DOI: 10.5846/stxb202001180147
盖美,翟羽茜.中国水资源-能源-粮食-支撑系统安全测度及协调发展.生态学报,2021,41(12):4746-4756.
Gai M,Zhai Y X.Measurement and coordinated development of water resources, energy, food and support security in China.Acta Ecologica Sinica,2021,41(12):4746-4756.

中国水资源-能源-粮食-支撑系统安全测度及协调发展

盖 美[1,2,3,*],翟羽茜[2]

1 教育部人文社科重点研究基地,海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029
2 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029
3 辽宁师范大学海洋可持续发展研究院,大连 116029

摘要:探索我国水资源-能源-粮食-支撑系统安全及时空演变规律,有利于促进中国水资源-能源-粮食-经济社会-管理维护的可持续发展。采用模糊物元法和耦合协调度模型,借助 ArcGIS 空间分析及核密度和基尼系数、变异系数,对我国 31 个省、市、自治区 2004—2017 年水资源-能源-粮食-经济社会-管理维护安全水平及耦合协调度进行测算及时空对比分析。结果表明:①时间上,我国安全测度指数总体呈上升趋势;空间上,我国安全测度水平除青海、西藏外普遍较好;②各子系统情况:经济社会子系统增长较快、水资源子系统水平较差、粮食安全指数变差、能源子系统分化现象显著、管理维护小幅度提升;③我国安全测度协调度 2004 年 0.170 提高至 2017 年 0.348,总体呈上升趋势;④安全测度协调度的空间演化基本可以分为上升型、下降型、平滑型和波动型四类,以波动型居多。

关键词:水-能源-粮食;模糊物元法;耦合协调度模型

Measurement and coordinated development of water resources, energy, food and support security in China

GAI Mei[1,2,3,*],ZHAI Yuxi[2]

1 *Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry of Education, Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Dalian* 116029, *China*
2 *School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian* 116029, *China*
3 *Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian* 116029, *China*

Abstract: In order to promote the sustainable development of water resources-energy-food-support system security in China, we explore security of water resources-energy-food and its spatio-temporal development regularity in China. In this paper, the fuzzy matter-element method and the coupling coordination degree model are used to calculate and analyze the water resources-energy-food ecological security level and coupling coordination degree of 31 provinces, cities and autonomous regions in China from 2004 to 2017 by using ArcGIS spatial analysis, core density, Gini coefficient and variation coefficient. The results showed that: ① in terms of time, security index of China was on the rise; in terms of space, China′s security index level was generally good except Qinghai and Tibet. ② The economic and social subsystem grew rapidly, the level of water resources subsystem and the index of food security were poor. The energy subsystem is differentiated significantly and small improvement in management and maintenance.③ The coordination degree of security in China increased from 0.170 in 2004 to 0.348 in 2017, showing an overall upward trend. ④ The spatial evolution of the coordination degree of security could be divided into four types: ascending type, descending type, smooth type, and undulating type.

基金项目:2020 辽宁省社会科学规划基金重点项目(L20ATJ001)
收稿日期:2020-01-18; **修订日期**:2020-12-15

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gaimei71@163.com

Key Words: Water-Energy-Food; fuzzy matter-element method; coupling coordination degree model

水、能源、粮食作为人类生存与社会发展的重要自然资源,2011 年波恩会议中首次将其联系起来作为一个整体考虑,至此水-能源-粮食(W-E-F)系统走进专家学者的视野[1-3]。随着人民生活水平的提高,对水资源、能源、粮食有了数量和质量要求,而我国资源日益短缺与人民日益增长的需求出现了巨大的矛盾。党的十八大和十九大分别提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”、“确保国家粮食安全,实施食品安全战略”,十三五规划提出了加快新型能源发展等方针政策,充分体现了党中央对水-能源-粮食安全的重视[2]。我国淡水资源总量占全球的 6%,人均水资源量仅为世界平均水平的 1/4;我国能源资源发展将从总量扩张转向提质增效新阶段;我国粮食实现了连年丰收却仍将存在粮食供求的结构性矛盾[2]。因此,研究水资源-能源-粮食系统的时空变化特征,对于更加深刻地认识我国安全测度水平,推进我国现代化建设有着重要意义。

针对 W-E-F 系统的研究主要有以下几方面特点:(1)安全测度指标体系构建:对区域 W-E-F 系统的评价方面指标体系构建集中在水[4]、能源[5]和粮食[6-7]三个单子系统或水安全与粮食安全[8]、能源与经济发展[9]、粮食与人口[10]等两个系统彼此的联系,如白景峰阐述了水-粮食-能源压力的时空变动及驱动力[11],研究不够全面;(2)研究内容:对 W-E-F 系统的整体研究侧重于对其概念的探究及纽带关系的阐述[12-13],如于宏源[14]阐述了纽带安全下能源-粮食-水的概念及现状;或对 W-E-F 系统的现状分析并提出相应的解决对策[15],目前的研究以定性研究为主,定量化研究依旧较少;(3)研究角度:对 W-E-F 系统的定量分析主要探究 W-E-F 系统的时间变化或时空演变规律,如王慧敏等[16]探究了水-能源-粮食的时间变化对山东省的区域绿色发展的影响并提出相应的对策,没有考虑到三要素之间协调程度。

基于此,本文做了以下几点拓展:(1)在多研究水-能源-粮食系统的基础上,本文考虑到人类社会可能对其的影响,引入支撑系统(社会经济子系统和管理维护子系统),构建五元系统体系,对中国安全测度水平进行定量化分析,从而全面反映中国安全测度状况;(2)本文构建水、能源、粮食和支撑系统(社会经济和管理维护)指标体系的基础上,考虑到水资源、粮食、能源生产消费安全的同时,还考虑到城乡基础设施对水、能源、粮食安全的影响,从居民消费水平、科技创新、国民人口素质等方面进行指标选取,力求全面、科学地反映中国安全测度状况;(3)目前针对水、能源、粮食的研究只考虑到各子系统安全测度水平的好坏,忽略彼此发展是否为协调发展,安全测度水平的评价较单薄,本文在评价各子系统安全水平的高低的基础上综合考虑系统之间的协调性,拓展了 W-E-F 系统的研究广度和深度,为提高中国安全测度水平,促进中国水资源-能源-粮食安全的可持续发展提供支持。

1　数据来源与说明

1.1　指标体系的构建

在评估区域安全测度水平时,水资源安全是保证区域安全测度水平的基础;而粮食安全是提高区域安全测度水平的保障;能源安全则有利于推动区域安全测度的进步;随着社会生产力的发展,人类对自然环境的利用改造程度越来越高,因此本文也考虑到经济发展可能会对当地安全测度水平造成的负面影响及人们为了保护生态环境所实施的一系列措施造成的积极影响。要提高区域安全测度水平,各子系统彼此之间的协调性也需要提升。

基于此,本文在坚持科学性、区域性、可获得性、典型性等原则的基础上,结合相关研究成果构建中国水资源-能源-粮食-经济社会-管理维护安全评价指标体系,对中国安全测度水平进行评估分析。如图 1。

1.2　数据来源

本研究选取 2004—2017 年为研究时段,主要数据来源有国家统计局官网、中国统计年鉴、中国城市统计年鉴、中国环境统计年鉴及各省份统计年鉴和统计公报。中国香港地区、中国澳门地区、中国台湾地区因数据获取困难,尚 不在研究范围内。

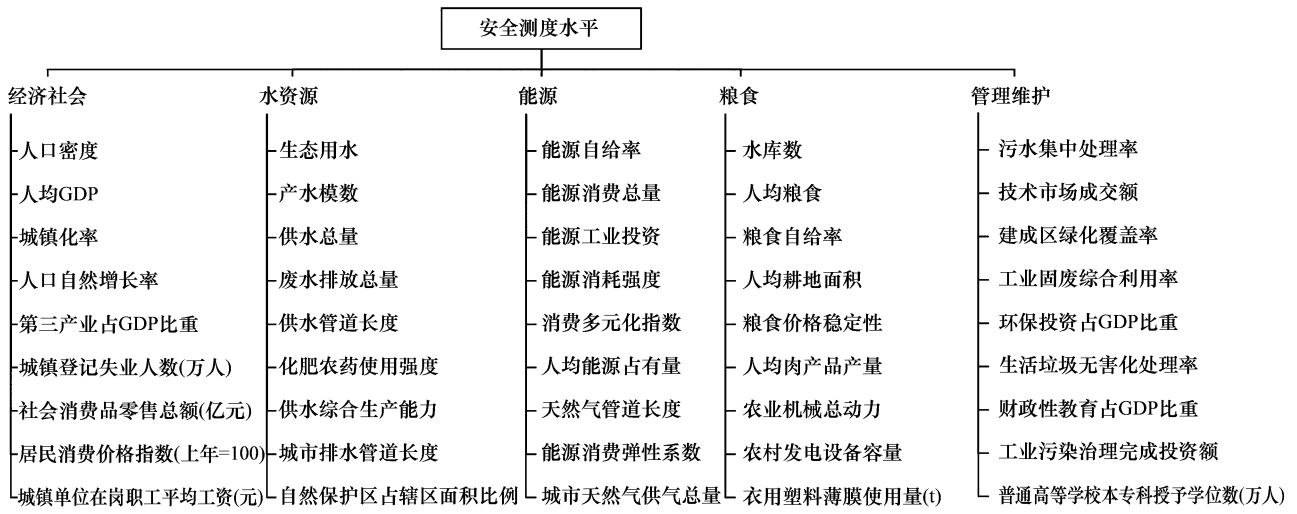

图 1 安全测度评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of ecological security

2 研究方法

本文构建水、能源、粮食、社会经济和管理维护五个指标体系的基础上,本文在传统水资源、粮食、能源生产消费安全的基础上,还考虑到城市供水、燃气设施对水安全、能源安全的影响、农业基础设施对粮食安全的影响、居民消费水平、科技创新、国民人口素质等方面进行指标选取,通过可信度分析最终筛选出 45 个指标。文章基于所选 45 个指标和各省份的数据,计算出中国各省份的安全测度指数。安全测度指数值越大,代表当地水-粮食-能源-经济社会-管理维护安全状况越好,反之则反。本文运用核密度估计和基尼系数、变异系数更科学详细的阐述安全测度水平的时间演化规律。再通过 ArcGIS 软件将各个省份的安全测度指数采用分位图展示出来进行空间分析,最后引入耦合协调度公式,进行系统间的相互分析。

2.1 指标可信度分析及确定权重

为了保证指标选取的客观、全面和可靠,本文对所获取的原始数据采用 Min-Max 方法进行标准化处理。并对标准化后的指标利用 SPSS 软件进行指标相关度分析及可信度分析。所选指标相关系数均小于 0.4,指标可信度系数均高于 0.8,证明所选指标反映的方面较全面,可信度较高。该指标体系能够客观全面的反映各省份的安全测度状况。

本文利用熵权法来确定指标权重。指标的熵值反映了指标提供给决策者信息量的大小,熵值可以客观地确定指标的重要程度,避免人为赋权主观性的偏颇。其中人口密度、人均 GDP、产水模数、能源消费弹性系数的权重较大(均>0.1),因此人口、水资源、能源均对各省份的安全测度状况有重要的影响,要提高安全测度状况需加大对其的调控。

2.2 模糊物元法

为了解决各类指标的不相容的问题,本文决定采用模糊物元法[17]。首先写出各省份安全测度的复合模糊物元矩阵;其次计算每项指标相对于标准事物的从优隶属度,基于此得出新的模糊物元矩阵。计算从优隶属度普遍将指标划分为正向和逆向,故计算从优隶属度公式仅分为越大越优型公式和越小越优型公式。笔者考虑到可能存在一些适中型指标,即有一个最优值,越向两边走,结果越差,故增加计算适中性指标的公式(公式 1)。最后根据安全测度指标体系各特征值中的最大值得出标准模糊物元,依据公式 2 和标准模糊物元来计算差平方,得出差平方物元 $R\Delta$。

适中型指标: $U_{\varphi ij}=\dfrac{2(\varphi_{ij}-\min\varphi_{ij})}{\max\varphi_{ij}-\min\varphi_{ij}}\times\min\varphi_{ij}\leqslant\varphi_{ij}\leqslant\max\varphi_{ij}$

$$\frac{2(\max\varphi_{ij}-\varphi_{ij})}{\max\varphi_{ij}-\min\varphi_{ij}}\times\min\varphi_{ij}+\frac{\max\varphi_{ij}-\min\varphi_{ij}}{2}\leqslant\varphi_{ij}\leqslant\max\varphi_{ij}\tag{1}$$

其中, $U_{\varphi ij}$ 表示各项指标的从优隶属度,$\max\varphi_{ij}$ 和 $\min\varphi_{ij}$ 分别表示各项指标的最大最小值。

$$\Delta ij=U_{\varphi 0j}-U_{\varphi ij}\tag{2}$$

2.3　欧式贴近度

本文采用欧式贴近度[17]公式来计算安全测度指数。方法计算时首先确定最优方案,然后计算其他方案与该方案的贴近程度,越接近则该方案越优。本文中复合模糊物元 R_{ph} 的计算采用 $M(*,+)$ 方法:

$$R_{PH}=\begin{bmatrix}&M_1&M_2&\cdots&M_m\\PH_i&PH_1&PH_2&\cdots&PH_m\end{bmatrix}\tag{3}$$

其中

$$PH_i=1-\sqrt{\sum_{j-1}^{n}w_j\Delta_{ij}}\quad(i=1,2\cdots m;j=1,2\cdots n)\tag{4}$$

w_j 是第 j 个指标的熵权权重,Δij 为第 i 个样本第 j 个指标的平方差。R_{ph} 为从第一个到第 i 个样本安全测度指数的集合,PH_i 为第 i 个样本的安全测度指数值。

2.4　耦合协调度模型

为了体现出水、能源、粮食各子系统之间的协调发展程度,本文采用耦合协调度模型[18-20],定量化计算彼此之间的耦合协调度值。数值越大,说明各子系统之间的耦合协调度越高,达到良性耦合状态,反之说明耦合状态较差:

$$D=\sqrt{C\times T}\tag{5}$$

$$C=\left\{\frac{f_1(x)f_2(x)\cdots f_n(x)}{\left[\dfrac{f_1(x)+f_2(x)\cdots+f_n(x)}{n}\right]^n}\right\}^n\tag{6}$$

$$T=\alpha_1f_1(x)+\alpha_2f_2(x)\cdots+\alpha_nf_n(x)\tag{7}$$

其中,D 表示各系统间的耦合协调度指数,C 表示各子系统之间的协调发展指数,T 为两系统之间的综合发展指数。本文认为各子系统重要性相同,故 α 在计算两系统协调性时取 1/2,在计算三系统耦合协调度时取 1/3。本文在参考相关研究[21-23]的基础上结合实际情况对耦合协调度进行划分(表 1):

表 1　我国安全测度耦合协调度等级划分表

Table 1　Table of coupling coordination degree of China's security

耦合协调度 Close coordination degree	耦合协调度等级 Degree of coupling coordination	耦合协调度 Close coordination degree	耦合协调度等级 Degree of coupling coordination
0—0.4	低度耦合	0.5—0.7	中度耦合
0.4—0.5	过渡耦合	0.7—1.0	高度耦合

3　研究结果

3.1　中国安全测度指数分析

3.1.1　安全测度综合指数分析

2004—2017 年中国安全测度水平呈先提高后下降,总体上升的趋势[24-26]。如图 2,我国的安全测度水平时间演变大体可分为匀速上升(2004—2008 年)、高水平波动(2008—2013 年)和整体下降(2013—2017 年)三个阶段。引入非参数核密度函数模型[27-28]对我国安全测度水平的时间演进轨迹和特征进行分析。图 3 为

中国安全测度指数演变规律,2004 年曲线呈现出了一个强度极大的单峰及单峰左侧两个明显递增的肩膀峰,表明此时我国安全测度指数已经开始出现了“三级分化”。“高值”区省市数量占绝对优势,剩余均处于“低值”区和“中间”区。“中间区”省市水平和“低值”区省市虽强度存在差距,但是彼此之间差距较小,而和“高值”区省市差距较大。到 2010 年时,“主峰”发生明显的“右移”,表明多数省市安全测度指数升高,其安全测度水平变好,而“低值”区由“肩膀峰”下降成一个“半峰”,说明“低值区”省市虽然有所减少并强度增加,但两极分化现象依然明显。2017 年时“主峰”相比 2010 年明显左移,表明多数省市安全测度指数出现明显下降,“半峰”左移趋势没有“主峰”明显,说明 2017 省市安全测度指数两极分化差距减小。

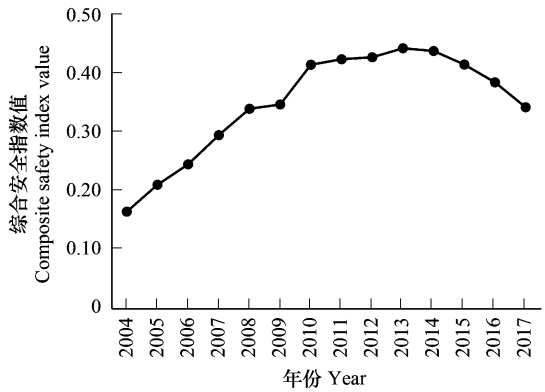

图 2 2004—2017 我国安全测度指数

Fig.2 2004—2017 national ecological security index

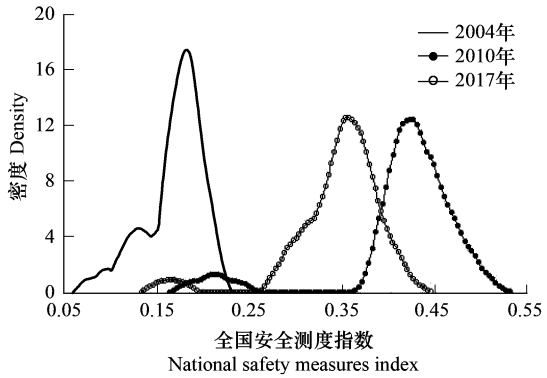

图 3 我国安全测度指数演变规律

Fig.3 Evolution regularity of national safety measure index in China

中国安全测度水平空间分布差异显著。2004 年东部沿海(吉林、山东、福建)、西南(云南、四川)和西北(新疆、甘肃)等省份安全测度指数为一般,其余均为差,主要是由于研究初期经济发展水平普遍不高,而河流沿岸水资源相对充足,且土壤肥沃利于粮食种植,西北则能源充足;2010 年中部地区(陕西、山西)和东部地区(福建、广东)安全测度指数提升较大为优秀,西部地区(云南、新疆)相对较差仅为良好,北部地区主要是由于依靠丰富的能源资源发展当地的经济,能源安全指数及经济发展极快,对应的管理维护投入力度加大。西部地区安全测度水平相对较差主要是由于自然条件恶劣未抓住经济发展的机遇,经济发展较慢;2017 年我国安全测度普遍稳定,除青海西藏外基本为梁海,重庆则是优秀(0.41),主要是由于重庆各子系统均衡发展,远超过全国平均值;北部内蒙古和山西安全测度指数为分别为 0.38、0.4 和 0.4,其中内蒙古能源安全水平最高为 0.75,经济发展水平也位居前列,山西水安全水平为全国最高达 0.73,粮食安全均有较大提高;东部沿海地区也有安全测度水平较好的省市零散分布,如山东、浙江等地分别为 0.36、0.37 和 0.35,主要是由于其经济发展水平较高,社会的管理维护投入较大加之能源利用程度较好;西藏安全测度水平最差,主要是由于经济发展和水安全指数在 2004—2017 年期间不增反降,粮食安全和能源安全小幅度上升使得当地综合安全测度指数始终低于全国平均水平。

中国安全测度空间分异显著,2004 年到 2007 年期间,内蒙古、山西和安徽安全测度指数持续增长,分别增长了 0.29、0.25、0.25,其中内蒙古各子系统增幅普遍较大,使其成为综合指数增长最快的省份、山西省 2014 年到 2017 年期间经济社会和管理维护子系统增长较快使其综合指数增长在所有省份中也不慢,说明经济发展和政府举措为当地安全测度水平的提高做出了很大贡献、安徽省的增长中政府举措为综合指数增长的重要因素,而水资源增长为负,拉低了当地整体安全测度水平,否则可能会更好;新疆、北京、四川等地区则经历了先下降后上升的过程,新疆初期;山东、湖南、黑龙江在 2004—2017 年安全测度水平先上升而后下降的问题。

3.1.2 我国安全测度分解分析

(1)经济社会安全指数演变规律

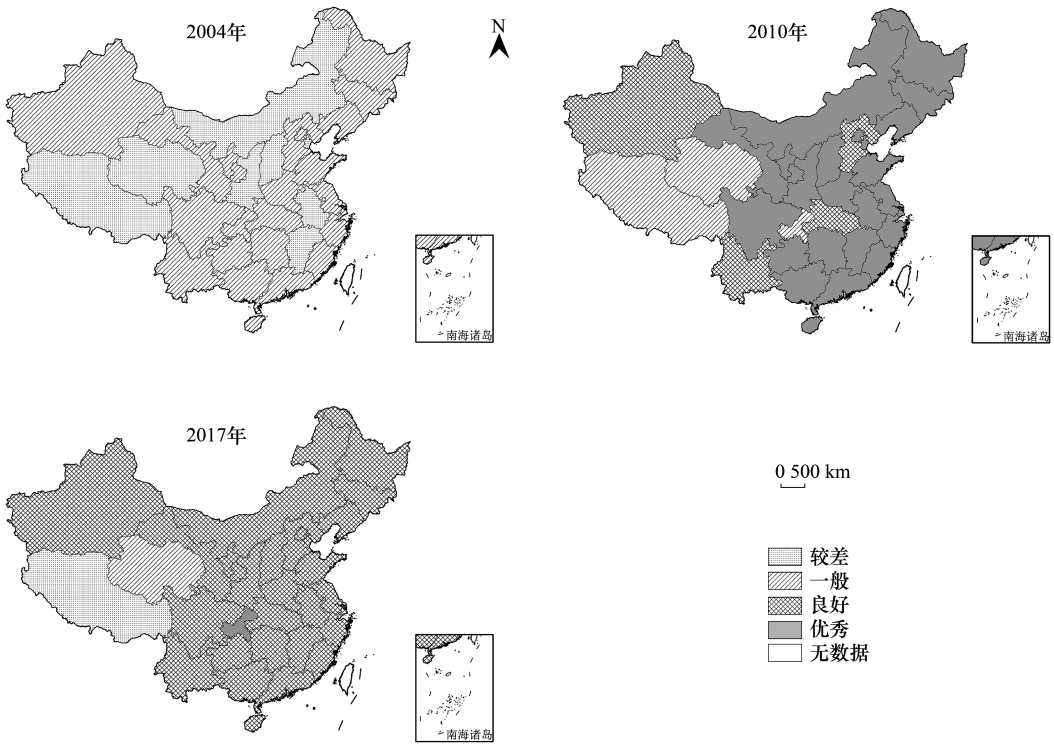

图 4　我国 2004、2010、2017 安全测度指数空间分布图

Fig.4　Spatial distribution of China′s security index in 2004, 2010 and 2017

图 5 为我国经济发展安全指数演变规律。2004 年,曲线呈现一个明显的“主峰”,右侧还有一个不太明显的“肩膀峰”,表明在 2004 年,我国大部分省区经济发展普遍不高;2010 年曲线出现了“主峰”右移的趋势并且主峰右侧出现及小的“卫星峰”,“肩膀峰”右移趋势更加明显,表明我国经济发展水平明显提高,并且省市间分化更加严重;2017 年,基本呈现“单峰”形式并继续右移,且强度降低半峰宽增加,表明我国各省市间经济发展水平进一步提升并且经济发展“分级”现象弱化,但是内部差异更加显著。

(2)水资源安全指数演变规律

图 6 为我国水安全指数演变规律。2004 年曲线呈现出“双峰”特性,其中“高值区”强度较大,“低值区”强度较小,说明我国水安全虽然存在分化情况,但水平低的城市个数明显较少;2010 年,“双峰”特征更加明显且发展右移,“低峰”强度加大说明我国水安全指数变好,但指数水平低的省市数量增加;2017 年主峰左移,且低峰趋势减弱,说明 2017 年我国水安全情况整体恶化,但分化情况减弱。

(3)粮食安全指数演变规律

图 7 为我国粮食安全指数演变规律 2004 年基本呈“单峰”特性,说明 2004 我国粮食安全指数没有出现明显的分化;2010 年主峰明显右移并在左侧出现另一微弱的“单峰”,说明 2010 年我国粮食安全指数明显变好但省市间的分化情况更加严重;2017 年时曲线“主峰”左移同时主峰左侧出现较明显的“卫星峰”,说明与 2010 年相比我国粮食安全出现下降趋势,同时省市间分化差距减小。

(4)能源安全指数演变规律

图 8 为我国能源安全指数演变规律。2004 年出现强度相似的“双峰”,说明 2004 我国粮食安全指数出现分化情况;2010 年主峰明显右移且强度变低半峰宽增加,2010 年我国能源安全指数明显变好且省市间的分化消失,但内部简单差异加大;2017 年时曲线“主峰”左移同时主峰明显左移并且半峰宽减小,说明与 2010 年相比我国能源安全出现下降趋势,同时内部分异也减小。中国能源安全指数空间变化较大。

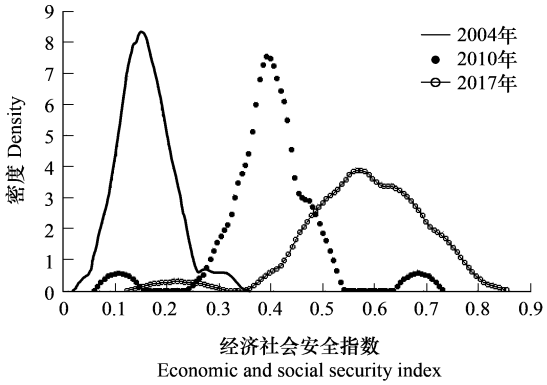

图 5 我国经济社会安全指数演变规律

Fig. 5 Evolution regularity of economic and social security index in China

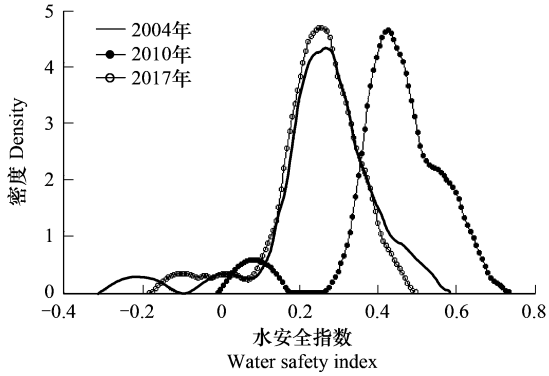

图 6 我国水安全指数演变规律

Fig.6 Evolution regularity of water safety index in China

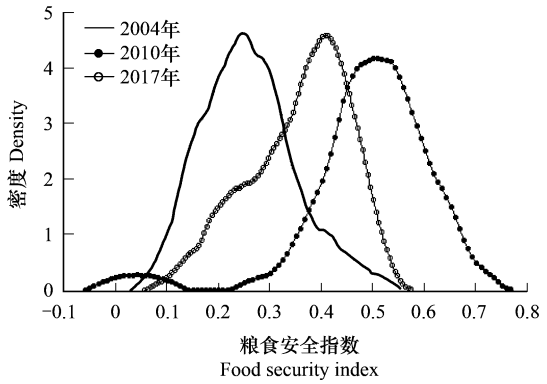

图 7 我国粮食安全指数演变规律

Fig.7 Evolution regularity of food security index in China

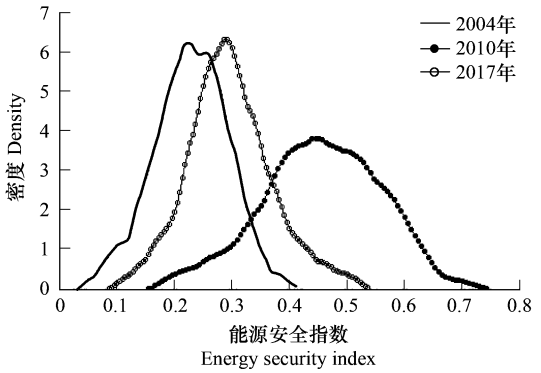

图 8 我国能源安全指数演变规律

Fig.8 Evolution regularity of energy security index in China

(5)管理维护安全指数演变规律

图 9 为我国管理维护安全指数演变规律。2004 年出现强度相差极大的“双峰”,说明 2004 我国管理维护安全指数出现分化情况;2010 年主峰明显右移且右侧出现不太明显的肩膀峰,说明 2010 年明显变好但省市间的分化趋势减弱;2017 年时曲线“主峰”继续右移但强度略为降低,且左侧出现强度较低的单峰,说明 2017 年小幅度提升,但分化情况加重出现一批水平较低的省市。

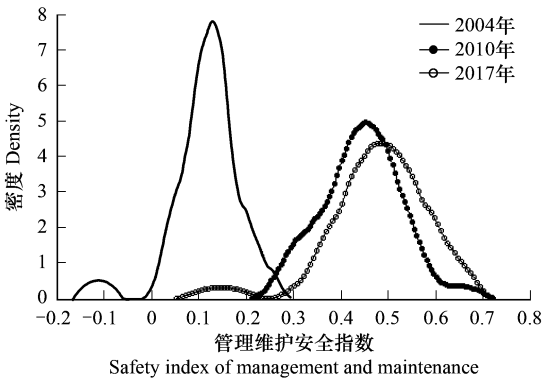

图 9 我国管理维护安全指数演变规律

Fig. 9 Evolution regularity of management and maintenance in China

3.2 中国综合安全测度协调性分析

根据上文中国安全水平评价指标体系的基础上,构建耦合度及耦合协调度模型,测算 2004—2017 年我国安全耦合协调度[26]。由图 10 可以看出,我国安全测度耦合协调度由 2004 年 0.267 提高至 2017 年 0.348,总体呈上升趋势。依据耦合协调度所处水平可将其大致分为三个阶段:①2004—2007 年我国安全测度耦合协调

度处于快速上升时期。主要是由于初期发展水平低,可提高空间大,加之城镇化推进 2006 年时提升至 48%、宏观调控政策的实施,经济发展水平提高,同时,水和能源资源丰富产水模数升值 108、人均能源占有量 2.56 千克标准煤/人,因此带动协调性大幅提高;②2007—2013 年我国安全测度耦合协调度波动上升达到过渡耦合协调阶段,并达到最高值 0.65。主要是该时期国家积极推进城镇化进程城镇化率达 55.5%,不断优化调整产业结构三产比重达 50.4%,致使经济发展水平显著提高,相对应的加大环保投入力度环保投资占比达 2.48%,加强污染治理力度工业固废综合利用率达 83%,从而推动社会保障水平的提高。同时能源产量上升人均能源占有量在该阶段达最大值 4.08,加大农业设备和水利设施建设的通入农业机械总动力和水库数分别达 98783 万千瓦和 98795 座,促进粮食产量上升,安全测度耦合协调度 保持在较高水平;③2013—2017 年期间安全测度耦合协调度不断下降,在 2017 年降至勉强耦合协调阶段。是由于该阶段资源环境的有限性和不断提高的经济发展水平的矛盾开始显现,经济发展水平不断提升,城镇化率和三产比重分别达 60%和 50%,与此同时水污染严重、无节制的能源消耗化肥农药使用强度高达 539、能源自给率降至 89%,粮食因受到国外进口农产品的冲击,粮食安全稳定也有所下降,导致综合协调性下降。

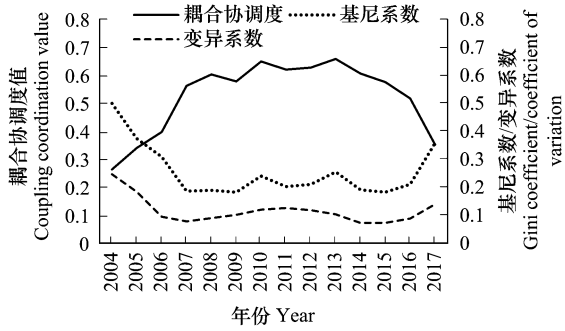

图 10　中国安全测度协调性及基尼系数、变异系数趋势

Fig. 10　Trends of security coordination, gini coefficient and coefficient of variation in China

采用基尼系数与变异系数[27]分析安全测度协调性的时间变化规律由图 10 可见,基尼系数呈现出与变异系数大致相同的趋势,前期快速提升后期较平稳,分别由 2004 年的 0.5 下降到 2017 年的 0.36、0.25 下降至 0.16。2004—2007 年期间收敛速度快速下降,年降幅 8.7%,主要是初期我国经济水平稳步增长由此基础投入不断增加、水和能源资源得到保障、粮食产量也不断提升;2007 年以后基本保持平稳状态。

研究结合 2004—2017 年中国安全测度耦合协调度值,通过分析我国安全测度协调性空间格局图 11 可知:2004 年我国西部地区云南、四川、新疆及东部沿海地区如吉林、山东、江苏达到过渡耦合阶段,其余省市均处于初级耦合阶段,空间格局上呈现东、西部协调性高、中部协调性低的特点;到了 2010 年,与 2004 年相比我国安全测度耦合性整体快速提高,高级耦合阶段省市明显增多;2011—2017 年期间呈现出下降趋势,大部分为过渡耦合,中部地区山西、陕西和重庆、西北地区新疆、东北黑龙江均为中级耦合,空间上呈现出三足鼎立的空间分布格局。

总体来说,我国 2004—2017 年安全测度耦合协调性可以分为上升型、下降型、平滑性和波动型四类[29]。我国平稳型地区如图 12 包括湖南、江苏、福建等地区,其安全测度耦合协调性在研究时段内基本保持平稳状态,其中:福建和江苏除前期协调性值略微较低外,其余年份均在 0.4—0.6 之间浮动;湖南的耦合性一直维持在较低水平,效率值在 0—0.1 之间。平滑型地区如湖南省人口基数大增长又快,自然增长率在 2017 年时为 6.2%,对资源的需求量不断长导致资源相对短缺,城市供水综合生产能力不断下降由 2004 年的 1234 万 m^3/d 下降至 2017 年的 1024 万 m^3/d,人均能源占有量由 0.93 吨/人降至 0.5 吨/人,加之经济发展过渡依赖第二产业,能源消费过单一,2017 年时煤炭消费份额占全省能源消费的 70%,资源面临极大挑战,因此其安全测度协调性始终保持较低水平。江苏省经济发展水平高,2017 年时城镇化率为 69%,科技水平提高农业投入力度加大,农用塑料薄膜使用量 132884.9t,能源利用效率不断提高,因此其安全测度协调性始终保持平稳较高水平。

上升型地区如图 13 较普遍主要包括山西、云南、青海、贵州、重庆地区,其安全测度耦合协调性呈现不同程度的上升趋势,但上升幅度各异,其中:山西和云南上升幅度最明显,均在研究末期达到过渡耦合状态;贵州、青海 虽有上升,但幅度相对较小。上升型地区如山西针对水污染治理情况效果良好出台如《山西省汾河流域水污染防治条例》、《山西省汾河流域生态修复与保护条例》等地方性法规,水安全得到有效保障加之粮

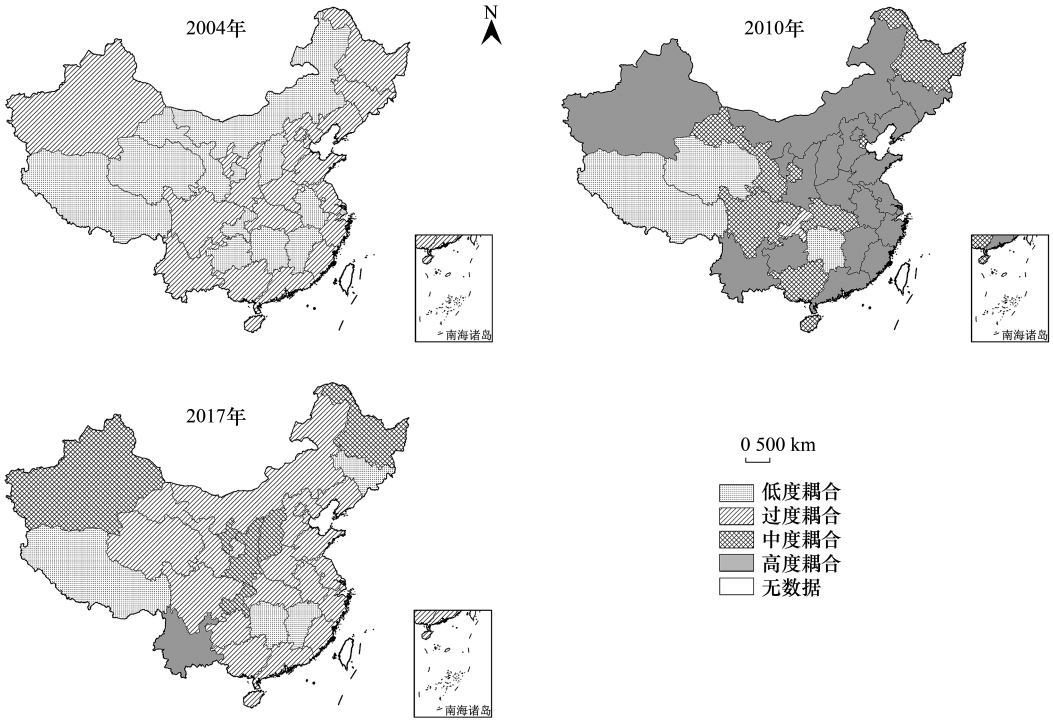

图 11 我国安全测度耦合协调度空间演变

Fig.11 Spatial evolution of coupling coordination degree of ecological security in China

食产量不断上升 2017 年到 91%,地方重视管理工业污染治理投资额不断增长 2017 年达 515241 万元,经济发展水平也不断提高 2004—2017 年期间人均 GDP 年均增长率达 28.4%。云南安全测度协调性基础良好,人口数量较少,人均粮食、肉产品产量高分别为 384 kg 和 87 kg,人均能源占有量也不断增加 2017 年时为 2.76 千克标准煤,因此安全测度协调性不断上升。青海安全测度协调性基础较差前期发展缓慢,后期依靠丰富的煤炭、石油、天然气和风能资源,大力发展能耗工业,拉动该地区经济增长,加之生态环境良好自然保护区面积占辖区面积大 30%,水资源丰富,人均耕地面积不断提高,社会基础设施投入力度加大,因此协调性也在逐渐上升。

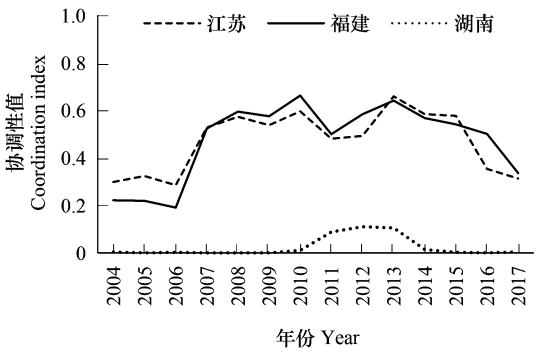

图 12 安全测度协调性平稳型演化

Fig.12 Evolution of security coordination and stability

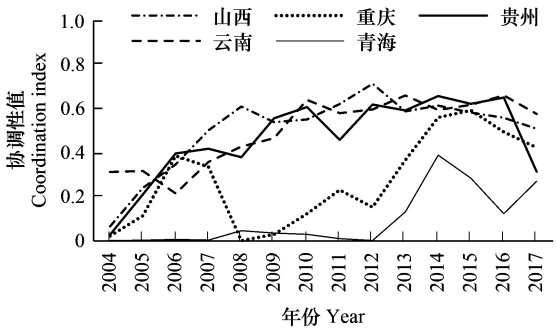

图 13 安全测度协调性上升型演化

Fig.13 Evolution of security coordination rising

下降型地区如图 14 包括吉林和山东,二省呈波动下降状态,研究末期下降至 0.098 和 0.24,均由过渡耦合下降至初级耦合状态。下降型地区如吉林经济发展快,2017 年人均 GDP 为 54838 元,相比 2004 年增长了

2.5 倍,相对的基础设施投入力度也随之增大,2017 年环保投资额更是占 GDP 比重的 2.48%,国家政策与支持,当地农业设施投入力度,农村发电设备容量 588740 千瓦粮食安全水平不断提高,与之不匹配的是吉林水安全指数出现下降趋势,2017 年降至 0.13 主要是由于随着粮食的产量大幅提高,化肥农药施用量也在不断提高加重了水污染,同时供水设施老化,城市综合供水生产能力下降,影响其协调性水平的提高。山东工业化初期,耗能多的重工业迅速发展,能源消费量不断增加,结构单一导致其安全水平变化不大,水受重工业发展的影响废水排放总量骤增,安全水平没有提高而同期经济发展指数迅速增长城镇化率由 30%提高至 60%,粮食安全水平提高,其内部不协调性愈加显现出来。

波动型地区如图 15 主要包括浙江、甘肃、广东和广西等地区,其安全测度耦合协调性在研究期内始终在 0.1—0.7 之间波动。波动型地区在我国比较普遍基本呈明显的先上升后下降趋势,甘肃态跟随西部大开发的步伐积极发展当地经济人口数量骤增自然增长率达 6%,但由于当地脆弱的生态环境,产水模数变化幅度很大,水利设施投入不足水资源受到极大威胁,水安全指数不断降低。当地积极发展农业,农业投入力度逐年加大,粮食安全 2010 年以前不断上升,后期受水源限制开始下降,因此其安全测度协调性呈现出波动状态。

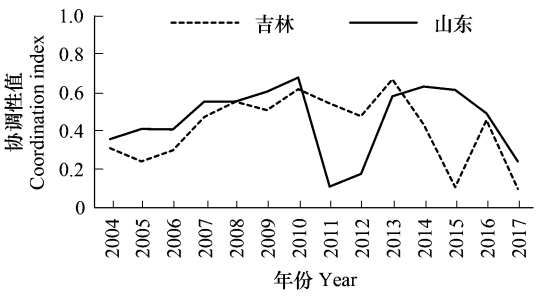

图 14　安全测度协调性下降型演化

Fig.14　Evolution of declining coordination of security

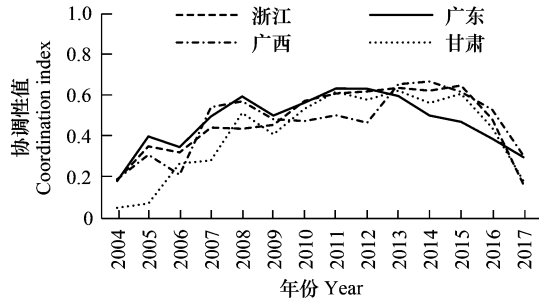

图 15　安全测度协调性波动型演化

Fig.15　Evolution of coordinated fluctuation pattern of security

4　结论与讨论

4.1　结论

(1)时间上我国安全测度指数总体呈上升趋势,且研究期内我国安全测度指数分化现象也在逐渐变小。经济发展“分级”现象弱化,但是内部差异更加显著;水安全情况整体恶化,但分化情况减弱;我国粮食安全出现下降趋势,同时省市间分化差距减小;我国能源安全出现下降趋势,同时内部分异也减小;管理维护 2017 年小幅度提升,但分化情况加重出现一批水平较低的省市。

(2)空间上,我国安全测度分异显著,除青海、西藏外普遍较好。

(3)在区域安全测度协调度上,我国由 2004 年 0.267 提高至 2017 年 0.348,总体呈上升趋势,可分为快速上升(2004—2007)、波动上升(2007—2013)和缓慢下降(2013—2017)三个阶段。空间上中部地区安全测度协调性提高较快,东部地区安全测度协调性普遍不高。2017 年以为三足鼎立的分布格局。

(4)我国安全测度协调度的空间演化基本可以分为上升型、下降型、平滑性和波动型四类。平稳性包括福建和江苏除基本在 0.4—0.6 之间浮动,而湖南的耦合性一直维持在较低水平;上升型地区较普遍主要包括云南、青海、黑龙江、上海等地区,上升幅度和原因各不相同;下降型地区仅有吉林和山东,主要是由于水安全的影响;波动型地区数量最多,基本呈先上升后下降趋势,主要包括浙江、内蒙古、广东等地区。

4.2　讨论

通过以上分析和结论,对提高我国未来安全测度水平提出针对性建议:因地制宜,加强区域综合管理。如湖南、江西应加强水安全的管理与治理、而青海应积极推动经济发展,从而推动区域安全测度水平的提高;积极推进经济高质量发展。积极进行产业结构升级,减少对资源环境的依赖,加强与其他地区间的合作以达到

发展经济的目的;建立节水型社会。严格实施水功能区纳污红线管理,加强对环境污染的综合治理以及生态环境的修复;加大农业科技投入。强化农业基础设施和农业现代装备建设,进一步挖掘粮食单产潜力、北京、浙江应加大农业基础设施投入,同时节流方面要尽可能的减少食物浪费[8];加强能源使用效率。积极提高能源利用率与推动地区能源消费多元化,优化能源结构与生产多元化[30-31],利用经济和科技优势支持风能、核能等新能源的开发利用。

本文对中国水资源-能源-粮食-经济社会-管理维护安全进行了测度,并分析了内部的耦合协调性,有利于该地区的可持续发展。文章虽然对中国水资源-能源-粮食-经济社会-管理维护安全的时空特征进行了分析,并阐述了其演变规律,但并未对作用机理进行分析,今后应通过空间计量等手段对中国水资源-能源-粮食-经济社会-管理维护安全演变的深层次原因进行探究。

参考文献(References):

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The Water-Energy-Food Nexus: a New Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture. Rome, Italy: FAO, 2014.

[2] 邓鹏, 陈菁, 陈丹, 施红怡, 毕博, 刘志, 尹越, 操信春. 区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究——以江苏省为例. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 232-238.

[3] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究. 自然资源学报, 2017, 32(12): 1999-2011.

[4] 孙涵, 聂飞飞, 胡雪原. 基于熵权 TOPSIS 法的中国区域能源安全评价及差异分析. 资源科学, 2018, 40(3): 477-485.

[5] 逯进, 常虹, 赵少平, 许抄军. 山东省能源、经济与环境耦合关系的演化特征. 经济地理, 2016, 36(9): 42-48.

[6] 张元红, 刘长全, 国鲁来. 中国粮食安全状况评价与战略思考. 中国农村观察, 2015, (1): 2-14.

[7] 姚成胜, 滕毅, 黄琳. 中国粮食安全评价指标体系构建及实证分析. 农业工程学报, 2015, 31(4): 1-10.

[8] 康绍忠. 水安全与粮食安全. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880-885.

[9] 张国军. 能源安全与经济可持续发展问题分析. 山东工业技术, 2019, (2): 83-87.

[10] 木合塔尔·艾买提, 纳麦提·托合提, 许善洋. 人口-耕地-粮食系统的发展趋势评价. 统计与决策, 2020, 36(3):63-66.

[11] 白景锋, 张海军. 中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析. 地理科学, 2018, 38(10): 1653-1660.

[12] Hellegers P, Zilberman D, Steduto P, McCornick P. Interactions between water, energy, food and environment: evolving perspectives and policy issues. Water Policy, 2008, 10(S1): 1-10.

[13] Bazilian M, Rogner H, Howells M, Hermann S, Arent D, Gielen D, Steduto P, Mueller A, Komor P, Tol R S J, Yumkella K K. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. Energy Policy, 2011, 39(12): 7896-7906.

[14] 于宏源. 纽带安全: 能源-粮食-水安全威胁及其思考. 区域与全球发展, 2018, (2): 94-110.

[15] 彭少明, 郑小康, 王煜, 蒋桂芹. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化. 水科学进展, 2017, 28(5): 681-690.

[16] 王慧敏, 洪俊, 刘钢. "水-能源-粮食"纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(6): 74-84.

[17] 李岩, 王珂, 刘巍, 李燕坤, 王时军, 张大红. 江苏省县域森林生态安全评价及空间计量分析. 生态学报, 2019, 39(1): 202-215.

[18] 程慧, 徐琼, 郭尧琦. 我国旅游资源开发与生态环境耦合协调发展的时空演变. 经济地理, 2019, 39(7): 233-240.

[19] 袁卫, 庞皓, 曾五一, 贾俊平. 统计学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2009: 33-36.

[20] 梁龙武, 王振波, 方创琳, 孙湛. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局. 生态学报, 2019, 39(4): 1212-1225.

[21] 张芷若, 谷国锋. 科技金融与科技创新耦合协调度的空间格局分析. 经济地理, 2019, 39(4): 50-58.

[22] 孙黄平, 黄震方, 徐冬冬, 施雪莹, 刘欢, 谭林胶, 葛军莲. 泛长三角城市群城镇化与生态环境耦合的空间特征与驱动机制. 经济地理, 2017, 37(2): 163-170, 186-186.

[23] 盖美, 钟利达, 柯丽娜. 中国海洋资源环境经济系统承载力及协调性的时空演变. 生态学报, 2018, 38(22): 7921-7932.

[24] 程钰, 王晶晶, 王亚平, 任建兰. 中国绿色发展时空演变轨迹与影响机理研究. 地理研究, 2019, 38(11): 2745-2765.

[25] 盖美, 朱静敏, 孙才志, 孙康. 中国沿海地区海洋经济效率时空演化及影响因素分析. 资源科学, 2018, 40(10): 1966-1979.

[26] 盖美, 展亚荣. 中国沿海省区海洋生态效率空间格局演化及影响因素分析. 地理科学, 2019, 39(4): 616-625.

[27] 于洋, 张丽梅, 陈才. 我国东部地区经济—能源—环境—科技四元系统协调发展格局演变. 经济地理, 2019, 39(7): 14-21.

[28] 孙才志, 刘玉玉, 陈丽新, 张蕾. 基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局. 生态学报, 2010, 30(5): 1312-1321.

[29] 赵林, 张宇硕, 焦新颖, 吴迪, 吴殿廷. 基于 SBM 和 Malmquist 生产率指数的中国海洋经济效率评价研究. 资源科学, 2016, 38(3): 461-475.

[30] 薛静静, 沈镭, 刘立涛, 高天明, 陈枫楠. 中国能源供给安全综合评价及障碍因素分析. 地理研究, 2014, 33(5): 842-852

[31] 刘立涛, 沈镭, 张艳. 中国区域能源安全的差异性分析——以广东省和陕西省为例. 资源科学, 2011, 33(12): 2386-2393