

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.012.

王锐, 祝笑笑, 彭艳艳, 等. 2000—2020年黄河流域水—能源—粮食系统耦合协调时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 354-362.

Wang Rui, Zhu Xiaoxiao, Peng Yanyan, et al. SpatioTemporal Characteristics of Water-Energy-Food Coupling Coordination in the Yellow River Basin in the Period from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 354-362.

2000—2020年黄河流域水—能源—粮食系统 耦合协调时空演变特征

王锐¹, 祝笑笑¹, 彭艳艳¹, 赵素霞^{1,2}, 肖东洋^{1,2}

(1.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000;

2.河南理工大学 黄河生态文明与高质量发展研究院, 河南 焦作 454000)

摘要: [目的] 探讨黄河流域水—能源—粮食系统的耦合协调时空演化特征, 可为定量评估流域高质量发展和区域可持续发展提供科学依据。 [方法] 通过耦合协调度模型分析水—能源—粮食系统的综合发展水平和耦合协调特征, 并利用灰色关联度对各子系统内部指标进行排序, 进而判断对水—能源—粮食系统耦合协调度的影响程度。 [结果] (1) 黄河流域水—能源—粮食系统的综合发展指数呈上升趋势, 水资源子系统波动幅度最大。(2) 2000—2020年黄河流域水—能源—粮食系统耦合协调度从初级协调向良好协调阶段发展; 不同省区间的系统耦合协调发展水平差异较为明显, 整体上可表现为上游地区 > 中下游地区。(3) 各子系统与系统耦合协调度的影响程度排名可表示为水资源子系统 > 粮食子系统 > 能源子系统, 其中水资源子系统内部指标与系统耦合协调度关联度均在 85% 以上, 水资源子系统相对其他子系统的严格管理尤为重要。 [结论] 水—能源—粮食系统的耦合协调发展水平有待提高, 为促进系统协调发展和流域高质量发展应综合考虑各子系统的相互作用关系。

关键词: 黄河流域; 水—能源—粮食系统; 耦合协调度模型; 灰色关联度分析

中图分类号: TV213; F205

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0354-09

SpatioTemporal Characteristics of Water-Energy-Food Coupling Coordination in the Yellow River Basin in the Period from 2000 to 2020

Wang Rui¹, Zhu Xiaoxiao¹, Peng Yanyan¹, Zhao Suxia^{1,2}, Xiao Dongyang^{1,2}

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic

University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Institute of Ecological Civilization and

High-Quality Development of Yellow River, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the coordinated spatiotemporal evolution of water-energy-food system in the Yellow River Basin, and to provide scientific basis for quantitative evaluation of high quality development and regional sustainable development. [Methods] Through the coupling coordination degree model, the comprehensive development level and coupling coordination characteristics of water-energy-food system were analyzed. And the grey correlation degree was used to sort the internal indicators of each subsystem, and then the influence degree on the coupling coordination degree of water-energy-food system was judged. [Results] (1) The integrated development index of the water-energy-food system in the Yellow River Basin showed an increasing trend, and the fluctuation of water resources subsystem was the largest. (2) The coupling coordination degree of water-energy-food system in the Yellow River Basin developed from primary coordination to good coordination stage during 2000—2020. From the perspective of space, the

收稿日期: 2022-11-03

修回日期: 2022-12-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于异源遥感数据融合的水旱交错区稻田灌溉时空演变特征研究”(42201297); 国家自然科学基金项目“豫东南地区气候变化的耕地利用适应策略及实施效应”(U1504401); 河南省高校科技创新团队支持计划“区域生态演变与调控”(22IRTSTHN008)

第一作者: 王锐(1978—), 男, 山西平鲁人, 博士, 副教授, 主要从事水土资源管理、水文生态研究。E-mail: wangrui.phd@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

development level of coupling coordination degree between different provinces and regions was significantly different, which could be shown as the upstream region > the middle and downstream region. (3) The ranking of the influence degree of the coupling coordination degree of each subsystem and system could be expressed as water resources subsystem > food subsystem > energy subsystem. The correlation degree between the internal factors of the water resources system and the coupling coordination degree of the system was above 85%. The strict management of the water resources system was particularly important compared with other subsystems. [Conclusion] The coupling and coordinated development level of water-energy-food system needs to be improved. In order to promote the coordinated development of the system and the high-quality development of the basin, the interaction of subsystems should be considered comprehensively.

Keywords: water-energy-food system; coupling coordination model; grey correlation degree analysis; Yellow River Basin

水资源、能源和粮食不仅是人类生存必不可少的物质基础,也是经济社会可持续发展的必要支撑,受全球气候变化、人口快速增长、生活方式不断改变以及生态系统退化等影响,资源有限的供给和不断增长的需求之间的矛盾在全球范围内日益加剧^[1],水资源短缺、粮食供应不稳定、能源需求旺盛已成为人类社会面临的重挑战^[2]。因此,实现水—能源—粮食系统协调与可持续发展是全球各个国家及区域都亟需解决的重大问题。

对于水资源、能源和粮食问题,多数研究关注的重点聚焦于某一项资源或两两资源之间的关系,并已进行了大量长期系统深入的研究和总结,而三者作为整体研究相对滞后^[3]。如康绍忠、张建业、孙才志等分别从定性和定量的角度分析水—粮食、能源—粮食、水—能源等两两资源之间的关系^[4-7],这对厘清两资源之间关系,为相应部门内部优化资源配置方案提供了理论基础,但单一资源或者两两资源整合的研究成果尚不足以支撑区域可持续发展决策方案的制定和执行,甚至会产生决策失误的可能^[8]。因此,将水、能源和粮食作为系统纽带进行整体研究显得尤为重要。

目前,许多学者们将关注点聚焦在水—能源—粮食的供需安全以及耦合协调发展领域,在全国^[9-11]、省级^[12-14]和市级等^[15-17]不同行政尺度下对其时空异特征和耦合协调发展过程进行研究。黄河流域是我国重要的粮食主产区和能源富集区,也是一个复杂的、耦合的社会—经济—生态复合系统,在区域可持续发展中具有重要的战略地位。黄河流域水资源开发利用率已达到 80%,远超一般流域 40%生态警戒线^[18],水资源短缺已成为制约能源和粮食发展的关键因素。为了满足日益增长的水、能源和粮食需求而对水资源过度开发利用可能会威胁到高产而脆弱的流域生态系统,刘华军^[19]、关伟^[20]、高甜^[21]等从单一资源或者两两资源进行了研究,而将黄河流域水资

源、能源和粮食作为整体的系统研究^[22-24]仍需加强。因此,从水资源约束和生态脆弱性的角度考虑,科学探究黄河流域 W-E-F 系统内部耦合协调关系和安全状况,对于促进流域资源可持续发展和高质量发展具有至关重要的作用。

以黄河流域九省(区)为研究区域,从水资源、能源、粮食子系统中分别选取 9 个指标,结合实际情况构建适合当地的 W-E-F 系统耦合评价体系,采用 CRITIC 赋权法确定指标权重,对流域 2000—2020 年 W-E-F 系统进行分析评估,通过耦合协调度模型测算其耦合协调度,研究地区 W-E-F 系统的时空差异及耦合协调变化特征,为黄河流域 W-E-F 系统纽带的资源管理和可持续利用提供理论参考。

1 研究区概况

从行政区划角度看,黄河全长 5 464 km,流域总面积 79.5 万 km²,自西向东依次流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省区(图 1),从自然资源角度看,是我国重要的水资源分布区、能源开发重要工业带以及农业经济带。

2020 年,黄河流域九省区的总人口约 4.37 亿人,占全国总人数的 31%;地区生产总值约 25.39 万亿元,占全国 GDP 总量的 25%,黄河流域为我国经济社会发展提供了有力的支撑,但同时也潜藏了巨大的生态风险。从水资源方面看,2020 年沿黄九省(区)用水总量达到 1 258.7 亿 m³,流域内人均水资源量不及全国平均水平的 1/4,却需要承担该区域生产、生活和生态等多种供水需求,空间分布不均匀,表现出明显的地区差异性;从能源角度讲,黄河流域蕴藏着丰富的煤炭、石油、天然气等资源,煤炭作为黄河流域传统化石能源的主体,例如:2020 年该区域煤炭产量约占全国煤炭的 80%,因煤矿的开采每年增加的水量超过 100 亿 t^[25],不仅会对生态环境造成破坏,

产生水资源、土地的污染以及矿区塌陷等生态损害问题,而且会消耗巨大的水资源;从粮食方面看,黄河流域作为我国重要的粮食主产区,2020 年粮食总产量高达 2.39 亿 t,占全国粮食总产量的 35.63%,但农业生产占用了 71% 的水资源^[26],远超全国 61.5% 的平均值,粮食产能的提升存在严重制约。

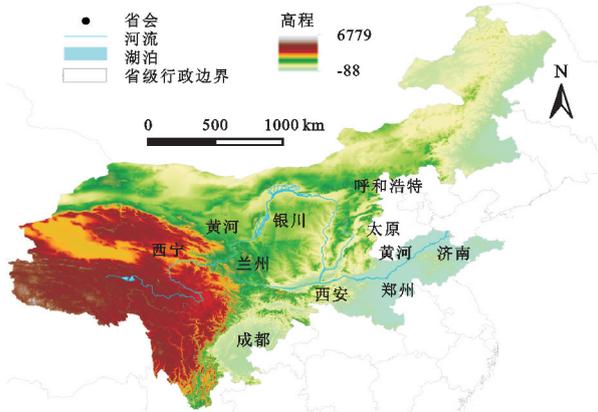


图 1 黄河流域九省(区)地理位置

Fig. 1 Geographical location map of nine provinces (regions) in the Yellow River Basin

2 研究方法

2.1 指标体系构建及数据来源

水—能源—粮食系统是由各子系统相互作用而组成的复合系统,且各子系统间存在着密切联系。根据研究区域的实际情况,遵循指标系统性、代表性和数据可获得性的原则,在参考已有研究成果^[10,23,27]的基础上选取 27 个指标,构建了黄河流域 W-E-F 系统综合评价指标体系(表 1)。

在综合评价指标体系中,水资源子系统从水量、结构和效益角度考虑,其中可利用水资源量、人均水资源量和产水系数反映一个地区的水资源状况;农业、工业、生活和生态用水量占比反映各产业结构的用水状况,生态用水占比越大,用水结构越利于社会和自然系统和谐;单位 GDP 用水量和万元工业增加值用水量作为节水型社会的核心指标之一,能直观反映黄河流域经济社会发展的水资源利用效率和效益。能源子系统主要从总量、结构和效益三方面的角度来考虑,能源子系统中结构指标主要是水力发电量占比和煤炭消费量占比,水力发电量占比越大,说明该区域清洁能源产业不断发展壮大。粮食子系统主要选择与水资源、能源相关指标,粮食作物产量的波动直接影响国民经济发展,农用机械总动力是反映农业机械化发展状况的一个重要指标,有效利用化肥有益于我国粮食安全和现代农业可持续发展,有效灌溉面积是衡量地区水利化程度和农业生产稳定程度的重要

指标;人口自然增长率能够反映人口增长对粮食需求的影响,粮食作物水足迹反映生长单位作物耗水量。

由于选取的指标之间可能存在一定程度的关联关系,在指标权重计算时采用 CRITIC 赋权法。该方法是一种基于数据波动性的客观赋权法,既能反映指标间的相关关系,又解决了指标的变异程度问题^[28],应用极差标准化对原始数据量纲处理后,由 CRITIC 赋权法得到黄河流域九省区水资源、能源、粮食子系统各指标的权重(表 1),并基于此计算出 3 个子系统的发展指数,为计算 W-E-F 系统的耦合协调度提供依据。

基础数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》以及各省统计年鉴等;作物水足迹系数由通过国际水足迹网站(<https://www.waterfootprint.org/en/>)上获取。

2.2 耦合协调度模型

耦合协调度模型是用来分析两者及两者以上系统间相互促进和相互影响的关系。在构建耦合协调度模型之前,首先,计算各子系统的发展指数,分析各子系统的发展情况。其中水资源、能源和粮食子系统发展指数分别用 W_x , E_y , F_z 表示,各子系统标准化后数值依次用 X_{ij} , Y_{ij} , Z_{ij} 表示, w_i , e_i , f_i 为各子系统指标权重,综合发展指数用 T 表示, α , β , γ 代表水资源、能源和粮食子系统的权重,在设定水、能源和粮食对社会发展同等重要^[11,22]的情况下, $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$,具体计算公式如下:

$$W_x = \sum_{i=1}^m w_i X_{ij}; E_y = \sum_{i=1}^m e_i Y_{ij}; F_z = \sum_{i=1}^m f_i Z_{ij} \quad (1)$$

$$T = \alpha W_x + \beta E_y + \gamma F_z \quad (2)$$

其次,构建 W-E-F 系统耦合度模型。耦合度用来描述两个以上的系统或要素之间相互影响的程度,本文涉及 3 个子系统,用耦合度分析 3 个子系统间相互制约的关系,用 C 来表示,其中: $C \in [0, 1]$ 。 C 值越大,表明系统之间越协调,当 $C = 1$ 时表明系统之间处于良性耦合状态。

$$C = \frac{3 \sqrt[3]{W_x E_y F_z}}{W_x + E_y + F_z} \quad (3)$$

最后,为了更好地表明系统间协调发展水平的高低,在 W-E-F 系统耦合度的基础上,引入耦合协调度模型^[29]全面分析黄河流域 W-E-F 系统的耦合协调发展水平。

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (4)$$

式中: D 为耦合协调度,取值范围为 $[0, 1]$,参考已有研究成果^[13,17],W-E-F 系统耦合协调度类型划分标准见表 2。

表 1 黄河流域 W-E-F 系统综合评价指标体系及其权重

Table 1 Comprehensive evaluation index system and its weight for W-E-F system in Yellow River Basin

系统层	指标层	数据来源	类型	权重
水资源子系统	可利用水资源量(亿 m ³)	按水资源总量的 40% ^[27] 计算	正	0.1022
	人均水资源量(m ³ /人)	水资源总量/人口	正	0.1105
	农业用水占比(%)	农业用水量/用水总量	负	0.1288
	工业用水占比(%)	工业用水量/用水总量	负	0.1560
	生活用水占比(%)	生活用水量/用水总量	负	0.1577
	生态用水占比(%)	生态用水量/用水总量	正	0.0868
	单位 GDP 用水量(m ³ /万元)	用水总量/GDP	负	0.0576
	万元工业增加值用水量(m ³ /万元)	工业用水量/工业增加值	负	0.0943
	产水系数	水资源总量/年降水量	正	0.1061
	一次能源生产总量(万 t)	统计数据	正	0.1195
能源子系统	人均能源生产量(t/人)	能源生产总量/总人口	正	0.1028
	能源消费总量(万 t)	统计数据	负	0.1181
	能源消费强度(t/万元)	能源消费总量/地区生产总值	负	0.0858
	发电总量(亿 kW·h)	统计数据	正	0.1110
	水电发电占比(%)	水电发电量/发电量	正	0.1336
	煤炭占比(%)	煤炭消费量/能源消费总量	负	0.0927
	人均能源消费量(t/人)	能源消费总量/总人口	负	0.1178
	农用柴油使用量(万 t)	统计数据	负	0.1188
	粮食作物产量(万 t)	统计数据	正	0.0936
	单位面积粮食作物产量(kg/hm ²)	粮食作物产量/粮食作物播种面积	正	0.0868
粮食子系统	果蔬产量(万 t)	水果产量+蔬菜产量	正	0.1049
	人均粮食产量(kg/人)	粮食作物产量/总人口	正	0.0725
	机械动力(kW/hm ²)	农业机械总动力/农作物播种面积	正	0.0977
	化肥负荷(kg/hm ²)	化肥用量/农作物播种面积	负	0.1460
	有效灌溉面积(千 hm ²)	统计数据	正	0.1129
	人口自然增长率(‰)	统计数据	负	0.0736
	作物总水足迹(亿 m ³)	由不同作物产量与其水足迹系数乘积的总和	负	0.2120

表 2 耦合协调度类型划分标准

Table 2 Coupling coordination degree type classification criteria

取值范围	类型划分	取值范围	类型划分
[0.00,0.10)	极度失调	[0.50,0.60)	勉强协调
[0.10,0.20)	严重失调	[0.60,0.70)	初级协调
[0.20,0.30)	中度失调	[0.70,0.80)	中级协调
[0.30,0.40)	轻度失调	[0.80,0.90)	良好协调
[0.40,0.50)	濒临失调	[0.90,1.00]	优质协调

2.3 灰色关联度分析

灰色关联度分析是一种多因素统计分析方法^[30],通过计算系统内两个因素变化趋势的一致性来判断二者之间的关联程度,确定参考数列和比较数列。本文分别将 3 个子系统中的指标作为影响因素,为了进一步判断系统耦合协调度与子系统内哪些因素的影响程度更强,哪些因素的影响程度弱,通过确定无量纲化处理后的各序列的关联系数,求取关联度并进行排序,从而来判断影响因素对系统耦合协调度的影响程度。

进行灰色关联度分析的参考数列和比较数列为:

$$x_0(k) = \{x_0^1, x_0^2, \dots, x_0^m\} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$x_i(k) = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n\} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: $x_0(k)$ 表示参考数列; $x_i(k)$ 为比较数列;计算灰色关联系数时, $\{x_0(t)\}$ 为无量纲化处理数列,其子数列为 $\{x_i(t)\}$,当 $t=k$ 时,计算 $\{x_0(t)\}$ 与 $\{x_i(t)\}$ 的灰色关联度,具体公式为:

$$\zeta_{oi}(k) = \left| \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho \Delta_{\max}} \right| \quad (7)$$

式中: $\Delta_{oi}(k)$ 为第 k 项两个数列的绝对差值; Δ_{\max} 为各项绝对差的最大值; Δ_{\min} 为各项绝对差的最小值。

根据关联系数进一步计算灰色关联度,计算公式为:

$$E_{oi} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \zeta_{oi}(k) \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 W-E-F 系统综合发展水平演变过程

黄河流域 W-E-F 系统中各子系统 2000—2020 年的发展指数均呈波动上升趋势(图 2)。其中水资源子系统发展指数从 2000 年的 0.419 9 提高到 2020 年

的0.734 5,年均增长率为4.7%。与其他两个子系统相比,水资源子系统的发展过程波动明显,变化趋势呈多个“W”型,拐点分别为2002年、2003年、2006年和2015年,主要受大气环流、季风环流和部分年份的洪水影响,降水量的年际差异影响着研究区水系的波动,尤其是在枯水年和用水较为紧张时期,其供水不足导致农业用水被挤占^[24],进而影响粮食生产;能源子系统发展指数在研究期内总体波动幅度不大,由2000年的0.508 1上升至2020年的0.572 5,年均增长率在0.81%左右,能源子系统发展指数相对较高的省份为山西、内蒙古、陕西、青海、四川等;粮食子系统发展指数从2000年的0.469 1提高到2020年的0.625 3,年均增长率为1.67%,发展趋势可在2016年前后分为较为稳定期和上升期,2016年受结构调整和区域严重自然灾害的影响导致粮食总产量减少,与2015年相比,减少0.5%。黄河流域W-E-F系统综合发展指数从2000年0.465 7提高到2020年的0.644 1,年均增长率为1.85%,总体呈上升趋势,但在特定拐点会产生较小的波动幅度,这是受到研究期内各子系统相互作用产生的影响。由此可见,黄河流域整体系统综合发展指数随着3个子系统发展指数的变化而变化,共同影响着整个系统的稳定发展,表明系统存在内部耦合关联。

黄河流域2000—2020年W-E-F系统的综合发展指数均值为0.47,参照已有的研究成果^[23],在中等发展水平左右。流域内不同地区子系统发展水平影响着系统综合发展水平。其中水资源子系统的发展指数均值为0.51,发展指数最高的省份是青海,青海作为多流域的水源发源地,水资源量较大而人口较少,人均水资源量位居流域九省区首位,均大于 $10\ 000\ \text{m}^3/\text{人}$;山东、河南和山西等与流域平均值存在一定差距,山东和河南作为农业大省,大量水资源用于农业生产,而山西本就水资源匮乏加上煤炭开发也消耗大量水资源。

粮食子系统发展指数均值为0.44,发展指数较高的是内蒙古、山东、河南和四川,分别为0.53,0.54,0.53,0.54,内蒙古人口基数小,人均粮食产量高,山东和河南粮食产量高且有效灌溉面积大,四川粮食播种面积扩大,粮食单产提高等使其发展指数高于流域均值;陕西的发展指数均值最低,主要是关中平原随着城市化的快速发展,其耕地向建设用地转移,陕北因退耕还林还草政策的实施,其耕地向林地和草地转移^[31],二者均导致粮食播种面积的不断减少。

能源子系统发展指数均值为0.46,四川、青海、陕西和山西的发展指数较高,分别为0.59,0.56,0.51,0.51,四川是我国的“西电东送”的主产地,2020年水力发电量为3 541.38亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占全国水力发电量

的26.04%,陕西“气化陕西”等能源民生工程的实施^[22],青海的清洁能源开发以及山西能源向绿色低碳转型取得积极进展等促使能源子系统发展指数较高,而山东的发展指数均值最低,能源消费总量激增,且位居九省首位,人均能源消费量也在不断增大。

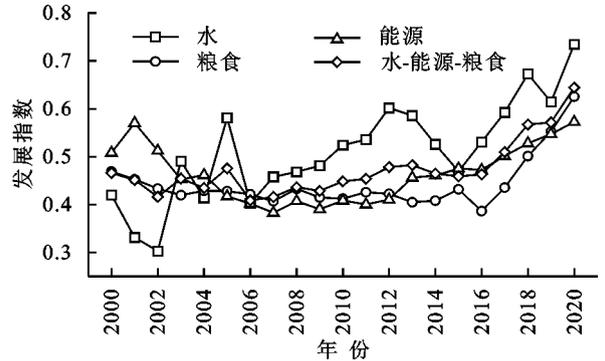


图2 黄河流域W-E-F子系统及综合发展趋势

Fig. 2 W-E-F subsystem and its comprehensive development trend in the Yellow River Basin

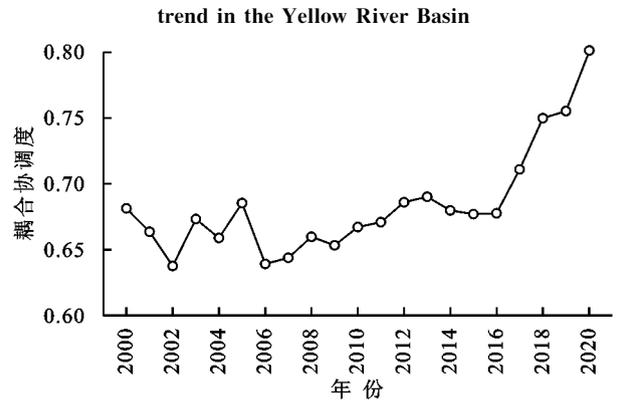


图3 黄河流域W-E-F系统耦合协调度发展趋势

Fig. 3 Development trend of W-E-F coupling coordination degree in Yellow River Basin

综上所述,与黄河流域系统均值相比,水资源子系统均值较大,能源子系统均值比较接近,粮食子系统均值较差,作为粮食主产区,该区域在农业生产方面需要进一步优化。黄河流域W-E-F系统内部存在着相互作用关系,任意子系统的变化均会影响到整个系统的发展。因此,综合考虑系统间的相互作用关系,才能有效促进W-E-F系统的耦合协调发展。

3.2 W-E-F系统耦合协调度时空分析

根据耦合协调度模型计算得到2000—2020年黄河流域W-E-F系统耦合协调度动态变化情况(图3)。结果表明,流域W-E-F系统整体协调发展水平逐步提高,从初级协调阶段向良好协调阶段发展,其耦合协调度从0.681 4上升至0.800 4,在2000—2006年呈波动变化,2006—2016年总体上呈缓慢增加趋势,而2016—2020年则迅速增加。

以2000年、2007年、2014年、2020年为例,通过ArcGIS将黄河流域九省区W-E-F系统的耦合协调

度空间变化进行可视化(图 4)。2000 年,九省区空间分布差异较为明显,除宁夏处于勉强协调阶段和四川处于中级协调阶段以外,其余各省份均处于初级协调阶段;2007 年,黄河流域上游除四川外均处于初级协调阶段,中下游地区的耦合协调度仍保持在初级协调阶段;2014 年青海和内蒙古的发展态势明显向好的

方向发展,由 2007 年的初级协调水平发展到 2014 年的中级协调水平;2020 年,宁夏已从勉强协调阶段上升至初级协调阶段,陕西和山西接近中级协调阶段,四川和内蒙古有望冲向良好协调阶段,其余省份均为中级协调阶段,黄河流域耦合协调度由西北向东南呈现出高一低一高的空间变化格局。

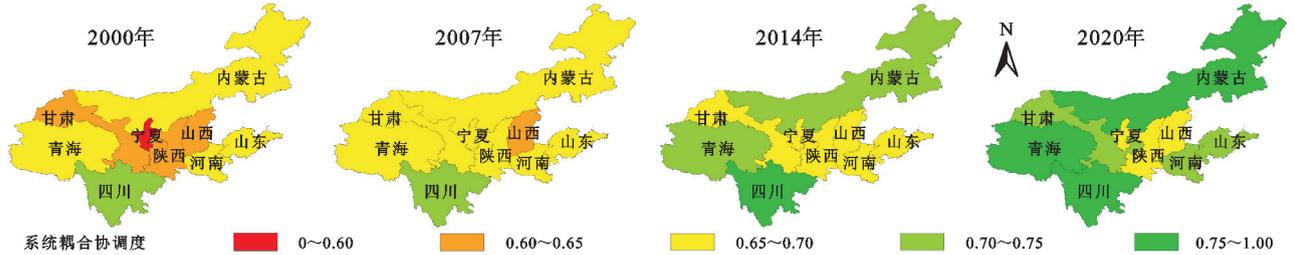


图 4 黄河流域九省区 W-E-F 系统耦合协调度

Fig. 4 Coupling coordination degree of W-E-F system in nine provinces of Yellow River Basin

从整体上来看,黄河流域 W-E-F 系统耦合协调度区域差异较为明显。流域上游的耦合协调度从勉强协调水平向中级协调水平发展,而中下游的耦合协调度从初级协调阶段发展为中级协调阶段。可见,上游省区与中下游省区相比,具有起点低、发展速度快等特征。这与流域上游地区水资源丰富、人口密度较低、人均水资源量相对较高,而经济发展水平相对较弱、水资源开发利用相对较低、单位 GDP 用水量和万元工业增加值用水量相对较高有关。从生态用水方面讲,截至 2020 年底,流域上游生态用水量达 50.8 亿 m^3 ,中下游达到 64.1 亿 m^3 ;与 2000 年相比,上游和中下游生态用水分别增加了 15 倍和 18 倍左右。近些年来,对流域内高耗水、高污染和破坏生态环境企业进行了关停,如督察宁夏石嘴山市整治了化工产业园违规取水和污染隐患等问题,青海关闭了 50 多家高耗能重污染的化工等企业等,对于流域整体生态环境维护和改善也有着积极作用。因此,必须持续重视和加强对流域上游地区的生态环境建设以进一步增加 W-E-F 系统耦合协调度。

流域中游和部分中上游地区是煤炭等资源的富集区,改革开放初期,大量煤炭产业兴起缓解了能源短缺的问题,能源产业的快速发展,中游地区能源生产总量较大,工业化加速推进,以山西、内蒙古和陕西为代表的能源大省形成了以传统能源为主的产业经济模式。如 2020 年山西的能源生产和消费比例高达 3.58 : 1,大量煤炭需要外销,但结构相对单一的能源经济在支撑该区域经济社会发展的同时,也为该区域生态系统治理和可持续发展带来了巨大压力,使得 W-E-F 系统的协调性、平衡性变得极不稳定。随着绿色发展模式的施行,煤炭占比降低,水力发电量占比增高,这说明了传统的产煤大省不断提高发展的

“含绿量”,促进煤炭高效集约节约利用。新兴产业不断壮大,生态环境持续向好,同时人们环保意识的普遍提升,能源资源利用效率和清洁能源供应得到了提升,绿色低碳的生活方式成为发展方向。

流域下游和部分中下游地区是粮食主产区,农业生产规模大,经济发展水平较高,粮食作物和果蔬产量高,2020 年黄河流域的粮食产量和果蔬产量分别是 2000 年的 1.5 倍和 1.4 倍,农业生产需要消耗大量水资源,而且过量施用农药、化肥等在提高粮食产能的同时,也造成了土壤质量退化、形成了深层地下水漏斗区等,引发了一系列生态环境问题;同时,中下游地区人口较为集聚,随着生活水平提高,生活用水也不断增加。由此,生产和生活大量耗水对该区域农业生产发展、人们健康生活和生态环境建设等都面临着较大的压力,不利于该地区 W-E-F 系统耦合协调发展。

3.3 灰色关联度分析

将 W-E-F 系统耦合协调度作为被解释变量,系统内指标作为解释变量,利用 SPSSAU 计算系统耦合协调度与各因素的关联度并排序(表 3)。从关联度值计算结果看,水资源子系统中各因素总体上对 W-E-F 系统耦合协调度的影响最大,均在 85% 以上,粮食子系统各因素的总体影响程度大于能源子系统。

在水资源子系统中,关联度排名在前三名的分别为农业用水量占比、工业用水量占比和产水系数且均在 90% 以上,其中前两名均为用水结构占比,黄河流域作为粮食主产区和能源富集区,在研究期内,农业和工业用水占流域总用水量均值为 84%,二者对系统的耦合协调度起着显著影响,而降水量的多少也明显影响着系统的耦合协调度。

在能源子系统中,煤炭占比的关联度也超过了 90%,大于 80% 的有 3 个影响因素,万元 GDP 能耗代表

着能源利用效率,在使用传统能源过程中,尽可能地集约节约利用,提高利用效率,也有利于流域生态保护。

在粮食子系统中,关联度超过 80% 的影响因素有 5 个,其中农业机械动力和化肥负荷对提高农业生产效率具有积极影响,但长期利用在一定程度上加剧生态系统的脆弱性。人均粮食产量和人均能源消费量均与人口数量有密切关系,而人类对生活品质的逐渐提高,对水资源、能源和粮食的需求量也就越大,黄河流域中下游地区的人口密度较大,相对需要消耗更多的资源,区域资源供应的不协调,不利于水—能源—粮食系统之间平衡。

表 3 系统耦合协调度与各子系统指标的关联度

Table 3 The correlation degree between the system coupling coordination degree and each subsystem index

系统项	评价项	关联度	排名
水资源子系统	可利用水资源量	0.875	6
	人均水资源量	0.847	9
	农业用水占比	0.972	1
	工业用水占比	0.933	2
	生活用水占比	0.924	4
	生态用水占比	0.885	5
	万元工业增加值用水量	0.863	8
	单位 GDP 用水量	0.866	7
	产水系数	0.926	3
	一次能源生产总量	0.722	7
	能源消费量	0.773	4
	人均能源消费量	0.802	3
	农用柴油使用量	0.749	6
能源子系统	能源消费强度	0.813	2
	发电量	0.769	5
	煤炭占比	0.902	1
	水电发电量占比	0.647	9
	人均能源生产量	0.711	8
	粮食作物产量	0.672	7
	人均粮食产量	0.824	3
	粮食单产	0.882	1
	果蔬产量	0.656	9
	粮食子系统	机械动力	0.832
化肥负荷		0.810	4
人口自然增长率		0.808	5
有效灌溉面积		0.704	6
作物总水足迹		0.671	8

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 通过对 W-E-F 系统耦合协调度的影响因素定量分析可知,水资源子系统中各因素与 W-E-F 系

统耦合协调度之间的关联度均在 0.85 以上,也就是说子系统中水资源量大小和水资源利用结构将显著影响流域 W-E-F 系统的耦合协调水平。当前黄河流域水资源仍存在粗放利用且效率不高,生产、生活和生态用水供需矛盾等突出问题。以水资源为约束条件,必须对流域水资源进行科学规划,不断优化用水结构。在农业上要以节水提效为方向,大力发展节水灌溉,建设节水生态型灌区,推广高效节水灌溉技术;在工业上实施阶梯用水、循环用水等节水措施,淘汰落后技术,推广先进工业节水技术。流域各区域因资源差异造成各省分工定位不同,各地区需发挥自身产业优势因地制宜,协同合作,实现区域资源的合理调配,从而促进黄河流域 W-E-F 系统耦合协调发展。

(2) 通过测算黄河流域 W-E-F 系统耦合协调度得出,系统耦合协调度从初级协调阶段向良好协调阶段发展,其总体趋势与彭俊杰等^[32]研究成果相近。但不同的是在研究期内,彭俊杰分析得出流域上中游是从勉强协调发展为高级协调,下游是从勉强协调发展为中级协调,本文研究得出流域上游从勉强协调向中级协调发展,中下游从初级协调向中级协调发展。从流域方面上看关于省区耦合协调度的发展阶段存在一定的差异,流域上游的生态系统本身就比较脆弱,受到人类活动的影响较大。近年来生态环境建设成效明显,但是水资源供需矛盾、能源效率低、农业生产基础条件薄弱等根本性问题并未完全扭转,尤其是水资源的约束容易造成 W-E-F 系统不平衡,导致其耦合协调水平仍偏低。

4.2 结论

(1) 2000—2020 年黄河流域 W-E-F 系统综合发展指数呈上升趋势,水资源子系统发展指数年际波动幅度最大;W-E-F 系统综合发展指数和子系统的发展指数均值较低,其中水资源子系统发展指数青海最高,山西、宁夏较低;能源子系统发展指数四川、青海、陕西较高,山东、宁夏较低;粮食子系统发展指数内蒙古、山东较高,陕西最低。

(2) 2000—2020 年流域 W-E-F 系统耦合协调度在波动中上升,从初级协调阶段向良好协调阶段过渡,表明该系统向着良性有序的方向发展。从空间上看,不同省区间的系统耦合协调发展水平差异较为明显,从勉强协调阶段到中级协调阶段,整体上可表现为上游地区 > 中下游地区。

(3) 2000—2020 年流域 W-E-F 系统耦合协调度与水资源子系统关联程度最强,粮食次之,能源最后。根据关联程度较强的影响因素可知,关联程度较强主要体现在用水结构占比、产水系数、煤炭占比、万元 GDP 能耗、粮食单产、机械动力与化肥负荷等因素上。

参考文献:

- [1] Zhang P, Zhang L, Chang Y, et al. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 215-224.
- [2] Wang J, Bao Z, Zhang J, et al. Spatio-temporal matching and nexus of water-energy-food in the Yellow River Basin over the last two decades [J]. *Water*, 2022, 14 (12): 1859.
- [3] 陈哲轩, 张士强, 李成宇. 中国省际水—能源—粮食综合利用效率研究 [J]. *山东科技大学学报: 社会科学版*, 2021, 23(2): 84-93.
- Chen Z X, Zhang S Q, Li C Y. Research on inter-provincial water-energy-food comprehensive utilization efficiency in China [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Social Science*, 2021, 23(2): 84-93.
- [4] 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.
- Kang S Z. Towards water and food security in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 880-885.
- [5] 郝帅, 孙才志, 宋强敏. 中国能源—粮食生产对水资源竞争的关系: 基于水足迹的视角 [J]. *地理研究*, 2021, 40 (6): 1565-1581.
- Hao S, Sun C Z, Song Q M. Study on the competitive relationship between energy and food production for water resources in China: From a perspective of water footprint [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(6): 1565-1581.
- [6] Gong J, Jia X, Zha T, et al. Modeling the effects of plant-interspace heterogeneity on water-energy balances in a semiarid ecosystem [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 221: 189-206.
- [7] 王婕, 张建云, 鲍振鑫, 等. 粮食产量对气候变化驱动水资源变化的响应 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(6): 855-866.
- Wang J, Zhang J Y, Bao Z X, et al. Response of grain yield to climate change driving water resources change [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(6): 855-866.
- [8] 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.
- Wang H M, Hong J, Liu G. Simulation research on regional green development policy under the “water-energy-food” nexus [J]. *China Population Resources and Environment*, 2019, 29(6): 74-84.
- [9] 支彦玲, 陈军飞, 王慧敏, 等. 共生视角下中国区域“水—能源—粮食”复合系统适配性评估 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(1): 129-139.
- Zhi Y L, Chen J F, Wang H M, et al. Assessment of water-energy-food nexus fitness in China from the perspective of symbiosis [J]. *China Population Resources and Environment*, 2020, 30(1): 129-139.
- [10] 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.
- Li C Y, Zhang S Q. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research [J]. *China Population Resources and Environment*, 2020, 30(1): 120-128.
- [11] 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.
- Sun C Z, Yan X D. Security evaluation and spatial correlation analysis of water-energy-food nexus coupling system in China [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(5): 1-8.
- [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.
- Deng P, Chen J, Chen D, et al. The evolutionary characteristics analysis of the coupling and coordination among water, energy and food: taking Jiangsu Province as an example [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(6): 232-238.
- [13] 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.
- Bi B, Chen D, Deng P, et al. The evolutionary characteristics analysis of coupling and coordination of regional water-energy-food system [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(2): 72-77.
- [14] 张洪芬, 曾静静, 曲建升, 等. 资源高强度流动区水、能源和粮食耦合协调发展研究: 以京津冀地区为例 [J]. *中国农村水利水电*, 2019(5): 17-21, 28.
- Zhang H F, Zeng J J, Qu J S, et al. Research on the coupling coordinative degree among water-energy-food system in high-intensity flow areas: A case study of Beijing, Tianjin and Hebei province [J]. *China Rural Water Resources and Hydropower*, 2019(5): 17-21, 28.
- [15] 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.
- Wang K, Li J B, Li H. Spatial and temporal variation characteristics of the coupling and coordination of water-energy-food nexus in Shanxi Province [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(3): 45-52.
- [16] Liu S, Zhao L. Development and synergetic evolution of the water-energy-food nexus system in the Yellow River Basin [J]. *Environ Science Pollution Research*,

- 2022,29(43):65549-65564.
- [17] 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.
Dang R, Zhang J, Zhou D M, et al. Characteristic of the coupling and coordination of water-energy-food of Gansu Province during 2000—2016 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020,31(1): 115-123.
- [18] 陈耀,张可云,陈晓东,等.黄河流域生态保护和高质量发展[J].区域经济评论,2020(1):8-22.
Chen Y, Zhang K Y, Chen X D, et al. Ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Regional Economic Review, 2020(1):8-22.
- [19] 刘华军,乔列成,孙淑惠.黄河流域用水效率的空间格局及动态演进[J].资源科学,2020,42(1):57-68.
Liu H J, Qiao L C, Sun S H. Spatial distribution and dynamic change of water use efficiency in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020,42(1):57-68.
- [20] 关伟,许淑婷,郭岫垚.黄河流域能源综合效率的时空演变与驱动因素[J].资源科学,2020,42(1):150-158.
Guan W, Xu S T, Guo X Y. Spatiotemporal change and driving factors of comprehensive energy efficiency in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2020,42(1):150-158.
- [21] 高甜,杨肖丽.黄河流域粮食与能源水足迹压力与绿色发展脱钩关系研究[J].节水灌溉,2021(10):24-29,35.
Gao T, Yang X L. A study on the decoupling relationship between grain and energy water footprint pressure and green development in the Yellow River Basin[J]. Water Saving Irrigation, 2021(10):24-29,35.
- [22] 徐辉,王亿文,张宗艳,等.黄河流域水—能源—粮食耦合机理及协调发展时空演变[J].资源科学,2021,43(12):2526-2537.
Xu H, Wang Y W, Zhang Z Y, et al. Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2021,43(12):2526-2537.
- [23] 赵良仕,刘思佳,孙才志.黄河流域水—能源—粮食安全系统的耦合协调发展研究[J].水资源保护,2021,37(1):69-78.
Zhao L S, Liu S J, Sun C Z. Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021,37(1):69-78.
- [24] 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.
Peng S M, Zheng X K, Wang Y, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2017,28(5): 681-690.
- [25] 张璐.黄河保护立法中的能源开发规制[J].甘肃社会科学,2022(2):136-144.
Zhang L. Regulation of energy development in Yellow River protection legislation[J]. Gansu Social Sciences, 2022(2):136-144.
- [26] 何慧爽,原雷雷.我国粮食主产区水—能源—粮食耦合协调发展分析与预测[J].生态经济,2021,37(6):102-108.
He H S, Yuan L L. Analysis and prediction of water-energy-food coupling and coordinated development in the main grain-producing areas in China[J]. Ecological Economy, 2021,37(6):102-108.
- [27] 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.
Bai J F, Zhang H J. Spatio-temporal variation and driving force of water-energy-food pressure in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(10):1653-1660.
- [28] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method [J]. Computers & Operations Research, 1995,22(7):763-770.
- [29] 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.
Wang S J, Kong W, Ren L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(3):793-810.
- [30] 管军,钟勇.基于多层次灰色关联分析的安全生产综合风险评估研究[J].工业安全与环保,2017,43(10):66-69.
Zan J, Zhong Y. Study on comprehensive risk assessment of safety production based on multi-level grey relational analysis[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017,43(10):66-69.
- [31] 孙善良,张小平,张志斌.陕西省2000—2018年土地利用时空演变及驱动因素[J].水土保持通报,2021,41(4):339-349.
Sun S L, Zhang X P, Zhang Z B. Spatiotemporal changes and driving forces of landuse in Shaanxi province during 2000—2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4):339-349.
- [32] 彭俊杰.黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调及时空分异[J].区域经济评论,2022(2):51-59.
Peng J J. Coupling relationship and spatial-temporal differentiation of the water-energy-food nexus in the Yellow River Basin [J]. Regional Economic Review, 2022(2):51-59.