

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0714

基于引力模型与空间自相关的长三角港口 一体化空间联系研究

丁倩^{1,2}, 刘桂云^{1*}, 傅海威²

(1.宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2.宁波工程学院 经济与管理学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 长三角港口一体化是实现区域一体化发展的必然要求。以长三角 27 个港口为研究对象, 通过熵权-TOPSIS 法分析了 2010 年、2015 年和 2020 年长三角港口一体化融入水平。在此基础上, 运用引力模型计算港口间的引力值, 研究长三角港口一体化空间联系强度和空间联系特征, 并通过空间自相关进行检验。研究结果表明: (1)长三角港口群一体化发展程度总体偏低, 且发展不均衡, 港口两极化特征较为明显。(2)2010 年、2015 年和 2020 年港口空间网络结构特征比较相似, 均呈现出各港口之间空间联系强度不均的现象。(3)以上海为核心, 江苏、浙江为两翼的长三角港口群格局初步显现。(4)长三角港口一体化水平呈现全局正向空间自相关性。

关键词: 港口一体化; 空间联系; 引力模型; 空间自相关

中图分类号: F552

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 05-0054-08

2019 年 12 月 1 日, 长三角一体化发展正式上升为国家战略, 港口一体化是其中的重要内容。在此背景下, 港口间加强合作, 实现港口互联互通, 成为港口一体化进程的重要推力。因此, 研究港口空间联系是实现港口一体化发展的重要内容, 对促进跨省市要素流动、实现港口分工互补以及优化港口空间格局具有重要意义。近些年, 有学者对港口一体化发展问题进行了研究, 如 Dong 等^[1]研究了宁波舟山港一体化程度与集装箱吞吐量的关系; Guo 等^[2]对港口资源整合前后港口整体的效益进行了分析; 魏巍^[3]探讨了区域港口一体化改革对港口效率的影响。

针对港口空间发展问题的研究, 早期主要集中在港口空间演化、港口空间分布格局等方面^[4-5]。随后有学者开始关注港口与外界的联系, 如张新放等^[6]、袁雯等^[7]开展了港口间竞争与合作、港口与腹地关系、港城关系等研究。空间联系一直广泛应用于城市群、区域经济、区域一体化发展中的内

部空间特征和竞合关系的研究^[8-9], 近年也扩展到了港口研究领域。秦娅凤等^[10]探讨了中国沿海港口城市的空间联系; 郭建科等^[11]对中国沿海港口物流网络空间联系强度和结构演化等问题进行了分析。这些成果大多采用引力模型、社会网络分析、流空间理论等方法, 为深入探究港口一体化空间相关性与空间联系特点奠定了一定的基础。但是, 目前针对区域内港口群一体化融入水平的定量分析及港口空间联系的研究成果鲜见报道, 相关研究方法较为单一。

本文选取《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》^[12]中划定的中心区 27 个城市所属港口为研究对象, 这些港口发展良好、联系紧密、具有一定规模和代表性。基于 27 个港口数据, 在分析近 10 年各港口融入长三角港口一体化水平基础上, 结合 ArcGIS、引力模型、空间自相关等方法, 研究 2010 年、2015 年和 2020 年港口一体化的空间特征及其内部空间关系, 以期优化长三角港口群空间布

收稿日期: 2023-07-22.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(D21013); 教育部人文社会科学研究项目(20YJC790025); 浙江省软科学项目(2021C35146)。

第一作者: 丁倩, 硕士研究生, 主要研究方向: 港航技术与管理工程. E-mail: dq974466@163.com

*通信作者: 刘桂云, 教授, 主要研究方向: 港口物流管理. E-mail: liuguizun@nbu.edu.cn

局,加快港口一体化发展提供启示.

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 引力模型

使用引力模型计算各港口的引力值,分析区域内各港口之间的空间联系.传统引力模型是分析空间相互作用的经典模型,常用来测度区域间空间联系^[13],模型的计算公式为:

$$F_{ij} = K \frac{M_i M_j}{D_{ij}^a},$$

式中: F_{ij} 为 i 点和 j 点之间的引力值; M_i 和 M_j 分别为两点的“质量”,即综合评价结果可以用 GDP、人口或多指标评价得到的综合质量来表示; K 为引力常数; a 为引力衰减指数; D_{ij} 为点 i 到点 j 的距离,包括时间距离、地理距离和综合距离.

根据实际情况,本文确定了引力模型中的相关参数,具体如下:

(1)综合发展质量(M).用港口一体化融入水平值作为引力模型参数 M 值.参考关于港口综合竞争力、城市一体化、区域一体化、物流一体化、城乡一体化评价指标体系的研究成果^[14-17],综合考虑多方因素,构建了港口一体化评价指标体系(表1).进而通过熵权-TOPSIS 法对长三角港口一体化融入水平值进行测算.

(2)经济距离(D).由于历史数据较难获得,将参数 D 表示为百度地图中获得的两港口间的最短公路距离.

(3)引力常数(K).综合已有成果,并考虑计算的简便性和精确性,利用综合评价得到港口一体化水平,对 K 进行修正,公式为:

$$K_i = \frac{M_i}{M_i + M_j},$$

式中: K_i 为港口 i 的综合质量水平与港口 i 和 j 综合质量水平之和的比值,表示港口 i 和 j 之间的空间联系方向.若 $0 < K_i < 0.5$,说明港口 i 对港口 j 的吸引力小于港口 j 对港口 i 的吸引力;若 $K_i = 0.5$,说明港口 i 和港口 j 相互之间的吸引力相对均衡;若 $0.5 < K_i < 1$,说明港口 i 对港口 j 的吸引力大于港口 j 对港口 i 的吸引力.

(4)引力衰减指数(a).由于研究区域内的港口距离较近,本文 a 取 2.

确定参数后的引力模型^[18]为:

$$F_{ij} = K_i \frac{M_i M_j}{D_{ij}^2}, \quad F_{ji} = K_j \frac{M_i M_j}{D_{ij}^2},$$

$$P_i = \sum F_{ij}, \quad N_i = \sum F_{ji},$$

式中: F_{ij} 代表港口 i 对港口 j 的空间联系强度,是绝对联系强度; F_{ji} 代表港口 j 对港口 i 的空间联系强度,是相对联系强度; P_i 是港口 i 对其他港口的绝对联系强度之和; N_i 是港口 j 对其他港口的相对联系强度之和,可以表明该港口与其邻近港口的空间关系.

1.1.2 空间自相关

空间自相关作为探索性空间数据分析法之一,通过空间权重矩阵和滞后向量度量某位置上的数据与其他位置上数据之间的相互依赖程度,主要

表1 港口一体化融入水平评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标来源
港口一体化	港口基础设施一体化	万吨级以上泊位数	文献[14]
		码头岸线长度	文献[14]
		货物吞吐量	文献[15]
		集装箱吞吐量	文献[15]
	港口腹地功能一体化	港口直接腹地 GDP	文献[14]
		港口城市进出口贸易总额	文献[14]
	港口集疏运一体化	港口城市公路里程	文献[14]
		港口城市铁路里程	文献[14]
	港口信息资源一体化	港口城市互联网用户数	文献[16]
		港口城市信息化固定资产投资额	文献[17]
	港口人力资源一体化	港口从业人员数	文献[16]

包括全局自相关和局部自相关^[19]。本文采用文献[20]的方法。

(1)全局空间自相关。全局空间自相关能量化数据间的空间相关程度,描述整个区域内港口群的空间分布情况,并判断此现象在研究区域内是否存在空间聚集特性^[21]。在描述港口一体化的全局空间自相关性时,引入全局莫兰指数(Global Moran's I),计算公式为:

$$I = \frac{n}{S_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{W_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij},$$

式中: I 为全局莫兰指数,对应的有效数值区间为 $[-1, 1]$, 若数值超过 0, 表明区域内部空间表现为正向关联, 若数值低于 0, 表明区域内部空间表现为负向关联, 若数值恰好为 0, 表明自相关性情况可以忽略不计; n 为统计量; W_{ij} 为港口 i 和港口 j 的空间权重; S_0 为所有港口的空间权重之和; x_i 和 x_j 为港口 i 和港口 j 属性值; $\bar{x}$ 为港口属性均值。

(2)局部空间自相关。局部空间自相关能够度量区域内不同港口之间的空间相关程度,描述空间聚集性出现的范围^[21]。本文对港口一体化的局部空间自相关性描述采用局部莫兰指数,计算公式为:

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_j,$$

$$Z(I_i) = \frac{I_i - E(I_i)}{\sqrt{V_i}},$$

式中: I_i 为局部莫兰指数,当取值大于 0 时,表明相邻港口之间的空间差异较小,即存在空间聚集性,当取值小于 0 时,表明相邻港口之间的空间差异较大,即存在非空间聚集性; Z_i 与 Z_j 为观测值的标准化形式; $E(I_i)$ 与 V_i 分别为数学期望和变异系数。

1.2 数据来源

本研究数据来源于中国港口年鉴^[22]、中国统计年鉴^[23]、中国第三产业统计年鉴^[24]、中国海洋统计年鉴^[25]、中国城市统计年鉴^[26]和部分市级统计年鉴,以及 eps 统计库(<http://olap.epsnet.com.cn/>)、choice 数据库(<http://choice.eastmoney.com/>)、中国

交通运输部(<https://www.mot.gov.cn/>)、中国国家邮政局(<https://www.spb.gov.cn/>)、中国工业和信息化部(<https://www.miit.gov.cn/>)以及中国国家统计局(<http://www.stats.gov.cn/>)等网站。

2 长三角港口一体化空间联系

2.1 港口一体化融入水平测算

根据港口一体化融入水平评价指标体系(表 1),用熵值-TOPSIS 法得到 2010 年、2015 年和 2020 年长三角 27 个港口一体化融入水平的测算值,即引力模型中参数 M 的取值,具体数据见表 2。

表 2 港口一体化融入水平测算结果

港口	M 值		
	2010 年	2015 年	2020 年
南京港	0.17	0.17	0.20
无锡港	0.12	0.13	0.15
常州港	0.11	0.07	0.09
苏州港	0.23	0.29	0.36
南通港	0.12	0.11	0.14
扬州港	0.04	0.06	0.07
镇江港	0.07	0.09	0.12
盐城港	0.14	0.11	0.09
泰州港	0.08	0.10	0.13
杭州港	0.20	0.23	0.25
宁波港域	0.28	0.36	0.43
温州港	0.12	0.09	0.08
湖州港	0.07	0.06	0.06
嘉兴港	0.08	0.08	0.11
绍兴港	0.06	0.05	0.06
金华港	0.10	0.06	0.06
舟山港域	0.10	0.14	0.15
台州港	0.10	0.06	0.05
合肥港	0.08	0.10	0.12
芜湖港	0.04	0.05	0.06
马鞍山港	0.02	0.03	0.04
铜陵港	0.04	0.03	0.03
安庆港	0.10	0.09	0.08
滁州港	0.06	0.05	0.03
宣城港	0.04	0.03	0.03
池州港	0.02	0.02	0.03
上海港	0.54	0.77	0.88

从表2可见,长三角27个港口一体化水平在2010年、2015年和2020年间大部分逐年递增。上海港、宁波舟山港的宁波港域(以下简称“宁波港域”)、苏州港、杭州港和南京港稳居前五。总体上,长三角港口群一体化水平偏低,且发展不均衡。2020年位于第一位的上海港港口一体化水平测算值为0.88,第二名宁波港域为0.43,其余25个港口一体化水平测算值均在0.03~0.36之间,可见港口两极化特征较为明显,港口之间一体化水平差异较大,未来需要在整合基础上对各个港口进行宏观分工和配置。此外,长三角港口一体化表现出明显的空间邻近性特征,以上海港为中心,浙江、江苏港口为两翼,分别形成了2个辐射圈。

2.2 港口引力特征

基于改进引力模型计算得到港口引力值。由于数据庞杂,因此构建了长三角港口空间关系的拓扑网络,并运用ArcGIS 10.2平台和自然断裂点分类法,依次对2010年、2015年和2020年长三角港口引力强度进行可视化表达,结果如图1所示。图1中2个港口之间的空间联系采取连线方式表示,各个港口空间联系强弱通过线条的粗细程度区分,线条越粗,表示空间联系越强,线条越细,表示空间联系越弱,当强度值低于3.048时线条不显现。

从图1可见,2010年、2015年和2020年长三角港口网络特征较为相似,总体结构未发生大的变化,均呈现各港口间空间联系强度分布不均的

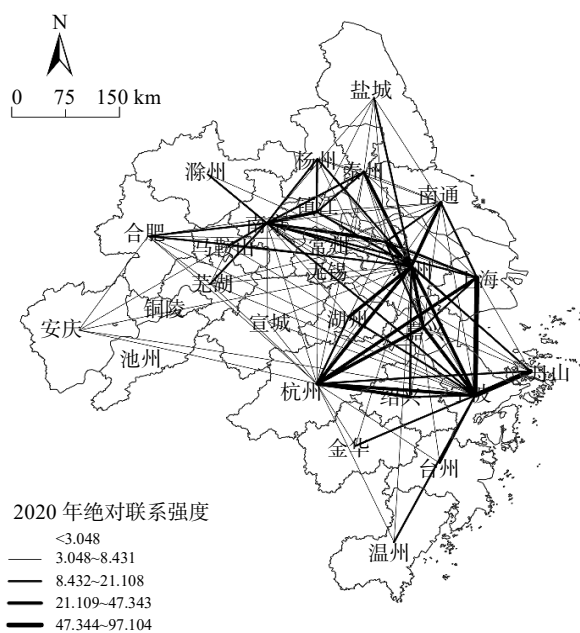
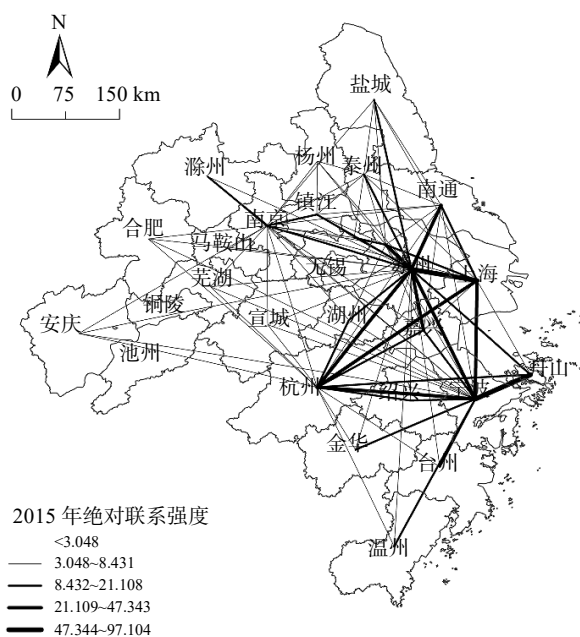
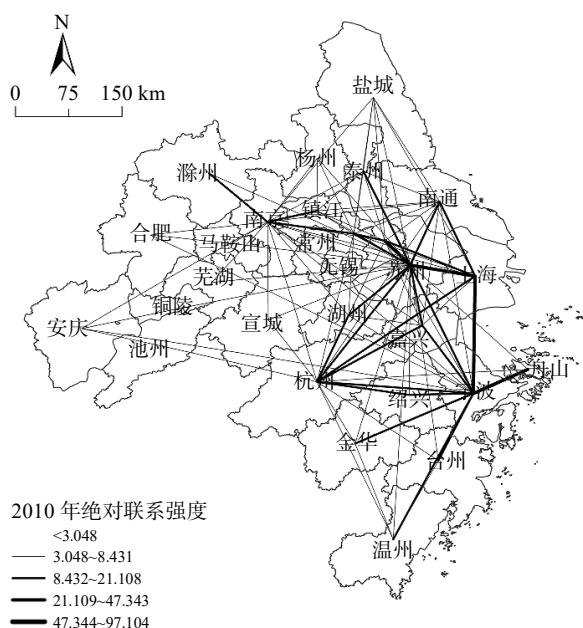


图1 2010年、2015年和2020年长三角港口一体化绝对联系强度示意图

现象。其中东部港口之间联系较强,西部、南部和北部等研究区边缘部分的港口之间联系较弱。而根据引力模型计算得到的引力值表明,各港口之间的空间关联强度都有所提升,其中杭州港、上海港、宁波港域、苏州港以及南京港等主要港口不仅自身一体化水平高,相互之间的一体化空间关联强度也高,表明这些港口与其他港口之间的资源要素合作也越加紧密。因此,长三角港口群未来整合的一个重要方向是实现港口群主港口之间的资

源信息互联互通,空间、设施、设备的相互利用和相互补偿,以达到高质高效的合作目标。

2.3 港口空间联系特征

为了进一步分析港口的联系结构,计算了2010年、2015年和2020年27个港口的 P_i 与 N_i ,结果见表3。

表3 2010年、2015年和2020年长三角港口绝对联系强度和相对联系强度

港口	2010年		2015年		2020年	
	P_i	N_i	P_i	N_i	P_i	N_i
南京港	136.08	102.38	140.93	126.02	192.68	172.19
无锡港	114.78	160.79	131.24	213.22	169.16	288.28
常州港	84.23	117.68	43.23	106.28	67.92	155.19
苏州港	270.29	211.59	389.13	313.14	559.51	429.62
南通港	79.62	119.16	76.35	147.05	105.23	201.16
扬州港	16.42	49.79	31.43	75.81	43.22	105.93
镇江港	44.14	78.48	64.67	105.19	109.74	157.35
盐城港	66.50	71.75	47.45	75.97	36.42	80.30
泰州港	46.69	79.12	70.99	108.59	99.43	149.55
杭州港	179.15	144.90	213.27	196.43	227.96	226.69
宁波港域	225.64	130.40	315.44	188.77	331.43	211.63
温州港	41.91	54.51	27.80	52.94	31.46	53.35
湖州港	38.93	90.05	27.89	92.22	35.76	101.31
嘉兴港	52.50	119.82	53.66	150.86	63.90	171.26
绍兴港	32.46	83.14	22.84	83.70	26.29	103.83
金华港	41.47	63.38	19.70	53.43	17.02	57.68
舟山港域	40.24	76.68	69.50	120.78	88.77	160.19
台州港	40.94	62.46	15.45	47.43	13.51	51.28
合肥港	31.07	45.80	41.97	59.29	57.07	79.75
芜湖港	15.09	39.98	20.88	51.59	31.34	72.67
马鞍山港	3.50	22.32	11.69	43.51	13.78	55.27
铜陵港	10.04	30.02	6.90	27.81	6.38	30.65
安庆港	34.87	43.90	29.68	47.49	27.47	53.71
滁州港	22.42	50.66	18.86	52.43	8.44	42.33
池州港	3.43	17.66	3.25	18.54	6.04	28.22
宣城港	13.42	39.92	10.00	39.10	7.14	38.49
上海港	570.01	149.49	893.34	199.94	1177.82	276.11

从表3可知,上海港的绝对联系强度明显大于其他港口,且随着时间增长与其他港口的差距逐渐拉大。各省港口绝对联系强度整体实力依次为江苏、浙江和安徽。2010年、2015年和2020年长

三角港口绝对联系强度排名前五的都为上海港、苏州港、宁波港域、杭州港、南京港,且上海港以绝对优势始终占据第一,江苏和浙江在前五中各占两席。江苏的苏州港和南京港一直处于第二位和第五位,苏州港10年来飞速发展,而无锡港、南通港、镇江港、泰州港等港口也发展较好。由此可见,江苏各港口呈现均衡、快速的发展态势。同样,浙江的宁波港域和杭州港也一直处于长三角港口绝对联系强度的前五位中。嘉兴港在2015年后发展迅速,而舟山港域(宁波舟山港的舟山港域)的绝对联系强度也逐年增长,表明浙江省港口的整体实力较强。安徽港口群的综合水平与江苏和浙江有较大差距,但是发展均衡,合肥港、芜湖港和马鞍山港在2020年绝对联系强度比2010年和2015年均有较大增长。上述结果显示,排名前五的龙头港口辐射能力强,带动边缘港口的协调发展,在长三角港口群发展中体现出了价值和担当,发挥了良好的示范和引领作用。以上海为核心,江苏、浙江为两翼的长三角港口格局初步显现。

3 长三角港口一体化空间自相关分析

3.1 全局空间自相关分析

计算2010—2020年长三角港口一体化全局莫兰指数,结果见表4。

表4 2010—2020年长三角港口一体化全局莫兰指数

时间	I	$E(I)$	$Sd(I)$	Z	P
2010年	0.068	-0.038	0.059	1.788	0.074
2011年	0.067	-0.038	0.060	1.772	0.076
2012年	0.070	-0.038	0.061	1.776	0.076
2013年	0.069	-0.038	0.061	1.752	0.080
2014年	0.066	-0.038	0.062	1.674	0.094
2015年	0.065	-0.038	0.054	1.912	0.056
2016年	0.066	-0.038	0.055	1.903	0.057
2017年	0.060	-0.038	0.055	1.800	0.072
2018年	0.059	-0.038	0.056	1.755	0.079
2019年	0.061	-0.038	0.056	1.775	0.076
2020年	0.081	-0.038	0.055	2.174	0.030

注: I 为莫兰指数; $E(I)$ 为莫兰指数期望; $Sd(I)$ 为标准差; Z 为标准差的倍数; P 为假设检验值。

从表4可知,历年港口一体化的全局莫兰指数均为正,且 P 值均小于0.1,表明长三角港口一体

化在空间分布上并非表现出完全的随机状态,而是存在空间正相关性,即港口一体化水平测评值高的港口在空间上趋于邻近,形成港口综合实力高、港口间联系紧密的高值集聚区。同样,测评值低的港口不仅在空间上相互靠拢,港口间经济活动也相互依赖,会形成低值集聚区。长三角港口一体化在空间上具有高-高或低-低聚集特征,逐步形成港口群的雏形。

此外,2010—2016年港口一体化的全局莫兰指数在0.065~0.070范围内波动,此时长三角港口一体化进入初步探索阶段,港口群集聚趋势不明显,因此相关性较低。2017年、2018年和2019年分别为0.060、0.059和0.061,对比之前有所下降,这是由于各港口分属不同地市,存在跨区域管理、利益分配不合理等情况,港口间缺乏合理协作,基本处于各自为政状态,使得一体化政策的实行与制定不同步,一体化效果不佳。2020年长三角区域一体化上升为国家战略,上海国际航运中心基本建成,“双碳”政策、数字化建设等大环境为港口一体化发展提供了强大助力。此时,长三角港口群的空间相关性增至0.081,相比之前有较大的提升。

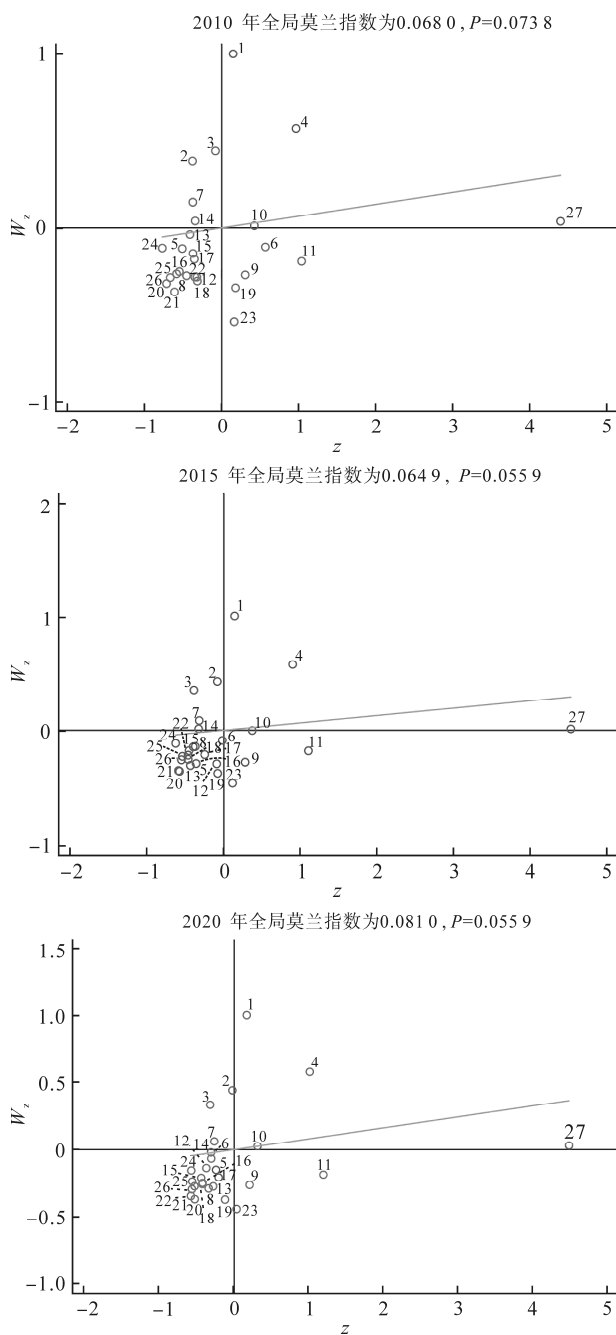
上述结果表明,长三角港口一体化的空间相关性呈现先平稳后降低再明显增加的趋势,这也验证了前面分析所得的港口之间空间联系强度逐年增强的结果。

3.2 局部空间自相关分析

全局莫兰指数说明研究区域的港口存在正向空间相关性,但无法确定该关联性出现的具体范围。因此,本文运用Stata软件计算港口一体化的局部莫兰指数,并绘制了2010年、2015年和2020年局部莫兰指数的散点图(图2)。

从图2可见,局部空间自相关将港口一体化水平的聚集情况分为4种类型,分别为高-高、低-低、高-低和低-高,所有港口样本被划分在4个象限中,大部分港口位于第一象限和第三象限,即高-高和低-低集聚区,少数分布在第二象限和第四象限,进一步印证了前述长三角港口一体化水平呈现全局正向空间自相关性的初步判断。2010年长三角地区一半港口位于第三象限,另一半港口均匀分布在第一象限、第二象限和第四象限,空间分布较为散乱,集聚特征不明显。2015年和2020年第二象限

和第四象限的港口逐渐向第一象限和第三象限靠拢,2020年完成集聚。此时,长三角的大部分港口都位于第一象限和第三象限,呈现高-高、低-低



1 为南京港, 2 为无锡港, 3 为常州港, 4 为苏州港, 5 为南通港, 6 为扬州港, 7 为镇江港, 8 为盐城港, 9 为泰州港, 10 为杭州港, 11 为宁波港, 12 为温州港, 13 为湖州港, 14 为嘉兴港, 15 为绍兴港, 16 为金华港, 17 为舟山港, 18 为台州港, 19 为合肥港, 20 为芜湖港, 21 为马鞍山港, 22 为铜陵港, 23 为安庆港, 24 为滁州港, 25 为池州港, 26 为宣城港, 27 为上海港。

图2 2010年、2015年和2020年港口一体化莫兰指数散点图

集聚趋势. 其中上海港、杭州港、苏州港、南京港等 4 个港口位于第一象限, 有 17 个港口位于第三象限, 进一步验证了前述上海港、杭州港、南京港、苏州港空间联系强度较高, 其余港口也存在空间联系, 但强度稍弱的结论. 换言之, 不仅一体化水平相对较高的港口在区域空间范围内趋于接近, 一体化水平不高的港口在其地理位置上也相对集中. 可见, 目前长三角港口正由各自独立的区域性港口向港口群发展转变, 分工体系相对清晰.

4 结论

在分析长三角地区港口一体化融入水平的基础上, 将用于探索城市群、区域经济、区域一体化空间联系等问题的引力模型引入港口群的研究, 结合空间自相关对长三角港口一体化的空间相关性、空间联系特征进行识别分析. 通过分析 2010 年、2015 年和 2020 年长三角港口群空间联系的时空变化得出以下结论:

(1)长三角港口群一体化程度存在发展不均衡现象, 排名第一位的上海港与其他港口一体化融入水平差异较大.

(2)各研究阶段的港口空间网络结构特征比较相似, 均呈现出港口之间空间联系强度分布不均, 中东部港口之间联系较强, 西部、南部和北部等研究区边缘部分的港口之间联系较弱的现象.

(3)2010 年、2015 年和 2020 年上海港的绝对联系值之和最大, 对外辐射能力最强, 其次是苏州港、宁波港域、杭州港和南京港, 均远强于其他港口, 这些核心港口带动了长三角港口的发展. 因此, 以上海为核心, 江苏、浙江为两翼的长三角港口格局初步显现.

(4)长三角港口一体化存在正向的空间相关性. 2020 年的空间集聚性最强, 高-高集聚区分布在上海港、苏州港、南京港和杭州港, 除 6 个零星分布在高-低、低-高集聚区的港口外, 其余港口均分布在低-低集聚区.

参考文献:

- [1] DONG G, ZHENG S Y, LEE P T W. The effects of regional port integration: the case of Ningbo-Zhoushan Port[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 120:1-15.
- [2] GUO L Q, NG A K Y, JIANG C M, et al. Stepwise capacity integration in port cluster under uncertainty and congestion[J]. *Transport Policy*, 2021, 112:94-113.
- [3] 魏巍. 区域港口一体化对宁波-舟山港效率的影响研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2021.
- [4] 曹有挥, 蒋自然, 陈欢, 等. 长江沿岸港口体系的形成过程与机制[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(11):1430-1440.
- [5] 赵旭, 梁雪娇, 周巧琳, 等. 海上丝绸之路沿线港口体系的空间布局演化[J]. *上海海事大学学报*, 2017, 38(4): 43-48.
- [6] 张新放, 吕靖. 21 世纪海上丝绸之路港口体系时空格局演变[J]. *经济地理*, 2019, 39(11):33-40.
- [7] 袁雯, 马仁锋, 王益澄, 等. 海港门户宁波对外交通与城市发展耦合演变[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2019, 32(2):114-120.
- [8] LIU P, QIN Y, LUO Y Y, et al. Structure of low-carbon economy spatial correlation network in urban agglomeration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 394:136359.
- [9] DONG S M, REN G X, XUE Y T, et al. Urban green innovation's spatial association networks in China and their mechanisms[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 93:104536.
- [10] 秦娅凤, 郭建科. 不同流要素视角下沿海港口城市体系的网络空间联系[J]. *地理科学*, 2022, 42(11):1867-1878.
- [11] 郭建科, 喻铄琪. 中国沿海港口物流网络空间结构演化及其影响因素[J]. *热带地理*, 2022, 42(10):1640-1650.
- [12] 中共中央国务院印发长江三角洲区域一体化发展规划纲要[N]. *人民日报*, 2019-12-02(001).
- [13] 李梦程, 王成新, 刘海猛, 等. 黄河流域城市发展质量评价与空间联系网络特征[J]. *经济地理*, 2021, 41(12): 84-93.
- [14] 滕炜超, 胡志华. 基于 TOPSIS 法和 DEA 法的中国沿海港口竞争力分析[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 31(4):537-543.
- [15] DENG Z, LI Z F, ZHOU Y T, et al. Measurement and spatial spillover effects of port comprehensive strength: empirical evidence from China[J]. *Transport Policy*, 2020, 99:288-298.
- [16] 吕承超, 杨珊珊. 中国城市群一体化水平测度及趋势演进[J]. *统计与决策*, 2023, 39(8):40-45.
- [17] 赵朝, 潘豫, 刘冠群. 基于引力模型的长吉图开发开放先导区城市一体化测度[J]. *统计与决策*, 2018, 34(6): 102-105.

- [18] 周园, 曹威威, 杨迅周, 等. 基于改进引力模型的黄河下游沿岸城市空间联系特征分析[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(6):63-68.
- [19] 任平, 洪步庭, 周介铭. 基于空间自相关模型的农村居民点时空演变格局与特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12):1993-2002.
- [20] 朱永明, 贾宗雅. 城市经济高质量发展的空间联系及其特征研究——以中原城市群为例[J]. 生态经济, 2022, 38(12):82-88.
- [21] 唐明珠, 曾坚, 曾鹏. 基于空间自相关与引力模型的闽三角城市群经济空间联系研究[J]. 现代城市研究, 2020, 35(10):68-74, 104.
- [22] 中国港口杂志社. 中国港口年鉴 2011—2021[M]. 上海: 中国港口杂志社, 2011—2021.
- [23] 国家统计局. 中国统计年鉴 2011—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011—2021.
- [24] 国家统计局. 中国第三产业统计年鉴 2011—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011—2021.
- [25] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴 2011—2021[M]. 北京: 海洋出版社, 2011—2021.
- [26] 国家统计局, 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2011—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011—2021.

Research on the integrated spatial connection of ports in the Yangtze River Delta based on the gravitational model and spatial autocorrelation

DING Qian^{1,2}, LIU Guiyun¹, FU Haiwei²

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.School of Economics and Management, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: The integration of ports in the Yangtze River Delta is an inevitable requirement for achieving regional integrated development. Based on the data of 27 ports in the Yangtze River Delta, the integration level of ports in the Yangtze River Delta in 2010, 2015 and 2020 were analyzed by means of entropy weight TOPSIS method. Then, the gravity values of ports were calculated using the gravitational model, with which the strength and characteristics of the spatial connection of the port integration in the Yangtze River Delta were studied, and the statistical results were also tested through spatial autocorrelation. The research results show that: (1) the overall level of integrated development of the Yangtze River Delta port group is relatively low, and the development is uneven with obvious polarization characteristics of ports; (2) the spatial network structure characteristics of ports in 2010, 2015, and 2020 are relatively similar, showing an uneven spatial connection strength among ports; (3) the pattern of the Yangtze River Delta port cluster is emerging preliminarily, with Shanghai as the core and Jiangsu and Zhejiang as the two wings; (4) the integration level of ports in the Yangtze River Delta presents a global positive spatial autocorrelation.

Key words: port integration; spatial connections; gravitational model; spatial autocorrelation

(责任编辑 史小丽)