

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.010

# 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究

赵良仕,刘思佳,孙才志

(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:**为探究黄河流域水-能源-粮食安全系统协调发展对推动流域人地关系协调、高质量发展的意义,以黄河流域水-能源-粮食安全系统为核心,构建流域水-能源-粮食安全系统综合指数,采用主成分分析法计算各指标权重,利用耦合协调度模型对2007—2017年黄河流域水-能源-粮食安全系统耦合协调度进行测算,并对2018—2027年流域耦合协调度进行预测。结果表明:黄河流域水-能源-粮食安全系统综合指数处于中等水平;流域2007—2017年水-能源-粮食安全系统耦合协调度经历初级和中级耦合协调发展水平,整体呈上升趋势,发展潜力较大;黄河流域水、能源安全子系统综合指数呈现轻微负增长态势,对系统整体发展提升存在一定负向压力;预测结果显示流域耦合协调度在预测期内仍将保持在中级协调。提高黄河流域水-能源-粮食安全系统协调性,推动黄河流域高质量发展,必须统筹考虑水、能源、粮食之间的协调关系,从根本上加强流域资源与生态的综合高效管理。

**关键词:**水-能源-粮食安全系统;耦合协调度;主成分分析;黄河流域

**中图分类号:**TV213.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2021)01-0069-10

**Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin**// ZHAO Liangshi, LIU Sijia, SUN Caizhi (Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** In order to explore the significance of the coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin to promote the coordination of human-land relationship and high-quality development, a comprehensive index of water-energy-food security system in the Yellow River Basin was constructed with the water-energy-food security system as the core. The weight of each index was calculated by principal component analysis. The coupling coordination degree model was used to measure the coupling coordination degree of water-energy-food security system in the Yellow River Basin from 2007 to 2017, and to predict the coupling coordination degree of the Yellow River Basin from 2018 to 2027. The results show that the comprehensive evaluation index of water-energy-food security system in the Yellow River Basin is in the middle level. From 2007 to 2017, the coupling coordination degree of water-energy-food security system in the basin experienced the primary and intermediate coupling and coordinated development level, showing an overall upward trend, with great development potential. The comprehensive index of water and energy security subsystem in the Yellow River Basin shows a slight negative growth trend, which has a certain negative pressure on the overall development of the system. The prediction results show that the coupling coordination degree of the basin will remain at the intermediate level of coordination during the prediction period. To improve the coordination of water-energy-food security system in the Yellow River Basin and promote the high-quality development of the Yellow River Basin, it is necessary to consider the coordination among water, energy and food, and fundamentally strengthen the comprehensive and efficient management of resources and ecology in the basin.

**Key words:** water-energy-food security system; coupling coordination degree; principal component analysis; Yellow River Basin

黄河流域是中国重要的煤炭、电力能源及粮食主产地,是“一带一路”沿线和中国经济发展中具有战略性作用的重要区域。由于其生态脆弱性以及流域内经济发展的双重压力,资源与生态环境成为制

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(41701616);辽宁省社会科学规划基金(L17CJY004)

作者简介:赵良仕(1985—),男,副教授,博士,主要从事水资源与可持续发展研究。E-mail: liangshizhao@lnnu.edu.cn

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

约黄河流域发展的关键性因素。2019年9月,习近平主席主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会并发表重要讲话,明确了当前黄河流域生态保护和高质量发展的目标,主要包括加强生态环境保护、推进水资源节约集约利用、发展现代农业等。探究区域水-能源-粮食系统及其内部耦合关系是资源环境领域的重要研究内容,也是促进实现区域可持续发展的基础性研究。因此,科学评价黄河流域水-能-粮安全系统内部耦合协调机制和安全状况,对于促进流域水-能源-粮食资源统筹协调发展,加快推动流域资源可持续、生态环境保护和高质量发展至关重要。

2011年11月,德国联邦政府在波恩会议上首次将水安全、能源安全和粮食安全之间的关系总结为一种“纽带关系”,认为3种资源之间存在相互依存的联系。2013年,联合国亚太经济社会理事发布了《亚太地区水-粮食-能源纽带关系报告》,指出水-能源-粮食在不同地区间也存在联系且日趋紧密。国内外学者在不同的时空尺度下对水-能源-粮食系统进行了研究<sup>[1-3]</sup>。基于全国视角,已有关于水-能源-粮食系统发展的协调程度和系统内部压力的研究成果<sup>[4-5]</sup>。还有以省、地级市为研究区域,探讨水-能源-粮食耦合协调度的空间相关性及影响因素<sup>[6]</sup>,张洪芬等<sup>[7]</sup>、邓鹏等<sup>[8]</sup>、毕博等<sup>[9]</sup>分别以京津冀地区、江苏省和辽宁省为研究区,研究了地区水-能源-粮食耦合协调程度、时序演化及发展趋势等问题。分析已有研究成果,目前对于水-能源-粮食纽带关系研究方法包括耦合协调度模型<sup>[10-11]</sup>、PSR模型<sup>[12-13]</sup>、SD模型<sup>[14-15]</sup>等。我国水-能源-粮食系统纽带三维关系的研究近年来逐渐增多,但总数依然相对较少,特别是定量研究。水-能源-粮食系统的耦合协调机制研究尺度多集中于全国、省、市级区域,缺少如流域等中观尺度视角的研究成果。水-能源-粮食三者作为强流动性的社会基础资源,地区资源协调能力与周边地区关联性较强。从流域等中观尺度出发,相关研究能够更好地反映地区真实的资源统筹和可持续发展水平,为地区提出更具针对性的区域生态系统适应性政策建议。

基于黄河流域视角,已有研究成果包括矿产和能源、农业生产、生态环境等单个因素或相结合<sup>[16-20]</sup>;结合影响流域水资源链分配的因素分析流域水资源管理对策<sup>[21-24]</sup>;流域城市化、城市群发展<sup>[25-26]</sup>;流域人地与空间协调<sup>[27]</sup>及探讨流域高质量发展<sup>[28-29]</sup>等。彭少明等<sup>[30]</sup>从提高流域资源承载力出发,研究了黄河流域水-能源-粮食的一体化布局。从已有研究成果来看,目前对黄河流域的研究

集中于水、能源、粮食中的两种资源组合,或与资源环境要素相结合。如果一味集中于系统内部某种资源承载力的提高,必然会给其他资源造成负面压力;系统内部任何一个子系统安全受到威胁,其他子系统也会受到连锁反应<sup>[31-32]</sup>。当前黄河流域不能仅以提高地区经济发展、资源承载力为目标,而是应从流域生态脆弱性出发,整体把握流域水-能源-粮食3种资源的开发和利用趋势,明确流域各子系统发展方式中存在的问题,将地区生态环境可持续与转向高质量发展相结合。综上,亟须以中观尺度视角聚焦黄河流域可持续发展问题,对流域水-能源-粮食安全系统耦合协调、资源统筹可持续及生态环境可持续方面进行量化研究。

本文选取黄河流域内8个主要省级行政区的水、能源、粮食安全系统共38个指标,采用主成分分析法确定权重,构建黄河流域水-能源-粮食安全系统综合指数,对流域2007—2017年水-能源-粮食安全系统进行评估和分析,建立水-能源-粮食安全系统耦合协调度模型,探究黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调机制,从流域尺度探讨水-能源-粮食实现可持续发展的可行路径,以为黄河流域水-能源-粮食安全系统的可持续发展提供对策和建议。

## 1 研究区域概况

黄河流域在中国十大一级流域中降水量排名居后位,多年平均降水量远低于全国平均水平,降水时空分布极不均衡。黄河流域又被称为“能源流域”,流域内拥有中国一半的煤炭基地和七成的煤电基地,是我国重要的能源、化工原材料和基础工业基地。流域内以内蒙古自治区、山西、陕西为代表的能源大省,面临传统产能过剩、产业结构单一、经济结构需转型升级的困境。此外,流域的经济发展过多依靠化石能源消耗,也为流域的环境污染治理和可持续发展带来了巨大压力。黄河流域是我国重要的农业经济地带,对维护我国整体粮食安全具有突出作用。黄河仅占全国河川径流2%的水量,承担着全国12%的人口、13%的粮食产量以及补给各支流水系的任務。流域内黄淮海平原、汾渭平原等地是我国谷物主产区,粮食和肉类产量约占全国1/3。据国务院新闻办发布的《中国的粮食安全》白皮书显示,2001—2018年我国年均进口的粮食总量中,稻谷和小麦两大口粮品种合计占比不足6%;根据海关总署统计数据,2017年黄河流域主要8省(区)进口谷物总值仅3.48亿美元。水资源短缺已成为新形势下影响国家粮食安全最重要的因素<sup>[33]</sup>,

当前黄河流域水资源开发利用效率远超国际公认的40%生态警戒线,水资源利用率低、水资源供给存在巨大缺口。以宁夏回族自治区为例,2017年宁夏供水总量中,89.9%供水量来源于黄河水源。目前黄河流域经济发展主要依赖于不可更新能源的消耗<sup>[34]</sup>,经济总量占全国比例呈下滑趋势。提高人民生活水平和经济发展的迫切需求将会进一步加剧流域资源矛盾和生态环境压力。寻找黄河流域资源可持续、高质量协调发展之路迫在眉睫。图1为黄河流域水资源量及能源、粮食生产总量占全国比例。

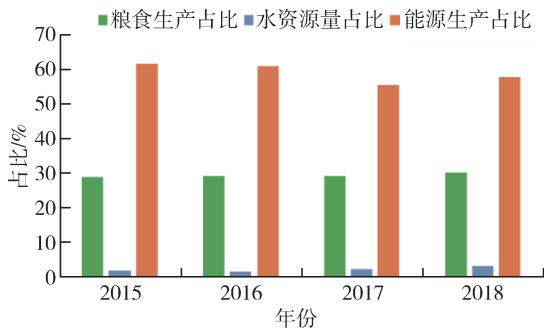


图1 黄河流域水资源量及能源、粮食生产总量占全国比例  
Fig.1 Proportion of water resources, energy and grain production in the Yellow River Basin in China

## 2 研究方法

### 2.1 指标选取及数据来源

水-能源-粮食安全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。结合研究区域的实际情况和数据的可得性与针对性,在已有研究成果的基础上选取子系统指标,以适用于长时段的时间序列分析需要。本文以2007—2017年为考察期,从3个子系统中共选取了38个指标,数据来源于《中国水利统计年鉴》《中国水资源公报》《中国能源统计年鉴》及各省统计年鉴等。

### 2.2 数据标准化及权重确定

#### 2.2.1 数据标准化

为消除不同指标量纲或数量级不同所造成的影响,对原始数据进行标准化处理,部分缺失数据已统一采用线性拟合法估算而得。根据指标的不同功效分为正、负指标,正、负向指标的计算公式分别为

$$X'_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \quad (1)$$

$$X'_{ij} = (X_{max} - X_{ij}) / (X_{max} - X_{jmin}) \quad (2)$$

式中: $X_{ij}$ 、 $X'_{ij}$ 分别为第*i*年指标*j*的原始值和标准化后的值; $X_{jmax}$ 、 $X_{jmin}$ 分别为历年来指标*j*的最大值和最小值。

#### 2.2.2 指标权重确定

主成分分析是设法将原来众多具有一定相关性的指标,重新组合成一组新的互相无关的综合指标,这几个综合指标既能尽量多地反映原来较多指标所反映的信息,同时它们之间又是彼此独立的,是一种降维处理方法。利用主成分分析法可以客观地确定各指标权重,有效避免人为主观因素的影响,具有直观和可操作性,同时增强结果的客观性和可信性。利用SPSS19.0,采用主成分分析法获取指标权重的具体过程:①求出标准化指标数据的相关系数矩阵;②得到相关系数矩阵的特征根和特征向量,以及特征根对应的方差贡献率;③取累计方差贡献率大于85%且特征值大于1的前*t*个主成分综合原始数据信息,记其方差贡献率为: $A = (A_1, A_2, \dots, A_t)$ ,利用载荷数与特征根得到主成分线性组合中的系数;④以方差贡献率作为主成分权重,对指标在主成分线性组合中的系数做加权平均;⑤最后将指标权重进行归一化,得到最终每个指标的权重(表1)。

### 2.3 水-能源-粮食安全系统综合指数

运用线性加权法计算水、能源、粮食安全子系统的综合指数,以衡量各子系统的发展水平,计算公式为

$$W_i = \sum_{j=1}^m w_j X'_{ij} \quad (3)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^m w_j Y'_{ij} \quad (4)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^m w_j Z'_{ij} \quad (5)$$

式中: $W_i$ 、 $E_i$ 、 $F_i$ 分别为第*i*年水、能源、粮食安全子系统的综合指数,该指数越高说明发展水平越高; $w_j$ 为各子系统指标*j*的权重; $X'_{ij}$ 、 $Y'_{ij}$ 、 $Z'_{ij}$ 分别为各子系统第*i*年指标*j*的标准化数值。

### 2.4 耦合协调度模型

耦合协调模型目前已经广泛应用于地理学中,用于研究系统及内部的耦合、协调和反馈的机理与机制。根据已有研究成果<sup>[7-8,35]</sup>,本文借助耦合度模型定量分析黄河流域水、能源、粮食安全子系统综合指数之间相互作用的程度,构建黄河流域水-能源-粮食安全系统耦合度模型:

$$C_i = \frac{3 \sqrt[3]{W_i E_i F_i}}{W_i E_i F_i} \quad (6)$$

式中  $C_i$  为第*i*年的耦合度,反映子系统间相互作用、相互影响程度的强弱, $0 \leq C_i \leq 1$ ,值越大表明子系统之间越协调,当  $C_i = 1$  时表明子系统间处于最佳协调状态。

表1 黄河流域水-能源-粮食安全系统综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of water-energy-food security system in the Yellow River Basin

子系统	指标层	数据来源及计算	权重
水安全	人均水资源量	统计数据	0.0627
	产水系数	水资源总量除以年降水总量	0.0832
	产水模数	水资源总量除以地区总面积	0.0800
	人均用水量	统计数据	0.0599
	用水总量	统计数据	0.1244
	单位GDP用水	用水总量除以GDP	0.0627
	万元工业增加值用水	用水总量除以工业增加值	0.1275
	水资源开发利用率	用水量除以水资源总量	0.0718
	地下水供水占比	地下水供水量除以供水总量	0.0904
	生活用水占比	生活用水除以用水总量	0.0933
	生态用水占比	生态用水除以用水总量	0.0488
	废水排放总量	统计数据	0.0952
能源安全	一次能源生产总量	统计数据	0.0622
	人均能源生产量	能源生产总量除以总人口	0.0634
	发电总量	统计数据	0.0972
	能源消费总量	统计数据	0.0927
	人均能源消费量	能源消费总量除以总人口	0.0891
	能源自给率	能源生产总量除以能源消费总量	0.0748
	单位GDP能耗	能源消费总量除以GDP	0.0902
	水电发电量占比	水电发电量除以发电总量	0.0569
	煤炭消费量占比	煤炭消费量除以能源消费总量	0.0724
	农用柴油使用量	统计数据	0.0770
	工业用水占比	工业用水总量除以用水总量	0.0701
	能源工业投资	统计数据	0.0762
工业废气排放量	统计数据	0.0779	
粮食安全	人均粮食产量	统计数据	0.1065
	粮食单位面积产量	统计数据	0.0977
	机械动力	农业机械总动力除以农作物播种面积	0.0893
	粮食播种面积比例	粮食播种面积除以区域总面积	0.0989
	受灾面积	统计数据	0.0877
	农业有效灌溉面积比例	农业有效灌溉面积除以地区耕地总面积	0.0694
	化肥负荷	化肥用量除以农作物播种面积	0.0875
	农业用水占比	农业用水总量除以用水总量	0.0851
	城镇居民家庭恩格尔系数	统计数据	0.0584
	农村居民家庭恩格尔系数	统计数据	0.0855
	人口自然增长率	统计数据	0.0696
	居民粮食消费价格指数	统计数据	0.0250
粮食流动成本	粮食零售价格指数除以生产价格指数	0.0393	

由于耦合度在某些情况下不足以充分表征水-能源-粮食安全系统的整体功能或发展水平。为了能更好地反映流域系统耦合协调的高低,构建了耦合协调度模型,其计算公式为

$$D_i = \sqrt{C_i T_i} \quad (7)$$

其中  $T_i = \alpha W_i + \beta E_i + \gamma F_i$   
 式中: $D_i$  为第  $i$  年的耦合协调度; $T_i$  为第  $i$  年的水-能源-粮食安全系统的综合指数; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为各子系统重要程度的权重,本文认为3个子系统同等重要,因此设定  $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。

为了更好地分析系统间的协调发展程度和所处的阶段,参考已有的研究成果<sup>[6-11]</sup>将耦合协调度进

行等级和类型的划分(表2)。

表2 耦合协调度类型及评价标准

Table 2 Coupling coordination degree type and evaluation standard

类型	取值范围	分类
协调发展类	(0.9~1.0]	优质协调发展类
	(0.8~0.9]	良好协调发展类
	(0.7~0.8]	中级协调发展类
	(0.6~0.7]	初级协调发展类
过度发展类	(0.5~0.6]	勉强协调发展类
	(0.4~0.5]	濒临失调发展类
失调衰退类	(0.3~0.4]	轻度失调衰退
	(0.2~0.3]	中度失调衰退
	(0.1~0.2]	严重失调衰退

### 3 结果与分析

#### 3.1 黄河流域水-能源-粮食安全系统综合指数

分别测算 2007—2017 年黄河流域水-能源-粮食安全系统中 3 个子系统综合指数,从而得到黄河流域水-能源-粮食安全系统综合指数的变化情况(图 2)。由图 2 可见,水安全子系统综合指数在研究期内整体波动幅度相对较小,但年平均增长率为  $-0.39\%$ ,呈现轻微下降趋势;能源安全子系统综合指数总体波动幅度不大,前期呈现上升趋势,从 2010 年开始呈现下降趋势,年平均增长率为  $-0.98\%$ ,也呈现负增长趋势;粮食安全子系统综合指数在 2007 年处于最低位水平,在 2007—2017 年呈现出良好的上升态势,2017 年增长为 3 个子系统中最高位水平,上涨幅度最大,涨幅波动最大,年平均增长率在  $1.02\%$  左右。由 3 个子系统综合指数的变化趋势可见,黄河流域水-能源-粮食安全系统综合指数在研究期内前期呈现上升趋势,波动幅度较小,研究期间的综合指数从 2007 年的 0.404 提高至 2016 年的 0.562,年平均增长率为  $2.04\%$ 。但由于受到研究期后期子系统综合指数下降影响,流域安全系统综合指数也略有下降,可见黄河流域水-能源-粮食安全系统内部相互耦合关联,3 个子系统共同影响着整个系统的稳定发展。

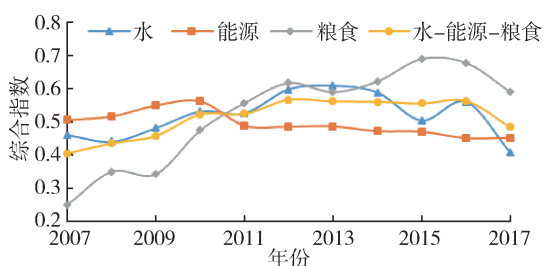


图 2 黄河流域水-能源-粮食安全系统综合指数变化

Fig. 2 Change of comprehensive index of water-energy-food security system in the Yellow River Basin

黄河流域整体水-能源-粮食安全系统综合指数均值为 0.512,处在中等水平。流域内各地区自然资源条件和经济社会发展状况各不相同,影响了水-能源-粮食安全系统综合指数的发展水平。其中,水、粮食安全子系统综合指数较好,能源安全子系统综合指数均值小于 0.5,为 3 个子系统中最低值。流域水安全子系统综合指数均值为 0.518,青海、宁夏与流域年均水平基本持平,甘肃、山西、山东均高于流域年均水平,内蒙古、陕西、河南与流域年均水平仍有较大差距。能源安全方面,青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西略高于流域年均值,经济发展水平较高的山西、河南、山东 3 省能源安全子系统综合指数较

低,较流域年均水平仍有一定差距。流域粮食安全子系统综合指数最高,年均值为 0.523,反映出黄河流域作为我国重要的农业产区,流域内粮食安全子系统发展水平较好,其中青海、甘肃、内蒙古、陕西 4 省年均值高于流域年均水平,而河南、山东作为我国传统粮食产地,综合指数水平却低于流域年均值,反映出两省在农业活动中存在一定问题。

图 3 为 2007—2017 年黄河流域及各省水-能源-粮食安全系统综合指数均值。由图 3 可见,上游青海、甘肃两省 3 个子系统综合指数均在流域平均值以上,耦合协调度稳步上升,增长速度较快,两省水电发电量占比大,清洁能源发展潜力大。宁夏地区的水资源供需缺口极大,开发利用率高,供给安全存在一定风险,但水安全子系统综合指数仍位居流域中等水平;同时,能源与粮食安全子系统的年均综合指数不高,与地区人均能源消耗量较高、能源自给率在研究期后期有所下降、人口增速相对较快等因素有一定关联。内蒙古水安全子系统综合指数位居流域末位,表现在地区水资源量不稳定,易发生自然灾害;人均用水量大,同时作为农业大省,农业用水占比高。陕西的水安全子系统综合指数较低,地区水资源供给不稳定,水资源开发率逐年攀升;能源安全子系统综合指数与流域平均水平持平,能源自给率高;粮食安全子系统综合指数居流域前列,地区农业灾害得到有效控制,同时地区农业用水需求增长不明显,粮食生产水平逐年提高。山西能源安全子系统综合指数与流域平均水平有一定差距,煤炭能源消费占比大,能源利用效率低,地区能源及工业结构亟待转型升级;粮食安全子系统综合指数也低于流域平均水平,自然灾害较多,人均粮食产量波动大,受地区地形因素影响,农业机械化进程受阻。河南 3 个子系统综合指数均低于流域平均水平,地区用水总量居流域首位,人均用水量大,地区水资源缺口极大,地下水开发过载;水资源利用不合理、效率低;能源供给缺口大,工业用水占比 20% 以上,地区经济产业结构不合理;河南是我国农业大省,但农业自然灾害频发,给农业生产和地区人民生活带来负面影响较大,地区粮食消费价格指数和粮食流动成本较高。山东水安全子系统综合指数略高于流域平均水平,近年来通过技术手段和出台相关政策把控,地区水资源承载力有所改善;能源安全子系统综合指数略低,地区经济发展水平高,能源消耗量大,能源自给率为流域最低水平,工业污染严重;地区农业自然灾害频发,不利于保障粮食稳定生产。

综上,黄河流域各省由于自然资源条件、经济发展状况不同,水、能源、粮食各安全子系统呈现出

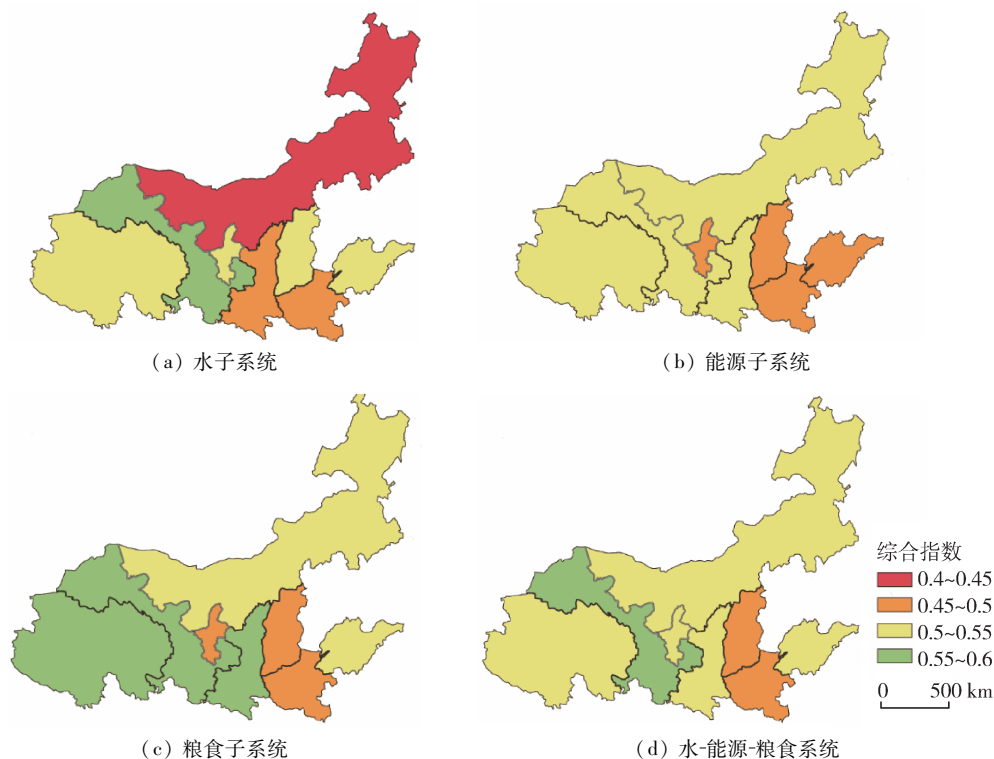


图3 2007—2017年黄河流域及各省水-能源-粮食安全系统综合指数均值

Fig. 3 Average value of comprehensive evaluation index of water-energy-food security system in the Yellow River Basin and every province from 2007 to 2017

同水平,进而影响地区水-能源-粮食安全系统整体水平。各子系统综合指数均较好的省区,水-能源-粮食安全系统综合指数也呈现较好水平。黄河流域各省水-能源-粮食安全系统内部存在一定的耦合协调机制,任意子系统的发展或滞后均会影响整个系统,必须统筹考虑三者内部的耦合协调关系,才能更有效地推动水-能源-粮食安全系统协调高效发展。

### 3.2 黄河流域水-能源-粮食安全系统耦合协调分析

利用耦合协调度模型测算 2007—2017 年黄河流域及流域主要 8 省(区)水-能源-粮食安全系统耦合协调度(图 4)。研究期内,流域耦合协调度处于由初级耦合向中级耦合过渡的阶段,从 0.622 增长到 0.746,由初级协调水平上升到中级协调水平,呈现稳定增长态势。但同时受到 3 个子系统涨幅波动及负增长态势的影响,增长速度相对缓慢,年平均增长率为 1.1%。流域内各主要省区的耦合协调度及流域上、中、下游地区在各子系统方面的表现也各有特点。黄河流域上游省区及内蒙古的耦合协调度在研究初期水平较低,中下游省区耦合协调度水平略优于上游;8 省(区)的耦合协调度均呈现增长态势,但各省增速差别明显。青海、甘肃、内蒙古、山东 4 省(区)耦合协调度增长速度较快,年平均增长率均大于 3%;宁夏、陕西、山西、河南增速较慢,年平均增长率在 0.5%~1.8%之间。流域内各省水-能源-

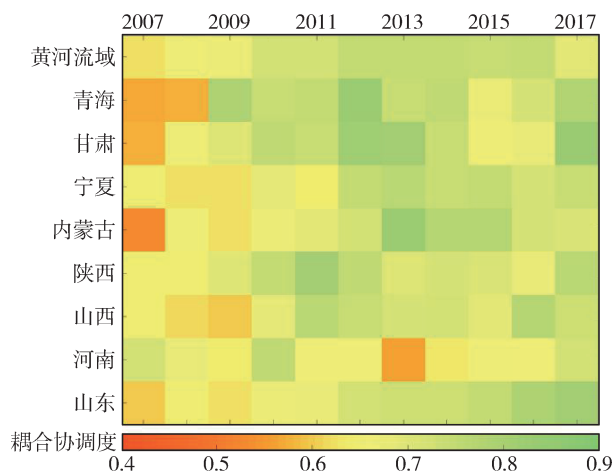


图4 水-能源-粮食安全系统耦合协调度变化

Fig. 4 Change of coupling coordination degree of water-energy-food security system

粮食安全系统耦合协调发展水平不尽相同:青海、甘肃、山东发展态势明显向好,由 2007 年的勉强协调水平发展到 2017 年的中级良好水平左右;宁夏、陕西发展呈上升态势,耦合协调度增长速度较缓,但整体平稳向好;内蒙古、山西、河南耦合协调度波动上升,耦合协调度在研究期内波动较大,但整体依然保持增长趋势。

流域上游地区工业、经济水平较弱,水-能源-粮食三者耦合协调度发展较快,在水安全子系统中评价较高。上游地区水资源量较充足,地下水开采量

及水资源开发利用等整体较低,可持续水平较高。用水总量少,但在农业主导的经济结构下,上游地区人均用水量要高于中下游地区。同时,上游地区人口密度较低,由于自身经济结构和发展水平影响,水资源利用效率低于中下游地区,水污染排放总量较少。上游地区生态用水占比高于中下游地区,有利于促进地区生态良性循环,维护和改善地区整体生态环境。上游地区承担着流域保护、涵养水源的重要任务,必须关注上游地区的水资源生态建设问题。

流域中游及上游部分地区是能源安全子系统良好稳定发展的基础,但地区生态环境脆弱,资源整体可持续水平较低。中游地区是全国重要的能源工业基地,煤、电等能源产量大,同时具有发展水电的自然优势,能源自给率高,同时也是东部地区重要的能源供应地之一。能源消费量、利用效率、污染排放量均处于流域中等水平,符合地区实际发展情况;地区工业用水占比与下游地区基本持平,但用水效率低于下游地区。这部分地区由于自身资源优势,长期以来过度依靠能源资源发展,对流域的水资源和生态环境负面影响较为严重。转变能源等产业结构、提高地区水资源利用效率等将是该地区未来发展的主要方向。

流域下游及部分中上游过渡地区是流域粮食生产的重要保障。经济发展和农业生产为地区水资源与能源带来巨大压力,不利于地区水-能源-粮食耦合协调度提高和资源可持续发展。下游地区农业生产规模大,发展水平较高;经济水平在流域内居于前列,地区经济结构相对较好,发展水平较高,恩格尔系数小于流域内其他地区,粮食消费价格指数及粮食流通成本略高于流域内其他地区。同时,流域下游地区由于经济和农业发展的双重压力,地区水资源和能源压力处于流域内高位水平,地区内部水-能源-粮食三者的矛盾更加尖锐,不利于水-能源-粮食耦合协调发展。

结合黄河流域水-能源-粮食安全系统综合指数变化,分析流域安全系统耦合协调发展趋势,当前流域内水、能源资源为系统耦合协调发展带来负向压力;研究期末,由于水、能源安全子系统综合指数双重负增长的压力,粮食安全子系统综合评价指数也略有下降。如果不积极采取措施,水资源与能源资源将长期处于低效不安全发展状态,并会对粮食系统产生限制和严重不利影响,进而影响整个系统安全与耦合协调发展。

### 3.3 耦合协调度预测

利用 Matlab 建立灰色预测模型(GM(1,1)),预测 2018—2027 年黄河流域水-能源-粮食安全系统

耦合协调度发展趋势(图 5),经拟合度检验,平均相对残差为 0.034,平均级比偏差为 0.0283,残差检验和级比偏差检验的结果都表明该模型对原数据的拟合程度较好。

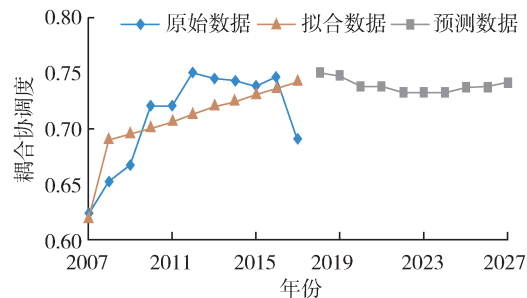


图 5 黄河流域 2018—2027 年耦合协调度预测

Fig. 5 Prediction of coupling coordination degree of the Yellow River Basin from 2018 to 2027

由图 5 可见,2018—2027 年黄河流域水-能源-粮食安全系统耦合协调度基本稳定在 0.73 ~ 0.76 之间,增长幅度不明显,整体保持中级协调发展状态;预测中期曲线呈现轻微凹型,表明预测中期流域安全系统耦合协调指数有轻微下降,但下降后仍处于中级耦合协调水平,且在预测后期有所回升。可见,在 2018 年流域水-能源-粮食安全系统耦合协调度达到一定水平后,在保持当前资源开发利用方式的情况下,未来一定时期流域的耦合协调程度将一直处于中级协调水平,未能向更优耦合协调水平发展。黄河流域当前发展方式存在问题,阻碍了流域向高质量发展方向转变。在流域内水资源供需矛盾日趋尖锐,而经济结构特点和能源工业存在一定的发展惯性的情况下,必须积极转变发展方式,才能推动流域水-能源-粮食安全系统耦合协调水平进一步提高。因此,需要关注流域内水资源供给及利用效率;流域中下游地区经济结构转型升级,重点包括能源行业等产业结构调整、转型等问题;农业向现代化、机械化迈进,同时关注流域内农业生产防灾、减灾和抗灾问题,保障地区粮食生产稳定。由于水-能源-粮食安全系统内部相互作用的机制较为复杂,误差值总体上保持在较小范围内,个别波动较大年份反映在图像上距离拟合曲线较远,需要最新的统计数据与预测结果进行对比,以进一步检验模型预测精度。

## 4 结论及建议

### 4.1 结论

a. 黄河流域水-能源-粮食安全系统综合指数处于中等水平,指数特征与流域整体水-能源-粮食特征基本吻合。3 个安全子系统具有各自特点和相对

独立性,但子系统之间相互关联,任意子系统的发展水平均会影响流域水-能源-粮食安全系统整体。提升各子系统及地区发展水平有利于推动整体安全系统协调发展。

**b.** 黄河流域 2007—2017 年水-能源-粮食安全系统耦合协调度经历初级和中级耦合协调发展水平,年均值为 0.71。耦合协调度整体呈现波动上升趋势,年增幅 1.1%。流域水-能源-粮食安全系统耦合协调度仍有较大发展空间和潜力。

**c.** 黄河流域水-能源-粮食安全系统虽然整体呈现上升态势,但其中水安全子系统和能源安全子系统呈现轻微负增长态势,当前两个子系统对系统整体存在一定负向压力,表明目前流域内水资源与能源的开发和利用现状存在较大问题,已经阻碍流域水-能源-粮食安全系统整体协调发展,应特别关注。

**d.** 预测 2018—2027 年黄河流域水-能源-粮食安全系统耦合协调度发展趋势,结果显示耦合协调度仍将保持在中级协调发展水平。如果不采取强有力的措施改善水资源供需矛盾,突破流域能源、产业结构等桎梏,流域水-能源-粮食安全系统协调发展受限,严重影响流域资源分配利用和可持续发展水平,无法推动流域整体生态环境可持续建设。

#### 4.2 建议

**a.** 高质量发展是黄河流域的核心战略,必须兼顾水-能源-粮食安全系统资源协调与地区发展。提高地区整体安全系统协调性,必须在制定发展方向与规划上,统筹考虑水-能源-粮食的协调发展关系。

**b.** 水、能源、粮食各子系统资源供需矛盾、利用效率低等问题均会影响到其他子系统。必须加强资源综合管理,加强各部门之间的配合和协作。在制定某单个子系统的相关政策时,应关注对其他子系统的不利影响。

**c.** 水、能源、粮食各子系统需要积极采取措施,协调流域资源平衡发展。水资源矛盾是当前黄河流域的基础性问题。因地制宜,通过严格把控高耗水高污染项目、引水入黄、提高水资源利用效率等方法缓解供需矛盾。

**d.** 黄河流域生态环境现状依然不容乐观。流域生态退化问题严重,水资源过度开发、能源过度开采、流域生态保育用地与农业用地的平衡、污染严重以及流域自身地理、生态特点等问题使得黄河流域的生态系统十分脆弱。水、能源、粮食三者协调与经济的同时,应以流域生态恢复和建设为核心内涵,从自然恢复、人地关系协调的角度审视流域资源

可持续问题,进而加强资源与生态的综合高效管理,推进流域资源可持续和高质量协调发展。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] NIVA Venla, CAI Jialiang, TAKA Maija, et al. China's sustainable water-energy-food nexus by 2030: impacts of urbanization on sectoral water demand [ J ]. Journal of Cleaner Production, 2020, 251: e119755.
- [ 3 ] 李东林, 刘建华, 郝林钢, 等. “一带一路”非洲区水-粮-能安全分析 [ J ]. 水资源保护, 2018, 34(4): 22-28. (LI Donglin, LIU Jianhua, HAO Lingang, et al. Analysis of water-food-energy safety in Africa area of “Belt and Road” [ J ]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 22-28. (in Chinese))
- [ 4 ] 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 Caizhi, YAN Xiaodong. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in China [ J ]. Water Resources Protection. 2018, 34(5): 1-8. (in Chinese))
- [ 5 ] 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 Jingfeng, ZHANG Haijun. Spatio-temporal variation and driving force of water-energy-food pressure in China [ J ]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1653-1660. (in Chinese))
- [ 6 ] 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 Chengyu, ZHANG Shiqiang. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research [ J ]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(1): 120-128. (in Chinese))
- [ 7 ] 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. (ZHANG Hongfen, ZENG Jingjing, QU Jiansheng, 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 and Hydropower, 2019(5): 17-21. (in Chinese))
- [ 8 ] 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 Peng, CHEN Jing, CHEN Dan, et al. The evolutionary and 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. (in Chinese))
- [9] 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 Bo, CHEN Dan, DENG Peng, et al. The evolutionary characteristics analysis of coupling and coordination of regional water-energy-food [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, 28(2): 72-77. (in Chinese))
- [10] 尹庆民,吴益. 中国水-能源-粮食耦合协调发展实证分析[J]. 资源与产业, 2019, 21(6): 20-29. (YIN Qingmin, WU Yi. Cases studies on water-energy-food coupling coordinated development in China[J]. Resources & Industries, 2019, 21(6): 20-29. (in Chinese))
- [11] 焦士兴,王安周,李青云,等. 河南省城镇化与水资源耦合协调发展状况[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 21-26. (JIAO Shixing, WANG Anzhou, LI Qingyun, et al. Study on coupling and coordinated development of urbanization and water resources in Henan Province [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 21-26. (in Chinese))
- [12] 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 Huimin, HONG Jun, LIU Gang. Simulation research on different policies of regional green development under the nexus of water-energy-food [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(6): 74-84. (in Chinese))
- [13] 刘晶,刘翠善,李潇,等. 中国水-能源-粮食关联系统协同安全评价[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 24-32. (LIU Jing, LIU Cuishan, LI Xiao, et al. Security evaluation of water-energy-food nexus system in China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(4): 24-32. (in Chinese))
- [14] RAVAR Z, ZAHRAIE B, SHARIFINEJAD A, et al. System dynamics modeling for assessment of water-food-energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran [J]. Ecological Indicators, 2020, 108: e105682.
- [15] 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))
- [16] 马丽,田华征,康蕾. 黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 137-149. (MA Li, TIAN Huazheng, KANG Lei. Eco-environmental impact and spatial control of mineral resources exploitation in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 137-149. (in Chinese))
- [17] 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 Wei, XU Shuting, GUO Xiuyao. Spatiotemporal change and driving factors of comprehensive energy efficiency in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 150-158. (in Chinese))
- [18] 雷鸣,贾正茂,肖素君. 黄河流域农业灌溉发展规模研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(10): 99-103. (LEI Ming, JIA Zhengmao, XIAO Sujun. Study of agricultural development scale of the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2013, 35(10): 99-103. (in Chinese))
- [19] 金凤君,马丽,许堞. 黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 127-136. (JIN Fengjun, MA Li, XU Die. Environmental stress and optimized path of industrial development in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 127-136. (in Chinese))
- [20] 张佰发,苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 460-473. (ZHANG Baifa, MIAO Changhong. Spatiotemporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2020, 42(3): 460-473. (in Chinese))
- [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. (ZHANG Ningning, SU Xiaoling, ZHOU Yunzhe, et al. Water resources carrying capacity evaluation of the Yellow River Basin based on EFAST weight algorithm [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1759-1770. (in Chinese))
- [22] 贾绍凤,梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 29-36. (JIA Shaofeng, LIANG Yuan. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29-36. (in Chinese))
- [23] 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 Huajun, QIAO Liecheng, SUN Shuhui. Spatial distribution and dynamic change of water use efficiency in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 57-68. (in Chinese))
- [24] 赵银亮,宋华力,毛艳艳. 黄河流域粮食安全及水资源保障对策研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(11): 47-49. (ZHAO Yinliang, SONG Huali, MAO Yanyan. Study on countermeasures of food security and water resources guarantee in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2011, 33(11): 47-49. (in Chinese))
- [25] 马海涛,徐植纺. 黄河流域城市群高质量发展评估与空间格局分异[J]. 经济地理, 2020, 40(4): 11-18. (MA Haitao, XU Xuanfang. High-quality development assessment and spatial heterogeneity of urban agglomeration in the Yellow River Basin [J]. Economic Geography, 2020, 40(4): 11-18. (in Chinese))
- [26] 郭家睿,吕可文. 黄河流域城镇化时空格局分析[J]. 郑

- 州轻工业学院学报(社会科学版),2017,18(2):68-73.  
(GUO Jiarui, LYU Kewen. Analysis of spatial and temporal pattern of urbanization in the Yellow River Basin [J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Social Science Edition), 2017, 18 (2): 68-73. (in Chinese))
- [27] 李小建,文玉钊,李元征,等. 黄河流域高质量发展: 人地协调与空间协调[J]. 经济地理,2020,40(4):1-10. (LI Xiaojian, WEN Yuzhao, LI Yuanzheng, et al. High-quality development of the Yellow River Basin from a perspective of economic geography: man-land and spatial coordination[J]. Economic Geography, 2020, 40 (4): 1-10. (in Chinese))
- [28] 杨永春,穆焱杰,张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略[J]. 资源科学,2020,42(3):409-423. (YANG Yongchun, MU Yanjie, ZHANG Wei. Basic conditions and core strategies of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3):409-423. (in Chinese))
- [29] 徐辉,师诺,武玲玲,等. 黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J]. 资源科学,2020,42(1):115-126. (XU Hui, SHI Nuo, WU Lingling, et al. Environmental stress and optimized path of industrial development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 115-126. (in Chinese))
- [30] 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 Shaoming, ZHENG Xiaokang, WANG Yu, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5):681-190. (in Chinese))
- [31] BRYAN B A, NOLAN M, HARWOOD T D, et al. Supply of carbon sequestration and biodiversity services from Australia's agricultural land under global change [J]. Global Environmental Change, 2014, 28(1):166-181.
- [32] GAO Lei, BRYAN B A. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability[J]. Nature, 2017, 544:217-222.
- [33] 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. (PENG Shizhang, AI Likun. Improving irrigation water use coefficient and ensure national food and water safety[J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (3): 79-82. (in Chinese))
- [34] 王慧亮,申言霞,李卓成,等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护,2020,36(6):12-17. (WANG Huiliang, SHEN Yanxia, LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on energy theory [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):12-17. (in Chinese))
- [35] 周露明,谢兴华,余丽,等. 水资源管理中的水-能源-经济耦合关系[J]. 水电能源科学,2019,37(4):144-147. (ZHOU Luming, XIE Xinghua, YU Li, et al. Water-energy-economy coupling relationship in water resources management [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (4):144-147. (in Chinese))
- (收稿日期:2020-07-14 编辑:王 芳)

(上接第 68 页)

- [29] 赵敏,刘珊. 基于双前沿面 SBM-DEA 模型的农业用水效率评价[J]. 水利经济,2020,38(1):54-60. (ZHAO Min, LIU Shan. Evaluation of agricultural water use efficiency based on SBM-DEA model with double frontiers [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38 (1):54-60. (in Chinese))
- [30] 郑德凤,郝帅,吕乐婷,等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系[J]. 地理研究,2020,39(1):64-78. (ZHENG Defeng, HAO Shuai, LYU Leting, et al. Spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships among multiple ecosystem services in Three-River-Source National Park [J]. Geographical Research, 2020, 39(1):64-78. (in Chinese))
- [31] 张兆方,沈菊琴,何伟军,等. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价:基于超效率 DEA-Malmquist-Tobit 方法[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2018,20(4):60-66. (ZHANG Zhaofang, SHEN Juqin, HE Weijun, et al. An analysis of water utilization efficiency of the Belt and Road initiative's provinces and municipalities in China based on DEA-Malmquist-Tobit model [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2018, 20(4):60-66. (in Chinese))
- [32] FÄRE R, GROSSKOPF S. Productivity and intermediate products: a frontier approach [J]. Economics Letters, 1996, 50(1):60-70.
- [33] 程昀,杨印生. 矩阵型网络 DEA 模型及其实证检验[J]. 中国管理科学,2013,21(5):103-109. (CHENG Yun, YANG Yinsheng. Network DEA for matrix-type organization with application [J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21 (5): 103-109. (in Chinese))
- [34] HAN D N, YU D Y, CAO Q. Assessment on the features of coupling interaction of the food-energy-water nexus in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 249, 119379.
- (收稿日期:2020-10-12 编辑:熊水斌)