

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.41

区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究

——以江苏省为例

邓鹏¹, 陈菁^{1,2}, 陈丹^{1,2}, 施红怡³, 毕博¹, 刘志¹, 尹越¹, 操信春^{1,2}

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南方地区高效灌排与农业

水环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029)

摘要: 随着我国淡水资源减少, 能源需求增加, 粮食供给的不确定性愈加严重。以江苏省为研究对象, 通过构建水资源-能源-粮食(W-E-F)系统耦合协调评价指标体系, 采用熵值法对各子系统指标赋权, 利用耦合协调模型进行对协调发展水平进行定量评价, 并基于灰色GM(1.1)模型预测未来5年的耦合协调度。结果表明: 江苏省2000-2015年W-E-F系统的综合评价指数整体上随时间呈上升趋势; 耦合度基本保持高水平耦合; 耦合协调度呈倒“U”型曲线, 经历了初级协调、勉强协调、中级协调3个阶段, 并在未来5年内向良好协调类过渡。但水资源与能源的发展水平仍滞后于粮食, 故提高水与能源的利用效率, 以促进区域的可持续发展。

关键词: 水资源; 能源; 粮食; 耦合; 协调; 江苏省

中图分类号: TV213.4; F205

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0232-07

The evolutionary characteristics analysis of the coupling and coordination among water, energy and food:

take Jiangsu Province as an example

DENG Peng¹, CHEN Jing^{1,2}, CHEN Dan^{1,2}, SHI Hongyi³, BI Bo¹,

LIU Zhi¹, YIN Yue¹, CAO Xinchun^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Efficient Irrigation - drainage and Agricultural Soil - water Environment in Southern Area,

Nanjing 210098, China; 3. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: With the reduction of fresh water resources and the increase of energy demand, the uncertainty of food supply has become more serious. Taking Jiangsu Province as the research object, in this paper the evaluation index system of water - energy - food (W - E - F) system interconnections was established, by using the entropy method the weight of each index was calculated, the coordinated development level was evaluated quantitatively by coupling coordination model, and then based on the gray GM (1.1) model the coupling coordination degree in the next five years was predicted. The results show that, the comprehensive evaluation index of W - E - F system in Jiangsu Province showed increasing trend over time from 2000 to 2015. The coupling degree kept a high level, the coupling coordination degree was inverted “U” curve, experiencing three stages of primary coordination, reluctant coordination, and intermediate coordination, and further raise to high level of coordination in the next five years. However, the level of development of water resources and energy still lags behind that of food. Therefore, the efficiency of water and energy use is enhanced so as to promote the sustainable development of the region.

Key words: water resources; energy; food; coupling; coordination; Jiangsu Province

收稿日期: 2017-08-07; 修回日期: 2017-09-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403200); 江苏省水利科技重点项目(2014006); 江苏水利科技项目(2017079); 江苏省社会科学基金项目(17GLC013)

作者简介: 邓鹏(1992-), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事水土资源规划与管理研究。

通讯作者: 陈菁(1964-), 女, 福建福州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源规划与管理研究工作。

1 研究背景

水资源、能源和粮食不仅是人类生存和发展的必需资源,更是区域可持续发展研究领域的重要主题^[1]。能源发展需要水,水资源的净化和调度也需要能源,粮食生产更是从灌溉到配送的各个环节都离不开水和能源,三者相互依存,联系紧密。在全球人口增长、环境恶化、资源短缺、气候变化影响加剧的背景下,研究水、能源和粮食之间的内在联系和互动关系显得日益重要^[2]。

目前,国外学者在 W-E-F 系统方面做了很多研究,2011 年 11 月德国联邦政府在波恩召开了探讨 W-E-F 系统安全的国际性会议,首次将水安全、能源安全和粮食安全之间的关系总结为一种“纽带关系”,该会议指出,全球气候变化和社会变化影响着水、能源和粮食资源的生产与消耗,同时指出这 3 种资源间的复杂关联关系,尤其是在生产、消耗与管理过程中普遍存在权衡取舍与潜在冲突,任意基于单一资源的战略都将会产生严重的不可预期的后果^[3]。2013 年,联合国亚太经济社会理事(UNESCAP)发布了《亚太地区水-粮食-能源纽带关系报告》,提出 W-E-F 在时间和空间上具有紧密联系。其中,Pittock 等^[4]研究了在集中生态环境与社会变化影响下,W-E-F 关系的动态变化与应对策略。Sahin 等^[5]成功利用系统动力学模型(SD model)对水-能源-气候关联关系进行了量化与仿真。

国内学者在 W-E-F 领域的研究,多集中于探讨水-能源、水-粮食或粮食-能源两两相关关系,其研究成果已不足以支撑决策方案的制定与执行,甚至有误导决策制定的可能。李桂君等^[6-7]具体阐明了 W-E-F 相关关系的发展历程和概念,指出该领域的核心研究议题、关键分析工具和未来面临的挑战,并利用数据包络分析法对我国各省份进行了综合评价分析;马丁等^[8]基于 TIMES-Water 模型,对我国能源系统与水资源系统开展耦合分析;赵丽平等^[9]运用耦合协调函数对我国 1998-2013 年城镇化和粮食生产水土资源发展趋势进行描述性分析与定量测算;于法稳等^[10]通过构建粮食灌溉用水对区域水资源影响的压力指数,分析了粮食国际贸易所带来的水资源要素流动对区域农业水资源压力指数的影响程度;李普林等^[11]基于耦合协调模型对江苏省城镇化进程水平与河湖水系连通进行了分析研究;逯进等^[12]运用耦合协调模型对我国省域能

源、经济与环境耦合的演化机制进行了研究。尽管现有研究一定程度上忽视了多资源多系统之间的关联关系,但是其为开展 W-E-F 之间关联作用研究奠定了基础,尤其是既有研究建立了较为完善的 W-E-F 系统影响因素体系,为揭示 W-E-F 系统的一般规律提供了有价值的参照。本文将水资源、能源与粮食三者综合于系统耦合协调分析框架下,开展 W-E-F 系统耦合协调关系的理论与实证分析。

江苏省作为我国第一综合经济大省,同时也是能源消耗大省和粮食主产区。区域水资源十分丰富,年平均降雨量 1 020 mm,但能源严重缺乏,2010-2015 年能源消费总量比可供消费的能源总量平均每年大约超出 2×10^8 t 标准煤,其中工业能源消费约占总量的 75%,并且用全国 1.1% 的土地资源养活了全国 5.8% 的人口,2015 年全省粮食进口总量 $1 578 \times 10^4$ t,同比增长 22.3%。如何协调水资-能源-粮食之间的关系,是一个重要课题。因此,开展江苏省 W-E-F 系统的耦合协调分析有助于促进江苏省资源和经济可持续发展,具有重要的理论与现实意义。

基于此,本文通过构建耦合度和耦合协调度模型将水资源、能源及粮食 3 个系统紧密联系起来,以江苏省 2000-2015 年的数据进行实证分析,探究三者之间的耦合协调发展状况,并通过灰色 GM(1,1) 模型对江苏省未来 5 年 W-E-F 系统耦合协调度的变化趋势进行分析预测,以期为地区资源综合管理和可持续发展提供理论参考和基础性数据准备。

2 系统耦合机制的理论分析

耦合是指 2 个或 2 个以上的系统通过各种相互作用而彼此影响的现象,是在各子系统之间的协同作用,系统由无序走向有序机理的关键在于系统内部序参量之间的协同作用,它左右着系统相变的特征与规律,耦合度正是对这种协同作用的度量。本文中的 W-E-F 系统耦合模型由两部分组成,即耦合度模型与耦合协调度模型。

2.1 耦合度模型

依据廖重斌^[13]1999 年的相关研究和其他学者的研究,构建了耦合度模型:

$$C_n = n \{ (u_1, u_2, \dots, u_m) \mid [\Pi (u_1 + u_2)] \}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

由于本文涉及 3 个子系统,即水资源子系统、能

源子系统、粮食子系统, $n = 3$, 故有:

$$C = \frac{3 \sqrt[3]{f(x)g(y)h(z)}}{f(x) + g(y) + h(z)} \quad (2)$$

式中: C 耦合度, 反映系统间相互作用、相互影响程度的强弱。耦合度 $C \in [0, 1]$, 根据相关文献, 本文将耦合度划分为 4 个等级, $C \in [0, 0.3]$, 为低水平耦合阶段; $C \in (0.3, 0.5]$, 为颀颀阶段; $C \in (0.5, 0.8]$ 为磨合阶段, 子系统开始接近耦合优化阶段; $C \in (0.8, 1.0]$, 为高水平耦合阶段。

2.2 耦合协调度模型

由于耦合度在有些情况下不足以充分表征 W - E - F 系统的整体功能或发展水平。为了能更好反映区域 W - E - F 系统耦合协调的高低, 构建了耦合协调度模型, 其算法可表示为:

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) + \gamma h(z) \quad (4)$$

式中: D 为耦合协调度; C 表示耦合度; T 表示 W - E - F 系统的综合评价指数; $f(x)$ 、 $g(y)$ 、 $h(z)$ 为各子系统的综合评价指数; α 、 β 、 γ 为表示各子系统重要程度的权重, 以 W - E - F 系统为例, 笔者认为三者同等重要, 因此, 可设定 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。

在本文中, 我们将借鉴廖重斌学者在 1999 年对珠江三角洲地区环境和经济耦合协调度划分的标准, 对我国地区的 W - E - F 系统的耦合协调类型进行划分。

表 1 耦合协调度的等级分类及评价标准

失调衰退类		协调发展类	
耦合度协调度 D	评价等级	耦合度协调度 D	评价等级
0.00 ~ 0.09	极度失调衰退类	0.50 ~ 0.59	勉强协调发展类
0.10 ~ 0.19	严重失调衰退类	0.60 ~ 0.69	初级协调发展类
0.20 ~ 0.29	中度失调衰退类	0.70 ~ 0.79	中级协调发展类
0.30 ~ 0.39	轻度失调衰退类	0.80 ~ 0.89	良好协调发展类
0.40 ~ 0.49	濒临失调衰退类	0.90 ~ 1.00	优质协调发展类

3 指标体系构建与数据处理

3.1 指标体系构建

构建科学合理的评价指标体系是对区域 W - E - F 协调发展水平进行评价的基础。本文综合考虑水、能源和粮食之间的相互作用机理, 并借鉴已有研究成果^[14-18], 遵循科学性、动态性、数据可得性和层次性原则, 从各子系统的安全视角出发, 将水资源子系统与能源子系统分为总量、结构、效益 3 个方面, 将粮食子系统分解生产安全、流通安全、消费安全 3

个方面, 这一系列指标能较为全面的展现 W - E - F 系统的发展水平。

表 2 江苏省 W - E - F 系统耦合协调度评价指标体系

子系统要素	指标	权重	类型	
水资源子系统	1. 人均用水量	0.1041	负	
	总量指标	2. 降雨量	0.0912	正
		3. 入境水量	0.0926	正
		4. 出境水量	0.0862	负
	结构指标	5. 农业用水量占总用水量比重	0.0880	负
		6. 工业用水量占总用水量比重	0.1177	负
		7. 生态用水量占总用水量比重	0.1465	正
	效益指标	8. 万元 GDP 用水量	0.1499	负
		9. 万元工业增加值用水量	0.1237	负
能源子系统	1. 能源消耗总量	0.1428	负	
	总量指标	2. 一次性能源生产量	0.0970	正
		3. 能源进口量	0.1194	正
		4. 能源出口量	0.0977	负
	结构指标	5. 第一产业占能源消耗比重	0.0661	负
		6. 第二产业占能源消耗比重	0.1601	负
		7. 第三产业占能源消耗比重	0.1012	正
	效益指标	8. 单位生产总值的能耗	0.1274	负
		9. 能源消费弹性系数	0.0883	负
生产安全	1. 单位面积粮食产量	0.0668	正	
	2. 粮食种植面积	0.1146	正	
	3. 粮食产量波动率	0.1085	负	
粮食子系统	流通安全	4. 国有企业粮食销售量	0.2245	正
		5. 粮食出口量	0.1377	负
		6. 粮食进口量	0.1076	正
消费安全	7. 粮食消费价格指数	0.0507	负	
	8. 人均粮食消费量	0.1239	负	
	9. 人均粮食占有量	0.0656	正	

注: 1. “正”为正向指标, 数值越大越好; “负”为负向指标, 数值越小越好。

2. 粮食产量波动率 $G_t = (Y_t - Y_{t-1})/Y_{t-1} \times 100\%$, 其中 t 为年份; Y 为 t 年份的产量。

3.2 指标权重的确定

本文采用了 2000 - 2015 年共 16 a 的数据, 采用熵值法确定指标权重(表 2)。熵值法确定权重的具体步骤为:

1) 将各指标同度量, 计算第 j 项指标第 i 年指标值的比例 P_{ij} :

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad (5)$$

式中: m 为统计年数; X'_{ij} 同上。

2) 计算信息熵 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (6)$$

式中: $0 \leq e_j \leq 1$; 当 $P_{ij} = 0, e_j = 0$ 。

3) 计算差异系数 g_j :

$$g_j = 1 - e_j \quad (7)$$

熵值越小, 指标间的差异性越大。

4) 计算指标权重 w_j :

$$w_j = g_j / \sum_{i=1}^n g_j \quad (8)$$

3.3 数据来源及处理

文中所用数据来源于国家统计局、江苏省水资源公报、《江苏省统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国粮食年鉴》等。部分缺失数据统一采用线性拟合法估算而得。

首先, 对原始数据进行无量纲处理, 其目的是为了消除原始数据因量纲不同而造成数据处理不便。对初始数据的具体标准化处理方法为:

正向“+”指标:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - \min X_j) / (\max X_j - \min X_j) \quad (9)$$

负向“-”指标:

$$X'_{ij} = (\max X_{ij} - X_j) / (\max X_j - \min X_j) \quad (10)$$

式中: X'_{ij} 为标准化后的指标值; X_j 为指标原始值; $\max X_j, \min X_j$ 为历年来 j 指标的最大值和最小值。

3.4 综合评价指数说明

综合评价指数可测度各子系统的发展水平, 其计算公式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^9 \omega_i X'_{it} \quad (11)$$

$$g(y) = \sum_{j=1}^9 \omega_j Y'_{jt} \quad (12)$$

$$h(z) = \sum_{k=1}^9 \omega_k Z'_{kt} \quad (13)$$

式中: t 为年份; $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ 分别为水资源、能源与粮食各指标的权重; $X'_{it}, Y'_{jt}, Z'_{kt}$ 分别为各指标的标准化数值; $f(x), g(y), h(z)$ 分别为 t 年份水资源、能源与粮食各子系统的综合评价指数, 指数越高则发展水平较高, 指数越低则发展水平相对滞后。以此为基础, 即可计算 W-E-F 系统的耦合协调度。

4 结果分析

4.1 系统耦合结果分析

本文利用以上公式, 计算得出江苏省水资源、能源、粮食系统的综合评价指数 T 、耦合度 C 、耦合协调度 D , 结果见表 3。

表 3 江苏省 W-E-F 的耦合度和耦合协调度对比关系

年份	水资源子系统 $f(x)$	能源子系统 $g(y)$	粮食子系统 $h(z)$	综合评价 指数 T	耦合度 C	耦合协调度 D	耦合程度	耦合协 调类型
2000	0.333	0.505	0.354	0.397	0.983	0.625	高水平耦合	初级协调
2001	0.283	0.522	0.334	0.380	0.966	0.606	高水平耦合	初级协调
2002	0.358	0.497	0.204	0.353	0.938	0.575	高水平耦合	勉强协调
2003	0.594	0.487	0.104	0.395	0.788	0.558	磨合阶段	勉强协调
2004	0.422	0.462	0.395	0.426	0.998	0.652	高水平耦合	初级协调
2005	0.463	0.493	0.426	0.460	0.998	0.678	高水平耦合	初级协调
2006	0.428	0.491	0.531	0.483	0.996	0.694	高水平耦合	初级协调
2007	0.559	0.525	0.526	0.537	1.000	0.732	高水平耦合	中级协调
2008	0.496	0.514	0.645	0.552	0.993	0.740	高水平耦合	中级协调
2009	0.424	0.484	0.722	0.543	0.974	0.727	高水平耦合	中级协调
2010	0.444	0.527	0.722	0.564	0.980	0.743	高水平耦合	中级协调
2011	0.437	0.497	0.773	0.569	0.969	0.743	高水平耦合	中级协调
2012	0.435	0.541	0.818	0.598	0.966	0.760	高水平耦合	中级协调
2013	0.370	0.534	0.905	0.603	0.934	0.751	高水平耦合	中级协调
2014	0.388	0.536	0.932	0.619	0.935	0.761	高水平耦合	中级协调
2015	0.453	0.515	0.969	0.646	0.943	0.781	高水平耦合	中级协调

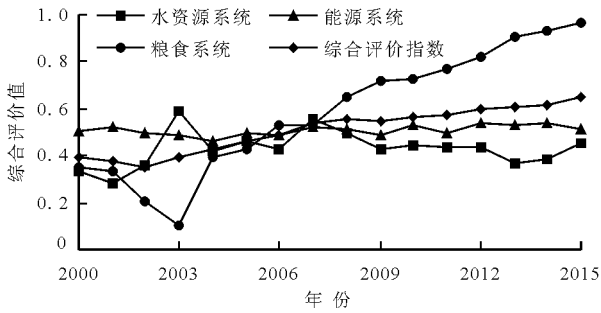


图1 区域W-E-F系统综合评价指数

由图1可以看出,2000-2015年江苏省W-E-F综合评价指数的变化趋势分为两个阶段,2000-2002年处于下降阶段,2003-2015年处于上升阶段,主要由于粮食子系统发展速度较快,其综合评价指数上升幅度大。

其中,水资源子系统综合评价指数在0.283~0.559之间波动,受降雨量的影响较大,且南水北调东线工程于2012年全线开通后,江苏省作为调水工程的水源地,区域水资源系统受到显著影响,另外农业用水量占总用水量比例逐年下降,但依然占最大的比例,工业用水量逐年上升,生态用水量没有发生明显变化,水资源子系统发展水平不高且波动较大,但已趋向于稳定;能源子系统综合评价指数随时间变化不大,基本保持在0.5上下,其原因是江苏省作为能源消耗大省和能源储备小省,能源主要依赖于进口,另外三大产业的能源消费结构相对比较稳定;粮食子系统综合评价指数呈明显上升趋势,但在2000-2003年降幅较大,2003年降到最低0.1041,主要由于全国性农业结构大调整,区域粮食种植面积连续多年减少,2003年又遭遇严重的自然灾害,造成粮食减产。2004年江苏省先后实施“一降三补”和“一免三补”政策,2006年全国取消农业税,农民种植粮食的积极性大幅提高,因此粮食产业得到较快的发展。

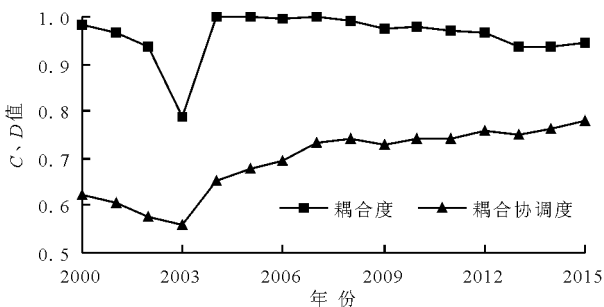


图2 江苏省水W-E-F系统耦合度及耦合协调度

W-E-F系统的耦合度分析:由图2可知:2000-2015年江苏省W-E-F系统耦合度在

0.788~1.000波动,整体耦合程度比较高,说明系统之间相互作用非常显著;但2000-2004年耦合度波动幅度比较大,主要由于粮食子系统受政策影响较大,2003年遭受自然灾害,2007年之后呈下降趋势,说明系统之间的相互作用开始减弱。

W-E-F系统的耦合协调度的变化趋势分为两个阶段,2000-2003年处于下降阶段,从初级协调降至勉强协调发展类;2004年之后,随着江苏省农业政策的调整,农民种植粮食积极性的提高,耦合协调度整体上呈上升趋势,从初级协调持续提升至中级协调发展类,系统耦合协调度总体上向较好的趋势发展。

4.2 系统耦合协调对比关系分析

为了进一步分析江苏省水资源、能源和粮食3个子系统之间的关系,即对各个子系统的综合值进行两两对比,利用下式计算各子系统间的对比系数:

$$l_{\text{水能}} = \frac{f(x)}{g(x)} \quad (14)$$

$$l_{\text{能粮}} = \frac{g(x)}{h(x)} \quad (15)$$

$$l_{\text{水粮}} = \frac{f(x)}{h(x)} \quad (16)$$

综合参考前人的研究成果^[19],按照子系统对比系数,划分子系统的关系类型: $l < 0.6$,极度受损型; $0.6 \leq l < 0.8$,严重受损型; $0.8 \leq l < 1.0$,较为短缺型; $1.0 \leq l < 1.5$,较为充足型; $1.5 \leq l$,特别充足型。

根据公式(14)~(16),本文分别计算区域水资源、能源和粮食3个子系统之间的两两对比系数,结果绘制见图3。

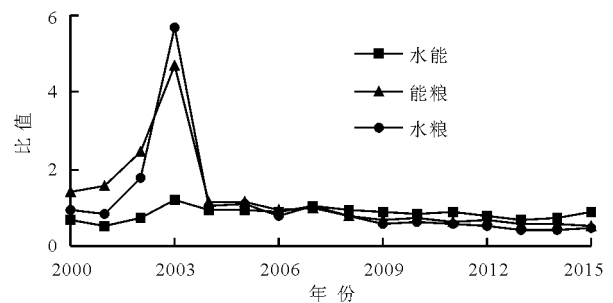


图3 江苏省水资源、能源、粮食各子系统对比系数

由江苏省水资源和能源的综合评价指数对比关系可知:2000-2002年, $l_{\text{水能}}$ 小于1,2001年达到最小值0.542,属于水资源极度受损型,主要由于时间段内区域能源开发利用是以过度消耗水资源为代价。2003年以后, $l_{\text{水能}}$ 在1.0左右波动,表明区域

水资源和能源发展相对均衡。

由江苏省能源和粮食的综合评价指数对比关系可知:2000-2007年, $l_{\text{能粮}}$ 大于1.0,表明时间段内能源供给比较充足。2007年之后, $l_{\text{能粮}}$ 小于1.0,表明时间段内的能源开发利用滞后于粮食生产。2013年下降至0.590,属于能源极度受损型,主要由于区域能源利用率比较低。

由江苏省水资源和粮食的综合指数对比关系可知:2000-2007年, $l_{\text{水粮}}$ 大于1.0,表明时间段内水资源供给比较充足,区域粮食相对水资源而言发展比较滞后,其中2003年 $l_{\text{水粮}}$ 达到最大值5.700,属于水资源特别充足型。随着经济的快速发展,对水资源的需求量不断增加。2007年之后, $l_{\text{水粮}}$ 小于1.0,表明时间段内的水资源较为短缺。2013年达到最低点0.409,属于水资源极度受损型,主要由于区域内的水资源利用比较粗放,利用率比较低。

4.3 W-E-F系统的耦合协调度灰色预测

灰色预测模型是灰色系统理论在处理时间序列短、统计数据少的小样本问题时精度比较高并且既可以进行短期预测,也可以进行长期预测,因此本文采用定量预测的灰色预测GM(1,1)模型,利用2000-2015年江苏省耦合协调度的数据预测2016-2020年的耦合协调度。

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (17)$$

式中: $X^{(1)}$ 为 N 个序列值累计生成的新序列; t 为第 N 个序列值; a 为发展系数; b 为灰作用量。

利用最小二乘法求解参数向量 $a = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$; B 为数据矩阵; Y 为数据向量,预测模型表达式为:

$$X^{(1)}(K+1) = [X^{(0)} - b/a]e^{-aK} + b/a \quad (18)$$

$$K = 1, 2, \dots, n$$

$$X^{(1)}(K+1) = X^{(1)}(K+1) - X^{(0)}(K) \quad (19)$$

$$K = 1, 2, \dots, n$$

后验差检验模型精度为 $T = S_2/S_1$; T 为后验差比值; S_2 为方差; S_1 为 $X^{(0)}$ 的方差。

依据GM(1,1)灰色预测模型,利用2000-2015年江苏省W-E-F系统的耦合协调度 D ,对2016-2020年W-E-F耦合协调度 D 进行预测,其预测结果见表4。

从表4可以看出,2016-2020年5年内江苏省W-E-F系统耦合协调度总体呈上升趋势,2016年后达到良好协调发展类。因此,江苏省在注重粮食安全

的同时,也需要注重水资源和能源的高效利用。

表4 江苏省W-E-F系统的耦合协调度 D 预测结果

年份	耦合协调度	协调类型
2016	0.8188	良好协调
2017	0.8354	良好协调
2018	0.8523	良好协调
2019	0.8695	良好协调
2020	0.8871	良好协调

5 结论与展望

本文构建了W-E-F系统耦合模型,对江苏省2000-2015年W-E-F系统的耦合协调关系及其时空演化特征进行了分析和解释。从分析结果看,耦合协调程度与实际情况相符。

(1)通过建立W-E-F系统耦合模型,构建系统耦合协调评价指标体系,采用熵值法对各子系统的评价指标赋权,实现了对江苏省2000-2015年W-E-F系统耦合协调度的定量评价和耦合协调演化特征的分析。

(2)江苏省W-E-F系统的综合评价指数整体上呈随时间上升趋势。受到降雨量和调水工程的影响,水资源子系统综合评价指数波动较大,但已趋向于稳定;能源子系统综合评价指数随时间变化不大,基本保持在0.5上下;粮食子系统综合评价指数呈明显上升趋势,其开发利用水平整体上高于水资源和能源。此外,虽然3个子系统之间具有相对独立性,且三者的发展并不总能保持一致,但3类指数的变动具有明确的相关性,通过提高各自的发展水平,有助于保持三者之间的协调发展。

(3)江苏省W-E-F系统的耦合程度基本保持高水平耦合,表明三者间存在着内在联系和相互作用。耦合协调度在时间分布上呈倒“U”型曲线,2000-2003年从初级协调降至勉强协调发展类,2004-2015年持续提升至中级协调发展类,并在未来5年内向良好协调发展类过渡。耦合协调度的阶段性和波动性特点是国家政策、经济发展和生态环境反馈综合作用的反映。因此在保持经济中高速发展的同时,有必要保证W-E-F系统的耦合协调发展,以促进区域可持续发展。

(4)江苏省水资源与能源的资源开发利用水平滞后于粮食生产,应由粗放型发展模式向节约型和集约化转变,调整产业结构,优化功能布局、提升新

型工业化进程。改变第二产业比重过大的现象,发展低能耗、绿色环保的产业。在粮食增产路径上,稳定面积,主攻单产;在区域分工上,控制苏南种植面积的减少、稳定苏中的生产潜力、释放苏北的增长能力。江苏省W-E-F系统的耦合协调程度有待进一步提升,保证三者的安全和协调发展对指导地区资源综合管理,促进资源可持续发展具有非常重要的社会意义。

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] 詹贻琛,吴岚,王艺璇. 中美均面临水、能源、粮食三者冲突[J]. 中国经济报告,2014,37(1):109-111.
- [3] Hoff H. Understanding the Nexus. Background paper for the Bonn2011 Nexus Conference: The Water Energy Security Nexus [R]. Stockholm University: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [4] Pittock Jamie, Karen Hussey, Samuel McGlennon. Australian Climate, Energy and Water Policies: conflicts and synergies[J]. Australian Geographer, 2013, 44(1):3-22.
- [5] Sahin O, Stewart R A, Richards R G. Addressing the water-energy-climate nexus conundrum: A systems approach [J]. Proceedings of International Congress on Environmental Modelling & Software, 2014, 101(24):7367-7373.
- [6] 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.
- [7] Li Guijun, Huang Daohan, Li Yulong. China's Input-Output Efficiency of Water-Energy-Food Nexus Based on the Data Envelopment Analysis (DEA) Model [J]. Sustainability, 2016, 8(9):1-16.
- [8] 马丁,陈文颖. 基于TIMES-Water模型的能源与水资源分析[C]//. 中国人口·资源与环境2014年专刊——2014中国可持续发展论坛. 2014:98-101.
- [9] 赵丽平,李邦熹,王雅鹏,等. 城镇化与粮食生产水土资源的时空耦合协调[J]. 经济地理, 2016, 36(10):145-152.
- [10] 于法稳. 粮食国际贸易对区域水资源可持续利用的影响[J]. 中国农村观察, 2010(4):54-62+96.
- [11] 李普林,陈菁,邓鹏,等. 江苏省城镇化进程水平与河湖水系连通耦合协调模式研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2):86-91.
- [12] 逯进,常虹,郭志仪. 中国省域能源、经济与环境耦合的演化机制研究[J]. 中国人口科学, 2016(3):23-33+126.
- [13] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系[J]. 热带地理, 1999, 19(2):171-177.
- [14] 姚成胜,滕毅,黄琳. 中国粮食安全评价指标体系构建及实证分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):1-10.
- [15] 冯巧. 区域水资源合理配置评价指标体系及评价模型研究[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [16] 陈平. 江苏省能源安全评价与发展对策[D]. 南京师范大学, 2014.
- [17] 袁立璜. 我国粮食安全预警研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [18] 柳玉梅,李九一. 水资源与粮食生产耦合关系研究现状与展望[J]. 节水灌溉, 2014(12):54-56+59.
- [19] 张卡,曲本亮,盖美. 区域经济发展与水土资源的耦合协调研究——以辽宁省为例[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(3):316-320+374.
- [20] 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, 25(1):93-99.