

干旱区水—能源—粮食纽带系统协同演化 ——以中国西北地区为例

孙才志^{1,2}, 魏亚琼³, 赵良仕^{1,2}

(1. 教育部人文社科重点研究基地, 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029; 2. 辽宁省“海洋经济高质量发展”高校协同创新中心, 大连 116029; 3. 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029)

摘要: 水、能源、粮食是人类社会发展的基本保障,三者之间的紧密联系成为近年来国内外学者关注的重点。通过对水—能源—粮食纽带系统协同演化机制的探究,能更好地厘清三者之间的相互关系,对实现社会高质量发展具有重要意义。基于自组织理论,从水、能源、粮食三个角度构建理论模型,运用哈肯模型分阶段地对中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同发展的演化机制进行探究,并在此基础上分析水—能源—粮食纽带系统协同得分的时空分异规律。结果表明:(1)2000—2010年间,中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同演化的序参量是水资源子系统,其主导着整个系统的演化方向,而能源子系统、粮食子系统处于从属地位。在协同得分的时空变化规律上,西北五省区协同得分整体呈上升趋势,但各地区得分差距较大。(2)2011—2018年间,中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同演化的序参量是水资源子系统和能源子系统,两者共同主导着水—能源—粮食纽带系统的协同演化,粮食子系统则处于从属地位。在协同得分的时空变化规律上,西北五省区协同得分仍保持平稳上升趋势,省际间得分差距明显缩小。

关键词: 水—能源—粮食纽带系统;自组织系统;哈肯模型;中国西北地区

水资源、能源、粮食资源是人类社会可持续发展的重要物质保障^[1]。伴随着人口爆炸式增长、气候变化、能源枯竭等全球性问题的出现^[2,3],人类对水资源、能源、粮食资源的消耗大大增加^[4]。据统计,近50年以来,全球水资源、能源、耕地资源的人均拥有量下降了20%~40%^[5],而在未来的20年内,人类对三者的需求预计增长30%~50%^[6]。中国作为世界上最大的发展中国家,水资源、能源、粮食资源的资源禀赋度在时空上存在着明显的差异^[7]。特别是中国西北地区,生态环境脆弱,水资源储量与能源开发、粮食生产之间极不匹配,已经成为限制中国西北地区经济社会实现高质量发展的重要因素。因此,开展中国西北地区水—能源—粮食纽带系统的协同演化研究对实现该地区的协调发展具有重要意义。

虽然水、能源、粮食资源的短缺对人类社会产生的压力由来已久,但是国内外对三者之间紧密联系的研究却十分短暂。水—能源—粮食纽带系统的研究起步于21世纪初,为了应对气候变化、能源安全、粮食安全等问题,许多学者开始关注水、能源、粮食的一元系统与社会经济发展之间的协同问题^[8-11]。但是随着社会经济的发展,以及对资源需求量的不断增加,当前一元系统的研究难以解决多资源协同发展的问题,不仅无法对决

收稿日期: 2020-12-07; 修订日期: 2021-05-06

基金项目: 国家社会科学基金项目 (19AJY010)

作者简介: 孙才志 (1970-), 男, 山东烟台人, 博士, 教授, 主要从事水资源经济与海洋经济研究。

E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

策制定提出合理建议,甚至还会误导决策的实施^[12]。2011年世界经济论坛将水—能源—粮食纽带系统列为威胁全球稳定发展的主要风险群之一^[13],水—能源—粮食纽带系统这个概念才逐渐被人们关注。同年11月,德国联邦政府召开的波恩会议上,首次提出水资源、能源和粮食之间存在一种“纽带关系”,并指出由于水资源、能源与粮食之间存在复杂的关联关系,单纯地基于单一资源的政策制定都将会产生不可预估的后果^[14]。在这种背景下,许多学者对水—能源—粮食纽带系统展开了大量的研究。

目前国际上对水—能源—粮食纽带系统的研究主要集中在以下方面:首先,在研究方法上常用系统动力学、投入产出法、生命周期评估法等等。例如Janez^[15]利用系统动力学模型,探索了水—能源—粮食纽带系统与当地GDP之间的因果联系,为世界经济论坛对GDP的定性描述提供了一个定量描述的建模平台;Owen等^[16]运用投入产出分析法,基于能源、水和粮食的消费情况计算了英国1997—2013年从原料提取到最终消费不同产品供应链之间能源、水资源和粮食的相互作用;Salmoral等^[17]以英格兰南部的Tamar河流域为研究对象,基于生命周期评估法对该区域粮食消费过程中的水资源和能源进行了量化,并对粮食供应链中的关键投入进行了评估,研究结果可为应对水—能源—粮食纽带系统的潜在风险提供依据。其次,在研究内容上,多集中在水资源、能源、粮食三者之间的纽带关系上。例如Daher等^[18]开发了W-E-F Nexus tool 2.0模型,用于分析水资源、能源、粮食资源之间的纽带关系,为学者们制定资源配置方案提供了平台;Hernandez等^[19]运用NexSym模型,对英国生态城市的水资源、能源、粮食三者之间协同发展进行了评估。随着研究的不断深入,一些学者开始对水—能源—粮食纽带系统对社会经济的影响机制进行探索。例如White等^[20]从地区贸易角度出发,用MRIO模型分析了东亚地区水资源、能源、粮食之间的关联,用以评估水—能源—粮食纽带系统投入与环境产出的竞争需求;Jesus等^[21]建立了基于水—能源—粮食纽带系统协同关系的多目标宏观优化模型,量化了水资源、能源、粮食资源在工业、农业、畜牧业之间的供需弹性。与此同时,国内对水—能源—粮食纽带系统的研究也大量涌现。但主要集中于水—能源—粮食纽带系统的概念引入与耦合性评价等方面。例如李桂君等^[12]通过分析水—能源—粮食纽带系统协同发展的历史,尝试从“什么是水—能源—粮食纽带系统”和“为什么是水—能源—粮食纽带系统”两个方面对水—能源—粮食纽带系统进行概念界定;Wang等^[22]利用物元可拓模型与PSR模型,对中国水—能源—粮食纽带系统体系的可持续性进行了评价;Sun等^[23]采用网络DEA模型,对中国三十个地区水—能源—粮食纽带系统耦合效率进行了测量。

尽管近几年有关水—能源—粮食纽带系统的研究不断涌现,研究方法也逐渐多样化^[24],但是国内对于水—能源—粮食纽带系统的研究仍处于初级阶段,并且大部分学者都将水—能源—粮食纽带系统内部间的联系作为研究的前提而不是研究的重点^[25],没有真正的理解水—能源—粮食纽带系统的内在发展机制。因此,本文基于自组织系统理论,对2000—2018年中国西北地区水—能源—粮食纽带系统的协同演化机制进行探讨,并对中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同状态进行评价。由于涉及的时间段过于漫长,为了更好地分析西北地区水—能源—粮食纽带系统协同演化驱动因素的变化,将“十一五”规划结束之年(2010年)作为分界点,对两个时间段(2000—2010年、2011—2018年)展开研究。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

中国西北地区是“丝绸之路”经济带的核心地区,是中国与中亚、欧洲陆上连接的重要纽带,西北地区在行政区划上主要包括陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆五省区。陆域面积约307.9万 km^2 ,约占中国国土面积的32%。2018年常住人口约1亿,约占中国人口比例的7.3%。尽管西北地区拥有广阔的地域与人口,却是中国水资源与能源、粮食资源匹配程度极不协调的地区之一。西北地区是中国“西部大开发”战略的关键地区,是中国能源战略布局中的重要能源生产与外输基地。2018年,西北地区能源生产量约88864万t,约占全国能源生产总量的24%。随着“西气东输”“北煤南运”等战略的实施,陕甘宁、塔里木盆地、柴达木盆地等地区将成为中国重要的能源生产外输基地。

西北地区深居内陆,距海遥远,形成了典型的温带大陆性气候。降水自西向东,自南向北递减,且多在400 mm以下。因此,西北地区成为中国资源性缺水的典型地区,平均年水资源总量在900亿 m^3 以下,仅为全国年水资源总量的8%。由于独特的地貌与气候条件,西北地区形成了许多历史悠久的农业区域和极具特色的种植结构,其中陕西关中地区、甘肃河西地区、宁夏、新疆南部地区等都是我国重要的粮食生产基地。粮食作物以耐旱的青稞、小麦、大豆为主。随着我国东部地区的城镇化水平不断提升,西北地区将会成为我国粮食主产区之一^[26,27]。

1.2 理论基础与研究方法

1.2.1 水—能源—粮食纽带系统协同演化的驱动因素分析

水—能源—粮食纽带系统协同演化,指的是地区之间或一个地区内部水资源、能源、粮食资源各子系统之间协同合作,推动水—能源—粮食纽带系统从无序到有序,从初级到高级的动态转变,形成互利共生,合作共赢的可持续发展机制。根据目前的研究,学术界普遍认为水—能源—粮食纽带系统内部存在着复杂而又紧密的联系,这种联系一方面体现在水、能源、粮食三个子系统之间存在共生性,具体表现为:能源生产、粮食种植需要水资源的支持;水资源的提取、净化则需要能源、粮食系统提供能量;同时能源为粮食生产提供了绝大部分机械动力,粮食则通过生物质能转化为能源。另一方面体现在水、能源、粮食三个子系统之间存在竞争性,具体表现为:水资源的提取、净化,粮食的种植加剧了能源的消耗;能源生产、粮食种植容易造成水资源的污染;水资源污染、能源消耗往往造成生态环境恶化,进而使得粮食产量下降,陷入恶性循环。

1.2.2 水—能源—粮食纽带系统协同演化的自组织特征

自组织理论是20世纪60年代开始兴起的一种系统理论^[28]。德国物理学家Haken^[29]认为当系统不存在人为给出的外部指令时,系统内部各个子系统按照相互默契的某种规则,各尽其职而又协同的形成有序结构,就是自组织。它是一个可以应用到种类繁多的不同系统的理论。水资源、能源、粮食资源由于其自身对人类社会的重要性及其三者相互之间的紧密联系,从而形成了一个具有自组织特征的协同系统。首先,水—能源—粮食纽带系统并不是完全闭合的封闭系统,它是一个与社会经济、生态环境相互作用、相互影响的动态系统。一方面,水—能源—粮食纽带系统作为人类社会经济发展的重要物质保障,推动着人类社会的高速发展,另一方面,水—能源—粮食纽带系统受到社会经济、生态环境的影响,来自系统外部的压力可能引起系统本身的量变。其次,水

—能源—粮食纽带系统在每一时刻的实际观测值与平均值之间的偏差, 具有随机性^[30]。由于水—能源—粮食纽带系统是一个开放性的动态系统, 时刻受到外界环境的影响, 因此水—能源—粮食纽带系统的状态变量时刻发生着涨落, 当水—能源—粮食纽带系统状态变量的涨落累计达到一定量, 使得系统状态变量越过系统演化的临界值时, 系统就会发生质变, 从而使系统形成新的有序结构。最后, 水—能源—粮食纽带系统各个子系统的演变并非是简单的线性关系, 即一个状态变量的变化引起的整个系统变量的变化并不是成比例的直线关系。由于水—能源—粮食纽带系统本身的复杂性与开放性, 水—能源—粮食纽带系统各要素之间存在着错综复杂的非线性相互作用。在这样的系统中, 任意子系统状态的细微变化都可能引起整个系统的巨大变化, 而较大的变化也可能只引起细微的变动。哈肯的系统学为探究自组织系统的演化过程提供了研究方法, 他认为, 任何系统都是由不同的子系统及其组成要素构成的, 在系统的演化过程中, 由于各个子系统参数阻尼值不同, 参数状态的变化速度也不相同。阻尼值越大, 参数衰减越快, 称之为快变量。阻尼值越小, 参数变化越慢。称之为慢变量, 即序参量。在系统的演化过程中, 序参量通常有一个或者几个, 主导着系统的演化方向, 支配其他快变量。在水—能源—粮食纽带系统中, 当系统序参量的状态变量超过系统稳定点时, 系统就会发生变化, 形成新的有序结构。

1.2.3 哈肯模型

哈肯模型是赫尔曼·哈肯提出的用以分析复杂系统有序度的重要模型^[31,32], 它主要用于系统序参量的识别。哈肯模型先假设两个相互关联的子系统分别为系统的快、慢两种变量, 通过构建运动方程, 得出两个子系统的阻尼值, 然后利用绝热消去法消除快变量, 最终得出系统的慢变量, 即序参量^[29]。

假设 q_1 为某个子系统的状态变量, q_2 被该变量控制, 则系统的运动方程可表示为

$$\dot{q}_1 = -\lambda_1 q_1 - a q_1 q_2 \quad (1)$$

$$\dot{q}_2 = -\lambda_2 q_2 + b q_1^2 \quad (2)$$

式中: q_1 、 q_2 代表系统的状态变量; λ_1 、 λ_2 代表两个子系统的阻尼系数, $\lambda \neq 0$; a 、 b 均为常数。当系统达到一个定态解, 即 $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = 0$ 时, $|\lambda_2| \gg |\lambda_1|$, 并且 $\lambda_2 > 0$, 则表明系统的状态变量 q_2 为快速衰减的快变量。这一过程称之为绝热近似假设。若绝热近似假设成立, 突然撤去 q_2 , q_1 来不及变化。令 $\dot{q}_2 = 0$, 求得:

$$q_2 = \frac{b}{\lambda_2 q_1^2} \quad (3)$$

q_1 即为系统的序参量, 系统演化方程为:

$$\dot{q}_1 = -\lambda_1 q_1 - \frac{ab}{\lambda_2 q_1^3} \quad (4)$$

对 \dot{q}_1 的相反数求积分可得系统的势函数, 通过对势函数求解可以判断系统所处的状态。

$$v = \frac{1}{2} \lambda_1 q_1^2 + \frac{ab}{4 \lambda_2 q_1^4} \quad (5)$$

由于式(1)、式(2)是针对连续性随机变量设定的, 在将其应用到水—能源—粮食纽带系统分析时, 需对式(1)、式(2)进行离散化处理, 其中 t 为时间变量, 即:

$$q_1(t) = (1 - \lambda_1) q_1(t-1) - a q_1(t-1) q_2(t-1) \quad (6)$$

$$q_2(t) = (1 - \lambda_2)q_2(t-1) + bq_1^2(t-1) \quad (7)$$

1.3 系统状态变量的选取及数据来源

1.3.1 指标体系的构建

由于考虑到水—能源—粮食纽带系统的复杂性以及国内外对水—能源—粮食纽带系统的研究尚处在初级阶段,因此学术界对水—能源—粮食纽带系统的评价指标还没有达成完全共识。本文在以往学者研究成果的基础上^[33-36],遵循综合性、科学性、真实性、可操作性的原则,从水、能源、粮食三个子系统出发,选取了30个指标,共同构建起中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同评价指标体系。结果见表1。

1.3.2 指标权重的确定

由于表1中各指标单位不同,因此利用max-min归一化方法,对原始指标数据做无量纲化处理,然后运用熵权法确定各项指标的权重。熵权法是利用数据离散性进行赋权的一种客观方法,由于篇幅限制,此处略去具体步骤,具体详见参考文献[37]。

1.3.3 数据来源

本文研究区域主要为中国陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆五省区。所使用的数据均来源于2001—2019年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国粮食年鉴》以及研究区域各省份2001—2019年统计年鉴,部分缺失数据利用均值插补法填补。

2 结果分析

2.1 2000—2010年中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同演化的序参量识别

利用哈肯模型对水资源、能源、粮食资源三个子系统参量进行两两分析,并根据绝热消去法判断模型假设是否成立,最终得出系统序参量。结果见表2。

通过利用哈肯模型对第一阶段影响中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同发展的三个主要子系统进行序参量识别,结果表明,水资源子系统是第一阶段影响水—能源—粮食纽带系统协同发展的序参量。它在系统的整个演化过程中起到主导作用,通过支配能源子系统与粮食子系统,促使水—能源—粮食纽带系统不断演进。

2.2 2000—2010年中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同得分时空变化规律分析

根据运动方程(2)显示, $\lambda_1=0.1$, $\lambda_2=1.25$, $a=-0.917$, $b=-0.196$ 。

则系统演化方程为:

$$\dot{q}_1 = -0.19q_1 + 0.14q_1^3 \quad (8)$$

系统势函数为:

$$v = 0.05q_1^2 - 0.036q_1^4 \quad (9)$$

解得势函数的三个解: $q_1^*=0$, $q_1^{**}=1.178$, $q_1^{***}=-1.178$ 。

将势函数的三个解代入系统势函数方程,可得到系统演化的三个稳定点,但是由于在实际的经济分析中,序参量的状态参数都是大于零的,因此水—能源—粮食纽带系统的稳定点为(1.178, 0.139)。系统任意状态参量点A与稳定点之间的距离决定了系统所处的状态,即系统状态评价函数为:

$$s_1 = \sqrt{(q - 1.178)^2 + [v(q) - 0.139]^2} \quad (10)$$

s_1 值越大表明系统的状态点距离稳定点越远,则协同得分越低,反之则协同得分越

表1 中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同评价指标体系

Table 1 Cooperative evaluation index system of water-energy-food nexus in Northwest China

目标层	准则层	指标层	指标计算方法或来源	指标性质	权重
水资源子系统	社会安全	人均水资源量/(m ³ /人)	统计数据	正	0.168
		地区生活用水量占总用水量比/%	地区生活用水量/总用水量	负	0.039
		有效灌溉面积比例/%	有效实灌面积/耕地面积	正	0.130
	经济安全	万元工业产值耗水量/(m ³ /万元)	工业总用水量/工业总产值	负	0.021
		水资源开发利用率/%	统计数据	负	0.022
		水利建设投资/10 ⁴ 元	统计数据	正	0.137
	生态安全	生态环境补水量/10 ⁸ m ³	统计数据	正	0.187
		年平均水资源总量/10 ⁸ m ³	统计数据	正	0.021
		天然湿地面积/10 ³ hm ²	统计数据	正	0.149
		节水灌溉面积/10 ³ hm ²	统计数据	正	0.126
粮食子系统	可供量	农作物受灾面积/10 ³ hm ²	统计数据	负	0.043
		粮食产量波动系数	(年粮食总产量-趋势粮食产量)/趋势粮食产量	负	0.040
		人均粮食产量/(kg/人)	粮食总产量/地区总人口	正	0.119
	生产可持续性	粮食播种面积比例/%	粮食种植面积/地区总面积	正	0.085
		耕地实际灌溉亩均用水量/(m ³ /hm ²)	统计数据	负	0.141
		农用化肥用量/10 ⁴ t	统计数据	正	0.198
		农用机械总动力/10 ⁴ kW	统计数据	正	0.148
	贸易平衡性	城乡居民消费水平/元	统计数据	正	0.173
		粮食消费价格指数	t 年粮食消费价格/ $t-1$ 年粮食消费价格 $\times 100$	负	0.029
		粮食生产价格指数	t 年粮食生产价格/ $t-1$ 年粮食生产价格 $\times 100$	负	0.024
能源子系统	供应稳定性	地区能源自给率/%	地区能源生产量/能源消耗量	正	0.162
		能源消费增长系数	能源消费年增长速度/国民经济发展年增长速度	负	0.019
		水力发电占比/%	统计数据	正	0.157
	经济可承受性	人均能源生产量/(t/人)	地区能源生产量/地区总人口	正	0.105
		单位工业增加值能耗/(t/10 ⁴ 元)	工业综合能源消费量/工业增加值	负	0.019
		水电燃料消费价格指数	统计数据	负	0.010
		能源工业投资额/10 ⁸ 元	统计数据	正	0.167
	环境承载力	工业废水排放达标量/10 ⁴ t	统计数据	正	0.104
		工业废气排放量/10 ⁸ m ³	统计数据	正	0.025
		森林覆盖率/%	统计数据	正	0.232

高。为了更加全面直观地反映西北五个省区的协同得分变化趋势，便于对各省区进行比较，本文采用极值法对原始协同得分值进行归一化处理，同时为避免出现0和1的边界问题，在对原始协同得分值归一化处理之前将原始得分值的最大值提升10%，最小值降低10%，最终得出西北各省区的得分变化趋势，如图1所示。

表2 第一阶段中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同演化序参量识别结果
Table 2 Identification results of sequence parameters of water-energy-food nexus co-evolution
in Northwest China in the first stage

序号	模型假设	λ_1	a	λ_2	b	结论
①	$q_1=w$	0.3	0.323	0.9	0.59	a. 运动方程不成立
	$q_2=e$	(0.000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.6902)	b. 不满足绝热近似假设 c. 模型假设不成立
②	$q_1=w$	0.1	-0.917	1.25	-0.196	a. 运动方程成立
	$q_2=f$	(0.0151)	(0.0064)	(0.0000)	(0.0049)	b. 满足绝热近似假设 c. 模型假设成立
③	$q_1=e$	0.84	-0.62	1.65	-0.015	a. 运动方程不成立
	$q_2=w$	(0.5752)	(0.4849)	(0.0000)	(0.8510)	b. 不满足绝热近似假设 c. 模型假设不成立
④	$q_1=e$	0.4	0.56	0.98	0.405	a. 运动方程不成立
	$q_2=f$	(0.0000)	(0.0197)	(0.9865)	(0.0281)	b. 不满足绝热近似假设 c. 模型假设不成立
⑤	$q_1=f$	0.8	-1.89	0.48	0.143	a. 运动方程成立
	$q_2=w$	(0.0585)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	b. 不满足绝热近似假设 c. 模型假设不成立
⑥	$q_1=f$	0.61	0.9	0.6	0.36	a. 运动方程成立
	$q_2=e$	(0.0895)	(0.0647)	(0.0205)	(0.0000)	b. 不满足绝热近似假设 c. 模型假设不成立

注：选取显著性水平为10%，w代表水资源子系统，e代表能源子系统，f代表粮食子系统，下同。

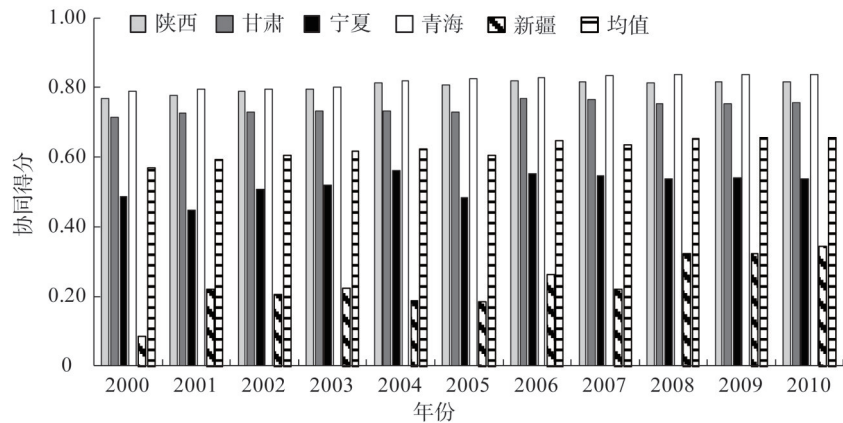


图1 第一阶段西北五省区水—能源—粮食纽带系统协同得分变化趋势

Fig. 1 The change trend of the water-energy-food nexus synergy score of five provinces of Northwest China in the first stage

根据图1可以看出，在水资源子系统主导水—能源—粮食纽带系统的初级阶段，西北五省区水—能源—粮食纽带系统协同得分整体呈现上升趋势，在2010年，五省区的协同得分从高到低依次为青海、陕西、甘肃、宁夏、新疆。从协同得分差距来看，西北各省区之间协同得分差距较大，这可能与各省区水资源储量、开发利用情况等有很大关系。

青海、陕西、甘肃三省得分趋势趋于平稳上升，并且各年份都高于西北地区平均得分水平。青海省水资源丰富，人均水资源占有量约是全国平均水平的5倍。此外，以柴达木盆地为主的地区富含多种能源矿产。而青海省由于地处高原，气候寒冷，人口密度

小,人类社会对水资源、能源、粮食的需求压力也比较小,因此在2000—2010年这一阶段青海省水—能源—粮食纽带系统协同得分更趋向于“自然状态”的协同。陕西、甘肃地区大部分属于半湿润半干旱地区,降水对于其他西北省份来说相对较多,并且地表径流众多,其中陕西省地跨长江、黄河两大水系,境内拥有黄河、渭河、泾河、汉江上游等诸多外流河。甘肃省则除了与陕西省共享黄河、渭河等水系以外,境内还拥有黑河、石羊河等内河水系,水资源总量在西北五省区中处于中等偏上水平。另外在水利建设投资方面,陕甘两省在2010年均在500亿元以上,极大地提高了地区水资源利用效率。因此在水资源子系统主导阶段,陕西、甘肃两省协同得分也较高。

宁夏地区协同得分变化趋势较为曲折,并且各年份均低于西北地区平均水平。这可能是因为宁夏地区地处干旱半干旱区,降水少且其中于夏季,大部分区域降水量在300 mm以下,且蒸发量大,有暖干化趋势。据统计,在2000—2010年间,宁夏地区平均水资源总量仅10亿 m^3 ,远低于西北地区其他省份。人均水资源量仅148 m^3 ,远低于全国平均水平。此外,宁夏地区第一产业在产业结构中占据主导地位,农业用水占用了总用水量的90.1%,严重阻碍了其他产业的发展,导致宁夏地区水—能源—粮食纽带系统协同得分处于较低水平,波动趋势也比较大。新疆地区协同得分增长趋势最为明显,但是新疆地区在西北五省区中协同得分最低,且在2001—2005年这一时间段出现下降趋势。由于新疆维吾尔自治区是我国陆域面积最大的省级行政区,水资源子系统有其自身的特殊性。首先,新疆地区水资源总量大,2010年约882.8亿 m^3 ,由于人口较少,人均水资源量约5125 m^3 ,约是全国平均水平的2倍,但是新疆地区水资源多以冰川形式存在,开发利用的难度较大,需要巨额的水利建设投资,对地区财政造成一定压力。其次,新疆地区是我国重要的农业产区,农业用水量占总用水量94.3%,2001—2005年,新疆地区能源消费增长量、耕地灌溉亩均用水量等耗水量持续上升,能源、粮食子系统对水资源的消耗远大于三者之间的合作共生。“十一五”开始之后,国家对新疆地区固定资产投资规模达到12000亿元,是“十五”时期的两倍多,逐步完善的基础设施和节水技术,使得水—能源—粮食纽带系统协同得分开始大幅度上升,成为西北地区上升速度最快的省份。

2.3 2011—2018年中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同演化的序参量识别

对中国西北地区第二阶段(2011—2018年)水资源子系统、能源子系统、粮食子系统三个变量进行两两分析,结果见表3。

第二阶段(2011—2018年)序参量识别结果表明,水资源子系统和能源子系统是第二阶段中国西北地区水—能源—粮食纽带系统发展的序参量,共同主导着水—能源—粮食纽带系统的协同演化。这说明,在第二阶段,中国西北地区开始发挥能源富足的比较优势,促进水—能源—粮食纽带系统的协同演化,但粮食子系统仍处于从属地位。

当系统存在多个序参量的情况下,应对加总后的序参量组合重新进行识别并对势函数进行求解。结果见表4。

2.4 2011—2018年中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同得分时空变化规律分析

根据表4可知: $\lambda_1=0.14$, $\lambda_2=0.66$, $a=-0.303$, $b=-0.048$ 。

则系统演化方程为:

$$\dot{q}_1 = -0.149q_1 + 0.022q_1^3 \quad (11)$$

系统势函数为:

表3 第二阶段西北地区水—能源—粮食纽带系统协同演化序参量识别结果

Table 3 Identification results of sequence parameters of water-energy-food nexus co-evolution in Northwest China in the second stage

序号	模型假设	λ_1	a	λ_2	b	结论
①	$q_1=w$	0.29	0.287	1.24	-0.448	a. 运动方程不成立
	$q_2=e$	(0.0159)	(0.8278)	(0.0006)	(0.0000)	b. 不满足绝热近似假设 c. 模型假设不成立
②	$q_1=w$	0.05	-0.411	0.65	-0.14	a. 运动方程成立
	$q_2=f$	(0.0000)	(0.0006)	(0.0000)	(0.0336)	b. 满足绝热近似假设 c. 模型假设成立
③	$q_1=e$	0.62	0.148	0.3	0.219	a. 运动方程不成立
	$q_2=w$	(0.0000)	(0.2345)	(0.0345)	(0.4626)	b. 不满足绝热近似假设 c. 模型假设不成立
④	$q_1=e$	0.38	-0.203	0.63	-0.206	a. 运动方程成立
	$q_2=f$	(0.0000)	(0.0055)	(0.0001)	(0.0191)	b. 满足绝热近似假设 c. 模型假设成立
⑤	$q_1=f$	0.45	-0.66	0.16	0.23	a. 运动方程成立
	$q_2=w$	(0.000)	(0.0543)	(0.0001)	(0.0053)	b. 不满足绝热近似假设 c. 模型假设不成立
⑥	$q_1=f$	0.31	-0.558	0.58	0.015	a. 运动方程不成立
	$q_2=e$	(0.0000)	(0.0104)	(0.0000)	(0.9303)	b. 满足绝热近似假设 c. 模型假设不成立

表4 第二阶段西北地区水—能源—粮食纽带系统加总序参量识别结果

Table 4 Identification results of summation sequence parameter of water-energy-food nexus in Northwest China in the second stage

模型假设	λ_1	a	λ_2	b	结论
$q_1=w$ add e	0.14	-0.303	0.66	-0.048	a. 运动方程成立
$q_2=f$	(0.0000)	(0.0441)	(0.0000)	(0.0013)	b. 满足绝热近似假设 c. 模型假设成立

$$v=0.07q_1^2+0.002q_1^4 \tag{12}$$

解得势函数的三个解为 $q_1^*=0$ ， $q_1^{**}=3.741$ ， $q_1^{***}=-3.741$ 。

依据势函数的三个解，得到系统演化方程的稳定点 (3.741, 1.959)，水资源子系统、能源子系统加总后的任意状态参量点 B 与系统稳定点之间的距离决定了系统所处的状态。即系统状态评价函数为：

$$s_2=\sqrt{(q-3.741)^2+(v(q)-1.959)^2} \tag{13}$$

s_2 值越大表明系统的状态点距离稳定点越远，则协同得分越低，反之距离越近则协同得分越高。根据第一阶段的方法，计算出西北五省区水—能源—粮食纽带系统协同得分值变化趋势，如图2所示。

根据图2可知，在水资源子系统、能源子系统共同主导水—能源—粮食纽带系统的新阶段，西北五省区水—能源—粮食纽带系统协同得分整体呈上升趋势。2018年，西北五省区协同得分由高到低依次为陕西、青海、甘肃、宁夏、新疆。从协同得分差距来看，西北五省区之间差距逐步缩小，这是由于在水—能源主导的新阶段，西北各省区开始充分发挥各自比较优势，能源子系统成为带动水—能源—粮食纽带系统的发展演化的

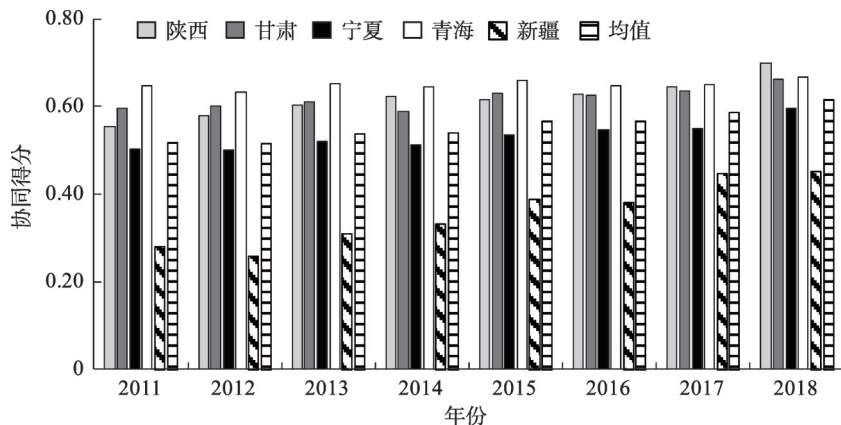


图2 第二阶段西北五省区水—能源—粮食纽带系统协同得分变化趋势

Fig. 2 The change trend of the water-energy-food nexus synergy score of five provinces of Northwest China in the second stage

主导力量之一。

在五个省区中,陕西、甘肃两省能源丰富。其中陕西省是我国主要的煤炭产区之一,煤炭储量居全国第四位,加之人类开发历史悠久,基础设施、工业体系较西北地区其他省份更为完善。甘肃玉门、长庆地区拥有数量可观的石油、天然气资源,是我国“西气东输”等标志性工程的重要通道与供应源地。在2011—2018年间,陕甘两省对能源工业投资额度持续上升,极大地提高了地区能源开发力度与利用效率。此外陕甘两省依托黄河水系和地形优势,积极发展水能产业,2018年,陕甘两省水力发电占比分别达到7.55%和26.87%。这不仅优化了地区能源产业结构,而且加强了水资源子系统与能源子系统的优化配合。因此在水—能主导的新阶段,陕、甘两省水—能源—粮食纽带系统协同得分较高。青海省则由于自身水资源、能源储量丰富,经济社会需求压力较小,水—能源—粮食纽带系统得分较高,且变化趋势趋于平缓。宁夏地区协同得分变化显著,各年份得分与西北地区平均分极大缩小。宁夏地区地域狭小,但是煤炭储量居全国第六位。2011年以来,“煤制油”等为代表的拥有自主知识产权的技术涌现,逐步突破了能源工业的技术瓶颈,以能源“金三角”地区为核心的现代能源化工产业集群正在形成,极大地推动了宁夏地区的水—能源—粮食纽带系统协同水平的提升。新疆地区协同得分上升趋势明显,并且与其他省份差距逐步缩小。新疆地区除了水资源总量丰富之外,能源储量也十分可观。根据目前探明的储量预测,新疆地区石油资源约500亿t,约占全国石油储量的1/3;天然气资源储量13亿 m^3 ,约占全国天然气储量的34%。因此,新疆地区成为我国能源跨地区调配的重要产出地区。鉴于新疆地区资源禀赋度高而开发利用难度大的特点,中国政府从“十五”计划开始,不断地加大对新疆地区基础设施进行完善,并制定了东西部经济对口帮扶策略等,使得新疆地区水—能源—粮食纽带系统进入一个加速发展阶段。

3 结论与建议

3.1 结论

本文立足于水—能源—粮食纽带系统,从水资源、能源、粮食三个子系统出发,选取

30个指标,构建中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同评价指标体系,利用自组织理论与哈肯模型,对中国西北地区水—能源—粮食纽带系统的协同演化机制进行了探索,并对中国西北地区各省份水—能源—粮食纽带系统协同得分的时空变化规律进行了分析,主要结论如下:

(1) 2000—2010年间,中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同发展演化的序参量是水资源子系统。这一阶段水资源子系统主导着整个系统的发展演化方向,而能源子系统、粮食子系统处于从属地位。在协同得分的时空变化规律上,西北五省区协同得分差距较大,其中青海、陕西、甘肃三省得分均高于西北地区平均水平,但是变化趋势较为平稳;宁夏地区得分低于西北地区平均水平,变化趋势较为曲折;新疆地区协同得分最低,但增长速度最快,上升趋势最为明显。

(2) 2011—2018年间,中国西北地区水—能源—粮食纽带系统协同发展演化的序参量是水资源子系统和能源子系统。两者共同主导着水—能源—粮食纽带系统的协同演化,粮食子系统仍处于从属地位。在协同得分时空变化规律上,西北五省区协同得分差距明显缩小,其中陕西、青海、甘肃三省得分高于西北地区平均水平,且上升趋势较第一阶段更为明显;宁夏地区协同得分逐步趋近于五省平均水平;新疆地区协同得分增长速度较快,与其他省份之间的差距明显缩小。

3.2 建议

中国西北地区水—能源—粮食纽带系统在近20年的发展演化取得长足进步,从开始的单一序参量主导的初期阶段转变为多个序参量共同主导的新阶段。这与西北地区20年来的努力发展有着密切的联系。但是要注意到粮食子系统仍处于从属地位,水—能源—粮食三个序参量的局面尚未形成。同时,西北五省区水—能源—粮食纽带系统协同得分仍有较大差距,各省区面临的现实情况也有一定差距,因此本文根据五省区协同分均值作为分类标准,分别对陕甘青三省、新疆两自治区提出以下建议:

陕西、甘肃、青海地区水—能源—粮食纽带系统协同得分较高,但是三省份尚未形成三个子系统共同主导演化过程的更高级协同局面,粮食子系统仍处于附属地位。在下一个阶段的发展中,陕甘青三省应当加快对重要农产品生产保护区的建设,积极改造中低产农田,提升粮食子系统在水—能源—粮食纽带系统中的支配能力,在大型的农业灌溉区域,合理规划建设一批示范性水源工程,保障灌区的用水安全,推进农业向绿色化、集约化方向发展。

新疆、宁夏地区均是我国重要的能源产区,但水资源较为匮乏,水—能源—粮食纽带系统协同得分均低于五省区平均水平。考虑到水资源子系统、能源子系统在水—能源—粮食纽带系统中占据主导地位,两地区应采取相应的措施确保水资源安全和能源安全。一方面,应当提高政府对缺水区的补贴扶持力度,兴建集中连片、规模供水工程,如水库、水窖以及雨水蓄积工程,解决水资源资源型短缺和开发利用难度大的问题。另一方面,要注重发展新技术,掌握能源工业的关键技术,通过技术革新降低单位能源生产用水。同时,要根据自身自然资源条件,发展风能、太阳能、天然气等新能源,优化能源结构,将生态保护放在重要位置。

参考文献(References):

- [1] CHEN H G, ZHANG Y H P. New biorefineries and sustainable agriculture: Increased food, biofuels, and ecosystem security. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47: 117-132.

- [2] 洪思扬, 王红瑞, 来文立, 等. 我国能源耗水空间特征及其协调发展脱钩分析. 自然资源学报, 2017, 32(5): 800-813. [HONG S Y, WANG H R, LAI W L, et al. Spatial analysis and coordinated development decoupling analysis of energy-consumption water in China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(5): 800-813.]
- [3] VUUREN D, BIJL D L, BOGAART P, et al. Integrated scenarios to support analysis of the food-energy-water nexus. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 1132-1141.
- [4] 杨鑫, 穆月英. 灌溉水压力、供给弹性与粮食生产结构: 基于变系数Nerlove模型. 自然资源学报, 2020, 35(3): 728-742. [YANG X, MU Y Y. Irrigation water pressure, supply elasticity and grain production structure: Based on variable coefficient nerlove model. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 728-742.]
- [5] ENDO A, TSURITA I, BURNETT K, et al. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 11: 20-30.
- [6] KADDOURA S, KHATIB S E. Review of water-energy-food Nexus tools to improve the nexus modelling approach for integrated policy making. *Environmental Science & Policy*, 2017, 77: 114-121.
- [7] 白景锋, 张海军. 中国水—能源—粮食压力时空变动及驱动力分析. 地理科学, 2018, 38(10): 1653-1660. [BAI J F, ZHANG H J. Spatial-temporal variation and driving force analysis of water-energy-grain pressure in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(10): 1653-1660.]
- [8] LIU X, SHI L, ENGEL B A, et al. New challenges of food security in Northwest China: Water footprint and virtual water perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 245: 118939, Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118939.
- [9] HELLEGERS P, ZILBERMAN D, STEDUTO P, et al. Interactions between water, energy, food and environment: Evolving perspectives and policy issues. *Water Policy*, 2008, 10: 1-10.
- [10] 张宗勇, 刘俊国, 王凯, 等. 水—粮食—能源关联系统述评: 文献计量及解析. 科学通报, 2020, 65(12): 1569-1580. [ZHANG Z Y, LIU J G, WANG K, et al. Review of water-food-energy correlation system: Literature measurement and analysis. *Science Bulletin*, 2020, 65(12): 1569-1580.]
- [11] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析. 地理学报, 2016, 71(9): 1613-1628. [ZHAO R Q, LI Z P, HAN Y P, et al. Analysis on the coupling action mechanism of regional "water-soil-energy-carbon". *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1613-1628.]
- [12] 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. 中央财经大学学报, 2016, (12): 76-90. [LI G J, HUANG D, LI Y L. Water-energy-food correlation: A new perspective of regional sustainable development research. *Journal of Central University of Finance and Economics*, 2016, (12): 76-90.]
- [13] World Economic Forum. Global Risks Report 2011. 6th edition. Cologne: World Economic Forum, 2011.
- [14] HOFF H. Understanding the nexus background paper for the Bonn 2011 conference: The water energy and food security nexus. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011: 16-18.
- [15] JANEZ S. Data-driven quantification of the global water-energy-food system. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133: 179-190.
- [16] OWEN A, SCOTT K, BARRETT J. Identifying critical supply chains and final products: An input-output approach to exploring the energy-water-food nexus. *Applied Energy*, 2018, 210: 632-642.
- [17] SALMORAL G, YAN X Y. Food-energy-water nexus: A life cycle analysis on virtual water and embodied energy in food consumption in the Tamar catchment, UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133: 320-330.
- [18] DAHER B, MOHTAR R H. Water-energy-food (WEF) Nexus Tool 2.0: Guiding integrative resource planning and decision-making. *Water International*, 2015, 40(5-6): 748-771.
- [19] MARTINEZ-HERNANDEZ E, MATTHEW L, YANG A D. Understanding water-energy-food and ecosystem interactions using the nexus simulation tool NexSym. *Applied Energy*, 2017, 206: 1009-1021.
- [20] WHITE D J, HUBACEK K, FENG K S, et al. The water-energy-food nexus in East Asia: A tele-connected value chain analysis using inter regional input output analysis. *Applied Energy*, 2018, 210: 550-567.
- [21] JESUS M N, EUSIEL R C, JOSE M P. Involving resilience in optimizing the water-energy-food nexus at macroscopic level. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 147: 259-273.
- [22] WANG Q, LI S Q, HE G, et al. Evaluating sustainability of water-energy-food (WEF) nexus using an improved matter-element extension model: A case study of China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 1097-1106.

- [23] SUN C Z, YAN X D, ZHAO L S. Coupling efficiency measurement and spatial correlation characteristic of water-energy-food nexus in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, Doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105151.
- [24] 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. *地理学报*, 2020, 75(5): 1036-1052. [SHI H Y, LUO G P, ZHRNG H W, et al. Analysis of water use in the Syr River Basin based on the causal relationship of "water-energy-food-ecology" link and Bayesian network. *Acta Geographical Sinica*, 2020, 75(5): 1036-1052.]
- [25] YAN X C, FANG L, MU L. How does the water-energy-food nexus work in developing countries? An empirical study of China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 716: 1-14.
- [26] 王玉宝, 刘显, 史利洁, 等. 西北地区水资源与食物安全可持续发展研究. *中国工程科学*, 2019, (5): 38-44. [WANG Y B, LIU X, SHI L J, et al. Research on sustainable development of water resources and food safety in Northwest China. *Chinese Engineering Science*, 2019, (5): 38-44.]
- [27] 赖玉佩. 中国水—能源—粮食协同需求的区域特征研究. *北京规划建设*, 2019, (1): 74-77. [LAI Y P. Regional characteristics of China's water-energy-food collaborative demand. *Beijing planning and Construction*, 2019, (1): 74-77.]
- [28] 胡金星. 产业融合的内在机制研究: 基于自组织理论的视角. 上海: 复旦大学, 2007. [HU J X. Research on the internal mechanism of industrial integration: From the perspective of self-organization theory. Shanghai: Fudan University, 2007.]
- [29] HAKEN H. 协同学导论. 西安: 西北大学, 1981: 158-162. [HAKEN H. Introduction to synergies. Xi'an: Northwest University, 1981: 158-162.]
- [30] 于丽丽. 中国海陆经济一体化及驱动机理研究: 基于耦合模型和哈肯模型. 上海: 上海大学, 2016. [YU L L. Research on economic integration and driving mechanism of China's land and sea: Based on coupling model and Hakken Model. Shanghai: Shanghai University, 2016.]
- [31] 李琳, 刘莹. 中国区域经济协同发展的驱动因素: 基于哈肯模型的分阶段实证研究. *地理研究*, 2014, 33(9): 1603-1616. [LI L, LIU Y. Drivers of regional economic synergy in China: A phased empirical study based on Hakken Model. *Geographical Research*, 2014, 33(9): 1603-1616.]
- [32] 郑玉雯, 薛伟贤. 丝绸之路经济带沿线国家协同发展的驱动因素: 基于哈肯模型的分阶段研究. *中国软科学*, 2019, (2): 78-92. [ZHENG Y W, XUE W X. The driving factors of the coordinated development of countries along the Silk Road Economic Belt: A phased study based on Hakken Model. *China Soft Science Magazine*, 2019, (2): 78-92.]
- [33] 姚成胜, 殷伟, 李政通. 中国粮食安全系统脆弱性评价及其驱动机制分析. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1720-1734. [YAO C S, YIN W, LI Z T. Vulnerability evaluation of China's food security system and analysis of its driving mechanism. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1720-1734.]
- [34] 孙才志, 阎晓东. 中国水资源—能源—粮食耦合系统安全评价及空间关联分析. *水资源保护*, 2018, 34(5): 1-8. [SUN C Z, YAN X D. Safety evaluation and spatial correlation analysis of water resource-energy-food coupling system in China. *Water Resources Protection*, 2018, 34(5): 1-8.]
- [35] 王慧敏, 洪俊, 刘钢. “水—能源—粮食”纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(6): 74-84. [WANG H M, HONG J, LIU G. Simulation research on regional green development policy under the relation of "water-energy-food". *China's Population, Resources and Environment*, 2019, 29(6): 74-84.]
- [36] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市水—能源—粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真. *管理评论*, 2016, 28(10): 11-26. [LI G J, LI Y L, JIA X J, et al. Construction and simulation of dynamic model of water-energy-food sustainable development system in Beijing. *Manage Reviews*, 2016, 28(10): 11-26.]
- [37] 张欣莹, 解建仓, 刘建林, 等. 基于熵权法的节水型社会建设区域类型分析. *自然资源学报*, 2017, 32(2): 301-309. [ZHANG X Y, XIE J C, LIU J L, et al. Analysis of regional types of water-saving society construction based on entropy method. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(2): 301-309.]

Co-evolution of water-energy-food nexus in arid areas: Take Northwest China as an example

SUN Cai-zhi^{1,2}, WEI Ya-qiong³, ZHAO liang-shi^{1,2}

(1. Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry Education, Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 2. University Collaborative Innovation Center of Marine Economy High-Quality Development of Liaoning Province, Dalian 116029, Liaoning, China; 3. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Northwest China is the core area of the Silk Road Economic Belt and an important gateway for China to open up to Central Asia and Europe. With the strategic support of the "Western Development", Northwest China has gone through four "Five-Year Plans" (2001-2020) planning and development. With the rapid economic and social development, it has also taken advantage of basic conditions such as water resources, energy and food resources. Based on the self-organization theory and the Haken model, this paper, taking Northwest China as an example, constructs a collaborative evaluation index system for the water-energy-food nexus. It examines the internal driving factors of the water-energy-food nexus in stages, and analyzes the spatial and temporal differentiation of the water-energy-food nexus synergy score. The results show that: (1) From 2000 to 2010, the sequence parameter of the coordinated development and evolution of the water-energy-food nexus in Northwest China was the water resources subsystem. This shows that the water resources subsystem dominates the development and evolution of the entire system in this stage, while the energy subsystem and the food subsystem are in a subordinate position. During this period, the water-energy-food nexus in the study area was still in an early stage of development and evolution. The development of the entire system relied on the support of a single element, and it had not yet formed a new and orderly structure driven by multiple elements. In terms of the spatial and temporal variations of synergy scores, there is a large gap between the five provinces in the region. The scores of Qinghai, Shaanxi, and Gansu are higher than the average of the region, but the trend of change is relatively stable. The score in Ningxia is lower than the average in the region, and the trend of change is more tortuous. Xinjiang has the lowest synergy score, but its growth is the fastest, and the upward trend is the most obvious. (2) From 2011 to 2018, the sequence parameters of the coordinated development and evolution of the water-energy-food nexus in Northwest China are the water resources subsystem and the energy subsystem. The two together dominate the co-evolution of the water-energy-food nexus. The various elements of the water-energy-food nexus are more closely linked and the system is more stable. However, the food subsystem in this stage is still in a subordinate position. In terms of the temporal and spatial changes, the gap in synergy scores among the five provinces has been significantly reduced. Among them, the scores of Shaanxi, Qinghai, and Gansu are still higher than the average of the Northwest, and the upward trend is more obvious than that in the first stage. Ningxia's synergy score gradually approaches the average of the five provinces. Although Xinjiang's synergy score is still the lowest, it has grown rapidly, and the gap with other provinces has narrowed significantly.

Keywords: water-energy-food nexus; self-organizing system; Haken model; Northwest China