城市生态韧性与保护

江苏省城市生态安全时空演变特征及预测

——基于 DPSIR-LSTM 模型分析

乔敬雅 邱春阳 朱 颖

苏州科技大学建筑与城市规划学院 江苏苏州 215011

摘要：【目的】开展生态安全时空演变及预测研究，实现从被动应对到未来预警的范式转变，为城市生态治理提供决策支持。【方法】基于江苏省 13 个城市 2005—2023 年面板数据，构建 DPSIR-LSTM 综合评价预测模型，系统揭示生态安全时空演变特征、识别城市发展模式并预测未来趋势。【结果】江苏省生态安全整体由“较不安全”提升至“较安全”，苏南、苏中、苏北呈高位均衡格局；空间分布由集聚转向分散且局部异质性显著；依据 DPSIR 维度间作用关系，识别出驱动-响应协同型等 5 类发展模式；LSTM 预测表明，全省生态安全态势整体向好，但区域不均衡问题依然突出。【结论】江苏省生态安全在水平跃迁与格局重组中实现整体提升，但面临差距固化风险，其内在机制源于 DPSIR 框架内不同维度间的动态博弈。未来需依据差异化发展模式，采取精准化与协同化治理策略，以推动生态安全向优质协同新格局迈进。

关键词：生态安全；DPSIR-LSTM 模型；时空演变；城市发展模式；预测

DOI：10.12169/zgcsly.2025.10.20.0001

Spatiotemporal Evolution Characteristics and Prediction of Urban Ecological Security in Jiangsu Province Based on DPSIR-LSTM Model

Qiao Jingya Qiu Chunyang Zhu Ying

(School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract: 【Objective】 The study of spatiotemporal evolution and prediction of ecological security is conducted to realize the paradigm shift from passive response to proactive early-warning, thereby providing a decision-making support for urban ecological governance. 【Method】 Based on the panel data from 13 cities in Jiangsu Province in 2005-2023, an integrated DPSIR-LSTM model of assessment and prediction is developed to systematically reveal spatiotemporal evolution characteristics of ecological security, identify urban development patterns, and predict future trends. 【Result】 The ecological security in Jiangsu Province generally improves from “relatively unsafe” to “relatively safe”, exhibiting a high-level equilibrium pattern across its southern, central, and northern regions. The spatial distribution shifts from agglomeration to dispersion with significant local heterogeneity. Based on interactions within the DPSIR framework, five development modes are identified, including the driver-response coordination. LSTM predictions indicate a positive overall trend of ecological security in the province, yet regional imbalances

收稿日期：2025-10-20

* 基金项目：国家自然科学基金项目（52208072）；风景园林学“十四五”江苏省重点学科（2022-2025 年）建设经费；江苏省研究生实践创新计划项目（SJCX25_ 1921）

第一作者：乔敬雅（1988- ），女，博士，讲师，研究方向为地域景观生态规划与设计。E-mail：joesilence@ usts. edu. cn

通信作者：朱颖（1973- ），女，博士，教授，研究方向为地域生态环境、风景园林规划设计。E-mail：zhuying@ mail. usts. edu. cn

remain prominent.【Conclusion】Jiangsu Province's ecological security has achieved overall improvement through level transitions and pattern restructuring, while facing the risk of gap solidification—a risk rooted in the dynamic game among dimensions within the DPSIR framework. In the future, it is necessary to adopt targeted and collaborative governance strategies according to differentiated development modes, to promote ecological security toward a new pattern of high-quality coordination.

Keywords: ecological security; DPSIR-LSTM model; spatiotemporal evolution; urban development pattern; prediction

生态安全关乎社会福祉与稳定，是人类生存发展的基础[1]。然而，快速的城镇化和工业化在推动经济增长的同时，导致自然资源过度消耗、生态系统服务失衡、环境污染及生物多样性下降等突出问题。因此，科学评估与解析城市生态安全水平及演变过程，对提升城市韧性至关重要。

生态安全评价是区域环境管理的核心工具，具有系统性和前瞻性。相关学者主要运用压力-状态-响应（PSR）及其扩展模型[2-3]、系统动力学[4]、生态足迹[5]、环境-经济-社会复合系统框架[6]等方法，对城市、森林、土地等开展评价，并借助空间自相关[7]、核密度估计[8]、探索性时空数据分析[9]等手段揭示其时空演变规律。其中，DPSIR 模型在 PSR 模型的基础上增加了驱动力和影响模块，能系统阐释社会经济、环境与人类活动间的复杂关系，因而得到广泛应用[10-11]。然而，既有研究多基于该框架揭示演变趋势或分析各要素贡献度的时空分异，未能深入解析维度间的相互作用，也缺乏针对不同城市特征的发展模式识别，制约了精细化生态治理的实施。同时，基于历史数据的评价存在滞后性，难以满足动态规划的需求[12]。随着人工智能的发展，深度学习为生态安全预测提供了新路径。其中，基于 RNN 循环神经网络改进的 LSTM（Long Short-term Memory）模型，在时间序列数据分析和预测中展现出较高的精度，在洪泛风险与公共卫生预测中均表现优异，准确性优于 GoogleNet 等对比模型[13-14]。鉴于生态安全指标为长时间序列数据，LSTM 模型能有效匹配这一需求，实现对未来水平的精准预测。

江苏省作为中国东部沿海的经济大省和人口密集区，其经济发展与生态环境保护的矛盾具有典型性和代表性。因此，本研究构建集成 DPSIR 模型与 LSTM 模型的综合框架，旨在对江苏省生态安全水平进行动态评价、解析及预测，探究其时空演变规律、城市发展模式及未来趋势，以期为区域生态风险管理与政策制定提供科学依据。

1　研究区概况

江苏省位于中国东部沿海中心，地处长江三角洲，面积 10.72 万 km^2，生态类型多样，水网密集[15]。全省 13 个市分为苏南、苏中、苏北 3 个区域。受历史、地理、政策等多重因素影响，三地发展存在着明显差异，其复杂的区域情境为研究提供了多层次视角。尽管自然条件优越，但 2023 年全省城镇化率已达 75.04%，高强度的增长模式引发了深层次的环境与发展矛盾冲突，加剧了区域生态风险。因此，开展精准的生态安全评估及预测，对保障区域生态安全具有重要意义。

2　研究方法

2.1　数据来源

本次研究指标原始数据来源于 2005—2023 年的《中国城市年鉴》《江苏省统计年鉴》以及江苏省各市、区（县）统计年鉴、《国民经济和社会发展统计公报》《环境状况公报》《水资源公报》等资料。在数据收集过程中，对于因统计项目与口径不同导致的数据缺失，采用数据插补法完善。

2.2　DPSIR 模型及评价体系

2.2.1　DPSIR 模型

DPSIR 模型从驱动力（Driving）-压力（Pressure）-状态（State）-影响（Impact）-响应（Response）5 个维度，系统揭示人类活动与环境变化之间的因果链条，为生态安全评价提供了结构化分析框架。基于此模型，江苏省生态安全可被视为社会、经济、环境交互作用下的动态平衡：人类活动作为驱动力对生态环境施加压力，引发社会生态系统状态的变化与后续社会、经济、

环境的影响，最终催生政策与行为响应，形成系统反馈闭环。

2.2.2 评价指标体系

遵循指标选择的系统性、科学性、可获取性和时序完整性等原则，结合江苏省社会经济与地理环境特征，构建城市生态安全水平综合评价指标体系[15-16]。以江苏省生态安全水平为目标层，以 DPSIR5 个维度为准则层（A），并从社会、经济、环境 3 个维度构建要素层（B），在充分考虑各要素间关系的基础上，最终选取 27 项相关指标构成指标层（C），并明确各指标的正负效应属性（表 1）。

表 1 生态安全评价指标体系

目标层	准则层（A）	要素层（B）	指标层（C）	属性	权重	参考文献
江苏省生态安全水平	驱动力 D	社会驱动	人口自然增长率 C_1	-	0.041 5	[3，9]
			城镇化率 C_2	+	0.039 5	[10，17]
		经济驱动	人均生产总值 C_3	+	0.047 2	[18-19]
			农林牧渔业总产值 C_4	+	0.042 8	[2，20]
		环境驱动	建设用地面积占比 C_5	-	0.034 7	[15，21]
			建成区道路密度 C_6	-	0.030 9	[6]
	压力 P	社会压力	人口密度 C_7	-	0.047 8	[3，11]
		经济压力	城镇常住居民人均可支配收入 C_8	+	0.047 2	[6，21]
		环境压力	工业 SO_2 排放总量 C_9	-	0.048 1	[19，22]
			工业废水排放总量 C_{10}	-	0.035 0	[17，23]
			单位 GDP 水耗 C_{11}	-	0.022 8	[3，22]
			单位 GDP 能耗 C_{12}	-	0.033 9	[24-25]
			单位 GDP 电耗 C_{13}	-	0.030 9	[3，18]
	状态 S	社会状态	人均水资源量 C_{14}	+	0.041 6	[21，23]
		经济状态	人均道路面积 C_{15}	-	0.055 5	[17-18]
		环境状态	人均公园绿地面积 C_{16}	+	0.028 8	[9，25]
			市区环境噪声平均等效等级 C_{17}	-	0.030 4	[2，26]
	影响 I	社会影响	人口死亡率 C_{18}	-	0.019 9	[2，25]
		经济影响	第三产业比重 C_{19}	+	0.042 1	[15，26]
		环境影响	建成区绿化覆盖率 C_{20}	+	0.030 1	[10，25]
			环境空气质量优良率 C_{21}	+	0.0301	[18，22]
	响应 R	社会响应	每万人拥有医生数 C_{22}	+	0.067 4	[11，23]
		经济响应	科学技术占公共预算支出比例 C_{23}	+	0.032 2	[9，19]
			教育占公共预算支出比例 C_{24}	+	0.035 7	[23，26]
			节能环保占公共预算支出比重 C_{25}	+	0.042 7	[15，18]
		环境响应	工业固体废弃物综合利用率 C_{26}	+	0.016 9	[17，26]
			污水集中处理率 C_{27}	+	0.024 3	[21-22]

注：属性列“+”表示正向指标，“-”表示逆向指标。

2.2.3 生态安全水平测度

为保证数据均衡可比，首先采用极差法对原始指标进行无量纲标准化处理。为克服主观赋权局限，进一步采用客观的熵权法计算各指标在研究期的平均权重。最后将标准化后的指标数值与相应权重加权，得到城市生态安全综合指数。结合相关研究分级分类法及本研究指标的自然断点值，建立城市生态安全分级标准（表 2）。具体计算公式如下：

$$C_{ij}^{+} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (1)$$

$$C_{ij}^{-} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (2)$$

式（1）~（2）中：C_{ij}为标准化值；C_{ij}^{+}为正向指标；C_{ij}^{-}为逆向指标；$\max(X_{ij})$、$\min(X_{ij})$分别为原始指标数据的最大值和最小值。继而，采用公式（3）~（6）计算得到指标 j 的权重。

$$P_{ij} = C_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{n} C_{ij} (0 \leqslant P_{ij} \leqslant 1) \quad (3)$$

$$e_j = (-1/\ln n) \sum_{i=1}^{n} P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

$$d_j = 1 - e_j (j = 1, 2, \cdots, n) \quad (5)$$

$$W_j = d_j \Big/ \sum_{j=1}^{m} d_j = 1 - e_j \Big/ m - \sum_{j=1}^{m} e_j \quad (6)$$

式（3）~（6）中：P_{ij}为第 i 个城市第 j 个指标占比；e_j为信息熵；d_j为信息熵冗余度；W_j为各指标权重。$0 \leqslant W_j \leqslant 1$，$\sum_{j=1}^{m} W_j = 1$。最后，采用公式（7）求得城市生态安全综合水平（$ESI_i$）。

$$ESI_i = \sum_{j=1}^{m} W_j \times C_{ij} \quad (7)$$

表 2　生态安全分级标准

生态状况	安全等级	数值区间	状态描述
不安全	Ⅴ	<0.25	压力远超承载力，结构严重退化，服务功能严重受损
较不安全	Ⅳ	[0.25，0.45)	压力超过临界负荷，结构存在短板，服务功能有退化风险
临界安全	Ⅲ	[0.45，0.55)	压力临近阈值，结构完整性一般，服务功能基本维持
较安全	Ⅱ	[0.55，0.75)	压力在可控范围内，结构较为完善，服务功能良好
安全	Ⅰ	≥0.75	压力远低于承载力，结构完整稳定，服务功能优良

2.3　空间自相关模型

本研究采用全局与局部自相关分析，探究江苏省城市生态安全水平是否跨越行政区划，形成空间交互作用。首先运用全局 Moran's I 指数衡量空间整体集聚程度，考虑全局 Moran's I 无法识别局部集聚位置，再采用局部 Moran's I 指数分析空间单元之间的局部关联特征。

2.4　LSTM 神经网络模型

本研究采用双向 LSTM 网络捕获时序前后信息，并使用时序交叉验证提升模型的稳定性。拟将无量纲标准化处理后的生态安全指标数据集作为输入层，对应的评价结果数据集作为输出层，在 PyCharm 中构建 LSTM 模型进行训练，以实现城市生态安全水平的精准预测。其中，设定 2005—2019 年的数据为训练集，2020—2023 年的数据为验证集（比例为 4∶1）。为量化预测精准度，采用均方根误差（RMSE）、平均绝对百分比误差（MAPE）以及决定系数（R^2）进行模型精度的测试。RMSE 与 MAPE 取值范围均为 [0，+∞]，值越接近 0 表示误差越小；R^2取值范围为 [0，1]，最佳取值为 1。

3　结果与分析

3.1　生态安全水平时序演变特征

由图 1 可知，2005—2023 年，江苏省生态安全水平整体呈上升趋势，从“较不安全”跃升至“较安全”。区域层面，苏南、苏中与苏北初期发展路径不同，但最终趋向收敛：苏南率先进入“临界安全”，后期增速放缓；苏中起点最低但增速最快，2015 年反超领先；苏北前期势能较大，中期增长乏力，后期重新加速。至 2023 年，三大区域均稳定处于“较安全”水平，形成高位均衡格局。城市层面（图 2），全省 13 个地市初期多处于“较不安全”及以下，至 2023 年已全部脱离“临界安全”及以下状态。苏州、南通、泰州后来居上，从“不安全”跨越到“安全”；南京、淮安稳步上升，同期达到“安全”；扬州、盐城起步较低，但总体呈稳步上升趋势；无锡和镇江率先进入“临界安全”，但后续增长乏力，始终未突破 0.7 的安全阈值。其中镇江水平呈起伏变化，2023 年显著落后，需予以重点关注。

3.2　生态安全水平空间格局变化

图 3 显示，全省生态安全格局经历了由“显著集聚-空间随机-微弱集聚-分散化”的演变过程：2005 年指数为 0.312，呈现显著空间正相关；2010 年骤降至-0.010，空间分布转为随机状态，原有结构出现阶段性瓦解；2015 与 2020 年指数再次由负转正，但数值较低，空间集聚态势不明显；2023 年降至-0.172，显示进一步分散趋势。

进一步通过局部 Moran's I 指数与 LISA 聚类分析（图 4）发现，2005 年空间集聚显著，徐州为“低-高”聚类，泰州、南通、苏州为“低-低”聚类；2010 年格局分化，盐城维持“低-低”聚类，扬州出现“高-低”聚类；2015 年结构重组，徐州转为“低-低”聚类，泰州转为“低-高”聚类；2020 年，南京呈现出极显著的“高-低”聚类，成为独立高值点；至 2023 年，仅南京仍呈“高-低”聚类，整体格局趋于破碎化。LISA 分析表明，江苏省生态安全格局在局部尺度上有较大的变动性和空间不稳定性，高值点辐射带动功能较弱，没有形成稳定且长久发展的协同板块。未来治理应重点关注空间异质性及极化问题，以推动区域协同发展。

3.3　生态安全各维度要素分析

2005—2023 年，江苏省各市生态安全水平整体差异较小，无锡、宿迁和苏州综合得分位居前三，盐城则尚未突破 0.5（图 5F）。在 DPSIR 各维度中，苏州、连云港、无锡的“驱动力”较强；泰州、宿迁、徐州生态“压力”更大；扬州、南京、淮安生态“状态”较好；苏州、镇江、

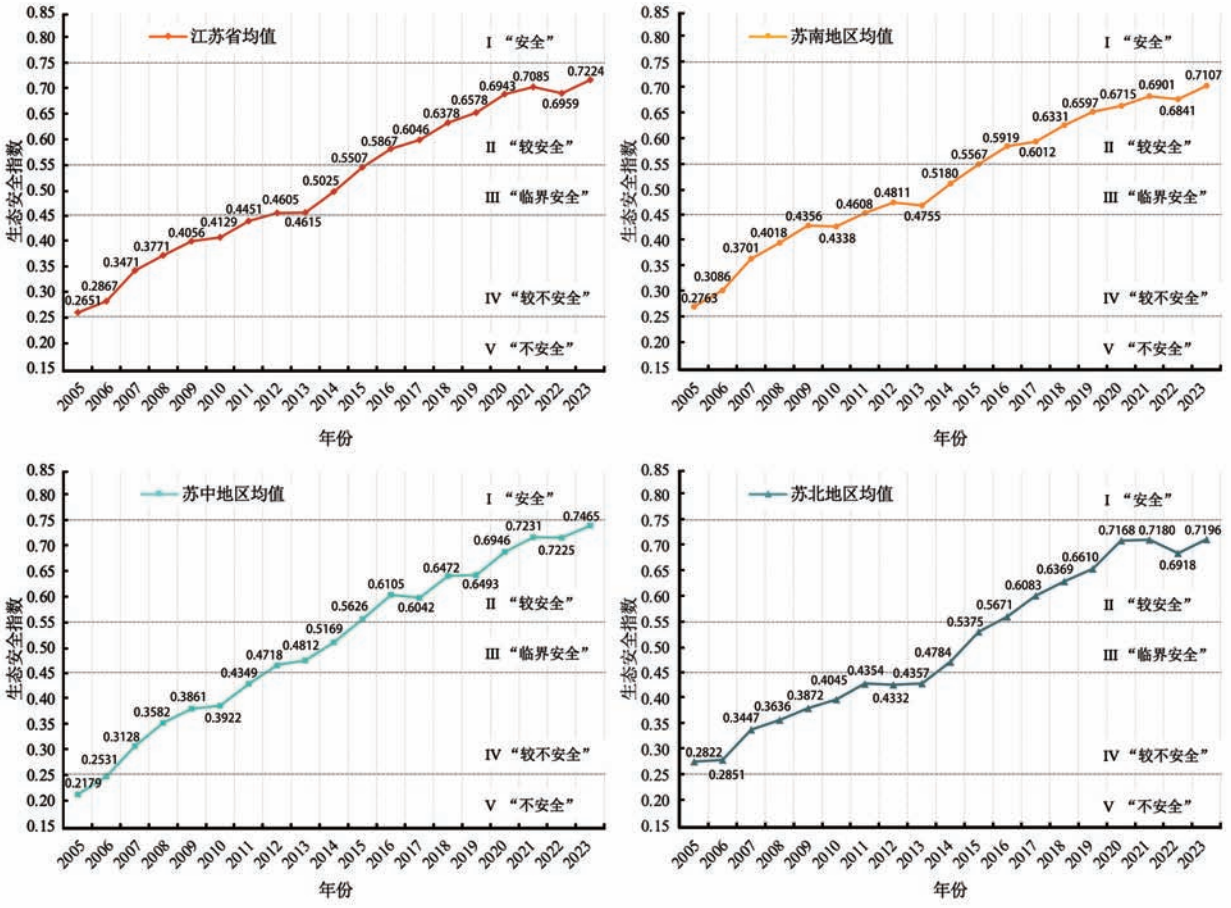


图 1 江苏省及分区生态安全水平时序演变（2005—2023 年）

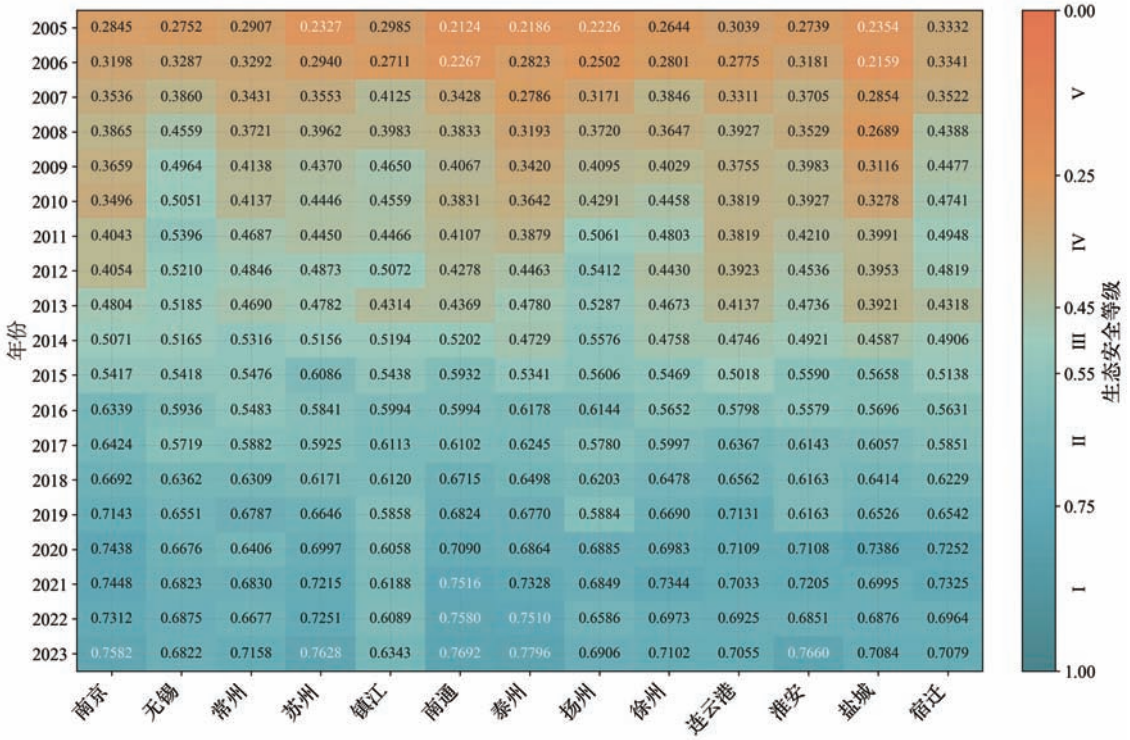


图 2 江苏省各城市生态安全水平时序演变（2005—2023 年）

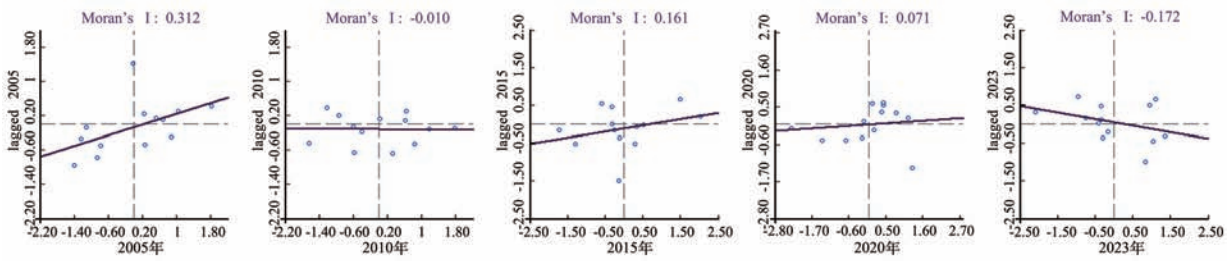


图 3　江苏省生态安全的全局 Moran's I 指数

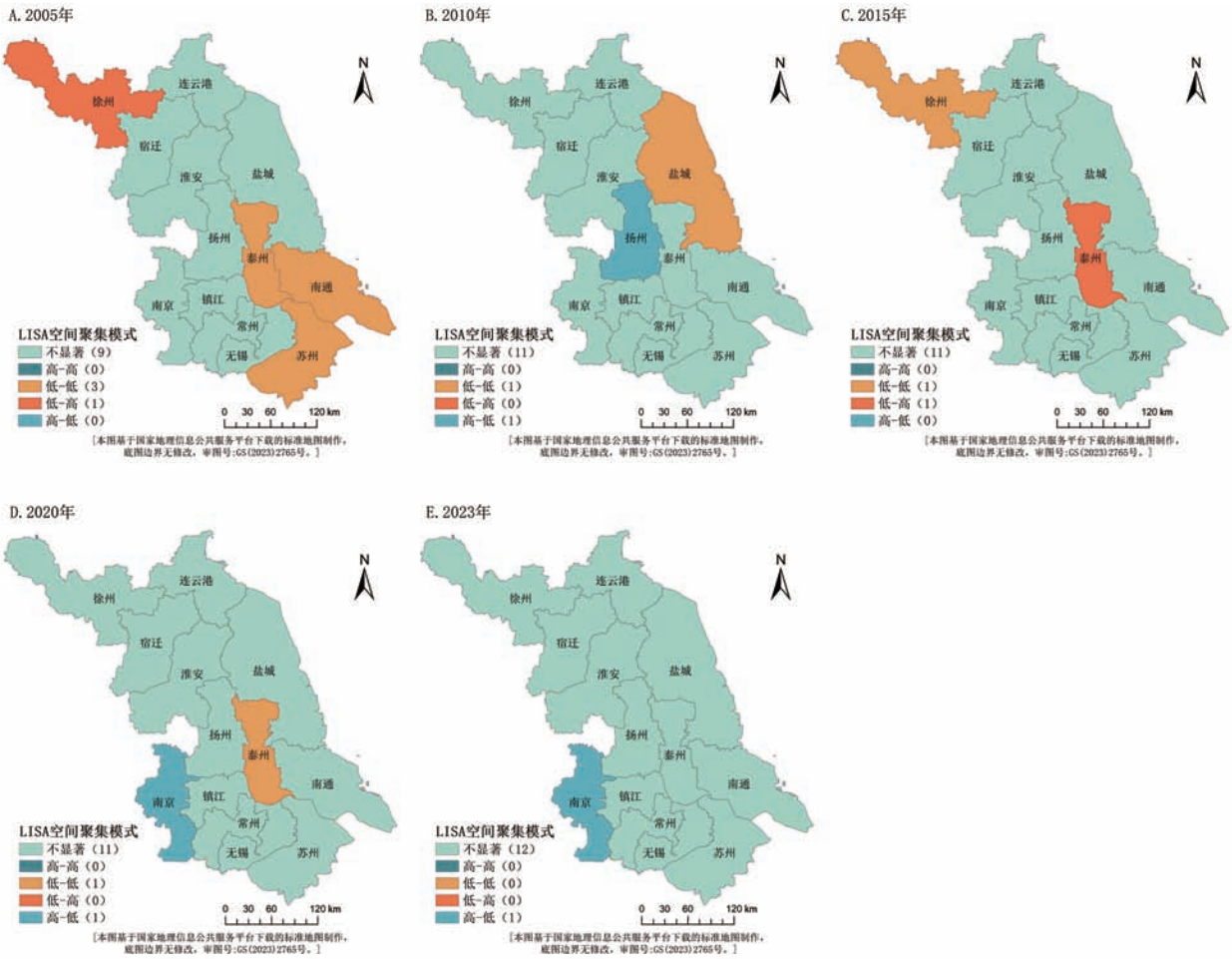


图 4　江苏省生态安全 LISA 聚类特征（2005—2023 年）

无锡对环境变化的“影响”较敏感；宿迁、南通、无锡的治理“响应”较积极。基于各市 DPSIR5 个维度的时序演变与相互作用（图 5），将城市发展模式归纳为 5 类：1）驱动-响应协同型（南京、苏州）：高强度驱动力引发压力，但能通过治理响应实现动态平衡，系统状态保持稳定，驱动力与响应形成良性循环。2）压力-响应对抗型（无锡、常州）：响应体系与高压持续博弈，响应领先驱动，压力得以有效控制，状态与影响处于可控范围。3）驱动-压力失衡型（扬州、泰州、南通、盐城）：驱动力快速增长直接冲击状态，而响应滞后，导致驱动-响应严重失衡，压力缓解不足，状态显著恶化。4）压力-状态危机型（徐州、淮安、镇江）：压力异常高位，状态恶化程度最高，而响应能力严重不足，因而压力-状态的恶性传导成为系统的主要矛盾。5）系统重构调整型（连云港、宿迁）：各维度波动明显，状态与压力的相互关系尚未稳定，系统关系正在重构与转型，既有向好潜力，也有失衡风险。

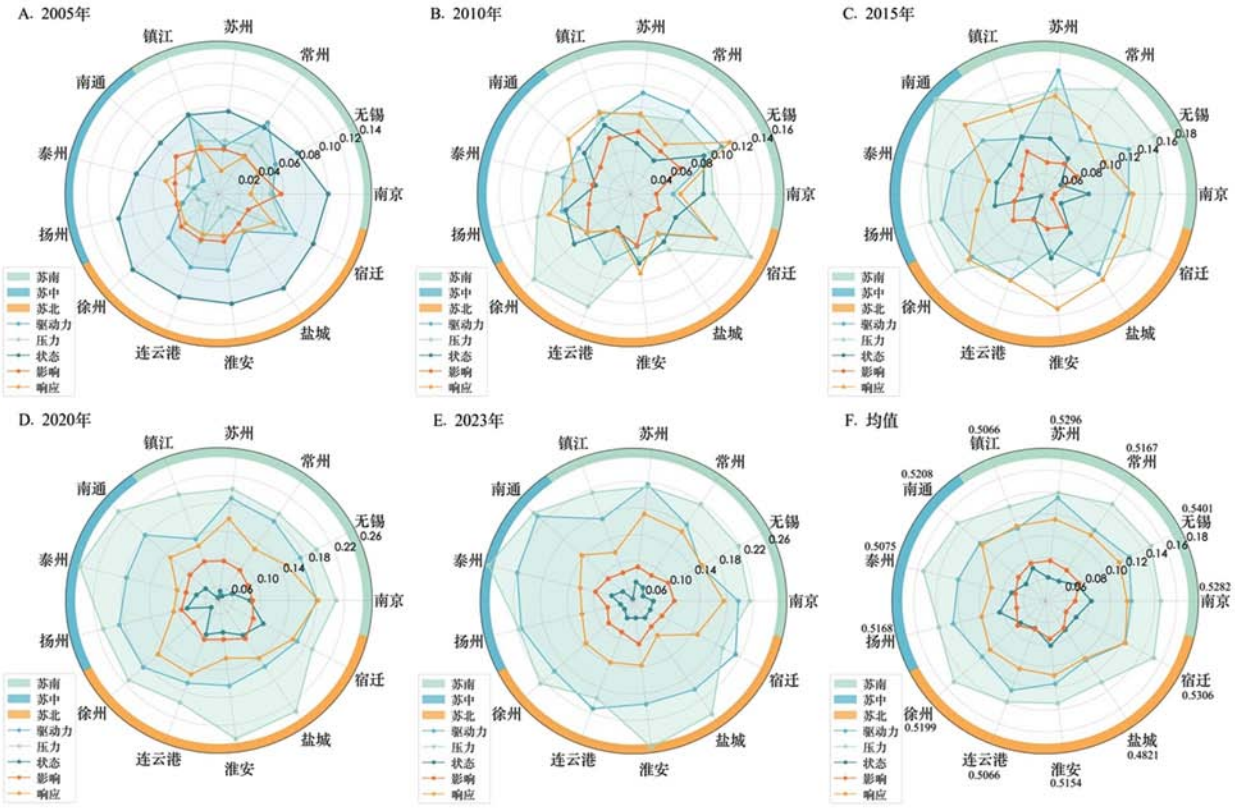


图 5 江苏省各城市生态安全 DPSIR5 个维度要素数值分布

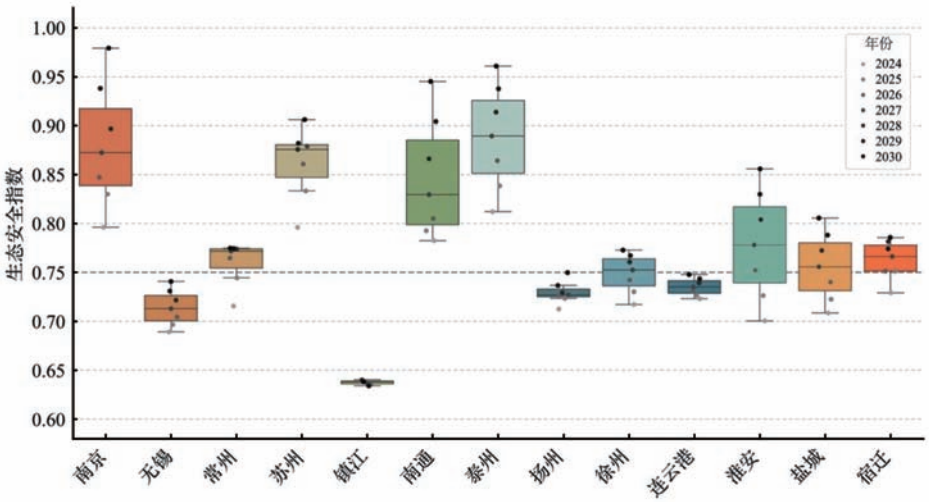


图 6 江苏省各城市生态安全预测指数分布（2024—2030 年）

3.4 生态安全水平预测

通过使用特征工程优化的方法，调整模型架构和修改训练参数，实现 LSTM 模型测试误差的显著提升，以科学预估城市生态安全水平。结果表明，所有数据测试误差 RMSE 均小于 0.015，MAPE 值低于 2%，R^2 大于 0.9，表明模型拟合度优秀，有较好的解释能力和预测能力。

根据预测结果，江苏省生态安全形势总体呈“整体优良，内部差异明显”的格局。全省多数城市生态安全水平稳步提升，预计未来将继续向好。从数值分布（图 6）看，9 个城市的中位线高于 0.75，处于“安全”等级；而排名靠后的城市与高位城市差距显著，区域不均衡问题突出。其中，南京、南通、泰州在预测期内呈正向变化，指数增幅均超 15%，占先优势不断扩大；苏州虽增幅低于 15%，但起点较高，至 2030 年亦突破

0.9；淮安、盐城稳步提升，分别达 0.85 与 0.80 级别；徐州、连云港、宿迁增长缓慢但持续上升；常州指数基本锁定在 0.77 左右，难以达到 0.8；镇江作为下离群点，始终处于“较安全”等级，应作为生态安全治理的重点干预对象。

4　讨论

4.1　生态安全时空演变规律及发展趋势差异

研究表明，2005—2023 年江苏省生态安全水平总体呈上升趋势，但局部城市存在波动，这与既有研究结论基本一致[9-10]。然而，崔馨月等[2]指出 2016 年镇江与南京、无锡等同属“较安全”等级，本研究的同期结论与此吻合；但后续数据显示镇江明显滞后并成为区域短板。为深入揭示其动态，本研究采用特征工程优化的 LSTM 模型进行预测分析，结果表明全省生态安全整体向好趋势虽将延续，但城市间差距存在固化风险，镇江作为长期滞后地区尤为典型。这与早期相对静态的研究结论形成差异，主要是因为研究时序的延长暴露了深层结构性矛盾，而预测模型则有效揭示了各城市非线性分化的潜在路径，共同凸显了长时序分析与前瞻性预测的关键价值。因此，未来政策需支持已达安全等级的城市探索生态与产业深度融合的高质量发展新范式，同时对滞后城市开展深度诊断并制定精准的差异化攻坚方案。最终，通过前瞻性、系统性的设计，推动全省生态安全从静态高位均衡迈向动态优质协同新阶段。

4.2　城市发展模式识别与精准治理

通过融合长时序动态分析与 DPSIR 维度互动解析，本研究实现了从要素贡献分析向系统交互机制剖析的理论深化，并据此创新性地提出了 5 类城市发展模式。这些模式揭示了区域生态安全演化异质性的根源，为精准治理提供了依据。以驱动-压力失衡型城市为例，其核心问题在于关键因果链的断裂：快速增长的驱动力与压力未能被同步提升的治理响应有效抵消，导致驱动力-响应失衡度偏高而响应-压力缓解率偏低，最终引发状态健康度的恶化。这表明，经济发展若与系统性响应能力脱节，孤立的措施难以奏效且可能加剧恶性循环，这与赵霞等[17]关于响应子系统障碍度制约系统平衡的结论相印证，也从机制上支持了环境规制能显著提升生态韧性的观点[25]。因此，生态治理必须精准施策以破解结构性制约：响应-压力对抗型城市需从源头减压，推动产业绿色创新；驱动-压力失衡型城市应重点提升响应能力，打破系统的恶性循环，并开展专项修复；压力-状态危机型城市亟需推进生态修复与产业转型，并建立长效补偿机制；系统重构调整型城市则须将增长动力内嵌于环保体系，确保发展定型于可持续路径。

4.3　展望

生态安全涉及多指标耦合、多空间联动，受方法与数据所限，仍有问题待深入探讨。DPSIR 模型虽能分解各维度间的相互作用关系，却无法准确描述系统内部的复杂反馈机制；LSTM 模型依赖历史数据规律，对突发性事件及重大政策干预等因素导致的变化难以有效应对。未来可融合系统动力学与 LSTM 的优势，构建混合模型，形成更为多元、科学的评价预测体系，探究不同政策干预与生态响应的动态因果关系，从而为生态安全管理的相关决策提供有效支持。

5　结论

江苏省生态安全经历了水平跃迁、空间格局重组与内部结构分异的复杂过程。2005—2023 年，生态安全水平总体提升，区域格局趋向高位均衡。生态安全空间格局由显著集聚逐步转向分散，异质性明显，高低值区尚未形成稳定协同板块。DPSIR 框架内不同维度间的动态博弈，是区域结构分异的深层机制，并由此形成了驱动-响应协同型、压力-响应对抗型、驱动-压力失衡型、压力-状态危机型、系统重构调整型五类差异化发展模式。预测分析进一步表明，未来生态安全水平整体向好，但内部不均衡问题依然显著。因此，为实现从高位均衡向优质协同的跨越，未来政策需在巩固既有优势的同时，着力突破系统短板，通过加强精准施策与区域协同，推动生态安全迈向动态优质协同新阶段。

参考文献

[1] ZHANG J, GUAN Q Y, SHAN Y X, et al. Ecological security prediction and land use conflict identification in fragile mountain cities: a case study of Longnan, China [J]. Journal of Cleaner

Production,2025,497:145146.
[2]崔馨月,方雷,王祥荣,等.基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J].生态学报,2021,41(1):302-319.
[3]胡悦,马静,李雪燕,等.京津冀地区生态安全评价及障碍因子诊断[J].环境污染与防治,2021,43(2):206-210,236.
[4]ZHANG P,LIU L,YANG L W,et al.Exploring the response of ecosystem service value to land use changes under multiple scenarios coupling a mixed-cell cellular automata model and system dynamics model in Xi'an,China[J].Ecological Indicators,2023,147:110009.
[5]鲁钰,赵银娣,董霁红.西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析[J].生态学报,2022,42(4):1354-1367.
[6]叶辉,白蝶,谈树成,等.基于多源数据的阿勒泰地区土地生态安全评价研究[J].资源与生态学报(英文版),2021,12(6):757-765.
[7]周凌赟,丁金华,杨阳.苏南水网地区生态系统服务权衡协同与分区调控:以苏州吴江区为例[J].中国城市林业,2025,23(4):33-40.
[8]柴国荣,李佳音,付文昊.黄河流域城市群生态安全能级:区域差异、动态演化及提升路径[J].经济地理,2025,45(2):69-79.
[9]张中浩,聂甜甜,高阳,等.长三角城市群生态安全评价与时空跃迁特征分析[J].地理科学,2022,42(11):1923-1931.
[10]李瑞发,崔旺来.长三角城市群生态安全的时空演变及影响因素[J].水土保持研究,2025,32(2):377-386.
[11]白君亭,黄莉,周芷秀,等.森林人家可持续发展评价体系构建[J].中国城市林业,2022,20(5):137-142.
[12]贺清云,李慧平,欧阳晓.长江中游城市群城市化与生态环境耦合协调分析及模拟预测[J].生态科学,2020,39(2):182-190.
[13]DING Y K,ZHU Y L,FENG J,et al.Interpretable spatio-temporal attention LSTM model for flood forecasting[J].Neurocomputing,2020,403:348-359.
[14]PERUMALSAMY D,JOHNSON S,THINAKARAN R.Unraveling health impacts of individuals in industrial zones:leveraging game theory-based LSTM approach for predictive analysis of public health dynamics[J].Ain Shams Engineering Journal,2025,16(10):103579.
[15]梁鑫,李平星,刘红光.面向气候变化脆弱性的生态安全格局构架研究:以江苏省为例[J].长江流域资源与环境,2025,34(7):1529-1540.
[16]YI R,CHEN Y N,CHEN A.Evaluating urban climate resilience in the Yangtze River Delta urban agglomeration:a novel method integrating the DPSIR model and Sustainable Development Goals[J].Journal of Environmental Management,2025,376:124517.
[17]赵霞,李亚楠.基于 DPSIR 模型的长江中游城市群综合承载力时空演变及影响因素[J].长江流域资源与环境,2025,34(7):1456-1469.
[18]刘珊珊,吴文婕,王志强.基于 DPSIR-TOPSIS 模型的乌鲁木齐市绿色发展水平测度及其影响因素[J].地球科学与环境学报,2023,45(4):857-868.
[19]李云燕,崔华.基于 DPSIR 和 PLS-SEM 模型的京津冀城市群减污降碳协同水平评价与路径分析[J/OL].环境科学,2025.(2025-08-21)[2025-10-20].https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202504220.
[20]CHENG X,LONG R Y,CHEN H,et al.Coupling coordination degree and spatial dynamic evolution of a regional green competitiveness system-a case study from China[J].Ecological Indicators,2019,104:489-500.
[21]李小玲,刘逸瑞,王成,等.PSR 模型在青海省生态安全评价中的应用[J].安全与环境学报,2025,25(2):757-766.
[22]邱廉,刘瑜,陈冉,等.基于 PSR 模型的浙江省生态安全评价及对策[J].湖北农业科学,2025,64(7):20-26.
[23]翁异静,杨月,文雁兵.浙江山区 26 县绿色转型系统耦合关系的动态演进及驱动因素[J].应用生态学报,2024,35(11):3119-3130.
[24]CHEN H Z,XU J F,ZHANG K,et al.New insights into the DPSIR model:revealing the dynamic feedback mechanism and efficiency of ecological civilization construction in China[J].Journal of Cleaner Production,2022,348:131377.
[25]刘志华,袁帅,张家乐,等.中国生态环境韧性综合测度、空间分异与影响效应[J/OL].环境科学,2025.(2025-09-16)[2025-10-20].https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202505251.
[26]吴梦成,孙燕,刘倩.基于改进云物元的山东省城市生态安全评价及贡献度分析[J].科学技术与工程,2022,22(20):8986-8994.