

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.010 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.010

鲁仕宝,张樊,裴亮,等.能源-粮食关联视角下的我国五大典型区水资源安全[J].水土保持学报,2026,40(1):219-230.

LU Shibao, ZHANG Fan, PEI Liang, et al. Evaluation of water resource security in China's five typical regions from the perspective of energy-food nexus[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):219-230.

能源-粮食关联视角下的我国五大典型区水资源安全

鲁仕宝¹, 张樊¹, 裴亮², 邓伟升¹, 薛延刚³

(1. 云南大学工商管理与旅游管理学院, 昆明 650000; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3. 重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160)

摘要: [目的] 为通过量化能源与粮食生产的虚拟水流动, 评估2001—2021年中国东北、华北、西北、西南和华东五大能源粮食主产区水资源安全状况, 为优化区域水资源管理策略提供科学依据。 [方法] 采用能源、粮食生产水足迹量化与修正水资源压力指数方法, 研究2001—2021年我国东北、华北、西北、西南和华东五个地区虚拟水在粮食及能源流动影响下的流动状况。 [结果] 五大地区粮食及能源虚拟水的消耗量整体呈显著增长态势, 其中粮食虚拟水足迹从2001年的2 620.5亿m³增至2021年的3 669.3亿m³, 能源虚拟水足迹峰值出现在2017年(44.3亿m³)。5个地区中越来越多的粮食、能源内嵌虚拟水从缺水的东北、西北流向经济发达的华东地区。东北地区通过粮食贸易流出的虚拟水从333.09亿m³(2001年)增至785亿m³(2021年), 西北地区能源虚拟水流出量从1.88亿m³(2001年)升至12.16亿m³(2021年); 而华东地区作为主要输入区, 能源-粮食虚拟水流入量从89亿m³(2001年)增至551.1亿m³(2021年)。水资源压力方面, 东北地区长期处于重度压力状态, 西北地区从无压力转为轻度压力, 华北、华东、西南则维持无压力水平。 [结论] 面对日益增长的水资源压力, 亟须优化调整重点用水地区水资源适应性战略, 完善水-粮食-能源协同管理框架, 合理进行地区水资源结构性调整、调运水资源保障措施。

关键词: 能源; 粮食; 水资源流动; 水资源压力; 水资源安全

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0219-12

Evaluation of Water Resource Security in China's Five Typical Regions from the Perspective of Energy-Food Nexus

LU Shibao¹, ZHANG Fan¹, PEI Liang², DENG Weisheng¹, XUE Yangang³

(1. School of Business and Tourism Management, Yunnan University, Kunming 650000, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

3. Chongqing Water Conservancy and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China)

Abstract: [Objective] This study aims to assess the water resource security status of China's five major energy and food production regions Northeast, North, Northwest, Southwest and East China from 2001 to 2021 by quantifying virtual water flows of energy and food production, thereby providing a scientific basis for optimizing regional water resource management strategies. [Methods] By using the water footprint quantification of energy and food production and the modified water stress index method, this study investigated the virtual water flows in China's five regions (Northeast, North, Northwest, Southwest and East China) from 2001 to 2021 under the influence of food and energy flows. [Results] The overall consumption of virtual water for food and energy in the five regions demonstrated a significant increasing trend. Specifically, the virtual water footprint of food increased from 262.05 billion m³ in 2001 to 366.93 billion m³ in 2021, while the virtual water footprint of energy peaked at 4.43 billion m³ in 2017. Furthermore, an increasing amount of virtual water embedded in food and energy flowed from water-scarce regions (Northeast and Northwest China)

收稿日期: 2025-05-25

修回日期: 2025-07-26

录用日期: 2025-08-03

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(51379219); 四川省哲学社会科学基金重点项目(SCJJ23ND46); 重庆市水利科技项目(CQSLK-2024015); 重庆市教委科技资助项目(KJZD-K202403801)

第一作者: 鲁仕宝(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事资源环境管理、环境科学与资源利用研究。E-mail: 346402642@qq.com

通信作者: 裴亮(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: 1659113442@qq.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

to the economically developed East China. Specifically, the virtual water outflow through food trade from Northeast China rose from 33.309 billion m^3 (2001) to 78.5 billion m^3 (2021). Meanwhile, the virtual water outflow of energy from Northwest China grew from 0.188 billion m^3 (2001) to 1.216 billion m^3 (2021). East China, as the primary importing region, saw its virtual water inflow of energy and food production expanded from 8.9 billion m^3 (2001) to 55.11 billion m^3 (2021). In terms of water resource stress, Northeast China was under severe stress for a long time, Northwest China transitioned from no stress to mild stress, and North, East and Southwest China maintained a no-stress level. [Conclusion] In response to increasing water resource stress, it is imperative to optimize and adjust adaptive water resource strategies in key water-consumption regions, improve the water-food-energy coordinated management framework, and implement rational structural adjustments of regional water resources and water allocation measures.

Keywords: energy; food; water resource flow; water resource stress; water resource security

Received: 2025-05-25

Revised: 2025-07-26

Accepted: 2025-08-03

Online(www.cnki.net): 2025-11-03

水、能源和粮食是支撑国民经济可持续发展的关键资源,也是保障人类生存、推动经济繁荣和社会进步的基础。它们的关系错综复杂,既协同又竞争^[1-2]。能源和粮食的生产消费均需使用大量的水资源,同时水的取用、传输和处理也消耗大量能源。粮食生产不仅越来越依赖能源,还蕴藏着重要的生物质能源潜力。在全球气候变化和人口激增背景下,仍有约10亿人面临营养不良,近9亿人面临水资源短缺,至少15亿人缺乏足够的能源供应^[3-4]。预计到2050年,全球食品和能源需求将增加60%和80%,对水资源的需求将增加约50%,进一步威胁粮食、能源和水资源的安全^[5-6]。这些资源对经济社会发展至关重要,直接关系到社会可持续发展和稳定^[7-9]。然而,目前我国粮食、能源和水资源供应无法满足快速发展的需求。针对水-粮食-能源系统的研究能够推动、超越单一资源的供应和高效利用,以实现资源的合理分配,避免浪费,减轻不确定性,保障经济社会的可持续发展^[10-12]。

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。相较于水资源综合管理(IWRM),基于水资源、粮食、能源(WFE)关系的水管理更加具有可行性^[13]。SIMPSON等^[14]评估水、粮食和能源资源安全的可持续发展目标,并提供该方面的概念框架;MIRZAEI等^[15]研究地下水与粮食和能源的联系,以改善伊朗农业部门的水安全;CHEN等^[16]考虑到经济增长,在台湾利用水-食品-能源关系方法探索可持续城市资源管理,确定该地区水进口情况。然而,过去对水、粮食和能源的研究大多是定性的,即纽带关系概念的引入和诠释,概念框架的建立等^[17],缺乏对“水-能源-粮食”具体的耦合关系的量化及进一步研究。近年来,虚拟水理论迅速发展,虚拟水指产品和服务的生产过程中所需要的水资源量,其作为“水”生产链的定量评价指标被广泛应用^[18],也为研究

水、粮食和能源的定量关系提供强有力的工具,扩展了对国家间水-能源-粮食关系的讨论。

虚拟水理论于1993年提出后,为量化水资源在产品与服务生产过程中的嵌入量提供新视角,在优化水资源配置、缓解区域水资源短缺方面展现出重要应用价值。虚拟水并非传统意义上可见的实体水,而是凝结在产品和服务中的水资源量,其“无形性”“社会交易性”和“便携性”特点,使得可通过贸易流动实现水资源在区域间的间接调配。虚拟水贸易能够有效缓解缺水地区水资源压力,如在农产品国际贸易中,缺水国家通过进口高耗水农产品,实现水资源的隐形输入,优化国内水资源利用结构。虚拟水贸易可在一定程度上弥补水资源分布不均的缺陷,提高水资源利用的整体效率^[19]。在我国,虚拟水理论也被应用于区域水资源管理规划中,通过调整产业结构、优化贸易模式等方式,充分利用虚拟水来缓解本地水资源压力,实现水资源的可持续利用。

本研究聚焦于中国东北、西北、华北、西南、华东五大区。在地理区划与资源分布背景下,五大区在我国能源和粮食生产格局中占据核心地位,粮食产量约占全国总量70%,能源产量亦超全国50%。相较于七大分区,五大区选取更具针对性。支彦玲等^[20]在对我国区域“水-能源-粮食”系统适配性研究中表明,东北、东部地区的适配性水平相对较高,中部、西部地区的适配性水平相对较低。此差异与刘自敏等^[21]关于混合能源网络的研究结论相呼应:经济发达地区在能源网络中多处于净受益板块,而资源富集但经济欠发达地区则承担净溢出角色。五大区涵盖我国主要的能源富集区与粮食主产区,如东北的粮食主产地位、西北的能源资源优势,对保障国家能源和粮食安全至关重要。从水资源分布来看,五大区水资源压力差异显著,能够更典型地反映我国资源禀赋与经济发达的区域矛盾。此差异为研究“水-能源-粮食”系统的协同管理提供了丰富

样本。卢召艳等^[22]的空间计量研究证实了区域协同对系统优化的促进作用。通过揭示资源流动与区域发展的内在联系,有助于制定更具针对性的资源管理策略,进而为制定更具针对性的资源管理策略提供依据。

基于此,本研究从虚拟水视角来看待“水-能源-粮食”纽带关系,研究 2001—2021 年我国华东、华北、西北、西南和东北五大地区伴随粮食及能源流动的虚拟水流量情况,主要包括 3 个部分:首先,确定粮食及能源虚拟水量化的研究方法;其次,核算各地区粮食及能源产品输出的虚拟水流量对当地水资源的影响;针对各地区虚拟水流量问题引发的主要原因及随之伴生而来的后果进行分析并制定对应策略,为国家科学管理、合理规划水资源提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区

结合我国自然地理与人文经济特征,选取七大分区中的东北、华北、华东、西北及西南地区作为核心研究区域^[23-25](图 1)。资源禀赋上,东北以黑土为核心,耕地占全国 23%,2021 年粮食产量超过 1.45 亿 t,松辽盆地煤油气富集;华北煤炭储量占全国 40% 以上,其中黄

淮海平原年产粮 0.65 亿 t 以上;西北油气储量占全国 40% 以上,耕地集中于绿洲,粮食自给率 85%;华东水资源占全国 17.5%,其中长三角能源消费占全国 17%;西南水能蕴藏量占全国 70%,四川盆地为粮区但耕地碎片化。自然环境方面,东北各地区平均年降水量 400~800 mm,水资源时空分布不均;华北各地区平均年降水量 400~600 mm,水资源仅占全国 3.4%,供需矛盾尖锐;西北地区沙漠占比超 50%,为最缺水区域;华东各地区平均年降水量 800~1 600 mm,水网密布但洪涝频发;西南各地区年平均降水量 800~2 000 mm,喀斯特地貌导致水土流失严重。人文经济上,华北重工业集中,能源消费强度为全国均值的 1.5 倍;华东城镇化率超 70%,其中长三角贡献全国 GDP 超 20%;东北城镇化率 69% 但人口外流,粮食商品率超 50%;西北人口密度 45 人/km²,能源外调量占产量 60%;西南农村人口超 40%,为劳务输出地。五大区域年粮食、能源产销量分别超过 4.5 亿、30 亿 t。2021 年东北粮食外运 6 616 万 t(占 45.79%),虚拟水流失占耗水 40%;西北能源外调量占产量 60%,因其地处我国干旱半干旱地区,虚拟水外流更显著^[26-27],此类流动加剧生产基地资源缺口,故解析其虚拟水流动机制具有重要意义。

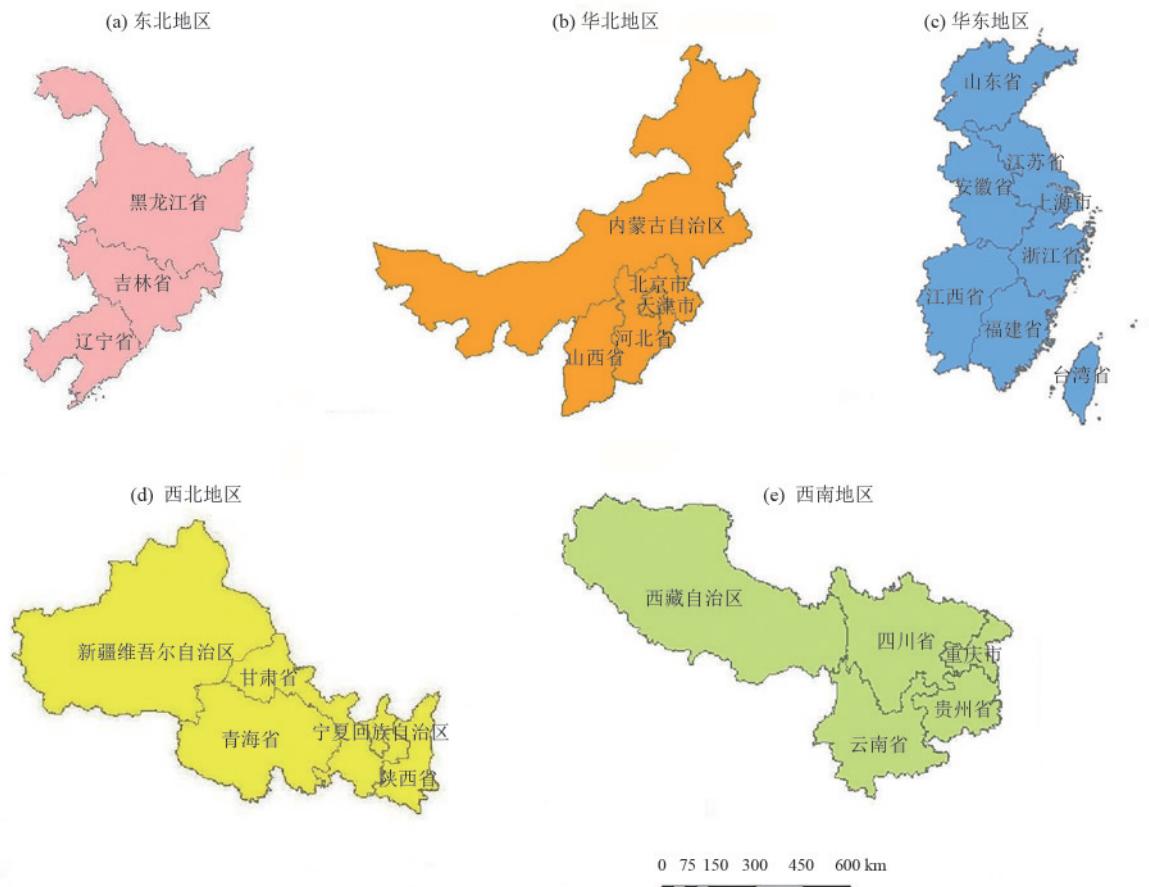


图 1 五大研究区域

Fig. 1 Five major study regions

1.2 数据收集

1.2.1 粮食虚拟水流量数据来源 本研究所涉及的华北、华东、西北、东北及西南五大地区粮食产量及人口数量等数据均引自 2001—2021 年的《中国统计年鉴》^[28]。灌溉定额、农业用水量等数据引自 2001—2021 年《中国水资源公报》^[29]和《中国水利年鉴》^[30]、各地区各省份用水定额及相关文献资料。

1.2.2 能源虚拟水流量数据来源 本研究所涉及的东北地区煤炭、石油及天然气的产量和调出量主要来自各地区的《能源统计年鉴》^[31]。各地区能源开采的行业准入用水标准来自《取水定额》(GB/T 18916—2012)^[32]。

1.3 研究方法

1.3.1 粮食生产水足迹量化 本研究中粮食虚拟水流量的计算需要基于一定假设:1)区域间粮食虚拟水流量不受粮食进出口的影响。2)对五大地区各地区粮食水密集型产品进行计算,主要研究的水密集型产品分别为水稻、玉米和小麦。3)假设五大地区粮食能源零库存,生产优先满足本地消费。

ALLAN^[33]首次提出虚拟水,定义为作物单位产量生命周期总用水。2002 年引入蓝水足迹和绿水足迹,2008 年,HOEKSTRA 等^[34]首次提出灰水足迹。水足迹可通过不同种植面积下农作物的生产水足迹来测量用水量,可分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹,其计算公式为:

$$WF = WF_{blue} + WF_{green} + WF_{grey} \quad (1)$$

式中:WF、WF_{blue}、WF_{green}、WF_{grey} 分别为总水足迹、蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹, m³/kg。

WF_{green}、WF_{blue} 和 WF_{grey} 计算公式分别为:

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} = 10 \times \frac{ET_{green}}{Y} \quad (2)$$

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} = 10 \times \frac{ET_{blue}}{Y} \quad (3)$$

$$WF_{grey} = \frac{a \times AR}{(C_{max} - C_{nat}) \times Y} \quad (4)$$

式中: CWU_{green} 和 CWU_{blue} 分别为作物在生长发育过程中对绿水、蓝水资源的消耗量, m³/hm²; Y 为单位面积中作物的产量, kg/hm²; AR 为氮肥施用量, kg/hm²; a 为氮淋失量(即进入水体的污染量占总氮肥施用量的比例); C_{max} 为氮肥浓度的最大浓度限度, kg/m²; C_{nat} 为污染物的自然本底浓度, kg/hm²。

ET_{green} 和 ET_{blue} 分别为作物在生长发育过程中蒸发蒸腾量的绿水和蓝水的数量, mm。计算公式为:

$$ET_{green} = \min(ET_c, P) \quad (5)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P) \quad (6)$$

式中: ET_{green} 为绿水蒸散发量; ET_{blue} 为蓝水蒸散发量; ET_c 为总蒸散发量; P 为有效降水, 即总降水中可以被作物利用的水分, 单位均为 mm。

ET_c 的计算公式为:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (7)$$

式中: K_c 为作物系数, 参考联合国粮农组织(FAO)发布的《作物蒸发量-作物需水量计算指南》^[35]; ET₀ 为参考作物蒸发蒸腾量, mm。

通过运用 CROPWAT 模型内嵌的 Penman-Monteith 公式对 ET₀ 进行量化, 该方法也是联合国粮农组织(FAO)推荐的作物蒸发蒸腾量的计算方法, 计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (8)$$

式中: Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率, kPa/°C; R_n 为参考作物冠层表面净辐射, MJ/(m²·d); G 为土壤热通量, MJ/(m²·d); γ 为干湿表常数, kPa/°C; T 为 2 m 高处的日平均气温, °C; U₂ 为 2 m 高处的风速, m/s; e_a 为饱和水汽压, kPa; e_d 为实际水汽压, kPa。

1.3.2 粮食虚拟水流量 各地区粮食虚拟水流量计算方法为:

$$V_{WFj} = \Delta A_j^{gt} V_{WCi} \quad (9)$$

$$\text{其中 } \Delta A_j^{gt} = G_j - \frac{P_j G_N}{P_N} \quad (2)$$

$$V_{WCi} = \begin{cases} V_{WCj}(\Delta A_j^{gt} \geq 0) \\ \sum_{j=1}^n \Delta A_{oj}^t V_{WCj}(\Delta A_j^{gt} < 0) \end{cases} \quad (10)$$

$$V_{WCj} = \frac{V_{Wj}}{G_j} \quad (11)$$

$$V_{Wj} = G_{VWj} + B_{VWj} \quad (12)$$

式中: V_{WFj} 为第 j 地区粮食虚拟水流量, 正、负值分别表示虚拟水的输出和输入, m³; ΔA_j^{gt} 为第 j 地区粮食净输入输出量, kg, 正、负值分别表示粮食的输出和输入; V_{WCi} 为粮食虚拟水, m³/kg; G_j 为第 j 地区粮食产量, kg; P_j 为第 j 地区人口数量(常住人口); G_N 为我国粮食总产量, kg; P_N 为我国人口总量; ΔA_{oj}^t 为第 j 地区粮食输出量, kg; V_{WCj} 为第 j 地区粮食虚拟水, m³/kg; n 为向第 j 地区输入粮食的地区个数; V_{Wj} 为第 j 地区粮食生产中蓝水(灌溉水)和绿水(降水)利用量, m³; G_{VWj} 为第 j 地区绿水利用量, 等于作物生育期内有效降水量与粮食作物播种面积的乘积, m³; B_{VWj} 为第 j 地区粮食生产中的灌溉水量, m³。有效降水量计算公式为:

$$P_{ei} = \begin{cases} \frac{P_i(4.17 \sim 0.02P_i)}{4.17(P_i < 83)} \\ 41.7 + 0.1P_i(P_i \geq 83) \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_{ei} 为作物*i*生育期内的有效降水量,mm; P_i 为作物*i*生育期内对应的旬降水量,mm;华北、华东、西北、东北及西南五大地区粮食虚拟水流量为各自范围内所有省份粮食虚拟水流量的加和。

1.3.3 能源水足迹与虚拟水流动量量化 本研究重点针对能源生产过程中的水密集型产品如煤炭、石油和天然气等进行水足迹及虚拟水流动量核算。因能源水足迹包括蓝水足迹与灰水足迹,灰水足迹消耗水资源较少,忽略不计。

1) 煤炭蓝水足迹的计算方法

煤炭的生命周期均产生水资源的消耗。其中开采与洗选过程对水资源的需求最大,其余环节耗水少,忽略不计。

煤炭蓝水足迹:

$$W_{b,coal} = W_b^m + W_b^w = \omega f^m C_i + \alpha_i \omega f^w C_i \quad (14)$$

式中: $W_{b,coal}$ 为煤炭开采和洗选业蓝水足迹, m^3/kg ; W_b^m 为煤炭开采业中的蓝水足迹, m^3/kg ; W_b^w 为煤炭洗选业的蓝水足迹, m^3/kg ; ωf^m 为采矿过程中每单位煤的蓝水足迹, m^3/kg ; ωf^w 为洗涤过程中每单位煤的蓝水足迹, m^3/kg ; α_i 为第*i*地区中洗涤的煤比率; C_i 为第*i*地区煤炭总产量,kg。

2) 石油蓝水足迹计算方法

原油在开采过程中对水资源的消耗主要集中在钻井和原油采取过程^[36],比例约为1:5,开采蓝水足迹为:

$$W_{oil} = W_1 + W_2 = \omega f_1 T_{oil} \alpha + \omega f_2 T_{oil} (1 - \alpha) \quad (15)$$

式中: W_{oil} 为原油开采蓝水足迹, m^3/kg ; W_1 为钻井过程中的蓝水足迹, m^3/kg ; W_2 为采油过程中的蓝水足迹, m^3/kg ; ωf_1 为钻井过程单位水足迹, m^3/kg ; ωf_2 为采油过程的单位水足迹, m^3/kg ; T_{oil} 为原油产量, m^3/kg ; α 为钻井过程用水与采油过程用水之比。在我国 α 通常取值为0.2。

3) 天然气蓝水足迹计算方法

$$W_{gas} = \omega f_{gas} T_{gas} \quad (16)$$

式中: W_{gas} 为天然气开采蓝水足迹, m^3/kg ; ω 为天然气开采单位蓝水足迹, m^3/kg ; T_{gas} 为天然气开采量,kg。

$$W = W_{b,coal} + W_{oil} + W_{gas} \quad (17)$$

式中: W 为总能源水足迹, m^3 。

4) 煤炭贸易虚拟水流量:

$$VW_{ic} = \frac{W_{b,coal}}{C_i} T_c^i \quad (18)$$

5) 石油贸易虚拟水流量:

$$VW_{io} = \frac{W_{oil}}{T_{oil}} T_o^i \quad (19)$$

6) 天然气贸易虚拟水流量:

$$VW_{ig} = \frac{W_{gas}}{T_{gas}} T_g^i \quad (20)$$

7) 虚拟水总流动量:

$$VW_i = VW_{ic} + VW_{io} + VW_{ig} \quad (21)$$

式中: VW_{ic} 为*i*地区煤炭贸易的虚拟水总流动量,kg; T_c^i 为*i*地区煤炭交易量,kg; VW_{io} 为*i*地区石油贸易的虚拟水总流动量, m^3 ; T_o^i 为*i*地区石油交易量,kg; VW_{ig} 为*i*地区天然气贸易的虚拟水总流动量; T_g^i 为*i*地区天然气交易量,kg; VW_i 为五大地区虚拟水总流动量, m^3 。

1.3.4 粮食及能源修正的水压力指数 水资源压力指数(water stress index, WSI)指对地区水资源的稀缺性进行测度,判断水资源是否对社会经济的发展有障碍。为实现区域水资源管理更加严格、明晰区域水资源受虚拟水流量影响等要求,在传统水资源压力指数的基础上,提出一种修正的水压力指数(modified water stress index, MWSI),量化粮食和能源的输送对区域虚拟水流出量的影响,计算公式为:

$$MWSI_j = \frac{VW_j}{LQ_j} \times 100\% \quad (22)$$

式中: $MWSI_j$ 为*j*区域在粮食能源输出作用下的水资源压力; VW_j 为粮食和能源输出的作用下从*j*区域流出的总虚拟流量, m^3 ; LQ_j 为*j*区域在水资源控制的“三条红线”框架下水资源消耗量的上限, m^3 。 $MWSI$ 分为无胁迫($MWSI \leq 0.2WSI_m$)、中度胁迫($0.2WSI_m < MWSI \leq 0.4WSI_m$)、重度胁迫($0.4WSI_m < MWSI \leq WSI_m$)和极端水分胁迫($MWSI > WSI_m$)4个级别。

2 结果与分析

2.1 全国主要地区粮食能源生产与调运

华北、华东、西北、东北及西南地区是我国主要的粮食能源生产地及消费地,2001—2021年粮食生产从3.13亿t增长到4.71亿t,粮食消费从2.95亿t增长到4.65亿t;与此同时,能源生产从9.77亿t增长到31.70亿t,能源消费量从13.91亿t增长到36.04亿t。由于五大地区基本上既生产全国的粮食和能源又消耗该类资源,那么该地区粮食能源生产、消耗及运输的关系及由此引发的水资源波动就非常值得研究^[37]。基于此,本研究通过对粮食能源生产过程中的水密集型产品进行研究,分析得到2001—2021年五大地区粮食能源生产及调运的变化趋势(图2、图3)。

近年来,我国各地区粮食和能源产量均呈上升趋势,在粮食生产领域以东北地区增幅最大,在能

源生产领域以华北和西北地区增幅最大。对于粮食生产而言,东北地区在国家粮食安全中发挥着越来越重要的作用,2001—2021年整个东北地区粮食产量同比增长121.5%,粮食产量从5 360万t增长到11 876万t,在满足本地区民众粮食自足的同时,作为国家粮食安全保障的东北也在积极发挥着粮仓作用,2021年粮食外运量占整个地区粮食生产总量的比例达到55.71%,为6 616万t。与东北地区一样,在满足自身粮食消耗后持续向外界运输的还有西北地区,该地区占全国面积的35%,但由于气候干燥,降水量少,水资源量仅占全国的8%,因此,在环境气候等因素的限制下西北地区的粮食生产量还不是很高,在满足地区人口消费后外运的粮食份额也相对较少。华东地区自改革开放后就在经济发展中扮演着重要的角色,人口及经济的聚集使得该地区十分依赖稳定的粮食供应,可喜的是华东的粮食产量十分充足,虽然没有出现较为快速增长,但是粮食总产量依旧占据着很高份额,然而伴随着人口的持续流入,该地区对于粮食的需求量也是在快速增长,2001年后每年流入该地区的粮食份额都在增加,到2021年华东地区粮食调入量就达到4 173万t。

为深入分析各地区粮食能源生产调度过程中的变化,选择东北地区的3个省份进行比较(图4)。作为我国主要的粮食生产基地及能源消耗基地,东北地区的发展十分依赖于对粮食能源的生产消费,近年来,东北地区粮食产量呈上升趋势,其中黑龙江粮食产量最高并且增幅最大,其次为吉林和辽宁。三省粮食总产量从2001年的4 759.4万t增长到2021年11 536.82万t,年平均粮食增长率为8.90%。其中黑龙江粮食产量从2 322.6万t(2001年)增长到6 181.15万t(2021年),年均粮食增长率为10.38%,

涨幅最大;而辽宁省涨幅最小为6.35%。与粮食相比,东北各地区能源产量均呈先上升后下降趋势,2001年三省能源总产量为1.841亿t,而2021年能源总产量也只有1.877亿t。2002年后,受到“振兴东北老工业基地”政策的影响,东北地区经济发展步伐加快增加对煤炭石油等能源的需求,当地的能源产量在此后都得到显著增长;但是伴随着中国产业结构调整,东北三省对能源生产基地作出严格的规定并关闭大批的煤炭产业基地,从而使得能源产量在迅速地降低。

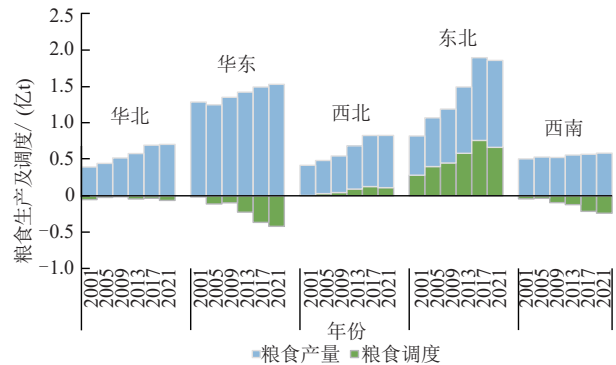


图2 2001—2021年全国五大地区粮食生产与交通运输
Fig. 2 Food production and transportation in five major regions of China from 2001 to 2021

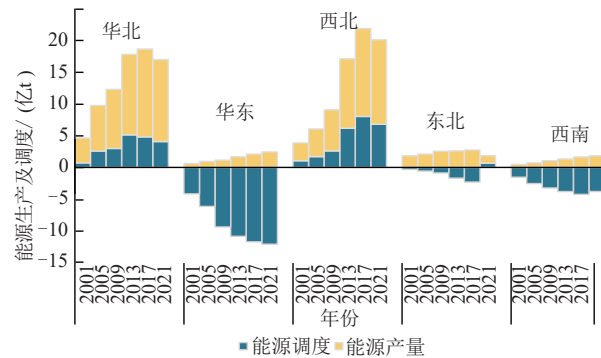


图3 2001—2021年全国主要地区能源生产与交通运输情况
Fig. 3 Energy production and transportation in major regions of China from 2001 to 2021

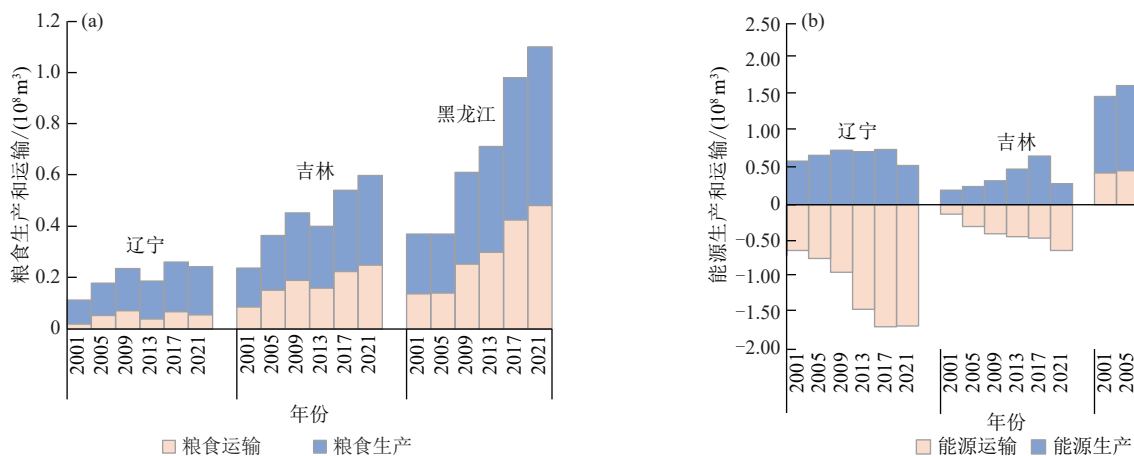


图4 2001—2021年东北三省粮食生产与交通运输情况
Fig. 4 Food production and transportation in three provinces of Northeast China from 2001 to 2021

伴随着粮食产量的增加,东北地区粮食的外输量同样呈上升趋势;而能源总产能增长不足,使得东北地区从主要能源流出地区向主要能源流入地区转变。可以看出东北地区的粮食主要输出区为黑龙江和吉林,能源的主要流入区为辽宁。2001—2021年,黑龙江外输粮食总量为4.623 4亿 t,占粮食产量的72.36%;辽宁能源流入总量为18.869 3亿 t,占能源产量的172.38%。

从粮食及能源水足迹的变化趋势(图5)来看,近年来我国粮食能源虚拟水足迹逐渐呈上升趋势,粮食水足迹从2 620.5 亿 m³(2001年)增长至3 669.3 亿 m³(2021年),水足迹高的地区往往也是粮食产量高的地区,比较典型的代表是华东和东

北地区,目前,各地都在积极发展新的农业节水灌溉技术及提高农业管理水平,旨在减少单位粮食生产的耗水量并提高农业水资源的利用率。能源水足迹的变化主要呈现为4个阶段,首先是2001—2009年缓慢增长阶段,2009—2013年快速增长阶段,2013—2017年缓慢增长阶段、2017—2021年缓慢减少阶段,能源水足迹在2017年达到最大值44.3 亿 m³,随后能源水足迹的降低主要原因有2个:一是能源开采制备过程节水技术的良好应用,单位能源生产所消耗的水资源量减少;二是为适应经济社会转型发展,国家有步骤、有计划地关闭一些高能耗低可持续发展的企业,在需求端减少对化石能源的依赖。

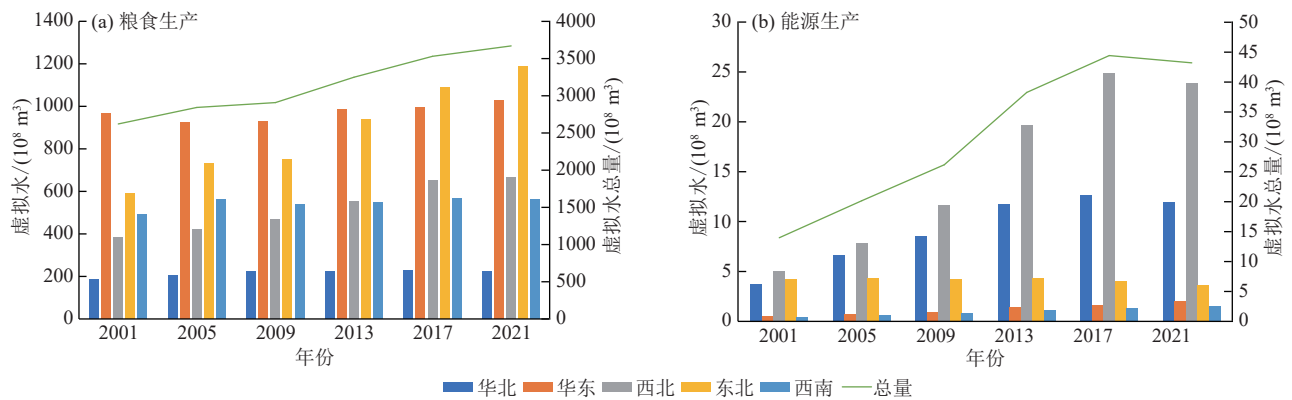


图 5 2001—2021年粮食能源水足迹变化

Fig. 5 Changes in water footprints of food and energy from 2001 to 2021

2.2 全国各地伴随粮食能源虚拟水流量

粮食能源产业的对外贸易必然主导着虚拟水的流动,对外出口带来虚拟水的流出,而进口则向本地输送虚拟水。2001—2021年,五大地区粮食能源生产水足迹及流动水足迹(表1)可以看出,在粮食领域通过贸易流出的虚拟水主要集中在东北和西北地区,2001—2021年,东北地区通过粮食贸易引发的虚拟水流量从333.09 亿 m³增长到785 亿 m³,粮食贸易带动的虚拟水调动占粮食水足迹的比重从56.44%上升至65.97%,大量虚拟水伴随粮食贸易从东北地区流出。华东地区作为全国最大的粮食流入地,虚拟水流入量从83.52 亿 m³(2001年)增长至535 亿 m³(2021年),大量虚拟水伴随粮食贸易流入华东地区。与粮食相比,能源水足迹的量级比较小,但可明显地看出,华东地区通过大量购买能源带动虚拟水流入,而西北地区作为全国最大的能源出口基地,伴随着能源的流出,蕴藏在能源中流动的虚拟水从2001年的1.88 亿 m³上升至2021年的12.16 亿 m³。

2001—2021年,伴随各地区粮食能源贸易的进行,大量虚拟水在我国主要地区流动(图6)。首先比较华北、华东、西北、东北和西南五大地区粮食能源

的虚拟水流动总量变化趋势可以发现,近20 a,五大地区虚拟水输出总量一直保持在200 亿 m³左右,可推测该部分的虚拟水主要是流入未被计算在内的中南地区。而代表东北地区虚拟水变化的曲线和代表华东地区虚拟水变化的曲线在图中的走势正好相反,东北地区虚拟水大量流出而华东地区虚拟水大量流入。代表西北地区虚拟水变化的曲线也在逐渐上涨,表明在跨地区的虚拟水变动过程中,西北地区扮演的角色将越来越重要,而华北和西南地区的虚拟水流动量一直都在0附近徘徊,表明华北和西南2个地区并没有过多地参与到粮食和能源的贸易过程中,其定位实际上是地区生产满足地区消耗。

2.3 2001—2021年全国五大区粮食能源水资源压力评价

随着我国工业化及城市化进程的不断加快,对于粮食、能源及水资源这类基础、战略资源的需求量越来越大,各地区根据自身优势结合实际情况选择适合地方特色的发展道路^[38]。在此过程中,有些地区过分依赖于化石能源的开采,有些地区则过分依赖于农业产品拉动区域经济,此类途径虽然在短期内产生可观的经济效益,但长久看来都不利于区域

的发展,同时伴随着粮食能源商品贸易的流动所引发的虚拟水流出量不断上升,进而对地区水安全问题造成严重威胁。因此,本文基于提出的修正水压力指数(MWSI)来计算各地区因虚拟水流量而造成的水资源压力,分析五大地区虚拟水流量伴随的水资源压力情况(表2)。

表1 各地区粮食能源水足迹流动

年份	地区	粮食水足迹	粮食流动水足迹	能源水足迹	能源流动水足迹
2001	华北	185.45	-25.46	3.69	0.17
	华东	967.97	-83.52	0.56	-5.48
	西北	385.02	3.62	5.05	1.88
	东北	590.17	333.09	4.24	1.33
	西南	491.90	-6.61	0.40	-1.79
2004	华北	203.37	-17.67	6.59	1.74
	华东	923.45	-244.81	0.77	-8.10
	西北	422.37	27.70	7.82	3.04
	东北	730.97	462.99	4.32	0.83
	西南	562.25	32.50	0.61	-2.57
2007	华北	225.16	-14.95	8.53	2.03
	华东	926.84	-284.10	0.92	-12.15
	西北	466.53	41.14	11.58	4.65
	东北	750.32	467.31	4.19	-0.14
	西南	538.68	-19.63	0.88	-3.36
2010	华北	225.58	-25.94	11.76	3.78
	华东	985.30	-385.06	1.38	-14.31
	西北	551.58	85.49	19.60	11.04
	东北	936.67	620.19	4.32	-0.98
	西南	549.47	-45.84	1.10	-4.17
2013	华北	227.01	-35.45	12.60	3.36
	华东	993.30	-522.94	1.58	-15.90
	西北	651.48	117.45	24.78	14.37
	东北	1 090.15	735.36	4.00	-1.68
	西南	567.79	-72.84	1.34	-4.98
2021	华北	221.78	-49.78	11.94	2.94
	华东	1 030.00	-535.00	2.08	-16.10
	西北	665.95	103.68	23.83	12.16
	东北	1 190.00	785.00	3.66	-1.90
	西南	561.56	-76.08	1.57	-4.95

华北、华东和西南等地区粮食能源虚拟水流量带来的水资源压力处于无压力的等级,主要与该地区人口众多,粮食能源以流入为主有关。也就是说,该地区现有的水资源供应量足够支撑该地区未来的发展。西北地区水资源压力从一开始的无压力逐年转为轻度压力,其主要原因在于西部大开发大量能

表2 2001—2021年全国五大地区虚拟水外流引起的水资源压力

地区	2001年	2005年	2009年	2013年	2017年	2021年
华北	无压力	无压力	无压力	无压力	无压力	无压力
华东	无压力	无压力	无压力	无压力	无压力	无压力
西北	无压力	无压力	无压力	无压力	轻度压力	轻度压力
东北	中度压力	重度压力	重度压力	重度压力	重度压力	重度压力
西南	无压力	无压力	无压力	无压力	无压力	无压力

3.2 面临的问题

通过对我国五大地区粮食水足迹和能源水足迹

源资源外运,加之西北地区地处中国干旱、半干旱地区,水资源本就稀缺。当地政府应该尽快调整发展战略,以水定产,协调水资源与能源开采间的关系,以免对当地可用水资源造成一定的影响。

东北地区是我国的粮食主产区,每年外运粮食量占其年产量1/2以上,大量水资源随着粮食的外运流失,水资源压力逐年增长。2001年,东北地区水资源压力就处于中度压力,随后几年由于粮食生产能力的加大,外运量增加,2004年转为重度压力并未回落,给当地的水资源安全带来严重威胁。

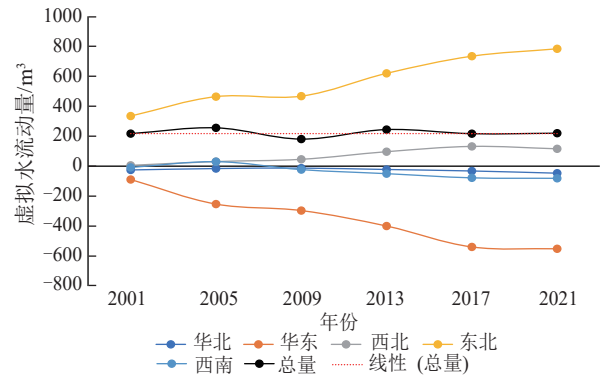


图6 2001—2021年粮食-能源虚拟水流量

Fig. 6 Virtual water flows of food and energy from 2001 to 2021

3 讨论

3.1 五大地区水资源的适配性

五大地区2021年水资源供需情况来看,五大地区各区域内的水足迹趋于稳定,但区域间差异仍旧巨大,华东、东北地区水足迹超过1 000亿 m³,分别达到1 296.9亿和1 435.65亿 m³(图7)。

我国各大地理分区职能各异,近年来并未发生重大变更,可供水量和水足迹相对关系长期稳定。该地区差异性的稳定造成水资源流出地区水资源的长期外流,缺水地区长期缺水,严重威胁到当地的生态与经济的可持续发展。由2021年观测的可供水量和水足迹关系可以看出,西南、华东、华北地区水资源长期内流,水资源能够满足地区生产、生活的需要(图8)。东北地区与西北地区作为我国粮食、能源重要输出地区,水足迹长期大于水资源供应量,说明该地区水资源不能满足其生活生产需求,水资源压力较大。

研究及对虚拟水流量衍生水资源压力的研究,总结我国五大地区为发展所面临的主要问题。华北、华

东、西南水资源供大于其他地区,随着大量虚拟水的流入,地区水资源富余,该种外来式补给既实现了资源互补,也带来相应的问题,其表现为:

1)外部水资源依赖性。第一,缺乏自主可控性,依赖外来虚拟水资源意味着华北、华东、西南地区的正常经济和农业活动高度依赖外部供应,而无法应对潜在的供应中断或变化,地区经济发展面临巨大的风险;第二,外来虚拟水的大量流入导致流入地区大力开展工业、服务业等经济生产活动,给生态系统造成压力,导致地方生态系统的过度开发,如对湖泊和河流的压力、生物多样性减少等。

2)创新创业动力减弱。在资源充足情况下,经济参与者可能减少对资源效率和创新的追求。因为资源供应充足,可能减少了采用新技术和更高效方法的动力。其次,依赖外部虚拟水输入也可能减少对可持续性和绿色产业的投资。经济体可能认为不需要采取环保措施,因为资源供应看似不受威胁。

3)低效用水与浪费。首先,富足地区依赖外部虚拟水输入可能导致资源浪费。认为资源丰富,可能没有足够的动力来提高用水效率和减少浪费,导致水资源的过度消耗。其次,对外来虚拟水的依赖可能引发地区间的资源冲突。当资源供应地区受到压力时,可能限制虚拟水的输出,进一步加剧富足地区的资源脆弱性。

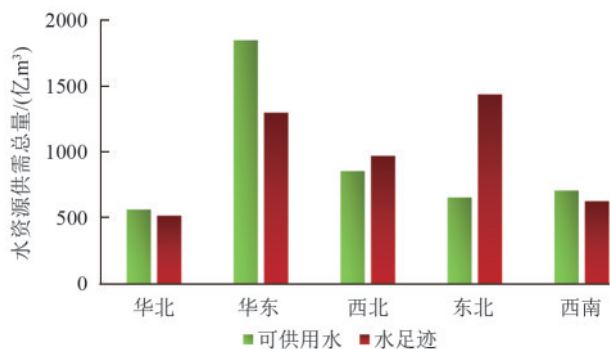


图 7 2021 年五大地区水资源供需情况

Fig. 7 Supply and demand of water resources in five major regions in 2021

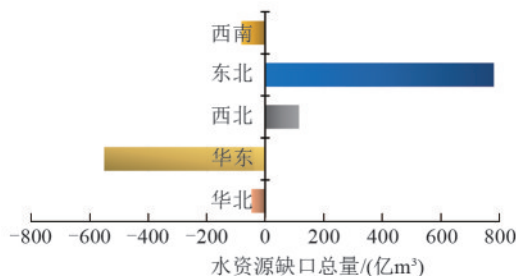


图 8 2021 年五大地区水资源供需缺口

Fig. 8 Supply and demand gaps of water resources in five major regions in 2021

东北和西北水资源供不应求地区,地方水资源短缺,大量水资源外流严重破坏生态平衡,对经济造

成不可弥补的损失,产生问题为:

1)生态可持续性下降。东北、西北地区水资源常年入不敷出,导致生态系统受到持续破坏,生态自我修复能力下降。如对东北黑土地的自杀式开发,使得原厚度 1 m 的黑土地平均深度不足 30 cm,根据每 100 a 恢复 1 cm 的恢复速度,其恢复时长将超过 5 000 a。按目前流失速度,20 a 内东北黑土地平均厚度将减至 15 cm,失去原有价值。

2)地下水过量开采。由于降水不足,地下水资源过度开采已经成为满足粮食和能源需求的代价,地下水位下降和地层结构不稳定,引发地面沉降,危及城市基础设施和人们的生命财产安全,同时增加水资源开采成本。

3)严格的用水限制。国务院发布《关于实行最严格水资源管理制度的意见》^[39]明确指出,水资源开发利用控制,用水效率控制和水功能区限制纳污“三条红线”。东北、西北地区由于重工业发达且开发时间早,设备陈旧,水资源利用效率低下、污染严重。面对严格的政策限制,当地企业可能难以为继。

4)不公平的地区发展。东北、西北地区在国家战略部署中处于水资源绝对流出区。中央制定的 2020 年实现的我国千亿千克粮食增产任务中,北方地区增产任务在 60% 以上,绝大多数位于东北。粮食、能源虚拟水占总用水量的比重过大势必影响地区间不同产业的用水竞争压力,不利于当地经济发展。

3.3 五大地区的水资源战略调整

本文针对五大地区未来发展所面临的问题提出以下水资源管理战略。总体而言,包括 2 个重点:一是要优化调整重点用水地区水资源适应性战略;二是要完善水-粮食-能源协同管理框架。

优化水资源适应性战略:1)西北地区。西北地区是我国水资源最为紧缺的地区,多地平均年降水量不足 200 mm,是全国生态系统中最脆弱的部分。目前西北地区出现植被退化、土地沙化、土壤侵蚀、河湖干涸等影响人类生存和发展的重大生态问题,极大地影响国家生态安全。因此,建议西北能源富集地区,严格“以水定地”,控制灌溉面积总量和耗水产业规模,完善水权交易机制,适时推进西部调水工程。2)东北地区。东北是全国的粮仓,2022 年,东北三省粮食总产量达 14 328 万 t,占全国 21%。大量的粮食产出需要大量的水资源,东北人均水资源仅 1 240 m³,只有全国比重的 60.5%,水资源压力巨大。因此,建议东北粮食主产区,优化粮食安全基本定位和相关政策,加强水与粮食协同调控,推进区域协同发展,建立水资源与粮食安全及合理能源利用的平

衡,优化水资源综合利用规划体系,协调用水,保持国家政策的协调一致性。3)华北、华东、西南水资源流入区。政策引导,全面推动供给侧结构性改革与产业结构转型升级,优化水资源配置效率,提高水资源利用率。综合结合华北地区重工业耗能大、污染重,华东地区轻工业和制造业发达等特点,调整各区域产业结构,合理配置不同行业的水资源,提高水资源的利用效率。深化农业供给侧结构性改革,提升南北方水土资源适配性,保障粮食生产和水资源协同安全。

完善水-粮食-能源协同管理框架:1)加强顶层设计,突出水资源约束作用,实现水-粮食-能源协同管理。开展区域发展规划的水资源论证,突出水资源的约束作用,实现水资源和粮食、能源供需三方匹配,倒逼水资源和粮食、能源进行合理布局与优化配置、转型升级和产业结构调整。根据供水能力决定粮食、能源发展规模,优化调整粮食、能源产业结构,与国家战略紧密结合,加强绿色经济发展,鼓励采取节水工艺与设备,制定用水效率准入门槛,将单位水资源的利用效率提到最高。2)创新协同安全保障技术,出台水-粮食-能源协同安全国家应对战略。构建“水能源粮食纽带关系”,实现水-粮食-能源系统安全国家应对战略。在国家“绿水青山就是金山银山”战略布局下,按照建设资源节约型、环境友好型社会要求,以水资源和水环境的承载能力为约束,将主要粮食基地-能源基地-水资源配适性研究为基础,保障国家粮食、能源安全,提出水安全的水资源适应性产业布局调整方案。3)推进水市场建设,发挥市场资源配置机制。以水定价,以量定价,建立水源差别化水价体系。制定企业用水标准,借助市场手段高效配置水资源,鼓励粮食、能源企业出资进行节水技术改造,在维持水生态健康的基础上保障粮食、能源开发。

4 结论

1)五大地区的粮食、能源虚拟水呈显著增长趋势。2001年,五大地区粮食、能源虚拟水为2 634.45亿 m^3 ,2013年增长至3 605.34亿 m^3 。此后,国务院正式发布能源发展“十二五”规划,提出以高效、清洁作为结构调整方向。促进用水效率提高和节水技术进步,2013年,能源产品总水足迹略有下降。然而从2013—2021年,粮食虚拟水足迹增长量远高于能源虚拟水足迹,2021年粮食、能源总水足迹增长至3 712.37亿 m^3 。

2)五大地区的粮食、能源内嵌虚拟水流量越来越多。显然,越来越多的水从缺水的东北、西北流向华北、华东等经济发达地区,严重削弱水资源流出地的可持续发展潜力,不利于全国水资源的可持续性管理。

3)五大地区从2001—2021年,由粮食、能源生产

造成的水资源压力在各地有所差异。特别是西北、东北地区,2017—2021年西北地区水资源压力持续处于轻度压力水平,东北地区则自2005年起始终处于重度压力状态,凸显“水-能源-粮食”系统协同管理的紧迫性。能源、粮食内嵌虚拟水流动加剧区域压力失衡,缺水的东北、西北作为粮食能源输出地,其水资源通过虚拟水流动持续向华北、华东等经济活跃地区转移,进一步削弱本地可持续发展潜力。未来需探索跨流域调水(如“西部调水工程”)与虚拟水流动的优化平衡,通过完善水权交易机制、构建“以水定产”的协同管理框架,实现资源系统的可持续治理。

4)保证主要粮食、能源基地(东北、西北)水资源的可持续性发展,需要综合对策。因此,本文基于以下几点提出建议措施:一是要优化调整重点用水地区水资源适应性战略,具体举措包括以水定地、控制灌溉面积与耗水产业规模、完善水权交易机制、适时推进西部调水工程、优化相关政策、政策引导等;二是要完善水-粮食-能源协同管理框架,具体举措包括加强顶层设计、创新协同安全保障技术、推进水市场建设。

参考文献:

- [1] 傅春杨,于也雯,龚六堂.以能源节约集约利用促进高质量发展:基于生产网络模型的重点节能增产行业选择[J].管理世界,2025(2):21-46.
FU C Y, YU Y W, GONG L T. Promoting high-quality development through energy conservation and intensive utilization: The selection of key energy-saving and production-increasing industries based on production network model[J]. Journal of Management World, 2025, 41(2): 21-46.
- [2] 郝帅,孙才志.基于网络DEA及SNA模型的中国水资源能源-粮食纽带系统效率研究[J].地理研究,2022,41(7):2030-2050.
HAO S, SUN C Z. Water resources-energy-food nexus system efficiency in China based on network DEA and SNA model[J]. Geographical Research, 2022, 41(7): 2030-2050.
- [3] 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.
- [4] 穆雅晴,吴宜进,田培,等.长江中游经济区“水-能源-粮食”系统与城市绿色转型适配性研究[J].自然资源学报,2024,39(9):2140-2154.
MU Y Q, WU Y J, TIAN P, et al. The adaptability of "water-energy-food" system and urban green transformation in the middle reaches of the Yangtze River Economic Zone [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(9): 2140-2154.
- [5] 丁童慧,陈军飞,嵇娟,等.水-能源-粮食纽带关系与生态系统服务耦合研究进展[J].生态学报,2025,45(6):3032-3045.
DING T H, CHEN J F, JI J, et al. Research progress

- and prospect of the coupling between water-energy-food nexus and ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(6):3032-3045.
- [6] 刘正佳,钟会民,李裕瑞,等.近20年中国粮食生产变化特征及其对区域粮食供需格局的影响[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(6):1413-1425.
- LIU Z J, ZHONG H M, LI Y R, et al. Change in grain production in China and its impacts on spatial supply and demand distributions in recent two decades[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(6):1413-1425.
- [7] 王兆华,邹朋宇,李浩,等.经济-能源-水耦合视角下黄河流域区域协同发展路径[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(8):10-19.
- WANG Z H, ZOU P Y, LI H, et al. Path of regional coordinated development in the Yellow River basin from the perspective of economy-energy-water nexus[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(8):10-19.
- [8] 李元杰,张卓颖,石敏俊.水资源约束下雄安新区建设对京津冀地区的经济影响:基于城市间投入产出优化模型的分析[J]. *城市与环境研究*, 2020(3):50-68.
- LI Y J, ZHANG Z Y, SHI M J. The economic impacts of the construction of Xiongan New Area on the Beijing-Tianjin-Hebei region under the constraints of water resources: Based on an inter-city input-output model[J]. *Urban and Environmental Studies*, 2020(3):50-68.
- [9] SHANG Y Z, LU S B, YE Y T, et al. China's energy-water nexus: Hydropower generation potential of joint operation of the Three Gorges and Qingjiang cascade reservoirs[J]. *Energy*, 2018, 142:14-32.
- [10] 张凡凡,张启楠,李福夺,等.中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(5):934-944.
- ZHANG F F, ZHANG Q N, LI F D, et al. The spatial correlation pattern of water footprint intensity and its driving factors in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5):934-944.
- [11] 金珏雯,穆月英,杨鑫.跨流域调水背景下粮食区域贸易对粮食种植结构的影响:基于“实体水-虚拟水”流动视角[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(12):176-192.
- JIN J W, MU Y Y, YANG X. Impact of regional grain trade on grain planting structure in the context of inter-basin water transfer: Based on the perspective of "physical water and virtual water" flow[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(12):176-192.
- [12] 闫晨健,栗萌,卓拉,等.1989—2019年陕西省作物生产水足迹时空演变与节水潜力评价[J]. *资源科学*, 2023, 45(1):158-173.
- YAN C J, LI M, ZHUOLA, et al. Spatiotemporal evolution of water footprint and water-saving potentials of crop production in Shaanxi Province during 1989—2019[J]. *Resources Science*, 2023, 45(1):158-173.
- [13] CAI X M, WALLINGTON K, SHAFIEE-JOOD 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.
- [14] SIMPSON G B, JEWITT G P W. The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: A review[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, 7:e8.
- [15] MIRZAEI A, SAGHAFIAN B, MIRCHI A, et al. The groundwater-energy-food nexus in Iran's agricultural sector: Implications for water security[J]. *Water*, 2019, 11(9):e1835.
- [16] CHEN I C, WANG Y H, LIN W, et al. Assessing the risk of the food-energy-water nexus of urban metabolism: A case study of Kinmen Island, Taiwan[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110:e105861.
- [17] KEYHANPOUR M J, MUSAVI JAHROMI S H, EBRAHIMI H. System dynamics model of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, 12(2):1267-1281.
- [18] SUN J X, YIN Y L, SUN S K, et al. Review on research status of virtual water: The perspective of accounting methods, impact assessment and limitations[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243:e106407.
- [19] 孙才志,阎晓东.基于MRIO的中国省区和产业灰水足迹测算及转移分析[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(2):207-218.
- SUN C Z, YAN X D. Measurement and transfer analysis of grey water footprint of Chinese provinces and industries based on a multi-regional input-output model[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(2):207-218.
- [20] 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.
- [21] 刘自敏,刘曦泽,朱泓宇,等.水-能源-粮食系统耦合视角下的中国分省碳达峰评估:基于LEAP模型的分析[J]. *经济地理*, 2024, 44(1):118-129.
- LIU Z M, LIU X Z, ZHU H Y, et al. Assessment of carbon peaking by province in China from the perspective of water-energy-food system coupling: Based on LEAP model[J]. *Economic Geography*, 2024, 44(1):118-129.
- [22] 卢召艳,黎红梅.中国农业“水-能源-粮食”系统协同发展及其影响因素[J]. *经济地理*, 2024, 44(12):177-186.
- LU Z Y, LI H M. Coordination development of "water-energy-food" system in China's agriculture and its influencing factors[J]. *Economic Geography*, 2024, 44(12):177-186.

- [23] 鲁仕宝, 廉志端, 尚毅梓, 等. 黄河流域经济带生态环境绩效评估及其提升路径[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 235-242.
LU S B, LIAN Z D, SHANG Y Z, et al. Ecological environment performance assessment and improvement path of the Yellow River basin economic belt[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 235-242.
- [24] 江激宇, 刘嘉铭, 赵勇, 等. 淮河流域气候变化对粮食生产用水绿色效率的影响[J]. 经济地理, 2024, 44(8): 181-190.
JIANG J Y, LIU J M, ZHAO Y, et al. Impact of climate change on green efficiency of water for food production in Huaihe River basin [J]. Economic Geography, 2024, 44(8): 181-190.
- [25] 王腾, 李佳, 付尧, 等. 基于层次分析-熵权法的内蒙古农牧交错带农业用水水平综合评价[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 259-266.
WANG T, LI J, FU Y, et al. Comprehensive evaluation of agricultural water use level in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia based on analytic hierarchy process and entropy weight method [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 259-266.
- [26] 华树春, 钟钰. 我国粮食区域供需平衡以及引发的政策启示[J]. 经济问题, 2021(3): 100-107.
HUA S C, ZHONG Y. Regional balance of grain supply and demand in China and the policy implications [J]. On Economic Problems, 2021(3): 100-107.
- [27] 丁文魁, 李兴宇, 杨晓玲, 等. 气象干旱变化特征及其对粮食产量的影响: 以甘肃武威市为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 656-664.
DING W K, LI X Y, YANG X L, et al. Drought characteristics and effects on grain production in Wuwei, Gansu Province [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 656-664.
- [28] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2021.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2001—2021.
- [29] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2001—2021.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin [R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2001—2021.
- [30] 中国水利年鉴编辑委员会. 中国水利年鉴[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001—2021.
Editorial Committee of China Water Conservancy Yearbook. China water conservancy yearbook [M]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2001—2021.
- [31] 国家统计局, 国家能源局. 中国能源统计年鉴(2001—2021)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics of China, National Energy Administration. China energy statistical yearbook (2001—2021) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 取水定额: GB/T 18916—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Water withdrawal quotas: GB/T 18916—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [33] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [J]. Priorities for water resources allocation and management, 1993, 13(4): 26.
- [34] HOEKSTRA A Y, Chapagain A K. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.
- [35] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [36] LU S B, SHANG Y Z, LI Y W. A research on the application of fuzzy iteration clustering in the water conservancy project [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 151: 356-360.
- [37] 庄溟然, 冯克鹏, 许德浩. 蒸散分离的玉米水分利用效率变化及影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1117-1130.
ZHUANG H R, FENG K P, XU D H. Changes, influencing factors and sensitivity of water use efficiency in maize farmland ecosystems based on evapotranspiration separation in the Ningxia irrigated area [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1117-1130.
- [38] 尹朝静, 廖培森, 葛静芳, 等. 中国农业全要素水资源绿色生产率的区域差异、动态演进及收敛性[J]. 干旱区资源与环境, 2025, 39(2): 107-116.
YIN C J, LIAO P S, GE J F, et al. Regional differences, dynamic evolution and convergence of agricultural total factor water green productivity in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025, 39(2): 107-116.
- [39] 中国中央国务院. 关于实行最严格水资源管理制度的意见(国发[2012]3号)[EB/OL]. 北京: 中央政府门户网站. <https://www.gov.cn>.
The State Council of the People's Republic of China. Opinions of the state council on implementing the strictest water resources management system (Guofa [2012] No. 3) [EB/OL]. Beijing: Central Government Portal. <https://www.gov.cn>.