

2000 - 2016 年甘肃省水资源—能源—粮食 耦合协调特征研究

党锐¹, 张军^{2,3}, 周冬梅², 刘洋¹, 马靖靖², 朱小燕², 马静²

(1. 甘肃农业大学 管理学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学 资源与环境学院,
甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要:以甘肃省为研究对象,构建水-能源-粮食(W-E-F)系统的评价指标,运用耦合协调模型对甘肃省2000-2016年W-E-F系统的时空变化特征进行研究。结果表明:甘肃省W-E-F系统的综合评价指数整体呈现“N”型变化趋势,水资源系统评价指标的发展趋势变化幅度较大,对W-E-F的综合评价指数的贡献最大;甘肃省W-E-F系统耦合度处于0.21~0.32,变化波动幅度较小且基本上保持平稳状态,处于低水平耦合阶段和颀颀阶段,耦合协调度处于0.27~0.42,其耦合协调类型大多为失调衰退型,耦合度和耦合协调度存在区域差异;不同因素在不同区域对W-E-F系统影响的方向和程度不同,其中常住人口、人均耕地面积、有效灌溉面积与W-E-F协调度的变化是同向,城镇化与W-E-F协调度变化既有正向又有负向的影响,而地区GDP对W-E-F系统的影响最不显著。

关键词:水资源-能源-粮食;耦合;协调;甘肃省

中图分类号:TV213.4; F205

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)01-0115-09

Characteristic of the coupling and coordination of water – energy – food of Gansu Province during 2000 – 2016

DANG Rui¹, ZHANG Jun^{2,3}, ZHOU Dongmei², LIU Yang¹, MA Jingjing², ZHU Xiaoyan², MA Jing²

(1. School of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Research Center for Water-saving Agriculture in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Taking Gansu Province as the research object, the evaluation index system of water – energy – food (W – E – F) system was established, and the coupling-coordination model was used to study the temporal and spatial variation characteristics of W – E – F system in Gansu Province during 2000 – 2016. The result showed that: the comprehensive evaluation index of the W – E – F system in Gansu Province showed a "N" shaped variation trend, in which the development trend of the water resources system evaluation index changed greatly, which contributed most to the comprehensive evaluation index of the W – E – F. When the coupling degree of the W – E – F system was in the range of 0.21 – 0.32 in Gansu Province, the fluctuation range of variation was small and basically maintained a stable state. This indicates that the W – E – F system is in a low-level coupling and antagonistic stage. Whereas the coupling coordination degree of the W – E – F system was in the range of 0.27 – 0.42, the coupling coordination types were mostly disorder recession types, the coupling degree and coupling coordination degree differed between regions. Different factors have different directions and degrees of influence on different regions. The change of the resident population, per capita cultivated land area, effective irrigation area are con-

收稿日期:2019-07-05; 修回日期:2019-09-10

基金项目:甘肃农业大学科技创新基金-青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2018-17); 学科建设基金项目(GAU-KKJS-2018-202、GAU-KKJS-2018-203); 国家自然科学基金项目(71563001)

作者简介:党锐(1994-),女,甘肃通渭人,硕士研究生,主要研究方向为水土资源管理。

通讯作者:张军(1977-),男,甘肃张掖人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水土资源可持续利用。

sistent with the variation of the coordination degree of W - E - F system, while the urbanization and the coordination degree have both positive and negative effects, but regional GDP has no significant effect on W - E - F coordination.

Key words: water - energy - food; coupling; coordination; Gansu Province

1 研究背景

水资源、能源和粮食是人类目前存在和未来发展的重要基础,也是制约一个地区发展的重要因素^[1-2]。水资源是粮食和能源生产的基础,能源生产进一步提高水资源利用效率和粮食生产效率,三者之间相互依赖,紧密联系^[3-4]。在此背景下“水 - 能源 - 粮食纽带”概念被提出^[5],进一步促进了从综合角度对自然系统和经济社会系统耦合关系研究,特别是对深入分析水 - 能源 - 粮食之间的耦合作用关系提供了新的思路,为实现区域内资源协调平衡利用提供了有力的方法支持。

目前,国内外学者在 W - E - F 系统方面做了大量研究, Li 等^[6]和 Saladini 等^[7]从 W - E - F 可持续发展进行讨论,将农业 - 水 - 能源 - 粮食可持续管理(AWEFSM)模型应用于中国西北地区的实际案例进行研究,可以有效帮助决策者对水 - 能源 - 粮食的协同管理; Christopher 等^[8]将 W - E - F 系统作为一个耦合的自然 - 人类系统来研究,使 W - E - F 系统能够更好地实现弹性和可持续性的发展目标; Zhang 等^[9]从 W - E - F 系统的概念、研究方法及问题进行阐述,有助于解决 W - E - F 系统发展过程中的挑战性问题; 白景锋等^[10]运用主成分分析法和地理加权回归模型对中国水 - 能源 - 粮食压力从时空两个方面进行研究,研究得出 W - E - F 压力随时间呈“升 - 降 - 稳”的特点,空间上从东南沿海向西北内陆 W - E - F 总压力逐渐递减; 邓鹏等^[11]和毕博等^[12]运用耦合协调模型对 W - E - F 系统的耦合协调关系进行研究,研究发现 W - E - F 系统间的发展水平尚未跨入高度发展协调阶段,还有很大的提升空间; Wang 等^[13]采用压力、状态和响应(PSR)模型评价水 - 能源 - 粮食关系的可持续性,研究得出中国 W - E - F 的可持续性处于一般状态水平; 鲍淑君等^[14]从 W - E 方面分析了 W - E 系统的纽带关系和协同发展,得出我国要注重政策和技术的一致性与可行性,宏观政策与微观技术相结合,用市场机制解决能源产业与水的问题; 刘渝等^[15]和康绍忠^[16]从水资源生态安全和粮食安全方面构建评价指标体系进行研究,研究得出水资源生

态质量与粮食安全质量下降; 彭少明等^[17]运用大系统分解协调技术及逐步优化方法和嵌套遗传算法,实现复杂巨系统的优化求解,使粮食增收、能源增产。目前他们的研究尺度大都是从国家以及流域大范围进行研究,为此,本文以甘肃省为研究对象,结合甘肃省自然资源空间分布的差异性,以及经济结构发展的多元性特征,构建 W - E - F 系统的评价指标,运用耦合协调模型和地理加权回归模型,分别从省域和市域空间尺度对甘肃省 2000 - 2016 年的 W - E - F 系统的耦合特征从时间和空间两个方面以及驱动因素进行定量研究,以期揭示甘肃省水 - 能源 - 粮食系统协调发展机制,也为经济社会可持续发展和地方政府决策提供参考依据。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况

甘肃省处于 92°13' ~ 108°46'E, 32°31' ~ 42°57' N, 位于我国西部地区黄河中上游, 沟通黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原, 地形复杂多样。甘肃省气候干燥, 气温日较差大, 年平均气温 0 ~ 15℃, 气候类型多样, 从南到北包括了亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性气候和高原山地气候四大类型。甘肃水资源严重匮乏, 年降水量 42 ~ 740mm, 大致呈现出东南向西北递减的趋势。甘肃省能源种类较多, 其中风能资源总储量达 2.37×10^8 kW, 是中国太阳能最为丰富的三大区域之一, 年太阳总辐射值为 $4\ 800$ MJ/m³ ~ $6\ 400$ MJ/m³。甘肃省下辖 12 个地级市, 分别为兰州市、嘉峪关市、金昌市、陇南市、白银市、天水市、武威市、酒泉市、张掖市、庆阳市、平凉市和定西市, 2 个自治州(临夏回族自治州和甘南藏族自治州), 共 14 个地州市(图 1), 土地资源丰富, 总土地面积约 42.58×10^4 km², 但山地多, 平地少, 全省山地和丘陵占土地总面积的 78.2%, 土地利用率为 43.55%, 粮食产量仅 $1\ 091.07 \times 10^4$ t。2017 年甘肃省人口 $2\ 625.71 \times 10^4$ 人, 国民生产总值 $7\ 460 \times 10^8$ 元, 其中第一产业 859.8×10^8 元; 第二产业 $2\ 561.8 \times 10^8$ 元; 第三产业 $4\ 038.4 \times 10^8$ 元^[18]。随着经济社会的快速发展, 化石能源枯竭、水资源短期以及粮食安全等问题日益严重, 制约着经济社会的可持续发展, 甘肃省作为国家重要

的生态屏障,也是“一带一路”经济带的重要陆路节点,具有重要的战略地位。

2.2 数据来源

本文从 2001-2017 年《甘肃省统计年鉴》《甘肃水资源公报》以及甘肃经济信息网中获取甘肃省 14 个地州市年降水量、水资源总量、总用水量、农田灌溉用水、总人口、粮食产量、有效灌溉面积、粮食播种面积、煤炭、液化石油气、天然气及电力等各项指标的数据。

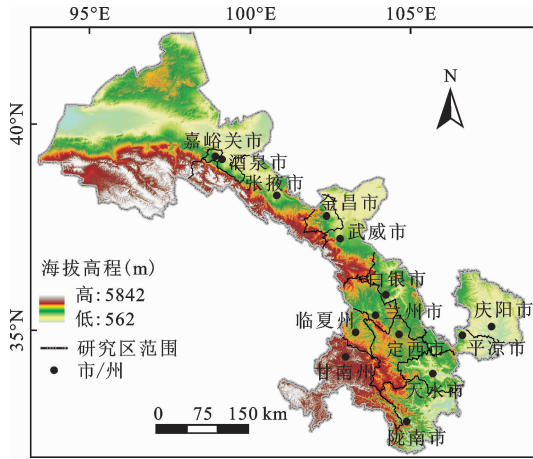


图 1 甘肃省地理位置及地州市划分

2.3 研究方法

2.3.1 综合指数法 综合指数法是指运用极差标准化对原数据进行归一化处理,并用加权求和的综合指数计算方法,分别计算出水-能源-粮食各系统的综合指数。在计算综合指数之前,用熵值法确定各项指标的权重^[19]。综合指数可计算各子系统的发展水平,其计算公式如下:

$$W(w) = \sum_{i=1}^n W_i X'_{it} \quad (1)$$

$$E(e) = \sum_{i=1}^n E_i Y'_{it} \quad (2)$$

$$F(f) = \sum_{i=1}^n F_i Z'_{it} \quad (3)$$

式中: t 为年份; $W(w)$ 、 $E(e)$ 、 $F(f)$ 分别为水资源、能源和粮食各子系统 t 年份的综合评价指数; W_i 、 E_i 、 F_i 分别为各系统评价指标的权重; X'_{it} 、 Y'_{it} 、 Z'_{it} 分别为各系统评价指标的标准化值。

2.3.2 耦合度模型 耦合指两个或两个以上的实体相互依赖于对方的一个量度^[11]。本文中耦合是指水-能源-粮食各系统间的相互作用、相互影响的程度。结合其他学者的相关研究^[11-12,20],构建本文的耦合度模型:

$$D = \sqrt[3]{\frac{W(w) \cdot E(e) \cdot F(f)}{[W(w) + E(e) + F(f)]^3}} \quad (4)$$

式中: D 为耦合度, $0 \leq D \leq 1$, 表示 $W-E-F$ 各系统之间的协调发展程度,耦合度越大,表明各系统之间的协调关联性越好。参考文献^[19-20]的研究成果,将耦合度分为 4 个等级,见表 1。

表 1 耦合度等级分类

耦合度 D	耦合程度
0.00 ~ 0.29	低水平耦合阶段
0.30 ~ 0.49	颤颤阶段
0.50 ~ 0.79	磨合阶段
0.80 ~ 1.00	高水平耦合阶段

2.3.3 耦合协调度模型 由于耦合度在某种情况下不能充分地反映系统内部之间的耦合协调程度的高低,为了更好地分析 $W-E-F$ 系统内部要素之间在发展过程中的协调程度,本文以耦合度为基础,构建耦合协调模型,其公式如下^[21-22]:

$$N = \sqrt{D \cdot H} \quad (5)$$

$$H = \alpha W(w) + \beta E(e) + \gamma F(f) \quad (6)$$

式中: N 为 $W-E-F$ 系统的耦合协调度, $0 \leq N \leq 1$; D 为耦合度; H 为水资源、能源、粮食的综合评价指数; $W(w)$ 、 $E(e)$ 、 $F(f)$ 分别为水资源、能源、粮食的综合评价指数; α 、 β 、 γ 分别为水资源、能源、粮食各子系统的重要程度;考虑到水资源、能源和粮食之间依存关系,以及维持经济社会可持续发展中的作用,本研究认为 $W-E-F$ 三者同等重要,故 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。本文为了便于与其他研究成果作比较,采用廖重斌^[23]和张玉萍等^[24]的耦合协调度划分标准,将其分为 10 种耦合协调类型,见表 2。

2.3.4 地理加权回归法 $W-E-F$ 系统的耦合协调受到地理空间因素的影响^[10,25],运用地理加权回归(GWR)模型,定量分析其影响因素,本文构建的地理加权回归模型如下^[26]:

$$Y_i = \beta_i(\mu_i + v_i) + \sum_{j=1}^n \beta_j(\mu_i + v_i)x_{ij} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中: Y_i 为甘肃省各个市 i 的 $W-E-F$ 系统的耦合协调度; $(\mu_i + v_i)$ 为各个市 i 的位置, β_i 为各个市 i 的回归常数; j 为各个市 i 的第 j 个回归参数; x_{ij} 为自变量,表示 x_j 在各个市 i 的值; n 为自变量数; ε_i 为随机误差。

2.4 评价指标体系构建

以甘肃省 14 个地州市为研究单元,依据科学

性、系统性和差异性原则,并在借鉴前人研究基础上,从水资源系统、能源系统和粮食系统3个方面,选取14个评价指标(表3),在水资源系统,选取年降水量、水资源总量、总用水量、人均水资源量以及农田灌溉用水5个指标;在能源系统,选取煤炭、液化石油气、天然气及电力4个指标;在粮食资源系统,选取粮食产量、粮食人均占有量、粮食消耗量、有效灌溉面积、粮食播种面积5个指标。

表2 耦合协调度的等级分类及评价标准

协调程度	耦合协调度 N	耦合协调类型
失调衰退	0.00 ~ 0.09	极度失调衰退类
	0.10 ~ 0.19	严重失调衰退类
濒临失调	0.20 ~ 0.29	中度失调衰退类
	0.30 ~ 0.39	轻度失调衰退类
过渡类	0.40 ~ 0.49	濒临失调衰退类
	0.50 ~ 0.59	勉强协调发展类
基本协调	0.60 ~ 0.69	初级协调发展类
	0.70 ~ 0.79	中级协调发展类
高度协调	0.80 ~ 0.89	良好协调发展类
	0.90 ~ 1.00	优质协调发展类

3 结果与分析

3.1 甘肃省水-能源-粮食时间序列变化分析

根据综合评价指数、耦合度以及耦合协调度的公式计算出甘肃省2000-2016年水-能源-粮食系统的综合评价指数 $Z(z)$ 、耦合度 D 、耦合协调度 N (表4)。

表3 W-E-F的指标体系及权重

系统	指标层	权重
水资源系统	年降水量/mm	0.324
	水资源总量/ $10^8 m^3$	0.273
	总用水量/ $10^8 m^3$	0.099
	人均水资源量/ m^3	0.200
	农田灌溉用水/ $10^8 m^3$	0.104
能源系统	煤炭/t	0.085
	液化石油气/t	0.507
	天然气/ $10^4 m^3$	0.277
	电力/ $10^4 (kW \cdot h)$	0.131
粮食系统	粮食产量/t	0.326
	粮食人均占有量/kg	0.300
	粮食消耗量/t	0.104
	有效灌溉面积/ hm^2	0.078
	粮食播种面积/ hm^2	0.192

表4 甘肃省2000-2016年W-E-F系统综合指数、耦合度以及耦合协调度

年份	水资源系统 $W(w)$	粮食系统 $F(f)$	能源系统 $E(e)$	综合评价 指数 $Z(z)$	耦合度 D	耦合协 调度 N	耦合 程度	耦合协调 类型
2000	0.348	0.181	0.336	0.288	0.320	0.304	颀颀阶段	轻度失调衰退类
2001	0.682	0.241	0.667	0.530	0.301	0.399	颀颀阶段	轻度失调衰退类
2002	0.378	0.245	0.575	0.399	0.314	0.354	颀颀阶段	轻度失调衰退类
2003	0.209	0.396	0.306	0.304	0.322	0.313	颀颀阶段	轻度失调衰退类
2004	0.846	0.269	0.073	0.396	0.215	0.292	低水平耦合阶段	中度失调衰退类
2005	0.381	0.328	0.085	0.265	0.277	0.270	低水平耦合阶段	中度失调衰退类
2006	0.811	0.336	0.102	0.416	0.242	0.318	低水平耦合阶段	轻度失调衰退类
2007	0.329	0.428	0.127	0.294	0.296	0.295	低水平耦合阶段	中度失调衰退类
2008	0.359	0.490	0.163	0.337	0.302	0.319	颀颀阶段	轻度失调衰退类
2009	0.501	0.584	0.221	0.435	0.307	0.366	颀颀阶段	轻度失调衰退类
2010	0.612	0.640	0.171	0.475	0.286	0.368	低水平耦合阶段	轻度失调衰退类
2011	0.816	0.695	0.173	0.561	0.274	0.392	低水平耦合阶段	轻度失调衰退类
2012	0.815	0.788	0.212	0.605	0.283	0.414	低水平耦合阶段	濒临失调衰退类
2013	0.417	0.868	0.204	0.496	0.282	0.374	低水平耦合阶段	轻度失调衰退类
2014	0.185	0.921	0.221	0.442	0.253	0.334	低水平耦合阶段	中度失调衰退类
2015	0.277	0.964	0.268	0.503	0.275	0.372	低水平耦合阶段	中度失调衰退类
2016	0.550	0.900	0.271	0.574	0.298	0.413	低水平耦合阶段	濒临失调衰退类

为了能更直观地反映 2000-2016 年甘肃省 W-E-F 系统的发展轨迹,将表 4 中各子系统的综合评价指数、耦合度及耦合协调度计算结果绘制为图 2、3。

由图 2 可知,甘肃省 2000-2016 年 W-E-F 的综合评价指数的变化除了水资源系统的变化波动较大之外,能源系统与粮食系统的变化较稳步发展。W-E-F 系统综合指数变化趋势分为 3 个阶段,2000-2001 年处于上升阶段,处于轻度协调衰退类,2002-2007 年处于波段变化阶段,2008-2016 年处于“N”形的变化趋势,主要由于在此阶段水资源系统指数变化波动较大,水资源系统对 W-E-F 的综合指数变化影响显著。

水资源系统指数处于 0.10 ~ 0.80,基本呈现“2N+M”的变化趋势,变化幅度较大。2001-2003 年处于下降阶段,主要受严重自然灾害(降水量)的影响较大,2003-2007 年呈现“M”的变化趋势,由于 2004、2006 年水资源总量和年降水量达到最大值,2007-2016 年呈现“N”的发展趋势,由于 2007 年年降水量和水资源总量分别比上年少 25.40%、23.51%,2011 年水资源总量比上年多 10.50%,2014 年水资源总量比多年平均值减少 24.19%,导致水资源系统指数在此时间段呈现“N”的变化趋势。能源系统指数基本介于 0.10 ~ 0.70,其发展趋势大体分为两个阶段,2000-2003 年为第 1 阶段,呈现剧烈波动特征,其中 2001 年最大为 0.667,2004 年最小为 0.073,主要受液化石油气使用的影响;2004-2016 年为第 2 阶段,呈现出波动上升趋势特征,主要是由于受到“西气东输”工程的影响,天然气开始在甘肃省广泛大量使用,天然气的使用量由 2004 年的 $2.1936 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2016 年的 $16.8571 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均使用量以 1.5 倍的速率增长。粮食综合评价指数随时间呈明显上升的趋势,主要是由于 2000-2016 年粮食的产量、播种面积以及有效灌溉面积逐年增加。

由图 3 可知,2000-2016 年甘肃省 W-E-F 系统耦合度 D 介于 0.21 ~ 0.32。耦合度年际间基本上保持平稳状态,波动较小,处于低水平耦合阶段和颀颀阶段,说明甘肃省 W-E-F 系统之间的耦合程度较低,与甘肃省生态、经济、社会发展程度相适应。大体分为 2 个阶段,2004 年以前为第 1 阶段耦合度较高,表明甘肃省水资源-能源-粮食系统耦合相适应。2004 年降到最低值 0.215,其主要原因是 2004 年甘肃省在 3 个时段分别发生了干旱、低

温冻害以及汛期的自然灾害,其中 5 月中旬至 7 月中旬的干旱时段最严重,导致粮食产量下降,全省受灾面积达 $613\ 336.40 \text{ hm}^2$ ^[27]。第 2 阶段从 2005 年开始,耦合度有所增加,但没有达到 2003 年之前状态,表明甘肃省水资源-能源-粮食系统耦合程度降低,主要原因是经济社会发展导致水资源和能源的需求增大。

甘肃省 W-E-F 系统的耦合协调度 N 介于 0.27 ~ 0.42,说明甘肃省 W-E-F 系统协调发展水平较低,协调类型大多为失调衰退型,且耦合协调度变化趋势大致与 W-E-F 综合指数的变化趋势相似,说明甘肃省 W-E-F 系统协调发展水平较低,不利于甘肃省生态-经济-社会的协调发展。2000 年耦合协调度低于耦合度,值为 0.304,处于轻度失调衰退类,2000-2001 年处于急剧上升阶段,主要是受此阶段水资源与能源资源急剧上升的影响,2001 年之后耦合协调度的发展趋势基本都高于耦合度,耦合协调类型由 2002 年的轻度失调衰退类发展为 2016 年濒临失调衰退类过渡阶段。虽然 2012 年 W-E-F 系统的耦合协调度达到最大值 0.414, W-E-F 系统的耦合协调度处于最好阶段,但其最大值低于 0.5,尚未进入勉强协调发展阶段。

3.2 甘肃省水-能源-粮食的空间格局变化分析

本文进一步研究了 2000-2016 年甘肃省 14 个地级市的平均 W-E-F 的综合评价指数(图 4)、耦合度以及耦合协调度(图 5)的空间分布特征。由图 4 可知,2000-2016 年 17a 甘肃省平均水资源空间分布不均匀,中部地区低于河西地区、甘南以及陇南,主要受水资源的影响,其中中部地区降水量较少;河西地区有三大内陆河流域,水资源相对丰富。能源资源综合评价指数高的区域集中于中西部,兰州、酒泉最突出,与经济发展水平区域分布一致;其次是庆阳、天水、武威等,武威地区主要受煤炭使用量多的影响;嘉峪关、甘南、金昌的能源资源综合评价指数最低,甘南地区主要受天然气的影响。粮食资源的综合评价指数较水资源、能源资源的综合评价指数较高,粮食资源综合指数较高区域分布于陇南,主要受粮食产量最高的影响;其次是张掖、定西、天水、平凉、庆阳等地区,其中张掖受灌溉面积的影响较大;嘉峪关综合指数最小,主要受其有效灌溉面积和产量较低的影响较大。

由图 5 可知,2000-2016 年 W-E-F 的平均耦合度较低,基本处于低水平耦合和颀颀两个阶段,除武威、酒泉耦合度处于颀颀阶段,其余各市处于低

水平耦合阶段。W-E-F的耦合协调度基本处于失调衰退和濒临衰退阶段,其中协调度较高的区域主要分布于东西两端以及中部的部分城市,酒泉、兰州等地较高,其次是白银、定西、平凉、临夏、甘南州

处于中度失调衰退类,低协调度主要集中于嘉峪关区域。说明2000-2016年甘肃省W-E-F耦合系统发展不协调、不平衡,且地区间W-E-F系统耦合度存在显著差异。

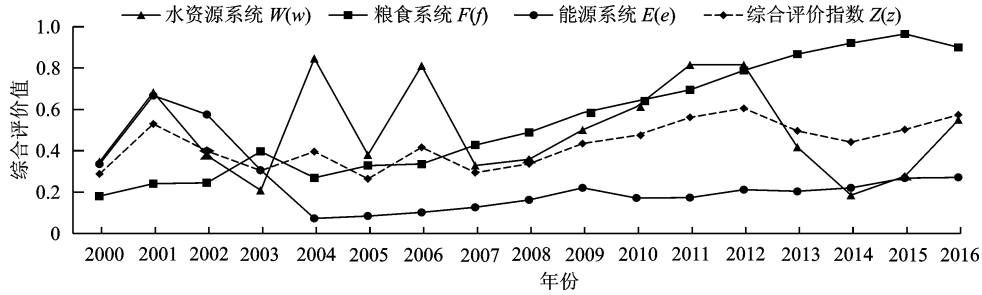


图2 2000-2016年甘肃省W-E-F系统综合评价指数变化趋势

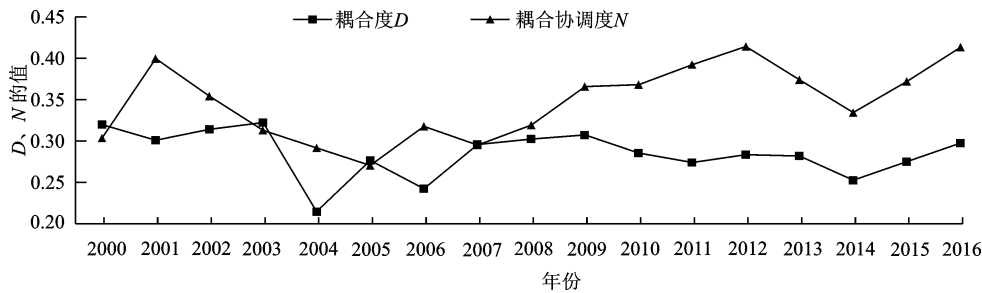


图3 2000-2016年甘肃省W-E-F系统耦合协调变化趋势

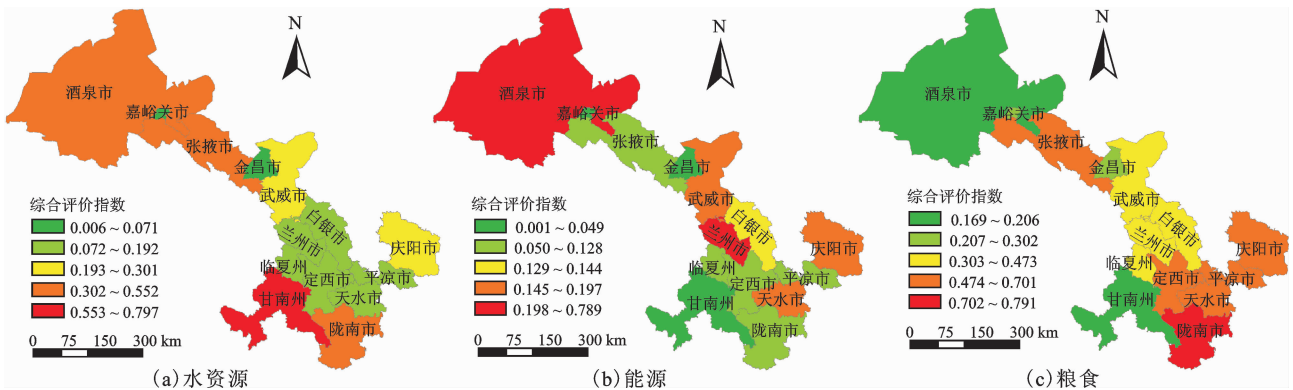


图4 2000-2016年甘肃省平均W-E-F的综合评价指数分布

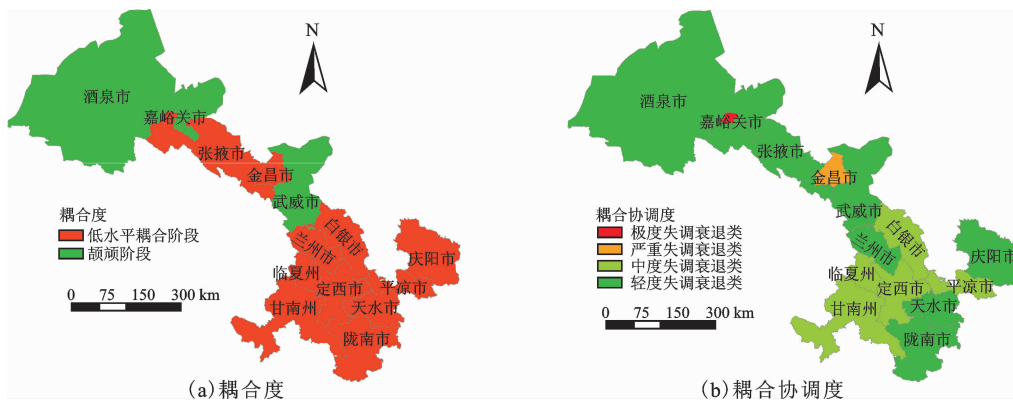


图5 2000-2016年甘肃省平均W-E-F的耦合度和耦合协调度

3.3 甘肃省水-能源-粮食耦合协调变化的驱动力分析

以甘肃省 14 个地级市 2000 - 2016 年的平均耦合协调度作为因变量的原始值,选取社会因素、经济因素和生态因素 3 个方面包括常住人口、城镇化、地区 GDP、人均耕地面积、有效灌溉面积 5 个指标作为自变量的原始值,对所有的变量进行取对数。并计算自变量的方差膨胀系数(VIF)和 Kappa 系数进行多重共线性检验,得到各指标的 K 值均小于 0.20, VIF 均小于 5,所以自变量间不存在多重共线性问题。本文选取“自适应”核函数的 AICc 的方法,结果显示拟合结果 R^2 均在 0.76 以上, AICc 值小于 50,由 GWR 结果表明,地区 GDP 对 W-E-F 协调度的影响不显著, R^2 约为 0.16。图 6 为 2000 - 2016 年甘肃省 GWR

模型自变量回归系数估算空间分布。由图 6 可知,2000 - 2016 年甘肃省 W-E-F 系统的协调变化因素,其中正向因素按影响程度从大到小次序为常住人口、人均耕地面积、有效灌溉面积;而城镇化与 W-E-F 协调度之间存在既有正向又有逆向的影响。白景锋等^[10]研究认为社会因素人口密度是影响 W-E-F 压力的第一驱动力,生产条件有效灌溉面积和人均耕地面积是第二驱动力,经济因素城市化率和人均 GDP 是第三驱动力;赵荣钦等^[28]从自然、社会、经济 3 个方面对水-土-能-碳的耦合机制研究,认为经济因素是影响水-土-能的决定性因素;张慧等^[29]在粮食生产的基础上对耕地压力的影响因素进行分析,研究得出社会经济因素对耕地压力的变动更显著;与本研究结果一致性。

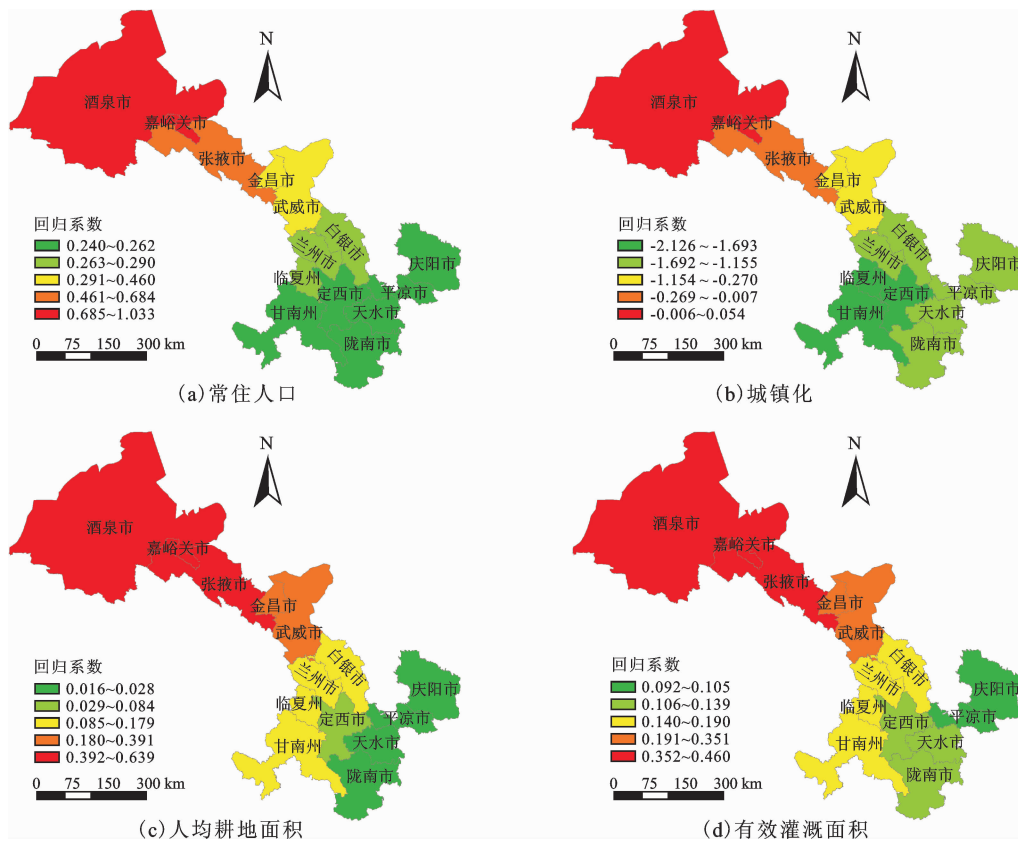


图 6 2000 - 2016 年甘肃省 GWR 模型自变量回归系数估算空间分布

常住人口对 W-E-F 系统的影响最为显著。常住人口与 W-E-F 协调度变化为正相关,空间上呈现从西北向东南递减,其影响最大值集中在张掖、酒泉,说明人口的增加使农村劳动力增加,有利于提高 W-E-F 系统协调度的,而影响程度最小值主要集中在定西、甘南、陇南、天水、平凉、庆阳,人口对不同地区 W-E-F 系统的影响存在差异。其

次是人均耕地面积与 W-E-F 协调度变化为正相关,其影响强度在空间上呈现自西向东逐渐递减,其影响最大值在酒泉、嘉峪关、张掖,而影响最小值在陇南、天水、平凉、庆阳,说明人均耕地面积对不同地区 W-E-F 系统的影响存在显著的差异。有效灌溉面积与 W-E-F 系统协调度变化呈现正相关,空间上呈现从西北向东北递减,其影响范围最大值

均集中在酒泉、嘉峪关、张掖,而影响程度最小的主要集中在平凉、庆阳,与有效灌溉面积在空间上呈现自西向东逐渐递减的变化趋势相吻合,说明增加有效灌溉面积可以提高 W-E-F 系统的协调度。城镇化对 W-E-F 的协调变化的影响有明显的区域差异,在西北方向呈现逆向影响,即城镇化率越高,则 W-E-F 协调度越小;在东部方向呈现正向影响,即城镇化程度越高,则 W-E-F 协调度越大。与本文研究的与农业相关的 W-E-F 协调有很大的关系,随着城镇化加快,耕地面积锐减、农村劳动力大量外流,对粮食产量产生了一定的负向影响,使得城镇化在某些地区的 W-E-F 的协调度较低。由此可见,不同因素在空间上具有不同的影响方向和影响程度。

4 结 论

本文以甘肃省为研究对象,通过选取 W-E-F 系统的评价指标体系,构建 W-E-F 系统耦合模型,研究了 2000-2016 年 W-E-F 系统的耦合协调度时空特征,得到以下主要结论:

(1) 甘肃省 W-E-F 系统的综合评价指数呈显“N”型变化趋势。受年降水量的影响,水资源系统评价指数随时间变化较大,对 W-E-F 的综合评价指数的贡献最大;受液化石油气和“西气东输”的工程影响,能源综合评价指数变化较大,但总体呈缓慢上升趋势;粮食的综合评价指数随时间呈明显的上升趋势。虽然 W-E-F 3 个子系统的变化趋势不同,但 3 个子系统的评价指数之间具有一定的关联关系,提高各自的发展水平,有助于 W-E-F 整体的协调发展。

(2) 甘肃省 W-E-F 系统的耦合度处于 0.21~0.32,变化不大且基本保持平稳状态,处于低水平耦合阶段和颀颀阶段,说明 W-E-F 3 个系统之间的耦合不协调;W-E-F 系统的耦合协调度处于 0.27~0.42,呈显波动上升的趋势,耦合协调类型大多为失调衰退型。虽然 2012 年 W-E-F 系统的耦合协调度达到最大值 0.414,但它的最大值小于 0.50,尚未跨入勉强协调发展阶段,有很大的发展提升空间。

(3) 甘肃省 W-E-F 系统的耦合度、耦合协调度存在空间分布差异性。2000-2016 年甘肃省耦合度变化趋势由甘肃省河西走廊-陇中-陇南地区耦合度由颀颀阶段向低水平耦合阶段变化;耦合协调度由陇中黄土高原部分区域的严重失调衰退类向

河西走廊、陇南地区、甘南的轻度失调衰退类过渡。

(4) 由 GWR 研究发现,不同因素在不同区域的影响方向和程度是不同的。常住人口、人均耕地面积、有效灌溉面积与 W-E-F 协调度的变化是同向,城镇化与 W-E-F 协调度变化既有正向又有负向的影响,而地区 GDP 对 W-E-F 协调度变化的影响不显著。

参考文献:

- [1] WELLYNGTON S D A, ISABELA B V, JOAO M P R, et al. The nexus between water, energy, and food in the context of the global risks: An analysis of the interactions between food, water, and energy security[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2018, 72:1-11.
- [2] LI Guijun, HUANG Daohan, LI Yulong. China's input-output efficiency of water-energy-food nexus based on the data envelopment analysis (DEA) mode[J]. *Sustainability*, 2016, 8(9):927-942.
- [3] 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.
- [4] KARATAYEV M, RIVOTTI P, MOURÃO Z S, et al. The water-energy-food nexus in Kazakhstan: challenges and opportunities[J]. *Energy Procedia*, 2017, 125:63-70.
- [5] SMAJGL A, WARD J, PLUCSHKE L. The water-food-energy Nexus - Realising a new paradigm[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533:533-540.
- [6] LI Mo, FU Qiang, VIJAY P S, et al. An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty[J]. *Science of the Total Environment*. 2019, 651:1416-1434.
- [7] SALADINI F, BETTE G, FERRAGINA E, et al. Linking the water-energy-food nexus and sustainable development indicators for the Mediterranean region[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91:689-697.
- [8] CHRISTOPHER L, JACOPO B, MEGAN K, et al. The U.S food-energy-water system: A blueprint to fill the mesoscale gap for science and decision-making[J]. *Ambio*, 2019, 48(3):251-263.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] WANG Qiang, LI Siqi, HE Gang, et al. Evaluating sustainability of water - energy - food (WEF) nexus using an improved matter - element extension model: A case study of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 1097 - 1106.
- [14] 鲍淑君,贾仰文,高学睿,等. 水资源与能源纽带关系国际动态及启示[J]. 中国水利,2015(11):6 - 9.
- [15] 刘渝,张俊飏. 中国水资源生态安全与粮食安全状态评价[J]. 资源科学,2010,32(12):2292 - 2297.
- [16] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报,2014,22(8):880 - 885.
- [17] 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.
- [18] 《甘肃年鉴》编委会. 甘肃统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2017.
- [19] 李二玲,崔之珍. 中国区域创新能力与经济发展水平的耦合协调分析[J]. 地理科学,2018,38(9):1412 - 1421.
- [20] 钟霞,刘毅华. 广东省旅游 - 经济 - 生态环境耦合协调发展分析[J]. 热带地理,2012,32(5):568 - 574.
- [21] 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.
- [22] PEREIRA L S. Water, agriculture and food: challenges and issues [J]. Water Resource Management, 2017, 31 (10): 2985 - 2999.
- [23] 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.
- [24] 张玉萍,瓦哈甫·哈力克,党建华,等. 吐鲁番旅游 - 经济 - 生态环境耦合协调发展分析[J]. 人文地理,2014,138(4):140 - 145.
- [25] 杨丽霞,杨桂山,姚士谋,等. 基于 ESDA - GWR 的粮食单产及其驱动因子的空间异质性研究[J]. 经济地理,2012,32(6):120 - 126.
- [26] 赵静,蒲越. 混合地理加权回归模型的两步法估计及其应用[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学·医学版),2017,38(2):20 - 27.
- [27] 《甘肃年鉴》编委会. 甘肃统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2005.
- [28] 赵荣钦,李志萍,韩宇平,等. 区域“水 - 土 - 能 - 碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报,2016,71(9):1613 - 1628.
- [29] 张慧,王洋. 中国耕地压力的空间分异及社会经济因素影响——基于 342 个地级行政区的面板数据[J]. 地理研究,2017,36(4):731 - 742.

(上接第 114 页)

- [11] 滕杰,郭明,周政辉. 汉江上游径流非一致性演变特征及频率分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):106 - 112 + 126.
- [12] 覃姗,岳春芳,何兵,等. 金沟河流域水文气象要素关系变异诊断[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(2):50 - 56.
- [13] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [14] 张波,谷晓平,古书鸿,等. 近 55 年贵州省潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):20 - 26.
- [15] IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 37.
- [16] 郑锦涛. 气候变化驱动下玛纳斯河山区径流演变规律研究[D]. 石河子:石河子大学,2018.
- [17] 徐春海,王飞腾,李忠勤,等. 1972 - 2013 年新疆玛纳斯河流域冰川变化[J]. 干旱区研究,2016,33(3):628 - 635.
- [18] 韩蓉. 气候变化对玛纳斯河流域积雪消融的影响研究[D]. 石河子:石河子大学,2017.
- [19] 牛奉高,刘维奇. 分数布朗运动与 Hurst 指数的关系研究[J]. 山西大学学报(自然科学版),2010,33(3):380 - 383.