

都市郊区社会—生态系统脆弱性时空演变特征 及其流要素影响研究

任国平¹, 郑慧开¹, 尹 罡¹, 刘黎明^{2*}

(1. 湖南城市学院管理学院, 湖南 益阳 413000; 2. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘 要:流要素不仅是乡村脆弱性时空分化和重组的重要力量, 也愈发成为研究都市城郊乡村重构的重要视角。论文通过构建“敏感性—适应能力”的社会—生态系统脆弱性评价指标体系, 采用序排列多边形面积法、时空探索分析、固定效应空间误差模型等方法分析了1998—2018年上海市青浦区184个行政村的脆弱性时空演变特征及人口流、资金流、商贸流的流量度和流向度对脆弱性的影响。结果表明:①青浦区社会—生态系统脆弱性指数由0.521增长至0.622, 脆弱性等级由中低等脆弱提升至中等脆弱;时空格局呈“先增后降波动式”和“东高西低团聚式”的动态特征。②青浦区社会—生态系统脆弱性时间路径移动相对长度由“中部区域向四周逐渐递减”, 脆弱性时间路径移动弯曲度较小且呈现“南北部高、中部低”的空间格局;脆弱性时空跃迁的流动指数为0.509, 空间集聚结构存在相对较高的转移活性。③人口流是提升脆弱性的主导因素, 其影响系数为0.022, 而资金流和商贸流成为降低脆弱性的关键;流要素的流出度对脆弱性的影响总体上高于流入度, 人口流出度对脆弱性增长最显著, 影响系数为0.018, 而资金流入度的降低脆弱性能力最显著, 影响系数为-0.009;“敏感性协同—适应能力权衡”是影响青浦区脆弱性的主导模式;流要素对经济敏感性和经济适应能力的影响更为显著。

关键词:社会—生态系统;脆弱性;时空演变;流要素;流向度;青浦区

社会—生态系统(social-ecological system, SES)是人与自然耦合的复杂适应性系统^[1-2], 注重复杂系统时空尺度上的扰沌是区域可持续发展研究的热点和前沿^[3-4]。脆弱性作为系统或系统组分对风险的承受和恢复能力^[5], 起源于自然灾害学, 是全球环境变化及可持续发展研究的重要主题和分析工具^[6]。随着SES理论的发展, 深度融合脆弱性分析框架为区域人地关系研究提供了新的视角^[7-8]。随着全球化和区域间关系加深, 以静态孤立范式开展SES的

研究已难以适应区域网络关联发展的现实, 区域间各要素的流动正打破空间距离的阻尼束缚, 驱使着关联网络从“地方空间”孕育的向心型中心地模式向“流空间”塑造的多中心网络化模式转变^[9]。流要素作为在不同空间位置间流动地理对象, 其通常涵盖了物质、信息、资金、能量等的空间转移。位置之间各种流的出现与强化, 改变了以距离衰减效应为基本规律的传统认知^[10]。流要素通过多向度流动和非线性耦合过程导致其逐渐演化成一个因果互

收稿日期: 2023-07-30; 修订日期: 2023-11-16。

基金项目: 湖南省哲学社会科学规划基金项目(20JD011); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ50273); 国家自然科学基金项目(42271105); 数字化城乡空间规划关键技术湖南省重点实验室项目(2018TP1042)。[Foundation: Social Science Foundation of Hunan Province, No. 20JD011; Natural Science Foundation of Hunan Province, No. 2022JJ50273; National Natural Science Foundation of China, No. 42271105; Key Laboratory of Key Technologies of Digital Urban-Rural Spatial Planning of Hunan Province, No. 2018TP1042.]

第一作者简介: 任国平(1982—), 男, 湖南益阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为土地利用和乡村可持续发展研究。

E-mail: renguoping82@163.com

*通信作者简介: 刘黎明(1966—), 男, 浙江上虞人, 博士, 教授, 主要研究方向为土地资源可持续利用与保护。

E-mail: liulm@cau.edu.cn

引用格式: 任国平, 郑慧开, 尹罡, 等. 都市郊区社会—生态系统脆弱性时空演变特征及其流要素影响研究[J]. 地理科学进展, 2024, 43(3): 531-544. [Ren Guoping, Zheng Huikai, Yin Gang, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of social-ecological system vulnerability and the influence of flow elements in metropolitan suburbs. Progress in Geography, 2024, 43(3): 531-544.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2024.03.009

动的复杂关系网络系统^[11-12]。在这种关系网络中,区域SES超脱传统地理“场域空间”,并在流要素扰动下实现时空压缩^[13],产生系统对流要素扰动的敏感性以及因缺乏应对能力而导致系统结构和功能发生转变和受损。

目前,国内外学者关于脆弱性的研究主要集中在以下4个方面:①关注脆弱性理论框架构建和应用。集中于构建灾害风险^[3]、系统要素与结构^[14]、人地耦合系统^[4]等理论框架,采用社会—经济—生态组合指标^[15]、暴露性—敏感性—适应性指标^[4],对贫困山区^[5]、生态湖区^[16]、沿海区域^[17]等开展研究。②脆弱性评价方法多采用BP神经网络^[18]、PCA-DEA模型^[19]、超DEA模型^[20]等对旅游地^[5]、乡村^[6]等进行大量实证研究。③关注脆弱性演变趋势和影响因子。集中于分析时空格局变化^[21]、多尺度时空非均衡性^[22]、恒定性的低值集聚空间^[23]等及脆弱性演变的地理宏观影响因子^[5,21]、微观农户生计影响因子^[6]等。④关注脆弱性与流的关联。以“流空间”理论为代表的新经济地理学的出现开启了对区域结构演变和发展动态关联的新纪元,产生了依托传统中心地“中心流”理论对人地耦合系统结构研究范式^[9]和依托“流空间”理论为支撑的空间网络结构研究范式^[24];以交通流^[25]、信息流^[26]、多维流^[13]等流要素的时空共享和时空压缩作用对区域人地耦合系统的结构变化、系统解构、功能转型所产生的脆弱性被实证。

综上,国内外学者对SES脆弱性研究取得了较多成果,但仍存在以下不足之处:①现有的数理统计和空间分析对于脆弱性时空格局评价更多的是从时间或者空间单一视角出发,揭示时空片段的格局特征,具有非连续性和截面特性;②现有研究多以脆弱性在时空上简单的数量变化为默认导向,忽视了时空维度的脆弱性变迁过程和跃迁程度,导致以“流要素”为依托的脆弱性演变驱动机制研究理论假设立足性不够;③现有研究对脆弱性变化的流向度影响考虑不足,可能导致流要素的解释精度和问题诊断的实践性差异,影响脆弱性瞄准和精准降脆政策的应用。都市城郊作为城镇化和工业化的前沿阵地具有极其优越的地理和经济区位。该区域在社会变革中,受能流、物流和信息流的影响,导致乡村系统由相对封闭状态快速解构成偏离或远离平衡状态,其内核的SES受社会经济压力最为直接和敏感。因此,评估都市城郊SES脆弱性,分析

其时空演变特征,探寻流要素的主导影响对该区防范脆弱性风险和实现区域可持续发展具有重要的实践意义。

1 研究区域概况

青浦区位于120°53′~121°17′E、30°59′~31°16′N之间,总面积668.54 km²,地处长江三角洲经济圈的中心地带,紧邻上海市核心经济商贸区,为上海市生态水源涵养区。全区共有8个镇、3个街道,184个行政村。1998—2018年间,在快速城镇化和工业化等外力驱动下,青浦区社会经济发展与当地资源、生态环境矛盾冲突加剧,对生态资源依托型的乡村资源配置、产业结构和社会文化产生了深层次的扰动,深刻影响着该区SES可持续发展。其特征主要表现为:①社会主体流失严重。1998—2018年间,该区城镇化率年均增长1.47%,人口总量增长3.97倍,其中非农人口占74.11%,农村劳动力转移158.87万人次。②产业结构高度工业化。该区GDP总量由1998年的317.20亿元增加至2018年的1074.33亿元,其中工业总产值增加了8.95倍;然而第一产业总值占GDP总量的比例下降了8.01%。③农业生产要素快速非农化。农业土地利用总面积减少817.92 hm²,水域面积减少824.69 hm²,建设用地增加954.29 hm²等。④交通运输规模急速扩张。年均交通客运量2045.12万人次,2018年规模以上交通运输、仓储和邮政业企业营业收入2622.03亿元,年均增长10.89%。⑤土地利用结构破碎化。斑块密度年均增长2.57个/hm²,斑块集聚度下降1.43,景观多样性指数下降0.33^[27]。

2 研究方法 with 数据

本文以SES理论为基础,构建“敏感性—适应能力”的脆弱性多因子评价指标体系;采用序排列多边形面积法对SES脆弱性进行综合评价;在此基础上引入时空探索分析揭示脆弱性的时空演变特征;最后,从流要素的流量度和流向度视角,采用空间误差模型分析村域SES脆弱性时空演变的影响因子。

2.1 社会—生态系统脆弱性评价方法

2.1.1 社会—生态系统脆弱性评价指标体系构建

由于脆弱性的概念在学术界尚未形成统一认

识,IPCC、UNISDR、IHDP、IGBP等国际组织及部分国内外学者的研究成果表明,脆弱性是系统内外扰动的敏感性以及缺乏应对能力从而使系统的结构和功能发生转变的一种属性,敏感性和适应性是系统关键构成要素^[5-6,15,28-31]。因此,本文将SES脆弱性评价内化为“敏感性—适应能力”分析。借鉴已有的脆弱性评价指标体系^[5-11,26],结合脆弱性内涵和研究区特征,在充分考虑高频指标囊括性、构成要素覆盖性和要素组份多维性的基础上,构建SES脆弱性多因子评价指标体系(表1)。1) 敏感性作为反映系统对内外部干扰易于感知的属性,其敏感程度取决于结构的稳定性^[32]。因此,从区域经济结构、社会结构和生态结构3个维度,选择表征产业、收入、城乡差异等12个指标。2) 适应能力作为系统对扰动的响应与应对能力,以及从扰动影响中的恢复能力,

其能力大小取决于物理应对方式和人为意识^[6]。因此,从区域经济发展能力、现代化程度、社会服务保障覆盖和投入等方面选择12个指标。

2.1.2 社会—生态系统脆弱性评价模型及等级划分

本文采取极差法对指标进行标准化处理以消除量纲差异的影响^[33],采用熵值法确定各指标权重。采用序排列多边形面积和多面体体积法分别评价脆弱性子系统和SES脆弱性。

1) 脆弱性评价。以多面体体积表征脆弱性指数,其中原点到各顶点的长度为评价指标,长度采用对数标准化处理后的数值,最终生成SES脆弱性指数^[34],计算公式如下:

$$V_{V-SES} = \frac{1}{6} \sin \beta \times (A_2 \times W_2 \times A_3 \times W_3 + \dots + A_4 \times W_4 \times A_5 \times W_5) \times (A_1 \times W_1 + A_6 \times W_6)$$

(1)

表1 青浦区社会—生态系统脆弱性评价指标体系

Tab.1 Evaluation indicator system of social-ecological system vulnerability in Qingpu District

目标层	准则层	指标层(单位)	指标含义及数据来源	权重	属性
敏感性	经济 敏感性	城乡差距(%) ^a	表征城乡收入结构差异的敏感性;农业统计数据	0.0498	+
		外商直接投资额(亿美元)	表征区域投资结构的敏感性;统计年鉴数据	0.0361	-
		第二产业占比(%)	表征第二产业结构的敏感性;统计年鉴数据	0.0345	-
		第三产业占比(%)	表征第三产业结构的敏感性;统计年鉴数据	0.0332	-
	社会 敏感性	失业率(%)	表征区域就业结构的敏感性;统计年鉴数据	0.0397	+
		老龄化人口数(人)	表征区域人口结构的敏感性;统计年鉴数据	0.0413	+
		废弃建设地面积(hm ²) ^b	表征区域建设用地资源闲置的敏感性;土地整治数据	0.0338	+
		耕地抛荒面积(hm ²) ^c	表征区域农用地资源撂荒的敏感性;土地整治数据	0.0377	+
	生态 敏感性	农业斑块密度(个/hm ²)	表征区域土地资源破碎结构的敏感性;土地矢量数据	0.0399	+
		农业景观分维数	表征区域土地资源形状结构的敏感性;土地矢量数据	0.0372	+
		植被覆盖率(%) ^d	表征区域生态资源结构的敏感性;土地矢量数据	0.0594	-
		水域面积(hm ²)	表征区域生境结构的敏感性;土地矢量数据	0.0497	-
适应能力	经济 适应能力	村域年均总产值(万元)	表征区域经济发展能力;统计数据	0.0421	+
		农业产业占比(%)	表征农业产业发展潜力;统计年鉴数据	0.0609	+
		农副产品 ^e 商品率(%)	表征农业产业生产效率;经济统计数据	0.0447	+
		产业多样化指数	表征区域产业的稳定性和平衡性;经济统计数据	0.0488	+
	社会 适应能力	农业机械总动力(kW/hm ²)	表征区域农业现代化程度;农业统计数据	0.0479	+
		高中以上学历人数(人)	表征区域人力资源质量;统计年鉴数据	0.0421	+
		人口总量(人)	表征区域人力资源发展潜力;统计年鉴数据	0.0454	+
		公共服务覆盖率(%) ^f	表征区域社会服务应对能力;统计数据	0.0458	+
	生态 适应能力	污水年处理量(t)	表征区域环境的恢复能力;统计年鉴数据	0.0266	+
		地表水水质达标率(%)	表征区域水环境治理能力;统计数据	0.0267	+
		环保投入(亿元)	表征区域环境保护的应对能力;统计数据	0.0353	+
		地均化肥使用量(t/km ²)	表征区域环境保护意识;农业统计数据	0.0414	-

注:a. 城乡差距采用农民人均纯收入与城镇职工平均工资性收入比例表征;b. 废弃建设用地面积采用废弃的宅基地、村委、小学、卫生院等面积表征;c. 耕地抛荒面积采用水稻种植面积减少量表征;d. 植被覆盖率采用农用地、园地、林地、草地面积与总面积的比例表征;e. 农副产品选取粮食、蔬菜、水果为主要对象;f. 公共服务覆盖率采用养老保险和医疗保险覆盖率的均值表征。

式中: V_{I-SES} 为社会—生态系统脆弱性指数, β 为夹角, $A_1 \sim A_6$ 为准则层指标标准化值, $W_1 \sim W_6$ 为准则层指标权重。

2) 脆弱性子系统评价。采用序排列多边形面积法表征 SES 脆弱性子系统指数^[34], 计算公式如下:

$$M_{V-SES} = \frac{1}{2} \sin \gamma \times (a_1 \times w_1 \times a_2 \times w_2 + \dots + a_n \times w_n \times a_{n+1} \times w_{n+1}) \quad (2)$$

式中: M_{V-SES} 为社会—生态系统脆弱性子系统指数, γ 为夹角, $a_1 \sim a_{n+1}$ 为各评价指标标准化值, $w_1 \sim w_{n+1}$ 为各指标权重。

3) 由于脆弱性等级划分尚未形成统一标准, 借鉴灾害脆弱性^[35]、生态脆弱性^[33]、城市脆弱性^[31]、乡村脆弱性^[36]等相关研究, 结合青浦区脆弱性评价结果, 采用自然断点法将脆弱性分成 5 个等级: 低度脆弱 [0, 0.398]、中低度脆弱 (0.398, 0.597]、中度脆弱 (0.597, 0.698]、中高度脆弱 (0.698, 0.764] 和高度脆弱 (0.764, 1.000]。

2.2 社会—生态系统脆弱性时空演变特征分析方法

2.2.1 探索性空间数据分析 (exploring spatial data analysis, ESDA) 法

采用 ESDA 分析法对青浦区 184 个行政村 SES 脆弱性进行全局和局部空间自相关分析以揭示其空间关联和集聚特征, 具体分析步骤见文献[27]。

2.2.2 LISA (local indicators of spatial association) 时间路径分析

在 ESDA 分析的基础上将时间维度融入 LISA 中, 使研究单元静态的 LISA 实现连续动态表达, 以揭示脆弱性关联特征在时间尺度上的演化轨迹。LISA 时间路径轨迹的几何特征通常采用相对长度和弯曲程度表征^[37], 公式如下:

$$N_i = \frac{n \times \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \quad (3)$$

$$D_i = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,t}, L_{i,T})} \quad (4)$$

式中: N_i 为相对长度; D_i 为弯曲程度; n 为行政村数量; T 为时间间隔; $L_{i,t}$ 为 i 村第 t 年在 Moran's I 散点图的 LISA 坐标; $d(L_{i,t}, L_{i,t+1})$ 为 i 村从第 t 年到 $t+1$ 年移动距离; $d(L_{i,t}, L_{i,T})$ 为 i 村从第 t 年到末年移动距离。 N_i 表征局部空间结构动态性, 其值越大说明区域脆弱性动态性越强; $N_i > 1$ 表明第 i 个行政村的移动距

离超过全区平均距离, 否则相反。 D_i 表征局部空间动态路径的波动程度, 其值越大说明区域脆弱性随时间推移增幅越显著; $D_i > 1$ 表明第 i 个行政村的动态轨迹较全区均值曲折, 否则相反。

2.2.3 LISA 时空跃迁分析

LISA 时空跃迁过程通常采用转移概率矩阵和时空跃迁类型表征, 可划分为 TP_0 、 TP_1 、 TP_2 和 TP_3 四种类型; 其中, TP_0 表示行政村自身和邻域村类型都不跃迁; TP_1 表示行政村自身跃迁但邻域村不变; TP_2 表示行政村自身不变而邻域村跃迁; TP_3 表示行政村自身和邻域村都跃迁。借鉴 Rey^[38] 的研究采用时空流动与时空凝聚来表征脆弱性的空间格局路径依赖和锁定特征, 公式如下:

$$SC_t = \frac{F_{0,t}}{n} \quad (5)$$

$$SF_t = 1 - SC_t \quad (6)$$

式中: SC 为时空凝聚指数, $SC \in [0, 1]$, SC 值越大表明脆弱性空间稳定性越大; SF 为时空流动指数, $SF \in [0, 1]$, SF 值越大表明脆弱性空间动态性越大; t 为研究时段; $F_{0,t}$ 为 t 时段内青浦区 SES 脆弱性发生 TP_0 类型跃迁的行政村数量; n 为区域内可能发生跃迁的数量。

2.3 社会—生态系统脆弱性动态演变的流要素选择与检验

1) 流要素选择。依据流要素定义所涵盖的物质、信息、资金、能量流动及流要素的流量和流向属性, 结合脆弱性特征, 选择人口流、资金流、商贸流的流量度和流向度作为分析 SES 脆弱性动态演变的流要素 (表 2)。① 人口流。人口是区域发展重要的人力资本, 选择区域人口迁移量和劳动力务工人员次进行表征。② 资金流。资金是区域发展重要的收入来源和金融资本, 选择集体经济组织收入及其长短期投资额进行表征。③ 商贸流。商品贸易是区域发展的社会资本, 选择传统商贸量和现代电商交易量的运输量进行表征。

2) 控制变量选择。为提高流要素对脆弱性影响的解释精度, 研究借鉴有关脆弱性影响因子的研究成果^[3-7, 29-32], 依据影响因子的重要性、数据可获取性、研究区特性等原则, 遴选技术流运转基础、信息流支撑基础、人均 GDP 及其平方项、各级政策辅助 5 个因子形成一组控制变量 (表 2)。① 技术流运转基础采用农户参加技术培训、就业指导、相关政策学习次数表征; ② 信息流支撑基础采用互联网和固

表2 社会—生态系统脆弱性演变的流影响要素

Tab.2 Flow elements affecting social-ecological system vulnerability change

类型	指标	代码	指标说明(单位)	VIF
解释变量	人口流	FP	区域人口流出量与流入量之和(人次)	8.564
	人口流入	FP ⁺	区域人口完全流入量与半年以上劳动力流入务工数之和(人次)	7.568
	人口流出	FP ⁻	区域人口完全流出量与半年以上劳动力外出务工数之和(人次)	8.225
	资金流	FC	区域资金流入和流出总额(万元)	9.218
	资金流入	FC ⁺	村集体经济组织年均收入(万元) ^a	1.006
	资金流出	FC ⁻	行政村对外长短期投资总额(万元) ^b	2.102
	商贸流	FG	区域货物的流入和流入总量(件)	7.773
	商贸流入	FG ⁺	区域通过物流企业 ^c 的收货量(件)	3.204
	商贸流出	FG ⁻	区域通过物流企业的发货量(件)	2.875
控制变量	技术流运转基础	FT	农户参加技术培训、就业指导等以及管理部门组织学习相关政策等次数(次)	1.152
	信息流支撑基础	FI	区域互联网和通讯设备覆盖度的均值(%)	1.120
	人均GDP	PGDP	区域年均总产值与总人数比值(万元/人)	6.214
	人均GDP平方	PGDP ²	区域年均总产值与总人数比值的平方(万元/人) ²	8.562
	各级政策辅助	LP	区域各级管理部门颁布的政策、制度、意见等(项)	1.042

注:a.村集体经济组织年均收入包含财政转移支付、各级政府项目投资资金和村集体经济组织创收收入;b.行政村长短期投资资金中跨年度的投资按照当年投资额进行分年度统计;c.区域物流企业指青浦区各行政村均可收发件的10家,包括EMS、韵达、宅急送、顺丰、德邦、中通、申通、百世、天天、圆通。

定电话覆盖度表征;③人均GDP及其平方项作为表征区域经济发展的重要指示剂,反映区域经济的活力差异;④各级政策辅助采用政府各部门制定和出台的各项政策数量表征。

3) 变量检验。考虑到各变量间关系而导致估计结果失真,对所有变量进行多重共线性检验。结果显示,各变量的方差膨胀因子(VIF)均小于10,达到模型估计要求。

2.4 数据来源与处理

2.4.1 数据来源

首先是地理空间数据,包括1998、2008和2018年3期1:5000青浦区土地利用现状图。其次是社会统计数据,来源于1999、2009和2019年《青浦区统计年鉴》《青浦区国民经济和社会发展统计公报》《青浦区乡镇统计年鉴》《青浦区农业统计年鉴》《青浦区村域社会统计报告》《青浦区乡镇工业发展报告》《青浦区林业统计年鉴》《青浦区环境调查报告》《土地整治规划2010—2020年》《土地利用总体规划2006—2020年》等。最后是农户调研数据,其中:村域土地类数据来源于“农村集体建设用地减量化普查”;农户社会经济类数据源于农业农村委员会农村固定观察点农户数据和课题组5人于2019年7—10月开展的参与式农户调查(共计1485份,有效回收率95%),问卷由家庭成员构成、土地情况、固定资

产情况、农户家庭生产经营情况等10部分构成。

2.4.2 数据处理

首先将矢量图转换成像元为30 m的栅格图,使用Fragstats 3.3软件提取闲置用地斑块数、景观分维数、斑块密度;其次利用ArcGIS空间统计功能计算水域面积和植被覆盖率。由于无法分割淀山湖边界,故水域面积不包含淀山湖面积;个别评价单元缺失或异常值剔除的数据借助SPSS软件进行均值插补处理;为消除货币因素影响,以2018年为基期对各项指标进行修正;为了减少因子的指数趋势,对流要素及控制变量进行取对数处理。

3 结果与分析

3.1 村域社会—生态系统脆弱性评价结果分析

(1) 脆弱性子系统时间异质性显著。1998—2018年青浦区SES敏感性和适应能力的值域范围分别为[0.126, 0.806]和[0.181, 0.795],且在典型年份上敏感性和适应能力指标分别呈现“先升后降”和“逐渐提升”的变化趋势。研究期间敏感性指数增长了0.077(表3)。青浦区SES发展结构的差异是造成敏感性指数呈“先升后降”变化的重要原因。1998—2018年间,该区凭借有利的经济区位条件,大力发展劳动密集型加工业导致该区的GDP由

表3 1998、2008和2018年青浦区社会—生态系统脆弱性评价结果

Tab.3 Results of social-ecological system vulnerability assessment for Qingpu District in 1998, 2008 and 2018

区域	敏感性			适应能力			脆弱性		
	1998年	2008年	2018年	1998年	2008年	2018年	1998年	2008年	2018年
徐泾镇	0.471	0.593	0.550	0.489	0.531	0.546	0.555 (II)	0.765 (IV)	0.736 (IV)
赵巷镇	0.430	0.572	0.506	0.474	0.515	0.533	0.599 (II)	0.759 (IV)	0.722 (IV)
华新镇	0.412	0.504	0.521	0.518	0.531	0.535	0.608 (III)	0.727 (IV)	0.706 (IV)
重固镇	0.413	0.542	0.466	0.506	0.521	0.528	0.591 (II)	0.700 (III)	0.655 (III)
白鹤镇	0.351	0.457	0.422	0.536	0.573	0.599	0.453 (II)	0.642 (III)	0.620 (III)
夏阳镇	0.653	0.680	0.673	0.421	0.549	0.651	0.597 (II)	0.713 (IV)	0.533 (II)
盈浦镇	0.620	0.714	0.686	0.437	0.505	0.615	0.621 (III)	0.739 (IV)	0.569 (II)
香花桥镇	0.589	0.698	0.668	0.491	0.531	0.600	0.631 (III)	0.748 (IV)	0.626 (III)
朱家角镇	0.339	0.482	0.438	0.674	0.715	0.750	0.392 (I)	0.566 (II)	0.534 (II)
练塘镇	0.311	0.569	0.521	0.587	0.616	0.624	0.399 (I)	0.599 (II)	0.586 (II)
金泽镇	0.246	0.383	0.335	0.673	0.702	0.737	0.322 (I)	0.583 (II)	0.559 (II)
青浦区均值	0.439	0.551	0.516	0.525	0.571	0.611	0.521 (II)	0.688 (III)	0.622 (III)
青东区均值	0.416	0.603	0.575	0.502	0.535	0.547	0.559 (II)	0.719 (IV)	0.688 (III)
青中区均值	0.621	0.701	0.675	0.448	0.527	0.623	0.611 (III)	0.734 (IV)	0.576 (II)
青西区均值	0.298	0.480	0.434	0.644	0.678	0.703	0.369 (I)	0.585 (II)	0.559 (II)

注：“脆弱性”列括号中为脆弱性等级，I、II、III、IV、V分别表示低度、中低度、中度、中高度及高度脆弱；青东区包括徐泾镇、赵巷镇、华新镇、重固镇、白鹤镇，青中区包括夏阳镇、盈浦镇、香花桥镇，青西区包括朱家角镇、金泽镇、练塘镇。

317.20 亿元上升至 1074.33 亿元，外商投资增加 16.40 亿美元；在比较经济效益影响下，研究期间该区三大产业 GDP 比例由 8.80:57.3:33.9 变化为 0.8:43.6:55.6。然而，适应能力指数增加了 0.086。产业多样化、农业现代化、社会保障全覆盖、环保投入等应对因素的逐年提升是造成青浦区 SES 适应能力增加的主要原因。

(2) 脆弱性子系统空间非均衡性明显。1998—2018 年青浦区 SES 敏感性指数呈现青中(0.666)>青东(0.531)>青西(0.404)的“中部高、两翼低”非均衡性特征。青中区域作为青浦区的政治、经济和文化中心，在二三产业快速发展下人口过度涌入和集聚，形成了人地系统间的尖锐矛盾，导致经济和生态敏感性明显高于其他区域。青西区域作为上海市水源涵养地，其经济产业发展速度低于其他区域。适应能力指数呈现青西(0.675)>青中(0.533)>青东(0.529)的“西高东低”分异特征。青东区域作为紧邻上海市中心城区的近郊区虽然适应能力子系统个别指标远高于其他区域，如村域年均总产值、农业机械化总动力、环保投入量等，但该区在过度商业化发展模式下其适应能力的累积程度低于青中和青西。

(3) 社会—生态系统脆弱性时空格局呈“先增后降波动式”和“东高西低团聚式”的动态特征。

1998—2018 年青浦区 SES 脆弱性指数由 0.521 增长至 0.622，脆弱性等级由中低等脆弱提升至中等脆弱。脆弱性在时间上的变化趋势主要源于敏感性子系统的先增后降的变化和适应能力子系统逐年增加所致。青浦区前阶段的全面发展极大地推动了组分敏感性提升，系统适应能力虽有所提升，但区域整体的适应能力和应对扰动响应措施的提升程度明显小于敏感性增长，形成了脆弱性增长。后阶段青浦区进入相对稳定发展时期，表现为在追求经济数量增长的同时强调高质量发展。研究期间 SES 脆弱性指数在空间上呈现“东高西低团聚式”变化趋势的主要原因为：① 青西区域依靠厚实的生态资源本底及其全区普惠经济成为低敏感和高适应模式下的低脆弱等级团聚，脆弱性等级变化呈现低等—中低等趋势，较为接近“低脆弱性，高适应能力”的理想情景。② 青中区域凭借公共投入优势成为高敏感和高适应模式下的中低脆弱等级团聚，脆弱性等级变化幅度明显呈现低等—中高等—中低等趋势，提高区域的适应能力成为未来区域实现可持续发展的重点。③ 青东区域在双中心推拉作用导致的城乡结构差异和社会适应能力不足的影响下成为高敏感和低适应模式下的中等脆弱等级团聚，脆弱性等级变化呈现增幅大降幅小的趋势，子系统间均衡成为未来该区降低脆弱性重点关注的目标。

3.2 社会—生态系统脆弱性动态特征分析

3.2.1 社会—生态系统脆弱性空间关联特征

(1) 脆弱性全局空间集聚显著,空间差异逐渐缩小。全局空间自相关检验结果显示,在5%显著性条件下,1998、2008、2018年Z值分别为5.718、6.986和8.577,表明不同年份行政村脆弱性总体上呈现集聚特征。1998、2008、2018年行政村脆弱性Global Moran's I指数分别为0.391、0.429和0.472,表明行政村脆弱性高值区和低值区在空间上趋于邻近,整体上具有显著的集聚特征。

(2) 脆弱性局部关联格局动态变化明显且区域极化特征凸显。1998—2018年青浦区行政村脆弱性HH和LL集聚区由62个增加至86个,增长幅度为38.71%,总面积增加了87.90 km²;同时,1998—2008年脆弱性LL区虽然呈现缓慢下降的趋势,但2018年其面积为100.48 km²,占总面积的15.03%(表4)。上述结果表明,青浦区脆弱性呈现“俱乐部”和极化式的空间格局,两级分化严重,具有脆弱性时空跃迁的基础。

3.2.2 社会—生态系统脆弱性时空交互特征

(1) 脆弱性LISA时间路径变化特征。采用

ArcGIS 10.0的自然断点法将相对长度和弯曲度划分成低等、中等、中高等和高等4种变化等级(图1)。

① 研究期间脆弱性LISA时间路径移动相对长度呈现由中部区域向四周逐渐递减的变化趋势(图1a)。相对长度高值区(中高等和高等)的行政村为109个,主要分布在青浦区中部。相对长度低值区(低等和中等)的行政村为75个,主要分布在该区北部和西南部。

② 脆弱性LISA时间路径移动弯曲度较小,呈现南北部高、中部低的空间格局(图1b)。弯曲度高值区(高等)的行政村为42个,主要分布在西北—西南部的白鹤镇和练塘镇。而弯曲度低值区(低等)主要分布于环淀山湖周边的金泽镇和朱家角镇的50个行政村。脆弱性LISA时间路径移动相对长度和弯曲度的时空特征表明,青浦区1998—2018年行政村脆弱性的局部空间结构具有强动态性和非稳定性。

(2) 脆弱性LISA时空跃迁特征。整体上,青浦区脆弱性空间凝聚较差,空间格局不稳定,具有较强的转移活性。1998—2018年脆弱性时空跃迁中TP₀型跃迁最活跃,发生该类型跃迁的行政村占比为47.83%;Moran's I散点图的时空凝聚指数为

表4 1998—2018年青浦区行政村社会—生态系统脆弱性集聚类型分布
Tab.4 Global Moran's I of social-ecological system vulnerability in Qingpu District during 1998–2018

脆弱性集聚类	1998年			2008年			2018年		
	村个数/个	面积/km ²	面积比例/%	村个数/个	面积/km ²	面积比例/%	村个数/个	面积/km ²	面积比例/%
HH类	21	73.92	11.06	42	147.84	22.11	54	190.08	28.43
HL类	58	221.13	33.08	52	199.68	29.87	40	149.76	22.40
LH类	38	174.24	26.06	28	107.14	16.03	31	122.76	18.36
LL类	41	128.74	19.26	28	87.92	13.15	32	100.48	15.03
不显著类	26	70.51	10.55	34	125.96	18.84	27	105.46	15.77

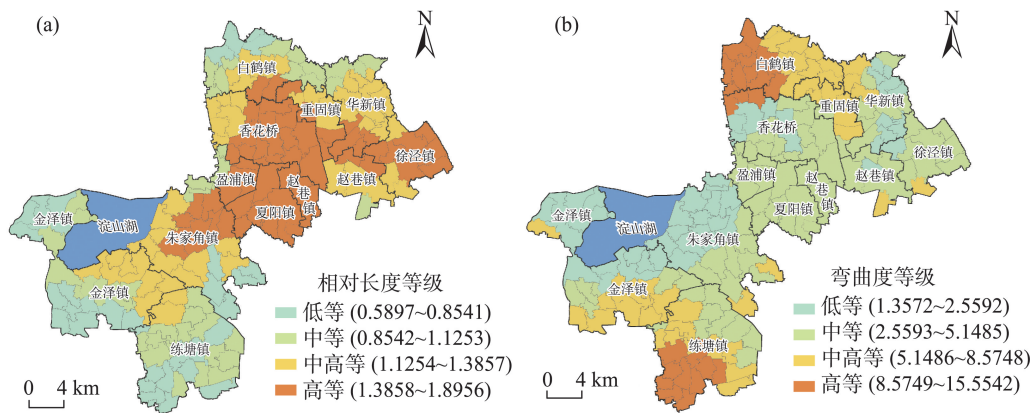


图1 青浦区行政村社会—生态系统脆弱性动态交互特征
Fig.1 Dynamic interaction characteristics of social-ecological system vulnerability in Qingpu District

0.491,而时空流动指数为0.509(表5);表明青浦区脆弱性的局部空间联动性较强,空间集聚结构存在相对较高的转移活性和较低的路径锁定性。从时段分析,1998—2008年和2008—2018年脆弱性时空跃迁TP₁型的行政村占比分别为23.64%和17.54%,成为继TP₀型后排名第二的主要类型。此外,虽然1998—2018年该区脆弱性时空流动指数为0.509,但两个时段的脆弱性时空凝聚性仍较强,空间格局较为稳定。

3.3 社会—生态系统脆弱性动态交互演变的流要素影响分析

3.3.1 流要素空间分析模型构建

考虑青浦区脆弱性存在的空间聚集性而无法规避其空间依赖性和异质性的客观问题,为克服普通最小二乘法(ordinary least squares, OLS)估计结果的有偏性,本文在分析流要素对脆弱性变化的影响中借鉴Anselin^[39]的成果,分别选择空间误差模型(spatial error model, SEM)和空间滞后模型(spatial lag model, SLM)进行参数估计和比较。

SEM:

$$\begin{aligned} V_{it} &= \beta_1 \ln F_{ik} + \beta_2 \ln X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \\ \varepsilon_{it} &= \varphi \ln W_{it} \varepsilon_{it} + \sigma_{it} \end{aligned} \quad (7)$$

SLM:

$$V_{it} = \rho \ln W_{it} V_{it} + \beta_1 \ln F_{ik} + \beta_2 \ln X_{it} + \mu_i + \gamma_t \quad (8)$$

式中: V_{it} 为第*i*个行政村在*t*时期的SES脆弱性; F_{ik} 为流的核心解释变量; X_{it} 为控制变量; μ_i 和 γ_t 分别为个体和时间效应; ε_{it} 为随机干扰项; W_{it} 为第*i*个行政村在*t*时期的权重; $\varphi \ln W_{it} \varepsilon_{it}$ 为邻域干扰项的

空间溢出效应; $\rho \ln W_{it} V_{it}$ 为空间滞后项; β_1 和 β_2 分别为其对应解释变量的回归系数; φ 为随机干扰项的空间滞后系数; σ_{it} 为残差项。

3.3.2 流要素空间分析模型比选结果分析

本文先后对两种模型进行拉格朗日乘子检验和豪斯曼检验,得到结果如表6所示。1)拉格朗日乘子检验显示9个因变量的SEM统计量及其显著性优于SLM。其中,统计量的均值排序结果为R-LM-ERR(43.819)>LM-ERR(43.266)>R-LM-LAG(8.064)>LM-LAG(6.713);同时R-LM-ERR和LM-ERR的统计量均在1%水平上显著,而R-LM-LAG和LM-LAG的显著性明显较差。2)虽然豪斯曼检验结果显示两种模型的固定效应(FE)和随机效应(RE)的参数估计并没有呈现明显的差异,但是为克服变量漏选导致的内生性进而产生参数估计的有偏性,本文选择固定效应估计(FE)。综上,采用固定效应空间误差模型(SEM-FE)估计流要素对SES脆弱性变化的影响。

3.3.3 社会—生态系统脆弱性时空演变的流要素影响结果分析

(1)流要素对脆弱性的影响在流量度上呈现程度和方式的显著差异,人口流是拉升脆弱性的主导因素,而资金流和商贸流成为降低脆弱性的关键。SEM-FE估计结果显示(表7),在流量度上3个流要素均呈现显著性,其影响系数均值为0.013,且其系数绝对值大小依次为:人口流(0.022)、资金流(0.013)、商贸流(0.006)。由此可见,人口流是提升青浦区脆弱性的重要流要素;表现为人口流动程度

表5 1998—2018年青浦区行政村社会—生态系统脆弱性时空跃迁矩阵

Tab.5 Spatiotemporal transition matrices of social-ecological system vulnerability during 1998–2018

时段		HH _{t+1}	LH _{t+1}	LL _{t+1}	HL _{t+1}	行政村数量		跃迁类型		SF	SC
						数量/个	比例/%	类型	比例/%		
1998—2008年	HH _t	0.537	0.252	0.129	0.100	74	40.22	TP ₀	46.77	0.517	0.483
	LH _t	0.177	0.518	0.119	0.208	47	25.54	TP ₁	23.64		
	LL _t	0.131	0.246	0.474	0.165	41	22.28	TP ₂	17.52		
	HL _t	0.118	0.219	0.253	0.428	22	11.96	TP ₃	12.07		
2008—2018年	HH _t	0.491	0.206	0.086	0.232	81	44.02	TP ₀	51.26	0.494	0.506
	LH _t	0.217	0.512	0.123	0.162	43	23.37	TP ₁	17.54		
	LL _t	0.102	0.254	0.530	0.134	33	17.93	TP ₂	19.81		
	HL _t	0.174	0.071	0.189	0.584	27	14.67	TP ₃	11.39		
1998—2018年	HH _t	0.547	0.104	0.131	0.227	88	47.83	TP ₀	50.33	0.509	0.491
	LH _t	0.114	0.513	0.223	0.165	35	19.02	TP ₁	16.57		
	LL _t	0.103	0.184	0.496	0.236	35	19.02	TP ₂	19.65		
	HL _t	0.203	0.120	0.253	0.443	26	14.13	TP ₃	13.45		

表6 空间分析模型的检验结果
Tab.6 Test results of the spatial analysis models

指标	LM-ERR 检验		R-LM-ERR 检验		LM-LAG 检验		R-LM-LAG 检验	
	统计量	P值	统计量	P值	统计量	P值	统计量	P值
脆弱性	44.974	<0.001	61.528	<0.001	8.874	<0.001	9.662	0.421
敏感性	28.257	<0.001	24.952	<0.001	5.779	0.077	4.714	0.010
适应能力	66.870	<0.001	62.717	<0.001	4.712	0.105	4.974	0.005
经济敏感性	37.585	<0.001	37.893	<0.001	2.014	<0.001	2.335	0.272
社会敏感性	76.351	<0.001	72.824	<0.001	4.695	0.133	5.214	0.372
生态敏感性	28.652	<0.001	32.617	<0.001	6.571	0.141	9.729	<0.001
经济适应能力	38.599	<0.001	40.931	<0.001	10.695	0.447	15.338	0.588
社会适应能力	19.547	<0.001	15.999	<0.001	9.712	<0.001	7.852	0.037
生态适应能力	48.563	<0.001	44.914	<0.001	7.364	0.005	12.759	0.012

表7 基于SEM-FE模型的空间估计结果
Tab.7 Estimation results of the SEM for the fixed-effect

变量	脆弱性	敏感性	适应能力	经济 敏感性	社会 敏感性	生态 敏感性	经济 适应能力	社会 适应能力	生态 适应能力
FP	0.022***	0.015***	-0.011***	0.023***	0.026***	0.013**	-0.015***	-0.011***	-0.004***
FP ⁺	0.018***	0.010***	-0.011 [*]	0.021**	0.026 [*]	0.006***	-0.006**	-0.006**	-0.002
FP ⁻	0.012***	0.006***	-0.003**	0.009 [*]	0.012***	0.011**	-0.004 [*]	-0.002 [*]	-0.003
FC	-0.013**	-0.007 [*]	0.018***	-0.010***	-0.009***	0.011**	0.032***	0.028***	0.019**
FC ⁺	-0.008***	-0.003***	0.015***	-0.011 [*]	-0.011 [*]	-0.003**	0.019***	0.022 [*]	0.018 [*]
FC ⁻	-0.009***	-0.011 [*]	0.016**	-0.009**	-0.007**	-0.001 [*]	0.017**	0.016 [*]	0.022**
FG	-0.006 [*]	-0.007**	0.013***	-0.008 [*]	-0.009	-0.011	0.015***	0.006	0.004 [*]
FG ⁺	-0.003 [*]	-0.005 [*]	0.004**	-0.009 [*]	0.005	0.009	0.019 [*]	0.005 [*]	0.002 [*]
FG ⁻	-0.002**	-0.005**	0.002 [*]	0.003 [*]	0.002	0.004	0.009 [*]	0.004	0.003
FT	-0.020**	-0.016**	0.034***	-0.016**	-0.012**	-0.015***	0.028***	0.026***	0.037***
FI	-0.018 [*]	-0.011**	0.029***	-0.014**	-0.009**	-0.006 [*]	0.015***	0.021***	0.018**
PGDP	-0.014***	-0.014***	0.009***	-0.019***	-0.019***	0.019***	0.018**	0.017***	-0.006**
PGDP ²	0.036***	0.024***	-0.023**	-0.018 [*]	0.009**	0.037***	0.011**	-0.018 [*]	-0.025**
LP	-0.002***	-0.001 [*]	0.003 [*]	-0.005	-0.006**	-0.004 [*]	0.006	0.009 [*]	0.012**
Lambda	0.035**	0.040***	0.027 [*]	0.040***	0.047**	0.062	0.029***	0.048**	0.033**
样本数	552	552	552	552	552	552	552	552	552
R ²	0.409	0.420	0.398	0.442	0.414	0.423	0.441	0.381	0.384

注：*、**和***分别表示通过10%、5%和1%的显著性水平检验。

每增加1%，该区的SES脆弱性水平将增加0.022。该结果验证了陈佳等^[40]的结论，即人口要素作为重要媒介，其流动的数量、土地利用行为、生计方式等极大地扰动着人地耦合系统造成系统结构变化和
功能转型，产生脆弱性风险。人口流动尤其是跨区域的城乡流动不断改变着区域劳动力数量、结构和人力资本水平，导致区域经济结构、社会结构和生态结构发生改变。对流出区而言，造成人口老年化、土地荒废化、建设用地闲置化、耕地抛荒化等，阻碍社会经济发展；对大量人口流入区而言，人口

的大量集聚对改变区域的资源结构、就业状况和生态环境影响深远，易于产生高脆弱性的恶性循环。

然而，资金流和商贸流对降低该区SES脆弱性效果显著，其影响力分别为-0.013和-0.006。该结果与王群等^[5]提出的构建完善的乡村金融体系和物流体系促进基础投资建设及商贸流通以抵制脆弱性风险的结果一致。① 资金流作为弥补区域发展资本不足的重要补充和区域持续发展的源动力，极大地推动着区域发展方式的转型和高质量发展；其对摆脱以往城乡二元架构下的独立且封闭的资金

链束缚和充分发挥其时空扩散效应、维持社会—生态系统结构的稳定性作用巨大。② 商贸流作为维系区域发展的内生决定要素,其本质为区域发挥各自比较优势,实现资源互补、产业重构、产品共享和区域融合的过程。以传统的交通运输体系和互联网时代的电商渠道网络并行的跨时空现代商贸物流通过搭建一种非接触性共同流动空间,在缓解区域高资源消耗压力和低水平适应能力的同时,倒逼区域社会—生态系统结构不断优化和调整,实现区域生产、生活和生态空间的多维双向重构,以达到降低脆弱性的目的。

(2) 流出度对脆弱性的影响强于流入度,但其程度和方式差异显著。在流向度上3个流要素的流入度和流出度影响系数均显著,其影响力的绝对均值分别为0.010和0.008。然而人口流的流向度对脆弱性提升作用显著,其均值为0.016;而资金流和商贸流的流向度对降低脆弱性作用显著。

首先,人口流出度对脆弱性增加最显著,影响力均值为0.018,比人口流入度的影响力高0.006。造成上述结果的主要原因为人口流出度总量远大于流入度。虽然人口流动尤其是乡村劳动力跨区域流动能释放剩余劳动力转移带来的内生增长潜力,以此推进该区社会经济稳定增长,加之人口流入过程中先进的技术和价值观念等空间外溢所产生的“回流效应”能激发乡村多维重构;但在区域人口流出庞大的体量下,其所带来的区域“资源诅咒”、老年化、资源闲置等风险改变着区域的社会经济结构,造成人口流向度对脆弱性的提升作用显著。

其次,以村集体经济组织长短期贷款主导的资金流出度较好地发挥了资金流的拉动作用,其对脆弱性降低的影响力为-0.008。青浦区依托“三来一补”的乡镇企业发展模式促进了乡村产业的发展,而资金流出的趋利性导致2/3的资金流向了技术密集型和劳动力密集型产业,导致三大产业结构失衡,对区域社会经济高质量发展产生阻力。以村集体经济组织收入为主导的资金流入度对降低脆弱性的显著影响为-0.009。该结果表明通过政策性转移支付和乡镇企业创收渠道取得了大量资金的村集体,通过提高公共服务的覆盖度等手段,对减少区域的失业率、修复生境、营造良好的经济环境以降低脆弱性作用显著。

再次,商贸流的流出度和流入度对脆弱性作用均呈显著状态但作用相对较小,其影响系数分别

为-0.003和-0.002。以传统的交通运输体系和互联网时代的电商渠道网络并行的跨时空现代商贸流出驱使着该区产业结构调整 and 分工细化,对提升区域农副产品商品率和提高各产业的增加值等作用加大。然而,受到商品同质化、产业雷同化等因素的影响,流出度对脆弱性的影响程度仅为-0.003。而依托于各产业快速发展的流入度对脆弱性的影响更小(-0.002),主要原因是商贸流入区的社会经济发展较好,产业结构相对完善。

(3) “敏感性协同—适应能力权衡”模式成为流要素影响脆弱性的主导模式,但存在子系统维度的路径差异。① 流要素对适应能力子系统的影响力强于敏感性子系统。耦合了人为意识和应对能力的适应能力相比于系统对干扰感知的敏感性更具外部调节效应。② 流要素对脆弱性与敏感性子系统的影响方式一致,而流要素对脆弱性与适应子系统的影响方式异质。具体表现为人口流正向影响脆弱性和敏感性,负向影响适应能力;而资金流和商贸流负向影响脆弱性和敏感性,正向影响适应能力。上述结果从侧面验证了田亚平等^[32]、李鹤等^[14]、王娅等^[4]关于脆弱性与敏感性成正比而与适应能力成反比的结论。③ 流要素对敏感性和适应能力子系统的影响存在路径差异。人口流对敏感性子系统呈正向影响,对适应性子系统呈负向综合影响;而资金流和商贸流对经济敏感性的负向综合影响为-0.019,对经济适应能力的正向综合影响为0.047,均居于各子系统之首。该结果表明,经济状况作为反映区域发展的晴雨表,其经济系统内部的结构稳定性和外部应对能力高低决定着SES脆弱性的大小。

(4) 控制变量对脆弱性影响差异显著,但其影响差异较大。① 技术流转基础对脆弱性、敏感性和适应能力的影响均非常显著分别为-0.020、-0.016和0.034。技术流转基础作为区域农户认知能力的核心,提升适应能力以降低脆弱性具有重要影响,是规避脆弱性风险的“持续性”资本^[41]。② 信息流物质支撑变量通过提升适应能力(0.029)达到降低脆弱性(-0.018)的目的。以互联网为载体的信息流打破传统地理场所空间尘封,有效稀释城乡要素非均衡分布外部条件,扩展区际交流深度和广度,极大地提升适应能力^[13]。③ 人均GDP及二次项对脆弱性的影响呈现极其显著的差异。人均GDP变量对降低SES敏感性(-0.014)和提高适应能力

(0.009),以实现脆弱性降低(-0.014)的作用十分显著;然而人均GDP二次项除降低经济敏感性(-0.018)和提高经济适应能力(0.011)外,该变量显著提升了敏感性(0.024)和降低了适应能力(-0.023),以至于对SES脆弱性的提升作用高达0.036。人均GDP二次项更深层的含义为:唯GDP导向的单一型经济发展方式和理念不利于区域可持续发展。④宏观政策辅助变量对降低脆弱性作用较小;然而该控制变量对提升社会适应能力(0.009)和生态适应能力(0.012)以及降低社会敏感性(-0.006)作用程度较大。通过多政策合作机制,加大公共服务体系建设力度,合理布局和规划教育、医疗、社保、金融、人口、物流等资源,是预防脆弱性风险的长远之计。

4 结论与讨论

本文从流要素的流量度和流向度视角,采用空间误差模型分析村域SES脆弱性时空演变的影响因子,得到以下结论:

(1)都市郊区社会—生态系统脆弱性时空异质性显著。1998—2018年青浦区敏感性和适应能力的值域范围分别为[0.126, 0.806]和[0.181, 0.795],且在典型年份上两个指标分别呈现“先升后降”和“逐渐提升”的变化趋势;空间上,敏感性和适应能力指数分别呈现“中部高、两翼低”和“西高东低”的非均衡性特征。然而,研究期间青浦区SES脆弱性指数由0.521增长至0.622,脆弱性等级由中低等脆弱提升至中等脆弱;时空格局呈“先增后降波动式”和“东高西低团聚式”的动态特征。

(2)都市郊区社会—生态子系统脆弱性空间凝聚较差,具有较强的流动性。1998—2018年青浦区SES脆弱性时间路径移动相对长度呈现由“中部区域向四周逐渐递减”的变化趋势,脆弱性时间路径移动弯曲度呈现“南北部高、中部低”的空间格局。受行政村邻域单元溢出效应影响,脆弱性时空跃迁的流动指数为0.509,村域脆弱性空间集聚结构存在相对较高的转移活性。

(3)“敏感性协同—适应能力权衡”模式成为流要素影响青浦区脆弱性的主导模式,但存在子系统维度的路径差异,对经济敏感性和经济适应能力的影响更为显著。流要素对青浦区SES脆弱性的影响在流量度上呈现程度和方式的显著差异,人口流

成为提升脆弱性的主导因素,其影响系数为0.022,而资金流和商贸流成为降低脆弱性的关键;流要素的流出度对脆弱性的影响总体上高于流入度,但其程度和方式差异显著,人口流出度对脆弱性提升的影响最显著,其影响系数为0.018,而资金流入度的降低脆弱性作用最显著,其影响系数为-0.009。

值得注意的是,本文仍然存在以下不足。①微观研究尺度造成的可变面元问题。本文以村级尺度开展脆弱性评价和影响因素分析,虽然深入地分析和获取了多种年鉴、报告、访谈数据等,仍存在行政村时间和空间数据缺失,在数据处理过程中借鉴前人的做法用村级的点状数据表征面状单元以及采用平均值填充缺失的数据,分析结果可能存在误差。②脆弱性评价指标的覆盖性问题。指标遴选注重考量可塑性的经济能力、社会转型特征、生态环境保护等,而对管理者的能力、管理机构的运行等定性指标覆盖不够。③控制变量对脆弱性、敏感性和适应能力影响的共趋势问题。空间估计结果显示,部分流要素和控制变量呈现“同频共振”的特征,如人口流与人均GDP平方、商贸流、资金流与技术流运转基础、信息流支撑基础等。该结果可能是由于本文对单个因子进行估计所致,而现实中各因子对脆弱性的影响存在耦合性,也为今后从多元流要素的耦合视角研究脆弱性变化提供了方向。

参考文献(References)

- [1] Glaser M. Human-nature interactions in the Anthropocene: Potentials of social-ecological systems analysis [M]. New York: USA: Routledge, 2012: 567-581.
- [2] Wang Y H, Yang A X, Yang Q Y, et al. Spatiotemporal patterns of human and wild boar conflicts in rural China and its implications for social-ecological systems coevolution [J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33(8): 1614-1630.
- [3] Ge Y, Dou W, Tao Z G, et al. Characterizing the nature of social vulnerability to disasters in inner-city households: Case of Jiaxing, China [J]. Natural Hazards Review, 2024, 25(1): 05023017. doi: 10.1061/nhrepo.nheng-1870.
- [4] 王娅, 杨国靖, 周立华. 祁连山北麓牧区社会—生态系统脆弱性诊断: 以甘肃肃南裕固族自治县为例 [J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 370-380. [Wang Ya, Yang Guojing, Zhou Lihua. The vulnerability diagnosis of the pastoral area social-ecological system in northern Qilian Mountains: A case study on the Sunan Yugur Autonomous County in Gansu Province. Journal of Glaciology and Geocryology,

- 2021, 43(2): 370-380.]
- [5] 王群, 银马华, 杨兴柱, 等. 大别山贫困区旅游地社会—生态系统脆弱性时空演变与影响机理 [J]. 地理学报, 2019, 74(8): 1663-1679. [Wang Qun, Yin Mahua, Yang Xingzhu, et al. Spatio-temporal evolution and impact mechanism of socio-ecological system vulnerability in poor mountainous tourist destinations: Taking Dabie Mountain Area as example. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1663-1679.]
- [6] 陈佳, 杨新军, 尹莎, 等. 基于VSD框架的半干旱地区社会—生态系统脆弱性演化与模拟 [J]. 地理学报, 2016, 71(7): 1172-1188. [Chen Jia, Yang Xinjun, Yin Sha, et al. The vulnerability evolution and simulation of the social-ecological systems in the semi-arid area based on the VSD framework. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1172-1188.]
- [7] Cumming G S, Barnes G, Perz S, et al. An exploratory framework for the empirical measurement of resilience [J]. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 975-987.
- [8] 马学成, 巩杰, 柳冬青, 等. 社会生态系统研究态势: 文献计量分析视角 [J]. 地球科学进展, 2018, 33(4): 435-444. [Ma Xuecheng, Gong Jie, Liu Dongqing, et al. Review of social ecological system research: An analysis based on bibliometrics. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(4): 435-444.]
- [9] Ren M Y, Lin Y Y, Jin M H. Examining the effect of land-use function complementarity on intra-urban spatial interactions using metro smart card records [J]. *Transportation*, 2020, 47: 1607-1629.
- [10] 裴韬, 舒华, 郭思慧, 等. 地理流的空间模式: 概念与分类 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(1): 30-40. [Pei Tao, Shu Hua, Guo Sihui, et al. The concept and classification of spatial patterns of geographical flow. *Journal of Geoinformation Science*, 2020, 22(1): 30-40.]
- [11] 龚艳青, 谭荣. “社会—生态系统”治理研究的原型分析: 概念、方法和展望 [J]. 地理科学进展, 2021, 40(8): 1430-1438. [Gong Yanqing, Tan Rong. Archetype analysis in social-ecological system governance research: Concepts, methods and prospect. *Progress in Geography*, 2021, 40(8): 1430-1438.]
- [12] 贾焱焱, 胡静, 谢双玉, 等. 贫困山区旅游地社会—生态系统脆弱性及影响机理 [J]. 人文地理, 2021, 36(1): 155-164. [Jia Yaoyan, Hu Jing, Xie Shuangyu, et al. Vulnerability and influence mechanisms of social-ecological system in poor mountainous tourism destinations. *Human Geography*, 2021, 36(1): 155-164.]
- [13] 周佳宁, 毕雪昊, 邹伟. “流空间”视域下淮海经济区城乡融合发展驱动机制 [J]. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1881-1896. [Zhou Jianing, Bi Xuehao, Zou Wei. Driving mechanism of urban-rural integration in Huaihai economic zone: Based on the space of flow. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(8): 1881-1896.]
- [14] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法 [J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25. [Li He, Zhang Pingyu, Cheng Yeqing. Concepts and assessment methods of vulnerability. *Progress in Geography*, 2008, 27(2): 18-25.]
- [15] Adger W N. Vulnerability [J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 268-281.
- [16] 王群, 陆林, 杨兴柱. 千岛湖社会—生态系统恢复力测度与影响机理 [J]. 地理学报, 2015, 70(5): 779-795. [Wang Qun, Lu Lin, Yang Xingzhu. Study on measurement and impact mechanism of socio-ecological system resilience in Qiandao Lake. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 779-795.]
- [17] 陈琦, 徐源. 我国海洋渔业社会—生态系统脆弱性影响因素分析: 基于ISM模型 [J]. 科技与管理, 2019, 21(1): 21-26, 32. [Chen Qi, Xu Yuan. Analysis of factors influencing marine fisheries social-ecological systems vulnerability in China based on interpretative structural modeling. *Science-Technology and Management*, 2019, 21(1): 21-26, 32.]
- [18] 彭飞, 韩增林, 杨俊, 等. 基于BP神经网络的中国沿海地区海洋经济系统脆弱性时空分异研究 [J]. 资源科学, 2015, 37(12): 2441-2450. [Peng Fei, Han Zenglin, Yang Jun, et al. Time-space differentiation of the vulnerability of marine economy systems in China's coastal area based on BP neural networks. *Resources Science*, 2015, 37(12): 2441-2450.]
- [19] 刘丽英. 基于PCA和DEA方法的北京市可持续发展能力的评价研究 [J]. 数理统计与管理, 2013(2): 202-210. [Liu Liying. An evaluation research on Beijing's sustainable development potential via PCA and DEA. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2013(2): 202-210.]
- [20] 侯俊东, 金欢. 基于超DEA-多元回归的地质灾害社会脆弱性影响因素研究 [J]. 灾害学, 2017, 32(4): 23-29. [Hou Jundong, Jin Huan. Factors influencing provincial social vulnerability of geo-disasters with supper efficiency DEA and multivariable regression models. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(4): 23-29.]
- [21] Pandey R, Jha S K, Alatalo J M, et al. Sustainable livelihood framework-based indicators for assessing climate change vulnerability and adaptation for Himalayan communities [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 79: 338-346.
- [22] Liu X Q, Wang Y L, Peng J, et al. Assessing vulnerability to drought based on exposure, sensitivity and adaptive ca-

- capacity: A case study in middle Inner Mongolia of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(1): 13-25.
- [23] 周扬, 李寻欢. 平原农区贫困地理格局及其分异机制: 以安徽省利辛县为例 [J]. *地理科学*, 2019, 39(10): 1592-1601. [Zhou Yang, Li Xunhuan. Geographical pattern and mechanism of poverty differentiation in plain areas: A case study of Lixin County, Anhui Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(10): 1592-1601.]
- [24] Meijers E. From central place to network model: Theory and evidence of a paradigm change [J]. *Journal of Economic and Human Geography*, 2010, 98(2): 245-259.
- [25] 李苑君, 吴旗韬, 张玉玲, 等. “流空间”视角下高速公路交通流网络结构特征及其形成机制: 以广东省为例 [J]. *地理研究*, 2021, 40(8): 2204-2219. [Li Yuanjun, Wu Qitao, Zhang Yuling, et al. Spatial structure and formation mechanism of expressway traffic flow network based on space of flows: A case study of Guangdong Province. *Geographical Research*, 2021, 40(8): 2204-2219.]
- [26] 邱坚坚, 刘毅华, 陈浩然, 等. 流空间视角下的粤港澳大湾区空间网络格局: 基于信息流与交通流的对比分析 [J]. *经济地理*, 2019, 39(6): 7-15. [Qiu Jianjian, Liu Yihua, Chen Haoran, et al. Urban network structure of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area with the view of space of flows: A comparison between information flow and transportation flow. *Economic Geography*, 2019, 39(6): 7-15.]
- [27] 任国平, 刘黎明, 李洪庆, 等. 都市郊区乡村景观多功能权衡—协同关系演变 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 273-285. [Ren Guoping, Liu Liming, Li Hongqing, et al. Evolution on trade-offs and synergy of multifunction of rural landscape in metropolitan suburbs. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(23): 273-285.]
- [28] Kurniawan F, Adrianto L, Bengen D G, et al. Vulnerability assessment of small islands to tourism: The case of the Marine Tourism Park of the Gili Matra Islands, Indonesia [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2016, 6: 308-326.
- [29] Turner B L II, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. *PNAS*, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [30] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram [J]. *Global Environmental Change*, 2007, 17 (3/4): 472-485.
- [31] 方创琳, 王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征 [J]. *地理学报*, 2015, 70(2): 234-247. [Fang Chuanglin, Wang Yan. A comprehensive assessment of urban vulnerability and its spatial differentiation in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 234-247.]
- [32] 田亚平, 向清成, 王鹏. 区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系 [J]. *地理研究*, 2013, 32(1): 55-63. [Tian Yaping, Xiang Qingcheng, Wang Peng. Regional coupled human-natural systems vulnerability and its evaluation indexes. *Geographical Research*, 2013, 32(1): 55-63.]
- [33] 杨俊, 关莹莹, 李雪铭, 等. 城市边缘区生态脆弱性时空演变: 以大连市甘井子区为例 [J]. *生态学报*, 2018, 38 (3): 778-787. [Yang Jun, Guan Yingying, Li Xueming, et al. Urban fringe area ecological vulnerability space-time evolution research: The case of Ganjingzi District, Dalian. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 778-787.]
- [34] 金贵, 邓祥征, 董寅, 等. 发展地理学视角下中国多维贫困测度及时空交互特征 [J]. *地理学报*, 2020, 75(8): 1633-1646. [Jin Gui, Deng Xiangzheng, Dong Yin, et al. China's multidimensional poverty measurement and its spatiotemporal interaction characteristics in the perspective of development geography. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(8): 1633-1646.]
- [35] Cutter S L. Vulnerability to environmental hazards [J]. *Progress in Human Geography*, 1996, 20(4): 529-539.
- [36] 李花, 赵雪雁, 王伟军, 等. 甘南高原乡村社会固有脆弱性及其影响因素 [J]. *地理科学*, 2020, 40(5): 804-813. [Li Hua, Zhao Xueyan, Wang Weijun, et al. Inherent vulnerability of rural society in Gannan Plateau, China and its influencing factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(5): 804-813.]
- [37] Ye X Y, Rey S. A framework for exploratory space-time analysis of economic data [J]. *The Annals of Regional Science*, 2013, 50(1): 315-339.
- [38] Rey S J. Spatial empirics for economic growth and convergence [J]. *Geographical Analysis*, 2001, 33(3): 195-214.
- [39] Anselin L. Under the hood issues in the specification and interpretation of spatial regression models [J]. *Agricultural Economics*, 2002, 27(3): 247-267.
- [40] 陈佳, 杨新军, 王子侨, 等. 乡村旅游社会—生态系统脆弱性及影响机理: 基于秦岭景区农户调查数据的分析 [J]. *旅游学刊*, 2015, 30(3): 64-75. [Chen Jia, Yang Xinjun, Wang Ziqiao, et al. Vulnerability and influence mechanisms of rural tourism socio-ecological systems: A household survey in China's Qinling mountain area. *Tourism Tribune*, 2015, 30(3): 64-75.]
- [41] Below T, Mutabazi K D, Kirschke D, et al. Can farmers' adaptation to climate change be explained by socio-economic household-level variables [J]. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 223-235.

Spatio-temporal evolution characteristics of social-ecological system vulnerability and the influence of flow elements in metropolitan suburbs

REN Guoping¹, ZHENG Huikai¹, YIN Gang¹, LIU Liming^{2*}

(1. School of Management, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China;

2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Flow elements are not only an important force for the temporal differentiation and reorganization of rural vulnerability, but also an important perspective in the study of urban and rural reconstruction. By constructing a social-ecological system vulnerability evaluation indicator system of "sensitivity-adaptability", the dynamic change characteristics of vulnerability and the impact of flow factors of 184 administrative villages in Qingpu District of Shanghai Municipality from 1998 to 2018 were analyzed by means of sequential polygonal area method, spatial exploration and analysis, and fixed effect spatial error model. The results show that: 1) During the study period, the social-ecological system vulnerability of the district increased from 0.521 to 0.622, and the vulnerability level increased from low grade to medium grade. The spatio-temporal patterns show that vulnerability first increased and then decreased, and was high in the east and low in the west. 2) The relative length of the social-ecological system vulnerability temporal path movement in the district showed a trend of gradual decline from the central region to the surrounding areas from 1998 to 2018. The mobility curvature of the vulnerability time path was relatively small, showing the spatial pattern of high in the north and south and low in the central area, and the flow index for vulnerability spatio-temporal transition was 0.509, indicating that the spatial agglomeration structure had relatively high transfer activity in this region. 3) Population flow had become the leading factor for enhancing vulnerability and the coefficient of impact was 0.022, and capital flow and commercial flow were the key to reducing vulnerability. The effect of outflow on vulnerability was generally higher than on inflow, and the most significant effect of population outflow on vulnerability increase was 0.018, while the vulnerability reduction capacity of capital inflow was -0.009. "Sensitivity synergy- adaptive trade off" had become the dominant mode of flow factor impact on vulnerability in Qingpu District. The flow factors had a more significant impact on economic sensitivity and economic adaptability.

Keywords: social- ecological system; vulnerability; spatial and temporal evolution; flow elements; flow direction; Qingpu District