

引用格式: 罗巍, 杨玄酯, 杨永芳, 等. 黄河流域水-能源-粮食纽带关系协同演化及预测[J]. 资源科学, 2022, 44(3): 608-619.  
[Luo W, Yang X Z, Yang Y F, et al. Co-evolution of water-energy-food nexus in the Yellow River Basin and forecast of future development[J]. Resources Science, 2022, 44(3): 608-619.] DOI: 10.18402/resci.2022.03.14

# 黄河流域水-能源-粮食纽带关系协同演化及预测

罗巍<sup>1,2</sup>, 杨玄酯<sup>3</sup>, 杨永芳<sup>4</sup>, 程遂营<sup>5</sup>

(1. 河南大学商学院, 开封 475000; 2. 河南大学工商管理研究所, 开封 475000; 3. 江苏大学管理学院, 镇江 212013; 4. 河南大学地理与环境学院, 开封 475000; 5. 河南大学文化产业与旅游管理学院, 开封 475000)

**摘要:** 水、能源、粮食存在互相依赖的纽带关系, 黄河流域作为三者矛盾突出且集中的典型区域, 实现水-能源-粮食纽带关系协同演化, 是保障流域资源安全、维护生态平衡、实现可持续发展的重要前提。基于协同学原理, 按照序参量-子系统-复合系统的逻辑, 从流域层和区域层, 对2010—2019年黄河流域的水-能源-粮食纽带关系协同演化进行实证分析及ARIMA预测。结果发现: ①从全流域看, 3个子系统有序度演化近10年来均有上升, 但三者间纽带关系演化长期处于低协同状态, 其中, 水-粮食协同度略高于能源-粮食协同度和水-能源协同度; ②分区域看, 上游和下游各子系统有序度演化近10年来升降各异, 而中游各子系统有序度演化不断上升, 3个区域中水-能源-粮食纽带关系演化均长期处于低协同状态; ③根据ARIMA预测, 纽带关系短期仍处于低协同状态, 水资源相对于能源和粮食仍是首要约束。最后, 从流域层提出“以水为刚性约束, 多要素互动”, 从区域层提出“生态位错位发展, 多区域协同”等政策启示。

**关键词:** 高质量发展; 水-能源-粮食; 协同演化; 有序度; 黄河流域

DOI: 10.18402/resci.2022.03.14

## 1 引言

黄河流域作为中国重要的生态屏障、经济地带、“能源流域”及打赢脱贫攻坚战的重要区域, 面临着生态环境脆弱、省际经济水平差异、发展关系松散、“三区”(少数民族集聚区、革命老区和高寒山区)叠加等特殊<sup>[1]</sup>, 从而决定了黄河流域高质量发展表现为长期性、多样性、竞争性、协同性甚至区域化等倾向<sup>[2]</sup>。梳理资源时空分布特征, 评估要素配置合理性, 厘清系统演化规律, 对黄河流域生态保护与高质量发展具有重要参考价值。

水、能源、粮食作为人类基本生存和长久发展的基础性资源, 相对其他资源更具不可替代性, 且三者间存在相互关联、互为依赖的纽带关系(Water-

Energy-Food Nexus, WEF-Nexus)<sup>[3]</sup>。中国的水、能源、粮食时空分布不均, 伴随资源需求增长, 水资源短缺日益严重, 能源对外依存程度加大, 粮食国际贸易变化对粮食安全也带来挑战<sup>[4]</sup>。黄河流域作为水、能源、粮食矛盾集中区域, 资源型缺水和季节性缺水对能源和粮食安全形成限制, 而能源开发与粮食生产又相互转化、互为支撑, 在留下巨大环境足迹同时<sup>[5]</sup>, 叠加产业发展对生态胁迫效应<sup>[6]</sup>, 将进一步放大流域系统安全风险, 对高质量发展形成约束。

2021年10月, 中共中央、国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》, 22次提及“协同”一词, 指出“水资源作为最大刚性约束”原则, 以

收稿日期: 2021-09-23, 修订日期: 2021-12-27

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(21ZDA081); 2022年度河南省重点研发与推广专项(软科学)项目(222400410140); 河南省教育科学“十四五”规划2021年度一般课题(2021YB0034)。

作者简介: 罗巍, 男, 河南南阳人, 副教授, 研究方向为区域经济发展战略。E-mail: luowei@vip.henu.edu.cn

通讯作者: 杨玄酯, 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 讲师, 研究方向为绿色经济管理。E-mail: yangkaihan@126.com

2022年3月

及“巩固粮食和能源安全,突出流域高质量发展特色”定位。“协同”作为超越单一要素及单一系统视野的研究范式,是指系统中两个或多个子系统、要素间通过互为依赖的非线性互动形成“1+1>2”联合效应<sup>[7]</sup>,而“协同演化”则是指不同主体、子系统间持续互动、互相改变、相互适应的长期反馈状态<sup>[8]</sup>。WEF-Nexus本质是在可持续发展框架内,寻求综合考虑水、能源、粮食三者协同发展的策略<sup>[9]</sup>。从系统内反馈来看,水资源高效配置有助于为能源及粮食生产提供持续稳定保障,能源结构优化有助于提升粮食生产及水资源利用效率,粮食结构改善有助于降低水和能源消耗。从系统外部性来看,WEF-Nexus所构建的复合系统协同演化,有助于促进生态共治、倒逼产业升级、提升产业链韧性、融通区域间合作,既是实现黄河流域高质量发展的路径,也是其必然要求。

为此,本文参考协同学原理,构建黄河流域水、能源、粮食各子系统的有序度模型,以及 WEF-Nexus 的协同度模型。从全流域和分区域两个层面对 WEF-Nexus 随时间发展的协同演化进行实证分析及预测,并识别影响 WEF-Nexus 的系统结构性来源,以期为黄河流域 WEF-Nexus 协同安全体系构建和高质量发展形成启示。

## 2 文献回顾

### 2.1 水-能源-粮食纽带关系(WEF-Nexus)

WEF-Nexus 经历了“单独资源”“两者关联”“三者纽带”等研究阶段<sup>[10]</sup>,2011年,世界经济论坛将其系统风险纳入三大风险群,掀起 WEF-Nexus 整体研究热潮。当前,WEF-Nexus 对高质量发展的影响得到认可:支彦玲等<sup>[11]</sup>基于共生理论,指出 WEF-Nexus 的协同效应,可通过提高资源流转效率、提升产品服务供给、增强环境适应性等途径,实现高质量发展;Naidoo 等<sup>[12]</sup>基于变化理论,指出 WEF-Nexus 的协同效应为零饥饿、清洁水、清洁能源、气候行动等生计转型提供思路,通过搭建循环经济、实现包容性成长,为高质量发展带来机会。

从研究内容看,WEF-Nexus 多被视为话语工具或概念框架,如何将其转变为决策工具,成为重要研究议题。早期研究侧重于纽带关系描述及效率评价<sup>[13]</sup>,进而形成对政治军事、社会经济、环境气候

等影响分析,当前更关注纽带关系的生成机制、价值体现与路径重塑,但多聚焦外部要素探索,对系统自身各要素间非线性互动及时间演化问题缺少说明。

从研究对象看,经历早期宏观分析后,学者们针对某一对象或区域形成细分研究。例如,刘倩等<sup>[14]</sup>以城市为范畴进行 WEF-Nexus 多资源管理研究,刘凌燕等<sup>[15]</sup>以东北三省为范畴进行 WEF-Nexus 风险演化研究。而如何搭建宏观与微观融合的立体化框架,以便形成不同视野下系统适应性的对比分析值得思考。

从研究方法看,现有研究多基于联系论和过程论,借助 DEA<sup>[16]</sup>、政策仿真<sup>[17]</sup>、结构路径<sup>[18]</sup>、社会网络群体决策<sup>[19]</sup>、贝叶斯概率网络<sup>[20]</sup>等方法建模<sup>[21]</sup>,基本思路有两类:其一,在水资源约束下,对能源及食物进行冲突量化,权衡经济效益和环境目标,以形成协同治理参考<sup>[22]</sup>;其二,以 WEF-Nexus 指数最大化为导向,确定水和能源消耗量、粮食和经济产出率,以此评估 WEF-Nexus 联系<sup>[23]</sup>。然而,多侧重于指标数量分析,缺少对系统质量挖掘,一些研究混用绝对指标和相对指标,造成评价不能有效揭示现实。同时,对系统协同演化关注较少,以至于结果局限于报告期,难以有效指导未来。

### 2.2 黄河流域生态保护与高质量发展

当前,“高质量发展”尚未形成统一定义,学者们主要从生态优先、市场有效、动能转换、产业支撑、区域协调、以人为本等方面进行表述<sup>[24]</sup>。从人地关系视角来看,指向人类活动与生态环境和谐共处,体现要素协同;从空间异质视角来看,指向不同区域间关联融合,体现空间协同<sup>[25]</sup>。

自黄河流域生态保护与高质量发展战略提出以来,以中国科学院地理科学与资源研究所、西北大学等为代表的科研机构,形成不少专题研究:学者们采用定性分析,在对高质量发展内涵辨析基础上,按照“基底-生态优先”“承载-发展约束”“驱动-内外关联”等逻辑<sup>[26]</sup>,形成模式选择<sup>[27]</sup>、法律规制<sup>[28]</sup>等战略设计及理论搭建;同时,采用定量分析,基于地理单元范式<sup>[29]</sup>,形成城市群建设<sup>[30]</sup>、空间治理<sup>[31]</sup>等思考,开发出高质量发展测度方法<sup>[32]</sup>,形成生态保护<sup>[33]</sup>、科技创新<sup>[34]</sup>、数字经济<sup>[35]</sup>等主题研究。

由于该战略目前处于起步阶段,现有研究还存在不少提升空间:研究内容上,多关注高质量发展中能在短时间内引起系统波动的要素(如政策导向、市场刺激),而对影响系统长久方向的要素(如水、能源、粮食)关注不够;研究对象上,多从流域(宏观)或省域(微观)展开分析,对于中观层面(上游、中游、下游)对比分析尚显不足,“流域+区域”多层次融合有待形成;研究方法上,多属于定性分析,有必要融合定性及定量分析优势,形成系统化、动态化及非线性研究。

### 3 研究设计

#### 3.1 序参量选择

根据协同学原理,系统演化时存在快弛豫变量和慢弛豫变量。系统受外界干扰震荡时,前者企图使系统重回稳定,具有阻尼大、衰减快的特点;后者企图使系统走向非稳定,具有阻尼小、衰减慢的特点。慢弛豫变量也被称为序参量,作为系统发生质变的突出标志,在驱动系统演化时,其相互竞合关系决定了系统有序结构,并表征为一组反应变量重要程度的权重系数向量<sup>[36]</sup>。结合李金昌等<sup>[37]</sup>高质量发展评价指标要求,遵循科学性(选取的变量对系统起主导作用)、适宜性(既体现规模又反映强度),进行如下序参量选择:

水资源开发利用程度常用供水和用水来反映,两者数值相等,但供水更反映水资源天然来源路径。参考《中国水利统计年鉴》中供水结构,选取地表水供水、地下水供水、其他供水作为序参量。

能源有一次能源和二次能源区分,但二次能源并不直接从自然界提取,只能通过一次能源转化得到。参考《中国能源统计年鉴》中一次能源构成,选取原煤、原油、天然气、电力作为序参量。

粮食常用播种面积或产量进行规模衡量,中国耕地面积有限且难有较大增加,伴随科技投入、设施改善、新经营模式等,不同类别粮食产量匹配,成为推进粮食结构优化重要力量。参考《中国农村统计年鉴》中粮食结构,选取谷物、豆类、薯类作为序参量(表1)。

#### 3.2 模型构建

##### 3.2.1 复合系统协同度模型

根据序参量支配系统演化的基本原理,遵循“序参量分量有序性贡献度-子系统有序度-复合系统”的逻辑,进行复合系统协同度模型构建。设定序参量分量有序性贡献度 $u$ 的模型为:

$$u_i(X_{ij}) = \frac{X_{ij} - \beta_i}{\alpha_i - \beta_i} \quad (1)$$

式中:  $X_{ij}$  表示序参量  $X_i$  的第  $j$  项分量数值;  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  分别表示序参量  $X_i$  在统计年份区间最大值和最小值。

由于各序参量对子系统有序性发挥作用不同,还需赋权处理。设定子系统有序度  $U$  的模型为:

$$U(X) = \sum_{j=1}^n \omega_i u_i(X_{ij}) \quad (2)$$

式中:  $\omega_i$  表示序参量  $X_i$  的权重,其数值大于0,且全部序参量权重之和等于1。

设定复合系统协同度  $S$  的模型为:

$$S = r \cdot \sqrt[3]{[U^1(W) - U^0(W)] \times [U^1(E) - U^0(E)] \times [U^1(F) - U^0(F)]} \quad (3)$$

式中:  $U^0(W)$ 、 $U^0(E)$ 、 $U^0(F)$  表示系统初始时刻,水、能源、粮食各自有序度;  $U^1(W)$ 、 $U^1(E)$ 、 $U^1(F)$  表示系统演化至某一时刻,水、能源、粮食各自有序度;  $r$  取值1或-1,表示子系统间协同方向;协同度  $S$

表1 序参量的选取

Table 1 Selection of order parameters

水			能源			粮食		
代码	内容	单位	代码	内容	单位	代码	内容	单位
$W_1$	地表水供水	亿 $m^3$	$E_1$	原煤一次能源	万 t	$F_1$	谷物	万 t
$W_2$	地下水供水	亿 $m^3$	$E_2$	原油一次能源	万 t	$F_2$	豆类	万 t
$W_3$	其他供水	亿 $m^3$	$E_3$	天然气一次能源	亿 $m^3$	$F_3$	薯类	万 t
			$E_4$	电力一次能源	亿 kW·h			

注:“电力一次能源”主要包括水电生产、核电生产、风电生产等。



2022年3月

数值处于-1到1之间,数值越大表示协同度越高,数值越小表示协同度越低。

### 3.2.2 ARIMA 预测模型

为形成对 WEF-Nexus 协同演化的预测,考虑研究对象时间上关联性,以及随机波动干扰,引入自回归积分滑动平均模型(Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA)进行预测<sup>[38]</sup>。

将非平稳时间序列,通过差分置换成为平稳时间序列,方法为:

$$v_t = \Delta^d s_t \quad (4)$$

式中:  $v_t$  表示平稳时间序列;  $s_t$  表示原始非平稳时间序列;  $\Delta$  表示变量的本期值与滞后值之间数值差;  $d$  表示差分阶数,其中,一阶差分表示为  $\Delta$ ,二阶差分表示为  $\Delta^2$ ,以此类推。

进而,构建出 ARMA( $p, q$ )模型:

$$v_t = c + \phi_1 v_{t-1} + \dots + \phi_p v_{t-p} + \zeta_t + \theta_1 \zeta_{t-1} + \dots + \theta_q \zeta_{t-q} \quad (5)$$

式中:  $c$  表示常数项;  $p$  表示自回归模型阶数;  $q$  表示移动平均阶数;  $\zeta_t$  表示一个白噪声过程。经过  $d$  阶差分后的 ARMA( $p, q$ )模型,则被称之为 ARIMA( $p, d, q$ )模型。

### 3.3 数据获取

为保证数据来源权威性,从《中国水利统计年鉴》获取水资源子系统相关数据,从《中国能源统计年鉴》获取能源子系统相关数据,从《中国农村统计年鉴》获取粮食子系统相关数据。为保证统计口径一致性 & 数据完整性,以 2010—2019 共 10 年数据作为计算区间。

### 3.4 指标赋权

指标赋权常有客观赋权法和主观赋权法两类:前者借助数学模型通过对数据关系处理计算权重,后者根据研究者主观判断计算权重。具体应用中,

不少学者采用客观权重和主观权重的均值,即综合权重作为最终权重<sup>[39]</sup>。

首先,采用相关矩阵赋权法进行客观赋权,其基本原理为:计算指标  $A$  与其他指标的相关系数,将相关系数绝对值之和视为指标  $A$  的“系统影响力”,以此类推,分别计算出所有指标的“系统影响力”,则指标  $A$  的“系统影响力”除以全部指标“系统影响力之和”,其比值为指标  $A$  的客观权重。

其次,采用判别矩阵分析法进行主观赋权,其基本步骤为:参考 Saaty<sup>[40]</sup>的 AHP 原理,邀请 7 位专家按少数服从多数原则,对指标两两比对打分。专家成员由从事地理及环境规划研究的 2 位教授(博导),从事区域战略研究的 2 位副教授(硕导),从事水利、农业、能源等政府部门工作者 3 位(具有硕士学位)构成。指标  $A$  和指标  $B$  相比,“更重要”“一样重要”“不重要”分别计“2”“1”“0”,将“单个指标评分”除以“全部指标评分总和”,得出各指标主观权重。

最后,计算客观权重和主观权重的均值,将其作为指标综合权重(表 2)。

## 4 结果与分析

### 4.1 全流域层面 WEF-Nexus 协同演化

#### 4.1.1 子系统有序度

根据公式(1),对数据进行归一化处理。进而,根据公式(2),计算各子系统有序度。结果显示:各子系统有序度演化路径各有不同,其中,能源子系统有序度上升幅度较大,水资源子系统和粮食子系统的有序度演化轨迹具有一定相似性(图 1)。

水资源子系统有序度经历“先上升、后下降、再上升”的演化过程。随着供水保障能力提升,2010—2012 年,各类供水数量均不断增加。而全球变暖及陆地降水变化,使得黄河流域各季节不断升

表 2 指标权重计算

Table 2 Calculation of indicator weights

	水			能源				粮食		
	$\omega_{W1}$	$\omega_{W2}$	$\omega_{W3}$	$\omega_{E1}$	$\omega_{E2}$	$\omega_{E3}$	$\omega_{E4}$	$\omega_{F1}$	$\omega_{F2}$	$\omega_{F3}$
客观权重	0.337	0.331	0.332	0.234	0.212	0.261	0.293	0.370	0.232	0.398
主观权重	0.556	0.333	0.111	0.062	0.250	0.250	0.438	0.556	0.333	0.111
综合权重	0.447	0.332	0.221	0.148	0.231	0.255	0.366	0.463	0.283	0.254

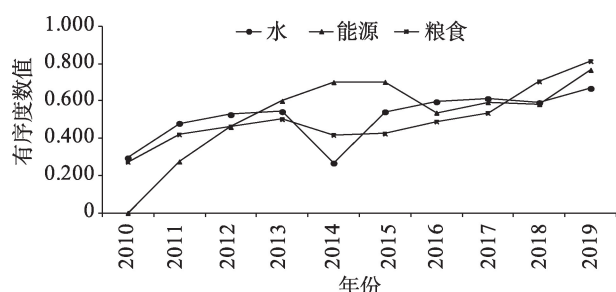


图1 2010—2019年全流域层面子系统有序度

Figure 1 Order degree of subsystems at the basin level, 2010-2019

温,其升温速率 $0.52^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、平均气温达 $7^{\circ}\text{C}$ ,从而增加了流域蒸散发强度,对河川径流等地表水形成抑制<sup>[41]</sup>。同时,人口及灌溉增加,加剧了地下水超采并对其他供水产生影响,使得2013—2014年前后,水资源有序度发生波动。近些年,随着最严格水资源管理制度推进,对水资源主体、内容、对象等进行规范。同时,南水北调工程实施,缓解了北方水资源短缺,对部分河湖形成生态补水,提高了水资源承载能力,使水资源子系统有序度得到改善。

能源子系统有序度经历“先直线快速上升、后波动缓慢上升”的演化过程。2010—2014年,原煤、原油、天然气、电力产量分别增长15.18%、13.17%、44.05%、110.14%,4类能源共同增长,使能源子系统有序度快速攀升。随着非可再生能源储量减少、能源环境污染、国际能源竞争加剧等问题不断呈现,国家加强对能源结构优化。加之南水北调工程对黄河干流发电量提升作用,以及西气东输、西电东运等跨区域能源工程对能源分布不均进行了改善。2015—2019年,4类能源产量增长率分别为24.22%、1.53%、42.29%、234.28%,非可再生能源增量放缓,可再生能源增量上升,使能源子系统呈现“波动式缓慢上升”,但整体有序度最终处于高位值。

粮食子系统有序度经历“波动中缓慢上升”演化过程。随着最严格耕地保护制度深化,河南、山东、内蒙古、四川等粮食主产区,一直保持粮食产量稳步增长。加之藏粮于地、藏粮于技等战略实施,农业科技动力作用及惠民政策激励作用不断显现,10年来,流域中谷物、豆类产量分别增长26.78%、23.69%,特别是内蒙古,10年来谷物、豆类产量增长率分别达79.10%、51.60%。谷物及豆类连年丰收,为粮食子系统有序度上升奠定基础。然而,薯类种

植由于集中度不高,特别是夏薯面积扩大而春薯面积下降,10年来产量减少3.81%,一定程度上影响了粮食子系统有序度上升速度。

#### 4.1.2 复合系统协同度

根据公式(3),依次计算出水-能源、水-粮食、能源-粮食、WEF-Nexus复合系统等协同度(图2)。

WEF-Nexus演化长期处于低协同状态。从数据呈现看,水、能源、粮食3个子系统有序度呈现不同程度上升,但不同时期三者演化轨迹各异(图1),使得3个子系统间长期处于低协同状态,甚至若干年份出现负协同状态。从系统属性看,随着经济发展及人口增加,社会生产对水资源需求不减。加之水、能源、粮食时空分布不均且分属不同管理部门,加剧了能源和粮食对水资源的竞争,并对WEF-Nexus协同发展形成挑战。

水-粮食协同度(年均值0.004)总体略高于能源-粮食协同度(年均值0.003)及水-能源协同度(年均值0.002)。从数据呈现看,水资源子系统和粮食子系统有序度演化路径接近(图1),辅助相关分析和偏相关分析对比发现:控制水资源影响后,能源有序度与粮食有序度之间的相关系数由0.639下降至0.467;控制能源影响后,水资源有序度与粮食有序度之间的相关系数由0.747下降至0.644;控制粮食影响后,水资源有序度与能源有序度之间的相关系数由0.494下降至0.033。相比而言,水资源有序度与粮食有序度之间互为支撑作用较好,能源有序度与粮食有序度之间互为支撑作用次之,而水资源有序度与能源有序度之间互为支撑作用较弱。从系统属性看,黄河流域(尤其是中游)能源开发及粮食生产对水资源竞争指数一直处于0.8以上高位<sup>[42]</sup>,

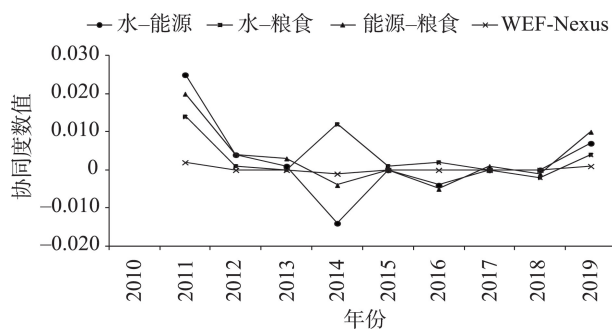


图2 2010—2019年全流域层面复合系统协同度

Figure 2 Synergy degree of composite system at the basin level, 2010-2019

2022年3月

上中游煤炭区、下游石油区存在不同程度纳污水体不足而影响地下水补给等问题,相对于水和能源的自然资源属性,粮食更具社会产品属性,当水和能源受自然约束时,粮食生产的灵活性相对能更好地适合三者纽带关系。

## 4.2 分区域层面 WEF-Nexus 协同演化

### 4.2.1 上游各子系统有序度及 WEF-Nexus 协同度

2010—2019年上游(青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古)各子系统有序度升降各异,WEF-Nexus 演化长期处于低协同状态。

水资源子系统有序度演化呈现“先增后降”趋势。尽管上游水资源丰富,地表水充裕,但近些年一些省(区)地下水超采,造成若干浅层地下水降落漏斗,并对其他供水产生影响。

能源子系统有序度演化呈现“稳步上升”趋势。10年来,原煤、原油、天然气产量分别增长23.16%、48.69%、7.05%,受益于水电富矿优势及国家对非化石能源政策加持,电力产量增长高达205.79%。

粮食子系统有序度演化呈现“稳步上升”趋势。作为新增耕地及灌溉面积的潜力区,上游土地资源丰富且光热条件良好,为粮食生产奠定重要基础。10年来,谷物、豆类、薯类产量分别增长32.74%、34.55%、6.49%,且3项指标增长幅度都高于流域平均值。

各子系统有序度演化升降趋势不同步,使得 WEF-Nexus 演化长期处于低协同状态,甚至若干年份出现负协同状态(图3)。辅助相关分析和偏相关分析对比发现:控制水资源影响后,能源有序度与

粮食有序度之间的相关系数由0.732下降至0.646;控制能源影响后,水资源有序度与粮食有序度之间的相关系数由0.451下降至-0.027;控制粮食影响后,水资源有序度与能源有序度之间的相关系数由0.636下降至0.502。相比而言,能源有序度与粮食有序度之间互为支撑作用较好,上游的清洁能源发展潜力高,其能源问题解决将对粮食生产带来潜在机遇,例如,农业光伏系统等。水资源有序度与能源有序度之间互为支撑作用其次,而水资源有序度与粮食有序度之间互为支撑作用较弱,甚至呈现一定程度竞争。

### 4.2.2 中游各子系统有序度及 WEF-Nexus 协同度

2010—2019年中游(陕西、山西)各子系统有序度不断上升,WEF-Nexus 演化长期处于低协同状态。

水资源子系统有序度演化呈现“波动式缓慢上升”趋势。10年来,随着流域水资源管理不断规范,地表水供水量增长27.92%,生态及其他供水量增长1400.00%,但地下水供水量减少11.06%,地下水超采问题仍需警惕。

能源子系统有序度演化呈现“稳步上升”趋势。10年来,原煤、原油产量分别增长47.31%、17.43%,相比而言,清洁能源增幅较大,天然气和电力产量分别增长119.63%、205.79%。

粮食子系统有序度演化呈现“波动式缓慢上升”趋势。随着农业供给侧改革推进,中游引导非优势区域对部分作物减重调优。10年来,谷物产量增长14.33%,豆类产量下降9.84%,而在马铃薯主粮化战略引导下,薯类产量增长50.24%。

各子系统有序度演化上升趋势不同步,使得 WEF-Nexus 演化长期处于低协同状态(图4)。辅助相关分析和偏相关分析对比发现:控制水资源影响后,能源有序度与粮食有序度之间的相关系数由0.753下降至0.406;控制能源影响后,水资源有序度与粮食有序度之间的相关系数由0.740下降至0.357;控制粮食影响后,水资源有序度与能源有序度之间的相关系数由0.792下降至0.531。总体而言,水资源有序度、能源有序度、粮食有序度彼此互为支撑作用水平一般,发展中更需要从 WEF-Nexus 的联动作用中寻找突破。

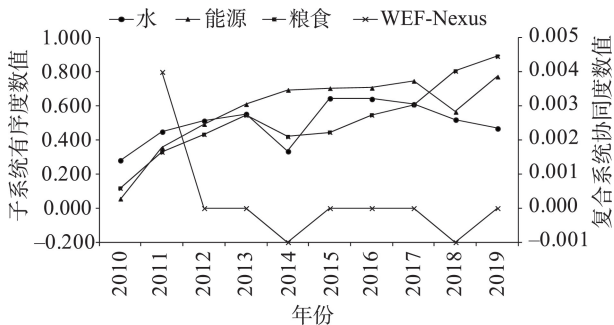


图3 2010—2019年上游子系统有序度及复合系统协同度

Figure 3 Order degree of subsystems and synergy degree of the composite system in the upstream region, 2010-2019



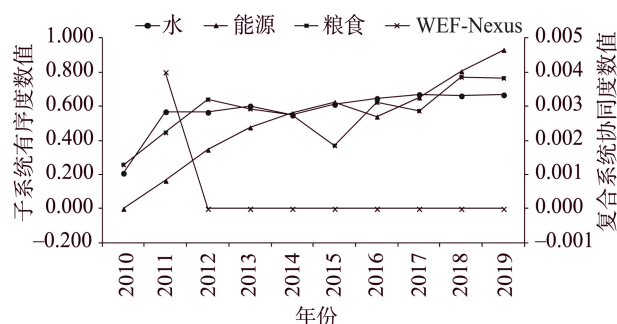


图4 2010—2019年中游子系统有序度及复合系统协同度

Figure 4 Order degree of subsystems and synergy degree of the composite system in the midstream region, 2010-2019

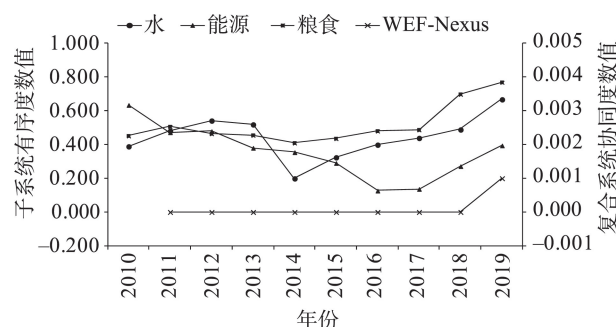


图5 2010—2019年下游子系统有序度及复合系统协同度

Figure 5 Order degree of subsystems and synergy degree of the composite system in downstream region, 2010-2019

### 4.2.3 下游各子系统有序度及 WEF-Nexus 协同度

2010—2019年下游(河南、山东)各子系统有序度升降各异, WEF-Nexus 演化长期处于低协同状态。

水资源子系统有序度演化呈现“先升后降再升”趋势。受天然径流减少、河段淤积、湿地受损、地下水超采等影响, 10年来, 地下水供水量下降15.55%。近些年南水北调中线及东线工程实施, 河南、山东分别调引受水100亿 $\text{m}^3$ 、53亿 $\text{m}^3$ , 合计占两线总受水量的37.50%, 一定程度使地表水供水量上升17.94%。同时, 南水北调带来水源置换, 将城市挤占生态用水归还粮食种植和生态需要<sup>[43]</sup>, 使得生态及其他供水量上升255.10%。

能源子系统有序度演化呈现“先降低后缓慢上升”趋势。随着国家能源政策推进, 下游能源生产开始为生态让路。10年来, 原煤、原油、天然气年产量分别降低39.91%、24.21%、50.00%, 而电力年产量则增长386.89%, 但下游也是人口及工业密集区, 电力消纳需求大, 一定程度冲抵电力一次能源增量。

粮食子系统有序度演化呈现“平缓式上升”趋势。河南、山东承担着国家粮食安全重要战略使命, 10年来, 谷物、豆类产量分别增长25.99%、15.70%。与中游薯类产量增长50.24%的增幅较大不同, 下游受薯类价格波动、蔬菜种植替代等影响, 薯类年产量降幅较大。

各子系统有序度上升趋势不同步, 使得 WEF-Nexus 演化长期处于低协同状态(图5)。辅助相关分析和偏相关分析对比发现: 控制水资源影响后, 能源有序度与粮食有序度之间的相关系数由-0.076

下降至-0.256; 控制能源影响后, 水资源有序度与粮食有序度之间的相关系数由0.697上升至0.719; 控制粮食影响后, 水资源有序度与能源有序度之间的相关系数由0.152上升至0.286。相比而言, 水资源有序度与粮食有序度之间互为支撑作用较好, 解决好水资源问题将对粮食安全形成保障, 而节约粮食并做好粮食结构优化, 也将为水资源有序提升形成动力。水资源有序度与能源有序度之间互为支撑作用较弱, 能源有序度与粮食有序度之间则呈现一定程度竞争关系, 从而意味着能源优化成为下游发展亟待突破的关键问题。

## 4.3 ARIMA 预测

根据公式(4)、(5), 使用 ARIMA 模型进行预测。实施过程中, 结合赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)和贝叶斯信息准则(Bayesian Information Criterion, BIC)要求, 针对各组时间序列, 借助 SPSSAU 软件, 对多个潜在备选模型进行建模及对比, 最终遴选各自最优模型及公式, 形成向后3年的预测值(表3)。

### 4.3.1 全流域层面预测

WEF-Nexus 短期仍处于低协同状态, 水资源问题仍是重要约束。能源子系统和粮食子系统的有序度, 短期内处于均值0.788和0.775的良好状态, 而水资源子系统有序度仅处于均值0.512的中等水平, 子系统之间有序度不匹配, 加之粮食生产及能源开采对水资源依赖性, 农药化肥及工业废水对水环境破坏性, 使 WEF-Nexus 短期仍处于低协同状态。粮食可通过土地、科技、政策、人力等不同要素配置进行调节, 能源可通过海外进口、不同形式替

2022年3月

表3 ARIMA 预测结果

Table 3 Autoregressive integrated moving average (ARIMA) forecast results

区域	子系统有序度	AIC 值	BIC 值	最优模型	拟合公式	向后 1 年	向后 2 年	向后 3 年	均值
全流域	水	-9.095	-8.490	MA(0)	$y(t)=0.512$	0.512	0.512	0.512	0.512
	能源	-3.021	-1.810	AR(2)	$y(t)=0.468+1.441 \times y(t-1)-0.612 \times y(t-2)$	0.828	0.804	0.732	0.788
	粮食	-12.421	-11.210	AR(2)	$y(t)=0.501+1.451 \times y(t-1)-0.616 \times y(t-2)$	0.829	0.785	0.711	0.775
	WEF-Nexus 协同度	-101.610	-101.216	MA(0)	$y(t)=0.000$	0.000	0.000	0.000	0.000
上游	水	-10.634	-10.029	MA(0)	$y(t)=0.501$	0.501	0.501	0.501	0.501
	能源	-2.424	-1.516	AR(1)	$y(t)=0.487+0.849 \times y(t-1)$	0.729	0.692	0.661	0.694
	粮食	-5.180	-4.272	AR(1)	$y(t)=0.507+0.915 \times y(t-1)$	0.859	0.829	0.802	0.830
中游	水	-80525	-7.920	MA(0)	$y(t)=0.575$	0.575	0.575	0.575	0.575
	能源	-8.359	-7.149	AR(2)	$y(t)=0.470+1.656 \times y(t-1)-0.730 \times y(t-2)$	0.989	0.993	0.958	0.980
	粮食	-4.999	-4.394	MA(0)	$y(t)=0.559$	0.559	0.559	0.559	0.559
下游	水	-9.733	-9.128	MA(0)	$y(t)=0.445$	0.445	0.445	0.445	0.445
	能源	-5.756	-5.151	MA(0)	$y(t)=0.354$	0.354	0.354	0.354	0.354
	粮食	-15.400	-14.492	AR(1)	$y(t)=0.560+0.816 \times y(t-1)$	0.731	0.699	0.674	0.701

代等途径缓解压力,而水资源由于其自然属性且难以被生产创造,因此,水资源问题成为影响 WEF-Nexus 协同演化的重要约束。

#### 4.3.2 分区域层面预测

水资源成为各区域共同的发展约束,而能源及粮食在各区域中表现优势不同。水资源有序度方面,即使水资源丰富的上游,将仅处于均值 0.501 的中等水平,对于水资源不丰富的下游,特别是河南、山东等粮食主产区由于对水资源过高需求,可能出现均值 0.445 的中低水平。能源有序度方面,得益于水电优势,上游将处于均值 0.694 的中等水平,受益于煤炭等资源天然储备丰富,加之近些年能源革命效果良好,中游将处于 0.980 的高等水平,下游则可能处于均值 0.354 的低等水平,其能源结构优化任重道远。粮食有序度方面,受益于光热条件良好及新增耕地及灌区面积扩大,上游将处于均值 0.830 的高等水平,受水沙关系治理及退耕还林要求等约束,中游将处于 0.559 的中低水平,得益于粮食主产区优势,下游将处于均值 0.701 的中高水平。相比而言,中游粮食结构优化调整仍需加强。

## 5 结论与政策启示

### 5.1 结论

参考协同学原理,构建黄河流域水、能源、粮食各子系统的有序度模型,以及 WEF-Nexus 协同度模

型,从流域层和区域层对 WEF-Nexus 协同演化进行实证分析及 ARIMA 预测。主要结论如下:

(1)从全流域层面看,2010—2019 年各子系统有序度演化轨迹不同。水资源有序度经历“先上升、后下降、再上升”的演化过程,能源有序度经历“先直线式快速上升、后波动式缓慢上升”的演化过程,粮食有序度经历“波动中缓慢上升”的演化过程。各子系统有序度不同时期演化路径各异,使 WEF-Nexus 演化长期处于低协同甚至若干年份出现负协同状态。相对而言,水资源有序度与粮食有序度之间互为支撑作用较好,能源有序度与粮食有序度之间互为支撑作用次之,水资源有序度与能源有序度之间互为支撑作用较弱,也使得水资源和粮食之间协同度,略高于能源与粮食之间协同度,以及水资源与能源之间协同度。

(2)从分区域层面看,2010—2019 年 3 个区域的 WEF-Nexus 均长期处于低协同状态,但各区域中子系统间竞合关系各有不同。其中,上游 3 个子系统有序度分别呈现“先增后降”“稳步上升”“稳步上升”等演化趋势,能源有序度与粮食有序度互为支撑作用较好,水资源有序度与能源有序度互为支撑作用其次,水资源有序度与粮食有序度互为支撑作用较弱,甚至呈现竞争关系。中游 3 个子系统有序度分别呈现“波动式缓慢上升”“稳步上升”“波动式



缓慢上升”等演化趋势,水资源有序度、能源有序度、粮食有序度彼此互为支撑作用一般。下游3个子系统有序度分别呈现“先升后降再升”“先降低后缓慢上升”“平缓式上升”等演化趋势,水资源有序度与粮食有序度互为支撑作用较好,水资源有序度与能源有序度互为支撑作用较弱,能源有序度与粮食有序度则呈现竞争关系。

(3)从ARIMA预测来看,水、能源、粮食3个子系统有序度不匹配,加之粮食及能源对水资源依赖性及破坏性,WEF-Nexus短期内仍处于低协同状态,水资源仍是影响WEF-Nexus协同演化的重要约束。而能源及粮食在各区域中优势也表现不同,其中下游的能源结构及中游的粮食结构,成为区域优化调整的重点。

## 5.2 政策启示

从全流域层面看,以水资源承载力为最大刚性约束,打造跨地区参与、多部门协同的平台型政府,把握黄河国家文化公园建设契机,构建WEF-Nexus协同安全命运共同体。

(1)统筹水资源、水环境和水生态关系,科学利用南水北调新增水量:重点解决地表水开发超载,执行最严格需水管理,以节水带动保水;完善地下水饮用水源地及重点污染源清单建设,加大环境监测及治理;做好蓝水和绿水调控并拓展其他供水。

(2)围绕“双碳”目标,以生态能源新模式促进绿色转型:实施“煤海绿洲”及“智慧煤矿”,加强矿区水源保护,畅通煤炭外送;搭建油气安全保障体系,推进跨区域油气管网布局的智慧化、协同化;提高水电重要地位,建设“水光蓄储”多能互补基地,畅通清洁能源互补打捆外送通道。

(3)坚守“谷物基本自给、口粮绝对安全”底线,推进农业绿色发展及韧性布局:围绕种子“芯片”,加强种质资源保护,做好救灾备荒种子储备;对谷物、豆类、薯类“有保有压”,重点保口粮、保谷物,通过科技创新实现提质增效;利用黄河国家文化公园建设等契机,培育新农人,讲好黄河粮食文化故事,倡导珍爱粮食风尚。

从分区域层面看,各地区应立足长远战略定位,拓宽合作治理渠道,区分不同资源禀赋优势,实现生态位错位发展。

(1)上游地区,深化南水北调西线论证,突出生态安全主线,筑牢源头责任,加快风、光、水多能互补,打造国家清洁能源产业高地:加强水源涵养区保护修复,做好冰川积雪哺育,稳定地表水流量,推进黄河水替代地下水,探索苦咸水利用,拓宽供水渠道;逐步引导煤企退出,强化原油和天然气清洁生产,立足水电富矿,提高电力产量;协同沙漠化防治,拓展新增耕地和灌溉面积,做好粮食种植品质化、效益化、信息化。

(2)中游地区,以节水扩大发展空间,做好能源革命,确保口粮安全:加大地表水污染及地下水超采治理,稳定生态补水;保障原煤安全产量,助力煤成气产业及非常规天然气基地建设,提高原油、天然气及电力清洁生产;确保口粮安全,推动主食产业化,稳定豆类生产同时,以马铃薯主粮化为引导,促进薯类规模生产。

(3)下游地区,做好黄河三角洲保护,落实最严格耕地保护,扛稳粮食安全:通过水资源税改,引导地表水利用,抑制地下水超采,扩宽海水淡化等其他供水;推进原煤储备,稳定原油及天然气产量,加快海上风电及风光储一体化建设;防止耕地“非粮化”,保障谷物种植安全前提下,提升豆类及薯类规模。

## 参考文献(References):

- [1] 任保平. 黄河流域高质量发展的特殊性及其模式选择[J]. 人文杂志, 2020, (1): 1-4. [Ren B P. The particularity and mode selection of high-quality development of the Yellow River Basin[J]. The Journal of Humanities, 2020, (1): 1-4.]
- [2] 杨永春, 穆焱杰, 张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 409-423. [Yang Y C, Mu Y J, Zhang W. Basic conditions and core strategies of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 409-423.]
- [3] Aiko E, Izumi T, Kimberly B, et al. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus[J]. Journal of Hydrology Regional Studies, 2017, 11: 20-30.
- [4] 王慧敏. “水-能-粮”系统治理[N]. 新华日报, 2021-01-19(18). [Wang H M. Governance of “Water-Energy-Food” System[N]. Xinhua Daily, 2021-01-19(18).]
- [5] Khan S, Hanjra M A. Footprints of water and energy inputs in food production: Global perspectives[J]. Food Policy, 2009, 34(2): 130-

2022年3月

- 140.
- [6] 金凤君, 马丽, 许堃. 黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 127-136. [Jin F J, Ma L, Xu D. Environmental stress and optimized path of industrial development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 127-136.]
- [7] Haken H. Synergetics[J]. *Naturwissenschaften*, 1980, 67(3): 121-128.
- [8] Gruber M. An evolutionary perspective on adoption-diffusion theory[J]. *Journal of Business Research*, 2020, DOI: 10.1016/j.jbusres.2020.02.024.
- [9] 林志慧, 刘宪锋, 陈瑛, 等. 水-粮食-能源纽带关系研究进展与展望[J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1591-1604. [Lin Z H, Liu X F, Chen Y, et al. Water-food-energy nexus: Progress, challenges and prospect[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1591-1604.]
- [10] 彭俊杰. 黄河流域“水-能源-粮食”纽带系统的生成机制、价值体现与路径重塑[J]. 当代经济管理, 2021, 43(8): 76-81. [Peng J J. The generating mechanism, value embodiment and path reconstruction of the water-energy-food nexus in the Yellow River Basin[J]. *Contemporary Economic Management*, 2021, 43(8): 76-81.]
- [11] 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 Y L, Chen J F, Wang H M, 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.]
- [12] Naidoo D, Nhamo L, Mpande S, et al. Operationalising the water-energy-food nexus through the theory of change[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, DOI: 10.1016/j.rser.2021.111416.
- [13] Hellegers P, Zilberman D, Steduto P, et al. Interactions between water, energy, food and environment: Evolving perspectives and policy issues[J]. *Water Policy*, 2008, DOI: 10.2166/wp.2008.048.
- [14] 刘倩, 张苑, 汪永生, 等. 城市水-能源-粮食关联关系(WEF-Nexus)研究进展: 基于文献计量的述评[J]. 城市发展研究, 2018, 25(10): 4-17. [Liu Q, Zhang Y, Wang Y S, et al. Urban WEF-Nexus toward sustainable development: A bibliometric review[J]. *Urban Development Studies*, 2018, 25(10): 4-17.]
- [15] 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.]
- [16] 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): 138-148. [Li G J, Huang D H, Li Y L. Evaluation on the efficiency of the input and output of water-energy-food in different regions of China[J]. *Comparative Economic & Social Systems*, 2017, (3): 138-148.]
- [17] 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.]
- [18] Deng H M, Wang C, Cai W J, et al. Managing the water-energy-food nexus in China by adjusting critical final demands and supply chains: An input-output analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137635.
- [19] Radini S, Marinelli E, Akyol A, et al. Urban water-energy-food-climate nexus in integrated wastewater and reuse systems: Cyber-physical framework and innovations[J]. *Applied Energy*, 2021, DOI: 10.1016/J.APENERGY.2021.117268.
- [20] 施海洋, 罗格平, 郑宏伟, 等. 基于“水-能源-食物-生态”纽带因果关系和贝叶斯网络的锡尔河流域用水分析[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1036-1052. [Shi H Y, Luo G P, Zheng H W, et al. Water use analysis of Syr Darya River Basin: Based on “water-energy-food-ecology” nexus and bayesian network[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 1036-1052.]
- [21] Yu L, Martinez H E, Leach M, et al. Designing integrated local production systems: A study on the food-energy-water nexus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135(1): 1065-1084.
- [22] Radmehr R, Ghorbani M, Ziaei A N. Quantifying and managing the water-energy-food nexus in dry regions food insecurity: New methods and evidence[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 1-19.
- [23] Sadeghi S H, Moghadam E S, Delavar M, et al. Application of water-energy-food nexus approach for designating optimal agricultural management pattern at a watershed scale[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 233(4): 56-72.
- [24] 安树伟, 李瑞鹏. 黄河流域高质量发展的内涵与推进方略[J]. 改革, 2020, (1): 76-86. [An S W, Li R P. Intension and promotion strategy of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. *Reform*, 2020, (1): 76-86.]
- [25] 李小建, 文玉钊, 李元征, 等. 黄河流域高质量发展: 人地协调与空间协调[J]. 经济地理, 2020, 40(4): 1-10. [Li X J, Wen Y Z, Li Y Z, et al. High-quality development of the Yellow River Basin from a perspective of economic geography: Man-land and spatial coordination[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(4): 1-10.]
- [26] 徐勇, 王传胜. 黄河流域生态保护和高质量发展: 框架、路径与对策[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(7): 875-883. [Xu Y, Wang C S. Ecological protection and high-quality development in the Yel-

- low River Basin: Framework, path, and countermeasure[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(7): 875–883.]
- [27] 任保平, 张倩. 黄河流域高质量发展的战略设计及其支撑体系构建[J]. 改革, 2019, (10): 26–34. [Ren B P, Zhang Q. The strategic design and supporting system construction of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Reform, 2019, (10): 26–34.]
- [28] 薛澜, 杨越, 陈玲, 等. 黄河流域生态保护和高质量发展战略立法的策略[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 1–7. [Xue L, Yang Y, Chen L, et al. Strategy of the legislation of Yellow River Basin ecological protection and high-quality development[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(12): 1–7.]
- [29] 樊杰, 王亚飞, 王怡轩. 基于地理单元的区域高质量发展研究: 兼论黄河流域同长江流域发展的条件差异及重点[J]. 经济地理, 2020, 40(1): 1–11. [Fan J, Wang Y F, Wang Y X. High quality regional development research based on geographical units: Discuss on the difference in development conditions and priorities of the Yellow River Basin compared to the Yangtze River Basin[J]. Economic Geography, 2020, 40(1): 1–11.]
- [30] 方创琳. 黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 1–8. [Fang C L. Spatial organization pattern and high-quality development of urban agglomeration in the Yellow River Basin[J]. Economic Geography, 2020, 40(6): 1–8.]
- [31] 李江苏, 孙威, 余建辉. 黄河流域三生空间的演变与区域差异: 基于资源型与非资源型城市的对比[J]. 资源科学, 2020, 42(12): 2285–2299. [Li J S, Sun W, Yu J H. Change and regional differences of production–living–ecological space in the Yellow River Basin: Based on comparative analysis of resource–based and non–resource–based cities[J]. Resources Science, 2020, 42(12): 2285–2299.]
- [32] 徐辉, 师诺, 武玲玲, 等. 黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 115–126. [Xu H, Shi N, Wu L L, et al. High-quality development level and its spatiotemporal changes in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 115–126.]
- [33] 孙继琼. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合协调: 评价与趋势[J]. 财经科学, 2021(3): 106–118. [Sun J Q. Evaluation and trend prediction of coupling coordination between ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Finance & Economics, 2021(3): 106–118.]
- [34] 罗巍, 杨玄酯, 杨永芳. 面向高质量发展的黄河流域科技创新空间极化效应演化研究[J]. 科技进步与对策, 2020, 37(18): 44–51. [Luo W, Yang X Z, Yang Y F. The evolution of spatial polarization effect of science and technology innovation in Yellow River oriented by high-quality development[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2020, 37(18): 44–51.]
- [35] 周清香, 何爱平. 数字经济赋能黄河流域高质量发展[J]. 经济问题, 2020, (11): 8–17. [Zhou Q X, He A P. High quality development of the Yellow River Basin empowered by digital economy[J]. On Economic Problems, 2020, (11): 8–17.]
- [36] 温馨, 周佳子. 一种面向效率的系统多序参量识别方法[J]. 运筹与管理, 2020, 29(10): 183–189. [Wen X, Zhou J Z. The utility model relates to an efficiency-oriented method for system multi-order parameter identification[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(10): 183–189.]
- [37] 李金昌, 史龙梅, 徐嵩婷. 高质量发展评价指标体系探讨[J]. 统计研究, 2019, 36(1): 4–14. [Li J C, Shi L M, Xu A T. Probe into the assessment indicator system on high-quality development[J]. Statistical Research, 2019, 36(1): 4–14.]
- [38] Hillmer S C, Tiao G C. An ARIMA–model–based approach to seasonal adjustment[J]. Journal of the American Statistical Association, 1982, 77(377): 63–70.
- [39] 俞立平, 宋夏云, 邹文璨, 等. 科技评价权重的本质研究[J]. 情报杂志, 2018, 37(2): 117–121. [Yu L P, Song X Y, Zou W C, et al. A study on the weight essence of science and technology evaluation[J]. Journal of Intelligence, 2018, 37(2): 117–121.]
- [40] Saaty L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3): 234–281.
- [41] 赵晓妮. 黄河流域高质量发展的气候与水之问[N]. 中国气象报, 2020–04–01(3). [Zhao X N. The Question of Climate and Water for High-Quality Development of The Yellow River Basin[N]. China Meteorological News, 2020–04–01(3).]
- [42] 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 S, Sun C Z, Song Q M. 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.]
- [43] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 29–36. [Jia S F, Liang Y. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29–36.]



# Co-evolution of water-energy-food nexus in the Yellow River Basin and forecast of future development

LUO Wei<sup>1,2</sup>, YANG Xuanzhi<sup>3</sup>, YANG Yongfang<sup>4</sup>, CHENG Suiying<sup>5</sup>

(1. School of Business, Henan University, Kaifeng 475000, China; 2. Institute of Business Administration, Henan University, Kaifeng 475000, China; 3. School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 4. School of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475000, China; 5. School of Cultural Industry and Tourism Management, Henan University, Kaifeng 475000, China)

**Abstract:** Water, energy, and food form an interdependent nexus. The Yellow River Basin is the typical place where the conflict between the three are prominent and concentrated, which means that co-evolution of the water-energy-food nexus becomes an important foundation for ensuring the safety of river basin resources, maintaining ecological balance, and achieving sustainable development. Based on the principle of synergy and the structure of order parameter-subsystem-composite system, this study conducted an empirical analysis and autoregressive integrated moving average (ARIMA) forecast on the co-evolution of water-energy-food nexus in the Yellow River basin at the river basin and regional scales, 2010-2019. The results show that: (1) At the river basin level, the order degree of the three subsystems have increased in the past 10 years, but the water-energy-food nexus has a long-term low synergy, and the water-food synergy is slightly higher than the energy-food synergy and water-energy synergy. (2) At the regional scale, the order degree of the subsystems in both the upstream and downstream regions have risen and fallen differently in the past 10 years, while the order degree of the subsystems in the midstream region has evolved continuously, and the water-energy-food nexus in the three regions shows a long-term low synergy. (3) According to the ARIMA forecast, the water-energy-food nexus will be in a low-coordination state in the short term, and water resources are still the primary constraint relative to energy and food. Finally, for the basin and regional levels, the article puts forward some policy implications such as promoting multi-element interaction on the basis of water as a constraint and adopting varied ecological development to realize multi-regional coordination.

**Key words:** high-quality development; water-energy-food; co-evolution; order degree; Yellow River Basin