

“北粮南运”背景下东北地区粮食虚拟水流动及其对水资源压力的影响

李 博¹, 李云玲², 章光新¹, 孙敬轩^{1,3}, 于叶翔^{1,3}, 齐 鹏¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所; 2. 水利部水利水电规划设计总院; 3. 中国科学院大学)

摘要:利用多源数据解析了东北地区粮食虚拟水的流动规模和结构,并评估了其在水资源压力的影响。结果表明:1990—2022 年东北地区粮食虚拟水调出量共计 16 520.03 亿 m³,其中绿水 12 604.78 亿 m³,蓝水 3 915.25 亿 m³;气候变暖与经济利益共同驱动了粮食虚拟水流动规模和结构,因粮食虚拟水流动引起的水资源压力指数由 0.47 上升为 0.87,压力水平由中度变为重度;东北地区应结合水资源条件调整种植结构,推进水网工程建设;中央政府需推动虚拟水和实体水资源综合管控,保障粮食安全与水资源可持续利用。

关键词:北粮南运;粮食安全;虚拟水流动;水资源压力;东北地区

Virtual water flow of grain in Northeast China and its impact on water resources pressure under background of “North-to-South Grain Transport”//Li Bo¹, Li Yunling², Zhang Guangxin¹, Sun Jingxuan^{1,3}, Yu Yexiang^{1,3}, Qi Peng¹(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences; 2. General Institute of Water Resources Planning and Design, Ministry of Water Resources; 3. University of Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The virtual water flow scale and structure of grain in Northeast China were analyzed using multi-source data, and their impact on water resources pressure was assessed. The results show that from 1990 to 2022, the total amount of grain virtual water exported from Northeast China is 1 652.003 billion m³, including 1 260.478 billion m³ of green water and 391.525 billion m³ of blue water. Climate warming and economic interests jointly drive the scale and structure of the grain virtual water flow, and the water resources stress index caused by the grain virtual water flow rises from 0.47 to 0.87, and the stress level changes from moderate to severe. Northeast China should adjust the planting structure and promote the construction of water network projects in the light of water resources conditions. The central government needs to promote the integrated management and control of virtual and physical water resources to ensure food security and the sustainable use of water resources.

Key words: North-to-South Grain Transport; food security; virtual water flow; water resources pressure; Northeast China

粮食虚拟水流动能调节水-粮关系的空间不均
衡性,可为构筑粮食安全战略、应对水资源短缺和
解决农业水资源配置提供新思路^[1]。由于我国南
北方地区农业资源禀赋和粮食消费需求极度不匹
配,我国粮食安全农业格局已于 20 世纪 90 年代
由“南粮北调”逆转为“北粮南运”^[2]。这一转
变虽缓解了南方水土资源约束,却导致大量虚拟水
从干旱缺水的北方流向水资源相对丰沛的南方,加
剧了北方水资源压力^[3],制约了当地经济社会可
持续发展与生态环境良性循环^[4-5]。因此,在粮
食产销错位背景下,开展“北粮南运”以来粮食
虚拟水流动及其对水资源压力的影响研究,对保
障区域农业可持续发展

和水资源安全至关重要。
粮食虚拟水是指在粮食生产过程中所消耗的水
资源量,包括蓝水(灌溉用水)和绿水(有效降
水)^[6]。粮食虚拟水流动是指水资源在粮食生产
和贸易过程中,重新进行跨区域转移和再分配^[7]。
目前,粮食虚拟水流动的研究尺度包括了全球、
国家、省和市等尺度^[1,8-10],核算方法以投入
产出分析方法、区域平衡法与线性优化方法等
为主^[11-12]。其中,阴亚丽^[8]基于统计数据采用
区域平衡法对 1997—2017 年我国南北方地区
间粮食虚拟水流动的时空演变特征进行了分析,
结果表明东北地区和黄淮海地区已成为虚拟水
输出中心,为评估长序列

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA28020501);中国工程院战略研究与咨询项目(JL2023-17)
作者简介:李博(1993—),男,助理研究员,博士,主要从事农业水资源研究。E-mail:lib@iga.ac.cn
通信作者:章光新(1971—),男,研究员,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhgx@iga.ac.cn

的粮食虚拟水流动量提供了技术支持。但核算过程中多依赖统计数据,忽略空间异质性,可能导致粮食虚拟水流动量高估^[13],也无法分析某一作物的蓝绿水流动结构变化。由于粮食虚拟水流动受人类消费需求牵引,与气候变化和人类活动密切相关,更易受自然灾害、政策变化和国际形势等因素影响^[14]。Sun 等^[15]发现自然因素(如降水量、气温)和社会经济因素(如经济发展水平、人口增长等)均对粮食虚拟水流动产生重要影响。但现有研究仅片面地分析了气象、社会经济因素与虚拟水流动的相关性,未充分考虑其背后重要的自然和经济驱动因素,并不利于全面理解粮食虚拟水流动规模与结构及其对实体水的影响,难以制定出科学、有效的应对策略。虽然虚拟水流动通过优化资源配置,在环境、经济与社会维度上均提升了均衡性^[16],但同时也导致了虚拟水输出地区的水资源超载。由于粮食虚拟水流动,我国北方地区水资源压力指数较南方高 2.3 倍^[17]。这一严峻问题引发了学界对输出区水资源可持续性的担忧,特别是东北、黄淮海等粮食主产区的水资源超载问题日益突出^[18-19]。作为我国粮食安全战略的核心区域,东北地区现有虚拟水的研究多聚焦于粮食虚拟水含量核算层面^[13,20],长序列粮食虚拟水流动规模与结构核算体系尚未建立,导致跨区域粮食虚拟水流动的时空异质性特征缺乏定量表征,无法反馈东北地区粮食虚拟水流动对区域水资源压力的影响,制约了科学用水方略的准确制定。

东北地区是我国重要的商品粮生产基地,也是“北粮南运”的重要战略支撑地区,粮食产量占全国的 1/4,商品粮占全国的 1/4,调出量占全国的 1/3,粮食供应在我国占有举足轻重的地位^[21]。20 世纪 90 年代“北粮南运”以来,东北地区始终是粮食虚拟水资源重要输出区,导致出现了水资源供需矛盾突出、地下水超采及生态用水被挤占等问题。因此,亟须回答“北粮南运”以来东北地区粮食虚拟水资源输出量、组成结构及其输出如何影响区域水资源压力的问题。鉴于此,本文基于遥感、气象和统计等多源数据定量评估粮食虚拟水流动规模和结构及其引起的区域水资源压力变化态势,以期科学制定区域水资源管理策略提供坚实的数据支撑与理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

东北地区位于 38° 43'N~53° 30'N、115° 30'E~135° 30'E,包括辽宁、吉林、黑龙江三省和内蒙古自治区东部四盟市。该地区属于温带季风气候,雨热

同期,为粮食作物的生长提供了优越的气候条件^[22]。主要种植的粮食作物为玉米、水稻、大豆,种植面积分别为 1500 万、500 万、590 万 hm^2 (图 1)。研究区内分布有松嫩平原、三江平原和西辽河及辽河中下游平原等粮食主产区,被誉为维护国家粮食安全的“压舱石”。东北地区耕地面积约占全国总量的 1/4,但区域水资源禀赋与农业生产需求矛盾日益凸显。2022 年《松辽流域水资源公报》显示,东北地区水资源总量占比已不足全国的 1/10。农作物种植规模与结构快速调整导致灌溉用水量达到区域总用水量的 78%^[23]。在粮食产销不匹配的格局下,东北地区粮食虚拟水大量流出,造成了松嫩平原、三江平原、西辽河等地区地下水位下降、河流径流量衰减及湿地面积萎缩等一系列生态环境问题,严重威胁东北地区粮食可持续性生产。

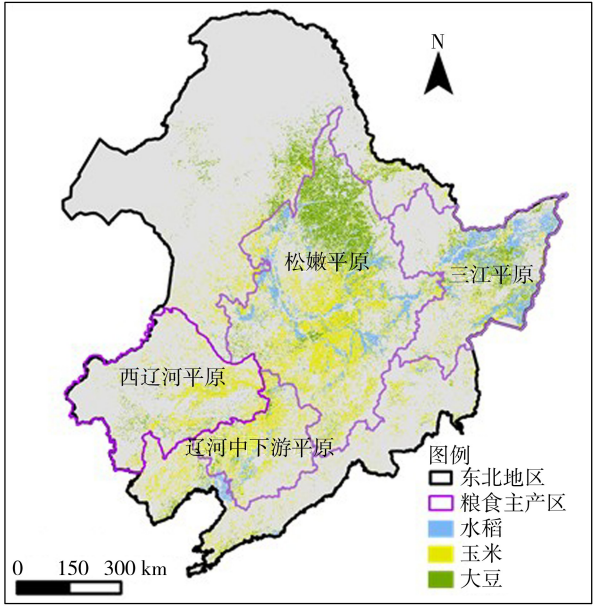


图 1 东北地区主要粮食作物的空间分布
Fig.1 Spatial distribution of major grain crops in Northeast China

1.2 数据来源

本文应用的数据包括遥感数据、统计数据和气象数据等多源数据,数据信息见表 1。本文在构建玉米、水稻和大豆虚拟水含量时空演变特征框架时,依据公开发布的玉米、水稻和大豆空间分布数据集^[24-30],通过剔除不同数据集中重复数据和校正误分类数据等操作,得到空间分辨率为 1 km 的长序列(1990—2022 年)东北地区玉米、水稻和大豆空间分布数据,并以此作为核算不同粮食虚拟水流动的基础。同时,将降水、实际蒸散发(ET)与总初级生产力(GPP)作为主要的数据支撑。其中降水数据来源于 NOAA Physical Sciences Laboratory 提供的空间分辨率为 0.5° 的逐日降水数据,本文利用 Delta 降

表 1 数据信息
Table 1 Data information

指标	时间范围	时间分辨率	空间分辨率	来源
降水量	1990—2022 年	1 d	0.5°	https://psl.noaa.gov/
<i>ET</i> 、GPP	1990—2000 年	8 d	0.05°	https://glass.hku.hk/download.html
	2001—2022 年	8 d	500 m	https://urs.earthdata.nasa.gov/
NDVI	1990—2000 年	16 d	30 m	https://earthexplorer.usgs.gov/
玉米	1985—2020 年	1 a	30 m	https://doi.org/10.6084/m9.figshare.16437054
	2001—2023 年	1 a	30 m	https://www.nesdc.org.cn/
水稻	1990—2016 年	1 a	30 m	https://www.scidb.cn/en
	2017—2022 年		20 m	
大豆	2000—2022 年	1 a	30 m	https://zenodo.org/
	1991—2019 年	1 a	1 km	https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25980358
地下水储量距平	1940—2022 年	1 月	0.25°	https://doi.org/10.5281/zenodo.10040927
人均粮食消费量	1990—2022 年	1 a		统计年鉴数据
农业灌溉用水、地下水资源量 和水资源总量	2000—2022 年	1 a		《松辽流域水资源公报》
人口密度数据	1990—2022 年	1 a	1 km	https://zenodo.org/records/11179644

尺度方法将其空间分辨率降为 1 km^[31]。实际蒸散发与 GPP 数据分别源于 GLASS 和 MODIS 实际蒸散发数据集,这些数据经过辐射通量塔数据对比后具有良好的精度,可以用于后续的研究^[32-33]。由于归一化植被指数 (NDVI) 作为植被覆盖和生长状态的指标,与 *ET* 和 GPP 密切相关^[34-36],所以本文采用 NDVI 数据将 1990—2000 年 *ET* 与 GPP 数据的空间分辨率均统一为 1 km。在评估东北地区粮食虚拟水含量时空演变特征及其流动规律时,本文依据不同粮食的各用途占比^[37],计算出不同粮食作物的人均消费比重,结合人口密度数据量化玉米、水稻和大豆的人均消费量。结合同一栅格尺度内的粮食产量数据,基于盈亏理论核算栅格尺度下粮食作物的盈亏情况,盈余 (亏缺) 部分记为粮食的输出 (输入) 量,最终得到 1990—2022 年逐年的粮食流动情况。本文利用公开发布的地下水储量数据集验证虚拟水流动对实体水资源的影响^[38]。农业灌溉用水、地下水资源量和水资源总量数据则均来源于 2000—2022 年《松辽流域水资源公报》。

2 研究方法

2.1 粮食虚拟水含量计算方法

东北地区水资源禀赋差异明显,不同区域不同粮食作物对水资源需求也各不相同。但以往的研究较少区分雨养农业和灌溉农业地区粮食作物需水量的空间差异。依据前期调研情况及前人研究成果,本文将年降水量 400 mm 作为玉米是否需要进行灌溉的依据,即年降水量低于 400 mm 地区的玉米需进行灌溉处理,高于 400 mm 地区基本无灌溉^[31];而水稻和大豆分别进行全额灌溉和无灌溉处理。综上,可得 1990—2022 年东北地区空间分辨率为 1 km 的

粮食虚拟水含量^[20]的计算公式:

$$T_i = B_i + G_i \tag{1}$$

其中 $B_i = \begin{cases} 10\max\{0, ET_i - p_i\} / Y_i & P < 400 \text{ mm} \\ 0 & P \geq 400 \text{ mm} \end{cases}$
 $G_i = 10\min\{ET_i, p_i\} / Y_i$

式中: T_i 、 B_i 、 G_i 分别为作物 *i* 总虚拟水、蓝水和绿水的含量; ET_i 、 p_i 分别为作物 *i* 在生育期的实际蒸散发和有效降水量; Y_i 为 1 km 栅格尺度下作物 *i* 的产量; P 为年降水量。

作物在生育期的有效降水量由日值有效降水量依据东北地区玉米、水稻和大豆的生育期累加求和得到。参照孙敬轩等^[31]研究成果,东北地区玉米、水稻和大豆的生育期情况见表 2。

表 2 玉米、水稻和大豆的生育期

Table 2 Growth periods of maize, rice, and soybean			
作物类型	种植日期	收获日期	生育期/d
玉米	5 月 1 日	9 月 26 日	149
水稻	5 月 15 日	9 月 25 日	134
大豆	5 月 10 日	9 月 6 日	120

在空间分辨率为 1 km 的栅格尺度下,基于不同作物在各自生育期内积累的 GPP 数据,结合收获指数,分别构建各作物的产量反演模型。Li 等^[39]已验证了该模型在东北地区的适用性,确定系数 R^2 大于 0.65,纳什效率系数大于 0.50,偏差率小于 5%。利用该模型对东北地区玉米水稻和大豆的单位面积产量进行核算,计算公式为:

$$Y_i = 20H_i\beta_i \tag{2}$$

式中: β_i 为作物 *i* 在生育期内积累的 GPP; H_i 为作物 *i* 的收获指数,不同地区收获指数值参考 Li 等^[39]的研究。

2.2 粮食虚拟水流动量计算方法

由于难以获取不同地区、不同年份的粮食库存数据,故本文借鉴国内外虚拟水研究中的常规处理方式,假设各地区当年并无粮食库存,且生产的粮食须优先供本地消费,将各地区粮食产量与消费量差值称为粮食调出(调入)量^[40]。因此,通过栅格尺度的粮食盈亏核算粮食调出(调入)量,并基于不同粮食调出(调入)量,结合对应粮食虚拟水含量,对不同粮食虚拟水流动量(流出或流入)进行量化^[41],计算公式为:

Z_i=Y_i-RC_i (3)

V_i=Z_iT_i (4)

式中:Z_i为1 km 栅格尺度下作物i的转运量;R为同一栅格范围内的人口数量;C_i为作物i的人均消费量;V_i为作物i的虚拟水流动量。

2.3 水资源压力指数核算

水资源压力指数通常用于衡量区域水资源开发利用的紧张程度。然而,传统水资源压力指数在评估虚拟水流动影响时存在局限性,难以表征跨区域粮食贸易引发的水资源隐性转移^[42]。为此,本文在传统水资源压力指数基础上,参考前人的研究成果,引入虚拟水流出量,通过构建农业广义水资源量核算体系,量化粮食虚拟水流动对区域水资源短缺的影响^[9,41]。因此,粮食虚拟水流动引发的区域水资源压力指数变化的计算公式^[9,41,43-45]为:

D_p=E/F (5)

D_v=e/F (6)

其中 F=F_b+F_g F_b=gh/J F_g=10SP_e
式中:D_p为由粮食生产引起的水资源压力;D_v为考虑虚拟水流动的水资源压力;E为粮食消耗虚拟水总量;e为粮食虚拟水流出量;F为区域农业广义水资源量,具体指区域内可用于农业生产的全部可调配水资源;F_b为农业可利用蓝水;F_g为绿水资源量;g为区域常规水资源总量;h、J分别为农业用水量与总用水量;S为玉米、水稻和大豆的种植总面积;P_e为玉米、水稻和大豆生长季内的有效降水量。

参考韩昕雪琦等^[9]探究西北地区粮食虚拟水流动对区域水资源影响的研究,根据D_v/D_p值将作物输出引起的水资源压力划分为4个等级:无压力(≤0.2)、轻度压力(>0.2~0.4)、中度压力(>0.4~0.8)、重度压力(>0.8)。

3 结果与分析

3.1 粮食虚拟水空间分布及结构变化特征

如图2所示,东北地区粮食虚拟水空间分布格

局差异明显。玉米虚拟水含量主要集中在400~600 m³/t,松嫩平原中部的玉米虚拟水含量最低。水稻虚拟水含量主要集中在1000~1200 m³/t,辽河中下游平原水稻虚拟水含量最低,说明该地区在生产相同质量水稻时消耗的水资源更少。大豆虚拟水含量主要集中在1600~1800 m³/t,空间变化特征并不明显。粮食虚拟水结构差异同样明显,多年均值的大小顺序依次为:大豆(1946.43 m³/t)、水稻(1179.61 m³/t)、玉米(610.45 m³/t),说明在相同产量下大豆耗水量最大,玉米耗水量最小。玉米绿水含量为508.91 m³/t,蓝水含量仅为101.54 m³/t,表明玉米生长所需水分主要来源于降水。水稻蓝水含量(641.23 m³/t)高于绿水(534.43 m³/t)。大豆生长所需水分基本依靠降水,没有灌溉,其虚拟水含量全部为绿水(图3)。

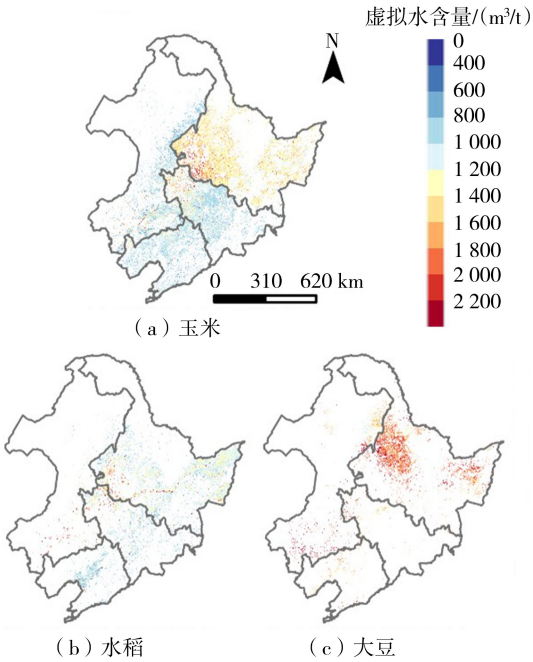


图2 东北地区粮食虚拟水含量的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of virtual water content of Northeast China

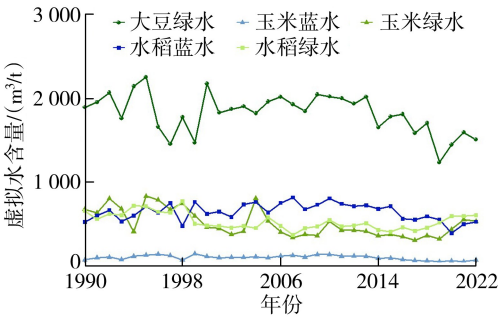


图3 1990—2022年东北地区粮食虚拟水含量
Fig. 3 Virtual water content of Northeast China from 1990 to 2022

3.2 粮食虚拟水流动结构变化特征

3.2.1 粮食转运量变化特征

图 4 为 1990—2022 年东北地区粮食转运量。由图 4 可见,“北粮南运”以来东北地区粮食转运量呈显著上升趋势,累计输出 20.6 亿 t。玉米输出 16 亿 t,其中黑龙江省玉米转运量最大,为 5.46 亿 t,辽宁省玉米转运量最小,为 2.49 亿 t。随着水稻种植面积的扩张,其呈现出由输入转为输出的变化,共计输出 2.94 亿 t。其中黑龙江省水稻转运量最多,达 2.54 亿 t。吉林省水稻在 1998 年开始输出,累计输出量(0.44 亿 t)仅次于黑龙江省,辽宁省由于水稻消费量大,直到 2003 年才输出。东四盟水资源短缺限制水稻种植规模,导致该地区共转入 0.14 亿 t 水稻。大豆种植面积虽然高于水稻,但是由于其产

量更低,导致其输出量(1.66 亿 t)明显低于水稻。黑龙江省作为主要大豆种植地区,共输出 1.52 亿 t。辽宁省受限于大豆种植比例,大豆产量无法满足省内的消费需求,长期以来一直处于大豆净输入状态,共计输入 0.23 亿 t。

3.2.2 粮食虚拟水流动量变化特征

图 5 为 1990—2022 年东北地区不同粮食的虚拟水流动量。由图 5 可见,随着“北粮南运”规模扩大,各地区粮食虚拟水流动量明显增加。“北粮南运”以来,东北地区共输出虚拟水 16 520.03 亿 m³,其中黑龙江省输出最多(9 860.24 亿 m³),辽宁省输出最少(1 129.19 亿 m³)。不同地区粮食虚拟水流动量差异明显。自“北粮南运”以来,东北地区玉米虚拟水输出共计 10 226.56 亿 m³,黑龙江省输出量最大

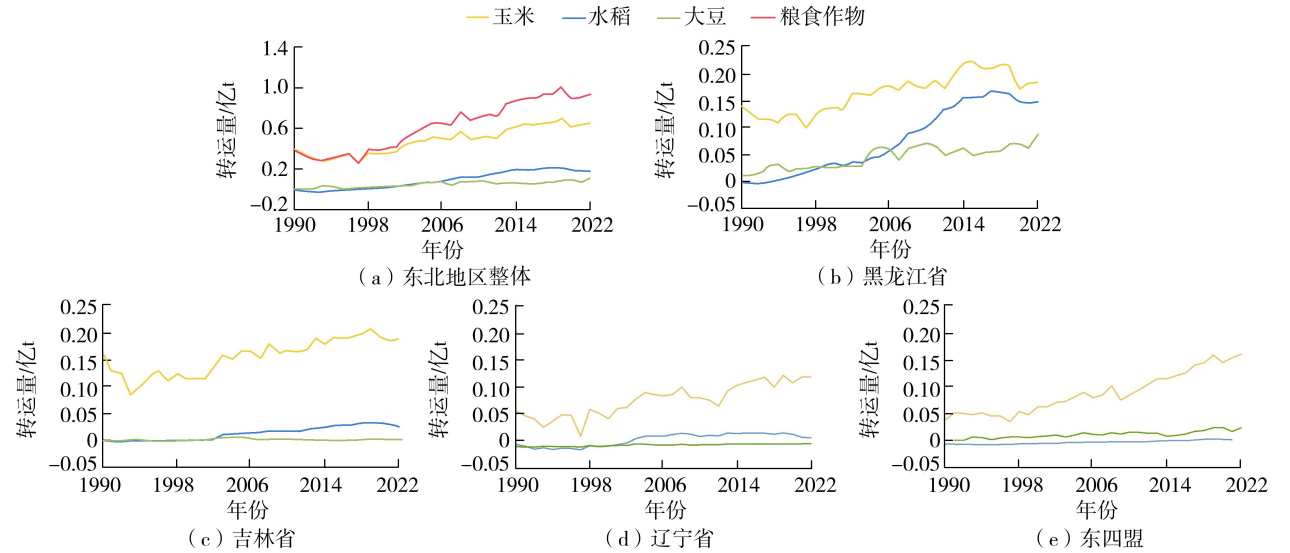


图 4 1990—2022 年东北地区粮食转运量

Fig. 4 Grain transport volume of Northeast China from 1990 to 2022

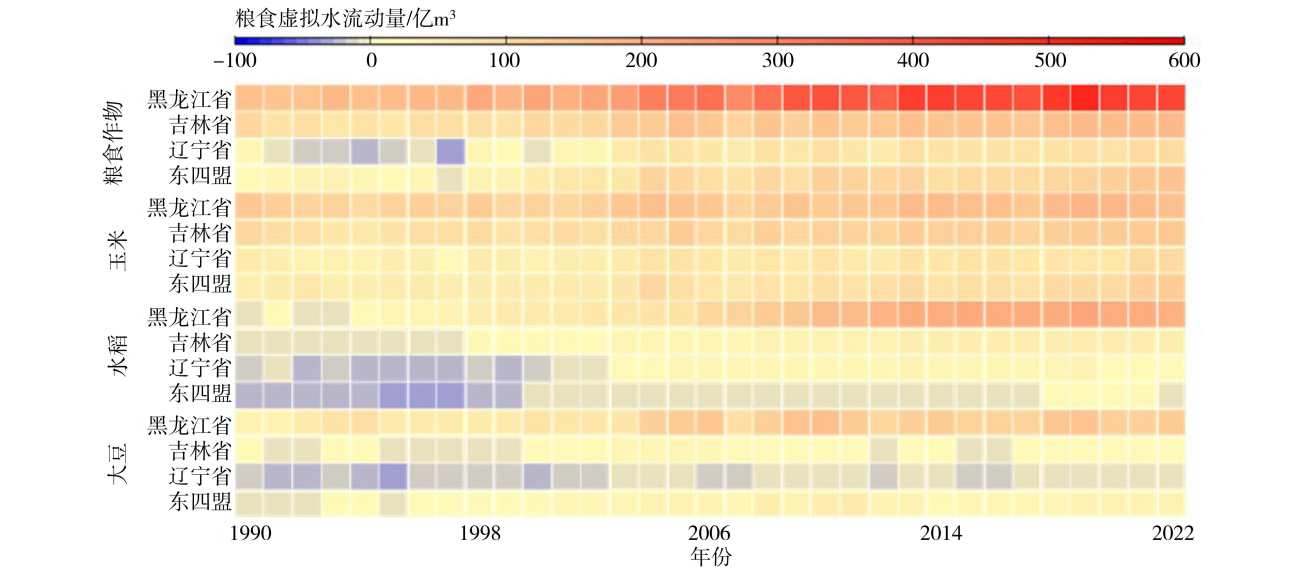


图 5 1990—2022 年东北地区不同粮食的虚拟水流动量

Fig. 5 Virtual water flow momentum for different grains in Northeast China from 1990 to 2022

(3985.76 亿 m³),辽宁省输出量最小(1436.23 亿 m³)。水稻的虚拟水(3393.01 m³)输出量明显低于玉米的,其中黑龙江省、吉林省和辽宁省共输出水稻虚拟水 3734.55 亿 m³,而东四盟则需输入 341.54 亿 m³ 虚拟水。大豆累计输出 2900.46 亿 m³ 虚拟水,输出量由大到小大小顺序为:黑龙江省(2694.64 亿 m³)、东四盟(472.80 亿 m³)、吉林省(102.46 亿 m³),而辽宁省始终作为大豆虚拟水输入地区,共输入 369.04 亿 m³。

3.2.3 粮食虚拟水流动结构变化特征

如图 6 所示,东北地区粮食虚拟水流动以绿水输出为主,占 76.30%,蓝水占 23.70%,其中玉米绿水输出量最大(8731.80 亿 m³),而水稻绿水输出量最小(1522.95 亿 m³)。虽然玉米绿水输出量明显高于水稻,但仅有约 1/3 地区的玉米位于低于 400 mm 降水等值线地区,需要进行补充灌溉,而水稻则需要进行全额灌溉来保障其稳产高产。因此,玉米蓝水输出量(1531.20 亿 m³)低于水稻蓝水输出量(1882.65 亿 m³)。“北粮南运”以来,绿水流动量呈波动上升趋势。玉米、大豆一直保持绿水输出状态,绿水输出量分别增加了 155.11 亿、126.65 亿 m³。水稻绿水由 1990 年输入状态转变为 2022 年输出状态,净增加了 128.75 亿 m³ 绿水流动量。蓝水流动量同样呈波动上升趋势,其中玉米蓝

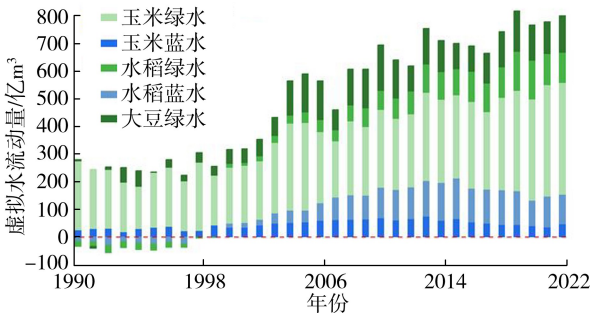


图 6 1990—2022 年东北地区不同粮食虚拟水流动变化特征
Fig. 6 Change characteristics of virtual water flow of different grains in Northeast China from 1990 to 2022

水流动量增加了 22.16 亿 m³,而水稻蓝水流动量则增加了 122.14 亿 m³。

3.3 粮食虚拟水流动对水资源压力的影响

“北粮南运”虽在一定程度上缓解了我我国区域粮食分布不平衡局面,但伴随东北地区粮食虚拟水大量流出,水资源压力指数由 1990 年 0.47 上升为 2022 年 0.87,压力等级由中度转为重度(图 7)。各地区粮食虚拟水流动引起的水资源压力等级发生转变的时间并不一致。其中黑龙江省水资源压力转为重度压力的年份(2005 年)最早。而东四盟水资源压力转为重度压力的年份(2008 年)早于吉林省(2013 年)。目前,辽宁省水资源压力尚未达到重度压力,却经历了剧烈的波动。辽宁省 1990—2002 年水资源压力为无压力;2004—2022 年水资源压力长时间为中度压力,但是其压力指数增加了 0.20,这意味着在“北粮南运”规模持续扩大趋势下,虚拟水流动引起的辽宁省水资源压力变化情况须引起高度重视。

4 讨论

4.1 粮食虚拟水流动量计算结果对比

不同研究对粮食虚拟水含量的核算结果存在一定程度的差异。例如,Dang 等^[20]估算的东北地区玉米虚拟水含量为 736 m³/t,Sun 等^[15]测算的水稻虚拟水含量为 1285 m³/t,Mekonnen 等^[46-48]评估的吉林省大豆虚拟水含量则高达 2150 m³/t。这些数值均高于本文测算的东北地区玉米(610.45 m³/t)、水稻(1178.61 m³/t)和大豆(1946.43 m³/t)的多年平均结果。这种差异主要由模型选择、参数设定、数据类型、研究区域与时段,以及土壤和气候等多种因素综合导致^[46-47]。相较于前人研究,本文在核算方法上具有显著优势:以往研究往往未对玉米和大豆的灌溉方式进行空间差异化处理,容易高估粮食虚拟水含量;而本文引入遥感数据,有效区分了东北地

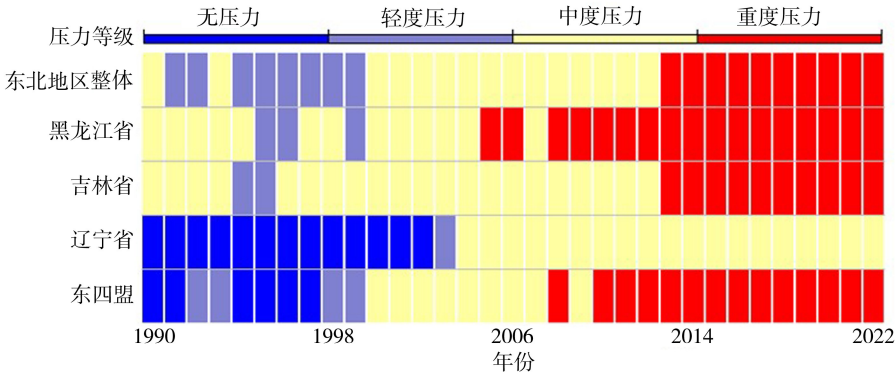


图 7 1990—2022 年东北地区粮食虚拟水流动引起的水资源压力等级

Fig. 7 Water resource pressure grade caused by virtual water flow of grain in Northeast China from 1990 to 2022

区不同作物灌溉方式的空间异质性,使得测算结果更加贴合实际农业生产情况。

粮食虚拟水流动反映了区域间因粮食贸易导致的水资源隐性转移,其计算结果的差异也进一步揭示了区域间农业生产模式、水资源禀赋及政策调控中的深层次矛盾。与以往基于省级行政单元开展的研究相比,本文核算的粮食虚拟水流动量在特定年份表现出明显的差异。以 1997 年和 2017 年为例,阴亚丽^[8]的研究显示黑龙江省和吉林省的粮食虚拟水流动量在 1997 年分别为 234.20 亿 m³ 和 89.80 亿 m³,2017 年分别增至 670.90 亿 m³ 和 210.60 亿 m³。而本文核算该两省流动量明显偏低,1997 年分别为 155.33 亿 m³ 和 67.37 亿 m³,2017 年分别为 406.05 亿 m³ 和 126.65 亿 m³。这主要是由于前人研究多将所有粮食作物合并考量,且过度依赖统计数据,未能有效区分不同作物之间虚拟水含量的固有差异。在辽宁省的核算结果上,两者呈现出不同的趋势。阴亚丽^[8]测算辽宁省 1997 年为净输入 50.60 亿 m³,2017 年为净输出 20.90 亿 m³。而本文核算其 1997 年净输入 33.71 亿 m³,但 2017 年净输出量却达到了 54.68 亿 m³。这主要是因为本文精确核定出 2017 年辽宁省主要粮食作物(玉米、水稻和大豆)虚拟水含量为 1 728.25 m³/t,明显高于前人研究结果(839 m³/t)。综上,本文利用遥感、统计和气象等多源数据相融合的方式,对栅格尺度的粮食虚拟水含量进行精准核算,不仅准确表征了虚拟水含量的空间差异性与分布规律,还有效降低了单一依赖统计或试验数据可能产生的误差^[47-48]。因此,本文核算的结果更具准确性和可信度,有助于深刻理解东北地区粮食虚拟水流动的规模和结构,及其对实体水短缺的深层影响机制。

4.2 粮食虚拟水流动的影响因素

自“北粮南运”以来,气候与人为因素共同驱动了东北地区粮食作物种植结构调整与规模变化,影响了粮食虚拟水流动规模和结构,加剧了水资源紧缺程度。具体而言,一方面在全球气候变暖情景下,东北地区活动积温增加促使适宜水稻种植范围北扩明显,为水稻种植面积的扩张提供了前提^[49];另一方面,水稻最低收购价格从 2004 年 1.50 元/kg 上涨到 2017 年 3.10 元/kg(图 8(a)),种植水稻的经济利益不断上涨引起了大规模“旱改水”行动。在全球气候变化背景下,东北地区作为典型的中高纬农业区,积温的上升有效延长了玉米、水稻和大豆适宜生长期,为粮食作物向三江平原、松嫩北部扩张提供了热量基础。而降水模式的改变使得传统旱作农

业风险加大^[31]。因此,气候变化与经济利益的双重驱动促使传统旱作区大规模开展水田扩张工程。这种土地利用方式的转变显著增加了农业灌溉用水需求,导致区域水稻蓝水流动发生了显著改变(图 8(b))。大豆种植面积的变化也影响了大豆虚拟水输出规模。例如,2018 年中美贸易摩擦背景下,我国大力提高了大豆生产者补贴标准,提高幅度超过 80%,扩大了东北地区大豆种植规模,导致 2019 年大豆虚拟水输出量增加了 14.78%。此外,台风等极端天气事件与俄乌战争等地缘政治冲突,对粮食生产与贸易等环节带来了严峻挑战,进而影响粮食虚拟水流动规模和结构,威胁我国粮食安全的稳定性^[3,14]。

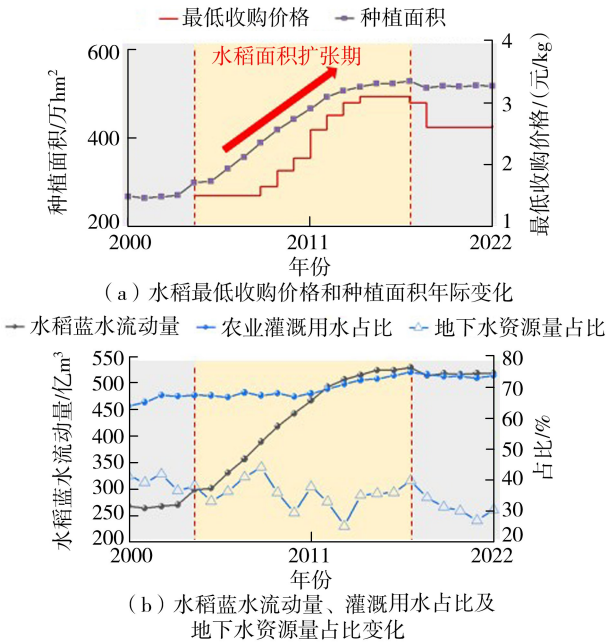


图 8 影响东北地区水稻蓝水流动量的因素分析结果
Fig. 8 Analysis results of influencing factors of rice blue water flow in Northeast China

4.3 粮食虚拟水流动对实体水资源的影响

与以往以省级或市级行政单元开展的研究相比,本文研究更聚焦东北地区内部,充分考虑了区域内地理环境和农业生产的多样性。通过多源数据融合和精细化的模型计算,研究发现东北地区不同地理单元和农业生产模式下的粮食虚拟水流动存在显著差异,这种差异对水资源压力的时空演变产生了独特影响,且地下水储量变化趋势与粮食虚拟水流动在时间上具有明显的响应关系(图 9),尤其是在输出规模高峰期与地下水储量距平的下降拐点存在耦合现象。以西辽河地区为例,其蓝水流动量虽整体较低,但因区域本底水资源稀缺,虚拟水输出所驱动的生产扩张加剧了地下水超采,其地下水储量距平呈持续性下降趋势。尤其区域粮食虚拟水流

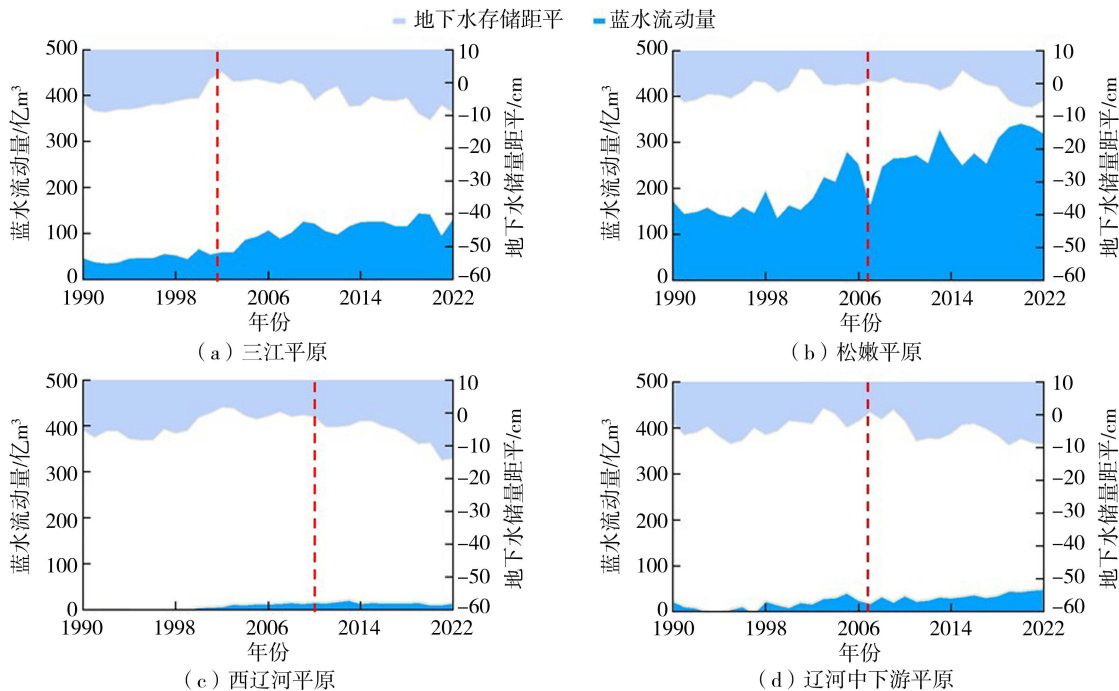


图 9 1990—2022 年东北粮食主产区地下水储量距平与粮食虚拟水流动量

Fig. 9 Groundwater storage anomaly and virtual water flow momentum of grain in main grain producing areas of Northeast China from 1990 to 2022

动量的峰值(2010 年前后)与地下水储量距平加速下降时段吻合,表明粮食贸易驱动的生产扩张加剧了地下水超采,促使了该地区水资源压力持续攀升^[50]。并且水资源失衡已经对当地生态环境和农业可持续发展构成严重威胁。而三江平原、松嫩平原和辽河中下游平原地区蓝水流动量自“北粮南运”以来增长明显,且波动较大,但地下水储量距平下降趋势并未有西辽河地区明显。这主要是因为这些地区水资源相对丰富,粮食生产过程中的虚拟水流动对实体水资源,尤其是地下水的影响并没有西辽河地区明显,当地的水资源尚且能在一定程度上支撑粮食生产。但粮食虚拟水输出若长期未得到合理调控,必然导致区域水资源失衡,进一步严重威胁农业可持续发展。因此,亟须构建兼顾虚拟水与实体水统筹考虑的水资源补偿方案,缓解东北地区的水资源短缺问题。

4.4 减缓水资源压力的策略

“北粮南运”的虚拟水流动加剧了东北地区水资源紧缺,制定有效的应对策略已刻不容缓。“北粮南运”以来东北地区粮食虚拟水含量虽然整体呈下降趋势,但是在空间上仍存在明显的空间差异(图 10)。因此,需基于粮食虚拟水流动特征与区域水资源承载能力差异,制定更具针对性的分区管控与多元协同策略。首先,在地方层面,应紧密结合各地水资源条件与作物需水特性,积极做好统筹蓝水与绿水利用,因地制宜优化主要粮食作物种植结构,

优先在水资源压力较小、虚拟水含量较低的区域发展玉米等低耗水作物,减少在地下水资源脆弱区种植高耗水作物如大豆与水稻,推动农业生产与水资源条件的匹配协调。其次,应强化农业节水措施与技术的落地推广,例如高效灌溉、深松免耕、水肥一体化等,提升单位水资源的产出效益。同时也须积极推动水网工程与引调水基础设施建设,实现水资源的跨区域调配,缓解水资源分布不均的问题。

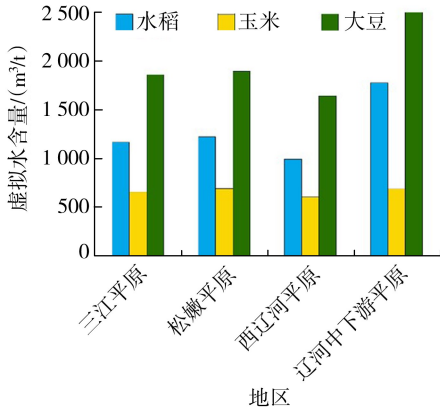


图 10 东北粮食主产区的粮食虚拟水含量
Fig. 10 Grain virtual water content in main grain producing areas of Northeast China

根据我国历年的主要粮食作物的市场价格与粮食虚拟水流动量可知,东北地区虚拟水输出的经济效益已由 1995 年 316.57 亿元增长到 2022 年 1698.76 亿元,而中央财政对东北地区的转移支付占比却下降了 1.45%(图 11),在一定程度上限制了

东北地区经济社会的发展,不利于保障东北地区粮食安全地位。因此,在中央政府层面,完善国家层面基于虚拟水流动的水资源生态补偿机制,对粮食主产区提供财政与政策支持,增强其农业供水保障能力与生态承载能力,构建兼顾虚拟水与实体水统筹考虑的水资源补偿方案,例如通过财政转移支付等方式,对东北地区因粮食虚拟水输出而造成的水资源损失进行补偿,设立专项基金用于支持东北地区的水资源保护和水利设施建设,提升农业供水的可靠性和稳定性。最后,应构建多源数据驱动的水资源-粮食系统动态监测与决策支持平台,为未来粮食调运与水资源配置的统筹管理提供科技支撑,助力实现农业高质量发展与水资源可持续利用的双重目标。

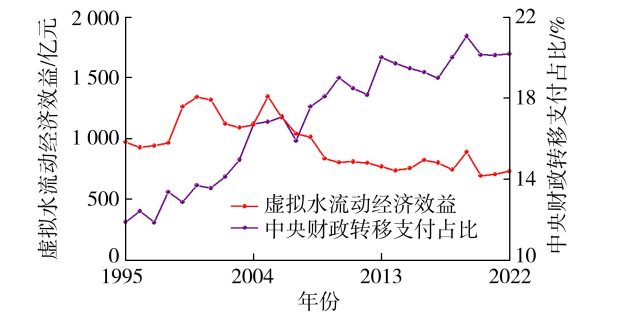


图 11 1995—2022 年东北地区粮食虚拟水流动经济效益与中央财政转移支付占比

Fig. 11 Economic benefits of grain virtual water flows and proportion of central government transfers in Northeast China from 1995 to 2022

5 结 论

- a. 东北地区主要粮食虚拟水含量从大到小的顺序为:大豆(146.43 m³/t)、水稻(1179.61 m³/t)、玉米(610.45 m³/t)。对于空间分布而言,东北地区中部的玉米虚拟水含量和辽河中下游平原的水稻虚拟水含量明显低于其他地区。
- b. “北粮南运”以来,东北地区粮食虚拟水流出总量累计达到 16520.03 亿 m³,伴随着区域粮食生产与消费结构的调整,该地区水资源压力指数由 0.47 上升至 0.87,水资源压力程度已由中度转为重度,部分区域出现了地下水储量持续下降的趋势。
- c. 在结合区域水资源与作物需水特性、合理规划粮食作物种植范围、做好地方层面的农业节水措施的同时,还应推动水网工程建设,从外部层面提高水资源分布的合理性,中央层面则要构建兼顾虚拟水与实体水统筹考虑的水资源补偿方案,提升农业供水的可靠性和稳定性。

参考文献:

[1] 贺正齐,周到,张振扬,等. 基于 PSR 与云模型的重要耕

地后备资源区水资源-能源-粮食协同安全评价[J]. 水利经济, 2025, 43 (1): 26-31. (He Zhengqi, Zhou Dao, Zhang Zhenyang, et al. Evaluation of water-energy-food synergistic security in important reserve resource for arable land regions based on PSR and cloud model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43 (1): 26-31. (in Chinese))

[3] 王浩,姜珊,朱永楠,等. 中国水-能-粮耦合系统协同安全发展战略研究[J]. 中国水利, 2024 (17): 5-12. (Wang Hao, Jiang Shan, Zhu Yongnan, et al. Research on the collaborative safety development strategy of Water-Energy-Food Nexus in China[J]. China Water Resources, 2024 (17): 5-12. (in Chinese))

[4] 王浩,杨贵羽,杨朝晖. 水土资源约束下保障粮食安全的战略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28 (3): 329-336. (Wang Hao, Yang Guiyu, Yang Zhaohui. Thinking of agriculture development in China based on regional water resources and land cultivation [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28 (3): 329-336. (in Chinese))

[5] 吴普特,卓拉,刘艺琳,等. 区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价[J]. 科学通报, 2019, 64 (18): 1953-1966. (Wu Pute, Zhuo La, Liu Yilin, et al. Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64 (18): 1953-1966. (in Chinese))

[6] 李保国,黄峰. 1998—2007 年中国农业用水分析[J]. 水科学进展, 2010, 21 (4): 575-583. (Li Baoguo, Huang Feng. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach [J]. Advances in Water Science, 2010, 21 (4): 575-583. (in Chinese))

[7] Allan J A. Water allocation[M]//Howsam P, Carter R C. Water Policy: Allocation and Management in Practice. London: CRC Press, 1996: 3-12.

[8] 阴亚丽. 中国“北粮南运”伴生的区域虚拟水流动过程解析与应对策略[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.

[9] 韩昕雪琦,安婷莉,高学睿,等. 我国西北地区主要农作物贸易对区域水资源影响[J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2020, 18 (1): 82-97. (Han Xinxueqi, An Tingli, Gao Xuerui, et al. Analysis of the impact of major crop trade on regional water resources in northwest China [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18 (1): 82-97. (in Chinese))

[10] 孙思奥,郑翔益,刘海猛. 京津冀城市群虚拟水贸易的近远程分析[J]. 地理学报, 2019, 74 (12): 2631-2645. (Sun Si' ao, Zheng Xiangyi, Liu Haimeng. Local and distant virtual water trades in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74 (12): 2631-2645. (in Chinese))

[11] 王艳秋,翟英南,江禹薇,等. 东北三省能源-粮食水足

- 迹与水资源空间匹配研究[J]. 水利经济, 2025, 43(2): 59-66. (Wang Yanqiu, Zhai Yingnan, Jiang Yuwei, et al. Research on the spatial matching of energy-food water footprint and water resources in the three provinces of Northeast China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(2): 59-66. (in Chinese))
- [12] Dalin C, Hanasaki N, Qiu Huanguang, et al. Water resources transfers through Chinese interprovincial and foreign food trade [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(27): 9774-9779.
- [13] Li Bo, Qin Lijie, Qi Hang, et al. Assessing the effects of drought on rainfed maize water footprints based on remote sensing approaches[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(2): 1154-1165.
- [14] Zhang Enze, Yin Xin'an, Yang Zhifeng. Contributions of climate change and human activities to changes in the virtual water content of major crops: an assessment for the Shijiazhuang Plain, northern China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169: 105498.
- [15] Sun Shikun, Wang Yubao, Engel B A, et al. Effects of virtual water flow on regional water resources stress: a case study of grain in China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 550: 871-879.
- [16] 吴兆丹, 丁小琦, 陈其勇, 等. 黄河流域粮食虚拟水流动对水资源空间均衡性的影响[J]. 水利经济, 2023, 41(1): 62-71. (Wu Zhaodan, Ding Xiaoqi, Chen Qiyong, et al. Influence of grain virtual water flow on the spatial equilibrium of water resources in the Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 62-71. (in Chinese))
- [17] 吴普特. 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告(1997—2023)[R]. 杨凌: 西北农林科技大学旱区节水农业研究院, 2024.
- [18] Yin Y L, Sun S K, Wang Y B, et al. Impact of grain virtual water flow on surface water and groundwater in China[J]. Advances in Water Resources, 2021, 150: 103848.
- [19] Wang Y B, Wu P T, Engel B A, et al. Application of water footprint combined with a unified virtual crop pattern to evaluate crop water productivity in grain production in China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 497-498: 1-9.
- [20] Dang Yongcai, Qin Lijie, Huang Lirong, et al. Water footprint of rain-fed maize in different growth stages and associated climatic driving forces in Northeast China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 263: 107463.
- [21] 张佳宝, 孙波, 朱教君, 等. 黑土地保护利用与山水林田湖草沙系统的协调及生态屏障建设战略[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1155-1164. (Zhang Jiabao, Sun Bo, Zhu Jiaojun, et al. Black soil protection and utilization based on harmonization of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland-sandy land ecosystems and strategic construction of ecological barrier[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1155-1164. (in Chinese))
- [22] 黄姣, 高阳, 李双成. 东北三省主要粮食作物虚拟水变化分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(3): 505-512. (Huang Jiao, Gao Yang, Li Shuangcheng. Temporal variation of virtual water of selected agricultural products in northeastern China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(3): 505-512. (in Chinese))
- [23] Xiao Xingyuan, Zhang Jing, Liu Yaqun. Impacts of crop type and climate changes on agricultural water dynamics in northeast China from 2000 to 2020[J]. Remote Sensing, 2024, 16(6): 1007.
- [24] Niu Quandi, Li Xuecao, Huang Jianxi, et al. A 30 m annual maize phenology dataset from 1985 to 2020 in China[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(6): 2851-2864.
- [25] Peng Qiongyan, Shen Ruoque, Li Xiangqian, et al. A twenty-year dataset of high-resolution maize distribution in China[J]. Scientific Data, 2023, 10(1): 658.
- [26] Shen Ruoque, Pan Baihong, Peng Qiongyan, et al. High-resolution distribution maps of single-season rice in China from 2017 to 2022[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(7): 3203-3222.
- [27] Zhang Hongchi, Lou Zihang, Peng Dailiang, et al. Mapping annual 10-m soybean cropland with spatiotemporal sample migration[J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 439.
- [28] Xuan Fu, Dong Yi, Li Jiayu, et al. Mapping crop type in northeast China during 2013-2021 using automatic sampling and tile-based image classification [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 117: 103178.
- [29] Shen Ruoque, Pan Baihong, Peng Qiongyan, et al. CCD-Rice: a paddy rice distribution dataset in China from 1990 to 2016 at 30 m resolution. [J]. Earth System Science Data, 2024, 17, 2193-2216.
- [30] Wang Minglei, Shi Wenjiao. The annual dynamic dataset of high-resolution crop water use in China from 1991 to 2019 [J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 1373.
- [31] 孙敬轩, 章光新, 吴燕锋, 等. 气候变化下东北地区农业绿水安全风险评估[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(7): 2210-2226. (Sun Jingxuan, Zhang Guangxin, Wu Yanfeng, et al. Risk assessment of agricultural green water security in northeast China under climate change [J]. Scientia Sinica Terrae, 2024, 54(7): 2210-2226. (in Chinese))
- [32] Xie Zijing, Yao Yunjun, Tang Qingxin, et al. Evaluation of seven satellite-based and two reanalysis global terrestrial evapotranspiration products [J]. Journal of Hydrology,

- 2024,630:130649.
- [33] Liang Shunlin, Zhang Xiaotong, Xiao Zhiqiang, et al. Global Land Surface Satellite (GLASS) products: algorithms, validation and analysis [M]. Cham: Springer, 2014.
- [34] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, et al. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production [J]. *BioScience*, 2004, 54 (6): 547-560.
- [35] Joiner J, Yoshida Y, Zhang Yao, et al. Estimation of terrestrial global gross primary production (GPP) with satellite data-driven models and eddy covariance flux data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1346.
- [36] 路洁,王学凤,曹永强. 气候和人类活动对辽宁省植被变化的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(4): 7-14. (Lu Jie, Wang Xuefeng, Cao Yongqiang. Effects of climate and human activities on vegetation variation in Liaoning Province [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(4): 7-14. (in Chinese))
- [37] 王洁蓉,何蒲明. 我国粮食消费结构对粮食进口贸易的影响研究[J]. *价格月刊*, 2016(6): 51-54. (Wang Jierong, He Puming. Research on influence of China's grain consumption structure on grain import trade [J]. *Prices Monthly*, 2016(6): 51-54. (in Chinese))
- [38] Yin Jiabo, Slater L J, Khouakhi A, et al. GTWS-MLrec: global terrestrial water storage reconstruction by machine learning from 1940 to present [J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(12): 5597-5615.
- [39] Li Xiaojie, Zhang Yongqiang, Ma Ning, et al. Increased grain crop production intensifies the water crisis in northern China [J]. *Earth's Future*, 2023, 11(9): e2023EF003608.
- [40] Wang Guofeng, Chen Jiancheng, Wu Feng, et al. An integrated analysis of agricultural water-use efficiency: a case study in the Heihe River Basin in northwest China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 89-90: 3-9.
- [41] Cao Xinchun, Bao Yutong, Li Yueyao, et al. Unravelling the effects of crop blue, green and grey virtual water flows on regional agricultural water footprint and scarcity [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 278: 108165.
- [42] 孙才志,张佳亮. 中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易的水资源压力效应[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(4): 1-8. (Sun Caizhi, Zhang Jialiang. Effects of water resources stress on agricultural trade between China and countries along Belt and Road [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(4): 1-8. (in Chinese))
- [43] Zhao Xu, Liu Junguo, Liu Qingying, 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.
- [44] 操信春,刘喆,吴梦洋,等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 94-100. (Cao Xinchun, Liu Zhe, Wu Mengyang, et al. Temporal-spatial distribution and driving mechanism of arable land water scarcity index in China from water footprint perspective [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(8): 94-100. (in Chinese))
- [45] Cao Xinchun, Huang Xuan, Huang He, et al. Changes and driving mechanism of water footprint scarcity in crop production: a study of Jiangsu Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 444-454.
- [46] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(7): 1259-1276.
- [47] Naresh R K, Timsina J, Dwivedi A, et al. Water footprint of rice from both production and consumption perspective assessment using remote sensing under subtropical India: a review [J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2017, 5(1): 343-350.
- [48] Papadavid G, Toullos L. The use of earth observation methods for estimating regional crop evapotranspiration and yield for water footprint accounting [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2018, 156(5): 599-617.
- [49] Zhang Qingsong, Sun Jiahao, Zhang Guangxin, et al. Spatiotemporal dynamics of water supply-demand patterns under large-scale paddy expansion: implications for regional sustainable water resource management [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 285: 108388.
- [50] Liu Junguo, Yang Hong, Gosling S N, et al. Water scarcity assessments in the past, present, and future [J]. *Earth's Future*, 2017, 5(6): 545-559.

(收稿日期:2025-04-14 编辑:徐娟)

