

# 2000 - 2019 年新疆水 - 能源 - 粮食系统 耦合协调发展研究

冯梅青<sup>1,2</sup>, 陈亚宁<sup>2</sup>, 焦黎<sup>1,3</sup>, 段伟利<sup>2</sup>, 陈世峰<sup>1,2</sup>

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 水、能源和粮食是区域可持续发展的关键要素。以新疆维吾尔自治区为研究区, 构建水 - 能源 - 粮食(W - E - F)系统综合评价指标体系, 利用耦合协调度模型和灰色 GM(1,1)模型, 分析新疆 2000 - 2019 年 W - E - F 系统耦合协调发展水平, 并对 2020 - 2031 年的耦合协调度进行预测。结果表明: 2000 - 2019 年新疆 W - E - F 系统的综合评价指数由 0.39 增大至 0.61, 整体上呈现上升趋势; 耦合协调度从 0.59 增大至 0.77, 3 个子系统之间存在着密切的联系, 目前整体表现为中级协调发展水平, 并预测在 2025 年将过渡为高级协调发展阶段。水资源子系统仍是制约 W - E - F 系统协调发展的关键, 农业用水占比过大, 导致新疆总体上结构性缺水严重。未来应积极调整用水结构, 提高水资源利用效率, 优化粮食消费结构, 以提升系统内部的协调性。

**关键词:** 水 - 能源 - 粮食系统; 评价指标体系; 耦合协调; 灰色预测; 新疆维吾尔自治区

中图分类号: TV213.4; F326.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)02-0077-08

## Research on the coupling and coordinated development of water - energy - food system in Xinjiang during 2000 - 2019

FENG Meiqing<sup>1,2</sup>, CHEN Yaning<sup>2</sup>, JIAO Li<sup>1,3</sup>, DUAN Weili<sup>2</sup>, CHEN Shifeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

**Abstract:** Water, energy and food are key elements of sustainable regional development. Taking Xinjiang Autonomous Region as the study area, the comprehensive evaluation system of water - energy - food (W - E - F) is constructed. The coupling coordination degree model and the grey GM(1,1) model are adopted to analyze the coupling coordination level of the W - E - F system from 2000 to 2019, and to predict its future development during the period of 2020 - 2031. The results showed that the comprehensive evaluation index of W - E - F system in Xinjiang rose from 0.39 to 0.61 from 2000 to 2019, showed an overall upward trend; the coupling coordination degree increased from 0.59 to 0.77, and the three subsystems were closely related but the overall performance fell in the intermediate level of coordinated development, which is expected to develop to the advanced level in 2025. Water resources subsystem is still the main factor that restricts the coordinated development of W - E - F system. The large proportion of agricultural water results in the severe structural water shortage in Xinjiang. In the future, Xinjiang should actively adjust the water use structure, improve the utilization efficiency of water resources, optimize the grain consumption structure, and enhance the internal coordination of the system.

**Key words:** water - energy - food (W - E - F) system; evaluation index system; coupling and coordination; grey prediction; Xinjiang Autonomous Region

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52161145102, 41501552)

作者简介: 冯梅青 (1997 -), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要从事水 - 能源 - 粮食纽带关系研究。

通讯作者: 陈亚宁 (1958 -), 男, 新疆阿克苏人, 博士, 研究员, 主要从事水资源与地表过程研究。

## 1 研究背景

“水-能源-粮食(water-energy-food, W-E-F)”是人类生存和发展所依赖的重要系统,其内部良好的耦合性能有力推动区域的可持续发展<sup>[1]</sup>。目前,该系统内部耦合关系受到人口增长和工业化等外部因素的影响,导致人类对水、能源和粮食的需求大幅度增加。预计到2050年,人类对水、能源、粮食的需求将分别增加约50%、35%和70%<sup>[2-4]</sup>。在人口增长、资源短缺和全球变暖的背景下,W-E-F系统的安全问题受到国内外社会的广泛关注<sup>[5]</sup>。

学术界对W-E-F系统进行了大量研究,主要集中在以下两个方面:一是对“水-能源-粮食”的内涵框架和相互关系的定性描述。在2011年11月波恩会议上,“水-能源-粮食”纽带(WEF nexus)首次被世人所熟知<sup>[6]</sup>。随后,WEF nexus研究受到学术界重视,其内在机理也逐渐被深化。Sadeghi等<sup>[7]</sup>在流域尺度上构建了农业水、能源和粮食之间的联系框架;郑人瑞等<sup>[8]</sup>从地球科学角度出发,指出资源调查和大数据分析等科学化监测是认识纽带关系的重要手段。二是对“水-能源-粮食”的研究方法进行定量解释。Karamian等<sup>[9]</sup>利用WEFNI模型对伊朗Miandarband平原农业种植系统的作物WEF nexus关系进行了定量化解释;Duan等<sup>[10]</sup>考虑气候变化和人口增长等外部因素对WEF nexus的影响,仿真不同的社会经济发展场景,对土库曼斯坦水和粮食的需求变化进行了预测;Shi等<sup>[11]</sup>在传统纽带关系的基础上增加了生态因素的耦合,通过构建贝叶斯网络模型对锡尔河流域用水进行了分析;王凯等<sup>[12]</sup>、党锐等<sup>[13]</sup>应用耦合协调度模型对中国部分省份W-E-F系统的协调发展关系进行了量化。

新疆维吾尔自治区(以下简称新疆)是我国重要的能源和粮食储备区,但水资源严重匮乏,W-E-F系统安全性十分脆弱<sup>[14]</sup>。已有学者研究了新疆地区水资源和粮食对气候变化的响应<sup>[15-17]</sup>,以及单一能源要素的变化<sup>[18]</sup>,但缺乏对W-E-F系统耦合协调发展的研究。因此,从省域尺度量化W-E-F系统耦合协调发展关系,对新疆社会经济可持续发展和生态安全具有十分重要的意义。

本文以新疆为研究区域,构建综合评价指标体系,选取2000-2019年的数据进行实例分析,利用耦合协调度模型来探究W-E-F系统协调发展状

况,并通过灰色GM(1,1)模型预测2020-2031年新疆W-E-F系统的耦合协调度。研究成果可为地区“水-能源-粮食”系统协同发展的政策制定提供参考。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于西北干旱区,是丝绸之路经济带的核心区。该区域水资源严重短缺,多年平均降水量为150 mm,水资源量仅为 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ <sup>[19]</sup>。新疆是我国重要的粮食产区之一,优质作物有小麦、玉米和棉花等<sup>[20]</sup>。新疆能源种类众多,风能资源总储量为 $8.9 \times 10^8 \text{ kW}$ ;太阳辐射年平均值为 $580 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ,是全国太阳能最丰富的地区之一;石油、煤炭和天然气更是新疆的优势资源。

### 2.2 数据来源与指标体系构建

本研究所需的原始数据来自于2001-2020年的《中国水资源公报》《新疆统计年鉴》《新疆水资源公报》等,部分缺失数据采用线性拟合法进行插补。

遵循科学性、全面性和系统性等原则,参考已有的研究成果<sup>[21-23]</sup>并结合新疆WEF nexus关系的互馈机制,构建该区域综合评价指标体系。同时,对系统内评价指标进行相关性检验,保留相关系数小于0.5的指标,最终选定25个评价指标。W-E-F系统综合评价指标体系见表1。

资源总量、消费结构和经济效益是水资源和能源子系统选取指标的出发点。在水资源子系统评价指标中,人均水资源量是表征区域水资源丰沛程度的重要指标;万元GDP和工业增加值用水量越少,则区域水资源消费结构越优化,取得的生态效益越高。在能源子系统评价指标中,工业、农业和生活占能源消耗比重越高,说明地区能源消费结构越不合理;能源消费弹性系数越小,说明能源消费安全程度越高。粮食子系统从生产和消费两方面进行指标的选取,粮食生产指标性质为正,其值越大,表明粮食供应越充足;化肥负荷指标性质为负,其值越小,表明在粮食生产过程中能源消费越合理。

### 2.3 数据标准化及权重确定

由于各子系统评价指标的量纲不同,需要对原始数据进行标准化处理,得到无量纲化数值,使数据具有可比性和可测性。根据指标的不同性质分为正、负指标。

正向指标:

$$X'_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

负向指标:

$$X'_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: $X'_i$ 为*i*指标标准化后的指标值; $X_i$ 为*i*指标的原始数据; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为各项评价指标的最大值和最小值。

本文采用熵值法对各指标进行客观赋权,在一

定程度上避免了人为赋权的主观性。熵值法是通过分析指标间的离散程度并根据各项指标所承载的信息量来计算指标信息熵的一种方法,熵值越小,表明各指标间的差异性越大,则指标在各子系统内的权重越大,反之越小<sup>[24]</sup>。各项评价指标的权重计算结果见表 1。

表 1 新疆 W-E-F 系统综合评价指标体系

子系统	指标类型	评价指标/单位	数据来源与计算	权重	性质	
水资源子系统	总量指标	降水量/mm	统计数据	0.04	正	
		废水排放量/10 <sup>4</sup> t	统计数据	0.07	负	
		人均用水量/m <sup>3</sup>	统计数据	0.13	负	
		人均水资源量/m <sup>3</sup>	统计数据	0.07	正	
	结构指标	农业用水比重/%	农业用水量/用水总量	0.08	负	
		工业用水比重/%	工业用水量/用水总量	0.07	负	
		生活用水比重/%	生活用水量/用水总量	0.07	负	
		生态环境用水比重/%	生态环境用水量/用水总量	0.38	正	
		效益指标	万元 GDP 用水量/m <sup>3</sup>	用水量/GDP	0.05	负
			万元工业增加值用水量/m <sup>3</sup>	用水量/工业增加值	0.04	负
能源子系统	总量指标	一次性能源生产总量/10 <sup>4</sup> tce	统计数据	0.14	正	
		外省调入量与进口量/10 <sup>4</sup> tce	统计数据	0.29	正	
		本区调出量与出口量/10 <sup>4</sup> tce	统计数据	0.11	负	
	结构指标	农业占能源消耗比重/%	农业能源消耗量/能源总消耗量	0.05	负	
		工业占能源消耗比重/%	工业能源消耗量/能源总消耗量	0.17	负	
		生活占能源消耗比重/%	生活能源消耗量/能源总消耗量	0.10	负	
		能源消费弹性系数/%	统计数据	0.07	负	
	效益指标	单位 GDP 能耗/tce	能源总消耗量/GDP	0.07	负	
		生产指标	粮食种植面积/10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup>	统计数据	0.14	正
			有效灌溉面积/10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup>	统计数据	0.14	正
单位面积粮食产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	粮食总产量/粮食播种面积		0.15	正		
粮食子系统	消费指标	人均粮食产量/kg	粮食总产量/总人口	0.13	正	
		粮食价格消费指数	统计数据	0.15	负	
	生产指标	化肥负荷/(t·hm <sup>-2</sup> )	化肥用量/农作物播种面积	0.15	负	
		机械动力/(kW·hm <sup>-2</sup> )	机械总动力/农作物播种面积	0.14	正	

### 2.4 综合评价指数模型

为了直观衡量 W-E-F 系统各子系统的发展水平,本研究利用线性加权法计算各子系统的评价指数。公式如下:

$$f_x = \sum_{i=1}^n E_i X'_i \quad (3)$$

$$g_y = \sum_{i=1}^n E_j X'_i \quad (4)$$

$$h_z = \sum_{i=1}^n E_k X'_i \quad (5)$$

式中: $f_x$ 、 $g_y$ 、 $h_z$ 分别为水、能源和粮食子系统的评价指数; $E_i$ 、 $E_j$ 、 $E_k$ 分别为水、能源和粮食子系统各指标的权重; $n$ 为各子系统所选取的指标数量。

### 2.5 耦合协调度模型

耦合在 WEF nexus 关系中指水、能源和粮食系统在发展过程中相互依赖、相互作用的过程<sup>[25]</sup>。参

考相关学者的研究结果,构建 W - E - F 系统耦合度模型如下:

$$C = \frac{3 \sqrt[3]{f_x \cdot g_y \cdot h_z}}{f_x + g_y + h_z} \quad (6)$$

式中:  $C$  为耦合度,  $C \in [0, 1]$ 。  $0 \leq C < 0.2$  为低水平耦合阶段;  $0.2 \leq C < 0.6$  为颀颀阶段;  $0.6 \leq C < 0.8$  为磨合阶段;  $0.8 \leq C < 1$  为高水平耦合阶段。耦合度值越高代表水 - 能源 - 粮食系统之间的耦合作用程度越好。

由于耦合度模型不能充分反映 W - E - F 系统整体耦合协调水平,为此构建耦合协调度模型如下:

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (7)$$

$$T = \alpha f_x + \beta g_y + \gamma h_z \quad (8)$$

式中:  $D$  为耦合协调度,  $D \in [0, 1]$ , 其值越大代表 W - E - F 系统协调发展水平越高,反之越差;  $T$  为 W - E - F 系统的综合评价指数;  $\alpha, \beta, \gamma$  为各子系统的权重,在 W - E - F 系统中,3 个子系统同等重要,故  $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。

Chen 等<sup>[14]</sup>在前人研究成果<sup>[26-27]</sup>的基础上,结合干旱地区的自然特征对耦合协调度分类标准进行调整<sup>[14]</sup>,如表 2 所示,本文借鉴此分类标准对耦合协调度进行划分。

表 2 耦合协调度分类标准

$D$ 值区间	耦合协调等级	耦合协调度
[0.00, 0.20]		高度失调衰退
[0.21, 0.40]	极度失调阶段	适度失调衰退
[0.41, 0.50]		轻微失调衰退
[0.51, 0.60]	协调过渡阶段	濒临失调衰退
[0.61, 0.70]		初级协调发展
[0.71, 0.80]		中级协调发展
[0.81, 0.90]	协调发展阶段	高级协调发展
[0.91, 1.00]		完全协调发展

## 2.6 灰色预测模型

灰色 GM(1,1) 预测模型是基于灰色系统理论并遵循现实信息优先原则,利用数学方法对时间序列短、具有饱和状态的样本数据进行精准预测<sup>[28]</sup>。如果各个子系统向良好水平发展,则 W - E - F 系统耦合协调度逐渐接近于 1,趋近饱和状态。因此该模型在 W - E - F 系统耦合协调度发展预测方面得到广泛应用<sup>[29-30]</sup>。本研究利用灰色 GM(1,1) 模型,根据 2004 - 2011 年新疆 W - E - F 系统耦合协调度的原始数据预测 2020 - 2031 年耦合协调度的

变化趋势。建模过程如下:

(1) 选定原始数据时间序列  $X^{(0)}$  共有  $n$  个观察值:

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (9)$$

(2) 原始序列  $X^{(0)}$  一次累加得到新序列  $X^{(1)}$ :

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (10)$$

(3) 新序列  $X^{(1)}$  白化微分方程为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (11)$$

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中:  $\hat{a}$  为待估参数向量;  $a$  为发展系数;  $b$  为灰色作用量;  $B$  为数据矩阵;  $Y$  为数据向量。

耦合协调度预测模型的表达式为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{a}{b}]e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (13)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 综合评价指数时序分析

计算得出的 2000 - 2019 年新疆 W - E - F 系统综合评价指数及各子系统评价指数变化趋势如图 1 所示。

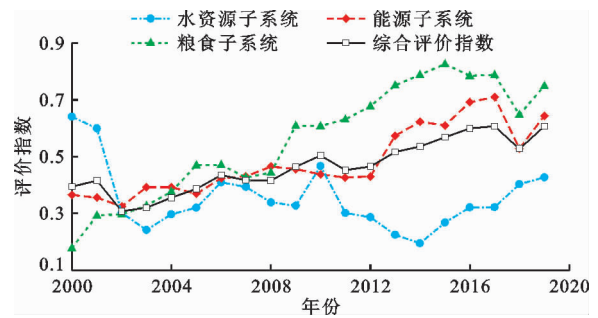


图 1 2000 - 2019 年新疆 W - E - F 系统综合评价指数及各子系统评价指数变化趋势

对图 1 中的计算结果分析如下:

(1) 2000 - 2019 年新疆 W - E - F 系统的综合评价指数呈波动增大的发展态势,其值由 0.39 增大至 0.61。主要原因是该时段粮食和能源子系统消费结构得以优化,保持向好发展态势,致使综合评价指数显著提升。

(2) 水资源子系统评价指数波动较大,呈现先减小后增大的发展趋势。2000 - 2003 年评价指数大幅减小,减幅为 62.3%; 2003 - 2010 年由 0.24 增大至 0.47; 2011 - 2014 年又显著减小,且 2014 年达到最低,为 0.19; 2014 年之后水资源评价指数直线上升,至 2019 年增幅达到 48%。形成这一变化过

程的主要原因是2001年中央政府实施对口帮扶政策,粮食种植面积显著增加<sup>[20]</sup>,农业用水占比过重,并且全疆人口2014年增加至 $2\,298 \times 10^4$ 人,人口的迅速增加导致人均水资源量由2000年的 $3\,398 \text{ m}^3$ 减少至 $3\,130 \text{ m}^3$ 。2014年之后随着节水技术的提高,用水结构得到明显改善,生态环境用水量增加,使水资源评价指数逐年增大<sup>[31]</sup>。

(3)能源子系统经历两个发展阶段:2000-2012年发展缓慢,评价指数由0.36增加到0.43;2013-2017年发展速度较快,评价指数由0.57增加到0.71;但2018年又大幅减小至0.53。1995年新疆政府实施“一黑一白战略”,大力发展煤炭等化石能源产业,使21世纪初新疆一次能源生产量持续增加<sup>[18]</sup>;此外,“十二五”时期,新疆工业快速发展,生产技术提高,能源消费结构得到优化,促使单位GDP所消耗的能源量逐渐减少<sup>[18]</sup>,能源消耗弹性系数由2011年的1.64减小至2017年的0.88。与此同时,能源子系统的评价指数于2017年达到了峰值,为0.71。

(4)粮食子系统总体保持良好的发展态势。2000-2015年评价指数由0.18增大至0.83;2015-2018年评价指数波动减小,由峰值0.83减小至0.65,2019年又增加至0.75。2002年,“稳疆兴疆,富民固边”战略的提出给新疆带来了投资发展的新机遇,其中,农田种植业资金投入占到总投资一半以上,使新疆粮食种植面积由 $144.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加至 $234.62 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

### 3.2 耦合度和耦合协调度时序分析

根据公式(6)~(8),计算2000-2019年新疆W-E-F系统的耦合度C和耦合协调度D,并对其进行类型划分,结果见表3和图2。

由表3和图2可以看出,2000-2019年新疆W-E-F系统的耦合程度较高,耦合度值在0.85~1.00之间波动,均为高水平耦合,说明W-E-F系统的各个子系统之间内在关联程度较好,同时,粮食和能源子系统评价指数总体保持增加的发展趋势,对W-E-F系统耦合度的贡献程度较大。2014年W-E-F系统耦合度明显下降,耦合度值减小至0.85,其主要原因是该年度水资源系统评价指数较低,仅为0.19,对W-E-F系统耦合度的发展起到负面影响。随后,新疆“三条红线”用水政策得到深入落实,使用水结构改善,水资源利用效率得到提高,2015年水资源子系统评价指数开始增大,至2019年,水资源子系统评价指数提升至0.43(图

1),耦合度提升至0.97。2000-2019年新疆W-E-F系统耦合协调度分为3种类型,即濒临失调、初级协调和中级协调(表3)。其中,2015-2019年耦合协调度由0.72增大至0.77。主要原因是2014年之后,由于农田水利设施的改善,有效灌溉面积不断增加,同时生态环境用水量增多,使耦合协调度上升为中级协调<sup>[32]</sup>。

表3 2000-2019年新疆W-E-F系统的耦合发展类型划分

年份	耦合度 C	耦合协调度 D	耦合程度	耦合协调类型
2000	0.88	0.59	高水平耦合	濒临失调
2001	0.95	0.63	高水平耦合	初级协调
2002	1.00	0.55	高水平耦合	濒临失调
2003	0.98	0.56	高水平耦合	濒临失调
2004	0.99	0.59	高水平耦合	濒临失调
2005	0.99	0.62	高水平耦合	初级协调
2006	1.00	0.66	高水平耦合	初级协调
2007	1.00	0.65	高水平耦合	初级协调
2008	0.99	0.64	高水平耦合	初级协调
2009	0.97	0.67	高水平耦合	初级协调
2010	0.99	0.71	高水平耦合	中级协调
2011	0.96	0.66	高水平耦合	初级协调
2012	0.94	0.66	高水平耦合	初级协调
2013	0.88	0.68	高水平耦合	初级协调
2014	0.85	0.68	高水平耦合	初级协调
2015	0.90	0.72	高水平耦合	中级协调
2016	0.93	0.75	高水平耦合	中级协调
2017	0.93	0.75	高水平耦合	中级协调
2018	0.98	0.72	高水平耦合	中级协调
2019	0.97	0.77	高水平耦合	中级协调

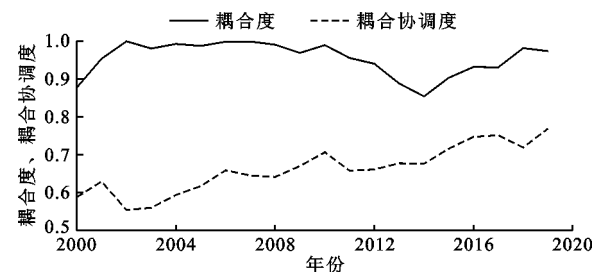


图2 2000-2019年新疆W-E-F系统耦合度和耦合协调度变化趋势

### 3.3 耦合协调度灰色预测

根据公式(9)~(13)对2020-2031年新疆W-E-F系统耦合协调度进行灰色预测,结果如图3所示。

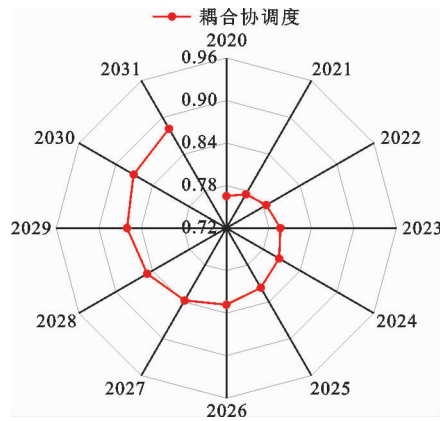


图3 2020-2031年新疆W-E-F系统耦合协调度预测

由图3可知,预测新疆W-E-F系统耦合协调度将由2020年的0.76增大至2031年的0.88,平均年增幅为0.01,虽然增长幅度较小,但始终保持平稳增长的发展态势,并于2025年过渡到高级协调阶段。整体而言,未来新疆W-E-F系统各子系统相互作用程度将不断加强,始终保持高水平耦合,促使W-E-F系统耦合协调度不断提高。节约水资源、提高能效,增强农业生产力是政府所追求的目标<sup>[33]</sup>。例如,2001年政府投资 $107 \times 10^8$ 元加强塔里木河流域水资源管理,主要包括灌区节水工程、平原水库的改造以及地下水的合理利用<sup>[17]</sup>,截至2019年,南疆地区农田灌溉效率提升至0.56。在2001-2021年,塔里木河下游共经历21次生态输水工程,生态输水量共计 $84.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[34]</sup>,并于2021年8月2日开始第22次生态输水工程。农田灌溉效率的提高以及生态用水量的持续增多,无疑会促进未来水资源子系统的发展,提高新疆W-E-F系统的耦合协调度。

为了验证预测结果的真实性,将2004-2011年的数据作为训练集、2012-2019年的数据作为测试集对模型预测结果进行有效性检验,检验结果见表4。

表4 耦合协调度预测结果检验

年份	测试集数据	训练集数据预测结果	误差绝对值
2012	0.66	0.66	0.00
2013	0.68	0.68	0.00
2014	0.68	0.69	0.01
2015	0.72	0.70	0.02
2016	0.75	0.72	0.03
2017	0.75	0.74	0.01
2018	0.72	0.75	0.03
2019	0.77	0.77	0.00

表4中显示,各年份耦合协调度预测误差绝对值在0~0.03之间,表明预测精度较高。

## 4 讨论

### 4.1 W-E-F系统协调发展影响因素

用水结构是影响新疆W-E-F系统协调发展的主要因素之一。不同于湿润地区,新疆为灌溉农业,农业用水占比过大,导致新疆总体上结构性缺水严重。因此,水资源是制约W-E-F系统协调发展的关键。蒲傲婷<sup>[35]</sup>指出,以2016年为例,新疆农业用水占比为94%,而生态环境用水占比仅为1.1%。Fang等<sup>[17]</sup>指出,地表水和地下水是新疆塔里木河流域农业用水的主要来源。流域农业灌溉用水所占比重为96%,但仅产生了40%的生产总值<sup>[36]</sup>。因此,农作物的灌溉用水量远远超过了地区水资源生产力,使得地区水资源压力日趋严重。农业用水比重作为水资源子系统的主要评价指标之一,其值越大,则水资源子系统的发展越差。因此,在新疆W-E-F系统中,水资源子系统发展波动较大,发展水平较低。但是,随着节水技术的发展以及用水结构的改善,农业灌溉效率得到显著提高<sup>[32]</sup>。这在一定程度上缓解了水资源子系统发展不稳定的局面,导致近年来水资源子系统发展水平有所提高。

粮食种植面积是影响新疆W-E-F系统协调发展的另一重要因素。作为中国主要粮食产区,新疆粮食种植面积不断增加,尤其在2001-2010年,在中央对口帮扶政策下,新疆利用农业资源优势,大力发展农业生产<sup>[37]</sup>。根据新疆统计年鉴,2000-2019年新疆粮食种植面积增加了 $90 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。粮食种植面积的扩大和单位粮食产量的增加对粮食子系统的发展起到了积极作用。

### 4.2 适用性和不确定性

目前,对于新疆W-E-F系统协调发展的长时间序列研究较少,与王玉宝等<sup>[38]</sup>对新疆各市W-E-F系统安全性评价分析相比,本研究利用综合评价指数和耦合协调度模型定量评价了2000-2019年新疆W-E-F系统耦合协调发展水平,为新疆水-能源-粮食系统协同优化发展提供了详实的结果。研究表明,水资源子系统是新疆W-E-F系统耦合协调发展的主要短板,得益于资源和环境优势,通过以能补粮<sup>[39]</sup>和以粮补水<sup>[40]</sup>的方式弥补水资源短板,成为W-E-F系统耦合协调发展的主要驱动力。在政策倾斜和节水技术提高的背

景下,灰色 GM(1,1)模型预测未来 12 a 的 W-E-F 系统耦合协调度发展的预测结果良好。

在本研究中,不确定性主要来源于评价指标体系的构建,综合评价指数模型在衡量子系统发展能力上效果显著,具有普遍适用性<sup>[13]</sup>。但就 W-E-F 系统耦合协调发展水平而言,由于数据的可获取性和评价体系构建的科学性等因素,导致综合评价指标体系并不能完全反映系统的耦合发展水平<sup>[12]</sup>。其次,本研究仅在系统内部对 W-E-F 系统耦合协调度进行分析,同时进行短期预测,并未考虑外部因素(如气候变化)对 W-E-F 系统耦合协调发展的影响。新疆作为一个农业大区,对气候变化的响应十分敏感,因此还需要探究未来气候变化背景下 W-E-F 系统耦合协调度的发展变化。

## 5 结 论

本文构建了 W-E-F 系统的综合评价指标体系,利用耦合协调度模型和灰色 GM(1,1) 预测模型,分析了新疆 W-E-F 系统耦合协调度的时序变化,并对影响因素进行了探讨。研究结果可为进一步提高新疆 W-E-F 系统耦合协调发展提供理论参考。主要结论如下:

(1)2000-2019 年新疆 W-E-F 系统的综合评价指数增大态势明显,由 2000 年的 0.39 增大至 2019 年的 0.61。水资源子系统评价指数波动较大,介于 0.19~0.64 之间;具有资源优势的能源子系统评价指数随时间的推移而波动增大;政策支持和灌溉技术的进步致使粮食子系统评价指数增幅较大。

(2)2000-2019 年新疆 W-E-F 系统的耦合度一直保持高水平耦合,表明 3 个子系统之间存在着密切的联系。耦合协调度目前处于中级协调,并在未来 12 a 内继续保持良性耦合的发展趋势,预测耦合协调度值将于 2025 年达到 0.82,过渡到高级协调发展阶段。

(3)从新疆 W-E-F 系统的耦合协调发展趋势来看,水资源仍然是制约各子系统耦合协调发展的主导因素。农业用水比重过大,导致用水比例失衡。因此,在未来系统耦合协调发展的过程中,应重点加快调整用水结构,以减轻水资源对其他子系统的制约作用。其次,优化能源消费结构,利用生物质能来提高粮食产量,从而降低粮食生产的水足迹,实现以能补粮、以粮补水的平衡发展。

### 参考文献:

[1] 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(12):76-90.

- [2] CHAI Jian, SHI Huiting, LU Quanying, et al. Quantifying and predicting the Water-Energy-Food-Economy-Society-Environment Nexus based on Bayesian networks—A case study of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120266.
- [3] PIAO Shilong, CIAIS P, HUANG Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [4] ZHANG Chi, CHEN Xiaoxian, LI Yu, et al. Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 625-639.
- [5] ZUO Qiting, WU Qingsong, YU Lei, et al. Optimization of uncertain agricultural management considering the framework of water, energy and food[J]. Agricultural Water Management, 2021, 253: 106907.
- [6] HOFF H. Understanding the nexus[R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [7] 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: 106071.
- [8] 郑人瑞,唐金荣,金玺.水-能源-粮食纽带关系:地球科学的认知与解决方案[J].中国矿业,2018,27(10):36-41.
- [9] KARAMIAN F, MIRAKZADEH A A, AZARI A. The water-energy-food nexus in farming: Managerial insights for a more efficient consumption of agricultural inputs[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 27: 1357-1371.
- [10] DUAN Weili, CHEN Yaning, ZOU Shan, et al. Managing the water-climate-food nexus for sustainable development in Turkmenistan[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 212-224.
- [11] SHI Haiyang, LUO Geping, ZHENG Hongwei, et al. A novel causal structure-based framework for comparing a basin-wide water-energy-food-ecology nexus applied to the data-limited Amu Darya and Syr Darya river basins[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(2): 901-925.
- [12] 王凯,李景保,李欢.山西省水-能源-粮食系统耦合协调时空变化特征研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):45-52+58.
- [13] 党锐,张军,周冬梅,等.2000-2016年甘肃省水资源-能源-粮食耦合协调特征研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):115-123.
- [14] CHEN Junfei, YU Xiaoya, QIU Lei, et al. Study on vulnerability and coordination of Water-Energy-Food sys-

- tem in Northwest China [J]. Sustainability, 2018, 10 (10): 3712.
- [15] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9.
- [16] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 马国飞. 叶尔羌河平原绿洲气候变化对粮食生产的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 705-712.
- [17] FANG Gonghuan, CHEN Yaning, LI Zhi. Variation in agricultural water demand and its attributions in the arid Tarim River Basin [J]. The Journal of Agricultural Science, 2018, 156(3): 301-311.
- [18] 高明花. 新疆能源经济发展对策研究[D]. 延吉: 延边大学, 2015.
- [19] 吴业鹏, 袁汝华. 丝绸之路经济带背景下新疆水资源与经济社会协调性评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 60-66.
- [20] 吕娜娜, 白洁, 常存, 等. 近50年基于农作物种植结构的新疆绿洲农田蒸散发时空变化分析[J]. 地理研究, 2017, 36(8): 1443-1454.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 毕博, 陈丹, 邓鹏, 等. 区域水资源-能源-粮食系统耦合协调演化特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 72-77.
- [24] 李元年. 基于熵理论的指标体系区分度测算与权重设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [25] 任祁荣, 于恩逸. 甘肃省生态环境与社会经济系统协调发展的耦合分析[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 2944-2953.
- [26] 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, 19(2): 171-177.
- [27] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
- [28] 谢乃明, 刘思峰. 离散GM(1,1)模型与灰色预测模型建模机理[J]. 系统工程理论与实践, 2005(1): 93-99.
- [29] 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.
- [30] 王丽川, 侯保灯, 周毓彦, 等. 城市水-能源-粮食耦合协调发展研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 9-17.
- [31] 陈曦, 包安明, 王新平, 等. 塔里木河近期综合治理工程生态成效评估[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 20-28.
- [32] WANG Fei, CHEN Yaning, LI Zhi, et al. Assessment of the irrigation water requirement and water supply risk in the Tarim River basin, Northwest China [J]. Sustainability, 2019, 11(18): 4941.
- [33] FAN Xing, ZHANG Wen, CHEN Weiwei, et al. Land-water-energy nexus in agricultural management for greenhouse gas mitigation [J]. Applied Energy, 2020, 265: 114796.
- [34] 李玉朋, 陈亚宁, 叶朝霞, 等. 塔里木河下游输水20a的生态响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 700-707.
- [35] 蒲傲婷. 新疆水-能源-粮食系统安全评价及影响因素分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [36] 张小霞. 基于投入产出模型的塔里木河流域社会经济系统水循环研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [37] 张沛. 塔里木河流域社会-生态-水资源系统耦合研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [38] 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.
- [39] 祖米来提·吐尔干, 林涛, 严昌荣, 等. 地膜覆盖时间对新疆棉田水热及棉花耗水和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 113-120.
- [40] 张沛, 龙爱华, 海洋, 等. 1988-2015年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究——基于农作物水足迹的统计分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 242-253.

(上接第76页)

- [51] ZHENG Hongxing, CHIEW F H S, CHARLES S, et al. Future climate and runoff projections across South Asia from CMIP5 global climate models and hydrological modelling [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2018, 18: 92-109.
- [52] 李紫妍, 刘登峰, 黄强, 等. 定量评估参数不确定性传递对径流模拟的影响[J]. 水力发电学报, 2019, 38(3): 53-64.
- [53] LEE S, QI Junyu, MCCARTY G W, et al. Uncertainty assessment of multi-parameter, multi-GCM, and multi-RCP simulations for streamflow and non-floodplain wetland (NFW) water storage [J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126564.
- [54] BARRIA P, WALSH K J E, PEEL M C, et al. Uncertainties in runoff projections in southwestern Australian catchments using a global climate model with perturbed physics [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529(Part 1): 184-199.