

黄河上中游地区水-粮食-能源协同发展战略研究

姜珊^{1,2}, 王建华^{1,2}, 刘合^{3*}, 朱永楠^{1,2}, 何国华^{1,2}, 李澍^{1,2}, 黄洪伟⁴

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 西安 712199)

摘要: 黄河上中游地区是我国水资源、粮食、能源矛盾最为突出的区域之一, 系统识别水-粮食-能源安全形势并提出应对措施, 是该地区实现高质量发展的重要保障。本文在科学认识水-粮食-能源纽带关系基本内涵的基础上, 研判了地区水资源、粮食、能源发展的新形势, 剖析了水-粮食-能源协同发展面临的机遇和挑战, 针对黄河流域生态保护和高质量发展目标, 提出了新发展理念下水-粮食-能源协同安全的“四化一创”保障战略框架。研究建议, 重视水资源在纽带关系中的核心作用, 实现水资源支撑作用最大化; 将能源作为区域高质量发展的战略性支柱产业, 实现能源对经济社会发展带动作用最大化; 强化农业用水支撑, 实现粮食安全保障作用最大化; 加强水资源保护, 实现粮食、能源对水资源与生态环境干扰的最小化; 加强基础科技研究, 发展水-粮食-能源安全保障技术。

关键词: 水-粮食-能源; 协同发展; 黄河上中游; 高质量发展; 安全保障

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A

Coordinated Development of Water, Food, and Energy in Upper and Middle Reaches of the Yellow River

Jiang Shan^{1,2}, Wang Jianhua^{1,2}, Liu He^{3*}, Zhu Yongnan^{1,2}, He Guohua^{1,2},
Li Wei^{1,2}, Huang Hongwei⁴

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Xi'an 712199, China)

Abstract: The upper and middle reaches of the Yellow River is an important region in China characterized by ongoing conflicts regarding water resources, food, and energy. To achieve high-quality development of the region, it is essential to identify water, food, and energy security risks and propose corresponding measures. This study examines the basic implications of water-food-energy coordinated development and analyzes the new situation, opportunities, and challenges associated with the coordinated development of water, food, and energy in the region. Focusing on the goals of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, the study proposes a strategic framework for coordinating water, food, and energy development. It further proposes the

收稿日期: 2023-03-06; **修回日期:** 2023-05-28

通讯作者: *刘合, 中国石油勘探开发研究院教授, 中国工程院院士, 研究方向为能源与矿业工程管理; E-mail: liuhe@petrochina.com.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目(72088101, 51809282); 中国工程院咨询项目“气候变化与双碳目标背景下的能源与水综合协同发展战略研究”(2022-XZ-07)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

following suggestions: (1) maximizing the utilization of water resources, (2) taking the energy industry as a pillar industry of the region and enhancing energy production efficiency, (3) ensuring food security by strengthening water support, (4) minimizing the negative impacts of food and energy development on water resources and ecology, and (4) innovating technological and institutional approaches to guarantee water, food, and energy security.

Keywords: water-food-energy; collaborative development; upper and middle reaches of the Yellow River; high-quality development; security assurance

一、前言

黄河上中游地区（包括内蒙古自治区、山西省、陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区）是我国能源富集区和粮食主产区，但也是水资源短缺、经济社会发展与生态安全用水矛盾突出的地区，区域内生态环境脆弱、经济欠发达，合理推动水资源、粮食、能源协同发展至关重要。目前，黄河流域生态保护和高质量发展已被列为国家重大战略^[1]，但流域内上、中、下游地区情况差异明显，发展定位也不尽相同。黄河上游地区约占总流域面积的51.3%，以生态保护为主，2021年的人均国内生产总值（GDP）仅为全国平均值的78%；黄河中游地区约占总流域面积的45.7%，拥有丰富的煤炭资源，2021年的人均GDP为7.13万元；黄河下游地区面积仅为 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，但GDP相当于上中游7个省份之和^[2]。因此，实现黄河流域高质量发展的关键点和难点在上中游地区。面对新发展要求、新宏观形势，研究不确定条件下水资源、粮食、能源的协同安全发展，对实现黄河上中游地区的持续、稳健发展具有重要的现实意义。

2011年在德国波恩召开的水-粮食-能源安全纽带关系会议，首次将三者关系确定为纽带关系^[3]。此后，水-粮食-能源的集成耦合与协同保障成为各国学者和研究机构关注的重要课题，研究范围从内部耦合关系^[4,5]向外部影响因素^[6,7]拓展，研究方法从一般的全生命周期^[8,9]向复杂的耦合多要素模型^[10,11]发展。但无论是从理论体系的完整性，还是对现实需求的实际支撑角度来看，当前研究仍处于起步阶段，整体视角下的水-粮食-能源协同策略研究尤为缺乏，使面向可持续发展的地区综合管理未能获得坚实支撑。

本文在科学认识水-粮食-能源纽带关系及其演变规律、资源利用、经济发展等复杂关联与互馈机制的基础上，聚焦水、粮食、能源矛盾极为突出的黄河上中游地区，研判地区发展新形势，凝练面临的机遇与挑战，提出新发展理念下地区水-粮食-能

源协同安全发展的保障策略建议，以期进一步明确水-粮食-能源协同发展的重要性，加快构建水-粮食-能源系统安全体系，支撑黄河流域重大国家战略的实施。

二、水-粮食-能源协同推动黄河上中游地区高质量发展

（一）水-粮食-能源协同发展的基本内涵

国际上对水-粮食-能源的关系描述为“Nexus”，将其定义为不同事物之间的复杂联系，既强调水、粮食、能源资源系统内部复杂的关联关系，又突出外部环境对核心资源的影响^[12]。我国将水-粮食-能源的关系称为纽带关系，强调在气候变化、人口增长、城镇化发展等背景下，水、粮食、能源资源的多重因果联系。水资源对农业生产及能源开采加工至关重要，还具有流通性和循环性，参与自然环境中一系列物理、化学、生物过程，且通过经济脉络进行流动，是水-粮食-能源纽带关系的核心要素（见图1）。

水-粮食-能源系统既受内部供需不稳定的影响，也受外部环境、经济社会发展状况、生产水平、发展政策等的影响。水-粮食-能源协同安全发展指在区域环境容量承载范围内，系统内部要保证水、粮食、能源在数量与质量方面的安全和充足，系统外部则要优化三者间的资源配置，提升资源流动与转化效率；通过社会、政府调控，最大程度地提升系统抗风险能力，增强系统内部与外部环境适应性，产生更多的经济、社会与环境效益，形成相对安全、风险较低的资源供应循环，以三者协调推动区域可持续发展。

（二）区域高质量发展与水-粮食-能源协同发展的新形势

1. 国家发展的新要求带来的全新挑战

《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》

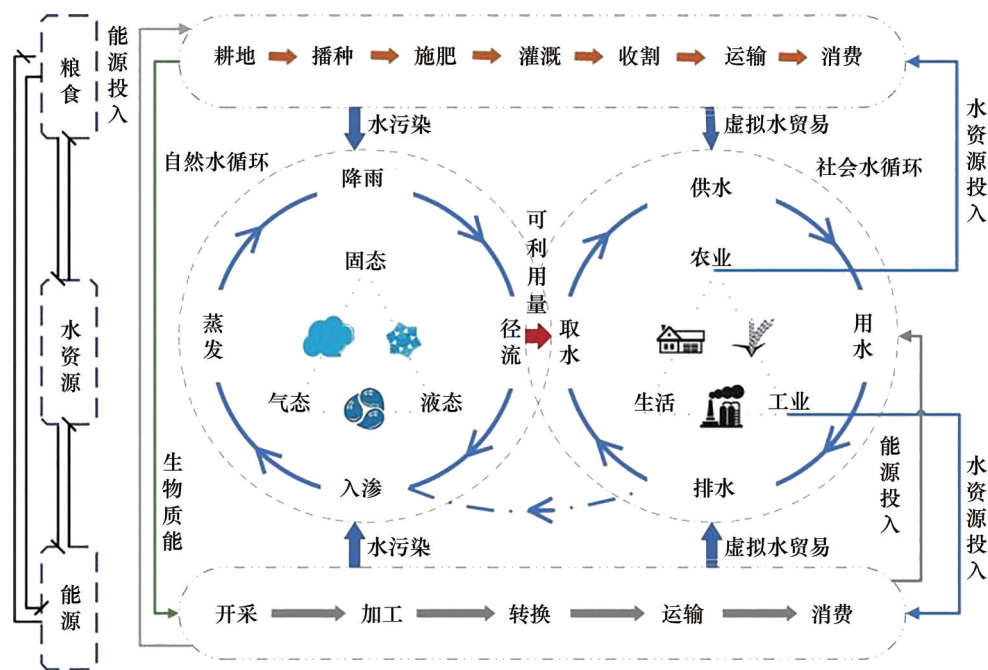


图1 水-粮食-能源纽带关系基本框架

(2021年)提出,统筹推进“山水林田湖草沙”综合治理、系统治理、源头治理,着力优化水资源配置,着力促进全流域高质量发展,让黄河成为造福人民的幸福河^[13]。《关于全面加强资源节约工作的意见》(2022年)强调,把节约放在资源开发利用的突出位置,水资源、粮食、能源作为国家发展最为重要的基础性自然资源,也是实现高质量发展的战略性经济资源,要求推进一体化节约、全过程管理和全链条节约。面对国家治理的现实需要和水-粮食-能源耦合系统复杂化对资源管理赋予的全新任务,保障黄河上中游地区水-粮食-能源系统的协同安全,构建黄河上中游地区水-粮食-能源系统的需求保障路径,是推动我国经济社会健康发展的迫切需要和必然要求。

2. 碳达峰、碳中和战略目标提出更高要求

《2030年前碳达峰行动方案》(2021年)提出,构建新发展格局,坚持系统观念,处理好发展和减排、整体和局部、短期和中长期的关系,统筹稳增长和调结构,把碳达峰、碳中和(“双碳”)纳入经济社会发展全局^[14]。实现“双碳”战略目标,需对经济、政策、技术等多方面进行系统性变革,将会显著影响我国未来的经济发展模式。能源资源型产业是黄河上中游地区经济增长的主要产业,形成了以煤为主,衍生火电、煤化工、钢铁等高耗能产

业的传统产业经济。面对“双碳”战略目标的刚性约束和未来水资源、粮食、能源需求增加的现实需求,发展先进的深度脱碳技术将成为该区域发展的必然要求,因而处理好水-粮食-能源-碳排放之间的动态平衡关系,对新时期黄河上中游地区经济社会发展格局的调整具有重要意义。

3. 区域发展带动产业结构调整带来的新机遇

当前,我国经济发展逐渐进入“新常态”阶段,第三产业逐渐成为产业主体,基本实现了创新发展、协调发展、绿色发展、开放发展和共享发展^[15]。自2012年起,黄河上中游地区的GDP增长率呈下降趋势且低于全国平均水平,2016年第三产业占比超过第二产业。依托地区资源优势 and 西部大开发战略,黄河上中游5省份已逐渐发展成为国家能源重化工基地,工业结构呈现过度重工业化倾向,工业高级化特征尚未显现,优势产业仍集中在能源、矿产资源、装备制造等方面,单一的产业结构使经济整体会比较脆弱。“一带一路”倡议和黄河流域生态保护和高质量发展战略为区域经济增长提供了新的机遇^[16],需要因地制宜构建现代化工业体系,培育地区产业发展新优势。黄河上中游地区化石能源储量丰富,具有得天独厚的新能源资源优势 and 开发条件,可以进一步增强能源开发利用 and 调配能力,延伸重点产业链,加快提升传统产业绿

色、智能发展。推动区域能源产业发展事关国家能源安全^[17]，也对促进区域经济社会发展、提升居民收入水平和巩固脱贫成果具有重要意义。

三、黄河上中游地区水-粮食-能源系统的发展现状

(一) 化石能源富集，是国家能源安全保障战略基地

在全国14个亿吨级大型煤炭基地中^[18]，位于黄河上中游地区的有7个。黄河上中游地区的煤炭资源总量占全国的52.2%，累计原煤产量占全国的49.3%，一次能源产量占全国总产量的50%以上。依托丰富的能源资源，黄河上中游地区建成了一批能源和重化工基地、钢铁生产基地、铝业生产基地、机械制造和冶金工业基地，带动了经济社会的快速发展，形成了以煤炭、电力、化工等低附加值行业为支柱的工业体系^[19]，“倚重倚能”特征非常明显。2000—2019年，我国能源消费量平均每年增长约11.2%，一次能源生产量平均每年增长8.9%，能源消费增速明显高于生产增速。作为能源的主要输出区，2015—2019年黄河上中游地区平均每年外运（输）原煤 1.63×10^9 t、原油 2.6×10^7 t、天然气 5.01×10^{10} m³、电力 5.01×10^{11} kW·h。当前，在国内能源需求和国际环境不确定性“双升”态势下，针对我国石油和天然气对外依存度较高的情况，稳定并提升我国能源自给率极为重要。此外，黄河上中游地区连接着中亚诸国的油气通道，确保油气通道安全畅通和提高保障能力也是实现国家能源安全、地区稳定的重要支撑。

(二) 农产品丰富，是国家粮食安全重要保障区

由于光热资源充足、灌溉条件好，黄河上中游地区是我国农业经济开发的重点地区。随着东南沿海地区工业化、城镇化发展进程的不断加快，粮食生产和流通格局从“南粮北运”变为“北粮南运”^[20]。黄河上中游地区的耕地面积约占全国耕地总面积的17%，粮食总产量约占全国粮食总产量的12%，拥有青铜峡灌区、河套灌区、汾河灌区等大中型灌区55个^[21]，是确保国家粮食安全的重要地区。2012—2021年我国粮食产量连续10年保持在 6×10^8 t以上，其中水稻、小麦、玉米三大谷物的自给率超过

98%^[22]。尽管我国粮食产量连创新高，但年消费量约为 7×10^8 t，为“把中国人的饭碗牢牢端在自己手中”，我国制定了 1.8×10^9 亩（1亩 ≈ 666.7 m²）的耕地红线^[23]。目前，黄河上中游地区宜农荒地约为 3×10^7 亩，占全国宜农荒地总量的30%，是我国重要的后备耕地^[24]，拥有较大的开发潜力。

(三) 干旱问题突出，是严重资源性缺水区域

黄河上中游地区深居内陆，区域内水资源的空分布格局为东多西少，年际和年内分布不均的特征十分显著。根据中国水资源公报^[25]，黄河上中游地区多年平均年降水量为357 mm，远低于全国平均降水量（661 mm）；年平均蒸发量达到1660 mm^[26]，强烈的蒸发作用加大了区域水分的消耗。此外，该区域降水情况在时间上的分配也极不均匀，全年60%~80%的降水量集中在夏季。从2000—2019年人均水资源量来看，除内蒙古自治区多年的平均人均水资源量（1941 m³）相对较高外，宁夏、山西两省份的多年平均人均水资源量仅为163 m³、312 m³，属于“极度缺水”区域^[27]。

黄河上中游地区的水源单一，经济社会供水依赖于地表水量。受产业结构和降水情况影响，2000年之后，黄河上中游农业用水占比始终保持在70%以上，工业用水量仅占总用水量10%，农业用水占比偏高，用水效率偏低，造成该区域单位水产出水平远低于东部地区，用水效益亟待提高。此外，受自然条件和灌溉方式的影响，黄河上中游地区在灌溉、生产、生活过程中产生了大量退水，带来了一定的水资源浪费，影响了黄河干流的水量和整体调度，不利于灌区乃至黄河流域生态的健康发展^[28]。

(四) 水-粮食-能源矛盾突出，是协调发展的重点地区

黄河上中游地区以不到全国4%的水资源，生产了全国12%的粮食和50%以上的一次能源，但区域生产总值仅占全国7%，水-粮食-能源系统与社会经济要素的空间错配特征十分显著，是我国水-粮食-能源纽带关系表现最显著、矛盾最突出的区域之一。受气候和下垫面变化影响，2001—2017年黄河水资源总量较1956—2000年降低了8.7%^[29]，水资源短缺成为制约区域粮食、能源可持续发展的关键

要素。针对黄河上中游地区能源和粮食生产过程中的水资源消耗问题,已有研究较为全面^[30]。为提高水资源利用效率,该区域大力发展节水灌溉,推广喷灌、微灌、低压管道输水灌溉等节水技术;加大工业节水改造力度,推进工业用水循环利用和再生水回用改造。但由于水资源、粮食、能源隶属于不同行业和部门,交叉与综合研究较为薄弱,目前尚未提出基于多要素内在互馈机制的跨行业、多部门协同保障方案。

由于水资源本地条件不足,水资源开发利用程度已超出了合理开采的上限,严重挤占生态用水,水资源供需矛盾突出,地理空间上的资源错配是水-粮食-能源关系中的核心矛盾。黄河上中游地区水、粮食、能源的协同发展不仅关系着黄河流域高质量发展,也影响着京津冀、东南沿海等地区的资源供需态势。为此,需要深入开展水-粮食-能源纽带关系研究,构建以水资源节约集约利用为核心的水-粮食-能源协同安全体系,严格落实“四水四定”,科学确定与水资源相适应的粮食生产和能源生产发展模式。

四、黄河上中游地区水-粮食-能源协同发展面临的挑战

(一) 能源结构升级,化石能源仍是最重要的基础资源

我国已进入全面建设社会主义现代化国家的新发展阶段,经济总量的持续扩大,对能源的刚性需求将长期存在。2030年,我国能源消费总量将控制在 6×10^9 tce以内,非化石能源、天然气占能源总消费量的比重分别达20%、15%^[31],化石能源仍是我国最重要的基础资源。针对中东部地区能源需求持续旺盛而资源逐渐枯竭的现状,黄河上中游地区作为我国能源接替区和资源战略储备区,发挥的作用日益重要。黄河上中游地区丰富的能源资源优势、优越的开采条件、良好的发展基础、便捷的能源外运通道使其成为我国能源格局中的重要组成部分。

目前,黄河上中游地区能源生产结构仍以煤炭为主,煤炭生产占一次能源生产的比例达90%,新能源装机量占该地区发电总装机量的36%,统筹协调能源安全与绿色发展的难度较大,风电和光伏

发电存在配套措施、政策衔接、设备更新等问题。

《“十四五”现代能源体系规划》(2022年)^[32]指出,推进内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林、山西晋北等煤制油气战略基地,山西、内蒙古西、陕北等地煤炭供应保障基地,黄河上游、黄河几字弯大型风电太阳能发电基地建设。化石能源仍是当前一段时间黄河上中游地区的主要供给能源。

(二) 保障国家粮食安全作用凸显,水资源成为制约发展的关键因素

近年来,黄河上中游地区的粮食生产量增加了87%,对全国粮食的贡献率从9%增高至12%。由于缺少区域间粮食贸易的相关数据,假定各地区人均消费量相同,粮食流通量等于本地粮食生产量减去粮食消费量,其正、负值代表粮食输出量和粮食输入量^[33]。根据统计数据,对黄河上中游地区的粮食贸易情况进行分析后发现(见图2),2000—2019年水稻输入量较大且较稳定,年均输入量为 1.64×10^7 t;小麦从2009年起由输出逐步转为输入;玉米是黄河上中游地区主要的输出粮食且输出量呈增长趋势,年均输出量为 1.72×10^7 t。这表明近20年黄河上中游地区由粮食输入区逐步转为粮食输出区,且作为玉米主产的区地位得到了提升。鉴于我国南方地区受土地资源和农业劳动力等资源限制,东北地区粮食生产受耕地和生态环境等制约,华北地区因地下水超采严重而致区域水资源承载压力较大^[34],黄河上中游地区作为重要粮食产区在保障国家粮食安全方面的作用将逐渐凸显。

从用水指标来看,黄河上中游的亩均灌溉水量为 463 m^3 ,农田灌溉水的有效利用系数偏低,大水漫灌现象普遍存在。从自然条件来看,该地区降水量少、蒸发量大,即使是种植相同作物、采用同样节水设施,亩均灌溉补水量仍显著高于其他地区。此外,该地区的农田灌溉除了维持农作物需求之外,还有隐藏的绿洲生态系统维持功能,如宁蒙引黄灌区降水量只有180 mm左右,引黄灌溉成为维持绿洲生态系统健康的关键形式。该地区的黑山峡河段、宁夏、内蒙古、陕西和甘肃接壤地区,地形平坦且土地集中连片、光热资源适宜,具有发展农业生产的巨大潜力,在解决水资源短缺的条件下,可成为我国粮食生产的重要增长点。

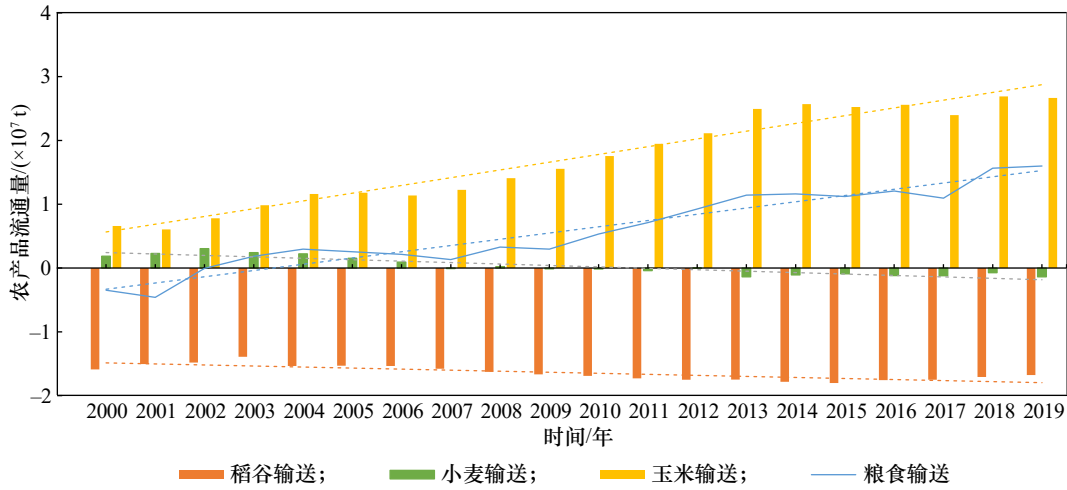


图2 黄河上中游粮食贸易格局变化趋势

(三) 作为粮食和能源输出区，水资源压力增加

作为“北粮南运”“西电东送”“西气东输”的重要组成部分，黄河上中游地区每年向全国输送粮食约 6×10^6 t，调出一次能源约 8.4×10^8 tce；在粮食和能源贸易过程中，伴随大量虚拟水输出给当地增加了水资源压力。为分析近期黄河上中游地区虚拟水的变化情况，本文基于2012年和2017年多区域投产出表^[35]，发现区域本地虚拟水消费量从2012年的 3.28×10^{10} m³下降到2017年的 2.92×10^{10} m³（见表1）。其中，农业虚拟水消费量占比从42%上升到47%，农业虚拟水净输出量从 3.16×10^9 m³增加到 4.06×10^9 m³；能源行业的虚拟水消费量较少，仅占总虚拟水消费量的1.6%，能源行业的虚拟水净输出量大于本地消费量。伴随农产品和能源产品贸易带来的虚拟水输

出量占总虚拟水输出量的85%以上。2017年，黄河上中游地区向北京、天津、上海、浙江和广东等省份输送农产品，伴随的虚拟水流量达到 5.1×10^9 m³；向河北、江苏、浙江和广东等省份输送能源产品，伴随的虚拟水流量达到 1.2×10^9 m³；虚拟水流动呈现出“由贫到富”“由短缺到丰富”的趋势。

水资源压力指数可以用来分析虚拟水流通对区域水资源的影响情况。水资源压力指数指区域总用水量与可更新水资源总量的比值，其中区域总用水量等于水资源开发利用总量扣除过境水利用量和跨流域调入水量^[36]。为分析虚拟水的影响，本文的跨流域调入水量等于实体调水量和虚拟水输入量之和。据统计，2001—2016年黄河多年平均天然径流量比1956—2000年减少17.4%^[1]，用水量缓慢增加，导

表1 2012年和2017年黄河上中游地区虚拟水消费情况

(单位: $\times 10^8$ m³)

部门	2012年		2017年	
	本地虚拟水消费量	虚拟水净输出量	本地虚拟水消费量	虚拟水净输出量
农业	136.77	49.27	137.64	89.04
能源行业	11.05	35.46	4.81	6.97
纺织服装业	6.04	-19.33	2.96	-9.12
造纸印刷及文教用品制造业	1.60	-6.92	0.94	-4.86
食品和烟草	60.58	-6.84	43.36	-18.87
金属冶炼及制品业	2.51	12.07	0.65	4.39
设备制造	5.58	-22.15	4.45	-5.65
其他工业	8.63	-17.73	1.88	-17.95
服务业	95.23	7.77	95.73	-3.39
总计	327.99	31.60	292.44	40.57

致黄河水资源压力增大，水资源压力指数从2012年的0.44上升到2017年的0.47，属于水资源高压地区。其中，农产品和能源的虚拟水流出量对区域水资源压力的贡献率达25%，水资源伴随着贸易的流通从黄河上中游地区流向经济发达地区，使得该地区的水资源压力进一步增加。

(四) 粮食与能源生产规模增加，用水竞争加剧

随着节水技术的推广和用水效率的提高，黄河上中游地区的农业用水量不断下降，农业用水占比由2000年的74.6%下降到2019年的62.8%；而能源相关产业的快速发展，使能源产业（煤炭开采、火电、煤化工、石油化工等）的用水量增加了3.2倍，能源产业用水量占比从1.3%上升到5.3%。为分析黄河上中游粮食-能源生产对水资源的竞争态势，本文采用能源-粮食生产水资源竞争指数（EFCI）对其进行分析^[7]。如图3所示，2000—2019年，能源与粮食生产的EFCI总体呈增长趋势，从0.19上升到0.36，高于同期全国平均竞争水平（2019年为0.27）。

在我国着力改善能源结构和生态保护的政策引导下，煤炭、石油等能源的比重将持续下降，天然气以及清洁能源的比重将持续上升。黄河上中游地区相关省份的产业结构将朝更优的方向发展，但其优化升级的整体速度低于全国平均水平。基于此，本文预测黄河上中游地区2035年、2050年能源产业用水量将达到 $3.37 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $4.104 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。就农业需水量预测而言，需考虑实际灌溉面积和规划灌溉面积2种情景。情景1：在灌溉面积保持不变的情况下，根据水利部审查通过的《新形势下黄河流域水资源供需形势深化研究》规划成果，目前黄河

上中游地区的农田有效灌溉面积为 6.5×10^7 亩，实际灌溉面积为 5.56×10^7 亩，据此测算，2035年、2050年的农业用水量分别为 $2.44 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $2.35 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。情景2：在灌溉面积为规划面积的情况下，根据《全国现代灌溉发展规划》中的大中型灌区续建配套新增灌溉面积，2035年黄河上中游农田的有效灌溉面积为 6.94×10^7 亩，据此测算2035年、2050年的农业用水量分别为 $2.89 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、 $2.78 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。若区域需水量可以得到满足，粮食和能源用水竞争指数将上升到0.49。但在水资源量衰减和未来用水需求扩大的双重作用下，区域水资源缺口呈扩大趋势，用水竞争加剧，亟需构建水-粮食-能源复杂系统的需求保障路径，推动区域健康高质量发展。

五、黄河上中游地区水-粮食-能源协同安全保障应对举措

水-粮食-能源纽带关系协同安全保障战略的目标是均衡水-粮食-能源系统与内外关联要素之间的关系，使有限的水资源可以最大化支撑粮食、能源行业的合理开发利用，避免粮食生产、能源开发对水系统和生态环境系统产生不利的影响，实现环境效益、经济效益、社会效益和创新效益的最大化。在新发展理念下，水-粮食-能源纽带关系的协同安全是在“四化一创”之间寻求平衡。水-粮食-能源纽带关系协同安全“四化一创”保障战略框架如图4所示，包括水资源对粮食、能源支撑最大化，粮食安全保障最大化，能源生产效益最大化，粮食和能源对水与生态扰动最小化，水-粮食-能源安全保障技术与机制创新。

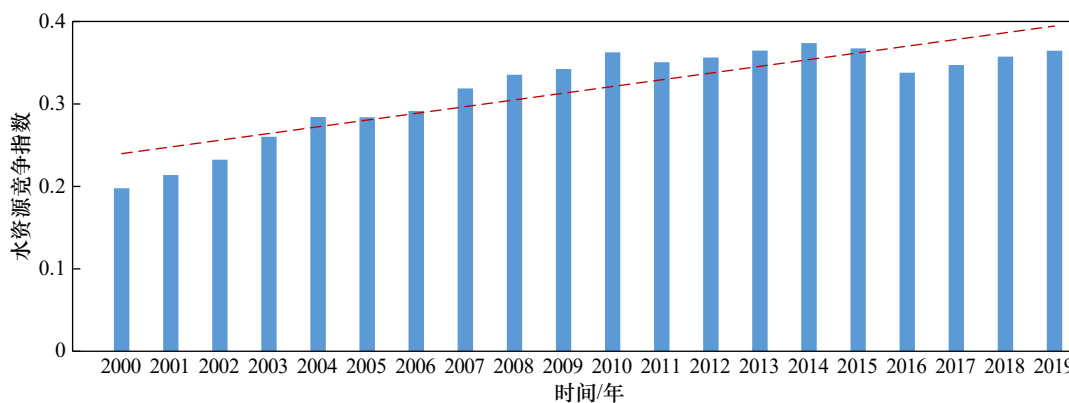


图3 黄河上中游地区能源-粮食生产的水资源竞争指数变化情况

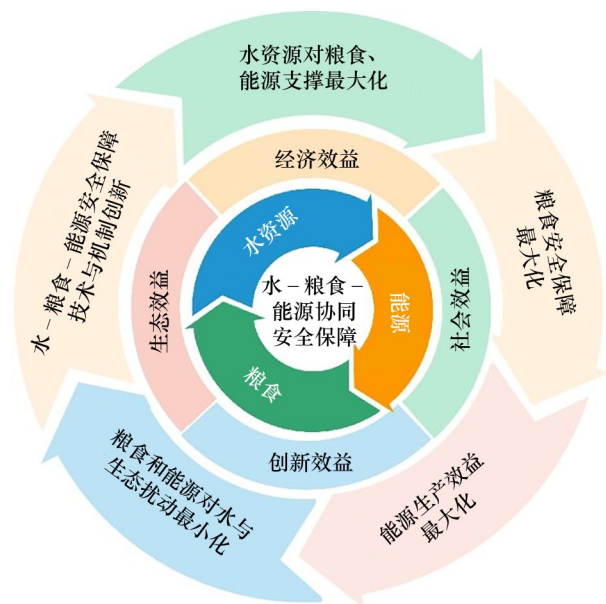


图4 水-粮食-能源纽带关系协同安全“四化一创”保障战略框架

(一) 重视水资源在纽带关系中的核心作用，实现水资源支撑作用最大化

黄河上中游地区的粮食和能源生产不仅要满足当地的需求，还要为国家粮食和能源安全提供重要支撑。近年来，黄河上中游地区的用水压力处于高压状态，当前的水资源可利用量和生态环境保护已对区域粮食生产与化石能源的开发形成了明显的约束，部分地区新增能源用水已经无法充分保障。为此，需深入研究水-粮食-能源系统间的复杂规律，提高水资源和能源的利用效率，在区域、行业发展规划时，建议将水资源、粮食、能源同时布局，统筹协调区域内水资源的开发和利用，以实现资源禀赋特征下的社会经济最佳发展模式。多年来，黄河流域的经济社会发展、生态环境和水资源情势发生了显著变化，2014年南水北调东中线一期工程全面通水后，黄河“八七”分水方案的局限性日益凸显。建议统筹南水北调水和黄河水，按照“小调整、大稳定”的原则，分阶段适时调整黄河“八七”水量分配方案，适度向黄河上中游地区的重点能源基地予以倾斜。

(二) 将能源作为区域高质量发展的战略性支柱产业，实现能源对经济社会发展带动作用的最大化

黄河上中游地区是我国经济后发地区，人均

GDP仅为东部地区的55%，但能源种类丰富、储量大，是区域实现跨越式发展的重要突破口。建议在生态环境、水资源保护及综合利用的前提下，加大晋陕蒙宁地区的化石能源勘察工作，逐步提高勘探和详查比例，形成化石能源资源梯形结构；将资源优势转化为产业优势，建立产业集群布局体系，通过配套基础设施建设打通区域能源优势点位，强化区域协同发展与辐射带动作用；加大可再生能源产业基地与分布式可再生能源微网建设，打造多能协同发展的多元化产业模式。此外，为打破“遍地开花”、标准不一的能源相关产业发展状况，明确区内能源产业布局，依据自然禀赋、市场需求、产品优势等统一规划各示范区能源发展定位。建议由国家行业主管部门牵头，会同自然资源、生态环境、工业和信息化等有关部门，组织编制黄河上中游地区集约绿色能源示范区建设规划，协调地区间能源生产及市场，促进区域能源产业整体高质量健康发展。

(三) 强化农业用水支撑，实现粮食安全保障作用最大化

粮食生产是高耗水产业，粮食贸易净输出虚拟水的不断增加（达到 $4.06 \times 10^9 \text{ m}^3$ ），势必对黄河上中游地区的水资源和生态系统稳定以及区域经济发展产生负面影响，应引起高度重视。建议严格“以水定地”，根据水资源承载能力，对水资源短缺、水资源开发过度、生态环境脆弱的地区划定灌溉面积控制红线；在采取种植结构调整、强化节水措施后仍不能满足灌溉和退减挤占生态环境用水要求的地区，采取有效措施退减灌溉面积。深入研究和论证西部调水工程，投资建设农田水利工程，为区域提供水资源保障。在科学划定“三区三线”的背景下，合理利用自然资源，开发甘肃西部地区、内蒙古西部地区以及内蒙古陕西交界地区的后备耕地，积极培育黄河上中游干旱半干旱地区粮食生产新动能，疏解东部地区粮食生产压力，改变西部地区大面积荒漠状态，构筑稳定的生态屏障。

(四) 加强水资源保护，实现粮食及能源对水资源与生态环境干扰最小化

黄河上中游地区的水资源现状利用量占用水量总量控制指标的比重偏高，外延式发展潜力有限，

亟需通过技术进步和政策约束将粮食生产与能源开发对水资源、生态环境的不利影响减少到最小。建议压减高比例农业用水,借助市场手段高效配置水资源,建立和健全水权交易制度、规则及其技术支撑体系,鼓励能源企业出资进行灌区节水技术改造,在维持水生态健康的基础上保障粮食生产和能源开发;明确化石能源在生态环境治理与能源清洁低碳转型中的定位和作用,强化碳捕集、利用与封存技术攻关,为化石能源可持续发展提供技术保障。同时,立足风、光、水资源优势,大力发展清洁可再生能源,多措并举保障黄河上中游地区能源外输。

(五) 加强基础科技研究, 发展水-粮食-能源安全保障技术

针对水-粮食-能源互动理论与协同保障技术短板,创新变化条件下水-粮食-能源系统关联互动演化与多目标协同理论,发展多尺度水-粮食-能源纽带关系分析方法和模型,突破不确定条件下水资源协同配置优化技术。加强前瞻性、颠覆性节水技术研发,创新水的循序再生利用技术,在农业方面重点研发旱作种植、咸水种植等技术,在能源方面积极研发保水采煤、无水冷却、无水压裂、污水中能源回收利用等技术。根据国家粮食和能源中长期发展规划,统筹考虑实体水与虚拟水两个维度,从国家层面提出保障水安全、粮食安全和能源安全的适水产业布局调整方案。

六、结语

黄河上中游地区土地资源丰富,光热条件适宜,矿产和能源资源富集,却是我国水资源最为紧缺的地区。新时期黄河上中游地区的供需形势发生深刻变化,随着西部大开发战略、“一带一路”倡议等的实施,经济社会发展与生态安全用水之间的矛盾日趋突出;国家能源和粮食安全保障将进一步驱动用水需求的增长,水资源保障问题更为复杂。实现黄河上中游水-粮食-能源协同安全,直接关系到西部国土的稳定和长治久安,也是保障国家均衡、强劲、持续发展的关键。

推进区域水-粮食-能源协同发展战略的关键是解决水资源问题,应依据水-粮食-能源系统间

的复杂规律,统筹协调区域水资源开发,粮食和能源生产、经济发展活动,将水资源、粮食、能源同时规划和布局,提高资源利用效率,强调三者间的协调安全发展,以构建资源禀赋特征下的社会经济最佳发展模式。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 6, 2023; **Revised date:** May 28, 2023

Corresponding author: Liu He is a professor from Research Institute of Petroleum Exploration and Development, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is energy & mining engineering. E-mail: liuhe@petrochina.com.cn

Funding project: National Natural Science Foundation of China (72088101, 51809282); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Comprehensive Collaborative Development Strategy of Energy and Water under the Background of Climate Change and Dual Carbon Goals” (2022-XZ-07)

参考文献

- [1] 张金良. 黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考 [J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 1-6.
Zhang J L. Water strategy for ecological protection and high quality development in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2020, 42(4): 1-6.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. 2021 China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [3] Hoff H. Understanding the nexus [C]. Stockholm: The Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus, 2011.
- [4] Hanumankar H R. The water, energy and food security nexus: Lessons from India for development: Book review [J]. International Journal of Water Resources Development, 2015, 31(1): 146-148.
- [5] 林志慧, 刘宪锋, 陈瑛, 等. 水-粮食-能源纽带关系研究进展与展望 [J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1591-1604.
Lin Z H, Liu X F, Chen Y, et al. Water-food-energy nexus: Progress, challenges and prospect [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1591-1604.
- [6] Berardy A, Chester M V. Climate change vulnerability in the food, energy, and water nexus: Concerns for agricultural production in Arizona and its urban export supply [J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(3): 035004.
- [7] Zhang X, Li H Y, Deng Z D, et al. Impacts of climate change, policy and water-energy-food nexus on hydropower development [J]. Renewable Energy, 2018, 116: 827-834.
- [8] Sherwood J, Clabeaux R, Carbajales-Dale M. An extended environmental input-output lifecycle assessment model to study the urban food-energy-water nexus [J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(10): 105003.

- [9] Owen A, Scott K, Barrett J. Identifying critical supply chains and final products: An input-output approach to exploring the energy-water-food nexus [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 632-642.
- [10] Scanlon B, Ruddell B, Reed P, et al. The food-energy-water nexus: Transforming science for society [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(5): 3550-3556.
- [11] Zeng X T, Zhang J L, Yu L, et al. A sustainable water-food-energy plan to confront climatic and socioeconomic changes using simulation-optimization approach [J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 743-759.
- [12] 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): 78-92.
Li G J, Huang D H, Li Y L. Water-energy-food nexus (WEF-nexus): New perspective on regional sustainable development [J]. *Journal of Central University of Finance & Economics*, 2016 (12): 78-92.
- [13] 丁民. 对流域保护治理工作的几点思考 [J]. *水利发展研究*, 2020 (3): 43-46.
Ding M. Thoughts on the protection and management of river basins [J]. *Water Resources Development Research*, 2020 (3): 43-46.
- [14] 张涛. 《2030年前碳达峰行动方案》解读 [J]. *生态经济*, 2022 (1): 9-12.
Zhang T. Interpretation of the action plan for carbon peak by 2030 [J]. *Ecological Economy*, 2022 (1): 9-12.
- [15] 黄群慧. 新时代中国经济发展的历史性成就与规律性认识 [J]. *当代中国史研究*, 2022, 29 (5): 23-35.
Huang Q H. Historical achievements and regularity understanding of China's economic development in the new era [J]. *Contemporary China History Studies*, 2022, 29(5): 23-35.
- [16] 刘海霞, 常文峰. 机遇、挑战、对策: “一带一路”背景下西北地区生态文明建设 [J]. *西北工业大学学报(社会科学版)*, 2017, 37(4): 44-49.
Liu H X, Chang W F. Opportunities, challenges and countermeasures: Ecological civilization construction in Northwest China under the background of the “the Belt and Road” [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University (Social Sciences)*, 2017, 37(4): 44-49.
- [17] 沈镭, 高丽. 中国西部能源及矿业开发与环境保护协调发展研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(10): 17-23.
Shen L, Gao L. Managing energy and mineral resources development and pollution control coordinately in the Western China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(10): 17-23.
- [18] 彭祥. 西线调水是事关国家发展全局的战略博弈 [J]. *中国软科学*, 2017 (S1): 7-16.
Peng X. The west rout water transfer is a strategic game concerning the overall development of China [J]. *China Soft Science*, 2017 (S1): 7-16.
- [19] 徐峰, 李想, 舒畅, 等. 黄河流域生态效率时空分异特征及其影响因素研究 [J]. *中国环境管理*, 2022, 14(5): 70-78.
Xu F, Li X, Shu C, et al. Research on the spatiotemporal differentiation characteristics of ecoefficiency in the Yellow River Basin and its influencing factors [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2022, 14(5): 70-78.
- [20] 吴普特, 高学睿, 赵西宁, 等. 实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论基本框架 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 1-10.
Wu P T, Gao X T, Zhao X N, et al. Framework of “two-dimension three-element” coupling flow of real water and virtual water [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 1-10.
- [21] 杨翊辰, 刘柏君. 黄河流域典型灌区节水潜力评估 [J]. *海河水利*, 2021 (3): 10-15.
Yang Y C, Liu B J. Evaluation of water-saving potential of the typical irrigated areas in the Yellow River Basin [J]. *Haihe Water Resources*. 2021 (3): 10-15.
- [22] 辛翔飞, 王济民. 我国粮食自给水平目标设定: 研究综述与政策启示 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(11): 2257-2269.
Xin X F, Wang J M. Target setting of food self-sufficiency level in China: Literature review and policy enlightenment [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2257-2269.
- [23] 王济民, 张灵静, 欧阳儒彬. 改革开放四十年我国粮食安全: 成就、问题及建议 [J]. *农业经济问题*, 2018 (12): 14-18.
Wang J M, Zhang L J, Ouyang R B. China's food security in the past 40 years of reform and opening-up: Achievements, problems and suggestions [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2018 (12): 14-18.
- [24] 薛松贵, 张会言. 黄河流域水资源利用与保护问题及对策 [J]. *人民黄河*, 2011, 33(11): 32-34.
Xu S G, Zhang H Y. Problems and countermeasures of water resources utilization and protection in the Yellow River [J]. *Yellow River*, 2011, 33(11): 32-34.
- [25] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2020年) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China water resources bulletin (2020)* [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2021.
- [26] 卓莹莹, 赵慧霞, 魏敏, 等. 近 59 a 黄河流域蒸发量变化规律及影响因素 [J]. *人民黄河*, 2021, 43(7): 28-34, 77.
Zhuo Y Y, Zhao H X, Wei M, et al. Temporal and spatial changes of pan evaporation and its influence factors in the Yellow River Basin in recent 59 years [J]. *Yellow River*, 2021, 43(7): 28-34, 77.
- [27] 郭玉静, 李春晖, 刘绿柳. 气候变化对水资源影响预估常用指标 [J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(4): 496-502.
Guo Y J, Li C H, Liu L L. Common indices in projecting impacts of climate change on water resources [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 17(4): 496-502.
- [28] 李静思. 大型引黄灌区退水规律与退水量预测方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学(博士学位论文), 2021.
Li J S. Study on the law and prediction method of return water in large-scale Yellow River diversion irrigation area [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology (Doctoral dissertation), 2021.
- [29] 张镭, 黄建平, 梁捷宁, 等. 气候变化对黄河流域的影响及应对措施 [J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 42-51.
Zhang L, Huang J P, Liang J N, et al. Impact of climate change on the Yellow River basin and respons [J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(17): 42-51.
- [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 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.
- [31] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030) [EB/OL]. (2017-04-25)[2023-03-26]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Revolutionary strategy for energy production and consumption (2016—2030) [EB/OL]. (2017-04-25)[2023-03-26]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568.htm.
- [32] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划 [EB/OL]. (2022-01-29)[2023-03-26]. http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Modern energy system planning for the 14th Five Year Plan [EB/OL]. (2022-01-29)[2023-03-26]. http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.
- [33] 王玉宝, 吴普特, 孙世坤, 等. 我国粮食虚拟水流动对水资源和区域的影响 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 208-215.
- Wang Y B, Wu P T, Sun S K, et al. Impact of virtual water flows of grain on water resources and regional economy in China [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 208-215.
- [34] 赵勇, 何凡, 李海红, 等. 黄河流域极限节水潜力与缺水识别 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Zhao Y, He F, Li H H, et al. Ultimate water-saving potential analysis and water scarcity identification in the Yellow River Basin [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [35] Zheng H, Zhang Z, Wei W, et al. Regional determinants of China's consumption-based emissions in the economic transition [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(7): 074001.
- [36] Zhao X, Liu J, Liu Q, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(4): 1031-1035.
- [37] Hua E, Wang X Y, Engel B A. The competitive relationship between food and energy production for water in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119103.