中国省际水资源-能源-粮食安全测度及其时空演变

黄德春1,2,3 吴小庆1,3 李进秋1,2,3

（1. 河海大学商学院，江苏 南京 211100；2. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心，江苏 南京 211100；3. 河海大学产业经济研究所，江苏 南京 211100）[[1]](#footnote-1)

摘要：以中国30个省份为研究对象，构建了包含水资源安全、能源安全、粮食安全3个层次共30个指标在内的水资源-能源-粮食安全评价体系，并对30个省份2003-2019年水资源-能源-粮食安全进行了测度和分析，结果表明：2003-2019年30个省份水资源-能源-粮食安全整体呈上升趋势；长江经济带沿线省份水资源-能源-粮食系统安全值提升显著，具有明显的空间集聚特征；京津冀地区水资源-能源-粮食安全值较低，主要是由于较高的生活水成本和生态水成本，宁夏、新疆两省的高农业化肥施用量和农作物受灾率导致后期安全指数波动明显；各省之间的能源安全指数差距和粮食安全指数差距较大，反映出目前我国各省份普遍存在资源生产能力和环境治理能力相脱节的问题。

关键词：水资源-能源-粮食；安全；时空演变；中国

中图分类号：X24 文献标志码：A 文章编号：1003-9511—

**Measurement and temporal-spatial evolution characteristics of provincial water-energy-food security in China**

HUANG Dechun1,2,3 , WU Xiaoqing1,3 , LI Jinqiu1,2,3II

（1. *School of Business, Hohai University, Nanjing 211100, China*；2. *“World Water Valley” and Water Ecological Civilization Cooperative Innovation Center，Nanjing 211100, China*；3. *Institute of Industrial Economics，Hohai University, Nanjing 211100, China*）

**Abstract:** Based on defining water-energy-food security, a comprehensive evaluation indicator system of water-energy-food security was established in this paper. Then By measuring the water-energy-food security of 30 provinces from 2003 to 2019, the kernel density analysis and the security index distribution map were used to analyze the temporal and spatial evolution characteristics of Chinese provincial water-energy-food security. The results show that: (1) The overall security of water-energy-food system in 30 provinces was gradually augmented from 2003 to 2019 with the improvement of resource supply capacity and utilization efficiency. (2) Water-energy-food security in the provinces along the Yangtze River Economic Belt have increased significantly, showing obvious spatial agglomeration characteristics. (3) The water-energy-food security in Beijing-Tianjin-Hebei region is relatively low due to the higher demands of domestic water and ecological water while lowness of water-energy-food security in Ningxia and Xinjiang is mainly due to the adjustment of planting structure, which leads to more application of chemical fertilizer and higher disaster rate of crops. (4) The energy security and food security vary distinctly between provinces, resource production capacity is generally inconsistent with environmental governance capability. Above conclusions can help relevant resource management departments in China to carry out targeted policies and measures according to specific situations in different regions.

**Keywords:** water-energy-food; security; temporal-spatial evolution; China

水资源、能源、粮食是一个国家或地区最重要的基础性自然资源和战略性经济资源，中国作为世界第一人口大国，面临着资源时空分布不均、人口资源占有量不足等问题，资源的地理错配问题进一步加剧了安全威胁。自2011年德国波恩会议首次将水、能源和粮食的关系界定为“纽带关系”（即WEF Nexus）以来，WEF Nexus逐渐成为辨识人与自然互动关系的一种新视角[1]，利用“纽带关系”将水资源、能源、粮食三种资源联系起来，可以更加深刻地理解和评价一个国家或地区的资源安全状况[2]。因此，构建适应新时代背景的水资源-能源-粮食安全评价体系，对中国30个省份的水资源-能源-粮食安全进行测度和分析，并具体探讨不同省份的资源安全现状、变化特征和形成原因，将有助于有关政府部门了解区域资源安全现状和问题所在，优化各地区国土空间内的自然资源治理和管控，推进地区治理体系和治理能力现代化。

在水资源-能源-粮食纽带关系下，不同学者对水资源-能源-粮食安全给出了不同的定义。2011年波恩会议首次指出“水资源-能源-粮食安全”致力于寻找减少资源权衡、促进资源协同、提高系统效率、实现可持续发展的方法，Pahl-Wostl[3]和Cai等[4]也认为水资源-能源-粮食安全的目标在于减少三种资源的权衡效应，发挥协同效应。Bhatt等[5]认为水资源-能源-粮食安全主要在于既要满足伴随着人口增长的粮食需求，同时也要满足由于气候变化带来的生态需求；Venghaus等[6]考虑到食物、能源和水的相互依赖性，认为水资源-能源-粮食安全应被界定为不存在对人类福祉和与水资源、能源、粮食的生产和使用有关的生态系统的威胁。

在水资源-能源-粮食安全测算和评价方面，现有大部分学者聚焦于单一水资源安全[7-8]、能源安全[9-10]和粮食安全[11-13]的评价与分析，且测算方法各不相同，而对水资源-能源-粮食安全评价的研究大都侧重于对水资源-能源-粮食的安全特征或风险特征展开描述性分析[14-16]，而较少揭示特征背后的原因。在水资源-能源-粮食安全指标体系构建方面，目前国际上使用较多的RAND指数[17]和SDG指数[18]均主要侧重于对一个国家或地区的水资源-能源-粮食安全评价，对于省际的资源安全评价尚不适用；另外，RAND指在评价体系构建过程中忽略了资源需求、生态以及社会经济方面的因素；SDG指数的评价体系过分强调了经济、社会发展指标的重要性，使得评价结果不尽合理。

综上所述，已有学者对水资源-能源-粮食安全给出了具体定义，并构建了相应的评价指标体系，但仍然存在以下不足之处：一是中国各地区自然资源禀赋差异和发展差异较大，其资源安全状况也应各不相同，而目前缺乏对中国省际水资源-能源-粮食安全的评价，尤其是缺乏对安全现状背后原因的分析和阐述；二是当前对水资源-能源-粮食安全的评价体系构建中，大多数是自然指标，但随着中国进入高质量发展阶段，社会治理能力逐渐增强，单纯侧重于资源禀赋角度去评价资源安全是不全面的，必须增加相应的社会、经济指标。为弥补上述不足，笔者将根据水资源-能源-粮食安全的具体含义构建适应中国新时代背景的水资源-能源-粮食安全评价指标体系，并使得评价和分析结果更加合理。

# 1.水资源-能源-粮食安全评价指标体系构建及测度

## 1.1水资源-能源-粮食安全的概念与内涵

“资源安全”是指一个国家或地区可以持续、稳定、充足和经济地获取所需自然资源及资源性产品的状态，以及维护这一安全状态的能力[19]，其核心是保证各种重要资源充足、稳定、可持续供应基础上，追求以合理价格获取资源，以集节约、环境友好的方式利用资源，保证资源供给的协调和可持续。而“水资源-能源-粮食纽带关系（WEF Nexus）视角下的资源安全”侧重于在整体发展运行过程中水资源、能源、粮食三者之间协调与合作的性质，系统结构中各自之间的协调、协作推动资源系统整体加强，朝着更加优化的方面发展。水资源-能源-粮食系统是由水资源、能源、粮食三种单一资源组成的综合复杂系统，一种资源的消耗会牵动另一种资源的消耗，同时三种资源亦存在一定程度的“替代能力”，即水资源、能源、粮食三者之间 一定程度上可以相互转化，这一特征将决定水资源-能源-粮食安全复合函数的构建，即水资源-能源-粮食安全综合测算方法的选择。

## 1.2水资源-能源-粮食安全评价指标选取及数据来源

笔者根据现有学者对水资源-能源-粮食安全的定义，认为水资源-能源-粮食安全评价应从供给安全、消费安全、生态安全、经济社会安全四个方面展开。其中，供给安全是指资源的自然禀赋，主要表现为资源储量和生产量，侧重衡量供给量水平、供给可靠性和供给多样性和可持续性；消费安全是指资源的数量和质量要求，包括自给自足能力和使用效率；生态安全是指资源开发和使用过程中对环境的影响程度；经济社会发展安全将包括支付能力、资源调配方面的考量，最终建立的中国水资源-能源-粮食安全评价指标体系如表1所示。

各三级指标的数据主要来源于《中国统计年鉴》（2003-2020）、各省份统计年鉴（2003-2020）、《中国环境年鉴》（2003-2019）及《中国能源年鉴》（2003-2019）、各省份环境状况公报、国民经济和社会发展公报等。

表1 中国水资源-能源-粮食安全评价指标体系

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 一级指标 | 二级指标 | 三级指标 | 计算方法或来源 | 指标属性 |
| 水资源安全 | 供给安全 | 人均水资源总量 | 水资源总量/人口总量 | 正向 |
| 产水模数 | 水资源总量/土地面积 | 正向 |
| 降水季节均衡性 | 降水月波动率（标准差） | 负向 |
| 消费安全 | 人均生活用水量 | 生活用水/人口总量 | 负向 |
| 单位面积农业用水量 | 农业用水/耕地面积 | 负向 |
| 单位土地面积生态用水量 | 生态用水/土地面积 | 负向 |
| 生态安全 | 亿元GDP工业废水排放量 | 工业废水排放量/地区GDP | 负向 |
| 人均生活污水排放量 | 生活污水排放量/人口总量 | 负向 |
| 经济社会安全 | 亿元GDP工业用水量 | 工业用水/地区GDP | 负向 |
| 城市污水处理率 | 统计年鉴 | 正向 |
| 能源安全 | 供给安全 | 人均能源生产量 | 能源生产量/人口总量 | 正向 |
| 能源自给率 | 能源生产量/能源消费量 | 正向 |
| 储量比 | 能源基础储量/全国能源基础储量 | 正向 |
| 消费安全 | 能源消耗强度 | 能源消费量/地区GDP | 负向 |
| 燃料价格消费指数 | 统计年鉴 | 负向 |
| 生态安全 | 清洁能源消费比例 | 清洁能源消费量/能源消费量 | 正向 |
| 工业废气排放强度 | 工业废气排放量/地区GDP | 负向 |
| 亿元GDP工业固体废弃物排放量 | 工业固体废弃物产生量/地区GDP  | 负向 |
| 经济社会安全 | 人均GDP | 地区GDP/人口总量 | 正向 |
| 能源可再生性 | 可再生能源生产量/能源生产总量 | 正向 |
| 粮食安全 | 供给安全 | 人均粮食产量 | 粮食产量/人口总量 | 正向 |
| 人均耕地面积 | 耕地面积/人口总量 | 正向 |
| 道路网密度 | 省域道路总里程/区域面积 | 正向 |
| 消费安全 | 人口增长率 | 本年人口/上年人口 | 负向 |
| 食品消费能力 | 货币工资指数/食品消费价格指数 | 正向 |
| 生态安全 | 单位播种面积化肥施用量 | 化肥施用量/粮食播种面积 | 负向 |
| 农作物受灾率 | 农作物受灾面积/粮食播种面积 | 负向 |
| 经济社会安全 | 粮食单产 | 粮食产量/粮食播种面积 | 正向 |
| 人均可支配收入 | 统计年鉴 | 正向 |
| 恩格尔系数 | 统计年鉴 | 负向 |

## 1.3水资源-能源-粮食安全评价指标权重

目前，关于资源安全评价的文章中，大多数学者使用主观赋权法或组合赋权法确定指标权重，考虑到使用主观赋权法有较大的随机性[9]，尤其当存在较多三级指标时，指标赋权会因专家的个人判断有较大的随意性和不稳定性，因此，笔者采用客观赋权法中的变异系数法来确定各指标权重，在充分反映各个指标的差异和影响程度的同时避免对异常数据的敏感性，适用于笔者的研究中对不同省份的水资源-能源-粮食相对安全程度进行比较。在使用变异系数法之前，首先需要对数据进行标准化处理：

 对于正向的指标：) （1）

对于负向的指标：) （2）

其中：为第个省份第项指标的标准化值，为第个省份第项指标的实际值，和分别为第个省份第项指标实际值的极大值和极小值。然后，计算各个三级指标的算术平均值和标准差：

 (*=1,2,3...n;=1,2,3…m*) （3）

 (*=1,2,3…….n*;*=1,2,3…m*） （4）

各项三级指标的变异系数和权重分别为：

 (*=1,2,3…m*) （5）

 (*=1,2,3…m*) （6）

## 1.4 各省份水资源-能源-粮食安全测度

由三级指标权重计算出水资源安全指数、能源安全指数、粮食安全指数分别为：

 ， ， （7）

其中，表示第项指标的权重，表示第项指标第年的标准化值。根据Venghaus[6]的研究，当单一资源之间存在一定的替代能力时，几何平均法更适用于资源系统的安全评价测算。对于水资源、能源、粮食三种资源而言，存在一定条件下的依赖、转化和替代能力，因此各省份第年的水资源-能源-粮食安全的综合评价指数为：

 （8）

以中国30个省份为研究对象（西藏、港澳台地区由于部分数据无法获取未纳入研究范围），利用上述评价指标体系和测算方法对各省份水资源-能源-粮食安全进行了测度，结果如图1所示（图中仅展示部分年份）。图1显示，2003年-2019年30个省份的水资源-能源-粮食安全值均有所提升，整体趋势向好，而各省的变化特征和变化原因存在差异。文章第2部分将对中国30个省份水资源-能源-粮食安全的时空演变特征及成因进行深入探究和分析。

图1 主要年份30省（市）水资源-能源-粮食安全指数分布

# 2.水资源-能源-粮食安全评价结果分析

## 2.1各省份2003-2019年水资源-能源-粮食安全时序演变分析

利用STATA软件绘制出主要年份中国30个省份的水资源安全指数、能源安全指数、粮食安全指数及水资源-能源-粮食安全指数核密度图（如图2所示）。首先从全域视角来看：①以核密度曲线的重心位置变化来看，2003年至2019年核密度曲线重心逐渐向右迁移，说明30个省份水资源-能源-粮食整体安全度逐渐提升，安全指数平均值从2003年的0.36提升至2019年的0.47，反映了随着中国经济社会发展水平的提高，在自然资源禀赋有限的条件下，各地区的资源开发能力、生产效率、调配能力和供给能力不断提高，资源安全度亦逐渐提升。②从曲线的主峰高度来看，2003-2008年主峰高度上升后再下降，说明各省之间的水资源-能源-粮食安全得分先集中后扁平再集中，安全差距呈现先缩小后扩大并再次缩小的趋势，尤其是能源安全指数和粮食安全指数的得分分布较为分散，差距较明显。③从曲线波峰数量来看，综合安全指数仅有2008-2012年出现波峰，说明我国各省份的水资源-能源-粮食安全尚未出现两极分化甚至是多极分化的局面，安全区间相对集中。④从去曲线左右拖尾来看，2003-2008年左侧拖尾与右侧拖尾基本一致，2008年后右侧拖尾大于左侧拖尾，出现加长和升厚趋势，说明2008年后我国高安全指数的省份逐渐增加，占比逐渐加大；能源安全指数和粮食安全指数的拖尾较相对长，表明各省能源安全差异和粮食安全差异较大。



(a)主要年份30省（市）水资源-能源-粮食安全指数核密度图 (b)主要年份30省（市）水资源安全指数核密度图



(c)主要年份30省（市）能源安全指数核密度图 (d)主要年份30省（市）粮食安全指数核密度图

图2 主要年份30省(市)水资源-能源-粮食安全指数及单一资源安全指数核密度图

其次，由图1可以得出局域变化情况：上海、江苏、江西、内蒙古四个省份水资源-能源-粮食安全指数提升较快，上海由2003年的0.27提升至2019年的0.49，江苏由0.27提升至0.47，江西由0.27提升至0.45，内蒙古则由0.45提升至0.62，主要归因于单位土地面积生态用水、工业废水排放以及亿元GDP耗水量和亿元GDP能耗的减少、清洁能源使用比例和道路网密度的增加等；海南水资源-能源-粮食安全指数波动明显，究其原因，主要是部分水资源安全和粮食安全指标不稳定，尤其是人均粮食产量和人均耕地面积降低以及单位播种面积化肥施用量和农作物受灾率的增加导致海南水资源-能源-粮食安全值出现长时间的波动，总体上升趋势不明显；宁夏2014-2016年的水资源-能源-粮食安全值处于波动下降的状态，主要由于单位播种面积化肥施用量和农作物受灾率的增加；新疆2014年安全值降低了0.03，后期增长速度亦低于其他省份，主要是由于人均粮食产量和食品消费能力的降低以及单位播种面积化肥施用量和农作物受灾率的增加。宁夏、新疆两地以种植业为主的农业产业结构使得化肥用量高于其他地区[20]，尤其近几年在倡导地区特色农业的背景下，两省相应提高了蔬菜和瓜果的种植比例，单位播种面积化肥施用量随之逐渐增加。其次，宁夏、新疆两地的粮食生产对自然灾害的预警和抵御能力比较弱，使得该地区农作物受灾率较高。

从2003-2019年水资源安全指数变化趋势来看，除北京和天津的水资源安全指数先上升后下降以外，其他省份基本呈现上升的趋势，尤其是上海和江苏提升明显；北京和天津主要是因为单位土地面积生态用水和人均用水量后期不断提升，导致水资源安全指数降低，从而拉低水资源-能源-粮食整体安全度，上海江苏两地节水政策效果明显，同时投资效率的提高[21]使得人均生活用水和单位面积生态用水和亿元GDP工业用水均有所降低，水资源安全提升显著；内蒙古、河南、山东变化不明显，主要原因在于人均生活用水、生态用水和人均生活污水排放不稳定。从2003-2019年能源安全指数变化趋势来看，陕西、山西、内蒙古提升0.2以上，上海、江苏、广东、福建、四川、云南皆提升了0.15以上，增长幅度明显，黑龙江则下降了0.05。从2003-2019年粮食安全指数变化趋势来看，黑龙江、上海、江苏增长最为明显，提升幅度超过0.2，其次为安徽、湖北、河南、重庆，增长幅度为0.15~0.2，增长较慢的主要是贵州、青海、云南等西南地区，提升幅度不超过0.05。

## 2.2 各省份2003-2019年水资源-能源-粮食安全空间演变分析

结合主要年份30省（市）水资源-能源-粮食安全指数分布图（图1）和单一资源安全指数分布图（图3），可以得到30个省份水资源-能源-粮食安全指数的空间演变特征。①整体来看，除内蒙古和黑龙江始终保持相对高的安全值外，呈现出从2003年的“随机分布”到2019年“长江经济带沿线省份安全度较高，珠三角次之，京津冀安全度相对较低”的空间分布格局，并形成了两大相对高安全值集聚区：西南三省和长三角地区。西南三省的水资源-能源-粮食安全值长期以来得益于较丰富的水资源、能源和粮食资源，长三角地区尽管自然资源禀赋有限，但资源的调配、供给能力和资源利用效率均高于其他省份，使得长三角地区的水资源-能源-粮食安全提升显著。长江经济带沿线省份水资源-能源-粮食安全指数提升尤为明显，主要是自2008年国家重视中西部发展以来，财政政策的倾斜使得长江经济带沿线省份加大了治理投入，2014年9月，长江经济带正式上升为国家层面的区域发展战略，此后依托于黄金水道，沿江省市逐渐实现经济、社会和生态的统一协调发展[22]，从而形成水资源-能源-粮食安全增强的“飞轮效应”。②从水资源安全指数的空间演变来看，除了京冀两地下降明显、浙江沪提升明显以外，2003年-2019年并无明显的空间聚集特征，整体变化相对分散。京津冀地区主要是人均生活用水、单位土地面积生态用水和人均生活污水排放的增加拉低水资源-能源-粮食系统整体安全度，京津冀地区的高人口密度和高人均GDP使得该地区水资源需求高于其他地区，同时水资源过度开发利用、地下水持续超采等导致该地区水生态功能退化，加之京津冀地区相对干旱的气候，使得该地区的生活水成本和生态水成本较高。③从能源安全指数空间变化来看，2003年高能源安全值的省份主要集中在新疆、黑龙江、内蒙古、陕西、山西等地，各省能源安全差异较大，2019年能源安全指数较高的省份新增上海、浙江、福建、广东、西南3省（云南、贵州、四川），形成了多个高能源安全值集聚区，主要归因于人均GDP、废气、固废排放的改善，部分省份不再受资源禀赋的限制，提高了资源的调配和供给能力，同时更节约和经济地使用资源。④从粮食安全指数空间变化来看，2003年高粮食安全值的省份集中在东北地区，即吉林、黑龙江、辽宁三省以及内蒙古，2019年粮食安全指数较高的省份除了东北三省和内蒙古外，还新增上海、江苏、安徽、山东、河南、湖北、重庆、宁夏8个省份，内陆和沿海省份均有提升，主要归因于粮食单产、人均可支配收入、恩格尔系数以及道路网密度的提升，这说明粮食安全受经济水平的影响，当经济水平提升时，一方面资源的供给能力和使用效率会得到提高，从而降低资源的供给压力；另一方面，人均收入的增加使得消费选择更加多样性，一定程度会降低的单一资源的消费需求压力。

图3 主要年份30省（市）水资源、能源、粮食安全指数分布

# 3.结论与政策建议

基于2003-2019年中国30个省份的面板数据，对30个省份的水资源-能源-粮食安全进行了评价和时空演变分析，可以得出如下结论：2003-2019年30个省份水资源-能源-粮食系统整体安全度逐渐提升，部分省份不再受制于自然资源禀赋的不足，资源的调配、供给能力和资源利用效率大大提高；社会经济发展水平的提升不仅可以提升一个地区的资源供给能力，同时一定程度会降低的单一资源的消费需求压力，从而提升水资源-能源-粮食安全。长江经济带沿线省份水资源-能源-粮食安全值提升明显，具有明显的空间聚集特征，在长江经济带发展战略下，国家对长江经济带沿线省份的生态转型要求成效显著，使得沿线省份的消费安全、生态安全和社会经济安全实现同步提升。京津冀地区生活水成本和生态水成本较高，拉低了水资源-能源-粮食安全，宁夏、新疆两地单位播种面积化肥施用量的不断增加带来潜在的环境风险，同时气象灾害和病虫害的频发使得农作物受灾率高于各省平均水平，由此拉低了后期水资源-能源-粮食安全。各省之间的能源安全差距和粮食安全差距较大，主要是工业污染物排放强度、化肥施用量、农作物受灾率等存在较大差异。东部沿海省份长期处于环境技术效率的前沿，而西部省份的环境技术效率一直处于较低的状态且有逐渐恶化的趋势。这说明我国各省份的资源生产能力和环境治理能力相脱节，资源稀缺型省份被倒逼提高资源使用效率和环境治理能力，而资源丰富型省份“粗放低效型”经济发展模式尚未得到改善。

针对中国省际水资源-能源-粮食安全现状和存在的问题，提出如下政策建议：

a.加强资源的供给和调配能力，提高资源的利用效率。一方面既要在供应端加大基础设施供应，完善物流交通网络体系，提高资源的供给、调配能力，缓解各省份资源的错配问题；另一方面，要加大能水资源、能源、粮食生产、加工和使用过程中的技术投入，提高资源利用效率，进而提高资源的消费安全。

b.发挥长江经济带“绿色”“生态”转型发展的空间带动作用，助推其他省份的经济绿色可持续发展。尤其要建立包括废水、废气、固体废弃物在内的工业污染物排放、治理和再利用的统一标准，推动长三角地区及其他东部沿海省份的污染物排放和再利用技术向中西部地区复制和转移。

c.加强重点地区的农作物受灾害防治，尤其是加强洪涝和干旱灾害的预警和治理。农业属于弱质产业，其发展对自然条件的依赖性很大，气温、降水、地形等都是影响农业发展的重要因素。因此要不断提高农业灾害防治的系统性，建立区域联动的紧急防范系统，增强农村和农业防范灾害风险和抵御自然灾害的能力，加强粮食安全保障。

d.发挥经济发达省份的带动作用，缩小沿海和内陆地区的经济发展差距和居民收入差距。2020年5月中共中央明确提出要以国内大循环为主体，重点是促进国内消费，特别是提高中低收入群体的消费能力。在此背景下，一方面，要利用经济发达省份带动周边省份经济发展，提高居民整体消费能力，降低对单一资源的消费需求压力；另一方面，缩小农业与其他产业的收入差距，提高农民种粮积极性，从而确保粮食安全，提高内循环。

# 参考文献

1. 刘凌燕,王慧敏,刘钢,孙冬营,方舟.供需视角下水—能源—粮食系统风险的驱动机理与政策仿真——面向东北三省的系统动力学分析[J].软科学,2020,34(12):52-60.
2. HOFF H. The water energy and food security nexus[R]. Stockholm Environment Institute, 2011.
3. PAHL-WOSTL C. Governance of the water-energy-food security nexus: A multi-level coordination challenge[J]. Environmental Science and Policy, 2017(7):356-367.
4. CAI X, WALLINGTON K, SHAFIEE-IOOD M, et al. Understanding and managing the food-energy-water nexus-opportunities for water resources research[J]. Advances in Water Resources, 2018,111:259–273.
5. BHATT. Smallholder system innovations in integrated watershed management (SSI): strategies of water for food and environmental security in drought-prone tropical and subtropical agroecosystems[J]. IWMI Working Papers, 2006, 113(3):601–620.
6. VENGHAUS S, DIEKEN S. From a few security indices to the FEW Security Index: Consistency in global food, energy and water security assessment[J]. Sustainable Production and Consumption, 2019(20):342-355.
7. 梁缘毅,吕爱锋.中国水资源安全风险评价[J].资源科学,2019,41(04):775-789.
8. 章恒全,蔡晓莹,黄元龙,张陈俊.中国绿色水资源利用效率的时空分布差异[J].水利经济,2020,38(03):1-6+18+83.
9. 孙涵,聂飞飞,胡雪原.基于熵权TOPSIS法的中国区域能源安全评价及差异分析[J].资源科学,2018,40(03):477-485.
10. 陈兆荣,雷勋平.基于熵权可拓的我国能源安全评价模型[J].系统工程,2015,33(07):153-158.
11. 马恩朴,蔡建明,林静,郭华,韩燕,廖柳文.2000—2014年全球粮食安全格局的时空演化及影响因素[J].地理学报,2020,75(02):332-347.
12. 姚成胜,殷伟,李政通.中国粮食安全系统脆弱性评价及其驱动机制分析[J].自然资源学报,2019,34(08):1720-1734.
13. 高延雷,张正岩,王志刚.基于熵权TOPSIS方法的粮食安全评价:从粮食主产区切入[J].农林经济管理学报,2019,18(02):135-142.
14. 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(05):1-8.
15. 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(01):120-128.
16. 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(01):69-78.
17. HENRY H W, DAVID G G, JEANNE S R, et al. Developing the Pardee RAND food-energy-water security index: toward a global standardized, quantitative, and transparent resource assessment[R]. RAND Corporation, 2016:27-36.
18. SACHS J, SCHMIDT-TRAUB G, KROLL C, et al. SDG Index and dashboards-global report[R]. Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDSN), 2016:31-46.
19. 谷树忠,姚予龙,沈镭,吕耀.资源安全及其基本属性与研究框架[J].自然资源学报,2002(03):280-285.

张烽文,刘小鹏,刘希风.宁夏西海固地区农业生态环境面源污染调查研究[J].干旱区资源与环境,2007(07):75-80.

1. 章恒全,覃颖聪,张陈俊.中国产业用水量变化驱动效应分解与差异分析[J].水利经济,2019,37(06):1-7+85.
2. 陈晓雪,徐楠楠.长江经济带绿色发展水平测度与时空演化研究——基于11省市2007—2017年数据[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2019,21(06):100-108+112.
1. **作者简介**：黄德春(1966-)，男，博士（后），教授，博导，主要研究方向为水资源-能源-粮食协同发展与安全、一带一路与澜湄投资合作。E-mail: huangdechun@hhu.edu.cn

**通讯作者**：李进秋（1983-），女，博士生，主要研究方向为水资源-能源-粮食协同发展与安全、资源环境经济。E-mail: 180213120005@hhu.edu.cn

**基金项目**：国家社科基金重大项目“绿色发展下我国水资源-能源-粮食协同发展与安全战略研究”（批准号：19ZDA084 ） [↑](#footnote-ref-1)