

权变框架下我国能源与粮食安全： 一个实时测度模型

朱庆缘¹, 孟 波¹, 武良鹏², 潘应浩³, 吴 杰³

(1. 南京航空航天大学经济与管理学院, 能源软科学研究所, 江苏 南京 211106;

2. 南京信息工程大学应急与风险管理研究院, 江苏 南京 210044;

3. 中国科学技术大学管理学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:在逆全球化思潮抬头、局部冲突频发、全球性气候问题加剧多重压力叠加下,保障国家能源和粮食安全成为应对世界动态变革期间的重要任务。然而,当前多体现于基于底线思维的供应安全无法反映“安全”内涵的实时变化。基于函数型数据分析(FDA)方法,构造权变框架下的安全评估体系,动态评估了我国30个省份2003—2019年的能源和粮食安全水平,并使用Function-on-Function(FOF)回归模型分析能源安全对粮食安全的实时影响。研究发现:能源安全的能源供应与运输安全 and 经济安全两个维度占比最大,环境安全比重逐渐提高;粮食安全的供应安全维度所占比重最大,生态安全的相关指标权重有所上升;随着能源安全与粮食安全内涵重心的改变,两者之间存在变动的非线性关系。

关键词:能源安全;粮食安全;函数型数据分析;动态权重

中图分类号:F206; F326 文献标识码:A 文章编号:1005-0566(2024)04-0154-12

Energy and food security in China under the contingency framework: A real time measurement method

ZHU Qingyuan¹, MENG Bo¹, WU Liangpeng², PAN Yinghao³, WU Jie³

(1. Institute of Soft Science of Energy, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjin 211106, China;

2. Institute of Emergency and Risk Management, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjin

210044, China; 3. School of Management, University of Science and Technology of China, Heifei 230026, China)

Abstract: In the face of mounting anti-globalization trends, frequent local conflicts, and intensifying global climate pressures, ensuring national energy and food security has become an important task to cope with the dynamic changes in the world. However, the current security of supply, which is mainly reflected in the bottom-line thinking, cannot reflect the real-time change of the connotation of "security". To solve this problem, based on the functional data analysis (FDA) method, the paper constructs a security assessment system under the dynamic weight framework, and dynamically evaluates the energy and food security level of 30 provinces from 2003 to 2019. Function-on-function (FOF) regression model is used to further analyze the impact of energy security on food security. The results showed

收稿日期:2023-05-25 修回日期:2024-03-05

基金项目:国家社会科学青年基金项目“能源安全导向下我国碳价扭曲的纠偏机制与策略研究”(23CJY029)。

作者简介:朱庆缘(1989—),男,安徽滁州人,博士,南京航空航天大学经济与管理学院教授,博士生导师,研究方向为评价理论与方法。通信作者:潘应浩。

that energy supply and transportation security and economic security accounted for the largest proportion, while the proportion of environmental security increased. The dimension of supply security of food security accounted for the largest proportion, and the weight of related indicators of ecological security increased. Further analysis shows that there is a nonlinear relationship between energy security and food security with the change of the connotation center of gravity.

Key words: energy security; food security; functional data analysis; dynamic weight

推进国家安全体系和能力现代化是统筹中华民族伟大复兴战略全局和世界百年未有之大变局的必然要求。习近平总书记强调:“中国人的饭碗任何时候都要牢牢端在自己手中,饭碗主要装中国粮”“能源的饭碗必须端在自己手里。”确保能源与粮食安全,成为确保国家发展和安全,一体之两翼、驱动之双轮。

中国作为世界上最大的能源生产与消费国,确保其能源安全至关重要。根据《2021年中国能源统计年鉴》的数据,2020年我国人均能源生产与消费量分别为2 286和3 531千克标准煤,能源供应缺口明显。随着俄乌冲突的爆发,多国能源供应告急,高度竞争的能源市场与复杂多变的国际局势使我国高度依赖进口的能源形势面临巨大的挑战。同时,“双碳”目标的承诺,对我国的能源消费结构和能源行业转型升级提出了更高的要求。为此,习近平总书记在二十大中强调“深入推进能源革命”“确保能源安全”,将能源安全升至与粮食安全同等重要的战略高度。

同时,中国作为世界上人口最多的国家,确保粮食安全是我国经济发展、社会稳定的基石。2019年年底,我国耕地面积19.18亿亩(1亩=1/15顷),人均耕地面积1.36亩,远低于世界平均水平。中国用占世界9%的耕地养活了世界近20%的人口,有限的耕地资源和巨大的人口基数对粮食生产技术提出了更高的要求。现阶段,虽然中国的粮食产量保持了稳定增长的态势,但受气候变化、城市化快速发展等因素的影响,我国的粮食安全仍有很大的不确定性。保障国家粮食安全,高度重视粮食安全问题,成为党中央治国安邦的首要任务。

如此,能源安全和粮食安全对我国推动经济发展、维持社会稳定意义重大。要确保能源和粮食安全,必须确保其内涵的精确性与测度的准确

性。能源和粮食安全最初的定义是保障连续充足的供应^[1-4],强调一个国家的生产消费能力和地缘政治属性。由于持续稳定的供应还受到供应链影响,学者们进一步将价格、购买力等经济因素纳入到能源和粮食安全的定义中^[5-9]。近年来,在“双碳”目标、气候变化等多重冲击下,环境安全、气候适应力转向等新内涵被凸显^[10-13]。2022年俄乌冲突的爆发加剧了地缘博弈等风险,使严重依赖进口的对外贸易形势面临巨大威胁,供应安全维度重新被世界各国所重视。正是由于能源和粮食安全内涵的广泛,目前在测度方面还没有统一的分析框架。构建能体现内涵变化的权变测度模型成为亟需解决的重要问题。更为重要的是,能源使用已经渗入到粮食生产的各个过程,厘清能源安全对粮食安全的影响对促进我国国家安全具有重大意义。然而,现有研究尽管定性认识“能—粮”耦合的重要性,但偏重于对先发经验的泛化借鉴,并忽略两者间的动态关系,导致“能—粮”耦合关系的静态化,最终削弱了“能—粮”安全协同推进机制构建的效果持续性。

为解决上述问题,本文在权变框架下构造安全测度指标体系,并运用函数熵权法进行动态赋权以体现内涵的动态变化特征。在此基础上,实时测度各省的能源和粮食安全水平,从整体趋势和区域角度进行了分析,确定我国能源和粮食安全的时空演化特征。最后,为体现能源安全与粮食安全之间的实时动态耦合特征,本文使用Function-on-Function(FOF)回归模型定量分析了两者之间的时变关系,为我国“能—粮”安全协同推进提供了数据支撑。

一、文献综述

由于不同地区、不同时间对能源安全的侧重点不同,确定全面、通用的维度来描述能源安全是一项重大挑战。最初的能源安全指以合理价格持

续供应能源,突出地缘政治风险下的供应安全^[14-17]。随着经济和社会发展,仅供应安全已无法反映能源安全的内涵,学术界开始出现全面的测度框架。亚太能源研究中心(APERC)提出的“4AS”框架(能源资源的可利用性、能源资源的可获得性、环境的可接受能力和能源投资成本的承受能力)在能源安全研究中应用极广,Shin 等^[5]、Tongsopit 等^[7]分别使用该框架测度了单个国家(韩国)、国际组织(东盟成员国)的能源安全水平;在 4AS 基础上,开发能力^[18]、效率^[19]、治理^[20]、环境管理^[21]等维度被逐渐纳入体系。近年来,在“双碳”目标、气候变化等的多重冲击下,环境安全越来越得到全球重视^[10-11],能源安全的定义和测度随时间动态变化。

为测度能源安全学术界提出了多种方法,除定性定性研究外^[22-23],主成分分析^[24]、数据包络分析^[20]、可计量一般均衡模型和贝叶斯方法^[26]等成为主流定量分析方法。以上研究大多采用静态赋权机制,前提假设能源安全的各项指标的重要性不随时间变化,而事实并非如此。为探寻能源安全潜在动态变化。有学者将函数型数据分析(FDA)引入能源安全研究中。即使如此,研究视角均聚焦于国家层面,仍缺少在省份层面构建动态权重的能源安全研究。

至于粮食安全,作为新中国成立初期保障人民生活水平的首要问题,国内相关研究起步较早,最初主要围绕粮食的持续供应能力。姚成胜等^[9]构建了粮食生产资源、粮食可供量和稳定性、粮食获取能力和粮食利用水平的 4 个子系统,苏芳等^[13]据此测度了粮食安全指标数并分析了气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响,Coates^[30]在测度体系中加入了文化可接受性。

厘清影响粮食安全的因素亦受到各界重视。朱晶^[31]发现影响我国农村地区农民粮食安全的主要因素是收入水平,张志新等^[32]认为农村金融排斥、农业技术进步可以影响中国粮食供给安全,这说明了经济发展对确保粮食安全的显著作用。确保粮食安全要以经济发展为主要抓手,在生产端^[33]和进口端^[34]保障粮食供应稳定的前提下,发

挥农产品期货市场^[35]的调节作用,推动城镇化进程^[36]的同时确保粮食安全。另外,耕地^[37]和水资源^[38-39]等自然资源通过影响土地的粮食生产能力,进而影响粮食安全。所以,通过保护耕地、水等资源来保持生态系统的稳定,也可以有效确保粮食安全。上述研究有针对性地测度和分析了粮食安全,但仍缺少能源安全对粮食安全的影响性分析。

现有研究较为有效的测度和分析了能源安全和粮食安全,并得出了启示性的结论和建议,但大多研究设定静态权重,这与能源和粮食安全动态变化性质不符。为此,本文构建了权变框架下的能源、粮食安全测度体系;另外,能源和粮食安全作为国家安全的重要组成部分,已有文献缺乏对两者相关性的研究,本文将进一步分析能源安全对粮食安全的时变影响。

二、权变框架下能源和粮食安全实时测度模型的构建

本部分对权变框架下的实时测度模型展开介绍,模型的构建流程如图 1 所示

(一)单维度下的指标平滑

由于我国统计口径的非一致性,观测数据多为离散测量,造成指标信息的丢失,从而容易忽视指标的潜在变化规律。函数型数据分析(FDA)可以探寻静态数据里隐含的动态信息。为了研究能源和粮食安全的潜在变化和确定动态权重,本文采用函数型数据分析。由于能源安全和粮食安全采用的是相同模型,本章仅以能源安全为例。

在 FDA 体系里,即使观察数据是按日、月或年收集,也假定所有的能源安全数据都是随时间连续。由此,函数变量的主要特征是无限维数,这意味着在时域 t 中,每一个可能的 t 值都存在一个 $y(t)$ 值。为将离散数据函数化,需用已知基函数的和来表示先验未知函数,从而重构观测数据的本征函数。常用的基函数有三次 B-样条和傅立叶基函数。傅里叶基函数适用于周期性数据,由于能源安全数据不具有明显的周期性特征,本文采用三次 B-样条基函数,则观测值 $y_{i1}, \dots, y_{iT_i}$ 的函数曲线 $y_i(t)$ 可以表示为:

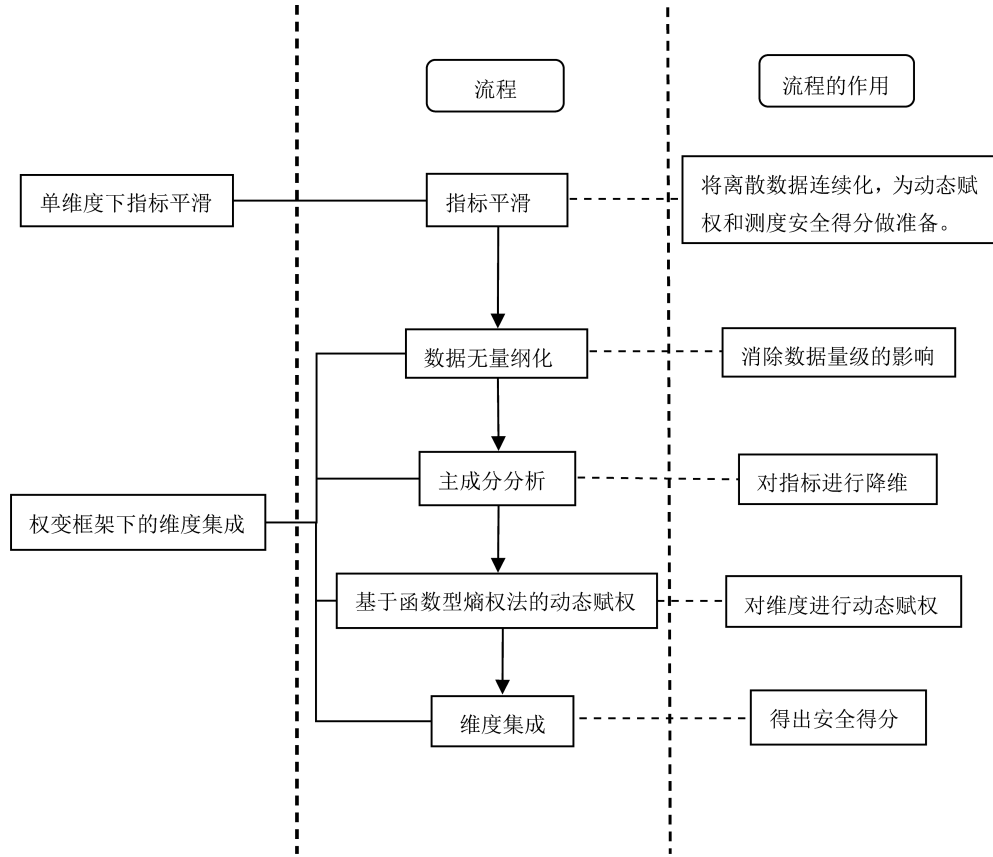


图1 实时测度模型流程

$$y_i(t) = \sum_{k=1}^K c_{ik} \varphi_k(t); i = 1, \dots, m; t \in T \quad (1)$$

式(1)中, $\varphi = \{\varphi_1(\cdot), \dots, \varphi_K(\cdot)\}$ 为已知基函数, K 为所需基函数的个数, m 为指标个数, T 为整个研究时间集。基展开方法的优势在于, 将估计一个函数的过程简化为估计一组标量系数 $c_{ik} \circ c_i = \{c_{i1}, \dots, c_{ik}\}$ 的系数向量通常是通过最小化残差平方和(SSE)来估计的, 具体计算为:

$$\min \left\{ SSE = \sum_{t=1}^{T_i} \left[Y_i(t) - \sum_{k=1}^K c_{ik} \varphi_k(t_{ij}) \right]^2 \right\} \quad (2)$$

式(2)中, $Y_i(t)$ 表示该省份 i 指标在 t 时刻的观测值。使用基函数线性逼近待估函数 $y_i(t)$ 的过程中, K 值过大导致过拟合使估计函数失准, K 值过小将导致数据中信息的缺失。为了兼顾拟合度和平滑度, 本文使用二阶导数 $y_i''(t)$ 的平方的积分构造惩罚粗糙度, 并将惩罚残差平方和(PENSSE)表

示为:

$$PENSSE(\lambda) = \sum_{j=1}^{T_i} [Y_i(t) - y_i(t)]^2 + \lambda \int_T [y_i''(t)]^2 dt \quad (3)$$

式(3)中的参数 λ 表示 $y_i(t)$ 的平滑度和模型拟合的优度。 λ 越大意味着对曲线粗糙度施加的惩罚越大, 函数曲线越平滑, 波动程度越小。为确定平滑参数的最佳值, 本文运用广义交叉验证(GCV(λ))进行计算^[40], 具体公式如下:

$$GCV(\lambda) = \left(\frac{T_i}{T_i - df(\lambda)} \right) \left(\frac{PENSSE(\lambda)}{T_i - df(\lambda)} \right) \quad (4)$$

式(4)中, $df(\lambda)$ 表示投影矩阵 $S_{\varphi, \lambda} = \varphi(\varphi^T \varphi + \lambda R)^{-1} \varphi^T$ 的自由度, 即 $df(\lambda) = \text{trace} S_{\varphi, \lambda}$, λ, R 为元素 $R_{jk} = \int_T \varphi_j''(s) \cdot \varphi_k''(s) ds$ 的 $K \times K$ 阶矩阵。式(4)根据 $GCV(\lambda)$ 取值最小的原则来确定 λ 的值, 但 $GCV(\lambda)$ 准则需要在基函数的个数为最优的前提

下使用。本文借鉴文献[27]的做法,通过将基函数个数 K 纳入原有的单元函数 $GCV(\lambda)$, 将其拓展为二元函数 $GCV(\lambda, K)$, 以同时确定 λ 和 K 的最优取值,其拓展式为:

$$GCV(\lambda, K) = \left(\frac{T_i}{T_i - df(\lambda, K)} \right) \left(\frac{PENSSE(\lambda, K)}{T_i - df(\lambda, K)} \right) \quad (5)$$

(二) 权变框架下的维度集成

由于能源安全指标数量较多,直接计算权重不便,且存在相互交叉关系。为满足指标体系相对独立性原则,本文使用主成分分析(PCA)进行降维,得到每个维度的得分。在此基础上进行动态赋权与维度集成,具体步骤如下。

(1) 数据无量纲化: 由于各指标间的量级、属性不同,为了消除这些差异的影响,首先对数据进行标准化,使用公式为:

$$x_{ijt} = \frac{y_{ijt} - \min(y_{ijt})}{\max(y_{ijt}) - \min(y_{ijt})} \quad (6)$$

$$x_{ijt} = \frac{\max(y_{ij}) - y_{ijt}}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (7)$$

当指标为正向时采用公式(6)进行标准化,负向指标采用公式(7)进行标准化。其中, y_{ijt} 表示 j 省份在 t 时刻 i 指标(如表 1 所示)的观测值, t 为连续时刻 $\max(y_{ij})$ 和 $\min(y_{ij})$ 表示第 i 个指标的最大值和最小值; x_{ijt} 是 y_{ijt} 标准化后的数值。

(2) 主成分分析: 采用 KMO 检验(Kaiser Meyer Olkin)和 Bartlett 检验来验证主成分分析的有效性。然后,对于每个维度内的指标,基于特征值大于 1,提取公因式 $F_{j,p} = 1, 2, 3, \dots, P$ (P 为公因式个数)得到指标 i 对 p 主因子的负荷系数 (M_{ip})、特征根 (R_p) 和公共因子的方差贡献 (C_p)。接下来,利用以下公式,对指标 i 进行加权:

$$W_i = \sum_{p=1}^P \frac{M_{ip}}{\sqrt{R_p}} \times \frac{C_p}{C} \quad (8)$$

式(8)中, W_i 表示指标 i 的权重; C 表示各主成分的累计贡献。

最后,各维度综合得分由下式得出:

$$x_{jd}(t) = \sum W_i \times x_{ij}(t) \quad (9)$$

式(9)中, $x_{jd}(t)$ 表示 j 省份的第 d 维度的

得分。

(3) 基于函数型熵权法的动态赋权: 经过离散数据函数化和主成分分析之后,可以得到能源安全的各维度函数,在各种赋权方法中,熵权法因其客观性和可解释性应用极广。但经处理和分析得到的能源安全维度值是随时间连续变化的函数,传统的熵权法无法使用。因此,本文对熵权法的函数化进行拓展,并将其应用到面板数据中,以动态地测度中国各省份的能源安全。具体步骤如下。

①通过定义在区间 $[t_0, t^*]$ 内的概率密度函数来计算 $x_{jd}(t)$ 这个评价目标在第 d 维度下的所占比例:

$$f_{jd}(t|t^*) = \frac{x_{jd}(t)}{\sum_{j=1}^{30} \int_{t_0}^{t^*} x_{jd}(y) dy} (t_0 \leq t \leq t^*) \quad (10)$$

式(10)中, $x_{jd}(t)$ 表示 j 省份在 t 时刻第 d 维度的得分, t_0 表示研究的起始时间, t^* 表示时域 T 内的一个变化时间点。

②计算此组数据的信息熵 $E_d(t|t^*)$, 其计算式为:

$$E_d(t|t^*) = [\ln 30(t^* - t_0)]^{-1} \cdot \int_{t_0}^{t^*} f_{jd}(t|t^*) \cdot \ln [f_{jd}(t|t^*)]^{-1} dt \quad (11)$$

③构建函数熵权法计算能源安全第 d 维度的动态权重曲线 $\omega_d(t|t^*)$:

$$\omega_d(t|t^*) = \frac{1 - E_d(t|t^*)}{m - \sum_{k=1}^m E_d(t|t^*)} (0 \leq \omega_d(t|t^*) \leq 1) \quad (12)$$

式(12)中, m 为能源安全的维度个数。

(4) 维度集成: 基于各维度的权重曲线 $\omega_d(t|t^*)$ 得出各省份能源安全曲线:

$$ESI(t) = \sum_{d=1}^m [\omega_d(t) + w_d(t)] \cdot x_{jd}(t) / 2 \quad (13)$$

式(13)中, $\omega_d(t|t^*)$ 为动态赋权函数, $w_d(t)$ 为主观权重。根据相关文献,本文对 4 个子维度分别赋予 0.4、0.2、0.2 和 0.2 的主观权重。

三、数据搜集与结果

(一) 测度体系的构建

1. 能源安全测度体系

亚太能源研究中心(APERC)提出“4AS”的能源安全框架,包括能源资源的可利用性(availability)、能源资源的可获得性(accessibility)、环境的可接受能力(acceptability)和能源投资成本的承受能力(affordability),被学术界广泛使用。另外,从能源消费的全过程考量,有助于随着能源安全定义的不断变化将新的维度纳入其中。本文在综合考虑上述两种能源安全框架基础上构建如下测度体系(见表1)。

表1 能源安全指标体系^①

维度	指标	计算方法	属性
供应与运输安全	自给自足率	能源生产消费比(%)	+
	生产多样性	$PDI = \sum Q_{ij} \ln Q_{ij}$ (PDI为生产多样性, Q_{ij} 为j地区第i种能源的供应占比)	+
	煤炭储量	各年煤炭储量	+
	石油储量	各年石油储量	+
	天然气储量	各年天然气储量	+
	工业用电价格	省会城市工业用电价格	-
	柴油价格	柴油年平均价格	-
	汽油价格	汽油年平均价格	-
	调入能源占比	调入能源总量/可用于消费能源总量	-
	配电效率	配电损失与净发电量之比	-
使用安全	人均能源消费	能源消耗/人口总数	-
	能源消费增长与人口增长比率	能源消费增长率/人口增长率	-
	单位能耗产生GDP	GDP/能源消费	+
	单位能耗工业增加值	工业增加值/能源消费	+
环境安全	二氧化硫排放量	二氧化硫/能源消费	-
	烟尘排放量	烟尘排放/能源消费	-
	二氧化碳排放量	二氧化碳排放/能源消费	-
	天然气产量占比	天然气产量/能源生产	+
	发电量占比	发电量/能源生产	+
	可再生发电量占比	可再生能源发电量/总发电量	+
经济安全	能源行业固定资产投资占全社会固定资产投资比重	国有经济能源行业固定资产投资/全社会固定资产投资	+
	能源行业固定资产投资占GDP比重	国有经济能源行业固定资产投资/GDP	+
	能源相关行业从业人员占比	电力、煤气和水生产及供应行业的雇员人数/常住人口	+

2. 粮食安全测度体系构建

与能源安全类似,本文从供应安全、消费安全、生态安全、经济与社会安全构造如下粮食安全指标体系(见表2)。

表2 粮食安全指标体系

维度	指标	计算方法	属性
供应安全	人均粮食产量	粮食总产量/人口总量	+
	人均耕地面积	耕地总面积/人口总量	+
	道路网密度	省域道路总里程/区域面积	+
消费安全	居民粮食消费价格指数	当年的粮食价格/去年的粮食价格	-
	农村人均粮食消费量	农村粮食总消费量/农村人口总量	-
生态安全	单位播种面积化肥使用量	化肥施用量/粮食播种面积	-
	农作物受灾率	受灾面积/播种面积	-
经济与社会安全	单位播种面积粮食产量	粮食产量/粮食播种面积	+
	恩格尔系数	食物支出金额/总支出金额	-

(二) 结果分析

1. 能源安全测度及分析

(1) 数据来源

本文搜集了中国30个省份(不含香港、澳门、台湾和西藏)2003—2019年的相关数据。其中工业用电价格、柴油价格、汽油价格3个指标的数据来自中欧经济合作委员会(CEIC)中国经济数据库,天然气产量、发电量、可再生发电量、能源行业固定资产投资、能源行业从业人员数据来自《中国能源统计年鉴》,二氧化碳排放数据来自CEADs数据库,其余数据来自《中国统计年鉴》。能源安全的指标描述性统计结果如表3所示。

表3 能源安全指标的统计描述

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
自给自足率	510	0.82	0.920	0.05	4.37
生产多样性	510	0.54	0.356	0.00	1.35
煤炭储量(万吨)	510	929 973	2 004 526	0.00	10 615 100
石油储量(万吨)	510	8 838	14 817	0.00	62 197
天然气储量(万立方米)	510	12 377 156	27 013 250	0.00	131 916 000
工业用电价格(万元/万度)	510	0.69	0.127	0.35	0.93
柴油价格(万元/万吨)	510	6 527.36	1 568.56	3 175.83	9 065.55
汽油价格(万元/万吨)	510	7 975.30	1 899.31	3 821.65	11 604.57
调入能源占比	510	0.17	0.80	-3.03	1.22
配电效率	510	0.06	0.04	0.00	0.91
人均能源消费(万吨标准煤/万人)	510	3.19	1.67	0.70	10.66
能源消费增长与人口增长比率	510	14.28	38.55	-140.86	282.86
单位能耗产生GDP(万元/万吨标准煤)	510	12 403.59	8 034.21	1 703.61	52 158.62
单位能耗工业增加值(万元/万吨标准煤)	510	4 606.67	2 414.49	551.616	11 787.76
二氧化硫排放量(吨/万吨标准煤)	510	61.04	49.60	0.63	405.98
烟尘排放量(吨/万吨标准煤)	510	48.96	44.55	2.26	437.25
二氧化碳排放量(吨/万吨标准煤)	510	2.77	0.70	1.33	5.23
天然气产量占比	510	0.04	0.08	0.00	0.47
发电量占比	510	0.26	0.17	0.03	0.76
可再生发电量占比	510	0.18	0.23	0.00	0.88
能源行业投资占全社会固定资产投资比重	510	0.04	0.03	0.03	0.19
能源行业投资占GDP比重	510	0.03	0.02	0.02	0.17
能源行业从业人员占比	510	0.00	0.01	0.01	0.06

① 值得注意的是,地缘政治因素均等化冲击中国各省份能源安全。如此,是否加入地缘政治,只会对能源安全的绝对水平产生影响,而不会影响省份间的相对水平。所以,本文未将地缘政治因素纳入能源安全测度体系。

(2) 动态权重分析

数据平滑与降维后,使用函数熵权法得到权重曲线(见图2)。从总体占比角度来看:供应与运输安全和经济安全两个维度相对重要,各时段权重均在 0.275 以上;环境安全和使用安全两个维度占比较小,环境安全各时段权重均在 0.25 以下,使用安全权重在 0.2 以下。

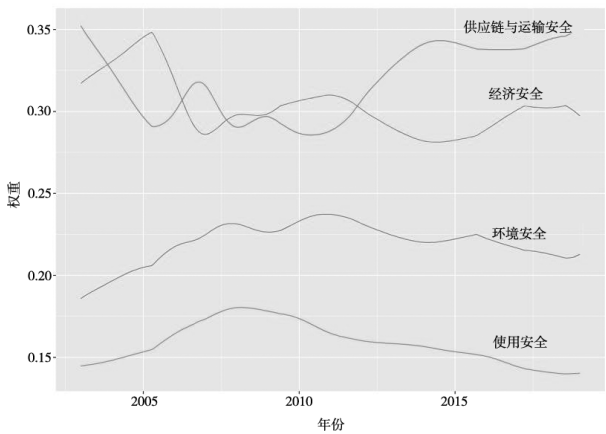


图2 维度的权重曲线

能源供应与运输安全权重整体呈现先下降再波动后上升的趋势。在2003—2006年间呈下降趋势且2003年该维度权重处于最大值,这是由于在过去的几十年里中国粗放式的发展模式对能源的需求量巨大,2003年、2004年我国的能源消费增长正处于峰值(高于15%,根据中国统计年鉴的相关数据),表明我国的经济发展与能源使用情况密切相关,此时能源供应充足与否直接影响着社会生产力水平的高低,所以初始权重最大,随后下降;2007—2011年间处于波动趋势,这时期我国能源弹性系数转变为上升趋势,同时我国能源自给率有所上升,能源供需情况出现波动;2011年后先上升后平稳,2012年中国成为世界上最大的石油净进口国,对外能源依赖度较大,故在此时段权重迅速上升。事实上,2011年之前,中国始终保持着一个较高的能源消费增长率(年平均大于9%),能源安全形势严峻。如今,中国作为世界上最大的能源生产和消费国,能源情况始终供不应求,能源供应与运输安全水平不高。

经济安全趋势较为复杂,这与它受经济环境影响有关。2003—2005年是中国能源消费增长最快的三年,能源市场繁荣,吸引了大量能源行业投

资和从业人员,经济安全权重达到了最高;2005—2007年由于能源市场活跃度降低,权重下降;2007—2011年为应对国际金融危机的冲击,我国实施了积极的财政政策,并推出四万亿经济刺激计划,权重出现了缓慢上升;2011—2015年有所下降,受之前应对危机所提出的扩张性政策的影响,经济复苏中的通货膨胀风险逐渐加剧,经济环境不佳;2015年,党中央提出了供给侧结构性改革这一战略决策,促进了资源的整合和配置,优化了社会经济环境,经济安全权重随之提升。

环境安全权重呈现先上升后稳定的态势。在2003—2008年间呈上升趋势,这与中国环保政策的建立有关,其中包括2003年原国家环保总局发布的《环境保护行政主管部门政务公开管理办法》标志着环境信息公开制度的建立,2006年施行的《中华人民共和国可再生能源法》以加快可再生能源的开发利用;2008年后处于相对稳定状态,我国的环保政策进一步完善。

使用安全呈现先上升后下降的趋势。波峰出现在2008年附近,这与2008年的全球金融危机导致的原油价格暴跌有关。2008年之前我国能源消费量的年平均速度增长率超过12%,巨大的能源消费量说明经济增长对能源消费的高依赖性,使用安全权重因此上升;2008年之后,受技术进步、环保政策等因素的影响,中国能源消费增速放缓,能源强度和能源弹性系数呈下降趋势,即经济发展和能源消耗的相关性减弱,导致能源使用安全维度重要性下降。

(3) 省份能源安全测度结果

根据维度值和权重可以测度出各省份的能源安全得分,如图3所示。

从整体时间趋势来看,能源结构优化和能源效率的提高对提升能源安全水平有长远意义。均值函数(黑色曲线)表明2003—2011年和2015—2018年呈下降趋势,2011—2015年和2018年后呈上升趋势。21世纪初以来中国的工业化进程进入中期,重工业化趋势明显,经济的快速增长以高耗能为支撑,导致经济结构、能源市场风险等问题日益突出。伴随着2008年的全球金融危机的发生,全球原油价格剧烈波动,中国的能源安全水平继续下降。2010年中国国务院出台进一步加强了淘

汰落后产能战略,期间强调降低煤炭在能源消费中的比例,以优化我国能源结构;转型的阵痛不可避免,在2014年迎来回暖。2015年《环境保护法》的颁布,对各地能源行业发展提出了更高要求,能源安全水平又出现了类似2010年的短暂下降。近年来,随着绿色发展、节能减排措施的深化,能源效率不断提升、能源结构日趋稳健,能源安全水平有所提高。

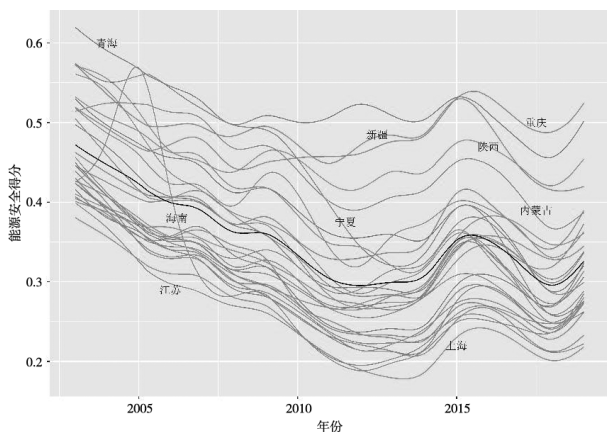


图3 省份能源安全曲线

2. 粮食安全测度及分析

(1) 数据来源。人均粮食产量、人均耕地面积、农村人均粮食消费量、单位播种面积化肥使用量、农作物受灾率和单位播种面积粮食产量指标数据来自《中国农村统计年鉴》,其余数据来自《中国统计年鉴》。粮食安全的指标描述性统计结果如表4所示。

表4 粮食安全指标的统计描述

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
人均粮食(公斤)	510	417.710	307.797	13.000	1 994.000
人均耕地(千公顷/百万人)	510	119.128	97.914	4.269	528.277
道路网密度(1)	510	0.290	0.191	0.000	0.860
居民粮食消费价格指数(%)	510	119.222	309.924	96.721	7 103.000
农村人均粮食消费量(公斤)	510	176.547	33.615	96.700	264.800
单位播种面积化肥施用量(公斤/公顷)	510	617.447	330.950	154.099	2 328.767
农作物受灾率(1)	510	0.352	0.252	0.000	1.743
单位面积产量(公斤/公顷)	510	5 521.730	969.781	3 236.600	8 213.900
恩格尔系数(1)	510	0.533	0.197	0.000	1.000

(2) 动态权重分析。粮食安全指标的权重曲线如图4。从总体占比角度看,人均粮食产量、人均耕地面积、道路网密度三个供应安全维度下的

指标权重较大,这表明供应安全是粮食安全最重要的维度。而剩余指标中权重最高的是经济与社会安全维度下的单位面积粮食产量,它反映的是地区的生产力水平,一定程度上影响着粮食安全,可见充足连续的粮食供应是确保粮食安全最关键的一环。而恩格尔系数、居民粮食消费价格指数等经济指标所占比重较小,这是由于粮食安全作为居民生活的基础,地区经济水平和居民生活水平的高低对粮食需求的影响有限,即无论穷富粮食需求相差不大。

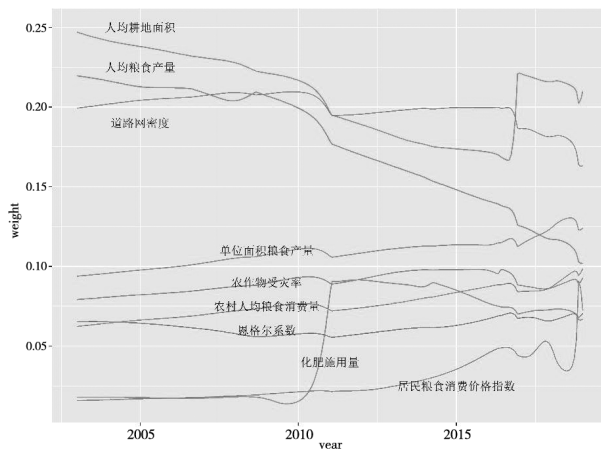


图4 粮食安全指标权重曲线

从时间变化趋势角度来看,生态安全的相关指标权重有所上升。第一个权重突变发生在2010年、2011年前后,人均粮食产量等3个供应安全的指标权重下降,而化肥使用量的权重迅速上升,这是由于社会各界环保意识的提升。为响应世界各国减缓气候变化的诉求,国务院发表了《中国应对气候变化的政策与行动(2011)》白皮书,生态和环境安全越来越被重视;为增大配方肥应用比例,农业部办公厅发布了《2012年全国测土配方施肥技术普及行动方案》,这一定程度上提高了化肥使用量的比重。第二个突变点在2017年附近,人均耕地面积的权重突然增加,这与2017年为提升耕地数量质量和落实国家粮食安全战略国务院印发的全国土地整治规划(2016—2020年)联系紧密。

(3) 省份粮食安全测度结果^②。图5展示了各省粮食安全走势。从总体时间趋势来看,各省份

^② 文中结果均通过稳健性检验,限于篇幅未能展出,有需要的可向作者索取。

粮食安全水平整体呈现稳步上升趋势。一方面随着技术进步,农业生产力不断提升,粮食产量、质量稳步增长,中国人的饭碗成色更足。另一方面,国家加大对粮食生产的支持力度,继续实施稻谷、小麦最低收购价政策,在内蒙古自治区和东北三省实行玉米、大豆生产者补贴,实施大豆振兴计划,实行粮食安全党政同责等一系列政策措施,中国饭碗端得更稳。

从区域看,各省粮食安全不具有明显的空间差异。黑龙江、吉林、内蒙古的粮食安全水平较高,这些地区的土地资源丰富,在粮食供应安全的维度上表现较好。青海和海南的粮食安全水平较差。与能源安全区域分布不同的是,北京、上海、江苏等较发达地区的粮食安全较好,粮食安全水平与经济发展水平没有出现空间上明显的负相关性。尤其上海在所有省份中排名靠前。虽然上海的粮食生产、耕地面积等自然资源并不突出,但其凭借优越的交通运输条件、发达的经济和技术能力同样达到了较高的粮食安全水平。可见,虽然自然资源极为重要,但提升粮食安全水平并非过“独木桥”,资源相对匮乏的地区可以通过自身的技术优势来提升粮食安全水平。各地区要充分利用自身优势,找到具有自身特色的道路以提升粮食安全水平。

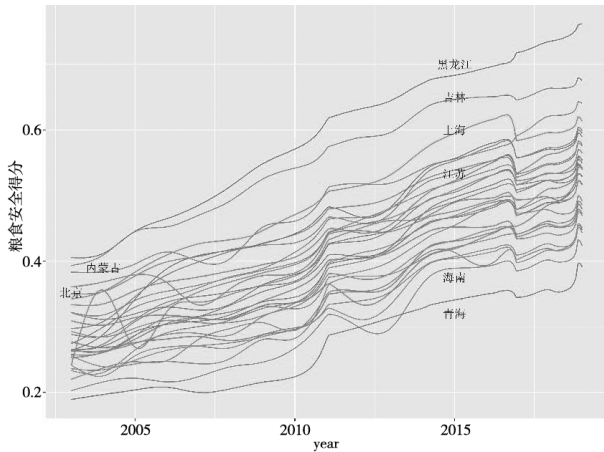


图5 省份粮食安全曲线

四、能源安全对粮食安全的影响

以往研究更多反应的是能源安全对粮食安全的平均效应,不能完全体现时变关系。基于此,本文使用 FOF 模型研究能源安全对粮食安全的时变

影响。另外,考虑到历史时刻的能源安全可能会对当前的粮食安全产生影响,本文研究将历史影响也纳入了 FOF 模型^[28,43]。

(一) FOF 模型

以能源安全的函数型数据作自变量,粮食安全为响应变量构建的 FOF 模型为:

$$F_n(t) = \alpha(t) + \int_1^T \vartheta(t, s) ESI_n(s) ds + \varepsilon_n(t) \quad (14)$$

式(14)中, $ESI_n(t)$ 表示函数型能源安全指数; $F_n(t)$ 表示函数型粮食安全指数。式(14)中,响应变量 $F_n(t)$ 只受到历史 $ESI_n(t)$ 的影响,即 $s \leq t$ 。式(14)主要是为了估计截距函数 $\alpha(t)$ 和回归曲面参数 $\vartheta(t, s)$ 。用 M 个单变量基函数逼近截距函数:

$$\alpha(t) \approx \sum_{m=1}^M \alpha_m A_m(t) \quad (15)$$

式(15)中, A_m 表示基函数, α_m 表示系数。同样,回归曲面 $\vartheta(t, s)$ 使用 L 个二元基函数估计:

$$\vartheta(t, s) \approx \sum_{l=1}^L \vartheta_l B_l(t, s) \quad (16)$$

使用黎曼和估计 $\int \vartheta(t, s) x_n(s) ds$:

$$\begin{aligned} \int \vartheta(t, s) x_n(s) ds &\approx \sum_{k=1}^K \delta_k \sum_{l=1}^L \vartheta_l B_l(t, s_k) x_n(s_k) \\ &\approx \sum_{l=1}^L \vartheta_l B_{li}^*(t) \end{aligned} \quad (17)$$

式中:

$$B_{li}^*(t) = \sum_{k=1}^K \delta_k B_l(t, s_k) x_n(s_k) \quad (18)$$

式(17)、式(18)中, $\delta_k = s_k - s_{k-1}$ 。基函数 M 和 L 的数量被选择为较大,并且使用粗糙度惩罚来确保估计函数的平滑性:

$$y_n(t) = \sum_{m=1}^M A_m(t) \alpha_m + \sum_{l=1}^L \vartheta_l B_{ln}^*(t) + \varepsilon_n(t) \quad (19)$$

残差平方和为:

$$S(\alpha, \vartheta) =$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J (x_n(t_j) - \sum_{m=1}^M A_m(t_j) \alpha_m - \sum_{l=1}^L \vartheta_l B_{ln}^*(t_j))^2 \quad (20)$$

式(20)中, $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_M]^T$ 、 $\vartheta = [\alpha_1, \dots, \alpha_L]^T$ 。通过最小化残差平方和 $S(\alpha, \vartheta)$ 与惩罚项的和来获得函数 $\alpha(t)$ 和二元曲面 $\vartheta(t, s)$ 的惩罚最小二乘估计。

(二) FOF 回归结果

如表5所示:截距函数和截距项显示在没有能源安全影响的情况下整体粮食安全的平均变化情况;截距函数的常数部分为0.68,其随观测周期的变化如图6中的截距函数所示。由表5知 p 值接近于零,表明估计具有统计学意义;此模型方差解释率约为65.2%,调整后的 R^2 为0.65。统计结果表明,粮食安全的变化一定程度上可以由各省份的能源安全来解释。

表5 能源安全与粮食安全回归的估计结果

常数项	估计	标准差	t-value	p-value
截距项 $\hat{\alpha}$	0.678 635	0.006 896	98.42	$< 2e - 16$ ***
	edf	Ref. df	F	p-value
截距项 $\hat{\alpha}(t)$	15.02	19.00	21.09	$< 2e - 16$ ***
回归函数 $\hat{\beta}(t)$	12.50	14.12	162.15	$< 2e - 16$ ***

注:①调整后 $R^2 = 0.65$, 方差解释率为65.2%;②括号内为稳健标准误。***表示在 $p < 0.01$ 时有统计学意义。

图6和图7为截距函数 $\hat{\alpha}(t)$ 和二元回归曲面 $\hat{\vartheta}(t, s)$ 估计值。图7中估计的二元曲面代表着 s 时刻的能源安全对 t 时刻的粮食安全的影响。从自变量所在时间轴(s 轴)来看,2005年之前,估计的回归曲面均为负值,表明能源安全对粮食安全的影响为负;2005—2009年回归曲面开始出现正值,但影响较小;2009—2011年曲线出现了波谷且值为负;2011—2017年能源安全对粮食安全的正效应较大;2017—2019年曲面再度变为负值。

事实上,2005年之前,中国能源消费量增长迅速,能源强度较大,经济发展以巨大的能源消耗为代价。此时包括粮食生产在内的生产力水平迅速提高,粮食生产、加工过程中的能源需求量加大,但由于能源效率较低,能源供应情况吃紧,能源安全和粮食安全的趋势相反,能源安全通过影响粮食生产和经济系统,对粮食安全产生了负面影响。相应地,2005年能源消费增长率放缓,能源的经济性有所提升,能源安全对粮食安全水平产生正向影响。直到2009年受全球金融危机的影响,各国

经济环境状况堪忧,此时国务院出台进一步加强淘汰落后产能战略,强调降低煤炭在能源消费中的比例,这总体上有利于提升我国能源安全,但受金融危机的持续影响国际能源市场不稳,降低煤炭的使用份额将导致能源价格波动,对粮食生产、运输等过程的成本和经济情况产生负面影响。能源安全通过能源价格波动和对经济系统的中介效应,对粮食安全产生了负面影响。之后,随着金融危机及其后续影响的结束,政府颁布《中国的能源政策(2012)》白皮书、《环境保护法》等政策和法律,着重强调能源效率的提升和可持续发展,能源系统采用了环境友好型的发展策略,能源安全通过对环境的中介效应对粮食安全产生较大的正效应。

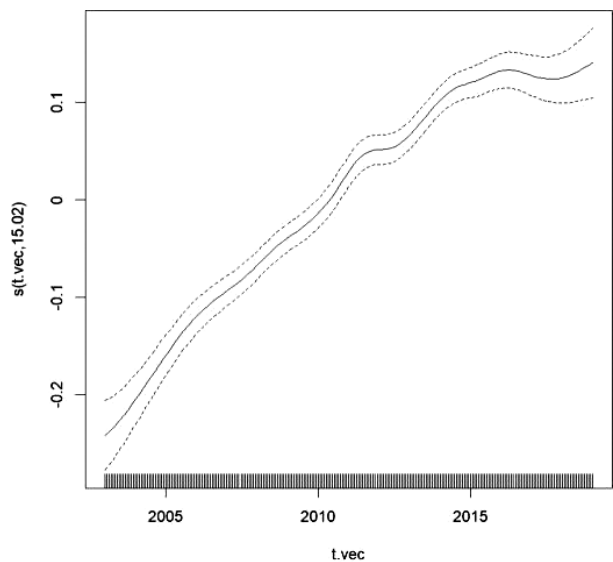


图6 含置信区间的估计截距函数 $\hat{\alpha}(t)$

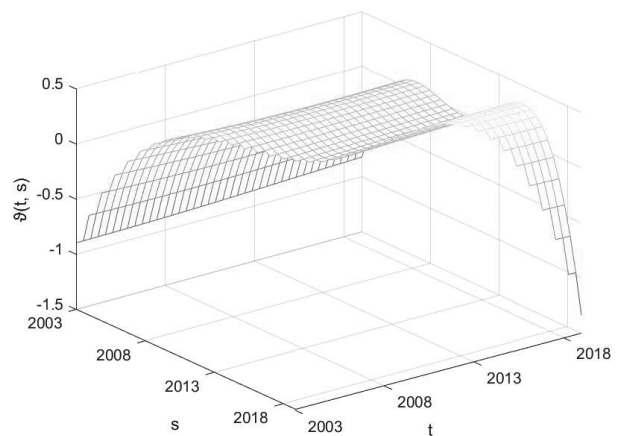


图7 估计的回归曲面 $\hat{\vartheta}(t, s)$

应。2017 年以来,随着生产力的提升我国粮食安全水平稳步提升,但能源安全受国际局势、严格环境政策的影响仍面临不小困难,两者趋势截然相反。

(三) 回归结果的稳健性分析

利用该回归模型拟合各省的粮食安全曲线,如图 8 所示。将图 8 与图 5 的粮食安全真实曲线对比,发现用能源安全数据作为解释变量,拟合得到的曲线值域缩小,尤其是最大值从 0.68 降到了 0.6 左右,这表明粮食安全水平存在能源安全无法解释的部分。但总体来看拟合得到的粮食安全与实际粮食安全曲线相差不大且拟合的曲线更加平滑,该模型的拟合效果良好。模型可能忽略了粮食安全数据中的噪声影响,进而预测了粮食安全的实际趋势。

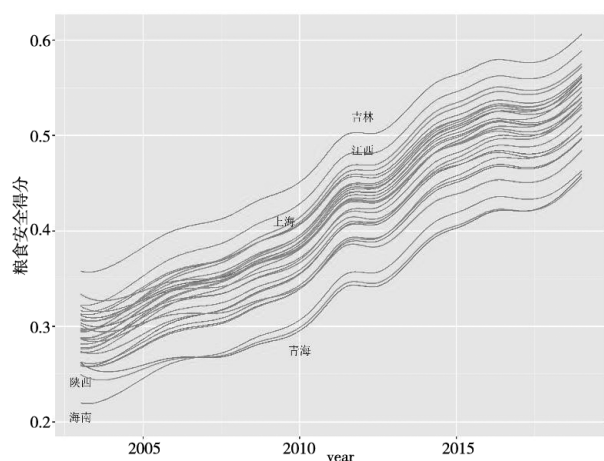


图 8 粮食安全拟合曲线

五、结论

本文使用函数型数据分析(FDA)和函数熵权法实时测度了 2003—2019 年间各省份能源和粮食安全水平。进一步通过 FOF 模型分析了能源安全对粮食安全的影响,结果发现:从权重变动趋势上来看,能源供应与运输安全和经济安全所占比重最大,环境安全比重有所提高,这说明我国在保障能源供应安全前提下,愈发注重能源的环境安全。与能源安全一致,供应安全仍然是粮食安全的核心所在,但近年来,生态安全对粮食安全重要性有所上升。更为重要的是,能源安全对粮食安全具有非线性影响。在观测期内,2005—2009 年、2011—2017 年能源安全对粮食安全产生了正效应且解释了粮食安全约 65% 的变化,拟合得到的粮食安全曲线与实际粮食安全曲线相差不大且拟合的曲线更加平滑。

基于以上结论,本文给出如下政策建议:需兼

顾“国内和国外双循环”以确保我国国家安全。对外中国政府应利用市场和外交手段降低进口风险,确保能源和粮食的持续稳定供应;在国内,应加大对清洁能源的研发力度,提高可再生能源使用占比以优化国内能源供应和需求结构。东部沿海省份的首要目标是确保连续充足的能源供应,而中西部地区应借助自身丰富的能源和东部沿海城市开展合作以引进技术和人才资源,进而推动经济发展;就粮食安全而言,东部沿海省份应凭借发达的运输网和经济来提升粮食安全水平,而中西部省份应借助资源禀赋来确保当地的粮食安全水平。除此之外,还需进一步深化供给侧改革以优化能源行业资源配置,建立健全能源安全制度,将提升能源安全水平作为当前的发展重心。

参考文献:

- [1] MORAN D, RUSSELL J A. Energy security and global politics: the militarization of resource management[M]. 6th. Routledge, 2008.
- [2] HOUSIN D. Security of energy supplies in a global market [C]// Speech by IEA Director Office of Oil Markets and Emergency Preparedness to 2nd Energy Forum, Prague, 2007: 4-6.
- [3] KALICKI J H, GOLDWYN D L. Energy and security: toward a new foreign policy strategy[M]. Woodrow Wilson Center Press, 2005.
- [4] 刘晓梅. 关于我国粮食安全评价指标体系的探讨[J]. 财贸经济, 2004(9): 56-61, 96.
- [5] SHIN J, SHIN W S, LEE C. An energy security management model using quality function deployment and system dynamics[J]. Energy policy, 2013(54): 72-86.
- [6] REN J, SOVACOOOL B K. Quantifying, measuring, and strategizing energy security: determining the most meaningful dimensions and metrics[J]. Energy, 2014(76): 838-849.
- [7] TONGSOPIT S, KITTNER N, CHANG Y, et al. Energy security in ASEAN: a quantitative approach for sustainable energy policy[J]. Energy policy, 2016(90): 60-72.
- [8] 鲜祖德, 盛来运. 我国粮食安全评价指标体系研究[J]. 统计研究, 2005(8): 3-9.
- [9] 姚成胜, 邱雨菲, 黄琳, 等. 中国城市化与粮食安全耦合关系辨析及其实证分析[J]. 中国软科学, 2016(8): 75-88.
- [10] HUANG S W, CHUNG Y F, WU T H. Analyzing the relationship between energy security performance and decoupling of economic growth from CO₂ emissions for OECD countries[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2021(152): 111633.

- [11] FANG D, SHI S, YU Q. Evaluation of sustainable energy security and an empirical analysis of China [J]. Sustainability, 2018, 10(5): 1685.
- [12] LE T H, NGUYEN C P. Is energy security a driver for economic growth? evidence from a global sample[J]. Energy policy, 2019(129): 436-451.
- [13] 苏芳, 刘钰, 汪三贵, 等. 气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(8): 140-152.
- [14] 周勤. 基于能源供给安全的国家之间能源政策的博弈: 兼评中日俄间的“安大线”与“安纳线”之争[J]. 中国工业经济, 2003(12): 57-63.
- [15] 吴方卫, 张锦华, 孔艳杰. 潜在原油缺口与经济持续增长[J]. 中国管理科学, 2014, 22(S1): 698-704.
- [16] CABALU H. Indicators of security of natural gas supply in Asia[J]. Energy policy, 2010, 38(1): 218-225.
- [17] PAVLOVIĆ D, BANOVAĆ E, VIŠTICA N. Defining a composite index for measuring natural gas supply security: the Croatian gas market case[J]. Energy policy, 2018(114): 30-38.
- [18] LEE C C, XING W, LEE C C. The impact of energy security on income inequality: the key role of economic development[J]. Energy, 2022(248): 123564.
- [19] ERAHMAN Q F, PURWANTO W W, Sudibandriyo M, et al. An assessment of Indonesia's energy security index and comparison with seventy countries[J]. Energy, 2016(111): 364-376.
- [20] WU T H, CHUNG Y F, HUANG S W. Evaluating global energy security performances using an integrated PCA/DEA-AR technique [J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2021(45): 101041.
- [21] SOVACOL B K, BROWN M A. Competing dimensions of energy security: an international perspective[J]. Annual review of environment and resources, 2010, 35(1): 77-108.
- [22] KILINÇ-PALA P B. Approaches in energy exclusive security: theories of energy security and the dominance of realism[J]. Politics & policy, 2021, 49(3): 771-794.
- [23] MOURAVIEV N. Energy security in Kazakhstan: the consumers' perspective[J]. Energy policy, 2021, 155: 112343.
- [24] WANG Q, ZHOU K. A framework for evaluating global national energy security [J]. Applied energy, 2017(188): 19-31.
- [25] 王林秀, 邹艳芬, 魏晓平. 基于 CGE 和 EFA 的中国能源使用安全评估[J]. 中国工业经济, 2009(4): 85-93.
- [26] AUGUTIS J, KRIKŠTOLAITIS R, MARTIŠAUSKAS L, et al. Integrated energy security assessment[J]. Energy, 2017(138): 890-901.
- [27] WANG D, TIAN S, FANG L, et al. A functional index model for dynamically evaluating China's energy security[J]. Energy policy, 2020(147): 111706.
- [28] BAMISILE O, OJO O, YIMEN N, et al. Comprehensive functional data analysis of China's dynamic energy security index[J]. Energy reports, 2021(7): 6246-6259.
- [29] GONG X, WANG Y, LIN B. Assessing dynamic China's energy security: based on functional data analysis [J]. Energy, 2021(217): 119324.
- [30] COATES J. Build it back better: deconstructing food security for improved measurement and action[J]. Global food security, 2013, 2(3): 188-194.
- [31] 朱晶. 贫困缺粮地区的粮食消费和食品安全[J]. 经济学(季刊), 2003(2): 701-710.
- [32] 张志新, 李成, 靳玥, 等. 农村金融排斥、农业技术进步与粮食供给安全[J]. 科研管理, 2023, 44(2): 184-192.
- [33] 杜志雄, 韩磊. 供给侧生产端变化对中国粮食安全的影响研究[J]. 中国农村经济, 2020(4): 2-14.
- [34] 杜志雄, 高鸣, 韩磊. 供给侧进口端变化对中国粮食安全的影响研究[J]. 中国农村经济, 2021(1): 15-30.
- [35] 何蒲明. 利用农产品期货市场促进粮食物流发展: 基于粮食安全的视角[J]. 经济管理, 2009, 31(2): 16-20.
- [36] 叶中华, 魏玉君. 城镇化背景下粮食安全研究可视化分析: 基于 Cite Space 的图谱量化研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S1): 64-66.
- [37] 罗翔, 张路, 朱媛媛. 基于耕地压力指数的中国粮食安全[J]. 中国农村经济, 2016(2): 83-96.
- [38] HANJRA M A, QURESHI M E. Global water crisis and future food security in an era of climate change [J]. Food policy, 2010, 35(5): 365-377.
- [39] KHAN S, HANJRA M A, MU J. Water management and crop production for food security in China: a review [J]. Agricultural water management, 2009, 96(3): 349-360.
- [40] CRAVEN P, WAHBA G. Smoothing noisy data with spline functions: estimating the correct degree of smoothing by the method of generalized cross-validation [J]. Numerische Mathematik, 1978, 31(4): 377-403.
- [41] ANG B W, CHOONG W L, NG T S. Energy security: definitions, dimensions and indexes [J]. Renewable and Sustainable energy reviews, 2015(42): 1077-1093.
- [42] ANG B W, CHOONG W L, NG T S. A framework for evaluating Singapore's energy security[J]. Applied energy, 2015(148): 314-325.
- [43] MALFAIT N, RAMSAY J O. The historical functional linear model [J]. Canadian journal of statistics, 2003, 31(2): 115-128.

(本文责编: 默 黎)