

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2022.0026

汪中华,田宇薇.我国水-能源-粮食耦合关系及影响因素[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):243-252. WANG Z H, TIAN Y W. Water-energy-food nexus and its influencing factors in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2): 243-252. (in Chinese)

我国水-能源-粮食耦合关系及影响因素

汪中华,田宇薇

(哈尔滨理工大学经济管理学院,哈尔滨 150000)

摘要:为缓解我国水、能源和粮食资源紧张问题,促进资源可持续利用,构建水-能源-粮食系统,利用耦合协调度模型对我国的30个省(自治区、直辖市)进行测算,并利用空间杜宾模型分析主要影响因素。结果表明,2003—2017年,我国能源、粮食评价指数高于水资源评价指数,系统综合评价指数逐年递增;大部分省份耦合协调度处于初级协调水平且呈现逐年上升的态势,个别省份耦合协调度濒临失调;耦合协调度空间自相关性较强,虽有明显波动,但是呈现逐年加强的态势;影响耦合协调度的主要因素有从业人口数、固定资产投资额、人均生产总值、人口总数、文盲人口占比、工业污染排放、城镇化。

关键词:水-能源-粮食;耦合协调度模型;空间杜宾模型;综合评价指数;空间自相关性

中图分类号:TV214;F062.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



水资源、能源和粮食是人类社会发展的基础,其短缺对全球经济发展和生态健康产生影响^[1],这3种资源间存在千丝万缕的关系和复杂的循环^[2-3],其中任意子系统的变动都会对其他系统产生影响^[4]。“水-能源-粮食系统”的概念一经提出就引起国内外学术界的积极探讨。

国外较早对水-能源-粮食耦合关系进行研究。在定性分析方面的研究有:Simpson等^[5]基于水-能源-粮食框架,总结了影响水-能源-粮食安全关系的一些主要因素,认为水-能源-粮食纽带关系可以成为推进可持续性发展的有效工具;Melo等^[6]指出森林和景观恢复是改善水-能源-粮食关系的重要措施,并且提出“森林安全”是构成新型水、能源、粮食和森林安全关系框架的第四个基本维度;Ringle等^[7]描述了不同区域内水、能源和粮食的关联关系和核心元素。在定量分析方面的研究有:Bazilian等^[8]利用综合建模方法对水-能源-粮食关系进行研究;Olsson^[9]基于环境科学视角进行分析;Sahin等^[10]利用历史

数据基于多元统计方法研究了系统间的关系。更进一步地,部分学者^[11-13]针对提高农作物产量、水-能源-粮食关系的安全程度等方面展开研究,为制定区域可持续发展战略提供建议。

我国对于水-能源-粮食关系的研究相对开展较晚,最初侧重于对水-能源-粮食耦合关系的分析^[14-18],后期同样关注定量分析,包括对系统仿真模型^[19-21]、耦合协调度模型、投入产出模型以及空间计量模型的应用。耦合协调度模型在分析水-能源-粮食关系时使用较为广泛,如:赵良仕等^[22]测算黄河流域水-能源-粮食的耦合协调度水平,发现水-能源-粮食的耦合协调度逐年变好;邓鹏等^[23]以江苏省为研究对象,计算近15年该省的耦合协调度,利用其预测未来5年的变化趋势;张洪芬等^[24]综合评价京津冀的水-能源-粮食发展情况,并测算3个系统间的耦合协调发展水平,结果显示3个系统间的综合评价水平逐年上升,耦合协调度水平也有很大的提升。还有学者构建水-能源-粮食系统投入产出体

收稿日期:2021-04-10 修回日期:2021-10-10 网络出版时间:2021-10-14

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211014.1304.002.html

基金项目:国家社科基金项目(20BMZ156)

作者简介:汪中华(1970—),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要从事资源环境经济学研究。E-mail:wangzhonghua@126.com

通信作者:田宇薇(1996—),女,黑龙江鹤岗人,主要从事资源环境经济学研究。E-mail:tianyuwei199694@163.com

系,对我国的 30 个省(自治区、直辖市)进行投入产出的有效性进行分析^[25-26]。空间计量模型主要用于影响因素的研究,该模型在水-能源-粮食耦合关系研究应用较少^[27]。

就全国而言:一方面,本文进一步创新原有的水-能源-粮食指标体系,选用耦合协调度模型定量分析水-能源-粮食耦合关系;另一方面,考虑到空间的相关性,利用空间杜宾模型剖析影响耦合协调度的因素。由于数据的缺失,本文研究包括我国的 30 个省(自治区、直辖市),数据来源于《中国统计年鉴》《能源统计年鉴》以及各省统计年鉴。

1 构建水-能源-粮食耦合协调度模型

1.1 指标体系的构建

科学合理的指标选取是计算水-能源-粮食耦合协调度的前提,结合研究区域的真实情况,参考王玉宝等^[28]对于水-能源-粮食耦合关系的研究,构建指标体系,见表 1。

表 1 水-能源-粮食系统指标体系

Tab. 1 Index system of water-energy-food system

系统	指标体系	指标性质
水资源	水资源总量/亿 t	+
	人均用水量/m ³	-
	生活用水量/亿 m ³	-
	生产用水量/亿 m ³	-
	农业用水量/亿 m ³	-
	供水综合生产能力/万 m ³	+
	废水排放总量/亿 t	-
	万元 GDP 用水量/m ³	-
能源	水资源开发利用率/%	+
	能源消费总量/万 t	-
	电力消费量/(亿 kW·h)	-
	第三产业增加值占比/%	+
	人均能源消费量/t	-
	第二产业能源消费占比/%	-
	煤炭消费量/万 t	-
	能源消耗强度/t	-
粮食	第三产业能源消费占比/%	-
	受灾面积/10 ³ hm ²	-
	粮食单产/(t·hm ⁻²)	+
	化肥施用量/万 t	-
	粮食消费价格指数/%	+
	人口自然增长率/%	-
	粮食播种面积占比/%	+

1.2 标准化处理

对数据进行标准化处理,标准化过程见式(1)和(2)。

$$\text{正向指标 } X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (1)$$

$$\text{逆向指标 } X'_{ij} = \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (2)$$

式中: X'_{ij} 为第 i 年指标 j 标准化后的数据; X_{ij} 为原始数据; $\max X_{ij}$ 为最大值; $\min X_{ij}$ 为最小值。

1.3 指标权重的确定

利用熵值法确定权重,如下所示。

计算指标值的比重,公式为

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad (3)$$

式中: m 表示统计年限; P_{ij} 为指标值的比重。

计算指标信息熵,公式为

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad 0 \leq e_j \leq 1 \quad (4)$$

计算信息熵冗余度,公式为

$$g_j = 1 - e_j \quad (5)$$

计算指标权重,公式为

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^m g_j} \quad (6)$$

计算得出各指标权重见表 2。

表 2 水-能源-粮食系统指标权重

Tab. 2 Index weights of water-energy-food system

系统	指标体系	权重/%
水资源	水资源总量	15.52
	人均用水量	1.11
	生活用水量	9.61
	生产用水量	15.46
	农业用水量	11.23
	供水综合生产能力	11.79
	废水排放总量	1.16
	万元 GDP 用水量	0.37
能源	水资源开发利用率	33.75
	能源消费总量	11.22
	电力消费量	7.97
	第三产业增加值占比	32.00
	人均能源消费量	6.86
	第二产业能源消费占比	20.21
	煤炭消费量	10.98
	能源消耗强度	3.65
粮食	第三产业能源消费占比	7.11
	受灾面积	4.34
	粮食单产	31.81
	化肥施用量	11.21
	粮食消费价格指数	6.52
	人口自然增长率	26.09
	粮食播种面积占比	20.03

1.4 研究方法

综合发展指数模型。分别构建水资源、能源、粮食综合发展指数,公式为

水资源系统发展综合指数

$$f(x) = \sum_{i=1}^n W_i X'_i \quad (7)$$

能源系统综合发展指数

$$g(y) = \sum_{s=1}^n W_s Y'_s \quad (8)$$

粮食系统综合发展指数

$$h(z) = \sum_{k=1}^n W_k Z'_k \quad (9)$$

水-能源-粮食系统综合发展指数

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) + \gamma h(z) \quad (10)$$

式中: W_i 、 W_s 、 W_k 分别为水资源、能源、粮食各指标的权重; X'_i 、 Y'_s 、 Z'_k 分别为第 i 年各指标标准化后的数值; t 、 s 、 k 代表各系统选取的指标数量;各系统的综合发展指数越高代表各系统发展越好,反之亦然。 T 代表水-能源-粮食系统综合发展指数, α 、 β 、 γ 为各个子系统对社会发展的影响程度权重,参考尹庆民等^[29]的观点认为 3 个系统对社会的影响程度相同,所以 $\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{3}$ 。

耦合协调度模型。分别计算耦合度和耦合协调度,其公式为

$$\text{耦合度 } C = \frac{3\sqrt[3]{f(x)g(y)h(z)}}{f(x)g(y)h(z)} \quad (11)$$

$$\text{耦合协调度 } D = \sqrt{C \times T} \quad (12)$$

参考文献^[30]对耦合协调度的划分标准,见表 3。

表 3 耦合协调度等级划分标准

Tab. 3 Classification of coupling coordination degree

耦合协调度	协调等级
$0 \sim < 0.1$	极度失调
$\geq 0.1 \sim < 0.2$	严重失调
$\geq 0.2 \sim < 0.3$	中度失调
$\geq 0.3 \sim < 0.4$	轻度失调
$\geq 0.4 \sim < 0.5$	濒临失调
$\geq 0.5 \sim < 0.6$	勉强协调
$\geq 0.6 \sim < 0.7$	初级协调
$\geq 0.7 \sim < 0.8$	中级协调
$\geq 0.8 \sim < 0.9$	良好协调
$\geq 0.9 \sim < 1.0$	优质协调

2 水-能源-粮食耦合协调度分析

2.1 水-能源-粮食综合发展指数分析

利用式(1)至式(10)计算水资源系统、能源系统、粮食系统发展指数以及水-能源-粮食系统综合发展指数,见图 1 和表 4。由图 1 可知:我国水-能

源-粮食系统中,粮食系统发展指数较高,2003—2004 年出现明显下降的态势,2004—2005 年迅速回升。在此之后,2006—2017 年总体呈现上升趋势,偶尔出现小幅度的波动。其次,能源系统发展指数波动较为明显:2003—2008 年,发展指数呈现逐年下降的趋势;2008—2009 年有小幅度的提升;2009—2017 年出现“U”形分布;2011 年为转折点,2011 年后逐年上升。我国水资源系统发展指数最低,发展指数徘徊在 0.17~0.20。综合水资源系统、能源系统、粮食系统发展指数,我国水-能源-粮食系统综合发展指数呈现整体上升趋势:2004 年出现小幅下降;2004—2011 呈现波动上升;2011—2017 年逐年稳步上升。

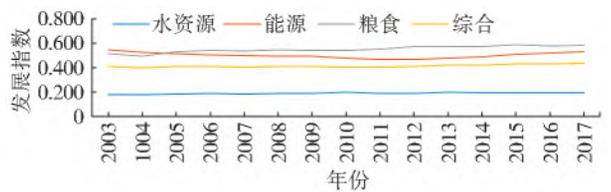


图 1 水资源系统、能源系统及粮食系统评价指数及综合发展指数

Fig. 1 Evaluation index and comprehensive development index of water resources system, energy system and grain system

从表 4 可以看出,水资源系统发展指数较高的省份多集中在东部地区,广东省、江苏省水资源丰富,利用合理,水资源发展指数远远高于其他省市。能源系统发展指数均值为 0.502,有 16 个省份达到均值,多分布于资源丰富的西北和东部地区,其中北京市、上海市使用清洁能源较早,促进了能源系统的发展。我国粮食发展指数较高的省市均集中分布在东北地区。东北三省是我国主要的粮食种植基地,粮食发展指数遥遥领先。农业水平欠发达的省份,例如,海南、青海等粮食发展指数较低。水-能源-粮食系统综合发展指数均值为 0.414,较低的省份主要分布在西部地区。西部地区交通不便,地理环境多样化、资源开发难度大,大部分省市综合发展指数低于 0.400。水-能源-粮食系统综合发展指数较高的省份多分布在资源较为丰富的地区,例如广东、湖南。

2.2 耦合协调度分析

耦合度可以度量系统间影响程度强弱,但无法衡量 3 个系统间协调水平,所以利用耦合协调度模型分析水资源系统、能源系统和粮食系统间的关系。耦合协调度均值见表 5。根据耦合协调度等级划分标准,除青海之外,其他省份耦合协调度都已达到 0.5 以上,达到勉强协调。从整体水平看,耦合协调度较低,呈现逐年递增态势。从各个省份来看,我国东部地区耦合协调度为 0.617,其中有 6 个省份达到

东部平均水平。东部 11 个省份中,有 7 个省份耦合协调度达到初级协调,初级协调率 64%,其中海南省耦合协调度最低,只有 0.506,仅仅高于濒临失调水平,海南省的主要经济来源是旅游项目,对于资源和环境的保护利用较差。中部地区耦合协调度均值为 0.606,其中超过中部平均水平的省份有 5 个,超过平均水平也意味着达到初级协调。

表 4 水资源系统、能源系统及粮食系统评价指数及综合发展指标

Tab. 4 Evaluation index and comprehensive development index of water resources system,energy system and grain system

地区	省(自治区、直辖市)	系统评价指数			综合发展指数
		水资源	能源	粮食	
东部地区	北京	0.148	0.817	0.650	0.538
	天津	0.108	0.567	0.667	0.448
	河北	0.165	0.360	0.517	0.347
	辽宁	0.146	0.449	0.768	0.454
	山东	0.185	0.315	0.557	0.353
	江苏	0.398	0.388	0.674	0.486
	上海	0.266	0.636	0.696	0.533
	浙江	0.211	0.481	0.604	0.432
	福建	0.194	0.523	0.552	0.423
	广东	0.431	0.469	0.502	0.467
	海南	0.062	0.647	0.424	0.378
均值	0.210	0.514	0.601	0.442	
中部地区	山西	0.085	0.407	0.526	0.340
	吉林	0.112	0.511	0.801	0.475
	黑龙江	0.191	0.512	0.652	0.452
	安徽	0.215	0.486	0.507	0.403
	江西	0.209	0.520	0.548	0.426
	河南	0.180	0.390	0.514	0.361
	湖北	0.241	0.496	0.563	0.563
	湖南	0.278	0.524	0.565	0.456
	均值	0.189	0.481	0.585	0.435
西部地区	重庆	0.109	0.549	0.609	0.423
	四川	0.274	0.483	0.594	0.450
	贵州	0.125	0.565	0.426	0.372
	云南	0.184	0.527	0.438	0.383
	陕西	0.091	0.509	0.510	0.370
	甘肃	0.107	0.543	0.462	0.371
	青海	0.068	0.500	0.379	0.316
	宁夏	0.305	0.481	0.456	0.414
	新疆	0.193	0.581	0.428	0.373
	内蒙古	0.118	0.402	0.402	0.354
	广西	0.252	0.524	0.424	0.400
均值	0.166	0.515	0.466	0.384	

表 5 2003—2017 年耦合协调度均值

Tab. 5 Average value of coupling coordination degree from 2003 to 2017

地区	省(自治区、直辖市)	耦合协调度
东部地区	北京	0.654
	天津	0.586
	河北	0.559
	辽宁	0.607
	江苏	0.685
	上海	0.697
	浙江	0.627
	福建	0.618
	山东	0.564
	广东	0.682
	海南	0.506
广西	0.618	
均值	0.617	
中部地区	山西	0.512
	吉林	0.598
	黑龙江	0.631
	安徽	0.612
	江西	0.624
	河南	0.574
	湖北	0.637
湖南	0.659	
均值	0.606	
西部地区	重庆	0.576
	四川	0.654
	贵州	0.557
	云南	0.590
	陕西	0.536
	甘肃	0.544
	青海	0.484
	宁夏	0.636
	新疆	0.592
	内蒙古	0.542
	均值	0.575

我国西部耦合协调度为 0.575,达到初级协调水平的省份有 3 个,由于西部资源匮乏,地理条件不佳,对能源的开采利用不合理导致耦合协调度较低。其中耦合协调度在 0.5~0.6 的省份有 7 个,为勉强协调水平,西部耦合协调度最低的省份为青海省,青海省多山多高原资源开发程度低,耦合协调度仅仅达到濒临失调的水平。

全国耦合协调度平均水平为 0.599,我国达到初级协调水平的省份共有 15 个,勉强协调的省份有

14个。耦合协调度较高的省份多数位于中部和东部沿海地区,这些地区拥有丰富的资源,境内有大江大河流过,拥有肥沃土地,农业发达,水资源充足,能源资源丰富等优点。由于地理区位优势,合理开发利用资源可以促进水-能源-粮食耦合协调度的发展。耦合协调度较低的省份多数分布在西北地区,那里高山盆地较多,降雨量不足,农业发展落后,能源开采难度大,导致耦合协调度水平较低。

从图2可知,我国东部、中部、西部以及全国耦合协调度都呈现波动上升态势。首先,东部耦合协调度最优,从2003年的0.617增长至2017年的0.628,波动范围在0.605~0.617,达到初级协调状态。2004年,东部耦合协调度达到最低点0.605,在2004年以后,耦合协调度逐年上涨,虽然在2006—2010年有小幅度的波动,但是影响不大。在经历2010—2013年小幅度波动后,呈现上升的趋势。其次,我国中部地区耦合协调度低于东部地区,但在2015—2017年逐步接近中部地区,2003—2011年中部地区耦合协调度最接近于我国平均水平。中部耦合协调度从2003年的0.595增长至2017年0.627,增幅较大。2003—2008年,中部耦合协调度只能达到勉强协调状态。从2009年开始,中部地区每年的耦合协调度逐步上涨,基本达到初级协调水平,从2011年以后,中部地区耦合协调度超过全国平均水平。西部耦合协调度水平远远不及东部、中部水平。西部耦合协调度维持在0.560~0.590,西部耦合协调度在2004—2005年和2011—2013年有大幅度的增长,其他年份较为波动,但是西部整体水平呈现上升态势。最后,观察全国耦合协调度均值可以发现,全国耦合协调度均值波动较小。全国耦合协调度均值维持在0.580~0.620,从2013年开始,全国耦合协调度达到0.600以上,全国达到初级协调水平。

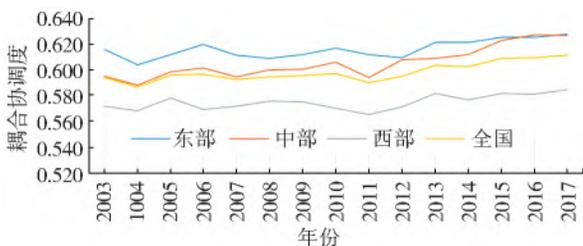


图2 2003—2017年耦合协调度发展趋势

Fig. 2 Development trend of coupling coordination degree from 2003 to 2017

3 水-能源-粮食耦合协调度影响因素分析

3.1 空间自相关检验

空间自相关检验是能否进行空间计量模型分析

的基础,用Moran's I指数判断是否存在空间效应。Moran's I指数的取值范围在(-1,1):Moran's I指数大于0说明存在正的空间相关性,值越大说明聚集度越高;Moran's I指数小于0说明相邻的地区具有分散性;Moran's I指数等于0说明不存在相关关系,呈现随机分布。根据上文测算出的耦合协调度,利用stata软件计算耦合协调度的全局Moran's I指数,见表6。从表中可以看出:2003—2017年耦合协调度全局Moran's I指数均为正数,说明我国30个省份的水-能源-粮食耦合协调度是自正相关的,具有空间聚集特性,在空间上相互关联和依赖。除了2004、2005、2013年外,都通过了10%水平下的显著性检验。Moran's I指数在时间序列上变化较大,可以看出耦合协调度Moran's I指数由2003年的0.138到2017年的2.245,呈现出波动上升态势。即使2004年和2005年Moran's I指数未能通过显著性检验,但是整体趋势是逐年变好的。2006—2010年Moran's I指数逐年上升,耦合协调度空间相关性也逐年加强,但是在2011—2013年,Moran's I指数呈现先上升后下降的态势,波动明显,并于2013年达到最低点,随后开始逐年上升,这说明我国水-能源-粮食的耦合协调性空间聚集越来越明显,但是空间分布格局不够稳定。

表6 2003—2017年耦合协调度的全局Moran's I指数

Tab. 6 Global Moran's I index of coupling coordination degree from 2003 to 2017

年份	Moran's I	Z值	P值	年份	Moran's I	Z值	P值
2003	0.138	1.841	0.066	2011	0.163	2.076	0.038
2004	0.096	1.368	0.171	2012	0.197	2.390	0.017
2005	0.112	1.529	0.126	2013	0.042	0.803	0.422
2006	0.141	1.838	0.066	2014	0.178	2.204	0.027
2007	0.175	2.194	0.028	2015	0.154	1.966	0.049
2008	0.176	2.191	0.028	2016	0.205	2.487	0.013
2009	0.166	2.077	0.038	2017	0.181	2.245	0.025
2010	0.243	2.882	0.004				

3.2 影响因素分析

3.2.1 变量设定

根据对水-能源-粮食耦合协调度的分析以及对文献的阅读,选取以下7个变量作为水-能源-粮食耦合关系的影响因素进行研究。

从业人口数(E)。从业人口数量对于维持就业市场正常运行起着十分重要的作用,水资源部门、能源部门以及粮食部门都需要大量的人力资源。

固定资产投资(F)。固定资产投资包括节水设备投资、能源建设投资以及粮食种植方面的投资,加大对以上方面的投资建设可以促进水-能源-粮食系统和谐发展。

人均生产总值(Q)。中国经济迅速发展,但是在促进经济发展的同时对环境产生了破坏,因此要考虑经济因素对水-能源-粮食系统的影响。

人口数(R)。中国人口基数大,从而导致对水资源、能源以及粮食的需求增大,合理地控制人口增加对水-能源-粮食耦合协调关系有很大的影响。

文盲人口比重(I)。用 15 岁以上文盲人口占总人口比重来衡量教育发展水平。提高个人的文化水平可以促进个人素养的提升,同时可以养成节约资源的意识,对水资源、能源和粮食的利用起到促进作用。

工业污染排放(P)。大量制造业制造过程中产生的工业污染未经达标就进行排放,对当地的环境产生恶劣影响,从而影响水-能源-粮食系统间的耦合协调性。

城镇化(U)。随着社会的进步,农村人口逐渐向城市转移,推进以人才为核心的新型城镇化是我国当前的热点话题,应该紧随国家的脚步,研究城镇化对水-能源-粮食关系的影响。

3.2.2 构建空间计量模型

根据 Moran's I 指数的结果判断水-能源-粮食耦合协调度具有空间效应,所以可以选择空间计量模型分析影响水-能源-粮食耦合协调性的因素。根据 Lesage 等^[31]研究整理所得,优先构建 SDM 模型为

$$G_{it} = \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln G_{jt} + \beta_1 \ln E_{it} + \beta_2 \ln F_{it} + \beta_3 \ln Q_{it} + \beta_4 \ln R_{it} + \beta_5 I_{it} + \beta_6 \ln P_{it} + \beta_7 U_{it} + \beta_8 \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln E_{jt} + \beta_9 \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln F_{jt} + \beta_{10} \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln Q_{jt} + \beta_{11} \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln R_{jt} + \beta_{12} \sum_{j=1}^n W_{ij} I_{jt} + \beta_{13} \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln P_{jt} + \beta_{14} \sum_{j=1}^n W_{ij} U_{jt} + u_i + v_t + \epsilon_{it} \quad (13)$$

式中: G_{it} 为第 t 地区第 i 年的水-能源-粮食耦合协调度; E_{it} 为第 t 地区第 i 年的从业人口数; F_{it} 为第 t 地区第 i 年的固定资产投资额; Q_{it} 为第 t 地区第 i 年的人均生产总值; R_{it} 为第 t 地区第 i 年的人口数; I_{it} 为第 t 地区第 i 年的文盲人口比重; P_{it} 为第 t 地区第 i 年的工业污染排放; U_{it} 为第 t 地区第 i 年的城镇化; ρ 为滞后被解释变量的回归系数; β_1 至 β_{14} 为各个变量的回归系数; W_{ij} 为空间权重矩阵; u_i 为地区效应; v_t 为时间效应; ϵ_{it} 为空间误差项。

进行 Lagrange multiplier(LM)检验,结果见表 7。

表 7 空间依赖性检验
Tab. 7 Spatial dependency test

检验项	统计值	P 值
LM-lag	1.704	0.192
Robust LM-lag	0.008	0.930
LM-error	388.954	0
Robust LM-error	387.258	0

虽然 LM 检验结果更倾向于空间误差模型,但是空间杜宾模型更具有一般性,利用 Wald 检验和 LR 检验判断空间杜宾模型能否退化成空间误差模型或空间滞后模型。如果同时拒绝原假设,则选择空间杜宾模型最佳。Wald 检验结果:Wald test_spatial lag 值为 118.83, P 值为 0, Wald test_spatial error 值为 78.26, P 值为 0。LR 检验结果:LR test_spatial lag 值为 105.86, P 值为 0, LR test_spatial error 值为 84.43, P 值为 0, 均通过显著性检验,不能退化为空间误差模型或空间滞后模型,选择采用空间杜宾模型。

利用 Hausman 检验固定效应与随机效应,通过显著性检验拒绝原假设,选择固定效应。时间固定效应、空间固定效应和双固定效应下时间固定效应结果最佳。在时间固定效应下, Hausman 检验结果值为 261.07, P 值为 0, 通过显著性检验,选择时间固定效应。

3.2.3 结果分析

相较于空间滞后模型和空间误差模型,空间杜宾模型更具有一般性,并且根据 Lesage 等研究整理以及 Wald 检验、LR 检验和 Hausman 检验结果判断选择空间杜宾模型不仅可以研究区域内部的影响还可以研究对其他地区的影响。本文选择空间杜宾模型来分析各个因素对耦合协调度的影响, ρ 为正值,并且通过 1% 的显著水平,说明耦合协调度存在较强的空间聚集效应。空间回归分析结果见表 8。

$\ln E$ 通过了 10% 的显著性检验,并且回归系数为正,说明从业人口数量是影响耦合协调度的重要因素。从业人口数多说明越来越多的人加入到建设祖国的事业中。从业人员各司其职,有利于经济发展、社会进步和生态文明建设,对耦合协调度的提升起到积极的影响。

$\ln F$ 通过了 1% 的显著性检验,并且回归系数为正,说明固定资产投资是影响耦合协调度的重要因素。国家在进行固定资产投资的过程中,也会包括资源、环境、生态建设方面的投资,这些投资有利于资源保护和可持续发展,从而促进耦合协调度的提高。

表 8 空间杜宾模型参数估计结果

Tab. 8 Parameter estimation results of spatial Dupin model

变量	系数	Z 值	P 值
lnE	0.035 *	1.95	0.051
lnF	0.021 ***	3.07	0.002
lnQ	-0.088 ***	-6.78	0
lnR	-0.088 **	-2.55	0.011
I	-0.001	-1.45	0.148
lnP	-0.001 ***	-5.99	0
U	0.001 ***	3.41	0.001
W×lnE	-0.235 ***	-4.09	0
W×lnF	0.038 **	2.33	0.020
W×lnQ	0.025	0.73	0.466
W×lnR	0.228 ***	3.65	0
W×I	0.001	0.44	0.657
W×lnP	0	1.21	0.225
W×U	0.001	0.54	0.592
ρ	0.457 ***	6.38	0
R-sq	0.609 5		
Log-likelihood	950.01		

注:1. ***、**、* 分别代表 1%、5%、10% 水平上的显著性。

2. W×lnE、W×lnF、W×lnQ、W×lnR、W×I、W×lnP、W×U 分别代表 lnE、lnF、lnQ、lnR、I、lnP、U 的空间滞后项。

lnQ 通过了 1% 的显著性检验,回归系数为负,说明人均 GDP 也是影响耦合协调度的重要因素。中国经济发展迅速,但是在经济发展的同时忽略了环境保护。人们在追求个人利益的同时,乱砍滥伐、浪费资源,对环境造成了严重的破坏。

lnR 通过了 5% 的显著性检验,回归系数为负,说明人口数量是重要影响因素。随着人口数目的增加,水资源、能源和粮食的需求加大,从而导致需求大于供给,自然界生产的资源不能满足人们的需求,人们开始大面积开采资源、破坏生态平衡,从而使资源无法循环利用。

I 未通过显著性检验,说明文盲人口比重不是影响耦合协调度的主要因素。

lnP 通过了 1% 的显著性检验,回归系数为负,说明工业污染是影响耦合协调度的重要因素。工业污染主要是工厂运行时产生的污染,无论是空气污染、水源污染或是土地污染都会对环境造成很大的影响,从而会破坏水-能源-粮食系统间的平衡。

U 通过了 1% 的显著性检验,回归系数为正,说明城镇化是影响耦合协调度的重要因素。城镇化主要是指农村人口进入城镇的比重。从农村到城市的人口主要是务工和求学。务工可以增加城市劳动力

需求,求学说明我国的教育事业在快速发展,无论哪个方面都有一定的积极影响。

4 结论与建议

4.1 结论

2003—2017 年,我国水-能源-粮食系统综合评价指数较低,上升速度较为缓慢。其中粮食系统评价指数优于能源系统评价指数和水资源系统评价指数,我国水资源空间分配不均衡导致水资源系统评价指数较低。

我国大部分省份耦合协调度水平较低,仅仅达到初级协调状态,提高水-能源-粮食耦合协调度有利于协调水资源系统、能源系统和粮食系统间的发展。从 2003—2017 年耦合协调度的发展趋势可以看出,未来耦合协调度会逐步提高。我国大部分省份水-能源-粮食耦合度已经达到中级协调水平以上,个别省份已经达到优质协调。

4.2 建议

加强职业技术培训,提高全国从业人口数量;加大对基础设施的资金投入,尤其是农业种植、水资源开发以及能源利用技术方面,这样不仅可以减少资源的浪费,同时可以改善我国水-能源-粮食系统现状,从而促进发展;在促进经济发展的同时应当注重资源环境的保护,严格把控企业污染物达标排放,对于污染严重的企业勒令停业整改;根据当前国情,优化人口格局,缓解当前资源紧张的态势;提高城镇化水平,不仅要数量上提高城镇化率,也要提高城镇化人口的质量。

参考文献(References):

- [1] SCANLON B R, RUDELL B L, REED P M, et al. The food-energy-water nexus: Transforming science for society[J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3550-3556. DOI:10.1002/2017WR020889.
- [2] KARABULUT A, EGOH B N, LANZANOVA D, et al. Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube River basin[J]. Ecosystem Services, 2016, 17: 278-292. DOI:10.1016/j.ecoser.2015.08.002.
- [3] ZHANG X, VESSELINOV V V. Integrated modeling approach for optimal management of water energy and food security nexus[J]. Advances in Water Resources, 2017, 101: 1-10. DOI:10.1016/j.advwatres.2016.12.017.
- [4] 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, 78. (SUN C Z, HAO S, ZHAO L S. Spatial-temporal differentiation characteristics of the efficiency of water resources-energy-food nexus system efficiency in China. [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 61-68, 78. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2021. 01. 009.
- [5] SIMPSON G B, JEWITT G P W. The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: A review[J]. Frontiers in Environmental Science, 2019, 7: 8. DOI. org/10. 1016/j. co-sust. 2013. 11. 005.
- [6] MELO F P L, PARRY L, BRANCALION P H S, et al. Adding forests to the water-energy-food nexus [J]. Nature Sustainability, 2021, 4(2): 85-92.
- [7] RINGLER C, WILLENBOCKEL D, PEREZN, et al. Global linkages among energy food and water: An economic assessment [J]. Journal of Environmental Studies and Sciences, 2016, 6 (1): 161-171. DOI: 10. 1007/s13412-016-386-5.
- [8] BAZILIAN M, ROGNER H, HOWELLS M, et al. Considering the energy water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. [J]. Energy policy, 2011, 39(12): 7896-7906. DOI: 10. 1016/j. enpol. 2011. 09. 039.
- [9] OLSSON G. Water energy and food interactions-Challenges and opportunities. [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2013, 7(5): 787-793. DOI: 10. 1007/s11783-013-0526-z.
- [10] SAHIN O Z, STEWART R A, RICHARDS R G. Addressing the water-energy-climate nexus conundrum: A systems approach[J]. Proceedings of International Congress on Environmental Modelling and Software, 2014, 101: 265-286.
- [11] GETAHUN G T, KATTERER T, MUNKHOLM L J, et al. Short-term effects of loosening and incorporation of straw slurry into the upper subsoil on soil physical properties and crop yield[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 184: 62-67. DOI: 10. 1016/j. still. 2018. 06. 007.
- [12] SCOTT C A. The water-energy-climate nexus: Resources and policy outlook for aquifers in Mexico[J]. Water Resources Research, 2011, 47(6): 368-378. DOI: 10. 1029/2011WR010805.
- [13] PITTOCK J, HUSSEY K, MCGLENNON S. Australian climate energy and water policies: conflicts and synergies. [J]. Australian Geographer, 2013, 44(1): 3-22. DOI: 10. 1080/00049182. 2013. 765345.
- [14] 刘博. 水-能源-粮食纽带关系的研究[J]. 河北水利, 2019, 31(4): 22-23. (LIU B. Research on the water-energy-food linkage [J]. Hebei Water Resources, 2019, 31(4): 22-23. (in Chinese))
- [15] 常远, 夏朋, 王建平. 水-能源-粮食纽带关系概述及对我国的启示[J]. 水利发展研究, 2016, 16(5): 67-70. (CHANG Y, XIA P, WANG J P. Overview of the water-energy-food bond and its enlightenment to my country[J]. Water Resources Development Research, 2016, 16(5): 67-70. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2016. 05. 019.
- [16] 李桂君, 黄道涵, 李玉龙. 水-能源-粮食关联关系: 区域可持续发展研究的新视角[J]. 中央财经大学学报, 2016, 36(12): 76-90. (LI G J, HUANG D H, LI Y L. Water-energy-food nexus; New perspective on regional sustainable development [J]. Journal of Central University of Finance and Economics, 2016, 36(12): 76-90. (in Chinese))
- [17] 于宏源. 纽带安全: 能源-粮食-水安全威胁及其思考[J]. 区域与全球发展, 2018, 2(2): 94-110, 157-158. (YU H Y. Tie security: Energy-food-water security threats and reflections[J]. Area Studies and Global Development, 2018, 2(2): 94-110, 157-158. (in Chinese))
- [18] 詹贻琛, 吴岚, 王艺璇. 中美均面临水、能源、粮食三者冲突[J]. 中国经济报告, 2014, 9(1): 109-111. (ZHAN Y C, WU L, WANG Y X. Both China and the United States are facing conflicts between water-energy-food[J]. China Policy Review, 2014, 9(1): 109-111. (in Chinese))
- [19] 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 L Y, WANG H M, LIU G, 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)) DOI: 10. 13956/j. ss. 1001-8409. 2020. 12. 09.
- [20] 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 Y, WANG H X, YANG Y X, 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)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2020. 04. 002.

- [21] 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 H M, HONG J, LIU G. 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)) DOI: 10. 12062/cpre. 20190125.
- [22] 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 L S, LIU S J, SUN C Z. 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)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2021. 01. 010.
- [23] 邓鹏,陈菁,陈丹,等. 区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究:以江苏省为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 232-238. (DENG P, CHEN J, CHEN D, et al. The evolutionary characteristics analysis of the coupling and coordination among water, energy and food: Take Jiangsu Province as an example[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 232-238. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2017. 06. 41.
- [24] 张洪芬,曾静静,曲建升,等. 资源高强度流动区水、能源和粮食耦合协调发展研究:以京津冀地区为例[J]. 中国农村水利水电, 2019, 61(5): 17-21, 28. (ZHANG H F, ZENG J J, QU J S, et al. Research on the coupling coordinative degree among water-energy-food system in the high-intensity flow areas: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019, 61(5): 17-21, 28. (in Chinese))
- [25] 孙成双,沈自豪. 基于 DEA 模型的水-能源-粮食投入产出效率研究[J]. 北京建筑大学学报, 2021, 37(1): 87-95. (SUN C S, SHEN Z H. Study on input-output efficiency of water-energy-food based on DEA model [J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021, 37(1): 87-95. (in Chinese))
- [26] 李桂君,黄道涵,李玉龙. 中国不同地区水-能源-粮食投入产出效率评价研究[J]. 经济社会体制比较, 2017, 33(3): 138-148. (LI G J, HUANG D H, LI Y L. Evaluation on the efficiency of the input and output water-energy-food in different regions of China[J]. Comparative Economic and Social Systems, 2017, 33(3): 138-148. (in Chinese))
- [27] 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 C Y, ZHANG S Q. 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)) DOI: 10. 12062/epre. 20190832.
- [28] 王玉宝,蒲傲婷,闫星,等. 新疆水-能源-粮食系统安全综合评价[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 264-272. (WANG Y B, PU A T, YAN X, et al. Comprehensive evaluation of water-energy-food nexus safety in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 264-272. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2020. 03. 028.
- [29] 尹庆民,吴益. 中国水-能源-粮食耦合协调发展实证分析[J]. 资源与产业, 2019, 21(6): 20-29. (YIN Q M, WU Y. Case studies on water-energy-food coupling coordinated development in China[J]. Resources and Industries, 2019, 21(6): 20-29. (in Chinese)) DOI: 10. 13776/j. cnki. resourcesindustries. 20191206. 006.
- [30] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 20(2): 76-82. (LIAO Z B. Quantitative judgment and classification system for coordinated development of environment and economy: A case study of the city group in the Pearl River delta[J]. Tropical Geography, 1999, 20(2): 76-82.) DOI: 10. 13284/j. cnki. rddl. 000443.
- [31] LESAGE J P, PACE R K. Introduction to Spatial Econometrics. Chapman & Hall/CRC, London, 2009. DOI: 10. 1201/9781420064254.

Water-energy-food nexus and its influencing factors in China

WANG Zhonghua, TIAN Yuwei

(School of Economics and Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: In 2011, the water-energy-food nexus was proposed in Bonn and it was summarized that the water-energy-food nexus can help humans to better understand the relationship between the three and solve global resource problems. In the same year, Stockholm International Environment Institute proposed the conceptual framework of water-energy-food nexus, including influencing factors such as population growth and climate change. In 2013, the UN Economic and Social Council of Asia-Pacific is-

sued the *Report on Water-Energy-Food Link in Asia-Pacific Region*. In 2014, FAO expounded on the water-energy-food relationship from the perspective of food security. The relationship between the three is particularly important in the shortage of global resources, population growth, climate change, and environmental deterioration.

The spatial correlation of water resources system development index, energy system development index, food system development index, water-energy-grain system comprehensive development index, and water-energy-grain coupling coordination are calculated, and the water-energy-food coupling coordination from 2003 to 2017, and the influence of working population, fixed asset investment, GDP per capita and total population are analyzed.

The water resources system development index is lower than the energy system development index and the food system development index. The water-energy-food system comprehensive development index shows a rising trend, and low levels of coordination of water-energy-grain coupling, most are at the level of forced and primary coordination. The results of the spatial autocorrelation test showed that the Moran's I index varies greatly in the time series, except for the following 2004, 2005, outside of 2013, all passed the significance test at the 10% level, with the spatial aggregation characteristics, spatially interrelated and dependent. When performing the influence factor analysis using the spatial Dubin model, the number of the employed population, fixed asset investment, and urbanization have passed the significance test. It promotes the improved coordination of water-energy-grain coupling. The per capita GDP, population, and industrial pollution passed the significance test, which was negative, suppressed the improved coordination of water-energy-grain coupling.

According to the above studies, the water-energy-food coordination is weak at the primary level, but in the current development trend, in the future, increase working population, increase investment in fixed assets, accelerate urbanization, strictly control industrial enterprises, reduce industrial pollution emissions, reasonably control population quantity and coordinate the relationship between economic development and resource environment can enhance water-energy-food coordination.

Key words: water-energy-food; coupled coordination degree model; spatial Dubin model; comprehensive system evaluation index; spatial autocorrelation

(上接第 242 页)

The results showed that: At annual scale, TRMM and CMORPH show higher detection accuracy than CHIRPS and PERSIANN_CDR, and terms of the spatial distribution characteristics of annual precipitation, only TRMM, CMORPH and CHIRPS could reflect its spatial distribution to varying degrees; At a monthly scale, TRMM and CMORPH still have high accuracy in precipitation estimation, and TRMM, CMORPH, and CHIRPS have different advantages in describing the spatial distribution of precipitation in different regions in YRB; At daily scale, the four satellite-based precipitation products have a strong ability to capture weak precipitation but have a poor ability to detect heavy precipitation; At spatial scale, the accuracy of the four types of satellite-based precipitation data is higher in high-altitude areas at daily and monthly scales, and there is no obvious change law at the annual scale.

In general, among the four types of satellite-based precipitation products, TRMM and CMORPH have more advantages in different time scales in YRB, but the spatial distribution of the four types of products is significantly different in different regions and different time scales. This conclusion lays the foundation for the further development of high-temporal-resolution precipitation fusion products suitable for YRB.

Key words: satellite precipitation product; time-space comparison; accuracy comparison; statistical evaluation; Yangtze River basin