引文格式：张芝镪,李天天,张琳敏,等. 长三角城市化与生态环境耦合协调发展研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(5): 67-70. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.05.014

# 长三角城市化与生态环境耦合协调发展研究

张芝镪[1]，李天天[1]，张琳敏[1]，张　杭[1]
（1. 浙江工商大学 旅游与城乡规划学院，浙江 杭州 310018）

**摘　要：**以长三角城市群为例，基于类DMSP-OLS数据和Landsat系列数据，分别建立综合夜间灯光强度指数和基于像素的生态环境质量模型；并采用耦合协调度模型对长三角城市群城市化水平与生态环境质量进行耦合测度，探究其变化特征。结果表明，2000—2020年长三角城市群城市化程度不断提高；长三角城市群生态环境质量始终维持一个相对稳定的区间；长三角城市群城市化与生态环境质量的协调度持续增加，已初步实现城市化与生态环境之间的良性协调发展。

**关键词：**城市化；生态环境；耦合分析；长三角城市群
**中图分类号：**P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）05-0067-04

## Research on the Coupling and Coordinated Development of Urbanization and Ecological Environment in the Yangtze River Delta

ZHANG Zhiqiang[1], LI Tiantian[1], ZHANG Linmin[1], ZHANG Hang[1]
(1. School of Tourism and Urban & Rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Taking the Yangtze River Delta urban agglomeration as a case study, we utilized DMSP-OLS-like data and Landsat series data to establish the comprehensive nighttime light intensity index and the pixel-based ecological environment quality mode, and employed coupling coordination degree model to assess the level of urbanization and ecological environment quality within the Yangtze River Delta urban agglomeration and to investigate their change characteristics. The results show that the urbanization degree of the Yangtze River Delta urban agglomeration has exhibited continuous improvement from 2000 to 2020. The ecological environment quality of it has remained relatively stable within the same period. The coordination degree between urbanization and ecological environment quality in the Yangtze River Delta urban agglomeration has continuously increased from 2000 to 2020, indicating an initial achievement of favorable and coordinated development between urbanization and ecological environment.

**Key words:** urbanization, ecological environment, coupling analysis, the Yangtze River Delta urban agglomeration

随着城市化进程的推进，生态空间被不断占用，给地区生态环境带来了沉重压力。这种压力与城市化之间的协调程度直接影响着该地区的可持续发展[1]。作为我国经济发展的重要推动力，长三角城市群既承担着生态环境高标准保护的责任，又面临着推动经济高质量发展的重大任务。党的二十大报告明确指出，推动绿色发展，促进人与自然和谐共生，对长三角城市群的生态与经济协调发展提出了更高的要求。人类活动的不断加强使得长三角城市群已出现了大气污染、热岛效应和水生态功能退化等生态环境问题[2]。因此，深入了解并分析该区域生态环境与城市发展的协调水平，准确把握二者之间的问题及其制约因素，是实现长三角城市群生态环境高水平保护和高质量发展的迫切需求。国外已对可持续发展、生态城市、和谐城市、人地关系地域系统等理论进行了激烈探讨[3-4]。在实证研究方面，国外研究已由质性研究向量化研究转变，并得出了PSR模型、环境库兹涅茨曲线、脱钩理论3个代表性研究成果，为我国学者进一步研究奠定了理论和现实基础[5]。目前国内学者主要利用遥感技术、数学模型等方式测定城市化对生态环境的影响[6-7]，针对二者的耦合协调关系与演变规律已形成了较成熟的理论体系[8]。尽管相关研究在深度和广度方面有一定进展，实证分析的研究范围涉及省域[9]、市域[10]等；但以城市群为研究主体的多尺度集成研究较少，仍需深入研究。因此，本文基于类DMSP-OLS数据和Landsat系列数据，分别建立综合夜间灯光强度指数（CNLI）和基于像素的生态环境质量模型（RSEI-2）；并采用耦合协调度模型对长三角城

项目来源：国家级大学生创新创业训练计划资助项目（202210353037）。
第一作者简介：张芝镪（2002—），本科，研究方向为城市环境遥感，E-mail：zzq1152996153@163.com。

市群城市化水平与生态环境质量进行耦合测度，探究其变化特征，以期为区域生态环境保护、城市群可持续发展提供参考意见。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区概况

本文选取上海、南京、杭州和合肥4个城市的主城区作为研究区域。截至2020年，4个城市的生产总值达到7.97万亿元，常住人口约为5 549.15万人，以占长三角城市群11.34%的陆地面积承载了23.59%的常住人口所创造的32.56%的生产总值，是长三角城市群中最核心的城市，在经济发展和人口集聚方面具有举足轻重的作用。

本文采用的遥感数据包括夜间灯光数据，来源于Wu等[11]研发的类DMSP-OLS夜间灯光遥感数据集；Landsat系列卫星数据从美国地质调查局官网获取。

### 1.2 研究方法

1）城市化定量估算。CNLI可反映一个区域的城市化程度[12]，计算公式为：

$$\mathrm{CNLI}=\frac{\sum_{DN_{\min}}^{DN_{\max}}(DN_i\times N_i)}{N}\times\frac{\mathrm{Area}_N}{\mathrm{Area}} \tag{1}$$

式中，$DN_i$为栅格$i$的像元灰度值；$N_i$为$i$级像元总数；$N$为总像元数；$\mathrm{Area}_N$为光像素的总面积；Area为区域面积。

2）生态环境质量估算。RSEI-2模型先对湿度（WET）、绿度（NDVI）、热度（LST）、干度（NDBSI）和丰度（AI）5个自然生态环境的重要指标进行主成分分析，再对第一主成分进行归一化处理[13]，以此定量表征一个区域内生态环境质量的优劣程度。相较于RSEI模型，RSEI-2模型改善了指数的低估现象，准确度显著提高。因此，本文利用RSEI-2模型计算长三角城市群的生态环境质量。各指标的计算公式为：

$$\begin{aligned}\mathrm{WET}=&0.151\,1B_1+0.197\,3B_2+0.328\,3B_3+\\&0.340\,7B_4-0.711\,7B_5-0.455\,9B_6\end{aligned} \tag{2}$$

$$\mathrm{NDVI}=\frac{(B_4-B_3)}{(B_4+B_3)} \tag{3}$$

$$\mathrm{LST}=\left[K_2\Big/\ln\left(K_1/\mathrm{BlackT}+1\right)\right]-273 \tag{4}$$

$$\mathrm{Black}T=\frac{\left[L_\lambda-L_\uparrow-\tau\times(1-\varepsilon)L_\downarrow\right]}{\tau\times\varepsilon} \tag{5}$$

$$L_\lambda=\mathrm{gain}\times DN+\mathrm{bais} \tag{6}$$

$$\mathrm{NDBSI}=(SI+\mathrm{IBI})/2 \tag{7}$$

$$SI=\frac{\left[(B_5+B_3)-(B_4+B_1)\right]}{\left[(B_5+B_3)+(B_4+B_1)\right]} \tag{8}$$

$$\mathrm{IBI}=\frac{\left[\frac{2B_5}{B_5+B_4}-\left(\frac{B_4}{B_4+B_3}+\frac{B_2}{B_2+B_5}\right)\right]}{\left[\frac{2B_5}{B_5+B_4}+\left(\frac{B_4}{B_4+B_3}+\frac{B_2}{B_2+B_5}\right)\right]} \tag{9}$$

$$AI=\frac{\mu\left(\begin{array}{l}0.35F+0.21G+0.28W+\\0.11C+0.04B+0.01U\end{array}\right)}{\mathrm{Area}} \tag{10}$$

式中，$B_1$、$B_2$、$B_3$、$B_4$、$B_5$、$B_6$分别为蓝光、绿光、红光、近红外、短波红外1和短波红外2的波段反射率；$L_\lambda$为热红外波段的像元辐射值；$DN$为像元灰度值；gain、bais为增、离值；Black$T$为黑体辐射亮度；$L_\uparrow$、$L_\downarrow$为大气向上、向下辐射亮度；$\tau$为热红外波段中的大气透过率；$\varepsilon$为地表比辐射率；$K_1$、$K_2$为定标参数；$\mu$为标准化系数，$F$、$G$、$W$、$C$、$B$、$U$分别为森林、草原、水域、农田、建筑用地、未利用地的面积；Area为统计区域的总面积。

为防止在主成分分析中各指标权重不平衡，必须对5个指标的初始值进行归一化处理，将其数值统一在[0,1]的范围之间。将归一化处理后的5个指标合成一幅新影像，对其进行主成分分析得到PC1；再对PC1进行归一化处理，即可得到RSEI-2。RSEI-2越接近1，说明生态环境质量越好。

3）耦合分析法。构建CNLI指数与RSEI-2模型的耦合模型[14]，计算公式为：

$$C=\sqrt{\frac{\bar{L}\times\bar{E}}{\left(\bar{L}+\bar{E}\right)^2}} \tag{11}$$

式中，$\bar{L}$、$\bar{E}$为归一化后的CNLI指数和RSEI-2模型，若$\bar{L}<\bar{E}$，则生态环境状况处于领先位置；若$\bar{L}=\bar{E}$，则二者相互协调；若$\bar{L}>\bar{E}$，则城市化发展处于领先位置。

为防止出现假性协调的情况，需要采用耦合协调度模型对上述模型进行发展度细化评估[15]，计算公式为：

$$T=a\times\bar{L}+b\times\bar{E} \tag{12}$$

$$D=\sqrt{C\times T} \tag{13}$$

式中，$T$为综合评价指数；$a$、$b$为$\bar{L}$与$\bar{E}$的综合关系权重值，$a$=0.65、$b$=0.35[16]；$D$为耦合发展度，值越大表示各要素之间的耦合发展关系越协调。

## 2 研究结果与分析

### 2.1 长三角城市群城市化变化特征

4个城市的CNLI值见表1、2，可以看出：①4个

城市作为长三角地区经济发展的主力军，在原有的发展条件下城市化发展速度较快，其中上海市的城市化水平最高；②2000—2020年4个城市主城区的CNLI稳步上升，城市化程度不断提高，上海市、南京市、杭州市、合肥市极高值区域面积分别增加了909、1 568、1 934、679 $km^2$；③2000—2010年4个城市城市化水平极高值区域面积占比成倍数增加，极低值区域面积成倍数减少，其中上海市、杭州市的城市化辐射范围更广，极低值区域面积占比分别为17.33%和33.60%，整体城市化水平由西向东逐渐提高；④随着经济持续快速发展，长三角城市群常住人口大幅增长，上海市、南京市、杭州市和合肥市的CNLI极高值区面积占比分别为85.44%、55.05%、64.41%、59.74%，显现出强大的社会活力与发展潜力；⑤4个城市主城区的城市化实现了更高水平的发展，未开发区域持续减少，发展活力不断释放，切实对长三角城市群起到了积极的引导和推动作用。

表1　CNLI均值变化

| 年份 | 上海市 | 南京市 | 杭州市 | 合肥市 |
|---|---|---|---|---|
| 2000年 | 0.590 | 0.382 | 0.395 | 0.332 |
| 2010年 | 0.776 | 0.573 | 0.619 | 0.547 |
| 2020年 | 0.860 | 0.779 | 0.804 | 0.786 |

表2　城镇干扰面积及其占比

| 年份 | 城市 | 极低值 | | 低值 | | 高值 | | 极高值 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 面积/$km^2$ | 占比/% | 面积/$km^2$ | 占比/% | 面积/$km^2$ | 占比/% | 面积/$km^2$ | 占比/% |
| 2000年 | 上海市 | 841 | 41.88 | 216 | 10.76 | 153 | 7.62 | 798 | 39.74 |
| | 南京市 | 2 457 | 75.16 | 341 | 10.43 | 241 | 7.37 | 230 | 7.04 |
| | 杭州市 | 2 385 | 70.79 | 495 | 14.69 | 262 | 7.78 | 227 | 6.74 |
| | 合肥市 | 1 003 | 75.53 | 109 | 8.21 | 101 | 7.61 | 115 | 8.66 |
| 2010年 | 上海市 | 348 | 17.33 | 174 | 8.67 | 237 | 11.80 | 1 249 | 62.20 |
| | 南京市 | 1 364 | 41.73 | 529 | 16.18 | 501 | 15.33 | 875 | 26.77 |
| | 杭州市 | 1 132 | 33.60 | 417 | 12.38 | 632 | 18.76 | 1 188 | 35.26 |
| | 合肥市 | 671 | 50.53 | 91 | 6.85 | 95 | 7.15 | 471 | 35.47 |
| 2020年 | 上海市 | 201 | 10.06 | 29 | 1.45 | 61 | 3.05 | 1 707 | 85.44 |
| | 南京市 | 251 | 7.69 | 586 | 17.94 | 631 | 19.32 | 1 798 | 55.05 |
| | 杭州市 | 345 | 10.28 | 332 | 9.90 | 517 | 15.41 | 2 161 | 64.41 |
| | 合肥市 | 192 | 14.45 | 166 | 12.49 | 177 | 13.32 | 794 | 59.74 |

### 2.2　长三角城市群生态环境质量变化特征

通过RSEI–2主成分分析得到4个城市主城区生态环境质量各指标分析结果（表3），可以看出：①2000年、2010年、2020年的第一主成分贡献率分别为88.90%、90.54%和86.83%，且各指标的贡献率相对稳定，表明5个指标的大部分特征都集中在第一主成分上；②第一主成分中绿度、干度和丰度的系数既有正值又有负值，说明这3个指标对生态环境质量既有正面影响也有负面影响，而湿度和热度的系数均为负值，表示这两个指标对生态环境产生负面影响；③丰度的系数最大，说明其为影响生态环境质量的主导因素；④除第一主成分外，其他主成分均不稳定，难以反映生态环境质量特征。

由4个城市的RSEI–2均值（上海0.63、南京0.66、杭州0.66、合肥0.79）可知：①2000—2020年4个城市主城区的生态环境质量均呈上下波动态势；②2000—2010年上海市和杭州市的环境质量不断提高，RSEI–2均值分别上升了0.09和0.02，而南京市和合肥市的环境质量持续恶化，RSEI–2均值分别下降了

表3　主成分分析统计表

| 年份 | 指标 | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2000年 | 绿度 | –0.632 | –0.229 | –0.291 | –0.539 | –0.352 |
| | 湿度 | –0.310 | –0.034 | 0.105 | 0.013 | 0.198 |
| | 干度 | –0.224 | –0.029 | 0.161 | –0.065 | 0.401 |
| | 热度 | –0.090 | 0.108 | –0.242 | 0.125 | 0.034 |
| | 丰度 | 0.006 | –0.777 | 0.010 | 0.162 | –0.013 |
| | 特征值 | 0.247 | 0.021 | 0.009 | 0.001 | 0.000 |
| | 贡献度/% | 88.90 | 7.73 | 3.01 | 0.27 | 0.09 |
| 2010年 | 绿度 | –0.540 | –0.255 | –0.341 | –0.604 | –0.343 |
| | 湿度 | –0.098 | –0.024 | –0.005 | –0.070 | –0.030 |
| | 干度 | –0.399 | 0.112 | 0.284 | –0.076 | 0.098 |
| | 热度 | –0.359 | –0.239 | –0.476 | 0.652 | 0.019 |
| | 丰度 | –0.016 | –0.448 | 0.077 | 0.053 | –0.014 |
| | 特征值 | 0.237 | 0.021 | 0.004 | 0.001 | 0.000 |
| | 贡献度/% | 90.54 | 7.48 | 1.56 | 0.27 | 0.16 |
| 2020年 | 绿度 | 0.038 | –0.024 | –0.090 | –0.036 | 0.088 |
| | 湿度 | –0.142 | 0.025 | 0.319 | 0.196 | –0.244 |
| | 干度 | 0.078 | –0.015 | –0.096 | –0.127 | 0.086 |
| | 热度 | –0.159 | –0.054 | –0.325 | 0.337 | 0.016 |
| | 丰度 | 0.064 | –0.984 | 0.137 | 0.035 | –0.017 |
| | 特征值 | 0.206 | 0.025 | 0.006 | 0.001 | 0.000 |
| | 贡献度/% | 86.83 | 10.24 | 2.56 | 0.32 | 0.06 |

0.01和0.09；③2010—2020年南京市和合肥市的环境质量得到持续改善，RSEI–2均值分别上升了0.01和0.06，而上海市和杭州市的环境质量持续恶化，RSEI–2均值分别下降了0.08和0.05；④在城市化进程不断加快的过程中，生态环境质量始终维持一个相对稳定的区间，这意味着城市化与生态环境逐步进入协调发展的阶段。

### 2.3 城市化水平与生态环境质量耦合测度分析

利用耦合分析法得到的CNLI和RSEI–2耦合分析结果见表4，可以看出：①2000—2020年4个城市主城区耦合度指数整体呈上升趋势，其中合肥市增长速度较快，而上海市增长速度较慢；②2000—2020年4个城市主城区耦合发展度指数同样呈上升趋势，其中合肥市增长速度较快，而上海市增长速度较慢。上述结果表明，城市化与生态环境质量的协调度正在持续增加，长三角城市群已初步实现城市化与生态环境之间的良性协调发展。

表4 耦合分析统计表

| 城市 | 2000年 | | 2010年 | | 2020年 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *C* | *D* | *C* | *D* | *C* | *D* |
| 上海市 | 0.39 | 0.49 | 0.43 | 0.57 | 0.43 | 0.58 |
| 南京市 | 0.35 | 0.41 | 0.39 | 0.48 | 0.42 | 0.56 |
| 杭州市 | 0.35 | 0.41 | 0.40 | 0.51 | 0.42 | 0.56 |
| 合肥市 | 0.34 | 0.41 | 0.39 | 0.49 | 0.44 | 0.58 |

## 3 结 论

本文以长三角城市群为例，基于类DMSP–OLS数据和Landsat数据分别建立了CNLI指数和RSEI–2模型，并采用耦合协调度模型探究了2000—2020年长三角城市群城市化水平与生态环境质量变化特征及其耦合协调度。结果表明：①2000—2020年上海市、南京市、杭州市和合肥市主城区CNLI指数分别由0.590、0.382、0.395和0.332快速上升至0.860、0.779、0.804和0.786，说明长三角城市群城市化程度不断提高，显现出强大的社会活力与发展潜力；②2000—2020年上海市、南京市、杭州市和合肥市主城区RSEI–2指数分别由0.63、0.66、0.66和0.79小幅变化至0.64、0.66、0.63和0.76，说明在城市化进程不断加快的过程中，生态环境质量始终维持在一个相对稳定的区间；③2000—2020年长三角城市群城市化与生态环境质量的协调度持续增加，说明长三角城市群已初步实现城市化与生态环境之间的良性协调发展。

## 参考文献


[1] 王少剑，崔子恬，林靖杰，等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报，2021，76(4):973-991

[2] 陈炳，曾刚，曹贤忠，等. 长三角城市群生态文明建设与城市化耦合协调发展研究[J]. 长江流域资源与环境，2019，28(3):530-541

[3] 陆大道，郭来喜. 地理学的研究核心—人地关系地域系统:论吴传钧院士的地理学思想与学术贡献[J]. 地理学报，1998，53(2):3-11

[4] Folke C. Resilience: The Emergence of a Perspective for Social Ecological Systems Analysis[J]. Global Environmental Change，2006，16(3):253-267

[5] 郑华伟，刘友兆，王希睿. 中国城镇化与土地集约利用关系的动态计量分析[J]. 长江流域资源与环境，2011，20(9):1 029-1 034

[6] 谢锐，陈严，韩峰，等. 新型城镇化对城市生态环境质量的影响及时空效应[J]. 管理评论，2018，30(1):230-241

[7] 史建军. 城镇化进程中生态环境响应的时空分异及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境，2019，33(5):60-66

[8] 马世骏，王如松. 社会—经济—自然复合生态系统[J]. 生态学报，1984，4(1):1-9

[9] 吕越，陈忠清. 浙江省城市化与生态环境协调度及其胁迫关系探讨[J]. 地域研究与开发，2017，36(3):160-164

[10] 路春燕，卫海燕，白俊燕. 基于BP神经网络的城市化发展生态环境压力响应研究:以延安市为例[J]. 干旱区资源与环境，2012，26(4):61-66

[11] Wu Y，Shi K，Chen Z，et al. Developing Improved Time-series DMSP-OLS-like Data (1992-2019) in China by Integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2022，60:236-245

[12] Zheng Z H，Wu Z F，Chen Y B，et al. Exploration of Eco-environment and Urbanization Changes in Coastal Zones: A Case Study in China over the Past 20 Years[J]. Ecological Indicators，2020，119:106 847

[13] Xu D，Yang F，Yu L，et al. Quantization of the Coupling Mechanism Between Eco-environmental Quality and Urbanization from Multisource Remote Sensing Data[J]. Journal of Cleaner Production，2021，32(1):152-161

[14] Cai B，Shao Z F，Fang S H，et al. Finer-scale Spatio-temporal Coupling Coordination Model Between Socioeconomic Activity and Eco-environment: A Case Study of Beijing，China[J]. Ecological Indicators，2021，131:108 165

[15] 余娇，杨鸿辉，陈榕榕，等. 生态城市城镇化与生态环境耦合协调时空分异[J]. 山东大学学报(理学版)，2022，57(11):102-110

[16] 图尔荪阿依·如孜，阿里木江·卡斯木，高鹏文，等. 多源数据融合下的城市化与生态环境耦合协调研究[J]. 测绘通报，2021(2):1-6