

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.05.01

中国水资源-能源-粮食耦合系统安全评价及空间关联分析

孙才志^{1,2}, 阎晓东¹

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029)

摘要:采用 Logistic 曲线、耦合协调度模型和探索性空间数据分析等方法,对中国水资源-能源-粮食耦合系统进行安全评价及空间关联分析。结果表明:①随着经济的发展,中国多数省份水资源安全指数、能源安全指数和粮食安全指数呈上升的趋势;②中国水资源-能源-粮食耦合系统安全系数在 2001—2015 年多数省份呈上升趋势,而几个资源大省如河北、河南、山东、陕西等地耦合安全程度呈现波动或者下降的趋势;③从全局空间分异来看,中国各地区水资源-能源-粮食耦合系统安全性存在着空间集聚现象;从局部空间分异来看,空间正相关模式(低低和高高集聚)所占比例很大,低低集聚主要集中在西部和中部欠发达地区,而高高集聚主要分布在东部地区,在空间分布上比较稳定。

关键词:水资源-能源-粮食耦合系统; Logistic 曲线; 耦合协调度模型; 探索性空间数据分析; 中国
中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2018)05-0001-08

Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in China

SUN Caizhi^{1,2}, YAN Xiaodong¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;
2. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Dalian 116029, China)

Abstract: A safety evaluation and spatial correlation analysis of China's water resources-energy-food nexus coupling system were made by using Logistic curve, coupling coordination model and exploratory spatial data analysis. The results show that 1) With the development of the economy, the index of water resources security, energy security and food security of most provinces in China are on the rise; 2) China's water resources-energy-food nexus coupling security coefficient was on the rise in most provinces of China from 2001 to 2015. However, the coupling security degree of several major resources provinces such as Hebei, Henan, Shandong and Shaanxi show the trend of fluctuation or decline; 3) From the aspect of global spatial difference, water-energy-food nexus coupling security in various regions of China presents characteristics of positive spatial autocorrelation; From the aspect of local spatial difference, the regions with LL (low-low) or HH (high-high) correlation pattern have a large percentage in the 30 provinces (regions). The regions with LL correlation pattern are mainly concentrated in the underdeveloped areas in the west and central regions of China, while regions with HH correlation pattern are mainly distributed in the eastern region of China. The spatial distribution in these years is steady.

Key words: water resources-energy-food nexus; Logistic curve; coupling coordinative degree model; exploratory spatial data analysis; China

基金项目: 国家社会科学重点基金(16AJY009)

作者简介: 孙才志(1970—), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源经济与海洋经济地理研究。E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

2011 年《全球风险报告》中第一次提出了“水资源-能源-粮食风险群”的概念,该风险与“宏观经济失衡”“非法经济”成为当今备受关注的三大重点风险^[1]。近年来,最突出的非传统安全问题就是水资源-能源-粮食安全。中国的耕地资源不足世界的 10%,而每年的粮食消费量占世界消费总量的 20%,是世界粮食贸易的 2 倍左右^[2];2015 年,中国原油、液化石油气等产品进口量高达 3.443 亿 t,同比增长了 7.4%,而石油产品的消费量同比增长 4.8%,达到 5.420 亿 t,石油净进口量占消费比例也提高到 2015 年的 63.5%^[3],为历史新高;2013 年 3 月调查数据显示,过去 60 年,全国有 23 000 条河流已经干涸。2016 年,全国耗水总量高达 3 192.9 亿 m³,而人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4 左右^[4],水资源的短缺严重影响了经济和社会的健康发展。因此,开展全国的水资源-能源-粮食耦合(water-energy-food Neuxs, W-E-F Neuxs)研究对促进资源可持续发展具有非常重要的现实意义。

目前关于水资源安全^[5-6]、能源安全^[7-8]和粮食安全^[9-10]已有了大量的研究成果,但是多集中于单一资源,而割裂了水资源、能源和粮食之间的联系,现有关于多资源耦合系统安全性研究并不多见,特别是关于 W-E-F Neuxs 系统研究更是寥寥无几,而对于 W-E-F Neuxs 系统的研究都是以个别省份作为研究对象^[1,11],然而中国地区间差异较大,因此有必要从空间视角对差异格局进行测度与分析。国外学者在 W-E-F Neuxs 系统方面的研究工作较为丰富,特别是在 2011 年的波恩会议^[12]和联合国粮农组织会议^[13]上,更是提出了关于 W-E-F Neuxs 和气候变化之间的联系,并引入经济社会发展等社会属性,丰富了 W-E-F Neuxs 的研究思路。

本文在传统安全评价方法基础上,利用 Logistic 曲线考虑 2001—2015 年中国各省的水资源、能源和粮食安全模型测度并引入耦合协调度模型^[14-16]对各省的耦合安全性进行量化分析,运用莫兰指数进行空间自相关检验,旨在为中国各省的水、能源、粮食持续稳定协调发展提供借鉴。

1 指标体系构建与数据来源

1.1 指标体系的构建

对水资源安全、能源安全和粮食安全做出评价是一个非常复杂而又庞大的命题。由于数据获取的限制,很难实现客观而又准确的评价。评价指标的选取和指标体系结构的把握非常重要,要从国情出发,做到科学性、系统性、全面性、真实性兼备。笔者根据水资源安全、能源安全和粮食安全的科学内涵,

参考相关的水资源安全评价文献^[17-18]、能源安全评价文献^[19-20]、粮食安全评价文献^[21-22],并咨询关于水资源、能源和粮食安全领域的专家,构建了中国水资源、能源、粮食安全综合评价指标体系(表 1)。

1.2 数据来源与说明

本文的研究对象为中国 30 个省、市、自治区(不含西藏、香港、澳门和台湾,以下简称“中国 30 省”)2001—2015 年 W-E-F Neuxs 安全状况,所使用的数据均来自于 2002—2016 年的《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》。部分缺失的数据由临近年份的拟合值或临近省份的近似值替代。

2 研究方法

2.1 逻辑斯蒂(Logistic)曲线模型

Logistic 曲线最早是 1837 年由德国数学生物学家 PF Verhust 提出的,描述的是事物增长趋势,其增长速度刚开始较快,然后较慢,当达到极限后,增速停止。Logistic 曲线广泛应用于生物学、医学、经济学和管理学^[23]及资源环境领域^[24-26],因为水资源安全、能源安全和粮食安全测试值并不是线性地反映出整体社会安全中各个方面和层次状态的水平,所以用式(1)计算中国 30 省的水资源安全指数、能源安全指数和粮食安全指数。

进行单因子评价,Logistic 曲线如图 1 所示。

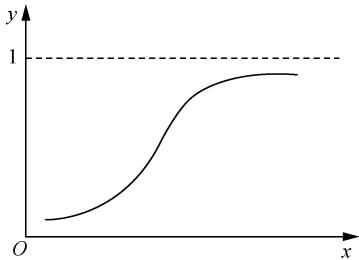


图 1 Logistic 曲线

Logistic 曲线函数表达式:

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-ax_i}} \tag{1}$$

式中: P_i 为第 i 项指标的安全评价值; x_i 为第 i 项指标测度值; a 、 b 均为常数。

水资源、能源和粮食安全指数综合评价值 P 为

$$P = \sum_{i=1}^n (W_i P_i) \tag{2}$$

采用变异系数法确定各指标的权重 W_i :

$$W_i = V_i / \sum_{i=1}^n V_i \tag{3}$$

其中

$$V_i = \sigma_i / \bar{x}_i$$

式中 σ_i 、 $\bar{x}_i$ 、 V_i 分别为第 i 项指标的标准差、平均值和变异系数。

表 1 区域水资源安全、能源安全和粮食安全复合系统综合评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标	指标计算方法或来源	指标性质
水资源安全指数	经济社会发展	工业万元产值用水	工业用水量与工业总产值之比	负向
		农田有效灌溉面积比例	正常灌溉的耕地面积与地区耕地总面积之比	正向
		单位 GDP 用水总量	用水总量与生产总值之比	负向
	人类生活	生活用水比例	生活用水与用水总量之比	正向
		自来水普及率	统计数据	正向
	水生态	城市污水处理率	统计数据	正向
		农作物受灾面积	统计数据	负向
		工业废水排放	统计数据	负向
	水分布	产水模数	水资源总量与地区总面积之比	正向
		产水系数	水资源总量与年降水总量之比	正向
能源安全指数	可获得	人均能源生产	能源生产总量与人口总量之比	正向
		生产多元化指数	$\sqrt{\sum_i p_i^2}$ (p_i 为 i 能源所占比重)	负向
		自给率	能源生产总量/能源消费总量	正向
	可支付	燃料消费价格指数	统计数据	负向
	效 率	能源消耗强度	能源消费总量与地区生产总值之比	负向
		工业废气排放	统计数据	负向
	生物质能安全	生活垃圾无害化处理率	统计数据	正向
		生活污水处理率	统计数据	正向
		农作物播种面积	统计数据	正向
		森林覆盖率	统计数据	正向
粮食安全指数	生产安全	粮食播种面积比例	粮食播种面积与地区总面积之比	正向
		粮食单产	粮食总产量与粮食播种面积之比	正向
		单位面积机械动力	机械总动力与农作物播种面积之比	正向
		化肥负荷	化肥使用总量与农作物总播种面积之比	负向
	消费安全	城镇恩格尔系数	统计数据	负向
		农村恩格尔系数	统计数据	负向
		人口自然增长率	统计数据	负向
		人均食品消费支出	统计数据	正向
	流通安全	粮食流通成本变动	粮食零售价格指数与粮食生产价格指数之差	负向
		农民人均纯收入	统计数据	正向

2.2 耦合协调度模型

“协调”是指两个或两个以上子系统相互配合、协调发展、良性循环的关系。根据中国各省的实际情况,基于杨士弘对协调发展度模型的研究,建立 n 个子系统评价模型^[27]如下:

$$C = \left\{ \left[\frac{f_1(x)f_2(x)\cdots f_n(x)}{f_1(x) + f_2(x) + \cdots + f_n(x)} \right]^n \right\} \quad (4)$$

式中: C 为耦合度; n 为子系统个数, 且 $n \geq 2$; $f_1(x)$ $f_2(x)$ 、 $\cdots$ $f_n(x)$ 分别为 n 个子系统综合评价价值。耦合度的大小由 $f_i(x)$ 的大小决定。由于 $f_i(x) \in [0,1]$, 因此 $C \in [0,1]$ 。当 $C = 0$ 时, 说明系统的耦合度最小, 系统之间处于无关状态; 当 $C = 1$ 时, 说明系统的耦合度最大, 系统之间达到良性耦合状态。

但是, 耦合度的值只能代表各子系统之间的一种强弱关系, 却不能反映出协调发展水平的高低, 所以, 本文引入耦合协调度模型^[2], 以便分析求解几个系统的耦合协调发展的程度:

$$D = \sqrt{CT} \quad (5)$$

其中 $T = \alpha_1 f_1(x) + \alpha_2 f_2(x) + \cdots + \alpha_n f_n(x)$ 式中: D 为耦合安全系数; T 为子系统综合评价指数; α_1 、 α_2 、 $\cdots$ 、 α_n 为待定系数。

2.3 全局莫兰指数和局部莫兰指数

全局莫兰指数 I 是表征研究区域空间自相关性的一个常用且有效的指标^[29], 其计算公式为

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} z_i z_j}{\left(\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} \right)} \quad (6)$$

其中 $z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$ $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

式中: I 为全局莫兰指数; n 为观察值的数目; x_i 为在位置 i 的观察值; z_i 是 x_i 的标准化变换。根据假定的空间数据分布可以计算全局莫兰指数的期望值和期望方差。

全局莫兰指数的取值范围为 $[-1,0)$ 、 0 和 $(0,1]$, 其代表的含义分别为空间负相关、空间不相关和空间正相关。相比于全局莫兰指数, 局部莫兰指数 I_i 用来验证研究对象是否存在异值集聚现象^[29],

其计算公式为

$$I_i = z_i \sum_{j \neq i}^n W_{ij} z_j \tag{7}$$

若计算所得的局部莫兰指数为正,说明同类型的属性值(高高集聚或低低集聚)相邻近;若局部莫兰指数为负,说明不同类型的属性值(高低集聚或低高集聚)相邻近。指数值的绝对值越大,说明邻近效果越明显。本文用 Z 统计量来检验局部莫兰指数的显著性。

本文运用全局莫兰指数,对中国 30 省 W-E-F Neuxs 耦合安全系数的空间关联程度进行描述,运用局部莫兰指数对 W-E-F Neuxs 耦合安全系数的空间聚集特征进行描述,以便发现其内在联系与发展规律。

3 结果及分析

3.1 水、粮食、能源安全指数测度

3.1.1 Logistic 曲线模型数据处理

本文采用待定系数法确定 Logistic 指数公式中

的参数 a 和 b :当 $x_i = 0.01$ 时, P_i 的值近似取 0.001;当 $x_i = 0.99$ 时, P_i 的值近似取 0.999,由待定系数法确定 a 和 b 的值分别为 4.595 和 9.19,所以得到的 Logistic 曲线公式为

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{(4.595 - 9.19x_i)}} \tag{8}$$

由于各指标的单位不同,所以要对原始指标数据进行无量纲化处理,对指标值越大越有利和越小越有利的原始指标数据分别按式(9)和(10)作无量纲化处理:

$$x_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{9}$$

$$x_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{10}$$

式中: x_i 为原始指标数据进行无量纲化处理后的指标值; X_i 为样本各指标的实际值; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为样本的最大值、最小值。

将表 1 中各指标无量纲化处理后的数据代入式(8)和式(2),计算得到 30 个省 3 个系统的安全评价得分,表 2 列出了 2001 年、2005 年、2008 年、2011 年和 2015 年 3 个系统的安全指数。

表 2 中国 30 省水资源、能源和粮食安全指数测度结果

地 区	水资源安全指数					能源安全指数					粮食安全指数				
	2001 年	2005 年	2008 年	2011 年	2015 年	2001 年	2005 年	2008 年	2011 年	2015 年	2001 年	2005 年	2008 年	2011 年	2015 年
北 京	0.629	0.374	0.562	0.669	0.403	0.474	0.728	0.407	0.483	0.710	0.438	0.515	0.738	0.453	0.598
天 津	0.607	0.550	0.562	0.607	0.671	0.483	0.630	0.612	0.514	0.631	0.646	0.561	0.618	0.647	0.694
河 北	0.532	0.426	0.444	0.543	0.393	0.474	0.560	0.365	0.472	0.561	0.311	0.487	0.579	0.323	0.551
山 西	0.541	0.377	0.187	0.572	0.537	0.345	0.574	0.570	0.359	0.589	0.564	0.451	0.587	0.579	0.429
内蒙古	0.477	0.279	0.263	0.560	0.271	0.335	0.560	0.295	0.360	0.573	0.340	0.367	0.560	0.378	0.451
辽 宁	0.534	0.434	0.359	0.562	0.478	0.402	0.577	0.433	0.430	0.598	0.512	0.451	0.577	0.501	0.538
吉 林	0.518	0.440	0.250	0.585	0.446	0.409	0.579	0.441	0.424	0.596	0.468	0.456	0.593	0.500	0.495
黑龙江	0.400	0.619	0.260	0.544	0.610	0.383	0.552	0.601	0.464	0.575	0.602	0.474	0.604	0.588	0.502
上 海	0.590	0.494	0.352	0.609	0.493	0.482	0.673	0.472	0.506	0.656	0.458	0.571	0.799	0.454	0.608
江 苏	0.421	0.500	0.445	0.479	0.499	0.501	0.485	0.492	0.544	0.513	0.408	0.580	0.540	0.395	0.689
浙 江	0.670	0.511	0.454	0.679	0.499	0.455	0.644	0.499	0.492	0.618	0.493	0.551	0.767	0.489	0.594
安 徽	0.493	0.469	0.348	0.550	0.499	0.422	0.639	0.471	0.460	0.620	0.473	0.427	0.695	0.489	0.510
福 建	0.768	0.493	0.263	0.732	0.494	0.282	0.688	0.501	0.287	0.588	0.502	0.293	0.804	0.505	0.388
江 西	0.635	0.504	0.268	0.663	0.495	0.297	0.703	0.499	0.334	0.682	0.499	0.380	0.780	0.507	0.393
山 东	0.491	0.532	0.445	0.532	0.503	0.523	0.506	0.495	0.561	0.491	0.443	0.564	0.492	0.468	0.632
河 南	0.528	0.501	0.364	0.567	0.503	0.475	0.556	0.499	0.517	0.544	0.442	0.498	0.559	0.449	0.530
湖 北	0.469	0.429	0.390	0.542	0.433	0.340	0.546	0.424	0.385	0.573	0.462	0.314	0.634	0.497	0.411
湖 南	0.608	0.485	0.297	0.600	0.483	0.386	0.607	0.470	0.385	0.644	0.521	0.375	0.769	0.541	0.458
广 东	0.687	0.482	0.202	0.598	0.460	0.279	0.655	0.477	0.284	0.643	0.466	0.344	0.697	0.480	0.425
广 西	0.578	0.427	0.174	0.580	0.435	0.271	0.611	0.444	0.174	0.620	0.474	0.240	0.794	0.514	0.293
海 南	0.669	0.431	0.242	0.752	0.463	0.169	0.758	0.494	0.205	0.806	0.522	0.185	0.642	0.529	0.297
重 庆	0.560	0.372	0.341	0.633	0.375	0.425	0.718	0.393	0.399	0.722	0.457	0.432	0.656	0.479	0.486
四 川	0.502	0.320	0.288	0.636	0.348	0.365	0.618	0.375	0.396	0.623	0.389	0.384	0.648	0.432	0.447
贵 州	0.568	0.235	0.298	0.552	0.335	0.277	0.628	0.325	0.289	0.605	0.398	0.278	0.677	0.427	0.349
云 南	0.654	0.365	0.272	0.610	0.411	0.245	0.684	0.422	0.268	0.643	0.440	0.279	0.628	0.447	0.309
陕 西	0.544	0.457	0.314	0.587	0.490	0.345	0.584	0.495	0.298	0.616	0.658	0.295	0.598	0.762	0.298
甘 肃	0.488	0.302	0.221	0.542	0.323	0.304	0.571	0.326	0.294	0.586	0.343	0.310	0.583	0.378	0.351
青 海	0.477	0.351	0.200	0.530	0.290	0.288	0.568	0.346	0.312	0.589	0.382	0.330	0.590	0.335	0.325
宁 夏	0.328	0.225	0.148	0.520	0.263	0.260	0.573	0.292	0.290	0.581	0.336	0.265	0.586	0.473	0.366
新 疆	0.402	0.439	0.148	0.489	0.504	0.328	0.566	0.537	0.222	0.591	0.573	0.188	0.646	0.545	0.236

3.1.2 基于耦合协调度的整体安全测度

由于本文度量的是水资源安全、能源安全和粮食安全的整体耦合状况,所以取 $n = 3$ 。随着时间的推移,面对着日益减少的资源,在不能影响经济增长和破坏环境的条件下,确保三方面协调发展,所以取 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1/3$,计算所得的耦合安全系数见表 3。

根据计算得到的耦合安全系数的值,将其划分以下 4 个区间^[30]:当 $0 < D \leq 0.4$ 时,系统处于低度耦合状态;当 $0.4 < D \leq 0.6$ 时,系统处于中度耦合状态;当 $0.6 < D \leq 0.8$ 时,系统处于高度耦合状态;当 $D > 0.8$ 时,系统处于极度耦合状态。

为了更加全面直观地反映耦合发展程度,对表 1 中 30 个省的耦合安全系数组合分类。由于数据太多,不能直观反映变化趋势,选取 2001 年、2008 年和 2015 年的数据进行分析,30 省在这 3 个年份

中出现了低度耦合、中度耦合、高度耦合和极度耦合 4 种耦合类型。①3 个年份属于低度耦合的省份数分别为 4、2 和 0 个,属于中度耦合省份数分别为 15、12 和 8 个,属于高度耦合的省份数分别为 11、16 和 21 个,属于极度耦合的省份数分别为 0、0 和 1 个。②低度耦合和中度耦合的省份逐年减少,高度耦合呈逐年增加的趋势,而极度耦合相对低度、中度和高度耦合出现的次数较少,这表明随着时间的推移,人们越来越重视水资源-能源-粮食安全协调发展的问题,耦合安全性越来越高。③多数省份的耦合安全系数随着时间的推移逐渐变大,说明在出现水资源短缺、能源衰竭、耕地面积少等现象的同时,政府也正在着手解决此问题,如提高水资源效率,寻找替代能源,提高粮食单产等。部分省份如北京、天津、上海等地,虽然人口增长速率过快,但是经过一些相关政策的实施,虽然面对诸多的压力,耦合安全

表 3 中国 30 省 W-E-F Neuxs 系统耦合安全系数

地 区	D				
	2001 年	2005 年	2008 年	2011 年	2015 年
北 京	0.6343 **	0.6477 **	0.6396 **	0.6787 **	0.7065 **
天 津	0.7536 **	0.7350 **	0.7516 **	0.7763 **	0.8039 *
河 北	0.6693 **	0.6594 **	0.6375 **	0.5884 ***	0.6005 **
山 西	0.4042 ***	0.6254 **	0.6390 **	0.7098 **	0.6968 **
内蒙古	0.4914 ***	0.5027 ***	0.5391 ***	0.5766 ***	0.6421 **
辽 宁	0.6267 **	0.6652 **	0.6631 **	0.7002 **	0.7284 **
吉 林	0.5177 ***	0.6568 **	0.6638 **	0.6885 **	0.7162 **
黑龙江	0.4939 ***	0.6580 **	0.7155 **	0.7246 **	0.7404 **
上 海	0.6258 **	0.7084 **	0.7027 **	0.7140 **	0.6993 **
江 苏	0.6670 **	0.7014 **	0.7076 **	0.6752 **	0.6557 **
浙 江	0.6943 **	0.6897 **	0.7129 **	0.7302 **	0.7269 **
安 徽	0.6279 **	0.6820 **	0.6870 **	0.6721 **	0.7097 **
福 建	0.4723 ***	0.5098 ***	0.5312 ***	0.5637 ***	0.6110 **
江 西	0.5196 ***	0.5501 ***	0.5840 ***	0.6341 **	0.6230 **
山 东	0.6913 **	0.7197 **	0.7166 **	0.6911 **	0.7004 **
河 南	0.6427 **	0.7088 **	0.7208 **	0.6920 **	0.7024 **
湖 北	0.6470 **	0.6105 **	0.6398 **	0.5864 ***	0.6678 **
湖 南	0.5629 ***	0.6506 **	0.6452 **	0.6426 **	0.6894 **
广 东	0.3969 ****	0.5383 ***	0.5321 ***	0.6013 **	0.6593 **
广 西	0.3731 ****	0.5292 ***	0.3641 ****	0.4789 ***	0.5102 ***
海 南	0.4610 ***	0.3157 ****	0.3817 ****	0.3347 ****	0.5593 ***
重 庆	0.5837 ***	0.6156 **	0.5883 ***	0.6470 **	0.7001 **
四 川	0.5315 ***	0.5612 ***	0.6054 **	0.6054 **	0.6593 **
贵 州	0.4379 ***	0.5113 ***	0.4872 ***	0.5209 ***	0.5825 ***
云 南	0.4823 ***	0.4802 ***	0.4893 ***	0.5213 ***	0.5639 ***
陕 西	0.5908 ***	0.6194 **	0.5693 ***	0.5530 ***	0.5358 ***
甘 肃	0.4560 ***	0.5325 ***	0.5158 ***	0.5351 ***	0.5880 ***
青 海	0.4439 ***	0.5001 ***	0.5444 ***	0.5718 ***	0.5407 ***
宁 夏	0.3835 ****	0.4584 ***	0.4868 ***	0.4884 ***	0.6345 **
新 疆	0.3583 ****	0.6117 **	0.4613 ***	0.3903 ****	0.4672 ***

注: * 表示极度耦合; ** 表示高度耦合; *** 表示中度耦合; **** 表示低度耦合。

性并没有下降,如山东、河北、河南和陕西等几个资源大省,虽然自身的产量很大,但是供需严重不平衡,导致的直接现象就是耦合安全系数下降或者是增减交替。

3.2 W-E-F Neuxs 系统安全性的空间格局分析

运用 Geoda 软件和 matlab 方法对中国 30 省 2001—2015 年 W-E-F Neuxs 系统安全程度进行全局空间相关性分析,表 4 给出了 2001—2015 年的 3 个指标层耦合安全系数的全局自相关莫兰指数的值。

表 4 中国 30 省三大安全耦合安全系数全局自相关莫兰指数

年份	<i>I</i>	<i>Z</i> 统计量	<i>P</i>
2001	0.5443	4.6629	0.0000
2002	0.5715	4.8817	0.0000
2003	0.4807	4.1509	0.0000
2004	0.5136	4.4171	0.0000
2005	0.4250	3.7053	0.0001
2006	0.4600	3.9843	0.0000
2007	0.4910	4.2372	0.0000
2008	0.5526	4.7315	0.0000
2009	0.5683	4.8574	0.0000
2010	0.3606	3.1877	0.0007
2011	0.3574	3.1598	0.0008
2012	0.3818	3.3549	0.0004
2013	0.3300	2.9388	0.0016
2014	0.3574	3.1582	0.0008
2015	0.2961	2.6642	0.0039

由表 4 可以看出,中国 30 省的水资源、能源和粮食的耦合安全性在 5% 显著水平下,具有显著的集聚现象。这说明了中国 30 省的水资源、能源和粮食的耦合安全性在空间分布上具有明显的正相关关系,中国 30 省的水资源、能源和粮食耦合安全系数在空间分布上出现了集聚现象,较高的耦合安全系数地区相邻,较低的耦合安全系数地区相邻。因此,在进行中国 30 省水资源、能源和粮食耦合安全性研究中,要从客观的角度分析空间上的差异,不能忽视它,运用空间计量模型对中国各地区水资源、能源和粮食耦合安全的研究成为必然。

下面通过局部莫兰指数研究中国 30 省水资源、能源和粮食耦合协调性是否存在局部集聚现象。图 2 为 2001 年、2005 年、2008 年、2011 年和 2015 年中国 30 省耦合安全系数的 Lisa 集聚地图。

由图 2 可以看出,高高集聚区主要集中在东部地区;低低集聚地区主要在西部和中部地区,由于经济发展缓慢,虽然地大物博,但是获取效率低;低高集聚区和高低集聚区介于高高集聚区和低低集聚区

之间,这些省市地区相对于高高集聚和低低集聚地区出现的次数较少。

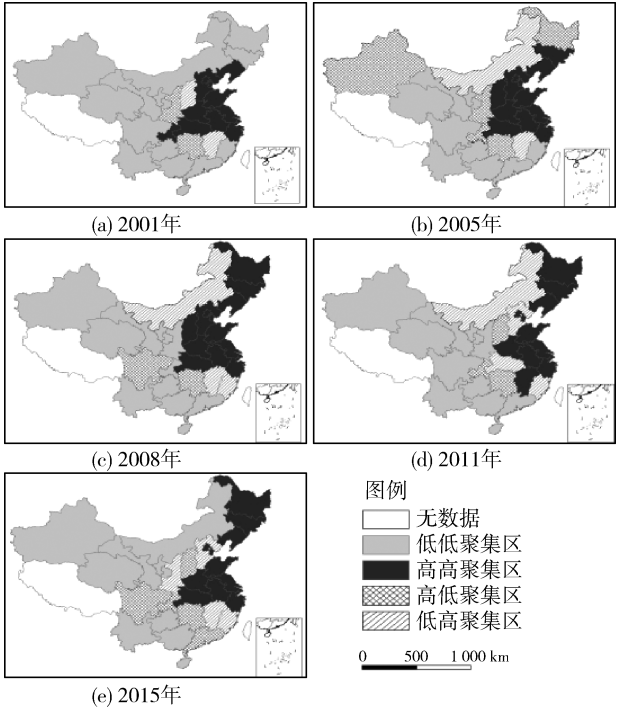


图 2 中国 30 省耦合安全系数空间分布

4 结论

a. 近年来随着经济社会的发展,多数城市的水资源、能源、粮食安全有缓慢提高,其结果符合中国 30 省的实际情况。

b. 中国 W-E-F Neuxs 系统耦合协调发展程度总体呈上升的趋势,个别资源大省除外。这与资源进出口有关,导致的直接结果就是资源消耗量过大,影响当地其他产业的发展。

c. 从耦合安全系数空间关联的角度来看,中国的 W-E-F Neuxs 系统安全性分布在时间上连续,在空间上也有明显的集聚现象。随着时间的推移,高高集聚地区(主要在东部地区)和低低集聚地区(分布在中部和西部偏远地区)相对稳定,而低高和高低集聚地区相对来说较少,而且这些地区空间集聚现象不稳定。

参考文献:

[1] 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. (LI Guijun, LI Yulong, JIA Xiaojing, et al. Establishment and simulation study of system dynamic model on sustainable development of water-energy-food nexus in Beijing [J]. Management Review, 2016, 28 (10): 11-26. (in Chinese))

[2] 蒋辉,张康洁. 粮食供给侧结构性改革的当前形势与政

- 策选择[J]. 农业经济问题, 2016(10): 8-17, 110. (JIANG Hui, ZHANG Kangjie. The current situation and policy choice of structural reform of food supply side[J]. Issues in Agricultural Economy, 2016(10): 8-17, 110. (in Chinese))
- [3] 田春荣. 2015 年中国石油进出口状况分析[J]. 国际石油经济, 2016, 24(3): 44-53. (TIAN Chunrong. Analysis of China's oil import and export situation in 2015[J]. International Petroleum Economics, 2016, 24(3): 44-53. (in Chinese))
- [4] 陈家琦, 王浩, 杨小柳. 水资源学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [5] 杜梦娇, 田桂良, 吴茜, 等. 基于系统动力学的江苏水资源系统安全仿真与控制[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 67-73. (DU Mengjiao, TIAN Guiliang, WU Qian, et al. Simulation and control of water resources system security in Jiangsu Province based on system dynamics[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 67-73. (in Chinese))
- [6] 郑德凤, 张雨, 魏秋蕊, 等. 基于可持续能力和协调状态的水资源系统评价方法探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 24-32. (ZHENG Defeng, ZHANG Yu, WEI Qiurui, et al. Study of method for evaluation of water resources system based on sustainability and coordinated condition[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 24-32.
- [7] 胡志丁, 葛岳静, 徐建伟, 等. 尺度政治视角下的地缘能源安全评价方法及应用[J]. 地理研究, 2014, 33(5): 853-862. (HU Zhiding, GE Yuejing, XU Jianwei, et al. Geopolitical energy security evaluation method and its application based on politics of scale[J]. Geographical Research, 2014, 33(5): 853-862. (in Chinese))
- [8] 刘立涛, 沈镭, 高天明, 等. 中国能源安全评价及时空演进特征[J]. 地理学报, 2012, 67(12): 1634-1644. (LIU Litao, SHEN Lei, GAO Tianming, et al. Evaluation and spatial-temporal evolution of energy security in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(12): 1634-1644. (in Chinese))
- [9] 徐建玲, 查婷俊. 基于城镇化视角的省域粮食安全研究: 以江苏省为例[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2353-2360. (XU Jianling, ZHA Tingjun. Provincial food security from the perspective of urbanization in Jiangsu Province[J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2353-2360. (in Chinese))
- [10] 彭世彰, 艾丽坤. 提高灌溉水利用系数, 保障国家粮食安全与水安全[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 79-82, 87 (PENG Shizhang, AI Likun. Improving irrigation water use coefficient and ensuring national food and water safety[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 79-82, 87 (in Chinese))
- [11] 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, 5: 1-10. (PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, WANG Yu, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2017, 5: 1-10. (in Chinese))
- [12] HOFF H. Understanding the nexus background paper for the Bonn 2011 conference: the water energy and food security nexus[R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [13] Food and Agriculture Organization of United Nations. The water-energy-food nexus: a new approach in support of food security and sustainable agriculture[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations, 2014.
- [14] ILLINGWORTH V. The penguin dictionary of physics[M]. Beijing: Foreign Language Press, 1996: 92-93.
- [15] 马海良, 李珊珊, 侯雅如. 河北省城镇化与水资源系统的耦合协调及预测[J]. 水利经济, 2017, 35(3): 37-41. (MA Hailiang, LI Shanshan, HOU Yaru. Coupling coordination and forecast of urbanization and water resource system in Hebei Province[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(3): 37-41, (in Chinese))
- [16] 耿芳, 董增川, 管西柯. 基于耦合协调度模型的南京市用水效率与经济发展关系[J]. 水利经济, 2017, 35(1): 21-25. (GENG Fang, DONG Zengchuan, GUAN Xike. Dynamic relationship between water use efficiency and economic development in Nanjing based on coupling coordination model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(1): 21-25. (in Chinese))
- [17] LECK H, CONWAY D. Tracing the water-energy-food nexus: description, theory and practice[J]. Geography Compass, 2015, 9(8): 445-460.
- [18] BIGAS H. Water security & the global water agenda: a UN-water analytical brief[M]. New York: United Nations University(UNU), 2013.
- [19] 薛静静, 沈镭, 刘立涛, 等. 中国能源供给安全综合评价及障碍因素分析[J]. 地理研究, 2014, 33(5): 842-852. (XUE Jingjing, SHEN Lei, LIU Litao, et al. Energy supply security assessment of China and the influence in factors based on set pair analysis[J]. Geographical Research, 2014, 33(5): 842-852. (in Chinese))
- [20] 薛静静, 沈镭, 彭保发, 等. 中国能源生产和消费大省的能源供给安全综合评价及优化: 以陕西省和广东省为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1186-1197. (XUE Jingjing, SHEN Lei, PENG Baofa, et al. Assessment and optimization on energy supply security of high energy producing and high energy consumption provinces in China: cases study of Shaanxi and Guangdong Provinces

[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30 (10) : 1186-1197. (in Chinese))

[21] 杨磊. 我国粮食安全风险分析及粮食安全评价指标体系研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35 (6) : 696-702. (YANG Lei. Study on the risk analysis and the risk assessment index system of grain security in China[J]. Research of Argicultural Modernization, 2014, 35 (6) : 696-702. (in Chinese))

[22] 张彩霞, 吕伟彩. 区域粮食安全预警评价指标体系研究[J]. 全国商情, 2010, 20: 13-15. (ZHANG Caixia, LYU Weicai. Study on regional food security early warning evaluation index system[J]. China Circulation Economy, 2010, 20: 13-15. (in Chinese))

[23] 孙冰. 同一企业内软件产品间共生模式的模型建构与实证研究: 基于质参量兼容的扩展 Logistic 模型[J]. 管理评论, 2017, 29 (5) : 153-164. (SUN Bing. Model construction and empirical analysis of the symbiosis pattern among software products of the same firm; an extended logistic model based on quality parameter compatibility[J]. Management Review, 2017, 29 (5) : 153-164. (in Chinese))

[24] 于雷, 吴舜泽, 马寅, 等. 基于二分类 Logistic 回归模型的 COD 总量减排措施的绩效分离评估[J]. 水资源保护, 2013, 29 (6) : 75-79, 84. (YU Lei, WU Shunze, MA Yin, et al. Performance division of COD total emission reduction using binary logistic regression model[J]. Water Resources Protection, 2013, 29 (6) : 75-79, 84. (in Chinese))

[25] 吴丹, 吴凤平, 陈艳萍. 基于二级修正的区域水资源需求量预测模型[J]. 水资源保护, 2010, 26 (3) : 1-4. (WU Dan, WU Fengping, CHEN Yanping. Regional water demand forecast based on second-order modifying model [J]. Water Resources Protection, 2010, 26 (3) : 1-4. (in Chinese))

[26] 赵文娟, 杨世龙, 王潇. 基于 Logistic 回归模型的生计资本与生计策略研究: 以云南新平县干热河谷傣族地区为例[J]. 资源科学, 2016, 38 (1) : 136-143. (ZHAO Wenjuan, YANG Shilong, WANG Xiao. The relationship between livelihood capital and livelihood strategy based on logistic regression model in Xinning County of Yuanjiang dry-hot valley[J]. Resources Science, 2016, 38 (1) : 136-143. (in Chinese))

[27] 杨士弘. 城市生态环境学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[28] 关伟, 刘勇凤. 辽宁沿海经济带经济与环境协调发展度的时空演变[J]. 地理研究, 2012, 1 (11) : 2044-2054. (GUAN Wei, LIU Yongfeng. The analysis of spatiotemporal evolution of economic and environmental coordination development degree in Liaoning coastal economic belt[J]. Geographical Research, 2012, 1 (11) : 2044-2054. (in Chinese))

[29] 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[J]. 自然资源学报, 2017, 32 (5) : 800-813. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LAI Wenli, et al. Spatial analysis and coordinated development decoupling analysis of energy-consumption water in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32 (5) : 800-813. (in Chinese))

[30] 马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析[J]. 地理学报, 2012, 67 (10) : 1299-1307. (MA Li, JIN Fengjun, LIU Yi. Spatial pattern and industrial sector structure analysis on the coupling and coordinating degree of regional economic development and environmental pollution in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67 (10) : 1299-1307. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-01-23 编辑: 彭桃英)

· 信息播报 ·

《水资源保护》入编北大中文核心期刊

《水资源保护》入编《中文核心期刊要目总览》2017 年版(即第 8 版) 之“环境科学”类核心期刊!

这是 2008 年《水资源保护》从《中文核心期刊要目总览》出来后再次荣耀回归。10 年, 我们卧薪尝胆, 励精图治, 找问题, 找差距, 踏踏实实, 一心向上。尤其近 3 年来, 设立特色栏目, 结合前沿热点问题, 开展专题征稿、向名家约稿, 办专辑、做专栏, 同时承办大型学术会议, 打造学术交流平台, 凝聚专家, 让更多的专家学者了解并帮助我们一起办刊。功夫不负有心人, 在广大专家、编委、作者、读者的大力帮助下, 《水资源保护》终于王者归来!

太多的感谢化作我们继续前行的动力, 请更多的专家学者关注、支持我们, 我们一定继续努力, 不负众望, 让《水资源保护》更上一个台阶!

(本刊编辑部 供稿)