

山西省水-能源-粮食系统耦合协调 时空变化特征研究

王凯, 李景保, 李欢

(湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081)

摘要:为探究山西省水-能源-粮食(W-E-F)系统耦合协调程度的时空变化特征,构建W-E-F系统评价指标体系,采用综合评价指数和耦合协调模型,测算全省及各地市2008-2017年W-E-F系统发展水平及其耦合协调程度,并分析其时空变动特征。结果表明:9年间全省W-E-F系统耦合协调度从0.55上升到0.83,总体达到良好协调水平。但各子系统发展特征不同,粮食子系统发展水平较高,表现稳定,水资源子系统发展滞后且稳定性较差。系统协调水平和各子系统的发展水平均存在显著且逐渐扩大的空间差异,2017年初级协调区和中级协调区占比分别为45%和55%。太原、忻州和晋中3市协调水平较高,协调水平较低的朔州和运城主要受能源和水资源子系统的制约;各子系统空间差异大小为能源>粮食>水资源,W-E-F各子系统发展水平最低的地区分别是运城、朔州、阳泉。大多数地区面临W-E-F系统内部发展日益失衡的问题,各子系统间存在突出的矛盾,主要表现为粮食和能源子系统与水资源子系统之间的压力和制约效应。最后提出促进山西省W-E-F系统协调发展的措施。

关键词:水-能源-粮食系统;耦合协调;空间差异;变化特征;山西省

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)03-0045-08

Spatial and temporal variation characteristics of the coupling and coordination of water - energy - food nexus in Shanxi Province

WANG Kai, LI Jingbao, LI Huan

(College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: In order to explore the spatial and temporal characteristics of the coupling and coordination of water - energy - food (W - E - F) nexus in Shanxi Province, the evaluation index system of W - E - F nexus was constructed. Then the comprehensive evaluation indexes obtained herewith and the coupling coordination model were used to measure the development level and coupling coordination degree of W - E - F nexus in Shanxi Province as a whole and the cities within from 2008 to 2017. In the meantime the spatial and temporal characteristics of the nexus was analyzed. The results show that the coupling coordination degree of W - E - F system in the province has risen from 0.55 to 0.83 in the past nine years, reaching a good coordination level as a whole; however, the development characteristics of each subsystem is differentiated, the development level of food subsystem is relatively high and its performance is stable, but the development of water resources subsystem is lagging behind with poor stability. There are significant and expanding spatial differences in the system coordination and the development of each subsystem. The proportion of primary coordination areas and intermediate coordination areas accounted for 45% and 55% of the province respectively in 2017. The areas with higher coordination level include Taiyuan, Xinzhou and Jinzhong, whereas Shuozhou and Yuncheng with lower coordination level are mainly restricted by energy and water resources subsystems. The sequence of subsystem spatial difference is

收稿日期:2019-11-08; 修回日期:2020-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41571100);湖南省重点学科地理学建设项目

作者简介:王凯(1996-),男,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为资源环境与区域经济发展。

通讯作者:李景保(1951-),男,湖南桂阳人,大学本科,教授,硕士生导师,研究方向为水文水资源科学。

energy > food > water resources, and the areas with the lowest development level of each subsystem are Yuncheng, Shuozhou and Yangquan. Most regions in Shanxi Province are faced with the problem of increasingly unbalanced internal development of W - E - F system, the contradictions among the subsystems are prominent, which mainly manifested in the pressure and restriction effect brought by the contradiction between the food and energy subsystem and the water resources subsystem. Finally, the measures to promote the coordinated development of Shanxi W - E - F system are put forward.

Key words: water - energy - food (W - E - F) nexus; coupling and coordination; spatial difference; variation characteristics; Shanxi Province

1 研究背景

水、能源和粮食是经济社会发展所必需的基础要素,其内外关联效应的优劣是实现可持续发展的关键。21世纪以来,随着世界人口和经济的迅速增长,W - E - F (water - energy - food) 供求压力日益凸显。金融危机前后国际油价经历两轮上涨,同时欧美开始大规模发展生物质能源,导致粮食价格急剧上升。随后美国率先掀起页岩油气革命,有效提升了能源供应,却又极大加剧了相关地区的水资源压力。可见 W - E - F 问题的日益突出已使全球可持续发展面临严峻挑战,同时也揭示了三者面临的内在矛盾和外部压力。在此背景下 W - E - F 问题受到国际社会的普遍关注,并将三者的关联关系称为 W - E - F Nexus^[1-3]。我国现阶段正处于人口和经济发展双重压力之下,水资源、能源和耕地均存在不同程度的短缺,且空间组合效果较差。能源和粮食产量虽居世界首位,但获取代价较高且难以自给,水资源匮乏的北方地区成为其主产区,导致生态环境问题凸显。此外,保障生态和粮食安全的压力又使得建设用地供应受限。由此可见,大规模的能源开发利用和粮食增产压力抬高了经济发展的生态环境和土地成本,W - E - F 问题已成为阻碍中国经济社会发展的关键问题。

作为可持续发展领域的研究热点,国外学者已对 W - E - F Nexus 进行了大量研究。一方面阐释了 W - E - F Nexus 的理论框架和现实意义,分析其内外关联机制,为后续的研究奠定了理论基础^[2,4];另一方面引入跨学科的方法并开发专用的模型工具,主要从跨国流域、地区和国家等尺度上进行实证研究并提出政策建议^[5-8]。国内关于 W - E - F 系统的研究起步较晚,在引进国外研究成果的基础上^[9],主要基于仿真预测、运行效率、耦合协调、系统优化、供求压力、安全评价等视角,引入相关学科的方法进行定量研究^[10-15],同时也表现出对地域差异的重视。此外,随着可持续发展研究的不断深化,

近年来城市 W - E - F 关联关系的地位开始得到重视,基于城市维度的研究成果正迅速增加^[16-17]。

山西省位于华北地区,属经济发展滞后的资源型省份。2018年人均GDP仅为全国平均水平的70%,同年煤炭产量占全国比重达24.9%。但人均水资源量不足全国平均水平的1/5,W - E - F 系统内部及其与生态环境之间存在突出的矛盾。长期以来高投入的粮食生产以及大规模的能源开发利用对生态环境造成了极大的损害,2018年全省100个地表水监测断面中水质优良比例仅为58%,同期全国空气质量最差的20个城市中山西即占6席。未来伴随着经济社会发展、页岩气开发及乙醇汽油的推广,W - E - F 系统外部及彼此间的需求还将继续增长,山西的可持续发展将面临更大的压力。因此亟待提高 W - E - F 系统的内外协调水平,保障其对经济社会发展的支持能力,同时减轻对生态环境的压力。

当前国内关于 W - E - F 系统的研究主要集中在全国和省域尺度,较少关注资源型地区系统内部的时空变化特征。考虑到 W - E - F 关联关系具有明显的地方特性,本文以山西省为研究区,立足于 W - E - F 系统的内外关联关系,构建适合该区域的评价指标体系。通过测算其发展水平和耦合协调状况,分析 W - E - F 系统的时空差异及其变化特征,以期为促进山西省 W - E - F 系统协调优化发展提供理论参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所需的原始数据来源于2008-2018年的《山西统计年鉴》《山西省水资源公报》以及各地市的统计公报,少数缺失数据采用线性拟合法插补。由于原始数据的量纲和作用方向不同,首先对其进行标准化处理,以便具有可比性。

正向指标:

$$X_i = (x_i - \min\{x_i\}) / (\max\{x_i\} - \min\{x_i\}) \quad (1)$$

负向指标:

$$X_i = (\max\{x_i\} - x_i) / (\max\{x_i\} - \min\{x_i\}) \quad (2)$$

式中: X_i 为 i 指标标准化后的指标值; x_i 为 i 指标的原始值; $\max\{x_i\}$ 、 $\min\{x_i\}$ 分别为 i 指标的最大值和最小值。

2.2 指标体系构建及权重的确定

遵循完整性、独立性、可行性等原则,参考相关研究并结合山西省的实际情况^[18-22],基于 W-E-F 系统的内涵,对各子系统分别从多个维度选取指标,将各子系统内相关系数大于 0.8 的重复指标剔除,最后得到 21 个评价指标,以此构建山西省 W-

E-F 系统耦合协调评价指标体系(表 1)。其中单位 GDP 用水量和单位 GDP 能耗皆按 2005 年不变价处理后计算,以便具有可比性;同时因数据缺乏且各市皆以粮食为主要种植作物,粮食生产地均增加值由种植业地均增加值近似替代,能源消费结构则以电力消费结构替代。

本文采用熵权法确定各评价指标的权重,熵权法通过测度各指标的观测值内部差异程度来计算其权重值。指标观测值的内部差异越大,其权重值也越大,反之越小。由于其采用客观计量方法,一定程度上避免了定性方法的缺陷。

表 1 山西省 W-E-F 系统耦合协调评价指标体系

子系统	系统构成	指标	方向	全省权重	各地市权重
水资源子系统	供需关系	人均水资源量	+	0.135	0.235
		人均用水量	-	0.226	0.126
	用水结构	农业用水占总用水量比重	-	0.148	0.188
		工业用水占总用水量比重	-	0.114	0.094
		生态用水占总用水量比重	+	0.102	0.162
		用水效益	单位 GDP 用水量	-	0.140
能源子系统	可持续性	人均工业废水排放量	-	0.135	0.085
		供需关系	人均一次能源产量	+	0.166
	能耗结构	人均能源消费量	-	0.211	0.161
		第二产业用电占比	-	0.110	0.140
		第三产业用电占比	+	0.141	0.111
		生活用电占比	+	0.100	0.190
粮食子系统	利用效益	能源消费弹性系数	-	0.078	0.098
		单位 GDP 能耗	-	0.194	0.184
	产出水平	人均粮食产量	+	0.185	0.139
		人均肉类产量	+	0.075	0.172
		粮食生产地均增加值	+	0.161	0.204
		投入能力	有效灌溉比例	+	0.171
生态化水平	农村人均用电量	+	0.146	0.131	
	稳定性	地均化肥施用量(折纯)	-	0.194	0.112
		粮食产量波动率	-	0.068	0.096

注:符号“+”表示指标为正向指标,数值越大越好。符号为“-”反之。

2.3 综合评价指数模型

在计算出各指标标准化值和权重的基础上,采用相关研究中广泛使用的线性加权模型计算 W-E-F 各子系统的综合评价指数^[20],公式如下:

$$\beta_k = \sum_j^m w_j X_j \quad (3)$$

式中: β_k 为各子系统的评价指数; w_j 为各指标的权重值; m 为各子系统的指标数量。

据此可分别计算出 3 个子系统在不同年份和地区的评价指数,进而对其发展水平的时空变化进行测度。W-E-F 3 个子系统的评价指数值分别以 $f(x)$ 、 $g(y)$ 、 $h(z)$ 表示。

2.4 耦合协调模型及类型划分

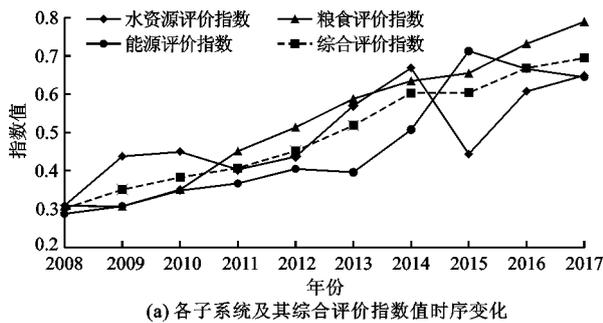
耦合是指系统间或者系统内部诸要素间通过各种相互作用而彼此影响的现象,耦合度即是对这种相互作用程度强弱的度量。W-E-F三者在生产、消耗与管理过程中皆存在紧密的关联关系,通过测算其耦合程度可以揭示其相互作用程度的强弱。W-E-F耦合度模型虽然能综合反映三者耦合作用的强弱,但无法反映三者间相互发展水平的高低,即系统协调水平^[23]。耦合协调度可衡量各子系统相互作用中良性耦合程度的大小,体现协调状况的优劣程度。因此采用耦合协调度模型,以便更好地评价W-E-F三者耦合发展的协调程度。根据相关研究确定耦合度和耦合协调度计算方法^[12]:

$$C = \frac{3 \sqrt[3]{f(x)g(y)h(z)}}{f(x) + g(y) + h(z)} \quad (4)$$

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

$$T = af(x) + bg(y) + ch(z) \quad (6)$$

式中: C 为耦合度, $C \in [0, 1]$, 其值越高代表3大子系统间相互作用程度越强; D 为耦合协调度, $D \in [0, 1]$, 其值越高表明W-E-F系统越趋向于协调发展; T 为W-E-F系统的综合评价指数, 反映系统的整体发展水平; a, b, c 为3个子系统的权系数。本文认为3个子系统对可持续发展具有同等的重要



性,故取 $a = b = c = 1/3$ 。

通过参考相关文献^[12]确定耦合协调类型划分的标准,详见表2。

3 结果分析

3.1 W-E-F各子系统及系统耦合协调水平时序变化特征

根据公式(1)~(6),计算山西省2008-2017年W-E-F各子系统及其综合评价指数、系统耦合度和耦合协调度。为直观显示,将其绘制为折线图(如图1所示),并分析判断各子系统及其耦合程度和耦合协调水平的时序变化特征。

表2 耦合度和耦合协调度类型划分

耦合度类型	耦合度	协调程度	耦合协调度	耦合协调类型
低水平耦合	[0, 0.3]	失调衰退类	[0.00, 0.09]	极度失调
颤颤阶段	(0.3, 0.5]		[0.10, 0.19]	严重失调
磨合阶段	(0.5, 0.8]		[0.20, 0.29]	中度失调
高水平耦合	(0.8, 1.0]		[0.30, 0.39]	轻度失调
		中间过渡类	[0.40, 0.49]	濒临失调
			[0.50, 0.59]	勉强协调
		协调发展类	[0.60, 0.69]	初级协调
			[0.70, 0.79]	中级协调
			[0.80, 0.89]	良好协调
			[0.90, 1.00]	高度协调

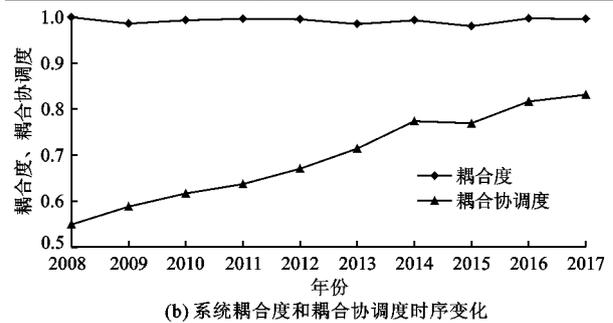


图1 2008-2017年山西省W-E-F系统发展水平的时序变化过程

3.1.1 W-E-F各子系统时序变化特征 对图1(a)进行分析得出:

(1)水资源子系统的变化以2014年为界可分为波动上升期和波动恢复期两个阶段。2008-2014年水资源评价指数提升了1.16倍,其原因首先是总权重为0.364的用水结构得到改善,其中生态用水占比从1.3%上升到2014年的4.76%,是贡献最大的指标;其次是人均工业废水排放的下降和用水效益的提升,这与产业结构的优化密切相关,2008-2014年第三产业占GDP比重上升了7.3个百分点。在此期间权重最大的人均用水量增长17.3%,负向

拉动效应显著,主要原因是灌溉面积增加导致用水量显著增长。2015年因降水减少使人均水资源量下降15.7%,并引发农业用水占比上升导致进入波动恢复期。总体来看,水资源系统受气候波动和经济发展影响较大。

(2)能源子系统可分为2015年前后的上升期和下降期。2008-2015年间因全国经济快速发展促使人均能源产量增长了22.4%,能源消费结构也显著优化,单位能耗大幅降低24.2%。但同时权重最大的人均能耗增长了23%,在2013年已达到峰值,对能源子系统构成拖累,这与金融危机后大规模

的基建投资及其拉动的重化工业发展有很大关系。2016年起能源子系统出现下滑,究其原因,首先是因供给侧改革淘汰过剩产能以及国家调整能源消费品种结构导致煤炭产量下降,加之能源消耗随经济发展有所增长,从而导致占权重达0.377的能源供需关系显著恶化;其次是由于能源消费弹性系数较2015年的低点有所反弹,但仍处于集约发展状态。

(3)粮食子系统在九年间发展较快且没有显著波动,这与全国农业发展态势基本一致。2006年废除农业税以来,国家加大对农业的扶持力度,农业基础设施显著改善,九年间农田有效灌溉比例提高8.68个百分点,农村人均用电量增长49%。粮食生产补贴和临储制度实施后农民种粮收入和积极性显著提高,粮食在九年间增产31.7%,粮食地均产出增长了1.6倍。但同时权重最大的地均化肥施用量在已经较高的基础上增长了13%,导致粮食种植的生态化水平进一步退化,生态环境负面影响加重。

总体来看,山西省W-E-F系统属水资源滞后型,其中粮食子系统稳定性最好且提升幅度最大,能源子系统次之,水资源子系统稳定性最差且增幅最低。2008-2017年各子系统均获得显著发展,很大程度上是经济发展和政府政策支持的综合结果。产业结构的优化促使水能消耗结构得到改善,资源型产业比重的下降使得单位GDP的水能消耗也随之下落,政府对农业的扶持则是粮食子系统发展的主要原因。对3个子系统负向拉动效应明显的指标分别为人均用水量、人均能源消费量和地均化肥施用量,表明经济社会发展对资源环境的依赖和破坏程度加深。

3.1.2 W-E-F系统耦合度和协调水平变化特征

由图1(b)可看出,山西省W-E-F系统在2008-2017年间一直保持高水平耦合状态,表明各子系统间相互作用程度较高。W-E-F系统综合评价指数2008-2017年增长了130%,耦合协调度从0.55上升到0.83,由勉强协调发展到良好协调,基本呈稳步发展态势。

由于系统耦合度接近于1且比较稳定,因此系统耦合协调度的变化趋势与综合评价指数相似,可分为2008-2014年的稳定上升期和2015-2017年的波动上升期。前一阶段先后由水资源子系统和粮食子系统发挥主要带动作用,其推动因素主要为用水结构优化、工业污水排放下降以及粮食生产投入产出水平的提升等方面,这得益于经济快速发展和政策支持。后一阶段因2015年以来水资源和能源子

系统的大幅下降而发生波动,起到负向拉动的因素从大到小依次是农业用水占比、人均一次能源产量、能源消费弹性系数、人均用水量、生态用水占比、人均能源消费量。

3.2 W-E-F系统空间差异变化特征及其内部关联效应

W-E-F系统的空间差异及其变化对其整体发展水平具有重要影响,采用2008-2017年山西省各地市的面板数据计算其耦合协调水平。结果显示大多数地市系统发展水平的时序变化方向基本一致,故以2008年和2017年为例分析W-E-F系统的空间差异及其变化特征。首先基于ArcGIS软件,采用自然断点法将测算结果划分为4个等级。山西省各地市2017年W-E-F系统发展水平空间分异及2008-2017年变动幅度见图2。

3.2.1 W-E-F各子系统的空间差异 经计算,2017年W-E-F各子系统综合评价指数的变异系数分别为0.19、0.26、0.22,再结合对图2(a)~2(c)的分析表明:

(1)3个子系统发展水平的空间差异显著。其中水资源子系统在吕梁表现最好,除表现较差的运城和朔州外其余各市间的差异较小。其差异主要在耗水结构和水资源供需两方面,其中农业和生态用水占比在运城和朔州最差。这是由各地区农业发展水平和经济结构的差异所导致的,地理环境和资源基础对其影响较大。

(2)能源子系统在太原和北部的大同、忻州等地发展水平较高,在晋西北的朔州和晋东南的晋城较差。其首要原因是能源消费结构的差异,大同和太原产业转型升级效果较好,2017年战略性新兴产业占工业比重分别达到9.7%和14.5%。产业结构也在很大程度上影响着能源需求和单位GDP能耗,而各市的资源禀赋在一定程度上塑造了产业结构。

(3)粮食子系统在山西中南部发展较好,尤以晋中和运城最高,阳泉则属全省最低,与粮食主产区的分布相符。其主要差异体现在灌溉比例和产出水平上,其中种植业地均产出的市际差异最大。由于山西黄土高原地形复杂,山地丘陵和盆地相间分布,各市农业发展条件差异很大。太原、晋中和运城3市皆位于汾河谷地,灌溉和耕作条件显著优于其它地区。

3.2.2 W-E-F系统协调水平的空间差异 由图2(d)可知,2017年各市W-E-F系统协调程度差异明显,处于中级协调水平占55%,初级协调水平占45%,协调度最高值为最低值的1.2倍。

协调水平最高的地区为山西中北部的太原、忻州和晋中市,前两者主要受能源子系统的推动,第三产业能耗比重分别超过全省 9.9 和 16.5 个百分点,能源消费结构较优。晋中水资源和粮食子系统发展水平居中,主要由粮食子系统拉动,其境内分布有汾河谷地,农业生产条件较好,粮食生产地均增加价值和人均肉类产量居全省首位。

吕梁和大同协调水平属第二梯队。吕梁主要受水资源子系统带动,其用水结构和水资源供需关系较好,2017 年水资源开发利用仅有 30.1%,为全省最优,但其位于西部吕梁山区,地形以丘陵和山地为主,水土流失严重,粮食生产条件较差,粮食子系统发展水平偏低。大同属山西第二大城市,是重要的能源生产基地,能源子系统发展水平较高;境内虽有大片盆地,但受干旱、内涝和盐碱的威胁,粮食和

水资源系统发展水平居全省中间位置,3 个子系统间差异较小。

阳泉、长治、临汾和晋城 4 市属第三梯队。阳泉位于太行山区,农业发展条件较差,2017 年人均耕地面积仅为全省平均水平的 39.8%,灌溉比例仅有 15.9%,粮食子系统发展水平属全省最低;因其农业对水资源的压力较小,水资源子系统发展水平较高。临汾和长治两市相邻,发展水平相近,且系统内部差异较小,这与其相似的资源基础和地理环境有很大关系。晋城是全省第五大能源生产基地,但其能源子系统对协调水平起到显著的负向拉动作用,主要由能耗结构的落后所导致;同时因多年平均降水量为全省最高,加之多山地地形使得耕地灌溉面积较小,单位 GDP 耗水量较低,因而水资源子系统发展水平较高。

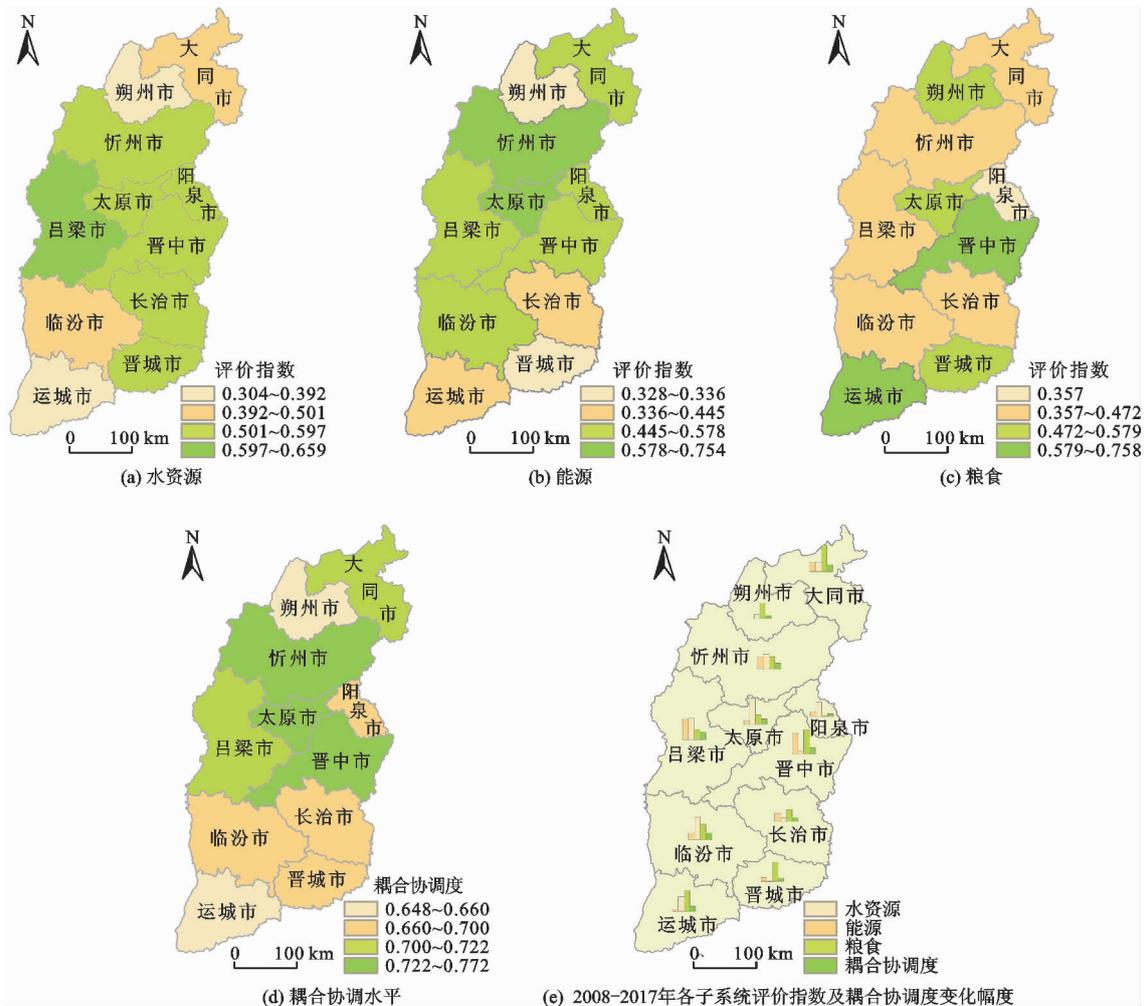


图2 山西省各地市 2017 年 W-E-F 系统发展水平空间差异及 2008-2017 年变动幅度

协调程度最低为朔州和运城,其能源和水资源子系统严重滞后。一方面重化工业在经济结构中的比重较高,使得能源消费结构较差且人均能耗较高,

其中朔州是山西最大的能源输出基地;另一方面因两市分布有大片盆地,农业发展条件较好,2017 年灌溉比例分别为 47.9% 和 61.4%,均超过全省平均

水平,导致较差的水耗结构和较高的人均用水量,使得水资源系统压力过大,不利于W-E-F系统协调发展。

3.2.3 W-E-F系统空间差异的变化特征 W-E-F系统协调水平的空间差异逐渐变大,趋于不平衡发展。经计算,2008年和2017年各市耦合协调度的变异系数分别为0.047、0.057,表明2008-2017年各市协调水平的差异有所扩大,这是因各市协调水平发展路径的分化所致。由图2(e)可知,陷入停滞的地区包括晋城、阳泉和朔州,2008-2017年增幅均不足9%。朔州水资源和能源子系统均没有明显的发展,主要因灌溉面积增加和重化工业发展导致对水、能源的需求迅速增长,水能消耗结构也未得到显著优化;阳泉主要因粮食子系统而陷入停滞,地形因素使农业发展空间受限;晋城主要受能源子系统衰退的拖累,其能耗水平在九年间大幅上升且能耗结构未得到显著改善。

W-E-F各子系统的变异系数分别从2008年的0.17、0.21、0.15增大到2017年的0.19、0.26、0.22。由图2(e)可以发现,粮食和能源子系统区域差异的显著扩大,是导致W-E-F系统空间差异扩大的重要原因。粮食子系统中,晋中、运城的较快增长和阳泉的停滞是区域不平衡加剧的原因所在,各市投入产出水平的增长差异较大,粮食子系统发展的推动因素包括玉米收购价的上涨,政府对粮食种植的补贴,农田基础设施的改善以及单产的提升等方面。能源子系统方面,太原、忻州的大幅提升和朔州、晋城的停滞加剧了空间分异,其变化差异主要在于能耗水平和结构两个方面,这与各市的产业结构有很大关系,朔州和晋城工业结构以重化工业为主,2017年煤炭行业增加值占规模以上工业比重超过60%,经济发展对能源的依赖程度依然较高。水资源子系统提升最显著的是吕梁和晋中,主要表现为人均水资源量和生态用水占比的提升,增长最慢的是朔州和运城,其人均用水量大幅上升且用水结构未有显著优化,尤其是运城的农业用水量因灌溉面积扩大而增长了65%。

3.2.4 W-E-F系统内部关联效应 W-E-F系统内部存在复杂的动态关联关系,两部门间的关系及其变化会对另一部门产生间接影响并发生反馈。各子系统之间既可以相互支持,也可能相互损害。在经济社会和环境等外围因素的影响下,部门间以复杂网络的形式发生非线性循环传导作用^[9],并对整个资源系统和生态环境产生影响,最终作用

于经济社会发展。随着系统外部压力的不断增加,由关联关系所引发的系统内部矛盾日益激化,长期以来,能源和粮食自给被视为优先目标,水资源系统付出了较大的代价。为比较系统内部差异,将2017年山西省各地市W-E-F各子系统发展水平绘制为柱状图,如图3所示。

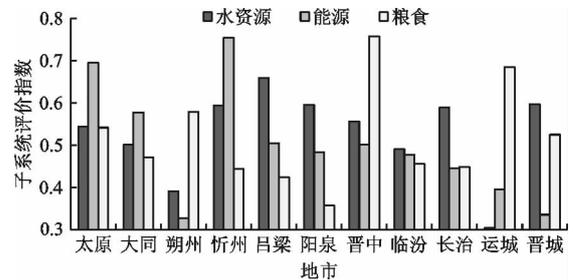


图3 2017年山西省各地市W-E-F各子系统发展水平

首先,粮食和水资源子系统之间普遍存在矛盾,其导致的水资源压力也会影响到能源的开发利用,反映了由外部压力和资源禀赋交互作用所导致的系统内部矛盾。各市水资源和粮食子系统综合评价指数的相关系数从2008年的-0.32减小到2017年的-0.55,负相关程度显著增强。其原因在于农业用水效率偏低,较高的灌溉比例抬高了农业用水比重、人均用水量和单位GDP水耗,从而引起水资源子系统反向变动。灌溉比例较低的忻州、吕梁、阳泉和长治等地水资源子系统评价指数皆高出粮食子系统30%以上,朔州、晋中、运城则与之相反。

其次,能源与水资源和粮食子系统之间也面临着不同程度的冲突。各市能耗总量与废水排放总量、城镇工业用水量相关系数分别为0.617、0.485,且能耗主要来自工业,表明能源开发利用对水资源子系统造成一定的损害,并通过耗水和水污染对粮食生产造成不利影响。能源和粮食子系统之间协调关系相对较好,但二者的相互需求不断增长,进而也会对水资源造成压力。2017年各市人均粮食产量和一产用电比例的相关系数为0.62,相比2008年有所上升,表明粮食生产愈加依赖于能源支持,同时由于投入增加、生活水平提升、城镇化等因素,粮食在生产资料、加工、享用等阶段的能耗也在增长。相比之下,能源对粮食的直接压力较小,目前主要表现为乙醇汽油推广对粮食的需求,其实质是对水土资源的争夺。

对于各地市内部W-E-F子系统间的不平衡程度,从图3可以发现,太原、大同、临汾和长治等市各子系统间差异相对较小,发展较为平衡,其余各市

无论协调水平高低其内部差异都较大,运城、忻州、朔州尤为明显,今后应注重扶持落后子系统的发展,以便提高协调发展水平,使系统整体效能达到最佳。

4 结论与建议

本文通过构建山西省 W-E-F 系统评价指标体系,运用综合评价指数和耦合协调模型,将时间序列和空间维度相结合,研究 2008-2017 年山西省各地市 W-E-F 系统耦合协调水平及其变化特征,并探究了系统内部的关联效应,得到如下几点结论:

(1)2008-2017 年山西省 W-E-F 系统综合评价指数增长了 130%,耦合协调度从 0.55 上升到 0.83,总体呈稳定发展态势。但其各子系统间存在显著差异,总体属水资源滞后型。得益于政策支持,粮食子系统发展最快且稳定性好,水资源子系统发展较慢且波动性最大,对能源和粮食子系统的支撑能力脆弱,不利于山西省的可持续发展。

(2)2008-2017 年尽管山西省 W-E-F 系统总体上获得显著发展,但各子系统存在显著且不断扩大的空间差异。其差异大小为能源 > 粮食 > 水资源,各子系统短板区域主要位于朔州、运城、阳泉和晋城等地。这与不同地区的经济结构和资源环境状况密切相关。未来需立足于各区域的现实条件,采取针对性的政策措施,以部门间的协同作为保障,着力提升低协调区滞后子系统的发展水平,推动 W-E-F 系统的协调发展。

(3)W-E-F 系统的内部矛盾较为突出,主要发生在粮食能源与水资源子系统之间,这与传统的资源驱动型发展方式和分割式的治理机制有很大关系。作为一个不可分割的整体,W-E-F 各子系统的发展必须尽可能降低对其他子系统的不良影响。在保障能源和粮食安全的同时,也要注重对水资源的合理开发和保护,使其能够为经济社会发展提供长远稳定的支撑。

(4)水粮关系的改善一方面需要加大投入,采取因地制宜的节水策略,提高节水灌溉比例;另一方面要通过改革推进户籍城镇化,从而有效转移农业剩余人口,以适度规模经营促进节水灌溉技术的推广,减轻粮食生产对水资源的压力。水能关系的改善首先需要优化能源生产结构,通过技术进步提升各类清洁能源的产量。其次是要改善能源消费结构,加快传统产业转型升级,推动高技术产业和现代服务业的发展,降低重化工业的能耗比重。最后要减轻能源利用的环境损害,加强高能耗产业的技术改造,有序推进

农村清洁取暖进程,降低散煤使用量。

参考文献:

- [1] DAVIS N. Global risks 2011 report (6th edition) [R]. Cologne: World Economic Forum, 2011.
- [2] HOFF H. Understanding the nexus [R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [3] TANIGUCHI M, ENDO A, GURDAK J J, et al. Water - food - energy nexus in the Asia-pacific region [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 11: 1 - 8.
- [4] 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 - 7960.
- [5] DAHER B T, MOHTAR R H. Water - energy - food (WEF) Nexus Tool 2.0: Guiding integrative resource planning and decision-making [J]. Water International, 2015, 40(5-6): 748 - 771.
- [6] CONWAY D, GARDEREN E A V, DERYNG D, et al. Climate and southern Africa's water - energy - food nexus [J]. Nature Climate Change, 2015, 5(9): 837 - 846.
- [7] MOHAMMADPOUR P, MAHJABIN T, FERNANDEZ J, et al. From national indices to regional action - An Analysis of food, energy, water security in Ecuador, Bolivia, and Peru [J]. Environmental Science & Policy, 2019, 101: 291 - 301.
- [8] LIN Yingchen, LIN Chiachun, MENGSHAN L, et al. Comprehensive assessment of regional food - energy - water nexus with GIS-based tool [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 151: 104457.
- [9] 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.
- [10] 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 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(6): 74 - 84.
- [11] 李桂君,黄道涵,李玉龙. 中国不同地区水 - 能源 - 粮食投入产出效率评价研究 [J]. 经济社会体制比较, 2017(3): 138 - 148.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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 [J]. 地理科学, 2018, 38(10): 1653 - 1660.
- [15] 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 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (5): 1 - 8.

(下转第 58 页)

和谐度等级,分析得出评价结果贴近研究区域实际情况,表明该评价模型合理可行,可适用于其他区域人水和谐度评价。

(3)根据评价模型中单一指标的和谐度等级可以清晰看出被评价区域在人水和谐方面的不足之处,并以此为导向,针对制约因素提出对应整改措施,这对于研究区域进行下一步水利工作,推动人水关系进一步和谐化具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张金鑫,唐德善,丁亿凡,等.基于云模型的流域人水和谐评价方法[J].水电能源科学,2015,33(9):155-158+127.
- [2] 戴会超,唐德善,张范平.城市人水和谐度研究[J].水利学报,2013,44(8):973-978+986.
- [3] 孟令爽,唐德善,史毅超.基于主成分分析法的城市人水和谐度评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):93-98.
- [4] 毛翠翠.人水关系的作用机制及量化方法研究[D].郑州:郑州大学,2013.
- [5] 沈金阳.南宁市人水关系和谐评价及调控对策[D].南宁:广西大学,2018.
- [6] 左其亭,张云,林平.人水和谐评价指标及量化方法研究[J].水利学报,2008,39(4):440-447.
- [7] 蔡其华.论人水和谐[J].人民长江,2006,37(5):1-3.
- [8] 王梅,唐德善,孟珍珠,等.基于模糊物元的综合评价模型在区域人水和谐评价中的应用[J].水电能源科学,2015,33(2):160-163+134.
- [9] 莫崇勋,莫桂燕,阮俞理,等.基于变权法的南宁市人水和谐度评价[J].水电能源科学,2018,36(3):30-33.
- [10] 钱程.城市化进程中人水和谐程度分析[J].绿色科技,2017(8):70-73.
- [11] 康艳,蔡焕杰,宋松柏.宝鸡市人水和谐评价研究[J].自然资源学报,2014,29(1):156-165.
- [12] 陆赛,唐德善,孟令爽.基于GRA-IECD协调发展模型的人水和谐评价[J].人民黄河,2019,41(3):84-88.
- [13] 王大洋,黄凯,莫崇勋,等.基于综合权重SMI-P法的广西人水和谐度量化评价[J].节水灌溉,2018(7):107-112.
- [14] 左其亭.人水和谐论及其应用研究总结与展望[J].水利学报,2019,50(1):135-144.
- [15] 李天宏,薛晶,夏炜,等.组合赋权法-木桶综合指数法在长江生态航道评价中的应用[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(1):36-49.
- [16] 鲁佳慧,唐德善.基于博弈论组合赋权的水环境综合治理效果评价[J].水利水运工程学报,2018(6):105-111.
- [17] 刘菁,唐德善,郝建浩.基于复合云模型的太湖流域水环境质量风险评价[J].长江科学院院报,2018,35(6):24-29.
- [18] 杨丹,唐彦,唐德善.基于熵权的模糊物元法在农业用水效率评价中的应用[J].节水灌溉,2018(10):64-67.
- [19] 张杨,严金明,江平,等.基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J].农业工程学报,2013,29(22):252-258.
- [20] 方娜,游清徽,刘玲玲,等.基于云模型的鄱阳湖秋季周边湿地水体富营养化评价[J].生态学报,2019,39(17):6314-6321.
- [21] 高玉琴,赖丽娟,姚敏,等.基于正态云-模糊可变耦合模型的水环境质量评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):1-7.
- [22] 唐新玥,唐德善,常文倩,等.基于云模型的区域河长制考核评价模型[J].水资源保护,2019,35(1):41-46.
- [23] 龚艳冰.基于正态云模型和熵权的河西走廊城市化生态风险综合评价[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):169-174.

(上接第52页)

- [16] ZHANG Pengpeng, ZHANG Lixiao, CHANG Yuan, et al. Food - energy - water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 142: 215 - 224.
- [17] LI Guijun, HUANG Daohan, SUN Chengshuang, et al. Developing interpretive structural modeling based on factor analysis for the water - energy - food nexus conundrum [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 309 - 322.
- [18] 王浩,杨贵羽,杨朝晖.水土资源约束下保障粮食安全的战略思考[J].中国科学院院刊,2013,28(3):329-336+321.
- [19] 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.
- [20] 惠调艳,郭筱.西部地区经济-资源-环境协调发展水平测度[J].统计与决策,2019,35(11):124-128.
- [21] 张宁宁,粟晓玲,周云哲,等.黄河流域水资源承载力评价[J].自然资源学报,2019,34(8):1759-1770.
- [22] 刘佳骏,董锁成,李宇.产业结构对区域能源效率贡献的空间分析——以中国大陆31省(市、自治区)为例[J].自然资源学报,2011,26(12):1999-2011.
- [23] 白雪,宋玉祥,浩飞龙.东北地区“五化”协调发展的格局演变及影响机制[J].地理研究,2018,37(1):67-80.