

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第10期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.10.012

论文标题： 基于机器学习算法的生态保护红线范围生态质量时空演变与预测——以鄱阳湖流域为例

作　　者： 徐武军，许久恒，危小建，等

收稿日期： 2025-09-10

引文格式： 徐武军,许久恒,危小建,等.基于机器学习算法的生态保护红线范围生态质量时空演变与预测——以鄱阳湖流域为例[J].中南林业科技大学学报,2026,46(10):133-145.

Xu W J, Xu J H, Wei X J, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of ecological quality in ecological protection redline areas using a machine learning algorithm: a case study of the Poyang lake basin[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026, 46(10):133-145.

相关论文推荐

Recommended articles

基于“三生空间”变化的新疆生态环境质量时空演变特征及驱动力分析

Research on the spatiotemporal evolution characteristics and driving forces of ecological environment quality in Xinjiang based on the changes in the “production-living-ecological spaces”

典型石漠化治理区域土地利用格局与生境质量的时空演变特征及响应关系

Spatio-temporal evolution and response relationship between land use pattern and habitat quality in typical rocky desertification control area

乡村旅游地人居环境韧性水平时空格局及障碍因子识别——以湖南洞庭湖区为例

Spatio-temporal pattern and barrier factor identification of the resilience level of the human settlements in rural tourism areas: a case study of Dongting lake area

城镇化过程中生态承载力耦合关系的时空演变——以洞庭湖区为例

Spatio-temporal evolution characteristics of coupling relationship of ecological carrying capacity during urbanization: a case study of Dongting lake region

长江经济带旅游生态韧性时空演变及驱动因素

Spatio-temporal evolution and driving factors of tourism ecological resilience in the Yangtze River economic belt

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.10.012
http: //qks.csuft.edu.cn

基于机器学习算法的生态保护红线范围生态质量时空演变与预测

——以鄱阳湖流域为例

徐武军[1, 2]，许久恒[1, 3]，危小建[4]，何杰霞[4]

（1. 自然资源部鄱阳湖流域生态保护红线野外科学观测研究站，江西 南昌 330025；
2. 江西省国土空间调查规划研究院，江西 南昌 330025；3. 江西九岭山国家级自然保护区管理局，江西 宜春 330600；4. 东华理工大学 a. 测绘与空间信息工程学院；b. 江西省流域生态过程与信息重点实验室；c. 南昌市景观过程与国土空间生态修复重点实验室，江西 南昌 330013）

摘　要：【目的】研究生态保护红线区域长期、有效的保护机制对维护生态安全格局、保障生态系统功能和支撑经济社会可持续发展具有重要意义。【方法】以鄱阳湖流域生态保护红线区为对象，通过融合多源遥感数据及地面监测数据，构建“基质性 - 胁迫风险 - 野性”生态质量动态监测体系；引入 XGBoost 机器学习算法对权重阈值进行自适应调整，建立修正生态质量指数；采用 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 检验、长短期记忆神经网络等方法，系统揭示并预测鄱阳湖流域生态保护红线范围生态环境质量的时空演变规律及未来发展趋势。【结果】鄱阳湖流域生态保护红线范围生态质量在时序上呈现出明显的阶段性变化特征。其中，快速变化期内生态质量空间异质性显著增强，各类用地类型间差异扩大；而在稳定调整期，生态质量总体波动幅度趋缓，部分区域出现恢复性改善，反映出生态保护政策的积极成效。空间分布上，生态质量较低的区域主要集中在西北部山地丘陵区、中部农业与城镇集中分布的盆地以及北部受人类活动影响较大的湖区周边；而生态质量较高的区域主要分布于流域南部的自然植被覆盖度高、人类干扰较小的山地与森林地带。未来生态质量以“较差”和“中等”等级为主，“良好”等级区域仅 1.06 万 km^2，集中于赣江源保护区，而典型生态脆弱区仍面临多重人为与自然压力。【结论】本研究建立的监测与评估体系可有效识别生态质量的时空演变特征，为生态保护红线区域的精准管理和政策制定提供数据支持与理论参考。

关键词：鄱阳湖流域；生态保护红线；生态质量指数；机器学习；XGBoost 模型；长短期记忆神经网络
中图分类号：S771.8；S718.55+7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)10-0133-13

Spatio-temporal evolution and prediction of ecological quality in ecological protection redline areas using a machine learning algorithm: a case study of the Poyang lake basin

Xu Wujun[1,2], Xu Jiuheng[1,3], Wei Xiaojian[4], He Jiexia[4]

(1. Field Scientific Observation and Research Station for Ecological Protection Red Line in Poyang Lake Basin of the Ministry of Natural Resources, Nanchang 330025, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Land and Space Survey and Planning Research Institute, Nanchang 330025, Jiangxi, China; 3. Jiangxi Jiulingshan National Nature Reserve, Yichun 330600, Jiangxi, China; 4.a. School of Surveying and Geoinformation Engineering; b. Jiangxi Key Laboratory of Watershed Ecological Process and Information; c. Nanchang Key Laboratory of Landscape Process and Territorial Spatial Ecological Restoration, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract:【Objective】This study aims to investigate the long-term and effective protection mechanisms for ecological protection

收稿日期（Received）：2025-09-10　　**修订日期**（Revised）：2025-11-17
基金项目：自然资源部鄱阳湖流域生态保护红线野外科学观测研究站开放课题基金资助（JXZSZ2025003）。
第一作者：徐武军（1058490100@qq.com），工程师，硕士。　　**通信作者：**何杰霞（hejiexia2002@126.com），硕士研究生。
引文格式：徐武军 , 许久恒 , 危小建 , 等 . 基于机器学习算法的生态保护红线范围生态质量时空演变与预测——以鄱阳湖流域为例 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(10):133-145.
Xu W J, Xu J H, Wei X J, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of ecological quality in ecological protection redline areas using a machine learning algorithm: a case study of the Poyang lake basin[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10): 133-145.

redline areas, which are crucial for maintaining ecological security patterns, ensuring ecosystem functionality, and supporting sustainable socioeconomic development.【Method】The research took the ecological protection redline areas in the Poyang lake basin as its study object. It constructed a dynamic ecological quality monitoring system based on the "matrix-stress-wildness" framework by integrating multi-source remote sensing data and ground monitoring data. The study introduced the XGBoost machine learning algorithm to adaptively adjust weight thresholds and establish a modified ecological quality index. Furthermore, it employed Theil-Sen trend analysis, Mann-Kendall test, and long short-term memory (LSTM) neural network to systematically reveal and predict the spatiotemporal evolution patterns and future development trends of ecological quality within the ecological protection redline areas of the Poyang lake basin.【Result】The ecological quality within the ecological protection redline areas of the Poyang lake basin showed distinct phased characteristics temporally. During the rapid change period, spatial heterogeneity of ecological quality significantly intensified, with widening disparities among different land use types. In the stable adjustment period, the overall fluctuation range of ecological quality tended to moderate, with restorative improvements observed in some areas, reflecting the positive effects of ecological protection policies. Spatially, regions with lower ecological quality are mainly concentrated in the northwestern mountainous and hilly areas, the central basins characterized by concentrated agriculture and urbanization, and the northern lake areas affected by significant human activities. In contrast, areas with higher ecological quality are primarily distributed in the southern part of the basin, which features high natural vegetation coverage and minimal human disturbance. LSTM model predictions indicated that future ecological quality is primarily classified as "poor" and "medium," with "good" quality areas covering only 10 600 km^2 and concentrated in the Ganjiang river source reserve. Typical ecologically vulnerable areas continue to face multiple anthropogenic and natural pressures.【Conclusion】The monitoring and assessment system established in this study effectively identifies the spatiotemporal evolution characteristics of ecological quality, providing data support and theoretical references for precise management and policy formulation in ecological protection redline areas.

Keywords: Poyang lake basin; ecological protection redline; ecological quality index; machine learning; XGBoost model; long short-term memory neural network

生态保护红线作为国家生态安全的重要制度保障，在维系生态系统完整性和稳定性方面发挥着关键作用[1]。然而，随着城镇化进程加剧和人类活动强度持续增加[2]，生态保护红线区普遍面临着生态系统结构变化，以及由此导致的生态功能退化、生物多样性锐减和景观破碎化加剧等一系列生态环境问题，对区域生态安全与可持续发展构成直接威胁。在此背景下，生态质量指数通过量化多个指标，实现对区域生态环境的综合评估，能够系统揭示其优劣程度与时空变化规律，从而为快速、系统地评估区域生态环境状况提供科学依据。因此，开展生态保护红线范围生态质量动态监测研究，深入解析生态质量指数变化的响应规律，对于协调生态环境保护与经济发展、实现区域生态可持续发展具有重要的理论和实践意义。

近年来，国内外研究者在生态环境质量评价领域开展了大量卓有成效的研究。从研究尺度来看，相关成果主要集中在特定流域[3]、城市群[4]和山地生态系统[5]等典型区域。在研究内容方面，主要聚焦于三大方向：一是生态环境质量时空演变格局的解析，二是生态环境质量变化驱动机制的探讨，三是评价模型构建及其精度验证方法的创新。在评价方法层面，综合指标法因其系统性和可操作性成为主流方法，主要包括生态指数（Ecological index，EI）[6]、综合指数法[7]以及遥感生态指数（Remote sensing based ecological index，RSEI）[8]等典型方法。其中，生态指数的构建仍存在数据整合、权重主观和区域适应性差等难题[9]。综合指数法虽然应用广泛，但其权重确定过程存在主观性强、科学依据不足等固有缺陷，未来研究可着力于结合机器学习算法优化权重分配，以提升该方法的科学性和适用性。遥感生态指数（RSEI）通过主成分分析整合绿度（NDVI）、热度（LST）、干度（NDBSI）和湿度（WET）四个关键指标，在评价精度和可重复性方面展现出明显优势，已成为当前生态环境质量评价的主流方法[9]。

鄱阳湖流域作为长江中下游的关键生态屏障，其在涵养水源、调节气候、维持生物多样性等方面提供的生态系统服务，对于保障区域生态安全与可持续发展具有不可替代的作用[10]。然而，由于人类活动和气候变化进程不断加剧，鄱阳湖流域洪水、干旱等极端气候事件发生频率持续增长[11]，已严重威胁区域的可持续发展。鉴于此，生态保护红线作为维护流域生态安全的核心空间载体，其生态环境质量的动态监测与评估显得尤为重要。当前，针对鄱阳湖流域生态保护红线范围生态环境质量的系统性研究仍较为匮乏，特别是缺乏兼顾科学性与实用性的动态监测体系，难以支撑精细化的生态管理需求。为此，本研究以鄱阳湖流域生态保护红线范围为对象，构建“基质性 - 胁迫风险 - 野性”评价体系，引入 XGBoost 机器学习算法实现指标权重的自适应优化，采用 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 检验、长短期

记忆神经网络等方法，系统揭示并预测鄱阳湖流域生态保护红线范围生态环境质量的时空演变规律，并预测了未来的发展趋势。研究成果不仅可为流域生态保护重点区域的识别与管控提供科学依据，而且能为协调生态保护与区域发展矛盾、实现可持续发展目标提供决策支持。

1　研究区概况与数据源

1.1　研究区概况

鄱阳湖流域位于长江中下游南岸，由赣江、抚河、信江、饶河、修水五大河流、环湖直接入湖河流以及鄱阳湖共同组成，流域总面积约为 16.22 万 km^2（图 1）。作为我国南方重要的生态屏障，鄱阳湖流域在调节区域气候、维持生物多样性和保障水资源安全等方面具有不可替代的生态功能。根据政府部门提供的相关数据，共划定鄱阳湖流域生态保护红线 3.86 万 km^2。

然而，近年来该流域生态安全面临严峻挑战，如鄱阳湖流域乔木林亩均蓄积量低于全国均值，2022 年鄱阳湖星子站水位创历史新低等 [12]。其中，生态保护红线区作为鄱阳湖流域生态功能的核心承载区，具有更高的生态敏感性和保护价值，是维持流域生态平衡的“核心地带”和长江中下游生态安全的“生命线”。因此，亟需加强红线区内生态系统质量的动态监测与精准评估，以科学支撑生态保护与修复，确保生态系统服务的可持续供给，为长江经济带绿色发展提供坚实保障。

1.2　数据来源与预处理

采用的公开数据包括 2000—2023 年的植被覆盖度、归一化植被指数（NDVI）、降水、坡度、人口密度等数据：1）DEM 来自地理空间数据云（http://www.gscloud.cn）的 ASTER GDEM

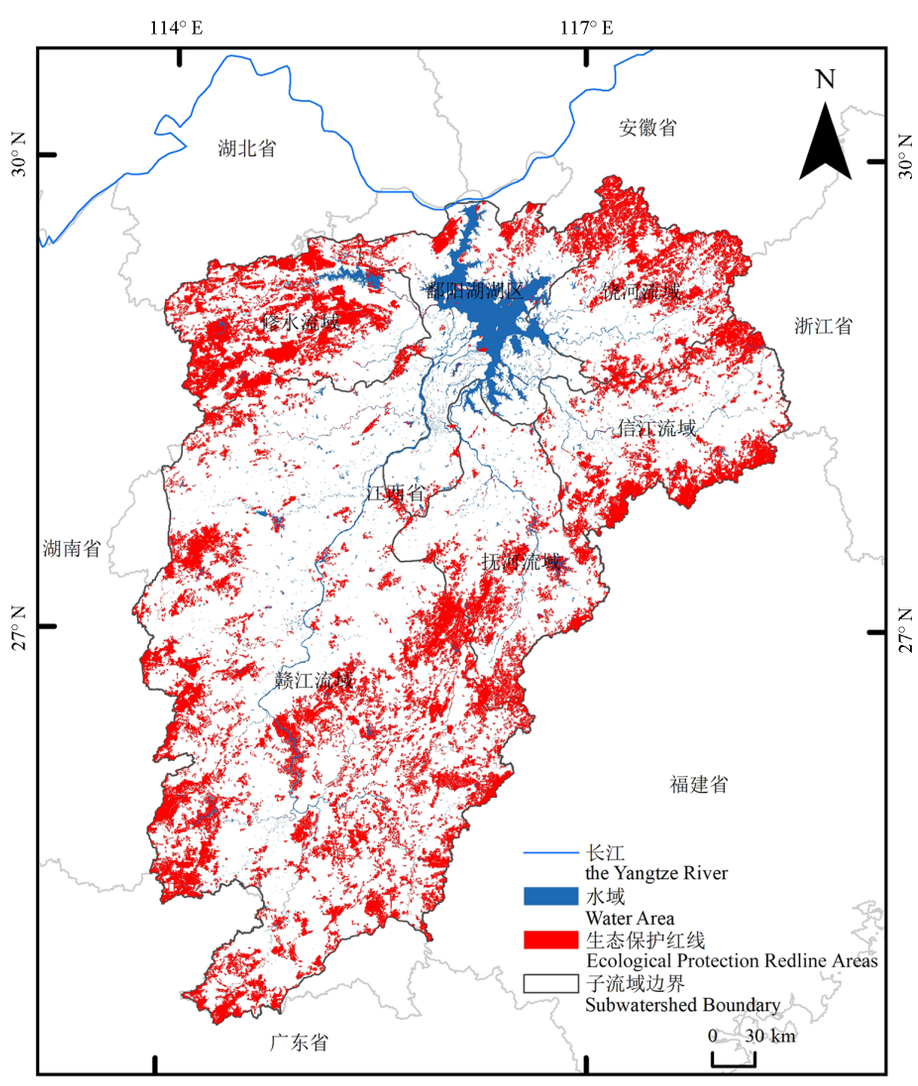


图 1　研究区范围

Fig. 1　The study area

的 30 m 分辨率产品；2）NDVI 来自美国国家航空航天局（https://www.earthdata.nasa.gov/）MODIS 数据集下 1 km 分辨率的 MOD13A3 数据；3）降水数据来自国家青藏高原数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/）的 1 km 分辨率产品；4）空气质量数据来自国家青藏高原数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/）的 1 km 分辨率产品，参考江西省空气质量相关的研究成果 [13]，选取了 $PM_{2.5}$、PM_{10}、O_3 三个关键参数，采用熵权法构建了综合空气质量指数；5）土地利用数据来自武汉大学的杨杰和黄昕教授发布的中国逐年土地覆盖数据（https://zenodo.org/records/12779975）的 30 m 分辨率产品；6）人口密度数据来自 ORNL（https://landscan.ornl.gov）LandScan 数据集的 1 km 分辨率产品；7）夜间灯光数据采用基于跨传感器校准获得的全球类 NPP-VIIRS 的长时序夜间光照数据（https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD）的 500 m 分辨率产品；8）水质数据来源于中山大学魏静团队发布的逐月高分辨率水质数据（https://www.nature.com/sdata），参考长江流域水质影响因子的研究成果 [14]，选取了溶解氧（DO）、总磷（TP）和高锰酸盐指数（CODMn）三个关键参数，采用熵权法构建了综合水质指数；9）叶面积指数来源于 Google Earth Engine（GEE）中 500 m 分辨率的 MOD15A2H.6.1 数据集；10）植被覆盖度来源于国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/）的 250 m 分辨率产品；11）生态保护红线数据来源于江西省国土空间调查规划研究院；12）碳储量数据估算中，不同土地利用类型的碳密度阈值设定参考长江流域碳储量时空变化的相关研究 [15]。

为平衡多源数据的分辨率差异并确保流域尺度分析的有效性，将所有指标重采样至 1 km×1 km 的空间分辨率，并投影至 CGCS2000 地理坐标系。该尺度与多项核心数据（如 NDVI、降水、人口密度）的原始分辨率一致，有利于在集成分析中最大限度地保留其主要空间信息。

2　研究思路与方法

2.1　研究思路

首先，选取 13 项指标构建鄱阳湖流域“基质性 - 胁迫风险 - 野性”生态质量动态监测体系，基于熵权法构建基本生态质量指数，并引入 XGBoost 机器学习算法对权重阈值进行自适应调整，建立修正生态质量指数；其次，采用 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 检验等方法，系统分析 2000—2023 年生态质量指数的时空演变特征；最后，选取长短期记忆神经网络预测鄱阳湖流域生态保护红线范围生态环境质量未来发展趋势。

2.2　研究方法

2.2.1　基于“基质性 - 胁迫风险 - 野性”的生态质量动态监测体系

基于前人研究并结合鄱阳湖流域存在的生态问题，选取 13 项指标构建鄱阳湖流域生态质量动态监测体系（表 1）。该指标体系可从基质性 - 胁迫风险 - 野性 3 个维度理解，基质性借用景观生态学中“基质”概念，指代支撑生态系统的基础物质条件；胁迫风险是指生态系统受到外界干扰或

表 1　生态质量动态监测体系
Table 1　Ecological quality dynamic monitoring system

准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	内涵 Connotation	指标来源 Source of indicator
基质性 Baseline quality	归一化植被指数	反映植被本身的生理活性与健康状况	[16]
	叶面积指数	反映植被本身的冠层结构	[17]
	空气质量	反映环境污染的动态变化	[13]
	水体质量	反映水文生态系统自净能力与富营养化程度	[14]
	碳储量	反映生态系统中存储的碳的数量	[18]
胁迫风险 Stress risk	降水	表示潜在水土流失和洪涝灾害威胁	[17]
	坡度	表示水土流失、滑坡等自然灾害发生的可能性	[10]
	土地利用强度	表示人类活动对陆地表层生态环境质量的影响程度	[10]
	人口密度	表示人类活动强度对生态系统的干扰	[19]
	夜间灯光指数	反映经济活动强度和城市发展程度	[10]
野性 Wilderness	蔓延度指数	表征景观中优势斑块的聚集程度与空间连通性	[10]
	香农多样性指数	衡量生态系统物种组成的丰富度与均匀度	[20]
	植被覆盖度	直接体现地表自然植被的空间遮蔽程度与生境完整性	[21]

压力的可能性和程度，这些干扰包括自然因素和人为因素，直接影响生态系统的健康和稳定 [10]；野性是指自然物种在生态群落、系统和环境相互依存、相互作用的信息调控下，植物物种个体适应或动物物种个体习得的一种生存方式 [22]。

在植被层面指标的选择上，本研究综合纳入归一化植被指数、叶面积指数与植被覆盖度。该选择是基于鄱阳湖流域高植被覆盖的生态特征 [23] 与研究目标所需的多维度精细化评估需求。尽管 3 项指标均与植被相关，但其物理内涵与生态指向具有明确区分：归一化植被指数、叶面积指数与植被覆盖度分别从生理活性、结构密度与空间范围三个维度，共同构建植被生态质量的立体诊断框架。为妥善处理指标间的信息重叠问题，后续综合评价采用熵权法与 XGBoost 等方法确定差异化权重，从而提高模型稳健性与解释力。

2.2.2　生态质量指数

基于熵权法构建基本生态质量指数，通过信息熵理论客观确定 13 项生态指标的权重分配。随后引入 XGBoost 机器学习算法对权重阈值进行自适应调整，建立修正生态质量指数。

1）基本生态质量指数

采用熵权法构建基本生态质量指数，以客观反映各生态指标的相对重要性。具体而言，通过计算信息熵确定各指标的权重分配，包括归一化植被指数（0.085 7）、叶面积指数（0.109 3）、空气质量（0.061 5）、水体质量（0.139 3）、碳储量（0.078 3）、降水（0.080 8）、坡度（0.072 3）、土地利用强度（0.062 5）、人口密度（0.027 1）、夜间灯光指数（0.044 1）、蔓延度指数（0.102 9）、香农多样性指数（0.094 8）以及植被覆盖度（0.041 4）。

2）修正生态质量指数

为进一步优化生态质量评价模型，采用 XGBoost（eXtreme gradient boosting）算法对生态质量评价因子的空间权重阈值进行自适应调整，构建修正生态质量指数。XGBoost 是一种基于梯度提升的集成学习算法 [24]，其核心思想是通过迭代训练多个弱学习器（决策树），并以加性策略逐步优化模型性能。该算法采用前向分步加法模型将各决策树的预测结果进行加权累加，最终形成强学习器。最佳目标函数如下：

$$O = -\frac{1}{2}\sum_{m}^{n=1}\frac{R_j^{\,2}}{H_j + e} + dm \qquad (1)$$

式中：e 为固定系数，d 为复杂性参数，m 为树中叶节点的数量，R_j 为叶节点 j 包含样本的一阶偏导数和，H_j 为叶节点 j 中包含样本的二阶偏导数之和。

模型构建过程基于 Python 编程环境及 Jupyter Notebook 平台实现，具体步骤如下：1）数据输入：将生态质量因子特征值及正负样本数据集导入模型，并按 7∶3 的比例随机划分为训练集和测试集；2）模型训练：初始化各评估单元的生态质量指数，以目标函数均值作为初始预测值，通过梯度下降算法优化损失函数，并基于梯度信息构建新的决策树；3）结果输出：利用迭代生成的决策树对生态质量水平进行预测，并通过累加方式逐步修正评估结果。当模型在测试集上的预测精度达到预设阈值时，终止迭代过程，最终输出修正后的生态质量指数。

为客观评估 XGBoost 模型的性能，采用 ROC 曲线（Receiver operating characteristic curve）进行验证。ROC 曲线是评估机器学习模型分类精度的常用工具，AUC（Area under curve）为曲线下面积，是模型预测精度的定量化表达，曲线越接近左上角，准确性和预测性就越高，预测结果越理想 [25]。

2.2.3　Theil-Sen 趋势分析法

为研究流域生态质量变化趋势空间分布特征，采用 Theil-Sen 趋势分析法，逐像元对变化趋势进行分析，从而反映其空间变化特征。计算公式为：

$$T_{\text{slope}} = \text{median}\left(\frac{W_{Yk} - W_{Yi}}{k - i}\right),\ \forall j > i \qquad (2)$$

式中：T_{slope} 为趋势变化斜率；W_{Yk} 和 W_{Yi} 分别为样本时序数据集合；median 为中值函数。当 $T_{\text{slope}} > 0$ 时，反映该时段内变量呈上升趋势；反之呈下降趋势。

2.2.4　Mann-Kendall 显著性检验

Mann-Kendall（MK）检验法是一种广泛应用于时间序列趋势分析的非参数统计方法，该方法能够有效识别序列中是否存在显著的单调上升或下降趋势。相较于 Theil-Sen Median 方法，MK 检验具有显著优势：它不仅能够反映长时间序列上要素变化趋势的显著性，而且对数据分布没有严格要求，同时也不受变化线性假设的限制。该方法通过计算统计量 Z 值来判断时间序列变化的显著性水平。

在实际应用中，通常设定生态质量指数变化趋势的显著性置信水平为 α=0.05，此时对应的临界值 Z=±1.96。根据 Z 值的绝对值大小可以判断趋势的显著程度：当 $|Z| > 1.65$ 时表示趋势通过 90% 置信度检验，$|Z| > 1.96$ 表示通过 95% 置信度检验，$|Z| > 2.58$ 则表示通过 99% 置信度检验。参考前人研究成果，将斜率计算结果与 Mann-

Kendall 显著性检验结果相结合，将生态质量指数变化趋势划分为 6 个不同的等级（表 2），从而实现对生态质量变化趋势的全面评估。

表 2　生态质量指数变化趋势等级划分
Table 2　Classification of ecological quality index changing trend

划分范围 Delimitation of Scope	等级 Grade
Slope ＞ 0，$\|Z\|$ ＞ 2.58	极显著改善
Slope ＞ 0，1.96 ＜ $\|Z\|$ ＜ 2.58	显著改善
Slope ＞ 0，0 ＜ $\|Z\|$ ＜ 1.96	不显著改善
Slope ＜ 0，$\|Z\|$ ＞ 2.58	极显著退化
Slope ＜ 0，1.96 ＜ $\|Z\|$ ＜ 2.58	显著退化
Slope ＜ 0，0 ＜ $\|Z\|$ ＜ 1.96	不显著退化

2.2.5　空间转移矩阵

空间转移矩阵可以判断系统在某一时间间隔内系统状态的相互转移特征，判断空间格局的变化，定量揭示不同要素间的转移情况和转移速率。计算公式如下：

$$K_{a-b}=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times 100\% \quad (3)$$

式中：K_{a-b} 为研究时段内生态环境质量动态度；U_a 为初始时间某一生态环境质量类型的面积；U_b 为结束时间某一生态环境质量类型的面积；T 为研究时长（以年为单位）。

2.2.6　长短期记忆神经网络

长短期记忆神经网络（Long short-term memory，LSTM）是一种特殊的循环神经网络结构，专注于时间序列数据，能够通过门控机制有效捕捉长时间依赖关系（图 2）。LSTM 模型网络结构包含两层 LSTM 单元：第一层配置 50 个神经元，第二层配置 25 个神经元。为防止过拟合，每层 LSTM 后引入 Dropout 正则化层（丢弃率 =0.2），最终通过全连接层输出预测值。模型编译阶段使用自适应矩估计优化器（Adam），学习率设定为 0.001，损失函数采用均方误差。训练过程中，批量大小设置为 16，训练迭代次数为 500 次。

3　结果与分析

3.1　生态质量指数空间分布格局

2000—2023 年，鄱阳湖流域生态保护红线范围修正生态质量指数训练集与测试集均值分别为 0.881、0.874，表明 XGBoost 的准确性和预测性较高，可用于生态质量指数修正。

基于对生态保护红线范围生态质量时空演变特征的分析，揭示了该区域生态系统显著的动态变化过程（图 3）。从时间序列维度观察，红线范围内生态质量呈现出鲜明的阶段性演变特征。初期阶段（2000 年），生态质量指数高度集中于 0.48 ～ 0.52 这一相对狭窄的区间内。这一分布特征表明该时期流域生态系统状态整体较为稳定，空间异质性较低。快速变化期（2005—2010 年），流域生态质量的空间分异程度显著加深。生态质量指数范围从 2005 年的 0.39 ～ 0.62，迅速扩展至 2010 年的 0.33 ～ 0.67，区间跨度增大至 0.34。该阶段不仅观测到局部区域的生态质量有所提升，同时也伴随着显著的生态退化现象，反映出流域内部生态过程的剧烈分化和复杂变化。稳定调整期（2015—2023 年），生态质量指数的波动幅度呈收敛态势。2015—2020 年间，指数范围维持在 0.34 ～ 0.65；2023 年进一步调整至 0.37 ～ 0.63。这一变化趋势表明，尽管流域生态系统整体仍保

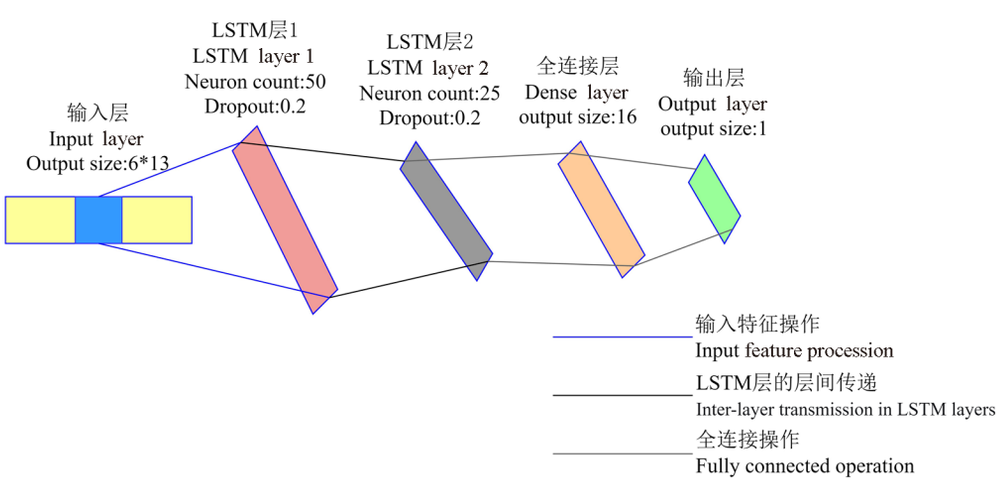


图 2　LSTM 模型架构
Fig. 2　Architecture of the LSTM model

持着较大的空间差异性，但其波动性已趋于平缓。此外，2023 年指数范围下限的上升，预示着流域生态质量开始呈现缓慢恢复的积极态势。从空间格局上看，研究期内，鄱阳湖流域大部分红线范围的生态环境质量处于较低水平。生态质量指数低值区主要分布于鄱阳湖流域西北部的九岭山、中部的吉泰盆地、北部的鄱阳湖湖区等地，高值区集中分布于赣州市中部地区。

基于《生态环境状况评价技术规范》（HJ/T 192—2006），将生态环境质量指数按 0.2 间隔划分为差 [0 ～ 0.20）、较差 [0.20 ～ 0.40）、中等 [0.40 ～ 0.60）、良 [0.60 ～ 0.80）和优 [0.80 ～ 1.00] 五个等级，通过等级转移矩阵分析得到图 4 所示的生态环境质量等级转移路径。本研究发现，生态质量指数的变化主要表现为相邻等级之间的渐进式转变，跨等级突变现象相对罕见。例如，在 2000 年，处于“中等”等级的区域主要向相邻的“较差”或“良好”等级转移，更为重要的是，在 2005—2023 年整个研究时段内，各生态质量等级之间普遍存在双向转移现象。这一特征清晰地表明，研究区内部同时并存着生态环境质量改善与退化的空间单元，凸显了流域生态恢复与压力并存的复杂局面。

3.2　生态质量指数时空变化格局

为深入探究鄱阳湖流域生态保护红线范围生态质量指数时空分异特征及其变化显著性，采用 Theil-Sen 趋势分析法与 Mann-Kendall 显著性检验方法，对 2000、2005、2010、2015、2020、2023 年共 6 个代表年份的生态质量指数序列进行量化分析。

结果显示，研究期内红线范围生态质量指数变化斜率范围为 -0.030 ～ 0.029（图 5a）。斜率为正的地区主要分布在西北部的怀玉山区、中部的鄱阳湖湖区、西部的武夷山东侧，表征以上区域生态环境质量呈上升趋势。斜率为负的地区主要分布在西

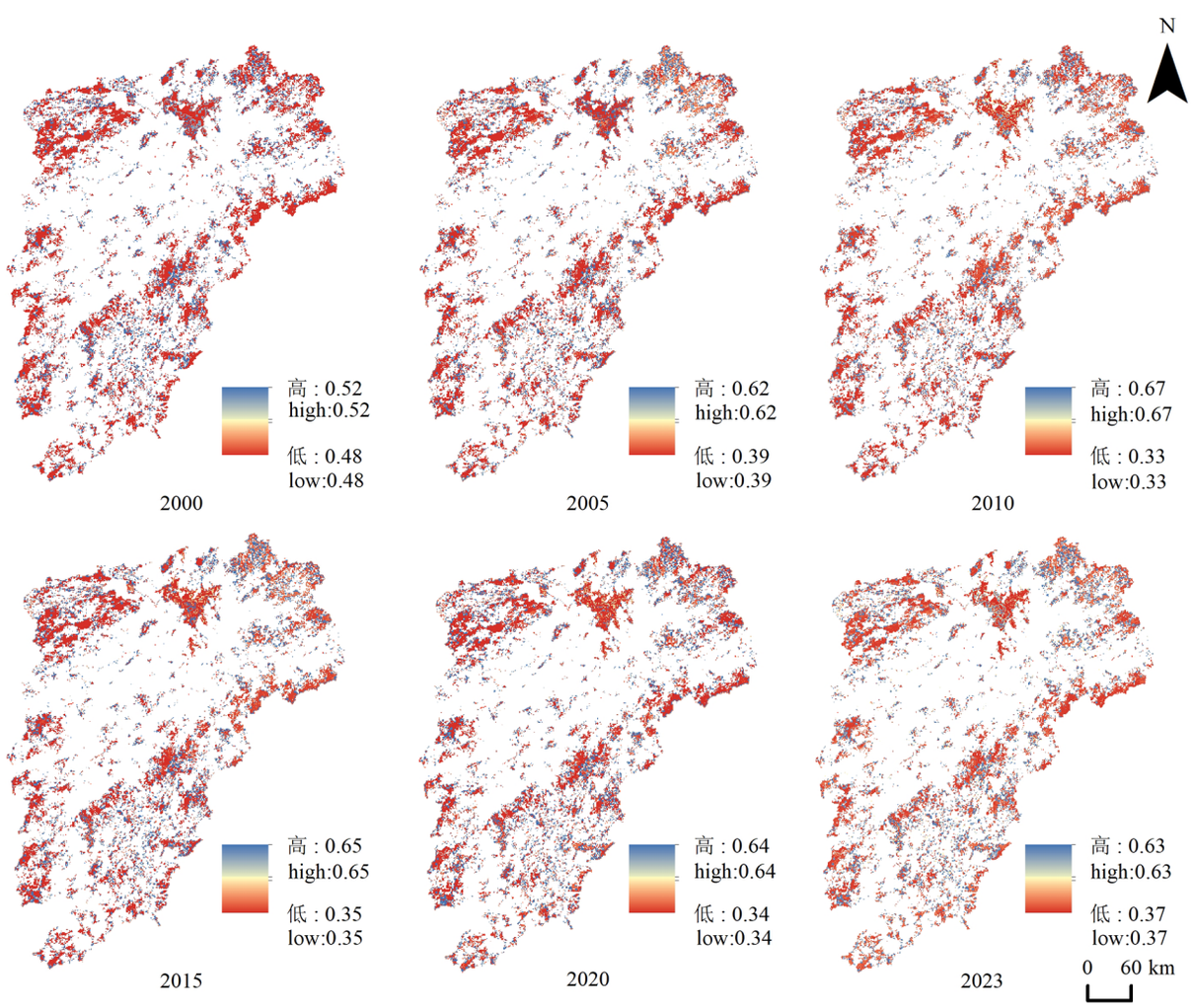


图 3　2000—2023 年生态质量指数空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of ecological quality index from 2000 to 2023

北部的幕阜山 - 九岭山区、西南部的罗霄山脉，表征以上区域生态环境质量呈下降趋势。在生态环境质量变化趋势等级的空间分布上（图 5b），生态质量改善区域占流域总面积的 52.36%。

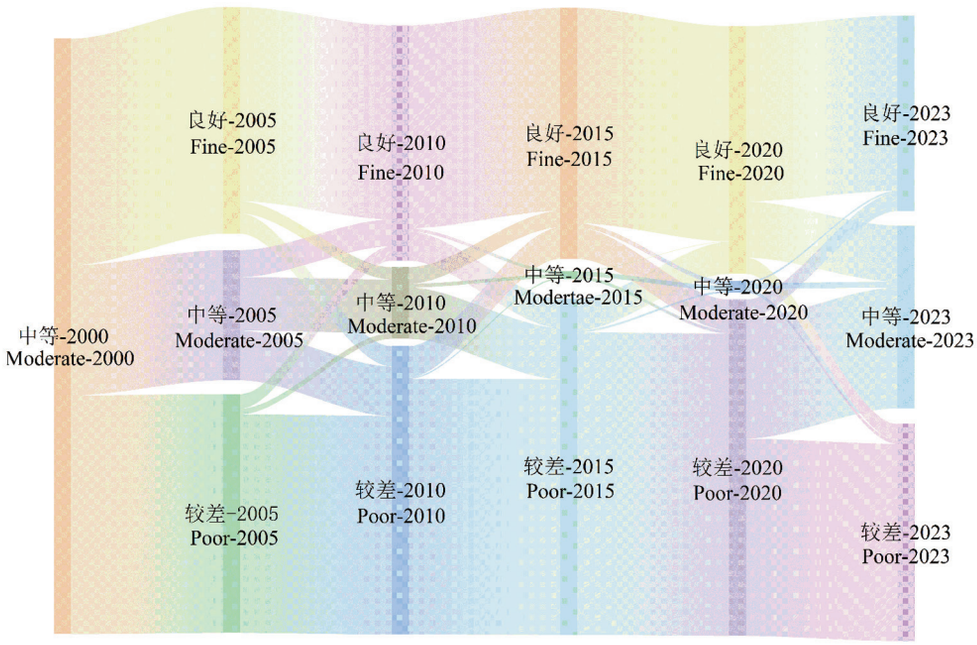
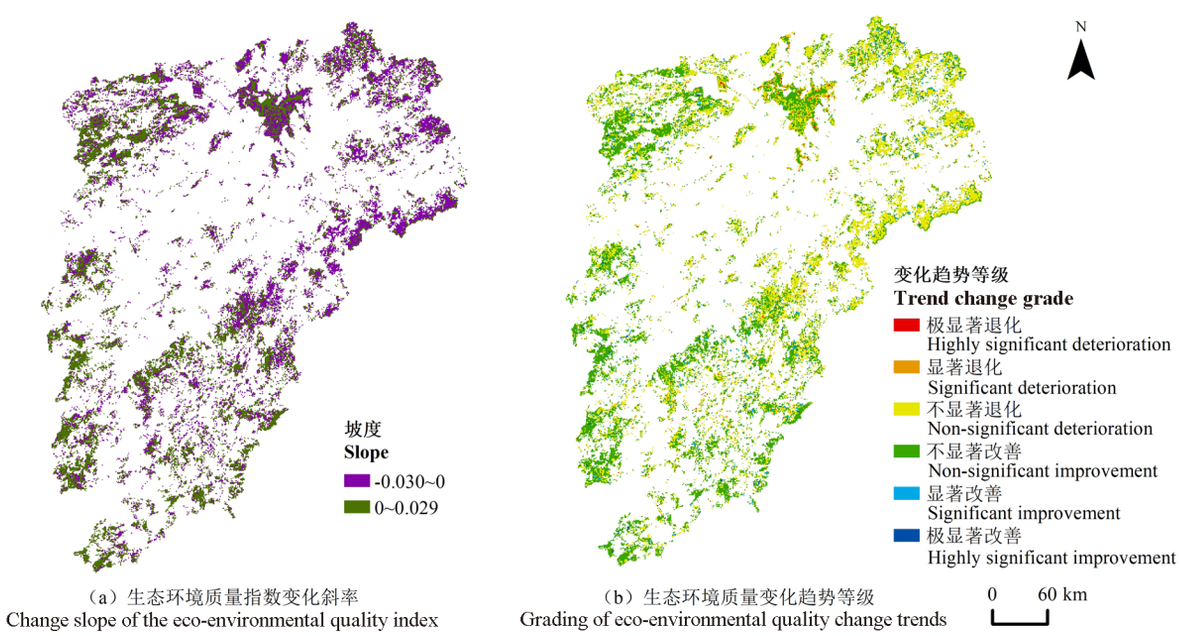


图 4　2000—2023 年生态质量指数迁移路径

Fig. 4　Transition pathways of ecological quality index from 2000 to 2023



（a）生态环境质量指数变化斜率
Change slope of the eco-environmental quality index

（b）生态环境质量变化趋势等级
Grading of eco-environmental quality change trends

图 5　生态质量指数变化趋势空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of ecological quality index changing trend

其中，显著改善和极显著改善的区域分别占 2.08% 和 0.67%，这些区域空间分布较为离散，主要集中于吉安市、赣州市及上饶市的丘陵山地地区；不显著改善区域占比最高，达 49.61%，主要分布于研究区南部与西北部。生态质量退化区域面积占比达 47.64%，呈现明显的空间异质性。其中，显著退化和极显著退化区域分别占 2.15% 和 0.64%，这些区域表现出显著的空间集聚特征，主要分布在南昌市及九江市的城市化核心区；不显著退化区域占 44.85%，在空间上呈连续分布格局，集中于研究区东部和东北部边缘地带。本研究揭示了流域生态保护红线范围生态质量演变的显著空间分异规律：山地丘陵区生态质量总体呈改善趋势，而快速城市化区域则面临显著的生态退化

压力，广大过渡地带多表现为不显著退化状态。这一空间分异模式反映了人类活动强度与自然地理背景的交互作用，可为制定差异化生态保护与修复策略提供了科学依据。

3.3　生态环境质量预测分析

基于长短期记忆神经网络模型，集成 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 及 2023 年多期特征数据，对鄱阳湖流域生态保护红线范围的生态质量指数进行预测。预测结果显示，生态质量预测指数介于 0.366 ～ 0.634。依据前述 HJ/T 192—2006 规范进行评价，预测区生态质量主要包括较差、中等和良好三个等级（图 6）。

生态质量预测指数处于较差等级的区域面积最大，达 1.68 万 km^2，约占预测区总面积的 43.5%，空间上集中分布于流域西北部的九岭山、中部的吉泰盆地、北部的鄱阳湖湖区、西部的武夷山东麓以及西南部的罗霄山脉五大典型区域。这些区域普遍面临严峻的复合生态压力：九岭山地区受陡峭地形、矿业重金属污染及高强度旅游活动的叠加影响，导致严重水土流失与植被退化；吉泰盆地作为核心农业区，大面积耕地集约化利用伴随高化肥投入，引发面源污染、土壤有机质下降及城镇扩张导致的栖息地破碎化；鄱阳湖湖区受大型水利工程调节影响显著，枯水期延长导致洲滩湿地植被大面积退化，叠加密集航运污染，加剧水体富营养化；武夷山东麓受充沛降水影响侵蚀强烈，加之较高比例的坡耕地进一步加剧水土流失；罗霄山脉林区受林相单一化制约导致生物多样性偏低，密集小水电开发严重削弱了河流的生态连通性。生态质量预测指数处于中等等级的区域面积为 1.12 万 km^2，约占 29.0%，主要集中于流域东北部的怀玉山区。该区域呈现出自然生态系统与人为活动相互制衡的动态格局：中低山地段保存了较好的常绿阔叶林，溪流网络发挥了一定的生态廊道功能。然而，茶叶种植的持续扩张导致局部生物多样性均质化，旅游公路网络建设产生的显著边缘效应构成主要干扰源。这种自然保护与开发压力的矛盾性特征，使其整体生态质量维持在流域中等水平，形成了典型的生态过渡带景观。生态质量预测指数达到良好等级的区域面积为 1.06 万 km^2，约占 27.5%，主要分布在流域南部的赣江源地区。该区域的生态优势源于多重保护性因子的协同作用：抗侵蚀能力强的古老地质基底为核心支撑，核心区极高的森林覆盖率维持了成熟稳定的顶级群落结构，国家级自然保护区的严格管控有效限制了开发活动，加之地处流域上游源头位置，受外部污染输入的影响极其微弱。这些因素共同保障了该区域高度的生态稳定性。

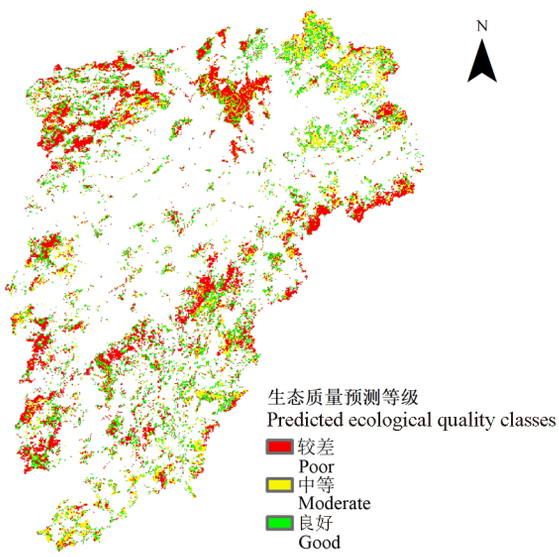


图 6　基于 LSTM 模型的生态质量预测指数
Fig. 6　Predicted ecological quality index based on LSTM model

4　讨论与结论

4.1　讨　论

4.1.1　生态环境质量时空变化

2000—2023 年鄱阳湖流域生态保护红线范围生态环境质量整体呈改善趋势，呈现出阶段性演变特征，这与前人的研究结果基本一致[26]，可划分为以下三个典型阶段：1）初期稳定阶段（2000 年），流域生态系统保持相对稳定状态，空间异质性较低。这一特征与当时城镇化水平相对有限、人类活动干扰强度较弱密切相关，反映出流域生态系统处于以自然演替为主的相对平衡状态。2）快速变化阶段（2005—2010 年），流域生态质量呈现出局部极化的演变特征。随着 2009 年“鄱阳湖生态经济区规划”上升为国家战略，生态保护力度得到显著加强。图 3 与图 4 显示，相较于 2005 年，2010 年规划区内生态质量“良好”等级的面积有所增加，反映出该阶段生态规划区内的城市发展更加注重生态保护与修复。这一变化体现了政策引导对生态系统质量提升的积极作用，也是红线区生态质量指数高值上升的主要原因，进一步验证了生态经济区规划在协调区域发展与生态保护方面的有效性。然而，与红线区邻近的外围

区域正处于快速的工业化与城镇化进程中，面临着显著的复合生态压力，本研究发现的生态质量指数最低值下降恰与这些外围压力相符。《2010 年江西省环境状况公报》及相关研究指出，当时全省面临酸雨污染、生态系统功能局部退化及历史遗留重金属污染等问题，特别是在临近红线区的乐安河流域（德兴铜矿）等工业化区域，出现了严重的重金属污染 [27]。这些邻近区域高强度的人类活动与相对滞后的生态保护措施，其负面影响扩散至红线区边缘，共同导致红线区内生态质量的局部退化，从而解释了生态质量指数范围下限下移与较差等级区域局部增加的现象。3）稳定调整期（2015—2023 年）呈现出独特的演变特征：生态质量指数的波动幅度呈现收敛态势。

这一稳定调整特征的形成，主要源于多重因素的复杂相互作用。首先，流域内持续实施的生态建设政策发挥了关键作用。2019 年《关于推进生态鄱阳湖流域建设行动计划的实施意见》的出台 [28]，标志着生态保护工作的系统化和常态化，推动生态系统管理从大规模工程治理向精细化、适应性管理转变。这些政策举措有效提升了生态系统的基质稳定性，增强了系统抵御外部干扰的能力。其次，频发的极端水文事件对生态系统产生了显著影响。2020 年的流域性特大洪水 [29]、2022 年鄱阳湖星子站水位创历史新低 [12] 等极端气候现象不仅直接改变了湖泊水文节律，还通过影响湿地生态系统结构和功能，对生态质量产生了深刻的扰动作用。在多重压力共同作用的背景下，稳定调整期的生态质量表现实际上反映了政策驱动的生态建设成效与气候变化引发的生态压力之间形成的动态平衡。生态质量指数的收敛趋势表明，尽管面临严峻的气候变化挑战，但通过持续的政策干预和生态保护措施，流域生态系统展现出了一定的韧性和适应性。然而，极端水文事件频发所导致的生态风险仍需高度关注，这对未来生态保护政策的制定和实施提出了更高要求。

研究期内，鄱阳湖流域生态保护红线范围内的生态质量呈现出“南高北低、边缘高腹地低”的空间分异格局，该格局的形成是自然地理本底与人类活动干扰共同驱动的结果。生态质量高值区集中分布于流域南部的赣江源区域，该区域的稳定自然本底是核心支撑：其古老的花岗岩体抗侵蚀能力强，中低山地形为主的地貌为生态系统提供了稳定的立地条件。同时，系统的生态保护政策发挥了关键作用：该区域森林覆盖率高，保存了较为完整的亚热带常绿阔叶林；设立了国家级自然保护区与水源涵养生态功能区，限制工矿开发和城镇建设。自然禀赋与保护政策的协同效应，共同保障了该区域优良的生态质量；生态质量低值区分布于西北部九岭山、中部吉泰盆地及北部鄱阳湖湖区，普遍表现为自然脆弱性与高强度人类干扰的叠加效应。九岭山区地形陡峭、水土流失风险高，叠加矿业污染与旅游干扰，生态系统持续承压；吉泰盆地作为核心农业区，单一化耕作与高强度化肥农药使用引发面源污染与土壤退化，城镇扩张进一步加剧生境破碎化；鄱阳湖湖区受大型水利工程调控影响，枯水期延长导致湿地植被退化，叠加航运、养殖等干扰，加剧水体富营养化与生态功能衰退。

综上，2000—2023 年鄱阳湖流域生态保护红线范围内生态质量的时空分异特征，反映了自然地理基底的基础性约束与不同发展阶段政策调控、人类活动的差异化影响。未来生态修复与空间治理应重视时空交互效应，强化政策实施的连续性与空间管控的差异性，以提升流域生态保护的整体效能与系统韧性。

4.1.2　生态环境质量预测分析

本研究以鄱阳湖流域生态保护红线范围为对象，该区域作为长江中下游重要的生态屏障，其生态质量的动态预测对于维护区域生态平衡与保障可持续发展具有深远的战略意义。在预测方法上，采用 LSTM 模型为流域内的每一个空间单元分别构建了其生态质量指标的时间序列，以此让 LSTM 模型充分学习其动态变化中的长期时序依赖规律。该模型通过大量数据样本的训练，能够从复杂时序数据中提取关键特征，发现潜在规律，从而更有效地识别生态系统的非线性响应规律与早期风险信号。

实证分析结果表明，基于 LSTM 模型的预测结果与《江西省国土空间规划（2021—2035 年）》提出的“一江双心，五河三屏”生态保护格局、生态修复规划及自然保护地体系等具有较高的空间一致性 [12]。特别是在鄱阳湖湖区、罗霄山脉、吉泰盆地等核心生态区域，模型所识别出的生态质量较差区域与规划中划定的重点保护与修复区域高度重叠。这一方面印证了 LSTM 模型在流域尺度生态环境质量预测中具有良好的适用性与解释力 [30]，另一方面也从技术层面验证了现行国土空间规划对关键生态空间布局的科学性与前瞻性。

现行规划为区域生态保护与修复提供了系统性的实践指引，本研究则从理论建模与数据分析角度为规划落实提供了科学支撑。二者之间具有

较高的一致性，既说明了本研究方法的合理性与预测结果的可靠性，也进一步强化了规划实施的理论基础，体现出理论研究与实践导向之间的良性互动。

4.1.3　不　足

首先，在指标体系构建方面，虽然基于科学性和数据可获得性原则选取了 13 个关键指标，但生态系统复杂性决定了其受多维度因素共同影响。例如，矿业活动强度、土壤侵蚀模数等未被纳入模型的因子在某些区域可能具有重要调控作用，未来研究可通过引入更多元的数据源，进一步丰富评价维度。其次，受遥感数据瞬时性特征限制，当前研究主要揭示了空间分异规律，对长时间序列动态演变机制的解析尚显不足，后续研究可结合多时相数据，深入探讨不同时间尺度下生态质量演变的主导驱动因素及其交互作用机制。这些改进将有助于建立更加精准、动态的流域生态质量监测预警体系，为区域生态文明建设提供更有力的科技支撑。

4.2　结　论

以鄱阳湖流域生态保护红线区为研究区域，构建了基于“基质性 - 胁迫风险 - 野性”的生态质量动态监测体系，通过对鄱阳湖流域生态保护红线范围 2000—2023 年生态质量的时空演变特征进行深入分析，揭示了该区域生态系统的显著动态变化与复杂的空间分异规律，并预测了其生态环境质量的未来发展趋势，得出以下主要结论：

1）鄱阳湖流域生态保护红线范围生态质量呈现出明显的阶段性变化特征，经历了初期稳定期（2000 年）、快速变化期（2005—2010 年）和稳定调整期（2015—2023 年）三个典型阶段。其中，快速变化期的生态质量空间分异程度显著加深，稳定调整期则表现出波动趋缓、局部恢复的积极态势。

2）空间格局分析结果表明，生态质量较差的区域主要分布在西北部山地、中部盆地和北部湖区，这些区域具有生态服务功能突出、人类活动干扰强烈和气候变化敏感等共性特征；而生态质量较好的区域则相对有限，主要分布在流域南部。这一空间分异格局深刻揭示了人类活动强度与自然地理环境本底之间的耦合作用机制，表明在生态保护政策制定过程中，必须系统考量区域环境异质性特征及其潜在的生态风险等级差异。

3）鄱阳湖流域生态保护红线范围未来生态质量空间分异依然显著，中低等级区域仍占主导。典型生态脆弱区面临多重胁迫因子的叠加压力，生态恢复形势严峻，少数生态质量优良区域其稳定性得益于自然本底与保护措施的协同增效。

参考文献：

[1] 曹书舸 . 江苏生态红线区生态质量演变及影响机制分析 [D]. 南京 : 南京信息工程大学 ,2024:9-10.
Cao S G. Analysis of ecological quality evolution and influencing mechanisms in Jiangsu ecological redline areas[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology,2024: 9-10.

[2] 程甜 , 黄熠和 , 胡文敏 , 等 . 基于供需匹配的洞庭湖区生态保护利用空间识别 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(6):157-171.
Cheng T, Huang Y H, Hu W M, et al. Spatial identification of ecological protection and utilization in Dongting lake area based on supply and demand matching[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(6):157-171.

[3] 陈康 , 尹海伟 , 孔繁花 , 等 . 基于资源型城市分区比较的黄河流域生态环境质量时空变化及驱动力分析 [J]. 生态学报 , 2025,45(18):8911-8922.
Chen K, Yin H W, Kong F H, et al. Spatiotemporal variations and driving forces of ecological environment quality in the Yellow River basin: a comparative analysis based on resource-based city zoning[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(18):8911-8922.

[4] 李光哲 , 王浩 , 曹银璇 , 等 . 长株潭城市群生态环境质量时空演变及影响因素分析 [J]. 自然资源遥感 ,2023,35(4):244-254.
Li G Z, Wang H, Cao Y X, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of ecological environment quality in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(4):244-254.

[5] 张萍 , 庞咏 , 陈庆松 , 等 . 基于 RSEI 模型的滇西北高山峡谷区生态环境质量动态监测及驱动因子分析 [J]. 自然资源遥感 , 2025,37(5):243-253.
Zhang P, Pang Y, Chen Q S, et al. Dynamic monitoring and driving factor analysis for eco-environmental quality in alpine gorges of northwest Yunnan based on a remote sensing ecological index model[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2025,37(5):243-253.

[6] Boori M S, Choudhary K, Paringer R, et al. Eco-environmental quality assessment based on pressure-state-response framework by remote sensing and GIS[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment,2021,23:100530.

[7] 傅伯杰 . 中国各省区生态环境质量评价与排序 [J]. 中国人口·资源与环境 ,1992,2(2):48-54.
Fu B J. The evaluation of eco-environmental qualities in China[J]. China Population, Resources and Environment,1992,2(2):48-54.

[8] 徐涵秋 . 区域生态环境变化的遥感评价指数 [J]. 中国环境科学 ,2013,33(5):889-897.
Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science,2013,33(5):889-897.

[9] 魏泽锋 , 官云兰 , 王淑婷 , 等 .“ 呼包鄂 ” 城市群生态环境质量时空演变及驱动因素分析 [J]. 环境科学 ,2025,46(11):7172-7185.
Wei Z F, Guan Y L, Wang S T, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of ecological quality in the “Hohhot-Baotou Ordos” urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2025,46(11):7172-7185.

[10] 来洒洒 , 陈文波 , 危小建 , 等 . 基于生态韧性评价的鄱阳湖流域自然保护地预测与空缺区识别 [J]. 应用生态学报 ,2024,35(12):3461-3468.
Lai S S, Chen W B, Wei X J, et al. Prediction of nature reserves and identification of vacancy areas in Poyang lake basin based on ecological resilience evaluation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(12):3461-3468.

[11] 袁燕萍 , 叶许春 , 刘婷婷 , 等 . 基于多源遥感数据的鄱阳湖流域综合干旱时空变化特征研究 [J]. 长江流域资源与环境 , 2024,33(1):214-227.
Yuan Y P, Ye X C, Liu T T, et al. Spatio-temporal characteristics of integrated drought in Poyang lake basin based on multi-source remote sensing data[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2024,33(1):214-227.

[12] 江西省人民政府关于印发《江西省国土空间规划 (2021—2035 年)》的通知 [EB/OL]. https://www.jiangxi.gov.cn/jxsrmzf/ghjh/pc/content/content_1832859850426494976.html.
Notice of the People’s Government of Jiangxi Province on Issuing the “Jiangxi Provincial Territorial Space Plan (2021-2035)”[EB/OL]. https://www.jiangxi.gov.cn/jxsrmzf/ghjh/pc/content/content_1832859850426494976.html.

[13] 许胜华 . 江西省空气质量分析与预测研究 [D]. 南昌 : 江西理工大学 ,2024:20-21.
Xu S H. Air quality analysis and prediction study in Jiangxi Province[D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology,2024:20-21.

[14] 陈瑞凯 , 康瑾 , 赵琰鑫 , 等 .2003—2024 年长江流域水质时空演变特征 [J]. 中国环境科学 ,2025,45(4):2171-2182.
Chen R K, Kang J, Zhao Y X, et al. Spatial and temporal evolution of water quality in the Yangtze River basin from 2003 to 2024[J]. China Environmental Science,2025,45(4):2171-2182.

[15] 匡文菲 , 刘永超 , 李加林 , 等 . 长江流域土地利用与碳储量时空变化及多情景预测 [J]. 环境科学 ,2026,47(3):1914-1927.
Kuang W F, Liu Y C, Li J L, et al. Spatiotemporal dynamics of land use and carbon stocks under multiple scenarios in the Yangtze River basin[J]. Environmental Science,2026,47(3):1914-1927.

[16] 武旭 , 王勃砚 , 任伟 , 等 .2000—2022 年黄河流域甘肃段生态环境质量与影响因素 [J]. 应用生态学报 ,2025,36(2):353-364.
Wu X, Wang B Y, Ren W, et al. Ecological environment quality and the influencing factors in Gansu section of Yellow River basin during 2000-2022[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(2):353-364.

[17] 牛忠恩 , 何洪林 , 张梦宇 , 等 .2003—2020 年中国陆地生态系统质量评价及归因分析 [J]. 地理学报 ,2025,80(7):1901-1919.
Niu Z E, He H L, Zhang M Y, et al. Assessment and attribution of terrestrial ecosystem quality in China from 2003 to 2020[J]. Acta Geographica Sinica,2025,80(7):1901-1919.

[18] Zhang X Y, Jia W W, He J Y. Spatial and temporal variation of ecological quality in northeastern China and analysis of influencing factors[J]. Journal of Cleaner Production,2023,423:138650.

[19] 郑京生 , 尹昌君 , 孙守家 , 等 .2000—2020 年黄河流域森林生态质量时空变化 [J]. 生态学杂志 ,2025,44(2):695-704.
Zheng J S, Yin C J, Sun S J, et al. Spatiotemporal changes of forest ecological quality in the Yellow River basin from 2000 to 2020[J]. Chinese Journal of Ecology,2025,44(2):695-704.

[20] 张良侠 , 周德成 , 樊江文 , 等 . 黄土高原地区生态脆弱性的空间分布格局及其控制因子关系的一致性 [J]. 生态学报 , 2024,44(22):10096-10105.
Zhang L X, Zhou D C, Fan J W, et al. Consistency analysis of the spatial distribution patterns and their drivers of the ecological vulnerability on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(22):10096-10105.

[21] 路利杰 , 王立辉 , 李扬 , 等 . 丹江口库区 2001—2020 年植被生态系统质量遥感监测与时空演变分析 [J]. 长江流域资源与环境 ,2023,32(6):1291-1304.
Lu L J, Wang L H, Li Y, et al. Remote sensing monitoring and spatial temporal pattern evolution analysis of the vegetation ecosystem quality in the Danjiangkou reservoir area from 2001 to 2020[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(6):1291-1304.

[22] 杨兴艺 , 包玉 , 王志泰 , 等 . 喀斯特区城市遗存山体野境自然野性评价——以贵阳为例 [J]. 生态学报 ,2022,42(24):9995-10010.
Yang X Y, Bao Y, Wang Z T, et al. Natural wildness evaluation of urban remnant mountain wilderness in karst area: a case study of Guiyang[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(24):9995-10010.

[23] 杨晓霞 . 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域陆地植被覆盖变化的影响研究 [D]. 重庆 : 西南大学 ,2022:42-52.
Yang X X. Impacts of climate change and human activities on the

terrestrial vegetation cover changes in the Poyang lake basin[D]. Chongqing: Southwest University,2022:42-52.

[24] 黄宇玲 , 吴达胜 , 方陆明 . 基于逐步回归的 XGBoost 方法的森林蓄积量估测 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(6):72-80.
Huang Y L, Wu D S, Fang L M. Forest stock volume estimation based on XGBoost method of stepwise regression[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(6):72-80.

[25] 邱大鹅 , 张军以 , 杨晓雪 , 等 . 基于 XGBoost-PLUS 模型的成渝城市群生态安全格局多情景模拟及反规划优化 [J]. 生态学报 ,2025,45(16):7905-7920.
Qiu D E, Zhang J Y, Yang X X, et al. Multi-scenario simulation and future planning optimization of ecological security pattern of Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on XGBoost-PLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(16):7905-7920.

[26] 田智慧 , 尹传鑫 , 王晓蕾 . 鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析 [J]. 环境科学 ,2023,44(2):816-827.
Tian Z H, Yin C X, Wang X L. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment quality in Poyang lake basin[J]. Environmental Science,2023,44(2):816-827.

[27] 江名荣 . 浅析德兴市受重金属污染的现状及治理措施 [J]. 资源节约与环保 ,2013(7):243.
Jiang M R. Analysis of heavy metal pollution and control measures in Dexing City[J]. Resources Economization & Environmental Protection,2013(7):243.

[28] 江西省推进生态鄱阳湖流域建设行动计划的实施意见 [N]. 江西日报 ,2019-01-23(007).
Implementation opinions on promoting the construction of an ecological Poyang lake basin action plan in Jiangxi Province[N]. Jiangxi Daily,2019-01-23(007).

[29] 江西省水文监测中心 .2020 年鄱阳湖流域暴雨洪水 [M]. 北京 : 中国水利水电出版社 ,2024:47-81.
Jiangxi Provincial Hydrological Monitoring Center. Rainstorm and flood in the Poyang lake basin (2020)[M]. Beijing: China Water & Power Press,2024:47-81.

[30] 何杰霞 , 张福庆 , 辛雪 , 等 . 基于深度学习模型的生态安全预警与格局构建研究——以鄱阳湖流域为例 [J]. 地理科学 ,2026,46(8):1755-1768.
He J X, Zhang F Q, Xin X, et al. Ecological safety early warning and pattern construction based on deep learning models: a case study of the Poyang lake basin[J]. Geographical Science,2026,46(8):1755-1768.

[本文编校：吴　彬]

（上接第 132 页）

[23] 肖遥 , 楚秀丽 , 徐肇友 , 等 . 南方红豆杉 2 年生容器苗多点试验的生长节律家系变异 [J]. 林业科学研究 ,2016,29(2):238-244.
Xiao Y, Chu X L, Xu Z Y, et al. Family variation on growth rhythm of two-year-old container seedlings of *Taxus wallichiana* var. *mairei* in multi-location trials[J]. Forest Research,2016,29(2):238-244.

[24] 李培 , 阙青敏 , 吴林瑛 , 等 . 红椿不同种源的苗期生长节律研究 [J]. 华南农业大学学报 ,2017,38(1):96-102.
Li P, Que Q M, Wu L Y, et al. Growth rhythms of *Toona ciliata* seedlings from different provenances[J]. Journal of South China Agricultural University,2017,38(1):96-102.

[25] Li C M, Xia H, Bai H, et al. Genetic variation of height growth rhythm between clones of *Larix kaempferi* × *L. gmelini* based on logistic models[J]. Journal of Forestry Research,2018,29:1387-1394.

[26] Carles S, Lamhamedi M S, Beaulieu J, et al. Differences in growth and mineral nutrition of seedlings produced from ten white spruce seed orchards[J]. New Forests,2011,42:195-214.

[27] Nasr S M H, Savadkoohi S K, Ahmadi E. Investigation of salinity impacts on germination and growth of two forest tree species at seedling stage[J]. Journal of Forestry Research,2013,24(4):703-708.

[28] 焦月玲 . 南方红豆杉和三尖杉种源变异及生理遗传研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2006:38.
Jiao Y L. Study on provenance variation and physiology genetics of *Taxus chinensis* var. mairei and *Cephalotaxus fortunei*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2006:38.

[本文编校：吴　彬]