

中国能源 - 经济 - 环境系统动态响应与因果分析

李玉莲, 张 倩*, 唐瑞泽, 吕文淼

塔里木大学信息工程学院, 新疆 阿拉尔

收稿日期: 2025年10月2日; 录用日期: 2025年10月31日; 发布日期: 2025年11月10日

摘 要

在“双碳”背景下, 中国作为全球最大能源消费国和第二大经济体, 能源 - 经济 - 环境(3E)系统协同发展对全球可持续治理意义重大。本研究基于1990~2024年数据, 宏观层面构建3E系统指标体系, 利用子系统的综合得分建立VAR模型解析动态机制; 微观层面构建因果网络, 开展中心性分析识别重要变量进行脉冲影响, 分析不同变量对系统的冲击。研究发现, 能源是驱动经济环境变化的核心要素, 环境规制对经济反馈作用小; 能源冲击使经济短期负向调整, 环境政策效应滞后明显, 10期响应值仅升6.7%。在5%显著性水平下, 环境是经济、能源系统的格兰杰原因。因果网络研究分析单位GDP能耗中心性居首, 运输行业碳强度接近中心性突出, 能源消费弹性系数中介中心性强, 脉冲响应反映管理3E系统需重视对运输行业碳强度、单位GDP能耗的短期影响。最后基于研究结论为3E系统协调发展提出建议。

关键词

双碳, 3E系统, VAR模型, 因果网络

Dynamic Response and Causal Analysis of Energy-Economic-Environment System in China

Yulian Li, Qian Zhang*, Ruize Tang, Wenmiao Lv

School of Information Engineering, Tarim University, Alar Xinjiang

Received: October 2, 2025; accepted: October 31, 2025; published: November 10, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李玉莲, 张倩, 唐瑞泽, 吕文淼. 中国能源-经济-环境系统动态响应与因果分析[J]. 可持续发展, 2025, 15(11): 114-125. DOI: 10.12677/sd.2025.1511314

Abstract

In “Dual Carbon” context, as the world’s largest energy consumer and second-largest economy, China’s coordinated 3E system development is crucial. This study constructs a macro-level 3E system index with 1990~2024 data, uses a VAR model for dynamic mechanism analysis, and at the micro level, develops a causal network to identify key variables through centrality analysis while examining impulse effects. Findings show energy drives economic-environment changes, environmental regulations have little economic feedback, energy shocks cause short-term economic negative adjustments, and environmental policy impacts lag, with the 10-period response value only rising by 6.7%. At 5% significance, environmental factors are Granger causes for economic and energy systems. Centrality analysis shows energy consumption per unit of GDP and transportation sector carbon intensity are top priorities. Impulse response analysis highlights short-term 3E system effects on carbon intensity and transportation energy consumption per unit of GDP. Recommendations are given for enhancing 3E system coordinated development.

Keywords

Dual Carbon, 3E System, VAR Model, Causal Network

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国对生态保护与资源利用的重视程度不断提高,传统粗放型经济模式已难以为继。高耗能、高污染产业引发资源浪费、环境破坏、产能过剩等多重问题,制约经济可持续发展。在此形势下,推进产业结构调整,践行绿色发展理念势在必行。绿色发展可以有效的协调能源经济与环境之间的关系,使其长期处于一个动态平衡的过程中。因此,建立一个合理的经济、能源、环境(Economy, Energy, Environment, 3E)系统来评价系统之间的发展显得至关重要。

作为一个复杂的动态耦合系统,3E系统的内部关联机制研究已成为学术界关注的焦点。向量自回归模型(VAR)和复杂网络理论因其在处理多变量动态关系和系统复杂性方面的独特优势,成为分析3E系统的重要工具。Apergis 等人[1]利用PVAR模型研究1971~2004年期间六个中美洲国家的二氧化碳排放,能源消耗和产出之间的因果关系,研究发现短期中能源消耗和实际产出之间的双向因果关系的单向因果关系,长期中能源消耗和碳排放之间存在双向因果关系。Wang Q. [2]通过Tapio解耦模型与协整检验发现1990~2015年间中国碳排放与经济增长仅在少数年份实现强脱钩,整体脱钩效果较弱。洪云波[3]利用VAR模型实证研究了云南省产业结构和能源消费结构的关系。栾俊红[4]利用格兰杰因果检验发现新疆的经济增长对可再生能源消费量具有积极影响。

与此同时,复杂网络理论的应用与因果关系模型的融合,进一步丰富了3E系统研究视角。Yang [5]利用Granger因果检验与有向无环图方法研究了1970~2008年印度经济增长、能源消费与碳排放的时空关联机制。Jiang 等人[6]通过融合多区域投入产出分析、复杂网络与面板回归方法,量化了国家在碳贸易网络中不同角色对直接碳排放影响。李玉莲[7]等人利用因果网络方法对比分析了中英两国3E系统的协同发展机制。刘家保[8]分析了中国能源消费碳排放的空间关联网络特征和影响因素,发现了各省市间存

在非对等的相互影响关系,网络结构总体稳定且省际碳排放联系紧密,呈现显著的空间关联和溢出效应。

随着研究方法的不断创新和数据可得性的提升,3E 系统研究正朝着更精细化、动态化和网络化的方向发展。基于此,本文将融合 VAR 模型与复杂网络模型研究中国 3E 系统的动态响应与因果分析。本研究揭示 3E 系统复杂关联的动态规律与网络结构,以期协同推进经济增长、能源安全与环境可持续提供关键的理论依据与决策支持。

2. 指标体系与建立模型

2.1. 数据来源与指标体系

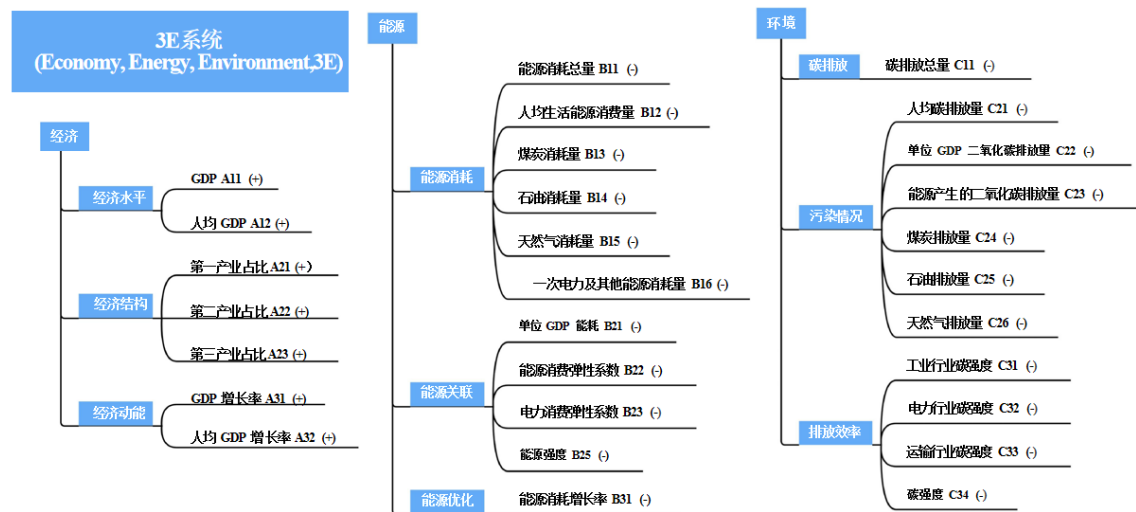


Figure 1. 3E system index system
图 1. 3E 系统指标体系

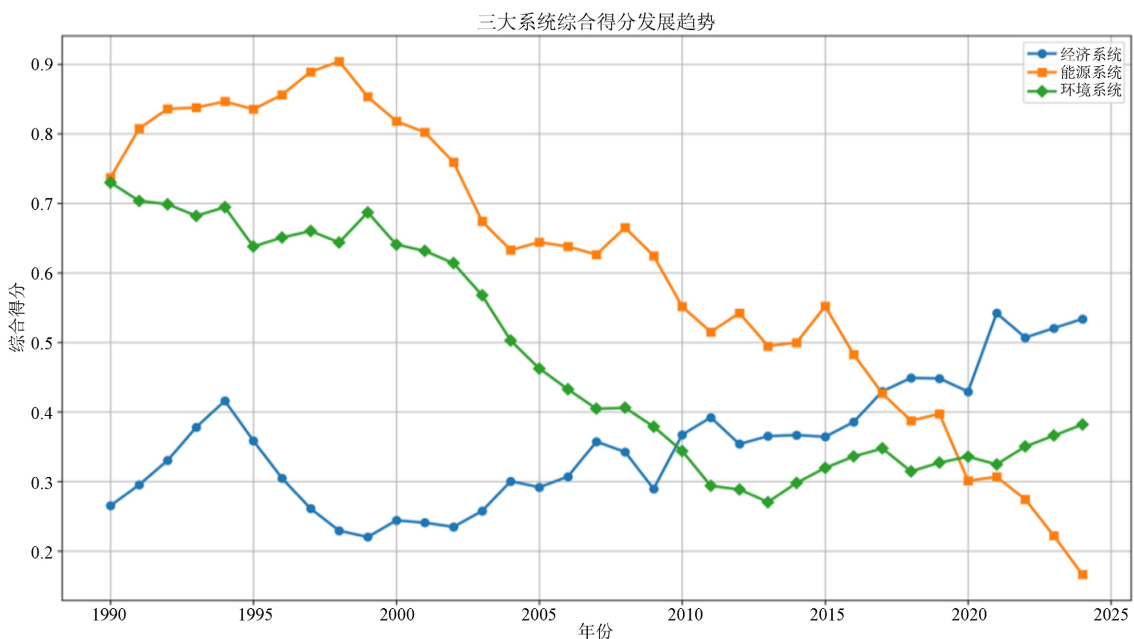


Figure 2. Development trend chart of comprehensive score of 3E subsystems
图 2. 经济 - 能源 - 环境子系统综合得分发展趋势图

在选取 3E 系统的变量时,传统研究方法是采用某一个指标去刻画一类经济现象,这种做法导致变量单一系统构建合理。因此,基于现有的研究成果,结合数据的可得性,本文建立了多层次的 3E 系统评价指标体系。数据选取来自国家统计局、世界银行、世界能源统计和全球大气研究排放数据库 1990~2024 年的数据进行分析。针对部分年份的缺失数据,采用统计插值法与预测模型相结合的方式予以补全。图 1 中包含经济、能源、环境三个子系统的指标,其中符号“+”表示正向指标,“-”表示负向指标。

本文运用熵值法[9]对中国 3E 系统的指标进行客观赋权处理,其基本原理是根据各评价指标值之间的差异程度来确定权重系数。结合使用耦合协调度对无量纲化处理后的数据和各个指标的权重分别计算出能源系统、经济系统和环境系统这三个系统的综合得分。最终,以综合得分数据为基础建立 VAR 模型,并开展后续分析。从图 2 三大系统综合得分发展趋势图可以看出,经济系统的综合得分呈现整体增长的趋势,而能源系统和环境系统整体呈现下降趋势。

2.2. 建立模型

本文研究思路如图 3 所示:首先,建立 3E 系统评价指标,以熵值法对 3E 系统进行权重赋值。其次,在宏观分析层面利用 VAR 模型对 3E 系统的内部动态响应进行分析;然后,根据 3E 系统所有变量两两间的 Granger 因果检验构建邻接矩阵,得到 3E 系统因果网络。接下来,在微观分析层面,基于复杂网络的中心性指标找出 3E 系统的重要变量,利用 VAR 模型分析重要变量对 3E 系统协调发展的影响。

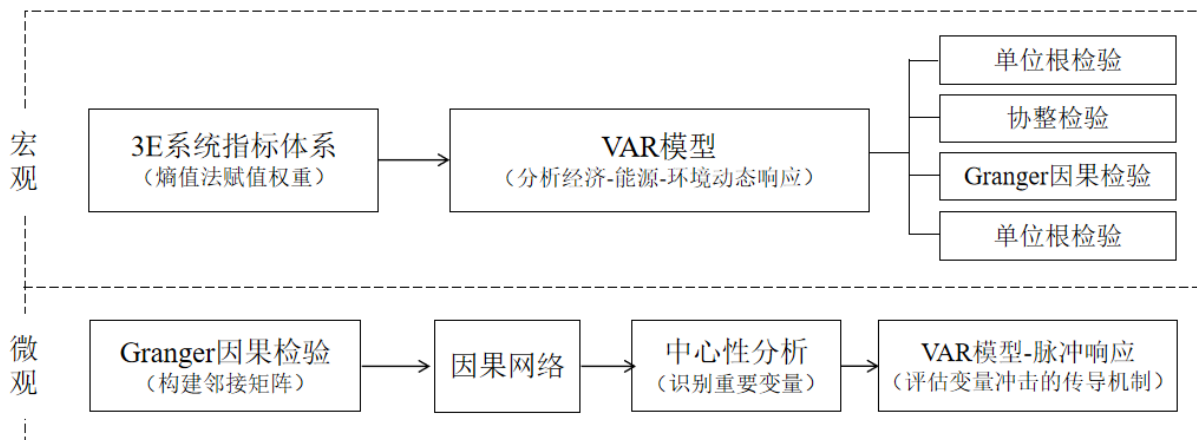


Figure 3. Research approach

图 3. 研究思路

2.2.1. VAR 模型

向量自回归模型(Vector Autoregressive Model, VAR)是分析多个变量之间动态关系的重要工具,其结构是每个变量的当前值均表示为自身及其他所有变量若干阶滞后项的线性组合,同时包含常数项和误差项以捕捉动态关系与随机扰动,以此捕捉变量间的相互影响和滞后效应,揭示变量间的短期波动关联与长期均衡关系[10]。在探究 3E 系统(涵盖能源、环境与经济)内部各要素间的交互作用时,运用 VAR 模型能够更综合地考量经济增长、能源消耗、环境质量等多个相互关联的因素,进而深入揭示三者间错综复杂的动态关系。同时,VAR 模型能够捕捉这些因素随时间推移的相互作用机制,清晰呈现经济发展对能源需求的拉动、能源消耗对环境的影响以及环境约束对经济增长的反作用等动态关联,为协调 3E 系统可持续发展的政策制定提供更为准确和可靠的依据。因此,为了验证经济、能源、环境三者间的相互影响机制,本文构建向量自回归模型对 3E 系统内部关系进行实证分析。

VAR 模型基本表达形式为:

$$X_t = A_0 + \sum_{i=1}^p A_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad t=1,2,\cdots,T \tag{1}$$

其中, $X_t = (x_{1t}, x_{2t}, x_{3t})'$ 表示经济、能源、环境系统的综合评价指数向量; A_0 表示截距项, 反映长期均衡关系; A_i 为系数矩阵, 刻画第 i 阶滞后项的动态影响; ε_t 表示误差项向量。

2.2.2. Granger 因果网络

Granger 因果网络是一种基于 Granger 因果检验、以“节点 - 有向边”形式呈现的网络图形, 其中“节点”对应系统中的变量, “有向边”代表通过检验确认的变量间因果关系。它主要用于量化和可视化变量间的动态影响关系, 识别系统中的重要变量。Granger 因果网络建模步骤如下:

- (1) 确定 VAR 模型滞后阶数, 通过计算不同滞后阶数对应的信息准则值, 选择使准则值最小的阶数作为统一参数, 为后续检验提供稳定的模型基础。
- (2) 3E 系统所有变量两两之间进行 Granger 因果检验, 以 $p < 0.05$ 作为显著性水平, 通过 F 检验 p 值判断变量间是否存在显著有向因果关系。例如: 若变量 X 到 Y 的检验 p 值小于 0.05, 则拒绝原假设, 认为 X 是 Y 的格兰杰原因。
- (3) 因果关系转化为邻接矩阵, 以 $p < 0.05$ 作为建立连接边的显著性水平阈值, 变量 X 到 Y 存在显著因果关系则对应位置记 1, 反之记 0。该矩阵定义了网络的有向边, 形成了格兰杰因果网络。

3. 实证分析

3.1. 单位根检验

平稳时间序列是 VAR 模型的前提条件, 因此在模型构建初期必须对变量进行平稳性检验, 保障模型结果的可靠性。表 1 中原始序列能源和经济指标数据显示非平稳, 环境指标显示平稳, 对非平稳指标进行一阶差分, 进行 ADF 检验发现一阶差分后的数据平稳, 序列满足序列均满足 5%临界水平下的一阶单整, 因此可能存在协整关系, 还要对序列进行协整关系检验。

Table 1. ADF unit root test results
表 1. ADF 单位根检验结果

变量	检验形式 (C, T, K)	ADF 检验值	临界值			结论
			1%	5%	10%	
能源 X1	(0, 0, 0)	-4.2271	-2.6369	-1.9513	-1.6107	平稳
环境 X2	(0, 0, 0)	-2.6585	-2.6347	-1.9509	-1.6109	平稳
经济 X3	(0, T, 0)	-4.4759	-3.6537	-2.9571	-2.6174	平稳

注: 检验形式(C, T, K)中 C 为 0 表示不带有常数项, T 为 0 表示不带有趋势项, K 表示滞后阶数。

3.2. 确定滞后阶数

VAR 模型中滞后阶数的确定对结果的准确性和可信度具有重要影响。本文按照 LR、FPE、AIC、SC 和 HQ 等准则来确定 VAR 模型的最佳滞后阶数。“*”表示按照准则选取滞后阶数, 含“*”最多的一项为最优滞后阶数。由表 2 最优滞后阶数的选择结果可得, VAR 模型的滞后阶数应为 5 阶, 此时 AIC、SC、HQ 的值最小。

Table 2. Optimal lag order of VAR model**表 2.** VAR 模型最优滞后阶数

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
1	182.2285	NA	1.94e-09	-11.54857	-11.12821	-11.41409
2	196.5943	22.98534	1.38e-09	-11.90629	-11.06557	-11.63734
3	203.6898	9.933684	1.63e-09	-11.77932	-10.51824	-11.37589
4	222.6804	22.78868	9.10e-10	-12.44536	-10.76392	-11.90745
5	247.9038	25.2234*	3.60e-1*	-13.5269*	-11.4251*	-12.8545*

3.3. Johansen 协整检验

Johansen 协整检验是在 VAR 模型基础上进行的, 目的是在多变量系统中检验可能存在的协整关系。由表 3 可知迹统计检验和最大特征根检验表明三个变量之间至少存在 2 个协整关系。基于检验结论将协整方程数量设定为 2, 并对其进行标准化处理, 最终得到的标准化协整方程为:

$$X1_{t-1} + 1.0507 \cdot X3_{t-1} = -0.9711 \quad (2)$$

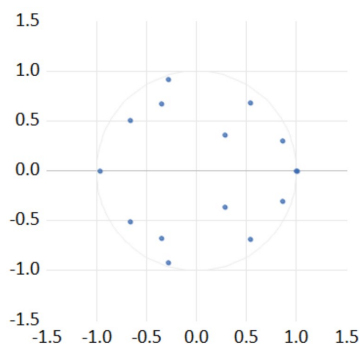
$$X2_{t-1} - 1.8071 \cdot X3_{t-1} = 0.1860 \quad (3)$$

对这两个方程进行经济解释, 第一个模型显示能源(X1)与经济(X3)正相关, 长期均衡下, 能源每增加 1 单位, 经济需减少约 1.05 个单位; 第二个模型显示, 环境(X2)与经济(X3)负相关, 环境每增加 1 单位, 经济需增加约 1.81 个单位维持平衡。

Table 3. Results of Johansen cointegration test**表 3.** Johansen 协整检验结果

统计量名称	原假设	统计量值	p 值
迹统计量	None	42.5588	0.0010***
	At most 1	16.1658	0.0396**
	At most 2	0.0799	0.7773
最大特征值统计量	None	26.3931	0.0083***
	At most 1	16.0858	0.0255**
	At most 2	0.0799	0.7773

注: *, **, ***分别代表在显著性水平 10%、5%和 1%的水平下显著。

**Figure 4.** AR feature root test**图 4.** AR 特征根检验

确定变量之间的协整关系后进行 AR 单位根检验, 结果见图 4。AR 单位根的模均小于 1 中, 所有检验点均落在单位圆内, 这证明了所构建的 VAR 模型具有稳定性和有效性, 也说明变量之间存在长期稳定的均衡关系。

3.4. 格兰杰因果检验

由表 4 格兰杰因果检验结果可知, 在 5% 的显著性水平下, p 值为 0.2249 大于 0.05, 即认为能源不是环境的 granger 原因; 同理, p 值为 0.9261 大于 0.05, 认为经济不是环境的 granger 原因。在 1% 的显著性水平下, 拒绝原假设认为能源是经济的原因; 在 5% 的显著性水平下, 拒绝原假设认为环境是能源和经济的 granger 原因。

Table 4. Granger causality test results
表 4. 格兰杰因果检验结果

原假设	卡方统计量	概率值
能源不是环境的 granger 原因	5.673843	0.2249
能源不是经济的 granger 原因	8.577352	0.0726*
经济不是能源的 granger 原因	10.99926	0.0266**
经济不是环境的 granger 原因	0.889017	0.9261
环境不是能源的 granger 原因	15.59454	0.0036**
环境不是经济的 granger 原因	13.08320	0.0109**

注: *, **, *** 分别代表在显著性水平 10%、5% 和 1% 的水平下显著。

3.5. 脉冲影响函数

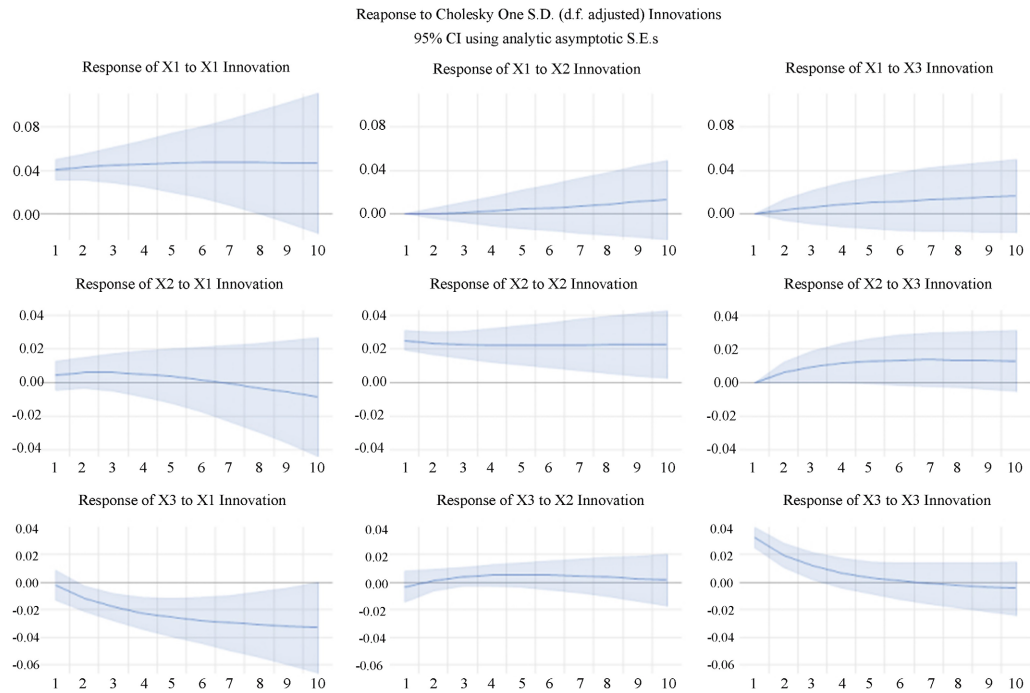


Figure 5. Impulse response
图 5. 脉冲响应

假设脉冲响应函数的追踪期为 10 期, 具体结果如图 5 所示。从脉冲响应函数来看, 能源(X1)对自身冲击初期略升后趋稳, 具备自我调节能力; 对环境冲击响应初期趋近于零, 随后逐渐上升, 由于置信区间宽, 表明环境对能源直接影响小且具不确定性; 对经济冲击响应初期趋近于零, 后略有上升, 说明经济对能源影响间接。环境(X2)对能源冲击响应初期近零, 随后渐升, 置信区间宽, 意味着能源对环境直接影响小且不确定; 对自身冲击初期略升后趋稳, 体现自我调节能力; 对经济冲击响应初期近零, 后略有上升, 表明经济对环境的影响间接。经济(X3)对能源冲击响应初期近零, 随后逐渐下降, 说明能源对经济短期影响小, 或有负向调整; 对环境冲击响应初期近零, 之后逐渐上升, 表明环境对经济影响间接且长期; 对自身冲击初期略升后趋稳, 有自我调节能力。

3.6. 方差分解

借助方差分解, 可明确各扰动项对 VAR 模型中其他变量的影响程度, 通过评估每个结构冲击在内生变量变动中的贡献占比, 来判别不同结构冲击的重要性。图 6 显示, 在能源(X1)消耗的变动中, 第 1 期完全由自身历史变化驱动, 显示出能源系统调整的内生性特征。随预测期延长, 环境(X2)和经济(X3)的影响逐步显现: 第 5 期环境贡献率升至 12.57%、经济达 6.17%; 第 10 期环境稳定在 21.71%、经济为 6.71%, 表明长期中环境政策与经济增长共同成为能源转型的外生推动力。值得注意的是, 能源自身贡献率从第 1 期 100%降至第 10 期 71.58%, 但标准差高达 17.17%, 反映其波动的不确定性较强。

在环境(X2)质量的短期波动中, 能源(X1)使用与自身历史因素共同主导, 贡献率分别为 51.85%和 48.15%, 凸显能源消费对环境的直接压力。随时间推移, 经济(X3)影响显著增强: 第 10 期经济贡献率升至 30.83%, 能源贡献率维持在 52.51%, 环境自身贡献率降至 16.66%。这表明长期中经济增长通过资源消耗或环保技术应用间接作用于环境, 而经济影响路径存在较大不确定性。

在经济(X3)增长的第 1 期中, 自身惯性与环境因素(X2)为主导驱动力, 贡献率分别为 75.43%和 23.98%。长期来看, 能源(X1)贡献率从第 1 期的 0.58%跃升至第 10 期的 45.28%, 成为经济增长的核心驱动力, 可以看出能源供应稳定性对经济可持续性的关键作用。环境贡献率长期稳定在 24%左右, 表明需持续优化环保政策以平衡发展与减排目标。

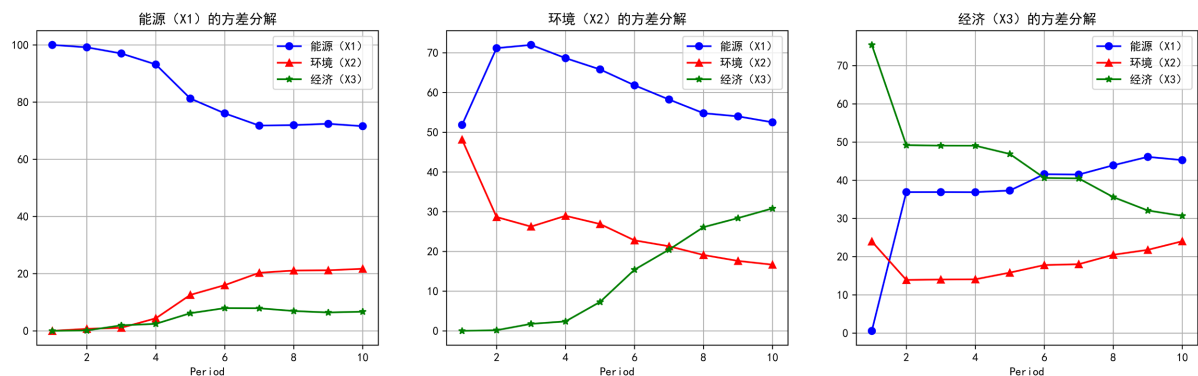


Figure 6. Analysis of variance

图 6. 方差分解

4. 因果关系网络

复杂网络往往用于抽象刻画现实世界中的各种复杂性系统中的网络连接, 将系统中的个体抽象为节点, 而将个体间的关系抽象为边, 理解复杂系统从微观无序到宏观有序的转变机制[11]。这里选取显著性

水平为 0.05，根据变量两两间的因果检验结果构建邻接矩阵，并以此创建有向图。图中节点代表变量，有向边由因果检验结果决定，最终绘制出如图 7 所示的格兰杰因果网络图。图 7 中密集的连接和众多变量表明能源、经济和环境系统是高度复杂的，变量间相互作用、相互影响，一个变量的变动可能通过复杂因果链条引发一系列连锁反应。

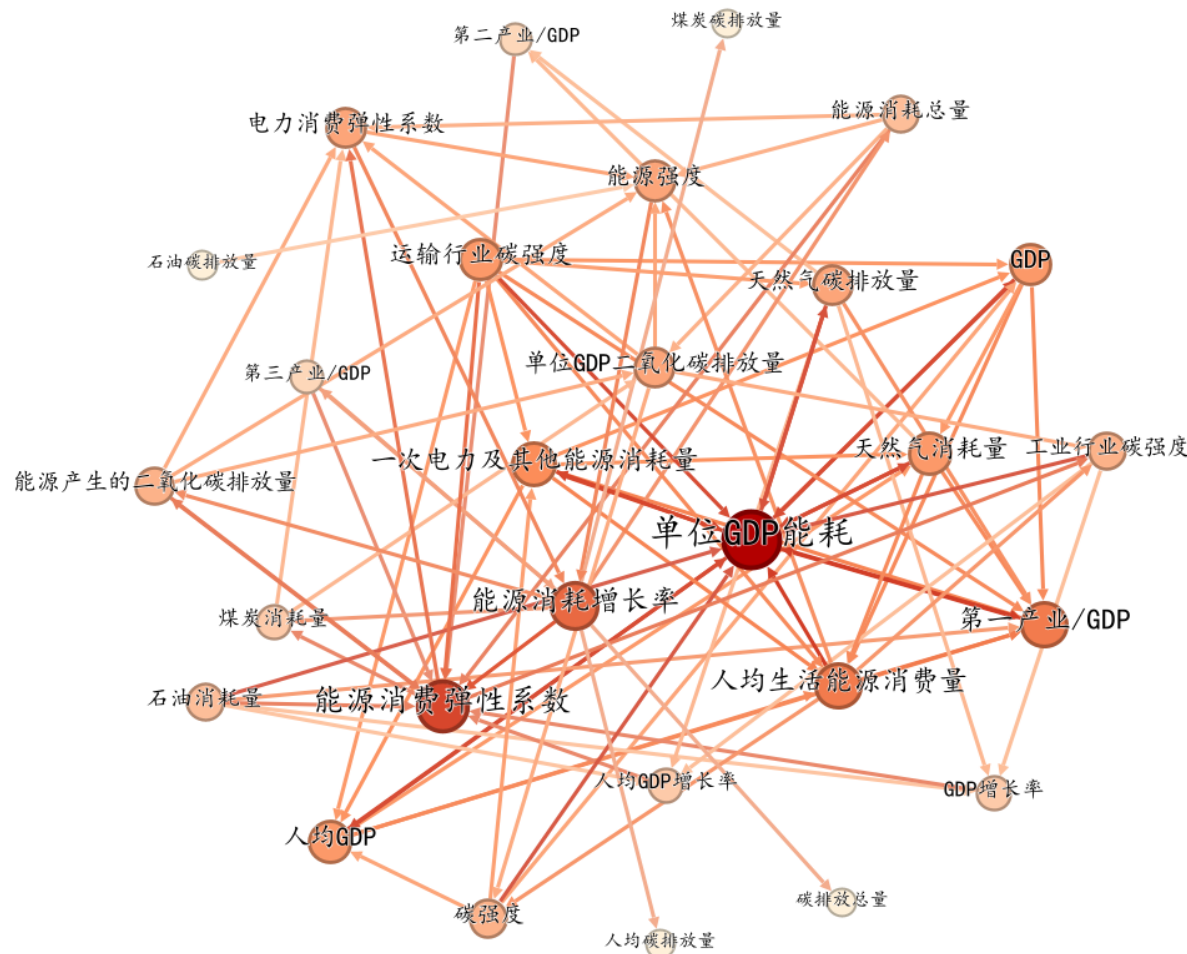


Figure 7. Granger causality network
图 7. 格兰杰因果关系网络图

4.1. 中心性分析

分析网络节点和连边所构成的局部或者整体网络特征，可判断该节点在网络中所起到的作用。中心节点会对其他多数节点产生影响，中介节点可作为桥梁传递信息。因此，本文利用重要节点的经典中心性指标排序法衡量网络节点的重要程度。由图 8 可知，度中心性数据最大的指标是单位 GDP 能耗，这意味着该指标与其他指标的连接点较多，对整个网络重要性很大。能源消费弹性系数和能源消耗增长率这两个指标与其他指标的连接点少，对整个网络的重要性比单位 GDP 能耗低，第一产业/GDP 和煤炭碳排放量等这些指标与其他指标的连接点较少。从接近中心性数据可以发现运输行业碳强度、人均生活能源消费量、单位 GDP 二氧化碳排放量数据较大，这意味着这些节点与其他节点之间的接近程度较大，能够快速产生影响，接近程度处于中间水平的指标有工业行业碳强度、天然气消耗量、一次电力及其他能源

消耗量、人均 GDP 和 GDP、能源产生的二氧化碳排放量能源消耗总量、第三产业/GDP 等，而人均 GDP 增长率、GDP 增长率和石油碳排放量这些指标与其他指标的接近程度处于较小的水平。从中介中心性数据来看，能源消费弹性系数和能源消耗增长率属于较高的水平，这意味着在网络中对信息流动的影响较大，对信息流动影响较小的指标有单位 GDP 能耗、工业行业碳强度、能源强度等，综合得分较高的指标有能源消费弹性系数、能源消耗增长率、单位 GDP 能耗和人均生活能源消耗量，综合得分属于中等水平的指标有能源强度等，而碳排放总量、人均碳排放总量和煤炭碳排放总量的综合得分属于一个较低的水平。

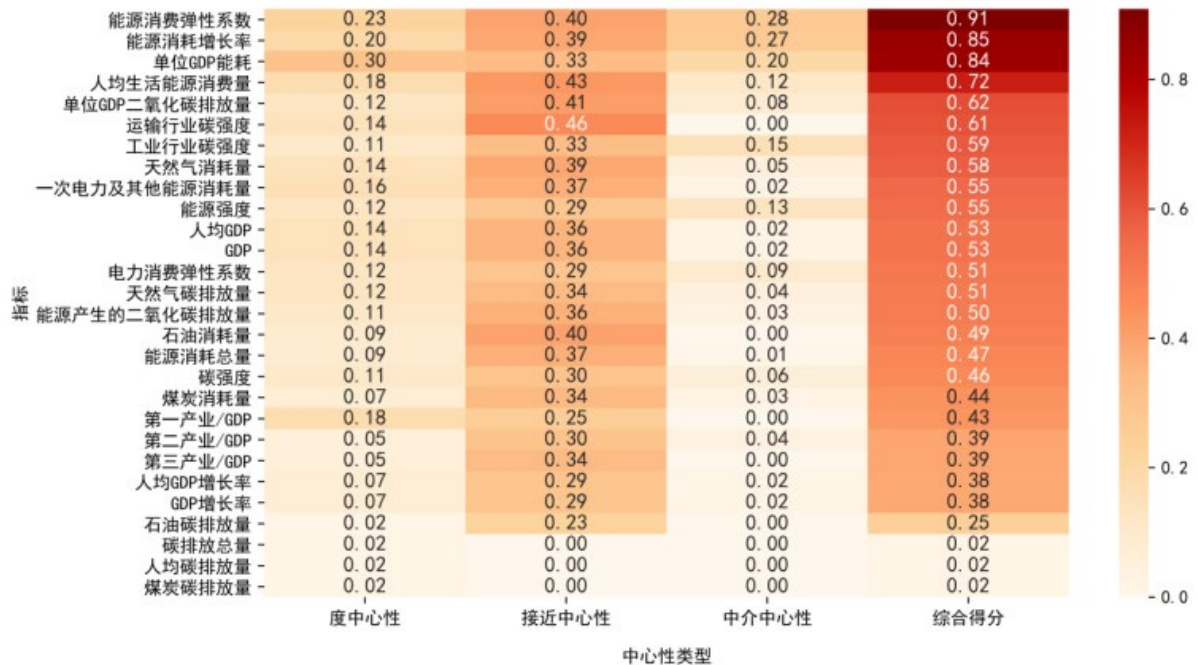


Figure 8. Heat map of the central indicators of energy, economy and environment
图 8. 能源、经济与环境指标的中心性指标热力图

4.2. 脉冲响应

为深入探究微观层面 3E 系统的因果传递效应，本文以中心性指标所识别的重要变量为对象，利用 VAR 模型的脉冲响应分析不同情景下重要变量对 3E 系统冲击的传导机制。根据中心性结果显示，单位 GDP 能耗(B21)的度中心性较高，其影响变量较多，可选择其代表能源系统。运输行业碳强度(C33)接近中心性较高，该变量越接近网络中心，选择其代表环境系统。由于排名前 10 个变量中没有经济系统指标，这里为了 3E 系统的全面性，选择经济系统中综合得分较高的人均 GDP (A12)指标作为研究对象。建立模型的过程首先对这三个变量进行 ADF 检验，发现 B21、C33 为二阶差分平稳，A12 为一阶差分平稳。VAR 模型最优滞后阶数为 2。其次，模型通过了协整检验、AR 单位根检验，即模型存在稳定性，变量之间存在长期均衡关系。最后建立 VAR 模型进行脉冲响应分析，见图 9。

由图 9 所示，人均 GDP (A12)对 3E 系统的冲击初期略有负向响应，后逐渐平稳，说明 3E 系统对人均 GDP 的直接影响较弱。B21 对 3E 系统的冲击呈现持续趋于正向变化应且逐渐增强，说明 3E 系统的优化能长期降低单位 GDP 能耗，可提升能源效率、调解结构等措施优化 3E 系统协调发展。C33 对 3E 系统的冲击初期负向响应，后转为正向并逐渐稳定，说明 3E 系统的优化能长期降低运输行业碳强度，可推

广系统层面的低碳技术、调整运输结构优化系统协调发展。3E 系统在受到自身 1 个标准差冲击后, 在第 1 期有显著正向响应, 随后逐渐回落并趋于平稳, 说明 3E 系统自身冲击的影响具有短期持续性。根据以上情景, 未来需重点关注并管理 3E 系统对运输行业碳强度以及单位 GDP 能耗对人均 GDP 的影响, 可通过提升整体 3E 系统效能来稳定或降低运输碳强度, 并对能效技术进行突破与应用, 促进经济增长与能耗脱钩, 实现绿色增长。

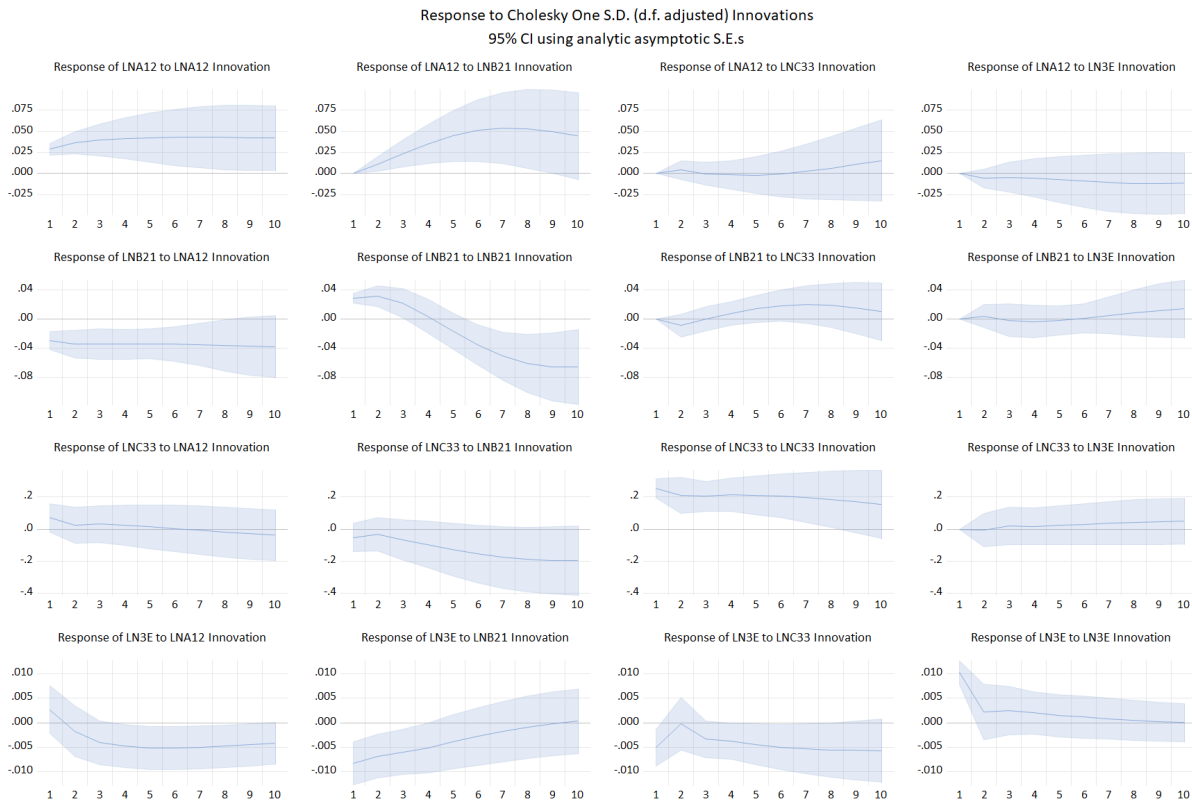


Figure 9. Microscopic impulse response
图 9. 微观层面脉冲响应

5. 结论与建议

本文通过构建 3E 系统的 VAR 模型, 对能源、环境、经济三大子系统之间的动态关系进行分析, 并建立格兰杰因果网络对 3E 系统网络结构进行分析。分析结果如下: 在宏观分析中, 在显著性水平下 1% 能源是经济的格兰杰原因, 显著性水平 5% 下, 环境是能源和经济的原因。脉冲响应显示 3E 系统中能源与经济相互影响, 环境受二者双重作用。能源和环境有自我调节能力, 环境对能源直接影响小, 经济对能源和环境间接影响, 环境对经济影响间接且长期。长期中, 环境政策与经济增长推动能源转型, 能源供应稳定性影响经济可持续发展, 经济增长通过资源消耗或环保技术间接作用于环境。单位 GDP 能耗影响大, 部分指标能快速产生影响, 子系统变量变动会引发连锁反应。将 3E 各子系统进行方差分析发现, 能源消费短期由自身主导, 长期受环境和经济增长影响显著, 其第 10 期贡献率分别为 21.71% 和 6.71%。环境质量主要受能源消费驱动, 其第 10 期贡献率为 52.51%, 经济增长对环境影响随时间增强。经济发展初期依赖环境, 长期能源供给为核心驱动力, 凸显系统动态耦合特征。

3E 系统因果网络显示, 单位 GDP 能耗的度中心性最大, 与其他指标联动性较高、重要性高, 能源

消费弹性系数等连接点少、重要性低；接近中心性上，运输行业碳强度等接近程度大、能快速产生影响，人均 GDP 增长率等接近中心性较小；中介中心性中，能源消费弹性系数等对信息流动影响大，单位 GDP 能耗等影响小。能源系统的指标得分较高，经济系统中等，环境系统得分较低。在微观分析中，人均 GDP 对 3E 系统冲击弱，单位 GDP 能耗、运输行业碳强度受 3E 系统优化长期正向影响，3E 系统自身冲击短期有效；未来需聚焦相关影响，通过提升 3E 系统效能、突破能效技术，推动经济与能耗脱钩实现绿色增长。

根据研究结果，对能源、经济、环境各子系统提出以下建议：在能源系统方面，鉴于单位 GDP 能耗影响大，应加强节能技术的研究和推广，提高能源利用效率，降低单位产出能耗，重视能源消费弹性系数等指标，合理规划能源消费增长，支持经济可持续发展。在经济制度层面，经济增长对环境具有长期的间接影响，要推动产业升级转型，发展绿色低碳产业，减少资源高消耗和高污染排放。在环境体系方面，鉴于环境质量主要由能源消费驱动，要加强能源消费结构调整，提高清洁能源比重，制定科学的环境政策，引导各方参与环境保护，建立长期的环境监测和评估机制。此外，由于 3E 系统各子系统相互关联，变量容易引发连锁反应，需要建立跨部门、跨领域的协同管理机制，加强政策协调，提高系统的整体弹性和抗风险能力，促进经济、能源和环境的协调可持续发展。

基金项目

本研究得到塔里木大学校长基金“3E 系统的非对称性因果传导效应研究”(编号：TDZKSS202417)、塔里木大学课程思政示范项目“抽样调查”(编号：TDKCSZ22429)、塔里木大学一流课程项目“抽样调查”(编号：TDYLKC202529)的资助。

参考文献

- [1] Apergis, N. and Payne, J.E. (2009) CO₂ Emissions, Energy Usage, and Output in Central America. *Energy Policy*, **37**, 3282-3286. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.048>
- [2] Wang, Q. and Su, M. (2019) The Effects of Urbanization and Industrialization on Decoupling Economic Growth from Carbon Emission—A Case Study of China. *Sustainable Cities and Society*, **51**, Article 101758. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101758>
- [3] 洪云波, 朱博伟. 新质生产力驱动下云南产业结构与能源消费关系的动态分析——基于 VAR 模型的实证研究[J]. 经济问题探索, 2024(6): 124-135.
- [4] 栾俊红, 古力哪尔·麦买提. 可再生能源消费与经济增长关系的协整分析——以新疆维吾尔自治区为例[J]. 绿色科技, 2025, 27(7): 263-271.
- [5] Yang, Z. and Zhao, Y. (2014) Energy Consumption, Carbon Emissions, and Economic Growth in India: Evidence from Directed Acyclic Graphs. *Economic Modelling*, **38**, 533-540. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.01.030>
- [6] Jiang, M., An, H., Gao, X., Liu, S. and Xi, X. (2019) Factors Driving Global Carbon Emissions: A Complex Network Perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, **146**, 431-440. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.012>
- [7] 李玉莲, 刘珍珍, 谢维玉, 王文豪. 中英经济-能源-环境系统因果网络联动分析——基于偏交叉映射方法[J]. 统计学与应用, 2025, 14(9): 191-203.
- [8] 刘家保, 胡瑾萱. 社会网络分析视角下中国能源消费碳排放影响因素研究[J/OL]. 合肥大学学报, 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/34.1345.Z.20250717.1725.002>, 2025-10-04.
- [9] 宋辉, 辛欣. 基于熵值赋权的中国绿色经济发展水平评价[J]. 当代经济, 2020(5): 80-84.
- [10] 李晓飞, 赵黎晨, 吕可文. 基于 VAR 模型的河南省能源-经济-环境动态关系研究[J]. 河南理工大学学报(社会科学版), 2018, 19(1): 48-54+71.
- [11] 汪小帆, 李翔, 陈荣荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.