

引用格式: 盖美, 徐晶晶, 岳鹏. 环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联网络特征及形成机制[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 565-582. [Gai M, Xu J J, Yue P. Characteristics and formation mechanism of spatial association network of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 565-582.] DOI: 10.18402/resci.2024.03.10

# 环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联网络特征及形成机制

盖美<sup>1,2</sup>, 徐晶晶<sup>1,2</sup>, 岳鹏<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁师范大学海洋可持续发展研究院教育部人文社科重点研究基地, 大连 116029;  
2. 辽宁省“海洋经济高质量发展”高校协同创新中心, 大连 116029)

**摘要:**【目的】人地关系地域系统理论作为地理学研究的核心,也是陆海交互作用强烈的海岸带可持续发展研究的重要理论基础。厘清海岸带人地系统韧性空间关联网络特征及形成机制,有助于把握韧性水平跨区域协同发展并进一步丰富海岸带科学研究。【方法】基于2005—2019年环渤海地区海岸带17个城市面板数据,利用可变模糊识别模型测度海岸带人地系统韧性水平,并在此基础上运用修正的引力模型和社会网络分析法对其空间关联网络特征与形成机制进行研究。【结果】①环渤海地区海岸带人地系统韧性存在显著空间关联性,但网络关联结构仍较为疏松;②天津、青岛、烟台和大连等城市在关联网络中占据主导地位,沧州、日照、丹东等城市处于空间关联网络的边缘位置;③锦州、营口、葫芦岛等属于“净受益”板块,潍坊、滨州、东营属于“双向溢出”板块,青岛、唐山和天津属于“净溢出”板块,烟台和大连属于“经纪人”板块;④QAP回归模型揭示了地理空间邻近、经济水平差异、环境质量差异、人力资本差异和信息化水平差异是海岸带人地系统韧性空间关联网络形成机制的主导因子。【结论】实现海岸带人地系统韧性空间关联网络紧密化发展,需促进地区间资源要素有序流动并解决要素错配问题,有效提升优势互补、合作交流机制。

**关键词:** 海岸带韧性; 人地关系地域系统; 空间关联网络; 社会网络分析; 环渤海地区

DOI: 10.18402/resci.2024.03.10

## 1 引言

海岸带以其丰富的自然资源、显著的区位优势对中国社会经济发展起着重要的推动作用,但高强度的开发利用活动所导致的资源枯竭、环境污染和人地矛盾等问题严重制约了海岸带可持续发展<sup>[1,2]</sup>。中国“十四五”规划和2035年远景目标纲要中明确提出“坚持陆海统筹,发展海洋经济,建设海洋强国”,并首次将“韧性城市”概念纳入国家战略规划中。在此背景下,海岸带韧性概念的提出成为衡量海岸带系统抵御或吸收外界干扰的重要指标,也是实现陆海统筹战略目标、推动中国海岸带持续稳定

发展的重要途径。与此同时,在市场化进程和区域协调发展战略的驱动下,地区间要素流动性日益增强,使得海岸带韧性在空间尺度上逐渐呈现出多中心、多线程的复杂空间关联特征。因此,研究海岸带韧性水平的空间关联网络特征与形成机制,对把握韧性水平跨地区协同发展及响应陆海统筹战略均具有迫切的现实意义。

“韧性”概念自提出便成为国内外学者跨学科、多范式研究的热点,早在IPCC的第二份报告中,韧性一词便与海岸带管理与气候变化适应方面相联系,后多项研究也证实了海岸带韧性的重要性<sup>[3,4]</sup>。

收稿日期: 2023-04-04 修订日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42276231); 教育部人文社科重点研究基地重大项目(22JJD790028); 辽宁省教育厅项目(LJKMZ20221408); 2023年辽宁师范大学高端科研成果培育资助项目(23GDL005)。

作者简介: 盖美,女,辽宁大连人,博士,教授,博士生导师,研究方向为区域经济与可持续发展。E-mail: gaimei71@163.com

通讯作者: 徐晶晶,女,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为海洋经济与区域韧性。E-mail: crystal\_max1208@163.com

目前,国外学者已围绕海岸带韧性开展了大量研究,主要集中在以下两个方面:一是海岸带韧性概念理论研究,以海岸带地貌韧性<sup>[5]</sup>、生态韧性<sup>[6]</sup>、灾害韧性<sup>[7]</sup>和社会生态韧性<sup>[8]</sup>为主,由较为单一的系统逐步扩展到相对复杂的非线性系统,但更多强调了海岸带“地”的作用和影响,忽视了海岸带“人”的主观能动性。事实上,海岸带陆海交界的特殊区位决定了其不仅承受着地震、海啸、风暴潮等自然灾害的外源性扰动,更重要的是人口集聚、海岸开发、工业污染排放等一系列内源性扰动,关键在于人地矛盾改变了海岸带韧性自然格局。只有从陆海统筹角度解决人地冲突问题,才能从根本上解决海岸带发展中的人地、人海和陆海矛盾,从而有效提升海岸带韧性能力。即人地系统作为地理学的研究核心<sup>[9]</sup>,更是陆-人-海关系的纽带<sup>[10]</sup>,也是海岸带韧性的研究重点。因此海岸带人地系统韧性可理解为在一系列内外扰动和冲击下,海岸带人地系统通过调整内部要素结构来抵御和适应各种复杂性和不确定性,以推动陆海复合系统可持续发展的能力。需要阐明的是,尽管社会生态系统和人地系统内涵相似,但从不同的学科视野出发,二者在相互联系的基础上仍存在一定区别。社会生态系统研究重点为社会发展与生态系统之间的协同性,对空间分异规律阐述较弱<sup>[11]</sup>;人地系统则突出“人”的主体作用、“地”的核心属性以及人地关系矛盾为本质要素,强调空间地域性、系统性和层次性<sup>[12]</sup>,进一步从广度和深度上深化和创新了人地作用和陆海交互双重影响下海岸带韧性的时空分异及其变化规律研究。二是海岸带韧性量化研究,研究重点在于指标体系的构建与研究方法的选择。指标选择方面大部分学者从系统要素层出发,以经济韧性、社会韧性、制度韧性、生态韧性等层面来衡量海岸带城市对灾害的抵御能力<sup>[13]</sup>,也有学者基于“抵抗-恢复-重构-转型”<sup>[14]</sup>、“预防-缓冲-恢复-适应”<sup>[15]</sup>等韧性各要素维度展开研究。然而,单一目标/维度的指标体系难以全面、清晰地解析韧性复杂动态机制,且指标多以静态为主,将海岸带地区之间视为相对孤立的系统。而将不同目标与维度指标结合为矩阵,并加入动态指标,方可有效深入研究海岸带韧性及内部之间的互动关系。在研究方法上已有研究多采用

高级环流模型<sup>[16]</sup>、测量模型<sup>[17]</sup>等对海岸带地貌仿真模拟或借用指数法<sup>[18]</sup>测度海岸带韧性水平,但尚未形成通用的评估指数和模型框架。

国内对于海岸带韧性的研究仍处于初步阶段,仅李扬帆等<sup>[19]</sup>提出海岸带韧性思想可作为陆海统筹生态管理的核心机制,大部分研究以中国沿海省(市)的海洋经济韧性<sup>[20]</sup>、海洋生态韧性<sup>[21]</sup>为主,少有以陆海统筹为指引将海岸带视为复合系统,且研究区域偏大,很难体现区域内部发展的不均衡性。城市作为各种空间实践的载体,是人口、经济、社会、生态等各要素流动的重要支撑,也是实现海岸带优化发展和规划的基础空间地理单元。综合国内外关于海岸带韧性研究,发现已有研究多基于“属性数据”对海岸带韧性进行空间量化,难以反映出海岸带各地区空间关联关系,而社会网络分析法可以对社会关系结构及其属性加以分析并精确量化社会实体间各种关系<sup>[22]</sup>,但该方法多用于研究生态<sup>[23]</sup>、经济<sup>[24]</sup>、旅游<sup>[25]</sup>、物流<sup>[26]</sup>和水资源<sup>[27]</sup>等层面,对于韧性要素特征的海岸带空间关联网研究较为缺乏。尤其是在自然灾害、气候变化、疫情肆虐等突发性灾害和愈发复杂的人地关系矛盾的背景下,海岸带单一城市韧性难以抵御外在冲击,极有可能使危机要素产生由点及面的传播效应,因此对海岸带韧性的空间关联网展开研究显得尤为必要。值得注意的是,现有研究从“海洋经济网络结构”视角<sup>[28]</sup>对沿海地区开展韧性评价,相较于本文,二者均结合了“区域韧性”和“城市网络”概念,但网络韧性主要通过“流”来研究城市间的联系,如人流、物流、资金流、知识流等,侧重于城市节点间关系的网络结构韧性<sup>[29,30]</sup>;韧性网络则是在城市韧性基础上进行网络化,如城市群间形成网络协同效应<sup>[31,32]</sup>,强调的是整个区域应对外部冲击的抵抗恢复能力。故海岸带韧性网络研究相对综合性更强,能够揭示城市之间复杂关联和相互依赖性,为更好地理解 and 提高海岸带系统韧性提供了更全面和深入的视角。

总结可知,目前国内外研究围绕海岸带韧性概念、韧性水平测度等进行了有益的探索,但仍存在一定不足:①多偏向单要素研究,对现实问题解释力不足。海岸带人地系统具有风险多样性、系统动态性和开放综合性等特征,其所面临的扰动主要来

2024年3月

源于陆海交互作用下的人地矛盾,因此需以人地和谐共生为核心的人地关系地域系统为导向,形成相对深层次的海岸带人地系统韧性研究逻辑。②指标体系构建片面化,忽视了海岸带系统的复杂性。需明确海岸带韧性变化过程中的行为主体及研究对象,即从“人”“地”和“人地关系”出发并结合韧性固有属性构建多目标、多维度的综合评价指标体系。③海岸带韧性空间关联网络研究仍显不足。已有研究将空间关联局限在地理上邻近地区,未从复杂网络视角重新审视海岸带韧性发展现状,尤其是未针对“关系数据”的海岸带人地系统韧性水平网络特征展开有效分析。④海岸带韧性驱动因素研究尚待深化。现有文献多以传统计量方法对海岸带韧性驱动因素进行分析,缺乏对海岸带人地系统韧性空间关联网络的形成机制研究。

环渤海地区是中国最具综合优势和发展潜力的经济增长极之一,但经济发展与生态建设之间的空间竞争关系激烈,人地关系矛盾突出、生态系统敏感脆弱等问题仍未得到根本性解决<sup>[33]</sup>。因此,本文选择环渤海地区17个沿海城市作为评价对象,运用可变模糊识别模型来刻画海岸带人地系统韧性水平空间格局,再以修正后的引力模型构建韧性空间关联网络矩阵,结合社会网络分析方法对海岸带人地系统韧性空间关联网络结构特征展开分析,最后以非参数方法QAP(Quadratic Assignment Procedure)回归来探究韧性空间关联网络的形成机制。一方面在理论上扩展了传统海岸带韧性研究思路,在陆海统筹视域下从人地关系出发深入理解海岸带韧性的复杂性和系统性;另一方面在实践上基于城市尺度对海岸带韧性开展空间关联网络的直接研究,有利于明晰各城市在空间关联网络中所扮演的角色,为区域协同发展及政策规划提供科学依据。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 可变模糊识别模型

可变模糊识别模型能科学地确定样本指标对各级指标标准区间的相对隶属度、相对隶属函数,并根据不同的准则参数组合变换出线性、非线性、海明距离和欧式距离4种组合,分别对同一事物取平均值进行评价,有效避免了传统模型的单一性,使结果更加稳定可靠<sup>[34]</sup>。评价模型如下:

$$V_A(u) = 1/[1 + (d_g/d_b)^\alpha] \quad (1)$$

$$\text{其中: } d_g = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^m w_i [1 - \mu_A(u_i)]^p}, \quad d_b = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^m w_i [\mu_A(u_i)]^p} \quad (2)$$

式中: $V_A(u)$ 为识别对象 $u$ 对 $A$ 的相对隶属度; $A$ 为 $u$ 的对立模糊集; $d_g$ 为距优距离; $d_b$ 为距劣距离; $\alpha$ 为优化准则参数, $\alpha=1$ 为最小一乘方准则, $\alpha=2$ 为最小二乘方准则; $w_i$ 为指标 $i$ 的权重; $\mu_A(u_i)$ 为指标 $i$ 对应的相对隶属度向量; $p$ 为距离参数, $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧式距离。其中 $\alpha$ 与 $p$ 有4种组合:①当 $\alpha=1$ , $p=1$ 时,为模糊综合评判模型;②当 $\alpha=1$ , $p=2$ 时,为理想点模型;③当 $\alpha=2$ , $p=1$ 时,为Sigmoid型函数;④当 $\alpha=2$ , $p=2$ 时,为模糊优选模型。

本文根据 $V_A(u)$ 计算结果,采用级别特征值公式,利用级别变量 $h$ 隶属于各等级的相对隶属度信息,作为可变模糊集理论判断、识别、决策的准则。级别特征值 $H(u)$ 为:

$$H(u) = \sum_{h=1}^c [V_A(u) \times h] \quad (3)$$

最后根据 $H(u)$ 值最终判断海岸带人地系统韧性水平,并结合环渤海地区发展实际与相关研究中可变模糊识别模型级别特征判断准则<sup>[35]</sup>,本文将海岸带人地系统韧性水平分为低韧性、较低韧性、中韧性、较高韧性和高韧性5个等级。

#### 2.1.2 修正引力模型

引力模型来源于物理学中万有引力理论,遵循距离衰减原理,具有较强的适用性。本文借鉴王兆峰等<sup>[36]</sup>的研究,将修正后的引力模型引入到海岸带人地系统韧性空间关联网络研究中,准确刻画出地区间韧性水平关联关系程度,其公式为:

$$F_{nt} = K_{nt} \frac{R_n \cdot R_t}{D_{nt}^2}, \quad K_{nt} = \frac{R_n}{R_n + R_t}, \quad D_{nt}^2 = \left( \frac{d_{nt}}{g_n - g_t} \right)^2 \quad (4)$$

式中: $F_{nt}$ 为环渤海地区 $n$ 和 $t$ 的韧性水平引力值; $K_{nt}$ 为引力系数; $R_n$ 和 $R_t$ 分别为 $n$ 城市和 $t$ 城市的韧性水平; $d_{nt}$ 为城市间球面距离; $g_n$ 和 $g_t$ 为 $n$ 城市和 $t$ 城市生产总值; $D_{nt}$ 为城市间经济距离。本文构建的海岸带人地系统韧性空间关联矩阵采用“均值法”对数据进行二值化处理。若 $F_{nt}$ 大于均值则记为1,表示环渤海地区两城市间存在空间关联关系,反之则取值为0,不存在空间关联关系。

2.1.3 社会网络分析法

本文运用社会网络分析法<sup>[37]</sup>,从整体网络特征、个体网络特征和块模型分析3个方面深入研究海岸带人地系统韧性空间关联网络特征。整体网络特征主要包括网络密度、网络关联度和网络效率;个体网络特征主要包括度数中心度、接近中心度和中介中心度;块模型则根据角色之间的互动把初始发生在矩阵中的点以聚类分析的方法重新排列,也是网络整体结构的重要表现形式之一。参考已有研究划分标准<sup>[38]</sup>,本文将环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联网络中的板块划分为4个类型:净溢出板块、净受益板块、经纪人板块和双向溢出板块。具体指标及计算公式与说明见表1。

2.1.4 QAP模型

为了探讨环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联网络形成的驱动力,本文进一步开展空间关联网络的驱动因素分析。由于海岸带人地系统韧性空间关联矩阵中变量均为关系数据,若使用传统计量方法来验证关系数据是否存在关系,可能会出现多重共线性问题。因此本文选取非参数方法QAP回归对关系数据进行分析更为稳健,目的在于对自变量和因变量矩阵对应的长向量元素进行标准多元回归分析,不需要独立性与正态分布假定,

最后以实际观察到的相关系数是在接受域还是拒绝域,进而确定回归方程。其基本计量模型为 $G=f(X)$ ,其中 $G$ 为因变量矩阵, $X$ 为自变量矩阵。

2.2 评价指标体系

参考关于区域韧性<sup>[39]</sup>、海岸带韧性<sup>[40]</sup>等研究成果并结合人地关系地域系统理论,本文首先从“人”“地”“人地关系”3个维度构建评价指标体系框架,其次基于韧性理论的抵抗恢复、适应调整、转换更新3个核心阶段进行二次筛选指标,最后遵循科学性与数据可得性原则确定最终指标,以此构建海岸带人地系统韧性评价指标体系(表2)。此外,本文在已有评价方法上进行了一定调整:一是借鉴李小建等<sup>[41]</sup>以“地均”类指标来表征海岸带资源要素,更加侧重海岸带“地”的属性特征分析;二是传统研究中的指标多以静态为主,本文在此基础之上增加流动性指标,有助于反映海岸带人地关系之间的动态变化,更能准确把握地区间要素流所带来的区域整体韧性的协同效应。为保证评价指标体系的严谨性,本文运用SPSS 19.0软件将 $VIF > 10$ 的指标予以剔除,避免指标间存在多重共线性问题。

(1)“人”作为海岸带主体,其韧性主要体现在人口数量变化到人口结构、生产力布局等各方面能够在不断变化的环境中保持稳定,以实现人口和社

表1 空间关联网络特征分析的主要指标测算与说明

Table 1 Estimation and explanation of the main indicators of the analysis of the spatial correlation network

指标	计算公式	公式说明	指标说明	
整体网络	网络密度	$D=L/N(N-1)$	$L$ 为城市关联网络中的实际关联数; $N$ 为网络中的节点总数	密度越大,城市间关联强度越紧密
	网络关联度	$C=1-V/[N(N-1)/2]$	$V$ 为网络中不可达的城市对的数量; $N$ 为网络中的节点总数	网络中城市之间直接或间接可达的程度,关联度越大,网络结构越稳健
	网络效率	$E=1-M/\max(M)$	$M$ 为网络节点间多余联系数; $\max(M)$ 为网络节点间最大可能多余联系数	网络中存在多余连线的程度,效率越低,网络冗余关系越多,网络结构越稳定
个体网络	度数中心度	$DC=W/(N-1)$	$W$ 为网络中与特定节点相关联的节点数量; $N$ 为网络中的节点总数	用于衡量各城市在网络中所处的地位,度数中心度越高,中心地位越突出
	接近中心度	$CC=\sum_{j=1}^N d_{ij}$	$N$ 为网络中的节点总数; $d_{ij}$ 为城市 $i$ 和城市 $j$ 的捷径距离	指该城市与其他城市捷径距离之和,接近中心度越大,越容易与其他城市产生直接关联
	中介中心度	$BC=\frac{2\sum_j \sum_k b_{jk}(i)}{N^2-3N+2}$ $b_{jk}(i)=\frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}$	$N$ 为网络中的节点总数; $b_{jk}(i)$ 为城市 $i$ 处于 $j$ 和 $k$ 城市间捷径上的概率; $g_{jk}$ 为城市 $i$ 和城市 $j$ 之间的捷径数量; $g_{jk}(i)$ 为城市 $j$ 和 $k$ 间的捷径经过城市 $i$ 的数量	用于衡量网络中节点在连接其他节点之间的程度,指网络中某一城市对其他城市起到中介作用,中介中心度越大,对其他城市控制力越强
块模型	位置期望内部关系比例	$Z=(Y_h-1)/(Y-1)$	$Z$ 为板块期望内部关系比例, $Y$ 为网络中所有城市数量, $Y_h$ 为某一板块内城市数量;设 $Q$ 为位置接收到的实际关系比例,若 $Q \geq Z$ ,为净受益板块,若 $Q < Z$ ,为净溢出板块;若接收关系比例 $\approx 0$ ,为双向溢出板块,若 $> 0$ ,为经纪人板块	净受益板块:该板块接收关系系数远大于溢出关系系数;净溢出板块:该板块溢出关系系数明显大于接收关系系数;双向溢出板块:既接收板块外部联系,又向其他板块溢出关系;经纪人板块:接收关系系数和溢出关系系数相差不大,发挥中介作用

2024年3月

表2 环渤海地区海岸带人地系统韧性评价指标体系

Table 2 Evaluation indicator system of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region

目标层	维度层	一级指标层	二级指标层	指标释义
海岸带 人地系 统韧性	人	抵抗恢复	A <sub>1</sub> 常住人口总量/万人	表征海岸带人口规模基数
			A <sub>2</sub> 人口流入量/万人	表征海岸带人口流动能力
			A <sub>3</sub> 沿海城市失业人数/万人	表征海岸带劳动力的抵抗能力
			A <sub>4</sub> 文盲人口占比/%	表征海岸带人口文化素质水平
		适应调整	A <sub>5</sub> 人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	表征海岸带人口集聚水平
			A <sub>6</sub> 城市化率/%	表征海岸带人口经济活动水平
			A <sub>7</sub> 临海人口比重/%	表征海岸带陆海人口结构
			A <sub>8</sub> 居民家庭恩格尔系数/%	表征海岸带居民家庭生活水平
			A <sub>9</sub> 人口自然增长率/%	表征海岸带人口自然变化情况
			A <sub>10</sub> 沿海城市就业人数/万人	表征海岸带劳动力生产水平
	转换更新	A <sub>11</sub> 第三产业从业人员比/%	表征海岸带就业结构转换力	
		A <sub>12</sub> 海洋科研机构R&D人数/人	表征海岸带创新与转换潜力	
		A <sub>13</sub> 每万人大学生在校生数/(人/万人)	表征海岸带人才支持力	
	地	抵抗恢复	B <sub>1</sub> 海岸线长度/km	表征海岸带空间基本属性
			B <sub>2</sub> 海域面积/km <sup>2</sup>	表征海岸带空间基本属性
			B <sub>3</sub> 风暴潮发生频次	表征海洋灾害对海岸带冲击强度
			B <sub>4</sub> 近岸水质Ⅳ类、劣Ⅳ类占比/%	表征海岸带近岸水质对风险的抵御能力
适应调整			B <sub>5</sub> 单位面积可利用近海及海岸湿地/(hm <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	表征海岸带生态冗余空间
			B <sub>6</sub> 单位面积海域渔业养殖量/(t/km <sup>2</sup> )	表征海岸带渔业资源水平
转换更新		B <sub>7</sub> 单位面积可利用水资源量/(m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	表征近岸陆域系统水资源供给	
		B <sub>8</sub> 单位面积可利用耕地面积/(hm <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	表征海岸带耕地资源供给	
		B <sub>9</sub> 海洋生物多样性指数 <sup>[42]</sup>	表征海岸带生态系统的调节能力	
		B <sub>10</sub> 近岸海域水质达标率/%	表征海岸带海域水质的修复能力	
		B <sub>11</sub> 海洋自然保护面积比/%	表征海岸带生态恢复能力	
人地关系		抵抗恢复	B <sub>12</sub> 河流断面水质优良比例/%	表征海岸带水环境生态转换能力
			C <sub>1</sub> 海洋生产总值/万元	表征海岸带涉海经济发展水平
			C <sub>2</sub> 沿海港口码头泊位数/个	表征海岸带港口基础设施建设情况
		适应调整	C <sub>3</sub> 城镇居民人均可支配收入/(元/人)	表征海岸带居民风险抵抗力
			C <sub>4</sub> 工业废水直排入海量/万t	表征海岸带受陆源工业活动的威胁程度
			C <sub>5</sub> 单位海洋GDP能耗/(t标准煤/万元)	表征海岸带经济产出所需的能源消耗水平
	C <sub>6</sub> 海岸线经济密度 <sup>[43]</sup> /(万元/km)		表征海岸带资源经济效益和利用效率	
	C <sub>7</sub> 沿海港口货物吞吐量/万t		表征海岸带港口贸易流通能力	
	C <sub>8</sub> 城市夜间灯光指数		表征海岸带可供适应调整的城市空间	
	转换更新	C <sub>9</sub> 建成区绿化覆盖率/%	表征海岸带城市绿化水平	
		C <sub>10</sub> 固定资本存量/万元	表征海岸带资本规模的稳定程度	
C <sub>11</sub> 绿色全要素生产率 <sup>[44]</sup> /%		表征海岸带生产要素的可持续再生能力		
C <sub>12</sub> 海洋产业高级化指数 <sup>[45]</sup>		表示海岸带产业结构转换能力		
	C <sub>13</sub> 科学技术支出占GDP比重/%	表征海岸带创新支持能力		
	C <sub>14</sub> 财政支出总额/万元	表征海岸带政府调控力度		
	C <sub>15</sub> 环境治理投资占GDP比重/万元	表征海岸带生态环境转换与优化能力		
	C <sub>16</sub> 企业异地投资数量 <sup>[46]</sup> /个	表征海岸带资金流通能力		
	C <sub>17</sub> 城市关注度 <sup>[47]</sup>	表征海岸带信息流通能力		

会可持续发展的能力。其中,人口的规模、流入量、劳动力水平等反映了海岸带“人”对抵御外部扰动的情况,故选取常住人口总量、人口流入量、沿海城市失业人数等表征海岸带“人”的抵抗恢复能力;人

口的分布、经济活动水平以及人口结构特征等反映了海岸带“人”在遭受冲击后的适应变化过程和稳定能力,故选取人口密度、城市化率、临海人口比重等表征海岸带“人”的适应调整能力;人口生产力布

局、就业结构、科研水平等反映了海岸带“人”的灵活应变和创新能动性,故选取沿海城市就业人数、第三产业从业人员比、海洋科研机构R&D人数等来表征海岸带“人”的转换更新能力。

(2)“地”作为海岸带发展的重要空间支撑和物质基础,其韧性主要体现在灾害应对、资源管理、生态恢复等方面,旨在减少灾害带来的影响。其中,海岸线长度等自然空间基本属性对抵御灾害具有正向作用,自然灾害、陆域污染等风险活动对海岸带环境韧性具有负向作用,故选取海岸线长度、海域面积、风暴潮发生频次等来表征海岸带“地”的抵抗恢复能力;海岸带资源丰度、滨海冗余空间等有助于维持健康的生态平衡,在面对扰动时能更好地适应环境变化,故选取单位面积的可利用近海及海岸湿地、海域渔业养殖量等表征海岸带“地”的适应调整能力;海岸带生物的多样性、海域环境质量的提升能够促进生态系统改善,更好地应对环境变化和人为干扰带来的冲击,有助于海岸带资源保护和开发利用,故选取海洋生物多样性指数、近岸海域水质达标率等来表征海岸带“地”的转换更新能力。

(3)“人地关系”作为海岸带要素间流动的重要纽带,其韧性主要体现在海洋工程开发、海洋经济发展、产业结构变化等方面,促进海洋与陆地的协调发展能力。其中,坚实的经济基础、完善的基础设施等有利于海岸带面对风险时提供强大的支撑力,人类活动对环境施加的压力越大,其抵御能力越低,故选取海洋生产总值、沿海港口码头泊位数、工业废水直排入海量等来表征“人地关系”的抵抗恢

复能力;经济活动的集中程度、贸易流通能力、城市发展水平等反映了对外界冲击后的海岸带适应状态和调整能力,故选取海岸线经济密度、沿海港口货物吞吐量、城市夜间灯光指数等来表征“人地关系”的适应调整能力;绿色经济转型、高级产业化、技术创新等能有效地利用资源、减少环境压力、培养创新人才以增强海岸带韧性,故选取绿色全要素生产率、海洋产业高级化指数、科学技术支出占GDP比重等来表征“人地关系”的转换更新能力。

### 2.3 数据来源

本文选取2005—2019年环渤海地区沿海17个地级市(天津、唐山、秦皇岛、沧州、青岛、烟台、滨州、东营、潍坊、威海、日照、大连、锦州、盘锦、营口、丹东和葫芦岛)年度数据为基础数据。所涉及数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国海洋统计年鉴》《中国港口年鉴》以及环渤海地区沿海省市的统计年鉴、生态环境公报和海洋环境公报。受篇幅限制,海洋生物多样性指数、海岸线经济密度、绿色全要素生产率等指标计算方法详见参考文献[41-46]。

## 3 结果与分析

### 3.1 海岸带人地系统韧性时空演化分析

#### 3.1.1 时序演化分析

运用可变模糊识别模型对2005—2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性进行测度并绘制箱型图以观察其总体趋势(图1a)。图中黑色圆点代表韧性均值,可以看出,2005—2019年环渤海地区整体韧性水平呈向上增长态势。此外2005—2012年箱型图上部分线段跨度远大于下部分跨度,说明韧

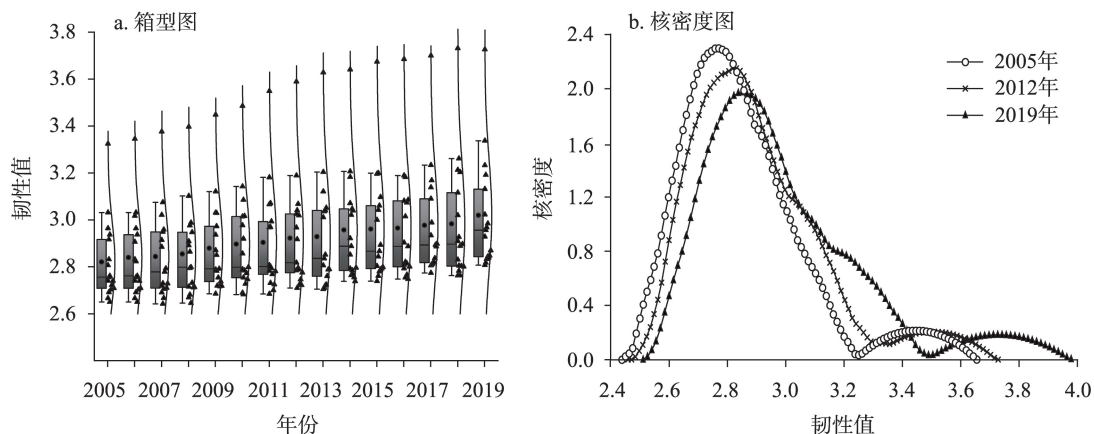


图1 2005—2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性的箱型图及核密度估计

Figure 1 Box plot and kernel density estimates of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region, 2005-2019

2024年3月

性发展多数集中于较低水平,2013—2019年箱型图下部分跨度逐渐增加,说明韧性水平向好发展,这主要是2012年党的十八大提出的“建设海洋强国”战略目标,陆源污染得到明显控制,切实提高了海洋资源对海岸带社会经济发展的支撑保障作用。为进一步揭示海岸带人地系统韧性的时序动态演化特征,本文对2005、2012和2019年韧性水平进行核密度估计(图1b)。2005—2019年,核密度曲线位置随时间的推移整体向右偏移,说明韧性水平整体呈现持续增长态势。此外,核密度曲线右拖尾存在逐年拉长现象,分布延展性存在一定程度的拓宽趋势,同时曲线形态均呈现多峰分布,表明环渤海地区海岸带人地系统韧性多极分化明显,存在较为显著的空间非均衡性。

### 3.1.2 时空演化分析

本文对2005、2012和2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性的空间分布进行可视化分析(图2)。整体来看,2005—2019年,环渤海地区海岸带人地系统韧性水平呈现较为明显的空间变化特征。其中:①天津市拥有全国最发达的海、陆、空综合交通网络体系,其韧性水平明显高于其他城市。②2005—2012年韧性保持在较低水平的城市主要分布在沧州、日照、锦州和葫芦岛。其中沧州作为重化工产业集聚地,经济效益提高的同时也加重了“地”的负担;日照经济人口总量小,发展较为靠后;锦州和葫芦岛由于产业经营呈粗放式增长、结构性矛盾突出。③至2019年环渤海地区各城市韧性发展水平有所提高,其中天津、大连、青岛等城市占据优越的地理位置以及科研人才支持,韧性水平相对较高。④丹东、东营等城市未发生明显变化,原因是这些城市资源优势转换慢,人口流失严重,环境保护人才短缺。总结来说,环渤海地区海岸带人地系统韧性的抵抗恢复能力有所增长,但大部分资源型城市的转换更新能力有待提高。

从子系统来看:①2005—2019年环渤海地区海岸带“人”子系统韧性能力整体虽有一定提升但仍以中低韧性水平为主。2019年,天津排名第一,青岛、烟台、大连和潍坊处于较高水平;中韧性水平城市主要集中在秦皇岛、唐山、沧州、东营和威海,较低韧性水平城市主要分布于辽宁盘锦、丹东、锦州、营口、葫芦岛和山东滨州、日照,这些城市产业结构

较为单一,人口结构偏向老龄化,人才向发达地区外流。②2005—2019年环渤海地区海岸带“地”子系统韧性水平差异明显。2019年除沧州外其余城市韧性水平均有所提升,其中大连、烟台、威海等城市韧性水平排名靠前,主要源于这些城市依托丰富的海洋资源向技术密集型海洋新兴产业转型升级,并严格把控工业和生活废水的排放。③2005—2019年环渤海地区海岸带“人地关系”子系统韧性水平呈上升趋势。2019年滨州、东营、秦皇岛、锦州、营口等城市为中韧性水平,烟台和青岛韧性水平仅次于天津,成为高韧性水平城市。原因是烟台和青岛经济快速发展的同时注重生态保护并加大环境治理投资,海水水质得到不断提升。据统计,2019年烟台市海域水质优良比例达到98.62%,较上年提升26%,青岛市近岸98.8%的海域符合第一、二类海水水质标准。这也侧面说明了只有协调好“人”与“地”之间的关系,韧性水平才得以持续增长,也是海岸带可持续发展的内在要求。

## 3.2 空间关联网络的结构特征分析

基于修正的引力模型建立环渤海地区海岸带人地系统韧性的空间关联矩阵,利用ArcGIS10.6可视化工具绘制了2005年和2019年韧性水平空间关联网络图并依据阈值将影响力过于微弱的关系去除。由图3可知:环渤海地区海岸带人地系统韧性的空间关联呈现出日趋复杂、多流向的网络结构形态,不存在孤立城市。2005年天津和青岛关联系数最多,与其他城市联系最为紧密,处于网络核心位置;唐山、大连和烟台关联系数较多,处于次级核心位置;沧州和其他城市的联系较为缺乏,处于边缘位置。2019年网络复杂程度增强,大连和烟台在关联网络中的重要性也逐步显现,进入了核心圈层;潍坊和唐山的关联系数也有所增加,滨州、日照、锦州、盘锦等城市空间关联作用相对较弱,沧州和丹东关联系数维持在较低水平。整体上,环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联网络呈现以“天津—大连—青岛—烟台”为核心的联系紧密区域,其余城市呈现网络关联稀疏的不平衡态势。

### 3.2.1 整体网络特征分析

进一步借助Ucinet 6.0计算得到整体网络结构特征指标值,由图4可知:①2005—2019年网络关联度均为1,说明环渤海地区海岸带城市间存在直接

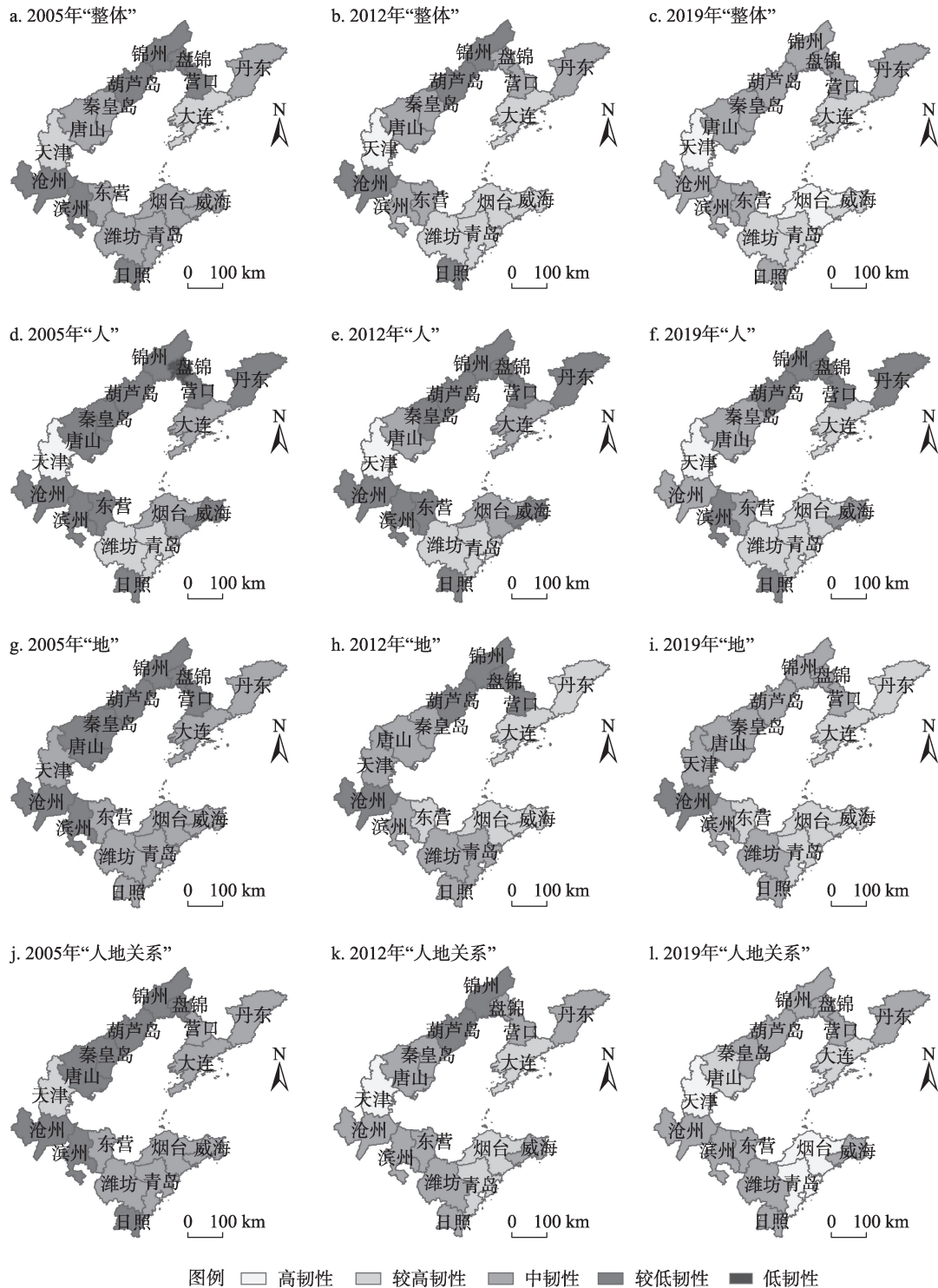


图2 2005—2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性空间差异

Figure 2 Spatial differences of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region, 2005–2019

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2022)4312号标准地图制作,底图边界无修改。

或间接的关联关系,网络通达较好,韧性水平发展具有显著的空间关联性。②2005—2019年间网络密度值在0.338~0.419之间浮动,处于较低水平,说明环

渤海地区城市间关联程度相对松散,仍存在较大提升空间。③2005—2019年网络关联系数虽然整体呈增长态势,但数值偏低,说明城市之间的溢出



2024年3月

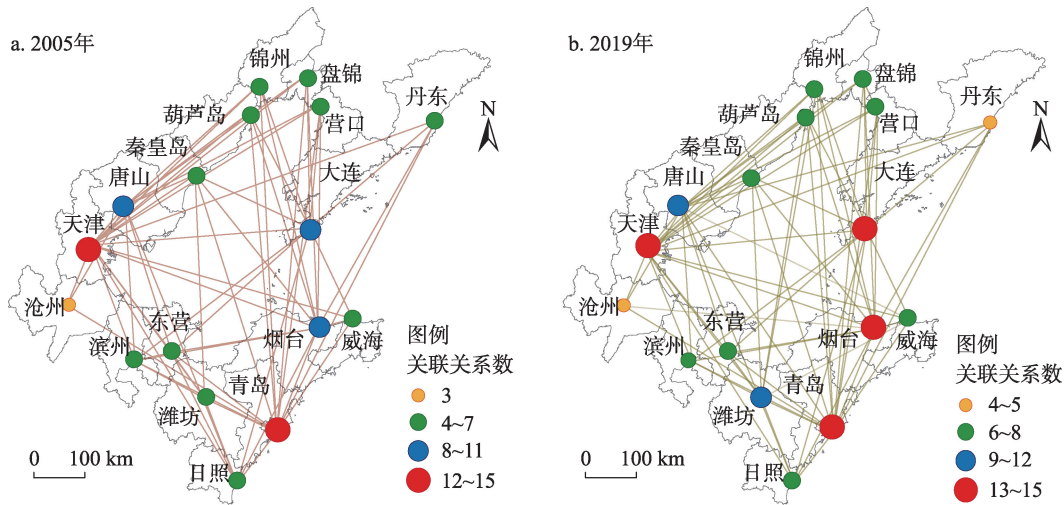


图3 2005和2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联网络

Figure 3 Spatial association network of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region, 2005 and 2019

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2022)4312号标准地图制作,底图边界无修改。

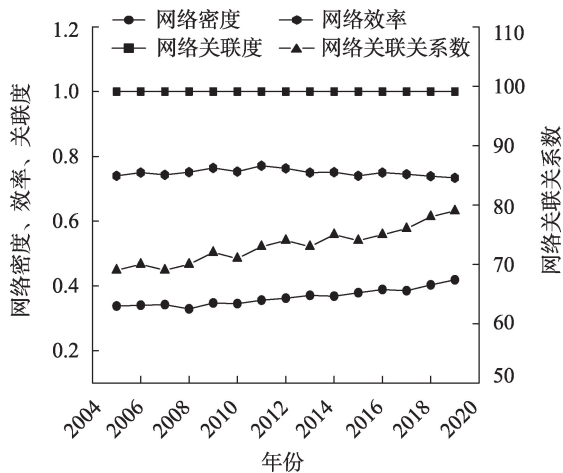


图4 2005—2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性整体网络特征

Figure 4 Overall network characteristics of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region, 2005-2019

效应仍然薄弱,这可能与城市更多关注内部发展有关。④2005—2010年网络效率在0.740~0.764间波动,2011—2019年网络效率由0.771下降至0.734,说明关联网络存在多重叠加的溢出渠道,网络稳定性增强。总体而言,环渤海地区已形成较为稳定的海岸带人地系统韧性水平空间关联网络,但其网络关联结构较为疏松,紧密度有待提高。

### 3.2.2 个体网络结构特征

为揭示各城市在空间关联网络中所发挥的作用,本文采用社会网络分析法计算得到各城市点出

度和点入度(图5)以及度数中心度、接近中心度和中介中心度(表3)。

(1)溢出与受益关系。由图5可知:2005—2019年,在点出度方面,天津、唐山和青岛的溢出关系明显大于受益关系,是空间关联网络中的溢出主体;点入度方面,丹东、营口、锦州、葫芦岛等城市的接收关系明显多于溢出关系,表现出较强的受益效应;大连和烟台的溢出和接收则基本保持平衡且大于均值,在关联网络中既是溢出主体也是受益主体;总结来说,经济发展水平较高的城市,在区域协调发展战略的推动下,有利于人才、技术、资本和先进的管理办法等向其他地区扩散,对周边城市表现出较强的“涓滴效应”。

(2)度数中心度。2005—2019年高于度数中心度均值的城市有青岛、烟台、天津、大连和唐山,这些城市在关联网络中占据主导地位,原因在于这些城市经济较为发达,交通基础设施和信息技术先进,与其他城市交流阻碍较少;度数中心度较低的城市有营口、盘锦、锦州、葫芦岛、日照、沧州等,这些城市的经济发展和技术能力相对落后,导致地区产业升级缓慢和创新驱动力不足,与其他城市联系匮乏,处于空间关联网络的边缘位置。通过2005和2019年度数中心度数值变化可以看出,丹东、锦州、葫芦岛等度数中心度仍低于均值,可见城市间要素流动缓慢,需增加韧性水平向上发展的溢出通道。

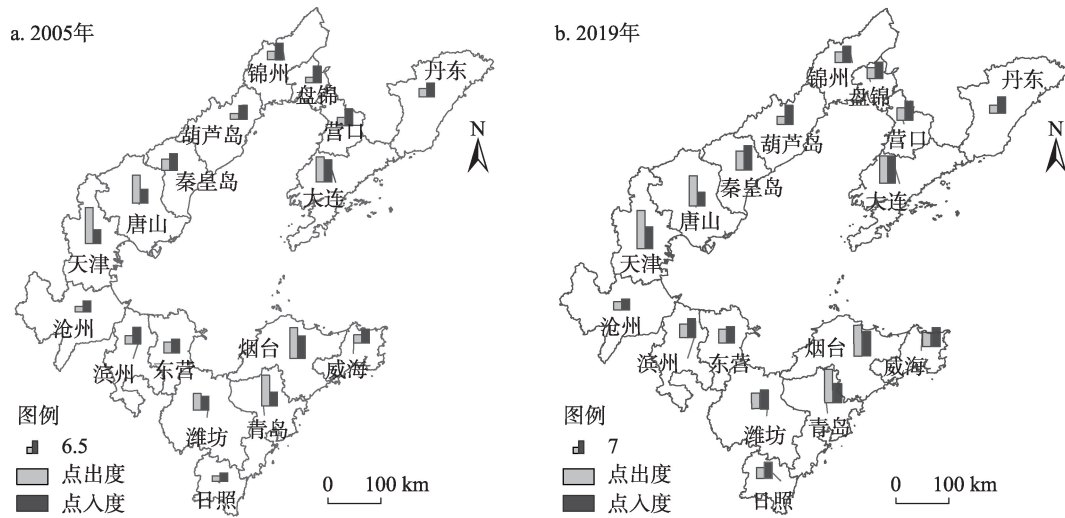


图5 2005和2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性溢出和受益关系的空间格局

Figure 5 Spatial pattern of spillover and benefit relationships of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region, 2005 and 2019

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2022)4312号标准地图制作,底图边界无修改。

表3 2005和2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联的网络中心性分析

Table 3 Network centrality analysis of spatial association of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region, 2005 and 2019

城市	2005年			2019年		
	度数中心度	接近中心度	中介中心度	度数中心度	接近中心度	中介中心度
天津	14.000	84.211	30.764	15.000	88.889	28.628
唐山	11.000	72.727	13.878	12.000	76.190	12.739
秦皇岛	7.000	59.259	13.044	9.000	66.667	11.788
沧州	5.000	50.000	3.418	6.000	55.172	2.890
青岛	12.000	76.190	24.767	13.000	84.211	23.078
威海	6.000	53.333	8.987	8.000	59.259	8.229
烟台	11.000	76.190	27.271	12.000	80.000	29.996
潍坊	7.000	61.538	3.060	7.000	61.538	5.871
滨州	6.000	50.000	3.418	7.000	59.259	4.885
东营	6.000	57.143	1.629	6.000	59.259	1.629
日照	4.000	48.485	5.023	7.000	57.143	2.087
大连	9.000	69.565	23.332	11.000	66.667	28.860
锦州	7.000	53.333	2.861	6.000	57.143	2.455
盘锦	6.000	43.243	4.203	8.000	51.613	4.203
丹东	7.000	47.059	0.629	6.000	48.485	0.629
营口	6.000	50.000	2.121	7.000	51.613	2.107
葫芦岛	5.000	48.485	0.653	6.000	48.485	0.653
均值	7.588	58.868	9.945	8.588	63.035	10.043

(3)接近中心度。2005—2019年,接近中心度远超过于均值的有天津、唐山、青岛和烟台,表明这些城市在关联网络中能较快与其他城市建立联系,成为关联网络中的中心行动者;营口、丹东、盘锦、葫芦岛等城市的接近中心度在2019年仍维持在较低水平,说明这些城市对其他城市建立的空间关联以间

接关联为主,未能对其他城市产生一定带动作用,这主要局限于有限的资源以及单一的产业结构等,难以与其他城市形成要素流通互补的关联关系。

(4)中介中心度。2005—2019年中介中心度显著高于均值的城市有天津、青岛、烟台和大连,表明这些城市对其他城市具有较强的控制力。2019年

2024年3月

天津和青岛的中介中心度有所下降,烟台和大连的中介中心度呈现上升趋势,说明其“中介”和“枢纽”作用不断增强;其余城市的中介中心度值则维持在较低水平,尤其是丹东和葫芦岛的中介中心度仅在0~1之间,对其他城市的控制力和影响极低,处于被支配地位。总体上,中介中心度在环渤海城市群空间非均衡性显著,极化特征明显,大部分网络空间关联由经济发展水平较好的城市完成。

### 3.2.3 块模型分析

为深入探究环渤海地区各城市在关联网络中的聚类特征,本文选取2005和2019年数据,采用Ucinet软件中的CONCOR模块并参考已有研究<sup>[23]</sup>,选择最大切分深度为2,集中标准为0.2,将环渤海17个城市划分为4个板块(表4)。2005年各板块关系为:板块I包括7个城市,分别是威海、葫芦岛、营口、秦皇岛、锦州、盘锦和丹东,该板块接收关系数远大于溢出关系数,且期望内部关系比例小于实际内部关系比例,具有“净受益”板块特征;板块II由烟台和大连2个城市组成,接收关系数和溢出关系数相差不大,且板块内部关系较少,具有“经纪人”板块特征;板块III包括5个城市,分别是日照、滨州、东营、潍坊和沧州,既接收板块外部联系,又向其他板块溢出关系,具有“双向溢出”板块特征;板块IV由青岛、唐山和天津组成,该板块溢出关系数明显

大于接收关系数,具有“净溢出”板块特征。2019年原板块III中的沧州和日照调整至板块I中,其他板块内部无明显变化,板块间溢出效应有所增强。

此外,为揭示板块间的空间关联关系,计算得到板块密度矩阵并将网络密度矩阵转化为像矩阵(表5)。由于2005和2019年韧性水平空间关联网络的密度是0.338和0.419,若密度矩阵中对应的数值大于网络密度值记为1,反之则记为0,以此得出2005和2019年的像矩阵相对称并绘制了板块关系图(图6)。第一板块接收关系数远大于对其他板块的溢出关系数,且接收第四板块的溢出关系最多;第二板块接收了其他板块的溢出关系并主要向第一板块溢出;第三板块与第四板块存在双向溢出,对其他板块仅存在微弱溢出效应;第四板块溢出关系远大于接收关系,向第一板块溢出最多。根据上述块模型分析,得出以下几点结论:①天津、青岛和唐山在关联网络中对其他城市产生显著溢出效应,构成了空间关联网络中的“发动机”,与前文研究结果一致;②烟台和大连承接来自天津、青岛等溢出效应并向葫芦岛、营口、盘锦等城市输送空间关联网络关系;③潍坊、滨州、东营发挥了其良好的地理位置优势,既接收了天津、青岛和唐山的溢出关系,也对其他板块产生了一定的溢出关系;④葫芦岛、盘锦、锦州、营口等城市由于经济发展较为落后,对外

表4 环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联板块的溢出效应

Table 4 Spillover effect of spatial association blocks of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region

板块类型	溢出关系数合计/个		接收关系数合计/个		期望内部 关系比例/%	实际内部 关系比例/%	板块属性
	板块内	板块外	板块内	板块外			
板块 I	7/14	15/26	7/14	34/43	37.50/50.00	43.75/53.85	“净受益”
板块 II	2/2	18/20	2/2	13/16	6.25/6.25	11.11/10.00	“经纪人”
板块 III	7/6	11/10	7/6	15/13	25.00/12.50	63.63/60.00	“双向溢出”
板块 IV	2/2	32/36	2/2	13/18	12.50/12.50	6.25/5.56	“净溢出”

注:分子和分母分别表示2005和2019年数据。

表5 环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联密度矩阵与像矩阵

Table 5 Density matrix and image matrix of spatial association of coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region

板块类型	密度矩阵				像矩阵			
	板块 I	板块 II	板块 III	板块 IV	板块 I	板块 II	板块 III	板块 IV
板块 I	0.143/0.194	0.571/0.722	0.086/0.333	0.238/0.074	0/0	1/1	0/0	0/0
板块 II	0.929/0.889	0.000/1.000	0.200/0.333	0.667/0.333	1/1	0/1	0/0	1/0
板块 III	0.057/0.074	0.200/0.176	0.350/0.778	0.467/1.000	0/0	0/0	1/1	1/1
板块 IV	0.905/0.926	0.500/0.333	0.733/0.333	0.333/1.000	1/1	1/0	1/0	0/1

注:分子和分母分别表示2005和2019年数据。

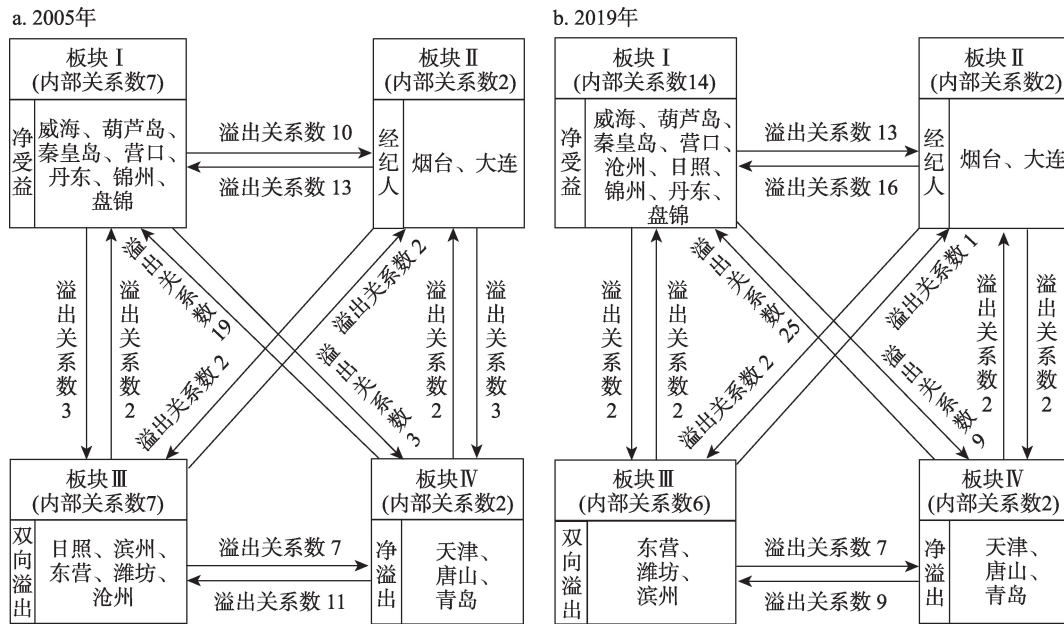


图6 2005和2019年空间关联网络四大板块间的传递关系

Figure 6 Transmission relationship among four blocks of spatial association network, 2005 and 2019

溢出较少,主要接收大连、烟台、天津、青岛和唐山的溢出关系。

### 3.3 空间关联网络的形成机制分析

#### 3.3.1 驱动因素选择与QAP相关性分析

由于海岸带人地系统韧性空间关联网络的形成受多种因素的影响,如地理空间属性、自然资源、社会经济活动、政策规划、科技创新等。本文参考相关文献<sup>[48,49]</sup>,选取地理邻近差异(*Dis*)、资源禀赋差异(*Res*)、环境质量差异(*Env*)、人力资本差异(*Edu*)、经济水平差异(*Eco*)、市场化水平差异(*Market*)、污染治理水平差异(*Con*)、产业结构差异(*Indus*)、政府调控差异(*Gov*)、技术创新差异(*Tech*)、对外开放差异(*Open*)和信息化水平差异(*Infor*)研究变量来考察海岸带人地系统韧性水平发展差异的作用机制。但通过对数据进行相关性分析,得出产业结构差异、市场化水平差异、污染治理水平差异和政府调控差异因素的相关性低于0.1且不显著,因此进行剔除(表6),其余驱动因素存在一定相关关系,具体说明如下:①地理空间邻近差异:地理空间邻近性产生的地区间要素流动成本较低,进而存在更加显著的关联关系与溢出效应,采用邻接权重矩阵进行表征,城市相邻设为1,不相邻则设为0。②资源禀赋差异:地区资源的丰富性或匮乏性对经济社会发

表6 海岸带人地系统韧性空间关联矩阵的QAP相关性分析结果

Table 6 Quadratic assignment procedure (QAP) correlation analysis results of spatial association matrix of coastal human-nature system resilience

自变量	实际相关系数	显著性水平
<i>Dis</i>	0.328***	0.000
<i>Res</i>	0.177**	0.016
<i>Env</i>	0.208**	0.014
<i>Edu</i>	0.294***	0.000
<i>Eco</i>	0.283***	0.002
<i>Market</i>	0.082	0.140
<i>Con</i>	0.091	0.116
<i>Indus</i>	0.072	0.180
<i>Gov</i>	0.021	0.422
<i>Tech</i>	0.145**	0.037
<i>Open</i>	0.223**	0.022
<i>Infor</i>	0.343***	0.001

展具有重要的推动作用,从而影响地区间的合作、竞争和互惠关系,故选取地区资源丰度<sup>[50]</sup>差值表征资源禀赋差异。③人力资本差异:良好的教育水平能带来优质的人力资源,故选取高等教育学生数占人口总数比重差值来表征人力资本差异。④经济水平差异:经济水平存在一定差距的地区间易于促进生产要素的流动,故采用地区生产总值差值来表征经济水平差异。⑤环境质量差异:环境质量水平

2024年3月

高的地区更具有吸引力,有利于建立积极的协作关系,故选取地区环境质量指数差值来表征<sup>[43]</sup>。⑥技术创新差异:技术进步本身具有溢出效应和扩散效应的属性,故采取地区专利授权数差值来表征技术创新差异。⑦信息化水平差异:信息网络的快速发展打破了传统地区之间交流的时空限制,故采用互联网宽带接入用户数差值来表征信息化水平差异。⑧对外开放差异:对外开放可吸收国外资金、技术和管理经验来实现地区快速发展,从而加速资本跨区域流动,故采取进出口总额占GDP比重差值来表征对外开放差异。

### 3.3.2 QAP回归分析

基于QAP相关性分析结果,本文将海岸带人地系统韧性空间关联关系的影响因素设定如下:

$$G=f(Dis, Res, Env, Edu, Eco, Tech, Open, Infor) \quad (5)$$

式中:变量表示的是数据之间的关系;因变量 $G$ 表示海岸带人地系统韧性空间关联矩阵; $Dis$ 、 $Res$ 、 $Env$ 、 $Edu$ 、 $Eco$ 、 $Tech$ 、 $Open$ 、 $Infor$ 为各变量差异的绝对值构建的关系矩阵。

通过5000次随机置换得到QAP回归结果,得

出各驱动因素对环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联网络的影响和作用差异化特征明显。由表7可知:2005—2019年调整后的 $R^2$ 在0.272—0.358之间浮动,回归结果中的8个影响因素可以解释环渤海地区海岸带人地系统韧性空间网络关系变化。

具体而言:①地理空间邻近系数均在1%的水平下全部显著为正,表明地理空间邻近有利于海岸带人地系统韧性水平空间关联网络的形成。城市间地理区位越邻近,能够快速获得最新信息和动态,利于地区间协同发展;②2005—2009年资源禀赋差异系数在5%水平下为显著为正,而研究后期显著性逐渐减弱,这是由于地区科技进步促使生产效率的提高进而减少对外部资源的依赖;③2011—2019年环境质量差异回归系数在5%水平下显著为正,随着人们环境保护意识的增强以及政策颁布实施促进投资产业合作等增强了与其他地区之间的联系;④经济水平差异系数均在1%水平下显著为正,表明城市间韧性水平的空间关联性在经济发展水平差异下增强,对关联网络的稳定性具有推动作用;⑤人力资本差异系数始终显著为正,表明人才

表7 2005—2019年海岸带人地系统韧性空间关联性影响因素的QAP回归结果

Table 7 Quadratic assignment procedure (QAP) regression results of spatial association factors of coastal human-nature system resilience, 2005–2019

变量	2005年	2007年	2009年	2011年	2013年	2015年	2017年	2019年
<i>Dis</i>	0.339*** (0.001)	0.342*** (0.001)	0.372*** (0.001)	0.420*** (0.001)	0.332*** (0.001)	0.325*** (0.001)	0.334*** (0.001)	0.389*** (0.001)
<i>Res</i>	0.203** (0.015)	0.193** (0.023)	0.221*** (0.005)	0.167* (0.061)	0.112* (0.052)	0.085 (0.102)	0.095* (0.058)	0.046 (0.285)
<i>Env</i>	0.104* (0.062)	0.065 (0.226)	0.100 (0.157)	0.138** (0.040)	0.107** (0.050)	0.163** (0.012)	0.145** (0.015)	0.195*** (0.006)
<i>Eco</i>	0.268*** (0.001)	0.253*** (0.001)	0.229*** (0.005)	0.208*** (0.007)	0.289*** (0.001)	0.297*** (0.001)	0.301*** (0.001)	0.310*** (0.001)
<i>Edu</i>	0.306*** (0.001)	0.287*** (0.001)	0.248*** (0.001)	0.290*** (0.001)	0.340*** (0.001)	0.293*** (0.001)	0.287*** (0.001)	0.304*** (0.001)
<i>Tech</i>	0.151** (0.039)	-0.170** (0.038)	-0.106* (0.100)	-0.062 (0.221)	-0.098* (0.096)	-0.055 (0.237)	-0.110* (0.091)	-0.028 (0.311)
<i>Infor</i>	0.326*** (0.001)	0.334*** (0.001)	0.385*** (0.001)	0.403*** (0.001)	0.398*** (0.001)	0.415*** (0.001)	0.477*** (0.001)	0.435*** (0.001)
<i>Open</i>	0.227*** (0.006)	0.202** (0.014)	0.155** (0.031)	0.197*** (0.008)	0.139** (0.047)	0.062 (0.234)	0.089* (0.094)	0.097 (0.167)
$R^2$	0.375	0.324	0.342	0.285	0.368	0.302	0.312	0.297
Adj- $R^2$	0.358	0.308	0.327	0.272	0.353	0.291	0.299	0.285
P值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注:变量的系数为标准化回归系数,括号内数值表示回归系数的显著性概率。

具有有效配置资源、调整地区发展战略的能力,通过推动产业联动、技术交流等方式促进空间关联网络的形成;⑥技术创新差异系数基本在10%的水平下显著为负,表明城市间技术创新差异过大,容易产生技术壁垒,不利于要素流动;⑦信息化水平差异系数均在1%水平下显著为正,说明利用信息化手段打破传统地理界线,改变传统资源配置的空间关系,有利于促进地区间社会、经济等领域要素流动;⑧2005—2013年对外开放差异系数在5%水平下显著为正,2015—2019年回归系数逐渐减少且转变为不显著,说明对外开放差异对韧性空间关联网络的正向作用逐渐减弱,环渤海作为率先实行对外开放的沿海地区之一,地区间对外开放差异逐渐缩小,进而被其他影响因素所替代。

### 3.3.3 形成机制解析

基于上述分析,结合已有研究基础,得出海岸带人地系统韧性空间关联网络演化的驱动机制(图7)。首先,海岸带人地系统是多元主体与多样目标相结合的具有层次性的开放系统,面对自然、社会、经济环境带来的复杂扰动,“人”与“地”相互作用方式会在一定程度上受到阻碍和干扰,从而引起系统内部各组成要素由均衡有序状态转为非均衡无序状态。韧性作为海岸带人地系统的重要属性,其思想中的抵抗恢复、适应调整和转换更新等核心理念则有助于海岸带系统要素重组、空间重构和功能转型,进而成为衡量海岸带面对复杂矛盾和危险时能否不断发展和创新的重要指标。其次,由回归结果可知,海岸带人地系统韧性空间关联网络受地理空间邻近、经济水平、资源禀赋、环境质量等因素影

响,为追求经济效益最大化,在政府调控和市场机制的作用下,各类要素在不同城市之间进行跨区域的流动扩散和空间再分配,使得海岸带韧性水平发展存在明显的区域差异,以此产生的“势能差”成为关联网络形成的驱动力。在此过程中高韧性水平城市与低韧性水平城市通过区域联动发展、合作学习以增进民生福祉、减少环境污染,力求“人”与“地”和谐发展,从而推动海岸带人地系统韧性空间关联网络的形成,并科学研究不同城市在空间上流动和溢出的发展演进,为政策规划提供实践指导。

## 4 结论与政策建议

### 4.1 结论

本文采用可变模糊识别模型测度2005—2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性水平,并利用社会网络分析方法对其韧性空间关联网络结构特征进行研究。得到以下结论:

(1)时间序列上,2005—2019年环渤海地区海岸带人地系统韧性虽呈上升趋势,但大部分地区仍处于较低水平,海岸带人地系统韧性有待提升;空间上,环渤海地区海岸带人地系统韧性存在显著的空间非均衡性,较高韧性水平区主要集中于经济发展水平较好的城市。

(2)环渤海地区海岸带人地系统韧性空间关联呈现日趋复杂、多流向的网络结构形态,其中整体网络特征表现为海岸带城市间网络节点的对称可达程度较高,但紧密度不高,溢出关系渠道偏少;个体网络特征表现为天津、唐山、青岛和烟台溢出效应显著,丹东、营口、锦州、葫芦岛、盘锦、威海等城市则表现出较强的受益效应;块模型结果显示环渤

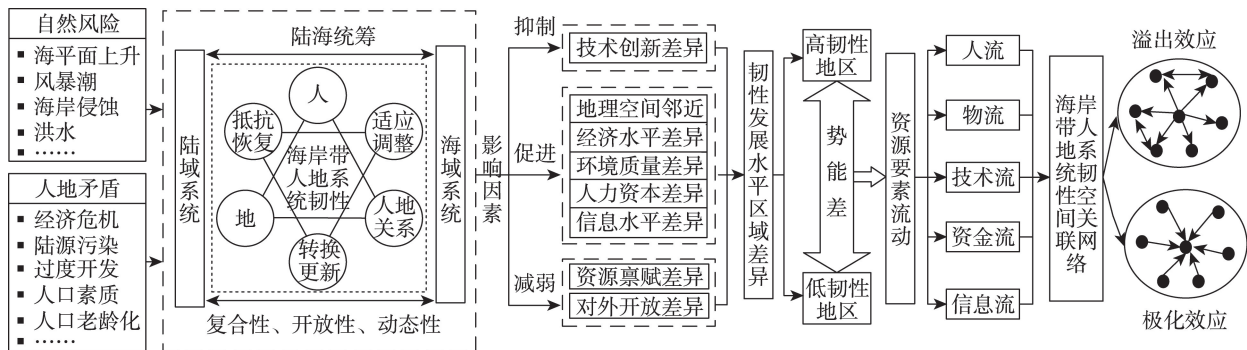


图7 海岸带人地系统韧性空间关联网络的形成机制

Figure 7 Formation mechanism of the spatial association network of coastal human-nature system resilience

2024年3月

海地区以板块间溢出为主,2019年“净受益”板块由威海、葫芦岛、营口、秦皇岛、锦州、盘锦、丹东、沧州和日照组成,“双向溢出”板块由滨州、东营、潍坊组成,“净溢出”板块由青岛、唐山和天津组成,“经纪人”板块由烟台和大连组成。

(3)通过形成机制分析发现,海岸带人地系统是多元主体与多样目标相结合的具有层次性的开放系统,其韧性空间关联网络的形成是多个驱动因素共同作用下的结果。其中,地理空间邻近、经济水平差异、环境质量差异、人力资本差异和信息化水平差异对空间关联网络形成具有推动作用,而对外开放差异和资源禀赋差异对空间关联网络形成的正向作用逐渐减弱,技术创新差异则对空间关联网络形成具有一定抑制作用。

#### 4.2 政策建议

根据研究结论,要实现海岸带人地系统韧性空间关联网络紧密化发展,需促进地区间资源要素有序流动并解决要素错配问题,有效提升优势互补、合作交流机制。本文提出的具体政策建议如下:

(1)对于天津、青岛等网络核心城市,积极发挥其示范带动作用,通过技术溢出、资源共享、人才引进等方式辐射带动周围城市,以促进韧性水平较低城市技术创新和提高资源要素配置效率;烟台、大连作为“经纪人”要继续发挥中介作用,承接来自核心城市的溢出,加强交通网、信息网等基础设施建设,进一步推动山东省和辽宁省内其他城市的韧性发展。

(2)对于营口、葫芦岛、锦州等在关联网络中受益最多,溢出较少的板块应尽快调整管理办法,充分发挥市场调节和政府调控作用,加快推进各地区基本公共服务均等化,缩小与其他城市差距,充分发挥学习和交流机制,避免不均衡发展矛盾加剧。

(3)核心城市与边缘城市需要打破技术创新壁垒,加强城市间经济的紧密性、相互补充城市间的产业结构,共享发展成果,探索城市间合作新机制,发挥不同城市优势互补,进一步推动人才、资本、信息、技术等创新要素跨地区流动和融通。

总结来说,本文对环渤海地区海岸带人地系统韧性进行评价,并借助社会网络分析方法对其空间网络结构进行探析,弥补了已有海岸带韧性研究在人地系统视角和空间关联网络研究上的不足,具有

一定的创新意义。未来可根据不同板块和城市在空间关联网络中扮演的角色,制定针对性政策以促进环渤海地区各城市间协调发展。

#### 参考文献(References):

- [1] 李杨帆, 向枝远, 杨奕, 等. 基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 130-140. [Li Y F, Xiang Z Y, Yang Y, et al. Application of ecological restoration and planning based on resilience thinking in coastal areas[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 130-140.]
- [2] 栾维新, 王辉, 片峰, 等. 中国陆海统筹战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2020. [Luan W X, Wang H, Pian F, et al. Research on Land and Marine Coordinated Development Strategy of China[M]. Beijing: Science Press, 2020.]
- [3] Liverman D. Assessing impacts, adaptation and vulnerability: Reflections on the Working Group II Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Global Environmental Change, 2008, 18(1): 4-7.
- [4] Mulder J P M, Hommes S, Horstman E M. Implementation of coastal erosion management in the Netherlands[J]. Ocean & Coastal Management, 2011, 54(12): 888-897.
- [5] Piégay H, Chabot A, Le Lay Y F. Some comments about resilience: From cyclicity to trajectory, a shift in living and nonliving system theory[J]. Geomorphology, 2020, DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.09.018.
- [6] Kim M, You S, Chon J, et al. Sustainable land-use planning to improve the coastal resilience of the social-ecological landscape[J]. Sustainability, 2017, DOI: 10.3390/su9071086.
- [7] Almutairi A, Mourshed M, Ameen R F M. Coastal community resilience frameworks for disaster risk management[J]. Natural Hazards, 2020, DOI: 10.1007/s11069-020-03875-3.
- [8] Lloyd M G, Peel D, Duck R W. Towards a social-ecological resilience framework for coastal planning[J]. Land Use Policy, 2013, 30(1): 925-933.
- [9] 吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统[J]. 经济地理, 1991, (3): 1-6. [Wu C J. On the research core of geography: The regional system of man earth relationship[J]. Economic Geography, 1991, (3): 1-6.]
- [10] 郭建科, 阴曙升, 王绍博, 等. 流动空间塑造的沿海国土空间地域功能识别理论[J]. 自然资源学报, 2023, 38(6): 1447-1463. [Guo J K, Yin S S, Wang S B, et al. The theory of regional function identification of coastal territorial space under the shaping of the flowing space[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(6): 1447-1463.]
- [11] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 等. 空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 891-903. [Liu Y X, Fu B J, Wang S, et al. Research progress of human-earth system dynamics based on spatial resilience theory[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 891-903.]

- [12] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1221–1234. [Liu Y S. Modern human–earth relationship and human–earth system science[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1221–1234.]
- [13] DasGupta R, Shaw R. An indicator based approach to assess coastal communities' resilience against climate related disasters in Indian Sundarbans[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2015, DOI: 10.1007/s11852–014–0369–1.
- [14] Beatley T. *Planning for Coastal Resilience: Best Practices for Calamitous Times*[M]. Washington DC: Island Press, 2012.
- [15] Liang J J, Li Y F. Resilience and sustainable development goals based social–ecological indicators and assessment of coastal urban areas: A case study of Dapeng New District, Shenzhen, China [J]. *Watershed Ecology and the Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.wsee.2020.06.001.
- [16] Rezaei A M, Loerzel J, Ferreira C M. Valuing natural habitats for enhancing coastal resilience: Wetlands reduce property damage from storm surge and sea level rise[J]. *PLoS One*, 2020, DOI: 10.1371/journal.pone.0226275.
- [17] Lam N S N, Qiang Y, Arenas H, et al. Mapping and assessing coastal resilience in the Caribbean region[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2015, 42(4): 1–8.
- [18] Oktari R S, Comfort L K, Dwitama P. Measuring coastal cities' resilience toward coastal hazards: Instrument development and validation[J]. *Progress in Disaster Science*, 2020, DOI: 10.1016/j.pdisas.2019.100057.
- [19] 李杨帆, 向枝远, 李艺. 海岸带韧性: 陆海统筹生态管理的核心机制[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(10): 3–7. [Li Y F, Xiang Z Y, Li Y. Coastal resilience: Core mechanism of integrated land–sea eco–management[J]. *Ocean Development and Management*, 2019, 36(10): 3–7.]
- [20] 王泽宇, 王焱熙. 中国海洋经济弹性的时空分异与影响因素分析[J]. 经济地理, 2019, 39(2): 139–145. [Wang Z Y, Wang Y X. Spatial and temporal differentiation and influencing factors of the marine economy resilience in China[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(2): 139–145.]
- [21] 汪永生, 李玉龙, 王文涛. 中国海洋生态经济系统韧性的时空演化及障碍因素[J]. 生态经济, 2022, 38(5): 53–59. [Wang Y S, Li Y L, Wang W T. Spatial and temporal changes and obstacle factors of marine ecological–economic resilience in China[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(5): 53–59.]
- [22] 吉雪强, 张跃松. 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络结构及动因[J]. 自然资源学报, 2023, 38(3): 675–693. [Ji X Q, Zhang Y S. Spatial correlation network structure and motivation of carbon emission efficiency in planting industry in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(3): 675–693.]
- [23] 赵林, 曹乃刚, 韩增林, 等. 中国生态福利绩效空间关联网络演变特征与形成机制[J]. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3183–3200. [Zhao L, Cao N G, Han Z L, et al. Evolution characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of ecological well–being performance in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12): 3183–3200.]
- [24] 赵林, 曹乃刚, 韩增林, 等. 中国绿色经济效率空间关联网络演变特征及影响因素[J]. 资源科学, 2021, 43(10): 1933–1946. [Zhao L, Cao N G, Han Z L, et al. Spatial correlation network and influencing factors of green economic efficiency in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(10): 1933–1946.]
- [25] 王凯, 余芳芳, 胡奕, 等. 中国旅游业碳减排潜力的空间关联网络结构及其影响因素[J]. 地理科学, 2022, 42(6): 1034–1043. [Wang K, Yu F F, Hu Y, et al. Spatial correlation network structure of tourism carbon emission reduction potential and the determinants in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(6): 1034–1043.]
- [26] 李苑君, 吴旗韬, 张玉玲, 等. 中国三大城市群电子商务快递物流网络空间结构及其形成机制研究[J]. 地理科学, 2021, 41(8): 1398–1408. [Li Y J, Wu Q T, Zhang Y L, et al. Spatial structure and formation mechanism of e–commerce express logistics network in the three major urban agglomerations of China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(8): 1398–1408.]
- [27] 洪思扬, 程涛, 王红瑞. 长江经济带水资源–能源网络特征[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1794–1807. [Hong S Y, Cheng T, Wang H R. Characteristics of the water–energy network in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Resources Science*, 2021, 43(9): 1794–1807.]
- [28] 李博, 曹盖. 基于涉海A股上市公司的中国沿海地区海洋经济网络结构韧性演化研究[J]. 地理科学进展, 2022, 41(6): 945–955. [Li B, Cao G. Structural resilience change of China's marine economic network based on the data of sea–related A–share listed companies[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(6): 945–955.]
- [29] 彭翀, 林樱子, 顾朝林. 长江中游城市网络结构韧性评估及其优化策略[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1193–1207. [Peng C, Lin Y Z, Gu C L. Evaluation and optimization strategy of city network structural resilience in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(6): 1193–1207.]
- [30] 魏冶, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 488–502. [Wei Y, Xiu C L. Study on the concept and analytical framework of city network resilience[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(3): 488–502.]
- [31] 张明斗, 张震. 长三角城市群城市经济韧性的空间关联网络研究[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(1): 69–79. [Zhang M D, Zhang Z. Spatial correlation network of urban economic resilience in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Geography and Geo–Information Science*, 2023, 39(1): 69–79.]
- [32] 李硕硕, 刘耀彬, 骆康. 生态安全约束下环鄱阳湖区城市经济韧性的空间关联网络特征[J]. 生态经济, 2023, 39(4): 95–102. [Li S S, Liu Y B, Luo K. Spatial correlation network characteristics of urban economic resilience in Poyang Lake Region under the eco–



2024年3月

- logical security constraints[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(4): 95-102.]
- [33] 盖美, 岳鹏, 杨苒菲. 环渤海地区海洋生态环境评价及影响因素识别[J]. *资源科学*, 2022, 44(8): 1645-1662. [Gai M, Yue P, Yang Q F. Assessment of marine ecological environment and identification of influencing factors in Bohai Rim region[J]. *Resources Science*, 2022, 44(8): 1645-1662.]
- [34] 王泽宇, 郭萌雨, 孙才志, 等. 基于可变模糊识别模型的现代海洋产业发展水平评价[J]. *资源科学*, 2015, 37(3): 534-545. [Wang Z Y, Guo M Y, Sun C Z, et al. The evaluation of modern marine industry development levels[J]. *Resources Science*, 2015, 37(3): 534-545.]
- [35] 盖美, 朱莹莹, 郑秀霞. 中国沿海省区海洋绿色发展测度及影响机理[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9266-9281. [Gai M, Zhu Y Y, Zheng X X. Marine green and its influence mechanism of coastal cities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(23): 9266-9281.]
- [36] 王兆峰, 刘庆芳. 中国省域旅游效率空间网络结构演化及其影响因素[J]. *地理科学*, 2021, 41(3): 397-406. [Wang Z F, Liu Q F. The evolution and influencing factors of spatial network structure of China's provincial tourism efficiency[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(3): 397-406.]
- [37] 蔡海亚, 赵永亮, 南永清. 中国“互联网+”发展的空间关联网及其影响因素: 基于社会网络分析视角的实证研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(6): 933-940. [Cai H Y, Zhao Y L, Nan Y Q. The spatial correlation network of China's 'Internet plus' development and its influencing factors: An empirical study based on the perspective of social network analysis[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(6): 933-940.]
- [38] 李梦程, 王成新, 刘海猛, 等. 黄河流域城市发展质量评价与空间联系网络特征[J]. *经济地理*, 2021, 41(12): 84-93. [Li M C, Wang C X, Liu H M, et al. Evaluation of urban development quality and characteristics of spatial connection network in the Yellow River Basin[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(12): 84-93.]
- [39] 彭翀, 袁敏航, 顾朝林, 等. 区域弹性的理论与实践研究进展[J]. *城市规划学刊*, 2015, 221(1): 84-92. [Peng C, Yuan M H, Gu C L, et al. Research progress on the theory and practice of regional resilience[J]. *Urban Planning Forum*, 2015, 221(1): 84-92.]
- [40] 盖美, 岳鹏, 徐晶晶, 等. 基于人地系统视角的海岸带韧性解构与测度[J]. *地理研究*, 2023, 42(10): 2605-2621. [Gai M, Yue P, Xu J J, et al. Deconstruction and measurement of coastal resilience based on human-nature system[J]. *Geography Research*, 2023, 42(10): 2605-2621.]
- [41] 李小建, 王玉钊, 李元征, 等. 黄河流域高质量发展: 人地协调与空间协调[J]. *经济地理*, 2020, 40(4): 1-10. [Li X J, Wen Y Z, Li Y Z, et al. High-quality development of the Yellow River Basin from a perspective of economic geography: Man-land and spatial coordination[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(4): 1-10.]
- [42] 陈东景, 张运磊, 刘玉, 等. 海洋生态经济系统适应性管理绩效测度与障碍因素诊断: 以山东省为例[J]. *经济地理*, 2020, 40(6): 185-192. [Chen D J, Zhang Y L, Liu Y, et al. Measure adaptive management and obstacle factors of marine eco-economic system: A case study of Shandong Province[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 185-192.]
- [43] 李博, 史钊源, 韩增林, 等. 环渤海地区人海经济系统环境适应性时空差异及影响因素[J]. *地理学报*, 2018, 73(6): 1121-1132. [Li B, Shi Z Y, Han Z L, et al. Spatio-temporal difference and influencing factors of environmental adaptability measurement of human-sea economic system in Bohai Rim region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1121-1132.]
- [44] 赵昕, 贾在珣, 丁黎黎. 多维视角下中国海洋经济绿色全要素生产率的空间异质性[J]. *资源科学*, 2023, 45(3): 609-622. [Zhao X, Jia Z X, Ding L L. Spatial heterogeneity of green total factor productivity of China's marine economy from a multidimensional perspective[J]. *Resources Science*, 2023, 45(3): 609-622.]
- [45] 盖美, 秦冰, 郑秀霞. 经济增长动能转换与绿色发展耦合协调的时空格局演化分析[J]. *地理研究*, 2021, 40(9): 2572-2590. [Gai M, Qin B, Zheng X X. The evolution of the spatiotemporal pattern of the coupling and coordination between economic growth kinetic energy conversion and green development[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(9): 2572-2590.]
- [46] 高鹏, 宁越敏, 何丹, 等. 企业异地投资视角下长三角城市经济增长的网络外部性研究[J]. *地理科学*, 2023, 43(7): 1216-1226. [Gao P, Ning Y M, He D, et al. Network externalities of urban economic growth in the Yangtze River Delta from the perspective of enterprises' non-local investment[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(7): 1216-1226.]
- [47] 初楠臣, 吴相利, 张平宇, 等. 基于现实与虚拟流视角下的东北地区城市空间网络特征[J]. *经济地理*, 2022, 42(5): 66-74. [Chu N C, Wu X L, Zhang P Y, et al. Urban spatial network characteristics from the perspectives of reality and virtual flow in Northeast China[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(5): 66-74.]
- [48] 黄杰. 中国能源环境效率的空间关联网结构及其影响因素[J]. *资源科学*, 2018, 40(4): 759-772. [Huang J. The spatial network structure of energy-environmental efficiency and its determinants in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(4): 759-772.]
- [49] 张明斗, 翁爱华. 长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网及形成机制[J]. *地理学报*, 2022, 77(9): 2353-2373. [Zhang M D, Weng A H. Spatial correlation network and its formation mechanism of urban water utilization efficiency in Yangtze River Economic Belt[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2353-2373.]
- [50] 孙才志, 张坤领, 邹玮, 等. 中国沿海地区人海关系地域系统评价及协同演化研究[J]. *地理研究*, 2015, 34(10): 1824-1838. [Sun C Z, Zhang K L, Zou W, et al. Study on regional system of man-sea relationship and its synergetic development in the coastal regions of China[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(10): 1824-1838.]

# Characteristics and formation mechanism of spatial association network of coastal human–nature system resilience in the Bohai Rim region

GAI Mei<sup>1,2</sup>, XU Jingjing<sup>1,2</sup>, YUE Peng<sup>1,2</sup>

(1. Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry of Education, Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. University Collaborative Innovation Center of Marine Economy High-Quality Development of Liaoning Province, Dalian 116029, China)

**Abstract:** **[Objective]** At the core of geographic research, the theory of regional human-nature system is also an important theoretical basis for the study of sustainable development of the coastal zone, where the interaction between land and sea is intense. It is of great significance to clarify the characteristics of the spatial association network and the formation mechanism of coastal human-nature system resilience, which will help to grasp the cross-regional synergistic development of the resilience level and enrich the scientific research of the coastal zone. **[Methods]** Based on the panel data of 17 cities in the coastal zone of the Bohai Rim region from 2005 to 2019, this study used the variable fuzzy identification method to measure the level of coastal human-nature system resilience, and applied the modified gravitational model and the social network analysis method to study its spatial association network characteristics and formation mechanism. **[Results]** (1) There was a significant spatial association between coastal human-nature system resilience in the Bohai Rim region, but the network structure was relatively loose; (2) Tianjin, Qingdao, Yantai, and Dalian dominated the association network, and Cangzhou, Rizhao, and Dandong were in the periphery of the spatial association network; (3) Jinzhou, Yingkou, and Huludao belonged to the “net beneficiary” block, Weifang, Binzhou, and Dongying belonged to the “two-way spillover” block, Qingdao, Tangshan, and Tianjin belonged to the “net spillover” block, and Yantai and Dalian belonged to the “broker” block. (4) The QAP regression model revealed that geographic proximity, differences in economic development levels, differences in environmental quality, differences in human capital, and differences in informationization levels are the dominant factors in the formation mechanism of spatial association network of coastal human-nature system resilience. **[Conclusion]** To realize the development of a close-knit network of spatial linkages for coastal human-nature system resilience, it is necessary to promote the orderly flow of resource elements between regions and solve the problem of factor mismatch, so as to effectively enhance the complementarity of strengths and the mechanism for cooperation and exchange.

**Key words:** coastal resilience; human-nature relationship areal system; spatial association network; social network analysis; Bohai Rim region