

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.020

# 中国水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率时空耦合协调关系分析

王恒,方兰

(陕西师范大学西北历史环境与经济社会发展研究院,陕西 西安 710119)

**摘要:**为研究中国资源系统与经济系统耦合协调发展状况,通过构建水-能源-粮食纽带系统安全评价指标体系,应用TOPSIS模型、DEA-Malmquist指数和耦合协调度模型,对中国30个省(自治区、直辖市)(不包括港澳台及西藏)水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率进行了测算,从时间和空间的角度分析了二者耦合协调关系。结果表明:中国水-能源-粮食纽带系统安全水平呈“双极分布”的空间格局,整体安全水平逐年提升,粮食子系统安全水平最高,水资源子系统安全水平最低;2005—2019年中国全要素生产率呈波动上升态势,水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合协调时空格局差异显著,耦合协调度呈现上升趋势,空间格局由南至北呈现出“高一低—高”的空间分布特征,时间维度上耦合协调呈现向高水平耦合阶段演进的趋势。

**关键词:**水-能源-粮食纽带系统;全要素生产率;安全水平;耦合协调度

**中图分类号:**TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0150-08

**Spatial-temporal coupling coordination relationship between the security level of water-energy-food nexus system and total factor productivity in China** // WANG Heng, FANG Lan (Northwest Institute of Historical Environment and Socio-Economic Development, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** In order to study the coupling coordination development of resource system and economic system, the evaluation index system of water-energy-food (WEF) nexus system security was constructed, which employed TOPSIS model, DEA-Malmquist index and coupling coordination degree model to estimate the WEF nexus system security level and total factor productivity (TFP) as well as the coupling coordination relationship between them from the perspective of time and space of 30 provinces, autonomous regions and municipalities (excluding Hong Kong, Macao, Taiwan and Tibet) in China. Results show that the spatial pattern of WEF nexus system security level in China is bipolar distribution and the comprehensive security level is increasing year by year with the security level of food system being highest and that of water resource system being lowest. From 2005 to 2019, TFP in China shows a fluctuating upward trend. The spatial and temporal pattern difference in the coupling coordination between WEF nexus system and TFP is significant and the coupling coordination degree shows an upward trend. The spatial pattern presents the spatial distribution characteristics of “high-low-high” from south to north, while the coupling coordination shows a trend of evolution to a high-level coupling stage from time dimension.

**Key words:** water-energy-food (WEF) nexus system; total factor productivity (TFP); security level; coupling coordination degree

水资源、能源、粮食是人类经济-社会-生态环境可持续发展的核心支撑点。随着全球人口及中产阶级比重的不断增加,城镇化进程的不断加快,工业发展对资源的过度攫取、生活方式的肆意扩张等,水、

能源、粮食系统间关联性与协调性在不断增强,传统针对单资源系统的研究范式已无法有效应对可持续发展视角下复合型系统间纽带关系研究。2011年11月德国波恩会议上,首次系统性提出“水-能源-粮

**基金项目:**陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究项目(2021ZD1043)

**作者简介:**王恒(1994—),男,博士研究生,主要从事资源环境经济及农业区域发展研究。E-mail: wangheng@snnu.edu.cn

**通信作者:**方兰(1969—),女,教授,博士,主要从事水资源管理和“三农”问题研究。E-mail: fanglan@snnu.edu.cn

食纽带系统安全关系”研究框架<sup>[1]</sup>,以可持续发展为目标,探索构建耦合水-能源-粮食纽带系统整体研究新视角与技术思路,研究如何提高效率、减少权衡、建立多系统间协同交互体系,以确保水-能源-粮食纽带系统安全性。

近年来国内外关于水-能源-粮食纽带系统的研究成果呈现井喷增长势头<sup>[2]</sup>,相关研究逐渐成为备受关注的新兴主题。学术界关于水-能源-粮食纽带系统研究主题主要涉及关联关系建模与评价<sup>[3-11]</sup>、系统风险<sup>[12]</sup>与管控<sup>[13]</sup>、产出效率<sup>[5]</sup>、粮食安全与虚拟水流动<sup>[14-18]</sup>、可持续发展<sup>[19-21]</sup>等,研究方法多采取数据包络分析<sup>[5]</sup>、系统动力学模型<sup>[3-4]</sup>、主成分分析<sup>[8]</sup>、空间计量学分析<sup>[6]</sup>、耦合协调模型、社会网络分析<sup>[22]</sup>等。关于水-能源-粮食纽带系统评价与协同效应的定量研究大多通过构建水、能源、粮食或结合社会经济子系统进行测度。综合来看,目前对水-能源-粮食纽带系统研究多是独立分析其系统内部匹配程度与可持续性<sup>[23-24]</sup>,重点关注效率评价与系统动力学分析,仅有少数研究将水-能源-粮食纽带系统与经济发展协同分析<sup>[7]</sup>。

进入工业化发展后期,广大发展中国家普遍人口增加、城镇化率不断提升,同时中产阶级占比上升,居民消费模式升级,对资源环境与经济发展的协调可持续性带来巨大的压力。近年来,经济社会快速发展的中国同样面临严峻的水资源短缺与时空分布不均、结构性粮食安全与能源安全趋紧等问题,如何在有限的资源环境及生态禀赋下,综合考量区域间经济发展差异性,协调不同地区资源安全与经济发展的耦合关系,及时有效优化调整发展战略与资源配置,成为亟待研究的重要命题。因此,研究中国区域间资源保障水平与经济系统效率耦合协调发展规律及时空匹配性,对引领中国经济社会更协调有序发展具有至关重要的意义。基于此,本文以除港澳台和西藏地区外的中国 30 个省(自治区、直辖市)(以下简称“省”)为研究区域,采用耦合协调度模型分析各省水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率(total factor productivity, TFP)耦合协调关系及其时空格局,旨在为中国区域可持续发展提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合框架

随着人类活动对资源与环境作用的不断增强,水资源、能源、粮食三者作为资源开发利用核心因素,其形成的资源利用、生态产品、服务产出的资源生态系统,正经历着与经济系统的协同演化过程。

水资源作为重要投入资源参与到一次能源生产与粮食生产中,同时,农业生产与加工、运输与水资源的提取、运输、利用等环节也需消耗能源,另外生物质能转化途径也可将部分能源作物转化为乙醇等能源产品进行利用。基于水、能源、粮食之间的相互转化与系统安全性考量,如何提高整体资源使用效率、保障水-能源-粮食纽带系统的综合安全问题日益突出。

经济高质量增长已成为近年来中国经济系统发展核心命题。全要素生产率在一定程度上不仅可衡量资源配置效率,还可初步判断经济发展阶段。从生产率角度看待发展问题,可以更为有效地剖析经济发展源泉,研究如何深化资源配置,进而提高生产率,推动经济增长。

随着可持续发展理念的深入以及资源环境与经济系统矛盾的日益凸显,单纯追求经济发展无法达到经济、社会与生态的可持续发展,因此,有必要从资源禀赋即资源开采或生产端,与资源消费即资源利用端出发,结合地方经济发展效率,从资源环境承载力和人地关系角度,探究资源禀赋对经济发展耦合协调特性。

### 1.2 评价指标体系构建

根据水-能源-粮食纽带系统安全研究内涵,参考相关研究成果,拟选取水资源子系统、能源子系统、粮食子系统 3 个二级指标,遵循系统性、科学性与可操作性,构建水-能源-粮食纽带系统安全综合评价指标体系(图 1),其中人均用水量、单位 GDP 用水量、水资源开发利用效率、人均能源消费量、单位 GDP 能耗、人口自然增长率为负向指标,其余指标均为正向指标。

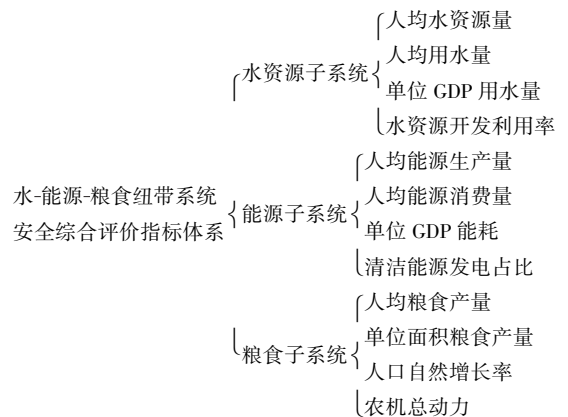


图 1 水-能源-粮食纽带系统安全综合评价指标体系

Fig. 1 Comprehensive evaluation index system of WEF nexus system security

### 1.3 TOPSIS 模型

逼近理想解的排序方法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)可以

同时考虑各个子系统到正理想解与负理想解的距离,可准确、合理地对各个子系统进行评价。因此,本文基于已构建的水-能源-粮食纽带系统安全综合评价指标体系,采用 TOPSIS 法进行水-能源-粮食纽带系统安全综合评价,具体评价方法见文献[7]。

### 1.4 全要素生产率测算

生产率或者全要素生产率可表征经济发展水平与资源配置效率<sup>[25]</sup>,同时,全要素生产率的提高仍是中国经济系统发展的重要目标之一<sup>[26]</sup>。因此,参考相关研究,本文采用 DEA-Malmquist 指数计算全要素生产率,将全要素生产率作为衡量经济增长质量的重要指标。本文选择投入指标为资本存量与就业人数,产出指标选择各省 GDP,其中资本存量与各省 GDP 以 2005 年为基期进行折算,测算方法参考文献[27]。

### 1.5 耦合协调模型

采用耦合度刻画水、能源、粮食子系统与全要素生产率子系统间相互作用、相互影响的程度。各子系统之间的耦合度  $C$  计算公式为

$$C = \left\{ \frac{f_w f_E f_F f_{TFP}}{[(f_w + f_E + f_F + f_{TFP})/4]^4} \right\}^{1/4} \quad (1)$$

式中  $f_w$ 、 $f_E$ 、 $f_F$ 、 $f_{TFP}$  分别为水资源子系统、能源子系统、粮食子系统与全要素生产率子系统的综合评价得分。耦合度取值范围为  $[0, 1]$ ,其值的大小是可持续发展各子系统的质量决定的,越大说明各子系统之间相互作用、相互影响越强烈,具体划分标准见表 1。

表 1 可持续发展耦合度等级划分标准

Table 1 Grading standards of sustainable development coupling degree

耦合度	耦合类型	特征
$>0.7 \sim 1.0$	协调耦合	子系统间耦合进一步加强并呈良性有序发展趋势
$>0.5 \sim 0.7$	磨合	子系统之间开始相互配合,出现良性耦合趋势
$>0.3 \sim 0.5$	拮抗	子系统间相互作用加强,出现优势系统占据主导地位
$0 \sim 0.3$	低耦合	子系统之间开始进行博弈,处于无关状态且向无序发展

为研究 4 个子系统处于何种协调程度,引入耦合协调度模型来更准确地表征水资源子系统、能源子系统、粮食子系统与全要素生产率子系统之间的耦合协调程度:

$$D = \sqrt{CT} \quad (2)$$

其中  $T = \frac{f_w + f_E + f_F + f_{TFP}}{4}$

式中  $D$  为耦合协调度,取值范围为  $[0, 1]$ , $D$  越大,

表示可持续发展子系统之间越协调,当  $D = 1$  时,可持续发展子系统之间达到优质协调状态;反之, $D$  越小,子系统之间越不协调。

为了分层分级表示出可持续发展耦合协调度,结合各子系统的分析数据,将可持续发展耦合协调度划分为 5 个等级,具体划分标准见表 2。

表 2 可持续发展耦合协调度等级划分标准

Table 2 Grading standards of sustainable development coupling coordination degree

耦合协调度	协调类型	特征
$>0.8 \sim 1.0$	优质协调	水-能源-粮食纽带系统与经济发展互相促进、有序发展,已达到高质量发展阶段 可持续发展取得一定成效,水-能源-粮食纽带系统与经济发展相互匹配协调发展
$>0.6 \sim 0.8$	良好协调	水-能源-粮食纽带系统与经济发展逐渐向可持续发展转化
$>0.4 \sim 0.6$	中度协调	水-能源-粮食纽带系统安全存在短板,由于与经济发展不平衡逐渐引发生态安全问题
$>0.2 \sim 0.4$	轻度失调	经济发展与水-能源-粮食纽带系统安全存在严重失衡,已产生严重生态问题
$0 \sim 0.2$	严重失调	

### 1.6 数据来源

数据来自《中国统计年鉴》《中国环境年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国农业统计年鉴》《中国劳动力统计年鉴》以及相关各省统计资源。

## 2 结果与分析

### 2.1 水-能源-粮食纽带系统安全综合水平演化

根据 TOPSIS 法测度 2005—2019 年各省水-能源-粮食纽带系统安全水平,结果如图 2 和表 3、表 4 所示。

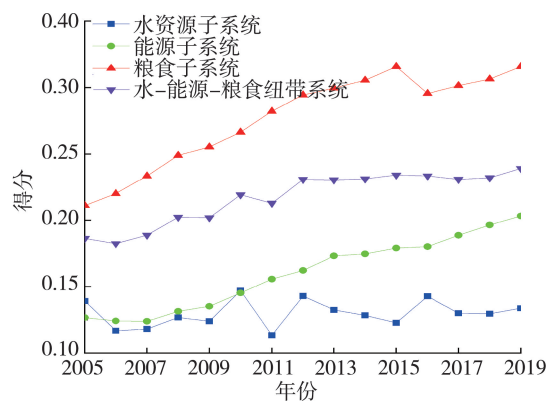


图 2 中国水-能源-粮食纽带系统安全水平演化趋势

Fig. 2 Evolution trend of WEF nexus system security level in China

由图 2 可见,研究期内中国粮食子系统安全得分由 0.2111 增长至 0.3159,增长速度最快,年平均

表3 2005—2019 中国各省水-能源-粮食纽带系统安全综合得分

Table 3 Comprehensive scores of Chinese provincial WEF nexus system security from 2005 to 2019

省份	综合得分				省份	综合得分			
	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年		2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
北京	0.092	0.101	0.131	0.137	河南	0.326	0.393	0.427	0.397
天津	0.088	0.101	0.104	0.152	湖北	0.166	0.218	0.249	0.236
河北	0.330	0.380	0.406	0.325	湖南	0.221	0.279	0.317	0.345
山西	0.102	0.124	0.151	0.095	广东	0.153	0.171	0.182	0.184
内蒙古	0.133	0.164	0.220	0.224	广西	0.199	0.230	0.305	0.276
辽宁	0.155	0.166	0.182	0.199	海南	0.168	0.246	0.134	0.162
吉林	0.181	0.214	0.235	0.252	重庆	0.121	0.134	0.136	0.147
黑龙江	0.142	0.213	0.284	0.359	四川	0.211	0.225	0.256	0.283
上海	0.143	0.152	0.164	0.203	贵州	0.119	0.151	0.194	0.186
江苏	0.185	0.216	0.254	0.264	云南	0.204	0.223	0.244	0.203
浙江	0.173	0.211	0.204	0.191	陕西	0.089	0.115	0.134	0.131
安徽	0.189	0.254	0.302	0.297	甘肃	0.081	0.099	0.134	0.134
福建	0.204	0.233	0.204	0.212	青海	0.538	0.484	0.400	0.524
江西	0.204	0.312	0.258	0.264	宁夏	0.057	0.073	0.096	0.118
山东	0.368	0.426	0.458	0.406	新疆	0.253	0.271	0.261	0.265

表4 2019 年中国各省水、能源、粮食子系统安全得分分布

Table 4 Score distribution of Chinese provincial WEF subsystem security in 2019

省份	水资源子系统	能源子系统	粮食子系统	省份	水资源子系统	能源子系统	粮食子系统
北京	0.011	0.304	0.198	河南	0.008	0.185	0.740
天津	0.006	0.141	0.221	湖北	0.061	0.189	0.369
河北	0.007	0.078	0.572	湖南	0.185	0.185	0.502
山西	0.013	0.515	0.145	广东	0.109	0.222	0.248
内蒙古	0.106	0.685	0.324	广西	0.261	0.148	0.294
辽宁	0.033	0.072	0.297	海南	0.163	0.174	0.160
吉林	0.113	0.128	0.361	重庆	0.096	0.191	0.191
黑龙江	0.246	0.098	0.480	四川	0.201	0.169	0.368
上海	0.010	0.221	0.284	贵州	0.189	0.148	0.183
江苏	0.015	0.211	0.432	云南	0.193	0.151	0.216
浙江	0.138	0.194	0.238	陕西	0.076	0.373	0.180
安徽	0.050	0.205	0.493	甘肃	0.073	0.096	0.186
福建	0.211	0.214	0.213	青海	0.938	0.062	0.072
江西	0.27	0.192	0.257	宁夏	0.008	0.221	0.175
山东	0.01	0.127	0.762	新疆	0.212	0.203	0.315

增长率为 2.921%，主要是中国各级政府极为重视粮食安全，提出“粮食安全是国家重要基础”并出台系列政策措施提高农业科技贡献率、农业机械化率及农产品良种化进程，不断提升中国粮食安全保障能力，由此中国粮食生产已保持“十八连丰”，粮食总产量已达到 68 285 万 t。研究期内中国能源子系统安全得分由 0.126 7 增长至 0.203 3，呈现出稳定增长态势，年平均增长率为 3.435%，能源安全是国民经济发展的基础，党的十八大以来，中国政府提出能源供给革命，在降低资源消耗、降低 GDP 能耗的同时，大力发展非化石清洁能源，光伏发电装机量领先全球。研究期内中国水资源子系统得分由 0.139 1 下降至 0.133 7，呈现出波动平衡状态，主要是由于水资源作为自然资源禀赋之一，具有天然属性，短期内其数量不会有显著增加，但随着经

济发展与城镇化率的提升，居民用水需求以及农业、工业、生态用水需求增加，伴随着水资源短缺与部分地区水资源过度开发，导致中国水资源安全保障问题较为突出。综合来看，2005—2019 年中国水-能源-粮食纽带系统安全总体得分呈现波动上升趋势，由 0.186 4 增长至 0.239 2，年平均增长率为 1.797%，增长较快时期为 2009—2012 年，由图 2 可知，中国水-能源-粮食纽带系统安全得分的上升主要源于粮食子系统与能源子系统安全保障水平的不断上升，而水资源子系统安全水平应是未来需要重点应对的领域。

由表 3 和表 4 可见，在空间维度上，水-能源-粮食纽带系统安全综合得分高值区表现出明显的“双极分布”的空间分布特征，以青海为核心的西部高安全水平中心和以河北、山东、河南为核心的环渤海



地区高安全水平中心,以及甘肃、宁夏、陕西、山西4省构成北方低安全条带,其分布的地域性与地带差异性明显,高值区表现出核心边缘特征,低值区表现出条带性特征。时间维度上,中国水-能源-粮食纽带系统安全得分表现出逐渐增大态势。子系统内部结构上,2005—2019年青海与河北、山东、河南为系统安全得分较高地区,其中河北、山东、河南粮食子系统得分较高,青海水资源子系统得分较高。甘肃、宁夏、陕西、山西4省持续为得分较低地区,主要限制因素为水资源,水资源短缺严重使得系统安全综合得分较低。西南地区与东南地区综合安全水平有所下降,因研究期内西南各省水资源与能源子系统安全水平处于低位波动,进而限制了西南地区系统安全综合得分。黑龙江安全水平有所上升,主要是因为黑龙江地区水资源子系统与粮食子系统安全得分上升较快。

## 2.2 水-能源-粮食纽带系统安全与全要素生产率耦合协调时空分异

### 2.2.1 全要素生产率时间演化

根据 DEA-Malmquist 指数方法测度 2005—2019 年中国各省全要素生产率,进而汇总得到中国全要素生产率变化趋势如图 3 所示。研究期内,中国全要素生产率呈现波动上升趋势,均值约为 1.278,总体呈现平稳发展特征,2012 年后略有上升,总体年均增速为 0.017%,测算结果与蔡昉<sup>[26]</sup>的研究结果接近。2008—2012 年中国全要素生产率有明显下降趋势,2008 年受金融危机冲击,由金融危机引发的全球经济低迷、需求不振,对出口导向的中国沿海地区制造业影响较大,同时全国各地高投资、高增长的发展模式也逐渐式微,随着中国政府一系列金融财政措施的出台,2012 年第三季度中国经济触底反弹,从经济危机阴影中走向复苏,全要素生产率也随之缓慢增大。总体看来,中国经济已走入全要素增长率放缓阶段,如何立足本土,把握中国经济内循环与外循环关系,提振生产率将成为未来经济系统面临的重要考验。

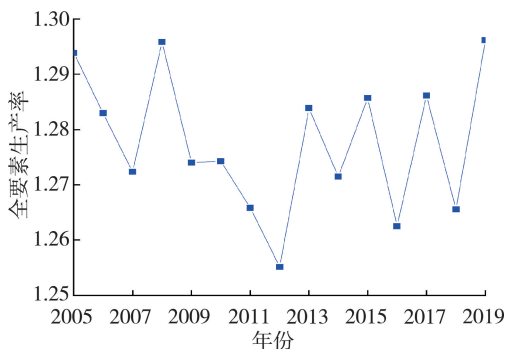


图 3 中国全要素生产率演化趋势

Fig. 3 Evolution trend of TFP scores in China

### 2.2.2 水-能源-粮食纽带系统安全与全要素生产率耦合协调演化

根据构建的耦合协调度模型,分别测算出 2005—2019 年耦合度与耦合协调度,结果如图 4 所示。随着社会经济协调发展及资源环境改善,中国水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合度与耦合协调度呈现波动上升趋势。研究期内,耦合度由 0.4814 增长至 0.5456,年均增长速度为 0.898%,由拮抗阶段过渡到磨合阶段,耦合协调度由 0.4503 增长至 0.5069,年均增长速度为 0.849%。

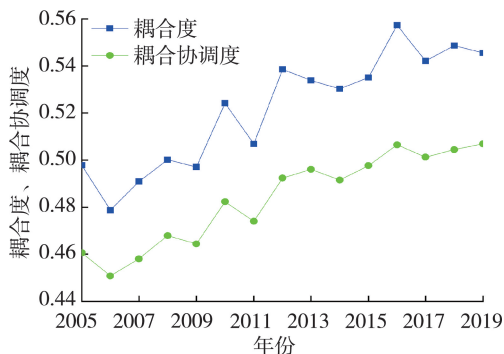


图 4 中国水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合协调演化趋势

Fig. 4 Evolution trend of coupling coordination between WEF nexus system and TFP in China

### 2.2.3 水-能源-粮食纽带系统安全与全要素生产率耦合度时空分异

由表 5 可看出,中国水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合度的高值区主要包括四川、广西、江西、福建、湖南、内蒙古等资源环境较优良且与经济发展匹配度较高的地区,低值区主要集中在北京、天津、河北、山东等环渤海地区以及宁夏、青海等西北地区。空间分布整体呈“南高北低”的空间格局特征,区域差异显著。从时间系列来看,各省水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合度在 0.20 ~ 0.77 之间,大多处于磨合阶段和拮抗阶段,分别占比 50.00% 和 26.67%,仍有 16.67% 的省份处于低耦合阶段。相较于 2005 年,2010 年各省水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合度逐步提升,由拮抗阶段进入为磨合阶段,处于磨合阶段与拮抗阶段的省份占比分别提升至 53.33% 和 36.67%。至 2015 年,各省水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合度在 0.30 ~ 0.76 之间,低耦合度省份彻底消失。2019 年,各省水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合度在 0.23 ~ 0.77 之间,相比 2015 年大部分省份耦合度进一步增大。

综合来看,以京津冀鲁为代表的低值区省份,水资源短缺,且时空分布不均,水资源短缺不仅挤压农

表5 中国各省水-能源-粮食纽带系统安全与全要素生产率耦合度

Table 5 Coupling degree of Chinese provincial WEF nexus system security and TFP in China

省份	耦合度				省份	耦合度			
	2005年	2010年	2015年	2019年		2005年	2010年	2015年	2019年
北京	0.259	0.327	0.325	0.350	河南	0.513	0.434	0.396	0.358
天津	0.220	0.310	0.304	0.235	湖北	0.585	0.646	0.626	0.539
河北	0.231	0.305	0.319	0.284	湖南	0.573	0.700	0.736	0.767
山西	0.391	0.426	0.391	0.365	广东	0.609	0.641	0.620	0.670
内蒙古	0.619	0.654	0.711	0.679	广西	0.668	0.723	0.750	0.733
辽宁	0.427	0.532	0.411	0.443	海南	0.580	0.632	0.547	0.642
吉林	0.564	0.534	0.633	0.660	重庆	0.474	0.424	0.516	0.658
黑龙江	0.546	0.596	0.649	0.632	四川	0.710	0.638	0.722	0.711
上海	0.264	0.316	0.407	0.364	贵州	0.565	0.534	0.645	0.596
江苏	0.401	0.449	0.526	0.396	云南	0.505	0.666	0.598	0.591
浙江	0.551	0.559	0.674	0.688	陕西	0.488	0.470	0.453	0.592
安徽	0.630	0.627	0.606	0.583	甘肃	0.358	0.492	0.459	0.545
福建	0.685	0.667	0.606	0.764	青海	0.477	0.532	0.354	0.476
江西	0.744	0.690	0.751	0.730	宁夏	0.241	0.203	0.334	0.309
山东	0.428	0.362	0.331	0.350	新疆	0.630	0.636	0.653	0.657

业用水,加剧粮食安全隐患,同时对产业经济良性发展带来巨大挑战,区域内各省份全要素生产率较低,水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率处于拮抗或低耦合阶段。中国政府协同推进区域一体化战略布局,通过推动城市间以功能互补、错位发展、整体共赢的多元化、多层次合作,环渤海地区各省正逐渐引导经济发展高质量转型。以江西、湖南、广西、四川为代表的南方高值区省份,其水资源丰沛,能源供需总体宽松,也是中国主要粮食产区,资源环境安全水平与其全要素生产率水平互相优化促进,逐渐走向有序、协调的可持续发展之路。

#### 2.2.4 水-能源-粮食纽带系统安全与全要素生产率耦合协调度时空分异

由表6可看出,在空间维度上,各省水-能源-粮

食纽带系统与全要素生产率耦合协调度与耦合度空间分布相关性较强,耦合协调度与耦合度大致吻合,整体由南至北呈现出“高一低—高”的空间分布特征,其分布的地带性差异明显。在时间维度上,耦合协调度整体呈现上升趋势,全国平均水平由2005年的0.46上升至2019年的0.51。2005年,各省耦合协调度在0.29~0.55之间,最低值为宁夏,最高值为湖南,该时期耦合协调类型主要有中度协调和轻度协调两种,分别占比86.67%和13.33%。2010年,各省耦合协调度处于0.31~0.63之间,最低值为天津,最高值为江西,耦合协调度类型有良好协调、中度协调和轻度失调3种,占比分别为3.33%、76.67%和20.00%,其中江西率先进入良好协调阶段。2015年,各省耦合协调度介于0.34~0.66之

表6 中国各省水-能源-粮食纽带系统安全与全要素生产率耦合协调度

Table 6 Coupling coordination degree of Chinese provincial WEF nexus system security and TFP in China

省份	耦合协调度				省份	耦合协调度			
	2005年	2010年	2015年	2019年		2005年	2010年	2015年	2019年
北京	0.322	0.333	0.391	0.421	河南	0.474	0.496	0.463	0.438
天津	0.297	0.315	0.358	0.372	湖北	0.476	0.496	0.536	0.530
河北	0.407	0.382	0.381	0.374	湖南	0.555	0.539	0.582	0.604
山西	0.409	0.430	0.469	0.442	广东	0.483	0.496	0.527	0.536
内蒙古	0.511	0.595	0.655	0.652	广西	0.545	0.535	0.590	0.581
辽宁	0.424	0.443	0.405	0.410	海南	0.481	0.519	0.500	0.521
吉林	0.496	0.528	0.499	0.522	重庆	0.473	0.479	0.497	0.493
黑龙江	0.477	0.510	0.536	0.600	四川	0.526	0.529	0.545	0.595
上海	0.320	0.343	0.392	0.415	贵州	0.457	0.500	0.533	0.541
江苏	0.449	0.438	0.492	0.459	云南	0.550	0.524	0.570	0.562
浙江	0.496	0.548	0.538	0.539	陕西	0.447	0.515	0.528	0.534
安徽	0.496	0.528	0.554	0.524	甘肃	0.433	0.399	0.403	0.439
福建	0.510	0.536	0.563	0.559	青海	0.502	0.512	0.502	0.512
江西	0.545	0.624	0.573	0.599	宁夏	0.296	0.369	0.344	0.383
山东	0.442	0.448	0.420	0.427	新疆	0.518	0.563	0.583	0.620

间,相比2010年略有上升,其中内蒙古进入良好协调阶段。2019年,各省耦合协调度介于0.37~0.66之间,平均耦合协调度逐渐增大,最低值为天津,最高值为内蒙古,耦合协调类型有良好协调、中度协调和轻度失调3种,占比分别为10.00%、80.00%和10.00%。

综合来看,社会经济的发展与水、能源和粮食子系统安全水平的动态协同演化逐渐趋于良性,尤其生态文明战略提出后,各级政府倡导协调生态环境与经济发展之间关系,通过资源环境不断优化与经济高质量发展转型的互相促进,正引导中国水-能源-粮食纽带系统与经济发展逐渐向健康有序的新发展阶段迈进。

### 3 结论

a. 中国水-能源-粮食纽带系统安全高值区呈现“两极分布”的空间格局,系统安全水平整体呈现逐年提升趋势,3个子系统中,粮食子系统安全水平最高,能源子系统次之,水资源子系统最低,安全水平增速粮食子系统最高,能源子系统次之,水资源子系统最低,综合来看水资源子系统安全水平是中国经济、社会与民生发展短板。

b. 中国全要素生产率在2005—2019年呈波动上升趋势,均值约为1.278,年均增速为0.017%,中国经济已进入增速放缓阶段。中国水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合协调时空差异格局显著,其耦合协调度呈现增长趋势。空间维度上由南至北呈现出“高一低一高”的空间分布特征,形成聚集的高值区中心与低值区中心;时间维度上,中国水-能源-粮食纽带系统与全要素生产率耦合协调关系呈现向高水平耦合阶段演进的趋势。

### 参考文献:

[1] HOFF H. Understanding the nexus: background paper for the Bonn 2011 conference: the water energy and food security nexus [R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.

[2] 黄雅丽,邓晓军. 基于 Citespace 的“水-能源-粮食”纽带关系研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(9): 172-181. (HUANG Yali, DENG Xiaojun. Research progress on the “water-energy-food” nexus based on Citespace[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(9): 172-181. (in Chinese))

[3] 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[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(6): 74-84. (WANG Huimin, HONG Jun, LIU Gang. Simulation research on different policies of regional

green development under the nexus of water-energy-food [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(6): 74-84. (in Chinese))

[4] 王雨,王会肖,杨雅雪,等. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 8-15. (WANG Yu, WANG Huixiao, YANG Yaxue, et al. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 8-15. (in Chinese))

[5] 曾萌,张园园,王红瑞,等. 中国水-能源纽带关系双向消耗核算研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 159-165. (ZENG Meng, ZHANG Yuanyuan, WANG Hongrui, et al. Bidirectional consumption accounting of water-energy nexus in China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 159-165. (in Chinese))

[6] 李成宇,张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 120-128. (LI Chengyu, ZHANG Shiqiang. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(1): 120-128. (in Chinese))

[7] 支彦玲,陈军飞,王慧敏,等. 共生视角下中国区域“水-能源-粮食”复合系统适配性评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 129-139. (ZHI Yanling, CHEN Junfei, WANG Huimin, et al. Assessment of water-energy-food nexus fitness in China from the perspective of symbiosis [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(1): 129-139. (in Chinese))

[8] 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[J]. 地理科学, 2018, 38(10): 1653-1660. (BAI Jingfeng, ZHANG Haijun. Spatio-temporal variation and driving force of water-energy-food pressure in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1653-1660. (in Chinese))

[9] 刘凌燕,王慧敏,刘钢,等. 供需视角下水-能源-粮食系统风险的驱动机理与政策仿真: 面向东北三省的系统动力学分析[J]. 软科学, 2020, 34(12): 52-60. (LIU Lingyan, WANG Huimin, LIU Gang, et al. Driving mechanism and policy simulation of water-energy-food risks from the perspective of supply and demand: a case study of Northeast China for system dynamics analysis [J]. Soft Science, 2020, 34(12): 52-60. (in Chinese))

[10] SUN Caizhi, YAN Xiaodong, ZHAO Liangshi. Coupling efficiency measurement and spatial correlation characteristic of water-energy-food nexus in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 164: 105151.

[11] SÁNCHEZ-ZARCO X G, MORA-JACOBO E G, GONZÁLEZ-BRAVO R, et al. Water, energy, and food security assessment in regions with semiarid climates [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2020, 22

- (10):2145-2161.
- [12] 米红,周伟. 未来30年我国粮食、淡水、能源需求的系统仿真[J]. 人口与经济,2010(1):1-7. (MI Hong, ZHOU Wei. The system simulation of China's grain, fresh water and energy demand in the next 30 years [J]. Population & Economics,2010(1):1-7. (in Chinese))
- [13] 李良,毕军,周元春等. 基于粮食-能源-水关联关系的风险管控研究进展[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(7):85-92. (LI Liang, BI Jun, ZHOU Yuanchun, et al. Research progress of regional environmental risk management; from the perspectives of food-energy-water nexus[J]. China Population, Resources and Environment, 2018,28(7):85-92. (in Chinese))
- [14] 汪芝晗,杨谨,刘其芸,等. “一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动[J]. 资源科学,2021,43(5):974-986. (WANG Yihan, YANG Jin, LIU Qiyun, et al. Virtual water and embodied energy transfer in grain trade across the countries along the “Belt and Road”[J]. Resources Science,2021,43(5):974-986. (in Chinese))
- [15] 郝帅,孙才志,宋强敏. 中国能源-粮食生产对水资源竞争的关系:基于水足迹的视角[J]. 地理研究,2021,40(6):1565-1581. (HAO Shuai, SUN Caizhi, SONG Qiangmin. Study on the competitive relationship between energy and food production for water resources in China; from a perspective of water footprint [J]. Geographical Research,2021,40(6):1565-1581. (in Chinese))
- [16] 陈莎,吕鹤,李素梅,等. 面向水资源可持续利用的综合水足迹评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(4):22-28. (CHEN Sha, LYU He, LI Sumei, et al. Methods of comprehensive water footprint assessment for sustainable utilization of water resources [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):22-28. (in Chinese))
- [17] 刘静,余钟波. 江苏省农产品水足迹与虚拟水流动及其环境影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):320-326. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water footprints and virtual water flows of agricultural products in Jiangsu and their environmental impacts [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (4): 320-326. (in Chinese))
- [18] 孙才志,王中慧. 中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易的虚拟水量流动特征[J]. 水资源保护,2019,35(1):14-19. (SUN Caizhi, WANG Zhonghui. Characteristics of virtual water volume flow of agricultural products trade between China and countries along “Belt and Road” [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (1):14-19. (in Chinese))
- [19] CHAMAS Z, NAJM M A, AL-HINDI M, et al. Sustainable resource optimization under water-energy-food-carbon nexus [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278:123894.
- [20] NHAMO L, NDLELA B, MPANDELE S, et al. The water-energy-food nexus as an adaptation strategy for achieving sustainable livelihoods at a local level[J]. Sustainability, 2020,12(20):8582.
- [21] SMITH G, BLOCK L B, AJAMI N, et al. Trade-offs across the water-energy-food nexus: a triple bottom line sustainability assessment of desalination for agriculture in the San Quintín Valley, Mexico [J]. Environmental Science & Policy, 2020,114:445-452.
- [22] WOLDE Z, WEI W, LIKESSA D. et al. Understanding the impact of land use and land cover change on water-energy-food nexus in the Gidabo Watershed, East African Rift Valley[J]. Natural Resources Research, 2021, 30 (3): 2687-2702.
- [23] 赵良仕,刘思佳,孙才志. 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究[J]. 水资源保护,2021,37(1):69-78. (ZHAO Liangshi, LIU Sijia, SUN Caizhi. Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection,2021,37(1):69-78. (in Chinese))
- [24] 孙才志,郝帅,赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征[J]. 水资源保护,2021,37(1):61-68. (SUN Caizhi, HAO Shuai, ZHAO Liangshi. Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources-energy-food nexus system efficiency in China [J]. Water Resources Protection,2021,37(1):61-68. (in Chinese))
- [25] 蔡昉. 生产率、新动能与制造业:中国经济如何提高资源重新配置效率[J]. 中国工业经济,2021(5):5-18. (CAI Fang. Productivity, growth momentum, and manufacturing: how China can regain its resources reallocate efficiency [J]. China Industrial Economics, 2021(5):5-18. (in Chinese))
- [26] 蔡昉. 导致我国全要素生产率增长减速的四个趋势[J]. 经济研究参考,2016(13):5-7. (CAI Fang. Four trends causing China's total factor productivity growth decline [J]. Review of Economic Research,2016(13):5-7. (in Chinese))
- [27] 孟令杰,李静. 中国全要素生产率的变动趋势:基于非参数的Malmquist指数方法[J]. 产业经济评论,2004,3(2):187-198. (MENG Lingjie, LI Jing. The tendency of total factor productivity of China; based on the method of non-parameter Malmquist index [J]. Review of Industrial Economics,2004,3(2):187-198. (in Chinese))

(收稿日期:2021-10-15 编辑:熊水斌)