

长三角城市群生态文明建设水平 空间度量与溢出效应分析

耿鹏 郑中团¹

(上海工程技术大学 数理与统计学院, 上海 201620)

【摘要】 基于长三角 26 个城市 2008—2017 年的面板数据, 通过构建生态文明建设水平测量指标体系, 运用熵权 TOPSIS 法、探索性空间数据分析法等系统分析长三角城市群生态文明建设水平的时空分布特征, 并构建空间杜宾模型探究生态文明建设水平的空间溢出效应。结果表明, 样本考察期内, 长三角城市群生态文明建设水平无明显时序变化, 但群内城市间生态文明建设水平差异明显, 呈现出东高西低特征。长三角 26 个城市生态文明建设水平具有较强的空间相关性。经济社会发展水平与科技研发水平等方面的提升显著促进当地生态文明建设水平的提高, 工业化水平、资源利用程度正向溢出效应明显, 城镇化水平负向溢出效应明显。由此, 提出推进长三角城市群生态文明建设协调发展的建议。

【关键词】 探索性空间数据分析 空间杜宾模型 溢出效应

【中图分类号】 F205; F062.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-4407(2021)07-211-09

长三角城市群是我国工业化和城镇化程度较高的地区之一, 资源能耗大, 环境污染压力大, 生态文明建设具有紧迫性与必要性。2019 年 12 月 1 日《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》对外发布, 纲要提出努力建设绿色美丽长三角, 需要加强生态空间共保, 协同推进环境治理, 夯实绿色发展生态本底。为推进长三角生态文明建设一体化及生态区域优化, 需要准确把握长三角城市群生态文明建设发展现状及各城市间的关联程度, 故有必要对长三角一体化战略下城市群生态文明建设水平进行空间测度及其影响因素分析。

近年来, 生态文明建设的研究方兴未艾, 主要从以下方面展开: (1) 对生态文明建设概念内涵的剖析。学术界分别从人与自然、现代文明与生态文明、生态文明与时代发展三个不同视角阐述了生态文明建设的科学内涵^[1]。(2) 不同层次对象的生态文明评价测度, 主要包括省域、市域、县域等不同层次。严耕等^[2]基于改进的《中国省域生态文明建设评价报告(ECCI2013)》, 计算了中国 31 个省份(不含港澳台地区)的生态文明指数及绿色生态文明指数, 并将各省份进行了分类。侯娜等^[3]以内蒙古自治区 12 个盟市的生态环境数据为研究对象, 综合运用灰色动态聚类 and 粗糙集筛选指标, 构建了内蒙古自治区的绿色资源环境指标体系。成金华等^[4]从国土空间优化、资源能源节约、生态环境保护及生态文明制度 4 个维度, 架构了生态文明差异化指标体系, 对湖北省不同主体功能的县域生态文明建设水平进行分析评价。(3) 研究方法选择多样。现有的生态文明建设多因素综合评价研究中, 因子分析法^[5]、熵值法^[6]、熵权 TOPSIS 法^[7]等定量测度评价方法得到广泛应用。近年来, 在这些评价方法的基础上, 考虑到生态文明建设水平的空间分布, 探索性空间数据分析^[8]、面板数据回归模型^[9-11]则被用于生态文明建设发展水平的空间度量及其影响因素分析。魏和清和李颖^[8]基于莫兰指数考察省域绿色发展指数的空间分布。吴小节等^[9]运用因子分析、聚类分析和面板数据回

¹**作者简介:** 耿鹏, 硕士研究生, 研究方向为生态文明的统计分析与可持续发展。E-mail:miniyezi118@163.com
郑中团, 博士, 副教授, 研究方向为应用随机过程与复杂网络, 可持续发展的统计分析。E-mail:zhongtuanzheng@163.com
基金项目: 全国统计科学研究项目“基于面板数据的上海生态文明建设水平综合测度与优化研究”(2018LY16)

归模型研究中国生态文明发展水平的时空演进与驱动因素。田时中和丁雨洁^[10]在利用熵值法客观评价长三角 26 个城市绿色化指数的基础上,采用面板 Tobit 模型分析影响长三角城市群绿色化发展的主要因素。朱金鹤和樊琴^[11]通过构建生态文明发展水平指标体系,采用熵权 TOPSIS 法、 β 收敛检验以及面板数据回归模型,对西北 5 省的生态文明发展水平收敛性及影响因素进行分析。

综上,前人对生态文明建设的定义内涵及相关理论、生态文明建设水平综合评价及空间度量做了广泛深入的研究,这些研究对于推进生态文明建设均具有重要意义。但从长三角一体化的发展视角来看,尚有如下问题亟待解决或改进加强:长三角城市群生态文明建设水平的空间自相关分析的研究相对缺乏,长三角一体化战略下城市群生态文明建设水平的空间溢出效应需要进一步探究。针对这些问题,结合长三角一体化发展战略背景,以长三角 26 个城市 2008—2017 年面板数据为样本,从“指标体系构建+综合测度与空间度量+溢出效应分析”的研究视角出发,本文结合复合生态系统理论,构建长三角城市群生态文明建设评价指标体系,运用熵权 TOPSIS 法进行生态文明建设水平的综合测度,由此,通过探索性空间数据分析与空间计量模型探究长三角城市群生态文明建设水平的空间相关性及空间溢出效应。基于此,重点分析影响长三角城市群生态文明建设水平的主要因素,识别长三角城市群生态文明建设的瓶颈与短板,从而给出长三角生态文明建设一体化发展及生态区域优化的相应策略及建议。

1 评价指标体系、数据来源与研究方法

1.1 评价指标体系

借鉴已有的生态文明建设科学内涵,以“社会—经济—自然”复合生态系统理论为基础^[12],结合长三角一体化战略的具体目标,构建以社会、经济、自然三大准则层为基础的评价体系。在具体指标的选取上,由于需要突出长三角一体化战略生态目标及长三角的地区差异性,因此,在指标选择时需选取有代表性的核心指标。指标的选取遵循科学性、系统性、可行性与权威性原则^[13]。指标选择主要参考《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》《国家生态文明建设示范区管理规程(试行)》《国家生态文明建设示范县、市指标(试行)》《中国生态文明发展报告》《绿色发展指标体系》中的评价指标体系,在此基础上又参考黄寰等^[7]、宓泽锋等^[14]对生态文明建设评价指标体系的研究,建立长三角城市群生态文明建设水平评价指标体系框架。该指标体系共包括 21 项指标,划入 3 个准则层中(表 1)。

表 1 生态文明建设评价指标体系

目标层	准则层	具体指标
长三角城市群生态文明建设水平评价指标体系	社会	S ₁ 人口自然增长率
		S ₂ 城镇登记失业率
		S ₃ 城镇化率
		S ₄ 职工平均工资
		S ₅ 每万人在校大学生数
		S ₆ 每万人拥有公共汽车数
		S ₇ R&D 占 GDP 比例
	经济	E ₁ 人均地区生产总值

		E ₂ 城镇居民人均可支配收入
		E ₃ 农村居民人均可支配收入
		E ₄ 第三产业比重
		E ₅ 财政收入年增长率
		E ₆ 单位生产总值能耗
		E ₇ 固定资产投资额年增长率
	自然	N ₁ 建成区绿化覆盖率
		N ₂ 人均公园绿地面积
		N ₃ 森林覆盖率
		N ₄ 污水处理率
		N ₅ 生活垃圾无害化转化率
		N ₆ 工业固体废物综合利用率
		N ₇ 空气质量优良率

1.2 数据来源与标准化处理

依据 2016 年 5 月国务院批准的《长江三角洲城市群发展规划》，选取长三角城市群 26 个城市 2008—2017 年的面板数据。指标原始数据来源于 2009—2018 年长三角 26 个城市统计年鉴、江浙皖统计年鉴及统计局官方数据，部分指标值依据二次计算得到，缺失数据采用多重插补法或以周边城市为参照补全。由于各指标数据正负指向及单位量纲均有差异，在数据计算之前，需对数据进行标准化处理。公式(1)、公式(2)分别为正向指标和逆向指标计算公式：

$$x^* = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \tag{1}$$

$$x^* = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \tag{2}$$

式中：x*是标准化值；x_{ij}是 j 项指标的第 i 个值；x_{jmin}和 x_{jmax}是 j 项指标的最小值与最大值。

1.3 分析方法

选用客观综合评价熵权 TOPSIS 法对社会、经济、自然 3 个准则层中各项指标数据进行综合测度。通过空间自相关分析考察长三角 26 个城市的生态文明建设水平的空间分布状况。在综合测量和评价长三角城市群生态文明建设水平的基础上，通过空间计量模型分析生态文明建设水平的空间溢出效应及影响因素。

1.3.1 熵权 TOPSIS 法

熵权 TOPSIS 法是将熵值法与 TOPSIS 相结合的多指标综合评价方法。熵值法根据指标数值的变异程度(熵)对各指标进行客观赋权,可避免个人主观因素的影响。TOPSIS 法是通过测度各评价方案与最优方案和最劣方案的距离,获取评价方案与最优方案的相对贴合度,从而对各评价方案进行排序。无论是指标赋权,还是最终的评价指数,都是从指标数据自身出发进行测算。熵权 TOPSIS 法的运用使评价结果具有科学性和客观性^[7,11,14]。计算步骤如下:

(1) 构建标准化矩阵:

$$A=(a_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

式中: a_{ij} 代表标准化之后的数据。

(2) 确定评价指标的熵:

$$\begin{aligned} f_{ij} &= a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij} \\ H_j &= -\frac{1}{\ln m} \left(\sum_{i=1}^m f_{ij} \times \ln f_{ij} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: f_{ij} 表示第 j 项指标在第 i 个方案占该指标的权重、 H_j 表示第 j 项指标的熵值。

(3) 计算指标的熵权:

$$w_j = (1 - H_j) / \sum_{j=1}^n (1 - H_j) \quad (5)$$

式中: w_j 表示第 j 项指标的权重。

(4) 计算加权评价权重:

$$R=(r_{ij})_{m \times n}, \text{ 其中 } r_{ij}=w_j a_{ij} \quad (6)$$

式中: r_{ij} 表示加权标准化指标值。

(5) 确定最优方案 Q_+ 和最劣方案 Q_- :

$$\begin{aligned} Q_+ &= (r_1^+, r_2^+, \dots, r_n^+) \\ Q_- &= (r_1^-, r_2^-, \dots, r_n^-) \end{aligned} \quad (7)$$

(6) 计算各方案与 Q 和 Q 的距离:

$$\begin{aligned} D_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_i^+)^2} \\ D_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_i^-)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

(7) 计算各方案的评价指数:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (9)$$

式中: $C_i \in [0, 1]$, 某城市 C_i 得分越高, 代表该城市生态文明建设水平越高。

1.3.2 探索性空间数据分析

通过探索性空间数据分析中的全局空间自相关和局部空间自相关分析, 实现生态文明建设水平空间分布的可视化分析, 从而发现是否具有空间效应。

全局空间自相关性。全局空间自相关性主要用于判断空间上是否出现了集聚或异常值, 一般用全局莫兰指数 (Moran' s I) 来度量^[15], 计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (10)$$

式中: $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, 表示方差; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 表示平均值; x_i 为城市 i 的观测值, n 为城市总数, w_{ij}

是空间权重矩阵。莫兰指数的取值范围为 $[-1, 1]$, 当 $I > 0$ 时为空间正相关, 越接近 1, 观测值越趋于空间集聚。当 $I < 0$ 时为空间负相关, 越接近 -1, 观测值越趋于离散。当 I 越接近 0 时, 表明观测值越趋于随机分布。

局部空间自相关性。局部空间自相关主要用于判断区域出现集聚及异常值的具体位置, 通常采用局部莫兰指数来度量^[16], 计算公式为:

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (11)$$

式中：I_i 为正值时表示该城市周围展现出相似的空间集聚性（高一高或低—低），I_i 为负值时表明该城市周围表现出非相似的空间集聚性（高一低或低—高）。一般采用莫兰散点图对区域单元的局部空间自相关性进行分析。

1.3.3 空间计量模型

目前，主要有 3 种空间计量模型，分别为空间滞后模型、空间误差模型与空间杜宾模型^[17]。

(1) 空间滞后模型 (SLM)。

SLM 指将被解释变量的空间滞后项放入解释变量中，其回归模型如下所示：

$$\begin{aligned} y &= \rho W_1 y + X\beta + \varepsilon \\ \varepsilon &\sim N(0, \delta^2 I_n) \end{aligned} \quad (12)$$

式中：y 是 n×1 维(因变量)向量，X 是 n×k 维(自变量)矩阵，ρ 是空间相关系数，W₁ 是 n×n 维(因变量)空间权重矩阵，ε 是 n×1 维(白噪声)向量，β 是 k×1 维(自变量)系数，δ 是 ε 的方差，I_n 是 n 维单位矩阵。

(2) 空间误差模型 (SEM)。SEM 通过误差项体现空间依赖性，回归模型如下所示：

$$\begin{aligned} y &= X\beta + \xi \\ \xi &= \lambda_1 W_2 \xi + \varepsilon \\ \varepsilon &\sim N(0, \delta^2 I_n) \end{aligned} \quad (13)$$

式中：W₂ 是 n×n 维(残差)空间权重矩阵，ξ 是 n×1 维(残差)向量，λ₁ 为残差相关系数。

(3) 空间杜宾模型 (SDM)。

SDM 是 SLM 与 SEM 的结合，模型中不仅包含了解释变量的空间相关性还包含了被解释变量的空间相关性。回归形式为：

$$y = \rho W_1 y + X\beta + \lambda_2 W_1 X + \varepsilon \quad (14)$$

式中：λ₂ 表示其他自变量对地区观测值的影响系数。

2 实证分析

2.1 生态文明建设水平测量结果评价

基于各指标数据，在对长三角 26 个城市生态文明建设水平进行横向比较时，运用熵权 TOPSIS 法能较为客观地反映出各城市在生态文明建设中所处的水平。具体地，利用熵值法确定生态文明建设水平各评价指标的权重。针对每一年份，利用 TOPSIS 法，通过公式(8) (即熵权欧式距离公式) 计算长三角各城市与“最优城市”和“最劣城市”的距离，进而通过公式(9) 获取各城

市的评价指数，结果如表 2 所示。熵权 TOPSIS 法是从指标数据自身出发对长三角城市群生态文明建设水平进行测算，该评价方法适用可行，具有客观赋权与定量测度的优势。

表 2 2008—2017 年生态文明建设水平评价指数

城市	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	均值	极差
上海	0.527	0.521	0.537	0.539	0.549	0.535	0.535	0.528	0.524	0.519	0.531	0.030
南京	0.566	0.569	0.599	0.606	0.573	0.559	0.603	0.637	0.620	0.634	0.597	0.079
无锡	0.569	0.591	0.634	0.615	0.613	0.566	0.577	0.563	0.558	0.552	0.584	0.082
常州	0.546	0.543	0.582	0.565	0.608	0.575	0.578	0.543	0.542	0.547	0.563	0.066
苏州	0.563	0.569	0.598	0.587	0.608	0.549	0.554	0.537	0.551	0.529	0.564	0.079
南通	0.466	0.479	0.497	0.479	0.490	0.530	0.513	0.515	0.485	0.492	0.495	0.065
盐城	0.391	0.361	0.400	0.369	0.387	0.385	0.400	0.396	0.376	0.386	0.385	0.040
扬州	0.480	0.520	0.512	0.478	0.508	0.512	0.483	0.507	0.478	0.485	0.496	0.042
镇江	0.517	0.548	0.569	0.531	0.555	0.544	0.539	0.522	0.514	0.496	0.534	0.073
泰州	0.383	0.392	0.439	0.398	0.436	0.442	0.441	0.457	0.428	0.453	0.427	0.074
杭州	0.647	0.654	0.678	0.637	0.693	0.602	0.656	0.668	0.680	0.640	0.655	0.091
宁波	0.575	0.607	0.582	0.537	0.552	0.594	0.613	0.618	0.637	0.585	0.590	0.100
嘉兴	0.457	0.450	0.471	0.457	0.479	0.497	0.464	0.457	0.472	0.471	0.468	0.047
湖州	0.527	0.524	0.517	0.524	0.545	0.465	0.499	0.497	0.510	0.531	0.514	0.080
绍兴	0.526	0.519	0.534	0.515	0.533	0.524	0.537	0.540	0.550	0.566	0.534	0.051
金华	0.520	0.503	0.511	0.482	0.515	0.485	0.496	0.485	0.515	0.510	0.502	0.038
舟山	0.508	0.507	0.556	0.556	0.547	0.555	0.543	0.519	0.538	0.547	0.538	0.049
台州	0.485	0.484	0.461	0.432	0.477	0.472	0.498	0.501	0.518	0.530	0.486	0.097
合肥	0.417	0.404	0.455	0.465	0.508	0.488	0.501	0.514	0.494	0.465	0.471	0.110
芜湖	0.413	0.410	0.402	0.355	0.427	0.380	0.341	0.357	0.364	0.350	0.380	0.086
马鞍山	0.361	0.371	0.388	0.371	0.343	0.338	0.365	0.331	0.342	0.333	0.354	0.057
铜陵	0.434	0.402	0.386	0.419	0.394	0.421	0.415	0.347	0.298	0.304	0.382	0.136
安庆	0.384	0.342	0.313	0.287	0.350	0.346	0.317	0.328	0.290	0.305	0.326	0.097
滁州	0.342	0.335	0.351	0.379	0.376	0.336	0.292	0.308	0.252	0.287	0.326	0.127

池州	0.453	0.416	0.409	0.392	0.393	0.459	0.389	0.404	0.375	0.374	0.406	0.084
宣城	0.432	0.414	0.419	0.410	0.383	0.411	0.389	0.391	0.372	0.395	0.402	0.060
均值	0.480	0.478	0.492	0.476	0.494	0.483	0.482	0.480	0.472	0.473		

长三角城市群生态文明建设水平呈现出不同的时空分异特征。一方面，从长三角整体纵向时序上看，长三角城市群生态文明建设水平整体起伏波动较小，历年评价指数的均值稳定在 0.48 左右。样本考察期内，除 2010 年、2012 年和 2017 年，长三角城市群生态文明建设水平较前一年有所上升外，其余年份均呈现下降趋势，但跨度均在 0.016 左右。其中，2016 年为样本考察区间内最小值(0.472)，2012 年为最大值(0.494)。

另一方面，从长三角各城市空间分布看，长三角城市群内各城市生态文明建设水平截面差异明显。从极差大小来看，上海最小(0.030)，铜陵最大(0.136)。从 10 年内 26 个城市生态文明建设水平评价指数自然间断点空间分布图看出(图 1)，生态文明建设水平表现较好的城市大多位于长三角东部，滁州、安庆、马鞍山 3 市为低水平城市，芜湖、铜陵、盐城、宣城、池州、泰州 6 市为较低水平城市，嘉兴、合肥、台州、南通、扬州、金华、湖州 7 市为中等水平城市，上海、镇江、绍兴、舟山、常州、苏州 6 市为较高水平城市，无锡、宁波、南京、杭州 4 市为高水平城市。其中，杭州是 26 个城市中唯一突破 0.6 的城市，表现最为优越。究其原因，较高生态文明建设水平城市主要以上海都市圈为主，基本位于长三角城市群中心地带，经济社会发达，综合水平较高。中等水平城市以长三角城市群外围城市为主，受中心城市辐射作用较小。其余城市均属于安徽省，自然生态基础较好，但经济与社会发展水平远低于上海、江苏与浙江。

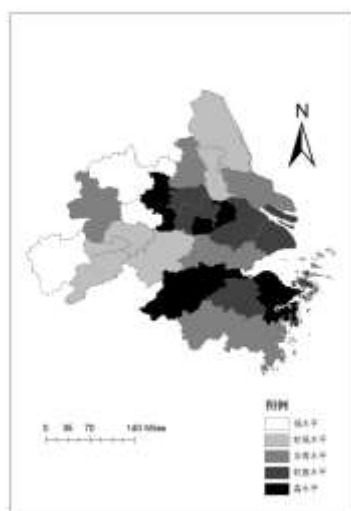


图 1 长三角 26 市生态文明建设水平评价指数均值空间分布图

长三角 26 个城市生态文明建设水平发展呈现出不同的波动状况。为进一步分析长三角城市群考察期内各城市不同的发展状况与波动特征，计算 26 市生态文明建设水平评价指数标准差(图 2)。标准差越大，说明该城市生态文明建设发展水平在时序上波动越大，不够稳定，但并不表示该城市生态文明建设发展水平偏低。依据生态文明建设水平评价指数的标准差，对长三角 26 个城市升序排列，可将 26 市发展水平的波动状况分为 3 个类别。上海、盐城、嘉兴、金华、绍兴、扬州、宣城、舟山、马鞍山、南通 10 市为强平稳型城市，标准差介于 0.009~0.020；镇江、常州、湖州、苏州、杭州、泰州、无锡、台州、南京、池州 10 市为中平稳型城市，标准差介于 0.020~0.030；安庆、宁波、芜湖、合肥、滁州、铜陵 6 市为弱平稳型城市，标准差大于 0.030。

上海为 0.009 最低，发展最为平稳，铜陵为 0.049 最高，发展平稳性最弱。强平稳型城市社会、经济、自然发展水平均较为稳定，需要通过转变经济发展模式及修复自然生态系统来提升生态文明建设水平。中平稳和弱平稳型城市在经济、社会、自然 3 个子系统下均具有较强的发展潜力，需加强统筹兼顾，推动协调发展。

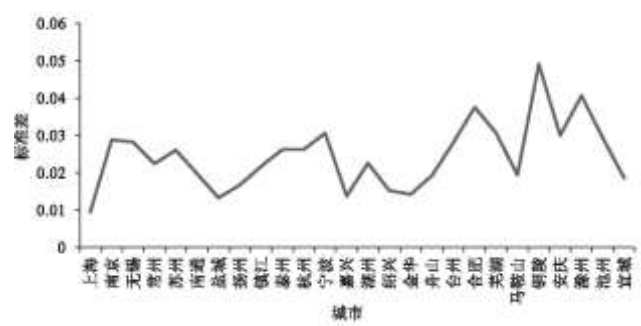


图 2 长三角 26 市生态文明建设水平评价指数标准差

2.2 空间关联分析

为了研究长三角 26 个城市生态文明建设水平评价指数的空间关联性，本文接下来采用探索性空间数据分析法对上述评价指数进行空间关联分析。分别选择邻接矩阵、距离矩阵和邻接距离矩阵作对比分析，最终结合空间杜宾模型的可决系数与极大似然值选择邻接一阶矩阵作为最终空间权重矩阵。

2.2.1 全局空间自相关性分析

在对 2008—2017 年长三角 26 个城市计算生态文明建设水平的基础上，计算长三角城市群生态文明建设水平评价指数的全局莫兰指数(表 3)。

表 3 生态文明建设水平全局莫兰指数

年份	莫兰指数	P 值	z 值
2008	0.346	0.003	2.8897
2009	0.335	0.005	2.7744
2010	0.357	0.004	2.9507
2011	0.312	0.006	2.5821
2012	0.306	0.009	2.5978
2013	0.280	0.016	2.4373
2014	0.295	0.011	2.5594
2015	0.229	0.026	2.0966

2016	0.339	0.004	2.9388
2017	0.418	0.003	3.4802

从表 3 看出,2008—2017 年,长三角城市群生态文明建设水平的全局莫兰指数均为正数且通过 P 值小于 0.05 的显著性检验,说明长三角城市群的生态文明建设水平存在空间正相关,具有显著的全局空间集聚特征。整体来看,长三角城市群的生态文明建设水平的莫兰指数从 2008 年的 0.346 增加到 2017 年的 0.418,表明长三角城市群空间集聚呈增强趋势。但这 10 年里,莫兰指数一直在下降—上升的波动趋势中循环发展。2008—2015 年,莫兰指数整体呈下降趋势,2015 年之后,莫兰指数开始平稳上升,这一时期的变化与生态文明建设水平发达地区对欠发达地区起带动作用有一定的关系。

2.2.2 局部空间自相关分析

为进一步衡量长三角城市群各城市生态文明建设水平与周边生态文明建设水平的空间关联与差异的分布格局,文中选用莫兰散点图,对长三角城市群生态文明建设水平进行分析,鉴于篇幅,仅对 2008 年、2011 年、2014 年、2017 年长三角城市群生态文明建设水平局部空间自相关进行分析,画出长三角城市群的莫兰散点图。莫兰散点图有 4 个象限,第一象限为高高型空间联系形式,第二象限为低高型,第三象限为低低型,第四象限为高低型。位于第一和第三象限的城市具有较强的空间正相关性,表示区域的发展水平相似。位于第二和第四象限的城市则具有较强的空间负相关性,表示区域的发展具有差异。

局部空间自相关分析结果如图 3 和表 4 所示,位于高高象限和低低象限的城市 2008 年为 22 个,占比 84.62%,2011 年为 18 个占比 69.23%,2014 年为 18 个占比 69.23%,2017 年为 18 个占比 69.23%。结合表 3 可知,长三角城市群生态文明建设水平的空间集聚效应呈现出先减弱后增强的趋势,通过比较各集聚象限中城市的变动发现:(1)上海、苏州、无锡、常州、镇江、宁波、金华、绍兴、湖州、舟山这些城市在样本期内均位于第一象限,即自身与周边城市的生态文明建设水平都较高。这些城市主要位于长三角东部地区,区位优势明显,产业结构较为合理,生态文明建设措施得当,因此对临市的扩散效应明显。(2)嘉兴、宣城、泰州始终位于第二象限,自身生态文明建设水平较低但周边城市生态文明建设水平表现良好,具有一定的后天优势。(3)位于第三象限的大多是安徽省的城市,即自身生态文明建设水平不高,周边各城市生态文明建设水平也较低,属于短时间内既无法发挥带头作用,也不能依靠辐射提高生态文明建设水平的地区。将上海、苏州、无锡、常州、镇江等地的高生态文明建设水平通过南京等长三角西部城市辐射出去,让低低城市的生态文明建设水平逐渐提高,实现长三角一体化的平稳推进。(4)南京是长三角城市群 26 个城市中唯一在样本期内始终位于第四象限的城市,即自身生态文明建设水平较高,但周边城市生态文明建设水平较低。由于缺乏有力的区域合作机制并未对周边城市产生有效的辐射带动作用,但南京在长三角生态文明建设一体化的过程中的作用却不容忽视,南京与安徽省毗邻,是长三角东部生态文明建设高发展向西部辐射的关键节点。

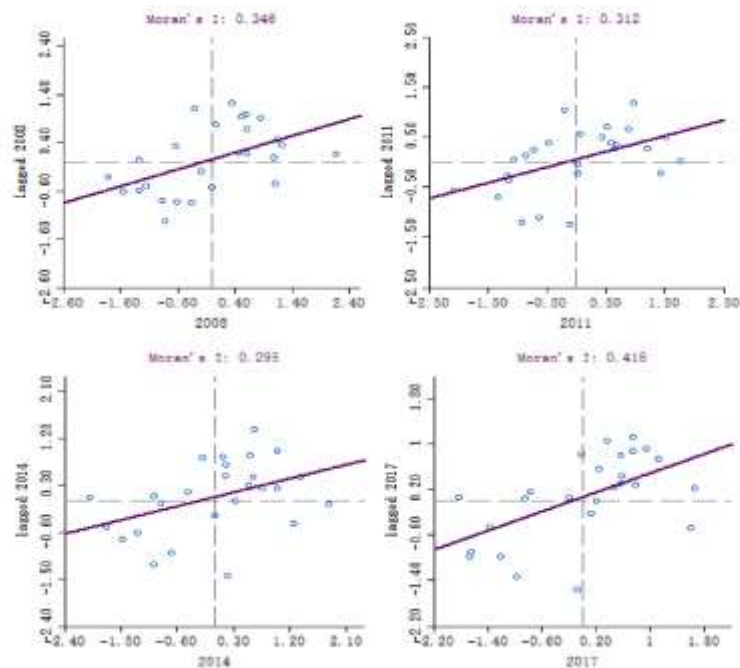


图 3 生态文明建设水平 Moran 散点图

表 4 生态文明建设水平空间聚类表

类型	2008 年	2011 年	2014 年	2017 年
高高型 (H-H)	上海、常州、无锡、苏州、 杭州、宁波、绍兴、舟山、 金华、湖州、台州、镇江	上海、常州、无锡、苏州、 杭州、金华、绍兴、湖州、 舟山、镇江、宁波	上海、常州、无锡、苏州、 镇江、南通、宁波、舟山、 绍兴、金华、湖州、台州	上海、苏州、无锡、常州、 镇江、杭州、宁波、舟山、 金华、绍兴、台州、湖州
低高型 (L-H)	嘉兴、宣城、泰州	嘉兴、台州、宣城、泰州、 滁州	泰州、嘉兴、宣城、滁州	嘉兴、泰州、宣城、盐城、 滁州
低低型 (L-L)	南通、滁州、马鞍山、安庆、 盐城、芜湖、铜陵、池州、 合肥、扬州	盐城、安庆、芜湖、马鞍 山、池州、铜陵、合肥	盐城、安庆、芜湖、马鞍山、 池州、铜陵	马鞍山、安庆、铜陵、芜湖、 池州、合肥
高低型 (H-L)	南京	南通、扬州、南京	扬州、南京、杭州、合肥	南通、扬州、南京

总体而言，长三角城市群生态文明建设水平呈现出“东强西弱”的特点，这与东部城市自身拥有先天的生态资源优势有关。但随着西部城市与上海、南京等中心城市的联系日益密切，未来长三角各城市生态文明建设水平将会日益提高，从而实现长三角一体化发展战略下的生态文明建设一体化。

2.3 生态文明建设水平的空间溢出效应分析

根据前述空间关联分析知长三角城市群生态文明建设水平存在显著的空间全局自相关关系，因而构建空间计量模型，定量研究长三角城市群生态文明建设水平的影响因素及溢出效应。

2.3.1 变量选取

生态文明建设是一个复杂系统，影响生态文明建设水平的因素也是多维与复杂的。结合长三角城市群生态文明建设水平评价指标体系(表 1)、已有研究^[9-11]及长三角城市群的发展现状，在综合测度和评价长三角城市群生态文明建设水平的基础上，选取经济社会发展水平、工业化水平、城镇化水平、科技研发水平、资源利用程度等 5 个方面建立生态文明建设水平影响因素体系。体现各影响因素的具体指标的选取主要依据生态文明建设各评价指标的权重排名。各影响因素解释如下：经济社会发展水平(lnPGDP)用人均地区生产总值表示，经济社会发展水平主要通过提高生态治理投入来影响生态文明建设水平；工业化水平(IND)由第二产业产值占 GDP 比重表示，工业化产业升级将会影响生态文明建设水平；城镇化水平(URB)用城镇化率表示，城镇化将会改变人均生存环境，从而影响生态文明建设水平；科技研发水平(TEC)由 R&D 占 GDP 比重表示，科技发展的进步将会影响污染治理能力与生态保护水平；资源利用程度(COM)由单位生产总值能源消耗量表示，合理的资源利用程度主要通过改善生态环境来影响生态文明建设。测度分析的数据均来自 2009—2018 年长三角 26 个城市的统计年鉴，部分缺失数据采用插值法处理。

2.3.2 回归模型判定选择

首先，面板回归模型的豪斯曼检验统计量值为 31.85，并且通过了显著性为 1%的检验，拒绝采用随机效应模型而采用固定效应模型。之后，对数据进行最小二乘法回归分析，使用拉格朗日乘数检验(LM)，检验结果如表 5 所示。空间滞后模型的拉格朗日乘数检验(LM-lag)和空间误差模型的拉格朗日乘数检验(LM-error)都通过了 1%的显著性检验，而稳健 LM-error 比稳健 LM-lag 显著性水平更高，因此选用空间误差模型。在此基础上结合似然比检验(LR)选择具体的固定效应模型，通过 LR 检验，结果(323.91, 自由度为 26, $P<0.01$)表明拒绝空间固定效应假设，同样地，也应该拒绝时间固定效应假设(30, 自由度为 10, $P<0.01$)。检验结果指向需选择空间和时间双固定效应模型。在确定了两步固定效应模型后，利用 LR 检验验证是否空间杜宾模型能够简化成空间误差模型，LR 检验结果(24.2, $P=0.0001$)说明应该拒绝原假设，同样地，LR 检验结果(24.15, $P=0.0002$)显示空间杜宾模型不能够简化成空间滞后模型，因此应该选择空间杜宾模型。

表 5 空间面板数据的 LM 检验

检验方法	统计量值	P 值
LM-lag	45.57	0.000
LM-error	104.85	0.000
RobustLM-lag	10.27	0.001
RobustLM-error	69.55	0.000

2.3.3 结果分析

空间杜宾模型中包含了空间滞后解释变量与被解释变量，估计结果不足以准确反映解释变量对被解释变量的直接影响^[17]。故采用偏微分方程计算出自变量的直接效应与间接效应。由空间杜宾模型及空间溢出效应估计结果可知，经济社会发展水平(lnPGDP)对生态文明建设水平的直接效应为正且较为显著，表明各城市经济社会发展水平的提升将有助于自身生态文明建设水平的提高。经济社会发展水平与周边城市生态文明建设水平在 10%的显著性水平下未呈现显著关系，表明经济社会发展水平并没

有产生有效的溢出效应。 $\ln PGDP$ 对生态文明建设水平的总效应为正，但统计上不显著，说明长三角城市群经济社会发展水平的提高对生态文明建设水平的提升作用并不明显。

工业化水平 (IND) 对生态文明建设水平的间接效应与总效应分别在 1% 和 5% 的水平下显著为正，第二产业产值占 GDP 比重每正向变化 1%，相邻城市的生态文明建设水平将会增加 0.44%。而长三角城市群的工业化水平每增加 1 个单位，生态文明建设水平增加 0.36。这与近年来长三角地区开始转变工业生产结构，逐步实现工业绿色化生产有关。

城镇化水平 (URB) 对生态文明建设水平的直接效应为负，但在统计上不显著，说明各城市城镇化水平对自身生态文明建设水平的影响并不明显。城镇化水平与相邻城市生态文明建设水平在 5% 的显著性水平下呈现出负向空间溢出效应。城镇化水平对生态文明建设水平的总效应为负，但统计上不显著。城镇化进程导致了城市人口的快速增长，给自身或周边城市的生态环境造成了巨大压力。

科技研发水平 (TEC) 对生态文明建设水平的直接效应为正且在 1% 的水平下显著，说明扩大科研技术在各城市的投资有利于提高生态文明建设水平。科技研发水平对周边城市生态文明建设水平的影响并不显著，由于上海、江苏、浙江、安徽科技研发投入差距较大，科技研发投入空间上的差异是空间溢出效应不显著的原因之一。科技研发水平的总效应在 5% 的水平下显著且为正，R&D 占 GDP 比重每提高 1%，生态文明建设水平提高 0.039%。一方面，科技研发将会提高资源利用效率、降低不可再生能源的使用率。另一方面，科技研发将会对绿色治理与绿色生产产生有力影响，进而有利于生态文明建设水平的提高。

资源利用程度 (COM) 对城市自身的生态文明建设水平在 10% 的显著性水平下未呈现显著关系。COM 对生态文明建设水平的间接效应为正且在 1% 的水平下显著，即资源利用程度对生态文明建设水平有正向空间溢出效应。从总效应来看，提高各城市的资源利用程度将会对生态文明建设水平的提升起到显著促进作用，COM 每正向变化 1 个单位，生态文明建设水平将会提高 0.13。资源的有效利用将会完善用能制度，提高科研技术水平，从而提升生态文明建设水平。

3 结论与建议

从时序演进来看，长三角 26 个城市 2008—2017 年生态文明建设水平并无明显时序变化特征。从空间分布来看，城市群内生态文明建设水平时间截面差异明显，生态文明建设较高水平城市主要属于上海都市圈及杭州都市圈。从空间相关性来看，长三角城市群生态文明建设水平在样本期内呈现显著的空间集聚。从影响长三角城市群生态文明建设水平的特征因素来看，在直接效应上，经济社会发展水平、科技研发水平的提升能显著促进当地生态文明建设水平的提高，工业化水平、城镇化水平、资源利用程度与当地生态文明建设水平关系不显著。在间接效应上，工业化水平、资源利用程度正向溢出效应明显，城镇化水平负向溢出效应明显，经济社会发展水平、科技研发水平无明显溢出效应。

基于此，为推动长三角生态文明建设一体化发展及生态区域优化，提出如下建议：

第一，制订各城市的生态文明建设目标。

可将生态文明建设目标从时间和空间上进行分解，鉴于各城市经济社会发展状况、生态环境资源禀赋差异明显，可依照不同城市不同时期的实际状况制定生态文明建设规划，明确实现短期与长期目标的有效路径。值得一提的是，上海是长江三角洲世界级城市群的核心城市，正推进国际经济、金融、贸易、航运和科技创新“五个中心”的全球卓越城市建设。上海生态文明建设水平发展稳定，但在 26 个城市中优势并不明显，其龙头带动作用未充分发挥，一定程度上是由于其人口压力很大，发展空间有限。可以考虑适度扩大上海作为全球中心城市的行政管辖范围，“有序疏解一般制造等非大都市核心功能”，或可先扩权，强化上海生态环境共保联治的主导权，进一步引领长三角一体化高质量发展。

第二，充分重视城镇化水平的负向溢出效应。

在优化各城市自身经济社会发展水平、科技研发水平的同时，密切关注周边城市关于生态文明建设相关政策，不断优化空间布局，不断完善城市功能，规划一批宜居城市、海绵城市以及生态示范城市，并打造绿色宜居新高地。

第三，积极发挥并提高工业化水平与资源利用程度的正向溢出效应。

各城市需加大科研合作力度，扩大科技创新方面的经济投入，实现科技化工业升级，同时，需用科技创新推动资源利用最大化，营造良好创业环境，推进数字化与人工智能进程，打造长三角数据中心。

第四，实现空间复合渗透。

结合城市群生态文明建设水平的空间集聚效应和空间溢出效应，在长三角生态绿色一体化发展示范区基础上，强化上海的龙头主导地位，加强长三角中心区城市间生态文明建设的合作联动，辐射带动周边地区协同发展，实现城镇、乡村、生态空间及创新空间的复合渗透，通过空间辐射打造长三角生态绿色一体化。

参考文献:

- [1]谷树忠, 胡咏君, 周洪. 生态文明建设的科学内涵与基本路径[J]. 资源科学, 2013(1): 2-13.
- [2]严耕, 林震, 吴明红. 中国省域生态文明建设的进展与评价[J]. 中国行政管理, 2013(10): 7-12.
- [3]侯娜, 李战江, 苏金梅, 等. 基于灰色动态聚类—粗糙集的绿色资源环境评价指标构建模型[J]. 统计与信息论坛, 2017(8): 96-103.
- [4]成金华, 戴胜, 王然. 县域生态文明评价指标体系构建及其应用[J]. 环境经济研究, 2017(4): 107-122.
- [5]谢森炜, 郭凤芝. 省域绿色生态发展水平的测度与评价[J]. 统计与决策, 2019(20): 50-53.
- [6]王奇, 缪婧雯. 基于生态化的我国各省份生态文明建设评估研究[J]. 生态经济, 2018(9): 212-218.
- [7]黄寰, 肖义, 王洪锦. 成渝城市群社会—经济—自然复合生态系统生态位评价[J]. 软科学, 2018(7): 113-117.
- [8]魏和清, 李颖. 我国绿色发展指数的空间分布及地区差异探析——基于探索性空间数据分析法[J]. 当代财经, 2018(10): 3-13.
- [9]吴小节, 彭韵妍, 汪秀琼. 中国生态文明发展状况的时空演变与驱动因素[J]. 干旱区资源与环境, 2016(8): 1-9.
- [10]田时中, 丁雨洁. 长三角城市群绿色化测量及影响因素分析—基于26城市面板数据熵值—Tobit模型实证[J]. 经济地理, 2017(9): 94-103.
- [11]朱金鹤, 樊琴. 西北五省生态文明发展水平收敛性及影响因素[J]. 北方园艺, 2019(7): 170-179.

-
- [12]马世骏,王如松.社会—经济—自然复合生态系统[J].生态学报,1984(1):1-9.
- [13]唐斌.地方政府生态文明建设绩效评估的体系构建与机制创新研究[D].长沙:湘潭大学,2017.
- [14]宓泽锋,曾刚,周灿,等.长三角城市群生态文明建设问题及潜力研究——基于5大城市群的比较[J].长江流域资源与环境,2018(3):463-472.
- [15]Moran P A. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. Biometrika, 1950, 37 (1/2): 17-23.
- [16]Anselin L. Spatial econometrics: Methods and models[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [17]Lesage J, Pace R K. Introduction to spatial econometrics[M]. New York: CRC Press, 2009.