输; 效率评价; 两阶段DEA; 关键节点; 安全保障效率; 应急效率

## Evaluating the Safety Efficiency and Emergency Efficiency of the Key Nodes of Sea-lanes

GAO Tian-hang, LU Jing

(Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to evaluate the safety efficiencies and emergencies efficiency of the key nodes of sea-lanes, this paper constructs a model which is based on a two-stage DEA considering the negative input-output variables, preference difference and decomposition efficiency. The proposed model is used to evaluate the safety efficiencies and emergency efficiencies of 16 key nodes of sea-lanes. The results show that the efficiencies of Lombok Strait and Hormuz Strait are always inefficient. Increase with the value of  $\alpha$ , Mandeb Strait, Suez Canal and Makassar Strait will become inefficient DMUs. Analysis found that the efficiency values of subsystems are not fluctuant, and the safety subsystem is dominated. The efficiencies of the Strait of Malacca and Lombok Strait are irregular.

**Keywords:** waterway transportation; efficiency evaluation; two-stage DEA; key nodes; safety efficiency; emergency efficiency

收稿日期: 2017-06-22

修回日期: 2017-09-05

录用日期: 2017-09-15

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China (71473023); 中央高校基本科研业务费专项资金/The Fundamental Research Funds for the Central Universities (3132016359).

作者简介: 高天航(1991-), 男, 辽宁大连人, 博士生.

\*通信作者: lujing@dlnu.edu.cn

## 0 引言

伴随着“一带一路”战略的实施,我国海上运输的重要性愈发增强.为了保障我国海上运输的正常运行,海上运输安全逐渐引起了有关学者的重视.在海上通道这个大的链条系统中,海峡/运河作为其中的节点,其安全保障效率和应急效率的强弱直接影响整个海上运输的运作.而考虑到不同节点客观条件的差异,以及众多沿岸国家针对复杂多样的环境采取的不同措施,不能简单地使用事故数和救援数来衡量上述两种效率的强弱.如何在考虑投入产出差异性的同时,使用一个统一的指标来衡量沿岸国家实施的节点安全保障及应急工作的成效就是本文需要解决的首要问题.

关于海上通道关键节点的定量安全评价,学者主要侧重于研究个别代表性节点的安全评价,例如 Mohd Hazmi Bin Mohd Rusli<sup>[1]</sup>曾单独分析马六甲海峡的安全性及其在整个海上通道中的作用,Bolat<sup>[2]</sup>则构建了一个风险评价模型来评价特定情况下土耳其海峡的安全状况.而在同时对于众多关键节点的安全保障与应急评价方面,也仅有吕靖<sup>[3-4]</sup>曾先后运用投影寻踪法和一种改进的DEA方法来评价众多关键节点安全状况,2篇文章都仅进行了安全评价,没有考虑应急评价.为此,本文决定在此基础上同时进行安全保障效率和应急效率的评价.而在方法方面,考虑到2个子系统之间串联关系,拟选用两阶段DEA模型进行研究.国内外关于两阶段DEA的研究侧重点主要为两阶段DEA中的投入产出变量的不同形式<sup>[5-6]</sup>.但是,子系统效率分解及子系统权重差异的问题也是一个需要特殊关注的问题,陈磊<sup>[7]</sup>曾基于合作博弈的思想,有效的解决了两阶段DEA模型分解子系统效率不唯一的问题.而Wu<sup>[8]</sup>则考虑了决策者偏好差异的问题,对我国30个省份的生产和环保效率进行了评价.但是,根据研究对象——海上通道关键节点的特点,两者是需要共同考虑互相结合的.

鉴于以上研究,如何考虑决策者对于两种效率的偏好差异,对海上通道关键节点的安全保障效率和应急效率进行评价,并分解其子系统效率是本文需要解决的关键问题.

## 1 海上通道关键节点安全保障效率及应急效率影响因素分析

### 1.1 安全保障效率影响因素

海上通道关键节点的安全保障效率是指其沿岸国家为了维护水域内航行安全所进行工作的投入产出比,是衡量其安全保障效果的重要指标.由于安全保障效率受到投入产出两方面的影响,所以本文从这两个角度分析其影响因素.

产出数据方面,选取船舶事故数和海盗袭船数两个指标.如果一个节点内发生的船舶事故数过高,可以认为该水域在船舶航行方面缺乏合理的引导;如果一个节点内的海盗袭船数过高,可以认为该水域没能很好地执行海盗防范措施.无论哪一种指标的异常,都可以认为该节点的安全状况存在问题,安全保障成果不显著.

投入数据方面,由于节点的安全保障效率会由其自身内部的自然物理环境和外部的政治法律环境两方面共同影响,就从这两个方面选取投入数据.在内部自然物理环境方面:首先,由于海峡/运河越为狭窄,船舶顺利通过的难度越大,发生船舶碰撞与搁浅的可能性也就越高;其次,若一个水域的船舶数量越多,意味着该水域越拥挤,安全通过的难度也就越大;除此之外,较大的船舶基数也会导致船舶安全事故数量的增加.外部的政治法律环境中,选取法律公约及规则数作为投入数据.法律、公约、规则等是从立法的角度为海上通道关键节点的安全提供保障,立法越全面,规则越清晰,安全通航的可能性越大,安全保障效率理应越高.

### 1.2 应急效率影响因素

应急效率是指海峡/运河的沿岸国家在应对海上突发事件时,所采取应急工作的投入产出比.应急效率的高低代表着沿岸国家的相关组织与机构在面对海上突发事件时能够将突发事件较好处理的能力.该部分仍然从投入和产出数据两方面来分析其影响因素.

产出数据方面,选取严重事故数作为衡量节点应急状况的数据.当节点范围内发生事故时,船舶驾驶人员会像沿岸国家的救援组织发出求救信号,救援组织会立即采取救援行动,如果该水域的

应急能力较强,则会有效降低海上事故转变成严重事故的可能,严重事故数会较小;反之,则会较大.需要注意的是,海盗袭船事件的全过程一般较快,沿岸国家没有足够的时间处理,所以,该类事件不作为应急的考虑范围.

投入数据方面,结合前文分析,应急效率的高低是受船舶事故数直接影响的.船舶事故数越高,需要应急处理的事件也就越多,难度也就越大.其次是沿岸国家相关的组织与机构数,一般来说,相关组织机构越多,用来处理海上突发事件的力量也就越大,带来的应急能力也就越强.最后为节点所拥有的水域面积,节点所拥有的水域面积越大,会导致发生船舶事故的地点也就越多,事故地点距离救援组织与机构所在位置较远的可能性也就越大,应急处理也就越困难.

## 2 海上通道关键节点安全保障效率及应急效率评价模型

如前文分析,安全保障系统和应急系统是前后串联的,前者的部分产出数据为后者的投入数据,为此,将其考虑为一个整体的系统,如图1所示.假设其中存在 $n$ 个相互独立的DMU $_j$ ,  $j=1,2,\dots,n$ ,安全保障系统共有 $m_1$ 种外部投入变量 $X_1=(x_{1j}^1, x_{2j}^1, \dots, x_{m_1j}^1)^T$ ,  $q_1$ 种将于中途退出系统的产出变量 $Y_1=(y_{1j}^1, y_{2j}^1, \dots, y_{q_1j}^1)$ 和 $o$ 种将作为中间投入变量进入应急系统的产出变量 $Z_1=(z_{1j}^1, z_{2j}^1, \dots, z_{oj}^1)$ ;应急系统则共有 $m_2$ 种外部投入变量 $X_2=(x_{1j}^2, x_{2j}^2, \dots, x_{m_2j}^2)^T$ 和 $q_2$ 种产出变量 $Y_2=(y_{1j}^2, y_{2j}^2, \dots, y_{q_2j}^2)$ .对于外部投入变量与产出变量,在模型中会被赋予不同的权重,记为 $\omega_{ik}^1, \omega_{ik}^2, \mu_{rk}^1, \mu_{rk}^2$ .而中间变量在两个系统中分别为产出与投入变量,权重也不相同,记为 $\tau_{vk}, \eta_{vk}$ .

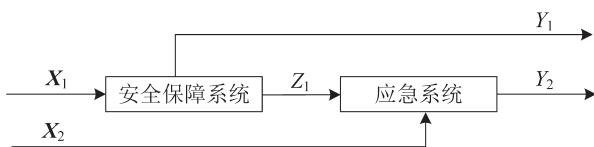


图1 两阶段系统结构图

Fig. 1 Two-stage system

实际情况中,宽度,法律、公约及规则数对安全保障效率和组织机构数对应应急效率的影响均为

正向的;而船舶数量对于安全保障效率和面积、船舶事故数对应应急效率影响均为负向的;除此之外,船舶事故数、海盗袭船数和严重事故数从效率角度来看也都是负产出数据.所以,需要将变量进行同向化的处理来符合投入产出变量的基本特性,选取Seiford<sup>[9]</sup>提出的线性数据转换函数法,将负向变量进行转换

$$\bar{u}_j = K - u_j \quad (1)$$

式中: $K$ 为一个非常大的正数.

根据传统CCR模型,两阶段DEA模型为

$$\max \theta = \frac{\sum_{r=1}^{q_1} \mu_{rk}^1 y_{rk}^1 + \sum_{r=1}^{q_2} \mu_{rk}^2 y_{rk}^2}{\sum_{i=1}^{m_1} \omega_{ik}^1 x_{ik}^1 + \sum_{i=1}^{m_2} \omega_{ik}^2 x_{ik}^2} \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{\sum_{r=1}^{q_1} \mu_{rk}^1 y_{rj}^1 + \sum_{r=1}^{q_2} \mu_{rk}^2 y_{rj}^2}{\sum_{i=1}^{m_1} \omega_{ik}^1 x_{ij}^1 + \sum_{i=1}^{m_2} \omega_{ik}^2 x_{ij}^2} \leq 1 \quad (3)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^{q_1} \mu_{rk}^1 y_{rj}^1 + \sum_{v=1}^o \tau_{vk} z_{vj}^1}{\sum_{i=1}^{m_1} \omega_{ik}^1 x_{ij}^1} \leq 1 \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^{q_2} \mu_{rk}^2 y_{rj}^2}{\sum_{i=1}^{m_2} \omega_{ik}^2 x_{ij}^2 + \sum_{v=1}^o \eta_{vk} z_{vj}^1} \leq 1 \quad (5)$$

$$\omega_{ik}^1, \omega_{ik}^2, \mu_{rk}^1, \mu_{rk}^2, \tau_{vk}, \eta_{vk} \geq 0, j=1,2,\dots,n$$

式(2)为该模型的目标函数,式(3)~式(5)分别表示总系统和子系统的效率限制不应超过1.虽然它可以评价整体系统的效率,但是,并没有考虑决策者对于两个不同系统的偏好差异,为此本文在该模型的基础上补充限制条件式(6).

$$\frac{\sum_{i=1}^{m_1} \omega_{ik}^1 x_{ik}^1}{\sum_{i=1}^{m_2} \omega_{ik}^2 x_{ik}^2 + \sum_{v=1}^o \eta_{vk} z_{ik}^1} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (6)$$

决策者会对其更加看重的系统增大投入,期望得到更大的产出;反之,则降低投入.所以,可以通过对投入变量大小的对比来得出决策者对于不同系统的偏好差异.在式(6)中,存在着对于安全保障系统的偏好权重 $\alpha, 0 < \alpha < 1$ .依据 $\alpha$ 的不同取值,

可以得出两个系统投入的不同比例.

为了能够方便求解,可以将上述模型转化为线性规划模型.采取 Charnes-Cooper 变换,令

$$t = \frac{1}{\sum_{i=1}^{m_1} \omega_{ik}^1 x_{ik}^1 + \sum_{i=1}^{m_2} \omega_{ik}^2 x_{ik}^2}, \phi_{ik}^1 = t\omega_{ik}^1, \phi_{ik}^2 = t\omega_{ik}^2, \varphi_{rk}^1 = t\mu_{rk}^1,$$

$\varphi_{rk}^2 = t\mu_{rk}^2, \psi_{vk} = t\tau_{vk}, \zeta_{vk} = t\eta_{vk}$ .上述模型转化为

$$\max \theta = \sum_{r=1}^{q_1} \varphi_{rk}^1 y_{rk}^1 + \sum_{r=1}^{q_2} \varphi_{rk}^2 y_{rk}^2 \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \sum_{r=1}^{q_1} \varphi_{rk}^1 y_{rj}^1 + \sum_{r=1}^{q_2} \varphi_{rk}^2 y_{rj}^2 - \sum_{i=1}^{m_1} \phi_{ik}^1 x_{ij}^1 - \sum_{i=1}^{m_2} \phi_{ik}^2 x_{ij}^2 \leq 0 \quad (8)$$

$$\sum_{r=1}^{q_1} \varphi_{rk}^1 y_{rj}^1 + \sum_{v=1}^o \psi_{vk} z_{vj}^1 - \sum_{i=1}^{m_1} \phi_{ik}^1 x_{ij}^1 \leq 0 \quad (9)$$

$$\sum_{r=1}^{q_2} \varphi_{rk}^2 y_{rj}^2 - \sum_{i=1}^{m_2} \phi_{ik}^2 x_{ij}^2 - \sum_{v=1}^o \zeta_{vk} z_{vj}^1 \leq 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{m_1} \phi_{ik}^1 x_{ik}^1 + \sum_{i=1}^{m_2} \phi_{ik}^2 x_{ik}^2 = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{m_1} \phi_{ik}^1 x_{ik}^1 = \alpha(1 + \sum_{v=1}^o \zeta_{vk} z_{ik}^1) \quad (12)$$

求解该模型最优解,即可得到总效率值,也可得到一组子系统的效率值,但是子系统效率值可能存在解不唯一的情况,因此,很难保证效率分解式的唯一性.为此,一些学者认为应优先考虑某一系统效率值来确认唯一解,但是这相当于忽视了另一系统在整体中的作用,容易造成子系统效率值的扭曲.在考虑决策者的偏好差异及协调效率最优<sup>[8]</sup>思想的基础上,本文认为子系统的效率值比例应接近于其偏好权重,即

$$\min \varepsilon = \left| \sum_{r=1}^{q_1} \varphi_{rk}^1 y_{rk}^1 + \sum_{v=1}^o \psi_{vk} z_{vk}^1 - \frac{\alpha}{1-\alpha} \sum_{r=1}^{q_2} \varphi_{rk}^2 y_{rk}^2 \right| \quad (13)$$

然后结合之前的限制条件,保证总效率值最优,添加限制条件式(14),构成求解子系统效率值的模型.

$$\sum_{r=1}^{q_1} \varphi_{rk}^1 y_{rk}^1 + \sum_{r=1}^{q_2} \varphi_{rk}^2 y_{rk}^2 = \theta \quad (14)$$

### 3 实例分析

#### 3.1 数据选取及处理

通过前文的分析,已经得到了安全保障效率和应急效率的影响因素,所有投入产出指标及其描述性统计如表1所示.其中,节点宽度以节点宽度最窄处为标准,通过 Google 地图测量得知;法律公约及规则数量和组织机构数量可以通过查询节点相关资料获得;水域面积通过在 Google 地图上测量获得;船舶数量则参考文献[4],选取北京时间2015年3月25日12:00的即使船舶数量代表,以该时刻处于该节点水域内的船舶总数为标准,数据来源为 www.marinetraffic.com 和 www.shipxy.com;而在该节点发生的船舶事故数、海盗袭船数和严重船舶事故数则均从 IMO 的 GISIS 数据库获得,研究范围设为2010—2016年,从这7年间全球发生的2 553个船舶事故、2 528个海盗事故和1 492个严重船舶事故中筛选出在本文研究范围内的.

表1 投入产出指标及描述性统计

Table 1 Introduction and descriptive statistics analysis of variables

效率评价	指标	单位	最大值	最小值	平均值	标准差	
安全保障效率评价	投入	宽度	km	180.000	0.152	55.180	50.020
	投入	船舶数量	艘	1 466	7	276.25	376.50
		法律公约及	个	5	1	1.94	1.30
	产出	船舶事故数量	艘次	35	1	10.25	9.97
海盗袭船次数		次	393	0	39.69	96.03	
应急效率评价	投入	船舶事故数量	艘次	35	1	10.25	9.97
		组织机构数量	个	6	1	3.19	1.55
	产出	水域面积	万 km <sup>2</sup>	21.000	0.012	4.080	5.730
		严重事故数	艘次	25	0	5.31	7.56

#### 3.2 结果分析

本文使用 Matlab R2014a 进行计算,得到系统

总体的效率值如表2所示,安全保障效率值如表3所示,应急效率值如表4所示.



表2 海上通道关键节点安全保障系统与应急系统总系统效率值

Table 2 Comprehensive efficiency results of safety system and emergency system

海峡	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$
台湾海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
朝鲜海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
大隅海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
曼德海峡	1.000 0	1.000 0	0.998 5	0.941 8	0.887 5	0.843 8	0.807 7	0.777 5	0.751 8
马六甲海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
龙目海峡	0.911 1	0.911 1	0.905 6	0.894 9	0.885 8	0.878 2	0.871 3	0.840 7	0.803 9
巽他海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
霍尔木兹海峡	0.792 4	0.792 4	0.792 4	0.792 4	0.792 4	0.792 4	0.792 1	0.779 1	0.737 7
宗谷海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
巴拿马运河	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
佛罗里达海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
苏伊士运河	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.988 7	0.963 0	0.939 6	0.918 7	0.898 6	0.879 3
直布罗陀海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
英吉利海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
民都洛海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
望加锡海峡	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.941 6

表3 海上通道关键节点安全保障系统子系统效率值

Table 3 Efficiency results of safety subsystem

海峡	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$
台湾海峡	0.100 0	0.202 6	0.318 1	0.400 2	0.506 8	0.614 9	0.712 3	0.800 0	0.900 4
朝鲜海峡	0.700 7	0.700 7	0.727 3	0.741 4	0.749 4	0.754 7	0.812 1	0.883 0	0.945 2
大隅海峡	0.110 5	0.219 1	0.316 7	0.472 1	0.552 9	0.612 3	0.704 5	0.812 5	0.910 5
曼德海峡	0.110 6	0.249 7	0.427 5	0.514 7	0.574 7	0.623 1	0.662 9	0.694 4	0.713 3
马六甲海峡	0.109 6	0.249 3	0.350 7	0.657 5	0.762 4	0.933 6	0.773 4	0.931 4	0.900 1
龙目海峡	0.091 2	0.241 2	0.388 1	0.504 1	0.466 7	0.550 9	0.628 3	0.667 8	0.732 0
巽他海峡	0.100 0	0.201 1	0.301 9	0.400 3	0.500 0	0.604 3	0.730 8	0.834 9	0.923 6
霍尔木兹海峡	0.524 0	0.524 0	0.524 0	0.524 0	0.524 0	0.524 0	0.554 5	0.586 8	0.647 0
宗谷海峡	0.110 2	0.481 6	0.603 6	0.664 2	0.700 5	0.724 6	0.741 8	0.827 0	0.917 9
巴拿马运河	0.108 1	0.213 7	0.383 0	0.400 0	0.585 0	0.610 9	0.700 2	0.818 1	0.912 8
佛罗里达海峡	0.102 8	0.210 0	0.312 0	0.419 4	0.511 3	0.608 9	0.708 0	0.808 8	0.902 5
苏伊士运河	0.105 9	0.244 5	0.304 1	0.436 0	0.481 6	0.556 4	0.636 8	0.714 2	0.788 7
直布罗陀海峡	0.103 5	0.224 5	0.338 7	0.418 3	0.511 1	0.611 7	0.710 3	0.815 5	0.911 5
英吉利海峡	0.989 9	0.989 9	0.989 9	0.989 9	0.989 9	0.989 9	0.992 3	0.995 5	0.998 0
民都洛海峡	0.110 9	0.212 3	0.334 2	0.440 4	0.506 4	0.651 4	0.720 9	0.809 0	0.903 5
望加锡海峡	0.100 5	0.200 0	0.303 7	0.427 2	0.523 3	0.624 6	0.703 6	0.802 5	0.831 6

表4 海上通道关键节点应急系统子系统效率值

Table 4 Efficiency results of emergency subsystem

海峡	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$
台湾海峡	0.900 0	0.810 6	0.742 2	0.600 4	0.506 8	0.409 9	0.305 3	0.200 0	0.099 6
朝鲜海峡	0.299 3	0.299 3	0.272 7	0.258 6	0.250 6	0.245 3	0.187 9	0.117 0	0.054 8
大隅海峡	0.994 5	0.876 4	0.739 0	0.708 1	0.552 9	0.408 2	0.295 5	0.187 5	0.089 5
曼德海峡	0.995 8	0.998 7	0.997 6	0.772 1	0.574 7	0.415 4	0.284 1	0.174 1	0.080 5
马六甲海峡	0.986 5	0.997 0	0.818 2	0.986 3	0.762 4	0.622 4	0.331 4	0.232 8	0.100 0
龙目海峡	0.820 0	0.669 9	0.905 6	0.756 2	0.466 7	0.327 3	0.269 3	0.172 9	0.071 9
巽他海峡	0.900 0	0.804 3	0.704 4	0.600 4	0.500 0	0.395 7	0.269 2	0.165 1	0.076 4
霍尔木兹海峡	0.268 4	0.268 4	0.268 4	0.268 4	0.268 4	0.268 4	0.237 6	0.192 3	0.090 7
宗谷海峡	0.889 8	0.518 4	0.396 4	0.335 8	0.299 5	0.275 4	0.258 2	0.173 0	0.082 1
巴拿马运河	0.972 8	0.854 8	0.893 7	0.600 0	0.585 0	0.407 3	0.300 1	0.181 9	0.087 2
佛罗里达海峡	0.924 9	0.839 9	0.728 0	0.629 2	0.511 3	0.405 9	0.303 4	0.202 2	0.097 5
苏伊士运河	0.952 8	0.978 0	0.709 6	0.654 1	0.601 5	0.383 2	0.281 9	0.184 5	0.090 5
直布罗陀海峡	0.931 8	0.897 9	0.790 2	0.627 4	0.511 1	0.407 8	0.304 4	0.184 5	0.088 5
英吉利海峡	0.010 1	0.010 1	0.010 1	0.010 1	0.010 1	0.010 1	0.007 7	0.004 5	0.002 0
民都洛海峡	0.997 9	0.849 1	0.779 7	0.660 6	0.506 4	0.434 3	0.309 0	0.202 2	0.100 4
望加锡海峡	0.904 9	0.800 0	0.708 6	0.640 9	0.523 3	0.416 4	0.301 5	0.200 6	0.110 0

首先分析总系统效率值.由表2可知,龙目海峡和霍尔木兹海峡的效率始终是非有效的,而当 $\alpha \geq 0.3$ 时,曼德海峡会转变成非有效单元, $\alpha \geq 0.4$ 时,苏伊士运河也如此转变,当 $\alpha \geq 0.9$ 时,望加锡海峡也会转变成非有效单元.另外一个需要注意的情况是除曼德海峡以外的其他非有效节点的效率值均随着 $\alpha$ 的增加有小幅度的下降,只有曼德海峡的效率值下降的最为明显,可见 $\alpha$ 取值的不同对曼德海峡效率值的影响是非常大的.

其次分析子系统效率值.由于本文考虑到决策者的偏好差异及协调效率最优的思想,认为子系统的效率值比例应接近于其偏好权重,所以子系统的效率值绝大多数等同于其偏好比,但其中也存在一些特例.朝鲜海峡的安全保障效率值一直处于0.7以上,随着 $\alpha$ 取值的变动会有小幅的增加,与此类似的还有霍尔木兹海峡的安全保障效率值稳定在0.50~0.65之间,英吉利海峡的安全保障效率值稳定在0.99左右,可见上述3个海峡安全保障效率值均较大,应急效率值较小,安全保障系统起了主要的作用.另外,马六甲海峡和龙目海峡的安全保障效率值随着 $\alpha$ 值增加总体趋势是增加的,但会在部分取值处稍有波动.

#### 4 结论

本文在充分分析海上通道关键节点安全保障效率和应急效率影响因素的基础上,构建了基于两阶段DEA的效率评价模型.并将该模型应用到了对我国较为重要的16个关键节点中进行实例运算.通过分析系统总效率值结果,找到了始终为非有效单元的关键节点,以及随着 $\alpha$ 值增加会逐渐转变成非有效单元的关键节点,然后通过分析子系统效率值又找到了朝鲜海峡等3个安全保障系统起主要作用且子系统效率值变化不明显的关键节点及存在效率值不规律变化的关键节点.

与以往研究相比,本文同时考虑关键节点安全保障效率和应急效率,以及两者之间的联系和影响,并在此基础上对其进行了总的效率评价和效率分解,对于关键节点的安全状况进行了更加全面具体的分析.而在具体操作上,本文以定性分

析为影响因素筛选基础,并考虑整体评价特点,以改进的两阶段DEA模型为效率评价基础,使得本文具有较强的理论依据,保障了整体的合理性和科学性.

#### 参考文献:

- [1] RUSLI M H B M. Protecting vital sea lanes of communication: A study of the proposed designation of the Straits of Malacca and Singapore as a particularly sensitive sea area[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2012(57): 79-94.
- [2] BOLAT P, JIN Y. Risk assessment of potential catastrophic accidents for transportation of special nuclear materials through Turkish Straits[J]. *Energy Policy*, 2013, 56(2): 126-135.
- [3] 吕靖,王爽.我国海上运输关键节点安全评价研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(1): 30-36. [LU J, WANG S. Safety evaluation of china's maritime transport key nodes[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(1): 30-36.]
- [4] 吕靖,高天航.海上通道关键节点安全保障效率研究[J]. *中国软科学*, 2015(10): 1-8. [LU J, GAO T H. Efficiency of safety control in key nodes of international sea lanes[J]. *China Soft Science*, 2015(10): 1-8.]
- [5] LI X. A fair evaluation of certain stage in a two-stage structure: revisiting the typical two-stage DEA approaches[J]. *Omega*, 2017(68): 155-167.
- [6] YU Y, SHI Q F. Two-stage DEA model with additional input in the second stage and part of intermediate products as final output[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 41(15): 6570-6574.
- [7] 陈磊,王应明,王亮.两阶段DEA分析框架下的环境效率测度与分解[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(3): 642-649. [CHEN L, WANG Y M, WANG L. Eco-efficiency measurement and decomposition in the two-stage DEA analysis framework[J]. *Systems Engineering —Theory & Practice*, 2016, 36(3): 642-649.]
- [8] WU J, YIN P Z, SUN J S, et al. Evaluating the environmental efficiency of a two-stage system with undesired outputs by a DEA approach: An interest preference perspective[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 254(3): 1047-1062.
- [9] SEIFORD L M, ZHU J. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002(142): 16-20.