

协调视角下长三角城市群的空间结构演变与优化

范擎宇^{1,2}, 杨山^{1,2}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 以城市群为主体优化城镇化空间布局是构建国土空间规划体系的重要内容, 空间优化的本质旨在促进城市群内部大中小城市协调发展。以长三角城市群为案例, 在测度2001-2016年长三角城市群26个城市的城镇化协调水平基础上, 运用社会网络和多维尺度分析等方法, 分析和识别城镇化协调关系及其空间结构和内在演变机理。结果表明: (1) 随着长三角城市群的城镇化协调水平提高, 城市群内部的高协调城市逐渐显现出以上海为核心的“Z型”分布态势, 低协调城市则稳定分布在长三角城市群扩容后的范围; (2) 根据城镇化协调水平的关联强度划分长三角城市群的凝聚子群, 凝聚子群的加权平均中心度和联系密度增大后, 上海极化效应更加明显; (3) 从城镇化协调关系的空间和时间两个维度识别城市群空间结构, 长三角城市群从在空间距离影响下以省会城市为中心的“圈层”结构, 变形为在时间距离影响下的“核心—边缘”结构; (4) 人口、土地和经济城镇化三者协调水平的变化影响着长三角城市群空间结构演变, 相较人口与经济城镇化, 土地城镇化对城镇化协调关系的加强具有显著促进作用。从协调视角剖析长三角城市群的空间结构并提出优化政策, 有助于中国现有资源环境承载能力条件下城市群一体化建设和空间资源的高效利用。

关键词: 城镇化协调; 网络空间结构; 多维尺度变形; 长三角城市群

城市群是城镇化发展到一定水平后的主体形态, 也是各国经济、社会 and 国土资源持续发展的重要空间载体^[1]。当前, 中国城镇化正处于城镇人口快速增加、土地大规模扩张和经济非均衡发展的状态向高质量协调发展的转型阶段, 城市群发展已成为促进区域协调发展、国土空间优化、提升新型城镇化品质的重要途径。国家适时提出“建立国土空间规划体系”, 以空间治理和优化为核心, 通过优化城镇化布局形态, 推动城市群健康发展, 构建大中小城市协调发展的城镇化空间格局, 并实现中国现有资源环境承载能力条件下区域空间的有效利用^[2]。

西方发达国家的城市群形成较早并已进入相对成熟阶段, 19世纪末英国学者Howard^[3]的著作《明日的田园城市》首先从空间优化的角度提出城市组合成群体并协调发展的思想, 后来Zipf^[4]又将物理学中的万有引力定律引入城市群空间结构分析, Gottmann^[5]在研究美国东北部沿海城市分布形态的基础上, 论述了城市群的特征和空间结构形成过程; 随着经济全球化和信息化, 对城市群的空间的研究逐渐从实体结构转向组织结构, 许多

收稿日期: 2019-03-26; 修订日期: 2019-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771171); 江苏省研究生科研创新计划项目(SJKY19_1126)

作者简介: 范擎宇(1990-), 女, 湖南衡阳人, 博士研究生, 研究方向为城乡发展与空间规划。

E-mail: qingyufy@126.com

通讯作者: 杨山(1963-), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 研究方向为城乡发展与空间规划。

E-mail: yangshan@njnu.edu.cn

学者开始从全球网络化视角研究城市群组织关系和空间结构^[6-10]。由于中国的城市群空间形态及结构正随着城镇化快速发展而剧烈变化,城市群的研究成果主要体现两个方面,一是引进国外研究的理论成果论述中国城市群的空间结构和形成过程^[11-14];二是基于国家战略需要对城市群布局 and 空间结构进行规划,大多数研究主要基于实证和应用,从空间结构识别、演化和机制进行分析^[15-19],对于城市群空间联系结构优化仍需要从协调视角进行深入研究,为发展具有中国特色的城市群提供理论基础。

城市群发展既要求群内各个城市紧密联系,也需要各城市的协调发展。在城镇化进程中各个城市的人口、经济和土地等要素只有协调发展,才能形成城市间的协同效应,共同推动城市群整体高质量发展^[13,20]。长江三角洲城市群(简称长三角城市群)是中国经济最为活跃的地区,也是“一带一路”与长江经济带的重要交汇地域,与京津冀城市群和珠三角城市群相比,在城镇化发展中最具典型性(图1)。为将长三角城市群打造成具有国际竞争力的城市群,国家在原有“15+1”长三角范围基础上重新进行了调整,将江苏省的盐城、浙江省的金华和安徽省的合肥、芜湖、滁州、马鞍山、铜陵、池州、安庆和宣城的10个地级市纳入其范围,形成涵盖三省一市26个城市的空间集聚格局^[21]。

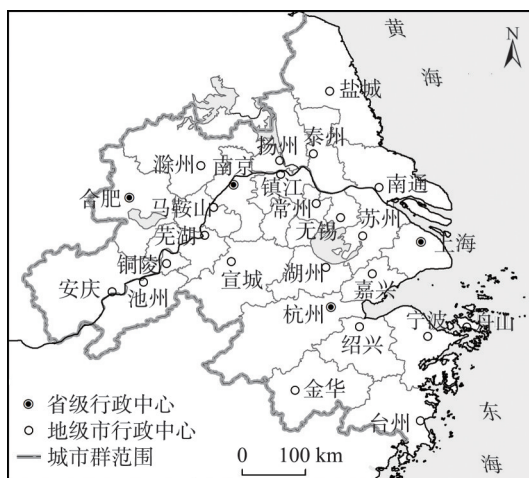


图1 长江三角洲城市群

Fig. 1 The Yangtze River Delta Urban Agglomeration

本文基于国土空间规划的背景,从协调视角测度长三角城市群各个城市的城镇化协调水平,依据各城市的城镇化协调关系划分凝聚子群,并在时间和空间维度上识别城市群的空间结构,在此基础上进一步探究近16年来长三角城市群空间结构演变的城镇化内在协调机制,提出优化长三角城市群空间结构的建议,以期服务于长三角城市群的国家发展战略需求。

1 研究方法与数据来源

1.1 指标选取与数据来源

测度城镇化水平有综合指标法和单一指标法,综合指标法涵盖城镇化多个侧面,能够反映城镇化综合发展情况,但可能存在多重共线性,易导致计算结果出现偏差;单一指标法则有简洁易行的优点,却只能反映城镇化某一方面的特征。根据多数测度城镇化水平相关研究^[22-23]的方法,结合综合指标法和单一指标法各自特点,本文选择城镇化的人口、土地和经济三个核心指标,分别采用城镇人口占比、建成区面积占比和三产占比来表征人口城镇化、土地城镇化和经济城镇化。由于长三角地区大多城市已进入工业化中后期,上海市及大多数地级市的城镇化发展质量在经济领域更多地体现在第三产业变化上,选择三产占比能更符合城镇化的发展规律。本文的社会属性数据主要源于2002-2017年的《中国城市统计年鉴》及各省与地级市统计年鉴^[24],考虑行政区划的调整和数据的

连续性及与当前宏观政策的衔接性,按最新行政区划进行城镇人口、三产经济和建成区面积数据分割和合并处理;路网数据来源于地球系统科学数据共享平台提供的长三角1:25万主要道路空间网络数据集;高铁时间数据主要来自中国铁路12306官网。

1.2 研究方法

首先采用协调模型测度长三角城市群人口、土地和经济城镇化的协调水平,分析其整体特征,并在此基础上引入社会网络分析方法,揭示城市群城镇化协调关系的局部特征。其次结合城市群城镇化协调关系的整体和局部特征,借助多维尺度分析方法,识别长三角城市群协调关系结构。最后运用面板分位数回归方法,剖析城市群空间结构形成的内在机理。

1.2.1 协调水平测度模型

借用耦合关系的协调测度模型,定量分析长三角地区人口、土地和经济城镇化三者之间的协调特征与变化趋势。协调测度模型^[22-23,25]如下:

$$C = \left[\frac{u_1 \times u_2 \times u_3}{(u_1 + u_2 + u_3/3)^3} \right]^{1/3} \quad (1)$$

$$D = \sqrt{CT}, T = \alpha u_1 + \beta u_2 + \varphi u_3 \quad (2)$$

式中: C 为三者的耦合关系; D 为协调度; T 为人口、土地、经济城镇化的综合协调指数; u_1 、 u_2 和 u_3 分别为人口、土地和经济城镇化指数; α 、 β 和 φ 为待定系数,参考已有研究^[25],待定系数取 $\alpha = \varphi = \beta = 1/3$ 。

1.2.2 社会网络分析法

城市群内部城镇化协调关系是识别城市群空间结构的基础^[26]。根据各城市的城镇化协调水平与加权最短时间距离计算各城市间的关联强度 (F_{ij}),并设定方向权重系数 q 突出关联强度的方向性,得到长三角城市群协调关系矩阵;其次通过社会网络分析法从凝聚子群、中心度 (C_i) 和联系密度 (D_i) 等三个方面对长三角城市群协调水平的关联强度进行定量分析。计算公式如下:

$$F_{ij} = q_{ij}(F_i F_j) / T_{ij}^2, q_{ij} = F_i / (F_i + F_j) \quad (3)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^{n-1} F_{ij} \quad (4)$$

$$D_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F_{ij} (n_i, n_j) / n(n-1) \quad (5)$$

式中: F_{ij} 是城市 i 和城市 j 间关联强度值; F_i 、 F_j 分别为城市 i 和城市 j 的城镇化协调度; T_{ij} 是两城市间的加权最短时间距离,通过城市距离综合权重的方法,分析对比各种交通方式下的最短时间获得^[17]; n 为城市个数; C_i 为城市 i 的网络中心度; D_i 为城市 i 的联系密度。其中 C_i 越大,该城市在网络中的地位越高, D_i 越大,该城市与其他城市的联系越紧密。

1.2.3 多维尺度分析

多维尺度分析 (Multidimensional Scaling, MDS) 是基于研究对象之间的相似性构建邻近关系矩阵,通过应力系数 (Stress) 和拟合指数 RSQ (R -squared) 分析其拟合程度,将多维的关系通过聚类或维度分析达到降维的目的,使其空间结构更为清晰^[17]。本

文通过MDS分别拟合空间和时间维度下长三角城市群协调关系结构,其中应力系数(stress)代表实际距离与空间结构上的表征距离的差异。计算公式为:

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (d_{ij} - \hat{d}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (d_{ij} - \bar{d})^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: d_{ij} 是研究对象的原始距离; \hat{d}_{ij} 是在该空间表征下研究对象的预测距离; \bar{d} 是所有研究对象原始距离的平均数。当Stress系数小于0.05时拟合结果极好,在0.05和0.1之间拟合结果较好,在0.1和0.2之间拟合结果一般,大于0.2时拟合结果较差^[27]。

1.2.4 分位数回归

分位数回归(Quantile Regression)是解释变量 X 与被解释变量 Y 的分位点之间线性关系的估计方法^[28-29]。相比传统的最小二乘法(OLS),分位数回归不仅可以反映不同分位点影响的大体特征,而且不需要很强的分布假设,在扰动项非正态分布情况下,估计量不易受到异常值的影响,估计结果更加稳健^[28-29]。

假设随机变量 Y 的概率分布为:

$$F(y) = \text{Prob}(Y \leq y) \quad (7)$$

Y 的 τ 的分位数定义为满足 $F(y) \geq \tau$ 的最小 y 值,即 $q(\tau) = \inf\{y: F(y) \geq \tau\}$ 的分位点可以由最小化关于 ξ 的目标函数得到,即:

$$q(\tau) = \underset{\xi}{\operatorname{argmin}} \left\{ \tau \int_{y > \xi} |y - \xi| dF(y) + (1 - \tau) \int_{y < \xi} |y - \xi| dF(y) \right\} = \underset{\xi}{\operatorname{argmin}} \left\{ \int \rho_{\tau}(y - \xi) dF(y) \right\} \quad (8)$$

式中: $\rho_{\tau}(\mu) = \mu(\tau - I(\mu < 0))$ 为检查函数,依据 μ 取值符号进行非对称加权^[29]。

2 结果分析

2.1 城市群城镇化协调水平的测度结果分析

基于耦合协调测度模型对2001-2016年长三角城市群各个城市人口、土地和经济城镇化三者的协调水平进行测度(图2),对其进行时间上的变化分析。然后,利用自然断裂点法分别对2001年和2016年长三角城市群的城镇化协调水平进行可视化,将其内部城市划分为4个等级,同一等级的城市形成一种类型:即高协调城市(I型)、较高协调城市(II型)、中等协调城市(III型)和低协调城市(IV型),考察2001-2016年不同类型城市间的转化情况(图3)。

随时间变化,长三角城市群城镇化协调水平整体呈上升趋势,均衡性逐渐增强。城镇化协调水平均值从2001年的0.379增加到2016年的0.517,年均增长率达到1.16%;16年间城镇化协调水平的标准差稳定在0.122到0.137之间,变异系数从2001年的0.315下降到2016年的0.266,说明长三角城市群内部的城镇化协调水平的空间差异呈逐步缩小态势。

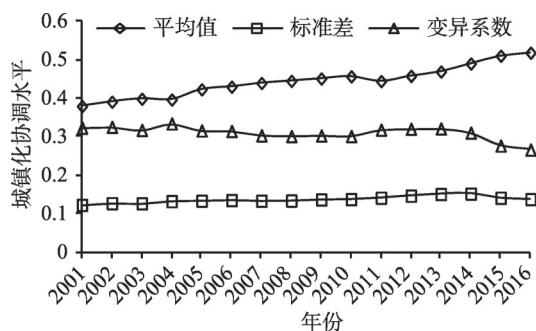


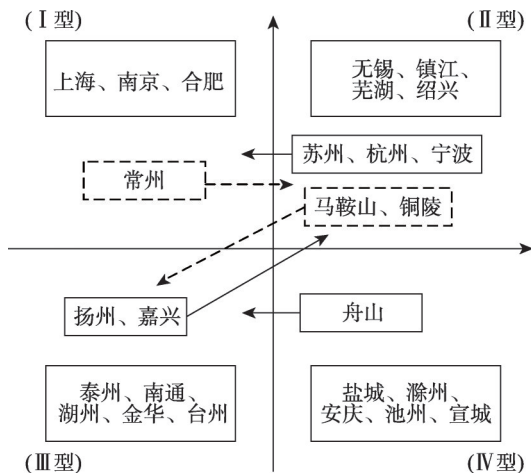
图2 2001-2016年长三角城镇化协调水平时间演化
Fig. 2 Time evolution of urbanization coordination level in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2001 to 2016

在空间变化上,除少数城市的城镇化协调类型发生变化以外,大部分城市的城镇化协调类型较为稳定,高协调区显现出以上海为中心的“Z型”分布态势。2001年长三角城市群主要以II型和III型城市为主,整体协调水平不高;到2016年I型城市数量有所增加,除上海和三个省会城市外,增加了沪宁合高速和沪杭甬高速的沿线的苏州、宁波等城市,而I型中常州的城镇化协调水平在2016年降为II型;II型和III型各有两个城市发生变化,II型中的马鞍山和铜陵降到III型中,而III型中扬州和嘉兴上升到II型;IV型城市主要分布在安徽省境内,均为长三角城市群空间范围扩容后的城市。

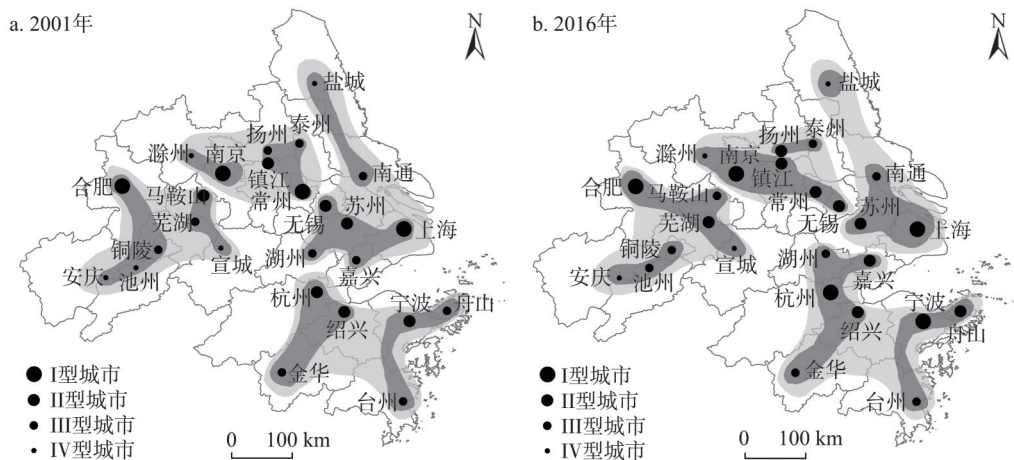
2.2 城市群城镇化协调关系的子群结构变化

城镇化协调类型划分体现了长三角城市群整体协调水平特征,其内部不同城市协调水平的空间关系特征仍需进一步刻画。运用社会网络分析法,根据城镇化协调水平的关联强度划分长三角城市群的凝聚子群,同一个子群内部城市的城镇化协调关系特征相似。借UCINET软件中的Concor算法,得到二级层面的4个凝聚子群,以及三级层面的8个凝聚子群,并通过三级层面的8个凝聚子群的加权平均中心度和联系密度判别其中心性及与其他子群的联系状况(图4、图5),分析长三角城市群城镇化协调关系的变化特征。

随着各城市城镇化协调水平的提升,长三角城市群内部不同城市空间联系形成的子



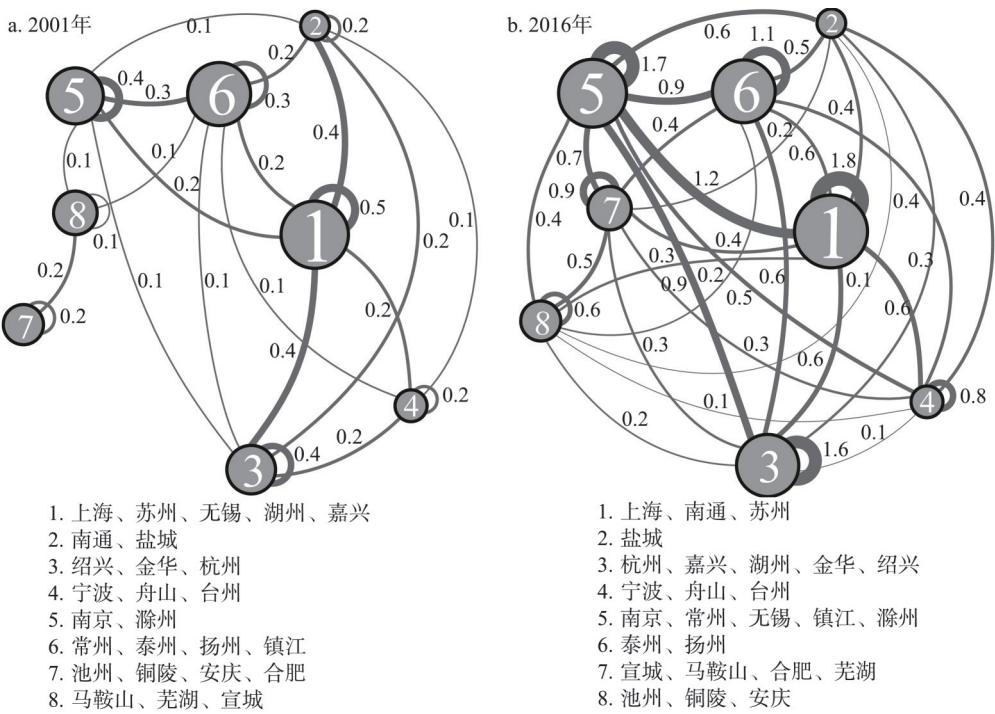
注:图中实线代表该区域城市的协调水平向较高等级演化,虚线代表该区域城市的协调水平向较低等级演化。
图3 2001-2016年长三角城镇化协调水平空间演化
Fig. 3 Spatial evolution of urbanization coordination level in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2001 to 2016



注:图中浅灰色区域代表二级层面的凝聚子群,深灰色区域实线代表三级层面的凝聚子群。

图4 长三角城市群城镇化协调关系的凝聚子群变化

Fig. 4 Evolution of the cohesive subgroups in the coordination relationship of Yangtze River Delta Urban Agglomeration



注：圈中数字大小代表子群的加权平均中心度，线的粗细代表子群间联系密度，省略联系密度小于0.1的线。

图5 长三角城市群协调关系凝聚子群关联强度变化

Fig. 5 Evolution of connection strength of coordination relations of Yangtze River Delta Urban Agglomeration

群发生分化与组合，二级层面的4个凝聚子群空间结构相对稳定，除无锡、湖州、嘉兴发生子群间位移外，基本维持以上海为核心的苏沪沿海子群，以杭州、宁波为核心的杭甬子群，以南京为核心的宁镇扬子群和以合肥为核心的江淮子群（图4）。三级层面的8个凝聚子群空间结构变化显著，除宁波—舟山—台州子群外，其他子群空间结构均发生调整，具体为：（1）以上海为核心的子群范围缩减，上海极化效应更加明显，而盐城子群、扬泰子群和铜陵—安庆—池州子群出现边缘化倾向；（2）部分城市脱离原来子群，向其他关联强度更大的子群集聚，形成南京—滁州—镇江—常州—无锡子群，杭州—湖州—嘉兴—绍兴—金华子群和合肥—马鞍山—芜湖—宣城子群。

从图5中各凝聚子群（简称子群）的加权平均中心度来看，2001年子群①最高，子群⑥次之，而子群②和子群④较低；到2016年，所有子群的加权平均中心度均有所提升，但提升幅度不同，其中以上海为核心的子群①增幅最大，达78.74%，盐城子群（②）增幅最小，为10.26%，该子群与宁波—舟山—台州子群（④）的加权平均中心度仍然偏低，边缘化趋势明显。

从各子群联系密度看，8个子群的内外联系密度平均值从2001年的0.166增加到2016年的0.473，变异系数从0.529上升到0.841，子群的内向和外向联系密度均增大，各子群联系强度的相对差异也在扩大（图5）。以上海为核心的子群①无论是内向联系密度还是外向联系密度都高于其他子群，2001年南通—盐城子群（②）虽受上海的辐射带动作用影响，但与其他子群的联系密度并不高，2016年盐城与其他子群的联系密度仍然较低，独立成为一个子群。子群③、子群⑤和子群⑥的联系密度均处于较高水平，联系密度从

2001年的1.4、1.2、1.3增加到2016年的4.0、6.9、4.7,而宁波—舟山—台州子群(④)由于地理位置的边缘性影响,与其他子群的联系密度同样偏低。子群⑦和子群⑧受长三角城市群规划范围和行政边界调整等多重因素影响,子群的内向联系密度高于外向联系密度。

2.3 城市群城镇化协调关系的多维结构识别

基于城镇化协调关系的城市群空间结构主要有两种识别方法,一是基于城市的空间位置刻画区域空间结构;二是基于时间距离,即划定一小时可达圈刻画区域空间结构^[17],综合考虑长三角城市群城镇化协调水平和协调关系的变化特征,从空间和时间两个维度构建长三角城市群空间关联强度矩阵,利用MDS拟合两种矩阵下城镇化协调关系的空间格局,在空间和时间维度下的Stress系数分别为0.094和0.106,RSQ值分别为0.944与0.976,拟合效果均较好。为便于分析,将拟合结果的散点图转化为二维空间分布图(图6)。

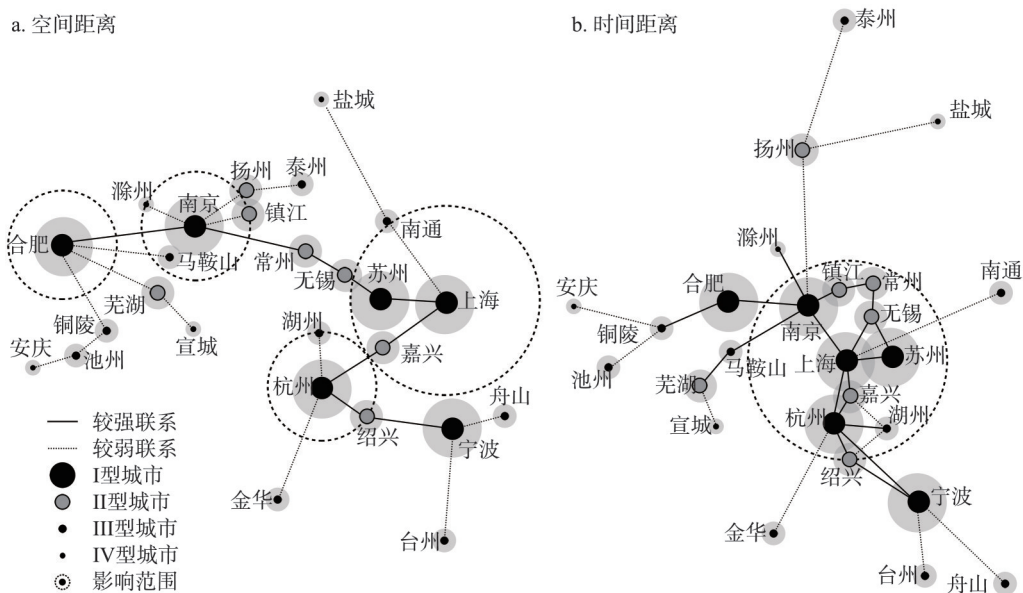


图6 长三角城市群城镇化协调关系的空间结构模式

Fig. 6 Comparison of coordination structure modes of Yangtze River Delta Urban Agglomeration

在空间距离影响下,长三角城市群城镇化协调关系表现出以上海、合肥、南京、杭州等城市为中心的“圈层”结构(图6a)。在时间距离影响下,长三角城市群城镇化协调关系表现出明显的“核心—边缘”结构(图6b),这是由于高铁和高速公路等快速交通使得时间距离大幅降低,城镇化关联强度增大,沿线城市逐渐向上海集聚,核心区范围不断扩大。安徽省的城市,江苏省的南通、扬州、盐城和泰州,浙江省的宁波、台州、舟山和金华因与以上海为核心的城镇化关联强度较弱,分布在核心区的外围,长三角城市群的空间结构由“圈层”结构经变形呈现出“核心—边缘”结构。

2.4 城市群城镇化协调关系演变的内在机制

长三角城市群空间结构的形成与变化,与其内部城市的城镇化协调关系相关,而城

镇化协调关系又受人口、土地和经济城镇化协调水平变化影响。将2001-2016年各城市的城镇化协调水平作为因变量（ Y ），人口、土地、经济城镇化作为自变量（ X_1 、 X_2 、 X_3 ），分别进行普通最小二乘法（OLS）和面板分位数回归（QREG）（表1）。

表1 长三角城市群协调水平分位数回归
Table 1 The regression analysis of evolution types of Yangtze River Delta Urban Agglomeration

分位点	回归系数			C	$Adj R^2$
	X_1	X_2	X_3		
OLS	0.180***	0.349***	0.356***	0.257***	0.793
0.1	0.362***	0.178***	0.483***	0.125***	0.564
0.2	0.449***	0.152***	0.344***	0.161***	0.638
0.3	0.437***	0.165***	0.334***	0.173***	0.674
0.4	0.389***	0.197***	0.352***	0.193***	0.701
0.5	0.376***	0.220***	0.352***	0.200***	0.719
0.6	0.292***	0.375***	0.373***	0.215***	0.737
0.7	0.259***	0.427***	0.385***	0.225***	0.772
0.8	0.229***	0.480***	0.360***	0.239***	0.820
0.9	0.231***	0.505***	0.352***	0.237***	0.874

注：***表示统计值在0.01水平上显著。

从OLS回归结果可知，研究期间土地和经济城镇化对长三角城市群整体协调水平影响较大，人口城镇化影响较低。为进一步探究各要素在不同分位点对城市协调水平的影响程度，构建分位数回归模型，表2中常数项 C 和调整系数（ $Adj R^2$ ）随着分位点的增加而增大，且各要素均在0.01水平上显著，其中人口城镇化（ X_1 ）的回归系数整体上随分位点的增大而下降，说明人口城镇化对中低协调城市的影响程度较大，而高协调城市由于人口城镇化率已基本稳定，影响程度相对下降；土地城镇化（ X_2 ）回归系数与分位点的等级变化呈正向关系，说明其对高协调城市的影响程度大于低协调城市，尤其在0.7到0.9分位点范围内，相较于人口和经济城镇化，土地城镇化影响更为突出，说明土地空间扩张对城镇化整体协调水平的贡献越来越高；经济城镇化（ X_3 ）回归系数在不同分位点分布较为平稳，且数值相对较高，反映了经济增长对各城市的城镇化协调水平提升均有促进作用。

3 结论与讨论

3.1 结论

在国土空间规划导向需求和新型城镇化任务双重驱动下^[26]，长三角城市群正以人口流动为基础的社会保障体系一体化、以国土空间资源合理利用为基础的空间结构优化和以经济发展为基础的产业一体化快速整合^[30-31]。本文从人口、土地和经济城镇化协调视角测度长三角城市群26个城市的城镇化协调水平，分析城镇化协调关系的空间结构演变特征，并探究不同要素城镇化互动的内在机制，为国土空间规划在区域—城市尺度上的多要素协调发展提供理论依据。结论如下：

（1）长三角城市群空间范围扩容后，城镇化协调水平差异增大，高协调城市呈现出

以上海为中心的“Z型”空间分布格局;低协调城市主要分布在新加入长三角城市群的安徽省境内。城镇化协调水平类型的划分受城市群空间规划的范围影响,安徽省在未来长三角一体化进程中具有较大发展潜力。

(2) 根据城镇化协调关系将长三角城市群划分两个层级的凝聚子群,在二级层面上的4个子群空间结构相对稳定;三级层面上的8个子群联系密度和加权中心度随着城镇化协调水平关联强度的上升而增大,子群空间结构变化显著,上海极化效应突出,而盐城子群、扬泰子群和铜陵—安庆—池州子群边缘化趋势明显。

(3) 从时空两个维度对长三角城市群内部城市结构进行变形识别,发现空间距离影响下的城市群城镇化协调关系表现出以上海和省会城市为核心的“圈层”结构,而时间距离影响下的城市群城镇化协调关系则呈现出明显的以上海为中心的“核心—外围”结构。

(4) 人口、土地和经济城镇化共同影响长三角城市群城镇化协调水平的演变,城市群内部不同协调关系塑造了城市群城镇化协调关系的空间结构,其中以人口迁移为特征的人口城镇化对中低协调城市的影响程度较大,以城市空间扩大为特征的土地城镇化随着城市协调水平的提升影响逐渐增大,以产业结构变化为特征的经济城镇化对所有城市的城镇化协调程度提升均有促进作用。

3.2 讨论

城市群发展的目标是区域一体化和协调发展,鉴于长三角城市群内部各城市城镇化协调发展水平不平衡,核心城市与边缘城市的空间联系较薄弱的现状,依据国土空间规划战略,进一步加强长三角城市群一体化建设和合理利用空间资源^[31-33],本文提出优化长三角城市群空间结构和协调城市发展的措施:(1) 从城镇化协调水平空间差异看,国土空间优化的重点是新加入长三角城市群的江苏省盐城和安徽省的大多数城市,迅速提高这些城市的城镇化水平以促进长三角城市群的整体发展;(2) 从城镇化协调关系的凝聚子群空间变化看,子群等级越高,稳定性越强,引导城镇化协调水平高的城市资源有序进入协调水平低的城市,缩小三级子群的协调水平差异,推动整个长三角城市群一体化建设;(3) 从城镇化协调关系变形的城市空间结构看,进一步发挥上海的辐射带动作用,健全城市群内部城市间跨行政区的协调机制,在市场原则基础上进行国土空间利用的合作;(4) 从城镇化协调关系的内在机制看,人口城镇化的红利正在消失,土地城镇化的影响力仍在加强,合理开发国土空间资源,通过提高空间承载能力优化各要素之间的协调关系。

参考文献(References):

- [1] 方创琳,宋吉涛,张薷,等.中国城市群结构体系的组成与空间分异格局.地理学报,2005,60(5): 827-840. [FANG C L, SONG J T, ZHANG Q, et al. The formation, development and spatial heterogeneity patterns for the structures system of urban agglomerations in China. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(5): 827-840.]
- [2] 匡文慧.新时代国土空间格局变化和美丽愿景规划实施的若干问题探讨.资源科学,2019,41(1): 23-32. [KUANG W H. Issues regarding spatial pattern change of national land space and its overall implementation on beautiful vision in new era. Resources Science, 2019, 41(1): 23-32.]
- [3] HOWARD E. Garden Cities of Tomorrow. Cambridge: MIT Press, 1965.
- [4] ZIPF G K. The P1/P2/D hypothesis: On the intercity movement of persons. American Sociological Review, 1946, 11(6): 677-686.

- [5] GOTTMANN J. Megalopolis or the urbanization of the Northeastern Seaboard. *Urban Planning International*, 1957, 33(3): 189-200.
- [6] CASTELLS M. *The Rise of the Network Society*. Cambridge, MA: Blackwell Publishers, 1996.
- [7] TAYLOR P J, CATALANO G, WALKER D R F. Measurement of the world city network. *Urban Studies*, 2002, 39(13): 2367-2376.
- [8] MEIJERS E J, BURGER M J. Spatial structure and productivity in US metropolitan areas. *Environment and Planning A*, 2010, 42(6): 1383-1402.
- [9] VANOORT F, BURGER M, RASPE O. On the economic foundation of the urban network paradigm: Spatial integration, functional integration and economic complementarities within the Dutch Randstad. *Urban Studies*, 2010, 47(4): 725-748.
- [10] DANIEL A B, FERNANDO S G. The validity of the monocentric city model in a polycentric age: US metropolitan areas in 1990, 2000 and 2010. *Urban Geography*, 2014, 35(7): 980-997.
- [11] MELO P C, GRAHAM D J, GRAHAM. Transport-induced agglomeration effects: Evidence for US metropolitan areas. *Regional Science Policy and Practice*, 2018, 10(1): 37-47.
- [12] 靳美娟, 张志斌. 国内外城市空间结构研究综述. *热带地理*, 2006, 26(2): 134-138, 172. [JIN M J, ZHANG Z B. A review on the study of urban spatial structure home and abroad. *Tropical Geography*, 2006, 26(2): 134-138, 172.]
- [13] 甄峰, 刘晓霞, 刘慧. 信息技术影响下的区域城市网络: 城市研究的新方向. *人文地理*, 2007, 22(2): 76-80. [ZHEN F, LIU X X, LIU H. Regional urban network influence by information technology: New direction of urban studies. *Human Geography*, 2007, 22(2): 76-80.]
- [14] FANG C L, YU D L. Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 126-136.
- [15] 姚士谋, 陈爽. 长江三角洲地区城市空间演化趋势. *地理学报*, 1998, 53(s1): 1-10. [YAO S M, CHEN S. The trend and urban spatial evolution in the Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(s1): 1-10.]
- [16] 孙斌栋, 华杰媛, 李琬, 等. 中国城市群空间结构的演化与影响因素: 基于人口分布的形态单中心—多中心视角. *地理科学进展*, 2017, 37(10): 1294-1303. [SUN B D, HUA J Y, LI W, et al. Spatial structure change and influencing factors of city clusters in China: From monocentric to polycentric based on population distribution. *Progress in Geography*, 2017, 36(10): 1294-1303.]
- [17] 王钊, 杨山, 龚富华, 等. 基于城市流空间的城市群变形结构识别: 以长江三角洲城市群为例. *地理科学*, 2017, 37(9): 52-59. [WANG Z, YANG S, GONG F H, et al. Identification of urban agglomerations deformation structure based on urban-flow Space: A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(9): 1337-1344.]
- [18] 方大春, 孙明月. 高铁时代下长三角城市群空间结构重构: 基于社会网络分析. *经济地理*, 2015, 35(10): 50-56. [FANG D C, SUN M Y. The reconstruction of the spatial structure of the Yangtze River Delta city group in the high-speed rail era: Based on the social network analysis. *Economic Geography*, 2015, 35(10): 50-56.]
- [19] 徐宜青, 曾刚, 王秋玉. 长三角城市群协同创新网络格局发展演变及优化策略. *经济地理*, 2018, 38(11): 133-140. [XU Y Q, ZENG G, WANG Q Y. Pattern evolution and optimization of synergic innovation network in Yangtze River Delta urban agglomeration. *Economic Geography*, 2018, 38(11): 133-140.]
- [20] 黄妍妮, 高波, 魏守华. 中国城市群空间结构分布与演变特征. *经济学家*, 2016, 9(9): 50-58. [HUANG Y N, GAO B, WEI S H. The temporal evolution of Chinese urban agglomeration's spatial structure. *Economist*, 2016, 9(9): 50-58.]
- [21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 长江三角洲城市群发展规划(2016-2020). 2016. [National Development and Reform Commission. *Yangtze River Delta urban agglomeration development plan (2016-2020)*. 2016.]
- [22] 曹文莉, 张小林, 潘义勇, 等. 发达地区人口、土地与经济城镇化协调发展研究. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(2): 141-146. [CAO W L, ZHANG X L, PAN Y Y, et al. Coordinate development among population, land and economy urbanization in developed area: The case of Jiangsu province. *China Population, Resource and Environment*, 2012, 22(2): 141-146.]
- [23] 张宇, 曹卫东, 梁双波, 等. 长江经济带城镇化协同演化时空格局研究. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(5): 715-723.

- [ZHANG Y, CAO W D, LIANG S B, et al. Research on the co-evolution temporal and spatial patterns of urbanization in Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(5): 715-723.]
- [24] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001-2016. [Department of Urban Social and Economic Investigation, National Bureau of Statistics. *China City Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistical Press, 2002-2017.]
- [25] 姜磊, 柏玲, 吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析: 兼论三系统耦合公式及其扩展形式. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 788-799. [JIANG L, BAI L, WU Y M. Coupling and coordinating degrees of provincial economy, resources and environment in China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(5): 788-799.]
- [26] 牛方曲, 刘卫东, 宋涛. 城市群多层次空间结构分析算法及其应用: 以京津冀城市群为例. *地理研究*, 2015, 34(8): 1447-1460. [NIU F Q, LIU W D, SONG T. A multi-level spatial structure analysis algorithm for urban agglomeration study in China. *Geographical Research*, 2015, 34(8): 1447-1460.]
- [27] KRUSKAL J B. Nonmetric multidimensional scaling: A numerical method. *Psychometrika*, 1964, 29(2): 115-129.
- [28] KOENKER R. Quantile regression for longitudinal data. *Journal of Multivariate Analysis*, 2004, 91(1): 74-89.
- [29] 刘帅宾, 杨山, 王钊. 基于人口流的中国省域城镇化空间关联特征及形成机制. *地理学报*, 2019, 74(4): 648-663. [LIU S B, YANG S, WANG Z. Characteristics and formation mechanism of China's provincial urbanization spatial correlation based on population flow. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(4): 648-663.]
- [30] 杨山, 杨虹霓, 季增民, 等. 快速城镇化背景下乡村居民生活圈的重组机制: 以昆山群益社区为例. *地理研究*, 2019, 38(1): 119-132. [YANG S, YANG H N, JI Z M, et al. The reorganization mechanism of the life circle of rural residents under the background of rapid urbanization: Based on the case study of Qunyi community of Kunshan. *Geographical Research*, 2019, 38(1): 119-132.]
- [31] 樊杰, 刘毅, 陈田, 等. 优化我国城镇化空间布局的战略重点与创新思路. *中国科学院院刊*, 2013, 28(1): 20-27. [FAN J, LIU Y, CHEN T, et al. The key strategies and innovative thinking for optimization on spatial pattern of urbanization in China. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28(1): 20-27.]
- [32] 贺艳华, 周国华, 唐承丽, 等. 城市群地区城乡一体化空间组织理论初探. *地理研究*, 2017, 36(2): 241-251. [HE Y H, ZHOU G H, TANG C L, et al. Theory on the spatial organization of urban-rural integration in urban agglomeration areas. *Geographical Research*, 2017, 36(2): 241-251.]
- [33] 纪学朋, 黄贤金, 陈逸, 等. 基于陆海统筹视角的国土空间开发建设适宜性评价: 以辽宁省为例. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 451-463. [JI X P, HUANG X J, CHEN Y, et al. Comprehensive suitability evaluation of spatial development and construction land in the perspective of land-ocean co-ordination: A case study of Liaoning province, China. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 451-463.]

Evolution and optimization of spatial structure of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from the perspective of coordination

FAN Qing-yu^{1,2}, YANG Shan^{1,2}

(1. School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: Taking urban agglomeration as the main object to optimize the spatial layout of urbanization is an important part of constructing the national land spatial planning system, and the essence of spatial optimization is to promote the coordinated development of large, medium and small cities within the urban agglomeration. Based on the measurement of urbanization coordination level of 26 cities in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2001 to 2016, this paper analyses and identifies the urban coordination relationship by using the methods of social network and multi-dimensional-scaling, and explores its internal evolution mechanism. The results show that: (1) With the improvement of the urbanization coordination level of the cities in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration, the internal space of the urban agglomeration is obviously changed. The high coordination cities gradually show a Z-shaped distribution with Shanghai as the core, and the low coordination cities were stably distributed in the expanded area of the urban agglomeration. (2) According to the correlation strength of the coordination level of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration, the cohesive subgroups were divided. The values of weighted average centrality and the contact density of the cohesive subgroups of the urbanization coordination relationship increased, and the polarization effect of Shanghai was more obvious. (3) The coordination structure of the urban agglomeration was identified from two dimensions of space and time. The Yangtze River Delta Urban Agglomeration has transformed from the "circle layer" structure centered on the provincial capital cities under the influence of spatial distance into the structure of "core-periphery" under the influence of temporal distance. (4) The evolution of spatial structure of the urban agglomeration was influenced by the change of coordination level of population, land and economy urbanization. Compared with population and economy urbanization, land urbanization has a significant role in promoting the level of urban coordination. The optimizing policies of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration were proposed from the perspective of coordination after analyses of its spatial structure. This is conducive to the realization of the integration of urban agglomeration and the efficient use of space resources under the conditions of China's existing resource and environmental carrying capacity.

Keywords: urbanization coordination; network spatial structure; multidimensional scaling deformation; Yangtze River Delta Urban Agglomeration