

引用格式: 杨桂红, 彭立, 张慧娟, 张馨月. “经济-绿色-环境”协调发展水平测度及动态交互关系——基于四川省 21 个市州数据的实证分析 [J]. 山地学报, 2024, 42(6): 865-879.

YANG Guihong, PENG Li, ZHANG Huijuan, ZHANG Xinyue. On the measurement of coordinated development level of economy-green-environment and their dynamic interaction relationships: An empirical analysis of 21 cities/prefectures in Sichuan Province, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(6): 865-879.

“经济-绿色-环境”协调发展水平测度及动态交互关系 ——基于四川省 21 个市州数据的实证分析

杨桂红, 彭立*, 张慧娟, 张馨月

(四川师范大学 a. 地理与资源科学学院; b. 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610101)

摘要: 经济水平、绿色发展和环境状况是城市可持续发展路径中的三个关键要素。受数据与方法限制, 前期研究主要关注经济、绿色发展、环境之间的两两关系, 对三者之间的互馈机制和因果联系研究仍较薄弱, 尚未建立一套能够全面反映经济-绿色-环境系统协调发展状况的统一评价指标体系。论文基于 2000—2021 年四川省 21 个市州的面板数据, 构建经济水平、绿色发展和环境状况的指标体系, 运用 CRITIC-熵权组合赋权法、耦合协调模型和面板向量自回归模型, 测度经济水平、绿色发展、环境状况的耦合协调程度, 并揭示三个系统之间的动态交互关系。结果表明: (1) 四川省经济水平、绿色发展和环境状况综合发展水平整体较好, 其耦合协调性平缓上升, 逐步向更高级的协调发展阶段迈进, 并且与经济水平发展趋势具有较高的一致性, 经济水平的提高带动了绿色发展和环境状况的改善。 (2) 经济水平、绿色发展、环境状况之间因果关系与双向互动关系显著, 共同构成了一个复杂的动态系统, 且三个系统在发展过程中均呈现出一定的自我增强效应, 但增强效应随着时间的推移逐渐减弱。研究结果可为实现区域经济、社会和环境的协调发展, 推动高质量和绿色可持续发展、生态文明建设等提供决策参考。

关键词: 经济水平; 绿色发展; 环境状况; 耦合协调; PVAR 模型

中图分类号: F129.9

文献标志码: A

经济的无序扩张引发自然资源枯竭、环境污染等一系列问题, 造成经济发展与环境保护之间形成了对立^[1]。绿色发展是一种以可持续发展为核心理念的发展模式^[2], 旨在促进资源和能源的高效利用, 维护生态环境的完整性和确保经济社会可持续发展的可持续性。经济水平、绿色发展和环境状况, 这三者之间具有复杂的关系, 它们相互影响、相互促进又相互制约。社会经济和环境的协调发展是城市可持续发展的必要条件。如何在保持经济高质量发展的前

提下, 推动绿色转型和环境优化, 是中国城市发展进程中所面临的重要课题。

国内外学者从产业结构、城市生态等多元化的视角出发, 在区域^[3-4]、省域^[5-7]、城市^[8-9]等尺度上研究了经济、绿色发展与环境系统的关系, 根据不同的研究需求和区域特征, 分别采用耦合协调模型^[10-12]、系统动力学模型^[13]、Tapio 脱钩模型^[14]、灰色关联度模型^[15]等方法, 构建多样化评价指标体系。这些指标体系广泛涵盖了经济效益、产业发展、

收稿日期 (Received date): 2024-07-13; 改回日期 (Accepted date): 2024-12-11

基金项目 (Foundation item): 四川省长江黄河上游生态屏障建设研究智库开放课题 (202309); 四川省科技计划项目 (2022JDJQ0015)。

[Yangtze and Yellow River Upstream Ecological Barrier Construction Think Tank Program of Sichuan Province (202309); Science and Technology Program Funding Projects of Sichuan Province (2022JDJQ0015)]

作者简介 (Biography): 杨桂红 (2000-), 女, 广西来宾人, 硕士研究生, 主要研究方向: 人文地理。[YANG Guihong (2000-), female, born in Laibin, Guangxi Zhuang Autonomous Region, M. Sc. candidate, research on humanity geography] E-mail: 20231101039@stu.sicnu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 彭立 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 人文地理。[PENG Li (1983-), male, Ph. D., professor, research on humanity geography] E-mail: pengli@imde.ac.cn

社会经济发展指数、生态保护、环境状况、环境治理^[16-18]、绿色增长、绿色福利、绿色治理、绿色生产、绿色生活^[19-20]等维度,并采用熵值法^[21]、数据包络分析法^[22]、生态足迹法^[23]等模型实现综合评价。然而,由于数据获取困难与现有方法的局限性,过去研究主要关注经济、绿色发展、环境之间的两两关系,尚未建立一套能够全面反映经济-绿色-环境系统协调发展状况的统一评价指标体系。此外,对于经济水平、绿色发展、环境状况三者之间的互馈机制和因果联系,研究仍较薄弱,特别缺乏关于绿色发展与环境状况之间关系的深入探讨。这可能导致对经济水平、绿色发展与环境状况之间关系的理解存在偏差,难以准确把握它们之间的复杂联系和相互影响,研究成果在理论层面的贡献尚有待深化。

四川省地跨中国地形第一阶梯(青藏高原)和第二阶梯,处于胡焕庸线的两侧,其自然地理环境的复杂性导致人口分布不均衡、区域经济发展水平差异显著,制约了四川省经济实现高质量发展。四川省是长江黄河上游重要的水源涵养区和生态建设核心区,在长江黄河流域生态安全中具有重要战略地位,但生态系统服务功能的基础仍不牢固,其作为长江经济带发展、黄河生态保护和高质量发展及成渝地区双城经济圈建设三大战略重要支撑区,在国家生态安全和高质量发展中具有独特战略地位。如何实现社会经济发展和生态环境保护之间的协调是四川省长期面临的重大发展问题,而科学揭示经济水平、绿色发展、环境状况之间的动态交互关系,对实现三者协调发展、推动省域高质量发展具有重要意义。

本研究以四川省 21 个市州为基本研究单元,构建四川省经济水平、绿色发展、环境状况的综合评价指标体系,并采用 CRITIC-熵权组合赋权法展开综合评价;利用耦合协调度模型和 PVAR 模型,定量分析 2000—2021 年四川省经济水平、绿色发展、环境状况的耦合协调程度时空演变特征及动态交互关系;基于研究结果提出发展战略和政策建议,为协调区域社会经济发展和生态环境保护之间的关系、推进生态文明建设、实现区域可持续发展提供理论和实践指导。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

四川省位于中国西南部,是长江上游地区的重

要组成部分,总面积约为 48.6 万 km²,是中国面积第五大的省份^[24]。省域内地貌类型多样,主要以高原和山地为主,地势总体上西高东低(图 1)。气候差异明显,西部高原山区由于海拔较高,以寒温带气候为主,降水量相对较少;东部由于地势较低,属于亚热带季风气候,年均气温为 16℃~18℃,降水量较为充沛^[25]。四川省下辖 18 个地级市、3 个自治州以及 183 个县级行政区,常住总人口约 8367.5 万人。2021 年四川国内生产总值(GDP)达到 53 850.79 亿元,工业经济总量超过 1.5 万亿元^[26]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源与指标体系构建

借鉴已有研究^[27-30],遵循系统性、完整性、科学性等原则,从经济水平、绿色发展、环境状况三个系统共选择 22 项指标综合构建评价指标体系(表 1)。各项指标数据来自《四川省水资源公报》^[31]、《四川省生态环境状况公报》^[32]、《四川省统计年鉴》^[26]和《国民经济和社会发展统计公报》^[33]《中国城市统计年鉴》^[34]等资料。在经济水平评价体系中,不仅考虑经济规模和增长速度,更重视经济质量与人的福祉。将人均 GDP、GDP 增速、人均可支配收入、财政收入年增长率等关键指标纳入评价体系。在绿色发展评价体系中,着眼于低碳发展的核心要素,将单位 GDP 能耗、电耗等表征绿色生活、绿色消费指标纳入评价。对于环境状况评价体系,主要考虑四川省资源环境成本较高的工业部门,将工业三废污染物排放、生活垃圾处理率等纳入评价体系。

1.2.2 CRITIC-熵权组合赋权法

现有研究中通常采用熵权法确定指标权重^[35-36],CRITIC 是计算客观权重指标方法,进一步拓展了权重确定的深度和广度,考虑评价指标对比度的同时兼顾指标之间的矛盾性。CRITIC-熵权组合赋权法既考虑指标的信息量,又考虑指标间的相关性,赋权结果更具客观性和全面性^[37-39]。为消除指标间的量纲差异,采用极值标准化方法对数据进行归一化处理^[40]。

正向指标为:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - \min X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}) \quad (1)$$

负向指标为:

$$X'_{ij} = (\max X_{ij} - X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}) \quad (2)$$

式中, X'_{ij} 为处理后的标准值; X_{ij} 为四川省各市州第 i 年第 j 个指标的原始值。

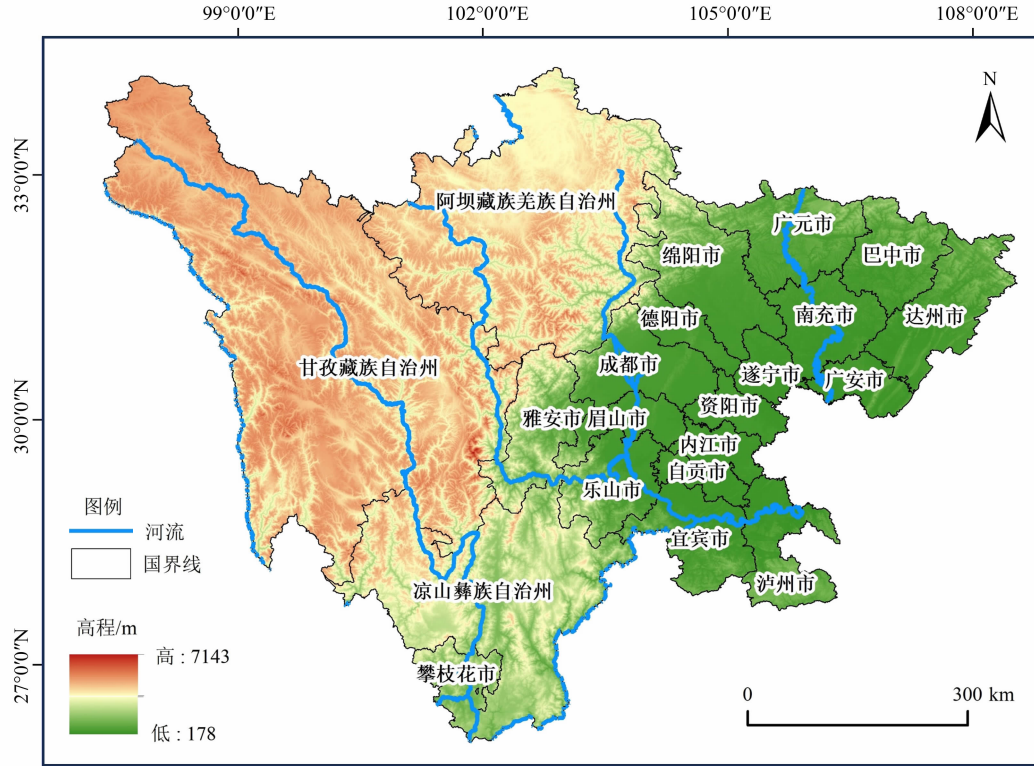


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of study area

权重的计算公式如下:

$$S_j = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1} \right)} \quad (3)$$

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (nx_{ij} - \bar{nx}) (nx_{jk} - \bar{nx}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (nx_{ij} - \bar{nx})^2 \sum_{i=1}^m (nx_{jk} - \bar{nx}_k)^2}} \quad (4)$$

$$R_j = \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk}) \quad (5)$$

$$w_{aj} = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} = \frac{S_j R_j}{\sum_{j=1}^n S_j R_j} \quad (6)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \times \ln \left(\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \right) \right] \quad (7)$$

$$w_{bj} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (8)$$

$$W_j = \frac{\sqrt{w_{aj} w_{bj}}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{w_{aj} w_{bj}}} \quad (9)$$

式中, S_j 和 \bar{x}_j 分别为第 j 个指标的标准差和平均值; ρ_{jk} 为第 j 个指标与第 k 个指标之间的相关系数; R_j 为第 j 个指标与其它指标之间的相关系数; C_j 为第

j 个指标的信息量; w_{aj} 为第 j 个指标的 CRITIC 权重; e_j 为第 j 个指标的熵; w_{bj} 为第 j 个指标的信息熵权重; W_j 为第 j 个指标的 CRITIC-熵权组合权重。

1.2.3 耦合协调度模型

耦合最初来自物理学,指两个或多个物体之间的相互作用^[41]。耦合协调度模型被用于测度经济水平、绿色发展、环境状况三个系统间的耦合协调性。耦合协调度公式如下:

$$C = \left\{ \frac{f(x) \times g(y) \times h(z)}{\left[\frac{f(x) + g(y) + h(z)}{3} \right]^3} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) + \delta h(z) \quad (11)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (12)$$

式中, C 为经济水平、绿色发展、环境状况系统耦合度; $f(x)$ 、 $g(y)$ 与 $h(z)$ 分别为经济水平、绿色发展、环境状况发展指数; $f(x) + g(y) + h(z) = 1$, 考虑到三个系统同等重要, 设定 $f(x) = g(y) = h(z) = \frac{1}{3}$;

T 为经济水平、绿色发展、环境状况 3 个子系统的综合协调指数, 反映出经济水平、绿色发展、环境状况对协调度的贡献; α 与 β 、 δ 分别为 3 个系统的权重;

表 1 经济水平-绿色发展-环境状况系统评估指标体系及其权重
Tab. 1 Evaluation index system and weights of economic level-green development-environmental conditions system

| 目标层 | 指标层 | 单位 | 属性 | 权重 |
|------|-----------------|-------------------|----|-------|
| 经济水平 | 人均 GDP | 元/人 | + | 0.203 |
| | GDP 增速 | % | + | 0.059 |
| | 人均可支配收入 | 万元 | + | 0.071 |
| | 财政收入年增长率 | % | + | 0.196 |
| | 第二产业增加值占 GDP 比重 | % | + | 0.096 |
| | 第三产业增加值占 GDP 比重 | % | + | 0.160 |
| | 固定资产投资 | 亿元 | + | 0.215 |
| 绿色发展 | 单位 GDP 电耗 | kWh/万元 | - | 0.048 |
| | 人均用水量 | L/d | - | 0.067 |
| | 单位 GDP 能耗 | t/万元 | - | 0.080 |
| | 二氧化碳排放量 | 万 t | - | 0.181 |
| | 建成区绿化覆盖率 | % | + | 0.125 |
| | 节能环保公共预算支出 | 万元 | + | 0.234 |
| | 林草覆盖率 | % | + | 0.266 |
| 环境状况 | 工业废气排放总量 | m ³ | - | 0.105 |
| | 工业废水排放总量 | t | - | 0.137 |
| | 工业固体废物排放量 | 万 t | - | 0.085 |
| | PM2.5 浓度 | μg/m ³ | - | 0.124 |
| | 生活垃圾处理率 | % | + | 0.069 |
| | 污水处理率 | % | + | 0.172 |
| | 环境空气优良率 | % | + | 0.130 |
| | 固体废物综合利用率 | % | + | 0.179 |

D 为经济水平、绿色发展、环境状况耦合协调度。
借鉴相关研究^[42-43],将耦合协调度分为 10 种等级(表 2)。

表 2 耦合协调度划分标准
Tab. 2 Division standard of coupling coordination degree

| 耦合协调度(D) | 类型 |
|-----------------------|------|
| $0 \leq D < 0.1$ | 极度失调 |
| $0.1 \leq D < 0.2$ | 严重失调 |
| $0.2 \leq D < 0.3$ | 中度失调 |
| $0.3 \leq D < 0.4$ | 轻度失调 |
| $0.4 \leq D < 0.5$ | 濒临失调 |
| $0.5 \leq D < 0.6$ | 勉强协调 |
| $0.6 \leq D < 0.7$ | 初级协调 |
| $0.7 \leq D < 0.8$ | 中级协调 |
| $0.8 \leq D < 0.9$ | 良好协调 |
| $0.9 \leq D \leq 1.0$ | 优质协调 |

1.2.4 PVAR 模型

PVAR 模型是 VAR 模型的扩展^[44],是一个多变量系统方程,可以同时观察多个变量之间的复杂动态关系。PVAR 模型既有面板数据和 VAR 模型的优点,也考虑了固定效应和时间效应,能有效地描述变量之间的短期和长期变化趋势,从而形成了一个稳健的多变量动态关系分析,公式如下:

$$Y_{it} = T_0 + \sum_{j=1}^K T_j Y_{it-j} + a_i + \beta_i + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

式中, Y_{it} 为一个由经济水平、绿色发展、环境状况变量组成的向量; i 和 t 分别为不同的城市与年份; T_0 为截距项向量; j 为滞后期; T_j 为滞后阶次的参数矩阵; a_i 为个体固定效应; β_i 为时间效应; ε_{it} 为随机扰动项。

2 结果与分析

2.1 耦合协调分析

2.1.1 时间维度下耦合协调度分析

从图 2 来看,2000—2021 年四川省经济水平、绿色发展、环境状况整体上发展态势良好,2021 年的经济水平提升至 2000 年的 2.6 倍,绿色发展升高了 11%,环境状况提高了 36%。表明四川省在可持续发展战略的实施中取得一定成效,且经济、社会、环境三方面的发展趋于协调,实现了长期的稳定增长。

从不同的发展阶段来看,2009—2014 年四川省绿色发展水平逐年下降,与经济水平背向而行,2009—2011 年四川省整体环境状况水平略有波动,

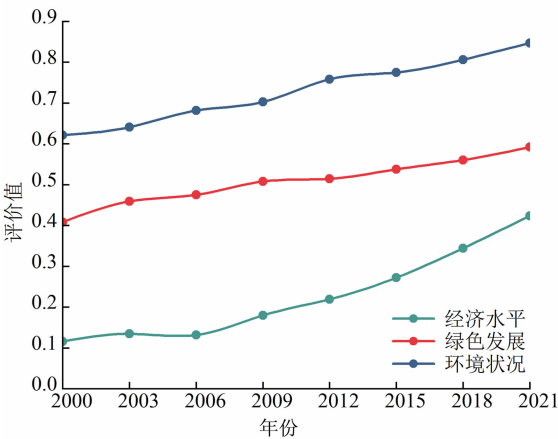


图 2 2000—2021 年四川省经济水平-绿色发展-环境状况评价
Fig. 2 Evaluation of economic level-green development-environmental conditions of Sichuan Province from 2000 to 2021

整体呈下降趋势。可能的原因是,该时段内四川省在产业升级和技术创新方面偏重高污染、高能耗的行业,而绿色、低碳产业的发展不足,影响绿色发展和环境状况。得益于《水污染防治行动计划》《大气污染防治行动计划》及《四川省长江经济带发展实施规划(2016—2020 年)》等方案的相继颁布,四川省绿色发展和环境状况分别在 2012—2021 与 2016—2021 年呈上升趋势,这对绿色发展和环境状况改善起到了积极作用。从 2000—2021 年,经济水平增长 1 倍,经济水平、绿色发展、环境状况耦合协调度提升 13.9%,并且与经济水平发展趋势具有较高的一致性,说明经济水平的稳步提升为绿色发展和环境状况保护提供了坚实的物质基础。同时,绿色发展的理念和实践,对经济的可持续健康发展具有重要意义。环境状况的改善,不仅提升了人民的生活质量,也为经济社会的高质量发展提供了良好的环境条件。

由图 3 可知,四川省经济水平、绿色发展、环境状况耦合协调度呈平缓上升趋势,耦合协调度增长率达 57.4%。五大经济区的经济水平、绿色发展、环境状况耦合协调度整体上均呈现上升的趋势。其中,成都平原经济区、攀西经济区的经济水平、绿色发展、环境状况耦合协调度较高,2021 年较 2000 年分别提高 41.2% 和 30%,原因可能是这两个经济区产业基础较好,是经济发展最活跃的区域,同时大规模绿化行动的开展使得环境状况得到有效改善。川南经济区的经济水平、绿色发展、环境状况耦合协调度的波动较其他四个经济区更为明显,原因可能是

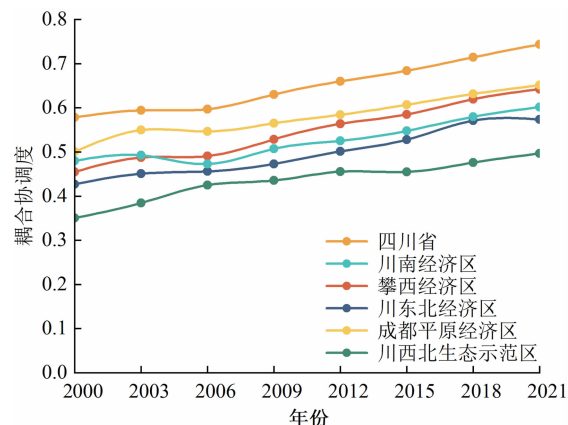


图 3 2000—2021 年四川省与五大经济区经济水平-绿色发展-环境状况耦合协调度

Fig. 3 coupling coordination degree of economic level-green development - environmental conditions of Sichuan Province and five major economic zones from 2000 to 2021

川南经济区在工业化、城市化进程中,经历了产业结构调整,面临资源利用效率、生态保护等方面的挑战。川东北经济区的耦合协调度以稳定而持续的态势逐年上升。川西北生态示范区生态环境质量较高,在生态保护和绿色发展方面成效显著,但经济总量相对于其他四个经济区较落后,因此经济水平、绿色发展、环境状况耦合协调度在四川省五大经济区位居末位,其上升速度相对较为缓慢。

2.1.2 空间维度下耦合协调度分析

从不同的市州来看(图 4),2000 和 2021 年 21 个市州的耦合协调度呈现上升趋势。将 2000 年市州的耦合协调度划分为轻度失调、濒临失调和勉强协调三个等级,而 2021 年这一分类变为濒临失调、

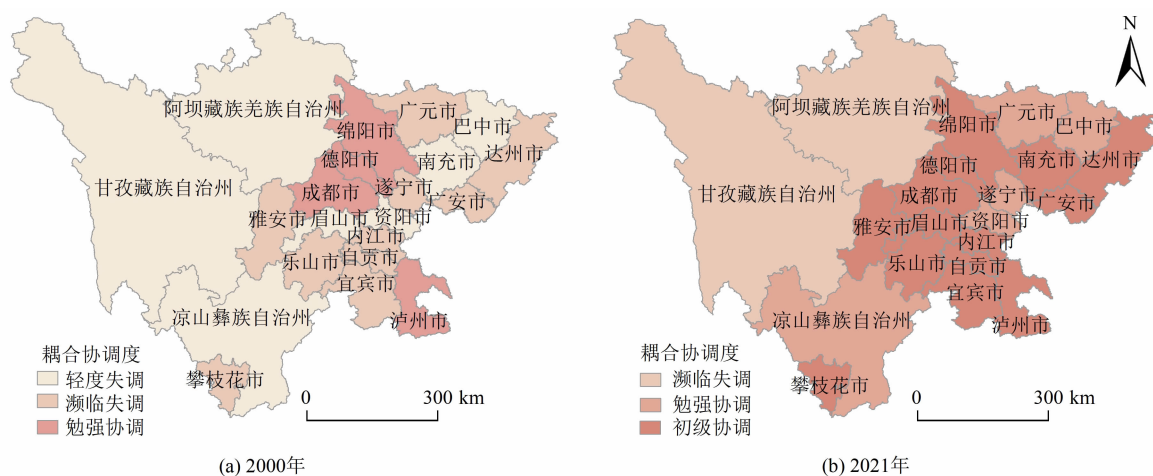


图 4 21 个市州经济水平-绿色发展-环境状况的耦合协调度

Fig. 4 Coupling coordination degree of economic level-green development-environmental conditions of 21 cities and prefectures

勉强协调和初级协调。具体来看,濒临失调的城市数量显著减少,而勉强协调的城市数量略有增加,初级协调的城市数量则大幅增加至 15 个,在四川省中部和东部,如成都市、德阳市、绵阳市等地的耦合协调度较高,这可能归因于这些地区拥有更加多元化和合理的经济结构,注重科技创新和产业升级,城市的综合水平整体较高,同时积极推进绿色发展战略,实施一系列节能减排、环境保护等措施,取得显著成效。然而,阿坝州和甘孜州在 2000 年和 2021 年分别处于轻度失调和濒临失调的阶段。尽管这些地区拥有优越的生态环境基础,但由于工业和居民分布分散,产业结构单一,导致经济发展相对滞后。此外,专利授权数量、进出口总额等均不高,这些因素共同影响了其在全省经济发展中的排名。

从不同的经济区来看(图 5),五大经济区的经济水平、绿色发展、环境状况的耦合协调度同样处于上升趋势。成都平原经济区作为四川省经济增长的引擎,在研究期初期和末期均展现出较高的耦合协调度,2000 年明显高于其他四个经济区。2021 年,攀西经济区和川南经济区的耦合协调度也实现了显著提升,这表明四川省在区域协调发展战略的推动下,各经济区之间的发展差距正在逐步缩小。然而,川西北生态示范区虽然在绿色发展和环境状况方面表现优异,但受限于经济水平的相对滞后,耦合协调度仍然处于较低水平,2021 年仍处于濒临失调的阶段。由此可见,经济水平的提升对实现经济水平、绿

色发展、环境状况耦合协调发展至关重要。此外,耦合协调性具有显著的联动效应,成都市作为区域发展的龙头,对周边城市的协同发展起到了重要的带动作用。这种协同效应不仅促进了区域内的经济一体化,也为区域内的绿色发展和环境保护提供了有力支撑。

2.2 动态交互关系分析

在 PVAR 模型估算前,为避免面板数据非平稳现象引起的回归误差,采用 HT(Harris-Tzavalis)、IPS(Im-Pesaran-Shin)、ADF(Augmented Dickey-Fuller)三种检验方法进行单位根检验来确认数据的平稳性^[45-46],并采用 AIC(Akaike Information Criterion)、BIC(Bayesian Information Criterion)、HQIC(Hannan-Quinn Information Criterion)来确定模型估计的最优滞后阶数^[47-48],最后将模型的滞后阶数设定为一阶^[49-50]。

2.2.1 格兰杰因果检验

使用平稳面板数据进行格兰杰因果检验,以确定经济水平、绿色发展、环境状况之间在统计上的因果关系(表 3)。从整体上看,以经济水平为因变量时,绿色发展与环境状况都在 5% 显著水平下为格兰杰原因。以绿色发展为因变量时,经济水平与环境状况在 1% 显著性水平下为格兰杰原因。当以环境状况为因变量时,经济水平、绿色发展为环境状况的格兰杰原因,显著性水平都在 10% 以下。说明经济水平与绿色发展、环境状况之间均存在双向的因果关系。

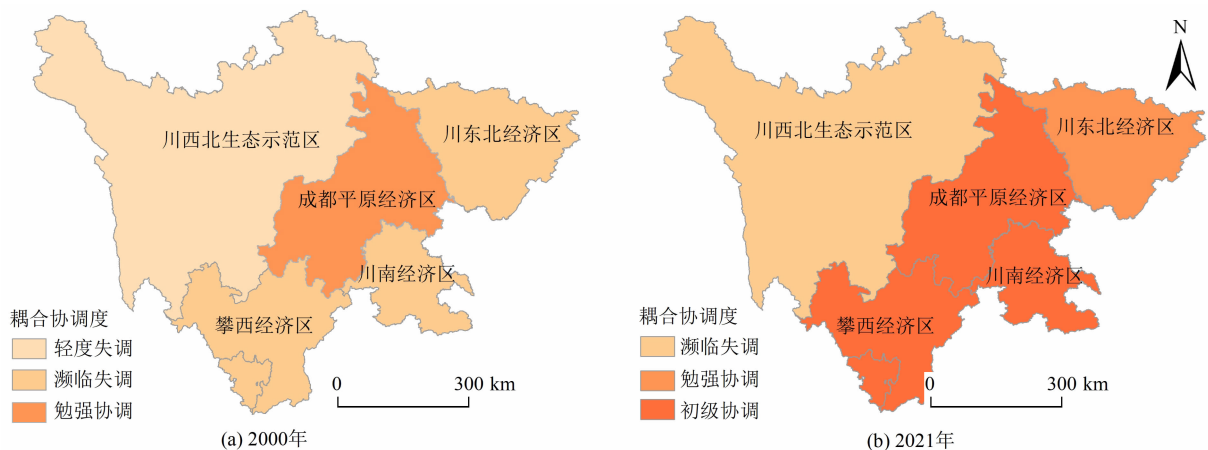


图 5 四川省五大经济区的经济水平-绿色发展-环境状况的耦合协调度

Fig. 5 Coupling coordination degree of economic level-green development-environmental conditions in the five major economic zones of Sichuan Province

表 3 格兰杰因果检验结果
Tab 3 Results of Granger causality test

| 变量 | 原假设 | 卡方值 | P 值 | 结果 |
|------|-----------------------|---------|-------|----|
| 经济水平 | 绿色发展不是经济水平的格兰杰原因 | 4.277 | 0.039 | 拒绝 |
| | 环境状况不是经济水平的格兰杰原因 | 16.938 | 0.000 | 拒绝 |
| | 绿色发展和环境状况不是经济水平的格兰杰原因 | 58.675 | 0.000 | 拒绝 |
| 绿色发展 | 经济水平不是绿色发展的格兰杰原因 | 11.941 | 0.001 | 拒绝 |
| | 环境状况不是绿色发展的格兰杰原因 | 16.937 | 0.000 | 拒绝 |
| | 经济水平和环境状况不是绿色发展的格兰杰原因 | 18.143 | 0.000 | 拒绝 |
| 环境状况 | 经济水平不是环境状况的格兰杰原因 | 2.979 | 0.084 | 拒绝 |
| | 绿色发展不是环境状况的格兰杰原因 | 5.465 | 0.019 | 拒绝 |
| | 经济水平和绿色发展不是环境状况的格兰杰原因 | 106.820 | 0.000 | 拒绝 |

2.2.2 基于 PVAR 模型的 GMM 估计

基于确定的最优滞后阶数,建立 PVAR 模型,并利用广义矩估计 (Generalized Method of Moments, GMM) 得到的结果如表 4 所示。

表 4 GMM 估计结果
Tab 4 Results of GMM estimation

| 变量 | 经济水平 | 绿色发展 | 环境状况 |
|------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 经济水平 | 0.859 *** (0.168) | 0.522 *** (0.252) | -0.564 *** (0.137) |
| 绿色发展 | 0.134 *** (0.039) | 0.770 *** (0.078) | -0.102 (0.024) |
| 环境状况 | 0.200 *** (0.116) | 0.375 ** (0.160) | 0.066 *** (0.112) |

注:**、*** 分别表示在 5%、1% 的显著水平上显著。

由表 4 可知,针对经济水平、绿色发展和环境状况,首期滞后对当期的影响均显著为正,回归系数分别为 0.859、0.770 和 0.066。这表明无论是经济水平、绿色发展还是环境状况的演化过程均具有自我增强机制,在时间上具有累积效应,在实践中具有惯性效应。在研究期间,绿色发展对经济水平的回归系数为正,并且在 1% 水平下显著。表明提高绿色发展能够显著促进四川省经济的发展,而环境状况对经济水平有显著的负向影响,归因于四川省在加强环境保护的过程中,可能需要投入更多的资源和资金用于污染治理和生态修复,在短期内可能会增加经济成本,对经济增长产生一定的抑制作用。当绿色发展作为被解释变量时,经济水平对绿色发展具有显著的正向影响,可能的原因是经济水平的提

高通常伴随着技术创新与产业结构升级,这可以促进更清洁、更高效的生产方式和绿色技术以及绿色低碳产业的发展。当环境状况作为被解释变量时,经济水平、绿色发展对环境状况有显著的正向影响,这说明随着经济的发展,更多的资源被投入到环境保护和污染治理中,对环境状况产生了积极影响。

2.2.3 脉冲响应分析

GMM 回归结果显示经济水平、绿色发展、环境状况之间存在明显的静态关系。为进一步了解三者之间的动态变化过程和判断变量之间影响的时滞关系,对三者进行脉冲响应分析。采用蒙特卡罗方法,通过 200 次模拟得到四川省 21 个市州滞后 10 期的脉冲响应图(图 6)。图中横坐标为滞后期数,纵坐标为响应程度,红色实线反映一个变量受到冲击时对另一变量产生的脉冲响应值,上下方的蓝色虚线代表 95% 置信区间。

经济水平、绿色发展、环境状况对自身冲击时均有正响应,但在当期达到最大响应值后,较长时期内响应值趋于零。说明经济水平、绿色发展、环境状况在短期内具有较强的惯性水平,但自我强化效应会逐渐减弱。

当经济水平对绿色发展进行冲击时,绿色发展在当期并无反应,但之后响应值迅速上升并表现出明显的正向响应,在第 2 期达到峰值,之后正向的影响减小,并逐渐趋向于零。当经济水平对环境状况进行冲击时,在当期并无反应,环境状况表现出先负后正的响应,在第 2 期负向响应达到峰值,第 3 期响应值为正,随后响应值逐渐减小并趋向于零。

绿色发展对经济水平冲击时,经济水平表现出

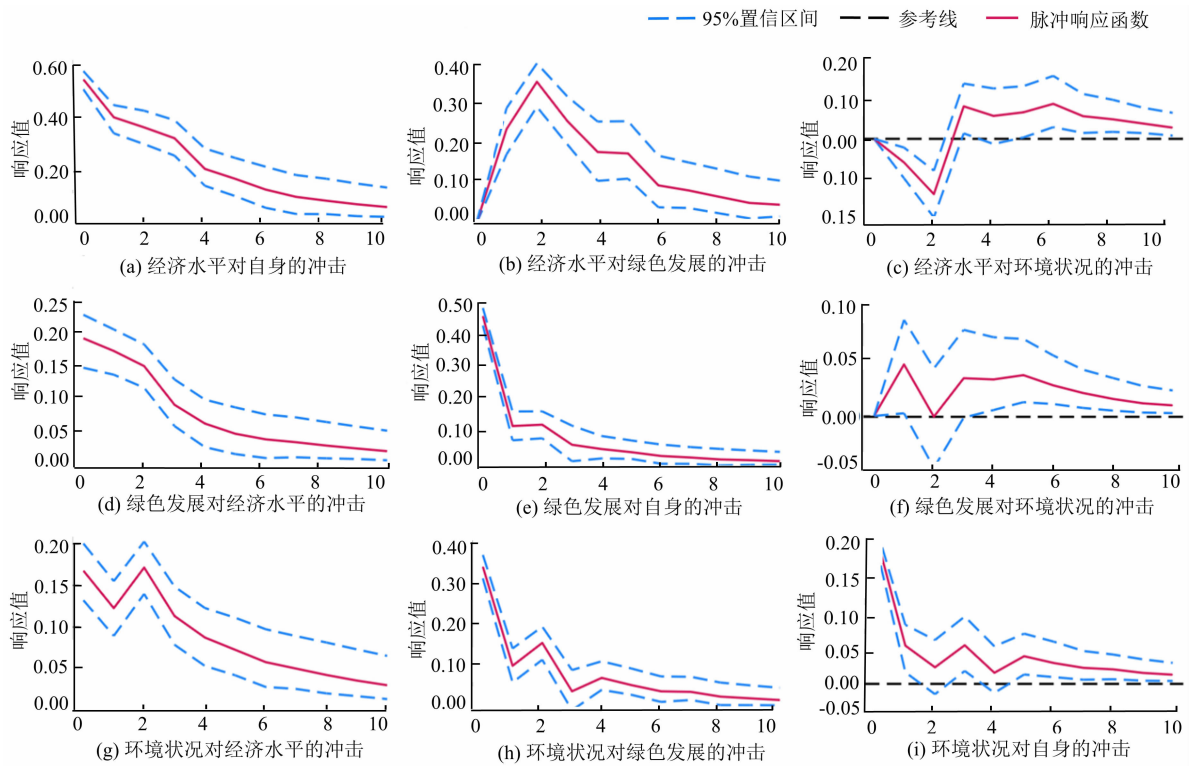


图 6 脉冲响应图

Fig. 6 Diagram of impulse response

明显的正向响应,在当期响应值达到峰值,随后逐渐减小并趋向于零。当绿色发展对环境状况冲击时,环境状况在当期并无反应,随后在第 1 期开始上升,并且响应值为正。第 1 期到第 5 期响应值表现出上下波动的态势,第 5 期开始响应值逐渐减小并趋向于零。

当环境状况对经济水平冲击时,其变化与绿色发展对经济水平冲击相似,当期迅速处于正向反应,响应值达到最大,但不同的是响应值从当期到第 2 期呈现先下降后上升的态势,随后响应值呈下降趋势并向零趋近。环境状况对绿色发展冲击时,响应值的变化呈近似“W”的形状,绿色发展在当期表现出显著的正向响应,并且正向响应呈先升后降的趋势,逐渐向零趋近。

为避免实证研究中出现的误差,进一步调整变量次序并进行模型检验,得到的结果和上述计量检验结论基本一致(图 7)。因此,本研究所建立的模型是可靠的,而且研究结果也有较强的解释力。

2.2.4 方差分解分析

方差分解可揭示 PVAR 模型内生变量变化的作用机制,表明某个变量对剩余变量的贡献大小。此

外,方差分解提供了因变量变化百分比的信息,这些因变量不仅可以归因于对自身的影响,还可以归因于其他变量的影响。因此,分别选取第 1、第 5、第 10 和第 15 期来分析经济水平、绿色发展、环境状况之间的相互作用,结果如表 5 所示。

表 5 方差分解结果

Tab 5 Results of variance decomposition

| 变量 | 期数 | 经济水平 | 绿色发展 | 环境状况 |
|------|----|-------|-------|-------|
| 经济水平 | 1 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| | 5 | 0.859 | 0.048 | 0.092 |
| | 10 | 0.837 | 0.051 | 0.123 |
| | 15 | 0.829 | 0.058 | 0.133 |
| 绿色发展 | 1 | 0.496 | 0.504 | 0.000 |
| | 5 | 0.625 | 0.359 | 0.016 |
| | 10 | 0.665 | 0.293 | 0.042 |
| | 15 | 0.672 | 0.272 | 0.056 |
| 环境状况 | 1 | 0.275 | 0.005 | 0.728 |
| | 5 | 0.353 | 0.053 | 0.648 |
| | 10 | 0.375 | 0.046 | 0.629 |
| | 15 | 0.377 | 0.044 | 0.626 |

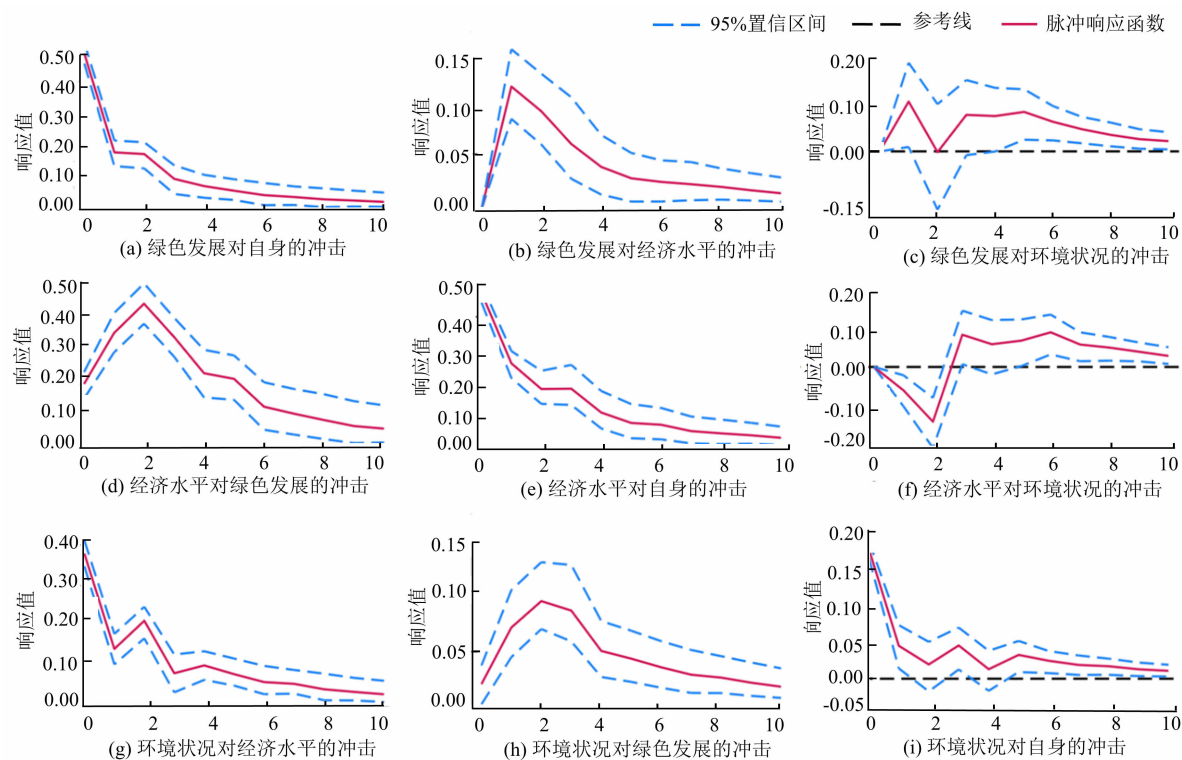


图7 脉冲响应稳健性检验图

Fig. 7 Robustness test diagram of impulse response

在经济水平的方差分解结果中,当经济水平方差分解为第 1 期时,受自身影响最大,贡献率为 100%,而随后对自身贡献率逐渐减少,但在 15 期之后依然对自身的贡献率最大。表明经济水平主要是受自身的影响,本身的惯性影响尤为明显。绿色发展和环境状况对经济水平贡献率逐渐增加,并且第 10 期与第 20 期的方差分解结果展现出高度的一致性,表明在经过 10 个预测周期之后,系统已基本上达到一个稳定的状态。

在绿色发展的方差分解结果中,方差分解为第 1 期时对自身的贡献率最大,随着期数的增加,对自身的贡献率逐渐减少,在 15 期之后对自身的贡献率变为 27.2%。经济水平对绿色发展的贡献率逐渐增加,第 15 期的贡献率达到 67.2%。环境状况对绿色发展的贡献率比经济水平对绿色发展的贡献率低,第 15 期的贡献率仅为 5.6%,这表明环境状况对绿色发展的影响较小。

在环境状况的方差分解结果中,对自身的贡献率同样也逐渐减少,在 15 期之后对自身的贡献率变为 62.6%,但绿色发展对环境状况的贡献率较少,第 15 期的贡献率为 4.4%。经济水平对环境状况

的贡献率较大,第 15 期的贡献率达到了 37.7%,这表明经济水平对环境状况发展具有长期影响。

总的来说,经济水平、绿色发展、环境状况三者之间均互有影响。绿色发展强调在经济增长的同时保护和改善环境,环境状况的改善又为经济提供了更加健康和可持续的发展条件。三个系统对自身的贡献率都逐渐减小,但来自其他两个系统的贡献率逐渐增加,说明三个系统之间随着时间的推移,对彼此的相互作用与依赖性增强,共同构成一个复杂的可持续发展系统。相较而言,经济水平对绿色发展、环境状况的贡献率都有较大的影响,表明经济水平在三者中扮演着核心角色,经济增长可以为环境保护提供资金和技术支持,同时也需要绿色发展和良好的环境状况作为支撑。

3 讨论与建议

3.1 讨论

在经济水平、绿色发展和环境保护之间找到平衡点,实现三者的协调发展具有重要意义。本文以四川省为例,将经济水平、绿色发展、环境状况三者

作为一个整体,探究其耦合协调和动态交互关系,为三者关系提供了新的研究视角,在一定程度上丰富了现有研究的理论体系,可为相关研究提供一定参考。

研究发现,经济水平、绿色发展、环境状况的耦合协调水平在时间和空间上都处于上升趋势,但耦合协调水平在空间上仍存在差异。综合发展水平较高的城市和区域具有较高的耦合协调水平,反映出各地区发展状况不平衡。应发挥成渝经济圈中心的独特地理优势,强化区域发展战略统筹,促进地区协同发展以及经济的高质量发展。

本文还探究了经济水平、绿色发展、环境状况的动态交互关系。实证结果发现三者之间均存在因果关系,一个系统的变化会影响到另一个系统。经济增长在短期内能够为环境状况的改善提供必要的资源和动力,起到积极的促进作用^[51]。然而,随着时间的推移,经济的持续增长可能会对环境状况造成压力,但这种压力并非永久,随着经济结构的优化和可持续发展理念的深入,经济也将对环境起促进作用,形成一个动态的“N”形发展模式。这与现有文献中的研究结果相吻合^[52-54],有利于加深对经济与环境相互作用的理解。研究结果表明,绿色发展不仅能够促进经济增长,同时经济增长也对绿色发展起到促进作用,这种相互促进的关系是实现经济与环境双赢的关键^[2]。此外,本研究发现,无论是经济水平、绿色发展还是环境的演化过程均具有自我增强机制,在时间上具有累积效应,在实践中具有惯性效应。表明经济水平、绿色发展和环境状况能够在一定周期内通过内部的正反馈循环实现自我增长,并且三者之间的相互作用和依赖性随着时间的推移而增强。绿色发展与环境状况之间存在着密切的正向互动。绿色发展依赖于一个健康和可持续的环境状况,而良好的环境状况又是实现绿色发展的重要前提和保障。

3.2 经济水平、绿色发展、环境状况协调发展建议

针对经济水平、绿色发展、环境状况耦合协调与动态交互关系及存在的问题,为实现三者良性互动,基于研究结果提出如下对策建议。

(1)研究结果表明经济水平、绿色发展与环境状况存在互为因果、相互促进的关系,这为我们指明了实现可持续发展的科学依据。要推动绿色发展战略,以“双碳”目标为抓手,加快绿色低碳产业发展

与经济结构的绿色转型,并在绿色制造、新型能源技术等新兴领域培育全新的经济增长点。将环境保护和资源节约作为经济发展的重要考量,鼓励绿色产业和清洁能源的发展。同时,科学评估环境保护的投入和综合效益,增加对环境治理的财政投入,利用好国家及地方的生态转移支付资金,重点用于生态保护和国家重点生态功能区建设,在发展中保护生态,以实现经济、环境和社会的可持续发展。

(2)对于以能源化工等重工业拉动经济的地区,贯彻落实绿水青山就是金山银山理念,对高排放、高能耗和高污染的产业进行优化,改造传统产业,推动产业结构升级,加快节能环保产业的发展,以高水平的生态保护促进可持续和高质量发展。同时,要将资源开发和污染排放源头治理相结合,形成环境保护与经济发展的良性互动。基于研究结果,经济水平、绿色发展、环境保护三者并重,营造高品质与舒适的生活宜居地,最终提升人们的综合生活质量。

(3)研究结果显示经济水平、绿色发展与环境状况之间的耦合协调与经济水平发展趋势高度一致。发挥经济水平发展较好地区的引领作用,加强区域发展战略的统筹规划,加快形成以人为本的新型城镇化建设,因地制宜培育新质生产力,以高水平的经济地区为引领,鼓励和支持创新要素向经济较为落后的地区延伸扩散,促进区域协同发展,形成创新驱动的区域发展新格局,提升区域经济、绿色、环境协调发展的合力。

4 结论

本文以2000—2021年四川省21个市州的面板数据为基础,分析经济水平、绿色发展、环境状况的综合状况和耦合协调关系,并构建PVAR模型来分析三者之间的交互动态关系,得出的结论如下。

(1)随着经济水平不断提升,绿色发展与环境状况也趋向良好,三者的耦合协调水平整体处于上升趋势,经济增长与环境保护之间可以实现协调发展。尽管三者之间的耦合协调水平在不同地区之间存在较大差异,总体水平仍有待提升,但随着时间的推移,各地区之间的耦合协调水平差异不断缩小。

(2)经济水平、绿色发展和环境状况之间均有显著的因果关系,进一步证实环境保护与经济发展

并不是单向的制约关系,而是一个相互促进、共同发展的双向过程。经济水平是绿色发展与环境状况变动的重要因素,经济水平提高会促进绿色发展水平提升,对促进环境状况改善也大有裨益。

(3)经济水平、绿色发展、环境状况均存在自我增强机制。环境状况的改善,尽管在某些情况下可能会对经济水平造成暂时的制约,但从长期看,它也可能反哺经济,带来长期的经济效益和社会福祉。绿色发展作为连接经济增长与环境保护的桥梁,不仅可以促进经济的可持续发展,也对环境状况产生正向影响,从而实现经济发展与生态保护的双赢。

参考文献 (References)

- [1] ZHANG Lifang, ZHAO Yuexu. Research on the coupling coordination of green finance, digital economy, and ecological environment in China [J]. Sustainability, 2023, **15**(9): 7551. DOI: 10.3390/su15097551
- [2] 高红贵, 何美璇. 生态优先、绿色低碳发展的理论逻辑、内涵特征与实践向度[J]. 生态经济, 2023, **39**(8): 13–18. [GAO Honggui, HE Meixuan. Theoretical logic, connotative characteristics and practical direction of ecological priority green and low carbon development [J]. Ecological Economy, 2023, **39**(8): 13–18]
- [3] 徐军委, 刘志华. 京津冀地区城市绿色发展评价及空间效应研究——基于空间杜宾模型的实证研究[J]. 生态经济, 2022, **38**(8): 80–87. [XU Junwei, LIU Zhihua. Research on evaluation and spatial effect of urban green development in Beijing-Tianjin-Hebei region: An empirical research based on the spatial Dubin model [J]. Ecological Economy, 2022, **38**(8): 80–87]
- [4] 黄庆, 张雨晴, 谢怡, 等. 环境经济形势指数评价体系研究——以 2020 年第二季度各地区环境经济形势分析为例[J]. 四川环境, 2020, **41**(5): 320–313. [HUANG Qing, ZHANG Yuqing, XIE Yi, et al. Research on environmental and economic situation index (EESI) evaluation system—take the analysis of regional environmental and economic situation in the second quarter of 2020 as an example [J]. Sichuan Environment, 2020, **41**(5): 320–313] DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2022.05.046
- [5] 徐斌, 许光清, 王伟, 等. 经济发展与环境协调性的实证研究——以浙江省宁海县为例[J]. 首都经济贸易大学学报, 2016, **18**(6): 25–32. [XU Bin, XU Guangqing, WANG Wei, et al. Economic growth and environmental coordination: Taking Ninghai County as an example [J]. Journal of Capital University of Economics and Business, 2016, **18**(6): 25–32] DOI: 10.13504/j.cnki.issn1008–2700.2016.06.003
- [6] 刘德强, 沙海江, 吴成亮. 中国省域生态经济系统耦合协调发展时空分异[J]. 江苏农业科学, 2018, **46**(5): 338–342. [LIU Deqiang, SHA Haijiang, WU Chengliang. Spatial and temporal heterogeneity of coupled and coordinated development of provincial ecological and economic systems in China [J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, **46**(5): 338–342] DOI: 10.15889/j.issn.1002–1302.2018.05.086
- [7] 肖金成, 王旭阳. 以绿色发展理念推动生态优势向经济优势转化[J]. 环境保护, 2018, **46**(6): 21–24. [XIAO Jincheng, WANG Xuyang. Promoting the transformation of ecological advantage to economic advantage with the concept of green development [J]. Environmental Protection, 2018, **46**(6): 21–24] DOI: 10.14026/j.cnki.0253–9705.2018.06.003
- [8] GOSSMANGM K. Environmental impacts of a North American trade agreement [R]. NBER, 1991: 1–57.
- [9] LI Quan, GUO Quan, ZHOU Min, et al. Analysis on the mechanism and influencing factors of the coordinated development of economy and environment in China's resource-based cities [J]. Sustainability, 2022, **14**(5): 2929. DOI: 10.3390/su14052929
- [10] 王介勇, 吴建寨. 黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势[J]. 生态学报, 2012, **32**(15): 4861–4868. [WANG Jieyong, WU Jianzhai. Analysis of the dynamic coupling process and trend of regional eco-economic system development in the Yellow River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(15): 4861–4868] DOI: 10.5846/stxb201107091021
- [11] 褚钰, 付景保, 陈华君. 区域生态环境与经济耦合高质量发展时空演变分析——以河南省为例[J]. 生态经济, 2022, **38**(5): 161–167. [CHU Yu, FU Jingbao, CHEN Huajun. Temporal and spatial evolution of the coupling coordination of the high-quality development of regional ecological environment and economy: Taking Henan Province for example [J]. Ecological Economy, 2022, **38**(5): 161–167]
- [12] 刘琳轲, 梁流涛, 高攀, 等. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(1): 176–195. [LIU Linke, LIANG Liutao, GAO Pan, et al. Coupling relationship and interactive response between ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(1): 176–195] DOI: 10.31497/zrzyxb.20210112
- [13] 瞿庆玲, 钱新, 王瑾. 综合类工业园环境系统动力学仿真与调控[J]. 环境保护科学, 2010, **36**(2): 82–85. [QU Qingling, QIAN Xin, WANG Jin. System dynamics simulation and adjustment on environment of comprehensive industrial park [J]. Environmental Protection Science, 2010, **36**(2): 82–85] DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004–6216.2010.02.024
- [14] 王亦菲. 山西省能源-经济-环境耦合协调发展研究及脱钩分析[J]. 现代工业经济和信信息化, 2024, **14**(6): 210–214. [WANG Yifei. Research on energy-economy-environment coupling and coordinated development in Shanxi Province and decoupling analysis [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2024, **14**(6): 210–214] DOI: 10.16525/j.cnki.14–1362/n.2024.06.066

- [15] 王静. 基于灰色关联度农村旅游经济与生态环境的耦合协调关系研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, **46**(10): 146–154. [WANG Jing. Coupling correlation between village tourism economy and ecology based on grey relational degree [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2024, **46**(10): 146–154] DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.10.012
- [16] 张焱, 胡雪枝, 唐婷, 等. 乡村振兴视角下经济社会与生态环境协调发展的动态评价及空间格局——基于云南省脱贫户数据的分析[J]. 生态经济, 2022, **38**(10): 148–157. [ZHANG Yan, HU Xuezhi, TANG Ting, et al. Dynamic evaluation and spatial pattern of the coordinated development of economic society and ecological environment from the perspective of rural revitalization: An analysis based on the data of poverty-relief households in Yunnan Province [J]. Ecological Economy, 2022, **38**(10): 148–157]
- [17] 郝智娟, 文琦, 施琳娜, 等. 黄河流域城市群社会经济与生态环境耦合协调空间网络分析[J]. 经济地理, 2023, **43**(12): 181–191. [HAO Zhijuan, WEN Qi, SHI Linna, et al. Spatial network analysis of coupling coordination between social economy and eco-environment in Yellow River Basin urban agglomerations [J]. Economic Geography, 2023, **43**(12): 181–191] DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2023.12.018
- [18] 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. [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] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.037
- [19] 邓宗兵, 肖沁霖, 王炬, 等. 中国数字经济与绿色发展耦合协调的时空特征及驱动机制[J]. 地理学报, 2024, **79**(4): 971–990. [DENG Zongbing, XIAO Qinlin, WANG Jyu, et al. Spatio-temporal characteristics and driving mechanism of the coupling coordination between digital economy and green development in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2024, **79**(4): 971–990] DOI: 10.11821/dlxb202404009
- [20] 唐源秀, 马家丽, 刘丽华. 川黔地区绿色发展与乡村振兴协调关系及影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, **44**(4): 277–288. [TANG Yuanxiu, MA Jiali, LIU Lihua. Coordination relationship between green development and rural revitalisation in Sichuan-Guizhou area and its influencing factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, **44**(4): 277–288] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.029
- [21] 吴传清, 陈文艳. 长江经济带经济增长与环境质量关系的实证研究[J]. 生态经济, 2016, **32**(5): 34–37+73. [WU Chuanqin, CHEN Wenyan. Empirical research of relationship between economic growth and environmental quality in the Yangtze River belt [J]. Ecological Economy, 2016, **32**(5): 34–37+73]
- [22] 杨龙, 胡晓珍. 基于 DEA 的中国绿色经济效率地区差异与收敛分析[J]. 经济学家, 2010(2): 46–54. [YANG Long, HU Xiaozhen. Analysis on regional difference and convergence of the efficiency of China's green economy based on DEA [J]. Economist, 2010(2): 46–54] DOI: 10.16158/j.cnki.51–1312/f.2010.02.006
- [23] 史丹, 王俊杰. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. 中国工业经济, 2016(5): 5–21. [SHI Dan, WANG Junjie. Measurement and evaluation of China's ecological pressure and ecological efficiency based on ecological footprint [J]. China's Industrial Economy, 2016(5): 5–21] DOI: 10.19581/j.cnki.ciejournal.2016.05.001
- [24] 赵茜宇, 刘昊. 生态系统服务价值对土地利用变化的响应研究——以四川省为例[J]. 资源与产业, 2024, **26**(6): 1–11. [ZHAO Qianyu, LIU Hao. Response of ecosystem servicing values on land use changes based on a case study on Sichuan Province [J]. Resource & Industries, 2024, **26**(6): 1–11] DOI: 10.13776/j.cnki.resourcesindustries.20241024.002
- [25] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, **74**(9): 1758–1776. [PENG Wenfu, ZHANG Dongmei, LUO Yanmei, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(9): 1758–1776] DOI: 10.11821/dlxb201909005
- [26] 四川省统计局. 四川统计年鉴(2001–2022) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001–2022. <https://tjj.sc.gov.cn/scstjj/c112124/sjcx.shtml> [Sichuan Provincial Bureau of Statistics. Sichuan Statistical Yearbook (2001–2022) [M]. Beijing: China Statistics Press. <https://tjj.sc.gov.cn/scstjj/c112124/sjcx.shtml>]
- [27] 张芷若, 肖喜萌. 长江经济带水资源-经济社会-环境状况耦合协调研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(11): 30–36. [ZHANG Zhiruo, XIAO Ximeng. Coupling coordination of water resources-economic society-ecological environment in the Yangtze River Economic Belt [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(11): 30–36]
- [28] 彭昕杰, 成金华, 方传棣. 基于“三线一单”的长江经济带经济-资源-环境协调发展研究[J]. 中国人口资源与环境, 2021, **31**(5): 163–173. [PENG Xinjie, CHENG Jinhua, FANG Chuandi. Coordinated development of economy, resources and environment in the Yangtze River Economic Belt based on “three lines and one order” [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, **31**(5): 163–173] DOI: 10.12062/cpre.20200937
- [29] 邓毛颖, 韦晓莉, 张国俊. 中国新型城镇化与绿色发展协调演进关系研究[J]. 自然资源学报, 2024, **39**(7): 1682–1697. [DENG Maoying, WEI Xiaoli, ZHANG Guojun, et al. Research on the coordinated evaluation relationship between new urbanization and green development in China [J]. Journal of Natural

- Resources, 2024, **39**(7): 1682 – 1697] DOI: 10.31497/zrzyxb.20240711
- [30] ZHANG Yaxian, FAN Jiangwen, WANG Suizi. Assessment of ecological carrying capacity and ecological security in China's typical eco-engineering areas [J]. Sustainability, 2020, **12**(9): 3923. DOI: 10.3390/su12093923
- [31] 四川省水利厅. 四川水资源公报(2000 – 2021) [M]. 成都: 四川省水利厅, 2000 – 2021. <http://slt.sc.gov.cn> [Sichuan Provincial Department of Water Resources. Sichuan water resources bulletin (2000 – 2021) [M]. Chengdu: Water Resources Department of Sichuan Province. <http://slt.sc.gov.cn>]
- [32] 四川省生态环境厅. 四川省生态环境状况公报(2000 – 2021) [M]. 成都: 四川省生态环境厅, 2000 – 2021. <https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/zfdlb/scs/> [Sichuan Provincial Department of Ecology and Environment. Sichuan provincial ecological environment status bulletin (2000 – 2021) [M]. Chengdu: Department of Ecology and Environment of Sichuan Province. <https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/zfdlb/scs/>]
- [33] 四川省统计局. 四川国民经济和社会发展统计公报(2000 – 2021) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2000 – 2021. <https://tjj.sc.gov.cn/sctjj/c112124/sjcx.shtml> [Sichuan Provincial Bureau of Statistics. Sichuan national economic and social development statistical bulletin (2000 – 2021) [M]. Beijing: China Statistics Press. <https://tjj.sc.gov.cn/sctjj/c112124/sjcx.shtml>]
- [34] 国家统计局. 中国城市统计年鉴(2001 – 2022) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001 – 2022. <https://www.stats.gov.cn/>. [China Bureau of Statistics. China city statistical yearbook (2001 – 2022) [M]. Beijing: China Statistics Press. <https://www.stats.gov.cn/>]
- [35] 卢卉, 张焱. 资源环境约束下云南省环境状况与经济耦合协调发展研究[J]. 云南农业大学学报(社会科学), 2023, **17**(2): 127 – 133. [LU Hui, ZHANG Yan. The coupling and coordinated development of ecological environment and economy in Yunnan Province under the constraints of resource and environment [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Sciences), 2023, **17**(2): 127 – 133] DOI: 10.12371/j.ynau(s).202210075
- [36] LI Yue, LYU Yangxi, ZHANG Zixuan, et al. Coupling coordination evaluation of “Three Waters” system and impulse response analysis in the Yellow River Basin [J]. Sustainable Cities and Society, 2024, **102**: 105174. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105174
- [37] 李林子, 邓陈宁, 詹丽雯, 等. 长江流域城市绿色发展评价与障碍影响研究[J]. 生态学报, 2024, **44**(15): 6554 – 6566. [LI Linzi, DENG Chenning, ZHAN Liwen, et al. Evaluation of urban green development and their obstacles in the Yangtze River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, **44**(15): 6554 – 6566] DOI: 10.20103/j.stxb.202312272837
- [38] DUAN Longlong, WANG Linmei. How does the construction of China's ecological civilization affect the health burden of urban and rural residents? [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2022, **20**(4): 369 – 382. DOI: 10.1016/j.cjpre.2022.11.007
- [39] LI Lijuan, LI Guosheng, CUI Linlin, et al. Method for modelling ecological competition based on Pareto optimality: A case study of coastal wetlands in Jiangsu Province, China [J]. Ecological Indicators, 2021, **129**: 107946. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107946
- [40] 蔡绍洪, 谷城, 张再杰. 西部经济与环境状况协调发展的时空特征研究——基于高质量发展视角[J]. 生态经济, 2022, **38**(11): 176 – 183. [CAI Shaohong, GU Cheng, ZHANG Zaijie. Study on the temporal and spatial characteristics of the coordinated development of economy and ecological environment in western China: From the perspective of high-quality development [J]. Ecological Economy, 2022, **38**(11): 176 – 183]
- [41] LIAO Kaicheng, YUE Mingyue, SUN Siwei, et al. An evaluation of coupling coordination between tourism and finance [J]. Sustainability, 2018, **10**(7): 2320. DOI: 10.3390/su10072320
- [42] 孙亚敏, 张付海, 王欢, 等. 基于耦合模型的安徽经济与环境协调发展分析[J]. 中国环境监测, 2021, **37**(6): 74 – 81. [SUN Yamin, ZHANG Fuhai, WANG Huan, et al. Study on the coordinated development of economy and environment based on coupling model in Anhui Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, **37**(6): 74 – 81] DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2021.06.08
- [43] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(3): 793 – 810. [WANG Shujia, KONG Wei, REN Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(3): 793 – 810] DOI: 10.31497/zrzyxb.20210319
- [44] TONE Kaoru. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001, **130**(3): 498 – 509. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00407-5
- [45] LI Zhuyuan, HAO Tianxu, ZHENG Run. The relationship between transportation industry efficiency, transportation structure, and regional sustainability development in China: Based on DEA and PVAR models [J]. Sustainability, 2022, **14**(16): 10267. DOI: 10.3390/su141610267
- [46] ZHANG Yangyang, HONG Wenxia, HUANG Qiaran, et al. Heterogeneous effects of urbanization, economic growth, and energy consumption on carbon emissions in China: Evidence from a PVAR model [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2023, **16**(12): 2471 – 2498. DOI: 10.1007/s11869-023-01419-9
- [47] SU Lining. The impact of coordinated development of ecological environment and technological innovation on green economy:

- Evidence from China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**: 6994. DOI: 10.3390/ijerph19126994
- [48] DONG Yin, JIN Gui, DENG Xiangzheng. Dynamic interactive effects of urban land-use efficiency, industrial transformation, and carbon emissions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020 (270): 122547. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122547
- [49] ZHANG Xiaohua, ZHANG Zhixuan. Interaction effects of R&D investment, industrial structure, rationalization, and economic growth in China based on the PVAR model [J]. *Sustainability*, 2023, **15**: 545. DOI: 10.3390/su15010545
- [50] DAI Shengli, WANG Yingying, ZHANG Weimin. The impact relationships between scientific and technological innovation, industrial structure advancement and carbon footprints in China based on the PVAR model [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19** (15): 9513. DOI: 10.3390/ijerph19159513
- [51] WAN Jiangjun, LI Yuxin, MA Chunchi, et al. Measurement of coupling coordination degree and spatio-temporal characteristics of the social economy and ecological environment in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration under high-quality development [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(21): 11629. DOI: 10.3390/ijerph182111629
- [52] 杨得前, 刘仁济. 财政投入对中国产业生态化效率提升的实证研究 [J]. *财经理论与实践*, 2017, **38** (1): 109 – 115. [YANG Deqian, LIU Renji. An empirical study of Chinese financial investment to enhance the eco-efficiency of industry [J]. *The Theory and Practice of Finance and Economics*, 2017, **38** (1): 109 – 115] DOI: 10.16339/j.cnki.hdxbcjb.2017.01.017
- [53] 江求川, 张锐, 汤凯. 临空经济对区域绿色发展的影响研究——来自黄河经济带的经验证据 [J]. *生态经济*, 2022, **38** (7): 63 – 71. [JIANG Qiuchuan, ZHANG Kun, TANG Kai. A study on the impact of airport economic zone on regional green development: Evidence from the Yellow River Economic Zone [J]. *Ecological Economy*, 2022, **38**(7): 63 – 71]
- [54] 李蕾. 以人民为中心, 探索以生态优先、绿色发展为先导的高质量发展新路子 [J]. *环境保护*, 2020, **48**(10): 39 – 44. [LI Lei. Taking people as the center, exploring a new way of high-quality development with ecological priority and green development as the guide [J]. *Environmental Protection*, 2020, **48**(10): 39 – 44] DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.10.009

On the Measurement of Coordinated Development Level of Economy-Green-Environment and Their Dynamic Interaction Relationships: An Empirical Analysis of 21 Cities/Prefectures in Sichuan Province, China

YANG Guihong, PENG Li^{*}, ZHANG Huijuan, ZHANG Xinyue

(a. Faculty of Geography and Resources Scienc; b. The Key Laboratory of Land Resources

Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

Abstract: Economic level, green development and environmental conditions are three key elements in the path of urban sustainable development. Previous research was conducted mostly on the pairwise relationship among the three of economy, green development and environment. However, research on the mutual feedback mechanisms and causal links among the three element systems remained relatively weak, and a set of unified evaluation index system that can comprehensively reflect the coordinated development of the economy-green-environment system on a regional basis had not yet been established.

In this study, it constructed a comprehensive index system integrating economic levels, green development, and environmental conditions based on panel data from 21 cities in Sichuan Province, China from 2000 to 2021. It used CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)-entropy weight combination method, coupling coordination model and panel vector autoregressive (PVAR) model to measure the degree of coordinated

development level of economy-green-environment, and revealed the dynamic interaction relationships among the three element systems.

The overall development levels of the economic level, green development, and environmental conditions in cities of Sichuan Province were relatively good, with their coupling and coordination gradually increasing and moving towards a higher stage of coordinated development, which was consistent with the development trend of the economic level. The improvement of the economic level drove the improvement of green development and environmental conditions.

The causal and bidirectional interactive relationships among economic development, green growth, and environmental conditions were significant, forming a complex dynamic system. All three element systems exhibited a certain self-reinforcing effect during their development process, but this reinforcing effect gradually diminished over time.

The research provides decision-making reference for realizing the coordinated development of regional economy, society and environment, promoting high-quality and green sustainable development, and ecological civilization construction.

Key words: economic level; green development; environmental conditions; coupling coordination; PVAR model

(责任编辑 朱颖彦 李 嵘)