

叶士琳,曹有挥,蒋自然,等.基于力学平衡模型的长三角港口物流发展协调性研究[J].地理科学,2017,37(11):1624-1631.[Ye Shilin, Cao Youhui, Jiang Ziran et al. Coordination of Port Logistics Development Based on Mechanical Model: A Case of the Yangtze River Delta Port System. Scientia Geographica Sinica,2017,37(11): 1624-1631.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.11.003

# 基于力学平衡模型的长三角港口 物流发展协调性研究

叶士琳<sup>1,2</sup>,曹有挥<sup>1</sup>,蒋自然<sup>1,2</sup>,王佳韡<sup>3</sup>

(1.中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏南京 210008;2.中国科学院大学,北京 100049;  
3.福建师范大学地理科学学院,福建福州 350007)

**摘要:**基于港口物流协调发展理论分析框架,构建相应的综合评价指标体系和协调性判别模型,对长三角13个港口物流发展协调性进行综合评判。结果表明:长三角已形成较为明显的以上海港为核心,宁波-舟山港、苏州港和南京港为副中心,其余港口为重要补充的多层次港口物流规模等级结构;港口物流协调发展层次总体偏低,以低水平协调型为主,且港口物流发展协调度与综合发展度间存在紧密联系,呈现明显的“U”型曲线特征;港口物流协调发展偏离方向集中化特征不明显,制约不同港口物流协调发展的主要因素存在较大区别,同时就物流运营发展滞后型、城市支撑发展滞后型和基础设施发展滞后型港口分别提出改进方向。

**关键词:**港口物流;指标体系;协调性;港口地理学;长三角

**中图分类号:**F552.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2017)11-1624-08

自21世纪初以来经济全球化和跨国生产网络深入发展,促进了全球海上运输市场的繁荣和现代物流业的迅猛发展。作为海陆连接点的港口,其物流功能不断拓展与延伸,实现从传统货物装卸中心向集运输、工贸、金融、信息等为一体的综合物流中心转型,成为全球大型物流节点布局的重要区位<sup>[1-3]</sup>。少数国际性枢纽港(如伦敦、香港等)甚至嬗变升级为全球供应链管理中心<sup>[4-6]</sup>。因此,港口物流在城市(区域)经济社会发展中的地位与作用愈发突显,成为经济地理学关注的热点领域。学者从不同视角进行了广泛研究,主要涉及4个方面:一是关于港口物流特征与影响因素研究,学者从产业发展视角揭示了港口物流业内在属性与发展规律,并分析了影响港口物流业发展的内外因素<sup>[7-9]</sup>。二是地理学者较为关注的港口物流空间组织研究,他们从理论到实证对港口物流发展的空间格局、演化及其内在驱动机理作了详细探讨<sup>[10-12]</sup>,深化了对不同类型港口物流活动空间组织

规律的认识<sup>[4,13,14]</sup>。三是对港口物流与区域经济发展关系的广泛探讨,主要以典型港口为研究对象,利用多种模型方法来验证和测度港口物流与城市产业、腹地经济、国家竞争力等之间的相互依存关系<sup>[15,16]</sup>。四是随着全球生产模式变革,从微观企业层面开展港口物流效率研究不断增多,主要涉及港口物流绩效评价、制约因素解析、港口物流系统优化等内容<sup>[17-20]</sup>,力求探寻港口物流系统优化路径,提高港口物流生产效率。

综合来看,现有研究对港口物流系统协调发展及其内部各要素间的耦合协调机制尚缺少全面深入的分析。基于此,本文在已有研究基础上提出港口物流协调发展理论分析框架,并尝试将综合评价指标体系与力学平衡模型相结合,构建港口物流发展协调性判别模型,借此探讨长三角地区各港口物流综合发展水平、内在耦合协同特征及其主要制约因素,为制定差异化港口物流政策提供科学依据。

**收稿日期:**2016-10-19;**修订日期:**2017-01-11

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41771139, 41671132)、浙江省自然科学基金(LY18D010004)项目资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China(41771139, 41671132), Natural Science Foundation of Zhejiang Province(LY18D010004).]

**作者简介:**叶士琳(1991-),男,福建宁德人,博士研究生,主要从事区域发展与交通地理研究。E-mail: yeshilin1990@163.com

**通讯作者:**曹有挥,研究员。E-mail: yhcao@niglac.ac.cn

# 1 分析框架、数据与方法

## 1.1 分析框架

基于港口物流业发展的内在特征和“港-产-城”融合发展思想,本文将港口物流系统分解为基础设施、物流运营和城市支撑三大子系统。基础设施子系统是港口物流形成与发展的物质基础,为物流活动提供必要的作业环境和空间载体,直接影响着港口物流现实生产能力和生产效率,主要涉及港口区位、通航设施、生产设施、仓储堆场等。物流运营子系统是港口物流发展的核心环节,通过整合港口资源,有效组织物流活动和利用物流信息,提高城市物资集散和产品流通能力,并通过带动效应促进城市发展,其输出结果主要表现为港口物流生产能力和货物通过量的增长。城市支撑子系统为港口城市综合发展状况(包括人力资源、政策环境、临港产业等),为港口基础设施建设提供必需的资金、技术和政策支持,通过经济发展产生货物运输需求,并为港口物流生产提供相应的港航服务配套,是港口物流可持续发展的重要支撑,深刻影响着港口物流结构、规模和效率。

港口物流协调发展即为港口物流发展过程中基础设施、物流运营和城市支撑子系统之间及其组成要素之间相互匹配、相互促进,形成港口物流发展演化的良性循环态势(图1),从而保持港口物流系统整体输出功能和整体正效应状态<sup>[21]</sup>。

港口物流协调发展不仅反映在基础设施、物流运营和城市支撑子系统的数量关系特征上,其实质更多地体现在子系统间持续进行的物质、能量与信息的相互交换与良性循环。这一相互作用机制形成了港口物流发展的驱动力,不断优化系统资源配置和提高资源利用效率,共同推动港口物流系统从低级协调共生向高级协调耦合不断演进。作为动态复杂系统,随着时间推移和外部发展环境变化,港口物流系统将不断地进行自我调节,并表现出不同的协调关系。通过对这一协调关系的考察,可以有效判定港口物流不同发展阶段各子系统间的耦合协调程度和主要制约因素,进而寻求港口物流持续健康发展的路径与策略。

## 1.2 数据来源

长江三角洲港口群(以下简称长三角港口群)是中国沿海五大集装箱港口群中港口分布最为密集、发展速度最快、综合实力最强的一个港口群。2015年,长三角地区港口货物吞吐量 $36.79 \times 10^8$ t、外贸货物吞吐量 $11.94 \times 10^8$ t、集装箱吞吐量 $7\,501 \times 10^4$ TEU,分别占全国规模以上港口总量的32.11%、33.00%和35.70%<sup>[22]</sup>。本文选取上海港、宁波-舟山港、连云港港、苏州港、南通港、江阴港、泰州港、镇江港、扬州港、南京港、嘉兴港、台州港和温州港13个长三角主要集装箱港口作为基本研究单元。综合评价指标原始数据来源于2013年的《中国港口年鉴》<sup>[23]</sup>、《江苏统计年鉴》<sup>[24]</sup>、《浙江统计年鉴》<sup>[25]</sup>和

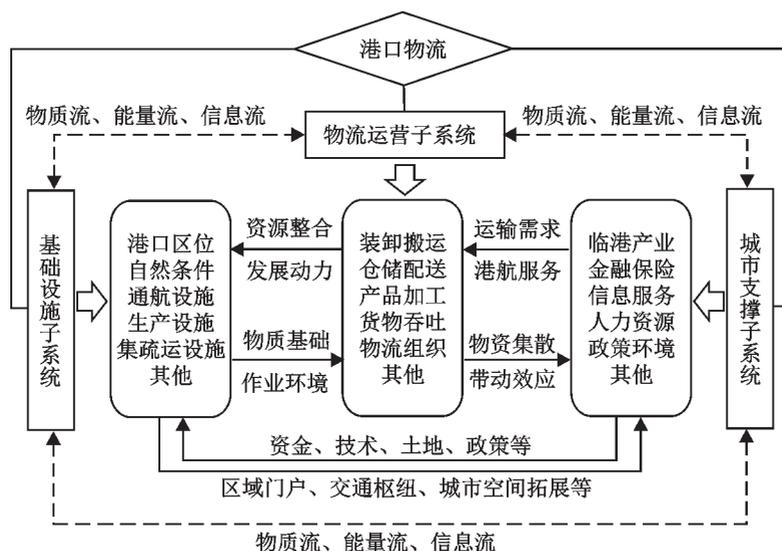


图1 港口物流协调发展分析框架

Fig.1 The analytical framework of port logistics coordinated development

《上海统计年鉴》<sup>[26]</sup>,以及长江航务管理局(<http://www.cjhy.gov.cn/>);长三角港口城市A级物流企业目录通过中国物流与采购联合会(<http://www.chinawuliu.com.cn/>)公布的前16批次A级物流企业名单汇总整理获得。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 综合评价指标体系构建

根据前文港口物流协调发展分析框架初步选取评价指标,并采用极差法(公式略)对原始数据进行标准化处理,以消除各指标数据量纲和数量级的影响。然后应用熵权法<sup>[27]</sup>对不同维度众多指标进行筛选,剔除差异不显著指标,并确定最终指标的权重,从而构建了包含3个维度14个指标的港口物流协调发展综合评价指标体系(表1)。最后将采用加权求和方法计算港口物流综合发展度及各子系统发展度。

表1 港口物流协调发展综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of port logistics coordinated development

目标层	准则层	指标层	单位	权重	
港口物流 综合发展 度	基础设施发 展度(OA)	生产用泊位数	个	0.21	
		生产用码头长度	m	0.23	
		航道水深	m	0.22	
	物流运营发 展度(OB)	集装箱航线数	条	0.34	
		货物吞吐量	t	0.18	
		集装箱吞吐量	TEU	0.32	
		集装箱吞吐量增长率 <sup>①</sup>	%	0.13	
	城市支撑发 展度(OC)	物流企业发展指数 <sup>②</sup>	—	0.20	
		集装箱运输组织能力 <sup>③</sup>	—	0.17	
		地区生产总值	亿元	0.16	
			第三产业比重	%	0.21
			进出口贸易总额	亿美元	0.29
			金融机构贷款余额	亿元	0.21
			人力-信息指数 <sup>④</sup>	—	0.13

注:① 为近3a港口集装箱吞吐量平均增长率。② 基于港口城市A级物流企业数据,对A~5A共5个等级企业分别赋值1~5分,得分累加即为该指标分值。③ 采用模糊记分,枢纽组港为4分,干线港为3分,支线港为2分,喂给港为1分。④ 人力-信息指数<sup>[28]</sup>为: $TH = \sqrt{p_i/pop} \times \sqrt{p_e/GDP}$ ,式中 $p_i$ 为样本港口城市高等学校在校学生数, $pop$ 为总人口数, $p_e$ 为邮电业务总量, $GDP$ 为样本港口城市地区生产总值。“—”为无量纲量。

#### 1.3.2 协调性判别模型构造

本文假设其他条件均质情况下,将港口物流的基础设施、物流运营和城市支撑子系统间耦合协调关系抽象为笛卡尔坐标系中3个不同方向作用力的矢量关系<sup>[29,30]</sup>,并用三者的力学平衡结果定量测度港口物流发展协调状态,从而构建基于力学平衡模型的港口物流发展协调性判别模型(图2)。模型中,矢量 $OA$ 、 $OB$ 和 $OC$ 分别代表港口基础设施、物流运营和城市支撑子系统的发展度(由前文综合评价指标体系计算获得),两两夹角弧度为 $2\pi/3$ ,三者的合力 $F_{\text{合}}$ 即为港口物流发展协调性状态。当3个子系统实现完全均衡协调发展时, $F_{\text{合}}$ 为0,位于坐标系原点 $O$ 处,即 $O$ 为系统均衡点。实际上在港口物流发展过程中各要素条件存在较大差异,3个子系统的综合发展水平并非完全均衡,也很难实现,更多的是处于此消彼长的非均衡状态,即 $F_{\text{合}}$ 始终不同程度的偏离均衡点 $O$ 。因此,通过考察 $F_{\text{合}}$ 大小与偏离方向便可直观地反映出研究对象港口物流各子系统间的相互匹配关系及其主要发展“短板”。

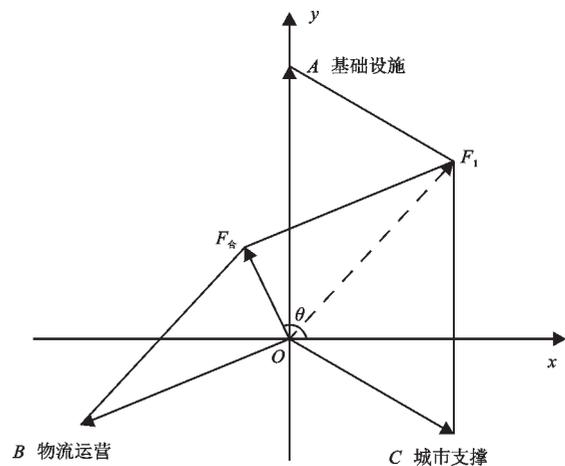


图2 港口物流发展协调性判别模型

Fig.2 The coordination discriminate model of port logistics development

实际计算中采用极坐标方法将 $F_{\text{合}}$ 表达为 $(\rho, \theta)$ 。其中,极径 $\rho$ 表征协调度, $\rho$ 越大,各子系统发展越不均衡,协调性越差;极角 $\theta$ 表征偏离方向,反映各子系统间的相互匹配关系。为便于计算,将 $OA$ 、 $OB$ 和 $OC$ 的方向角度定义为 $\pi/2$ 、 $11\pi/6$ 和 $7\pi/6$ <sup>[31]</sup>,则按照矢量运算规则,极坐标 $(\rho, \theta)$ 的计算公式如下:

$$\begin{cases} \overline{OA} = (x_A, y_A) = (0, OA) \\ \overline{OB} = (x_B, y_B) = \left( \cos \left( \frac{1 - \frac{|OB|}{OB}}{2} \pi - \frac{5\pi}{6} \right) |OB|, \sin \left( \frac{1 - \frac{|OB|}{OB}}{2} \pi - \frac{5\pi}{6} \right) |OB| \right) \\ \overline{OC} = (x_C, y_C) = \left( \cos \left( \frac{1 - \frac{|OC|}{OC}}{2} \pi - \frac{\pi}{6} \right) |OC|, \sin \left( \frac{1 - \frac{|OC|}{OC}}{2} \pi - \frac{\pi}{6} \right) |OC| \right) \\ \overline{F_{\text{合}}} = (x_{\text{合}}, y_{\text{合}}) = \overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC} = (x_A + x_B + x_C, y_A + y_B + y_C) \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho = \sqrt{x_{\text{合}}^2 + y_{\text{合}}^2} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \theta = \arctan \left( \frac{y_{\text{合}}}{x_{\text{合}}} \right), y_{\text{合}} \geq 0 \\ \theta = \arctan \left( \frac{y_{\text{合}}}{x_{\text{合}}} \right) + 2\pi, y_{\text{合}} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\overline{OA}$ 、 $\overline{OB}$ 、 $\overline{OC}$ 和 $\overline{F_{\text{合}}}$ 分别为基础设施、物流运营和城市支撑发展度及三者合力的向量表达， $x_A$ 、 $x_B$ 、 $x_C$ 、 $x_{\text{合}}$ 和 $y_A$ 、 $y_B$ 、 $y_C$ 、 $y_{\text{合}}$ 分别为其x轴和y轴的坐标。 $\rho$ 和 $\theta$ 为矢量合力 $\overline{F_{\text{合}}}$ 的极径和极角。

## 2 长三角港口物流发展协调性判别

### 2.1 港口物流综合发展水平评价

港口物流综合发展度测算结果(图3)显示,长三角港口物流综合发展度得分分布于[1.19, 27.08]之间,标准差达7.33,仅有上海港、宁波-舟山港、苏州港和南京港4个港口的得分高于平均值(6.84),占港口总数的30.77%。其中,上海港的物流综合发展度达27.08,处于长三角港口体系的首位,约为第二位港口宁波-舟山港(17.26)的1.57倍和平均值(6.84)的3.96倍。温州港(4.28)、南通港(3.53)、连云港港(3.41)等其余9个港口的物流综合发展水平相互差距较小,仅占有所有港口物流综合发展度总和的28%。

由此可见,长三角港口物流综合发展水平非均衡性突出,整体呈现逐级递减趋势,形成了以上海港为核心,宁波-舟山港、苏州港和南京港为副中心,其余港口为重要补充的多层次港口物流规模等级结构。这主要是因为上海、宁波、苏州和南京不仅是长三角城市群的核心城市或重要经济中心,也是长三角地区的重要港口和中转基地,凭借明显的水路区位优势 and 规模效应,吸引大量物流组织与生产活动集聚,从而实现港口物流业快速

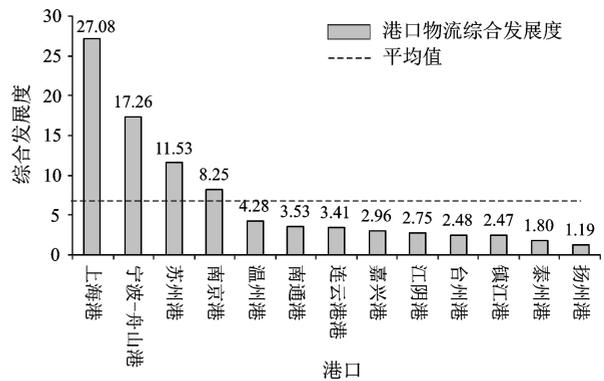


图3 长三角港口物流综合发展度

Fig.3 The comprehensive development degree of port logistics in the Yangtze River Delta

发展。而位于周边的众多喂给港在港口条件、腹地范围、港航服务业发展等方面远逊于前者,缺乏明显的竞争优势,物流发展空间受限,处于港口物流发展的低水平阶段,主要服务于港口体系内的枢纽港与干线港。

### 2.2 港口物流协调发展类型特征

根据公式(1)~(3)求取各港口的 $F_{\text{合}}$ ,并按 $\rho$ 的分布情况采用自然断点分级法,将港口物流协调发展度划分为协调( $0.33 \leq \rho < 1$ )、基本协调( $1 \leq \rho \leq 1.80$ )和失调( $1.80 < \rho \leq 5.43$ )3类,各类港口数量比例达61.54:23.08:15.38,反映了长三角大部分港口物流发展处于协调和基本协调状态。同时,为进一步准确识别出不同发展阶段(或水平)港口的物流发展协调度的内涵和差异<sup>[32]</sup>,本文将港口物流综合发展度(按数值高低聚类划分为高水平阶段、中等水平阶段和低水平阶段)与协调度进行交叉分析形成9种协调发展类型。如表2所示,长三角13个港口具体涉及以下5种类型:

1) 高水平协调型。该类型仅有上海港,协调

表2 长三角港口物流协调发展类型

Table 2 Types of port logistics coordinated development in the Yangtze River Delta

港口物流协调发展类型	发展阶段	协调状态	港口	比重(%)
高水平协调型	高水平	协调	上海港(0.57)	7.69
中等水平基本协调型	中等水平	基本协调	南京港(1.58)	7.69
中等水平失调型		失调	宁波-舟山港(5.43)、苏州港(3.23)	15.38
低水平协调型	低水平	协调	温州港(0.84)、南通港(0.87)、嘉兴港(0.95)、台州港(0.63)、镇江港(0.33)、泰州港(0.51)、扬州港(0.54)	53.85
低水平基本协调型		基本协调	江阴港(0.49)、连云港港(1.77)	15.38

注:括号内为港口物流发展协调度。

特征表现为港口物流整体处于高水平发展阶段,各子系统发展程度趋向均衡,且交互作用强烈,呈高水平协同演进态势,资源要素得到有效利用。

2) 中等水平基本协调型。该类型仅有南京港,协调特征表现为港口物流整体处于中等水平发展阶段,各子系统发展水平存在一定差距,但在可接受范围内,基本保持同步增长态势,薄弱项对港口资源综合效益的发挥存在影响。

3) 中等水平失调型。该类型包括宁波-舟山港和苏州港,占港口总数的15.38%。协调特征表现为港口物流整体处于中等水平发展阶段,但各子系统发展极大偏离均衡状态,相互制约现象十分突出,导致资源要素匹配性和综合利用效率偏低,港口物流协调可持续发展面临较大挑战,须引起足够重视。

4) 低水平协调型。该类型涉及港口较多,包括温州港、南通港和嘉兴港等7个港口,占港口总数的53.85%。协调特征表现为港口物流整体处于低水平发展阶段,各子系统发展程度差距较小,呈低水平协调共生生态势。

5) 低水平基本协调型。该类型包括江阴港和连云港港,占港口总数的15.38%。协调特征表现为港口物流整体处于低水平发展阶段,各子系统发展水平相互存在一定差距,资源要素开发利用效率有待进一步提高。

在上述分类的基础上,以综合发展度为横坐标、协调度为纵坐标,经标准化处理后将长三角13个港口绘于坐标空间上(图4)。可以发现,处于低水平发展阶段和高水平发展阶段的港口物流协调度相对较高,而中等水平发展阶段的港口物流协调度相对偏低,即随着港口物流综合发展水平的提高,综合发展度与协调度之间呈现明显的“U”型

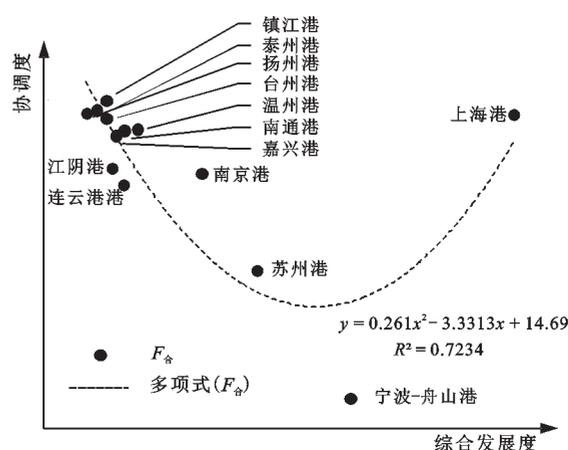


图4 长三角港口物流协调度与综合发展度的相互关系  
Fig.4 Interrelation between coordination degree and comprehensive development degree of port logistics in the Yangtze River Delta

曲线特征。表明长三角港口物流综合发展水平与协调度间存在显著的相关性,中等水平发展阶段是港口物流基础设施、物流运营和城市支撑子系统及其组成要素之间相互胁迫最为强烈的时期。

### 2.3 港口物流协调发展偏离方向识别

OA、OB和OC两两结合可将相互作用结果空间划分为I、II和III象限,每个象限所表征的矢量动力状态各不相同。由此可根据长三角各港口物流发展协调度偏离方向 $\theta$ 所处象限(图5),明晰各港口物流协调发展所面临的主要制约因素,从而将13个港口划分为3种滞后类型:

1) 物流运营发展滞后型(第I象限),包括上海港、南京港、台州港和温州港。这部分港口的物流运营子系统发展水平比基础设施和城市支撑子系统偏低,即港口物流协调发展所面临的主要障碍来自于港口物流运营能力不足。营造良好的物流市场环境,科学组织港口物流生产活动,提升物

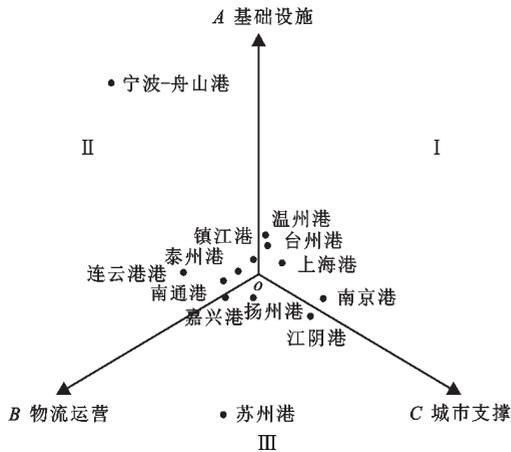


图5 长三角港口物流发展协调度及其象限分布  
Fig.5 Port logistics development coordination and its quadrant distribution in the Yangtze River Delta

流信息化水平和经营管理效率,是这些港口今后的发展重点。

2) 城市支撑发展滞后型(第II象限),包括宁波-舟山港、镇江港、泰州港、南通港和连云港港。这些港口物流协调发展的主要障碍来自于所依托的港口城市综合发展水平相对落后于港口基础设施和物流运营子系统,表现为港口城市所提供的产业支撑、港航服务、物流配套等难以满足港口物流快速发展需要。今后应加快金融保险、信息服务、法律等港航服务业集聚发展,重视港口物流专业人才培养与引进,完善港口集疏运系统建设,提高港口客货流吸引力,有效支撑港口物流发展。

3) 基础设施发展滞后型(第III象限),包括苏州港、嘉兴港、扬州港和江阴港。该类型港口物流运营能力和城市综合发展水平相对较高,但受制于港口自然条件和投资不足等因素,港口基础设施发展相对滞后,成为港口物流协调发展的主要制约因素。这些港口在未来发展中,应着力于加强港口规划建设,增加投资,逐步完善和提高港口装卸搬运、码头泊位、航道水深、仓库堆场等基础设施水平,降低港口基础设施对物流发展的约束。

需要指出的是,港口物流某一子系统的发展滞后并不意味着其在长三角港口群中的绝对低水平,而是相对于港口自身另外2个物流子系统而言的发展不充分。因此,在制定港口物流发展政策与措施时,应针对自身物流发展薄弱环节,因地制宜地采取差异化发展路径,有效提高港口物流发展整体效益和可持续发展能力。

### 3 结论与建议

① 长三角港口物流综合发展水平非均衡性突出,除上海港、宁波-舟山港、苏州港和南京港外,其他9个港口物流综合发展度均低于平均值,形成以上海港为核心,宁波-舟山港、苏州港和南京港为副中心,其余港口为重要补充的多层次港口物流规模等级结构。② 虽然长三角大部分港口物流发展处于协调(61.54%)和基本协调(23.08%)状态,但协调发展层次总体偏低,协调发展类型以低水平协调型为主,资源要素配置和综合利用效率有待提高。此外,协调度与综合发展度之间具有显著相关性,随着综合发展度的提高,协调度呈现先降低后回升的“U”型曲线特征,港口物流中等水平发展阶段是各子系统相互胁迫最强烈和协调度波动最大的阶段。③ 长三角港口物流协调发展偏离方向 $\theta$ 差异明显,由此可将13个港口划分为物流运营发展滞后型、城市支撑发展滞后型和基础设施发展滞后型3类,各类型港口数量大体相当。不同滞后型港口物流协调发展所面临的主要制约因素存在较大区别,补“短板”和制定差异化发展策略成为推动港口物流协调可持续发展的关键。

国内外经验表明,要实现港口物流快速发展除了要有良好的港口基础设施条件,也离不开高效的物流组织和城市综合服务,而以往对港口物流的评价工作恰恰缺乏对这两方面的足够重视,仅将其作为庞大指标体系中的少数变量。本文从“港-产-城”融合发展思路出发将港口物流系统分解为基础设施、物理运营和城市支撑3个子系统,有利于明晰港口物流发展的关键要素,突出物流组织与城市综合服务的作用,也符合产业内在特征与要求,对相关研究具有一定借鉴意义。此外,本文糅合综合指标评价与力学平衡模型,从作用力矢量关系视角测度长三角不同港口物流发展协调性特征,研究结果表明,该方法能够有效和直观地识别不同港口物流协调发展状态和主要制约因素,为港口物流协调发展分析提供了一种较为便捷的方法。但矢量评价方法难以深入揭示不同维度(变量)之间相互作用机制,对变量非共线性和赋权的要求较高,这是今后应用中应注意的。

研究中由于部分基础资料获取困难,本文仅对长三角港口物流协调发展特征做了初步分析,对港口物流协调发展动力机制、影响因素和时间序列上

的分析,将在今后研究中进一步深化与丰富。

### 参考文献(References):

- [1] Hesse M, Rodrigue J P. Guest editorial: Transportation and global production networks[J]. *Growth and Change*, 2006, 37: 599-609.
- [2] Drewe P, Janssen B. What port for the future? From 'Mainports' to ports as nodes of logistic networks[M]//Reggiani A. *Accessibility, Trade and Behaviour*. Aldershot: Ashgate, 1998: 241-264.
- [3] 王成金. 试论现代物流的地理学研究及发展趋势[J]. *人文地理*, 2006, 21(6): 22-26. [Wang Chengjin. Geographical study on modern logistics and its development trend. *Human Geography*, 2006, 21(6): 22-26.]
- [4] Wang J J, Cheng M C. From a hub port city to a global supply chain management center: a case study of Hong Kong[J]. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(1): 104-115.
- [5] Grossmann H, Otto A, Stiller S et al. Growth potential for maritime trade and ports in Europe[J]. *Inter Economics*, 2007, 42(4): 226-232.
- [6] 王成金. 集装箱港口网络形成演化与发展机制[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [Wang Chengjin. *The evolution and development mechanisms of container ports network*. Beijing: Science Press, 2012.]
- [7] Rodrigue J P, Ashar A. Transshipment hubs in the new Panamax Era: the role of the Caribbean[J]. *Journal of Transport Geography*, 2016, 51: 270-279.
- [8] 韩增林, 王成金. 港口物流特点与影响因素分析[J]. *中国港口*, 2001(8): 38-40. [Han Zenglin, Wang Chengjin. Analysis on characteristics and influencing factors of port logistics. *China Ports*, 2001(8): 38-40.]
- [9] 韩增林, 王成金. 再论环渤海港口运输体系的建设与布局[J]. *人文地理*, 2002, 17(3): 86-89. [Han Zenglin, Wang Chengjin. The discussion of the port transportation system in the region around Bo Sea. *Human Geography*, 2002, 17(3): 86-89.]
- [10] Slack B. Satellite terminals: a local solution to hub congestion? [J]. *Journal of Transport Geography*, 1999, 7(4): 241-246.
- [11] Lee S W, Kim C H, Chung H W. A study on Port Performance Related to Port Backup Area in the ESCAP Region[M]. Seoul: Korea Maritime Institute, 2005.
- [12] 曹卫东, 曹有挥, 梁双波. 安徽长江沿岸港口物流发展评价与空间博弈研究[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2007, 41(3): 464-468. [Cao Weidong, Cao Youhui, Liang Shuangbo. Study on the synthetic evaluation and spatial competition of port-logistics along the Yangtze River in Anhui Province. *Journal of Huazhong Normal University(Natural Sciences)*, 2007, 41(3): 464-468.]
- [13] Rodrigue J P, Debie J, Fremont A et al. Functions and actors of inland ports: European and North American dynamics[J]. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(4): 519-529.
- [14] Cheung R K, Tong J H, Slack B. The transition from freight consolidation to logistics: the case of Hong Kong[J]. *Journal of Transport Geography*, 2003, 11(4): 245-253.
- [15] Sujeta L, Navickas V. The impact of port logistics systems on a country's competitiveness (case of small countries)[J]. *Economics and Management*, 2014, 19(1): 44-53.
- [16] 沈秦伟, 韩增林, 郭建科. 港口物流与城市经济增长的关系研究——以大连为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(1): 69-73. [Shen Qinwei, Han Zenglin, Guo Jianke. Research on the relationship between port logistics and urban economic growth: a case study of Dalian. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(1): 69-73.]
- [17] Coto-Millan P, Banos-Pino J, Rodriguez-Alvarez A. Economic efficiency in Spanish ports: Some empirical evidence[J]. *Maritime Policy&Management*, 2000, 27(2): 169-174.
- [18] Clark X M, Dollar D, Micco A. Port efficiency, maritime transport costs, and bilateral trade[J]. *Journal of Development Economics*, 2004, 75(2): 417-450.
- [19] Bichou K, Gray R. A logistics and supply chain management approach to port performance measurement[J]. *Maritime Policy&Management*, 2004, 31(1): 47-67.
- [20] 焦新龙. 港口物流绩效评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. [Jiao Xinlong. *Study on evaluation system of port logistics performance*. Xi'an: Chang'an University, 2010.]
- [21] 陈晓红, 万鲁河. 城市化与生态环境耦合的脆弱性与协调性作用机制研究[J]. *地理科学*, 2013, 33(12): 1450-1457. [Chen Xiaohong, Wan Luhe. The interactive mechanisms for the coordination and vulnerability between regional urban and eco-environment. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(12): 1450-1457.]
- [22] 周红梅. 2015年长三角地区港口经济运行情况及形势分析[J]. *中国港口*, 2016, 38(5): 1-3. [Zhou Hongmei. Analysis on the situation of port economy in Yangtze River Delta in 2015. *China Ports*, 2016, 38(5): 1-3.]
- [23] 中国港口年鉴编辑部. 中国港口年鉴2014[M]. 上海: 中国港口杂志社, 2014. [China Ports Yearbook Editorial Board. *China Ports Yearbook 2014*. Shanghai: China Port Magazine, 2014.]
- [24] 江苏省统计局. 江苏统计年鉴2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. [Jiangsu Bureau of Statistics. *Jiangsu Statistical Yearbook 2014*. Beijing: China Statistics Press, 2014.]
- [25] 浙江省统计局. 浙江统计年鉴2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. [Zhejiang Bureau of Statistics. *Zhejiang Statistical Yearbook 2014*. Beijing: China Statistics Press, 2014.]
- [26] 上海市统计局. 上海统计年鉴2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. [Shanghai Bureau of Statistics. *Shanghai Statistical Yearbook 2014*. Beijing: China Statistics Press, 2014.]
- [27] 贾艳红, 赵军, 南忠仁, 等. 基于熵权法的草原生态安全评价——以甘肃牧区为例[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(8): 1003-1008. [Jia Yanhong, Zhao Jun, Nan Zhongren et al. Ecological safety assessment of grassland based on entropy-right method: A case study of Gansu pastoral area. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8): 1003-1008.]
- [28] 梁双波, 曹有挥, 曹卫东, 等. 长三角港口物流经济空间差异及演化分析[J]. *经济地理*, 2009, 29(7): 1081-1086. [Liang Shuangbo, Cao Youhui, Cao Weidong et al. Analysis spatial dis-

- parities economy and evolvement in the Yangtze River Delta. *Economic Geography*, 2009, 29(7): 1081-1086.]
- [29] 班茂盛, 方创琳, 刘晓丽, 等. 北京高新技术产业区土地利用绩效综合评价[J]. *地理学报*, 2008, 63(2): 175-184. [Ban Maocheng, Fang Chuanglin, Liu Xiaoli et al. Comprehensive evaluation of land use performance of Beijing high-tech industrial Zone. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(2): 175-184.]
- [30] 周华, 马春宁, 周生路, 等. 基于力学平衡模型的乡村转型均衡发展判别方法研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(3): 303-310. [Zhou Hua, Ma Chunping, Zhou Shenglu et al. The study of discrimination method of rural coordinated transformation development based on mechanical model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(3): 303-310.]
- [31] 项晓敏, 金晓斌, 杜心栋, 等. 基于“强度-潜力-难度”综合测度的中国农用地整治实施协调性分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(2): 285-298. [Xiang Xiaomin, Jin Xiaobin, Du Xindong et al. The coordination of farmland consolidation implementation in China by comprehensive measure of "intensity, potential and difficulty". *Geographical Research*, 2016, 35(2): 285-298.]
- [32] 张晓东, 池天河. 90年代中国省级区域经济与环境协调度分析[J]. *地理研究*, 2001, 20(4): 506-515. [Zhang Xiaodong, Chi Tianhe. Differentiating and analysis of the coordination degree between economic development and environment of provinces (regions) in China. *Geographical Research*, 2001, 20(4): 506-515.]

## Coordination of Port Logistics Development Based on Mechanical Model: A Case of the Yangtze River Delta Port System

Ye Shilin<sup>1,2</sup>, Cao Youhui<sup>1</sup>, Jiang Ziran<sup>1,2</sup>, Wang Jiawei<sup>3</sup>

(1. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China;*

*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Geographical Sciences,*

*Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China)*

**Abstract:** Based on the idea of systems theory, one new theoretical analytical framework for port logistics coordinated development is proposed by the authors. The framework consists of three subsystems, including port infrastructure, logistics operation, and city support. On the basis of it, one comprehensive index system of port logistics coordinated development is established in this research. It contains 3 second grade indexes and 14 third grade indexes. This article abstracts the coupling relationship, between the three subsystems, into vector relation of three forces with different direction in Cartesian coordinate system. Then, the authors construct the coupling coordination discriminate model of port logistics development, by combing the comprehensive evaluation index system with the mechanical model. Furthermore, by using the natural and social economic statistic data from 13 container ports in the Yangtze River Delta in 2013, the comprehensive development level, the coordinated development state and the main restrictive factors of port logistics development are estimated and quantified. The results show that: 1) There are some significant differences in the comprehensive development degree of port logistics among the Yangtze River Delta port system, and it has formed a multi-level port logistics hierarchical structure. Shanghai is the center, Ningbo-Zhoushan, Suzhou and Nanjing are the sub-centers, and the rest of the ports is the supplement. 2) There are some obvious differences in the coordination degree of port logistics in the Yangtze River Delta port system. The overall level of coordination is obviously low. The Yangtze River Delta port system includes five kinds of coordination development types, of which the low-level coordination type is the main types, and it covers 7 ports, accounting for 53.85% of the total ports. In particular, the comprehensive development degree is closely linked with the coordination degree of port logistics, and the relation is in line with the ‘U-shaped’ curve. 3) The concentration characteristic of the deviated direction of the coordination degree is not obvious. The quantity of ports in the lag type of the port infrastructure, logistics operation and city support subsystems is approximately the same. Finally, how to promote the coordinated development of the Yangtze River Delta port logistics has carried on the preliminary discussion.

**Key words:** port logistics; index system; coordination; Port Geography; the Yangtze River Delta