

【生态文明与区域发展】

# 黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调及时空分异\*

彭俊杰

**摘要:**以2000—2020年黄河流域9个省、自治区为研究对象,在厘清“水—能源—粮食”纽带系统耦合机制基础上,构建“水—能源—粮食”纽带系统的质量评价体系,运用耦合协调度模型和空间相关分析探讨三者耦合协调的时空特征及其空间联系,研究发现,黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的综合评价指数上升趋势明显,并处于中等发展水平阶段,其空间分布与区域资源禀赋具有高度一致性;黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统以初级—中级协调为主,呈现出稳定的上升态势,并且具有显著的空间分异性,各省呈现出明显的非同步发展特征,总体上表现为“上游地区>中游地区>下游地区”;黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度具有典型的“阶段突变”特征。以2010年为分界线,2010年以前黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的空间集聚不稳定,呈现正负分化明显的波动特征;2010年以后黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的空间集聚程度不断增强;黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调正在从区域离散向区域集聚发生转变,且表现为“高—高”区域、“低—低”区域明显的两极分化趋势。

**关键词:**黄河流域;“水—能源—粮食”纽带系统;耦合协调;空间相关性

**中图分类号:**F323 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5766(2022)02-0051-09 **收稿日期:**2021-12-28

**\*基金项目:**2020年国家社会科学基金青年项目“黄河流域‘水—能源—粮食’纽带系统互馈作用机制与协同优化研究”(20CGJ033);2021年河南省社会科学规划项目“河南强化副中心城市能级和区域协同发展研究”(2021WT47)。

**作者简介:**彭俊杰,男,河南省社会科学院城市与环境研究所副研究员(郑州 450002)。

## 一、引言

2020年8月31日,习近平总书记在主持召开中央政治局会议审议《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》时强调,要把黄河流域生态保护和高质量发展作为事关中华民族伟大复兴的千秋大计,统筹推进山水林田湖草沙综合治理、系统治理、源头治理,促进全流域高质量发展。这为推动黄河流域生态保护和高质量发展指明了方向,提供了遵

循。黄河流域是我国重要的粮食生产基地和重要的能源基地,水资源短缺已经成为制约能源和粮食发展的关键要素。在黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略的背景下,科学认知“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调关系,准确把握三者之间的时空演进规律,对于共同抓好黄河流域大保护,协同推进大治理,促进全流域可持续发展具有重要意义。

从全球范围来看,“水—能源—粮食”纽带系统作为联合国2030可持续发展议程的重要目标,其发

展先后经历了水—能源、水—粮食和能源—粮食以“单一中心”为主体相互作用关系的研究,而后演变成将三者纳入统一框架的研究过程。2011年,在德国召开的波恩会议上,有学者首次提出了“水—能源—粮食”纽带系统(W-E-Fnexus)的研究命题,建议重构纽带系统与全球气候变化、可持续的经济增长等作用关系与内在机理。随后,关于“水—能源—粮食”纽带系统的研究主要集中在以下三个方面:一是纽带系统的科学认知。主要从安全(Hoff H, 2011)、管理(FAO, 2014)、功能(Endo A et al., 2017)、学科(Van Gevelt T, 2020)四个维度来不断丰富对“水—能源—粮食”纽带系统的认知。二是纽带系统的复杂关联。主要存在“水—能源—粮食”系统的静态观(Kalomoria Z, et al., 2018)、慢变量观(Patience M, et al., 2020)和资源整合观(Mehzabeen M, et al., 2018)三种主要观点。三是纽带系统的实证分析。在时间尺度上,从年际动态变化(Jennifer D, et al., 2020)、季节性变化(Rodrigo A B, et al., 2018)降维至实时动态监测(Laura B, et al., 2020);在空间尺度上,从单一居民(Wael A H, et al., 2018)、城市(Bassel D, et al., 2019)、流域(Ethan Y C, Sungwook W, 2018)扩展到全球范围(Matrin F, et al., 2018)。国内学者对于水、能源和粮食的系统研究尚处于起步阶段,前期主要侧重于水—能源(项潇智、贾绍凤, 2016;孔令斯等, 2018)、水—粮食(李春晖等, 2008;常明等, 2019)、能源—粮食(郝帅等, 2021)等两两关系,而把水、能源和粮食三者之间纳入同一框架内研究不多,最早追溯到2010年(米红、周伟, 2010),直到2016年国内学者才开始提出水、能源和粮食的纽带关系(李桂君等, 2017;刘倩等, 2018;白景锋、张海军, 2018)。而针对黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的研究不多。基于此,本文以黄河流域9省(区)为研究区域,以2000—2020年为研究时段,首先厘清黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合机理,并构建“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调发展评价指标体系,定量测度黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合度与协调度,并根据耦合作用机理分析纽带系统的耦合协调关系,最后对黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调度进行空间可视化表达,旨在为系统推进黄河流域生态保

护和高质量发展战略提供参考借鉴。

## 二、耦合协调机制分析

黄河流域“水—能源—粮食”三者之间不是简单的两两关系,而是一个“传导—耦合—反馈—适应”的复杂关系。以往关于黄河流域的研究,学者们更多关注粮食安全视角下的流域水效率、流域水管理机制、流域水生态文明,流域产业发展对生态环境本底、大气环境、水资源与水环境、生态功能的胁迫响应,以及能源综合效率的时空演变与驱动因素(彭少明等, 2008;周振、孔祥智, 2015;邵鹏等, 2020;石涛, 2020;李瑞、刘腾花, 2021)。对于黄河流域来说,粮食从“农田—餐桌—厨房”的循环往复过程需要消耗大量水资源和能源动力,能源特别是煤炭等矿产资源的开采、加工、冷却等也是以水资源的消耗为基本前提;与此同时,粮食既可以为保障流域经济社会发展提供基础物质资料,又为能源生产提供生物质原材料。由于“水—能源—粮食”纽带系统具有边界模糊性、动态性和开放性,这就决定了系统研究的复杂性;而黄河流域又集中反映出资源型缺水 and 季节性缺水并存的敏感区域,能源资源与粮食资源相互转化、相互支撑,能源开发、粮食生产加剧了黄河流域的水资源短缺,它们之间具备复杂的非线性响应特征,因此,研究黄河流域需要同时强调水、能源和粮食三者之间的传导机制、耦合机制与协同机制。(1)传导机制:水、能源和粮食作为黄河流域的资源产品属性,水资源是核心要素,能源资源是动力支撑,粮食资源是基本保障,在生产、消费、转化过程中相互交织、相互依赖、相互传导。(2)耦合机制:黄河流域“水—能源—粮食”是一种实现资源稀缺性有效应对的新型治理模式,且不能牺牲某一个子系统的发展来换取其他系统的发展,能够确保水、能源和粮食的供给安全和供需适配。(3)协同机制:水资源、能源资源和粮食资源是共同支撑黄河流域健康发展的“慢变量”,三者之间的演化需要先后经历失调衰退—勉强协调—耦合协调三个发展阶段,最终实现水、能源和粮食利用效率最大化,能源资源生态环境容量最大化,进而推动实现黄河流域可持续发展。

### 三、研究设计：模型、方法与数据

黄河流域是我国重要的水资源分布区、能源富集区和粮食生产核心区,在我国经济社会发展和生态安全方面具有重要地位(彭俊杰,2021)。基于黄河流域水、能源、粮食等部门的不同隶属关系,笔者借鉴耦合协调度的相关研究,从集中化、链条化、合理化三个维度,选取水资源子系统、能源子系统和粮食子系统三个层面建立综合评价指标体系来衡量“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调关系。

#### 1.“水—能源—粮食”纽带系统综合评价指数

根据黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合机制,构建综合评价指标体系,如表1所示。

建立原始数据的无量纲化处理:

$$\text{正向: } X_{ij}' = [X_{ij} - \min(X_{ij})] / [\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})] \quad (1)$$

$$\text{负向: } X_{ij}' = [\max(X_{ij}) - X_{ij}] / [\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})] \quad (2)$$

然后参考周振和孔祥智(2015)的研究成果,计算水、能源、粮食的评价指数。

$$\begin{aligned} \text{Water} = \rho_1 &= n \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n X_i} \\ \text{Energy} = \rho_2 &= n \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Y_i} \\ \text{Food} = \rho_3 &= n \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Z_i} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$ 分别表示水资源子系统、能源子系统、粮食子系统发展指数, $X_i$ 、 $Y_i$ 、 $Z_i$ 分别表示描述三个子系统指数的标准化数值。

建立综合评价指数:

$$T = \sqrt[3]{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_3} \quad (4)$$

式(4)中, $T$ 表示综合评价指数,代表纽带系统的综合发展能力,当 $T \in (0, 0.3]$ 时,说明处于低水平发展阶段;当 $T \in (0.3, 0.7]$ 时,说明处于中等水平发展阶段;当 $T \in (0.7, 1]$ 时,说明处于高水平发展阶段。

#### 2.耦合协调度测度

引入耦合度模型主要是用来度量黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的相互作用程度和交互耦合强度。

$$C = \sqrt[3]{(\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_3) / [(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3) / 3]^3} \quad (5)$$

式(5)中,耦合度 $C$ 的取值区间为 $[0, 1]$ 。由于

耦合度不能全面有效的反映“水—能源—粮食”三个子系统之间的协同水平,因此,本文引入耦合协调度模型:

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (6)$$

式(6)中,耦合度 $D$ 的取值区间为 $[0, 1]$ ,当 $D \in (0, 0.4]$ 时,说明处于极度—中度失调阶段;当 $D \in (0.4, 0.5]$ 时,说明处于濒临失调;当 $D \in (0.5, 0.6]$ 时,说明处于勉强失调;当 $D \in (0.6, 0.7]$ 时,说明处于初级协调;当 $D \in (0.7, 0.8]$ 时,说明处于中级协调;当 $D \in (0.8, 0.9]$ 时,说明处于高级协调。 $T$ 为“水—能源—粮食”纽带系统的综合评价指数。

#### 3.基于Moran's I指数的空间相关性分析

如果单独依靠耦合协调度模型来分析黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的复杂关联和相互影响并不能判断其空间作用。为此,引入全局Moran's I指数来测度纽带系统的空相关性和集聚程度:

$$\text{Moran's I} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Z_i - Z)(Z_j - Z)}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (7)$$

式(7)中, $n$ 是研究对象个数, $Z_i$ 和 $Z_j$ 分别为 $i$ 、 $j$ 区域的观测值, $W_{ij}$ 为空间权重矩阵(空间相邻为1,不相邻为0), $S^2$ 为观测值方差, $Z$ 为观测值平均值。

#### 4.数据来源

本文数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国水资源公报》《黄河水资源公报》《中国能源统计年鉴》以及沿黄9省区国民经济和社会发展统计公报、沿黄9省区统计年鉴等,缺失数据采用近邻年份数据进行差补。

## 四、实证分析

通过综合评价指数、耦合度、耦合协调度、耦合协调的空间相关性、时间突变性等对黄河流域全域、上下游以及沿黄各省份之间的“水—能源—粮食”纽带系统展开评价分析。

#### 1.黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的综合评价指数分析

如图1所示,2000—2020年三个子系统的评价指数均呈上升趋势,其中,粮食系统评价指数上升态势明显,水系统次之,能源系统保持相对稳定。对于粮食系统来说,其评价指数从2000年的0.263上升至2020年的0.814,先后经历了2004年以前的低水平发展阶段、2018年以前的中等水平发展阶段



表1 黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调发展评价指标体系

目标层	子系统层	指标层	计算方法	单位	指标性质
“水—能源—粮食”耦合指数	水资源子系统	产水模数	水资源总量/区域面积	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>	正向
		产水系数	水资源总量/降水总量	%	正向
		灌溉面积	统计数据直接获取	10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup>	正向
		人均水资源总量	水资源总量/人口总量	m <sup>3</sup> /人	正向
		人均用水量	用水总量/人口总量	m <sup>3</sup> /人	逆向
		生态用水占比	生态用水/用水总量	%	正向
		生活用水占比	生活用水/用水总量	%	正向
		废水排放量	统计数据直接获取	万吨	逆向
		万元GDP用水量	用水总量/GDP	m <sup>3</sup> /万元	逆向
	能源子系统	能源生产量	统计数据直接获取	万吨标准煤	正向
		能源消费量	统计数据直接获取	万吨标准煤	逆向
		能源自给率	能源生产量/能源消费量	%	正向
		人均能源消费	能源消费量/人口总量	吨标准煤/人	逆向
		煤炭消费比重	煤炭消费量/能源消费量	%	逆向
		能源消耗强度	能源消费量/GDP	吨标准煤/万元	逆向
		能源消费系数	统计数据直接获取	%	逆向
		工业废气排放量	统计数据直接获取	万吨	逆向
		能源工业投资	统计数据直接获取	亿元	正向
	粮食子系统	人均粮食产量	粮食总产量/人口总量	kg	正向
		粮食单产	粮食总产量/粮食播种面积	吨/hm <sup>2</sup>	正向
		粮食播种面积比例	粮食播种面积/区域总面积	10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup>	正向
		机械动力	机械总动力/粮食播种面积	千瓦/hm <sup>2</sup>	正向
		化肥负荷	化肥用量/农作物播种面积	吨/hm <sup>2</sup>	逆向
		农村居民恩格尔系数	统计数据直接获取	%	逆向
		城镇居民恩格尔系数	统计数据直接获取	%	逆向
		人口自然增长率	统计数据直接获取	‰	逆向
		粮食流动成本	粮食零售价格指数/生产价格指数		逆向
农村居民可支配收入	统计数据直接获取	元	正向		
城镇居民可支配收入	统计数据直接获取	元	正向		

资料来源:数据选取历年《中国统计年鉴》《中国水资源公报》《黄河水资源公报》《中国能源统计年鉴》以及沿黄9省(区)历年国民经济和社会发展统计公报、沿黄9省(区)统计年鉴等。部分缺失数据采用近邻年份数据进行差补。“正向”代表正向指标,“逆向”代表负向指标。

到当前的高水平发展阶段,说明黄河流域的粮食生产总体情况逐渐向好,并保持持续增长态势;对于水系统来说,年际波动幅度最大,呈现“W”型走势,总体上由2000年的0.363上升至2020年的0.682,处于中等发展水平阶段,水系统年际波动主要受降水量地区分布差异的影响,上游的青海、四川、宁夏,中游的陕西、山西和下游的山东评价指数相对较高。对于能源系统来说,呈缓慢上升趋势,总体上由2000年的0.497上升至2020年的0.630,处于中等发展水平阶段,能源评价指数相对较高的省份主要分布在山西、宁夏、陕西、青海等,能源评价指数相对较低的省份主要分布在能源资源相对贫瘠的四川、河南、山东等省份。

从纽带系统的综合评价指数来看,黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的综合评价指数呈上升趋势,从2000年的0.362上升至2020年的0.705,处于中等发展水平。从综合评价指数的分布阶段来看,2000—2006年呈波动式上升,2006—2014年呈缓慢上升,2015—2020年呈快速上升。从“水—能源—粮食”纽带系统的内部质量的整体变化时间趋势来看,如图2所示,箱型图上限除2002年、2015年有较大幅度下降外,其余年份均呈逐年上升趋势,说明2000—2020年综合评价指数最高的陕西发展一直较快,稳步增加粮食产量、能源产量、能源自给率,降低废水排放量、能源消耗强度、万元GDP水耗等成为其重要表征;上四分位

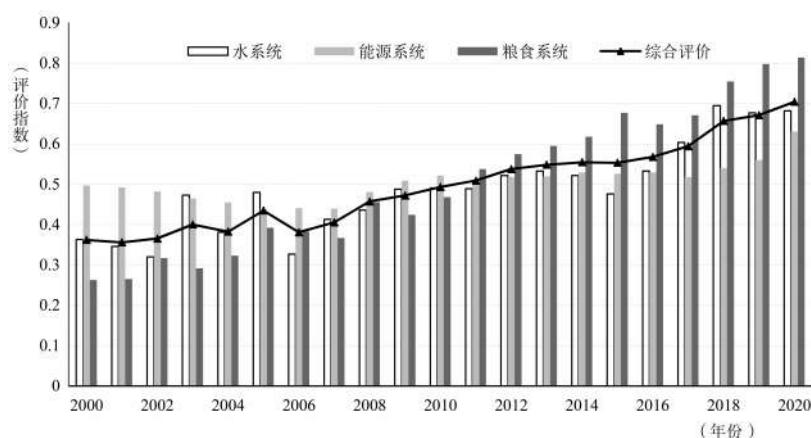


图1 2000—2020年黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的综合评价指数  
时序变化特征

资料来源:作者自行绘制。

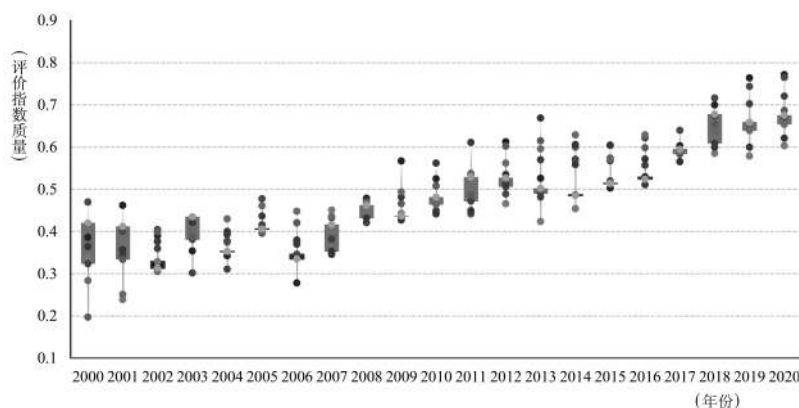


图2 2000—2020年黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的质量箱型图  
资料来源:作者自行绘制。

和下四分位整体呈增加趋势,说明综合评价指数较高和较低的省份得分以波动式上升为主要变化趋势。

## 2.黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调关系分析

纽带系统的耦合度分析。利用公式(5),计算2000—2020年黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合度可以看出,2000—2020年黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合度均值为0.980,处于高水平耦合阶段。从总体上来看,2000—2020年耦合度呈现递增态势,耦合度均值由2000年的0.940增加至2020年的0.988,可见黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统正在由速度型耦合向质量型耦合全方位转变。从空间上来看,2000—2020年黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合度的空间差异较小且逐年降低,耦合度标准差由2000年的0.039降至2020年的0.010,2000年和

2020年高于耦合度均值的省份数量分别是1个和6个,占黄河流域全部省份数量的11.11%和66.67%,其中四川、陕西等省份的“水—能源—粮食”纽带系统的耦合度始终高于平均水平。

纽带系统的耦合协调度分析。从时间维度上来看,2000—2020年黄河流域各省份“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调度呈现不同程度的上升趋势,由2000年的0.576提高到2020年的0.822,总体上朝着高级协调的方向发展。在耦合协调度类型上,先后经历了两种类型:2000—2006年呈波动式上升,2006—2020年呈快速上升。2000年,黄河流域的宁夏处于濒临失调状态,甘肃、河南、内蒙古、山西处于勉强失调状态;但到2020年,除内蒙古和河南这2个省份处于中级协调状态外,其余各省份均处于高级协调状态。从流域来看,2000—2020年黄河流域上游、中游的耦合协调度从最初的勉强失调发展成为最终的高级协调状态,下游耦合协调度则从最初的勉强失调发展成

为最终的中级协调状态,并且呈现出“上游起点低、速度快、后发优势明显;下游起点高、速度慢、自然波动较大”的发展特点。这是因为在发展初期,与中下游地区相比,上游地区为了加快发展,走上了一条以牺牲资源和环境为代价的粗放式发展之路,再加之上游地区生态本底脆弱,受到人类活动的扰动性较强,极易造成“水—能源—粮食”纽带系统的不协调、不平衡。特别是2016年以来,人们更加重视能源资源的节约集约利用和合理配置、更加重视绿色低碳生产生活方式,相对于中下游地区来说,上游地区自然基础较好,“水—能源—粮食”纽带系统的恢复力和适应力更强,发展潜力更大。

为了更好地反映黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度的空间分布,我们绘制了2000—2005年、2006—2010年、2011—2015年、2016—2020年各省份“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度平均值的空间分布情况,如图3所示。随着时间的

推移,黄河流域2002—2020年耦合协调度空间差异显著,呈现出非同步发展特征。总体来说,根据耦合协调度均值,黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度整体趋向“上游>中游>下游”的梯度递减空间分布格局。具体来说,2000—2005年,河南、甘肃、宁夏、山西等省份处在勉强失调阶段,青海、四川、内蒙古、陕西和山东处于初级协调阶段。2006—2010年,沿黄9省区都处于初级协调阶段。2011—2015年,黄河流域各省份“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度出现了明显的转换,其中青海、宁夏、内蒙古、陕西、山西、山东、四川、甘肃实现了由初级协调向中级协调的跃升;只有河南仍处于初级协调阶段,成为制约黄河流域可持续发展的“短板”区域。2016—2020年,黄河流域各省份的耦合协调度均处于中级—高级协调阶段,其中青海、四川、甘肃发展速度较快,已经实现了由中级协调向高级协调的跃升。

### 3.黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调的空间相关性分析

全局空间自相关分析。根据测算的2000—2020年黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度,运用GeoDa软件计算“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度的Moran's I指数,结果显示,全局Moran's I指数在2015年、2020年分别通过了5%、1%的显著性检验,且符号为正,说明邻近省份的耦合协调度空间自相关正向表现显著,整体呈空间集聚态势。2000—2020年,Moran's I指数属于非平稳序列,具有典型的“阶段突变”特征。其中,2000—2010年Moran's I指数上下波动趋势强烈,并于2010年达到最低点,随后开始反弹,表现出较强的正向空间自相关关系并趋于相对稳定状态,呈上升趋势,这表明自2010年以后,黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统具有较强的空间集聚模式,而且这种集聚程度在不断增强。通过对Moran's I指

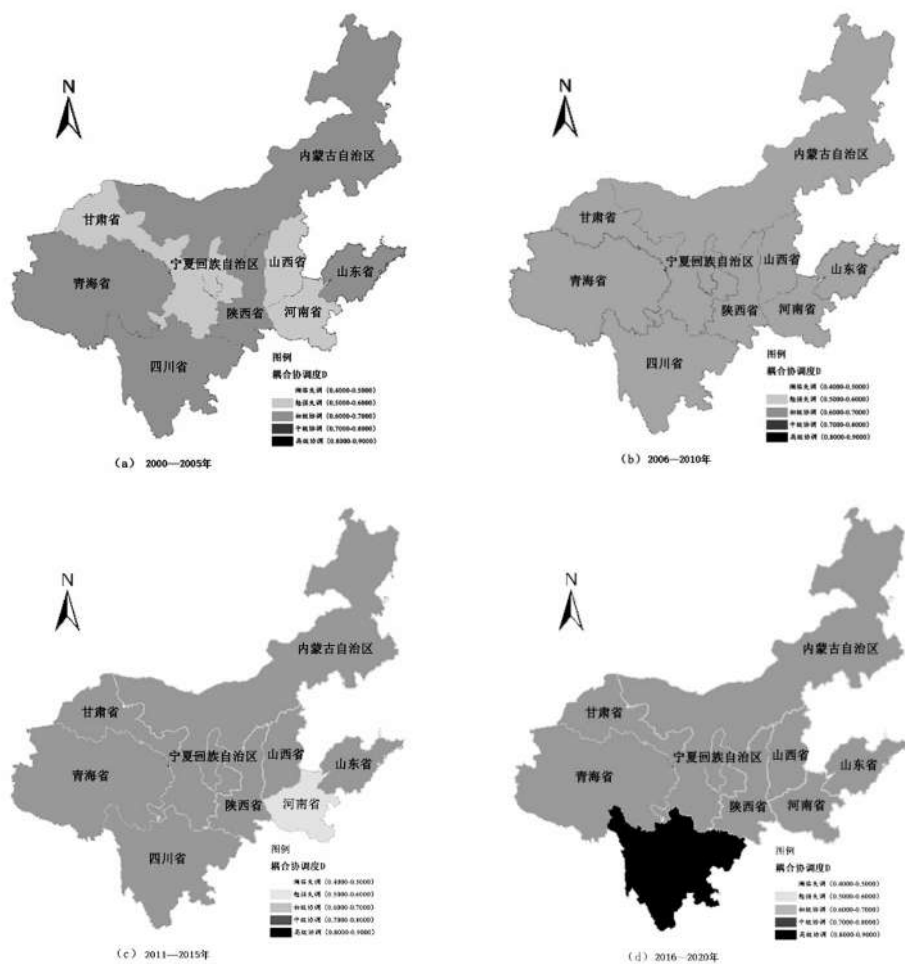


图3 2000—2005年、2006—2010年、2011—2015年、2016—2020年黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度的空间分布图

资料来源:作者自行绘制。

数的小波分析也可以看出,2010年是研究期间的突变点,这表明“十二五”以来,沿黄各省份把建设资源节约型、环境友好型社会作为加快转变经济发展方式的重要着力点,不断优化能源结构,合理控制能源消费总量,实行最严格的水资源管理制度,推进生产、流通、消费各环节循环经济发展,“水—能

源—粮食”纽带系统的协调性、可持续性不断增强。

局部空间自相关分析。运用Stata16.0软件制作2000年、2005年、2010年、2015年和2020年5个年份中黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度的Moran's I指数散点图,如图4所示。2000年黄河流域多数省份处于“低—高”区域(第二象

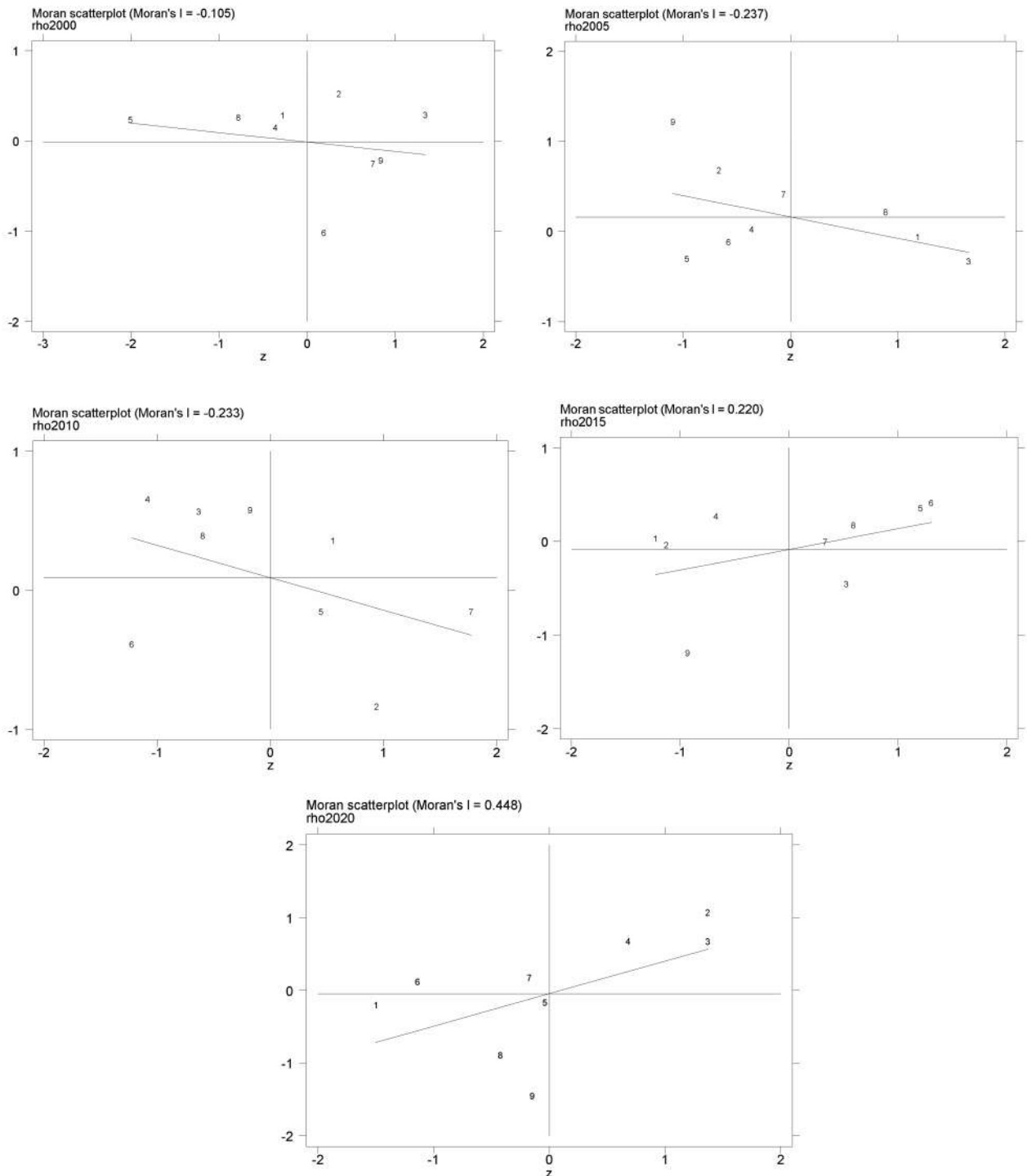


图4 黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调的莫兰散点图(其中,1—9依次代表河南、青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、山东等省份)

资料来源:作者自行绘制。



限),这表明处于耦合协调度高的区域对耦合度低的区域形成包围,表现为空间负相关,呈现异质性和离散型特征。2005年黄河流域多数省份处于“低—高”“低—低”区域(第二象限、第三象限),2010年多数省份处于“低—高”“高一低”区域(第二象限、第四象限)。2015年、2020年多数省份处于“高一高”区域(第一象限)和“低—低”区域(第三象限),且表现为显著空间正相关。这说明近年来,黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调正在从区域离散向区域集聚发生转变,且表现为“高一高”区域、“低—低”区域明显的两极分化趋势。也就是说,耦合协调度高的青海、四川、甘肃、陕西等省份通过加强生态整体保护系统治理、提高水资源集约节约利用效率、打造黄河流域重要的清洁绿色能源基地、建立跨区域跨部门协调发展机制等政策举措对周边区域形成示范带动效应,进而形成相互协同、相互支撑的高值集聚区;耦合协调度相对较低的河南、内蒙古、山西、山东等省份受到水资源布局与能源、粮食分布不匹配、水资源刚性约束、资源型产业转型升级动力不足等因素影响,导致“水—能源—粮食”三者之间的关联效应和作用机制没有得到充分发挥,进而形成低值集聚区。

## 五、结论与建议

通过对黄河流域9个省份“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调度及空间联系进行分析,得出以下研究结论并提出政策建议。

### 1. 结论

黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的综合评价指数上升趋势明显,并处于中等发展水平阶段,其空间分布与区域的资源禀赋具有高度一致性;黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统以初级—中级协调为主,呈现出稳定的上升态势,并且具有显著空间分异性,各省份呈现出明显的非同步发展特征,总体上表现为“上游地区>中游地区>下游地区”;黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度具有典型的“阶段突变”特征。以2010年为分界线,2010年以前黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的空间集聚不稳定,呈现正负分化明显的波动特征;2010年以后黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的空间集聚程度不断增强;黄河流域“水—

能源—粮食”纽带系统的耦合协调正在从区域离散向区域集聚发生转变,且表现为“高一高”区域、“低—低”区域明显的两极分化趋势。

### 2. 建议

一是科学认识黄河流域“水—能源—粮食”的纽带关系。黄河流域是“水—能源—粮食”矛盾突出且集中的典型区域,水资源约束引起流域能源安全脆弱性、生态环境脆弱性、粮食生产脆弱性的风险增加。科学认知黄河流域“水—能源—粮食”纽带关系的互馈机制,建立以提高水资源利用效率为纽带的能源安全和粮食安全框架,通过三种资源的整体研究有助于提高可持续发展决策的有效性,有助于推动上下游、流域两岸、干支流的协同安全。积极探索走出一条具有流域特色的保障“水—能源—粮食”纽带系统安全的协同路径和资源利用最优模式,更好实现以水定城、以水定地、以水定人、以水定产的目标,是推进水资源节约集约利用的重要内容,是探索富有地域特色的高质量发展新路的战略举措,更是以扩大内需为战略基点,倒逼农业转型升级和能源安全高效,激活消费需求,支撑“双循环”新发展格局的有效载体。

二是加快建设一批“水—能源—粮食”纽带系统协调发展示范区。选择青海、四川、甘肃等耦合协调度高的省份,建立一批“水—能源—粮食”的纽带系统协调发展示范区,支持其在水资源集约节约利用、清洁能源高效开发利用、优质粮食生产和高标准农田建设等方面先行先试,引领带动沿黄其他省份“水—能源—粮食”可持续发展。例如,在清洁能源高效开发利用方面,合理控制煤炭开发强度,推动甘肃陇东、青海海西等重要能源基地高质量发展,发挥黄河上游水电站和电网系统的调节能力,支持青海、甘肃、四川等风能、太阳能丰富地区构建风光水多能互补系统,以此来提升水资源和能源资源利用效率,增加清洁能源供应强度。以能源绿色低碳发展为着力点,支持“水—能源—粮食”纽带系统协调发展示范区内重点行业、重点企业率先达到碳排放峰值、废气废水“零”排放,树立一批行业“近零”排放示范企业和示范园区,引领带动黄河流域中下游形成有效的碳排放控制阀门,确保全流域如期实现碳达峰、碳中和目标。

三是积极探索差异化的“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调路径。针对“水—能源—粮食”耦



合协调度较低的地区,加快实施农业节水增效和工业节能降耗并举,提升制造业、现代农业发展水平,促进经济发展与生态环境相协调,实现可持续发展。在农业节水增效方面,结合高标准农田建设,推进大中型灌区续建配套及节水改造,普及推广喷灌、微灌、滴灌、低压管道输水灌溉等高效节水灌溉技术,实施区域化、规模化高效节水灌溉。在工业节能降耗方面,加大钢铁、有色、石化、化工等产业绿色改造升级和落后过剩产能淘汰力度,纵深推进智能化改造和新产品开发技术改造,提升企业自主创新能力,加快国家资源循环利用基地建设,发展再制造产业和静脉产业园等,以此来不断缩小“水—能源—粮食”纽带系统耦合协调度的空间差异,提高空间集聚程度。

#### 参考文献

- [1] Hoff H. Understanding the Nexus[R]. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: the Water Energy and Food Security Nexus, Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [2] FAO. The Water-Energy-Food Nexus—Anew Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture[R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2014.
- [3] Endo A, Tsurita I, Burnett K. A Review of the Current State of Research on the Water, Energy, and Food Nexus[J]. Journal of Hydrology :Regional Studies, 2017(11).
- [4] Van Gevelt T. The Water - Energy - Food Nexus: Bridging the Science - Policy Divide[J]. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2020(13).
- [5] Kalomoria Z, Sofia K, Maria-Eleni K. Recasting of the WEF Nexus as An Actor with a New Economic Platform and Management Model[J]. Energy Policy, 2018(119).
- [6] Patience M, Bas V, Gert S. What Could Go Wrong with Cooking? Exploring Vulnerability at the Water, Energy and Food Nexus in Kampala through ASocial Practices Lens[J]. Global Environmental Change, 2020(63).
- [7] Mehzabeen M, Tareq A, Hamish R M. Quantifying the Energy, Water and Food Nexus: A Review of the Latest Developments Based on Life-Cycle Assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2018(193).
- [8] 项潇智,贾绍凤.中国能源产业的现状需水估算与趋势分析[J].自然资源学报,2016(1).
- [9] 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(10).
- [10] 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(3).
- [11] 邵鹏,王齐,单英骥.基于文本分析的黄河流域生态保护与高质量发展研究[J].干旱区资源与环境,2020(11).
- [12] 石涛.黄河流域生态保护与经济高质量发展耦合协调度及空间网络效应[J].区域经济评论,2020(3).
- [13] 彭俊杰.黄河流域“水—能源—粮食”相互作用关系及其优化路径[J].中州学刊,2021(8).
- [14] 周振,孔祥智.中国“四化”协调发展格局及其影响因素研究——基于农业现代化视角[J].中国软科学,2015(10).

## Coupling Relationship and Spatial-Temporal Differentiation of the Water-Energy-Food Nexus in the Yellow River Basin

Peng Junjie

**Abstract:** Taking 9 provinces in and autonomous the Yellow River Basin in 2000—2020 as the research object, on the basis of clarifying the coupling mechanism of the Water-Energy-Food nexus, this article constructs the evaluation index system of the Water-Energy-Food nexus. The coupling coordination degree model and the spatial correlation analysis are used to analyze the spatial-temporal characteristics and spatial relationship. The results show that: The comprehensive evaluation index has an obvious upward trend, and is at a medium development stage. The spatial distribution pattern is consistent with the distribution pattern of water, energy, and food resource endowments in the Yellow River Basin. The Water-Energy-Food nexus is mainly in the primary-intermediate coordination stage, showing a steady upward trend, and has significant spatial divergence. The 9 provinces show obvious characteristics of non-synchronous development, and generally appear as upstream areas > midstream area > downstream area. The nexus in the Yellow River Basin has a typical “stage mutation” characteristic. Taking 2010 as the dividing line, the spatial agglomeration was unstable before 2010, showing obvious fluctuation characteristics of positive and negative differentiation; after 2010, the degree of spatial agglomeration continued to increase. The coupling coordination of the Water-Energy-Food nexus in the Yellow River Basin is changing from regional dispersion to regional agglomeration, which is mainly concentrated in high-high and low-low areas, with a trend of polarization.

**Key Words:** The Yellow River Basin; Water-Energy-Food Nexus; Coupling Relationship; Spatial Correlation

(责任编辑:柳 阳)