长三角城市群科技创新、经济增长与生态环境的时空耦合及趋势预测[1]

徐小鹰 田煞煞

(中南民族大学经济学院，湖北 武汉 430074)

【摘 要】：在梳理耦合跃迁机理的基础上，构建了科技创新、经济增长与生态环境三系统的评价指标体系，凭借熵值法、耦合协调度模型、空间重心模型与 GM(1，1) 灰色预测模型，科学测算与分析了 2006 ～ 2019 年长三角城市群科技创新、经济增长与生态环境三系统之间的时空耦合特征及其未来演变趋势。研究表明：(1) 科技创新、经济增长和与生态环境各系统综合水平发展情况总体向好；(2) 三系统耦合协调水平呈平稳上升态势，整体实现了由失调衰退状态向协调发展状态的转变，但在空间分布上存在不平衡，呈“中心—边缘”与“Z 字型” 分布特征；(3) 长三角城市群高科技创新水平、高经济发展水平与高生态环境水平城市的空间错位分布特征显著，其中科技创新与经济增长的空间匹配程度最优，但在经历前期快速融合后，现面临难以继续深化的难题；(4) 预测期内长三角城市群整体三系统耦合协调水平持续改善，但个别西部城市仍无法跳出失调衰退的发展状态。最后，为推动长三角城市群实现更高质量的一体化发展，本文提出相应的协调发展建议。

【关键词】：长三角城市群；时空耦合；趋势预测

中图分类号：F124. 5；X22 **文献标识码**：A **文章编号**：1004-8227(2023) 04-0706-15

DOI：10. 11870 /cjlyzyyhj202304003

改革开放后，我国经济发展取得了举世瞩目的成就，同时也面临复杂的生态环境问题。十九大报告指出我国经济发展进入新常态，如何协调经济发展与生态环境恶化、推进经济发展转型升级成为我国现阶段发展的主要挑战，而科技创新则是实现突破的关键一环。近年来，长三角城市群逐渐成为长江经济带乃至全国创新能力最强、经济发展最活跃且最具有开放程度的区域之一，在我国现代化建设大局与全方位开放格局中具有举足轻重的战略地位。伴随生态文明建设的持续推进，长三角城市群在维持经济稳定增长的目标下，生态环境水平得到显著改善，但生态环境的根源性、结构性问题尚未得到缓解。2018 年长三角一体化发展正式上升为国家战略，践行绿色一体化发展模式，致力于打造精准治污的科技创新支撑体系，为深入改善生态环境及生态成果转向经济成果提供可能。在此背景下，科技创新、经济增长与生态环境保护成为推动长三角城市群绿色一体化发展的重要驱动力，研究三者之间的关系有助于评估和剖析长三角创新、经济与环境的发展现状，为推动长三角绿色一体化发展提供具有重要理论价值与现实意义的战略参考。

1 文献综述

[1] **收稿日期**：2022-05-23；**修回日期**：2022-09-21

基金项目：中央高校中南民族大学基本科研业务费专项资金项目(CSY22033) 阶段性成果；国家社会科学基金项目(15CJL014) 的阶段性成果

作者简介：徐小鹰(1980 ～)，女，副教授，主要研究方向为区域经济与环境经济． E-mail：877327294@qq. com

科技创新、经济增长与生态环境之间两两交互关系的理论研究已成为学术界研究的热门话题。20 世纪中叶，国外学术界将收入分配与经济发展间的“倒 U 型曲线”推广到经济增长与生态环境研究中[1],提出了“环境库兹涅兹曲线”;同时在基于新李嘉图比较优势了理论的综合研究结果显示，其中生态环境要素在经济增长过程中并不具有显著比较优势[2]。20 世纪 60 年代，有关科技创新与经济增长相关关系的研究中，Denison 等[3]提出科学技术对推动经济增长具有重要贡献；此后，Park 等[4]在科学技术的基础上进一步指出推动经济增长的是“科技创新”而非“科技进步”,并深入探讨了科技创新实现价值转化的过程与机制。20 世纪 70 年代，Ehrlich 等[5]着手于科技创新与生态环境之间的传导路径研究，通过构建 IAPT 模型指出人口过度增长所导致的生态环境恶化可以通过科技创新进行缓解；Porter[6]进一步从环境规制视角提出著名的“波特假说”,丰富了该传导路径。在二者的相关性研究中，Grossman 等[7]认为科技创新水平与生态环境水平呈正相关，即高科技创新水平伴随着高生态环境水平。

国内学者基于上述理论对我国发展的现状与未来导向做了大量研究，并对三者间的交互关系做出了延伸和拓展。部分相关研究表明我国生态环境与经济增长之间存在“倒 U”型关系[8],提出我国经济发展方式应由生产要素驱动的粗放型发展方式应转向由科技创新驱动的集约型发展方式[9]。转变过程中，国家科技创新推动力不能仅限于个体创新力的叠加，应集聚企业、政府与第三方力量[10],才能在全国范围内形成创新产业为标志的创新型经济[11]。其中政府可以通过制定以“绿色经济”为核心的政策方针刺激企业进行科技创新[12,13],从而提高生产效率，减少生态环境压力，促进经济增长和环境保护的脱钩[14,15]。脱钩过程中会受到社会环境、能源环境等[16,17,18,19]因素影响，而科技创新是关键影响因素，故较多学者倾向于研究科技创新、经济增长同生态环境三者之间的交互关系。其研究成果中，研究尺度主要聚焦于中国省域[20]、长江经济带[21]、黄河流域[22]及各城市群[23,24,25]。研究维度主要基于三系统的耦合协调分析[26]或三类双系统耦合协调分析[27,28,29]。研究内容主要聚焦于：(1)修正现有双系统耦合协调模型，进而演化推导三系统乃至多系统耦合模型[30,31];(2)科学测评与分析系统间耦合协调水平，并利用灰色预测法对系统耦合协调未来演变趋势进行预测[32]。(3)凭借空间计量模型及地理遥感等方法剖析系统耦合协调水平的空间演化特征[33]。

通过梳理发现既有文献对科技创新、经济增长与生态环境三者的研究较为丰富与前沿，但仍然存在值得改进的地方：(1)现有研究尺度主要聚焦于全国、长江经济带和黄河流域层级，缺乏基于长三角城市群的协调分析；(2)既有文献主要基于三系统耦合水平或双系统耦合水平展开研究，缺少对三系统耦合协调与三类双系统耦合协调的相关关系分析；(3)既有文献多从时序或空间演变视角对协调发展水平进行分析，缺少结合时序与空间的分析。基于此，本文以长三角城市群 2006～2019 年面板数据为样本，讨论创新、经济与生态间的耦合机制，全面揭示长三角城市群“十一五”至“十三五”期间三者的协调发展水平现状，并预测“十四五”期间三者协调水平演变趋势，为长三角科技创新、经济增长与生态环境水平的协调发展提供重要理论参考。

2 耦合跃迁机理与评价指标体系构建

2.1 耦合跃迁机理

根据双系统与三系统耦合协调理论及定义，本文参考相关研究[33],对科技创新、经济增长与生态环境之间的内在耦合机理进一步展开解析。在图 1 三维坐标系中，正方体代表了科技创新、经济增长与生态环境三系统耦合协调状态，平面 EOF、COE 和 COF 分别代表三类双系统耦合协调发展状态，假定 OE、OF、OC 长度均为 1,平面 EOF 代表科技创新与经济增长的耦合协调发展状态。

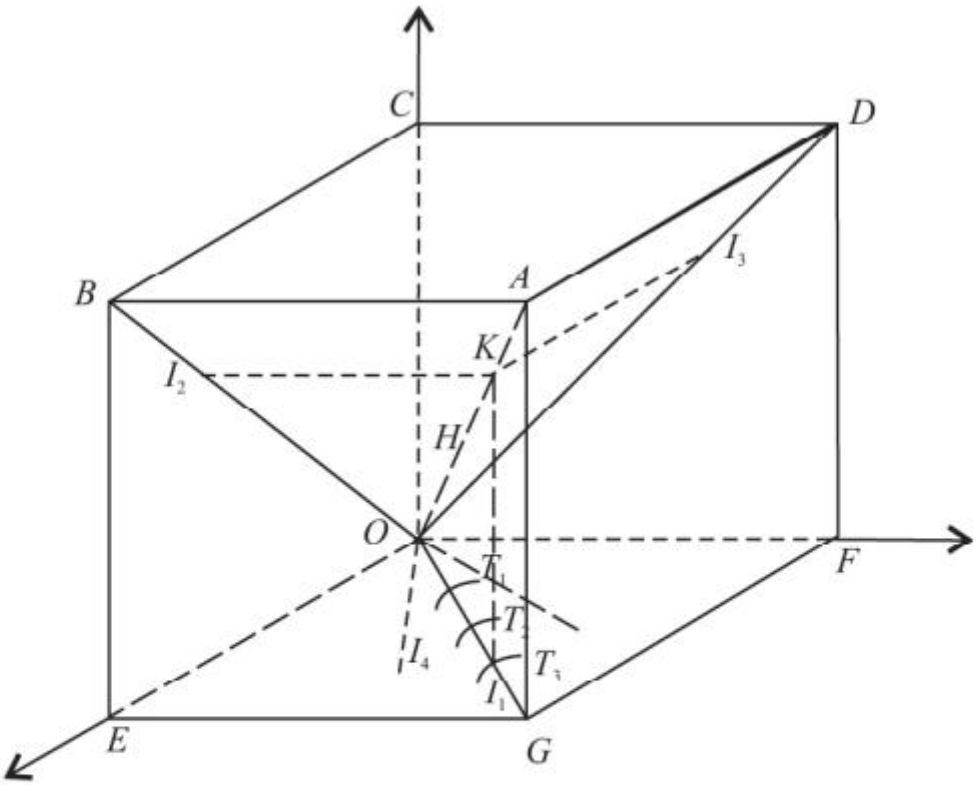

图 1　科技创新-经济增长-生态环境三系统耦合机理图

Fig. 1　Mechanism of technology innovation-economic growth-ecological environment three systems coupling

从双系统耦合协调视角出发，结合图 1 中二维平面 EOF,可以得出以下 3 个结论：(1)平面 EOF 内有无数条从原点 O 出发的射线，每条射线代表了不同的双系统耦合度水平，OG 所在射线代表科技创新与经济增长最优耦合水平，其耦合度为 1;(2)平面 EOF 内有无数条无差异曲线，分别代表系统间不同的协调程度，离原点 O 越远的无差异曲线所代表的协调程度越高； T1、T2、T3 三条无差异曲线上的点分别代表了不同的协调度，大小关系显然为 T3>T2>T1;(3)在耦合度水平确定的情况下，与位于离原点 O 越远的无差异曲线的交点，其代表的耦合协调度水平越高；在 OG 所在射线上，G 点所在的无差异曲线离原点最远，故 G 点代表了最优耦合协调水平。同理，上述结论可推广至平面 COE 和 COF。

将上述双系统耦合协调机理推广到三系统耦合协调机理中，可得出以下 3 个结论：(1)正方体内部有无数条从原点 O 出发的射线和无差异曲线，分别代表三系统间不同的耦合水平和协调水平；(2)科技创新-经济增长-生态环境三系统耦合状态由三类双系统耦合状态决定，即当三类双系统耦合水平分别位于最优耦合度所在射线 OG、OB、OD 上时，三系统耦合水平位于 OA 射线上，达到最优；(3)三系统耦合协调水平也由三类双系统耦合协调水平共同决定，OA 与离原点 O 越远无差异曲线的交点代表的耦合协调水平越高。具体而言，假定 I1、I2、I3 三点双系统协调水平相同，则三系耦合协调水平反映在 OA 射线上即为 K 点，比 H 点所处的耦合协调水平更高，但低于 A 点。综上可知，若要提高科技创新-经济增长-生态环境的耦合协调发展水平，就必须促进科技创新-经济增长、科技创新-生态环境、经济增长-生态环境三类双系统耦合协调水平的协同共进，才能推动三系统实现更高

水平的耦合协调发展。

2.2 评价指标体系构建

考虑到长三角科技创新、经济增长与生态环境的实际情况与指标体准确性、一致性等要求，本文在前人研究[32]与区域特征基础上，构建了科技创新、经济增长与生态环境 3 个系统的评价指标体系。该评价指标体系共包括 9 个一级指标、31 个二级指标，大致涵盖了《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中明确指出的一体化发展任务，具体见表 1。长三角城市群科技创新、经济增长与生态环境三者的耦合是一个复杂的体系，系统之间相互影响、相互制衡。综合以上因素，科技创新水平的测评从投入、产出和成效 3 个维度展开，其中创新投入直接影响创新产出，创新成效受创新投入和创新产出的共同影响，主要通过 R&D 相关指标、普通高等学校数量、技术成交额、专利申请授权量等指标来衡量，能够较好说明技术发现转为技术成果，进而转化为经济收益这一过程。关于经济增长水平的测度，包括规模、结构与效益 3 个方面，重点考虑与生产总值、产业结构及人均收入等相关的指标。生态环境水平的测评围绕环境质量、资源利用与环境治理 3 个方面进行，选取了与大气、水、土壤、噪音相关的且具有代表性的指标。本研究区域选取参考《长江三角洲城市群发展规划》,包括上海、南京、杭州、合肥等 26 个地级市，数据来源于《中国城市统计年鉴》(2007-2020 年)、《中国城市建设统计年鉴》(2007-2020 年)、各地级市统计公报、各地级市统计年鉴和 EPS 数据库，长三角城市群底图数据与各城市经纬度数据来源于国家基础地理信息中心(http: //ngcc.sbsm.gov.cn)。个别缺失数据采用插值法和移动平均法进行补充。最后，运用上述熵值法测算出科技创新、经济增长与生态环境系统的各一级指标、二级指标权重，结果见表 1。

3 研究方法

3.1 熵值法

熵值法可以对长三角城市群科技创新、经济发展及生态环境水平进行客观评价，其原理是在指标评价过程中，根据各指标值的变异程度所反映的信息量来确定权重，信息量越大说明该指标不确定性就越小，熵就越小，其权重就越大，反之成立。最后根据各指标权重确定各系统综合指数。为了使数据处理有意义，需消除标准化后数据出现的零值，所以将标准化后的数据进行整体平移 0.000 1。

3.2 耦合协调度模型

本文借助物理学耦合协调度模型对科技创新、经济增长和生态环境间的耦合协调关系进行分析，涉及双系统耦合协调模型与三系统耦合协调模型，参考现有研究成果[30],具体测算公式如下：

(1)双系统耦合协调模型：其中 c 表示两系统间的耦合度，t 表示两系间的综合发展水平，d 为两系统间的耦合协调度，U1、U2、U3 分别代表各系统综合指数；α 和 β 分别为两系统权重，满足 α+β=1,本文默认两系统同等重要，故取均值 0.5。

表 1 长三角城市群科技创新、经济增长与生态环境系统评价指标体系

系统层	一级指标	二级指标	属性	权重
科技创新	创新投入(34.29%)	R& D 人员占就业人员比重(%)	正	5.60%
		R& D 经费占 GDP 比重(%)	正	8.74%
		普通高等学校学校数(所)	正	19.95%

	创新产出(60.61%)	规上工业总产值(万元)	正	33.88%
		技术市场成交额(万元)	正	13.73%
		国内专利申请授权量(件)	正	13.00%
	创新成效(5.10%)	新产品销售收入占主营业务收入比重(%)	正	4.05%
		单位 GDP 能耗((t 标准煤/万元)	负	0.75%
		单位 GDP 水耗(m3/万元)	负	0.30%
经济发展	经济规模(34.09%)	固定资产投资增长率(%)	正	2.17%
		GDP(万元)	正	31.92%
	经济结构(27.90%)	人均社会消费品零售额(元)	正	18.12%
		第二产业增加值占 GDP 比重(%)	正	3.55%
		第三产业增加值占 GDP 比重(%)	正	6.23%
	经济效益(38.00%)	人均 GDP(元)	正	12.03%
		城镇人均可支配收入(元)	正	11.96%
		农村人均纯收入(元)	正	12.63%
		GDP 增长率(%)	正	1.38%
生态环境	环境质量(16.25%)	SO2 年日平均值(μg/m3)	负	4.50%
		可吸入颗粒物浓度平均值(μg/m3)	负	1.77%
		区域环境噪声平均值(dB)	负	2.40%
		建成区绿化覆盖率(%)	正	1.54%

		人均公园绿地面积(m2/人)	正	6.04%
	资源利用(40.05%)	人均水资源量(m3/人)	正	33.88%
		耕地保有量(10 hm2)	负	4.16%
		城市建设用地面积(10 hm2)	负	2.01%
	环境治理(43.71%)	工业固体废物综合利用率(%)	正	2.00%
		大气污染物去除率(%)	正	5.91%
		城市生活垃圾无害处理率(%)	正	1.54%
		城市污水集中处理率(%)	正	2.04%
		环境保护投资额占 GDP 比重(%)	正	32.22%

$$c=\left[\frac{U_1U_2}{\left(\frac{U_1+U_2}{2}\right)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$t=\alpha U_1+\beta U_2 \quad (2)$$

$$d=\sqrt{c\times t} \quad (3)$$

(2)三系统耦合协调模型：C 表示 3 个系统间的耦合度，T 表示 3 个系统发展水平，D 表示 3 个系统耦合协调度，γ、δ、ε分别表示各个系统的权重，满足γ+δ+ε=1,本文默认各个系统同等重要，故取均值 1/3。

$$C=\left[\frac{U_1U_2U_3}{\left(\frac{U_1+U_2+U_3}{3}\right)^3}\right]^{\frac{1}{3}} \tag{4}$$

$$T=\gamma U_1+\delta U_2+\varepsilon U_3 \tag{5}$$

$$D=\sqrt{C\times T} \tag{6}$$

(3)本文参考相关研究，将测算结果划分为 10 个协调等级，具体划分标准见表 2。

3.3 空间重心模型

空间重心模型可以刻画各个研究对象的空间作用合力点，即空间重心，从而更便于分析研究对象的空间平衡结构。本文利用该模型对科技创新、经济增长和生态环境之间耦合协调状态的空间匹配态势进行分析。具体公式如下：

表 2 耦合协调度等级划分标准

失调衰退区间		协调发展区间	
耦合协调度 D	协调等级	耦合协调度 D	协调等级
(0.0～0.1)	极度失调	[0.5～0.6)	勉强协调
[0.1～0.2)	严重失调	[0.6～0.7)	初级协调
[0.2～0.3)	中度失调	[0.7～0.8)	中级协调
[0.3～0.4)	轻度失调	[0.8～0.9)	良好协调
[0.4～0.5)	濒临失调	[0.9～1.0)	优质协调

$$X_t = \frac{\sum_i^n (T_{it} x_i)}{\sum_i^n T_{it}}, \quad Y_t = \frac{\sum_i^n (T_{it} y_i)}{\sum_i^n T_{it}} \tag{7}$$

$$D_{f-e}^t = C \times \sqrt{(Y_f - Y_e)^2 + (X_f - X_e)^2} \tag{8}$$

式中：Xt、Yt 分别表示区域研究对象第 t 年的空间重心经纬度坐标；xi、yi 分别表示第 t 年第 i 个城市的经纬度坐标；Tit 表示第 i 个城市第 t 年的属性值；f、e 表示任意两个系统；Dtf-ef-et 表示第 t 年两系统间空间重心距离；C 为经纬距离转换为平面距离的转换系数，设为 111.111。

3.4 GM(1,1)灰色预测模型

GM(1,1)灰色预测是指通过构建数学模型分析以往数据的发展规律，并对未来进行科学预测，有助于决策者制定未来发展战略和政策。本文利用该模型对“十四五”预测期内科技创新-经济增长-生态环境耦合协调水平进行预测，计算步骤如下：

(1)设时间序列 X0={x0(1),x0(2),…,x0(n)}有 n 个观测值，对其进行累加形成新序列 X1={X1(1),X1(2),…,X1(n)},则 GM(1,1)模型相应微分方程为：

$$\frac{dX_1}{dt} + \theta X_1 = \mu \tag{9}$$

式中：θ 为发展灰数；μ 为内生控制灰数。

(2)设 $\hat{\theta} = (\frac{\theta}{\mu})$,利用最小二乘法求解得 $\hat{\theta} = (B^T B - 1) B^T Y_n$,求解微分方程即可得到预测模型：

$$x_1^T \hat{X}_1 (k+1) = \left[x_0(1) - \frac{\mu}{\theta} \right] e^{-\theta k} + \frac{\mu}{\theta}, \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \tag{10}$$

(3)预测模型构建完成后需对其进行精度检验，表 3 为检验结果等级评判标准，若 P 值和 C 值均在合格范围内，则可进行预测分析，否则需进一步分析残差序列并对公式进行修正。

表 3 灰色预测精度检验等级标准

模型精度等级	后验差比 C 值	相对精度 P 值
好	C≤0.35	P>0.95
合格	0.35<C≤0.5	0.8<P≤0.95
勉强合格	0.5<C≤0.65	0.7<P≤0.8
不合格	C>0.65	P≤0.7

4 实证分析

4.1 各系统综合水平测度

基于上述构建的评价指标体系，本文采用熵值法测算出长三角城市群 26 个城市各系统 的综合指数，限于篇幅，仅列出 2006、2010、2014、2019 年测算结果与均值，结果见表 4。

表 4 较为直观展现了 2006～2019 年长三角城市群各系统综合得分变动情况，各城市科技创新、经济增长、生态环境系统综合水平均不断攀升。2006～2014 年系统间总体均值大小为：生态环境>经济增长>科技创新，截至 2019 年，经济增长系统实现赶超，位居第一。从总体均值变化幅度来看，各系统综合得分均呈上升趋势，其中经济增长系统变化幅度最大，总体均值上升 0.329，科技创新和生态环境系统变化幅度相当；“十一五”至“十三五”期间大量外来人口涌入长三角，导致城市生态环境治理负担加重，故生态环境改善速度相对于经济增长更加缓慢；除上海、南京和苏州的科技创新能力提升较快以外，长三角大部分城市处于科技创新发展初期，体现为科技创新指数较低且提升幅度较小，以至于科技创新总体均值变化幅度较小。综合视角来看，城市间发展状况各异，上海、杭州、苏州和南京等城市各系统排名比较靠前，系统间差异较小，发展较为均衡；相反，安庆、滁州 、池州和宣城虽系统间差异较小，但各系统排名均靠后；值得注意的是经济增长占主导地位的城市，生态环境相对处于劣势地位，例如上海经济增长指数提升了 0.639，生态环境指数却仅增长 0.053，究其原因，可能是上海工业固体废物综合利用率及城市生活垃圾无害处理率还不够高，在工业固体废物与生活垃圾的处理与循环利用方面还有待提升。

表 4 2006～2019 年长三角城市群各系统层指数

	科技创新					经济增长					生态环境				
	2006	2010	2014	2019	均值	2006	2010	2014	2019	均值	2006	2010	2014	2019	均值
上海	0.493	0.629	0.682	0.849	0.663	0.272	0.420	0.596	0.911	0.550	0.638	0.681	0.687	0.691	0.678
南京	0.245	0.262	0.321	0.470	0.325	0.176	0.281	0.448	0.655	0.396	0.407	0.402	0.433	0.447	0.420

无锡	0.234	0.251	0.259	0.272	0.254	0.206	0.319	0.450	0.643	0.415	0.324	0.375	0.395	0.445	0.386
常州	0.088	0.111	0.125	0.140	0.116	0.155	0.249	0.384	0.559	0.341	0.505	0.498	0.526	0.562	0.510
苏州	0.233	0.296	0.332	0.423	0.321	0.215	0.352	0.526	0.737	0.469	0.435	0.546	0.514	0.535	0.500
南通	0.146	0.146	0.153	0.172	0.154	0.111	0.190	0.298	0.457	0.265	0.180	0.208	0.255	0.298	0.236
盐城	0.094	0.091	0.096	0.109	0.098	0.082	0.134	0.216	0.313	0.189	0.205	0.242	0.288	0.358	0.275
扬州	0.078	0.093	0.108	0.137	0.104	0.104	0.174	0.270	0.399	0.240	0.364	0.404	0.427	0.468	0.416
镇江	0.111	0.111	0.119	0.142	0.121	0.125	0.209	0.327	0.440	0.283	0.277	0.338	0.366	0.386	0.350
泰州	0.110	0.105	0.105	0.140	0.115	0.093	0.160	0.248	0.367	0.221	0.223	0.245	0.277	0.347	0.276
杭州	0.300	0.301	0.350	0.402	0.339	0.185	0.291	0.472	0.669	0.408	0.453	0.543	0.562	0.677	0.576
宁波	0.189	0.196	0.222	0.242	0.212	0.178	0.278	0.444	0.619	0.386	0.270	0.324	0.341	0.405	0.337
嘉兴	0.149	0.137	0.148	0.169	0.151	0.144	0.224	0.353	0.505	0.308	0.233	0.276	0.304	0.347	0.292
湖州	0.104	0.093	0.095	0.106	0.100	0.124	0.195	0.302	0.461	0.270	0.203	0.287	0.321	0.371	0.299
	0.120	0.121	0.139	0.172	0.138	0.143	0.231	0.349	0.492	0.306	0.220	0.254	0.274	0.364	0.279

绍兴															
金华	0.110	0.113	0.110	0.128	0.115	0.122	0.191	0.298	0.443	0.263	0.217	0.247	0.277	0.332	0.268
舟山	0.055	0.052	0.056	0.072	0.059	0.136	0.212	0.339	0.479	0.294	0.260	0.304	0.338	0.380	0.322
台州	0.109	0.109	0.111	0.138	0.117	0.129	0.192	0.282	0.427	0.257	0.193	0.243	0.279	0.328	0.265
合肥	0.328	0.292	0.298	0.327	0.311	0.111	0.180	0.263	0.440	0.243	0.262	0.310	0.326	0.377	0.323
芜湖	0.206	0.153	0.139	0.147	0.161	0.087	0.151	0.216	0.338	0.196	0.259	0.295	0.303	0.347	0.301
马鞍山	0.123	0.111	0.082	0.091	0.102	0.101	0.169	0.213	0.334	0.201	0.651	0.539	0.473	0.498	0.509
铜陵	0.091	0.078	0.077	0.073	0.080	0.093	0.156	0.253	0.234	0.182	0.451	0.412	0.353	0.374	0.393
安庆	0.044	0.052	0.060	0.066	0.055	0.058	0.090	0.134	0.223	0.124	0.162	0.224	0.287	0.338	0.256
滁州	0.079	0.080	0.081	0.092	0.083	0.048	0.083	0.127	0.245	0.120	0.130	0.223	0.250	0.322	0.233
池州	0.061	0.049	0.050	0.054	0.053	0.046	0.097	0.145	0.218	0.127	0.201	0.231	0.284	0.330	0.267
宣城	0.072	0.070	0.068	0.070	0.070	0.062	0.095	0.159	0.241	0.140	0.163	0.237	0.264	0.335	0.252
	0.153	0.158	0.169	0.200	0.170	0.127	0.205	0.312	0.456	0.277	0.303	0.342	0.362	0.410	0.355

总体均值															

4.2 耦合协调水平分析

在对长三角城市群各系统综合指数的发展趋势分析下，本文进一步探讨三系统间的相互协调关系，故借助上述耦合协调公式，测算长三角城市群 26 城市三系统及三类双系统耦合协调度，结果见表 5。

4.2.1 三系统耦合协调分析

(1)时序演变趋势分析

综合分析表 5 可知，长三角城市群整体三系统耦合协调水平呈平稳上升的态势，其总体均值由 2006 年的 0.369 上升到 2019 年的 0.563,增幅为 52.57%,年均增速达 3.76%,实现了由失调衰退状态向协调发展状态的转变，然而整体耦合情况的绝对水平尚有较大的提升空间。在城市层面上，各城市耦合协调的绝对水平得到了提升，平均增速均为正，但城市间相对关系未发生根本性变化，说明耦合协调水平增长速度差异明显且发展不平衡。具体而言，2006 年，上海、杭州、南京与苏州处于低水平的协调发展状态，其余城市均处于失调发展阶段，耦合协调态势并不乐观；截至 2019 年末，大部分城市实现了由失调类型向协调类型的跃进，其中上海的耦合协调度最佳、领先优势明显，已率先由初级协调进入优质协调的发展阶段，其次杭州、苏州和南京也实现中级协调乃至良好协调发展；同时期，盐城及安徽部分城市仍处于失调衰退状态，未实现向协调发展的跃迁。

(2)空间演变趋势分析

为更直观展示长三角城市群三系统耦合协调水平的空间格局演变特征，使用 ArcGIS10.5 软件对 2006、2010、2014、2019 年的耦合协调度进行空间可视化分析，结果如图 2。

表 5 2006～2019 年长三角城市群三系统与三类双系统耦合协调度

	科技创新-经济增长-生态环境				科技创新-经济增长			
	2006	2010	2014	2019	2006	2010	2014	2019
上海	0.699	0.816	0.883	0.983	0.620	0.748	0.840	0.995
南京	0.517	0.574	0.662	0.754	0.447	0.525	0.634	0.780
无锡	0.499	0.573	0.623	0.689	0.463	0.538	0.597	0.667
常州	0.420	0.490	0.555	0.618	0.304	0.385	0.455	0.523
苏州	0.542	0.657	0.713	0.785	0.469	0.580	0.668	0.782
南通	0.319	0.386	0.459	0.534	0.325	0.390	0.453	0.530

盐城	0.281	0.337	0.401	0.471	0.245	0.293	0.350	0.408
扬州	0.341	0.415	0.478	0.556	0.250	0.323	0.390	0.474
镇江	0.365	0.432	0.489	0.545	0.309	0.366	0.428	0.493
泰州	0.314	0.366	0.416	0.512	0.275	0.329	0.377	0.467
杭州	0.558	0.636	0.72	0.818	0.482	0.552	0.659	0.752
宁波	0.441	0.512	0.581	0.655	0.416	0.481	0.568	0.638
嘉兴	0.381	0.434	0.496	0.565	0.359	0.402	0.470	0.542
湖州	0.321	0.388	0.440	0.508	0.301	0.334	0.384	0.450
绍兴	0.355	0.413	0.473	0.571	0.333	0.388	0.459	0.540
金华	0.333	0.388	0.436	0.513	0.306	0.358	0.404	0.477
舟山	0.291	0.325	0.380	0.500	0.226	0.249	0.301	0.384
台州	0.320	0.382	0.433	0.517	0.310	0.353	0.399	0.485
合肥	0.437	0.501	0.551	0.641	0.415	0.474	0.535	0.634
芜湖	0.373	0.418	0.444	0.509	0.329	0.368	0.399	0.463
马鞍山	0.436	0.461	0.433	0.493	0.296	0.342	0.325	0.388
铜陵	0.364	0.388	0.409	0.404	0.255	0.289	0.332	0.318
安庆	0.157	0.242	0.309	0.375	0.124	0.185	0.238	0.296
滁州	0.136	0.279	0.326	0.419	0.159	0.230	0.274	0.357
池州	0.185	0.242	0.288	0.341	0.132	0.182	0.214	0.259
宣城	0.208	0.284	0.329	0.389	0.187	0.228	0.271	0.314
总体均值	0.369	0.436	0.490	0.563	0.321	0.380	0.439	0.516
	科技创新-生态环境				经济增长-生态环境			
	2006	2010	2014	2019	2006	2010	2014	2019
上海	0.834	0.908	0.931	0.977	0.645	0.731	0.800	0.883
南京	0.591	0.600	0.653	0.715	0.517	0.580	0.664	0.722
无锡	0.534	0.577	0.594	0.629	0.508	0.588	0.649	0.731
常州	0.451	0.490	0.522	0.553	0.529	0.593	0.670	0.749
苏州	0.596	0.690	0.698	0.737	0.553	0.662	0.721	0.777

南通	0.336	0.371	0.421	0.470	0.376	0.446	0.525	0.607
盐城	0.314	0.340	0.378	0.433	0.360	0.424	0.499	0.579
扬州	0.380	0.426	0.461	0.517	0.441	0.515	0.583	0.657
镇江	0.393	0.427	0.452	0.489	0.431	0.516	0.588	0.642
泰州	0.350	0.362	0.384	0.468	0.379	0.445	0.512	0.597
杭州	0.651	0.692	0.730	0.804	0.538	0.630	0.718	0.820
宁波	0.464	0.507	0.537	0.588	0.468	0.548	0.624	0.708
嘉兴	0.399	0.422	0.451	0.497	0.428	0.499	0.572	0.647
湖州	0.325	0.372	0.394	0.435	0.398	0.486	0.558	0.643
绍兴	0.360	0.388	0.422	0.509	0.421	0.492	0.556	0.651
金华	0.346	0.374	0.391	0.446	0.403	0.466	0.536	0.619
舟山	0.271	0.277	0.306	0.371	0.434	0.504	0.582	0.653
台州	0.319	0.365	0.393	0.456	0.397	0.465	0.530	0.612
合肥	0.537	0.560	0.575	0.624	0.413	0.486	0.541	0.638
芜湖	0.466	0.450	0.441	0.475	0.387	0.459	0.506	0.585
马鞍山	0.555	0.504	0.427	0.454	0.506	0.549	0.563	0.639
铜陵	0.438	0.398	0.373	0.373	0.453	0.504	0.547	0.544
安庆	0.159	0.240	0.299	0.339	0.311	0.377	0.443	0.524
滁州	0.151	0.309	0.329	0.390	0.281	0.369	0.422	0.530
池州	0.251	0.233	0.261	0.295	0.310	0.387	0.450	0.518
宣城	0.232	0.298	0.310	0.350	0.317	0.387	0.453	0.533
总体均值	0.412	0.445	0.467	0.515	0.431	0.504	0.570	0.646

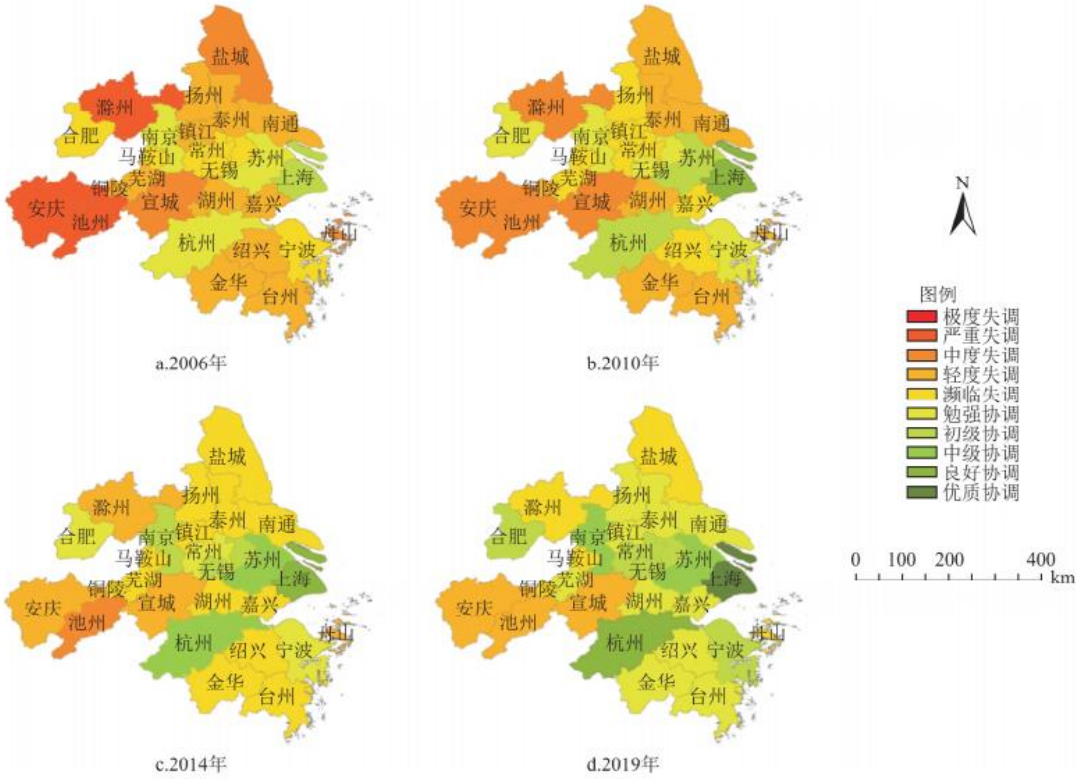

图 2　2006~2019 年长三角城市群三系统耦合协调度的空间格局演变

Fig. 2　Spatial distribution evolution of coupling coordination of three systems in YRDUA from 2006 to 2019

从图 2 的空间分布格局来看，长三角城市群科技创新、经济增长与生态环境三系统耦合协调发展整体向好，但区域不协调状态并未实现根本性转变，呈现以下两个分布特征：第一，协调水平较好的城市在空间上逐步形成了以合肥为起点、宁波为终点的“Z 字形”分布；“Z 字形”分布上的城市，2006 年多介于失调发展向协调发展过渡阶段，截至 2014 年，大部分城市已实现向协调发展的跨越；“Z 字形”分布外的城市，值得关注的是，2006 年安庆、滁州和池州严重失调，其余多存在轻度失调，但随着城市科技、经济及生态意识提高，长三角城市群北部和南部城市协调程度逐步提高，其中南部城市耦合协调发展相对更好，相继在“十三五”期间实现了由衰退失调状态向协调发展状态的跳跃；西部城市耦合协调程度虽有所改善，但仍旧处于衰退失调的发展态势。第二，三系统耦合协调水平空间上呈“中心-边缘”分布，形成了以上海为中心，杭州、南京、合肥为副中心的增长极，协调水平由中心向四周扩散，边缘城市协调程度较低，说明中心城市与边缘城市间可能存在某种支配和依附关系。

4.2.2 三类双系统耦合分析

根据耦合跃迁理论可知，三系统耦合协调水平由三类双系统耦合协调水平共同决定，想要进一步探究导致各城市的协调发展状态存在诸多差异的原因，首先需要对各双系统耦合协调水平变化特征进行解析。整体上，科技创新-经济增长双系统耦合协调度的总体均值从 2006 年 0.321 提升至 2019 年 0.516,变动了 0.195,增长速度较快，这说明科技创新与经济增长协调共进方面具有较大的潜力，体现了长三角城市群目前科技创新推动更高质量的一体化经济发展现状；科技创新-生态环境双系统耦合协调度的总体均值从 2006 年 0.412 上升至 2019 年 0.515,增长了 0.103,增幅最小；经济增长-生态环境双系统耦合协调度的总体均值从 2006 年 0.431 上升至 2019 年 0.646,增长了 0.215,增长速度最快。通过对比上述三类双系统的耦合协调水平，不难发现与科技创新相关的两类双系统耦合协调水平相对较低，这说明科技创新对经济增长和生态环境的有效推动和支撑作用并未显现，科技创新还未真正成为推动长三角城市群经济高质量发展的关键要素。相反经济增长与生态环境之间交互作用的协调性更高一些，印证了目前长三角城市群生态环境的改善主要依靠大量资金投入，并非来自大量高新技术投入和科技创新成果的运用。更

加值得注意的是，经济增长-生态环境双系统的耦合协调度始终高于三系统耦合协调度，这表明经济增长与生态环境间的协同促进作用对三系统的协调发展影响最大，长三角城市群应继续保持“稳中求进，稳中求新”的生态环境治理理念，在维持生态环境治理的资金投入力度的同时，各政府也要持续加强创新研发投入，以激发科技创新对经济增长和生态环境保护的潜在推动力。

4.3 三系统之间交互影响的时空分析

通过对系统间耦合协调水平的科学测评与变动特征分析，可以发现无论是三系统还是三类双系统的耦合协调发展水平均存在不同程度的差异，需通过解析系统间交互影响关系来深层次探究形成差异的原因。鉴于此，本文将从两个方面探讨其交互影响关系：一是从空间视角探讨科技创新、经济增长与生态环境系统综合水平的空间重心转移轨迹及空间重心距离，以刻画出各系统地理演化规律及其系统间空间匹配关系；二是从截面拟合角度分析双系统与三系统耦合协调发展的协同关系。

4.3.1 系统空间匹配度分析

为了更客观分析系统间的空间匹配程度，本文借助上述空间重心模型测算各系统空间重心经纬度坐标，通过 ArcGIS10.5 软件刻画出 2006～2019 年长三角城市群各系统空间重心迁移轨迹及系统间重心距离，结果见图 3 和图 4。

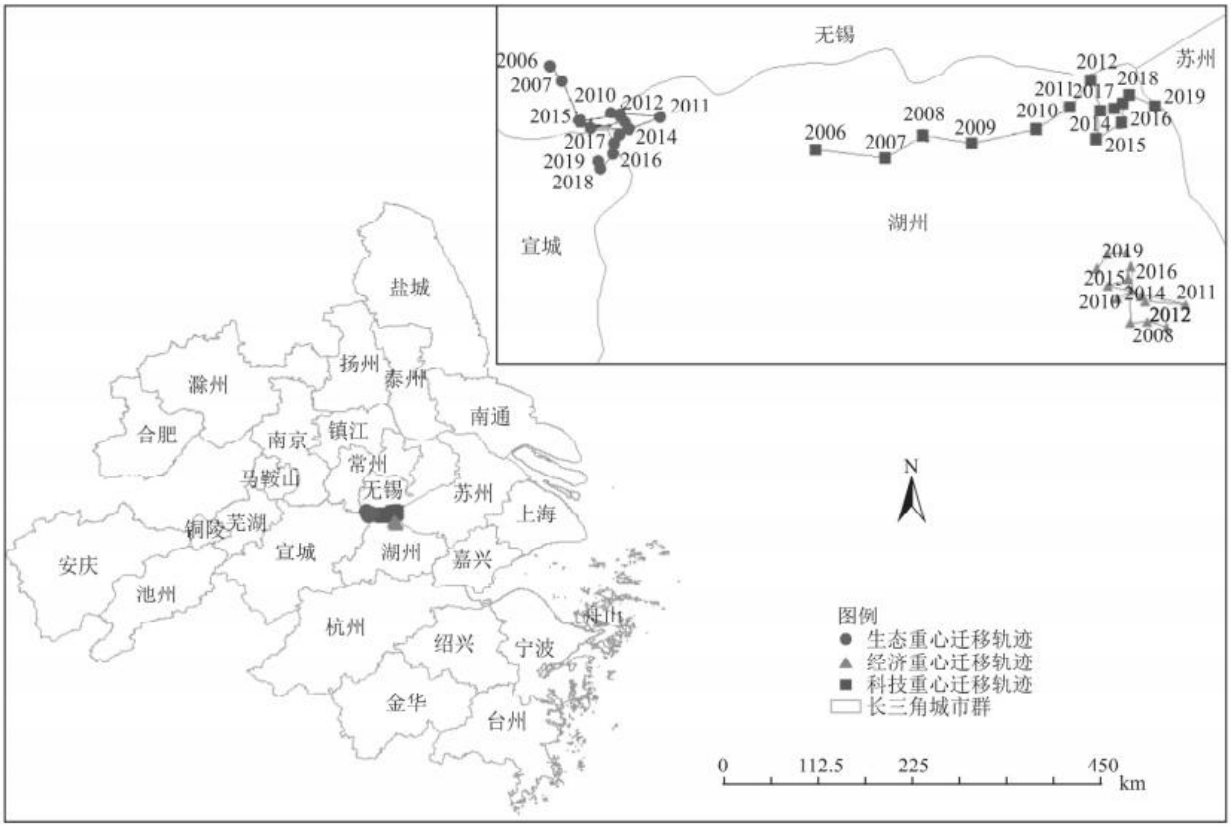

图 3　2006~2019 年各系统空间重心迁移轨迹

Fig. 3　Spatial center of gravity migration trajectory of each system from 2006 to 2019

(1)2006～2019 年各系统的空间重心迁移轨迹

图 3 较为直观展示了长三角创新水平、经济发展水平城市与生态环境水平空间错位分布的显著特征，从移动轨迹来看有逐

渐改善趋势，符合上述三系统耦合度逐步提高的结论。其中，科技创新与经济增长重心位置相距较近且位于生态环境重心的北部，纬向空间重心移动轨迹较为一致，存在北上趋势，经向空间重心移动轨迹相反。生态环境纵向空间重心移动方向与前二者相反，存在南下趋势并且波动向东移动。

具体而言，科技创新的空间重心整体快速向东移动，从湖州境内逐渐向苏州境内移动，2010 年以前移动速度较快，2010 年后南北方向波动且向东缓慢移动，总移动频数为 14 次，移动频数为 100%,纬度向北变化了 0.023 度，经度向东变化了 0.181 度。2005 年《长三角“十一五”科技发展规划》正式启动后，长三角各地方政府大力提升科技创新水平，而上海、杭州 、苏州等东部城市高等院校、科研院及创新型企业数目较多，经济实力较强，为创新发展奠定了现实基础，故创新实力提升更快更强，综合导致科技创新重心急速向东移动；而后长三角科技创新发展水平逐渐达到饱和，高端人才、创新产业大量集聚在中心城市，创新驱动发展进程达到高潮，但同时创新“瓶颈”也逐渐显现，故后期科技重心移动速度放缓并面临难以深化的难题。研究期内经济增长的空间重心位于湖州境内，并缓慢向西北方向移动，大致与科技创新空间重心后期移动方向一致，移动次数为 11 次，移动频数为 78.57%,纬度向北变化了 0.031 度，经度向西变化了 0.037 度，即长三角城市群西北部城市经济水平日益提高，区域经济发展逐渐趋于平衡。生态环境的空间重心持续缓慢南下，主要在无锡、宣城和湖州交界处附近移动，具体移动路径呈西北向东南方向移动，移动次数为 8 次，移动频数为 61.54%,其经纬变化较为一致，表现为由北向南、由西向东，但纬向变化更加明显，向南移动了 0.051 度。这源于长三角东南部城市，主要是沿海城市，生态环境质量改善成效显著。

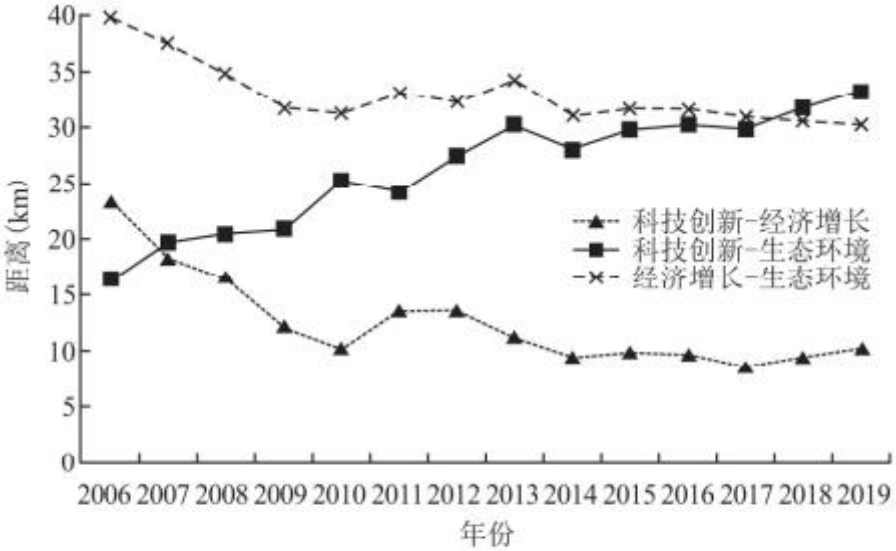

图 4　2006~2019 年系统间的空间重心距离演变趋势

Fig. 4　Evolution trends of spatial center of gravity distances among systems from 2006 to 2019

(2)2006～2019 年三类双系统的空间重心距离

图 4 显示，“科技创新-经济增长”的重心距离最小，即目前科技创新与经济增长重心匹配度最优。其中 2010～2012 年相对距离增长速度较大，主要源于金融危机的影响。2013 年后恢复正常，空间重心距离变动较为平稳，2017 年后再次出现上升趋势，这说明了科技创新与经济增长空间匹配程度出现下降趋势，归因于长三角东部地区科技创新实力的提升相对经济水平更快，而科技创新对经济增长的推动作用还未充分显现，中偏北部城市要将科技创新成果积极运用到经济建设中去，推动创新型经济发展。其次，“科技创新-生态环境”的重心距离由 2006 年最小变化为 2019 年最大，总体呈波动上升的趋势，这说明科技创新

与生态环境的空间匹配程度正在逐步降低，科技创新对生态环境保护的促进作用还未显现。“波动性”特征也体现了科学技术发现转化为科技成果并运用到生态环境保护中这一过程具有阶段性、周期性。最后，“经济增长-生态环境”的重心距离较大，到 2018 年仅次于“科技创新-生态环境”,并在 2009 到 2019 年形成了较为明显的“倒 U”型特征。2009～2013 年受到金融危机的影响，各地方政府为减轻金融危机对地方经济的冲击，故将经济发展放在首位，忽略了生态环境的保护治理工作，从而导致长三角经济增长与生态环境间重心距离增大，匹配程度降低。2013 年后意识到环境退化的严重性，开始重视生态环境治理，提倡经济与环境协同发展，故重心距离恢复缓慢下降趋势。

4.3.2 三类双系统与三系统耦合协同发展趋势

为进一步讨论各双系统与三系统耦合协同发展的关系，使用截面多项式拟合 2006 与 2019 年这两个起止年份双系统与三系统的耦合协调度，结果见图 5。

图 5 显示，2006 与 2019 年各拟合线斜率均为正，表明这三类双系统的协调发展对三系统的协调发展起正向促进作用。科技创新-经济增长、科技创新-生态环境、经济增长-生态环境这三类双系统耦合协调度与三系统耦合协调度的拟合回归系数分由 2006 年的 1.070、0.814、1.447 变化为 2019 年的 1.437、0.953、1.653。2006～2019 年科技创新-经济增长、经济增长-生态环境与三系统的拟合回归系数均显著提高，表明其对三系统的耦合协调发展促进作用增强，现阶段促进这两个双系统的协调发展，特别是促进经济增长与生态环境保护的脱钩，更能推动三系统协调发展。其中，2006 年科技创新-经济增长拟合回归系数较高，其耦合协调程度的提高对三系统的整体协调发展影响较大，原因在于当时长三角城市群科技创新水平较低，提升科技创新能力并增强科技创新对经济发展的促进作用，可以较大程度提高三系统的协调发展水平。2019 年科技创新-经济增长与三系统的拟合回归系数进一步大幅度上升，增加了 0.367,即其对三系统耦合协调发展的促进作用极大增强，这源于长三角城市群科技创新、经济增长前期经历了磨合后，经济社会发展方式从“要素驱动”转向“创新驱动”取得了明显的进步，然而前文分析显示科技创新水平增长速度逐渐减缓，表明创新驱动经济模式的迅速发展后可能会面临耦合难以继续深化的难题，未来可能会出现科技创新与经济发展的耦合协调偏离三系统而发展，即当前科技创新与经济发展的政策仍需不断改进。

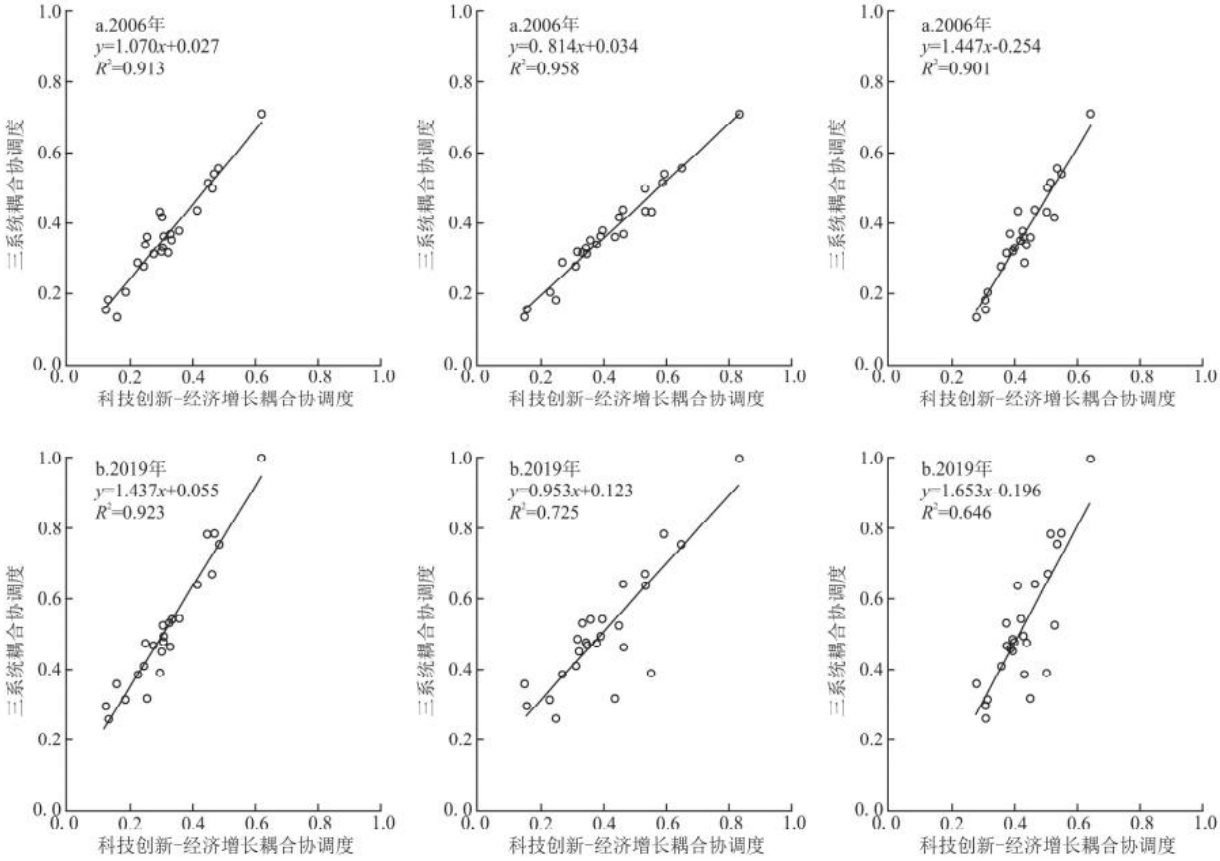

图 5　长三角城市群三类双系统与三系统耦合协调度发展趋势

Fig. 5　Development trends of coupling coordination between three systems and three types of dual system in YRDUA

4.4 三系统耦合协调趋势预测

将长三角城市群 2006～2019 年科技创新-经济增长-生态环境耦合协调度数据作为模拟值带入 GM(1,1)模型中，测算预测值与模拟值间的后验差比 C 值和相对精度 P 值，结果显示各城市后验差比 C 最大值为 0.1309,相对精度最小值为 0.929,均在合格范围内，可以进行耦合协调度演变趋势预测分析。本文 GM(1,1)模型预测期为 2020～2025 年，预测结果见表 6。

从表 6 预测结果来看，长三角城市群科技创新-经济增长-生态环境耦合协调水平在未来几年将不断得到改善，各城市将大致延续以往的变化特征。其中，上海、苏州和杭州将实现更高质量的优质协调，南京将在中级协调基础上实现向良好协调的跃迁，无锡、合肥、常州等城市也将从低水平协调跃迁至中级协调。预测期内，安徽省除合肥、芜湖及滁州外，仍有大部分城市处于衰退协调的发展阶段，其中滁州将会在 2024 年走出失调衰退的发展困境，进而转向协调发展阶段。马鞍山、铜陵、安庆等城市协调水平尽管得到提升，但由于协调水平起点较低，预计 2020～2025 年仍将处于失调衰退的发展阶段。综上，在耦合协调水平的推进上，长三角城市群各城市应继续保持现有演化水平，并进一步改进以突破自身限制因素，实现科技创新能力、经济稳步增长与生态环境保护的协调共升。

表 6 长三角城市群科技创新-经济增长-生态环境耦合协调度演变趋势预测

	2020	2021	2022	2023	2024	2025

上海	0.957	0.966	0.973	0.989	0.992	0.997
南京	0.785	0.809	0.834	0.859	0.885	0.887
无锡	0.708	0.723	0.738	0.754	0.770	0.787
常州	0.643	0.662	0.680	0.699	0.719	0.739
苏州	0.819	0.840	0.860	0.882	0.904	0.927
南通	0.557	0.577	0.598	0.620	0.643	0.666
盐城	0.500	0.520	0.541	0.563	0.585	0.609
扬州	0.587	0.608	0.630	0.653	0.676	0.700
镇江	0.574	0.591	0.608	0.626	0.644	0.663
泰州	0.532	0.552	0.573	0.594	0.617	0.640
杭州	0.841	0.864	0.887	0.911	0.936	0.961
宁波	0.678	0.697	0.716	0.736	0.757	0.778
嘉兴	0.588	0.606	0.625	0.645	0.665	0.685
湖州	0.528	0.546	0.564	0.582	0.602	0.622
绍兴	0.597	0.620	0.644	0.669	0.695	0.722
金华	0.514	0.530	0.545	0.562	0.578	0.596
舟山	0.468	0.485	0.502	0.521	0.540	0.560
台州	0.539	0.559	0.580	0.601	0.624	0.647
合肥	0.657	0.675	0.695	0.714	0.735	0.756

芜湖	0.518	0.530	0.542	0.555	0.568	0.581
马鞍山	0.462	0.465	0.468	0.470	0.473	0.476
铜陵	0.416	0.419	0.423	0.426	0.430	0.434
安庆	0.397	0.414	0.431	0.449	0.466	0.484
滁州	0.437	0.456	0.475	0.494	0.514	0.534
池州	0.349	0.362	0.376	0.390	0.404	0.419
宣城	0.394	0.408	0.421	0.435	0.448	0.462

5 结论及政策建议

5.1 结论

在对科技创新、经济增长与生态环境间耦合协同跃迁机理论证的基础上，本文尝试构建了三者指标评价体系，运用熵值法、耦合协调模型、GM(1,1)灰色预测模型等方法科学测算和分析了长三角城市群 26 个城市 2006～2019 年三系统间耦合协同发展水平，并进一步对三者交互影响关系及未来演化趋势作出讨论。主要研究结论如下：

(1)综合指数测算结果显示，长三角城市群科技、经济与生态水平发展情况总体向好，综合指数不断攀升。其中经济增长指数变动幅度最大，科技创新与生态环境变动幅度相当；纵使近年来国家大力发展科技创新能力，科技创新由于发展相对滞后、起点较低，离成熟阶段仍有距离，致使平均水平相对落后。

(2)耦合协调水平测算结果说明：①长三角城市群整体三系统耦合协调水平呈平稳上升的态势，实现了由失调衰退状态向协调发展状态的转变，但空间维度上，三系统耦合协调发展处于非均衡状态，呈“中心-边缘”分布和“Z 字形”分布特征；②与科技创新相关的两类双系统耦合协调水平相对较低，表明科技创新对经济增长和生态环境的有效推动和支撑作用并未显现，科技创新还未真正成为推动长三角城市群经济高质量发展的关键要素。

(3)从三系统之间交互影响的时空分析可以得出：①长三角高创新水平、高经济发展水平城市与高生态环境水平城市空间错位分布特征显著，呈逐渐改善趋势；②科技创新与经济增长重心位置相距最近，其空间匹配程度最高，生态环境保护与科技、经济发展的匹配度较低；③三类双系统与三系统耦合协调水平的拟合线斜率均为正，即对三系统耦合协调发展的均呈正向促进作用，其中，科技创新-经济增长与三系统的拟合回归系数增幅最大，表明科技创新、经济增长经历了前期磨合后，经济社会发展方式从要素驱动转向创新驱动取得了明显的进步。

(4)从三系统耦合协调水平预测结果可以得出，长三角城市群科技创新-经济增长-生态环境耦合协调水平大致延续以往的变化特征，协调水平不断得到改善。“十四五”期间，安徽仍有部分城市处于失调衰退的发展阶段，说明现有发展路径尚存在改进之处。

5.2 政策建议

基于上述研究结论，笔者认为，为有效提升长三角城市群科技创新-经济增长-生态环境耦合协调水平并促进城市间均衡发展可以从以下几点着手：

(1)持续加强科技创新投入与创新领域改革。

上述结论均显示长三角城市群现阶段科技创新发展逐步向好，但整体仍存在发展不充分，对经济增长与生态环境的潜在推动力还未完全显现的问题，现阶段需要通过创新投入与改革激发其潜力。首先，长三角城市群要积极响应《长三角科技创新共同体建设发展规划》中指出的“科技+产业”发展理念，加强对创新产业的投入，引领传统产业升级，达到提高资源利用效率和减少污染物排放，逐步形成“创新生态”的良性发展模式。其次，持续推进科技创新改革，特别是创新要素流动改革，有助于改善长三角创新高度集聚的空间特征，加速创新要素在城市间流动，使得创新要素配置更加合理化，整体经济运行更加高效。

(2)统筹推进区域一体化协调发展，缩小城市间协调发展水平差距。

长三角城市群耦合协调度的空间分布情况显示其科技创新、经济增长与生态环境耦合协调水平在区域内发展不平衡。长三角应充分发挥上海、杭州、南京、合肥等增长极的扩散效应，通过高水平协调城市向低水平协调城市转移先进技术、产业等，带动低水平协调城市科技、经济、生态的协调发展，从而实现更高水平协调，形成区域相互促进的区域协调一体化发展。

(3)改进协调发展路径，加快失调衰退型城市向协调型城市转化的步伐。

预测结果显示安徽部分城市“十四五”期间仍将处于失调衰退的发展阶段，安徽作为农业大省，可加强科技创新在农业生产中的运用，促进产业升级，达到增加农业产量，同时减少农业生产所制造的化学污染。最终彻底抛弃“先污染后治理”的发展路径，以实现科技、经济与生态的一致发展，突破失调衰退的发展困境，转向良性协调发展。

参考文献

[1] KUZNETS S.Economic growth and income equality [J].American Economic Review,1955,45(1):1-28.

[2] KEMP-BENEDICT E.The inverted pyramid:A neo-ricardian view on the economy-environment relationship [J].Ecological Economics,2014,107:230-241.

[3] BABEAU A,DENISON E F,POULLIER J P,et al.Why growth rates differ,postwar experience in nine western countries [J].Revue Économique,1969,20(5):915.

[4] PARK S C,LEE S K.The innovation system and regional growth strategy in Denmark[J].Ai & Society,2005,19(3):292-308.

[5] EHRLICH P R,HOLDREN J P.Impact of population growth [J].Science (New York,N Y),1971,171(3977):1212-1217.

[6] PORTER M E.Essay [J].Scientific American,1991,264(4):168.

[7] GROSSMAN G M,KRUEGER A B.Environmental Impacts of the north american free trade agreement

[R].Cambridge:Working Paper,1991.

[8] 韩瑞玲，佟连军，佟伟铭，等.经济与环境发展关系研究进展与述评 [J].中国人口·资源与环境，2012,22(2):119-124.HAN R L,TONG L J,TONG W M,et al.Research advances and reviews of relationship between economic and environmental development [J].China Population,Resources and Environment,2012,22(2):119-124.

[9] 卫兴华，侯为民.中国经济增长方式的选择与转换途径 [J].经济研究，2007,42(7):15-22.WEI X H,HOU W M.Choice of economic growth styles in China and transition from the extensive style to the intensive one [J].Economic Research Journal,2007,42(7):15-22.

[10] 张来武.科技创新驱动经济发展方式转变 [J].中国软科学，2011(12):1-5.ZHANG L W.Scientific and technical innovation drives the transition of economic development mode [J].China Soft Science,2011(12):1-5.

[11] 洪银兴.科技创新与创新型经济 [J].管理世界，2011(7):1-8.HONG Y X.Scientific and technological innovation and innovative economy [J].Management World,2011(7):1-8.

[12] YI H,LIU Y.Green economy in China:Regional variations and policy drivers [J].Global Environmental Change,2015,31:11-19.

[13] 黄德春，刘志彪.环境规制与企业自主创新——基于波特假设的企业竞争优势构建 [J].中国工业经济，2006(3):100-106.HUANG D C,LIU Z B.Study on relationship between environmental regulation and firm independently innovation:The firm competitiveness design based on porter hypothesis [J].China Industrial Economy,2006(3):100-106.

[14] 王长征，刘毅.经济与环境协调研究进展 [J].地理科学进展，2002,21(1):58-65.WANG C Z,LIU Y.A review on the research of harmony of economy and environment [J].Progress in Geography,2002,21(1):58-65.

[15] 王敏，黄滢.中国的环境污染与经济增长 [J].经济学(季刊),2015,14(2):557-578.WANG M,HUANG Y.China’s environmental pollution and economic growth [J].China Economic Quarterly,2015,14(2):557-578.

[16] 李雪松，龙湘雪，齐晓旭.长江经济带城市经济-社会-环境耦合协调发展的动态演化与分析 [J].长江流域资源与环境，2019,28(3):505-516.LI X S,LONG X X,QI X X.Dynamic evolution and analysis of coupling development of economy,society and environment in Yangtze River economic belt [J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(3):505-516.

[17] 王建康，韩倩.中国城市经济—社会—环境耦合协调的时空格局 [J].经济地理，2021,41(5):193-203.WANG J K,HAN Q.Spatial-temporal Pattern of the Coupling Coordination of Urban Economy-Society-Environment in China [J].Economic Geography,2021,41(5):193-203.

[18] 陈诗一，林伯强.中国能源环境与气候变化经济学研究现状及展望——首届中国能源环境与气候变化经济学者论坛综述 [J].经济研究，2019,54(7):203-208.CHEN S Y,LIN B Q.The summary of the 1st forum for China’s energy,environemnt and climate change economics [J].Economic Research Journal,2019,54(7):203-208.

[19] 关伟，金一.中国能源利用、经济增长演进对生态环境的脉冲响应 [J].经济地理，2020,40(2):31-40.GUAN W,JIN

Y.Analysis of the impulse response of China’s energy utilization and economic growth to the ecological environment [J].Economic Geography,2020,40(2):31-40.

[20] 李广培，张梦倩，李艳歌，等.中国省域绿色创新效率、生态效率与经济增长质量耦合研究 [J].生态经济，2021,37(10):46-52.LI G P,ZHANG M Q,LI Y G,et al.Research on the coupling of provincial green innovation efficiency,ecological efficiency and economic growth quality in China [J].Ecological Economy,2021,37(10):46-52.

[21] 严翔，成长春，周亮基.长江经济带经济发展-创新能力-生态环境耦合协调发展研究 [J].科技管理研究，2017,37(19):85-93.YAN X,CHENG C C,ZHOU L J.Research on coupling coordination development of regional economic growth-innovation ability-ecological environment in Yangtze River economic zone [J].Science and Technology Management Research,2017,37(19):85-93.

[22] 任保平，杜宇翔.黄河流域经济增长-产业发展-生态环境的耦合协同关系 [J].中国人口·资源与环境，2021,31(2):119-129.REN B P,DU Y X.Coupling coordination of economic growth,industrial development and ecology in the Yellow River Basin [J].China Population,Resources and Environment,2021,31(2):119-129.

[23] 蒋文莉，黄何，蔡盼心，等.珠三角生态-经济-科技创新系统耦合协调特征及发展对策 [J].科技管理研究，2021,41(11):63-69.JIANG W L,HUANG H,CAI P X,et al.Research on coupling and coordination of regional ecology-economy-technology innovation:Take nine cities in Pearl River Delta As an example [J].Science and Technology Management Research,2021,41(11):63-69.

[24] 李芳林，张梅.长三角城市群经济资源环境耦合协调差异研究 [J].华东经济管理，2018,32(6):59-65.LI F L,ZHANG M.Coupling and coordination differences of the economy-resources-environment system in the Yangtze River Delta megalopolis [J].East China Economic Management,2018,32(6):59-65.

[25] 段新，戴胜利，廖凯诚.区域科技创新、经济发展与生态环境的协调发展研究——基于省级面板数据的实证分析 [J].科技管理研究，2020,40(1):89-100.DUAN X,DAI S L,LIAO K C.Research on the coordinated development of regional technology innovation,economic development and environment:Empirical analysis based on provincial panel data [J].Science and Technology Management Research,2020,40(1):89-100.

[26] 谭建伟，王宇.生态文明、科技创新与区域经济系统耦合协调研究——以重庆市为例 [J].重庆理工大学学报(社会科学),2022,36(1):97-107.TAN J W,WANG Y.Research on the coupling and coordination of ecological civilization,technological innovation and regional economic system:Taking Chongqing as an example [J].Journal of Chongqing University of Technology (Social Science),2022,36(1):97-107.

[27] 华坚，胡金昕.中国区域科技创新与经济高质量发展耦合关系评价 [J].科技进步与对策，2019,36(8):19-27.HUA J,HU J X.Analysis on the coupling relationship between technology innovation and high-quality economic development [J].Science & Technology Progress and Policy,2019,36(8):19-27.

[28] 严翔，成长春.长江经济带科技创新效率与生态环境非均衡发展研究——基于双门槛面板模型 [J].软科学，2018,32(2):11-15.YAN X,CHENG C C.Research on non-equilibrium relationship between efficiency of regional science & technology innovation and ecological environment in Yangtze River economic zone:Based on dual-panel threshold model [J].Soft Science,2018,32(2):11-15.

[29] 赵传松，任建兰，陈延斌，等.中国科技创新与可持续发展耦合协调及时空分异研究 [J].地理科学，2018,38(2):214-222.ZHAO C S,REN J L,CHEN Y B,et al.Coupling coordination and spatio-temporal differentiation of scientific and technological innovation and sustainable development in China [J].Scientia Geographica Sinica,2018,38(2):214-222.

[30] 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 [J].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 [J].Journal of Natural Resources,2017,32(5):788-799.

[31] 王林钰，陈浩，陈思源，等.城市层面能源-经济-环境-社会耦合协调发展的动态演化与实证分析——以江苏省为例 [J].北京理工大学学报(社会科学版),2022,24(1):51-64.WANG L Y,CHEN H,CHEN S Y,et al.Dynamic evolution and empirical analysis of coordinated and coupling development of energy-economy-environment-society at urban level:A case study of Jiangsu Province [J].Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition),2022,24(1):51-64.

[32] 周成，冯学钢，唐睿.区域经济-生态环境-旅游产业耦合协调发展分析与预测——以长江经济带沿线各省市为例 [J].经济地理，2016,36(3):186-193.ZHOU C,FENG X G,TANG R.Analysis and forecast of coupling coordination development among the regional economy-ecological environment-tourism industry:A case study of provinces along the Yangtze economic zone [J].Economic Geography,2016,36(3):186-193.

[33] 张竣喃，逯进，周惠民.技术创新、产业结构与金融发展的耦合效应研究——基于中国省域数据的实证分析 [J].管理评论，2020,32(11):112-127.ZHANG J N,LU J,ZHOU H M.Coupling effects of technology innovation,industrial structure and financial development:Based on the empirical analysis of provincial data in China [J].Management Review,2020,32(11):112-127.