DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.007

黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价

赵 勇[1,2],黄可静[2],高学睿[3],安婷莉[2],何国华[1],姜 珊[1]

(1.中国水利水电科学研究院水资源研究所,北京 100038;2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为分析黄河流域粮食生产用水的可持续性,引入水足迹和虚拟水相关理论方法,对研究区主要粮食生产水足迹及粮食贸易伴生的虚拟水流动格局进行了量化解析,并对未来粮食生产水足迹进行了预估。结果表明:2011—2016 年,全流域粮食生产总水足迹和单位水足迹分别由 460 亿 m^3 和 1.20 m^3/kg 降为 402 m^3 和 0.93 m^3/kg,均呈下降趋势;从粮食贸易伴生的虚拟水流动特点来看,流域全口径粮食虚拟水从 2011 年的 110.7 亿 m^3 减小到 2016 年的 50.3 亿 m^3,呈输入态势;除稻谷之外的粮食虚拟水由 82.6 亿 m^3 增加到 193.4 亿 m^3,呈输出态势;在流域不同气候情景下,2035 年粮食生产总水足迹为 481.9 亿~518.7 亿 m^3,其中绿水足迹增幅达 20%,而蓝水足迹增长不显著;未来流域内粮食输出量的增加会进一步加剧本地农业生产的用水矛盾,但粮食灌溉总用水量的增速可能放缓。

关键词:水足迹;虚拟水;粮食生产;气候变化;黄河流域

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0039-09

Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin

//ZHAO Yong[1,2], HUANG Kejing[2], GAO Xuerui[3], AN Tingli[2], HE Guohua[1], JIANG Shan[1] (1. *Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 2. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*; 3. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*)

Abstract: To evaluate the sustainability of available water resources for grain production in the Yellow River Basin, the theory of water footprint and virtual water was introduced to quantitatively analyze the water footprint of grain production and virtual water flow pattern associated with grain trade in the Yellow River Basin and estimate future water footprint of grain production in this area. The results showed that the total water footprint of grain production in the whole basin decreased from 46.0 billion m^3 to 40.2 billion m^3 from 2011 to 2016, while water footprint per unit of grain production decreased from 1.20 m^3/kg to 0.93 m^3/kg. According to virtual water flow associated with grain trade, the full-caliber grain virtual water in the Yellow River Basin decreased from 11.07 billion m^3 in 2011 to 5.03 billion m^3 in 2016, indicating a trend of grain input, especially the input of rice. Virtual water flow of other grains except rice increased from 8.26 billion m^3 to 19.34 billion m^3, indicating a trend of other grain output. By 2035, the total water footprint of grain production is expected to be 48.19 billion m^3 to 51.87 billion m^3 under different climatic scenarios. The green water footprint is expected to increase by 20%, while the increase of blue water footprint is insignificant. Therefore, it is concluded that the increase of grain output will aggregate the water resources stress in the Yellow River Basin, while the growth of irrigation water demand may slow down.

Key words: water footprint; virtual water; grain production; climate change; the Yellow River Basin

20 世纪 90 年代以来,随着国民经济快速发展和区域产业结构的优化,我国南北方粮食生产的空间格局发生了重大变化[1-2]。吴普特等[3]研究发现,1990 年以来我国北方粮食向南方输运而形成的

基金项目:国家杰出青年科学基金(52025093);陕西省水利科技计划项目(2020slkj-9)

作者简介:赵勇(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事流域水资源高效利用及节水政策研究。E-mail:zhaoyong@iwhr.com

通信作者:高学睿(1986—),男,副研究员,博士,主要从事流域水资源管理及水循环模拟研究。E-mail:gaoxuerui666@163.com

“农业北水南调虚拟工程”的虚拟水年调运量已超过200亿m^3，远大于南水北调实体水现状调水规模，水资源丰沛的南方地区粮食产量逐年减少，而水资源短缺的北方地区成为我国粮食安全保障的主力军。我国黄河流域后备耕地资源、光照资源充足[4-6]，拥有大量地形平坦且集中的土地，农业生产潜力巨大[7]。因此，在新时期，黄河流域以及北方地区在保障国家粮食安全中的作用将逐渐凸显[8-9]。黄河流域是中华文明的发祥地，同时又是干旱缺水、水土流失和生态脆弱等问题复杂交织的重点区域[10]。2019年，国家对加强黄河流域的治理保护、推动黄河流域高质量发展做出了重大部署[11]。当前，农业生产和粮食安全是黄河流域高质量发展的重要组成部分，而水资源供需安全是实现黄河流域生态保护与高质量发展的基础前提[12]。解决黄河流域的水问题，直接关系着国家粮食安全，关系着西部大开发和“一带一路”倡议的顺利实施。因此，需要更加重视水利基础设施建设，保障区域水资源有效供给，提升黄河流域的水-粮协同安全水平[13-14]。

长期以来，人们对水资源问题的认识往往局限于“实体水”的角度，这为干旱、半干旱地区的经济社会可持续发展带来了较大阻碍[15]。虚拟水和水足迹概念的提出突破了“实体水”的局限，给水资源管理者提供了新视角和新路径[16]。事实上，随着社会经济发展和区域间贸易持续增长，商品生产造成的实体水耗用和商品流通伴生的虚拟水流动均呈急速扩张态势。由此可见，在现代环境下，社会经济活动伴生的实体水利用和虚拟水流动均对区域水资源系统产生重要影响，统筹实体水和虚拟水管理是新时期水资源管理的重要命题，已成为相关领域研究热点[17]。区域实体水-虚拟水统筹管理的基本前提是精确量化商品生产过程中的水资源投入（即商品中的虚拟水含量），并揭示伴随区域贸易过程的虚拟水流动格局[18]。2002年Hoekstra[19]提出了水足迹的概念，为商品虚拟水含量的计算提供了一个新指标。众多学者利用这一概念进行了多方面研究，包括对农业、畜牧业、工业等各行业的水足迹进行测算和评估，分析其水足迹变化的主要影响因素，为区域水资源的配置提供了支撑和帮助。这些研究的侧重点是探索利用不同手段对商品中虚拟水含量进行量化，是区域虚拟水流动格局分析的重要基础。由于虚拟水流动与区域贸易过程紧密耦合，因此，解析区域商品贸易流通格局，结合单位商品的虚拟水含量即可揭示商品贸易伴生的区域虚拟水流通格局。学者们从全球或国家层面、省际层面、流域层面等各个层面对虚拟水流动进行解析[20-22]，分析虚拟水流动对不同因素的响应及其对水资源系统的影响，为水资源管理提供有效的建议和帮助。

经过多年的研究积累，在商品的水足迹量化与区域贸易伴生的虚拟水流动解析方面均建立了众多可行的方法。在小尺度上，可以采用机理性耗用水模型实现商品生产用水过程的精细量化，但需要大量的基础数据支撑；在大尺度上，可以通过区域耗用水统计数据通过“自上而下”的方式量化商品水足迹，对基础数据的要求可以适当降低。本文通过权衡不同水足迹量化方法的利弊，确定利用可行性和适用性较高的“自上而下”方式对黄河流域作物生产水足迹进行计算，同时结合贸易均衡法解析农作物贸易及其伴生的虚拟水流动通量，进而利用水资源压力指数量化粮食作物贸易伴生的虚拟水流动效应及影响，最后对不同气候情景下的未来粮食生产水足迹进行预测，以期研判气候变化情景下黄河流域未来用水规模和可能趋势。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

黄河流域地处我国北方，位于32°N ~42°N、95°E ~ 120°E，流域总面积为79.3万km^2，属于典型的干旱、半干旱气候区。受特定气候条件和地理位置的影响，黄河流域长期干旱缺水，多年平均降水量为450 mm，全流域水资源总量为560亿m^3，仅占全国水资源总量的2.2%[23]。2016年黄河流域耕地面积为1 628万hm^2，占全国总耕地面积的13.2%[24]。流域内农业耕作区主要集中在平原及河谷盆地，上游宁蒙河套平原是干旱地区建设“绿洲农业”的成功典型，中游汾河、渭河盆地是我国主要的农业生产基地之一。然而，作为我国资源性缺水最为严重的流域之一，黄河流域耕地对河川径流的利用量仅为300 m^3/hm^2，是全国水平的15%[25]，水资源短缺已成为当地农业生产的最大障碍因素。

1.2　研究方法

黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东9个省级行政区（以下简称省区）。由于统计数据大多以市级行政区为单元，为了便于数据的收集，本研究以市级行政区为单元，收集整理了黄河流域人口、耕地面积、粮食播种面积和粮食产量等长系列数据，为黄河流域粮食生产和伴生的虚拟水流动格局分析提供数据支撑。由于四川省在黄河流域范围较小，且属牧区，粮食产量较低，本研究未将其纳入研究范围；河南新乡、山西晋中和忻州、内蒙古包头和巴彦淖尔、陕西商洛5个地区仅

有部分区域在黄河流域内,为简单起见,计算分析时按照面积加权对相应的统计数据进行剖分。

本研究中,粮食的种类与国家统计年鉴的数据口径保持一致,主要包括谷物、豆类和薯类,其中谷物有稻谷、小麦、玉米、谷子、高粱以及其他谷物(大麦、燕麦、荞麦等);豆类包括大豆、绿豆、小红豆等;薯类包括马铃薯、甘薯等。

1.2.1 粮食生产水足迹计算方法

作物生产水足迹是表征生产单位重量作物所需要的水资源数量的一个重要指标,它包括蓝水足迹(作物生长过程所消耗的灌溉水)和绿水足迹(作物生长过程所消耗的天然降水)。研究区粮食生产水足迹参考吴普特等[26]的计算方法:

$$W_{FGi} = \frac{W_{gi} + W_{bi}}{G_i} \tag{1}$$

其中 $W_{gi} = \dfrac{10P_{ei}S_{Gi}}{\lambda_{Gi}} \quad W_{bi} = R_{Gi}S_{RGi}$

式中:W_{FGi} 为黄河流域第 i 省区粮食生产单位水足迹,m^3/kg;W_{gi}、W_{bi} 分别为第 i 省区粮食生产过程中绿水足迹和蓝水足迹,m^3;G_i 为第 i 省区统计时段内(通常为一年)粮食总产量,kg;P_{ei} 为第 i 省区有效降水量,mm;S_{Gi} 为第 i 省区粮食播种面积,hm^2;λ_{Gi} 为第 i 省区粮食复种指数;R_{Gi} 为第 i 省区单位面积灌溉定额,m^3/hm^2;S_{RGi} 第 i 省区粮食灌溉面积,hm^2;

λ_{Gi} 和 S_{Gi} 可以通过收集当地统计资料获取,P_{ei} 的计算依据气象站点旬降水量数据和美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量估算方法[27]。本研究中,首先利用泰森多边形法将某一省区各站点的旬降水量进行加权平均,然后利用下式计算有效降水量:

$$P_{ei} = \begin{cases} \dfrac{P_i(4.17 - 0.02P_i)}{4.17} & P_i < 83\ \text{mm} \\ 4.17 + 0.1P_i & P_i \geq 83\ \text{mm} \end{cases} \tag{2}$$

式中 P_i 为第 i 省区旬降水量平均值,mm。

R_{Gi}、S_{RGi} 计算公式分别为

$$R_{Gi} = \frac{R_iS_i}{S_{Gi} + \alpha_iS_{Ei}} \tag{3}$$

$$S_{RGi} = \frac{S_{Ri}S_{Gi}}{S_i} \tag{4}$$

其中 $\alpha_i = \dfrac{R_{Ei}}{R_{Ci}}$

式中:R_i 为第 i 省区平均灌溉水深,mm;S_i 为第 i 省区总的作物播种面积(包括非粮作物),hm^2;S_{Ei} 为第 i 省区非粮作物的播种面积,hm^2;α_i 为第 i 省区的非粮作物与粮食作物的综合灌溉定额之比;S_{Ri} 为第 i 省区总有效灌溉面积,hm^2;R_{Ei}、R_{Ci} 分别为第 i 省区非粮作物、粮食作物的单位面积灌溉定额,m^3/hm^2,可以根据统计公报中的数据资料推求。

1.2.2 粮食贸易伴生的虚拟水流动量计算方法

对粮食贸易伴生的虚拟水流动过程分析基于两个假设:①将黄河流域各省区视为一个整体,假设黄河流域与外部地区之间粮食贸易及伴生的虚拟水流动过程不受国际粮食贸易(即粮食进出口)因素的影响;②假设黄河流域内各省区粮食年际间的库存变化为0,即表示各地生产粮食优先满足本地消费后将对外进行贸易销售。

由于粮食虚拟水流动与粮食贸易紧密伴生,因此,粮食虚拟水流动量在数值上等于区域间粮食贸易量与粮食生产单位水足迹的乘积。对粮食贸易伴生的虚拟水流动量计算公式为

$$W_{Vi} = \begin{cases} \dfrac{G_i'W_{FGi}}{10} & G_i' > 0 \\ \dfrac{G_i'W_{FGo}}{10} & G_i' \leq 0 \end{cases} \tag{5}$$

其中 $G_i' = 10^7G_i - N_i\dfrac{G}{N}$

式中:W_{Vi} 为黄河流域第 i 省区粮食贸易伴生的虚拟水流动量,亿 m^3;W_{FGo} 为黄河流域以外区域粮食生产单位水足迹的均值,m^3/kg;G_i' 为黄河流域第 i 省区的粮食调运量,万 t;N 为全国人口,万人;N_i 为黄河流域第 i 省区的人口数量,万人;G 为全国粮食总产量,万 t。$W_{Vi} > 0$ 时,虚拟水为输出方向;$W_{Vi} < 0$ 时,虚拟水为输入方向。$G_i' > 0$ 时,粮食贸易方向为输出;$G_i' < 0$ 时,粮食贸易方向为输入;$G_i' = 0$ 时表示无区域间粮食贸易。

1.2.3 虚拟水流动影响评价方法

采用实际水胁迫指数 I_{ws} 和假设水胁迫指数 I_{ws}'[19] 量化虚拟水流动对区域水资源系统的影响。I_{ws} 指区域内实际用于粮食生产的水量与区域可利用水资源量的比值,该指标可以作为一个区域可利用水资源量的上限。I_{ws}' 指假设区域内没有发生粮食输入或者输出贸易和虚拟水流动时的粮食生产用水量与区域内可利用水资源量的比值。I_{ws} 和 I_{ws}' 计算公式分别为

$$I_{ws} = \frac{W_{Gi}}{W_i} \tag{6}$$

$$I_{ws}' = \frac{W_{Gi} - W_{Vi}}{W_i} \tag{7}$$

式中:W_{Gi} 为第 i 省区粮食生产用水量,m^3;W_i 为第 i 省区用水总量控制红线,m^3。

一般来说,I_{ws} 和 I_{ws}' 在评价水压力程度时可以

分为 5 个等级:无压力(I_{ws} ≤0.2 或 I'_{ws} ≤ 0.2)、轻度压力(0.2 < I_{ws} ≤0.4 或 0.2 < I'_{ws} ≤0.4)、中度压力(0.4 < I_{ws} ≤0.6 或 0.4 < I'_{ws} ≤0.6)、重度压力(0.6 < I_{ws} ≤0.8 或 0.6 < I'_{ws} ≤0.8)和极端压力(0.8 < I_{ws} ≤1.0 或 0.8 < I'_{ws} ≤1.0)。

1.2.4 未来粮食生产用水需求预测方法

以 2016 年为现状年,依据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)第五次评估报告中给出的 3 种气候情景模式(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)预测黄河流域未来气候变化特点。根据 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)提供的气候情景预估模式,结合区域降尺度计算结果,得到黄河流域 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景模式下平均温度变化率分别为 0.028 ℃/a、0.040 ℃/a 和 0.053 ℃/a,降水量变化率分别为 -0.89 mm/a、0.52 mm/a 和 1.44 mm/a。为预测不同气候情景模式下黄河流域作物用水需求,采用 Blaney-Criddle 法[28]分析作物参考蒸散发量的变化规律,进而利用作物系数推求 2035 年水平年黄河流域粮食生产需水规律。

Blaney-Criddle 法计算公式为

$$ET = p(0.46T_a + 8.13) \tag{8}$$

式中:ET 为计算时段内的日参考作物蒸散发量,mm/d;T_a 为计算时段内的平均气温,℃;p 为计算时段内的平均白昼长度占全年总白昼长度的百分比,%。p 与纬度相关,对于黄河流域作物主要生育期(3—9 月),p 可取值为 0.3 左右[28]。

基于式(8),作物蒸腾需水量(日尺度)的计算公式为

$$W_D = 0.3K_C(0.46T_a + 8.13) \tag{9}$$

式中 K_C 为作物系数,可视为定值。根据汪志农[29]的研究成果,以陕西省中北部小麦、玉米和薯类的作物系数代表黄河流域平均水平:小麦的 K_C 为 1.2,玉米的 K_C 为 1.0,薯类的 K_C 为 0.9。未来研究区作物蒸腾需水量的日平均变化量与其温度的变化量呈线性关系,即:

$$\frac{\Delta W_D}{\Delta T_a} = 0.138K_C \tag{10}$$

1.3 数据来源

本文涉及的主要数据有:①黄河流域各省区 2011—2016 年的粮食产量、粮食播种面积、非粮作物播种面积、有效灌溉面积、人口数量等统计数据,数据来源于国家和各省统计年鉴;②黄河流域主要气象站点(研究区内共分布了 86 个站点)的降水量数据来自中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp);③粮食生产用水量数据来源于各省的水资源公报,粮食和非粮作物的灌溉定额数据参考《中国水利统计年鉴》等相关资料,研究区粮食复种指数参考《中国农业年鉴》等相关资料;④CMIP5 未来气候数据集中的气温、降雨、太阳辐射等数据来源于世界气候研究计划(World Climate Research Programme)(https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/)。

2 结果与分析

2.1 黄河流域粮食生产水足迹变化趋势

利用上文所述的研究方法,分析了 2011—2016 年黄河流域粮食生产总水足迹、蓝水足迹和绿水足迹的变化特征,如图 1 所示。从图 1 可见,2011—2016 年黄河流域粮食生产总水足迹呈现下降趋势,其中,蓝水足迹和绿水足迹均呈下降趋势,蓝水足迹的下降趋势较绿水足迹更为显著。2011 年,黄河流域粮食生产总水足迹为 460.1 亿 m³,其中,蓝水足迹为 196.3 亿 m³,绿水足迹为 263.8 亿 m³;2016 年,黄河流域粮食生产总水足迹为 402.3 亿 m³,其中,蓝水足迹为 151.7 亿 m³,降幅为 22.7%,绿水足迹为 250.6 亿 m³,降幅为 5.0%。一般来说,绿水足迹的变动主要是由降水总量及其时空分布特征决定的,难以人为调控,而蓝水足迹的降低主要是灌溉基础设施的提升、灌溉技术的进步以及管理方式的变革等因素导致的[30]。由此可见,近些年黄河流域粮食生产水足迹下降的主要人为驱动力是技术的进步和水资源调控方式与灌区管理水平的提升[31-32]。

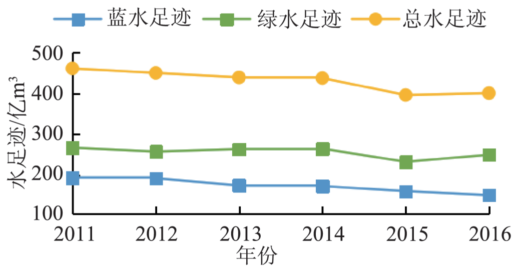


图 1 粮食生产水足迹演变趋势

Fig. 1 Changing trends of grain production water footprints

为更加深入了解黄河流域粮食生产水足迹的时空演变规律,进一步分析了黄河流域各省区 2011—2016 年粮食生产总水足迹与单位水足迹的变化特征,结果如图 2 所示。与总水足迹相比,粮食生产单位水足迹的降幅更为显著。全流域平均粮食生产单位水足迹从 2011 年的 1.2 m³/kg 降为 2016 年的 0.93 m³/kg,降幅为 22.5%。2011—2016 年,黄河流域所有省区粮食生产单位水足迹呈下降趋势,其中,山西、内蒙古、河南、山东 4 省区粮食生产单位水足迹均在 1.0 m³/kg 以下,低于全国平均水平的

1.12 m³/kg[33]，说明这些省区的粮食生产用水效率居全国前列；青海、宁夏 2 省区粮食生产单位水足迹偏高，未来粮食生产节水空间较大。粮食生产单位水足迹不仅和粮食生产过程中的用水效率有关，还与单位面积的粮食产量密切相关。因此，区域粮食生产水足迹的降低可以通过种质资源创新、地力提升和栽培技术进步等手段来实现[34]。2011—2016 年，所有省区粮食生产蓝水足迹亦呈下降趋势；除内蒙古、河南、陕西等省区的绿水足迹略有增长之外，其他省区的绿水足迹均呈下降趋势。由此说明，近年来黄河流域农业节水管理和灌溉技术发展效果显著，对控制区域用水总量，保障农业水安全具有重要作用。

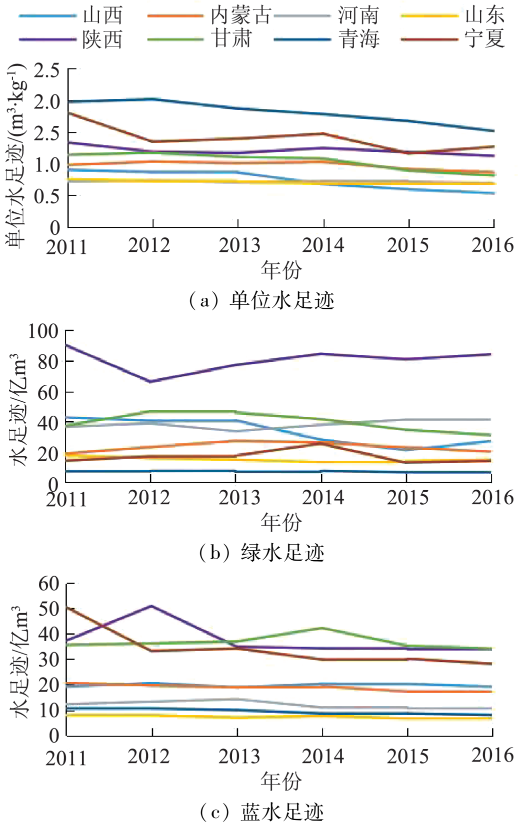


图 2　各省区水足迹变化趋势

Fig. 2　Changing trends of water footprints in different provinces

2.2　黄河流域粮食虚拟水流动格局分析

将黄河流域视为一个整体，国内其他省区看作一个整体，分析 2011—2016 年黄河流域粮食贸易伴生的虚拟水流动格局。鉴于黄河流域稻谷的消费量逐年上升，且该区域稻谷生产量较小，为稻谷的净输入区，本文在粮食虚拟水流动分析过程中将稻谷贸易量及其虚拟水流动单列出来。图 3 给出了 2011—2016 年黄河流域粮食贸易的输入和输出格局，正值表示向外区域输出，负值表示从外区域输入。

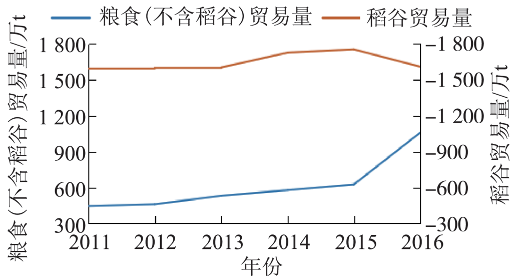


图 3　粮食贸易输入和输出格局变化趋势

Fig. 3　Changing trends of grain trade patterns

从图 3 可以看出，粮食(不含稻谷)的贸易呈向外输送态势，贸易量逐年增长，从 2011 年的 450.1 万 t 增长到 2016 年的 1 064.6 万 t，年均增幅为 23%；稻谷的贸易呈向内买入态势，买入量总体呈增长趋势，从 2011 年的 1 595.2 万 t 增长到 2016 年的 1 610.9 万 t，增幅极小(仅为 0.98%)。从全口径粮食贸易来看，黄河流域是净贸易输入地区，粮食输入量从 2011 年的 1 212.9 万 t 下降到 2016 年的 546.3 万 t。依此趋势，黄河流域未来可能会演变为粮食产销平衡区域，也有可能成为粮食输出区域，该地区在全国粮食安全保障中的作用愈发重要。

根据黄河流域粮食贸易情况，进而分析了粮食贸易伴生的虚拟水流动特点，如图 4 所示。从全口径粮食来看，黄河流域粮食贸易伴生的虚拟水呈向内输入态势，且输入量呈减小态势，从 2011 年的 110.7 亿 m³ 减小到 2016 年的 50.3 亿 m³，客观来说，黄河流域粮食虚拟水输入态势主要是由于稻谷的输入引起的。由于黄河流域水稻种植面积较少，随着城市化和人民群众膳食结构的改变，稻谷的本地生产难以满足当地需求，需要从流域外水稻主产区购买。研究结果显示，2011 年由于购买稻谷引发的虚拟水流动量为 196.9 亿 m³，2016 年降低到 161.2 亿 m³，降幅为 17.6%，主要原因是稻谷生产单位水足迹逐年降低。从其他粮食贸易伴生的虚拟水流动来看，2011 年黄河流域虚拟水流出量为 86.2 亿 m³，2016 年增长到 139.4 亿 m³，增幅达 38.1%。由此可见，除稻谷以外，其他粮食贸易输出量增大将带走黄河流域越来越多的虚拟水资源，对当地水资源系统产生一定的影响。

黄河流域各省区粮食贸易伴生的虚拟水流动空间格局如图 5。图 5(a)(b)分别表示 2011 年和 2016 年黄河流域全口径粮食贸易伴生的虚拟水流动态势。从全口径粮食虚拟水流动来看，黄河流域整体为粮食虚拟水输入区；空间分布上，内蒙古、宁夏和河南 3 省区是净输出区，其他省区为净输入区，上述结论与黄河流域各省区粮食产销功能定位是一致的。图 5(c)(d)分别表示黄河流域 2011 年和

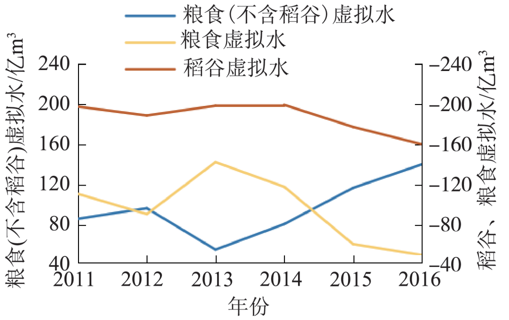
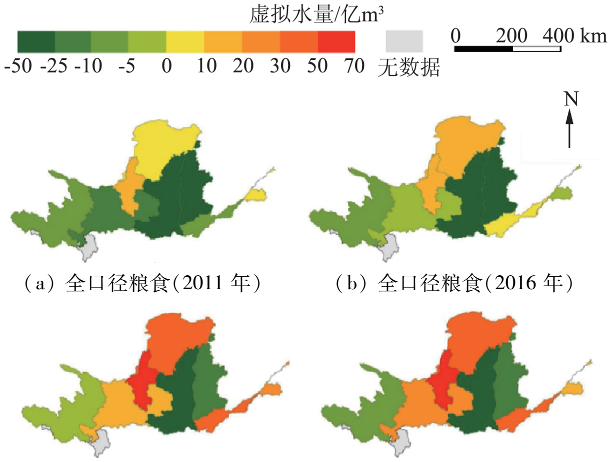


图 4 粮食贸易伴生的虚拟水流动格局变化趋势

Fig. 4 Virtual water flow associated with grain trade



(a) 全口径粮食(2011 年) (b) 全口径粮食(2016 年)

(c) 除稻谷外粮食(2011 年) (d) 除稻谷外粮食(2016 年)

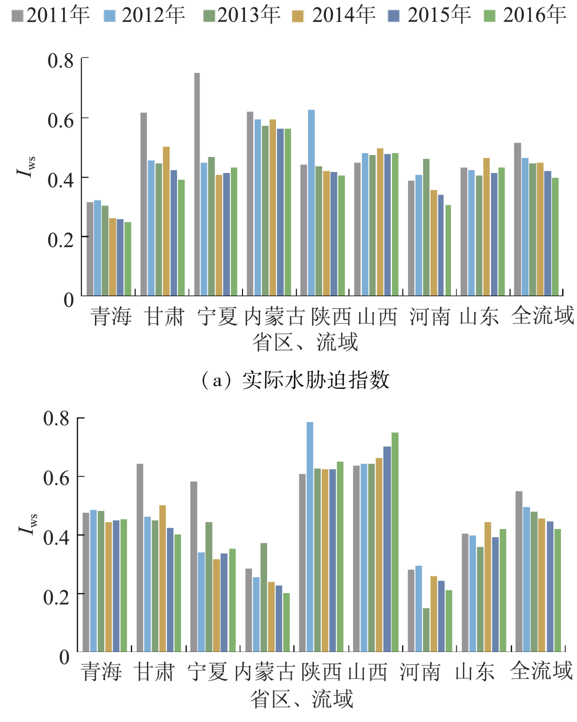
图 5 各省区粮食虚拟水流动空间格局

Fig. 5 Spatial patterns of grain virtual water flow in different provinces

2016 年除稻谷外粮食贸易伴生的虚拟水流动态势。结果显示,黄河流域是除稻谷外粮食贸易伴生的虚拟水输出区;空间分布上,甘肃、宁夏、内蒙古、河南和山东 5 省区均为粮食贸易输出区,其中以宁夏的输出量最大,达到全流域虚拟水输出量的 72%,青海、陕西和山西 3 省区是粮食贸易输入区,其中陕西粮食贸易伴生的虚拟水输入量最大。总体来看,黄河流域除稻谷以外,其余粮食需求基本可以通过本地生产满足,剩余部分可以通过贸易向域外区域销售。近年来,黄河流域粮食生产区功能进一步强化,小麦、玉米、土豆等产量持续增加,导致全流域除稻谷外粮食的虚拟水流出量显著增加。黄河流域是传统的小麦、玉米和薯类作物的优势种植区,对保障国家粮食安全具有极为重要的战略地位。

2.3 黄河流域粮食虚拟水流动影响评价

为量化黄河流域粮食贸易伴生的虚拟水流动对区域水资源系统的影响,引入 I_{ws} 和 I'_{ws},通过对比分析揭示虚拟水流动的潜在影响。图 6 反映了黄河流域和不同省区 2011—2016 年由于粮食生产和贸易引起的 I_{ws} 和 I'_{ws} 变化情况。如图 6 所示,青海、陕西和山西 3 省区的 I'_{ws} 远高于 I_{ws},说明这 3 个省区的虚拟水流动呈净流入态势,且虚拟水流入对缓解区域水资源供需矛盾具有重要作用。宁夏、内蒙古、河南 3 省区的 I_{ws} 高于 I'_{ws},说明上述地区的虚拟水流动呈净流出态势,这 3 个省区是黄河流域重要的商品粮生产基地,承担着重要的粮食生产和外供任务,加剧了当地的水资源供需矛盾。2011—2016 年,3 个省区的 I_{ws} 基本处于 0.6 以下,且呈下降趋势,属于中度水压力水平。甘肃和山东的 I_{ws} 和 I'_{ws} 相差不大,说明上述区域属于粮食的产销平衡区。



(a) 实际水胁迫指数

(b) 假设水胁迫指数

图 6 I_{ws} 和 I'_{ws} 变化趋势

Fig. 6 Changing trends of I_{ws} and I'_{ws}

黄河流域总体上 I'_{ws} 高于 I_{ws},全流域呈现粮食虚拟水净流入态势,对缓解地区水资源短缺现状具有一定的积极意义。黄河流域是小麦、玉米等粮食作物的输出区,特别是对宁夏、内蒙古、河南等粮食主产区而言,粮食贸易的不断输出对当地水资源具有显著的不利影响。随着我国“虚拟水北水南调”的格局愈加明显,黄河流域对于国家粮食安全的保障作用愈加重要,借助虚拟水流动视角可以对当前水资源供需矛盾形势有更加清晰的判断,对全流域水资源管理措施和政策制定具有积极作用。

2.4 未来黄河流域粮食生产水足迹变化预估

以 2016 年为基准年、2035 年为水平年,表 1 列出了水平年 3 种气候情景模式(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)下,黄河流域平均气温、降水量及有效降水量的预测结果。结合陈伟等[35-36]的研究成果,估算了 3 种气候情景模式下黄河流域主要作物的生育期需水量和灌溉需水量(净灌溉定额)的变化结果,如

表 1　不同气候情景下黄河流域温度、降水量和粮食作物需水量预测结果

Table 1　Estimated temperature, precipitation and crop water demands under different climate scenarios in the Yellow River Basin

年　份	平均温度/℃	降水量/mm	有效降水量/mm	需水量/mm			净灌溉定额(m^3/hm^2)		
				小麦	玉米	薯类	小麦	玉米	薯类
2016 年	10.30	479.07	226.9	610	550	520	3525	2925	2625
2035 年(RCP2.6)	10.72	485.72	249.2	623	561	530	3735	3120	2805
2035 年(RCP4.5)	10.90	496.87	272.9	630	565	535	3570	2925	2625
2035 年(RCP8.5)	11.20	510.67	301.8	637	572	540	3345	2700	2385

表 1 所示。

据已有研究统计[37],2016 年黄河流域农田有效灌溉面积为 520.9 万 hm^2(不包括流域外引黄地区灌溉面积)。根据《全国大型灌区续建配套与节水改造规划》《黄河流域水资源综合规划》《全国现代灌溉发展规划》等成果资料,预计到2035 年,全流域将新增农田有效灌溉面积 55.7 万 hm^2,其中通过节水改造和续建配套新增灌溉面积 15.7 万 hm^2,新建大中型灌区 40 万 hm^2。假定未来黄河流域各主要粮食作物的播种面积和种植结构变化不大,推求未来水平年黄河流域粮食生产的蓝水足迹、绿水足迹和总水足迹,结果如表 2 所示。

表 2　不同气候情景下黄河流域粮食生产水足迹

Table 3　Estimated grain production water footprints under different climate scenarios in the Yellow River Basin

气候情景	粮食灌溉面积/万 hm^2	粮食雨养面积/万 hm^2	蓝水足迹/亿 m^3	绿水足迹/亿 m^3	总水足迹/亿 m^3
RCP2.6	576.6	561.8	198.2	283.7	481.9
RCP4.5	576.6	561.8	187.8	310.7	498.5
RCP8.5	576.6	561.8	175.1	343.6	518.7

由表 2 可见,到 2035 年,不同气候情景下黄河流域粮食生产总水足迹为 481.9 亿 ~ 518.7 亿 m^3,与 2011—2016 年全流域粮食生产平均水足迹 434 亿 m^3 相比,呈显著增长态势。绿水足迹的增幅最大,以 RCP4.5 情景为例,2035 年全流域绿水足迹为 310.7 亿 m^3,较 2011—2016 年的平均水平增长 20%,其主要原因是随着气候变化,未来黄河流域的有效降水将增加。和绿水足迹相比,未来水平年蓝水足迹与 2011—2016 年全流域平均蓝水足迹相比变幅不大,甚至有下降趋势。据此推断,未来气候变化情景下,黄河流域粮食生产灌溉用水需求不会急剧增长。

整体而言,本文研究结果与韩昕雪琦等[9,38]的研究结果基本一致,部分省区略有出入,但整体趋势一致,可以认为本文的计算框架适用于黄河流域虚拟水足迹的计算与预测。

3　结　论

a. 2011—2016 年,全流域粮食生产总水足迹由 460.1 亿 m^3 降为 402.3 亿 m^3,呈下降趋势,其中,总蓝水足迹降幅较总绿水足迹大。相比总水足迹,全流域粮食生产单位水足迹的降幅更为显著,由 1.20 m^3/kg 降为 0.93 m^3/kg,其主要原因是单位面积的粮食产量显著提升。

b. 从粮食贸易伴生的虚拟水流动特点来看,流域全口径粮食虚拟水呈输入态势,且输入量呈减小态势,从 2011 年的 110.7 亿 m^3 减小到 2016 年的 50.3 亿 m^3。黄河流域粮食虚拟水输入主要由稻谷输入引起,除稻谷外的粮食虚拟水呈输出态势,由 82.6 亿 m^3 增加到 193.4 亿 m^3,有可能进一步加剧当地水资源矛盾;流域内宁夏、内蒙古、河南 3 省区粮食贸易伴生的虚拟水输出将进一步加剧当地的缺水问题,其他省区属于粮食贸易输入区或产销平衡区,粮食贸易在一定程度上缓解了当地用水紧张局面。

c. 预估到 2035 年(水平年),全流域不同气候情景下粮食生产总水足迹为 481.9 亿 ~ 518.7 亿 m^3,高于 2011—2016 年全流域粮食生产平均水足迹 434 亿 m^3,其中绿水足迹增幅达 20%,而蓝水足迹增长不显著,据此推断,未来气候变化情景下黄河流域粮食灌溉用水的增速可能放缓。

参考文献:

[1] 崔宁波,董晋. 主产区粮食生产安全:地位、挑战与保障路径[J]. 农业经济问题,2021(7):130-144. (CUI Ningbo, DONG Jin. Grain production security in major grain-producing areas: status, challenges and guarantee path[J]. Issues in Agricultural Economy,2021(7):130-144. (in Chinese))

[2] 徐海亚,朱会义. 基于自然地理分区的 1990—2010 年中国粮食生产格局变化[J]. 地理学报,2015,70(4):582-590. (XU Haiya, ZHU Huiyi. Spatial change of China's grain production based on geographical division of natural factors during 1990-2010[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(4):582-590. (in Chinese))

[3] 吴普特,赵西宁,操信春,等. 中国"农业北水南调虚拟工程"现状及思考[J]. 农业工程学报,2010,26(6):1-6. (WU Pute, ZHAO Xining, CAO Xinchun, et al. Status and thoughts of Chinese "agricultural north-to-south water

diversion virtual engineering"[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(6):1-6.(in Chinese))

[4] 田泽,陈柯婧,潘晶晶,等.基于突变理论方法的我国黄河流域土地生态安全评价[J].水利经济,2021,39(5):13-19.(TIAN Ze,CHEN Kejing,PAN Jingjing,et al. Evaluation of ecological security of land in the Yellow River Basin based on catastrophe theory[J]. Journal of Economics of Water Resources,2021,39(5):13-19.(in Chinese))

[5] 孙才志,靳春玉,郝帅.黄河流域水资源-能源-粮食纽带关系研究[J].人民黄河,2020,42(9):101-106.(SUN Caizhi,JIN Chunyu,HAO Shuai. Study on water-energy-food nexus relationship of the Yellow River Basin[J]. Yellow River,2020,42(9):101-106.(in Chinese))

[6] 李华贞,张强,顾西辉,等.降水与农业种植变化对黄河流域径流影响研究[J]自然资源学报,2018,33(8):1402-1415.(LI Huazhen,ZHANG Qiang,GU Xihui,et al. Quantification of fractional contributions of seasonal changes in climate and cropland to streamflow changes across the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources,2018,33(8):1402-1415.(in Chinese))

[7] 黄硕俏,吴泽宁,狄丹阳.水资源工业生产价值能值评估及空间分布[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):202-208.(HUANG Shuoqiao,WU Zening,DI Danyang. Study on emergy and spatial distribution of industrial production value of water resources[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(1):202-208.(in Chinese))

[8] 王雨,王会肖,杨雅雪,等.黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J].水利水电科技进展,2020,40(4):8-15.(WANG Yu,WANG Huixiao,YANG Yaxue,et al. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):8-15.(in Chinese))

[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,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))

[9] 赵银亮,宋华力,毛艳艳.黄河流域粮食安全及水资源保障对策研究[J].人民黄河,2011,33(11):47-49.(ZHAO Yinliang,SONG Huali,MAO Yanyan. Study on countermeasures of food security and water resources guarantee in the Yellow River Basin[J]. Yellow River,2011,33(11):47-49.(in Chinese))

[10] 方兰,李军.粮食安全视角下黄河流域生态保护与高质量发展[J].中国环境管理,2019,11(5):5-10.(FANG Lan,LI Ju. Ecological protection and high quality development of the Yellow River Basin from the perspective of food security[J]. Chinese Journal of Environmental Management,2019,11(5):5-10.(in Chinese))

[11] 杨开忠,董亚宁.黄河流域生态保护和高质量发展制约因素与对策:基于"要素-空间-时间"三维分析框架[J].水利学报,2020,51(9):1038-1047.(YANG Kaizhong,DONG Yaning. Research on restricting factors and countermeasures of ecological protection and high-quality development of Yellow River Basin:analysis based on the multi-dimensional framework of "element-space-time"[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(9):1038-1047.(in Chinese))

[12] 朱晓梅,魏加华,杨海娇,等.黄河流域城市群水资源利用效率评估及驱动因子分析[J].水资源保护,2022,38(1):153-159.(ZHU Xiaomei,WEI Jiahua,YANG Haijiao,et al. Evaluation and driving factor analysis of water resources utilization efficiency of urban agglomerations in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):153-159.(in Chinese))

[13] 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(1):69-78.(ZHAO Liangshi,LIU Sijia,SUN Caizhi. Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):69-78.(in Chinese))

[14] 王慧亮,申言霞,李卓成,等.基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J].水资源保护,2020,36(6):12-17.(WANG Huiliang,SHEN Yanxia,LI Zhuocheng,et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):12-17.(in Chinese))

[15] GAO Xuerui,SUN Miao,ZHAO Yong,et al. The cognitive framework of the interaction between the physical and virtual water and the strategies for sustainable coupling management[J]. Sustainability,2019,11:2567.

[16] 安婷莉,韩昕雪琦,高学睿,等.虚拟水理论发展及应用前景综述[J].南水北调与水利科技,2020,18(2):44-61.(AN Tingli,HAN Xinxueqi,GAO Xuerui,et al. A review of the development and application prospect of virtual water theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(2):44-61.(in Chinese))

[17] 吴普特.实体水-虚拟水统筹管理保障国家粮食安全[J].灌溉排水学报,2020,39(7):1-6.(WU Pute. Integrative management of physical water and virtual water to ensure national food security[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2020,39(7):1-6.(in Chinese))

[18] LIN Lixing,GAO Xuerui,ZHAO Yong,et al. Evaluation of the water consumption of animal products and the virtual

water flow pattern associated with interprovincial trade in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 328:129599.
[19] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade[C]//Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Delft:UNESCO-IHE,2003.
[20] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalization of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change, 2005, 15 (1):45-56.
[21] XU Zhao, 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,2015,112(4):1031-1035.
[22] 杨志峰,支援,尹心安.虚拟水研究进展[J].水利水电科技进展,2015,35(5):181-190.(YANG Zhifeng, ZHI Yuan, YIN Xinan. Research advances in virtual water [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):181-190.(in Chinese))
[23] 周帅,王义民,畅建霞,等.黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J].水利学报,2019,50(10):1231-1241.(ZHOU Shuai, WANG Yiming, CHANG Jianxia, et al. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(10):1231-1241.(in Chinese))
[24] 水利部黄河水利委员会.黄河水资源公报 2015[M].郑州:黄河水利出版社, 2016.
[25] 赵银亮,宋华力,毛艳艳.黄河流域粮食安全及水资源保障对策研究[J].人民黄河,2011,33(11):47-49.(ZHAO Yinliang, SONG Huali, MAO Yanyan. Study on countermeasures of food security and water resources guarantee in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2011,33(11):47-49.(in Chinese))
[26] 吴普特,王玉宝,赵西宁.2010 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
[27] PETRA D, STEFAN S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research,2002, 38(4):1-8.
[28] 张乐昕,丛振涛.基于 FAO-Blaney-Criddle 方法的河套灌区参考作物蒸散发量估算[J].农业工程学报,2016, 32(16): 95-101. (ZHANG Lexin, CONG Zhentao. Calculation of reference evapotranspiration based on FAO-Blaney-Criddle method in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(16):95-101.(in Chinese))
[29] 汪志农.灌溉排水工程学[M].北京:中国农业出版社,2000.
[30] 杨盼,梁伟,严建武,等.黄河流域多尺度水系统结构变化特征[J].中国沙漠,2021,41(6):223-234.(YANG Pan, LAING Wei, YAN Jianwu, et al. Multi-scale analysis of water system structure changes in the Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research,2021,41(6):223-234.(in Chinese))
[31] 张永凯,孙雪梅.黄河流域水资源利用效率测度与评价[J].水资源保护, 2021, 37(4): 37-43. (ZHANG Yongkai, SUN Xuemei. Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):37-43.(in Chinese))
[32] 王慧亮,李卓成.基于能值水生态足迹模型的黄河流域水资源利用评价[J].水资源保护,2022,38(1):147-152.(WANG Huiliang, LI Zhuocheng. Evaluation of water resources utilization in the Yellow River Basin based on emergy water ecological footprint model [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):147-152.(Chinese))
[33] 吴普特,王玉宝,赵西宁.2014 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
[34] 陈雨生,陈志敏,江一帆.农业科技进步和土地改良对我国耕地质量的影响[J].农业经济问题,2021(9):132-144.(CHEN Yusheng, CHEN Zhimin, JIANG Yifan. Effects of agricultural science and technology progress and land improvement on cultivated land quality in China[J]. Issues in Agricultural Economy, 2021 (9): 132-144. (Chinese))
[35] 陈伟,陈丽,孙从建,等.黄土高原东部主要作物需水量空间分布规律[J].水土保持研究,2020,27(5):166-171.(CHEN Wei, CHEN Li, SUN Congjian, et al. Spatial distribution of water requirements for different crops in North Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(5):166-171.(in Chinese))
[36] 陆静,朱文哲,高志永.陕北黄土丘陵区主要作物需水与降水耦合分析[J].节水灌溉,2019(12):72-76.(LU Jing, ZHU Wenzhe, GAO Zhiyong. Analysis of coupling degree between water demand of main crops and rainfall in loess hilly region of Northern Shaanxi[J]. Water Saving Irrigation,2019(12):72-76.(in Chinese))
[37] 蒋桂芹,王煜,靖娟.黄河流域最小保有灌溉需水量预测[J].人民黄河, 2017, 39(11): 30-33. (JIANG Guiqin, WANG Yu, JING Juan. Minimum irrigation water requirement for food security in the Yellow River Basin [J]. Yellow River,2017,39(11):30-33.(in Chinese))
[38] 卓拉,栗萌,吴普特,等.黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动时空演变与驱动力分析[J].水利学报,2020,51(9): 1059-1069.(ZHUO La, LI Meng, WU Pute, et al. Assessment of crop related physical-virtual water coupling flows and driving forces in Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (9):1059-1069.(in Chinese))

(收稿日期:2021-12-27　编辑:施业)