

DOI: 10.20103/j.stxb.202210253041

王文慧, 钟业喜, 马宏智, 欧明辉, 冯兴华, 吴尚光. 鄱阳湖水陆交错带生态韧性时空变化及影响因素. 生态学报, 2023, 43(22): 9514-9526.

Wang W H, Zhong Y X, Ma H Z, Ou M H, Feng X H, Wu S G. Spatio-temporal variations and influencing factors of ecological resilience in the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9514-9526.

鄱阳湖水陆交错带生态韧性时空变化及影响因素

王文慧¹, 钟业喜^{1,2,*}, 马宏智¹, 欧明辉¹, 冯兴华¹, 吴尚光¹

¹ 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022

² 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022

摘要: 鄱阳湖水陆交错带是一典型水陆相复杂生态系统, 其人地关系矛盾和冲突强烈改变了区域生态韧性格局。基于适应性循环理论框架“潜力-连通度-恢复力”三维综合评价体系, 以乡镇为研究单元, 对鄱阳湖水陆交错带 2000 年、2010 年、2020 年的生态韧性进行评估; 并运用地理探测器分析各因素在不同时期对生态韧性的影响强度及其相互作用机制, 从而为地区生态韧性提升策略的制定提供指导。结果表明: (1) 2000—2020 年鄱阳湖水陆交错带综合韧性指数先增后减, 整体呈上升趋势, 韧性低值区经历了“小集聚大分散→大集聚小分散→整体分散”的空间演化特征; (2) 鄱阳湖水陆交错带大部分乡镇经历了“释放→重组→开发”的演化交替, 其中 2020 年各乡镇韧性演化处于开发(r)、保护(K)、释放(Ω)、重组(α)阶段的乡镇数量分别占 49.4%、28.3%、8.2%、14.1%; (3) 2000—2020 年内的不同时期, 鄱阳湖水陆交错带生态韧性驱动因子的影响强度存在差异, 其中植被覆盖、夜间灯光强度、建设用地距离以及夜间灯光强度变化趋势成为研究区韧性变化的主导驱动力, 且影响强度出现较为明显的逐年增强趋势。本研究可以在一定程度上剖析研究区域的韧性发展现状和趋势, 推动形成具有地域特色且可持续的人地耦合系统。

关键词: 生态韧性; 时空演变; 影响因素; 地理探测器; 鄱阳湖水陆交错带

Spatio-temporal variations and influencing factors of ecological resilience in the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake

WANG Wenhui¹, ZHONG Yexi^{1,2,*}, MA Hongzhi¹, OU Minghui¹, FENG Xinghua¹, WU Shangguang¹

¹ School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

² Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research Ministry of Education, Nanchang 330022, China

Abstract: The Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake is a typical water-land complex ecosystem, and its contradictory and conflicting human-land relationship has significantly changed the regional ecological resilience pattern. Based on the three-dimensional comprehensive evaluation system of Potential-Connectivity-Resilience" in the framework of adaptive cycle theory, we aim to assess the ecological resilience of the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake in 2000, 2010, and 2020. Taking townships as the research unit, we analyzed the influence strength of each factor on ecological resilience in different periods and its interaction mechanism by using geographic probe, so as to provide guidance for the formulation of regional ecological resilience improvement strategy. The results show that: (1) the comprehensive resilience index of the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake has increased and then decreased in 2000—2020, with an overall increasing trend. The low value area of resilience has experienced the spatial evolution characteristics of small agglomeration and large dispersion→large agglomeration and small dispersion→overall dispersion. The coverage of the medium-high resilience zone is always larger, and the regional integrated resilience is closely related to the ecological background of the system, with

基金项目: 国家自然科学基金(41961043, 42001189); 江西省社会科学“十四五”基金项目(22YJ12)

收稿日期: 2022-10-25; **网络出版日期:** 2023-10-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhongyexi@126.com

significantly spatial differentiation characteristics. (2) Most townships in the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake have experienced the evolutionary cycle of release→reorganization→development, in which the number of townships whose resilience evolution was in development (r), protection (K), release (Ω) and reorganization (α) stages in 2020 accounted for 49.4%, 28.3%, 8.2%, and 14.1%, respectively. However, there were still some townships that fell into the pathological trap (failed restructuring) during the study period, and how to break the existing situation to achieve new regional growth is now a key issue for the sustainable development of most township ecosystems. (3) The influence intensity of ecological resilience factors in the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake in 2000—2020 was different, among which vegetation cover, night light intensity, construction land distance and night light intensity change trend became the dominant driving forces of resilience change in the study area. The interaction between the factors is mainly nonlinearly enhanced and the influence intensity shows a more obviously increasing trend year by year. The future should be based on the resilience support capacity of the natural ecological background of the regional ecosystem, and promote the benign interaction between human activities and the ecosystem through ecosystem function enhancement and spatial structure optimization. To a certain extent, this research can analyze the current situation and trends of resilience development in the study area, and promote the formation of a sustainable human-land coupling system with regional characteristics.

Key Words: ecological resilience; spatial-temporal evolution; influencing factor; geodetector; the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake

水陆交错带为陆地生态系统和水生生态系统的过渡区域^[1],其通过截留和过滤水分、沉积物等来协调水体周边的物质循环和能量流动,对水土保持、保护水源及促进生物多样性等方面具有重要作用^[2-3]。然而由于全球气候变化和人类活动加剧,湖泊水陆交错带生境退化严重,生态功能受损,进而导致水体污染和洪涝灾害频发,且水陆交错带系统的稳定性在很大程度上会影响河湖生态系统的健康^[4]。2021 年国家发展改革委颁发的《关于加快推进洞庭湖、鄱阳湖生态保护补偿机制建设的指导意见》中明确提出“坚持山水林田湖草是一个生命共同体,协调开发利用与生态保护关系”。因此在由自然规律引致的灾害冲击和快速城镇化过程中人类扰动增强的双重现实背景下,科学认识鄱阳湖水陆交错带生态韧性的时空格局及影响因素,对于区域寻求生态、生产、生活空间的和谐统一具有重要意义,也成为当前开展生态环境保护的迫切需求。

自然生态系统是人类赖以生存和发展的物质基础。在全球气候变化和快速城市化背景下,自然生态系统所面临的胁迫与冲击加剧,从而出现了诸如空间错配、空间扩张失序等“空间冲突”现象,影响区域的可持续性发展^[5]。而生态安全问题也引起了众多学者的广泛关注,研究内容多聚焦于区域的生态安全与景观风险^[6-7]、生态脆弱性与敏感性^[8-9]、生态系统服务与健康评估^[10-11]等方面,其研究维度多以单一风险源维度或多维度简单叠加为主,主要描述的是生态安全的静态模式。1973 年,生态学家 Holling 首次将韧性的概念运用到生态学领域,以表征生态系统内部的稳定结构与功能^[12]。生态韧性作为一个综合性、系统性的传统热点问题,受到了诸多学者的关注。自 20 世纪 90 年代以来,生态韧性的研究逐渐与城市系统相结合,主要应用于气候变化、洪涝灾害、生态修复、飓风灾害等相关研究和规划实践中^[13-16],以解决城市系统在灾害及环境变化后的可持续发展问题。目前,有关生态韧性的研究主要集中在韧性概念辨析、生态韧性的定量测度和生态系统韧性的发展路径三个方面。从研究区域来看,现有研究多着眼于发达城市地区,如王少剑等^[17]借鉴物理学耦合模型测算珠三角城镇化与生态韧性的耦合协调度;陶洁怡等^[18]构建长三角城市生态韧性评估模型以分析其时空动态演化特征;王松茂等^[19]采用熵权 TOPSIS 法评估山东半岛城市群城市生态韧性。虽然目前学界对于城市地区的生态韧性研究取得了较大进展,但在大湖水陆交错带这种特殊且有着复杂人地关系的区域,研究还非常匮乏,对该类型区域生态系统韧性演变、规律及机制等方面更缺乏深入的研究。同时,相较于城市地区所面临的未知风险较多来源于城市规模扩张带来的累积压力^[20],水陆交错带的生态安全则更易受到洪涝、干旱等自然灾害的急性冲击,从而导致水陆交错带生态系统的发展演变更具有无序性和复杂性。另

一方面,从研究尺度来看,既有研究主要以城市为代表的宏观区域为主,多将研究区域作为整体,较少落实到乡镇尺度,本研究将在一定程度上为该研究领域的尺度方面发挥补充作用。

随着鄱阳湖生态经济区建设上升为国家战略^[21],鄱阳湖作为流域高质量发展的重点区域,研究和探索鄱阳湖水陆交错带生态环境变化不仅对江西乃至长江中下游经济社会的可持续发展具有深远的影响。近年来,城市建设用地的持续扩张以及不断增强的人类扰动强烈地改变着区域的生态空间格局^[22],鄱阳湖水陆交错带正面临着水体污染、人地关系矛盾、水土流失等生态问题,逐步成为制约区域可持续发展的瓶颈。因此,基于生态适应性循环理论构建鄱阳湖水陆交错带生态韧性三维评价指标体系,研究和探索鄱阳湖水陆交错带生态韧性的时空演变特征及阶段,在此基础上,应用地理探测器对生态韧性各影响因素进行分析,有利于揭示生态韧性对人地要素变化的空间响应机制,对于探索鄱阳湖水陆交错带生态文明建设新模式、践行山水林田湖草生命共同体理念具有重要的示范作用。

1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部(28°22′—29°45′ N, 115°47′—116°45′ E),是中国第一大淡水湖,也是长江流域的一个过水性、吞吐性、季节性重要湖泊。受“五河”与长江水位的影响,水位的周期性涨落形成了大面积水陆交替的草洲、泥滩和沙滩^[23]。本文鄱阳湖水陆交错带是以最高水位线(吴淞高程湖口水位 22.48 m)所涉及乡镇的全域,共包括南昌、九江、上饶三市 11 个滨湖县(市、区)的 85 个乡镇单元(图 1)。该地区属亚热带湿润季风型气候,多年平均温度为 16.5—17.8 °C,年平均降雨量为 1426 mm,但降水量分布不均多集中在 4—6 月。鄱阳湖水陆交错带地势低平,土壤肥沃,拥有丰富的自然和人文旅游资源,是“山水林田湖草生命共同体”的典型代表。

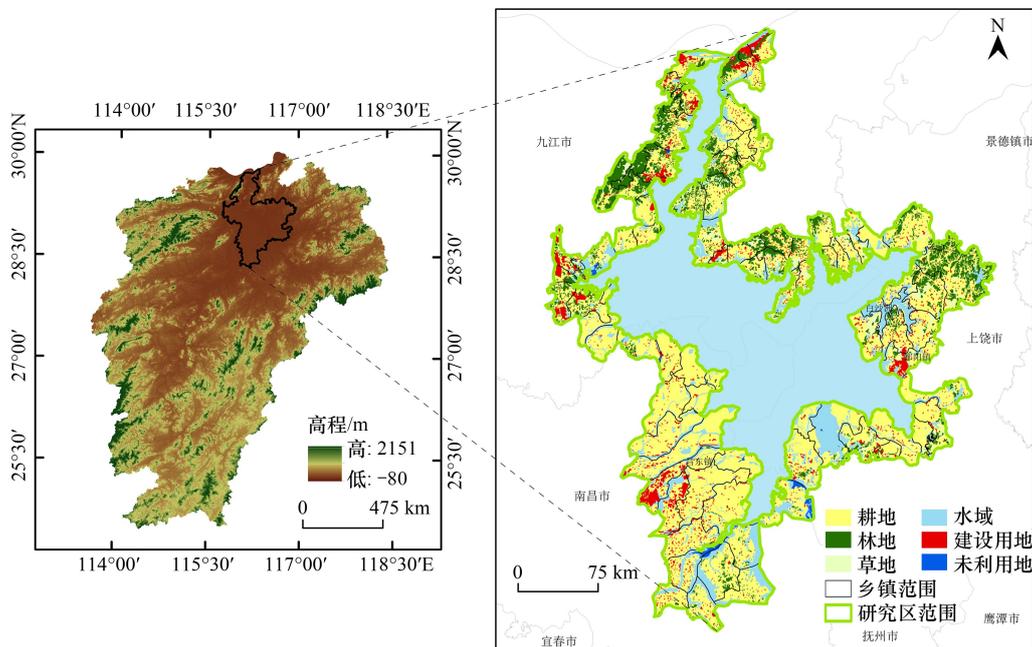


图 1 鄱阳湖水陆交错带地理位置及范围

Fig.1 The geographical location and scope of the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake

鄱阳湖水陆交错带作为复杂的水陆相生态系统,也是典型的人地耦合系统,其人地关系经历了人类被动型(自然耕种)、人类主动型(围垦)、政策引导型(退田还湖)、人地协调型(生态经济)四个发展阶段^[24],不同发展阶段都会深刻地影响着区域生态系统的稳定性,从而对鄱阳湖水陆交错带生态韧性空间格局产生扰动。20 世纪 50 年代以来,鄱阳湖减少了 2267 km²,引起湖泊调蓄能力大幅下降^[25],导致自然灾害频发,从而对鄱

阳湖水陆交错带的生态系统稳定性造成一定程度的破坏。随着全球气候变化和区域内人类活动加剧等因素影响,鄱阳湖水文态势发生明显变化,这不仅影响着经济社会的发展,还导致湿地生态系统失衡以及候鸟栖息地生境退化,增加区域生态环境问题的复杂性和不确定性。近年来随着城镇化的快速发展,区域生态系统遭受多方面风险威胁,其人地关系矛盾和冲突不仅对江西,对整个长江中下游地区均会产生重要影响。在此背景下,提升区域生态韧性,增强应对风险扰动能力将是协调鄱阳湖水陆交错带人地关系发展变化的重要路径和依据。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究所包含的数据主要为数字高程模型(DEM)、归一化植被指数(NDVI)、地表温度、夜间灯光数据和土地利用数据等。DEM来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)的ASTER GDEM30 m分辨率产品;1990—1999年的NDVI数据来自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)的GIMMS 3g以及2000—2020年的MOD13Q1 NDVI数据源自LAADS DAAC(<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>),分辨率分别为8 km和250 m;地表温度数据来源于地理空间数据云的Landsat4—5 TM、Landsat 8 OLI_TIRS分辨率为30 m的卫星数据产品;夜间灯光数据源自国家青藏高原科学数据中心^[26];土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)提供的30 m分辨率的土地利用栅格数据,重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类。由于研究区在不同水位情况下具有不同特征,故本文所用研究数据均来自于同一季相下的相同或相近水位。所有指标均经过ArcGIS重采样为30 m×30 m的数据精度,并全部投影至WGS84地理坐标系。

2.2 生态系统韧性三维评估框架和指标体系

1973年,生态学家Holling首次挑战了传统生态平衡与稳定范式,将韧性概念导入生态学领域,并概括为系统受到干扰之后恢复到维持其基本功能和结构的能力。韧性具有在改变自身结构前吸收与承受外部干扰的能力、在面对外部扰动时系统内部重组后的更新能力以及继续面对外部影响的存续力,在此基础上,系统的动态循环过程应包含开发(r)、保护(K)、释放(Ω)、重组(α)四个演化阶段,从而以整体和动态两种视角来理解系统内部与外在胁迫之间的相互作用机制。因此,生态适应性循环理论是对传统生态系统演替观点的完善和拓展^[27],而其中的适应性是指人类活动和自然生态系统应对正在或即刻发生的扰动时为保持自身结构与功能的稳定而做出转变过程^[28]。该模型通过构建“潜力—连通度—恢复力”三重属性的三维框架,定量刻画了生态韧性动态演化过程中的四个阶段,即系统在发展过程中将经历快速生长阶段(r)、稳定守恒阶段(K)、释放阶段(Ω)与重组阶段(α),代表区域生态系统的生命周期^[29],同时将推动系统发展演变的共同作用归纳为潜力、连通度及恢复力三个维度的特征属性,三种特征彼此之间具有相互作用,系统在不同的发展阶段会具有不同的潜力、连通度和恢复力特征,且具有相对稳定的发展趋势。

随着城镇化的快速发展,人类活动强度增强对自然环境的干扰加剧,被认为是影响地球生态系统的最主要的外部因素^[30]。适应性循环理论作为启发式模型^[31],它为理解复杂系统与韧性效应之间的相互作用关系提供了一个整体的、动态的过程。鄱阳湖水陆交错带作为承载着特殊且复杂的人地关系的复杂适应系统,被认为是典型的人地耦合系统^[24]。因此,引入适应性循环理论来构建该框架可以在空间尺度上直观地反映区域生态韧性。本文基于上述理论基础及研究区自身生态本底的特点,同时借鉴刘焱序等^[32]、景培清等^[33]的研究,以“潜力—连通度—恢复力”3个特征属性作为韧性准则层,选取12个相关指标来表征区域生态韧性,并基于熵权法确定指标权重(表1)。熵权法是一种客观赋权的方法,可有效减少主观因素的干扰^[34]。

(1)“潜力”维度的指标及其测度方法

潜力表示系统所控制的资源和要素,反映了区域生态系统韧性的属性和现状,包括地形地貌、植被特征及城镇化发展水平等。其中坡度可以表征水土流失、滑坡等地质灾害发生的可能性,以 2° 和 15° 作为韧性阈值

进行归一化计算;植被覆盖对维持区域生态系统服务功能具有重要作用,NDVI 能反映植被生长状况和生态系统健康程度,采用最大值合成法计算 NDVI 值,以 0.1 和 0.8 作为韧性阈值进行归一化计算;地表温度和夜间灯光强度能够在一定程度上反映社会经济发展与人类活动对区域生态系统产生的负面影响,前者由 ENVI 软件中的大气校正法反演生成,后者可以通过确定合适的灯光阈值并检查排除异常值后进行归一化处理,通常高值区表示高密度建筑和高强度人类活动,该区域作为潜在风险的滋生地,其值越高则意味着综合韧性水平越低。

(2)“连通度”维度的指标及其测度方法

连通度表示系统内部各个组成要素之间的相互作用强度和联系格局,反映不同景观结构和类型对生态韧性的响应程度以及人类活动对区域景观连通性的影响。其中香农多样性指数反映区域内景观镶嵌格局状况和景观类型的多样性特征,一般认为,区域内景观类型越丰富,邻近景观单元间的相互作用越强,系统因外界干扰而崩溃的风险相对越小,生态韧性越高;蔓延度指数用以表征自然生态系统景观斑块的延展性和连通度,其值越高则斑块破碎化程度越小,区域韧性越高;以上两个指标均采用 Fragstats 4.2 的移动窗口法以 1 km 移动半径计算。大面积的水体往往对区域生态环境有良好的促进与维持作用,水体距离可以通过 ArcGIS 10.2 的欧几里得距离计算得到,归一化后,水域本身韧性为 1,向周边不断衰减,直至为 0。城市建设与人类活动对景观连通性的干扰主要从建设用地距离和道路距离两个方面来体现,两者刻画了城市建设用地扩张对周围景观斑块的破碎化影响,基于 ArcGIS 10.2 的欧几里得距离计算得到,归一化后,建设用地与道路用地本身韧性为 0,向周边不断递增,直至为 1。

(3)“恢复力”维度的指标及其测度方法

恢复力表示系统经受干扰后可维持其功能与结构的能力,即韧性要素的适应力。系统韧性通常受到自身发展演替和外界环境干扰的共同影响,包括生态恢复的趋向、土地利用以及社会经济发展对系统的干扰趋势等。其中土地利用风险可以反映不同土地利用类型抵抗外界扰动的能力,参照景观生态风险评价中的脆弱度赋值方式,赋建设用地为 1,未利用地为 0.9,耕地为 0.5,草地为 0.2,水域为 0.1,林地为 0;植被覆盖变化趋势表征系统自身生态特征的变化趋势,选取近 10 年的 NDVI 作一元线性回归趋势分析,趋势增长越显著则表明区域环境承载力越大,综合韧性越高;夜间灯光强度变化趋势可以反映城市规模与人类活动带来的潜在风险对区域的干扰作用的变化趋势,利用近 10 年的夜间灯光强度作一元线性回归趋势分析,趋势增长表示城市化水平及人类活动增强,系统所受外界扰动加剧,区域韧性降低。

表 1 基于“潜力-连通度-恢复力”的生态韧性评价指标体系

Table 1 Index selection and weight definition based on “potential-connectedness-resilience”

准则 Criterion	指标 Index	内涵 Connotation	类型 Type	权重 Weight
潜力 Potential	坡度(X_1)	滑坡等地质灾害	反向	0.0034
	植被覆盖(X_2)	植被空间分布状况	正向	0.1830
	地表温度(X_3)	地表热环境影响	反向	0.0151
	夜间灯光强度(X_4)	经济社会发展情况	反向	0.1355
连通度 Connectedness	香农多样性指数(X_5)	景观类型空间变异性	正向	0.0809
	蔓延度指数(X_6)	斑块的延展性和连通度	正向	0.0451
	水体距离(X_7)	系统的多种生态系统服务能力	反向	0.0032
	建设用地距离(X_8)	城市化对于自然生态的影响	正向	0.1263
恢复力 Resilience	道路距离(X_9)	城市建设对生态连通性的干扰	正向	0.1168
	土地利用风险(X_{10})	土地利用类型抗干扰能力	反向	0.0150
	植被覆盖变化趋势(X_{11})	生态系统的抗干扰恢复能力趋势	正向	0.0044
	夜间灯光强度变化趋势(X_{12})	社会经济发展对生态系统干扰趋势	反向	0.2713

2.3 地理探测器

地理探测器是探测研究区的空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,其核心思想是基于如下假设:如果某个自变量对因变量有重要影响,那么二者的空间分布应具有一定的相似性^[35]。本研究采用因子探测和交互作用探测来分析鄱阳湖水陆交错带生态韧性各影响因素对其空间分异的强度大小,明确各因素之间的交互关系。

因子探测用于探测 Y 的空间分异性,以及探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异,用 q 值度量^[35],公式如下。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (1)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (2)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (3)$$

式中, SST 为全区总方差(Total Sum of Squares), SSW 为层内方差和(Within Sum of Squares), q 为因子 X 对因变量 Y 的解释程度,取值范围为 0—1,值越大则表示空间分异性越明显。

交互作用探测用于分析不同影响因子之间的相互作用,当两个或以上因子共同作用时,是否能够增强或减弱对因变量的解释程度。判定方法是首先分别计算两种因子 X_1 和 X_2 对 Y 的 q 值,记为 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$,并计算二者叠加后的因子的 q 值,记为 $q(X_1 \cap X_2)$,并对 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较。交互作用类型如表 2 所示。

表 2 探测因子交互作用类型

Table 2 Interaction types of the detection factors

交互作用类型 Type of interaction	判断标准 Judgment criterion
非线性减弱 Nonlinear weaken	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱 Univariate nonlinear weaken	$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强 Bivariate enhance	$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强 Non-linear enhance	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
独立 Independent	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

q : 因子解释力 Explanation of different factors; X_1, X_2 : 探测因子 Detecting factors

3 结果与分析

3.1 鄱阳湖水陆交错带生态韧性时空演变特征

2000 年、2010 年和 2020 年鄱阳湖水陆交错带生态韧性各维度及综合韧性分布如图 2 所示。从时间变化上来看,2000—2020 年鄱阳湖水陆交错带生态韧性指数先增后减,整体呈上升趋势。在退田还湖等生态工程实施初期(即 2000 年)鄱阳湖水陆交错带生态韧性平均值为 0.52,生态工程实施后的 10 年(2010 年)鄱阳湖水陆交错带的生态韧性指数升高明显,平均值为 0.62,但 2020 年生态韧性总体平均水平下降至 0.54。其中潜力和恢复力均呈现出先上升后下降、总体增长的趋势,而连通度则表现为先下降后上升、总体减少的趋势。从空间演化上来看,2000—2020 年鄱阳湖水陆交错带生态韧性低值区经历了“小集聚大分散→大集聚小分散→整体分散”的空间演变格局,低值区主要在西部、北部及靠近南昌市的区域集中分布。庐山、东部林区以及南部农耕区得益于较高的生态潜力和恢复力,形成韧性高值区,这些区域人类活动强度较低及丰富的植被覆盖,景观完整性保存较好,系统生态功能与结构相对稳定,从而导致韧性高值区始终在该区域集中。通过与潜力、连通度和恢复力图层对比发现,综合韧性与这些维度之间的空间分布格局具有一定的继承性,也有一些显著变化,这一现象体现了鄱阳湖水陆交错带生态韧性时空演变的多样性、复杂性、综合性特征。

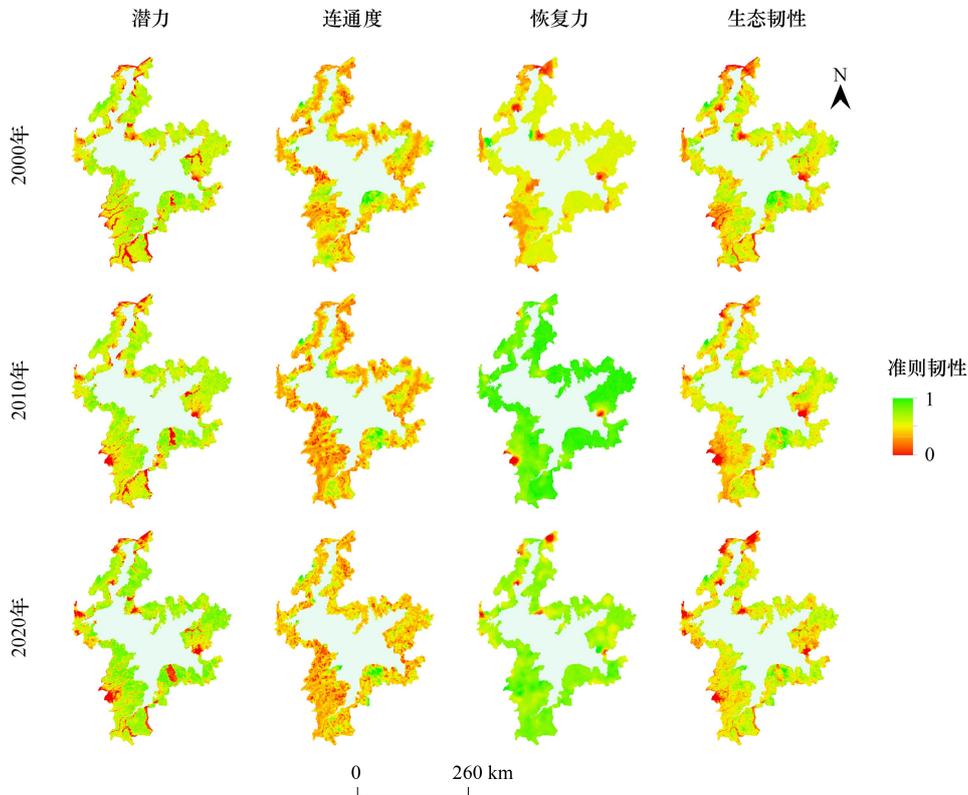


图2 鄱阳湖水陆交错带生态韧性空间分布格局

Fig.2 Spatial patterns of ecological resilience in the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake

根据鄱阳湖水陆交错带生态韧性的空间分布特征,从乡镇尺度出发,选取韧性低值区(I、II、III)和高值区(IV)共四个典型区域进行分析,如图3所示。在I区中,2000年韧性低值区主要在白沙洲乡和鄱阳镇西南部出现连片发展现象,随着生态恢复工程的实施,白沙洲乡韧性指数上升,由于人口密度的增加,鄱阳镇韧性低值区覆盖范围出现向团林乡和四十里街扩散的趋势;2020年韧性低值区主要集中在白沙洲乡及鄱阳镇东部与南部。在II区中,由于该区域的经济水平较高,城市范围的持续扩大对系统的环境承载力产生消极作用,导致区域适应力不足,故在2000—2010年间昌东镇和麻丘镇的韧性指数明显下降;2020年该区域受益于发展生态经济的政策,政府寻求生态环境与经济发展之间的平衡,环境污染治理力度加大,区域系统的恢复力指数增加,从而使该区域内四个乡镇的韧性指数得到有效提升。在III区中,2000年的韧性低值区在马影镇、双钟镇及新港镇集中分布,随着生态环境重视程度的不断提升,政府在2000—2010年间出台了一系列生态恢复工程的措施,使得系统自身的生态修复能力显著提升,表现为韧性低值区覆盖范围缩小;然而由于近年来城镇化快速发展的巨大需求,区域生态系统面临着水土流失、土壤退化、污染排放等环境恶化问题,表现为低韧性水平区域向凰村乡和虞家河乡逐渐扩展。在IV区中,海会镇、东牯山林及温泉镇得益于庐山的生态效应,三个乡镇的生态空间整体性强,有利于发挥区域景观的生态功能,研究期间,韧性高值区范围持续扩大,生态韧性整体发展状况良好。

3.2 基于乡镇尺度的系统适应性生态韧性循环阶段分析

基于适应性循环理论的定量研究,对鄱阳湖水陆交错带2000年、2010年和2020年的85个乡镇所处的韧性演化阶段进行空间落位(图4)。2000年研究区各乡镇韧性演化处于开发(r)、保护(K)、释放(Ω)、重组(α)阶段的乡镇数量分别占9.4%、20.0%、52.9%、17.7%,而2020年各阶段乡镇数量占比为49.4%、28.3%、8.2%、14.1%,可见鄱阳湖水陆交错带大部分乡镇在2000—2020年间经历了“释放→重组→开发”的演化交替过程。

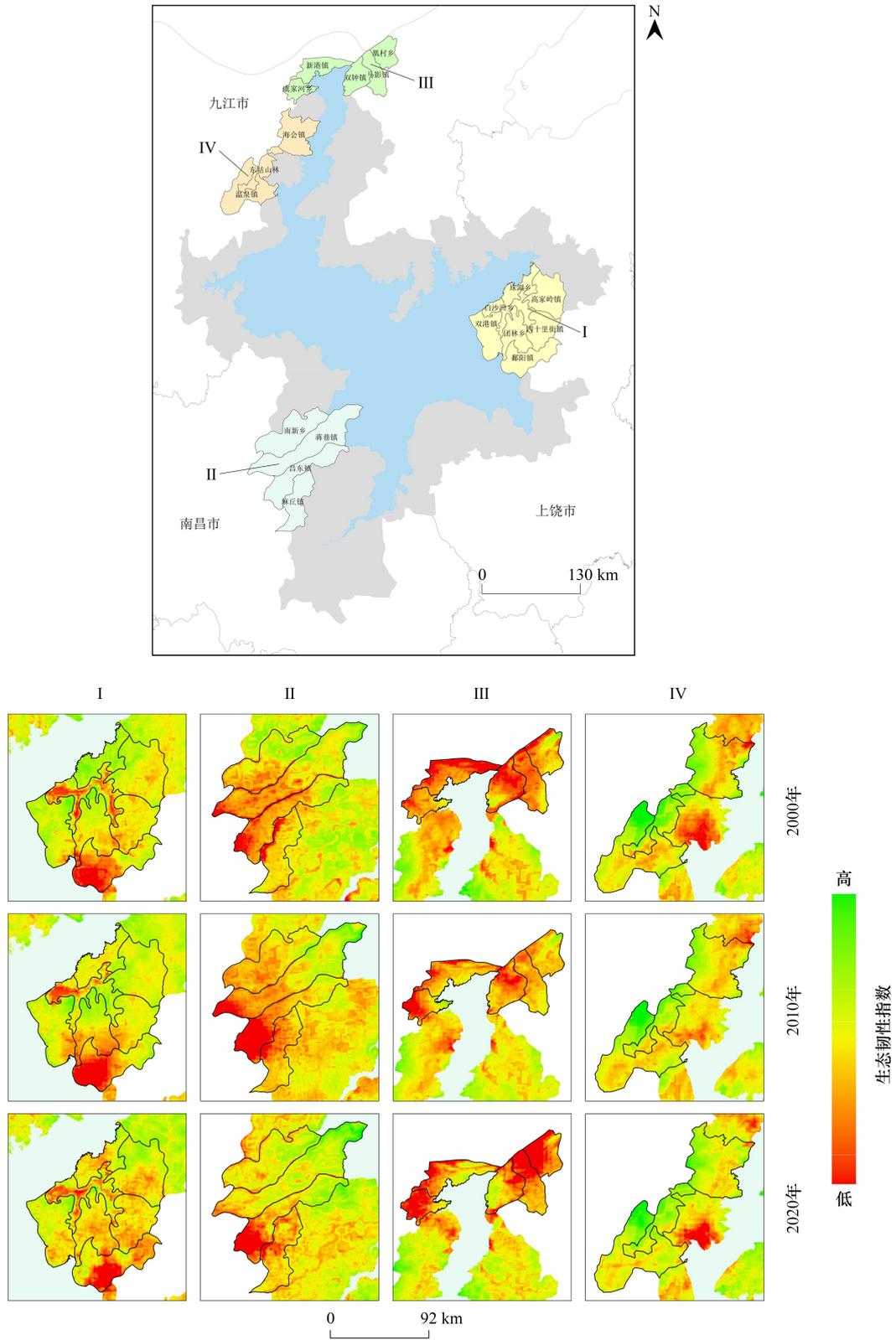


图3 基于乡镇尺度的生态韧性区域化空间分布格局

Fig.3 Regionalized spatial patterns of ecological resilience on the basis of township level

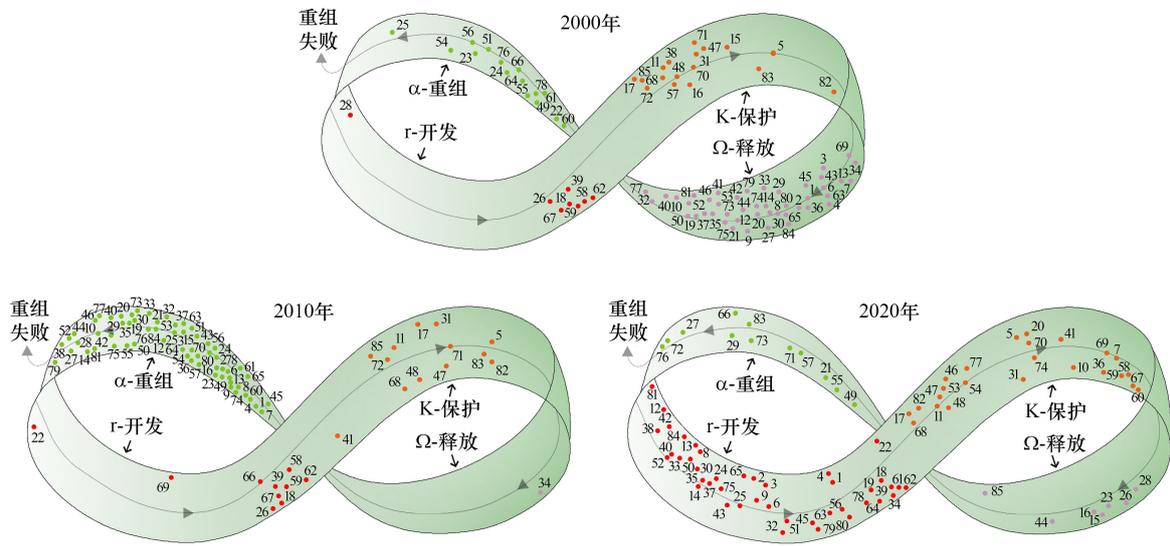


图 4 各乡镇系统适应性生态韧性循环阶段

Fig.4 Stage of adaptive ecological resilience cycle in each township system

2000—2010 年鄱阳湖水陆交错带大部分乡镇地区实现了“释放→重组”的阶段转变,即区域系统的发展过渡期。由于研究区域受到 1998 年特大洪水的冲击与干扰,其系统所承受的外界压力在较短时间内迅速增加,导致鄱阳湖水陆交错带生态系统的结构和功能发生紊乱,由此引发了系统将所控制的资源和要素大量释放,使得原本紧密有序的系统开始变得混乱无序。此阶段为生态破坏严重、系统难以维系自身发展的极端情况。在快速释放之后,系统将会创造新的发展机遇,以此进入缓慢重组阶段。此十年间,在政府提出的湿地保护与恢复工程、鄱阳湖流域造林绿化“一大四小”工程以及水土保持生态建设工程等众多生态治理工程的实施背景下,系统功能逐步重组并恢复,资源开始积累并创新,系统韧性演化呈现出新的发展趋势,即重组(α)阶段。随后,2009 年国务院批准实施的《鄱阳湖生态经济区规划》倡导推进生态文明与经济社会发展协调统一,研究区域开始对新的政策体制进行响应,使得 2010—2020 年鄱阳湖水陆交错带开始以生长积累为主,当区域资源和资本积累达到一定高度时,系统内部潜能开始增长,由此进入快速发展阶段。此阶段主要表现为建设用地扩张、人群集聚等,在社会经济迅速发展的同时,对生态环境的压力与胁迫增强,城市用地不断压缩生态空间,导致社会经济发展与生态保护之间的矛盾与日俱增。

通过对 2000 年、2010 年和 2020 年各乡镇韧性演化阶段的落位分析,预测 2020 年以后鄱阳湖水陆交错带大部分乡镇的适应性生态韧性将经历“开发(r)→保护(K)”的演化迁移。在此演化阶段内,系统潜力增速放缓、连通度持续增加、恢复力持续降低,快速发展的城镇化是该阶段演化的重要驱动因素,如何打破固有局面实现区域新增长是该阶段各乡镇生态系统可持续发展的关键问题。而对于已处在保护(K)阶段的乡镇,在发展社会经济的同时,要努力提高公众的环境保护意识,积极实现社会经济发展和生态环境保护之间的动态平衡。另外,应采取相应的措施延缓研究区各个乡镇向释放阶段发展的过程。

3.3 鄱阳湖水陆交错带生态韧性的影响因素分析

3.3.1 因子探测结果及分析

基于公式(1)计算得到 2000 年、2010 年、2020 年各影响因子对生态韧性的解释度,如图 5 所示。从因子探测结果可以看出,2000 年各因子对生态韧性影响程度排名前五为 X_{12} (夜间灯光强度变化趋势) $>X_4$ (夜间灯光强度) $>X_9$ (道路距离) $>X_2$ (植被覆盖) $>X_8$ (建设用地距离);其中,解释度 q 值大于 0.3 的因子有夜间灯光强度变化趋势、夜间灯光强度及道路距离,是影响生态韧性的主要因子,表明 2000 年研究区生态韧性主要受到社会经济发展水平的影响。2010 年各因子影响程度前五为 X_{12} (夜间灯光强度变化趋势) $>X_4$ (夜间灯光强度)

$>X_2$ (植被覆盖) $>X_8$ (建设用地距离) $>X_9$ (道路距离);在 2000—2010 年间,随着生态环境重视程度的不断提升,政府采取了一系列生态恢复工程的措施,使得植被覆盖对区域韧性的影响程度有所提高,所以社会经济发展水平和植被覆盖程度成为该时期韧性变化的主导因素。2020 年各因子影响强度排名前五为 X_4 (夜间灯光强度) $>X_{12}$ (夜间灯光强度变化趋势) $>X_8$ (建设用地距离) $>X_2$ (植被覆盖) $>X_{10}$ (土地利用风险),这些影响因子的解释力均超过 0.3,说明研究区正处于社会经济快速发展阶段,建设用地持续扩张,该时期生态韧性受到社会经济发展水平和自然地理条件多要素因子的影响。

通过对比各时期的影响因子解释度可以看出,各因子对生态韧性的影响程度在不同阶段存在差异,但 X_4 (夜间灯光强度)和 X_{12} (夜间灯光强度变化趋势)两个因子在各时期对生态韧性的解释度均表现为较强,而 X_1 (坡度)、 X_3 (地表温度)、 X_6 (蔓延度指数)和 X_7 (水体距离)等自然地理类因子对韧性的解释度相对较弱。由于鄱阳湖水陆交错带是典型的人地耦合系统,具有复杂的人地关系,其人类活动成为研究区生态韧性格局变化的主导因素。

3.3.2 交互作用探测结果及分析

交互探测结果如图 6 所示,各时期影响因子间的交互作用对生态韧性的解释力均大于单因子作用,且都表现为双因子或非线性增强,即生态韧性水平变化是多种因素相互作用而形成的结果,这种现象说明了生态韧性的格局变化具有多样性、复杂性和综合性特征。由图 5 可知,2000 年 X_9 (道路距离)和 X_{12} (夜间灯光强度变化趋势)交互作用影响力最高,而 2010 年和 2020 年均是 X_2 (植被覆盖)和 X_{12} (夜间灯光强度变化趋势)交互作用的解释度排名第一;植被覆盖、夜间灯光强度、建设用地距离及夜间灯光强度变化趋势与其他探测因子的交互作用结果进一步说明这些因子为鄱阳湖水陆交错带的主要影响因素,且各因子与其他探测因子的交互作用解释力呈现出逐年增强的趋势。虽然坡度、蔓延度指数、植被覆盖趋势等自然地理类因素的单因子解释力较低,但与社会经济类因子的交互作用均呈增强效应,其中土地利用风险和植被覆盖趋势与其他因子的交互作用在 2010—2020 年间逐渐增强,成为该阶段研究区生态韧性的次影响因素。

4 讨论

4.1 水陆交错带生态韧性发展演变规律分析

本研究发 2000—2020 年间鄱阳湖水陆交错带生态韧性指数先增后减,总体趋于上升。前 10 年区域整体韧性水平提升得益于生态工程的实施,如湿地保护与恢复工程(2003 年)、鄱阳湖流域造林绿化“一大四小”工程(2008 年)以及水土保持生态建设工程(2010 年)等,使得生态系统的恢复力显著提高。由于鄱阳湖水陆交错带持续受到城镇化快速发展的影响,人口要素汇聚、建设用地的扩张不断压缩耕地等生态空间,削弱了区域生态系统的服务能力和稳定性,进而导致后 10 年的系统潜力和恢复力下降明显,是鄱阳湖水陆交错带生态韧性降低的主要原因。在研究期内,人类活动成为区域生态韧性格局变化的主导因子且影响强度不断增强,人类对生态环境的干预属性具有显著的空间分异特征。在城镇化水平较高的区域,城市和道路用地扩张侵占非建设用地,生态用地被不断分割,人类活动对系统的生态安全起到明显的负面作用;在生态本底条件优越的区域,生态工程建设成效显著,人类活动对区域生态潜力的增加起着重要的促进作用,该结果与刘婷婷等^[36]成果

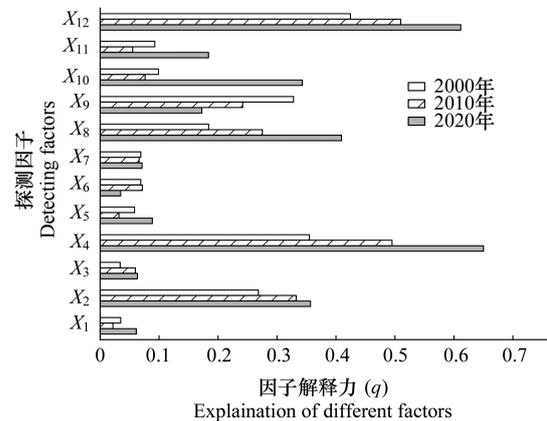


图 5 研究区生态韧性变化因子探测结果

Fig.5 Detection results of ecological resilience change factors in the study area

X_1 :坡度; X_2 :植被覆盖; X_3 :地表温度; X_4 :夜间灯光强度; X_5 :香农多样性指数; X_7 :水体距离; X_8 :建设用地距离; X_9 :道路距离; X_{10} :土地利用风险; X_{11} :植被覆盖变化趋势; X_{12} :夜间灯光强度变化趋势

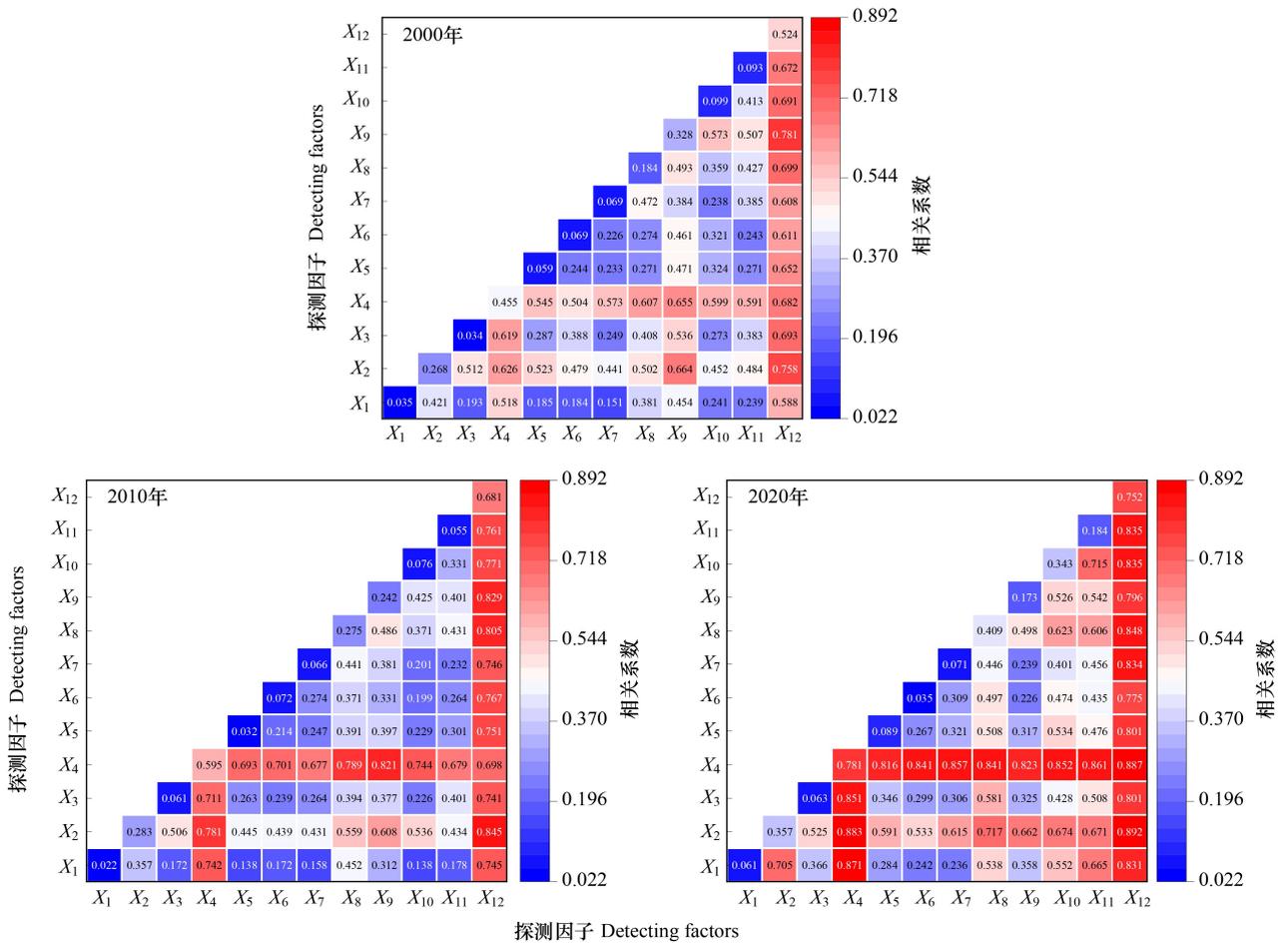


图6 研究区各因子交互探测结果

Fig.6 Interactive detection results of various factors in the study area

相似,人类活动可通过直接改造和间接影响对鄱阳湖水陆交错带生态韧性产生正面促进或负面干扰的影响。

4.2 水陆交错带与城市地区韧性发展对比

水陆交错带作为景观开发与保护的敏感区域,具有动态性和难以进入性,其开发利用格局对区域生态安全尤为重要^[37]。对于大部分城市体系来说,其面临的不确定风险较多来源于城市规模扩张所带来的慢性压力,且城市地区的各项基础设施较为完善,在面对外界风险冲击时,城市所形成的基础设施韧性将给予经济、社会及生态韧性等方面强有力的支撑作用,从而构建了更大范围的风险防范屏障^[38],故城市系统能更快地完成自我更新。然而由于水陆交错带地区受季节性淹没的影响,其面临的风险既包括自然灾害带来的急性冲击,也包括不确定的人为扰动压力,同时水陆交错带人地关系地域系统复杂多样,包括人-水关系、人-鸟关系以及人-渔关系等多个层面^[24],其主体多元化、要素多样性导致了水陆交错带各乡镇地区发展缓慢且不稳定,甚至乡镇系统演化极易进入停滞状态,该区域难以仅依靠自身能力完成系统演替的突破,因此水陆交错带乡镇系统韧性发展较城市地区更具有复杂性和无序性。

4.3 创新与展望

本研究通过构建三维指标体系对鄱阳湖水陆交错带这一特殊的地理过渡性空间的生态韧性进行评价,相较于传统的针对植被、生物、水文等自然地理类要素开展的水陆交错带生态恢复与重建研究更具系统性和综合性。在研究区域上,现有研究多关注洞庭湖^[39]、巢湖^[2]和漓江^[40]等水陆交错带地区,而对鄱阳湖研究较少;在指标选取上,一定程度上考虑了人类活动和社会经济发展对区域生态韧性的影响。同时,鄱阳湖水陆交

错带因为历史原因,形成了大量的乡(镇)、村等聚落景观^[41],该区域人与环境相互作用强烈,是一个很具代表性的人地耦合系统,故本研究可为后续其他类型的水陆交错带地区在生态环境等方面的研究提供一定的参考意义;在研究尺度上,目前有关生态韧性的研究多以城市为单元^[17-19],鲜有学者从乡镇尺度对生态韧性进行讨论,尺度的精细化有利于明确各乡镇生态韧性的基本状况,初步预测未来发展阶段及其特征,能更好地在规划层面上实现因地制宜。然而由于乡镇系统自适应性循环能力较为薄弱,其生态韧性发展具有更多的复杂性和不确定性,在对研究区各乡镇进行韧性发展阶段落位时出现小部分乡镇会长期陷入病态陷阱(即重组失败)阶段。因文章篇幅受限,本文未对鄱阳湖水陆交错带各乡镇发展过程中可能进入的病态陷阱进行详细解释,未来将通过实地调查或访谈对其阶段及原因进行深入分析。因此,更加科学和准确地对研究区域各乡镇生态系统韧性演化进行模拟和预测将成为未来深入研究的重点议题。

5 结论

本文基于生态适应性循环理论,构建“潜力-连通度-恢复力”三维生态韧性评价指标体系,对鄱阳湖水陆交错带 2000 年、2010 年、2020 年的生态韧性进行评估,分析其时空演变特征并采用地理探测器对影响因素进行探讨。主要得到以下结论:(1)2000—2020 年鄱阳湖水陆交错带生态韧性水平先增后减,总体呈上升趋势;其韧性低值区经历了“小集聚大分散→大集聚小分散→整体分散”的空间演化特征,中高韧性区覆盖范围始终较大,区域综合韧性与系统生态本底紧密相关,具有显著的空间分异特征。(2)根据适应性循环理论对鄱阳湖水陆交错带各乡镇进行生态韧性演化阶段落位,研究发现 2000—2020 年间大部分乡镇经历了“释放→重组→开发”的演化交替过程,预测研究区内大部分乡镇未来可能会进入保护阶段,如何打破现有局面实现区域新增长是目前大多乡镇生态系统可持续发展的关键问题。(3)因子探测及交互作用探测结果表明,在不同时期内鄱阳湖水陆交错带生态韧性驱动因子的影响强度存在差异,植被覆盖、夜间灯光强度、建设用地距离以及夜间灯光强度变化趋势成为研究区韧性格局变化的主导驱动力,因子间的交互作用主要为非线性增强,且影响程度出现逐年递增趋势,未来应立足区域生态系统自然生态本底的韧性支撑能力,通过生态系统功能提升与空间结构优化,促进人类活动与生态系统的良性互动。

参考文献(References):

- [1] 姜允芳,武雅芝,丁冬琳. 崇南水陆交错带景观整体适应性评价与提升. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 449-458.
- [2] 姚飞,陈龙乾,王秉义,张婷,周天建,张宇. 巢湖水陆交错带土地利用景观格局梯度分析. 水土保持研究, 2016, 23(3): 214-219.
- [3] Casey R E, Taylor M D, Klaine S J. Mechanisms of nutrient attenuation in a subsurface flow riparian wetland. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(5): 1732-1737.
- [4] 赵长盛,陈庆峰,赵明,蒋利,王利红,李剑. 我国北方水陆交错带的功能与发展方向研究. 安徽农业科学, 2012, 40(30): 14823-14826.
- [5] 周国华,彭佳捷. 空间冲突的演变特征及影响效应——以长株潭城市群为例. 地理科学进展, 2012, 31(6): 717-723.
- [6] 陈昕,彭建,刘焱序,杨旸,李贵才. 基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [7] 于婧,汤昇,陈艳红,张蕾,聂艳,邓文胜. 山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建——以张家界市为例. 生态学报, 2022, 42(4): 1290-1299.
- [8] 霍童,张序,周云,陈伟. 基于暴露-敏感-适应性模型的生态脆弱性时空变化评价及相关分析——以中国大运河苏州段为例. 生态学报, 2022, 42(6): 2281-2293.
- [9] Cui H L, Liu M, Chen C. Ecological restoration strategies for the topography of loess plateau based on adaptive ecological sensitivity evaluation: a case study in Lanzhou, China. *Sustainability*, 2022, 14(5): 2858.
- [10] 吴远翔,陆明,金华,潘晓钰. 基于生态服务-生态健康综合评估的城市生态保护规划研究. 中国园林, 2020, 36(9): 98-103.
- [11] Li Y C, Fan Z Y, Li Z H, Zhang X, Du R Y, Li M H. Exploring development trends of terrestrial ecosystem health: a case study from China. *Land*, 2021, 11(1): 32.
- [12] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [13] 曾坚,王倩雯,郭海沙. 国际关于洪涝灾害风险研究的知识图谱分析及进展评述. 灾害学, 2020, 35(2): 127-135.
- [14] 李杨帆,向枝远,杨奕,王泉力,李艺. 基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用. 自然资源学报, 2020, 35(1): 130-140.

- [15] Zaidi R Z, Pelling M. Institutionally configured risk; assessing urban resilience and disaster risk reduction to heat wave risk in London. *Urban Studies*, 2015, 52(7): 1218-1233.
- [16] Campanella T J. Urban resilience and the recovery of new Orleans. *Journal of the American Planning Association*, 2006, 72(2): 141-146.
- [17] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 谢金燕, 苏坤. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. *地理学报*, 2021, 76(4): 973-991.
- [18] 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. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(9): 1975-1987.
- [19] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析. *经济地理*, 2022, 42(8): 51-61.
- [20] Feng X H, Tang Y, Bi M Y, Xiao Z P, Zhong Y X. Analysis of urban resilience in water network cities based on scale-density-morphology-function (SDMF) framework: a case study of Nanchang city, China. *Land*, 2022, 11(6): 898.
- [21] 吕桦, 钟业喜. 鄱阳湖生态经济区地域范围研究. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(2): 249-252.
- [22] 欧明辉, 钟业喜, 马宏智, 冯兴华, 肖泽平. 采砂活动影响下鄱阳湖水陆交错带形态及景观格局变化研究. *生态学报*, 2023, 43(11). DOI: 10.5846/stxb202112223631.
- [23] 黄怀萱. 基于高分 1 号影像的鄱阳湖水陆交错带植被演替分析. *江西科学*, 2019, 37(3): 335-340, 427.
- [24] 马宏智, 钟业喜, 欧明辉, 肖泽平, 冯兴华. 基于人地关系视角的鄱阳湖水陆交错带范围划分. *生态学报*, 2022, 42(12): 4959-4967.
- [25] 杨桂山, 徐昔保. 长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”的基础与策略. *中国科学院院刊*, 2020, 35(8): 940-950.
- [26] 张立贤, 任浙豪, 陈斌, 宫鹏, 付昊桓, 徐冰. (2021). 中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集 (1984-2020). 国家青藏高原科学数据中心, DOI: 10.11888/Socioeco.tpdc.271202. CSTR: 18406.11.Socioeco.tpdc.271202.
- [27] 孙晶, 王俊, 杨新军. 社会-生态系统恢复力研究综述. *生态学报*, 2007, 27(12): 5371-5381.
- [28] Anson Mackay. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(6): 2407.
- [29] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A P. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): art5.
- [30] 张玉娇, 曾杰, 陈万旭, 黄成. 基于适应性循环的丹江口库区生态风险评价. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 349-360.
- [31] Luo F H, Liu Y X, Peng J, Wu J S. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive cycle framework. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 125-134.
- [32] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 张甜, 魏海. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. *地理学报*, 2015, 70(7): 1052-1067.
- [33] 景培清, 张东海, 艾泽民, 郭斌. 基于格局-过程生态适应性循环三维框架的自然景观生态风险评价——以黄土高原为例. *生态学报*, 2021, 41(17): 7026-7036.
- [34] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 贾明璐. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析. *地理科学*, 2013, 33(11): 1323-1329.
- [35] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [36] 刘婷婷, 杨晓霞, 叶许春, 吴娟, 刘佳. 人类活动对 2000—2020 年鄱阳湖流域陆地植被覆盖变化的影响. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 320-329.
- [37] Tan J B, Chen M Q, Cheng A, Zhao G, Lei G B, Tang Y, Wang B, Li A N. Inducing flooding index for vegetation mapping in water-land ecotone with Sentinel-1 & Sentinel-2 images: a case study in Dongting Lake, China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109448.
- [38] 李彦军, 马港, 宋舒雅. 长江中游城市群城市韧性的空间分异及演进. *区域经济评论*, 2022(2): 88-96.
- [39] 汪朝辉, 王克林, 李仁东, 熊艳, 许联芳. 水陆交错生态脆弱带景观格局时空变化分析——以洞庭湖区为例. *自然资源学报*, 2004, 19(2): 240-247.
- [40] 梁士楚, 苑晓霞, 卢晓明, 许桂芬, 覃艳, 姜勇. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征. *生态学报*, 2019, 39(8): 2752-2761.
- [41] 欧明辉, 钟业喜, 陈华钦, 马宏智, 王文慧. 鄱阳湖水陆交错带湖岛型聚落空间形态特征与优化. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(5): 533-541.