

# 福州都市圈社会经济水平与生态环境韧性的 时空演化及耦合协调性

李诗涵<sup>1,2,3</sup>, 陈秋霞<sup>4</sup>, 许章华<sup>1,2,5</sup>, 俞辉<sup>5</sup>, 朱嘉豪<sup>1</sup>, 刘智才<sup>2</sup>, 王琳<sup>2</sup>

(1.福州大学 先进制造学院, 福建 泉州 362200; 2.福州大学 环境与安全工程学院,

福建 福州 350108; 3.黔南生态环境监测中心, 贵州 黔南 558000; 4.福建农林大学

公共管理学院, 福建 福州 350002; 5.空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350108)

**摘要:** [目的] 分析福州都市圈社会经济水平与生态环境韧性的协调状态及其发展趋势, 为该都市圈内高质量、可持续发展提供调控建议与理论参考。[方法] 以福州都市圈 27 个县域城市为例, 构建基于韧性“抵抗—恢复—适应”特征的三维生态环境韧性评价模型, 建立普适性的社会经济水平评价指标体系, 结合熵权法、耦合协调度模型、核密度估计、剪刀差计算以及重心迁移模型, 综合分析福州都市圈社会经济水平与生态环境韧性的耦合协调水平及其时空演化趋势, 并通过 Pearson 相关分析方法探讨影响协调发展的主要因素。[结果] ①福州都市圈的社会经济水平均值由 0.181 2 上升至 0.320 8, 高值区在空间上呈现以福州市辖区为核心的“一核三中心”分布特征。②都市圈的生态环境韧性均值由 0.429 4 下降至 0.349 4; 韧性及其子系统在空间上存在较强的正自相关性, 其中韧性高值区主要集聚于“延平—古田”等内陆山区, 而低值区分布于“马尾—湄洲岛”沿海一带, 并在福州市辖区及其周围形成了韧性“洼地”。③福州都市圈的耦合协调度均值从 0.51 稳步提升至 0.56, 县域社会经济水平与生态环境韧性的发展速度趋于平衡, 剪刀差角度普遍减小; 协调发展重心向都市圈中部地区移动, 进入同步发展类型的县域数量大幅提升; 影响都市圈耦合协调发展的主要因素为抗风险指数、人均 GDP 以及每千人拥有医院床位数。[结论] 福州都市圈的社会经济水平与生态环境韧性在时空上呈现“错位”发展趋势, 两系统的耦合协调水平尚有较大的提升空间。

**关键词:** 社会经济水平; 生态环境韧性; 时空演化; 耦合协调发展; “抵抗—恢复—适应”模型; 福州都市圈  
**文献标识码:** A **文章编号:** 1000-288X(2023)06-0311-13 **中图分类号:** X24, F224

**文献参数:** 李诗涵, 陈秋霞, 许章华, 等. 福州都市圈社会经济水平与生态环境韧性的时空演化及耦合协调性[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 311-323. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.037; Li Shihan, Chen Qiuxia, Xu Zhanghua, et al. Spatiotemporal evolution and coupling coordination of socio-economic level and ecological resilience in Fuzhou metropolitan area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 311-323.

## Spatiotemporal Evolution and Coupling Coordination of Socio-economic Level and Ecological Resilience in Fuzhou Metropolitan Area

Li Shihan<sup>1,2,3</sup>, Chen Qiuxia<sup>4</sup>, Xu Zhanghua<sup>1,2,5</sup>, Yu Hui<sup>5</sup>, Zhu Jiahao<sup>1</sup>, Liu Zhicai<sup>2</sup>, Wang Lin<sup>2</sup>

(1.School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou, Fujian 362200, China;

2.College of Environmental and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108,

China; 3.Qiannan Ecological Environment Monitoring Center, Qiannan, Guizhou 558000, China;

4.School of Public Administration, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

5.Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing, Ministry of Education, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract:** [Objective] The coordinated state of socio-economic level (SEL) and ecological resilience (ER) in the Fuzhou metropolitan area (FMA) and its development trend were analyzed in order to provide regulatory

收稿日期: 2023-02-23

修回日期: 2023-05-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“毛竹林刚竹毒蛾危害的蔓延机制及模拟研究”(42071300); 福建省自然科学基金项目(2020J01504; 2016J01188); 中国博士后项目(2018M630728); 福建省资源环境监测与可持续经营利用重点实验室开放课题(ZD202102); 晋江市福大科教园区发展中心科研项目(2019-JJFDKY-17); 3S技术与资源优化利用福建省高校重点实验室开放课题(fafugeo201901)

第一作者: 李诗涵(1995—), 男(汉族), 四川省成都市人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感与GIS。Email: 466476822@qq.com。

通信作者: 许章华(1985—), 男(汉族), 福建省福清市人, 博士, 教授, 主要从事资源环境遥感与GIS研究。Email: fafuzh@163.com。

suggestions and theoretical references for high-quality and sustainable development of this metropolitan area. [Methods] Data were obtained for 27 county cities in FMA, and a three-dimensional ecological resilience evaluation model based on the “resistance-recovery-adaptability” characteristics of resilience was constructed. A universal social and economic level evaluation index system was also constructed. The entropy weight method, coupling coordination degree model, kernel density model, scissors difference method, and gravity center migration model were used to determine the temporal and spatial evolution trends of SEL, ER, and coupling and coordination level of FMA. The main factors affecting the coordinated development were determined by Pearson correlation analysis. [Results] ① The mean value of SEL for FMA increased from 0.181 2 to 0.320 8. The spatially high SEL areas were distributed as “one core and three centers” with FMA as the core. ② The mean value of ecological environmental resistance (ER) decreased from 0.429 4 to 0.349 4, and the high ER areas were mainly concentrated in the inland mountainous areas such as “Yanping-Gutian”, while the low ER areas were located in the coastal area of “Mawei-Meizhou Island”, and formed a resilience “depression” in and around FMA. ER and its subsystems exhibited strong positive autocorrelation in space. ③ The mean value of coupling coordination degree steadily increased from 0.51 to 0.56. The speed of development in terms of the SEL and ER of counties tended to be balanced, and the scissor angle difference generally decreased. The center of gravity of coordinated development moved to the central part of FMA, and the number of counties entering a type of coordinated development increased significantly. The main factors hindering the coupled coordination were the risk resistance index, per capita GDP, and the number of hospital beds per thousand people. [Conclusion] The SEL and ER of FMA showed a trend of “misaligned” development in space-time, and the coupling and coordination level of both still has much room for improvement.

**Keywords:** socio-economic level; ecological resilience; spatiotemporal evolution; coupling coordination development; “resistance-recovery-adaptability” model; Fuzhou metropolitan area

改革开放以来,中国经济社会发展成绩斐然,经济总量占世界经济的比重从 1978 年的 4.9% 提高到 2021 年的 18.5%,城镇化率从 17.9% 上升至 64.7%。但多年孤岛型、粗放型的社会经济发展方式不仅导致城市间出现无序的“同质竞争”现象<sup>[1]</sup>,也引发一系列区域生态环境问题,主要体现在自然资源虚耗,生态环境恶化等方面,严重影响了区域的可持续协调发展。在此背景下,城市开始从“单打独斗”走向“抱团取暖”,都市圈逐渐成为区域发展的新形态。2019 年《关于培育发展现代化都市圈的指导意见》强调都市圈作为推进新型城镇化的重要手段,在社会经济一体化发展中要注重生态环境质量同步提升。可见实现社会经济系统与生态环境系统的协调平衡是都市圈高质量建设的应有之义。然而,随着工业化、城镇化的推进,区域资源枯竭、极端气候、水土流失等<sup>[2]</sup>问题日渐突出,城市生态环境系统面临着无法避免的内部扰动与外部冲击<sup>[3]</sup>。因此,建设“高治理水平,强风险防控”的韧性城市,提高城市抵御复杂多元生态环境灾害风险的能力,已成为促进都市圈社会经济与生态环境可持续协调发展的重要因素。

20 世纪 70 年代,加拿大学者霍林<sup>[4]</sup>首次将韧性理论引入生态系统。随后,韧性思想被逐步应用到城

市研究领域,并有学者提出韧性城市应在灾害干扰过程中具备 3 个基本特征<sup>[5-6]</sup>:城市面对外界干扰的抵抗能力、城市在遭受干扰时的恢复能力以及城市在面对下一次冲击时的自适应(学习)能力。“生态环境韧性”作为城市韧性的一个关键维度,其研究多通过构建多维评价模型以分析生态环境系统对风险的综合防护能力。李苏等<sup>[7]</sup>基于生态系统服务价值与景观指数构建“抵抗—恢复—适应”生态韧性评价模型,并将其应用于水土流失较为严重的宁夏回族自治区;肖圣等<sup>[8]</sup>通过“风险—连通性—潜力”模型测算城市生态韧性水平,认为南昌市的生态韧性水平总体较低,两极分化严重;陶洁怡等<sup>[9]</sup>构建了“抵抗—适应—恢复”生态韧性评估模型,发现长三角城市的生态韧性整体呈上升趋势,影响因素较为复杂;王松茂等<sup>[10]</sup>从“抵抗—响应—创新”维度入手,认为山东半岛城市群的生态韧性波动上升,生活垃圾无害化处理是制约韧性提升的最主要因素;修春亮等<sup>[11]</sup>则重点考虑韧性的物质支撑能力,提出了“规模—形态—密度”韧性评估方法。此外,在与生态环境韧性交互耦合方面,王少剑等<sup>[3]</sup>发现珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调度持续走低,两者协调类型的转变呈现出圈层式

的区域特征;蒋文鑫等<sup>[12]</sup>指出江苏省经济发展水平与生态韧性的耦合协调关系正朝着生态滞后的“基本协调”类型发展。不难发现,现有研究在构建多维评价模型时较少考虑干扰的阶段性,也较少针对干扰的阶段过程选取相应的评价指标;同时,都市圈作为区域发展的重要载体,从韧性视角研究其生态环境系统,探索其生态环境韧性与社会经济水平的耦合协调研究还较为匮乏。鉴于此,本文以福州都市圈为研究区,首先根据灾害干扰的阶段性,从韧性的抵抗力、恢复力以及适应力 3 大特征构建“抵抗—恢复—适应”三维生态环境韧性评价模型;其次,基于统计数据与空间数据,分析福州都市圈 2010,2015 和 2020 年社会经济水平与生态环境韧性的时空演化格局;最后,通过耦合协调模型测算福州都市圈社会经济水平与生态环境韧性的耦合协调度,并运用核密度估计、剪刀差模型、重心迁移模型以及 Pearson 相关分析方法探索都市圈协调发展的时空分异特征与影响因素。以期为福州都市圈高质量、可持续发展提供调控建议与理论参考。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究区概况

福州都市圈规划雏形最早来源于 2011 年提出的“福莆宁同城化”发展战略,并于 2021 年正式得到国家发改委批复。都市圈辖 27 个区县,范围覆盖福州全市、莆田全市以及宁德市和南平市的部分地区,凸显“山海城湾”格局。在生态环境方面,圈内涵盖森林、内陆湿地和水域、海洋与海岸等多种自然生态系统类型,大部分区县的林、水、气等环境质量优良;在区位方面,都市圈地处闽东北、台湾海峡西岸,是两岸经济交流的重要门户,也是“21 世纪海上丝绸之路”的核心支点;在经济方面,2021 年都市圈经济总量达到 1.97 万亿元,占福建省 GDP 的 40.5%,在全省经济发展中发挥着举足轻重的作用;此外,福州市作为福建省省会,同时也是习近平生态文明思想的重要孕育地,以其为核心的都市圈不仅是省内的政治中枢,更是生态优先、绿色发展理念的先行实践地。

### 1.2 数据来源

1.2.1 遥感影像数据 2010,2015 和 2020 年福州都市圈土地利用分类数据<sup>[13]</sup>来源于地球大数据科学工程数据共享服务系统(<http://data.casearth.cn>),该数据以 Landsat 影像为数据源,分辨率为 30 m,囊括 29 个土地覆盖类型。经过验证,该数据在福州都市圈区域的分类精度达到 93%。根据研究需要将用地类型重分类为建设用地、未利用地、耕地、草地、林地、

水域 6 类,用于后续韧性指数的计算。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)采用 MODIS 植被指数产品 MOD13Q1,3 个年份共 72 景影像,使用批处理工具 MRT(MODIS Reprojection Tool)实现年度 NDVI 合成,数据来源于美国航天局官网(<https://search.earthdata.nasa.gov>)。

1.2.2 统计数据 所使用的统计数据来源于《福州市统计年鉴(2011—2021 年)》《莆田市统计年鉴(2011—2021 年)》《宁德市统计年鉴(2011—2021 年)》《南平市统计年鉴(2011—2021 年)》《福建省统计年鉴(2011—2021 年)》以及各县政府《国民经济和社会发展统计公报(2010—2020 年)》。

1.2.3 其他数据 DEM 数据从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载获得;行政边界、居民点、水系、道路、自然保护区范围等数据来自全国地理信息资源目录服务系统基础地理数据库(<https://www.webmap.cn>)。

### 1.3 研究方法

1.3.1 指标体系构建 生态环境韧性的表现具有阶段性与过程性<sup>[14]</sup>,应体现生态环境系统在灾害干扰“初期—中期—后期”阶段过程中的综合应对能力,展现系统针对不同干扰阶段的“初期抵抗—中期恢复—后期适应”特征(图 1)。基于此,“抵抗—恢复—适应”三维评价模型构建思路为:①为体现系统在干扰初期维持自身稳态的抵抗力,选择抗风险指数与 NDVI 两项指标;其中,景观格局变化影响着生态环境系统稳定性<sup>[15]</sup>,抗风险指数作为格局信息的浓缩载体,可表示系统抵抗风险、维持结构稳定的能力;高植被覆盖度不仅对生态环境系统产生稳定化作用<sup>[16]</sup>,还可增强系统对气候变化、人类活动等扰动的抵抗能力。②为体现系统在干扰中期快速恢复关键功能或回到正常状态的恢复力,选择水系连通度指数与形态指数两项指标;其中,考虑福州都市圈地处沿海,城市面临由台风引起的洪涝灾害风险,而畅通循环的水系能有效提升系统对洪涝扰动的恢复能力<sup>[17]</sup>;形态指数体现城市生态空间对内涝、碳排放及热岛效应等扰动的消解能力<sup>[11]</sup>。③由于系统在持续发展中可提升自身韧性水平以更好地应对未来的灾害干扰,从资源的可持续性角度选择规模指数与密度指数两项指标,体现系统在干扰后期为适应环境变化而调整自身状态的适应力<sup>[11]</sup>。总体而言,生态环境系统在扰动下的抵抗与恢复过程揭示了系统的短板以及可能遭遇的灾害风险,为城市适应性发展指明方向;而适应过程推动城市持续发展,进一步提高系统的抵抗力与恢复力;“抵抗—恢复—适应”的循环往复

促使生态环境韧性动态提升<sup>[14]</sup>。各指标获取及计算方法如下。

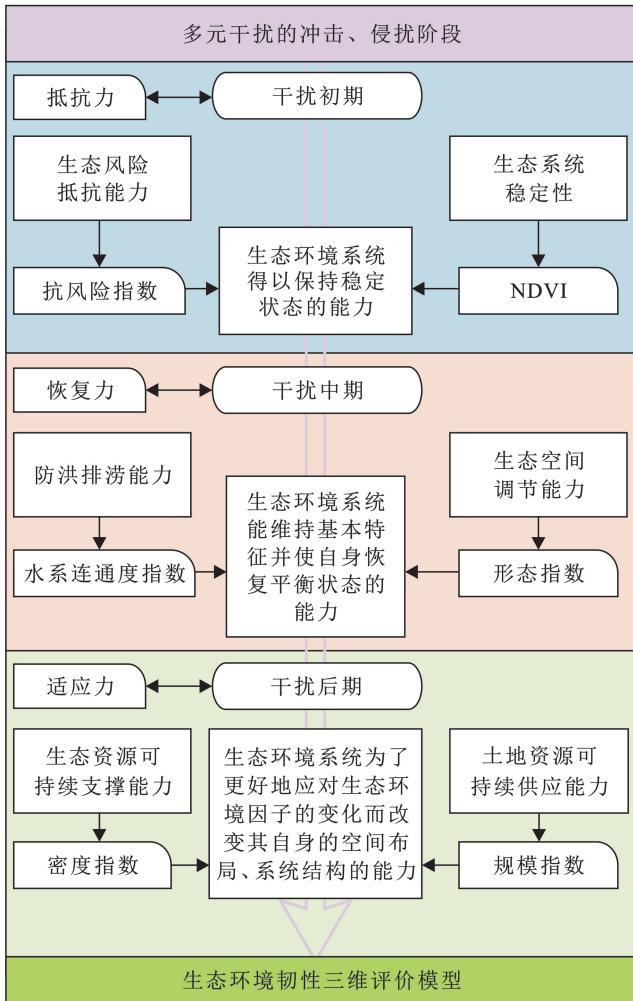


图 1 生态环境韧性三维评价模型构建流程

Fig.1 Process of constructing a three-dimensional evaluation model for ecological resilience

(1) 抗风险指数。在考虑福州都市圈规划范围的基础上,采用创建渔网的方式将研究区等间距划分为  $5\text{ km} \times 5\text{ km}$  的风险小区并参考许凤娇等<sup>[18]</sup>的研究方法确定最佳分析粒度为  $50\text{ m}$ 。选取景观破碎度( $C_i$ )、景观分离度( $V_i$ )、景观优势度( $DO_i$ )、景观脆弱度( $LF_i$ )等景观格局指数<sup>[15]</sup>计算生态风险指数(ecological risk index, ERI)。计算公式为:

$$ERI_m = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{A_{mi}}{A_m} \times (aC_i + bV_i + cDO_i) \times LF_i \right] \quad (1)$$

式中: $C_i$ 为景观破碎度; $V_i$ 为景观分离度; $DO_i$ 为景观优势度; $LF_i$ 为景观脆弱度; $i$ 为土地利用生态景观类型,分别为建设用地、未利用地、耕地、草地、林地以及水域6类; $a, b, c$ 为权值<sup>[15]</sup>分别为0.5, 0.3, 0.2; $A_i$ 为景观类型的斑块面积; $A$ 为景观总面积; $m$ 为风险小区编号。本文采用风险指数的倒数作为

抗风险指数表征县域抵抗生态风险的能力。

(2) 水系连通度指数。根据前人在生态网络连接度研究中的思路<sup>[19]</sup>,选取成环水平、节点连接度、廊道连接度以及水系密度等作为评价指标<sup>[20]</sup>,并结合福建省降水与径流量丰枯期波动明显、防汛压力大等特点,对各指标进行赋权,以计算各县域水系连通度指数 $W$ 。计算公式为:

$$W = 0.5 \times (0.25 \times W_a + 0.5 \times W_\beta + 0.25 \times W_\gamma) + 0.5 \times W_d \quad (2)$$

式中: $W_a$ 为水系成环水平; $W_\beta$ 为水系节点连接度; $W_\gamma$ 为河链连接度; $W_d$ 为水系密度,数值为县域水系长度与土地面积之比;各常数为指标权重; $W$ 为县域水系连通度指数,其值越大,县域水系连通性越好。

(3) 形态指数。合理耕作能有效调节水土流失情况,保留耕作用地对县域的资源保障以及生态空间的安全布置具有重要意义。因此本文在前人<sup>[11]</sup>所提出的计算方法上,将耕地、水域、林地、草地归类为“汇”景观,通过测算其与建设用地等“源”景观的距离,得到形态指数。计算公式为:

$$M = \frac{L}{\left( \sum_i D_{ij} \right) / n} \quad (i=1, 2, 3 \dots n; j=1, 2, 3 \dots m) \quad (3)$$

式中: $D_{ij}$ 代表“源”栅格到周围最近“汇”栅格的距离; $n$ 为“源”栅格个数; $m$ 为“汇”栅格个数; $L$ 为2010年都市圈“源—汇”平均距离; $M$ 为形态指数,体现县域“汇”景观消解并吸收“源”景观对生态环境的负面影响的能力。

(4) 规模指数。福建省境内山地丘陵纵横,自然环境是限制省内城市发展与用地扩张的重要因素,而社会经济条件则是推动城市扩张的主要因素。因此本文采取适宜性评价的方法,从自然环境、生态安全以及社会经济等方面选取因子,构建县域用地生态适宜性评价模型(表1)。同时参考相关文献<sup>[21]</sup>,采用层次分析法(AHP)对各指标进行赋权( $RC=0.0367 < 0.1$ )。

通过加权叠加的方法计算并统计2020年各县域7分及以上的栅格面积作为适宜建设面积,并分别与2010, 2015和2020年各县域已建设面积相除得到各年的规模指数<sup>[11]</sup>。计算公式为:

$$S = \frac{A}{A_s} \quad (4)$$

式中: $A$ 为2020年该县(区)在各因子限制下的适宜建设面积; $A_s$ 为该县(区)在各年份的建设用地面积; $S$ 为规模指数,其值越小,说明县域在生态环境约束下的可持续扩张潜力越低。

表 1 福州都市圈县域用地生态适宜性评价模型

Table 1 Ecological suitability evaluation model of county land use in Fuzhou metropolitan area

评价因子		适宜性评分					权重
一级指标	二级指标	1	3	5	7	9	
自然环境因子	坡度/(°)	>25	[15,25]	[10,15]	[5,10]	<5	0.079 4
	高程/m	>864	[595,864]	[368,595]	[162,368]	<162	0.079 4
	距水域距离/m	[0,100]	[100,250]	[250,350]	[350,500]	>500	0.108 6
生态安全因子	距自然保护区距离/m	[0,200]	[200,500]	[500,700]	[700,1 000]	>1000	0.197 4
	土地利用类型	水域	草地、林地	耕地	未利用地	建设用地	0.241 0
社会经济因子	距主要道路距离/m	>2 000	[1 500,2 000]	[1 000,1 500]	[500,1 000]	<500	0.161 7
	距居民点距离/m	>2 000	[1 500,2 000]	[1 000,1 500]	[500,1 000]	<500	0.132 5

(5) 密度指数。生态足迹与生态承载力的关系可以表征区域生态系统对人类密集活动的可持续支撑能力。生态足迹是通过构建生物资源账户和能源消耗账户,将人类对资源的消费换算为水域、耕地、林地、草地、建筑用地和化石燃料用地的面积,其中福州都市圈的生物资源账户主要由稻谷、油料、蔬菜瓜果菌类、茶叶、水果、猪肉、牛羊肉、奶制品、禽蛋产品、水产品、林产品、木材、竹材等 13 项农林产品的产量组成;而由于福建省缺少各县域的能源结构消费数据,因此能源消耗账户采用万元地方生产总值能耗与地方生产总值相乘获取的标准煤总量构成<sup>[22]</sup>。生态承载力则是将生产性土地所占有的真实面积通过均衡因子和产量因子<sup>[23]</sup>进行修正并扣除 12% 的生物多样性保护面积后作为区域的生态维持面积。将生态承载力与生态足迹相除即获得密度指数<sup>[11]</sup>,计算公式为:

$$I = \frac{E_c}{E_f} \quad (5)$$

式中: $E_c$  表示县(区)的总生态承载力; $E_f$  表示县(区)的总生态足迹; $I$  为密度指数,其值与县域生态系统对人类活动的可持续支撑能力成正比关系。

1.3.2 社会经济水平评价指标体系 参考相关研究<sup>[24]</sup>,从经济总量、经济结构、经济活力、社会基础以及社会保障等方面选取指标,评价都市圈县域的社会经济水平。

指标处理方面,对各项指标数据进行 min-max 离差标准化处理,以消除不同类型数据之间的量纲以及方向差异;指标权重采用熵权法计算,以避免权重受到主观因素干扰。此外,本文以县域为研究单元,对输出为栅格数据的指标以各县(区)行政区划内的均值作为该项指标在该县(区)的结果。评价模型以及指标权重具体详见表 2。

表 2 福州都市圈生态环境韧性三维评价模型、社会经济水平评价体系及权重

Table 2 A three-dimensional evaluation model for ecological resilience and socio-economic level evaluation model and weights in Fuzhou metropolitan area

目标层	准则层	权重	指标层	权重	属性
生态环境韧性	抵抗力	0.258 3	抗风险指数( $A_1$ )	0.174 6	+
			NDVI( $A_2$ )	0.083 7	+
	恢复力	0.279 1	水系连通度指数( $A_3$ )	0.157 1	+
			形态指数( $A_4$ )	0.122 0	+
	适应力	0.462 6	规模指数( $A_5$ )	0.287 1	+
			密度指数( $A_6$ )	0.175 5	+
社会经济水平	经济总量	0.237 1	人均 GDP/万元( $B_1$ )	0.112 9	+
			人均固定资产投资额/万元( $B_2$ )	0.124 2	+
	经济结构	0.132 1	第三产业产值比例/%( $B_3$ )	0.070 3	+
			第三产业年均增速/%( $B_4$ )	0.061 8	+
	经济活力	0.292 0	居民消费水平/(万元)( $B_5$ )	0.095 0	+
			人均社会零售品销售额/万元( $B_6$ )	0.197 0	+
	社会基础	0.108 4	城镇人口比重/%( $B_7$ )	0.071 1	+
			普通中小学师生比/%( $B_8$ )	0.037 3	+
	社会保障	0.230 4	养老保险参保人数比例/%( $B_9$ )	0.108 0	+
			每千人拥有医院床位数/张( $B_{10}$ )	0.122 4	+

注:属性“+”代表指标为正向影响。

1.3.3 耦合协调度模型 耦合协调度模型可用于判断多个(两个及以上)系统之间的协调发展水平,现被广泛应用于城市发展与生态变化的交互研究,表达式为:

$$C = \frac{\sqrt{X_1 \times X_2}}{\sqrt{\left(\frac{X_1 + X_2}{2}\right)^2}} \quad (6)$$

$$T = \alpha X_1 + \beta X_2$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (7)$$

式中: $C$ 代表生态环境韧性与社会经济水平两个系统的耦合度,其值与系统间的相关程度成正比; $T$ 为综合发展指数,其值可表征两个系统的综合发展水平; $D$ 为耦合协调度指数,表现两个系统在发展中的协调程度; $X_1, X_2$ 分别表示社会经济水平和生态环境韧性; $\alpha, \beta$ 为各系统的相对重要程度,本文认为社会经济水平与生态环境韧性对于都市圈的发展具有同等重要性,因此 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

同时,通过核密度估计<sup>[25]</sup>、剪刀差模型(SDM)<sup>[26]</sup>以及重心迁移模型等<sup>[27]</sup>方法分析都市圈耦合协调发展的时空演化趋势。

1.3.4 Pearson 相关分析 假设现有自变量 $X$ ,因变量 $Y$ 两组数据,通过 Pearson 相关系数可衡量 $X, Y$ 两变量之间的线性关联程度,表达式为:

$$R_{X,Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)}\sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}} \quad (8)$$

式中: $X$ 为自变量; $Y$ 为因变量; $E$ 表示数学期望; $R_{X,Y}$ 为相关系数,取值范围是 $[-1, 1]$ 。相关系数绝对值越大则说明两组变量相关性越强;反之,绝对值越接近 0,两变量间的线性关系越弱。

## 2 结果与分析

### 2.1 社会经济水平与生态环境韧性的时空分析

2.1.1 社会经济水平的时空演化与分析 在研究期内,福州都市圈的社会经济水平均值从 0.181 2 增长到 0.320 8,社会经济发展状况良好。图 2 显示,各县域在 2010—2015 年的增长率普遍高于 2015—2020 年,县域最高与最低水平的比值由 4.29 下降至 3.34,说明都市圈社会经济水平的提升虽趋于平缓,但发展愈发均衡。其中北岸经开区与长乐区分别为两时段发展势头最为强劲的县域,这与两地行政区划变更时间点相匹配,说明区划调整为县域社会经济发展注入了活力。在空间分布上,各年份社会经济高水平县域的集聚特征明显,基本集中于各地级市市辖区,并呈现出“一核多强”的发展趋势,其中“一核”指福州市辖六区,“多强”则是其余三市主城区。不难发现,鼓楼区、城厢区、蕉城区以及延平区分别作为各地市的核心区域,在研究时段内的社会经济水平均处于同市最高,并通过自身的经济基础、政策优势带动周边县域发展。此外,都市圈的社会经济水平在 2015 年呈现出“东高西低”的空间分布特征,但至 2020 年该特征有所缓解,内陆与沿海县域的发展水平趋于一致,说明都市圈正朝着山海协同发展的目标迈进。整体而言,都市圈应发挥山海联合的区位优势,沿海县域以“长乐—福清—平潭”为中心,加强招商引资及航运能力,打造对外开放桥头堡;山地县域则以延平区为中心,发展如武夷岩茶等特色农林产业集群,打造农业产业强区县,整体形成以福州市辖区为发展增长极的陆海协同集约发展新格局。

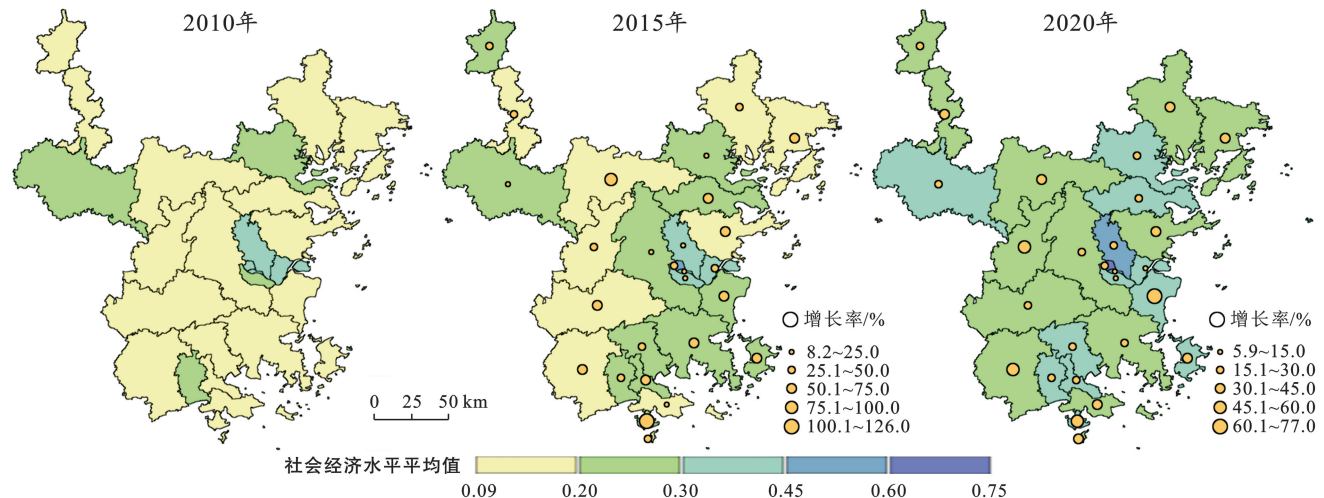


图 2 福州都市圈社会经济水平及增长率空间格局

Fig.2 Spatial pattern of socio-economic level and growth rate in Fuzhou metropolitan area

### 2.1.2 生态环境韧性的时空演化与分析

(1) 时序特征分析。图 3—4 显示,福州都市圈的生态环境韧性均值在研究时段内由 0.429 4 持续下降至 0.349 4,其中抵抗力均值上涨 15.6%,恢复力均值小幅下降 3.1%,而适应力均值的跌幅达 56.2%,可见适应力变化是造成都市圈生态环境韧性发生改变的主要原因。分县域看,仅有鼓楼区与台江区的各生态因子较为稳定,韧性水平保持着升高态势。韧性曲线整体随时间沿 y 轴持续下移且 2015—2020 年的下移幅度小于 2010—2015 年,同时斜率愈发平缓,说明大部分县域的韧性水平呈现出“加速—减缓”的下降

趋势,县域韧性差距在不断缩小。此外,规模指数贡献率变化幅度最大,韧性较低的县域普遍表现为规模指数低贡献率。因此合理限制县域城市扩张规模是提高都市圈生态环境韧性的关键。从分韧性因子看(图 3),都市圈的 NDVI 和抗风险指数在研究期内的均值及最大值持续上升,这得益于福建省保护先行的林业改革政策以及城市的发展促进了用地集约连绵布置,使得森林覆盖率提高,建设用地斑块聚集性加强;而形态指数、密度指数与规模指数均值的持续走低说明都市圈在生态用地布置、生态资源配置以及规模控制等方面的能力亟待提升。

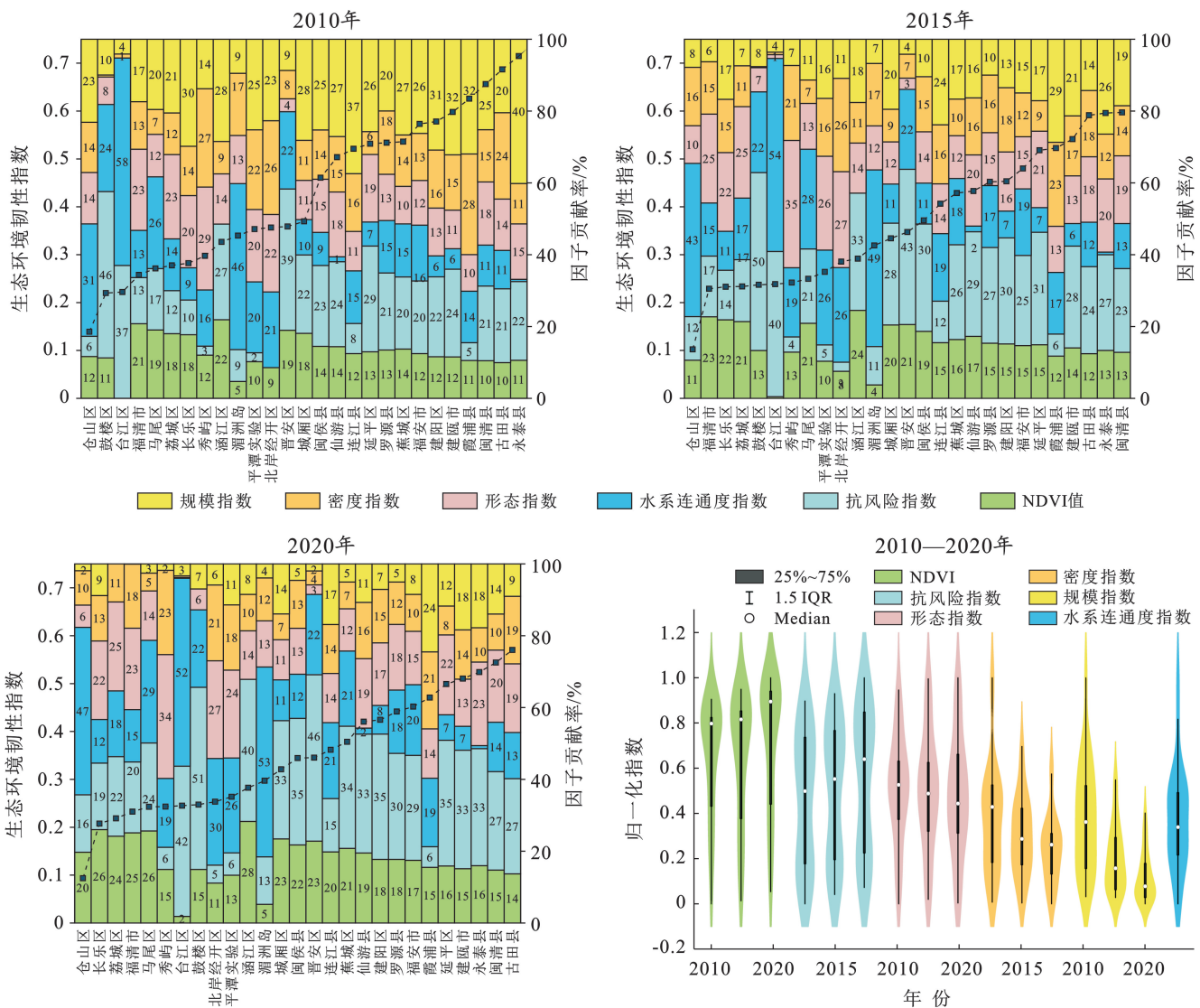


图 3 福州都市圈生态环境韧性及生态因子时序变化

Fig.3 Temporal changes of ecological environmental resilience and ecological factors in Fuzhou metropolitan area

(2) 空间格局分析。图 4 显示,2010 年低韧性县域( $<0.30$ )集中于福州、莆田两市部分沿海及市辖区,而北部及内陆地区的生态环境韧性普遍超过 0.50;2015 年低韧性县域进一步在东南沿海地区集

聚,同时连江县以北的沿海地区表现出较快的韧性下降趋势,沿海与内陆韧性水平的空间差异进一步凸显,呈现“沿海低、内陆高”的分布特征;至 2020 年,都市圈形成“马尾—湄洲岛”的线状沿海韧性低值连绵

区;同时,“仓山—鼓楼—台江—马尾—长乐—福清”组成的“聚集斑块”在研究期内持续成为最低韧性水平区域,形成了韧性“洼地”。

因此,应将调控重点聚焦于都市圈东南沿海地区,合理规划“北岸—仓山—秀屿—平潭”的城市功能区,通过同类土地的连绵布置以降低由景观异质性带来的生态风险;适当提高“台江—仓山”的绿化覆盖

率,降低绿色景观与建设用地的距离;加快修整“涵江—永泰—仙游”的水渠河道,建立畅通的水系连通体系;严格控制“荔城—福清—仓山”的城市扩张边界,促进土地节约集约高效利用;大力完善对“鼓楼—台江—仓山—马尾—晋安”生态、永久基本农田保护红线的管控机制,确保生态环境对县域发展的可持续支撑能力。

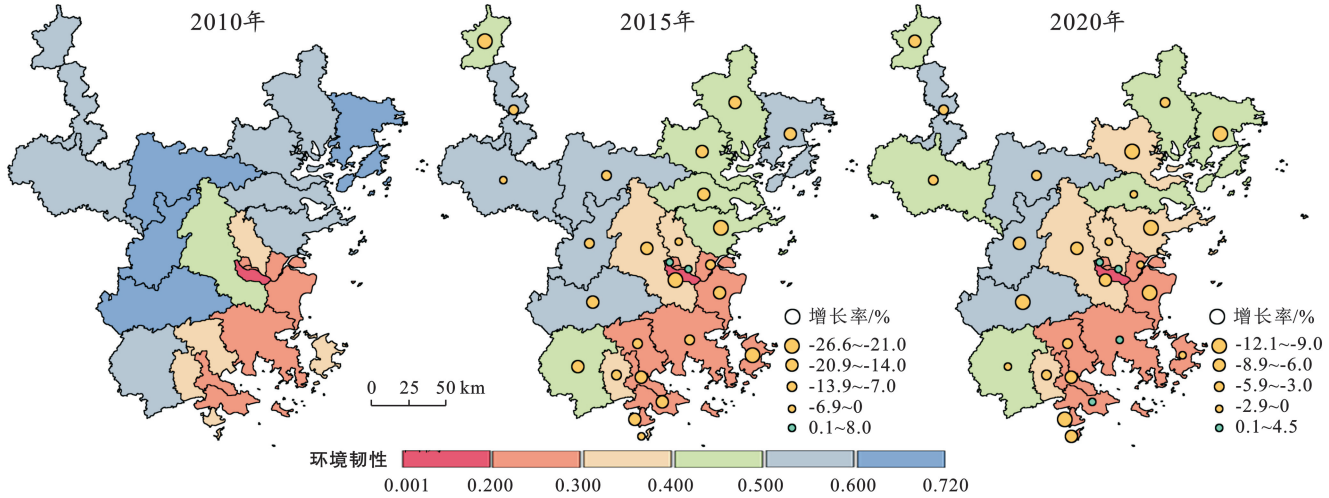


图 4 福州都市圈生态环境韧性空间格局

Fig.4 Spatial pattern of ecological resilience in Fuzhou metropolitan area

为进一步探明都市圈生态环境韧性的空间特征以及发展规律,本研究对各指数的空间关联情况进行分析。

表 3 显示,韧性及其子系统在空间上均存在较强的正自相关性,但全局 Moran's  $I$  在研究期内均有减少,说明各指数的空间相关性在逐渐减弱,各指标的

正向溢出效应降低;相较于抵抗力与适应力,韧性与恢复力更倾向于同类分布,即水平相近的县域更易集聚,其中“仓山—台江—鼓楼—晋安”在韧性与适应力方面呈现低值团块状的聚集性发展特征,应给予重点关注;而“古田—闽清—延平—蕉城”在都市圈中部地区形成韧性、抵抗力以及恢复力的高值聚集区。

表 3 福州都市圈生态环境韧性及各子系统全局 Moran's  $I$

Table 3 Global Moran's  $I$  of ecological resilience and each subsystem in Fuzhou metropolitan area

指数	年份	Moran's $I$	$P$ -value	$Z$ -value	H-H	L-L	H-L
生态环境韧性	2010	0.589	0.001	3.571	1,2,3	6,7,8,9	—
	2015	0.583	0.001	3.491	1,2,3	6,7,8,9	—
	2020	0.579	0.002	3.416	1,2,3,4	6,7,10	—
抵抗力	2010	0.488	0.003	3.095	1,2	—	—
	2015	0.475	0.003	3.039	1,2,3	—	—
	2020	0.464	0.004	2.962	1,2	—	—
恢复力	2010	0.533	0.003	0.369	1,3,4	11,12,13,14	7
	2015	0.541	0.003	0.427	1,3,4	12,13,14	7
	2020	0.528	0.003	0.348	1,3,4	12,13,14	7
适应力	2010	0.441	0.003	2.793	5	6,7,8,9	—
	2015	0.401	0.006	2.577	5	6,7,8,9	—
	2020	0.336	0.019	2.279	5	6,7,8,9	—

注:图中 H-H, H-L, L-L 分别代表“高一高”集聚、“高一低”集聚和“低—低”集聚,数字代表各县(区),其中,1 为古田县;2 为闽清县;3 为延平区;4 为蕉城区;5 为福安市;6 为仓山区;7 为台江区;8 为鼓楼区;9 为晋安区;10 为马尾区;11 为仙游县;12 为城厢区;13 为荔城区;14 为福清市。



核心区域率先进入“初级协调”；至 2020 年，内陆地区耦合协调水平进一步加强，形成了由“延平—永泰—闽清—古田—罗源—晋安—鼓楼”组成的“初级协调”连绵区。在空间演进方面，对福州都市圈耦合协调发展的重心迁移轨迹与标准差椭圆进行绘制(图 8)。都市圈耦合协调发展重心的移动方向由东南向中部转移，且 2015—2020 年的移动距离短于 2010—2015 年，

说明中部地区逐渐成为都市圈耦合协调发展的关键；标准差椭圆呈现西北—东南格局，旋转角角度、短半轴长度、长半轴长度分别从 2010 年的  $168.27^\circ$ , 62.21 km, 96.72 km, 至 2020 年小幅变化为  $168.67^\circ$ , 62.02 km 和 96.70 km, 面积减少  $63.6 \text{ km}^2$ , 表明都市圈的耦合协调发展在空间上愈发集聚，虽存在逆时针偏移的趋势，但发散方向较为稳定。

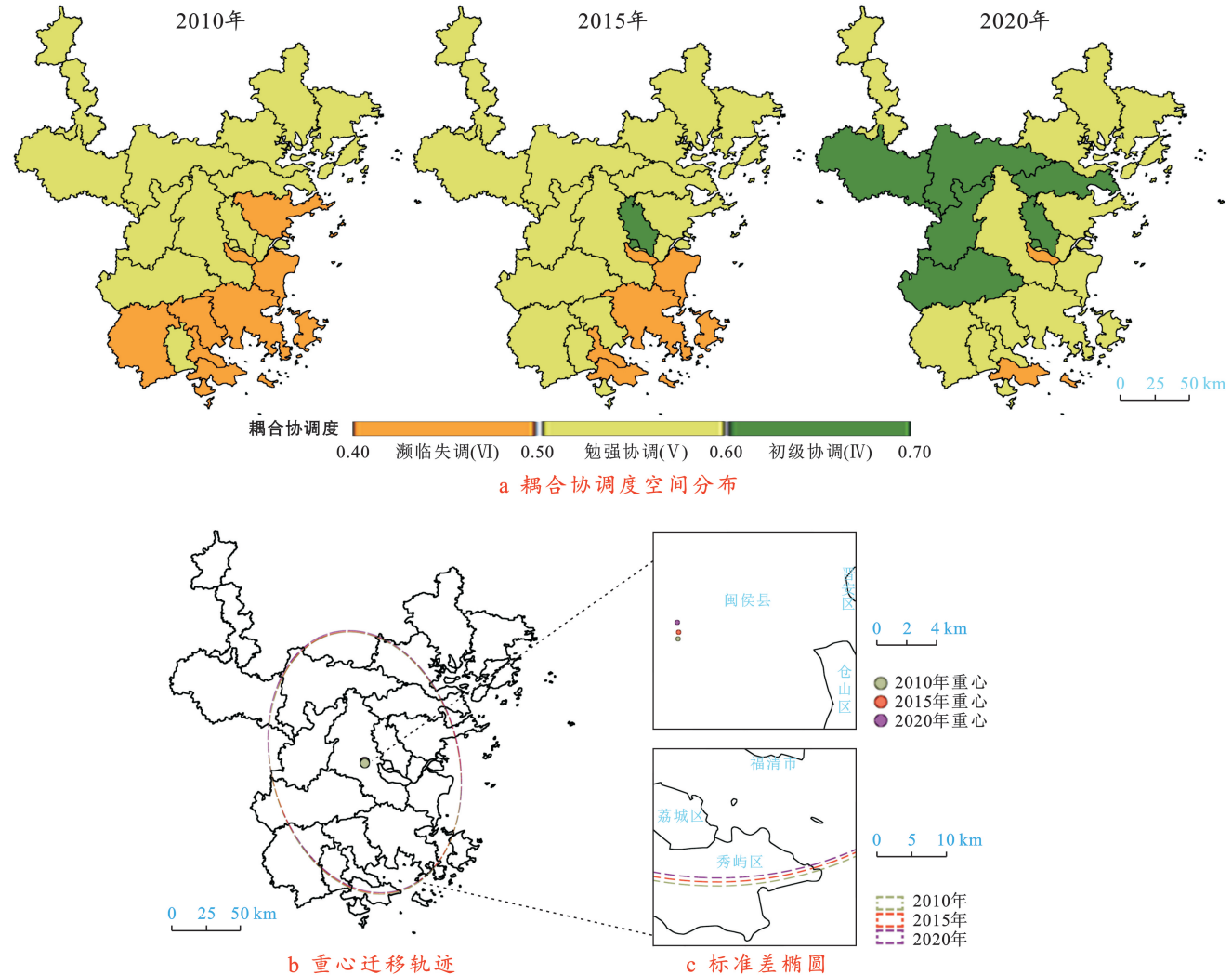
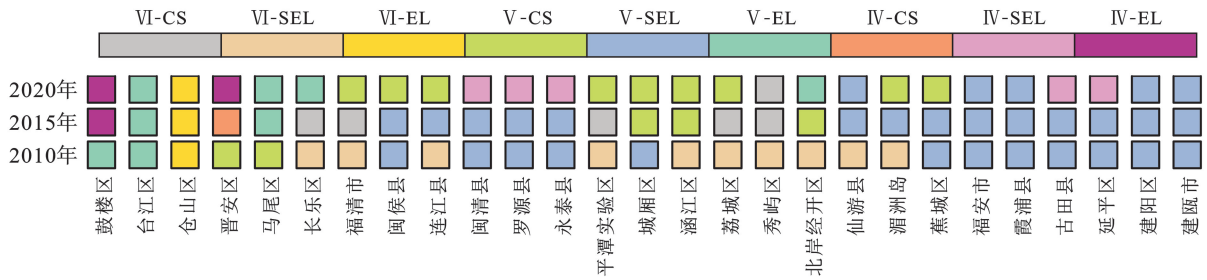


图 7 福州都市圈耦合协调发展空间格局

Fig.7 Spatial pattern in coupled and coordinated development in Fuzhou metropolitan area

2.2.2 社会经济水平与生态环境韧性耦合协调类型的时序演化与分析 为探明福州都市圈各县域社会经济水平与生态环境韧性的相对发展情况，本文对耦合协调类型进行了分类<sup>[28]</sup>，结果如图 8 所示。至 2020 年，福州市辖 6 区和北岸经开区分别作为都市圈整体与湄洲湾地区的发展核心，虽社会经济发展势头迅猛，但相对忽视了生态环境韧性的同步发展，表现为“生态环境滞后型”；“闽清—罗源—永泰—延

平—建阳—建瓯—仙游—福安—霞浦—古田”等地由于生态资源禀赋较好，同时在发展中注重生态环境的保护，在研究时段内均属于“社会经济滞后型”；“福清—闽侯—连江—平潭—城厢—涵江—荔城—秀屿—蕉城—湄洲岛”等地均由“社会经济滞后型”最终发展为“协调同步型”，说明这些县域不仅社会经济发展潜力较高，而且逐渐在生态保护与城市发展之间找到了平衡点，协调发展能力更为强劲。



注:①Ⅶ为轻度失调,Ⅵ为濒临失调,Ⅴ为勉强协调,Ⅳ为初级协调;②CS为生态环境韧性与社会经济水平协调同步,EL为生态环境韧性滞后,SEL为社会经济水平滞后。

图 8 福州都市圈各县域耦合协调类型

Fig.8 Classification of coupling coordination degree of counties in Fuzhou metropolitan area

2.2.3 社会经济水平与生态环境韧性耦合协调发展的影响因素与分析 福州都市圈社会经济水平与生态环境韧性耦合协调度的影响因素的分析结果详见表 5。在生态环境方面,抗风险指数( $A_1$ )与 NDVI ( $A_2$ )和耦合协调度呈显著正相关关系,说明高质量的城市功能区建设以及较高的植被覆盖水平有利于构建县域生态安全格局、保障城市基本功能运转,从而维持社会经济稳定发展,同时也说明提升生态环境抵抗力对促进高质量耦合协调发展的重要性。在社会经济方面,人均 GDP( $B_1$ )、第三产业比例( $B_3$ )、居民消费水平( $B_5$ )、城镇人口比重( $B_7$ )、养老保险参保

人数占比( $B_9$ )以及每千人医院床位数( $B_{10}$ )等指标和耦合协调度呈显著正相关关系,其中  $B_1$ ,  $B_3$  以及  $B_5$  说明雄厚的经济实力不仅为社会经济的持续发展奠定了基础,还可推进生态环境保护修复工程的实施,同时第三产业的高占比推动了绿色经济高效增长,使得县域发展对生态资源的消耗量降低,此外生活质量的提高也促使居民对生态环境提出更高的要求; $B_7$ ,  $B_9$  以及  $B_{10}$  则说明城镇化建设对土地集约利用、激发社会经济发展动力具有正向作用,同时社会保障水平的提升也进一步为县域协调发展提供稳定的社会环境。

表 5 福州都市圈社会经济水平与生态环境韧性耦合协调度的影响因素分析

Table 5 Analysis of influencing factors on coupling and coordination degree of Fuzhou metropolitan area

因素	生态环境韧性						社会经济水平									
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$B_7$	$B_8$	$B_9$	$B_{10}$
$R$	0.76	0.47	0.10	0.07	0.02	-0.10	0.53	0.15	0.26	-0.03	0.36	0.15	0.37	-0.05	0.41	0.55
$\rho$	**	**	—	—	—	—	**	—	*	—	**	—	**	—	**	**

注: $I$ 为评价指标; $R$ 为 Pearson 相关系数值,  $|R| > 0.5$  则认为具有强相关性;  $\rho$ 为置信度; \*\*表示在 1%水平(双侧)上相关性显著, \*表示 5%水平(双侧)上相关性显著。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

本文基于韧性特征构建了“抵抗—恢复—适应”三维生态环境韧性评价模型,并采用耦合协调度模型、Pearson 相关分析等方法,从时空演进视角对福州都市圈 2010, 2015 和 2020 年社会经济水平与生态环境韧性的协调发展进行综合分析,系统梳理了都市圈从“设想”到“落地”的发展历程,研究结果对培育发展现代化都市圈具有一定的现实意义。研究表明,福州都市圈生态环境韧性高值区主要出现在各地市的外围县域,低值区则出现在各地市核心区,且韧性随时间推移逐渐降低,而社会经济水平则相反,由此可见两者在时空上存在明显的“错位”发展趋势。意

味着随社会经济水平提升,福州都市圈的生态环境韧性极有可能持续降低,尤其是仓山区等都市圈核心区,持续且过低的韧性水平会削弱都市圈整体的生态共治能力,这一现象不仅影响都市圈一体化协调发展,也与“十四五”强调的“协同推进社会经济高质量发展和生态环境高水平保护”理念相悖。因此以《福州都市圈发展规划》为统领,找准各县域优势功能定位,避免社会经济与生态环境“错位”发展,是推动福州都市圈高质量发展的关键。“福州主城区—长乐(滨海新城)—福清—平潭”作为都市圈主中心,应以发展绿色经济为主线,通过壮大第三产业以提升经济总量,并在城镇化进程中逐渐完善社会保障机制,从而提振居民消费信心;莆田、宁德和南平三市中心城区为次级中心,应将社会经济与生态环境“两手抓”,

通过产业转移、提高公共服务水平以及开发生态旅游景点等方式承接部分非省会的城市功能,疏解主中心人口和资源消耗过度集中等问题;以“古田—闽清—永泰”为代表的非中心县域则应充分利用内陆地区的生态资源优势,保障都市圈的农林产品供应,同时继续保持高植被覆盖度,筑牢生态屏障,构建都市圈全域生态安全格局。此外,以厦漳泉都市圈为例的沿海地区都市圈在区位、生态环境资源等方面与福州都市圈具有相似性,因此发挥“山海协作”区位优势,找准内陆与沿海县域城市功能定位的都市圈发展模式,对于沿海都市圈社会经济与生态环境的耦合协调发展具有重要的借鉴意义,有利于沿海地区新型城镇化过程中的生态环境保护及其资源的可持续利用。

本文所构建的三维评价模型,融合了空间信息与统计数据,对生态空间的规模、数量、质量以及功能性均有涉及,丰富了韧性评价指标的选取。通过与社会经济的耦合协调研究,在一定程度上拓展了韧性理论在城市生态领域的研究视域,对福州都市圈的可持续协调发展起到了积极作用,但研究依然存在一定的局限性:①生态环境在社会经济发展影响下所产生的变化具有滞后性、累积性等特点,本文所选择的时间跨度较短,虽然不影响对生态环境韧性本底状态及其变化趋势的研究,但可能会造成韧性在更长时段的变化特征被忽视,因此在未来研究中应尽可能地扩大时间尺度,以更全面地分析生态环境韧性的发展过程与演化规律,同时也应尝试在长时间跨度基础上对韧性的发展趋势进行预测,并根据预测结果提出前瞻性的发展建议,指导韧性长效提升;②都市圈是以社会经济发展为主线划定的特殊区域,其对生态环境资源的占用消耗并非仅来自都市圈内部的生态环境系统,实际上也依赖于更大范围的周边区域。如果将密度指数测度局限于都市圈内部,可能造成生态环境资源支撑能力的低估,尤其在起步发展阶段,都市圈内部尚未实现差异化发展,少有城市发挥出保障区域生态环境资源安全的功能,此时周边区域对都市圈发展的资源支撑就显得尤为关键,因此在今后研究中应根据都市圈发展阶段适当调整密度指数测度范围。以上不足之处有待未来进行深入探讨。

### 3.2 结论

(1) 福州都市圈的社会经济水平稳步提升,并在空间上呈现以福州市辖区为核心的“一核三中心”分布特征。

(2) 都市圈的生态环境韧性小幅下降,适应力变化是造成韧性降低的主要原因。在空间上,生态环境韧性的分布表现为“西北高,东南低”,并形成了“仓

山—鼓楼—台江—马尾—长乐—福清”韧性“洼地”以及“马尾—湄洲岛”沿海低韧性连绵区;韧性及其子系统均存在显著的空间正相关性,同类集聚效应明显,“古田—闽清—延平—蕉城”形成韧性高值聚集区。

(3) 都市圈耦合协调度的增长幅度较为平缓,内部多极化发展趋势减弱,大部分县域的社会经济水平与生态环境韧性的发展速度趋于平衡。在空间上,耦合协调度的分布呈现出“内陆高,沿海低”的特点,发展重心逐渐向都市圈中部地区靠近,且集聚性加强,并形成由“延平—永泰—闽清—古田—罗源—晋安—鼓楼”组成的协调度高值连绵区,至 2020 年已有 10 个县域成长为“协调同步型”。此外,影响都市圈耦合协调发展的主要因素为抗风险指数、人均 GDP 以及每千人拥有医院床位数。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘士林.文化城市群与中原经济区的跨越式发展[J].河南社会科学,2013,21(12):7-11.
- [2] 王庚,查轩,黄少燕,等.福建省永定县的水土流失动态变化[J].水土保持通报,2016,36(6):272-277.
- [3] 王少剑,崔子恬,林靖杰,等.珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J].地理学报,2021,76(4):973-991.
- [4] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4(4):1-23.
- [5] 石龙宇,郑巧雅,杨萌,等.城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展[J].生态学报,2022,42(14):6016-6029.
- [6] 陈长坤,陈以琴,施波,等.雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J].中国安全科学学报,2018,28(4):1-6.
- [7] 李苏,刘浩南.干旱区城市化与生态韧性耦合协调的时空格局演化分析:以宁夏为例[J].干旱区地理,2022,45(4):1281-1290.
- [8] 肖圣,多玲花,邹自力.基于“风险—连通性—潜力”的南昌市生态韧性评估[J].应用生态学报,2023,34(3):733-741.
- [9] 陶洁怡,董平,陆玉麒.长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2022,31(9):1975-1987.
- [10] 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[J].经济地理,2022,42(8):51-61.
- [11] 修春亮,魏冶,王绮.基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估[J].地理学报,2018,73(12):2315-2328.
- [12] 蒋文鑫,吴军,徐建刚.城市生态韧性与经济发展水平耦合协调关系研究:以江苏省为例[J].资源开发与市场,2023,39(3):299-308,318.
- [13] Zhang Xiao, Liu Liangyun, Chen Xidong, et al. GLC\_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery [J].

- Earth System Science Data, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [14] 方东平,李在上,李楠,等.城市韧性:基于“三度空间下系统的系统”的思考[J].土木工程学报,2017,50(7): 1-7.
- [15] 陈全通,殷浩然,李艳红,等.秦巴山地景观生态风险的时空分异[J].水土保持通报,2022,42(3): 239-246.
- [16] 陈集景,周蕾,迟永刚,陆地生态系统稳定性空间格局及影响机制研究综述[J].中国农业气象,2021,42(7): 552-560.
- [17] 高玉琴,刘云苹,闫光辉,等.秦淮河流域水系结构及连通度变化分析[J].水利水电科技进展,2020,40(5): 32-39.
- [18] 许凤娇,吕晓.基于土地利用变化的江苏沿海地区生态风险格局[J].生态学报,2018,38(20): 7312-7325.
- [19] 王云才.上海市城市景观生态网络连接度评价[J].地理研究,2009,28(2): 284-292.
- [20] 朱诗洁,毛劲乔,戴会超.资料缺乏地区水系连通工程效益评价方法研究[J].水力发电学报,2021,40(2): 12-19.
- [21] 邵丽亚,陈荣蓉,侯俊国,等.城镇建设用地生态适宜性评价研究:以重庆市荣昌县为例[J].中国农业资源与区划,2013,34(6): 86-92.
- [22] 杨璐迪,曾晨,焦利民,等.基于生态足迹的武汉城市圈生态承载力评价和生态补偿研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(9): 1332-1341.
- [23] 邱寿丰,朱远.基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究[J].生态学报,2012,32(22): 7124-7134.
- [24] 张中浩,聂甜甜,高阳,等.长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(5): 1086-1100.
- [25] 许玉洁,刘曙光.黄河流域绿色创新效率空间格局演化及其影响因素[J].自然资源学报,2022,37(3): 627-644.
- [26] 姜悦,侯现慧,刘国彬,等.黄土高原生态—经济—社会耦合协调发展研究:以长武县、绥德县、神木市和淳化县为例[J].水土保持通报,2022,42(4): 234-243.
- [27] 王宇琦,沈润平,黄安奇,等.2001—2017年中国不同耕作区重建 MODIS LAI 时空动态[J].地球信息科学学报,2021,23(4): 658-669.
- [28] Yangfan Li, Yi Li, Yan Zhou, et al. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 98: 127-133.

(上接第 310 页)

- [12] 曹娟,张朝,张亮亮,等.基于 Google Earth Engine 和作物模型快速评估低温冷害对大豆生产的影响[J].地理学报,2020,75(9): 1879-1892.
- [13] 郭永强,王乃江,褚晓升,等.基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J].中国环境科学,2019,39(11): 4804-4811.
- [14] 霍高普,薛喜成,武超,等.彬长矿区直罗组砂岩含水层孔隙结构及分形特征研究[J].煤矿安全,2023,54(2): 189-194.
- [15] 肖乐乐,胡嵩岩,牛超,等.彬长矿区地下水化学特征及突(涌)水源判别[J].西安科技大学学报,2022,42(4): 724-732.
- [16] 汤万金,胡乃联,李祥仪,等.矿区可持续发展的评价[J].北京科技大学学报,1999,21(2): 119-124.
- [17] 何倩.彬长地区地质灾害特征及风险评价[D].陕西西安:西安科技大学,2018.
- [18] 刘宪锋,杨勇,任志远,等.2000—2009年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J].中国沙漠,2013,33(4): 1244-1249.
- [19] Fern R R, Foxley E A, Bruno A, et al. Suitability of NDVI and OSAVI as estimators of green biomass and coverage in a semi-arid rangeland [J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 16-21.
- [20] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [21] 李苗苗.植被覆盖度的遥感估算方法研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2003.
- [22] 林妍敏,李文慧,南雄雄,等.基于地理探测器的宁夏贺兰山植被覆盖度时空分异及驱动因子[J].应用生态学报,2022,33(12): 3321-3327.
- [23] Barsi J A, Schott J R, Hook S J, et al. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration [J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 11607-11626.
- [24] 李登科,范建忠,王娟.陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J].应用生态学报,2010,21(11): 2896-2903.
- [25] 曹俊忠.一元线性回归显著性检验方法分析[J].西安工程科技学院学报,1988(增刊): 78-82.
- [26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1): 116-134.
- [27] 王逸男,孔祥兵,赵春敬,等.2000—2020年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析[J].水土保持学报,2022, 36(3): 130-137.
- [28] 王一,郝利娜,许强,等.2001—2019年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J].生态学报, 2023, 43(6): 1-11.