

DOI: 10.20103/j.stxb.202304070696

嵇娟, 陈军飞, 丁童慧, 李远航. 长三角城市群城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系. 生态学报, 2024, 44(7): 2772-2785.

Ji J, Chen J F, Ding T H, Li Y H. Coupling coordination between urban flood resilience and ecosystem services in the Yangtze River Delta urban agglomerations. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2772-2785.

长三角城市群城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系

嵇 娟¹, 陈军飞^{1,2,3,*}, 丁童慧¹, 李远航¹

¹ 河海大学商学院, 南京 211106

² 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098

³ 江苏长江保护与高质量发展研究基地, 南京 210098

摘要:厘清城市洪涝韧性与生态系统服务之间耦合协调关系, 可为城市防洪减灾和生态文明建设提供重要决策参考。综合运用基于麻雀算法的投影寻踪模型、InVEST 模型和耦合协调度模型, 在分析 2000—2020 年长三角城市群的城市洪涝韧性与水源涵养、水质净化、土壤保持和气候调节四种生态系统服务时空格局基础上, 尝试探索两者耦合协调关系及其时空演变特征。研究发现: (1) 长三角城市群的城市洪涝韧性水平呈现“N”型增加趋势, 并呈现“上海>江苏>浙江>安徽”的空间格局, 表明经济水平越高的城市展现出更强的洪涝韧性, 经济是影响城市洪涝韧性波动的主要因素, 而自然韧性成为城市洪涝韧性提升的关键短板; (2) 生态系统服务存在显著的空间异质性, 高植被覆盖的南部地区提供了更高的生态系统服务, 从时间维度看其空间分布是稳定的, 水源涵养和水质净化服务总体呈向好趋势, 土壤保持服务整体呈现倒“N”型增加, 气候调节服务呈现微弱的下降趋势; (3) 城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调度在研究期内较为稳定, 且与生态系统服务的时空变化趋于一致, 呈现“南高北低、由西南向东北逐渐减弱”的趋势, 生态系统服务较高的城市, 表现出更好的耦合协调性, 且随着生态系统服务的增加而改善。因此, 长三角城市群有必要从提高生态系统服务功能的角度出发, 因地制宜、分类施策, 促进城市洪涝韧性与生态系统服务的协调发展。

关键词:城市洪涝韧性; 生态系统服务; 耦合协调度; 长三角城市群

Coupling coordination between urban flood resilience and ecosystem services in the Yangtze River Delta urban agglomerations

Ji Juan¹, CHEN Junfei^{1,2,3,*}, DING Tonghui¹, LI Yuanhang¹

¹ Business School, Hohai University, Nanjing 211106, China

² Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China

³ Jiangsu Research Base of Yangtze Institute for Conservation and High-quality Development, Nanjing 210098, China

Abstract: With global climate change and continuous urbanization exacerbating flood disasters, urban flood resilience and ecosystem services have become the focus of research. Clarifying the coupling coordination relationship between urban flood resilience and ecosystem services can provide significant decision-making reference for urban flood control, disaster reduction, and ecological civilization construction. Based on the comprehensive application of projection pursuit based on sparrow algorithm model, InVEST model and coupling coordination degree model, this study analyzes the spatiotemporal patterns of urban flood resilience and ecosystem services (water conservation, water purification, soil conservation, and

基金项目:国家自然科学基金项目(42071278); 国家社会科学基金重大项目(19ZDA084); 中央高校基本科研业务费专项(B230207002)

收稿日期:2023-04-07; **网络出版日期:**2024-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenjunfei@hhu.edu.cn

climate regulation) in the Yangtze River Delta urban agglomerations from 2000 to 2020, and attempts to explore the spatiotemporal evolution characteristics of the coupling coordination degree between them. The results show that: (1) The level of urban flood resilience in the Yangtze River Delta urban agglomeration presents a N-shaped trend, with a spatial pattern of Shanghai > Jiangsu > Zhejiang > Anhui, indicating that cities with higher economic levels exhibit stronger urban flood resilience. The impact of economic resilience, social resilience and infrastructure resilience is much greater than that of natural resilience. Economy is the main factor affecting fluctuation in urban flood resilience, and natural resilience is a key weakness in improving urban flood resilience. (2) There is significantly spatial heterogeneity in the ecosystem services, but their spatial distribution is stable from perspective of time dimension. The southern regions with high vegetation cover provide higher ecosystem services. Water conservation and water purification services demonstrate a good trend in general, soil conservation service presents an inverted N-shaped increase, and climate regulation service displays a weak downward trend. (3) The coupling coordination degree between urban flood resilience and ecosystem services is relatively stable during the research period, and tends to be consistent with the spatiotemporal changes of ecosystem services. Among them, the coupling coordination degree between urban flood resilience and water conservation service shows a weak trend of first decreasing and then increasing, with a best overall performance, while the coupling coordination degree between water purification, soil conservation and climate regulation services has a weak decline. From perspective of space, the coupling coordination degree between urban flood resilience and ecosystem services shows a trend of high in the south and low in the north, gradually weakening from southwest to northeast. The cities with higher ecosystem services tend to have better the degree of coupling coordination, and improves with the increase of ecosystem services. Therefore, from perspective of improving ecosystem services, it is necessary for the Yangtze River Delta urban agglomeration to promote the coordinated development of urban flood resilience and ecosystem services according to local conditions and classification.

Key Words: urban flood resilience; ecosystem services; coupling coordination; Yangtze River Delta urban agglomerations

随着全球气候变化和城市化的不断发展,城市洪涝已成为许多国家和地区的一个主要且常见问题^[1]。西蒙诺维奇在洪水管理国际论坛中提到,应对气候变化一方面要采取行动减少 CO₂ 等温室气体排放,另一方面要学会适应,在适应的过程中,采取韧性手段应对气候变化带来的极端天气事件^[2],城市洪涝韧性成为有效应对气候变化的不可预测性和城市未来洪水风险,并确保城市可持续发展的重要方法^[3]。一些全球倡议,如《2015—2035 年仙台减少灾害风险框架》和《2030 年新城市议程》都致力于建设具有灾害韧性的城市^[4]。此外,城市洪涝韧性的提升需要统筹城市建设与生态环境治理,将城市开发建设和生态系统保护修复相结合^[5]。2020 年,《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标的建议》也明确提出“增强城市防洪排涝能力,建设韧性城市”和“加强生态文明建设,推进生态环境保护与修复”。因此,在此背景下,如何促进城市洪涝韧性建设与生态环境保护的协调发展成为城市可持续发展的重要挑战。

城市洪涝韧性被认为是城市的社会经济系统在长期和短期内有效抵抗、吸收、恢复,以及成功适应和应对洪涝灾害的能力^[6]。城市洪涝韧性水平不仅取决于社会经济系统结构和功能强弱,也取决于城市生态系统本身^[4],良好的自然生态系统可以自动调节城市水系和生态多样性,促进城市中经济和基础设施等各方面的发展^[7],减少气候变化的脆弱性和灾害风险^[8]。此外,生态系统服务,作为人类从生态系统中获得的所有惠益,在预防和减缓洪涝风险方面发挥着重要作用^[9]。生态系统通过其调节服务和作为天然保护屏障或缓冲区有效减少了对洪涝、山体滑坡等常见自然灾害的物理暴露^[10]。国家生物多样性战略利用生态系统服务来影响自然灾害,并有望维持和改善生物多样性保护,同时减少对自然灾害的暴露和脆弱性^[11]。Abenayake 等人将生态系统服务的脆弱性作为衡量社区洪涝韧性的综合指标,用实证证明生态在加强社区洪涝韧性方面的作用^[4]。Huang 等人基于自然的解决办法验证了洪水风险较低的地区可能提供更高水平的生态系统服务^[12]。许萌等人通过生态系统服务的供需匹配分析,识别珠海市灾害风险区,以期增强城市国土空间抗灾

能力提供参考^[13]。

总体而言,大部分研究主要从生态角度评估城市韧性^[14],或将生态指标纳入到洪涝韧性的评估当中^[15-16],也有一些学者研究生态系统服务对于城市洪涝风险和城市洪涝韧性的影响,然而,极少有研究聚焦于城市洪涝韧性与生态系统服务之间的关系。因此,本文尝试探索城市洪涝韧性与生态系统之间的耦合协调关系,并运用具体的物理量——生态系统服务来衡量生态系统状况,旨在通过二者耦合协调关系的探索,为城市防洪和生态保护提供科学性的支撑和决策。

城市群作为城市发展到成熟阶段的空间组织,不仅表现在经济发展、城市规划、通信与交通等基础设施紧密联系、相互影响,而且,其地域相近、气候相似,具有同样的洪涝风险共性。面对洪涝灾害时,城市群可以发挥群效应,通过共商、共建、共享,实现城市之间的互补和共赢,全面提升城市群整体抵御洪涝灾害的综合防范能力。长三角城市群作为中国城镇化基础最好的城市群之一,经济快速发展的同时,洪涝灾害剧增^[17],生态环境问题也日益凸显。因此,探究长三角城市群的城市洪涝韧性与生态系统服务之间的耦合协调关系,对减缓洪涝风险,提高城市洪涝韧性以及改善生态环境质量具有重要参考价值。

鉴于此,本文基于 2000—2020 年的遥感影像和社会经济统计数据,采用基于麻雀算法的投影寻踪模型、InVEST 模型和耦合协调度模型,以长三角城市群为研究对象,进行:(1)构建城市洪涝韧性评估指标体系并评价长三角城市群的城市洪涝韧性水平;(2)分析长三角城市群的生态系统服务的时空演化特征;(3)探索长三角城市群城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系及其时空演化的分异特征,为长三角城市群的防洪减灾建设和生态环境保护提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

长江三角洲城市群(简称长三角城市群)是中国东部沿海地区一个高度发达的经济区域,地处长江下游,濒临黄海和东海,由安徽、浙江、江苏和上海的 27 个城市组成(图 1),总面积约 22.9 万 km²,以 2.3% 的国土面积集聚了 12.3% 的全国人口,贡献了约 1/4 的 GDP。自然环境方面,长三角城市群是中国河网密度最高的地区,共有湖泊 200 多个,如太湖、洪泽湖、巢湖等等,其地形呈周高中低,低洼的地势使得洪涝灾害较为严重。长三角城市群为亚热带季风气候,年降雨量在 1000—1400mm,年平均气温在 18—23℃ 之间^[18],大约 70% 的降雨集中在春季和夏季,这使得这两个季节洪涝可能性更大。同时,长三角城市群是中国最大的经济圈,是长江经济带与“一带一路”的重要交汇地带,在中国国家现代化建设大局和开放格局中具有举足轻重的战略地位,其人口密度高,是中国城镇化基础最好的地区之一。然而,由于城市开发强度高,建成区面积不断增加,大量不透水表面正在取代天然水面、林地和其他自然土地用途,快速且部分临时的城市化导致生态功能逐步退化,严重威胁到生态系统服务。因此,有必要对长三角城市群的洪涝和生态系统问题展开研究,从而提出切实可行的洪涝管理政策,提高城市洪涝韧性,实现区域可持续发展。

1.2 研究方法

1.2.1 城市洪涝韧性水平测度

城市洪涝韧性是一种多维度、跨时期的综合能力,受到自然、社会、经济等多方面的影响^[19],这意味着不

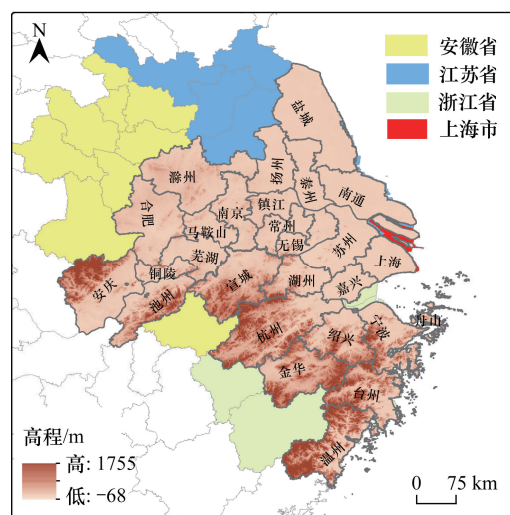


图 1 长三角城市群的概况

Fig.1 The overview of the Yangtze River Delta urban agglomeration

能仅单方面考虑城市洪涝韧性。学者们采用多标准决策的方法,从自然、社会、经济等维度考虑城市洪涝韧性的影响因素^[1,20-23],体现城市应对洪涝灾害的吸收、恢复和转化能力。因此,本文参考已有研究,从自然、经济、社会和基础设施四个维度构建了城市洪涝韧性评估体系,利用累计贡献率和相关性分析相结合的方法^[24]筛选了 26 个评价指标,构建的城市洪涝韧性评估体系如表 1 所示。

表 1 城市洪涝韧性评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of urban flood resilience

目标层 Target layer	子系统层 Subsystem layer	指标层 Indicator layer	单位 Unit	属性 Attribute
城市洪涝韧性水平 The level of urban flood resilience	自然	N1: 24h 最大降雨量	mm	负
		N2: 年均降雨量	mm	负
		N3: 地貌	—	正
		N4: 洪涝风险	—	负
		N5: 土壤透水性	%	正
		N6: 森林覆盖率	%	正
		N7: 河网密度	km/km ²	负
	经济	E1: 人均 GDP	万元	正
		E2: 农业占比	%	正
		E3: 第三产业占比	%	正
		E4: 城市市政公用设施建设投资	%	正
		E5: 经济耐受性	—	正
		E6: 人均进出口额	×100 美元	正
		E7: 人均粮食产量	kg	正
	社会	P1: 旅游人次	×100 万人次	负
		P2: 性别差异	—	正
		P3: 失业率	%	负
		P4: 最低生活保障率	%	负
		P5: 公众反应能力	%	正
		P6: 文盲率	%	负
		P7: 失业保险覆盖率	%	正
	基础设施	F1: 万人拥有床位数	张	正
		F2: 每万人拥有公共汽车数	辆	正
		F3: 排水管网密度	km/km ²	正
		F4: 绿地覆盖率	%	正
		F5: 人均公园绿地面积	m ²	正

“正”表示指标对城市洪涝韧性有提升作用;“负”表示指标对城市洪涝韧性有削弱作用

评估城市洪涝韧性的方法主要有层次分析法^[22,25]、计量模型^[26]、半定量模型^[27]、机器学习^[28]等,其中投影寻踪模型是常用的机器学习方法。投影寻踪模型的基本目标是将多维数据转化为低维数据,并通过确定能够反映原始多维数据结构和特征的最佳投影来解决实际问题,其完全由数据驱动,不受样本大小或数据结构的限制,不受主观因素干扰的影响,结果是客观合理的。当使用投影寻踪模型解决实际问题时,关键是要确定最佳投影方向。最佳投影方向的确定涉及高维和复杂的非线性问题优化过程,并且通常采用群体智能算法来确定最优投影方向。基于麻雀算法的投影寻踪模型^[29]在综合优化能力和收敛性能方面,相比于传统的基于遗传算法的投影寻踪模型和基于粒子群优化的投影寻踪模型具有明显的竞争优势。基于麻雀算法的投影寻踪模型的主要步骤如下:

步骤一:评价指标数据标准化。

对于正向指标:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (1)$$

对于负向指标:

$$X_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (2)$$

式中, x_{ij} 是第 i 个城市第 j 个指标因素, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$; $\max x_j$ 和 $\min x_j$ 分别是指标 j 的最大值和最小值; X_{ij} 是标准化后的数据。

步骤二:构造投影指标函数。

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j \cdot X_{ij} \quad (3)$$

式中, z_i 为投影值, a 为投影向量。

步骤三:优化投影指标函数。

$$\begin{cases} \max Q(a) = S_z D_z \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^m a_j^2 = 1, a_j \in [0, 1] \end{cases} \quad (4)$$

$$S_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 / (n - 1)} \quad (5)$$

$$D_z = \sum_i^n \sum_j^m (R - r_{ij}) u(R - r_{ij}) \quad (6)$$

式中, S_z 和 D_z 分别是 z_i 的标准差和局部密度; $\bar{z}$ 是 z_i 的均值; R 是 D_z 的窗口半径; r_{ij} 是样本之间的距离; $u(t)$ 是单位阶跃函数, 当 $t \geq 0$ 时, 其值为 1, $t < 0$ 时, 其值为 0。

投影寻踪模型最佳投影方向 a 的选取对于评估精度及评估结果有着关键性影响。本文利用麻雀算法来对最佳投影方向 a 进行参数寻优, 于是设置麻雀的维度为样本组数。适应度函数为投影寻踪目标函数 $Q(a)$ [30]。最终输出投影值, 确定城市洪涝韧性值。

$$\text{fitness} = Q(a) \quad (7)$$

1.2.2 生态系统服务测度

生态系统及其提供的服务构成了城市应对洪涝灾害, 提高城市洪涝韧性的重要组成部分。生态系统中的湿地、森林、耕地等不仅在提供多种生态系统服务方面发挥重要作用, 而且有助于缓解城市受洪涝灾害的影响。本文探讨四种生态系统服务与城市洪涝韧性的耦合协调性, 分别是: 水源涵养、水质净化、土壤保持和气候调节 [12], 并使用生态系统服务和权衡综合评估 (InVEST) 模型来量化这四种生态系统服务, InVEST 模型是一套广泛使用的综合空间可视化模型, 可以量化和绘制近 20 个陆地和海洋生态系统服务 [31-32]。InVEST 模型的产水量模块、养分输送比模块、泥沙输移比模块和碳储存模块分别计算水源涵养服务、水质净化服务、土壤保持服务和气候调节服务。

(1) 水源涵养

水源涵养服务包括截留、渗透降水, 蓄积土壤水分等, 对于调节径流, 防止水旱灾害和城市内涝具有预防和减缓作用。

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (8)$$

式中, Y_{xj} 为 x 栅格 j 种土地类型的年产水量; P_x 为 x 栅格的年降水量; AET_x 为 x 栅格 j 种土地类型的年平均蒸散量。

(2) 水质净化

水质净化服务绘制了流域养分源的潜在数量及其通过自然植被输送到溪流中的情况。该模块通过输出氮和磷来反映水的净化程度。氮和磷的输出越小, 净水服务功能就越强, 当发生暴雨洪涝灾害时, 对水资源造成的污染更小 [31]。

$$\text{ALV}_x = \text{HSS}_x \times \text{pol}_x \quad (9)$$

式中, ALV_x 是 x 栅格的调整负荷数, HSS_x 是 x 栅格的水文敏感性评分, pol_x 是 x 栅格的输出系数。

(3) 土壤保持

土壤保持服务反映了生态系统防止土壤侵蚀、储留保持泥沙的能力。研究区域的土壤保持能力对缓解和预防土壤侵蚀引发的洪涝灾害具有重要的意义^[33]。

$$\text{SEDRET} = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) + (1 - \text{SDR}) \times R \times K \times LS \times C \times P \quad (10)$$

式中, SEDRET 为土壤保持量, R 为降雨侵蚀力, K 为土壤可蚀性, LS 为地形因子, C 为植被覆盖因子, P 为管理措施因子, SDR 为泥沙输移比。

(4) 气候调节

气候调节服务能够通过碳储量和碳汇功能对区域陆地生态系统进行评估,通过调节大气中的 CO_2 含量,减缓洪涝等极端天气事件。因此,研究气候调节服务对改善城市洪涝韧性具有重要意义。

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{belove}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (11)$$

式中, C_{tot} 为总碳存储量, C_{above} 为地上生物碳储存, C_{belove} 为地下生物碳储存, C_{soil} 为土壤碳储存, C_{dead} 枯落物碳储存。

1.2.3 耦合协调度模型

耦合协调度模型广泛用于描述多个系统的相互影响程度。耦合度可以表示系统之间的相互作用程度,但不能反映系统之间的协同作用。耦合协调度可以描述不同系统之间的协调关系。因此,本文引入耦合协调度模型来评估城市洪涝韧性和多个生态系统服务之间的协调发展关系^[34]。方程如下所示:

$$C = 2 \times \sqrt{\frac{ES \times \text{UFR}}{(ES + \text{UFR})^2}} \quad (12)$$

$$T = \alpha \times ES + \beta \times \text{UFR} \quad (13)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (14)$$

式中, ES 表示四类生态系统服务评估值, UFR 表示城市洪涝韧性评估值。 C 表示城市洪涝韧性与多个生态系统服务之间的耦合程度。 T 代表生态系统服务与城市洪涝韧性的综合评价指数,因为生态系统服务和城市洪涝韧性同样重要^[4,35],因此被赋予相同的权重,即 $\alpha = \beta = 0.5$ 。 D 代表生态系统服务与城市洪涝韧性的耦合协调程度。根据相关研究^[36-38],耦合协调程度可以分为六类:极度失调 ($0 \leq D < 0.2$),中度失调 ($0.2 \leq D < 0.4$),轻度失调 ($0.4 \leq D < 0.5$),初级协调 ($0.5 \leq D < 0.6$),中级协调 ($0.6 \leq D < 0.8$),高度协调 ($0.8 \leq D < 1$)。

1.3 数据来源

研究数据包括长三角城市群 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的土地利用/覆盖数据 (<https://www.resdc.cn/>)、气象数据 (<http://data.cma.cn/>)、土壤属性数据、空间分辨率为 30m 的数字高程模型 (DEM) 数据 (<http://www.gscloud.cn>) 以及社会经济统计数据。其中,土壤数据来自世界土壤数据库 (HWSO) 的《中国土壤数据集》 (<http://www.ncdc.ac.cn/portal/>)。社会经济统计数据主要来源于《中国建设统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、人口普查数据以及长三角城市群 27 个城市的统计年鉴和《国民经济和社会发展统计公报》。

2 结果分析

2.1 城市洪涝韧性水平分析

2000—2020 年长三角城市群 27 个地级市的城市洪涝韧性趋势如图 2 所示。从空间上看,长三角城市群的城市洪涝韧性强弱具有明显的空间异质性,上海、南京、无锡、苏州、杭州、宁波的城市洪涝韧性表现较好,韧性水平都在 2.05 以上,而铜陵、安庆、池州、宣城、温州和嘉兴的城市洪涝韧性表现不佳。从时间上看,2000—2020 年,长三角城市群的城市洪涝韧性整体呈现增长趋势,但是 2000—2015 年变化幅度较小。其中,安庆的城市洪涝韧性表现最差,2010 年仅有 0.49;2020 年的城市洪涝韧性较高,尤其是南京,高达 3.25。

图 3 为长三角城市群、上海、江苏、浙江和安徽的城市洪涝韧性均值及各子系统韧性在研究期内的变化趋

势。自然韧性稳定在 0.8 左右,但是由于较高的洪涝风险以及森林覆盖率的减少,呈现微弱下降趋势。随着经济的高速发展,经济韧性从 2000 年的 0.63 上升到 2015 年的 0.86,然而 2020 年受新型冠状病毒肺炎疫情的影响下降到 0.59;由于失业率和文盲率持续下降,教育和社会保障水平不断提升,社会韧性保持稳步增长的态势,从 2000 年的 0.62 上升到 2020 年的 1.07。同时,高水平的城镇化使得长三角城市群的基础设施不断完善,基础设施韧性呈“N”型波动上升趋势,从 2000 年的 0.73 上升到 2020 年的 1.11。在四个子系统的共同作用下,长三角城市群的城市洪涝韧性水平呈现“N”型的增加趋势,从 2000 年的 1.69 增加到 2020 年的 2.22。由此可知,经济是影响城市洪涝韧性波动的主要因素,而自然韧性成为城市洪涝韧性提升的关键短板。

从各省市来看,长三角城市群的城市洪涝韧性强度表现为:上海>江苏>浙江>安徽。上海市的城市洪涝韧性,以及经济韧性、社会韧性和基础设施韧性水平都远高于其他省份,这主要得益于其蒸蒸日上的经济形势、高水平的城镇化和完善的社会保障体系,但是上海的自然韧性水平最弱,一方面由于其本身处于沿海低洼地区,另一方面是高水平的城镇化导致生态环境逐渐脆弱。苏、浙、皖的城市洪涝韧性水平及其子系统韧性水平的变化趋势较为一致,城市洪涝韧性水平和基础设施韧性都呈现“N”型增加趋势,而经济韧性和社会韧性都呈现比较平稳的增长趋势,自然韧性呈现微弱下降趋势。其中,江苏省整体发展较为均衡,城市洪涝韧性从 2000 年的 1.89 提高到 2020 年的 2.54;浙江省由于其植被资源丰富,扎实推进生态文明建设,自然韧性水平保持高位稳定,持续领跑长三角,其经济、社会保障水平和医疗、交通和给排水等基础设施建设皆与江苏省旗鼓相当;安徽省较高的森林覆盖率使其自然韧性仅逊于浙江省,此外,安徽省面临更小的人口压力,其基础设施的承载和服务能力显著增强。因此,在研究期间,安徽省的城市洪涝韧性虽低于其他省市,但是由于基础设施韧性的提高,从 2000 年的 1.32 提高到 2020 年的 1.80。

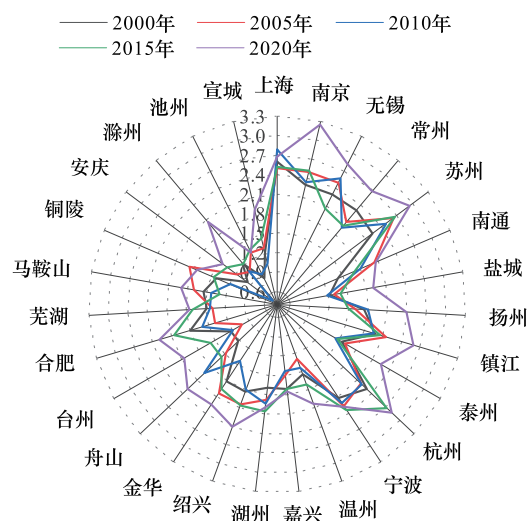


图2 长三角城市群 27 个城市城市洪涝韧性年变化趋势
Fig.2 Annual Change Trend of Urban Flood Resilience in 27 Cities of Yangtze River Delta Urban Agglomeration

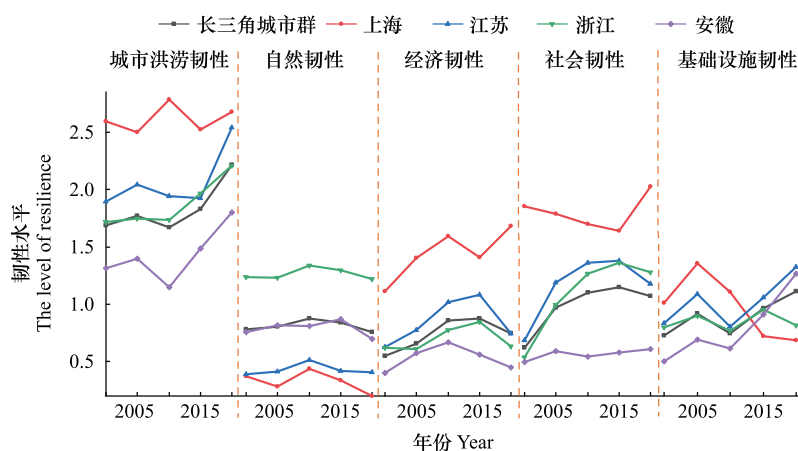


图3 2000—2020 年城市洪涝韧性及各子系统韧性水平
Fig.3 The level of urban flood resilience and resilience of each subsystem from 2000 to 2020

2.2 生态系统服务时空演变分析

2000 年—2020 年水源涵养、水质净化、土壤保持、气候调节四种生态系统服务的时空分布和变化如图 4 所示,图 5 展示了 2000—2020 年四种生态系统服务的总量变化趋势。长三角城市群的四种生态系统服务存在显著的空间异质性,但其空间分布在研究期间是稳定的。具体而言,水源涵养服务的低值主要分布在北部,而高值逐渐由东南向西南移动,这主要受降水空间分布的影响。水源涵养服务增加的区域主要分布在西北部

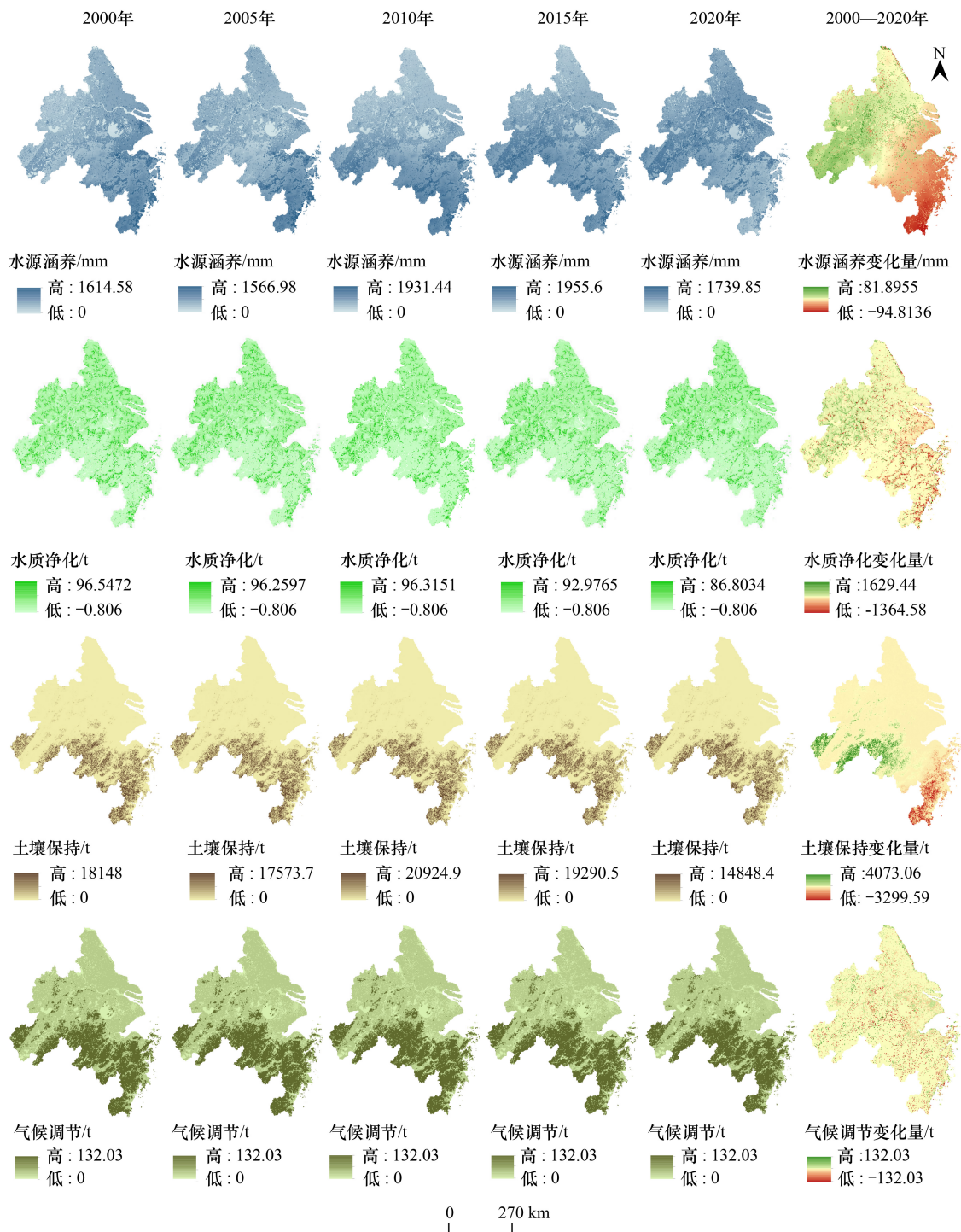


图 4 2000—2020 年四种生态系统服务的时空分布和变化

Fig.4 Spatiotemporal distribution and changes of four ecosystem services from 2000 to 2020

的安徽八市,而减少的区域集中在东南部的宁波、温州、舟山和台州(图4),但是总量总体呈上升趋势,从2000年的966884万mm增加到2020年的1507380万mm,年增长率为2.25%(图5)。水质净化服务高值主要集中在中西部地区,低值主要分布在北部的盐城、合肥、安庆和滁州,除零星地点的水质净化服务有所降低之外,大部分地区都出现转好趋势(图4)。从总量上看,长三角城市群水质净化服务呈现向好的趋势,氮磷输出减少了0.71%,从2000年17110万t,下降到2010年的15818万t,2020年升至16988万t(图5)。

土壤保持和气候调节服务显示出相似的空间分布(图4):高值区域主要集中在高植被覆盖的浙南以及皖南的安庆、池州和宣城,而低值区域主要位于土地利用类型多为耕地的长三角城市群的北部。这可以解释为,森林在保持土壤生产力和调节气候方面发挥着重要作用。然而,土壤保持和气候调节服务从2000—2020年的变化趋势并不一致。土壤保持服务的变化具有明显的空间分布,减少的区域主要集中的东南部沿海的舟山、台州、宁波和温州,而显著增加的区域主要集中在西南部山区;对于气候调节服务,除零星地方减少,大部分地区基本保持不变(图4)。此外,土壤保持总量整体呈现倒“N”型增加趋势,年增长率为0.35%,气候调节服务呈现微弱的减少趋势,从2000年的131949万t下降到2020年的129810万t,降幅为1.62%(图5)。

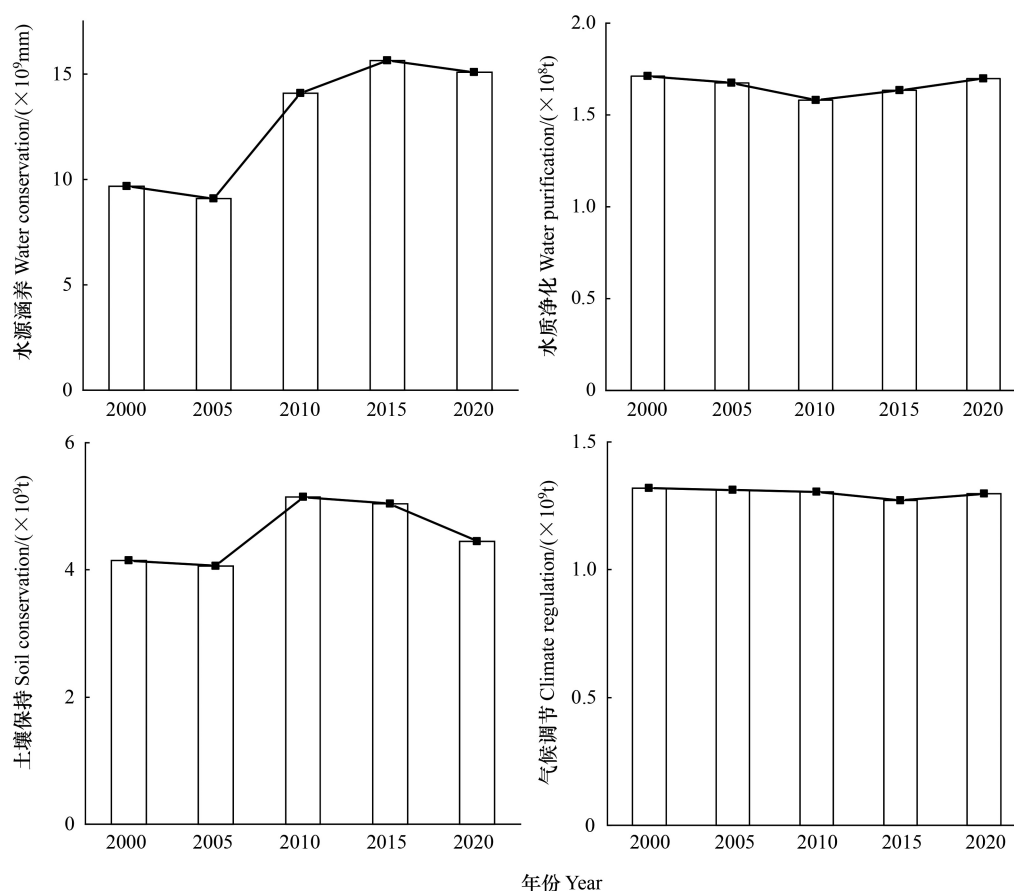


图5 2000—2020年四种生态系统服务的总量

Fig.5 Total amount of four ecosystem services from 2000 to 2020

2.3 城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调度分析

2000—2020年长三角城市群27个城市与生态系统服务的耦合协调度的年变化趋势和时空分布分别如图6和图7所示。从年变化趋势可以看出,2000—2020年城市洪涝韧性与四种生态系统服务之间的耦合协调度变化幅度较小,其中,城市洪涝韧性与水质净化/土壤保持/气候调节之间的耦合协调度均发生了微弱的下降,而与水源涵养服务之间的耦合协调度在研究期内有所改善。相比之下,城市洪涝韧性与水源涵养之间

的耦合协调度最高,其次是气候调节和水质净化,最后是土壤保持。从空间上看,城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调度整体上呈现“南高北低、由西南向东北逐渐减弱”的趋势。大多数城市的状态保持不变,只有少数城市出现倒退或改善现象。

具体而言,城市洪涝韧性与水源涵养之间整体处于中级协调水平,耦合协调度由 0.71 上升至 0.74,呈良好上升态势(图 6)。在 2000—2020 年期间,除舟山外,长三角城市群中所有城市都处于协调水平。其中,浙江除舟山、嘉兴和湖州外都处于高度协调,其耦合协调度值平均值高达 0.87,且随着城市的建设发展,安庆、合肥、滁州、南京、盐城和南通的城市洪涝韧性与水源涵养之间也逐渐向高度协调发展(图 7)。这是因为长三角城市群位于中国东部沿海地区,降水丰富,经济、社会、及各项基础设施发展良好,导致长三角地区城市洪涝韧性与水源涵养服务协调发展。

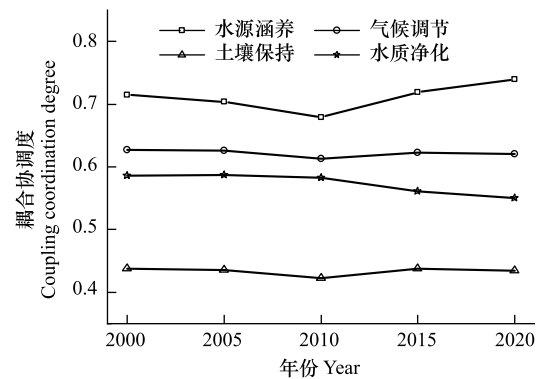


图 6 2000—2020 年城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调度的年变化趋势

Fig.6 The annual change trend of the coupling coordination degree between urban flood resilience and ecosystem services from 2000 to 2020

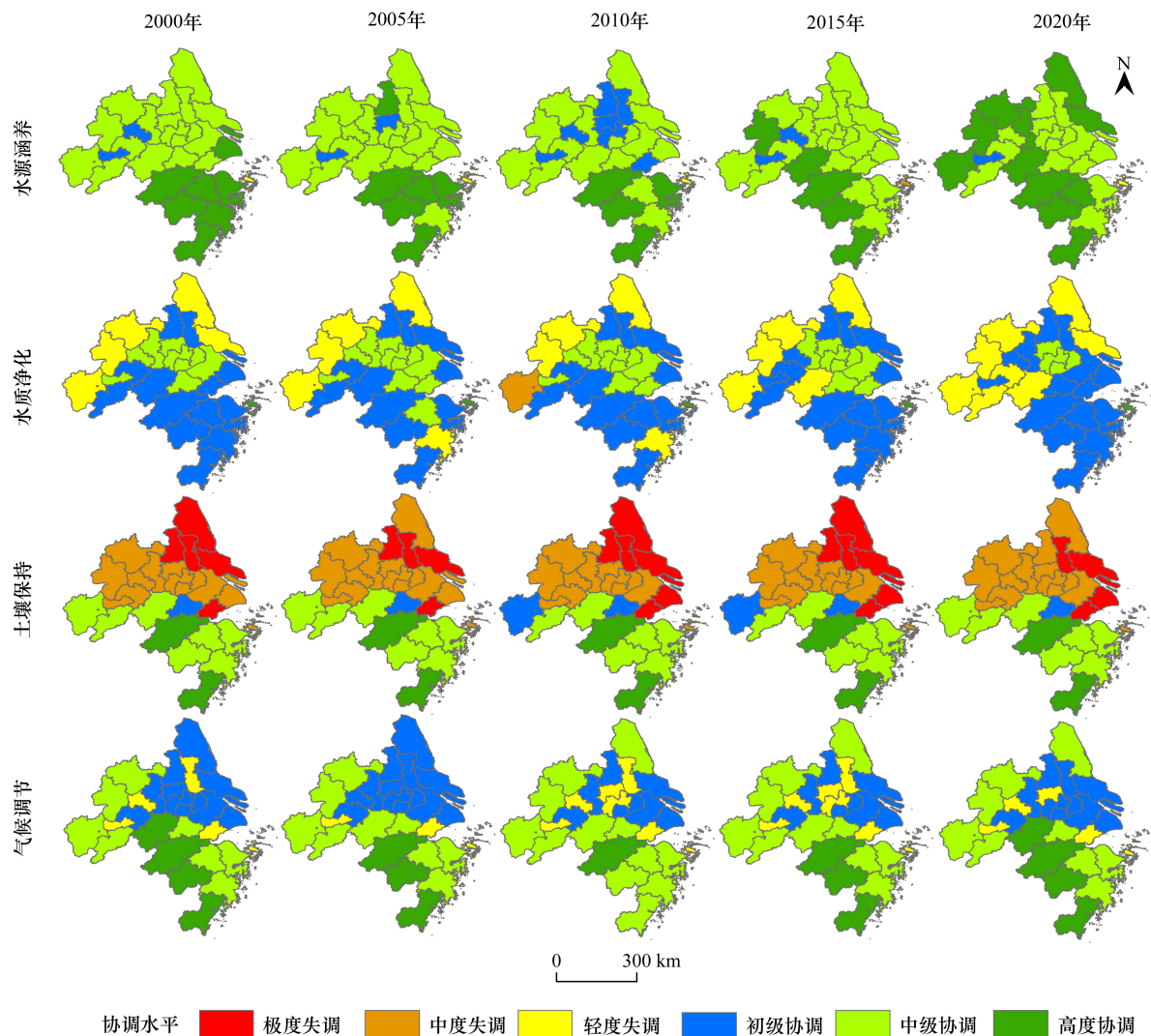


图 7 2000—2020 年城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调水平的空间分布

Fig.7 The spatial distribution of the coupling coordination degree between urban flood resilience and ecosystem services from 2000 to 2020

城市洪涝韧性与水质净化之间整体处于初级协调水平,从 2000 年的 0.59 下降到 2020 年的 0.55,呈现出明显的下降趋势(图 6)。从图 7 可以看出,城市洪涝韧性与水质净化之间的耦合协调度以苏中和苏南经济发达区域为核心向外扩散,呈现出明显的“中间高,四周低”的空间分布特征。舟山的耦合协调度表现最好,为高度协调水平;盐城、南通和安徽大部分城市表现为轻度失调水平。中级协调城市占比从 2000 年的 29.63% 下降到 2020 年的 11.11%,其中,南京、苏州、湖州、马鞍山和铜陵从中级协调倒退成初级协调水平,芜湖、池州和宣城从初级协调倒退成轻度失调水平。

城市洪涝韧性与土壤保持之间的耦合协调度一直在 0.4 左右徘徊,整体处于轻度失调水平,耦合协调度表现最差(图 6)。从空间上看,城市洪涝韧性与土壤保持之间的耦合协调度存在严重的两极分化现象,失调城市占比 62.96%。其中,长三角城市群的北部呈现中度失调和极度失调,南部多呈现高度协调和中度协调,如南通、扬州、台州和嘉兴的耦合协调度在研究期内均未超过 0.2,而杭州和温州的耦合协调度在 2000—2020 年均超过 0.8,尤其是杭州,其值一直在 0.95 以上(图 7)。

城市洪涝韧性与气候调节之间整体处于中级协调水平,其值一直稳定在 0.62 左右(图 6)。2000—2020 年,嘉兴、舟山、马鞍山和铜陵几乎都处于轻度失调状态,江苏省的常州、镇江和泰州在 2010—2015 也出现了轻度失调状态,相比之下,浙江省的城市洪涝韧性与气候调节之间的耦合协调度更好,几乎都处于中级协调和高度协调水平,占比达 80%(图 7)。这是因为浙江省在注重城市洪涝韧性建设的同时,贯彻落实生态环境保护政策,维护城市洪涝韧性与生态系统服务的协调发展。

3 讨论

3.1 城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系的综合分析

通过观察城市洪涝韧性与四种生态系统服务之间的耦合协调度,可以看出长三角城市群的城市洪涝韧性与水源涵养、土壤保持及气候调节服务之间的协调关系具有明显的两极分化特征,主要表现为:南部都处于良好的协调状态,而北部偏弱,即这三种生态系统服务较高的地区往往具有更好的耦合协调性。城市洪涝韧性与水质净化服务的耦合协调性和城市洪涝韧性水平的空间分布较为一致,这与长三角城市群土地利用/土地覆盖的空间分布特征密切相关,南部主要是森林,而北部主要是耕地,而森林在水源涵养、土壤保持及气候调节服务方面发挥着重要作用^[39]。例如,位于长三角城市群南部的杭州在城市洪涝韧性与生态系统服务之间的耦合协调度上远远领先于其他城市。杭州西部、中部和南部为浙西丘陵地区,有天目山、白际山和龙门山等,森林资源丰富。杭州市政府实施了一系列计划,如《杭州市生态文明建设规划(2010—2020)》、《杭州环境功能区划》和《新时代美丽杭州建设实施纲要(2020—2035 年)》等,以保护生态系统。此外,杭州市的城市洪涝韧性也处于较高水平,为推动杭州市防洪减灾,杭州市颁布了《杭州市城市防洪排涝三年行动计划(2014—2016 年)》,以及加快打造“会呼吸”、有韧性的海绵城市,从而促进了城市洪涝韧性和生态系统服务的协调发展。

长三角城市群的北部,尤其是苏北和皖西主要以耕地为主,中部地区的建设用地占比较大,这些地区在提供生态系统调节服务方面偏弱,这与李成等人^[40]、Ding 等人^[18]的研究成果一致。以上海为例,与 Lu 等人^[23]研究结果相似,上海市的城市洪涝韧性在所有城市中是最好的,然而由于较低的生态系统服务,其城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调性明显不及南部城市。因此,针对经济发达地区,提高生态系统服务可以促进城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调性。

从以上分析可以看出,城市洪涝韧性与生态系统服务之间的耦合协调发展区域与生态系统服务高值的空间分布基本一致,表明如果一个区域具有较高的生态系统服务,则城市洪涝韧性和生态系统服务之间将更容易实现协调发展。此外,通过城市洪涝韧性时空特征分析,对于欠发达地区,发展经济是重中之重,而针对经济发达地区,通过改善自然生态环境,提升生态系统服务功能是提高韧性水平的关键。因此,长三角城市群不仅要协调自然、经济、社会和基础设施韧性的发展,还必须加强生态系统的保护与建设。否则,盲目的经济发

展将破坏当地生态系统,从而影响城市洪涝韧性建设。

3.2 长三角城市群发展的政策建议

对于城市洪涝韧性滞后的安徽省,加强经济韧性与社会韧性建设,在合肥都市圈和南京都市圈的辐射带动下,有效整合产业资源和创新要素,推进经济高质量发展,全面提升社会的防灾应急能力;对于城市洪涝韧性较好的上海、南京等城市,持续提升基础设施韧性和自然韧性,应根据建设海绵城市和韧性城市要求,从提升生态系统服务功能角度出发,采用景观绿化与排水防涝一体化的城市空间韧性利用新方式,建设“人—水—生态”和谐的高质量城市。

对于生态系统服务滞后的上海、皖西和苏北,在促进经济发展的同时,兼顾生态系统的保护。全力推动自然保护区建设,加强新生湿地培育和生态修复,划定生态脆弱区,并控制其土地开发利用规模。其中,对于水质净化服务滞后的盐城、合肥、安庆和滁州,严格耕地保护政策,加强农业生态资源保护,以绿色生态为导向,减少农药化肥用量,推广水肥一体化等高质高效的农业技术。

对于城市洪涝韧性与生态系统服务失调的北部地区,重点提升土壤保持服务和气候调节服务,加强以低碳为特征的绿色基础设施建设,完善城市洪涝灾害应急响应机制,全面提高城市防洪减灾能力。此外,加强上海、南京、苏州、杭州、合肥 5 个重要城市辐射带动作用,提升长三角城市群的城市洪涝韧性建设与生态环境保护的协同治理水平。

3.3 研究的局限性

本文聚焦于城市洪涝韧性与生态系统服务的研究,然而,对于城市洪涝韧性的评估国内外学者已经取得了大量成果,由于数据的可获取性,本文未将政府治理能力和居民参与度等指标纳入城市洪涝韧性评估中,这可能会对评估结果造成一定影响。未来研究需要结合更多的访谈和调研数据来完善城市洪涝韧性的评估指标体系。其次,研究发现生态系统服务对城市洪涝韧性有一定的促进作用,然而,耦合协调度模型不能直接反映城市洪涝韧性与生态系统服务之间的协同作用,因此,在未来的研究中,本文需要深入探讨二者之间可能的协同作用。最后,本文从城市群尺度讨论了生态系统服务与城市洪涝韧性之间的耦合协调关系,研究结果对于促进长三角城市群的城市洪涝韧性建设和生态环境保护具有一定参考价值,但是未来仍需要将研究尺度精细化,从而获得更小尺度的研究结果和针对性的政策建议。

4 结论

本文综合运用基于麻雀算法的投影寻踪模型、InVEST 模型和耦合协调度模型,分析了长三角城市群 2000—2020 年的城市洪涝韧性和生态系统服务,以及两者耦合协调关系,主要结论如下:(1)长三角城市群的城市洪涝韧性强度呈现出“上海>江苏>浙江>安徽”的空间格局,发达城市洪涝韧性水平明显高于欠发达城市。从时间维度看,长三角城市群的城市洪涝韧性水平呈现“N”型增长趋势,经济韧性、社会韧性和基础设施韧性对其影响远大于自然韧性的影响。经济是影响城市洪涝韧性波动的主要因素,而自然韧性成为城市洪涝韧性提升的关键短板。(2)长三角城市群的 4 种生态系统服务存在显著的空间异质性,尤其是高植被覆盖的南部地区提供了更高的生态系统服务,但其空间分布在研究期间是稳定的。从总量上看,2000—2020 年长三角城市群的水源涵养和水质净化服务总体呈向好趋势,土壤保持服务整体呈现倒“N”型增加,气候调节服务呈现微弱的下降趋势。(3)城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系在研究期内整体上较为稳定,且与生态系统服务的时空变化趋于一致,其中,城市洪涝韧性与水源涵养服务之间的耦合协调度呈现微弱的先减后增趋势,且整体表现最佳,而与水质净化、土壤保持和气候调节之间的耦合协调度均发生了微弱的下降。从空间上看,城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调度整体上呈现“南高北低、由西南向东北逐渐减弱”的趋势。生态系统服务较高的地区具有更好的耦合协调性,且随着生态系统服务的增加而改善。

总言之,提升生态系统服务功能既是改善城市洪涝韧性水平的关键,亦能促进城市洪涝韧性和生态系统服务的协调发展。因此,本文针对长三角城市群的城市洪涝韧性与生态系统服务的耦合协调关系特征,从生

态系统服务角度提出相应政策建议。

参考文献 (References):

- [1] Zhu S Y, Li D Z, Huang G Y, Chhipi-Shrestha G, Nahiduzzaman K M, Hewage K, Sadiq R. Enhancing urban flood resilience: a holistic framework incorporating historic worst flood to Yangtze River Delta, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 61: 102355.
- [2] 斯洛博丹·西蒙诺维奇. 从洪水风险管理到韧性管理: 评估全球变化环境下一种新的适应性方法. *中国防汛抗旱*, 2019, 29(2): 2.
- [3] Restemeyer B, Woltjer J, van den Brink M. A strategy-based framework for assessing the flood resilience of cities - A Hamburg case study. *Planning Theory & Practice*, 2015, 16(1): 45-62.
- [4] Abenayake C C, Mikami Y, Matsuda Y, Jayasinghe A. Ecosystem services-based composite indicator for assessing community resilience to floods. *Environmental Development*, 2018, 27: 34-46.
- [5] Li Z M, Zhang X X, Ma Y F, Feng C Y, Hajiye A. A multi-criteria decision making method for urban flood resilience evaluation with hybrid uncertainties. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 36: 101140.
- [6] Sun R R, Shi S H, Rehman Y, Li S M. Measurement of urban flood resilience using a quantitative model based on the correlation of vulnerability and resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 82: 103344.
- [7] Chen X S, Jiang S L, Xu L S, Xu H G, Guan N N. Resilience assessment and obstacle factor analysis of urban areas facing waterlogging disasters: a case study of Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(24): 65455-65469.
- [8] Paudel P K, Lamichhane A, Acharya K P, Bastola R. Ecosystem restoration reduces community vulnerability to water-induced disasters: need to rethink Chure conservation in Nepal. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 90: 103647.
- [9] Kato S, Huang W H. Land use management recommendations for reducing the risk of downstream flooding based on a land use change analysis and the concept of ecosystem-based disaster risk reduction. *Journal of Environmental Management*, 2021, 287: 112341.
- [10] Renaud F G, Sudmeier-Rieux K, Estrella M. The role of ecosystems in disaster risk reduction. New York: United Nations University Press, 2013. 9-11.
- [11] Cohen-Shacham E, Janzen C, Maginnis S, Walters G. Nature-based solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: IUCN, 2016. 10.
- [12] Huang W H, Hashimoto S, Yoshida T, Saito O, Taki K. A nature-based approach to mitigate flood risk and improve ecosystem services in Shiga, Japan. *Ecosystem Services*, 2021, 50: 101309.
- [13] 许萌, 董潇楠, 谢苗苗, 王玉, 全德. 基于承灾脆弱性与生态系统服务供需匹配的城市空间治理分区. *生态学报*, 2021, 41(15): 6012-6023.
- [14] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例. *生态学报*, 2022, 42(1): 116-126.
- [15] Kotzee I, Reyers B. Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: a composite index approach. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 45-53.
- [16] Haghbin S, Mahjouri N. Quantifying and improving flood resilience of urban drainage systems based on socio-ecological criteria. *Journal of Environmental Management*, 2023, 339: 117799.
- [17] 黄晶, 余靖雯. 长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性评估及影响因素分析. *河海大学学报: 哲学社会科学版*, 2020, 22(6): 39-45, 110.
- [18] Ding T H, Fang L P, Chen J F, Ji J, Fang Z. Exploring the relationship between water-energy-food nexus sustainability and multiple ecosystem services at the urban agglomeration scale. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 35: 184-200.
- [19] Rana I A, Bhatti S S, Jamshed A, Ahmad S. An approach to understanding the intrinsic complexity of resilience against floods: Evidences from three urban communities of Pakistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 63: 102442.
- [20] Forrest S A, Trell E M, Woltjer J. Socio-spatial inequalities in flood resilience: rainfall flooding in the city of Arnhem. *Cities*, 2020, 105: 102843.
- [21] Ruan J E, Chen Y B, Yang Z W. Assessment of temporal and spatial progress of urban resilience in Guangzhou under rainstorm scenarios. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 66: 102578.
- [22] 贺山峰, 梁爽, 吴绍洪, 郭浩. 长三角地区城市洪涝灾害韧性时空演变及其关联性分析. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(9): 1988-1999.
- [23] Lu H, Lu X, Jiao L D, Zhang Y. Evaluating urban agglomeration resilience to disaster in the Yangtze Delta city group in China. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 76: 103464.
- [24] Liu D, Wang C Q, Ji Y, Fu Q, Li M, Ali S, Li T X, Cui S. Measurement and analysis of regional flood disaster resilience based on a support vector regression model refined by the selfish herd optimizer with elite opposition-based learning. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300: 113764.
- [25] 李正兆, 傅大放, 王君娴, 闵克东, 张骏彧. 应对内涝灾害的城市韧性评估模型及应用. *清华大学学报: 自然科学版*, 2022, 62(2):

266-276.

- [26] Yu S Y, Kong X S, Wang Q, Yang Z W, Peng J. A new approach of Robustness-Resistance-Recovery (3Rs) to assessing flood resilience: a case study in Dongting Lake Basin. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 230: 104605.
- [27] Mehryar S, Surminski S. Investigating flood resilience perceptions and supporting collective decision-making through fuzzy cognitive mapping. *Science of The Total Environment*, 2022, 837: 155854.
- [28] Hussain M, Tayyab M, Ullah K, Ullah S, Rahman Z U, Zhang J Q, Al-Shaibah B. Development of a new integrated flood resilience model using machine learning with GIS-based multi-criteria decision analysis. *Urban Climate*, 2023, 50: 101589.
- [29] Xu D, Liu D P, Liu D, Fu Q, Huang Y, Li M, Li T X. New method for diagnosing resilience of agricultural soil-water resource composite system: projection pursuit model modified by sparrow search algorithm. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127814.
- [30] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用——麻雀搜索算法[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [31] Wang W X, Deng X Z, Wang Y F, Peng L, Yu Z Y. Impacts of infrastructure construction on ecosystem services in new-type urbanization area of North China Plain. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 185: 106376.
- [32] 刘迪, 陈海, 张行, 史琴琴, 耿甜伟. 黄土丘陵沟壑区生态系统服务对人类福祉的影响及其群体差异. *地理研究*, 2022, 41(5): 1298-1310.
- [33] Keesstra S, Nunes J, Novara A, Finger D, Avelar D, Kalantari Z, Cerdà A. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 2018, 610/611: 997-1009.
- [34] Liu Y, Huang X J, Yang H. An integrated approach to investigate the coupling coordination between urbanization and flood disasters in China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 375: 134191.
- [35] Karrasch L, Restemeyer B, Klenke T. The 'Flood Resilience Rose': a management tool to promote transformation towards flood resilience. *Journal of Flood Risk Management*, 2021, 14(3): e12726.
- [36] Ding T H, Chen J F, Fang Z, Chen J Y. Assessment of coordinative relationship between comprehensive ecosystem service and urbanization: a case study of Yangtze River Delta urban Agglomerations, China. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108454.
- [37] 赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 王伟军. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 131-147.
- [38] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 秦胜利, 王艳华, 苗长虹. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素. *资源科学*, 2020, 42(1): 159-171.
- [39] Halbe J, Knüppe K, Knieper C, Pahl-Wostl C. Towards an integrated flood management approach to address trade-offs between ecosystem services: insights from the Dutch and German Rhine, Hungarian Tisza, and Chinese Yangtze Basins. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 984-994.
- [40] 李成, 赵洁, 庄智程, 顾思浩. 长三角城市群生态系统服务权衡强度时空演变及影响因素. *生态学报*, 2022, 42(14): 5708-5720.