DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.006 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.006
吕添贵, 申乐, 胡节, 等. 基于DPSIRM模型的水生态韧性时空演变及影响因素分析:以江西省为例[J]. 水土保持研究,2026,33(6):274-283.
Lyu Tiangui, Shen Le, Hu Jie, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of water ecological resilience based on DPSIRM model: a case study of Jiangxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):274-283.

基于DPSIRM模型的水生态韧性时空演变及影响因素分析
——以江西省为例

吕添贵[1], 申 乐[1], 胡 节[1], 黄贤哲[1], 袁梦涵[1], 赵 巧[2]
(1.江西财经大学 公共管理学院, 南昌 330013; 2.江西财经大学 数字经济学院, 南昌 330013)

摘 要:[目的]识别水生态韧性的时空演化特征并诊断其关键影响因素,以期为大湖地区的水资源适应性管理提供案例借鉴。[方法]基于DPSIRM模型构建水生态韧性评价指标体系,综合运用熵权-逼近理想解排序法(TOPSIS)、核密度估计和空间杜宾模型,剖析了2012—2023年江西省水生态韧性的空间演变特征,揭示其背后的影响因素,并提出了水生态韧性的提升路径。[结果](1)江西省水生态韧性整体呈波动上升趋势,由2012年的0.353逐步提升至2023年的0.385,年均增幅0.003;(2)江西省水生态韧性呈现以南昌和赣州为双核心,并向周边梯度递减的空间格局,多数城市实现水生态韧性层级跃迁且空间分异趋于收敛;(3)江西省水生态韧性主要受到地区财政收入影响,其中,第三产业比重基于知识扩散产生正向空间溢出效应,而第二产业比重对水生态韧性具有显著的负向空间溢出效应。[结论]江西省水生态韧性整体呈双核心驱动、稳步向优的态势,且受财政收入与产业溢出主导,未来应从财政协同、产业优化、节水修复和跨域网络等维度系统提升区域水生态韧性水平。

关键词:水生态韧性; 时空演变; DPSIRM模型; 江西省
中图分类号:TV213.4; X826 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0274-10

Spatiotemporal evolution and influencing factors of water ecological resilience based on DPSIRM model
—a case study of Jiangxi Province

Lyu Tiangui[1], Shen Le[1], Hu Jie[1], Huang Xianzhe[1], Yuan Menghan[1], Zhao Qiao[2]
(1.*School of Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang* 330013, *China*;
2.*School of Digital Economics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang* 330013, *China*)

Abstract: [**Objective**] To identify the spatiotemporal evolution characteristics of water ecological resilience and diagnose its key influencing factors, so as to provide case-based references for adaptive water resource management in large-lake regions. [**Methods**] Based on the driver-pressure-state-impact-response-management (DPSIRM) model, an evaluation index system for water ecological resilience was constructed. By comprehensively applying the entropy weight-technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method, kernel density estimation, and spatial Durbin model, the spatial evolution characteristics of water ecological resilience in Jiangxi Province from 2012 to 2023 were analyzed. The underlying influencing factors were revealed, and pathways for enhancing water ecological resilience were proposed. [**Results**] (1) The overall water ecological resilience in Jiangxi Province showed a fluctuating upward trend, increasing from 0.353 in 2012 to

收稿日期:2026-01-15 **修回日期:**2026-01-29 **接受日期:**2026-02-11
资助项目:国家自然科学基金(42261049);江西省自然科学基金(20232BAB203061);江西财经大学第二十届学生科研课题(2025120815145346)
第一作者:吕添贵(1986—),男,福建龙岩人,博士,教授,主要从事资源利用与环境保护研究。E-mail:lvtiangui@163.com

0.385 in 2023, with an average annual growth of 0.003. (2) The spatial pattern of water ecological resilience in Jiangxi Province was characterized by two cores—Nanchang and Ganzhou—with a gradient decline toward the periphery. Most cities achieved a transition in water ecological resilience levels, and spatial differentiation tended to converge. (3) The water ecological resilience in Jiangxi Province was primarily influenced by regional fiscal revenue. The proportion of the tertiary industry generated a positive spatial spillover effect through knowledge diffusion, while the proportion of the secondary industry had a significant negative spatial spillover effect on water ecological resilience. [**Conclusion**] The overall water ecological resilience in Jiangxi Province exhibits a dual-core driving and steady improvement, primarily driven by fiscal revenue and industrial spillover effects. To systematically enhance regional water ecological resilience, future efforts should focus on fiscal coordination, industrial optimization, water conservation and restoration, and the development of cross-regional networks.

Keywords: water ecological resilience; spatiotemporal evolution; DPSIRM model; Jiangxi Province

水生态系统是人类生存发展与生态文明建设的关键载体,对化解水资源危机和推动可持续发展具有重要作用[1]。然而,极端气候变化、旱涝交替胁迫、工业生活废水排放以及农业面源污染导致水生态环境保护形势依然严峻,致使区域水生态系统面临巨大保护压力[2]。事实上,中央政府提出改善水环境质量作为首要目标,将水资源作为最大的刚性约束,统筹推进水资源利用和提升水环境质量[3]。为此,如何科学评估水生态韧性空间演化过程,推动水生态系统由被动应对转向主动适应,已成为区域水资源适应性管理的研究热点。

围绕水生态韧性研究,国内外学者进行了诸多探讨。在概念层面,水生态韧性强调水生态系统在面对自然与社会经济多重压力时,所具备的抵抗、适应、恢复与转型的综合能力[3-4]。在研究尺度方面,聚焦于大江大河流域或单一城市[5-7],关注特定区域的多维度韧性交互[8],侧重于韧性水平评估与影响因素识别,体现研究尺度交叉与概念融合的进程。在评价体系构建方面,主要包含PSR、DPSIR、“脆弱-适应-响应”“压力-状态-响应”及“抵抗-适应-恢复-转型”等体系框架[9-11]。在研究方法层面,采用熵权法、层次分析法与综合评价法[12-13],结合多元线性回归等[14-15],识别并检验关键驱动因子或障碍因子,实现从静态描述向机制解析的延伸。综上,已有研究为水生态韧性的概念内涵、测度评价等提供了良好理论参考。然而,现有研究将管理措施简单纳入“响应”模块,未能充分刻画政府主导的制度性主动管理行为,难以准确评估管理投入的实际效果,同时忽略了水生态韧性及其影响因素之间可能存在的空间关联与溢出效应。事实上,江西省作为长江中游城市群的重要节点区域,其水生态安全关系到长江流域的水生态安全保护与利用。尤其是近年来遭受旱涝交替胁迫,水生态系统正面临湿地面积萎缩、水资源生态足迹攀升和生态功能退化等困境,水生态系统压力与日俱增[16-17]。鉴于此,以江西省为研究对象,基于2012—2023年面板数据,构建涵盖驱动力-压力-状态-影响-响应-管理的水生态韧性评价指标体系,揭示其时空演变格局,采用空间杜宾模型识别关键影响因素并提出相应提升路径,以期为同类型湖滨城市水生态保护提供决策参考。

1　研究区概况与研究框架

1.1　研究区概况

江西省(24°29′—30°04′N,113°34′—118°58′E)地处中国东南部,长江中下游南岸,总面积16.69万km^2,辖11个地级市。省内地势起伏较大,高程最高达2 103 m,最低为−17 m。独特的地形条件塑造了完整的鄱阳湖流域水系,河网密布,水生态资源丰富。其中,鄱阳湖作为中国第一大淡水湖,正常年份水域面积约3 283 km^2,蓄水量达276亿m^3,是该区域乃至全国重要的水生态保护核心区。然而,在气候变化与人类活动的双重扰动下,这一优越的水生态本底正面临严峻挑战。受亚热带季风气候主导,江西省年降水量1 300～1 800 mm,但年际变化较大,雨季(4—6月份)降水常占全年的40%～50%,导致水资源时空分布不均,频繁出现“枯水”危机[18]。同时,快速城镇化和高强度的土地利用加剧了水生态系统压力,全省湿地总面积由1989年的74.35万hm^{2}缩减至2020年的73.25万hm^2,尤其是沼泽湿地面积持续减小[19]。水资源本底的脆弱性与人类活动的压力相互叠加,使得部分区域人均水资源生态赤字已然显现,水生态系统脆弱性日益凸显,水生态韧性面临持续弱化的风险[20]。为此,在“生态优先”的新发展格局下,探讨水生态韧性的时空演变规律及其影响因素,对保障流域水生态安全具有典型性和紧迫性。

1.2 研究框架

本质上，水生态系统是自然环境和社会经济因素相互作用形成的综合体。而驱动力-压力-状态-影响-响应-管理（Driver-Pressure-State-Impact-Response-Management，DPSIRM）模型作为一种系统分析工具，其核心在于揭示社会、经济与生态环境等多个子系统之间复杂的因果关联链条。该模型不仅适用于评估水资源安全、湖泊生态系统健康及人居环境安全等具体领域，更因其对“压力-状态-响应”逻辑链条的完整刻画，而高度契合生态安全治理的动态性与综合性特征[21-22]。相应的是，DPSIRM模型将政府的干预、修复与长效管理措施独立设为“管理”准则层，有效弥补了传统DPSIR模型对此类主动性、制度性管理刻画不足的缺陷，从而能更精准地揭示“社会-生态”系统中治理效能的作用机制[23]，更能体现水生态环境与社会经济发展之间的耦合协同过程。

为此，本研究将水生态系统的驱动因素（D）分为人口、社会和经济发展三部分。其中，在驱动力作用机制下，对水生态系统产生废水、废气、资源和污染压力（P），进而在外源性压力和内源性压力的双重作用交织下，对水生态系统的资源和社会状态造成改变（S），进一步对水生态系统内的工业用水、生活用水和生态用水造成影响（I）。同时，为应对水生态系统状态的变化和水环境系统的改变，推动水生态系统在废水治理和资源循环两方面做出响应（R），在此基础上，基于环境规制和科创投资对其进行综合治理（M），最终使水生态系统得到优化调控。事实上，水生态韧性并非单一要素的表征，而是在社会经济发展与水资源压力的双重驱动下，区域水资源状态、综合影响、响应机制与管理效能相互作用而形成的综合映射（图1），兼具系统整体性与地域个体性特征。

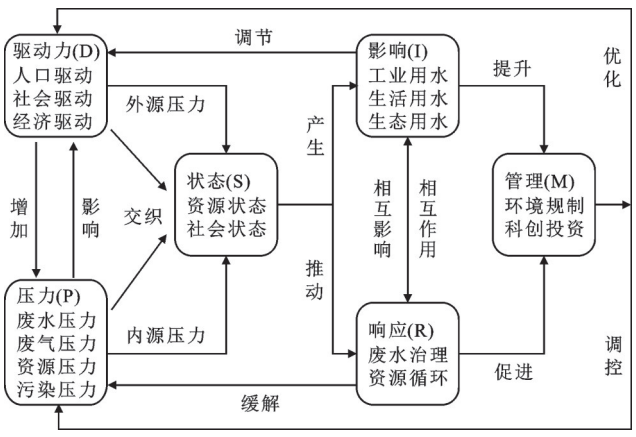


图1 基于DPSIRM模型的水生态韧性评价框架

Fig. 1 Water ecological resilience assessment framework based on DPSIRM model

2 指标选取及研究方法

2.1 评价指标选取

事实上，水生态系统包含复杂的生态环境系统和人类社会系统，在“社会-生态”系统视角下，水生态韧性指的是该系统在遭受外部冲击后，能够恢复并跃升至一个更具适应性、更强韧的新平衡态的能力。在参考已有研究的基础上[24-25]，结合江西省水生态环境状态，以及社会经济发展现状特征，基于DPSIRM模型框架，依据指标选取的客观性、合理性和可获得性原则，构建水生态韧性评价指标体系（表1）。

（1）驱动力因子[22]。体现为人口、社会与经济因素共同作用区域水生态韧性的演变。其中，人口密度表征外部人口驱动，反映人口集聚对水资源的压力；而城镇化率作为社会发展进程的关键指标，推动用水结构转变与需求升级；人均GDP则表征经济驱动水平，通过影响水资源开发利用的规模与方式，进而作用于水生态安全格局。

（2）压力因子。表现为人类活动对区域水生态韧性的直接胁迫。其中，工业二氧化碳排放量表征废气排放压力，影响降水质量与水体酸化风险；而工业废水与生活污水排放量共同表征废水排放压力，直接影响水环境安全；工业增加值用水量反映资源消耗压力，体现经济增长对水资源的依赖程度；农药化肥施用量则表征农业面源污染压力[25]，影响流域水体富营养化风险。

（3）状态因子。反映区域水资源在自然与社会作用下的现实条件与利用水平[5]。其中，水资源总量和年均降水量表征自然赋存状态，决定区域水资源的本底供给能力；而人均水资源量则表征社会用水条件下人均占有水平，体现水资源与人口规模匹配关系，反映人类对水资源实际利用状态。

（4）影响因子[25]。体现水生态安全状况对3类用水需求的直接作用，其中，工业用水总量表征对生产用水的影响，关联区域工业发展与用水效率；生活用水总量反映对居民生活用水的影响，涉及基本民生保障与用水公共服务水平；生态用水总量则表征对生态环境用水的影响，体现生态流量保障与系统修复能力。

（5）响应因子。体现社会对水生态环境问题的治理与调控响应。其中，污水处理率直接表征对水污染治理的工程与管理响应，反映减排与净化的实施力度；生活垃圾无害化处理率则间接表征资源循环与固体废物管控响应[22]，通过减少陆地污染物迁移降低对水环境的二次影响。

表 1　水生态韧性评价指标体系

Table 1　Evaluation index system of water ecological resilience

目标层	准则层	指标层	指标属性	指标权重
水生态韧性评价	驱动力(D)	人口密度(人/km²)	−	0.0962
		城镇化率(%)	+	0.0396
		人均GDP(元/人)	+	0.0550
	压力(P)	工业二氧化碳排放量(万t)	−	0.0208
		万元工业增加值用水量(m³)	−	0.0116
		工业废水排放量(万t)	−	0.0037
		生活污水排放量(万t)	−	0.0160
		农药化肥施用量(t)	−	0.0365
	状态(S)	水资源总量(亿m³)	+	0.0775
		年均降水量(亿m³)	+	0.0892
		人均水资源量(m³/人)	+	0.0226
	影响(I)	工业用水总量(亿m³)	+	0.0245
		生活用水总量(亿m³)	+	0.0804
		生态用水总量(亿m³)	+	0.0904
	响应(R)	污水处理率(%)	+	0.0143
		生活垃圾无害处理率(%)	+	0.0040
	管理(M)	科学技术支出(万元)	+	0.1798
		固定资产投资额比重(万元)	+	0.0662
		地方财政一般预算内教育支出(万元)	+	0.0718

(6) 管理因子[22-23]。作为政府主导的主动调控手段,涵盖科技投入与制度保障。其中,科学技术支出表征对水环境治理与节水技术资金支持;固定资产投资比重与地方财政教育支出,共同反映了在提升资源利用效率与公众环保意识方面的长期制度性投入,从而间接促进水生态环境保护能力的系统提升。

2.2　影响因素选取

参考相关研究[22,25-27]并结合江西省区域发展特点和数据可得性,从社会经济结构与生态治理两个维度共选取7个影响因素(表2),具体如下:

(1) 社会经济结构维度。其中,总人口(X_1)以常住人口数量表征,其规模直接构成水资源消耗与污染负荷的基础压力,挑战水生态韧性;地区财政收入(X_2)以一般公共预算收入测度,表征地区经济支撑能力,可为水生态治理提供资金,驱动韧性提升;第二产业比重(X_3)以第二产业增加值占GDP比重表征,通常伴随较高资源环境压力,对水系统形成持续负荷;第三产业比重(X_4)以第三产业增加值占GDP比重测度,反映经济结构服务化转型,有助于缓解经济增长对水生态系统的冲击。

(2) 生态治理维度。水土流失治理面积(X_5)以累计水土流失治理面积表征,属源头性修复措施,能减少泥沙入河,增强土壤蓄水,巩固流域稳定性;建成区绿化覆盖率(X_6)以绿化覆盖面积占建成区面积比例测度,能够提升水文循环与净化能力;绿地与广场用地面积(X_7)以城市规划中该类用地总面积表征,通过增强地表透水性与蓄滞空间,提升城市应对极端洪涝的缓冲适应能力。

表 2　水生态韧性影响因素

Table 2　Factors affecting water ecological resilience

维度	变量	定义	测度方法	平均值	最大值	最小值
社会经济结构	X_1	总人口	常住人口数量(万人)	14.10	0.99	0.11
	X_2	地区财政收入	地方一般公共预算收入(亿元)	1.96	5.36	0.59
	X_3	第二产业比重	第二产业增加值占GDP比重(%)	0.57	3.51	0.37
	X_4	第三产业比重	第三产业增加值占GDP比重(%)	0.51	3.48	0.27
生态治理	X_5	水土流失治理面积	累计水土流失治理面积(10^3hm²)	7.10	21.79	1.22
	X_6	建成区绿化覆盖率	建成区绿化覆盖率(%)	0.47	0.57	0.39
	X_7	绿地与广场用地面积	绿地与广场用地总面积(km²)	0.15	0.53	0.04

2.3　研究方法

2.3.1　熵权−TOPSIS　基于熵权法客观地分配指标体系中的各项权重,不仅避免了传统方法对指标权重赋值的主观性,而且能够得到更加准确、客观的结果[28]。假设有m个评价对象、n个指标,构成原始矩阵$X=\left(x_{ij}\right)_{m\times n}$,标准化后得到矩阵$Y=\left(y_{ij}\right)_{m\times n}$。

在此基础上，依据数据的离散程度对指标赋权，采用TOPSIS方法计算各评价对象的最优方案及最劣方案的距离，从而得到历年水生态韧性水平，步骤如下。

（1）对原始矩阵$X=(x_{ij})_{m\times n}$运用极差法标准化处理。

正向指标：

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}\ i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

负向指标：

$$y_{ij}=\frac{x_{\max}-x_{ij}}{x_{\max}-x_{\min}}\ i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

（2）熵权法求出标准化后的指标权重。

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}y_{ij}}\times\ln\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}y_{ij}}\right) \tag{3}$$

$$w_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-e_j)} \tag{4}$$

式中：e_j为第j项指标的信息熵；k为波尔茨曼常量，满足$k=1/\ln m$；y_{ij}为第i个城市第j项指标的标准化值；w_j为第j项的指标权重。

（3）确定加权标准化矩阵z。

$$z_{ij}=w_j y_{ij} \tag{5}$$

（4）确定各评价对象与最优解及最劣解间的加权欧氏距离s_i^+与s_i^-。

$$s_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(z_j^+-z_{ij})^2} \tag{6}$$

$$s_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(z_j^--z_{ij})^2} \tag{7}$$

式中：z_{ij}为加权后指标标准化值；z_j^+与z_j^-分别为第j个指标到最优和最劣目标距离。

（5）计算各评价对象与理想解的贴近度。

$$c_i=\frac{s_i^-}{s_i^++s_i^-} \tag{8}$$

式中：c_i为第i个对象的贴近度。$c_i\in[0,1]$，值越大代表水生态韧性越高，反之越低。

2.3.2 核密度估计 核密度估计用于对数据样本特点进行客观描述，可反映数据的空间分布情况，无需对水生态韧性总体分布做过多假设，有效处理样本的多模态分布[27]。因此，核密度估计可用于描述江西省水生态韧性的时间演变轨迹。因此，核密度越大，数据集中的程度就越高；反之，核密度越小，数据集中的程度就越低。公式如下：

$$f(x)=\frac{1}{mr}\sum_{i=1}^{m}k\left(\frac{X_i-x}{y}\right) \tag{9}$$

式中：$f(x)$为随机变量x的密度函数；m为城市样本数量；X_i为观测值，即城市i的水生态韧性值；x为观测值的均值，即城市样本的水生态韧性均值；$k(x)$为核函数，选取高斯核密度函数；r为带宽，设定为：$r=0.9SN^{-0.2}$（S为样本标准差，N为样本数）。

2.3.3 空间杜宾模型 事实上，水生态韧性存在显著的空间关联性[3,29]。空间杜宾模型（Spatial Durbin Model，SDM）可同时识别解释变量对被解释变量的直接效应及跨区域空间溢出效应[30]。因此，本文构建空间杜宾模型来分析江西省水生态韧性的影响因素，模型如下：

$$\begin{aligned}\ln \mathrm{CER}_{it}=&\rho\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\ln \mathrm{CER}_{it}+\beta\ln X+\\&\gamma\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\ln X+\mu+\lambda+\varepsilon\end{aligned} \tag{10}$$

式中：CER_{it}为城市i在t年的水生态韧性水平；n为城市数目；ρ为空间自相关系数；X为影响因素；β,γ分别为影响因素的回归系数、空间滞后项系数；W_{ij}为城市i与城市j的空间二阶邻接矩阵；μ,λ分别为个体、时间固定效应；ε为误差项。SDM的运算均在Stata中进行。

2.4 数据来源

本研究水资源数据和社会经济数据主要来源于2012—2023年的《长江经济带统计年鉴》《中国水资源公报》《江西省统计年鉴》《江西省生态环境统计年报》《江西省水资源公报》，以及江西省各地级市国民经济与社会发展统计公报和统计年鉴等，部分缺失数据通过线性插值法、多年平均法计算获得。所使用的行政区划矢量图来源于地理空间数据云。

3 结果与分析

3.1 水生态韧性时空演变特征分析

3.1.1 水生态韧性时序演变特征 （1）总体分析。由图2可知，江西省水生态韧性整体呈波动上升趋势，由2012年的0.353增至2023年的0.385，年均增长0.003。其中，2012—2017年属快速提升期，水生态韧性由0.353显著上升至0.386，韧性水平整体大幅提升；2018年呈明显下降期，韧性水平骤降至0.340；2019—2023年为缓慢增长期，韧性水平从0.374逐步回升至0.385，增速放缓但保持稳步提升态势。治理演化过程主要得益于“河长制”等制度创新与污染防治攻坚战等工程措施的协同效应，也凸显了极端气

候事件对水生态系统的冲击,暴露了其在应对突发扰动的脆弱性。同时,表明治理重心已从末端工程治理转向流域系统性修复,长期的管理与修复投入正持续发挥正向作用。

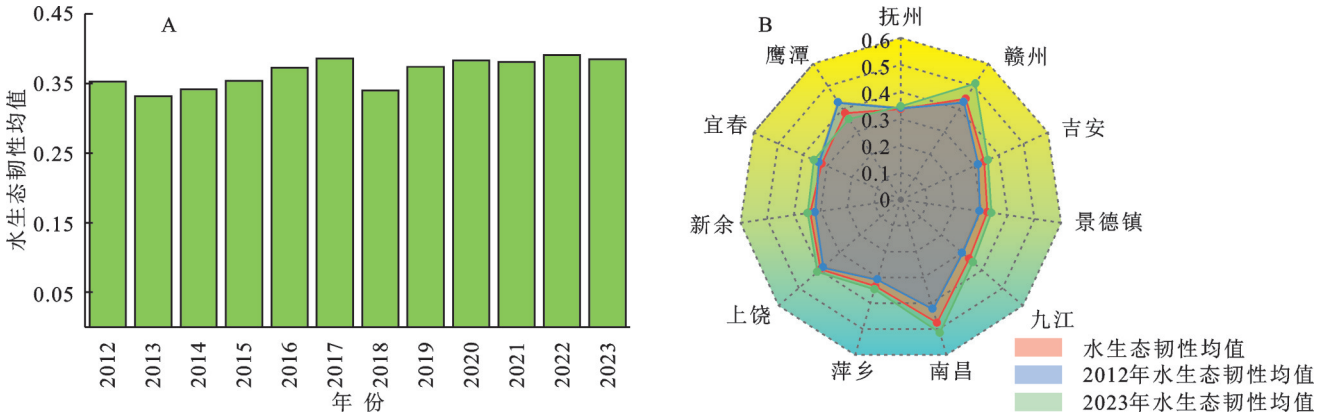


图 2　水生态韧性时序演化过程

Fig. 2　Temporal variation process of water ecological resilience

（2）局部分析。江西省水生态韧性变化呈现出区域差异逐步收敛,整体向均衡化发展的显著特征。一方面,不同城市间的韧性水平仍存在梯度差异,以2023年为例,南昌市(0.476)、赣州市(0.445)、上饶市(0.394)在水生态韧性提升方面表现突出。相比之下,宜春市(0.322)、景德镇市(0.324)、萍乡市(0.334)等部分区域水生态韧性水平仍相对较低;另一方面,区域间的差距整体趋于缩小,表明各市在水生态治理上逐步协同推进,整体均衡性有所提升。区域差异收敛的背后,体现了治理资源的空间再分配与政策扩散效应。尤其是南昌、赣州的高韧性不仅源于本地资源禀赋,更得益于区域中心城市的辐射带动功能,南昌通过生态补偿政策与财政转移支付影响周边,赣州则依托东江源、赣江源等生态区位,在流域协同治理中发挥关键作用。韧性较低区域如景德镇、萍乡等,除生态本底限制外,还反映出跨区域生态补偿机制尚未完全落地,导致治理投入与生态效益不匹配。

3.1.2　水生态韧性空间演变特征　为揭示江西省水生态韧性空间分异与演变规律,通过ArcGIS 10.8软件并使用Jenks自然断点法,将江西省11个地市的水生态韧性水平划分为低韧性、中低韧性、中韧性、中高韧性和高韧性5个等级(图3)。鉴于2017年是提出“两山理念”、长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”战略的起始年,为江西省水生态文明建设提供了明确方向和战略指引,故选取2012年、2017年和2023年进行空间可视化呈现。

（1）整体分析。研究期内,江西省水生态韧性空间格局呈现双“核心-外围”逐步递减的分布特征。表现为以南昌和赣州为核心,且中韧性与中高韧性区域持续扩展,表明水生态韧性具有空间扩散效应,体现为南昌依托行政资源进行治理辐射与赣州作为生态源头发挥屏障功能,二者共同驱动,通过差异化路径带动周边区域韧性,但其水生态影响力随地理距离和资源覆盖梯度而向外围逐步减弱。

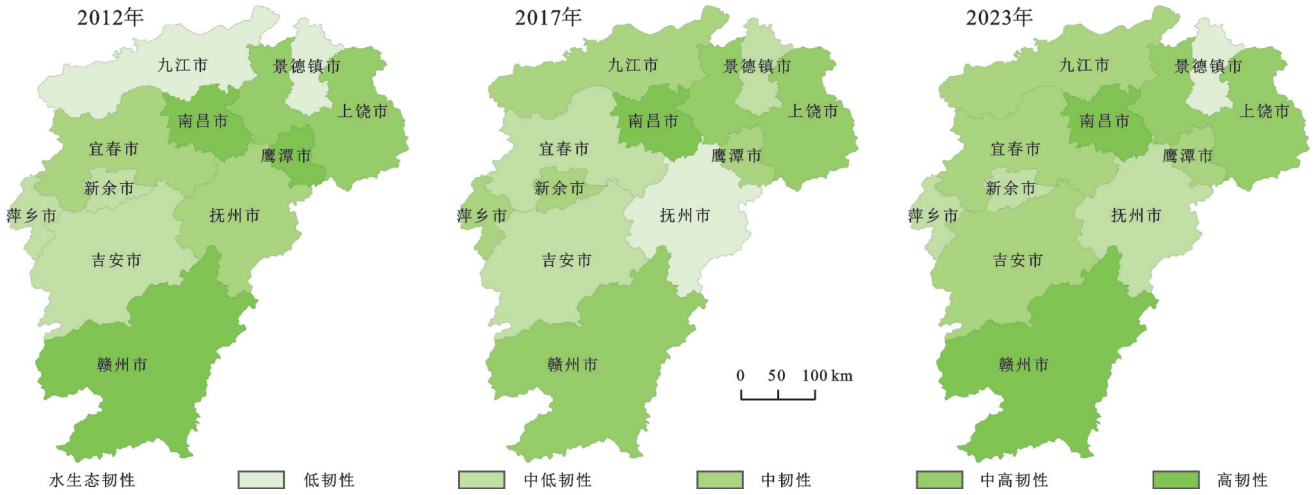
（2）阶段分析。在2012年,江西省水生态韧性整体处于中低水平,高韧性区仅集中于南昌市和赣州市部分地区,九江市和景德镇市等地属于低韧性或中低韧性区;截至2017年,低韧性区域仅抚州市1个,宜春市、鹰潭市等地韧性水平出现下降,其余地区基本呈韧性水平上升态势,空间上“核心突出、周边协同提升”趋势明显,与该时期江西省强化生态环境治理的宏观政策导向基本吻合;到2023年,多数城市实现韧性等级跃迁,中高值区域范围进一步扩大,江西省水生态韧性在空间上呈现均衡化与协同增强的趋势。仅景德镇市、萍乡市等少数边缘地区仍维持在中低值水平,应通过实施差异化生态修复工程,建立跨区域生态补偿与协同提升机制,推动其水生态韧性水平整体跃升。

3.1.3　水生态韧性演变轨迹特征　采用核密度估计方法对江西省水生态韧性展开分析,揭示2012—2023年江西省水生态韧性差异的动态轨迹(图4)。

（1）在分布位置上,江西省水生态韧性核密度曲线整体呈现右移趋势,表明水生态韧性普遍提升。该趋势与江西省推动流域综合治理、实施生态保护修复及强化水资源统筹管理等措施密切相关,反映江西省水生态环境整体明显改善。

（2）在分布形态上,江西省水生态韧性核密度曲线由初期较宽的“双峰”形态逐渐向“单峰”收敛,主峰高度显著提升且侧峰趋于平缓,表明江西省水生态韧性的内部差异逐步缩小,区域间发展趋向协调。尤其是2023年主峰明显高于2012年,印证了江西省各城市水生态韧性整体增强且两极分化有所缓解。

（3）在分布延展性上，江西省水生态韧性核密度曲线右拖尾现象持续存在，左端面积明显减小且未出现左拖尾，表明原低韧性区逐渐向高韧性区转移。整体呈现“低值聚集减弱、高值趋向集中”的动态演变格局，反映出江西省水生态韧性提升仍具有一定的空间不均衡性，但整体朝向更高韧性水平演进。



注：基于标准地图服务系统下载的审图号GS（2023）2726号的标准地图制作，底图未做修改，下图同

图3 水生态韧性空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water ecological resilience

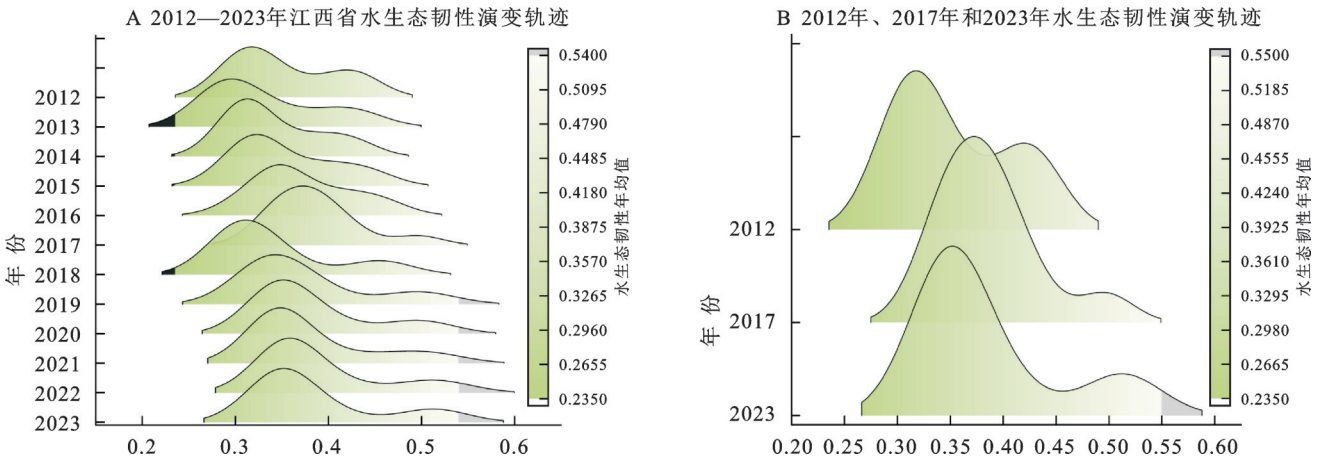


图4 水生态韧性核密度曲线演化趋势（2012—2023年）

Fig. 4 Evolution trend of Kernel density curves of water ecological resilience (2012—2023)

3.2 水生态韧性影响因素分析

3.2.1 模型检验与选择 在构建空间杜宾模型前，进行统计检验以确定模型适用性。首先，全局莫兰指数（Moran′s *I*）检验显示，2012—2023年江西省水生态韧性值的Moran′s *I*指数均为正且通过了1%水平的显著性检验，表明水生态韧性存在显著的空间正相关，适合采用空间计量模型。其次，通过拉格朗日乘数检验（LM）、似然比检验（LR）和沃尔德检验（Wald），结果均显著支持使用空间杜宾模型（SDM）而非空间误差模型（SEM）或空间滞后模型（SLM）。最后，豪斯曼（Hausman）检验结果支持使用固定效应模型。因此，最终选择双固定效应的空间杜宾模型进行估计。

3.2.2 空间杜宾模型结果 基于上述检验，本研究采用空间杜宾模型进行估计，并进一步计算各影响变量的直接效应、间接效应（空间溢出效应）和总效应，结果见表3。

（1）地区财政收入（X_2）对水生态韧性具有显著正向影响，其直接效应（0.001）、间接效应（0.001）与总效应（0.001）均在1%水平上显著为正，表明增强地方财政能力是提升水生态韧性的基础保障，其溢出效应提示跨区域生态补偿与协同治理的可行性。

（2）第三产业增加值占GDP比重（X_4）的空间溢出效应显著为正，其间接效应（0.171）与总效应（0.193）均在5%水平上显著，反映出知识溢出与绿色服务业的区域协同效应。第三产业尤其是环保技术、生态咨询等生产性服务业，可通过跨区域项目合作、人才流动与技术扩散，提升周边地区的环境管理能力。表明推动产业结构向服务化、绿色化转型，不仅能降低本地环境压力，还能通过空间联动增强区域整体水生态韧性水平。

表 3　水生态韧性空间杜宾模型效应分解结果

Table 3　Decomposition results of spatial Durbin model effects for water ecological resilience

	变量	直接效应	间接效应	总效应
X_1	总人口	0.001(0.20)	0.001(0.64)	0.001(0.70)
X_2	地区财政收入	0.001***(7.79)	0.001***(7.03)	0.001***(9.00)
X_3	第二产业增加值占GDP比重	−0.041(−0.61)	−0.174**(−2.18)	−0.216**(−2.14)
X_4	第三产业增加值占GDP比重	0.023(0.34)	0.171**(2.17)	0.193**(1.97)
X_5	水土流失治理面积	−0.001(−1.31)	−0.001***(−8.17)	−0.001***(−8.13)
X_6	建成区绿化覆盖率	−0.002***(−3.39)	−0.001(−0.83)	−0.004**(−2.14)
X_7	绿地与广场用地面积	0.001(1.44)	0.001*(1.87)	0.002**(2.42)

注:***,**,*分别表示在1%,5%,10%的水平上显著,括号内为t值。

(3)第二产业增加值占GDP比重(X_3)的间接效应(−0.174)与总效应(−0.216)显著为负,表明第二产业比重的提升对水生态韧性产生负面空间溢出。究其原因,一方面是污染避难所效应,即本地环境规制趋严导致高污染产业向周边转移;另一方面是水资源竞争效应,即工业用水增加可能挤占下游地区的生态与生活用水份额。

(4)水土流失治理面积(X_5)与建成区绿化覆盖率(X_6)对水生态韧性呈负向影响。这揭示了在特定发展阶段和资源约束下,治理措施的短期成本或实施方式可能带来非预期的负面次生影响。如大规模水土流失治理工程在短期内可能干扰水文连通性,而高密度建成区绿化若依赖大量灌溉和化肥,则可能加剧局部水资源压力与面源污染风险。

(5)绿地与广场用地面积(X_7)的总效应(0.002)在5%水平上显著为正,其空间溢出(间接效应0.001)在10%水平上显著为正,表明该变量对区域整体水生态韧性提升具有明显贡献,且对周边地区形成边际显著的正向空间溢出效应。究其原因,大规模的绿地与广场形成了区域性的生态节点与廊道,增强了雨洪蓄滞、水质净化等生态服务供给能力。但其直接效应尚不显著,表明其影响机制存在区域协同特征,导致本地效应尚未稳定显现。总人口(X_1)的各项效应均不显著,表明在控制其他因素后,人口规模对水生态韧性的影响有限。

3.3　水生态韧性提升路径

(1)强化财政支持,深化智慧治理。一方面应借助国家生态文明试验区政策优势,加大财政投入,建设赣鄱水生态监测平台,整合江河湖泊监测数据,构建江西省统一的水环境物联网平台;另一方面,推动数字技术在流域管理中的应用,构建智慧水务平台,在赣江、抚河等重点流域开展水质实时预警与智能调控试点,以数字化手段打破行政壁垒,切实将财政优势转化为跨市域水环境协同治理效能。

(2)优化产业结构,推进绿色布局。一是严格限制高耗水、高污染产业向赣江上游及鄱阳湖周边等生态敏感区转移,并建立区域产业准入负面清单协同机制,从源头上阻断“污染避难所效应”和水资源竞争引发的负面溢出;二是依托赣江新区、南昌航空港等平台,加快发展生态旅游、绿色金融、智慧环保服务等知识密集型、环境友好型第三产业,通过技术扩散、人才流动和项目合作,将本地绿色服务业的发展红利有效传导至周边地区,放大其正向空间协同效应。

(3)开展节水修复,缓解资源矛盾。一方面,优先选用香樟、湿地松等乡土耐旱植物,结合海绵城市理念改造绿地系统,以降低养护用水需求并减少面源污染风险;另一方面,在赣南等水土流失重点区域,应大力推广梯田蓄水、植被毯覆盖等低干扰和低耗水的近自然治理技术,提升水源涵养功能和最大限度维护水文连通性。

(4)构建生态网络,激发协同潜力。首先以鄱阳湖为核心,沿赣、抚、信、饶、修五河系统性地建设连续的生态廊道和滨水绿地节点,形成有效净化入湖水质、调节流域微气候的生态网络。其次,推动城市公园绿地与乡村生态用地的互联互通,构建“湖-河-城-乡”一体化的水生态安全格局。此外,可探索建立基于生态产品价值实现的跨区域横向补偿机制,为水生态网络的共建共享提供长效激励机制。

4　讨论与结论

(1)江西省水生态韧性水平整体呈快速上升-灾害骤降-稳步回升态势,反映出社会-生态系统在外部冲击下的适应性循环特征,表明制度响应能力与基础设施韧性已显著增强,体现了工程韧性向社会-生态复合韧性的转型趋势。

(2)江西省水生态韧性呈现双核驱动-梯度扩散-趋同发展的演化趋势。核密度曲线由“双峰”向“单峰”收敛,表明区域间发展差距缩小,符合新经济

地理学中“集聚阴影消退”与“知识溢出扩散”的理论预期。

(3)驱动机制上财政能力、产业结构与生态管理措施共同影响水生态韧性演变。其中,地方财政收入和第三产业比重对本地及邻域韧性具有显著正向影响,第二产业比重则产生负向溢出,而部分生态工程在特定条件下引发非预期的负面效应。

(4)应构建财政赋能-产业优化-生态修复-空间协同的四维联动提升路径,以制度保障强化财政支撑,以绿色转型优化产业布局,以自然恢复为主导改进生态修复模式,通过跨区域空间协作放大正向溢出效应,从而推动水生态韧性从被动适应迈向主动塑造。

值得注意的是,尽管本研究基于DPSIRM框架强化了政府调控维度在水生态韧性评估中的分析,但在研究时序上以面板数据为基础,未来可引入系统动力学或基于主体的建模,模拟气候变化、极端事件与政策干预等多重情景下水生态韧性的非线性反馈机制。同时可融合遥感、物联网等实时大数据,构建监测-评估-预警-决策一体化智慧水韧性平台,实现从被动响应到主动适应的水资源治理跃迁,进一步提升区域水资源适应性管理水平。

参考文献(References):

[1] Yuan L, Yang D Q, Wu X, et al. Development of multi-dimensional water poverty in the Yangtze River Economic Belt, China[J]. Journal of Environmental Management, 2023,325:116608.

[2] Hu H, Yan K G, Shi Y, et al. Decrypting resilience: the spatiotemporal evolution and driving factors of ecological resilience in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024,106:107540.

[3] 杨力,徐悦,朱俊奇,等.长江中游城市群水生态韧性及影响因素分析[J].安全与环境学报,2025,25(1):335-347.
Yang L, Xu Y, Zhu J Q, et al. Analysis of water ecological resilience and influencing factors in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Safety and Environment, 2025,25(1):335-347.

[4] 李阳力,陈天.国土空间规划体系下的“标准化”水生态韧性研究模式重构[J].中国软科学,2024(3):98-108.
Li Y L, Chen T. Reconstruction of the “standardized” research model of water ecological resilience under the territorial spatial planning system[J]. China Soft Science, 2024(3):98-108.

[5] 孙斌,姜慧敏,薛建春.黄河流域城市群水生态韧性与城市发展交互影响关系研究[J].沈阳农业大学学报,2026,57(1):133-142.
Sun B, Jiang H M, Xue J C. Study on the interactive relationship between water ecological resilience and urban development in urban agglomerations of the Yellow River Basin[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2026,57(1):133-142.

[6] 黄梅,刘晨曦,俞晓莹,等.城市水生态网络韧性评价与优化策略:以长沙市为例[J].经济地理,2022,42(10):52-60.
Huang M, Liu C X, Yu X Y, et al. Evaluation and optimization strategies of urban water ecological network resilience: a case study of Changsha City[J]. Economic Geography, 2022,42(10):52-60.

[7] 张晓晴,廖星月,李果,等.基于DPSIR模型的湖北省长江干流城市群水生态安全评估及未来趋势预测[J].生态环境学报,2025,34(10):1618-1632.
Zhang X Q, Liao X Y, Li G, et al. Water ecological security assessment and future trend prediction of urban agglomerations along the main stream of the Yangtze River in Hubei Province based on the DPSIR model[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(10): 1618-1632.

[8] 张正昱,金贵,郭柏枢,等.基于多准则决策的长江经济带国土空间脆弱性与恢复力研究[J].自然资源学报,2020,35(1):95-105.
Zhang Z Y, Jin G, Guo B S, et al. Study on territorial spatial vulnerability and resilience in the Yangtze River Economic Belt based on multi-criteria decision-making [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(1):95-105.

[9] 贺小荣,石彩霞,彭坤杰.长江中游城市群新型城镇化与生态韧性的时空适配及互动响应[J].长江流域资源与环境,2024,33(4):699-714.
He X R, Shi C X, Peng K J. Spatiotemporal adaptation and interactive response between new urbanization and ecological resilience in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(4):699-714.

[10] You X T, Sun Y N, Liu J W. Evolution and analysis of urban resilience and its influencing factors: a case study of Jiangsu Province, China[J]. Natural Hazards, 2022, 113(3):1751-1782.

[11] Kaur M, Hewage K, Sadiq R. Investigating the impacts of urban densification on buried water infrastructure through DPSIR framework[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,259:120897.

[12] 陶洁怡,董平,陆玉麒.长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2022,31(9):1975-1987.
Tao J Y, Dong P, Lu Y Q. Analysis of spatiotemporal changes and influencing factors of ecological resilience in the Yangtze River Delta region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(9):1975-1987.

[13] Xia C H, Zhai G F. The spatiotemporal evolution pattern of urban resilience in the Yangtze River Delta urban agglomeration based on TOPSIS-PSO-ELM[J]. Sustainable Cities and Society, 2022,87:104223.

[14] Tang L, Zhou Z F, Zhao H K, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of water ecological resilience and non-stationarity of influencing factors: a case study of the Yangtze River economic belt[J]. Water Resources, 2025,52(6):1318-1339.

[15] Wan P J, Zhang H J. Enhancing urban water ecological resilience through sponge city initiatives: evidence from China[J]. Urban Climate, 2026,65:102755.

[16] 孟丽红,吴绍雄,郑蓬蓬,等.江西省水资源利用时空变化特征及区域差异[J].水土保持通报,2020,40(5):276-283.
Meng L H, Wu S X, Zheng P P, et al. Spatiotemporal variation characteristics and regional differences of water resource utilization in Jiangxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(5):276-283.

[17] 王欢,韦丽,崔巍.江西省水资源承载力时空异质性分析[J].长江流域资源与环境,2025,34(12):2740-2752.
Wang H, Wei L, Cui W. Spatiotemporal heterogeneity analysis of water resource carrying capacity in Jiangxi Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025,34(12):2740-2752.

[18] 吴向东,许新发,成静清,等.江西省水资源利用效率时空演变及其影响因素[J].人民长江,2021,52(12):92-98,121.
Wu X D, Xu X F, Cheng J Q, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of water resource utilization efficiency in Jiangxi Province[J]. Yangtze River, 2021,52(12):92-98,121.

[19] Zou Y Y, Dong X B, Liu Y F, et al. Analysis of the changes in water conservation in Jiangxi Province from 2000 to 2020, and the determinant factors[J]. Journal of Resources and Ecology, 2023,14(5):940-950.

[20] 秦欢欢,黄丽想.江西省水资源生态足迹评价与预测[J].人民长江,2023,54(7):104-112.
Qin H H, Huang L X. Evaluation and prediction of water resource ecological footprint in Jiangxi Province[J]. Yangtze River, 2023,54(7):104-112.

[21] 郭倩,汪嘉杨,张碧.基于DPSIRM框架的区域水资源承载力综合评价[J].自然资源学报,2017,32(3):484-493.
Guo Q, Wang J Y, Zhang B. Comprehensive evaluation of regional water resource carrying capacity based on the DPSIRM framework[J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(3):484-493.

[22] 吕添贵,邱蓉,赵巧,等.基于DPSIRM模型的长江中游城市群生态安全时空特征及障碍因素[J].水土保持研究,2024,31(2):379-388.
Lyu T G, Qiu R, Zhao Q, et al. Spatiotemporal characteristics and obstacle factors of ecological security in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River based on the DPSIRM model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):379-388.

[23] 董媛媛.基于"生态要素-DPSIRM"生态安全评价体系的构建[J].水土保持研究,2020,27(5):333-339.
Dong Y Y. Construction of an ecological security evaluation system based on "ecological elements-DPSIRM"[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(5):333-339.

[24] 吕连菊,阚大学.新型城镇化与水生态韧性的交互耦合及驱动因素:基于中部地区研究[J].中国农业资源与区划,2025,46(2):103-116.
Lyu L J, Kan D X. Interactive coupling and driving factors of new urbanization and water ecological resilience: based on a study of the central region[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025,46(2):103-116.

[25] 吕添贵,李锐,邱蓉,等.长江中游地区水生态安全时空演化特征及障碍因素研究[J].人民黄河,2024,46(6):96-102.
Lyu T G, Li R, Qiu R, et al. Study on the spatiotemporal evolution characteristics and obstacle factors of water ecological security in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Yellow River, 2024,46(6):96-102.

[26] 胡晗,颜克高,吕添贵,等.湖南省生态韧性时空演变与非线性效应[J].生态学报,2025,45(21):10526-10536.
Hu H, Yan K G, Lyu T G, et al. Spatiotemporal evolution and nonlinear effects of ecological resilience in Hunan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(21):10526-10536.

[27] 彭文斌,邝嫦娥,李文意,等.长江中游城市群城市更新与生态韧性空间关联网络及影响研究[J].地理科学,2024,44(11):1936-1945.
Peng W B, Kuang C E, Li W Y, et al. Spatial correlation network and impact of urban renewal and ecological resilience in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024,44(11):1936-1945.

[28] 王松茂,牛金兰.黄河流域城市生态韧性时空演变及其影响因素[J].生态学报,2023,43(20):8309-8320.
Wang S M, Niu J L. Spatiotemporal evolution and influencing factors of urban ecological resilience in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(20):8309-8320.

[29] Zhao R D, Fang C L, Liu H M, et al. Evaluating urban ecosystem resilience using the DPSIR framework and the ENA model: a case study of 35 cities in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021,72:102997.

[30] 吕添贵,付舒斐,赵巧,等.基于空间机器学习的长江中游地区城市生态韧性时空演变及其影响因素研究[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2025,43(3):12-23.
Lyu T G, Fu S F, Zhao Q, et al. Study on the spatiotemporal evolution and influencing factors of urban ecological resilience in the middle reaches of the Yangtze River based on spatial machine learning[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2025,43(3):12-23.