

基于VECM模型的湖北省经济增长、 环境污染和能源消耗的关系 研究

李力, 申子睿

湖北大学商学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年11月7日; 录用日期: 2024年1月8日; 发布日期: 2024年1月19日

摘要

本文将2000~2019年湖北省SO₂的排放数据和湖北省人均生产总值以及湖北省人均原油消耗量, 分别作为污染指标、经济增长指标、能源消耗指标, 用以探究湖北省经济增长、环境污染和能源消耗关系。通过建立VECM模型, 经由Johansen检验和Granger因果关系检验的分析, 探讨湖北省经济增长与环境污染和能源消耗这三种指标在时间维度上的相互影响的机制与动态关系。研究结果表明: 湖北省的经济-环境-能源之间存在着长期稳定的协整关系, 且环境污染与经济呈现负相关关系, 与能源呈正相关关系; 环境污染与能源消耗对经济的影响较大, 环境污染会抑制经济的发展, 而能源消耗会促进经济的增长。

关键词

VECM模型, 经济增长, 环境污染, 能源消耗, Johansen检验, 方差分解

Study on the Relationship between Economic Growth, Environmental Pollution, and Energy Consumption in Hubei Province Based on the VECM Model

Li Li, Zirui Shen

School of Business, Hubei University, Wuhan Hubei

Received: Nov. 7th, 2023; accepted: Jan. 8th, 2024; published: Jan. 19th, 2024

文章引用: 李力, 申子睿. 基于 VECM 模型的湖北省经济增长、环境污染和能源消耗的关系研究[J]. 社会科学前沿, 2024, 13(1): 306-314. DOI: 10.12677/ass.2024.131042

Abstract

This article will explore the relationship between economic growth, environmental pollution, and energy consumption in Hubei Province by using SO₂ emission data from 2000 to 2019, per capita GDP, and per capita crude oil consumption in Hubei Province. By establishing a VECM model and analyzing the Johansen test and Granger causality test, this study explores the mechanism and dynamic relationship of the interaction between economic growth, environmental pollution, and energy consumption in Hubei Province in the time dimension. The research results indicate that there is a long-term stable cointegration relationship between the economy, environment, and energy in Hubei Province, and environmental pollution is negatively correlated with the economy, while positively correlated with energy; Environmental pollution and energy consumption have a significant impact on the economy. Environmental pollution will inhibit economic development, while energy consumption will promote economic growth.

Keywords

VECM model, Economic Growth, Environmental Pollution, Energy Consumption, Johansen Inspection, Variance Decomposition

Copyright © 2024 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

进入“十四五”以来,我国逐步落实环境和经济协调发展的方针,大力推进企业节能减排、促进环保产业的发展。湖北省积极响应国家要求,在经济稳步发展的同时,在省内推广节能减排综合方案,省内各行业中清洁能源的使用占比逐渐提高,企业进一步向绿色化转型,提升了能源利用效率,减少能源向污染的转换,使污染在源头上能够得到有效控制。基于此,本文对湖北省经济增长与环境污染和能源消耗在时间维度上的相互影响的机制与动态关系进行了探讨。

2. 文献综述

2.1. 国外学者研究

Mirza & Kanwal (2017)等使用 VAR 模型分析 G7 国家 1961~2013 年的数据,发现环境污染与经济增长之间存在单向关系[1]。Ang (2008)等通过法国 1960~2000 年的能源消耗、环境污染、碳排放等数据,发现能源消耗和 GDP 之间存在着短期的单向关系,而 GDP 与能源消耗和二氧化碳排放之间存在长期关系。其次,作者还通过研究马来西亚 GDP、能源消耗、碳排放之间的关系,发现三者之间存在着双向动态影响机制[2]。Ramanathan (2005)等通过对中东和北非的 17 个国家的研究,发现一些富有资源而且很富裕的国家对环境并没有遵循碳友好政策[3]。外国学者 Klstad & Krautkraemer (1993)等认为,能源消耗与经济增长与环境之间存在动态影响机制,能源消耗对经济造成正面影响时对环境则会造成反面的影响[4]。

2.2. 国内学者研究

国内学者们对环境与能源消耗与经济发展三者之间的关系也做了大量的研究。潘超(2021)通过对

1971~2014 年的中国碳排放、能源消耗和 GDP 数据三者之间的关系进行研究, 发现三者之间存在协整关系[5]。刘宏波(2021)等认为, 天然气的消费量与环境污染之间存在着相互影响的关系, 消费量的增加会导致污染程度的加重[6]。黄越(2020)等以包头市的能源消费、经济增长和环境污染为研究对象, 通过建立 VAR 模型发现经济增长和环境恶化都会伴随着能源消费的增加[7]。牛晓耕(2016)等人认为能源与环境抑制了经济增长, 要找出一条节能减排和经济增长良性互动的机制才能促进发展[8]。杨旭(2012)等根据中国 1978~2007 年人均 CO₂ 人均用油、人均 GDP 数据, 通过 VECM 模型验证, 发现经济增长与能源消耗与环境污染之间存在着长期影响关系[9]。黄宝敏(2015)等通过对我国 29 个省份的全要素能源进行估计, 得出结论能源效率的提高和环境状况的改善对于提高我国经济有质量的增长具有一定效果, 经济增长在一定程度上也能提高能源利用率和改善环境质量, 即我国经济增长、能源、环境之间具有良性循环[10]。范琳琳(2015)等通过全国数据做调查, 发现东部地区能源与经济发展呈负相关, 碳排放与经济呈现出负相关; 西部地区能源与经济呈正相关, 碳排放会对经济产生正相关。说明产业结构不同, 三者之间的关系也会不同[11]。

综合上述国内外学者对 GDP、能源消耗、环境污染的研究, 我们能发现学者们研究方式有很多种, 得出的结论也会随着研究对象、研究时段的不同导致不同结果, 说明不同的地区和不同的时期, 根据经济条件的不同和产业结构的不同会产生不同的能源 - 污染 - 经济的相互影响作用。本文将结合湖北省 2000 年至 2019 年间的历史数据, 对湖北省的能源 - 污染 - 经济之间的关系进行探讨, 并给出相应的政策建议。

3. 数据处理与研究方法

3.1. 数据的选取与处理

作为工业重要能源的煤和石油在燃烧后都会产生 SO₂ 气体, 这也是我国能源消耗生成的主要污染物和大气污染主要的污染来源之一, 因此本文选取湖北省 2000~2019 年的废气中 SO₂ 的数据作为环境污染指标。以湖北省人均 GDP 作为经济增长指标; 以人均原油消耗量作为能源消耗指标。本文对所选择的数据做了对数化处理, 以消除可能存在的异方差问题。同时, 取对数后的数据也更加便于计算和做后续的数据检验。所有数据均来源于《国家统计局》《湖北统计局》《中国碳排放核算数据库》。数据处理如下表所示(表 1):

Table 1. Indicator names, symbols, and dimensions

表 1. 指标名称、符号以及量纲

编码	指标	本文采用的变量符号
1	人均 GDP (元)	lngdp
2	人均二氧化硫(kg)	lnSO ₂
3	人均原油消耗量(kg)	lnyy

3.2. 研究方法

第一步, ADF 检验

对需要参与回归的数据进行单位根检验, 也就是 ADF 检验, 以判断数据是否平稳, 如果出现单位根, 说明原序列不平稳, 则需要对原序列数据进行差分处理, 差分后数据出现同阶单整的情况则说明差分后数据平稳。

第二步, 协整检验

数据经过差分后平稳, 虽然平稳但是会丢失一定的数据, 这时就需要对序列进行协整检验, 用来分析各个变量之间是否具有长期平稳关系。如果能在几个变量中找到长期平稳的关系, 就可以说这几个变量是具有一定关系的, 可以用这几个变量进行回归分析。本文在多个变量之间使用 Johansen 检验。

第三步, 误差修正模型

在单位根检验和协整检验的基础上, 构建误差修正模型。使用误差修正模型来检验各个变量的短期波动偏离了长期平稳状态多少, 并进行修正。

误差修正模型的公式:

$$\Delta Y = \alpha ecm_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \pi_i \Delta Y_{t-i} + \mu_t \quad (1)$$

其中, α 为系数矩阵, 反映了短期内向量偏离长期均衡关系时, 误差修正项想要调整回原来位置的程度, ecm_{t-1} 是误差修正项, 代表了各个变量间的长期均衡关系, $\pi_i \Delta Y_{t-i} = \alpha ecm_{t-1}$, 其中自变量差分项的系数反映各个变量短期波动对因变量短期变化的影响, μ_t 表示误差。

第四步, AR 根估计

对 VECM 模型的稳定性检验, 如 VECM 模型所有根的模的倒数小于 1, 即在圆内, 则系变量系统是稳定的, 反之, 变量系统不稳定。

第五步, 基于 VECM 进行因果检验

为了进一步探究经济增长与环境污染和能源消耗三者之间的关系, 本文将对三种变量将进行长期、短期的 Granger 因果检验。

第六步, 方差分解

通过方差分解可以得出模型中各变量对其他变量的影响, 从而评判变量冲击对系统的重要性, 更加准确的把握变量之间相互影响的关系。

4. 实证分析

4.1. ADF 检验

各个变量的平稳性检验是进行协整检验的第一步, 本文采用 Eview 软件对变量进行 ADF 检验, 设 $d2\ln gdp$ 、 $d2\ln SO_2$ 、 $d2\ln ny$ 分别为 $\ln gdp$ 、 $\ln SO_2$ 、 $\ln ny$ 的二阶差分。如果存在单位根则判定序列不平稳, 反之, 则平稳。根据表 2 结果, 我们可以看到所有的变量均呈二阶单整, 因此, 可以判定原序列不平稳, 且二阶差分后的序列平稳, 因此符合协整的条件。

Table 2. ADF unit root test results (2000~2019)

表 2. ADF 单位根检验结果(2000~2019)

Variable	ADF test value	5% Significance level	Results
d2lngd	-4.4686	-3.73320	平稳
d2lnSO ₂	-7.17076	-1.96281	平稳
d2lnny	-5.005278	-3.759743	平稳

4.2. 协整检验

由于 VECM 模型是一种含有协整约束条件的模型, 因此在 ADF 的基础上还需要分析三种变量之间

是否具有协整关系。由于变量数较多, 因此, 选择 Johansen 协整检验, 本文将通过协整检验判断环境污染变量与经济变量、能源消耗变量是否具有长期的平稳关系。由于 Johansen 检验对最佳滞后阶数的选择比较敏感, 因此要先对三种变量建立向量自回归模型也就是 VAR 模型, 以确定最佳滞后阶数, 最佳滞后阶数的选择由 LR、AIC、SC 中带“*”号最多的一项确定。变量系统的 VAR 模型最佳滞后阶数如表 3。

Table 3. Determination of lag order of VAR models for lnGDP, lnSO₂, and lnyy

表 3. lngdp 和 lnSO₂ 和 lnyy 的 VAR 模型滞后阶数判断结果

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	-6.327849	NA	0.000602	1.097394	1.244432	1.112010
1	62.44292	105.1788*	5.46e-07	-5.934461	-5.346310	-5.875997
2	74.73499	14.46127	4.21e-07	-6.321764	-5.292500	-6.219453
3	92.49110	14.62268	2.17e-07*	-7.351894*	-5.881518*	-7.205736*

通过表 3 可以得出以 SO₂ 为环境变量的 VAR 模型的最佳之后阶数都是 3 阶。由于协整检验滞后阶数比 VAR 模型少 1 阶, 因此在确定最佳滞后阶数后, 可以确定变量系统协整检验的滞后阶数为 2 阶, 变量系统的协整检验如下表 4。

Table 4. Johansen characteristic root trace test results for lnGDP, lnSO₂, and lnyy

表 4. lngdp 和 lnSO₂ 和 lnyy 的 Johansen 特征根迹检验结果

Null hypothesis	Characteristic value	Trace statistic	5%Critical value	p
None *	0.904582	48.63987	29.79707	0.0001
At most 1	0.399718	8.698568	15.49471	0.3940
At most 2	0.001324	0.022525	3.841466	0.8806

表 4 根据 $p = 0.0001 < 0.05$, 得出在 5% 的显著性水平下可以拒绝原假设, 表明 SO₂ 排放量和经济增长和原油之间最多存在 1 个协整关系。也就是说能源消耗、环境污染与经济增长之间存在长期均衡的关系。

4.3. 误差修正模型

经前文验证, 湖北省的经济 - 环境 - 能源之间存在着长期稳定的协整关系。因此选取湖北省 2000~2019 年的人均 SO₂ 环境变量分别与人均 GDP 经济变量和人均原油消耗能源变量构建向量误差修正模型。VECM 误差修正模型的最佳滞后阶数要比 VAR 最佳滞后阶数少 1, 所以 VECM 模型的最佳滞后阶数也为 2 阶。VECM 估计结果如表 5 所示。

表 5 的第一部分是对协整方程的拟合, 根据表中数据信息可以推导出 2 个协整方程:

$$\ln\text{SO}_2 = -3.215650\ln\text{gdp} + 12.24057\ln\text{yy} - 32.45696 \quad (2)$$

从式(2)看, 可以看出 SO₂ 与 GDP 与能源消耗之间存在长期协整关系, 其中经济增长对 SO₂ 排放的影响的弹性值为(-3.21565)为负, 说明经济增长与 SO₂ 的排放表现出呈负相关关系, 原油消耗对 CO₂ 的排放的弹性值为(12.24057), 说明能源消耗对 SO₂ 的排放具有较强的促进作用。

Table 5. VECM estimation results for variable groups with SO₂ as environmental variable
表 5. 以 SO₂ 为环境变量的变量组 VECM 估计结果

协整方程	CointEq1		
lnSO ₂ (-1)	1.000000		
lngdp (-1)	-3.215650 (0.50287) [-6.39463]		
lnyy (-1)	12.24057 (1.62005) [7.55569]		
C	-32.45696		
误差修正	D (lnSO ₂)	D (lngdp)	D (lnyy)
CointEq1	-0.312306 (0.05837) [-5.35004]	0.015318 (0.01837) [0.83407]	-0.077476 (0.02365) [-3.27544]
C	-0.961672 (0.19623)	0.096604 (0.06174)	-0.051605 (0.07951)
R ²	0.833630	0.510547	0.716005

表 5 的第二部分为误差修正模型, 重点关注 ecm_{t-1} , 由表可知, 污染排放与经济增长与能源消耗的误差修正项的系数分别为 -0.312306、0.015318、-0.077476, 说明误差修正项将在短期内以 -31.23% 的调整力度对本期污染排放进行修正, 并将其拉回长期稳定状态, 而对经济增长的修正力度与对能源消耗的修正力度分别为 1.5%, -7.7%, 可以看出调整力度较小, 这说明我国对污染的防控与治理已经具有一定的成果, 已经掌握一定的 SO₂ 的治理技术和政策, 但是, 我们在治理污染的同时还要营造良好的经济环境, 保证经济的稳定发展。并且在 VECM 模型中污染排放、经济增长与能源消耗的可决系数 R² 分别为 0.833630、0.510547、0.716005, 表明以 SO₂ 构建的 VECM 模型能够较好的拟合环境污染 - 经济增长 - 能源消耗的短期动关系。

4.4. AR 根估计

VECM 模型的 AR 根估计结果由图 1 可知, AR 根估计所有根的模都在单位圆内, 因此变量系统是具有稳定性的, 可以进行接下来的 Granger 因果关系检验和方差分解。

4.5. 基于 VECM 进行 Granger 因果检验

为了进一步证明经济增长与环境污染以及能源消耗的关系, 本文以 SO₂ 为环境污染变量的 VECM 模型继续进行 Granger 因果检验, 结果如表 6 所示。

通过表 6 可以看出, 在 5% 的显著性水平下, 经济增长与 SO₂ 排放具有 Granger 因果关系, 经济增长在短期动态中能导致 SO₂ 排放的变动; 在 10% 的显著性水平下, 能源消耗与 SO₂ 的排放具有因果关系, 能源消耗在短期内的变动会导致 SO₂ 的变动; 在 10% 的显著性水平下, 能源消耗与经济增长具有 Granger 因果关系, 经济在短期内的变动会导致能源消耗的变动。这说明经济 - 能源 - 污染之间存在着一定的因果关系。

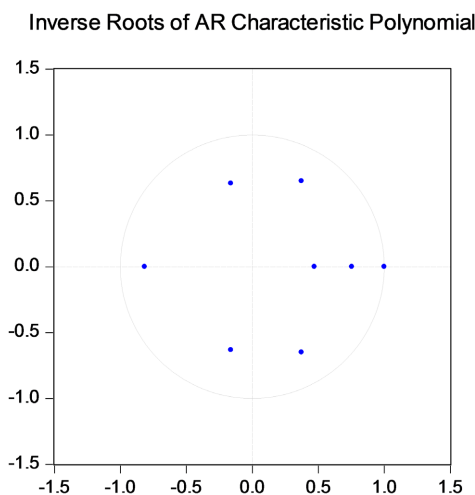


Figure 1. Root model display of VECM model
图 1. VECM 模型根模显示图

Table 6. Granger causality test between two variables based on VECM
表 6. 基于 VECM 的两变量间的 Granger 因果检验

Null Hypothesis:	Obs	F-Statistic	Prob.
lnGdp does not Granger Cause lnSO ₂ lnSO ₂ does not Granger Cause lnGdp	18	4.00446 0.06333	0.0442 0.9389
lnny does not Granger Cause lnSO ₂ lnSO ₂ does not Granger Cause lnny	18	2.91091 1.75640	0.0902 0.2113
lnny does not Granger Cause lnGdp lnGdp does not Granger Cause lnny	18	0.91773 2.89991	0.4238 0.0909

4.6. 方差分解

为了考察每个变量产生一个标准差的变动时对其他变量的影响,从而评判变量冲击对系统的重要性。本文接下来对 2000~2019 年的人均 SO₂ 排放量、湖北省人均 GDP、人均原油消耗近 20 年的数据做方差分解,具体结果如表 7。

Table 7. Variance decomposition results of environmental, economic, and energy variables
表 7. 环境、经济、能源变量的方差分解结果

方差分解	lnSO ₂	lnGdp	lnny
	0.000000	100.0000	0.000000
	0.048862	97.53870	2.412434
	0.181842	94.52946	5.288694
	0.551928	92.32938	7.118691
经济增长的方差分解	1.233877	91.06433	7.701793
	2.131704	90.47647	7.391822
	3.101451	90.23638	6.662174
	4.051594	90.10496	5.843449
	4.952383	89.95580	5.091822
	5.810343	89.73322	4.456436

续表

	98.74624	1.253764	0.000000
	83.02904	15.12962	1.841335
	65.77114	25.77481	8.454048
	56.30812	31.15843	12.53344
环境污染的方差分解	50.94751	35.61436	13.43813
	47.90902	38.38320	13.70778
	46.58106	39.17560	14.24334
	46.11916	38.79196	15.08887
	45.91232	37.91145	16.17623
	45.70737	36.87159	17.42104
	24.37009	12.59132	63.03859
	17.27292	15.48312	67.24396
	17.09717	15.40021	67.50262
	17.66008	15.35046	66.98945
能源消耗的方差分解	17.79332	17.44744	64.75925
	16.80823	23.02861	60.16316
	15.78487	28.69392	55.52121
	15.08422	33.27822	51.63756
	14.68065	36.84936	48.47000
	14.50046	39.69373	45.80582

根据表 7 的第一部分, 经济增长的方差分解, 我们可以看出, 经济增长一开始受到自身影响最强, 然后自身影响开始逐步递减, 直到最后 89.7%, 而其他的变量对经济增长的贡献率逐步递增, 经济增长受到环境污染贡献率的 5.8%, 受到能源消耗贡献率的 4.46%, 可以看出, 经济增长受到自身贡献率的影响最大, 受到环境污染的影响和受到能源消耗的影响比较小。

根据表 7 第二部分, 环境污染的方差分解, 我们可以看出, 环境污染一开始受自身波动影响最大, 高达 98.74%, 后来逐年下降最后一年影响最小为 45.707%, 受经济的影响从开始的 1.26% 到最后一年变为 36.87%, 可以看出, 环境污染受经济的影响很大, 根据环境污染与能源消耗的影响关系, 可以看出环境污染受能源消耗影响逐渐增长为 17.4%, 说明环境污染受能源消耗影响较大。

根据表 7 的最后一部分, 能源消耗的方差分解, 可以看出, 能源消耗一开始受自身的影响为 63.04%, 到最后受自身影响 45.81%, 受经济的影响一开始为 12.59% 到最后 39.69%, 受环境污染的影响由一开始的 24.37% 到 14.50%, 可以看出能源消耗受经济影响较大, 经济越好所需要的能源就越多, 此外, 能源开始受环境影响较大, 后来逐渐减小, 这可能与我国环境政策对环境污染的控制有关。

通过对方差分解的结果可以看出, 环境污染与能源消耗受到经济增长的影响较大, 而经济受到环境污染和能源消耗的影响较小; 环境污染与能源消耗和经济之间都存在很大的影响关系。

5. 结论

通过对 2000~2019 年经济增长、环境污染、能源消耗三种变量关系之间的研究, 本文发现湖北省的经济 - 污染 - 能源之间存在着长期均衡关系, 且经济增长与环境污染之间呈负相关, 环境污染与能源消耗之间呈正相关。随着进一步在 VECM 的基础上进行 Granger 因果检验, 本文发现经济 - 污染 - 能源之间存在着单向因果关系, 能源消耗和经济增长是环境污染的单向因果关系, 经济增长是能源消耗的单向因果关系。再由方差分解进一步证明经济增长对环境污染以及能源消耗有着一定程度的影响力。

通过上述研究, 我们得出以下结论:

1) 湖北省经济受到能源与污染的较高影响, 说明湖北省经济的快速发展, 确实一定程度上是建立在资源的消耗上, 而相应的能源消耗也会带来污染问题, 而湖北省环境污染与经济增长为相互抑制的

关系。

2) 从湖北省经济与环境分析来看, 湖北省对环境的治理以及取得了初步的成果, 在经济稳步向前的同时, 环境污染问题也得到了合理的解决;

3) 湖北省能源 - 环境之间的关系没有得到良好的解决, 能源与环境之间的正相关弹性系数依然较高, 表明湖北省能源利用率还不够高, 能源向污染转化的比例较高, 生产技术还需要提高。

由上述结论可知, 湖北省在落实经济、环境与能源之间的协调发展的过程中, 应该继续贯彻落实环境治理政策不动摇, 积极引进新兴生产技术, 加快完成湖北省的生产线的绿色转型; 加快研发新的绿色能源, 提高能源利用率; 大力推动产业结构的升级以及调整, 尽快减少湖北省经济上对能源型企业的依赖, 最终实现环境 - 经济 - 能源的协调发展。

基金项目

本文为国家社科基金项目“经济新常态下的中国环境政策工具选择与评价研究”(19BGL195)和湖北省教育厅社科重大课题“经济波动条件下中国环境政策设计研究”的研究成果。

参考文献

- [1] Mirza, F.M. and Kanwal, A. (2017) Energy Consumption, Carbonemissions and Economic Growth in Pakistan: Dynamic Causality Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **72**, 1233-1240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.081>
- [2] Ang, J.B. (2008) Economic Development, Pollutant Emissions and Energy Consumption in Malaysia. *Journal of Policy Modeling*, **30**, 271-278. <https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2007.04.010>
- [3] Ramanathan, R. (2005) An Analysis of Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in Countries of the Middle East and North Africa. *Energy*, **30**, 2831-2842. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.01.010>
- [4] Kolstad, C.D. and Krautkraemer, J.A. (1993) Natural Resource Use and the Environment. *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, **3**, 1219-1265. [https://doi.org/10.1016/S1573-4439\(05\)80013-2](https://doi.org/10.1016/S1573-4439(05)80013-2)
- [5] 潘超. 经济增长、环境污染和能源消耗关系[J]. 冶金管理, 2021(13): 155-170.
- [6] 刘宏波, 陈东生, 黄程帅, 丁旭光, 于广. 天然气能源消费量与环境污染的双向耦合关系研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(5): 28-31.
- [7] 黄越. 呼包鄂榆城市群能源消费、环境污染与经济增长关系研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- [8] 牛晓耕. 能源与环境约束下的中国经济增长: 理论探讨与经验研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 辽宁大学, 2016.
- [9] 杨旭, 万鲁河, 王继富, 王宝健, 徐洋. 基于 VECM 模型的经济增长与环境污染和能源消耗关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(5): 75-79.
- [10] 黄宝敏. 能源效率、环境约束与我国经济增长质量研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [11] 范琳琳. 基于内生增长模型的能源、环境与经济增长关系研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.