长三角城市群城市韧性与创新效率耦合协调时空演化分析

吴 澎，周雅乐

（安徽大学商学院，合肥 230601）

摘要：在全球气候变化加剧与经济不确定性增加的背景下，提升城市群韧性与创新效率的协同发展对推动区域高质量发展具有重要意义。基于 2015—2023 年长三角城市群 27 个城市的多源数据，构建涵盖经济、社会、生态、基础设施维度的城市韧性评价体系与包含创新投入、产出维度的创新效率评价体系，采用 CRITIC 赋权法、超效率 SBM 模型与耦合协调模型，系统分析二者的时空演化特征及协同机制。结果表明：城市韧性呈现“多极引领、梯度扩散”的时空特征，区域差异逐步缩小；创新效率呈 N 形波动趋势，空间格局由单核集聚演变为多中心联动；耦合协调度显著提升，形成“双高值中心＋沿江协调带”的层级化格局，发展重心向东南方向迁移。研究结果可为长三角高质量一体化发展提供韧性-创新协同发展的科学依据。

关键词：长三角城市群；城市韧性；创新效率；耦合协调；超效率 SBM 模型

中图分类号：F127；F062.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)16－0182－12

近年来，全球气候变化的加剧与经济不确定性的增加对城市群可持续发展提出了严峻挑战。城市群作为国家经济发展的核心载体，其抗风险能力与创新效率的协同提升成为破解发展难题的关键。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出“开展城市现代化试点示范，建设宜居、创新、智慧、绿色、人文、韧性城市”的战略要求[1]。此外，《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》也进一步强调建设“具有全球影响力的科技产业创新中心”的目标[2]。城市韧性是指城市应对外部冲击时快速恢复并实现转型的综合能力，而创新效率则衡量科技创新资源的配置与转化效果[3]。二者协同作用不仅能够增强城市抵御风险的能力，还能通过创新驱动实现高质量发展。

然而，现有研究多将城市韧性体系与创新生态系统分别探讨，较少关注二者在城市群尺度上的时空耦合机制。尤其是长三角这类超大城市群，在面对复杂风险挑战时，如何实现城市韧性与创新效率的系统协同，仍缺乏深入的实证探讨与机制揭示。基于此，本文采用基于指标间相关性的准则重要性（criteria importance through inter-criteria correlation，CRITIC）赋权法、超效率松弛变量测度（slack-based model，SBM）模型与耦合协调模型试图研究：在长三角城市群中，城市韧性水平与创新效率之间是否存在耦合协调关系？其时空演化特征如何？研究结论不仅有助于揭示韧性—创新协同发展的内在机理，还能为超大城市群统筹安全与发展、推进高质量一体化提供政策参考，对区域一体化进程具有决定性意义[4-5]。

1 文献综述

在城市韧性方面，学者普遍关注其时空演进特征与影响因素。焦柳丹等[6]发现中国城市韧性呈 N 形波动，区域差异显著；伍文生等[7]揭示了五大城市群韧性“东高西低”的空间格局；胡雨晨等[8]构建了基于工程韧性理论的评估流程。这些研究为韧性测度提供了方法论基础，但多聚焦于韧性本身的描述，未将其与创新效率等系统进行联动分析。

在创新效率研究方面，曾鹏等[3]基于三阶段数据包络分析（data envelopment analysis，DEA）模型发现中国城市群创新效率呈波浪式上升且空间分布不均衡；张翼等[9]发现东部地区城市创新效率的

收稿日期：2026-04-14

基金项目：安徽省哲学社会科学规划项目（AHSKQ2020D10）

作者简介：吴澎（1990—）男，安徽宿州人，博士，副教授，研究方向为决策评价、区域经济与政策；周雅乐（2005—）女，安徽合肥人，硕士研究生，研究方向为决策评价、区域经济与政策。

均衡化趋势强于中西部地区；史焱文等[10]采用三阶段 DEA 模型对中原城市群的城市创新效率进行综合分析；范玉凤等[11]基于超效率 SBM 模型分析了京津冀城市群创新效率。这些研究揭示了创新效率的时空规律，但同样局限于单一系统，未能探讨创新效率与城市其他功能（如韧性）的协同关系。

在韧性与创新的耦合研究方面，刘海龙等[12]对京津冀的研究采用地理探测器识别影响因素。彭坤杰等[4]分析了长三角“科技创新-经济韧性”双系统的耦合协调。邹蔚等[5]聚焦长三角，发现耦合协调度存在“东高西低”的空间格局，但指出科技创新滞后现象突出。

这些研究已初步揭示了两系统的耦合关系，但仍存在以下共同局限：多数成果聚焦单一系统的静态分析，未能充分揭示城市韧性与创新效率的动态交互机制；针对政策干预效应的动态评估不足，难以反映区域一体化战略对韧性—创新协同发展的实际影响。

基于此，本文旨在回答以下核心问题：长三角城市群城市韧性与创新效率的耦合协调呈现怎样的时空演化特征？其空间格局的形成受哪些因素驱动？为此，本文基于 2015—2023 年长三角城市群面板数据，从时空角度系统分析了长三角城市群尺度下韧性-创新系统的协同演化规律。具体而言，本文研究主要聚焦于以下三个方面：一是进一步纳入了社会韧性与基础设施韧性，更全面地刻画城市韧性的多维构成，并采用 CRITIC 赋权法量化各维度的权重；二是聚焦城市群尺度，采用超效率 SBM 模型量化了重心迁移轨迹，揭示了协调发展重心的动态过程；三是采用耦合协调模型分析了长三角城市群城市韧性与创新效率耦合协调时空演化规律。

2　研究设计

2.1　研究区概况与数据来源

作为中国经济领域活力突出、开放程度领先、创新能力顶尖的区域代表，长三角城市群凭借独特的地理区位和发展特征，成为研究城市韧性与创新效率耦合协调的典型样本。该区域以上海为核心，涵盖江苏、浙江、安徽三省共 27 个城市，形成了“一核多极”的空间格局。长三角地区以占全国 2.2% 的国土面积，贡献了全国近四分之一的 GDP，其经济密度和创新强度均位居全国前列。区域内以上海、杭州、合肥为代表的“科创金三角”已初步形成，而沿江沿海城市带则构成了创新要素流动的重要通道。同时，区域内发展不平衡问题依然突出，皖南地区在基础设施和创新资源方面与核心区存在显著差距。这种“核心-边缘”并存的空间特征，为探究城市韧性与创新效率的协同演化机制提供了理想的研究场景。

长三角城市群的城市韧性和创新效率指标数据，主要来源于 2015—2023 年的《中国城市统计年鉴》、各省份统计年鉴、各省份《科技统计年鉴》《科技经费投入统计公报》。对于少量获取难度较大的指标，如人均地方财政收入，使用人均一般公共预算收入代替。而长三角城市群地级市范围数据筛选自中国科学院资源环境科学数据中心（https://www.resdc.cn/Default.aspx）。

2.2　长三角城市群城市韧性与创新效率评价指标体系构建

城市韧性是指城市系统在面临外部冲击时保持基本功能、快速恢复并实现转型发展的综合能力，其评价涵盖经济、社会、生态和基础设施等多维属性。参考已有研究[7]，本文构建的长三角城市群城市韧性评价体系，包含经济韧性、社会韧性、生态韧性、基础设施韧性 4 个一级指标维度，以及人均 GDP、道路网密度等 14 个二级指标维度。创新效率反映区域创新资源配置与成果转化的有效性。围绕构建长三角城市群创新效率评价指标体系，选取科技创新投入和产出作为一级指标，涵盖 R&D 人员全时当量、技术市场合同成交额等 4 个二级指标。在此基础上，形成了城市韧性与创新效率评价指标体系。如表 1 所示。

表 1　长三角城市群城市韧性与创新效率评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标	单位	指标方向
城市韧性	经济韧性	人均 GDP	元/人	+
		人均地方财政收入	元/人	+
		第三产业占 GDP 比例	%	+
		全社会固定资产投资额	万元	+
	社会韧性	人口自然增长率	‰	+
		在岗职工平均工资	元	+
		城镇化率	%	+
		社会消费品零售总额	万元	+
	生态韧性	建成区绿地覆盖率	%	+
		污水处理率	%	+
	基础设施韧性	人均医疗机构床位数	张	+
		医疗机构数	个	+
		中小学学校数量	个	+
		道路网密度	km/km^2	+
创新效率	创新投入	R&D 人员全时当量	人年	+
		一般公共预算科学支出	万元	+
	创新产出	专利申请数	件	+
		技术市场合同成交额	万元	+

注：“+”表示正向指标，数值越大表示水平越高。

其中，“中小学学校数量”指标的理论依据在于：基础教育设施是城市维持社会秩序和家庭功能正常运转的公共服务基础。Martin 和 Sunley[14]的路径依赖理论指出，区域应对冲击的适应能力依赖于其制度基础设施的完善程度，学校作为人力资本再生产的核心场所，其空间分布密度直接影响危机时期的社会恢复能力。钟紫蓝等[13]也将公共服务设施和社区条件纳入城市韧性评价体系。因此，将“中小学学校数量”作为基础设施韧性的二级指标，反映城市基础教育资源的配置水平及其对长期社会稳定的支撑作用。

“人口自然增长率”反映城市人口的自我维持能力，是衡量社会系统“更新能力”的重要维度。根据 Holling 的工程韧性理论，系统的再生与更新能力是韧性的核心组成部分[13]。彭坤杰等[4]发现人口集聚是影响韧性-创新耦合协调的重要因素。因此，将人口自然增长率纳入社会韧性维度。需要说明的是，对于人口负增长但依靠外来人口补充的城市（如部分长三角核心城市），其净流入人口已通过“城镇化率”“社会消费品零售总额”等指标间接反映。

为检验本文指标选择的稳健性，参考曾鹏等[3]、邹蔚等[5]的做法，在指标体系构建上遵循“多维覆盖、数据可得、理论支撑”三原则。对于“中小学学校数量”和“人口自然增长率”两个争议指标，在剔除后重新计算韧性指数，结果表明与原有指数的相关系数分别为 0.94、0.89（$P<0.01$），说明本文核心结论对这两个指标不敏感。

2.3　研究方法

通过多指标加权求和法计算各城市韧性指数。首先，对原始数据进行极差标准化处理。其次，采用 CRITIC 客观赋权法确定指标权重。最后，通过加权求和的方式计算得到各城市的韧性指数 U_1。

$$U_1 = \sum_{j=1}^{n} w_j x_{ij}^{*} \tag{1}$$

式中：w_j 为采用客观赋权法 CRITIC 确定的指标权重；x_{ij}^{*} 为对原始数据进行标准化处理后的结果。采用该方法可以综合评估指标的变异性和冲突性，避免主观评价给评价结果造成偏差。CRITIC 法相比传统指标权重确定方法，能够更全面地捕捉指标间的竞争与互补关系，尤其适用于长三角城市群这类高度复杂、指标间关联性显著的区域系统研究。

如表 2 所示，道路网密度（11.38%）和全社会固定资产投资额（10.45%）贡献最大，反映交通基础设施和经济投资能力是长三角城市韧性的核心支撑；社会消费品零售总额（9.51%）位居第三，体现市场规模的重要性；人口自然增长率（3.64%）和污水处理率（3.85%）权重较低，说明这些指标在长三角城市间的区分度有限。

表 2　长三角城市群城市韧性各指标 CRITIC 权重结果

一级指标	二级指标	权重/%
经济韧性	人均 GDP	8.42
	人均地方财政收入	7.07
	第三产业占 GDP 比例	5.04
	全社会固定资产投资额	10.45
社会韧性	人口自然增长率	3.64
	在岗职工平均工资	5.82
	城镇化率	6.76
	社会消费品零售总额	9.51
生态韧性	建成区绿地覆盖率	4.16
	污水处理率	3.85
基础设施韧性	人均医疗机构床位数	5.09
	医疗机构数	6.24
	中小学学校数量	4.57
	道路网密度	11.38

采用超效率 SBM 模型测度长三角城市群创新效率水平。通过引入松弛变量，同时考虑投入和产出的改进潜力，从而克服传统 DEA 模型的局限性。具体测算如下。

$$\min\rho = \frac{1-\frac{1}{m}\sum_{i-1}^{m}\frac{s_i^-}{x_{ik}}}{1+\frac{1}{s}\sum_{r-1}^{s}\frac{s_r^+}{y_{rk}}}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_{j=1,j\neq k}^{n} x_{ij}\lambda_j - s_i^- = x_{ik}, & i=1,2,\cdots,m,\\ \sum_{j=1,j\neq k}^{n} y_{rj}\lambda_j + s_i^+ = y_{rk}, & r=1,2,\cdots,s,\\ \lambda_j \geqslant 0, & j=1,2,\cdots,N,\\ s_i^- \geqslant 0, & s_r^+ \geqslant 0\end{cases} \tag{2}$$

式中：ρ 为效率值；x_{ik}、y_{rk} 分别为第 k 个决策单元的投入和产出；s_i^-、s_r^+ 为松弛变量；λ_j 为权重系数。

需要说明的是，受限于地级市层面数据可得性，创新效率指标采用专利申请数和技术市场合同成交额。参考曾鹏等[3]的做法，专利申请数更能反映创新活动的活跃度；技术市场合同成交额直接反映创新成果的市场化转化能力。对 R&D 人员全时当量与科学支出进行的相关性检验显示，Pearson 相关系数为 0.68，方差膨胀因子（VIF）为 3.42，低于临界值 10，表明不存在严重的多重共线性问题。

为衡量城市韧性与创新效率的协同发展程度,采用耦合协调度模型进行量化测算。具体计算公式为

$$C = 2\sqrt{\frac{U_1U_2}{(U_1+U_2)^2}} \tag{3}$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \tag{4}$$

$$D = \sqrt{CT} \tag{5}$$

式中:U_1 为城市韧性指数;U_2 为创新效率得分;C 为耦合度,取值范围[0,1];T 为协调指数,反映两系统的整体发展水平;D 为耦合协调度,综合评估两系统的协调发展状态。耦合协调度越高的地区,表明其城市发展与科技创新形成了良性互动;而低值区域需有针对性地优化资源配置,促进两系统协调发展。

3　结果分析

3.1　长三角城市群城市韧性时空演变特征分析

根据2015—2023年长三角27个中心城市的韧性指数计算结果,使用QGIS desktop 3.40.5,通过自然断点法对城市韧性指数由高到低划分为高度韧性、较高度韧性、中度韧性、较低度韧性、低度韧性五个等级。

3.1.1　时间演变特征

根据2015—2023年长三角城市群韧性指数计算结果(表2和表3),韧性水平总体呈上升趋势,均值从2015年的0.390增长至2023年的0.426,年均增长2.8%。

具体而言,2015—2017年,长三角城市群韧性水平呈现初步提升态势。高度韧性城市数量占比从7.41%增至11.11%,新增合肥进入该梯队,其人均GDP2017年突破9万元、第三产业占比增至59%是主要原因。较高韧性城市占比由18.52%升至22.22%,南京、苏州等城市凭借固定资产投资和城镇化发展保持领先。中度韧性城市数量稳定在14.81%,但绍兴等城市通过提升人均医疗机构床位

表2　2015—2023年长三角城市群城市韧性指数时序变化

城市	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年
上海	0.769	0.775	0.805	0.725	0.735	0.747	0.735	0.727	0.825
南京	0.599	0.620	0.604	0.531	0.589	0.637	0.582	0.565	0.623
无锡	0.550	0.525	0.509	0.463	0.552	0.543	0.456	0.606	0.587
常州	0.458	0.443	0.393	0.389	0.446	0.435	0.437	0.411	0.506
苏州	0.586	0.536	0.541	0.456	0.478	0.536	0.531	0.521	0.591
南通	0.393	0.384	0.367	0.384	0.341	0.344	0.342	0.340	0.437
扬州	0.364	0.331	0.316	0.300	0.307	0.315	0.299	0.275	0.318
镇江	0.342	0.311	0.273	0.274	0.278	0.314	0.325	0.322	0.345
盐城	0.351	0.311	0.282	0.241	0.276	0.299	0.317	0.245	0.306
泰州	0.270	0.259	0.259	0.250	0.281	0.275	0.281	0.279	0.295
杭州	0.650	0.669	0.647	0.615	0.673	0.685	0.626	0.621	0.713
宁波	0.514	0.495	0.557	0.461	0.475	0.518	0.536	0.531	0.563
温州	0.532	0.558	0.517	0.437	0.507	0.506	0.530	0.432	0.496
湖州	0.307	0.299	0.306	0.293	0.316	0.316	0.317	0.267	0.317
嘉兴	0.304	0.304	0.286	0.256	0.299	0.307	0.315	0.308	0.356
绍兴	0.363	0.383	0.384	0.349	0.377	0.406	0.423	0.379	0.452
金华	0.331	0.367	0.396	0.332	0.403	0.387	0.367	0.340	0.364
舟山	0.198	0.266	0.288	0.253	0.262	0.292	0.326	0.261	0.338
台州	0.328	0.330	0.388	0.366	0.355	0.303	0.342	0.292	0.357
合肥	0.592	0.555	0.595	0.542	0.569	0.573	0.528	0.548	0.581
芜湖	0.282	0.291	0.334	0.289	0.359	0.326	0.387	0.333	0.395
马鞍山	0.281	0.252	0.301	0.270	0.272	0.355	0.377	0.265	0.327
铜陵	0.267	0.256	0.269	0.191	0.268	0.270	0.267	0.216	0.288
安庆	0.293	0.242	0.308	0.183	0.217	0.245	0.336	0.198	0.276
滁州	0.255	0.230	0.240	0.188	0.335	0.239	0.264	0.228	0.329
池州	0.171	0.150	0.165	0.151	0.202	0.232	0.228	0.190	0.280
宣城	0.175	0.165	0.192	0.129	0.206	0.157	0.219	0.183	0.251

表3　2015—2023年长三角城市群城市韧性指数时序变化(均值)

韧性指数	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年
平均值	0.390	0.382	0.390	0.345	0.384	0.391	0.396	0.366	0.426

数(2017年增至0.005 2张/人)实现等级跃升。较低和低韧性城市占比分别下降至33.33%和18.52%,但皖南地区因道路网密度不足(<4 km/km²)仍集中在低韧性区间。

2018—2020年呈现波动调整特征。高度韧性城市占比稳定在11.11%,上海第三产业占比突破72%,巩固其领先地位。较高度韧性城市新增南通(固定资产投资增长12%),占比升至25.93%。中度韧性城市中,温州凭借社会消费品零售、第三产业发展实现跃升,该等级占比增至18.52%。较低韧性城市占比下降至29.63%,但马鞍山等城市因医疗机构数增长缓慢(年均增幅<3%)仍处该等级。低韧性城市占比微降至14.81%。

2021—2023年进入分化优化阶段。高度韧性城市占比达14.81%,杭州数字经济发展推动其持续领先。较高度韧性城市中,无锡通过工业技改投资保持优势,该等级占比稳定在25.93%。中度韧性城市新增嘉兴(城镇化率突破70%),占比升至22.22%。较低韧性城市占比27.78%,滁州等城市因道路网密度(4.6 km/km²)接近均值实现提升。低韧性城市占比降至9.26%,但池州因人均地方财政收入不足7 000元仍处末位。整体呈现"核心强化、边缘追赶"的演进特征。

3.1.2 空间分异格局

长三角城市群城市韧性呈现"多中心集聚、梯度扩散"的空间特征(图1),形成以上海、杭州、合肥为核心的"金三角"高值区,并向周边地区呈圈层式递减。

高度韧性城市(>0.6)集中分布于沿海地区(上海、杭州),其韧性指数超出区域均值85%以上,主要得益于突出的经济优势(人均GDP>12万元,第三产业占比>65%)和完善的基础设施(道路网密度>7 km/km²,人均医疗机构床位数>0.006张)。

较高度韧性城市(0.5~0.6)沿长江沿线分布(南京、苏州、宁波等),形成弓形高值带,这些城市凭借较强的财政实力(人均地方财政收入>1.5万元)和城镇化水平(>74%)保持较高韧性。

中度韧性城市(0.4~0.5)主要分布在苏南和浙北地区,围绕高值区呈环状分布,其经济指标和公共服务处于中等水平。

较低和低韧性城市(<0.4)集中在皖南地区,形成连片低值区,这些城市受限于经济基础薄弱(人均GDP<7万元)、基础设施不足(道路网密度<4 km/km²)和公共服务资源匮乏(人均医疗机构床位数<0.006张)。值得注意的是,沿海城市(如南通、温州)通过提升固定资产投资和城镇化率,韧性水平显著提高,逐步向较高韧性城市靠拢。

3.2 创新效率时空演变

使用QGIS desktop 3.40.5,通过自然断点法对长三角27个中心城市的创新效率进行分级,按从高到低的顺序将其划分为高效率、较高效率、中效率、较低效率、低效率五个类型。

3.2.1 创新效率时序演变特征

根据2015—2023年长三角城市群韧性指数计算结果(表4和表5),创新效率呈"N形波动"趋势,均值从0.423升至0.527。

具体来说,2015—2017年为调整波动期。高效率城市占比从14.81%降至11.11%,南通因R&D人员全时当量减少(-103%)导致效率下降;较高效率城市中绍兴技术市场合同成交额下降32%,致使其占比减少。这一时期效率波动主要源于科研投入(R&D人员、科学支出)与产出(专利申请、技术合同)的阶段性失衡。

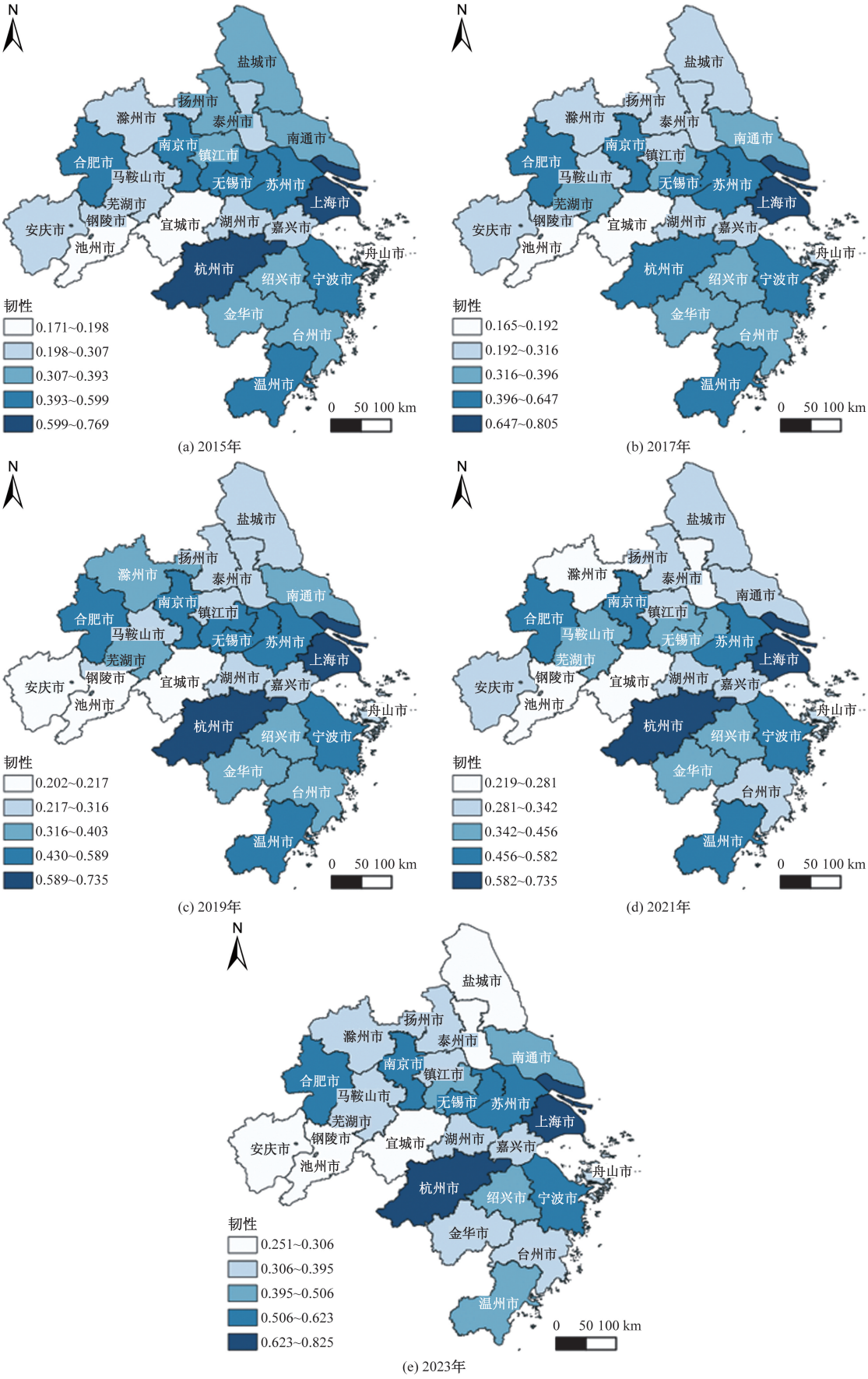
2018—2020年为快速提升期。高效率城市占比回升至18.52%,泰州通过增加科学支出(2019年增长17%)带动技术合同成交额增长26%;中效率城市中苏州专利申请数增长27%,推动效率提升。效率提升主要得益于研发投入加大与成果转化增强。

2021—2023年为结构优化期。高效率城市占比稳定在22.22%,马鞍山通过优化R&D人员配置实现效率跃升;低效率城市占比降至14.81%,但铜陵因科学支出不足(低于均值)仍处于低位。效率提升依赖于研发资源配置优化与创新产出质量提高。

3.2.2 创新效率空间分异特征

长三角城市群创新效率呈现"东高西低、多中心集聚"的总体格局(图2),高效率区(>0.7)的空间范围呈扩大趋势,主要集中在东部地区和沿海地区,低效率区(<0.3)范围不断缩小,主要集中在皖南山区。

高效率区(>0.7)主要分布在沿江沿海城市带,以上海、苏州、杭州为核心向外辐射。这些城市凭借雄厚的科研投入(R&D人员全时当量超4万人年)和持续的科学支出(年均50亿元以上),实现了专利申请量(年均3万件)和技术交易额(超50亿元)的快速增长。南通(0.803→0.901)通过承接上海研发资源,温州(1.179→0.596)则依托民营经济活力实现跃升。



审图号:GS(2020)3189 号

图 1　典型年份长三角城市群城市韧性空间格局

表 4　2015—2023 年长三角城市群创新效率时序变化

城市	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
上海	0.178	0.156	0.200	0.170	0.235	0.204	0.317	0.319
南京	0.669	0.530	0.368	0.360	0.448	0.341	0.444	0.356
无锡	0.979	1.343	0.369	0.297	0.444	0.451	0.543	0.494
常州	1.067	1.073	1.623	1.402	0.445	1.008	0.595	0.518
苏州	0.589	0.445	0.280	0.220	0.508	0.319	0.190	0.413
南通	0.504	0.741	1.318	1.506	0.615	0.571	0.656	0.901
扬州	0.222	0.271	0.293	0.275	0.698	1.043	1.077	1.100
镇江	0.856	0.682	0.602	0.315	0.535	0.517	0.806	1.168
盐城	0.335	0.408	0.544	1.060	0.701	0.544	0.552	0.742
泰州	0.887	1.036	0.909	1.057	1.222	1.380	1.290	1.017
杭州	0.122	0.194	0.228	0.237	0.362	0.290	0.412	0.360
宁波	0.179	0.166	0.300	0.170	0.264	0.215	0.239	0.269
温州	1.179	1.251	1.136	1.200	1.298	0.684	1.112	0.596
湖州	0.321	0.208	0.364	0.296	0.319	0.277	0.331	0.309
嘉兴	0.257	0.218	0.350	1.022	0.794	0.585	1.051	1.030
绍兴	1.351	1.027	1.338	0.260	0.365	0.488	0.452	0.459
金华	0.082	0.116	0.169	0.141	0.294	0.344	1.010	0.342
舟山	0.092	0.075	0.100	0.093	0.120	0.092	0.145	0.143
台州	0.097	0.279	0.349	0.218	0.241	0.297	0.375	0.392
合肥	0.248	0.153	0.225	0.168	0.217	0.124	0.218	0.263
芜湖	0.262	0.221	0.221	0.256	0.259	0.232	0.394	1.007
马鞍山	0.180	0.147	0.134	0.133	0.271	1.069	1.190	0.442
铜陵	0.089	0.054	0.066	0.136	0.127	0.118	0.165	0.206
安庆	0.210	0.214	0.147	0.089	0.143	0.180	0.254	0.273
滁州	0.105	0.132	0.127	0.120	0.223	0.182	0.354	0.384
池州	0.170	0.236	0.223	0.194	0.243	0.284	0.418	1.315
宣城	0.201	0.185	0.133	0.123	0.141	0.124	0.195	0.204

表 5　2015—2023 年长三角城市群创新效率时序变化(均值)

变量	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
创新效率均值	0.423	0.428	0.449	0.427	0.427	0.443	0.547	0.556	0.527

较高效率区(0.5～0.7)环绕核心区呈带状分布,包括南京、宁波等次中心城市。泰州(0.887→1.380)依托医药产业集群优化创新资源配置,实现快速增长。该区域 2018 年后扩张明显,反映出创新要素的扩散效应。

中效率区(0.3～0.5)呈现“点状突破”特征,合肥、芜湖等城市虽然科学支出接近区域均值(约 50 亿元),但受 R&D 人员配置效率较低制约,创新产出相对有限。2021 年,马鞍山(0.180→1.190)通过产业链协同实现跨越式发展,由低效率区转换为高效率区。

较低效率区(0.2～0.3)和低效率区(＜0.2)主要集中在皖南地区,形成连片低值区。这些城市面临科研投入不足(R&D 人员＜1 万人年)和创新产出薄弱(专利申请＜5000 件)的双重制约。但池州(0.170→1.315)等城市通过政策扶持实现了显著提升。

3.3　城市韧性与创新效率耦合协调的时空格局演变

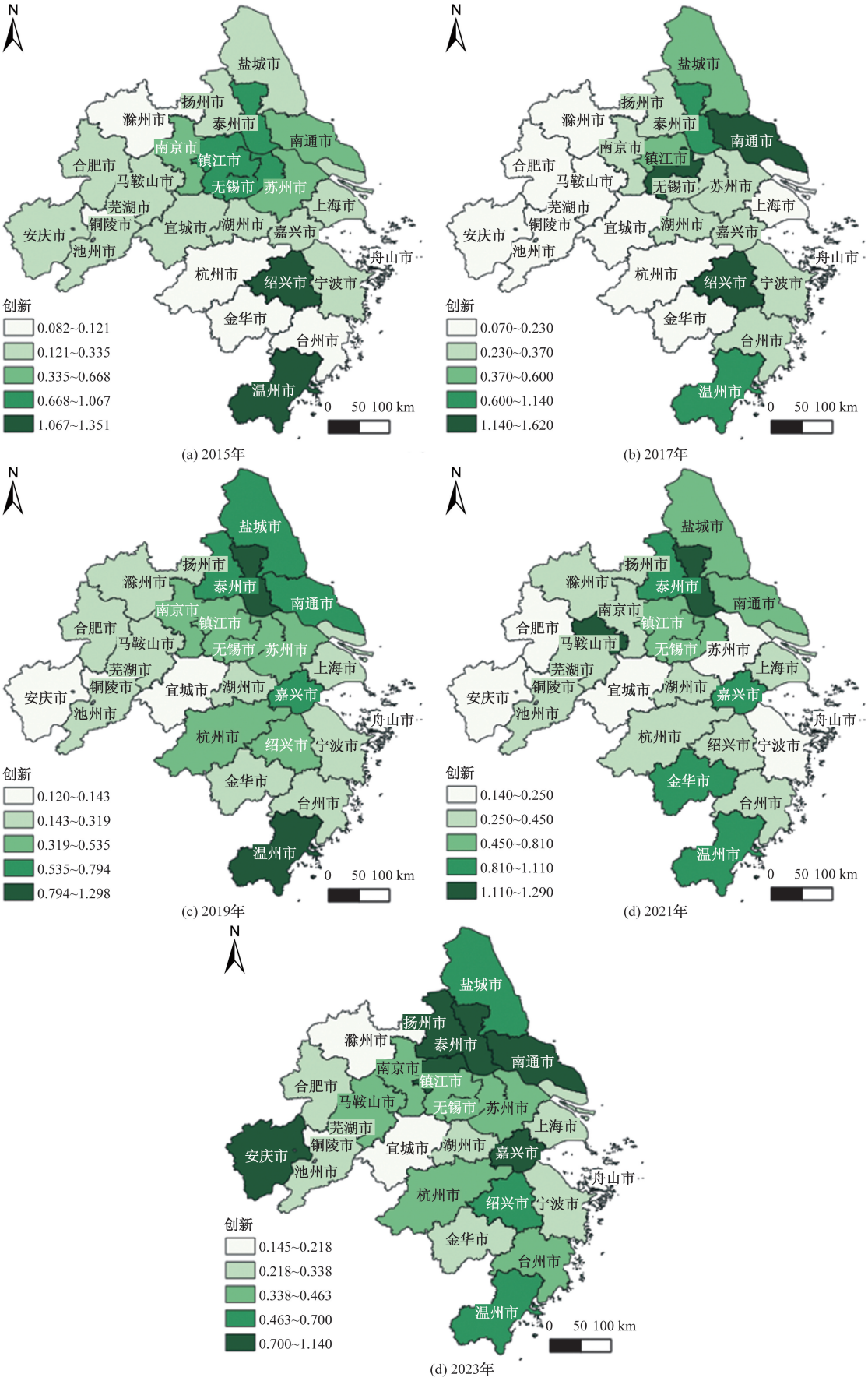
采用自然断点法分级,将长三角 27 个中心城市的城市韧性与创新效率耦合协调度由高到低划分为高度协调、良好协调、中级协调、初级协调、勉强协调、濒临失调 6 个类型[1]。

3.3.1　耦合协调时序特征

2015—2023 年长三角城市群耦合协调度总体呈上升趋势,均值从 0.573 提升至 0.673,协调等级由初级协调向中级协调演进(表 6 和表 7),城市韧性与创新效率的协同发展水平持续提高。

具体来看,2015—2017 年,协调度均值从 0.573 升至 0.598。高度协调城市数量保持稳定,无锡凭借第三产业占比突破 65%和持续的技术市场交易保持领先地位。良好协调城市中,杭州通过优化 R&D 人员配置实现了协调等级提升。中级协调城市占比提升至 29.63%,但皖南地区受基础设施和科研投入制约,仍集中在初级及以下协调等级。

2018—2020 年,协调度均值增至 0.651。高度协调城市向沿江地区扩展,南通通过固定资产投资增长和城镇化水平提升实现显著跃升。良好协调城



审图号:GS(2020)3189 号

图 2　典型年份长三角城市群创新效率空间格局

表 6　2015—2023 年长三角城市群城市韧性与创新效率的耦合协调度时序变化

城市	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
上海	0.608	0.590	0.633	0.592	0.644	0.625	0.695	0.694	0.689
南京	0.795	0.757	0.687	0.661	0.716	0.683	0.713	0.670	0.704
无锡	0.857	0.916	0.658	0.609	0.704	0.704	0.706	0.740	0.722
常州	0.836	0.830	0.894	0.859	0.667	0.814	0.714	0.680	0.667
苏州	0.767	0.699	0.624	0.563	0.702	0.643	0.564	0.681	0.702
南通	0.667	0.730	0.834	0.872	0.677	0.665	0.688	0.744	0.840
扬州	0.533	0.547	0.551	0.536	0.680	0.757	0.753	0.742	0.759
镇江	0.735	0.679	0.637	0.542	0.621	0.635	0.715	0.783	0.791
盐城	0.586	0.597	0.626	0.711	0.663	0.635	0.647	0.653	0.680
泰州	0.700	0.720	0.697	0.717	0.765	0.785	0.776	0.730	0.751
杭州	0.530	0.600	0.620	0.618	0.703	0.668	0.713	0.687	0.732
宁波	0.551	0.536	0.639	0.529	0.595	0.578	0.598	0.615	0.651
温州	0.890	0.914	0.875	0.851	0.901	0.767	0.876	0.712	0.756
湖州	0.560	0.499	0.578	0.543	0.563	0.544	0.569	0.536	0.554
嘉兴	0.529	0.508	0.562	0.715	0.698	0.651	0.759	0.750	0.797
绍兴	0.837	0.792	0.846	0.549	0.609	0.667	0.661	0.646	0.702
金华	0.406	0.455	0.508	0.465	0.587	0.604	0.780	0.584	0.592
舟山	0.368	0.376	0.412	0.391	0.421	0.405	0.466	0.440	0.471
台州	0.422	0.551	0.607	0.531	0.541	0.548	0.599	0.581	0.601
合肥	0.619	0.539	0.605	0.549	0.593	0.517	0.582	0.616	0.620
芜湖	0.522	0.504	0.522	0.521	0.552	0.524	0.625	0.761	0.651
马鞍山	0.474	0.439	0.448	0.435	0.521	0.785	0.819	0.585	0.605
铜陵	0.393	0.343	0.365	0.401	0.430	0.423	0.458	0.459	0.483
安庆	0.498	0.477	0.461	0.357	0.420	0.458	0.541	0.483	0.726
滁州	0.405	0.418	0.417	0.387	0.523	0.457	0.553	0.544	0.517
池州	0.413	0.434	0.438	0.414	0.471	0.507	0.555	0.707	0.531
宣城	0.433	0.418	0.400	0.355	0.413	0.373	0.455	0.440	0.465

表 7　2015—2023 年长三角城市群城市韧性与创新效率的耦合协调度时序变化(均值)

变量	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
耦合协调度均值	0.590	0.588	0.598	0.566	0.607	0.608	0.651	0.639	0.658

市中,泰州依托医药产业集群发展迅速提升协调水平。合肥通过专利申请量的大幅增长成功进入中级协调城市行列。

2021—2023 年,协调度进一步提升至 0.673。高度协调城市呈现多中心发展格局,马鞍山通过工业技术改造实现协调水平突破。良好协调城市持续增加,嘉兴凭借数字经济发展取得明显进展。但部分城市如宁波受技术转化效率限制,协调等级提升相对缓慢,皖南地区城市虽在生态环境方面表现突出,但因创新产出不足仍处于较低协调等级。

3.3.2　耦合协调空间格局演变特征

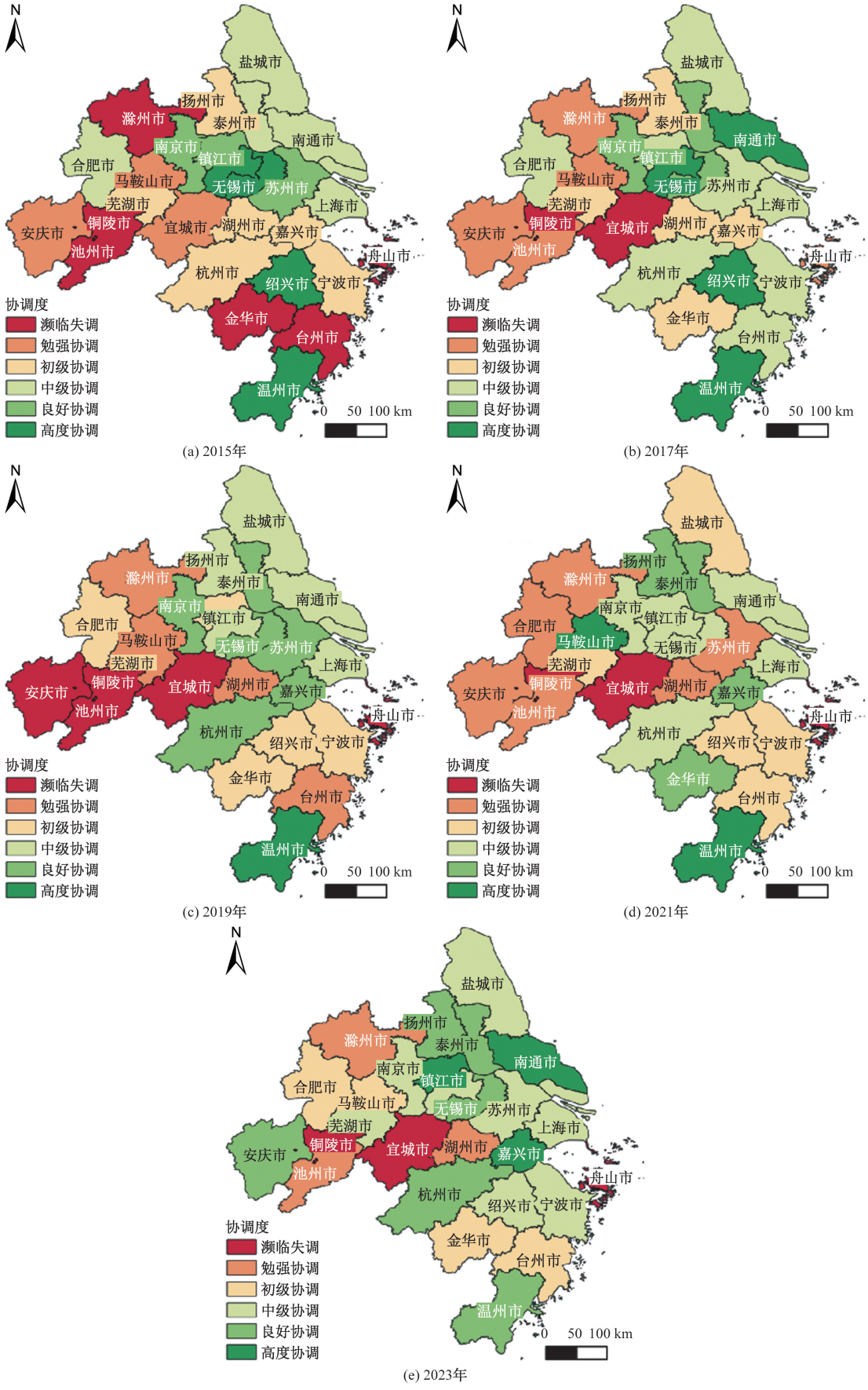
长三角城市群耦合协调度的空间格局整体呈现“多中心协同、梯度扩散”的分布特征(图 3),形成以上海、杭州、合肥为核心,沿江沿海为高值带的层级化结构。2015—2023 年,高度协调区范围显著扩大,皖南等边缘区域协调度提升但差距仍存。

高度协调区(0.80～1.00)主要分布在沿江沿海城市。南通协调度从 0.667 提升至 0.840,得益于产业承接带来的创新效率提升;温州虽从 0.890 波动至 0.756,但始终保持高位,源于其民营经济优势。

良好协调区(0.70～0.79)沿长江沿线集聚。南京协调度稳定在 0.70 左右,得益于科教资源优势;泰州从 0.700 升至 0.751,医药产业集群发展成效显著。

中级协调区(0.60～0.69)以上海、杭州、合肥为核心。上海协调度从 0.608 增至 0.689,但超大城市治理压力限制其进一步提升;杭州从 0.530 升至 0.732,数字经济成为主要驱动力。

初级及以下协调区(≤0.59)主要集中在皖南地区。宁波协调度从 0.551 提升至 0.651,但港航经济优势尚未充分发挥;宣城从 0.433 微增至 0.465,创新资源不足制约其发展。



审图号:GS(2020)3189 号

图 3　典型年份长三角城市群城市韧性与创新效率的耦合协调度空间格局

4 结论

本文基于2015—2023年长三角城市群韧性、创新效率及耦合协调度的实证分析，得出以下结论。

(1)城市韧性呈现“多极引领、梯度扩散”的时空特征。2015—2023年，长三角城市韧性水平稳定增长。以上海、杭州、合肥为核心形成“科创金三角”引领格局，南京-苏州-宁波构成沿江韧性带，而皖南地区与核心区差距显著。2018年后区域差异逐步缩小，表明一体化政策正在发挥作用。

(2)创新效率呈现“N形波动、多中心跃升”趋势。研究初期单核集聚特征明显，至2023年已形成多中心联动的“弓箭形”空间构型。南通、温州等高效率区和沿江高值创新带的形成，反映出创新要素的跨区域流动正在加强。但与此同时，皖南和部分沿海城市仍存在创新资源短板。

(3)耦合协调度形成“核心引领、圈层扩散”格局。耦合协调度均值从0.573升至0.673，空间上形成了层级化的空间格局。南通-温州“双高值中心”与沿江“良好协调带”共同构成了协调发展的主体框架。重心迁移轨迹显示，协调发展重心在研究期内向东南方向移动(总位移86.5 km)。这一量化结果的意义在于：向东南移动表明浙南地区(杭州、温州等)的协调发展增速快于苏南；2018年后重心加速向东南移动，与《长三角一体化发展规划纲要》实施时间吻合，表明一体化政策对浙南的边际效应更强。

依据上述研究结论，进一步提出相应发展建议。对于协调度较低区域，如皖南低值区，地理距离构成硬约束，优先改善交通可达性(如推进与合肥、杭州的城际铁路建设)，同时激活本地民营经济。对沿江中等协调带，市场联动基础良好，深化G60科创走廊的产业链分工，降低行政壁垒对要素流动的摩擦。对协调度高值区，政府治理面临瓶颈，上海可借鉴东京经验向周边疏解非核心功能，通过“同城化”通勤网络换取韧性提升空间。

参考文献

[1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13)[2026-04-09]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

[2] 长江三角洲区域一体化发展规划纲要[EB/OL]. (2019-12-01)[2026-04-09]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-12/01/content_5457442.htm.

[3] 曾鹏，黄晶秋，魏旭. 中国城市群科技创新资源配置效率的时空演变及发展曲线模拟[J]. 地理科学，2022，42(12)：2189-2197.

[4] 彭坤杰，张萌，许春晓. 科技创新与经济韧性耦合协调度及驱动因素分析——基于长三角地区的实证[J]. 地理与地理信息科学，2024，40(6)：118-125.

[5] 邹蔚，王兴宇，万凤娇，等. 城市韧性与科技创新水平耦合协调发展研究——以长三角城市群为例[J]. 生态经济，2024，40(1)：78-87.

[6] 焦柳丹，谭琪麟，张羽，等. 中国五大城市群韧性水平区域差异与时空演进研究[J]. 长江流域资源与环境，2024，33(12)：2577-2590.

[7] 伍文生，胡艳，朱晓莉. 长江经济带科技创新、经济发展与生态环境的耦合协调及时空演化[J]. 统计与决策，2024，40(23)：132-137.

[8] 胡雨晨，张梦琳，毛义华，等. 基于多灾害的城市韧性评估及应用研究[J]. 城市发展研究，2024，31(2)：35-43.

[9] 张翼，王艺萌，郑兴无. 中国城市科技创新效率测度、时空演进与差异分析[J]. 科技管理研究，2024，44(5)：1-13.

[10] 史焱文，陈强，陈婉钰，等. 城市创新效率与高质量发展水平测度及时空耦合分析——以中原城市群30个地级市为例[J]. 统计与决策，2024，40(5)：116-120.

[11] 范玉凤，马宇博，于瑞卿. 京津冀城市群创新效率与高质量发展水平测度及耦合协调分析[J]. 统计与决策，2023，39(22)：128-133.

[12] 刘海龙，安芷萱，王焕珂，等. 京津冀城市群县域城市韧性与创新效率耦合协调时空演变及影响因素的空间异质性[J]. 地理研究，2025，44(2)：577-602.

[13] 钟紫蓝，齐娜娜，缪惠全，等. 基于ReCOVER体系的我国城市韧性演进特征分析[J]. 自然灾害学报，2024，33(1)：19-29.

[14] MARTIN R，SUNLEY P. Path dependence and regional economic evolution[J]. Journal of Economic Geography，2006，6(4)：395-437.

Spatiotemporal Evolution Analysis of the Coupling Coordination between Urban Resilience and Innovation Efficiency in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration

WU Peng, ZHOU Yale

(School of Business, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Against the backdrop of intensifying global climate change and increasing economic uncertainty, enhancing the synergistic development of urban resilience and innovation efficiency in urban agglomerations is of great significance for promoting regional high-quality development. Based on multi-source data from 27 cities in the Yangtze River Delta urban agglomeration from 2015 to 2023, an urban resilience evaluation system was constructed covering economic, social, ecological and infrastructure dimensions, as well as an innovation efficiency evaluation system encompassing innovation input and output dimensions. Using the CRITIC weighting method, the super-efficiency SBM model and the coupling coordination model, the spatiotemporal evolution characteristics and synergistic mechanisms between the two systems were systematically analyzed. The results are as follows. Urban resilience exhibits spatiotemporal characteristics of "multi-polar leadership and gradient diffusion" with regional disparities gradually narrowing. Innovation efficiency shows an "N-shaped" fluctuating trend, with the spatial pattern evolving from single-core agglomeration to multi-center linkage. The coupling coordination degree has significantly improved, forming a hierarchical pattern of "dual high-value centers+riverside coordination belt" with the development gravity center shifting southeastward. The findings provide a scientific basis for the synergistic development of resilience and innovation in the high-quality integration of the Yangtze River Delta.

Keywords: Yangtze River Delta urban agglomeration; urban resilience; innovation efficiency; coupling coordination; super-efficiency SBM model