

区域水—能源—粮食关联系统协同发展模型

任绪燕¹, 任永泰², 武方宸¹, 司通达¹, 王紫阳¹

(1.东北农业大学 工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2.东北农业大学 文理学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: [目的] 研究区域水—能源—粮食关联系统(WEFN)的协同发展状况, 促进区域水、能源、粮食的可持续利用。[方法] 基于复杂适应系统理论, 从水、能源、粮食 3 方面构建区域 WEFN 协同发展评价指标体系, 以协同进化算法、灰色关联等为基础提出一种基于各要素条件和相互作用机理的综合协同发展模型, 并以黑龙江省为例测算 2009—2018 年 WEFN 的协同发展度及子系统的发展度、协同度, 评价其协同发展状况。[结果] ①各子系统发展程度中等, 差距较小, 协同度差距较大但均呈波动上升趋势, 其中水资源对能源和粮食、能源对粮食的协同作用明显。② WEFN 协调发展状况中等, 与各子系统协同发展趋势一致, 波动上升后保持稳定, 粮食子系统协同发展程度最高。③子系统间协同作用差是造成 WEFN 协同发展状况不高的原因, 应以水、能源在农业生产中的高效应用为突破口, 促进子系统间的协同发展。[结论] 综合协同发展模型能够有效评价区域 WEFN 的协同发展状况, 有助于区域可持续发展决策。

关键词: 水—能源—粮食关联系统(WEFN); 复杂适应理论; 综合协同发展模型; 协同进化算法; 灰色关联
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2021)05-0218-08 **中图分类号:** TV213.4, X24, F326.4

文献参数: 任绪燕, 任永泰, 武方宸, 等. 区域水—能源—粮食关联系统协同发展模型[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 218-225. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.029; Ren Xuyan, Ren Yongtai, Wu Fangchen, et al. Collaborative development model of regional water-energy-food nexus [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 218-225.

Collaborative Development Model of Regional Water-Energy-Food Nexus

Ren Xuyan¹, Ren Yongtai², Wu Fangchen¹, Si Tongda¹, Wang Ziyang¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;
2. College of Arts and Science, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: [Objective] The synergistic development of the regional water-energy-food nexus (WEFN) system was studied in order to promote the sustainable utilization of regional water, energy, and food. [Methods] Based on the theory of complex adaptive systems, an evaluation index system of regional WEFN collaborative development was constructed from three aspects of water, energy, and food. A comprehensive collaborative development model was proposed based on the conditions of various elements and the interaction mechanism based on a co-evolution algorithm and gray correlation. Taking Heilongjiang Province as an example, the collaborative development degree of WEFN and the development degree and collaborative degree of its subsystems from 2009 to 2018 were calculated to evaluate the collaborative development status. [Results] ① The development degree of each subsystem was medium, and the gap was small. The collaborative degrees had a large gap, but all showed a fluctuating upward trend. Among them, the collaborative effect of water resources on energy and food, and energy on food was obvious. ② The collaborative development of WEFN was moderate, consistent with the trend of various subsystems, and remained stable after rising fluctuations. The collaborative development of the food subsystem was the highest. ③ Poor collaboration between subsystems was the reason for the low level of WEFN coordinated development. The efficient application of water and energy in agricultural production should be used as a breakthrough to promote the coordinated

收稿日期: 2021-06-08

修回日期: 2021-07-14

资助项目: 黑龙江省哲学社会科学规划项目“黑龙江省农业经济发展方式转变研究”(18TJB098)

第一作者: 任绪燕(1995—), 女(汉族), 山东省济南市人, 硕士研究生, 研究方向为农业系统工程理论方法及应用。Email: rxuyan@hotmail.com.

通讯作者: 任永泰(1973—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业系统工程理论方法及应用研究。Email: ytren@neau.edu.cn.

development of subsystems. [Conclusion] The comprehensive collaborative development model can be effectively used to evaluate the collaborative development status of regional WEFN, and is helpful for regional sustainable development decision-making.

Keywords: water-energy-food nexus (WEFN); complex adaptive system theory; comprehensive collaborative development model; co-evolutionary algorithm; gray correlation

水—能源—粮食关联系统 (water-energy-food nexus, WEFN) 是一种以水、能源、粮食为主体的复杂系统, 水、能源、粮食三者相互作用、协同发展。2011 年世界经济论坛发布《全球风险报告》提出将三者作为一个关联系统研究, 自此许多关键的 Nexus 政策文件都强调了 3 个领域的协同安全, 指出了确保人类获得充足和safe的水、能源、粮食的重要性^[1]。近年来, 中国经济正追求高质量发展, 建设资源节约型社会, 因此, 关注水、能源、粮食作为一个复杂耦合系统的协同发展是非常必要的。

许多学者都在上述问题的背景下对 WEFN 进行了相关研究。一些学者对于 WEF 关系的重要性进行了研究, 例如 Wiegleb 等^[2]主张用跨部门的联结方法来进行资源治理和联结论述, 资源治理应该关注处理影响世界经济论坛联系动力的社会和环境因素的多角度方法; Bazilian 等^[3]基于 LEAP, WEAP, AZE 等跨领域方法建立气候—土地—能源—水模型 (CLEWs), 强调多领域协作的重要性。一些学者专注于 WEFN 的综合风险管控, Sanders 等^[4]通过综合 GIS 和资源管理方法应用于 WEF 的综合管理和安全预警, 取得了良好效果; 李良等^[5]构建耦合模型并对 WEF 系统的压力进行量化, 并建立了风险传导与调节反馈机制, 为 WEFN 的区域环境风险管控做出了贡献。在 WEFN 系统耦合协同演化方面, Zhang^[6]基于 DEA 模型和 Malmquist 指数在粮食、水和能源的资源整合方面进行了协同效率评价; 彭少明等^[7]基于协同理论构建 WEFN 整体分析框架; 李桂君等^[8]运用系统动力学仿真方法, 以北京市为例模拟了 WEF 系统, 分析发现能源是目前提升综合可持续发展能力的关键。

现有 WEFN 协同发展状况的研究主要集中于国家和流域层面, 对单一区域研究较少, 且多集中于关联系统耦合的定性描述, 缺乏对子系统内部演化机制和外部协同相结合的定量描述。为此, 本文基于复杂适应系统理论, 引入协同进化算法及灰色关联分析方法, 建立区域 WEFN 的综合协同发展模型, 对黑龙江省 2009—2018 年 WEFN 协同发展状况进行实证分析, 希望能够为区域 WEFN 的可持续发展提供理论依据和参考。

1 基于复杂适应系统理论的区域 WEFN 协同发展机理理论分析

1.1 区域 WEFN 复杂适应系统

复杂适应系统理论是一种能有效模拟系统演化规律的复杂系统模型理论, 专注于从微观层次到宏观层次解释系统演化过程中的自组织发展, 在 1994 年由诺贝尔奖获得者 Holland 提出。复杂适应系统具有自组织、自适应的特性。主体是在复杂系统中具有主动学习和适应能力的元素, 能够在和其他主体及环境的交流过程中学习并积累经验, 完成自身进化^[9]。如图 1 所示, 在适应环境的过程中, 相似主体聚集成群体, 进而形成复杂系统。复杂系统由无序到有序, 能更好地适应环境^[10]。

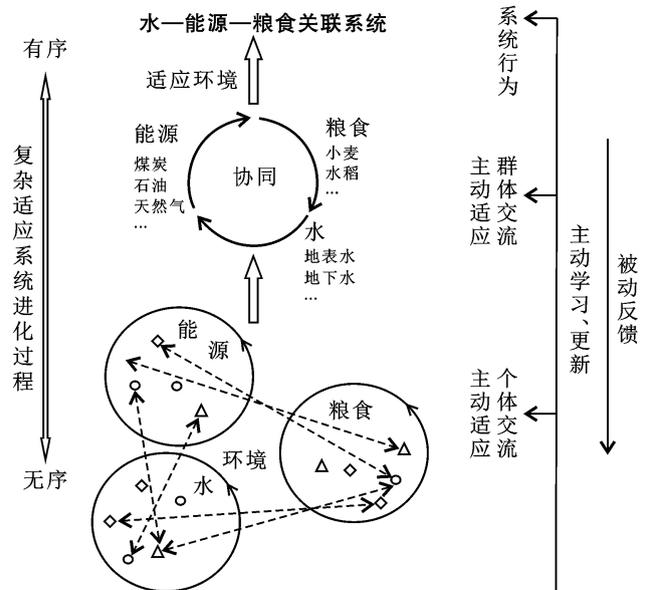


图 1 WEFN 复杂适应系统完善进化过程

系统的协同与发展是不同的概念^[11]。系统的发展依赖于系统本身或内部要素的演化, 且可能是建立在压制其他系统的状态基础上的。例如, 充足的粮食的供给和消费可能是基于高耗水、高耗能的粗犷农业生产模式。协同作用指由两种或两种以上不同的资源或个体互相磨合和协作的过程。协同发展是复杂适应系统中各子系统相互适应、协调、配合、促进的良性循环过程。区域 WEFN 协同发展是指水资源、能

源、粮食 3 种资源在区域 WEFN 联结框架下,保障各子系统内部平稳发展,促进各子系统之间相互作用和影响,实现供需平衡、结构合理化、高效运行和环境友好的过程^[12-13]。

1.2 水—能源—粮食协同分析

作为一个复杂适应系统,区域 WEFN 具有复杂性、关联性、层次性^[14]。如图 2 所示,水资源的开发利用需要能源支持,能源是水资源的供给的基础和动力;水在粮食生产过程中得以储存,粮食生产也在—

定程度上提供一些非游离水。大多数能源的开发利用过程耗水较多,特别是矿产资源的开采,然而,近年来太阳能、风能、粮食生产提供的生物质能等新能源的出现不仅能缓解能源压力,也在逐步转变高耗能、耗水的能源生产模式^[14-15]。此外,传统农业生产模式耗水耗能较多,节水农业及机械化食品加工方式的逐渐普及使得高耗水耗能现象有所好转。

水、能源、粮食三者辩证统一,竞争与合作并存,它们之间的协同作用是可持续协调发展的内在因素。

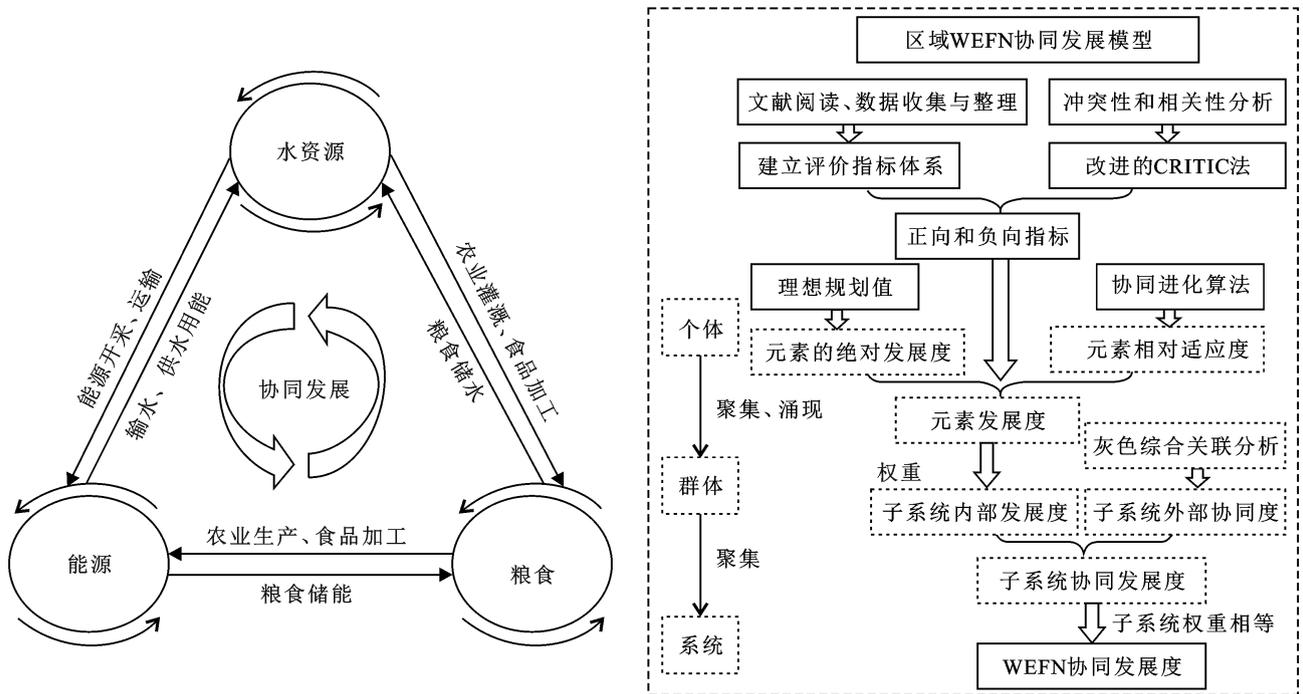


图 2 WEFN 主要关联关系及模型框架图

综合上述分析,本文依据个体—群体—系统的聚集层次建立区域 WEFN 协同发展模型(见图 2),从系统进化的角度综合考虑水资源、能源、粮食三者的协同发展过程,还能够揭示 WEFN 发展过程中各要素、子系统的发展水平以及各子系统之间的协同程度的自适应演化规律。模型对区域水资源和能源的利用现状和影响因素分析可为经济社会的资源可持续利用、相关部门的资源政策制定提供参考;对粮食系统现状分析可为农业生产和粮食消费提供可靠的建议;对三者的协同分析可对生态环境、农业及相关产业发展提供一些跨部门、跨领域的建议和参考。

2 研究方法

2.1 构建评价指标体系及指标权重分配

系统中各主要因素的平衡、结构的合理性、能量和物质的有序交换都能对系统的协同和可持续发展

起到重要的作用。本文参考国内外相关文献^[14-18],遵循科学性、实用性、动态性、数据可获得性等原则,并结合专家咨询法、频度分析法将水资源和能源子系统分为总量、结构和效率 3 个层面,将粮食子系统分为供给、消费、稳定性 3 个层面,构建区域 WEFN 协同发展的指标体系(表 1)。

权重的合理与否与评价结果直接相关,是研究 WEFN 协同发展度的基础。CRITIC 法依据指标间差异和冲突来计算权重,可以兼顾指标间的变异程度和相关性^[19-20]。根据本文中指数之间的相关性要求对常规方法进行改进,指标差异用标准差系数计算,指标冲突性用 $\sum_{k=1}^n (1 - |r_{jk}|)$ 来衡量^[19]。具体过程如公式(1):

$$w_{ij} = \frac{I_{ij}}{\sum_{j=1}^n I_{ij}} \quad [I_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\bar{X}} \sum_{k=1}^n (1 - |r_{ijk}|)] \quad (1)$$

$$\text{正向指标: } a_{ijt} = \frac{x_{ijt} - \min_t(x_{ijt})}{\max_t(x_{ijt}) - \min_t(x_{ijt})}$$

$$\text{负向指标: } a_{ijt} = \frac{\max_t(x_{ijt}) - x_{ijt}}{\max_t(x_{ijt}) - \min_t(x_{ijt})}$$

式中:对于子系统 i , ω_{ij} 为第 j 个指标权重; X_{ijt} 表示 t 时刻第 j 个指标的值; α_{ijt} 表示 t 时刻第 j 个指标的标准化值; r_{ijk} 是同一子系统中指标 j 和 k 的相关系数; σ_{ij} 表示第 j 个指标的标准差; I_{ij} 代表第 j 个评价指标所含的信息量。

具体指标及权重计算结果见表 1。

表 1 WEFN 协同发展评价指标体系及各指标权重

准则层	维度	代码	指标层	指标属性	权重
水资源子系统 A	总量指标	A ₁	人均用水/m ³	负向	0.098
		A ₂	地表水供水总量/10 ⁸ m ³	正向	0.180
		A ₃	地下水供水总量/10 ⁸ m ³	正向	0.099
	结构指标	A ₄	农业用水比例/%	负向	0.110
		A ₅	工业用水比例/%	负向	0.110
		A ₆	生态用水比例/%	正向	0.245
	效率指标	A ₇	万元 GDP 用水量/10 ⁴ m ³	负向	0.080
		A ₈	万元工业增加值用水量/m ³	负向	0.078
能源子系统 B	总量指标	B ₁	能源消耗量/10 ⁴ t	负向	0.111
		B ₂	一次性能源生产总量/10 ⁴ t	正向	0.127
		B ₃	能源净进口量/10 ⁴ t 标准煤	正向	0.104
	结构指标	B ₄	第一产业耗能比例/%	负向	0.145
		B ₅	第二产业耗能比例/%	负向	0.090
		B ₆	第三产业耗能比例/%	正向	0.152
	效率指标	B ₇	单位生产总值能耗下降率/%	正向	0.125
		B ₈	能源消费弹性系数	负向	0.146
粮食子系统 C	供给指标	C ₁	单位面积粮食产量/(kg · hm ⁻²)	正向	0.098
		C ₂	粮食作物播种面积/10 ⁴ hm ²	正向	0.105
		C ₃	人均粮食产量/kg	正向	0.102
	消费指标	C ₄	农业生产资料价格指数	负向	0.187
		C ₅	居民人均粮食消费量/kg	负向	0.096
		C ₆	粮食消费价格指数	负向	0.209
	稳定性指标	C ₇	粮食总量波动率/%	负向	0.105
		C ₈	粮食自给率/%	正向	0.097

注:数据来源于 2009—2018 年《黑龙江省统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国环境年鉴》,部分无法直接获取的数据采用公式计算、趋势预测得出。

2.2 构建综合协同发展模型

2.2.1 子系统内部元素绝对发展度的测定 在本研究中,元素绝对发展度为子系统内部元素发展能力的一种度量。在 WEFN 的协同发展过程中,其演变过程不能完全获得每个元素的信息,元素之间的关系不确定。因此,为了充分利用元素已有的信息,本文采用引入理想规划值,根据子系统内指标的正负理想点,计算相对距离比得出发展度,这是一种指标发展满意度的评价方法^[21],计算方法见公式(1)中 α_{ijt} 。

2.2.2 子系统内部元素间自适应性的测定 在本研究中,元素的自适应性是指子系统内元素间相互作用、适应性进化能力的一种度量^[22]。Hillis^[23]提出的协同进化算法可以有效地模拟个体间交互的自适应特性。该算法克服了遗传算法计算个体适应度时常

见的局部最优现象。然而,在常见的协同进化算法中不同测试对象的最优协作因子是不断变化的,缺乏通用性,本文参考已有文献^[22,24]提出的协同进化算法的相对适应度,计算公式如下:

$$\begin{cases} f_{ijt} = \frac{0.5 + \text{HD}_j - \text{AHD}}{0.5 + \text{HD}_j} a_{ijt} \\ \text{HD}_j = \sum_{k=1}^n (b_{kj}! = B_j) \\ \text{AHD} = \frac{1}{m \times n - 1} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (b_{kj}! = B_j) \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{ijt} 代表元素 j 的自适应度; HD_j 代表第 k 个样本的第 j 个元素 b_{jk} 和总体样本的最优元素 B_j 之间的汉明距离。AHD 表示问题中各元素的定义域与其最优元素之间的平均汉明距离,0.5 表示平滑因子,用于

避免 AHD 值较小对系统造成严重影响。

2.2.3 元素发展度的测定 元素的发展度与自身的发展能力有关,同时与其他元素存在子系统内自适应关系。由于系统中元素的进化是随机的,遵循自然环境变化的规律,所以元素的发展度不是其绝对发展度和自适应性的简单叠加。计算元素权重的方法应体现上述特点,因此,本研究将元素的权重作为绝对发展度和自适应性的参数^[22],可以得到元素的发展度 d_{ijt} 如下:

$$d_{ijt} = w_{ij} \cdot a_{ijt} + (1 - w_{ij}) f_{ijt} \quad (3)$$

2.2.4 确定子系统内部的发展度 子系统的发展度由隶属于子系统的元素的发展度决定^[11]。分析各子系统的适应性及其内部协调发展关系,对于促进 WEFN 子系统的可持续发展具有至关重要的作用。

子系统的发展度 d_{it} 的计算公式如下:

$$d_{it} = \sum_{j=1}^m \omega_j d_{ijt} \quad (4)$$

2.2.5 确定子系统外部的协同度 子系统外部协同度是某子系统建立在子系统内部发展基础上受其他子系统协同作用的度量。

灰色关联分析是一种基于对于两个系统发展趋势相似性对比的分析方法。本研究借鉴相关文献^[25-29]以子系统的发展度值为初始数据,计算子系统两两之间的绝对关联度和相对关联度,并综合二者形成子系统的综合关联度。

依据子系统发展度大小,如果子系统 j 发展度大于子系统 i ,表示 j 的发展程度好于 i ,其对 i 的协同作用小于 1,则 j 对 i 协同因子 $\beta_{ij} = \alpha_{ij}$;如果子系统 j 发展度小于子系统 i ,表示 j 的发展程度比 i 差,其对 i 的协同作用大于 1,则 $\beta_{ij} = 1/\alpha_{ij}$,子系统本身协同因子为 1^[28-29]。计算方法如下:

(1) 计算绝对关联度。设初始行序列 $X_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iu})$,为消除首端效应令 $x_i^0 = (d_{i1} - d_{i1}, d_{i2} - d_{i1}, \dots, d_{iu} - d_{i1}) = (d_{i1}^0, d_{i2}^0, \dots, d_{iu}^0)$ 。

$$\begin{cases} |s_i| = \left| \sum_{k=2}^{i-1} d_{ik}^0 + \frac{1}{2} d_{ii}^0 \right| \\ |s_i - s_j| = \left| \sum_{k=2}^{i-1} (d_{ik}^0 - d_{jk}^0) + \frac{1}{2} (d_{ii}^0 - d_{jj}^0) \right| \end{cases} \quad (5)$$

则子系统 i 和 j 之间的绝对关联度为

$$u_{ij} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|} \quad (6)$$

$u_{ij} \in [0, 1]$,数值越大关联度越大。

(2) 计算相对关联度。将步骤 1 中的初始序列替换为 $X_i' = (\frac{d_{i1}}{d_{i1}}, \frac{d_{i2}}{d_{i1}}, \dots, \frac{d_{iu}}{d_{i1}})$,可得子系统 i 与 j 之间的相对关联度 v_{ij} 。 $v_{ij} \in [0, 1]$,数值越大相对关联度越大,两子系统的变化速率越近。

(3) 计算综合关联度。

$$\alpha_{ij} = \eta u_{ij} + (1 - \eta) v_{ij} \quad (7)$$

系数 η 取 0.5,表明绝对关联度与相对关联度等重。

(4) 计算协同因子 β_{ij} 。

(5) 计算子系统外部的协同度 c_{it} 。

$$c_{it} = \sum_{j=1}^k \omega_j \beta_j d_{jt} \quad (8)$$

例如, $c_{1t} = \omega_2 \beta_2 d_{2t} + \omega_3 \beta_3 d_{3t}$,表示在协同发展过程中子系统受其他两个子系统影响的机会相同,系数 ω_j 取 0.5。

2.2.6 确定子系统的协同发展度 子系统的协同发展度由内部发展度和外部协同度共同组成^[11],表示子系统的协同发展受内部元素间的相互作用影响,同时也受其他子系统影响。

公式如下:

$$C_{it} = \sqrt{d_{it} c_{it}} \quad (9)$$

2.2.7 系统的协同发展度 系统的协同发展度由各个子系统协同发展度共同组成。

公式如下:

$$C_t = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k C_{it}} \quad (10)$$

假定 3 个子系统占比相同,各占 1/3,式中取 $k=3$ 。

2.3 WEFN 协同发展的等级划分

发展度和协同度分别衡量子系统自身发展状况和子系统之间的协同状况^[11]。根据发展度和协同度的结合,依据现有研究成果通过查阅文献资料^[11,16-17,19]、专家意见、研究区实际情况,确定 WEFN 及子系统协同发展度、子系统发展度及协同度的等级划分(表 2)。

表 2 WEFN 及子系统协同发展度、子系统发展度、子系统协同度的等级划分

子系统发展度		子系统协同度		WEFN 系统协同发展度	
范围	等级	范围	等级	范围	等级
0~0.4	勉强发展	0~0.3	初等协同	0~0.3	低水平协同发展
0.4~0.6	中等发展	0.3~0.6	中等协同	0.3~0.6	中等协同发展
0.6~0.8	良好发展	0.6~0.8	良好协同	0.6~0.8	良好协同发展
0.8~1	高度发展	0.8~1	优质协同	0.8~1	高等协同发展

3 实例应用

3.1 研究区概况

黑龙江省位于中国东北部,面积 $4.73 \times 10^5 \text{ km}^2$,人口约 3.83×10^7 ,江河众多,物产丰富,是中国重要的能源与商品粮基地。水资源方面,黑龙江省有黑龙江、松花江两条主要河流,2018 年水资源量 $1.01 \times 10^{11} \text{ m}^3$,居全国省份第 8 位,其中,农业用水占总用水量 88.9%,远高于全国水平,地下水开采强度为 23.0%、远高于全国水平,黑龙江省水资源利用率低,农业灌溉技术粗犷、地下水过度开采等问题日益严重。能源方面,黑龙江省是中国重要的能源供应地,矿产资源类型丰富,储量大,但同时,能源开采

成本较高、利用效率低以及带来的环境污染问题也日益严重。粮食方面,黑龙江省土壤肥沃,粮食产量常年居全国首位,2018 年黑龙江省粮食产量 $7.51 \times 10^7 \text{ t}$,占全国粮食总产量的 11.4%,粮食资源充足,但是农业生产技术有待提高,单位粮食产量也有较大的上升空间。

3.2 结果与分析

基于 2009—2018 年数据,采用构建评价指标及指标权重分配方法,得到研究区域 WEFN 各子系统要素的权重(表 1)。由构建综合协同发展模型方法得到子系统内部的发展度(图 3a),子系统外部的协同度(图 3b),子系统协同发展度(图 3c),WEFN 的协同发展度(3d)。

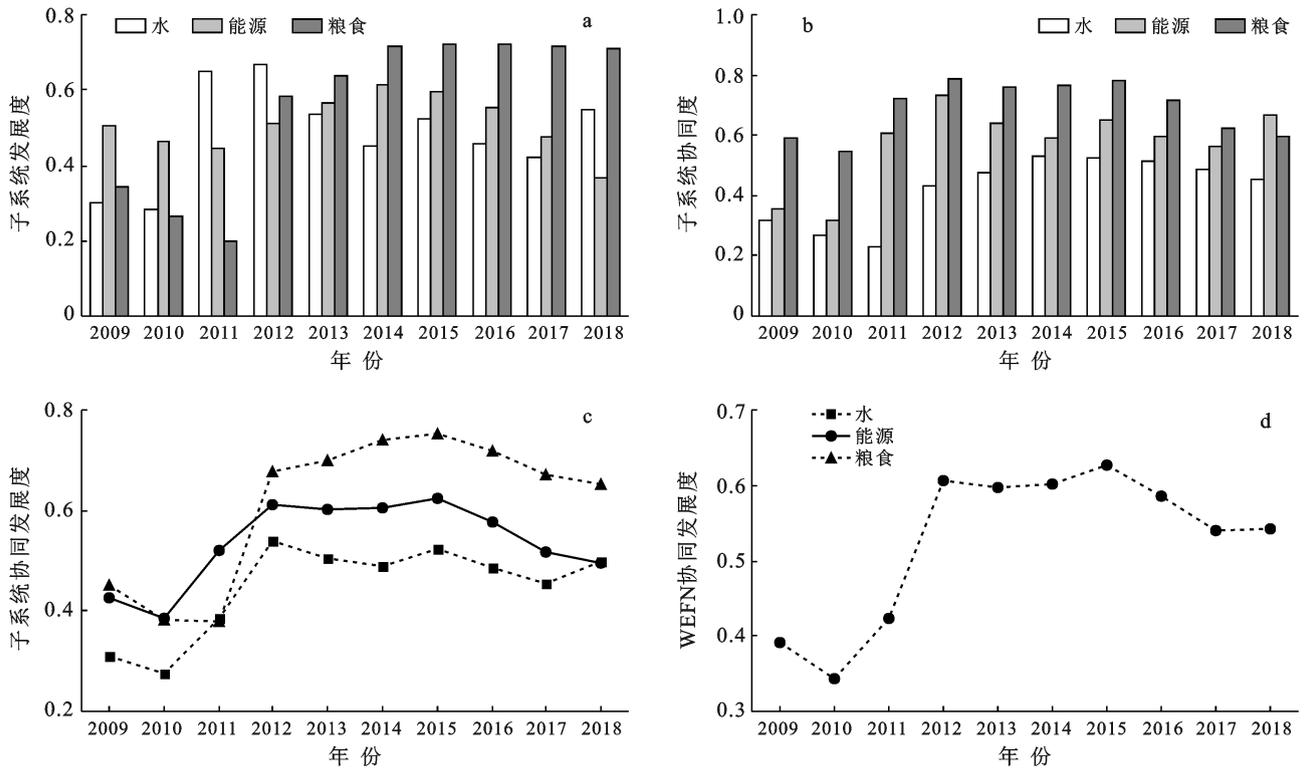


图 3 黑龙江省 WEFN 及子系统协同发展度

3.2.1 WEFN 系统各子系统的发展程度 由图 3a 可知,2009—2018 年水资源子系统发展度波动较大,集中在 $[0.40, 0.70]$,基本处于中等发展阶段。2009—2012 年发展水平上升幅度较大,期间地表供水量上升影响水资源总量,且水资源利用效率提升较高;2013—2018 年,波动幅度维持在 $[0.45, 0.55]$,期间除了地表水供水量影响,生态用水增多也是重要原因。可知水资源子系统有较大的发展空间,其波动趋势受气候影响较大,同时发展节水科技、保障生态用水是促进水资源可持续发展的有效措施。能源子系统发展度呈下降—上升—下降的波动趋势,集中在 $[0.40,$

$0.60]$,处于中等发展阶段。2009—2011 年下降期主要由于能源消耗量和单位 GDP 能耗上升;2012—2014 年为上升期,期间能源消费弹性系数大幅下降,能源消耗增长速度落后于经济发展速度;2015—2018 年为下降期,单位生产总值能耗上升。可知能源子系统发展中等,波动幅度不大,波动主要受经济发展和节能技术的影响,因此转变经济发展方式、发展节能科技、开发新资源是促进能源可持续发展的有效措施。粮食子系统发展度先小幅下降,在 2011 年之后持续上升至 $[0.5, 0.7]$ 的良好发展阶段。黑龙江省作为粮食主产地,国家政策扶持、农业技术发展使得粮

食产量、粮食自给率逐年上升。2009—2011 年小幅下降期间农业生产资料价格上升,2011 年农业生产资料物价回落其保持基本稳定。总体来看,粮食子系统发展程度高且较稳定,维持生产资料物价有利于农业生产。

总体来看,黑龙江省 WEFN 的 3 个子系统发展程度差距不大。粮食子系统发展最好且发展最为稳定,能源子系统次之,水资源子系统发展程度和稳定性均最差。三者受经济和节水、节能科技发展影响较大,另外,水资源作为自然资源比较依赖气候变化等因素。因此,维持经济高质量发展、发展节能节水科技、开发新资源等是促进区域水、能源、粮食可持续发展的有效措施。

3.2.2 各子系统的协同程度 由图 3b 和表 3 分析可知,各子系统协同度主要集中于 $[0.20, 0.60]$, $[0.40, 0.70]$ 和 $[0.50, 0.80]$,说明 2009—2018 年黑龙江省 WEFN 子系统外部协同度为:粮食>能源>水资源,分别约为良好、良好、中等。粮食和能源子系统的协同度较高且均呈波动上升趋势,表明二者受外部子系统的协同作用均有增强。水资源子系统协同度相对较小、呈基本水平趋势,受外部子系统的协同作用较弱。能源子系统对粮食子系统协同作用明显,水资源子系统对能源子系统和粮食子系统的协同作用也较明显,协同因子分别为 1.707, 1.681, 1.043;而水资源受其他子系统的协同作用不明显。这表明未来黑龙江省要以水—能源—粮食的协同为突破口,持续提高农业机械化水平,发展现代化、规模集约化农业,促进能源在农业生产中的应用;同时要发展节水、节能科技,提高水资源在能源、粮食相关产业中的利用效率。

表 3 黑龙江省 WEFN 子系统协同因子 β_{ij}

施作用系统 j	受作用系统 i		
	水资源	能源	粮食
水资源	1.000	1.681	1.043
能源	0.595	1.000	1.707
粮食	0.962	0.586	1.000

3.2.3 WEFN 系统及各子系统的协同发展程度 图 3c 显示了水资源子系统、能源子系统和粮食子系统的协同发展程度基本为:粮食>能源>水,主要集中在 $[0.40, 0.80]$, $[0.40, 0.60]$ 和 $[0.20, 0.50]$,三者差异较大但均呈现先上升至 2012 年后保持稳定趋势。能源子系统协同发展程度低于粮食子系统主要受自身发展限制,水资源子系统协同发展程度最低主要由于其发展度与协同度均最低。这表明,在经济高速发展状态下自然资源的开发利用与资源本身的储量和资

源利用技术的关系较为密切,当前提高水和能源的利用效率仍旧是重点。

图 3d 显示了 WEFN 的协同发展程度,由勉强发展阶段迅速上升并基本维持良好发展阶段,这一趋势与各子系统的协同发展程度基本相同,说明该系统在各子系统自身发展基础与子系统间的相互协同状况逐步趋于良好基础上,整体呈现基本良好的协同发展状况。因此,可提高各个子系统的协同发展水平,注重子系统自身发展、提高子系统间协同互惠水平,是增强 WEFN 可持续发展的基础。

3.3 模型优缺点分析

相比于传统的耦合协调模型^[16,18],本文提出的综合协同发展模型充分考虑了子系统由无序到有序的进化过程,可以综合 WEFN 演化过程的聚集、动态、非线性等复杂特征对 WEFN 系统及各子系统的协同发展程度进行有效评价。该模型引入改进的协同进化算法衡量了子系统内部元素的适应性发展程度,综合了元素本身和元素之间的良性互动,反映了系统要素之间的和谐程度及其有序聚集的发展过程。但是,在计算系统协同发展度时假设各子系统占比相同,这一模型假设仍有进一步的改进空间。

4 结论

本文建立了区域 WEFN 的协同发展指标体系,基于复杂适应理论建立了一个综合协同发展模型,研究了黑龙江省 2009—2018 年 WEFN 的协同发展水平及变化特征,得到如下结论:

(1) 2009—2018 年黑龙江省 WEFN 协同发展度呈增长趋势。

(2) 各子系统的内部发展程度差异较小、协同程度差距较大,各子系统协同发展程度有相似的增长趋势,表明子系统虽然协同发展状况不一但是相互关联、相互协同。

(3) 黑龙江省应以水—能源—粮食的协同为突破口,发展现代化、规模集约化农业,促进水、能源等在农业生产中的高效应用。

综上所述,本文提出的综合协同发展模型可以有效评价 WEFN 系统由个体到整体的复杂适应系统协同发展状况并分析得出影响因素,为水、能源、粮食三者的协同发展提供可靠的依据。

[参 考 文 献]

- [1] Hoff H. Understanding the nexus [C]//The Water Energy Security Nexus, The Bonn 2011 Nexus Conference, 2011.
- [2] Wiegleb V, Bruns A. What is driving the water-energy-

- food nexus? discourses, knowledge, and politics of an emerging resource governance concept [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018,70(1):1-14.
- [3] 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.
- [4] Sanders K T, Masri S F. The energy-water agriculture nexus: The past, present and future of holistic resource management via remote sensing technologies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,117:73-88.
- [5] 李良,毕军,周元春,等.基于粮食—能源—水关联关系的风险管控研究进展[J].*中国人口·资源与环境*,2018,28(7):85-92.
- [6] Zhang Tianming, Xu Yejun. Evaluation on the efficiency of water-energy-food nexus based on data envelopment analysis (DEA) and malmquist in different regions of China [J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2019,12(2):1649-1659.
- [7] 彭少明,郑小康,王煜,等.黄河流域水资源—能源—粮食的协同优化[J].*水科学进展*,2017,28(5):681-690.
- [8] 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[J].*管理评论*,2016,28(10):11-26.
- [9] Cheng Kun, Yao Jiping, Ren Yongtai. Evaluation of the coordinated development of regional water resource systems based on a dynamic coupling coordination model [J]. *Water Supply*, 2019,19(2):565-573.
- [10] 谭跃进,邓宏钟.复杂适应系统理论及其应用研究[J].*系统工程*,2001,19(5):1-6.
- [11] 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*,1999,16(2):171-177.
- [12] 穆东,杜志平.系统协同发展程度的 DEA 评价研究[J].*数学的实践与认识*,2005,35(4):56-64.
- [13] 穆东,杜志平.资源型区域协同发展评价研究[J].*中国软科学*,2005(5):106-113.
- [14] 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.
- [15] 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(4):8-15.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 窦如婷,申敏,汪天凯.动态视角下国际投资的宏观环境综合评价:基于改进的 CRITIC 赋权和 TOPSIS 法[J].*工业技术经济*,2018,37(8):132-138.
- [20] 张立军,张潇.基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J].*统计与决策*,2015(22):65-68.
- [21] 贾品荣.区域低碳协同发展评价:京津冀、长三角和珠三角城市群的比较分析[J].*经济数学*,2017,34(4):1-6.
- [22] Yao Jiping, Ren Yongtai, Wei Shuai, et al. Assessing the complex adaptability of regional water security systems based on a unified co-evolutionary model [J]. *Journal of Hydroinformatics*,2018,20(1):34-48.
- [23] Hillis W D. Co-evolving parasites improve simulated evolution as an optimization procedure [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1990,42(1/2/3):228-234.
- [24] 李碧.协同进化算法的研究及其应用[D].广东 广州:华南理工大学,2010.
- [25] 刘思峰,郭天榜,党耀国.灰色系统理论及其应用[M].2版.北京:科学出版社,1999:51-64.
- [26] 文淑惠,黄丽芳.基于灰色关联度的云南省产业结构趋同性研究[J].*昆明理工大学学报(社会科学版)*,2012,12(6):51-56.
- [27] 李佳俐,程涛.基于区间灰色关联度的食品产业集群发展评价方法[J].*统计与决策*,2016(4):84-87.
- [28] 刘怡,周凌云,耿纯.京津冀产业协同发展评估:基于区位熵灰色关联度的分析[J].*中央财经大学学报*,2017(12):119-129.
- [29] 孟萍莉,董相町.生产性服务业 FDI, OFDI 对制造业结构升级的影响:基于灰色关联理论的实证分析[J].*经济与管理*,2017,31(3):74-79.