

DOI: 10.5846/stxb202110092793

伍博炜, 王远, 王强, 伍世代, 詹智成, 蒋培培. 福建省生态环境与高质量发展耦合关系及驱动机制. 生态学报, 2022, 42(20): 8238-8253.

Wu B W, Wang Y, Wang Q, Wu S D, Zhan Z C, Jiang P P. Coupling relationship and driving mechanism between eco-environment and high-quality development in Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8238-8253.

福建省生态环境与高质量发展耦合关系及驱动机制

伍博炜^{1,2,3}, 王 远^{1,2,3,4,*}, 王 强^{1,2,3}, 伍世代⁵, 詹智成⁶, 蒋培培^{1,2,3}

1 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

2 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

3 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

4 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023

5 福建师范大学旅游学院, 福州 350108

6 根特大学地理学院, 比利时根特 9000

摘要: 研究生态环境与高质量发展耦合关系时空演变及驱动机制, 对实现可持续发展、构建生态文明体系和建设美丽中国具有重要意义。综合构建了生态环境—高质量发展指标体系, 运用耦合协调度模型、空间马尔科夫链和 BP 神经网络—地理加权回归组合模型, 系统探讨 2005—2020 年福建省生态环境与高质量发展耦合关系的时空演变及驱动机制。结果表明: (1) 研究期间, 福建省生态环境指数整体稳定, 而高质量发展指数呈现先降低后上升的变化趋势, 二者在空间上的组合关系整体呈现错位特征。(2) 福建省县域生态环境与高质量发展指标之间的耦合关系呈先降低后上升的趋势, 且呈现明显的空间异质性。(3) 协调发展和绿色发展是驱动生态环境质量提高的关键因素, 其影响程度呈“圈层式”空间分布特征。

关键词: 生态环境; 高质量发展; 耦合关系; 驱动机制; 福建省

Coupling relationship and driving mechanism between eco-environment and high-quality development in Fujian Province

WU Bowei^{1,2,3}, WANG Yuan^{1,2,3,4,*}, WANG Qiang^{1,2,3}, WU Shidai⁵, ZHAN Zhicheng⁶, JIANG Peipei^{1,2,3}

1 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

4 State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China

5 College of Tourism, Fujian Normal University, Fuzhou 350108, China

6 Department of Geography, Ghent University, Ghent 9000, Belgium

Abstract: Investigating the coupling relationship and driving mechanism between eco-environment and high-quality development is conducive to alleviating the contradiction between regional eco-environment and high-quality development, which is of great significance to realize regional sustainable development. This study constructs the index system of eco-environment and high-quality development. The coupling coordination degree model, spatial Markov chain, BP neural network, and geographically weighted regression model (GWR) combination model are employed to systematically discuss the spatial-temporal differentiation characteristics, spatiotemporal evolution trend and driving mechanism of coupling coordination between ecological environment and high-quality development in Fujian Province during 2005—2020. The

基金项目: 福建省公益类科研院所重点专项(2019R1002-7); 福建省社会科学基金项目(FJ2021B042); 国家自然科学基金(41971261)

收稿日期: 2021-10-09; **网络出版日期:** 2022-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ywang@nju.edu.cn

results show that: The results show that: (1) During the investigation period, the average value of eco-environment index was around 0.35 in Fujian Province. The county eco-environment quality was relatively stable, which appeared in a spatial distribution pattern of low coastal and high inland. The county-level units with the high level of the eco-environment index were centered in the Nanping-Sanming-Longyan urban-town convergence axis. While the high-quality development tended to rise after an initial decline, which presented a spatial distribution pattern of high coastal and low inland. Fuzhou and Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan areas were the engines of regional development in Fujian Province, and the high-quality development level tended to gather at a high stage. However, the spatial combination of the eco-environment and the high-quality development index showed a dislocation characteristic. (2) The coupling relationship between the county-level eco-environment and high-quality development tended to increase after an initial decrease in Fujian Province and showed obviously spatial heterogeneity. The coordinated development of neighborhood coupling relationship could enhance the trend of regional spatial collaborative evolution, indicating that the rise of its own ecological environment or high-quality development level would radiate and drive the rise of the surrounding county ecological environment and high-quality development level. Conversely, the unbalanced development of neighborhood coupling relationship could enhance the role of spatial constraints, indicating that the low degree of county coupling coordination would affect the improvement of ecological environment quality or high-quality development level of surrounding counties. (3) Different dimensions of high-quality development have positive effects on the eco-environment. The key factors which drive to ameliorate eco-environment quality are coordinated development and green development, and its influence degree is characterized by a circle-type spatial distribution. In this connection, promoting the coordinated development of high-quality development and eco-environment is conducive to promoting the coupling and coordination of regional ecological environment and high-quality development. Enable high-quality development to promote substantively the improvement of eco-environmental quality.

Key Words: eco-environment; high-quality development; coupling relationship; driving mechanism; Fujian Province

可持续发展目标是实现生态环境与社会经济发展相协调^[1],当前全国整体生态环境恶化趋势基本得到控制,生态环境质量呈现向好趋势,如何加强生态环境与经济协同效应,已成为社会关注的重点^[2]。为此,党的十九大报告提出“我国经济发展已经从高速发展阶段转向高质量发展阶段”,积极推进生态环境与经济高质量发展相协调不仅是国家生态文明建设的战略目标^[3],更是建设美丽中国的重要举措。

生态环境与高质量发展的耦合关系已成为重要研究领域。近年来,国外学者将环境库兹涅茨曲线(EKC)^[4-5]和压力状态响应模型(PSR)^[6]应用于生态环境与经济耦合关系的研究;研究区域以工业区、村、城市等小尺度单元为主^[7-8]。国内学者基于生态、经济、资源及社会等不同视角^[9-10],构建定量评价为主的理论和模型方法^[11],如采用综合指标评价法^[12],生态足迹法^[13],能值分析法^[14]和物质流分析法^[15]等方法开展研究。评价指标选取也逐渐从单一指标演变成复合型指标^[16]。研究区域涉及全国^[1]、重点区域^[17-18]、省域^[19]、城市群^[20-21]和流域^[22]等尺度范围,但缺乏县域为单元的省域实证研究。研究内容多以耦合关系时空分布、演化特征为主,而对耦合关系的空间演变机制研究尚待深入^[23-24]。

综上所述,本文以福建省县域(区或地级市为1个县域单元,金门县由于统计数据缺乏,研究暂不考虑)为基础单元,以生态系统服务价值表征生态环境情况^[25],结合高质量发展指标体系构建生态环境与高质量发展耦合关系机制研究框架;运用空间马尔科夫链分析福建省生态环境与高质量发展耦合关系的时空演变机制,最后,通过BP神经网络—地理加权回归组合模型揭示高质量发展对生态环境驱动机制的时空分异,为福建省生态环境与高质量发展的决策建议与规划提供理论支撑。

1 生态环境与高质量发展耦合机制

生态环境与高质量发展是互为因果、相互作用的关系,已有成果对二者之间的作用机理实证研究不足,仅

有的理论机制探索尚未形成统一的结论^[26-27]。此外,空间异质性也会影响区域生态环境与高质量发展的相互作用机理^[28]。生态系统服务价值(Ecosystem Services Values, ESV)是生态环境的重要表征之一,是反映国土空间的生态环境与区域经济发展相互影响关系的主要方法^[29];党的十八届五中全会第二次全体会议上提出了“五大发展理念(创新、协调、绿色、开放、共享)”,其作为高质量发展的理论支撑,发展目标统筹兼顾了生态保护优先和经济可持续发展^[23](图1)。

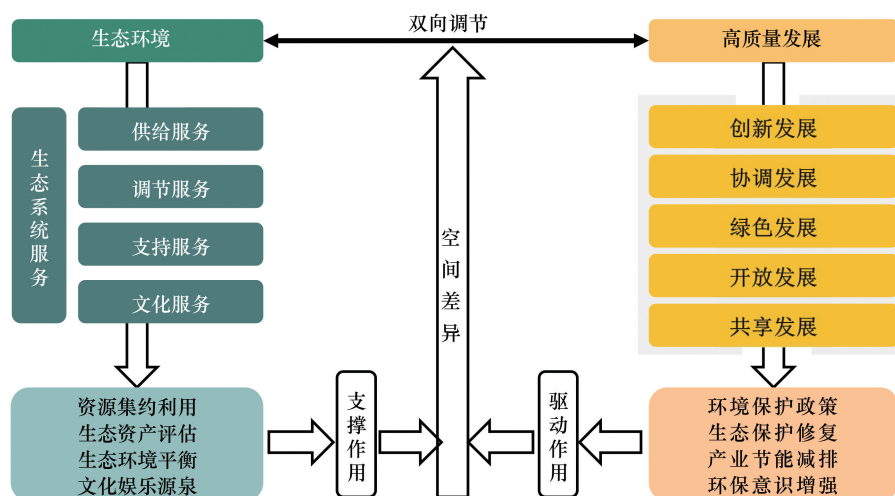


图1 生态环境与高质量发展耦合关系机制

Fig.1 Framework of coupling mechanism between eco-environment and high-quality development

“生态优先、绿色发展”已成为可持续发展的共识。生态环境质量提高有利于支撑高质量发展^[10-12],具体表现为:(1)提高自然资源集约利用水平,为生态环境保护提供新途径,为高质量发展提供新理念;提高生态系统服务价值,加大技术创新和政策扶持,合理配置资源型生产要素,有利于提高高质量发展水平。(2)加快生态资产评估,以绿色发展为理念,开展生态环境的价值评估,通过生态补偿的方式将生态资源转化为生态资产,因地制宜地把“绿水青山”的资源优势转化为“金山银山”的经济优势,实现高质量发展。(3)维持生态环境平衡,有助于提高生态系统的资源保障功能,促进自然资源的可持续利用,为高质量发展提供必要的生产要素。(4)良好的生态环境是天然的文化娱乐源泉,通过开展生态体验、生态教育和生态认知等生态旅游方式促进高质量发展水平提高,并对生态环境质量提高给予经济支持。

经济可持续增长是保证生态环境质量提高的基础,高质量发展对生态环境质量提高具有驱动作用^[12],具体表现为:(1)高质量发展是经济发展特定阶段的产物,高质量发展倒逼环境保护政策实施,以环境保护政策约束经济无序发展,有利于提高生态环境质量。(2)高质量发展为全域全要素的生态环境保护修复提供经济基础,当生态保护修复的资金充足时,生态环境质量才会得到提高。(3)高质量发展有助于产业节能减排,全面整合优化资源要素配置,促进产业从规模扩张到结构优化,从要素驱动到创新驱动,从源头减少污染排放,降低对生态环境的影响。(4)高质量发展带来日益增长的生态服务需求,有利于增强民众环保意识。

此外,进一步评估高质量发展对生态环境质量的影响对促进人与自然关系协调具有重要的理论与现实意义。其逻辑内涵具体表现为:创新发展侧重提高发展驱动力,减少发展带来的负面环境影响;协调发展侧重解决地区发展不均衡问题,提高地区发展的整体效能以降低对生态环境质量的破坏;绿色发展重点研究人与生态和谐发展的课题,通过降低资源消耗和污染排放,减少发展对生态环境的破坏;开放发展通过放宽市场准入、提高外资负面清单管理制度等手段加快相关领域改革步伐,促进经济发展向绿色转型;共享发展有利于促进教育、医疗和交通等公共服务设施的合理配置,在提高民众科学文化和健康素质同时减少了相关公共资源的过度浪费。

2 数据和方法

2.1 研究区概况

福建省位于中国东南沿海,陆域面积 12.4 万 km^2 ,海域面积 13.6 万 km^2 ;毗邻长三角城市群与粤港澳大湾区,与台湾省隔海相望,是海上丝绸之路的起点;2020 年 GDP 总量为 43903.89 亿元,位列全国第七,城镇化率达 69.5%,整体呈现沿海内陆不均衡发展的特征;2014 年成为全国首个生态文明先行示范区,生态环境本底优越,2020 年森林覆盖率达 66.8%,居全国首位(图 2)。因此,研究福建省生态环境与高质量发展耦合关系对全国具有较好的示范意义。

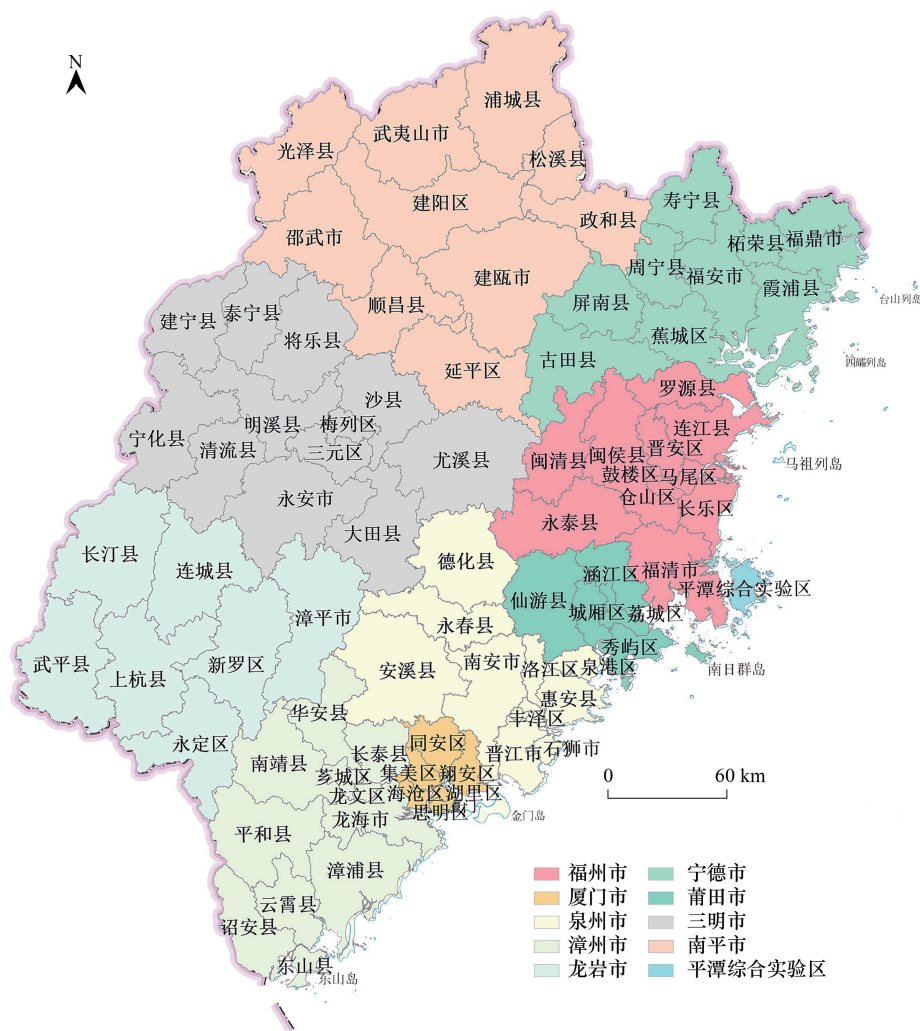


图 2 福建省行政区分布图

Fig.2 Distribution map of administrative regions in Fujian Province

2.2 数据来源

(1) 土地利用遥感监测数据。本文以 2005、2010、2015 和 2020 年四期土地利用遥感监测数据为基础,数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),土地利用分类体系为二级类,主要用于生态系统服务价值核算。

(2) 统计数据。社会经济统计数据主要来源于《福建省统计年鉴(2006—2020 年)》、《福建省国民经济和社会发展统计公报(2005—2020 年)》、《福建省水资源公报(2005—2019 年)》和各市县统计局统计资料。部

分 2020 年缺失的统计数据,本文通过 2010—2019 年变化趋势推导得出。

2.3 研究方法

2.3.1 生态环境指数

本文以生态系统服务价值表征生态环境情况,采用谢高地等^[30-31]修订的单位面积价值当量因子静态评估方法,核算福建省县域陆地生态系统服务价值,并通过标准化得到县域生态环境指数(ESVI)。

(1) 标准 ESV 单量因子修正

1 个标准 ESV 单量因子是 1hm²福建省平均产量的农田每年自然粮食产生的经济价值,计算公式为:

$$E = \sum_t S_a \times F_a \quad (1)$$

式中, E 为 1 个标准单位 ESV 当量因子的价值(元/hm²); S_a 为不同粮食作物播种面积占总粮食作物播种面积比(%), F_a 为不同粮食作物单位面积平均利润(元/hm²), t 表示年份时间,根据《福建省统计年鉴(2006—2020 年)》和《全国农产品收益资料汇编(2006—2020 年)》,确定稻谷、玉米、马铃薯、甘薯和大豆为福建省主要粮食作物。为消除不同年份粮食价格受通货膨胀和物价波动的影响,本文引入福建省居民消费价格指数,将各年份粮食平均价格统一调整至 2020 年的价格水平,计算得出 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年福建省 1 个标准单位 ESV 当量因子的价值分别为 5137.02 元/hm²、6962.68 元/hm²、3167.58 元/hm²和 1669.6 元/hm²。

(2) 不同土地利用类型单位面积 ESV 系数的修正

根据福建省国土空间变化特征,参照谢高地等^[30-32]改进的中国陆地生态系统单位面积服务价值当量,计算福建省不同国土空间类型的 ESV,计算公式为:

$$ESV_k = L_k \times S_k \times E, k = 1, 2, 3, \dots, i \quad (2)$$

式中, ESV_k 为不同国土空间类型生态系统服务价值(元), L_k 为不同国土空间类型当量, S_k 为国土空间类型面积(hm²), E 为 1 个标准单位 ESV 当量因子的价值(元/hm²), k 为国土空间类型,其中建设用地当量为 0,详情见表 1。

表 1 单位面积生态系统服务价值当量

Table 1 Ecosystem service equivalent value per unit area

国土空间 Land space	供给服务 Provisioning service			调节服务 Regulating service				支持服务 Supporting services			文化服务 Cultural services
分类 Classification	食物 生产	原料 生产	水资源 供给	气体 调节	气候 调节	净化 环境	水文 调节	土壤 保持	维持养 分循环	生物 多样性	美学 景观
旱地 Dry land	0.85	0.40	0.02	0.67	0.36	0.10	0.27	1.03	0.12	0.13	0.06
水田 Paddy field	1.36	0.09	-2.63	1.11	0.57	0.17	2.72	0.01	0.19	0.21	0.09
有林地 Woodland	0.27	0.63	0.33	2.07	6.20	1.80	3.86	2.52	0.19	2.30	1.01
灌木 Shrub	0.19	0.43	0.22	1.41	4.23	1.28	3.35	1.72	0.13	1.57	0.69
疏林地 Sparse woodland	0.22	0.52	0.27	1.7	5.07	1.49	3.34	2.06	0.16	1.88	0.82
其他林地 Other woodlands	0.25	0.58	0.30	1.91	5.71	1.67	3.74	2.32	0.18	2.12	0.93
高覆盖度草地 High coverage grassland	0.38	0.56	0.31	1.97	5.21	1.72	3.82	2.4	0.18	2.18	0.96
中覆盖度草地 Medium coverage grassland	0.22	0.33	0.18	1.14	3.02	1	2.21	1.39	0.11	1.27	0.56
低覆盖度草地 Low coverage grassland	0.1	0.14	0.08	0.51	1.34	0.44	0.98	0.62	0.05	0.56	0.25
湿地 Wetland	0.51	0.5	2.59	1.9	3.6	3.6	24.23	2.31	0.18	7.87	4.73
水域 Waters	0.8	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	0.07	2.55	1.89
建设用地 Construction land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.3.2 高质量发展评价指标体系

本文以“创新、协调、绿色、开放、共享”五大新发展理念表征高质量发展状况^[23],参考城市体检^[33]和《市县国土空间开发保护现状评估技术指南(试行)》等评价体系,综合构建福建省县域高质量发展评价指标体系(表2)。(1)创新发展:创新是实现高质量发展的驱动力,以 R&D 经费占 GDP 比重,R&D 人员数量等来代表创新投入,以产业结构高级化来代表创新产出;(2)协调发展:着重统筹城乡、海陆、各行业产业等方面协调发展,以人均 GDP、城乡收入差距等代表协调发展;(3)绿色发展:着重强调发展过程的“可持续性”,用万元 GDP 用水量、万元 GDP 建设用地消耗和能源消费强度等来衡量;(4)开放发展:充分体现国内国外双循环的新发展格局,以社会消费品零售总额代表国内循环,以进出口总额和实际利用外资代表国际循环;(5)共享发展:从教育、医疗、交通等角度重点考虑经济发展过程的区域公平共享性,教育支出占比、医疗机构床位数和公路通车里程为代表指标。

表 2 福建省高质量发展评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of county high-quality development in Fujian Province

一级指标 Primary index	二级指标 Secondary index	单位 Unit	权重 Weight/%				属性 Attribute
			2005	2010	2015	2020	
创新发展 Innovative development	R&D 经费占 GDP 比例	%	5.16	4.24	3.29	3.68	+
	R&D 人员数量	人	9.37	10.76	10.19	9.16	+
	科技支出占一般公共支出比例	%	6.26	4.42	3.58	5.77	+
	固定资产投资	亿元	6.12	4.15	4	4.07	+
	产业结构高级化		3.33	3.24	5.45	7.53	+
协调发展 Coordinated development	人均 GDP	元/人	5.6	2.73	2.7	4.66	+
	城乡收入差距	元	2.08	0.65	0.59	1.01	-
	居民消费价格指数	%	1.64	6.36	0.67	2.06	-
	城镇化率	%	4.21	3.75	5.04	3.39	+
	规模以上工业产值	亿元	8.71	6.1	6.05	6.01	+
绿色发展 Green development	第三产业占比	%	1.83	1.59	2.57	2.06	+
	万元 GDP 用水量	万元/m ³	1.33	0.82	0.86	1.04	-
	万元工业增加值用水量	万元/m ³	0.33	0.49	0.38	0.41	-
	万元 GDP 建设用地消耗	万元/m ²	0.48	0.32	0.46	0.73	-
	人均综合用水量	m ³ /人	1.15	1.35	1.18	1.2	-
开放发展 Open development	能源消费强度	t/万元	1.62	1.53	1.84	1.66	-
	单位耕地面积农业化肥使用量	t/hm ²	3.12	3.81	0.77	2.56	-
	社会消费品零售总额	万元	6.49	6.35	7.56	7.66	+
	进出口总额	万美元	14.03	11.42	13.02	12.88	+
	实际利用外资	万美元	8.13	16.88	20.64	11.77	+
共享发展 Sharable development	教育占一般公共支出比例	%	1.58	1.52	0.84	1.63	+
	医疗机构床位数	张	3.99	4.92	5.2	5.7	+
	公路通车里程	km	3.44	2.61	3.14	3.36	+

R&D:研究与试验发展 Research and development;GDP:国内生产总值 Gross domestic product

熵值法作为客观反映指标信息熵值的效用价值,能够有效减少主观因素的干扰,因此本文采用熵值法确定指标权重,具体如下:

首先,采用极值标准化方法对研究指标进行无量纲化处理,计算公式为:

$$y_{cd} \text{ 为正向指标: } y_{cd} = \frac{x_d - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} (c = 1, 2, \dots, i; d = 1, 2, \dots, j) \quad (3)$$

$$y_{cd} \text{ 为负向指标: } y_{cd} = \frac{x_{\max} - x_d}{x_{\max} - x_{\min}} (c = 1, 2, \dots, i; d = 1, 2, \dots, j) \quad (4)$$

式中, y_{cd} 为 c 城市第 d 项指标的标准化数值, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为第 d 项指标的最大值和最小值。其次, 算出 d 指标的信息熵 e_d , 最终确定 d 指标的权重, 计算公式为:

$$e_d = - \left(\frac{1}{\ln z} \right) \sum_{c=1}^z p_{cd} \ln(p_{cd}) \quad (5)$$

$$p_{cd} = \frac{y_{cd}}{\sum_{c=1}^z y_{cd}} \quad (6)$$

$$W_d = \frac{1 - e_d}{\sum_{c=1}^z (1 - e_d)} \quad (7)$$

式中, e_d 为信息熵; z 为县域的数量; p_{cd} 为第 d 项指标下第 c 个县域占该指标的比重, W_d 为第 n 项指标权重。

2.3.3 耦合协调度模型

本文通过耦合协调度模型研究生态环境与高质量发展的耦合关系, 计算公式为:

$$C = 2 \times \sqrt{\frac{\text{ESVI} \times \text{HQDI}}{(\text{ESVI} + \text{HQDI})^2}} \quad (8)$$

$$T = \alpha \text{ESVI} + \beta \text{HQDI} \quad (9)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (10)$$

式中, C 为耦合度, 反映生态环境与高质量发展之间的相互作用, 但无法反映二者的综合发展水平; T 为协调度指数, 反映生态环境与高质量发展的综合发展水平; α 和 β 分别表示生态环境与高质量发展的重要性, 本文综合考虑主体功能定位对福建省生态环境与高质量发展指数的影响^[34-35], 以不同地区的主体功能类型划分生态环境与高质量发展的重要性, 详情如下表 3。 D 为耦合协调度, 耦合协调度可以更综合评价两个系统的发展状况, D 值越大表示两系统之间是相互优化的关系, D 值越小表示两系统之间相互制约的关系。借鉴相关研究成果^[10-12], 将耦合协调度划分为 4 类(表 4)。

表 3 生态环境与高质量发展的重要性

Table 3 The significance of ecological environment and high-quality development

重要性 Significance	优化开发区 Optimize development zone	重点开发区 Key development zones	农产品主产区 Major agricultural production areas	重点生态功能区 Key ecological functional areas
生态环境 Eco-environment	0.25	0.35	0.60	0.80
高质量发展 High-quality development	0.75	0.65	0.40	0.20

2.3.4 空间马尔科夫链

空间马尔科夫链结合“空间滞后”概念, 是揭示研究对象空间演变形式与过程的有效工具^[36-37]。空间马尔科夫链通过构建区域空间权重矩阵, 将传统马尔科夫链概率转移矩阵 $m \times n$ 分解为 Q 种空间滞后类型的 $m \times n$ 概率转移矩阵。空间滞后类型由空间单元的空间滞后值确定, 空间滞后值是该空间单元邻居区域属性值的空间加权平均值。计算公式为:

$$P_{ij}(Q) = \frac{O_{ij}}{O_i} \quad (11)$$

式中, O_{ij} 表示研究时期内, t 时段 i 类型在 $t+1$ 时段转变为 j 类型的数量, O_i 是整个时期内 i 类型的数量, $P_{ij}(Q)$ 为转移概率。为了验证不同县域的生态环境与高质量发展耦合关系演变是否存在显著的空间相关性, 需要进行假设检验, 即假设是二者耦合关系演变是相互独立的, 与邻域空间属性无关。检验模型为卡方检验, 公式为:

表 4 耦合协调度类型

Table 4 The type of coupling coordination degree

类型 Type	耦合协调度 Coupling coordination degree	相对值 Relative value	滞后类型 Lag type
衰退失调型 Decline disorder type	$0 \leq D < 0.32$	$ESVI-HQDI > 0.1$	高质量发展滞后
		$ESVI-HQDI < -0.1$	生态环境滞后
		$0 \leq ESVI-HQDI \leq 0.1$	共同滞后
濒临失调型 Borderline disorder type	$0.32 \leq D < 0.41$	$ESVI-HQDI > 0.1$	高质量发展滞后
		$ESVI-HQDI < -0.1$	生态环境滞后
		$0 \leq ESVI-HQDI \leq 0.1$	共同滞后
初级协调型 Primary coordination type	$0.41 \leq D < 0.50$	$ESVI-HQDI > 0.1$	高质量发展滞后
		$ESVI-HQDI < -0.1$	生态环境滞后
		$0 \leq ESVI-HQDI \leq 0.1$	共同发展
协调发展型 Coordinated development type	$0.50 \leq D < 1$	$ESVI-HQDI > 0.1$	高质量发展滞后
		$ESVI-HQDI < -0.1$	生态环境滞后
		$0 \leq ESVI-HQDI \leq 0.1$	共同发展

D :耦合协调度 Coupling coordination degree; $ESVI$:生态环境指数 Eco-environment index; $HQDI$:高质量发展指数 High-quality development index

$$S = -2 \log \left\{ \prod_{l=1}^u \prod_{i=1}^u \prod_{j=1}^u \left[\frac{P_{ij}}{P_{ij}(Q)} \right]^{O_{ij}(Q)} \right\} \quad (12)$$

式中, u 为生态环境与高质量发展耦合关系类型数量, 即 $u=4$, p_{ij} 为传统马尔科夫演变概率, $P_{ij}(Q)$ 、 $O_{ij}(Q)$ 分别为空间滞后类型为 Q 的空间马尔科夫演变概率和对应的地区个数; S 服从自由度为 $u(u-1)^2$ 的卡方分布。

2.3.5 BP 神经网络—地理加权回归组合模型

BP 神经网络模型是模拟神经网络传输系统的非线性关系模型, 具有较强的自学习和自适应性, BP 神经网络一般由输入、隐含和输出层组成; 平均影响值 (MIV) 是 BP 神经网络评价变量重要性的最优指标之一, 其符号代表正负相关性, 绝对值代表对结果的影响程度^[38-39]。良好的生态环境离不开高质量发展的驱动作用, 本文运用 BP 神经网络模型揭示 2005—2020 年不同维度高质量发展对生态环境的影响。

由于生态环境与高质量发展的相互影响关系较为复杂, 利用统计分析模型容易忽略了县域生态环境与高质量发展系统间的空间非平稳性与异质性的现实特点。地理加权回归模型 (Geographically Weighted Regression, GWR) 是一种变化后的线性回归模型, 它对一般线性回归模型进行了扩展, GWR 模型将研究对象的空间位置纳入线性回归模型之中, 为不同单元中的各个研究要素构建了独立的方程, 具有强大的局部分析能力^[40-41]。

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

式中, i 为研究要素, (u_i, v_i) 为研究要素 i 的坐标, $\beta_k(u_i, v_i)$ 为第 i 个研究要素的第 k 个回归系数, ε_i 为第 i 个研究要素的随机误差。本文通过 GWR 模型研究 2005—2020 年空间背景下福建省高质量发展对生态环境指数的影响, 将不同维度高质量发展变化量作为 GWR 模型的自变量, 生态环境指数变化量作为 GWR 模型的因变量, R^2 为 0.5839, 拟合效果好。

3 结果分析

3.1 生态环境与高质量发展指数时空变化

3.1.1 生态环境指数时空变化

2005—2020 年, 福建省生态环境指数均值为 0.35 左右, 县域生态环境整体较稳定, 总体呈“沿海低, 内陆高”的空间分布格局 (图 3)。生态环境指数高水平地区位于“南平—三明—龙岩城镇聚合轴”, 南平和龙岩各县生态环境指数趋于高水平集聚, 建瓯、尤溪、建阳等 7 个县域生态环境指数极高, 生态本底优越。生态环境

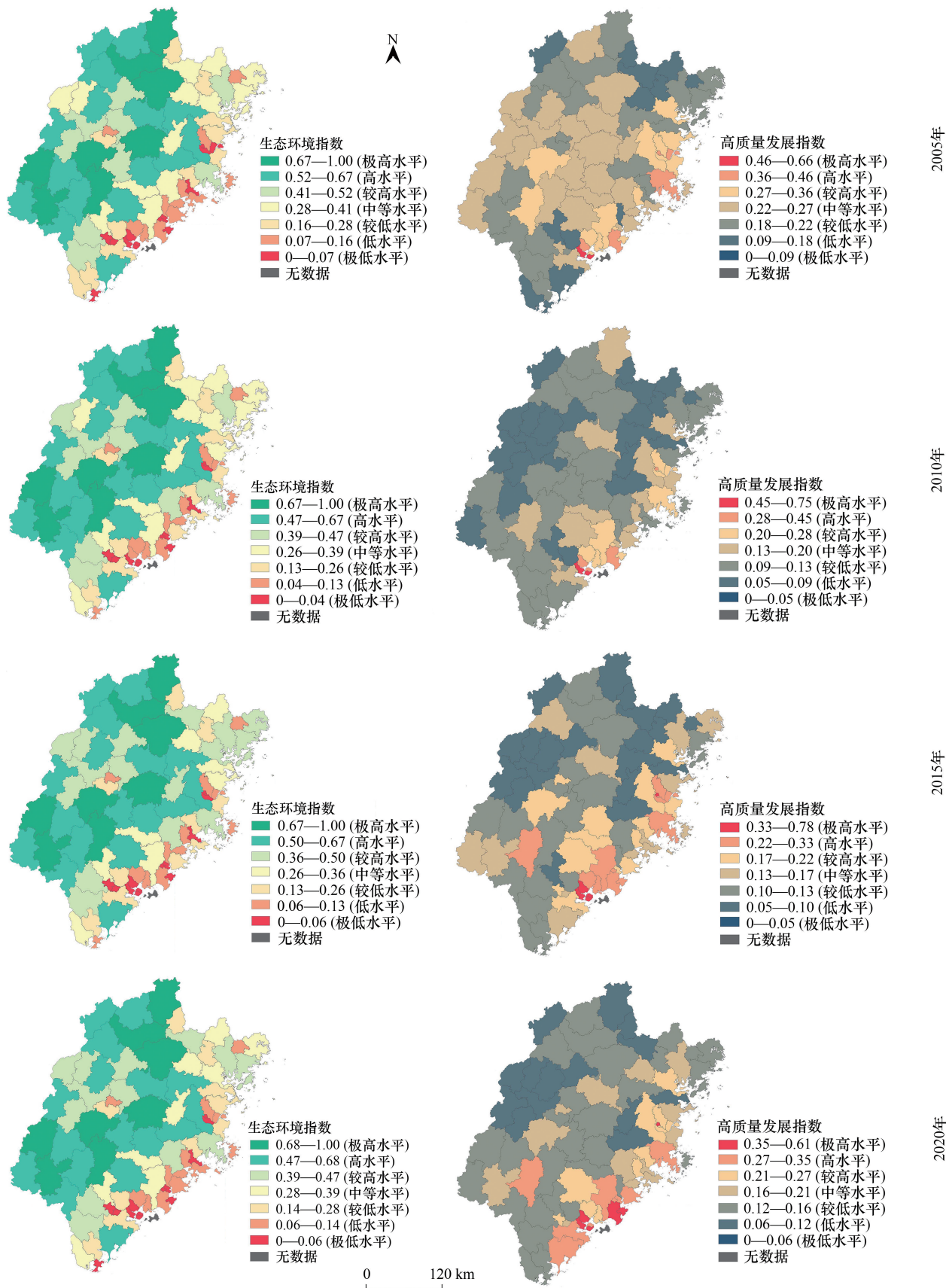


图3 生态环境与高质量发展指数时空分布

Fig.3 Spatio-temporal distribution of eco-environment and high-quality development index

指数低水平地区位于“滨海都市区”,主要集中在福州和厦漳泉大都市区,台江、仓山、荔城等 11 个县域生态环境指数极低。究其原因在于,“滨海都市区”是省内经济发展的主体,建设用地快速扩张,从而一定程度上降低了生态环境质量^[42—43]。

3.1.2 高质量发展指数时空变化

2005—2020 年,全省高质量发展指数呈先降低后上升的趋势,从 2005 年 0.25 降低至 0.15(2010 年)再上升至 0.20(2020 年),空间上呈“沿海高,内陆低”分布格局(图 3)。高质量发展指数集聚区位于福州和厦漳泉大都市区,两大都市区作为福建省区域发展增长动力源,率先实现优质经济增长,高质量发展水平较高^[24]。2005—2010 年全省共有 80 个县域高质量发展指数降低,主要原因是全球金融危机爆发,福建省重点产业转型升级刚起步,高质量发展水平出现短暂的降低。2010 年后,闽南地区和闽北地区出现较大的差异性。其中,“厦门—龙岩腹地拓展轴”和“泉州—莆田—三明腹地拓展轴”高质量发展整体呈上升趋势,由此可见,厦漳泉都市区带动闽东南地区高质量发展明显;而“福州—武夷山腹地拓展轴”高质量发展的空间差异化特征逐步明显,福州都市区的辐射带动效应有待增强,2020 年光泽、松溪和政和县的高质量发展指数位于全省后三位。

3.2 生态环境与高质量发展耦合关系时空演变分析

3.2.1 时空分异特征

从时序变化看(图 4),2005—2020 年福建省县域生态环境与高质量发展耦合协调度总体呈先降低后上升的变化趋势。2005 年全省协调发展型县域 47 个,衰退失调型 6 个(鼓楼、台江、思明、湖里、鲤城和龙文);2010 年全省 81 个县域出现不同程度的下降,协调发展型仅有 20 个,衰退失调型增至 17 个;2010—2020 年,全省 74 个县域耦合协调度均呈现上升趋势,协调发展型增至 33 个,衰退失调型减至 6 个(鼓楼、台江、湖里、鲤城、龙文和东山)。究其原因在于,2005—2010 年,福建省经济发展处于转型发展阶段,工业化与城镇化建设加速,导致建设用地盲目扩张,从而生态环境质量有所下降。2010 年后,福建省将生态文明建设纳入发展战略体系,在一定程度上加速了地区经济发展模式由粗放转向高效集约、绿色低碳的转变,生态环境与高质量发展耦合关系逐渐转变为协调发展,生态环境与高质量发展二者间出现协同作用。

从空间分布看(图 4),2005—2020 年全省以协调发展型为主,耦合协调度呈“沿海低、内陆高”的分布特征,这与各地区生态本底和经济社会发展水平有关,福州和厦漳泉大都市区是福建省经济建设的核心,高质量发展水平高于生态环境质量,耦合协调度呈现出以都市区核心区向外围递增的圈层式格局。2010 年后,随着产业结构调整和转型升级,都市区边缘县域生态环境质量提高,都市区边缘生态环境与高质量发展逐渐转向共同发展、相互协调的特征。内陆地区整体协调,但普遍存在高质量发展滞后的情况,主要因为内陆地区以重点生态功能区和农产品区为主,经济发展起步晚,绿色发展是实现内陆地区生态环境与高质量发展相协调的重要途径。

3.2.2 时空演变机制分析

本文运用传统马尔科夫链揭示 2005—2020 年福建省各县域生态环境与高质量发展耦合关系时序演变的趋势,结果表明(表 5):(1)对角线上数值上均比非对角线数值大,说明耦合协调类型保持不变的概率在 70.28%以上,各县域固有的生态环境保护与经济发展模式对耦合协调类型转移的影响很大,存在空间差异。(2)县域耦合协调类型存在向更高水平或更低水平转移的概率,县域仅能向上转移 1 级,向下可以跨越转移,表明生态环境与高质量发展协调发展演变是一种循序渐进、相对稳定的过程,无法实现跨越转移,但一味注重经济发展忽视生态保护重要性会造成生态环境与高质量发展耦合关系发生跨越性衰退。(3)耦合协调类型整体向上比向下转移概率高,体现福建省生态环境与高质量发展耦合关系演变具有协同发展的趋势。(4)协调发展型有 27.84% 概率转移至初级协调,说明维持生态环境与高质量发展耦合关系协调发展核心是实现经济可持续发展前提下确保生态环境质量不下降。(5)衰退失调和濒临协调型保持不变的概率比初级协调型高,提高衰退失调和濒临协调型的生态环境和高质量发展水平将是未来福建省的重点研究方向。基于上述背

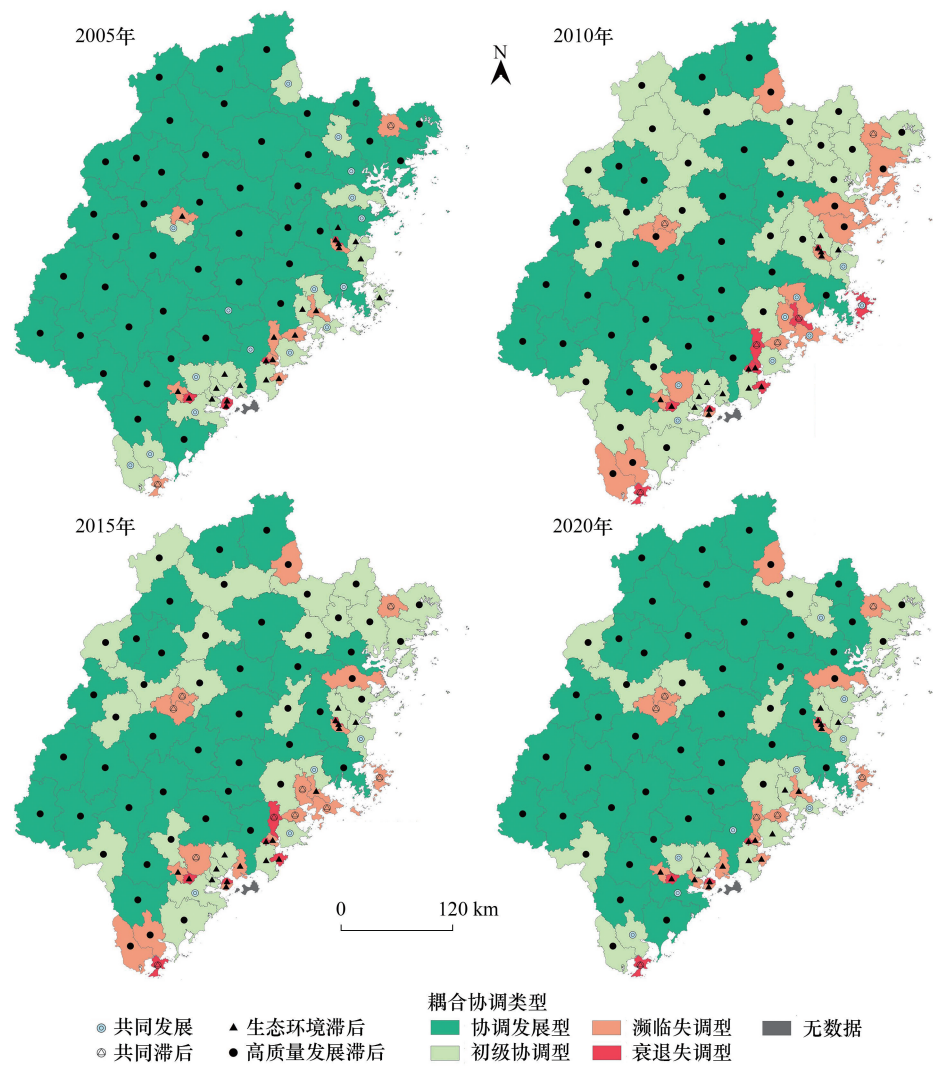


图 4 生态环境与高质量发展耦合协调类型时空分布

Fig.4 Spatio-temporal distribution of coupling coordination between eco-environment and high-quality development

景,研究 2005—2020 年不同维度高质量发展水平变化对生态环境质量的驱动作用,能因地制宜地制定区域发展战略,有利于促进福建省生态环境与高质量发展二者之间的耦合关系向协调发展演变。

表 5 传统马尔可夫转移概率矩阵

Table 5 Traditional Markov transition probability matrix

$t/t+1$	n	衰退失调型 Decline disorder type	濒临失调型 Borderline disorder type	初级协调型 Primary coordination type	协调发展型 Coordinated development type
衰退失调型 Decline disorder type	25	80.21%	19.79%	0%	0%
濒临失调型 Borderline disorder type	45	9.51%	67.76%	22.74%	0%
初级协调型 Primary coordination type	82	1.08%	20.65%	62.99%	15.27%
协调发展型 Coordinated development type	100	0%	1.88%	27.84%	70.28%

t :时间 Time; n :数量 Number

传统马尔科夫链忽略了空间相邻区域相互作用的影响,本文基于空间相邻矩阵构建空间马尔科夫链分析相邻县域生态环境与高质量发展耦合关系空间演变特征。卡方检验在 $p<0.01$ 的水平上显著,未调整自由度的情况下, $S=94.11>\chi^2=49.64$,说明 2005—2020 年县域生态环境与高质量发展耦合关系空间演变特征是相互独立的假设不成立,并认为邻域空间显著影响县域耦合关系。具体如下(表 6):(1)当邻域为初级协调型时,生态环境与高质量发展耦合关系向协调发展演变概率比邻域为濒临失调型高 ($25.93\%>25.00\%$, $19.44\%>17.39\%$),向失调发展演变概率降低 ($14.29\%<20.00\%$, $13.89\%<17.39\%$);(2)邻域为衰退失调型,县域改善生态环境和高质量发展的耦合关系后,仍有向濒临失调演变的概率 (33.33%);(3)邻域为协调发展时,县域若不能维持生态环境与高质量发展耦合关系的协调发展,耦合关系仍有向失调发展演变的概率。

表 6 空间马尔可夫转移概率矩阵
Table 6 Spatial Markov transition probability matrix

类型 Type	$t/t+1$	n	衰退失调型 Decline disorder type	濒临失调型 Borderline disorder type	初级协调型 Primary coordination type	协调发展型 Coordinated development type
衰退失调型 Decline disorder type	衰退失调型	3	66.67%	33.33%	0%	0%
	濒临失调型	0	0%	0%	0%	0%
	初级协调型	2	0%	0%	100.00%	0%
	协调发展型	0	0%	0%	0%	0%
濒临失调型 Borderline disorder type	衰退失调型	19	73.68%	26.32%	0%	0%
	濒临失调型	20	10.00%	65.00%	25.00%	0%
	初级协调型	23	0%	17.39%	65.22%	17.39%
	协调发展型	5	0%	0%	20.00%	80%
初级协调型 Primary coordination type	衰退失调型	3	100.00%	0%	0%	0%
	濒临失调型	27	11.11%	62.96%	25.93%	0%
	初级协调型	36	2.78%	13.89%	63.89%	19.44%
	协调发展型	35	0%	5.71%	14.29%	80.00%
协调发展型 Coordinated development type	衰退失调型	0	0%	0%	0%	0%
	濒临失调型	4	0%	100.00%	0%	0%
	初级协调型	21	0%	33.33%	57.14%	9.52%
	协调发展型	54	0%	0%	35.19%	64.81%

本文进一步通过 ArcGIS 绘制耦合关系空间演变分布图(图 5),分析空间异质性和对生态环境与高质量发展耦合关系的影响,结果表明:2005—2020 年,研究时间段耦合协调类型共计 48 个县发生了类型转移,其中 1 个县域向协调发展转移,24 个县域向失调发展转移,23 个县域波动不变;自身稳定、邻域向下转移的县域占多数(47 个)。空间异质性显著影响生态环境与高质量发展耦合关系的时空演变,邻域耦合关系协调发展增强了区域空间协同演变趋势,即存在向协调发展演变的空间集聚现象,说明自身生态环境或高质量发展水平上升,能够辐射带动周边县域生态环境与高质量发展水平上升;邻域耦合关系失调发展增强了空间制约作用,即存在向失调发展演变的空间集聚趋势更明显,说明县域耦合协调度低会影响周边县域生态环境质量或高质量发展水平的提高。耦合关系演变存在相邻耦合协调类型之间来回波动,这些县域都具备进入协调发展的潜力,若要稳定的进入协调发展就应当坚持可持续发展,而不是单纯的追求经济增长速度。此外,生态环境与高质量发展耦合关系还存在单一极化现象,即二者之一占有绝对优势,这种现象主要因为县域在国土空间开发保护格局和主体功能定位上具有不同侧重^[44]。综上所述,空间异质性对生态环境与高质量发展耦合关系具有相互协同和制约的作用,为此,在研究不同维度高质量发展对生态环境质量的驱动作用时,也应考虑其空间异质性的影响,这将对福建省全域实现生态环境与高质量发展耦合协调具有重要意义。

3.3 高质量发展对生态环境的驱动机制分析

运用 BP 神经网络模型揭示福建省不同维度高质量发展对生态环境的驱动作用,结果表明(图 6):2005—

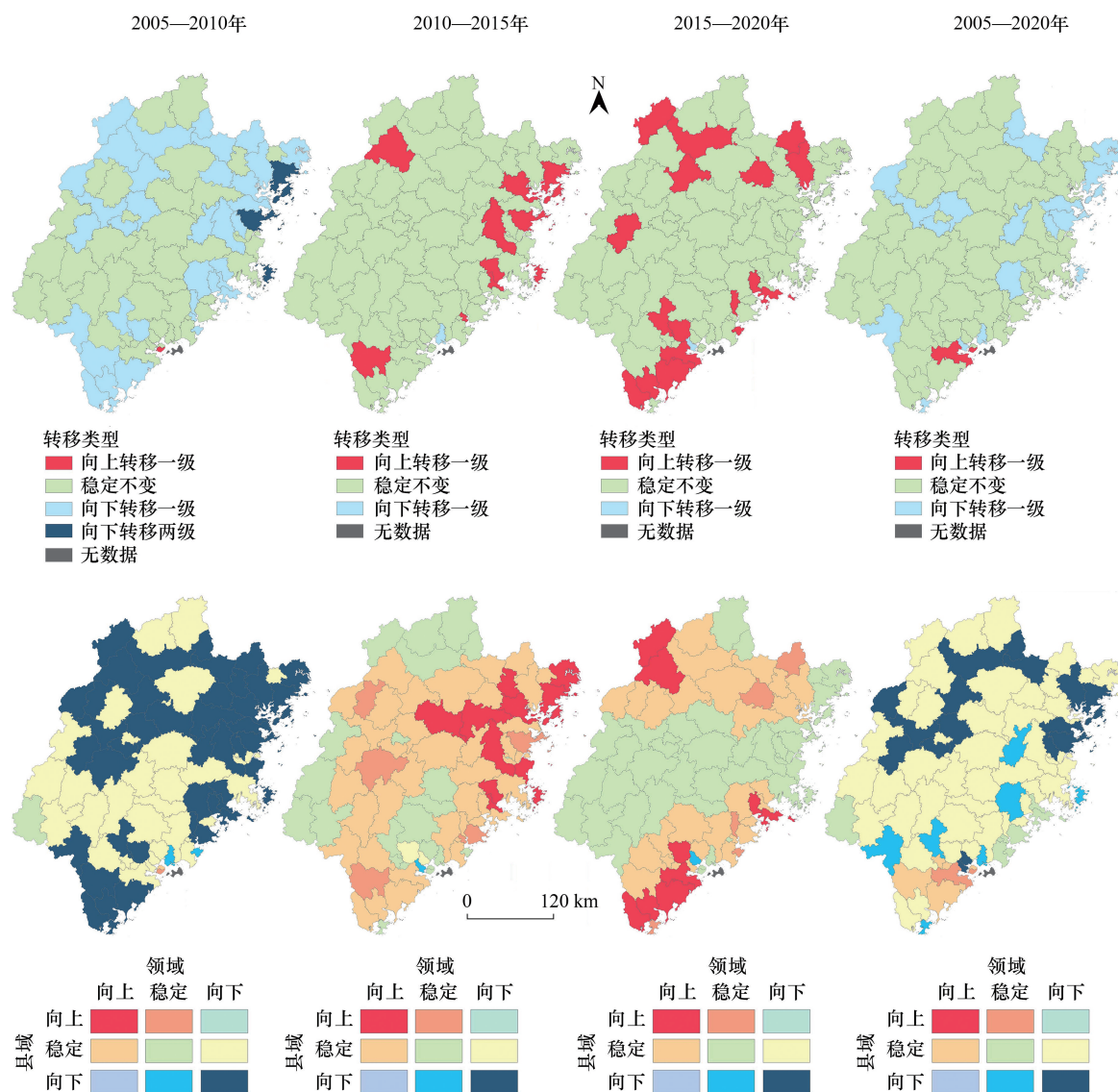


图5 福建省生态环境与高质量发展耦合关系时空演变

Fig.5 Spatio-temporal evolution of the coupling relationship between eco-environment and high-quality development in Fujian Province

2020年,不同维度高质量发展对生态环境的影响以协调发展演变为绿色发展为主,表明福建省作为国家生态文明试验区,深入贯彻可持续发展战略,绿色发展逐渐成为提高生态环境质量的关键驱动因素。具体来讲,2005年,协调发展影响程度最大(0.290),创新发展影响程度最小(0.106),该阶段是福建省加快城乡、山海地区协调发展的重要阶段,协调发展对福建省高质量发展的促进作用明显;2010—2020年,绿色发展影响程度最大,主要因为全球金融危机后福建省加快产业结构优化转型,以环境保护政策约束经济粗放发展,自然资源集约利用水平的提高,能源消费总量、强度的降低是提高生态环境质量的重要抓手。

为进一步研究不同维度高质量发展对生态环境影响的空间异质性,本文通过GWR模型进行驱动力分析,不同维度高质量发展对生态环境影响的回归系数均为正,总体呈“圈层式”的空间分布特征,说明福建省不同维度高质量发展对生态环境影响均具有正向促进作用,回归系数越大,正向促进作用越强,且具有显著的空间异质性(图6)。具体如下:(1)创新发展回归系数呈“沿海向内陆地区递增”的分布特征,说明内陆地区创新发展对生态环境的正向促进作用更显著,显著性逐渐向沿海地区降低;究其原因在于,沿海与内陆地区发展不均衡导致,福建省沿海地区创新型企业分布密集,创新贡献突出,内陆地区相比之下企业创新水平较

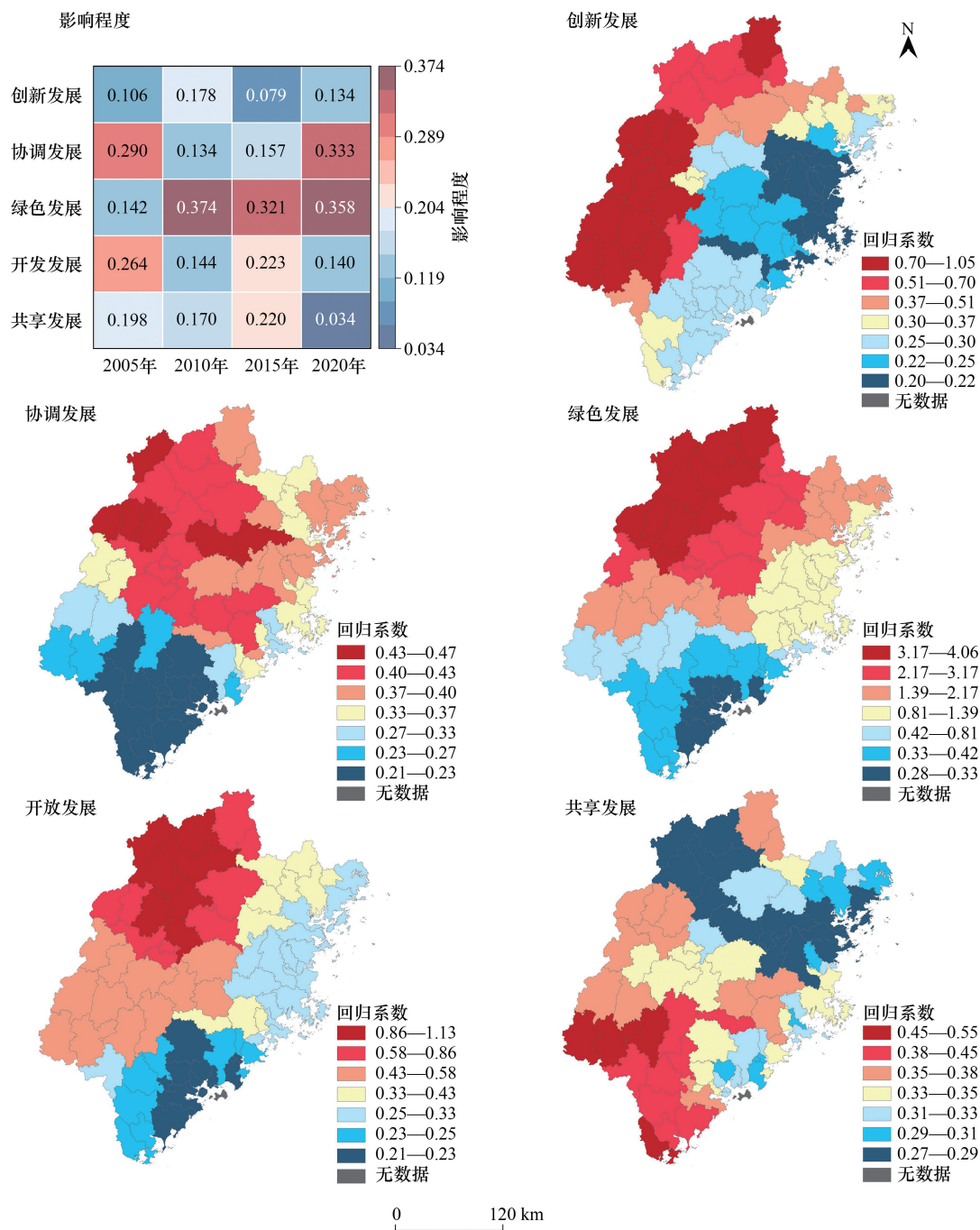


图6 高质量发展对生态环境的影响

Fig.6 The influence of high-quality development on eco-environment

低^[43],因此提高内陆地区创新发展水平对生态环境质量提高更重要;(2)协调发展回归系数呈“闽东南向闽中递增”的分布特征,说明协调发展对生态环境质量的正向促进作用呈现闽东南向闽中地区逐渐增强的趋势;由此可见,厦漳泉都市区作为闽东南地区的发展核心,福建省经济主要增长极,协调发展水平高,相比之下闽中地区人均GDP、城乡发展水平和工业化水平等较落后^[42],促进各方面的协调发展对闽中生态环境质量影响更显著。(3)绿色发展回归系数最大,呈“闽西北向闽东南递减”的分布特征,说明绿色发展对生态环境的正向促进作用最显著,显著性由闽西北逐渐向闽东南降低;主要因为闽西北地区的县域主体功能区多以重点生态功能区和农产品主产区为主,经济发展模式较粗放导致资源利用水平、经济效益和土地利用效率等多方

面相比之下处于较低水平^[44],坚持生态优先的绿色发展路径对闽西北生态环境影响更重要。(4)开放发展回归系数呈“内陆向沿海递减”的分布特征,说明开放发展对内陆地区生态环境质量提高的显著性更强;究其根本在于,沿海相比内陆地区的开放水平更发达,外商投资较多,对外贸易频繁,沿海地区应该借助交通优势推动与内陆地区的经济联动^[45],促进福建省整体开放发展水平的提高,加快绿色经济发展,降低发展对生态环境的负面影响。(5)共享发展回归系数呈“闽南向闽北递减”的分布特征,说明共享发展对生态环境正向促进作用的显著性由闽南逐渐向闽北地区降低;主要因为闽南相比闽北地区人口更密集,教育、医疗等方面公共资源需求紧张,需要加大基础设施建设和投入、提高公共服务水平、保障民众生活质量,同时还需兼顾闽北经济欠发达地区的公共需求,实现全域全要素公共资源的合理配置,减少资源浪费,最终达到提高生态环境质量的目的。综上所述,考虑高质量发展对生态环境影响的空间异质性,为区域实现生态环境与高质量发展耦合关系相协调相促进的目标提供重要依据。

4 结论

研究生态环境与高质量发展耦合关系时空演变及驱动机制不仅可为福建省国家生态文明试验区建设探索提供实证依据,同时也对我国加快构建生态文明体系具有重要的研究意义。研究结论如下:

(1)2005—2020年福建省生态环境指数整体稳定,高质量发展指数先降低后上升的趋势;在空间分布上,生态环境指数呈现“沿海低,内陆高”的特征,而高质量发展指数则呈现“沿海高,内陆低”的特征,二者空间错位分布格局明显。在都市区层面,福州和厦漳泉都市区作为福建省区域发展增长极,生态环境指数趋于低水平集聚,而高质量发展指数趋于高水平集聚;厦漳泉都市区带动闽东南地区高质量发展明显,福州都市区的辐射带动效应有待增强。

(2)2005—2020年福建省县域生态环境与高质量发展耦合协调度呈先降低后上升的变化趋势,呈现“沿海低、内陆高”的空间格局。福建省生态环境与高质量发展耦合关系的空间异质性要求不同区域采取差异化、循序建议的政策改善措施实现区域协调发展,避免过度极化现象。对于耦合协调度较低的沿海地区,要以环境保护政策为指向,注重自然资源的可持续利用,实施全域全要素生态保护与修复,夯实生态环境质量,促进经济发展提质增效。对于耦合协调度较高的内陆地区,要坚持绿色发展,夯实生态本底,因地制宜地把“绿水青山”的资源优势转化为“金山银山”的经济优势,提高高质量发展水平。

(3)福建省高质量发展对生态环境的驱动机制影响以协调发展和绿色发展为主,2010年后绿色发展逐渐成为提高生态环境质量的关键驱动因素,不同维度高质量发展对生态环境影响具有显著的空间异质性。因此,以五大发展理念为指引,统筹推进高质量发展和生态环境保护协同发展,有利于促进区域生态环境与高质量发展耦合协调,让“高质量发展”从“源头”推进“生态环境质量提高”。

参考文献 (References):

- [1] 魏伟, 石培基, 魏晓旭, 周俊菊, 颀斌斌. 中国陆地经济与生态环境协调发展的空间演变. 生态学报, 2018, 38(8): 2636-2648.
- [2] 陆大道. 中国地理学的发展与全球变化研究. 地理学报, 2011, 66(2): 147-156.
- [3] 方创琳. 中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向. 地理研究, 2019, 38(1): 13-22.
- [4] Wang Y, Zhang C, Lu A T, Li L, He Y M, ToJo J, Zhu X D. A disaggregated analysis of the environmental Kuznets curve for industrial CO₂ emissions in China. Applied Energy, 2017, 190: 172-180.
- [5] 李竞, 侯丽朋, 唐立娜. 基于环境库兹涅茨曲线的我国大气污染防治重点区域环境空气质量与经济增长关系研究. 生态学报, 2021, 41(22): 8845-8859.
- [6] Levrel H, Kerbiriou C, Couvet D, Weber J. OECD pressure - state - response indicators for managing biodiversity: a realistic perspective for a French biosphere reserve. Biodiversity and Conservation, 2008, 18(7): 1719-1732.
- [7] Hein L, van Koppen C S A, van Ierland E C, Leidekker J. Temporal scales, ecosystem dynamics, stakeholders and the valuation of ecosystem services. Ecosystem Services, 2016, 21: 109-119.
- [8] Sherrouse B C, Clement J M, Semmens D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services. Applied Geography, 2011, 31(2): 748-760.

- [9] 江孝君, 杨青山, 耿清格, 王小艳, 刘鉴. 长江经济带生态—经济—社会系统协调发展时空分异及驱动机制. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 493-504.
- [10] 朱玉鑫, 姚顺波. 基于生态系统服务价值变化的环境与经济协调发展研究——以陕西省为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3331-3342.
- [11] 周婷, 陈万旭, 李江风, 梁加乐. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系. 生态学报, 2021, 41(15): 6134-6145.
- [12] 刘琳珂, 梁流涛, 高攀, 范昌盛, 王宏豪, 王瀚. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应. 自然资源学报, 2021, 36(1): 176-195.
- [13] 杨雪获, 白永平, 车磊, 乔富伟, 周亮. 甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析. 生态学报, 2020, 40(14): 4785-4793.
- [14] 曹威威, 孙才志, 杨璇业, 崔莹. 基于能值生态足迹的长山群岛人地关系分析. 生态学报, 2020, 40(1): 89-99.
- [15] 马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析. 地理学报, 2012, 67(10): 1299-1307.
- [16] 崔丹, 卜晓燕, 徐祯, 李国平, 吴殿廷. 中国资源型城市高质量发展综合评估及影响机理. 地理学报, 2021, 76(10): 2489-2503.
- [17] 江伟康, 吴隽宇. 基于地区 GDP 和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1747-1757.
- [18] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 谢金燕, 苏坤. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.
- [19] 任祁荣, 于恩逸. 甘肃省生态环境与社会经济系统协调发展的耦合分析. 生态学报, 2021, 41(8): 2944-2953.
- [20] 杜霞, 孟彦如, 方创琳, 李聪. 山东半岛城市群城镇化与生态环境耦合协调发展的时空格局. 生态学报, 2020, 40(16): 5546-5559.
- [21] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例. 经济地理, 2020, 40(1): 93-102.
- [22] 杨泽康, 田佳, 李万源, 苏文瑞, 郭睿妍, 刘文娟. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势. 生态学报, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [23] 化祥雨, 金祥荣, 吕海萍, 叶娅芬, 邵元海. 高质量发展耦合协调时空格局演化及影响因素——以浙江省县域为例. 地理科学, 2021, 41(2): 223-231.
- [24] 黄冬梅, 刘小玉, 郑庆昌, 刘骏. 多中心格局对城镇化与生态环境耦合协调发展的影响研究——以福建省两大都市区为例. 生态学报, 2020, 40(21): 7886-7896.
- [25] Chen W X, Chi G Q, Li J F. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the County level in China, 1995-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 459-470.
- [26] 赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 王伟军. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化. 自然资源学报, 2021, 36(1): 131-147.
- [27] 王佳韡, 祁新华, 伍世代. 中国资源环境与区域发展关系演化: 脉络、局限与趋势. 生态学报, 2019, 39(24): 9408-9415.
- [28] 段佩利, 刘曙光, 尹鹏, 张海峰. 中国沿海城市开发强度与资源环境承载力时空耦合协调关系. 经济地理, 2018, 38(5): 60-67.
- [29] 左玲丽, 彭文甫, 陶帅, 祝聪, 徐新良. 岷江上游土地利用与生态系统服务价值的动态变化. 生态学报, 2021, 41(16): 6384-6397.
- [30] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [31] 张杰, 李清泉, 吴祥茵, 张晨晨, 王敬哲, 郭国锋. 基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析. 生态学报, 2021, 41(21): 8375-8386.
- [32] 程琳, 李锋, 邓华锋. 中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变. 生态学报, 2011, 31(20): 6194-6203.
- [33] 张文忠, 何炬, 湛丽. 面向高质量发展的中国城市体检方法体系探讨. 地理科学, 2021, 41(1): 1-12.
- [34] 王强, 伍世代, 李永实, 汤晓华, 陈国子. 福建省域主体功能区划分实践. 地理学报, 2009, 64(6): 725-735.
- [35] 樊杰. 地域功能—结构的组织途径——对国土空间规划实施主体功能区战略的讨论. 地理研究, 2019, 38(10): 2373-2387.
- [36] Alyousifi Y, Ibrahim K, Kang W, Zin W Z W. Correction to: Modeling the spatio-temporal dynamics of air pollution index based on spatial Markov chain model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(12): 753.
- [37] 徐维祥, 徐志雄, 刘程军. 黄河流域地级城市土地集约利用效率与生态福利绩效的耦合性分析. 自然资源学报, 2021, 36(1): 114-130.
- [38] 李荣丽, 陈志彪, 陈志强, 张晓云, 郑丽丹, 王秋云. 基于 BP 神经网络的流域生态恢复度计算——以福建长汀朱溪小流域为例. 生态学报, 2015, 35(6): 1973-1981.
- [39] 黄智洵, 王飞飞, 曹文志. 长江经济带生态文明水平影响因素探析及预测——基于 VAR、GWR-BP 神经网络组合模型. 经济地理, 2020, 40(3): 196-206.
- [40] 刘彦文, 刘成武, 何宗宜, 周霞, 韩冰华, 郝汉舟. 基于地理加权回归模型的武汉城市圈生态用地时空演变及影响因素. 应用生态学报, 2020, 31(3): 987-998.
- [41] 杨雪婷, 邱孝梓, 徐云, 朱付彪, 刘运伟. 典型山区生态系统服务对居民福祉影响的空间差异及动态特征——以川西山区为例. 生态学报, 2021, 41(19): 7555-7567.
- [42] 梁建飞, 陈松林. 环境约束下的福建省城市建设用地利用效率及驱动因素. 自然资源学报, 2020, 35(12): 2862-2874.
- [43] 苏凯, 魏道智, 林文雄. 福建省城镇化效率的区域差异及空间格局研究. 生态学报, 2019, 39(15): 5450-5459.
- [44] 林丽群, 李娜, 李国煜, 伍世代, 王强, 林蕙灵, 董政, 黄玉娟. 基于主体功能区的福建省城镇建设用地利用效率研究. 自然资源学报, 2018, 33(6): 1018-1028.
- [45] 李新光, 黄安民. 高铁对县域经济增长溢出效应的影响研究——以福建省为例. 地理科学, 2018, 38(2): 233-241.