

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.031

黄河流域小麦生产水足迹量化与评价

卓拉^{1,2} 王伟³ 冯变变³ 谢朋轩³ 高学睿^{1,2} 吴普特^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为准确评价区域不同时空尺度作物生产耗水量及耗水效率的动态变化及其分布规律,以黄河流域典型年为例,基于作物水分生产力模型 AquaCrop,考虑不同供水和灌溉方式,在5'空间尺度对流域内小麦生产水足迹进行了量化与评价。结果表明:流域小麦水足迹总量和单位生产水足迹年均值分别为 $2.19 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $1.22 \text{ m}^3/\text{kg}$,蓝水足迹占65%,单位生产水足迹呈现上游向下游递减的趋势。传统地面灌农田小麦生产蓝、绿水足迹量分别为流域总量的92%和50%。流域灌溉条件下小麦生产水足迹($1.40 \text{ m}^3/\text{kg}$)高于雨养条件($1.12 \text{ m}^3/\text{kg}$);灌溉方式对小麦生产水足迹影响显著,其中微灌仅为 $1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$,喷灌条件下高达 $2.07 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。供水与灌溉方式对区域农作物生产水足迹的影响不可忽略,考虑不同供水与灌溉方式的作物生产水足迹量化与评价将成为农业水资源高效利用的重要基础。研究结果可为不同时空尺度农作物水足迹核算和区域农业节水策略制定提供参考。

关键词: 小麦生产水足迹; 灌溉方式; 空间分布; 农业高效用水

中图分类号: S162.5⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)09-0264-08

Water Footprint Accounting and Evaluation for Wheat Production in Yellow River Basin

ZHUO La^{1,2} WANG Wei³ FENG Bianbian³ XIE Pengxuan³ GAO Xuerui^{1,2} WU Pute^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the dynamic changes and distribution in water consumption quantity and efficiency of crop production at different spatial and temporal scales in a region, the AquaCrop model was applied at 5' spatial resolution to estimate the blue and green water footprints (WFs) of wheat production in three typical hydrological typical years in Yellow River Basin (YRB). Irrigated and rainfed wheat were identified. Results showed that the annual average total WF and per-unit-product WF of wheat in YRB were $2.19 \times 10^{10} \text{ m}^3$ and $1.22 \text{ m}^3/\text{kg}$, respectively. Blue WF accounted for 65% of the per-unit-product WF of wheat. The wheat WF was decreased from the upper reach to the lower reach in YRB. Traditional surface irrigation dominated the total blue WF and total green WF of wheat by occupying 92% and 50% of basin's total amount, respectively. The WF under irrigated condition was $1.40 \text{ m}^3/\text{kg}$, which was higher than that under rain-fed condition of $1.12 \text{ m}^3/\text{kg}$. The WF of wheat production in YRB was affected by irrigation methods. The basin average WF under micro irrigation was only $1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$, while that of sprinkler irrigation was up to $2.07 \text{ m}^3/\text{kg}$. The result indicated that the effects of different water supply and irrigation methods on large-scale WF accounting can not be ignored. The quantification and evaluation of crop WF distinguishing different water supply

收稿日期: 2019-05-22 修回日期: 2019-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809215)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ4020)和教育部直属高校基本科研业务费项目(2452017181)

作者简介: 卓拉(1988—),女,研究员,主要从事区域农业高效用水研究,E-mail: zhuola@nwfufu.edu.cn

通信作者: 吴普特(1963—),男,教授,主要从事区域农业高效用水研究,E-mail: gjzwp@vip.sina.com

and irrigation methods could be an important foundation for efficient utilization of agricultural water resources. The results can provide reference for WF accounting and regional agricultural water saving strategy formulated for different temporal and spatial scales.

Key words: water footprint of wheat production; irrigation techniques; spatial distribution; high-efficient water usage in agriculture

0 引言

水资源供需矛盾突出、时空分布不均、用水效率时空差异大是我国农业水资源高效利用与管理的重要瓶颈^[1-3]。作物生产耗水的时空变异性取决于作物、气象、土壤等自然因素以及种植类型、灌溉技术等人为因素^[4]。量化区域不同时空尺度作物生产耗水量及耗水效率的动态变化及其分布规律是农业水资源高效利用与需水管理的核心内容。

为全面度量人类活动对水资源的影响,荷兰学者 HOEKSTRA^[5] 提出水足迹 (Water footprint, WF) 概念。作物生产水足迹,指一定时间、一定地理范围内作物生产过程中产生的水资源消耗量和污染量,可分为蓝水足迹、绿水足迹与灰水足迹^[6]。蓝水足迹指地表水和地下水 (灌溉水) 的消耗,绿水足迹指降雨的消耗^[7]。与传统作物用水评价指标作物水分生产力相比,作物生产水足迹区分考虑作物生长阶段对广义水资源 (蓝水与绿水) 消耗强度,为水资源管理提供了新视角^[8-9]。以 HOEKSTRA 等^[10] 建立的水足迹标准计算方法框架为基础,国际上通过将地理信息系统 (GIS) 技术与作物水分模型、水文统计数据相结合,已经实现栅格尺度高空间分辨率的作物生产水足迹量化。CHUKALLA 等^[11] 基于国际粮农组织 (FAO) 作物水分生产力模型 AquaCrop, 针对以色列、西班牙、意大利与英国特定区域内不同灌溉方式下小麦、玉米与马铃薯生产水足迹进行了评价,发现当灌溉方式从传统地面灌转为滴灌时,作物蓝水足迹与绿水足迹之和平均减少 8% ~ 10%, 灌溉方式差异显著影响区域作物生产水足迹强度和时空分布。近年来,诸多学者对我国作物生产水足迹进行了研究。LIU 等^[12] 的研究指出处于干旱半干旱地区的黄河流域是全球作物生产水足迹中蓝水占比最高的流域之一。CAO 等^[13] 通过引入输配过程的水损失,同时区分雨养和灌溉两种供水方式,对我国小麦生产水足迹进行了核算,揭示了其时空变异性。然而,对于灌溉这一人工主导过程,已有研究常假设灌溉水等于净灌溉需水量,尚未考虑不同灌溉方式对作物生产水足迹的影响。

黄河流域 3/4 的面积地处干旱半干旱地区,流域水资源量仅占全国 2%,却承担着全国 13% 的粮

食生产任务,是我国农业生产与灌溉用水矛盾最为突出的流域。本研究利用 FAO 作物水分生产力模型 AquaCrop,在 5' × 5' (约为 7.4 km × 9.3 km) 栅格尺度作物生产水足迹计算框架内引入灌溉方式模块,对黄河流域种植最广的粮食作物小麦^[14-16] 的生产水足迹进行量化与评价,分析小麦生产水足迹空间分布规律,明晰不同供水方式 (灌溉和雨养) 和灌溉方式 (传统地面灌、喷灌和微灌) 对作物生产水足迹核算的影响,以期为农作物水足迹量化及在农业节水中应用的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究方法

本研究基于 AquaCrop 模型^[17-19] 的栅格尺度作物生产水足迹计算方法框架^[20],通过引入灌溉方式模块,对不同降雨典型年黄河流域不同供水方式和灌溉方式下小麦生产水足迹进行量化。黄河流域被划分为上游、中游、下游 3 个片区,如图 1 所示,上游区域从源头到内蒙古自治区河口镇,河口镇到河南省郑州市桃花峪为中游部分,自桃花峪至渤海为流域下游^[21]。AquaCrop 是由 FAO 开发的作物水分生产力模型,该模型在精度、模型复杂性和稳定性之间寻求平衡,同时实现对作物不同灌溉方式、播种日期和气候变化条件下产量的模拟^[18],已被广泛应用于作物耗水量及耗水类型的模拟与评价^[22-24]。

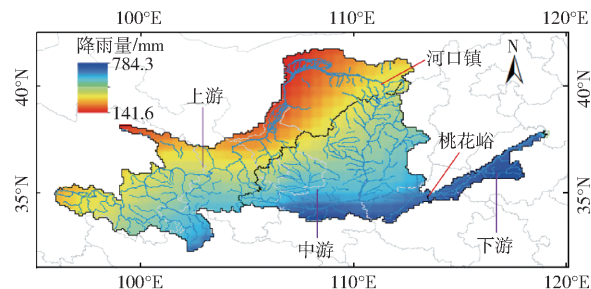


图 1 研究区域

Fig. 1 Map of Yellow River Basin

1.1.1 作物生产水足迹量化

单位产量作物生产蓝水足迹和绿水足迹,分别由单位产量作物生育期腾发量 (ET) 中蓝水量和绿水量表示^[10]。作物生长期日步长 ET 以及作物单产 $Y(\text{kg}/\text{hm}^2)$ 由 AquaCrop 模型模拟得出,对产量模拟值进行栅格所在省域单产统计值校核。AquaCrop

通过追踪根区水分流入量和流出量来模拟土壤水分动态平衡,为

$$S_t = S_{t-1} + P_t + I_t + C_t - ET_t - R_t - D_t \quad (1)$$

式中 S_t ——作物生长期第 t 天末土壤含水量,mm

P_t ——第 t 天的降雨量,mm

I_t ——第 t 天的灌溉水量,mm

C_t ——第 t 天的地下水毛细上升量,mm

ET_t ——第 t 天的作物腾发量,mm

R_t ——第 t 天由降雨及灌溉产生的地表径流量,mm

D_t ——第 t 天土壤的深层渗漏量,mm

依据 ZHUO 等^[25] 和 CHUKALLA 等^[11] 基于 AquaCrop 模型提出的作物根区土壤水分平衡关系:作物生长期初始土壤水设为绿水,生育期内灌溉与降雨分别是蓝水足迹与绿水足迹来源,追踪逐日灌溉量与降雨量对土壤水分平衡各要素的贡献比例,分别得到相应蓝、绿水腾发量 ET_{b_t} 与 ET_{g_t} ,进而得到作物生产蓝、绿水足迹

$$S_{b_t} = S_{b_{t-1}} + (P_t + I_t - R_t) \frac{I_t}{P_t + I_t} - (D_t + ET_t) \frac{S_{b_{t-1}}}{S_{t-1}} \quad (2)$$

$$S_{g_t} = S_{g_{t-1}} + (P_t + I_t - R_t) \frac{P_t}{P_t + I_t} - (D_t + ET_t) \frac{S_{g_{t-1}}}{S_{t-1}} \quad (3)$$

式中 S_{b_t} 、 S_{g_t} ——每日土壤中蓝水量和绿水量,mm

作物生长期土壤水分要素中,每日地表径流中蓝水与绿水的构成由当日灌溉与降雨的比例所决定;每日 ET 与土壤水深层渗漏中蓝、绿水的占比等于前一日结束时土壤中蓝、绿水所占比例。

1.1.2 灌溉方式模块

基于 AquaCrop 模型的栅格尺度作物生产水足迹计算方法框架,以表层土壤湿润率(Fraction of soil surface wetted, %)为表征参数,分别创建针对传统地面灌(表层土壤湿润率为 80%)、喷灌(100%)和微灌(40%)3 种灌溉方式的标准化输入文件;基于栅格所在省级行政区灌溉方式应用比例,量化不同灌溉方式实施分布权重系数,得到相应灌溉方式下

田间小麦生产蓝、绿水足迹

$$W_{F_b} = \frac{\sum_{i=1}^3 \left(10 \sum_{t=1}^{g_p} ET_{b,t} w_i \right)}{\sum_{i=1}^3 (Y_i w_i)} \quad (4)$$

$$W_{F_g} = \frac{\sum_{i=1}^3 \left(10 \sum_{t=1}^{g_p} ET_{g,t} w_i \right)}{\sum_{i=1}^3 (Y_i w_i)} \quad (5)$$

式中 W_{F_b} 、 W_{F_g} ——田间灌溉作物生产蓝水足迹与绿水足迹, m^3/kg

i ——灌溉方式, i 为 1、2、3 依次代表传统地面灌、微灌和喷灌

$ET_{b,t}$ 、 $ET_{g,t}$ ——实施灌溉方式 i 条件下作物生长期第 t 天蓝水和绿水蒸发蒸腾量,mm

Y_i ——灌溉方式 i 下的作物单产, kg/hm^2

w_i ——灌溉方式 i 在空间单元的应用面积比例, %

g_p ——作物生育期时间, d

每一栅格中各灌溉方式施用面积所占份额与其所在省份各灌溉方式下灌溉面积占全省有效灌溉面积的比例一致。

1.2 数据来源

选取 2005 年(枯水年)、2009 年(丰水年)和 2013 年(平水年)为黄河流域小麦水足迹的分析年。黄河流域小麦有效灌溉面积和各灌溉方式灌溉面积等农业生产数据来源于《中国农业机械工业年鉴》^[26];流域各省区小麦播种面积和产量数据来源于国家统计局“国家数据”数据库^[16];月平均降雨量、日平均最高温度和日平均最低温度等 AquaCrop 模型所需气象数据源于 CRU-TS3.10 数据库^[27];大气 CO_2 浓度数据源于美国夏威夷冒纳罗亚观测站(<https://www.esrl.noaa.gov/>);黄河流域土壤类型和含水量数据分别来自 ISRIC 土壤地形数据库^[28],小麦生育期关键作物参数见表 1;黄河流域上、中、下游 3 个片区降雨典型年不同灌溉方式下小麦的播种面积见表 2。

表 1 小麦生育期主要参数

Tab.1 Crop characteristics for wheat in current study

作物	播种日期	生育期/d				收获指数/ %	最大根深/m	
		前期	发育期	中期	后期		雨养	灌溉
冬小麦	10月15日	30	140	40	30	40	1.8	1.5
春小麦	3月15日	20	25	60	30	39	1.5	1.0

注:作物播种日期来自文献[29];收获指数来自文献[30-31];作物生育期分段方法和最大根深依据国际粮农组织 FAO 56 号文件^[32]及文献[33]。

表2 黄河流域小麦播种面积及各灌溉方式面积分布

Tab.2 Harvested area of wheat and occupations by irrigation methods in Yellow River Basin

年份	片区	播种面积/hm ²	灌溉占比/%	传统地面灌面积/hm ²	微灌面积/hm ²	喷灌面积/hm ²
2005(枯水年)	上游	8.357 0 × 10 ⁵	71	5.435 0 × 10 ⁵	7.2	4.49 × 10 ⁴
	中游	2.481 5 × 10 ⁶	62	1.414 8 × 10 ⁶	20.5	9.09 × 10 ⁴
	下游	1.069 6 × 10 ⁶	81	8.360 0 × 10 ⁵	5.0	2.49 × 10 ⁴
2009(丰水年)	上游	8.173 0 × 10 ⁵	72	5.325 0 × 10 ⁵	7.8	4.87 × 10 ⁴
	中游	2.442 9 × 10 ⁶	62	1.412 9 × 10 ⁶	21.2	8.03 × 10 ⁴
	下游	1.146 7 × 10 ⁶	80	8.833 0 × 10 ⁵	5.9	2.49 × 10 ⁴
2013(平水年)	上游	7.274 0 × 10 ⁵	74	4.439 0 × 10 ⁵	47.8	4.33 × 10 ⁴
	中游	2.313 0 × 10 ⁶	62	1.356 8 × 10 ⁶	30.0	4.48 × 10 ⁴
	下游	1.180 1 × 10 ⁶	77	8.660 0 × 10 ⁵	11.1	2.64 × 10 ⁴
典型年平均	上游	7.935 0 × 10 ⁵	72	5.066 0 × 10 ⁵	20.9	4.56 × 10 ⁴
	中游	2.412 5 × 10 ⁶	62	1.394 8 × 10 ⁶	23.9	7.20 × 10 ⁴
	下游	1.132 1 × 10 ⁶	79	8.618 0 × 10 ⁵	7.3	2.54 × 10 ⁴

2 结果与分析

2.1 黄河流域小麦生产总水足迹构成

图2为典型年黄河流域小麦生产总水足迹构成。黄河流域小麦生产总水足迹年均值为 $2.19 \times 10^{10} \text{ m}^3$,各典型年间不同灌溉方式的贡献比例基本保持稳定。传统地面灌的蓝水和绿水足迹在全流域小麦生产总水足迹中都占较大比例,分别为92%和50%。而微灌在蓝水和绿水中的贡献比例仅分别为2%和1%。表3列出了黄河流域典型年各片区小麦生产总水足迹。各片区间,中游小麦生产总水足迹要远高于上游和下游。中游小麦生产总水足迹的年均值为 $1.16 \times 10^{10} \text{ m}^3$,占流域总量的53%(表3)。

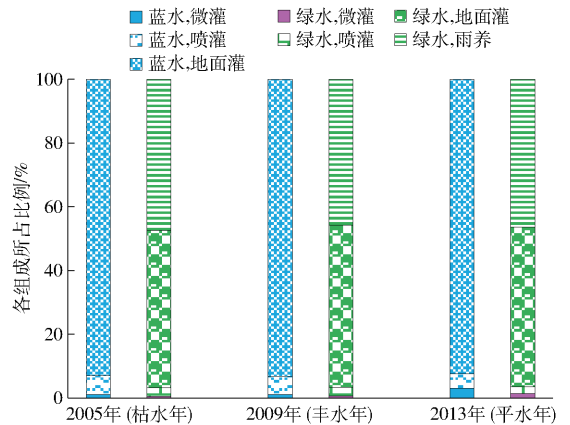


图2 典型年黄河流域小麦生产总水足迹构成

Fig.2 Composition of total water footprint of wheat production in every typical year in Yellow River Basin

表3 黄河流域典型年各片区小麦生产总水足迹

Tab.3 Total water footprint of wheat production in different reaches in Yellow River Basin

年份	片区	传统地面灌		微灌		喷灌		雨养
		总蓝水足迹	总绿水足迹	总蓝水足迹	总绿水足迹	总蓝水足迹	总绿水足迹	总绿水足迹
2005(枯水年)	上游	2.36×10^9	8.33×10^8	2.80×10^7	9.00×10^6	2.29×10^8	7.30×10^7	7.97×10^8
	中游	5.32×10^9	2.85×10^9	7.50×10^7	3.60×10^7	3.85×10^8	1.73×10^8	3.57×10^9
	下游	3.67×10^9	1.63×10^9	2.1×10^7	8.00×10^6	1.15×10^8	4.80×10^7	7.39×10^8
2009(丰水年)	上游	2.18×10^9	8.76×10^8	2.60×10^7	1.10×10^7	2.37×10^8	8.60×10^7	7.80×10^8
	中游	4.32×10^9	2.99×10^9	6.10×10^7	4.20×10^7	2.72×10^8	1.68×10^8	3.55×10^9
	下游	3.27×10^9	1.88×10^9	2.00×10^7	1.10×10^7	9.70×10^7	5.30×10^7	8.35×10^8
2013(平水年)	上游	1.68×10^9	7.44×10^8	1.83×10^8	7.30×10^7	1.95×10^8	7.80×10^7	6.41×10^8
	中游	4.31×10^9	2.83×10^9	8.00×10^7	5.80×10^7	1.57×10^8	9.20×10^7	3.42×10^9
	下游	3.52×10^9	1.82×10^9	4.30×10^7	2.10×10^7	1.14×10^8	5.50×10^7	9.39×10^8
典型年平均	上游	2.07×10^9	8.18×10^8	7.90×10^7	3.10×10^7	2.20×10^8	7.90×10^7	7.39×10^8
	中游	4.65×10^9	2.89×10^9	7.20×10^7	4.60×10^7	2.71×10^8	1.45×10^8	3.15×10^9
	下游	3.49×10^9	1.78×10^9	2.80×10^7	1.30×10^7	1.09×10^8	5.20×10^7	8.38×10^8

小麦生产总水足迹在灌溉方式间及各片区间所表现出的差异主要归因于小麦播种面积的空间分布,即中游播种面积最大,占到总播种面积的56%,小麦生产总水足迹最高。排除各片

区小麦种植面积的作用,以节水灌溉面积(微灌)占作物灌溉面积的比例进行分析,上游分别为中游和下游的2倍和4倍,节水灌溉工程在偏干旱的上游地区发展现状要优于中下游地区。

在相同播种面积条件下,节水灌溉面积占比越高,小麦生产总水足迹越低。就整个流域灌溉农业的发展而言,通过推广节水灌溉提高区域农业用水效率和降低作物生产水足迹总量仍具有较大潜力。

2.2 黄河流域小麦生产水足迹空间分布

图3为黄河流域小麦生产水足迹空间分布状况。黄河流域小麦生产水足迹年均值为 $1.22 \text{ m}^3/\text{kg}$,其中蓝水占65%。不同降雨典型年间,枯水年小麦生产水足迹最大($1.36 \text{ m}^3/\text{kg}$),丰水年($1.19 \text{ m}^3/\text{kg}$)和平水年($1.12 \text{ m}^3/\text{kg}$)较小。图3显示,流域小麦生

产水足迹在不同典型年空间差异明显,整体呈现从上游向下游递减趋势,上游、中游及下游小麦生产水足迹的年均值分别为 1.66 、 1.28 、 $0.96 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。小麦生产水足迹空间差异主要原因为:内蒙古、宁夏和甘肃等地降雨少蒸散量大,导致这些地区小麦单产水平过低,故水足迹较大;青海等地多种植春小麦,生育期短耗水量较少,因而水足迹偏小;下游河南和山东等地小麦生产水足迹较小的原因是单产水平较高。流域小麦生产水足迹强度差异主要体现在上中游地区,这是由不同典型年降雨量在这一区域变化显著所造成的。

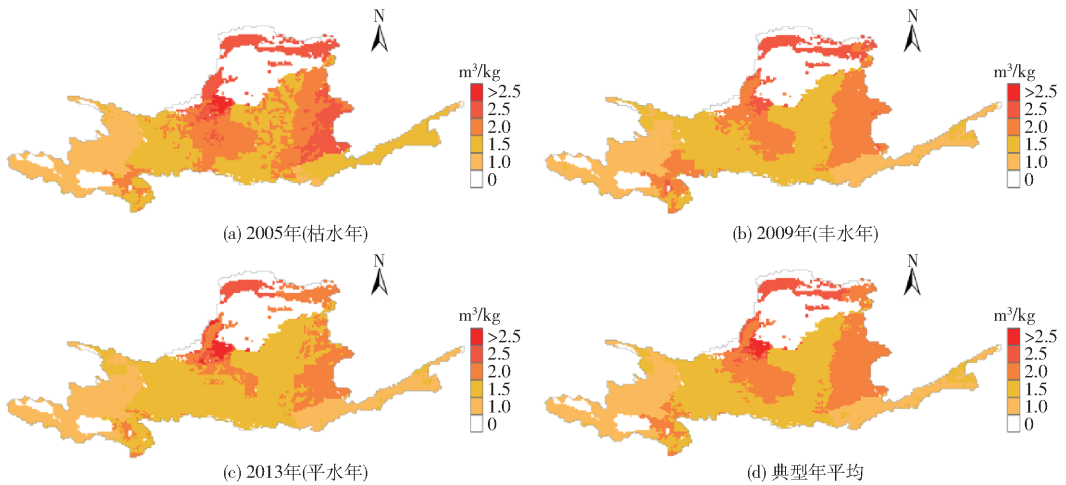


图3 黄河流域小麦生产水足迹空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of water footprint in wheat production in Yellow River Basin

图4为黄河流域小麦生产蓝水足迹占比分布图。由图4可知,全流域小麦生产蓝水足迹占比处于较高水平。流域内蓝水足迹比重较大地区集中在上游宁蒙平原灌区,达70%以上;其次是中游的伊洛沁河和汾渭盆地灌区;下游的黄淮海引黄灌区,蓝水足迹占比亦维持在60%以上。不同降雨典型年间,各分片区蓝水足迹占比随降雨差异产生波动。枯水年(图4a)全流域表现出高生产水足迹、高蓝水

足迹占比的特点。丰水年(图4b)充沛降雨条件下,流域中游地区蓝水足迹占比最低。平水年(图4c)黄河及其主要支流(渭河、汾河、伊洛河等)沿岸蓝水足迹占比偏高。全流域普遍偏高的蓝水足迹,一方面是因为上中游地区降雨较少故需实施大规模灌溉,另一方面是下游较高的土壤蒸发量也要求该地区要有足够的灌溉保证率,这同LIU等^[12]得出的黄河流域是全球作物蓝水足迹比重最高的流域之一的

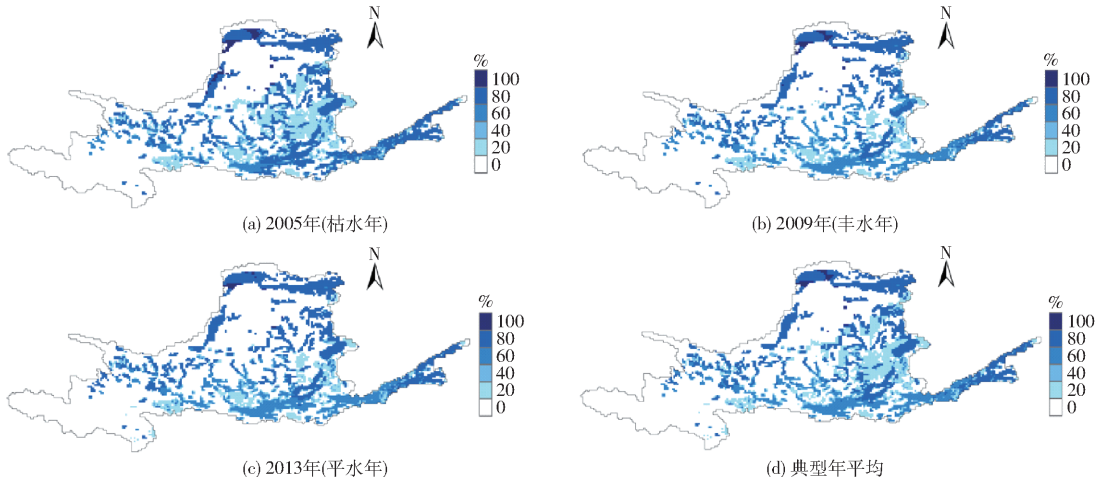


图4 黄河流域小麦生产蓝水足迹占比分布

Fig. 4 Weight distribution of blue water footprint in total for wheat production in Yellow River Basin

研究结果一致。

2.3 不同灌溉方式下的小麦生产水足迹

图5和表4分别为典型年黄河流域及其各片区不同供水方式和灌溉方式下小麦生产水足迹分布。对比不同供水方式和灌溉方式下小麦生产水足迹发现,传统地面灌最低,为1.20 m³/kg,微灌和喷灌小麦生产水足迹差异较小,分别为1.40、1.50 m³/kg。流域灌溉农田小麦生产水足迹(1.40 m³/kg)均值高于雨养农田(1.12 m³/kg)。片区间不同供水方式和灌溉方式间小麦生产水足迹也呈现差异,以节水灌溉面积占比最大的上游为例,微灌小麦生产水足迹最低,为1.67 m³/kg,蓝水足迹占比71.8%;传统地面灌为1.76 m³/kg和71.7%,喷灌为2.07 m³/kg和73.6%。

全流域与各片区间小麦生产水足迹产生差异的主要原因在于流域上中游地区传统地面灌面积占流域总播种面积的68%,且流域内超过86%的微灌种植聚集于此,在上游地区单产(3.2 t/hm²)水平显著

低于流域平均水平(4.2 t/hm²)的前提下,导致全流域水足迹加权结果向下游播种面积更广的传统地面灌种植倾斜。这说明在同一空间尺度,微灌与传统地面灌和喷灌相比,用水效率更高,降低作物生产水足迹的效果更明显。

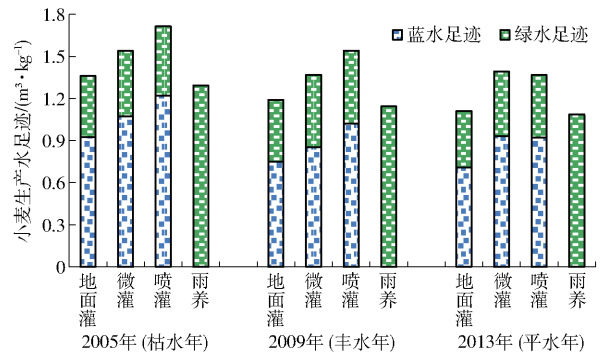


图5 黄河流域降雨典型年不同供水方式和灌溉方式下小麦生产水足迹

Fig. 5 Water footprint of wheat production under different irrigation methods in typical years in Yellow River Basin

表4 黄河流域降雨典型年不同供水方式和灌溉方式片区尺度平均小麦生产水足迹

Tab. 4 Water footprint of wheat production in different reaches of Yellow River Basin

年份	片区	传统地面灌			微灌			喷灌			雨养	
		水足迹/ (m ³ ·kg ⁻¹)	蓝水足迹 占比/%	单产/ (t·hm ⁻²)	水足迹/ (m ³ ·kg ⁻¹)	蓝水足迹 占比/%	单产/ (t·hm ⁻²)	水足迹/ (m ³ ·kg ⁻¹)	蓝水足迹 占比/%	单产/ (t·hm ⁻²)	水足迹/ (m ³ ·kg ⁻¹)	单产/ (t·hm ⁻²)
2005(枯水年)	上游	1.87	73.9	3.15	1.69	75.2	3.13	2.16	75.8	3.11	1.30	2.56
	中游	1.45	65.1	3.98	1.69	67.2	3.19	1.79	69.0	3.42	1.36	2.76
	下游	1.08	69.2	5.88	1.05	71.7	5.56	1.12	70.3	5.87	1.05	3.46
2009(丰水年)	上游	1.73	71.3	3.32	1.52	69.9	3.13	2.05	73.3	3.23	1.29	2.64
	中游	1.27	59.0	4.08	1.54	59.0	3.18	1.56	61.7	3.50	1.20	3.19
	下游	0.94	63.5	6.23	0.93	64.4	5.84	0.97	64.7	6.21	0.88	4.07
2013(平水年)	上游	1.68	69.3	3.26	1.70	71.6	3.16	1.98	71.4	3.18	1.19	2.80
	中游	1.18	60.4	4.47	1.29	57.9	3.56	1.32	62.9	4.22	1.13	3.44
	下游	0.91	65.9	6.81	0.90	67.7	6.43	0.95	67.3	6.79	0.91	3.75
典型年平均	上游	1.76	71.7	3.24	1.67	71.8	3.15	2.07	73.6	3.17	1.26	2.66
	中游	1.30	61.7	4.17	1.47	61.2	3.35	1.60	65.2	3.62	1.22	3.12
	下游	0.97	66.3	6.31	0.94	67.7	6.07	1.01	67.5	6.30	0.93	3.77

将作物腾发量进一步分为无效蓝绿水蒸发与有效蓝绿水蒸腾。图6为不同供水方式和灌溉方式下小麦腾发量组成。由图6可知,不同供水方式下小麦生育期耗水量和耗水类型存在明显区别。微灌方式下于生育期总腾发量最低,年均值为519 mm;传统地面灌和喷灌方式下偏高,分别为560、576 mm;雨养模式下的绿水蒸腾量为415 mm。不同供水方式及灌溉方式下有效蓝绿水蒸腾量均大于无效蓝绿水蒸发量,其中微灌方式下有效蒸腾量占到作物总耗水的91%,在传统地面灌、喷灌和雨养中分别为84%、80%和85%。至于机会成本更高的蓝水,特别是蓝水无效蒸发量,喷灌最大,为51 mm;其次是传统地面灌的42 mm;最低为微灌的22 mm。此外,灌溉方式间蓝水无效蒸发量相对大小不随年降雨量

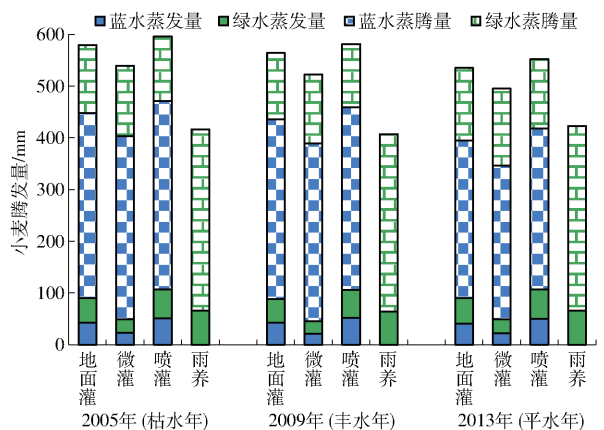


图6 不同供水方式和灌溉方式下小麦腾发量组成

Fig. 6 Composition of evapotranspiration in wheat production under different irrigation methods

变化,而主要取决于不同灌溉方式下土壤表层湿润率的差异。

不同灌溉方式下小麦生产水足迹量化结果表明,喷灌小麦生育期腾发量和生产水足迹最大。传统意义上的节水灌溉是从用水角度出发,通过提升灌溉效率减少输水损失来降低用水需求^[34]。而作物生产水足迹是从耗水角度展开,衡量作物生长的实际耗水,未考虑因深层渗漏而造成的回归水量^[10],这一观点的合理性也被 GRAFTON 等^[35]提出的“节水灌溉悖论”所证实:喷灌同传统地面灌相比,用水量虽然减少,但土壤表层湿润率更大,去除回归水量影响后,喷灌耗水更多。这同 CHUKALLA 等^[11]针对以色列、西班牙、意大利和英国主要作物的研究结果一致。此外,流域灌溉小麦生产水足迹高于雨养,因为同等环境下,雨养小麦生育期耗水量比灌溉小麦平均低 25%,单位产量比灌溉小麦低

22%。

3 结束语

以黄河流域典型年小麦生产水足迹量化与评价为研究案例,揭示大区域尺度不同供水方式与灌溉方式对作物生产水足迹的影响不可忽略。流域小麦生产水足迹年均值为 1.22 m³/kg,蓝水足迹占 65%,呈现出从上游向下游递减趋势;黄河流域灌溉小麦生产水足迹普遍大于雨养;不同灌水方式下,以节水灌溉面积占比最大的上游为例,微灌小麦生产水足迹最低,为 1.67 m³/kg,蓝水足迹占比 71.8%;传统地面灌为 1.76 m³/kg 和 71.7%,喷灌为 2.07 m³/kg 和 73.6%。流域中游地区作为小麦主要种植区域,小麦生产总水足迹占全流域 53% 以上;传统地面灌在流域小麦生产总蓝水足迹及总绿水足迹中都占较大比例,分别为 92% 和 50%。

参 考 文 献

- [1] 操信春,任杰,吴梦洋,等. 基于水足迹的中国农业用水效果评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 1-8.
CAO Xinchun, REN Jie, WU Mengyang, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 1-8. (in Chinese)
- [2] 吴普特. “北水南调工程”的警示与应对策略[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 121-123.
WU Pute. Warning and strategy of North-to-South Water Transfer Project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 121-123. (in Chinese)
- [3] CAO X, WU M, GUO X, et al. Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 587-597.
- [4] 许迪,刘钰,杨大文,等. 蒸散发尺度效应与时空尺度拓展[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [5] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[M]. Delft, Netherlands: UNESCO-IHE, 2003.
- [6] HOEKSTRA A Y. The water footprint of modern consumer society[M]. London: Routledge, 2013.
- [7] 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: 1259-1276.
- [8] 吴普特,孙世坤,王玉宝,等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 651-660.
WU Pute, SUN Shikun, WANG Yubao, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 651-660. (in Chinese)
- [9] ZHUO L, HOEKSTRA A Y. The effect of different agricultural management practices on irrigation efficiency, water use efficiency and green and blue water footprint[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2017, 4(2): 185-194.
- [10] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London, UK: Earthscan, 2011.
- [11] CHUKALLA A, KROL M, HOEKSTRA A. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19: 4877-4891.
- [12] LIU J, YANG H. Spatially explicit assessment of global consumptive water uses in cropland: green and blue water[J]. Journal of Hydrology, 2010, 384(3-4): 187-197.
- [13] CAO X C, WU P T, WANG Y B, et al. Assessing blue and green water utilization in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(8): 3165-3178.
- [14] 王浩,贾仰文,王建华,等. 黄河流域水资源及其演变规律研究[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [15] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划 2012—2030 年[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2013.
- [16] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京:中国统计出版社, 2016.
- [17] HSIAO T C, HENG L, STEDUTO P, et al. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 448-459.
- [18] RAES D, STEDUTO P, HSIAO T C, et al. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 438-447.

- [19] STEDUTO P, HSIAO T C, RAES D, et al. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 426–437.
- [20] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Sensitivity and uncertainty in crop water footprint accounting: a case study for the Yellow River basin[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(6): 2219–2234.
- [21] 水利部黄河水利委员会. 黄河水资源公报 2016[M]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2016.
- [22] ABEDINPOUR M, SARANGI A, RAJPUT T B S, et al. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110: 55–66.
- [23] LQBAL M A, SHEN Y J, STRICEVIC R, et al. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 135: 61–72.
- [24] AHMADI S H, MOSALLAEPOUR E, KAMGAR-HAGHIGHI A A, et al. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(8): 2837–2853.
- [25] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y, et al. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961–2009)[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 87: 29–41.
- [26] 中国机械工业年鉴编辑委员会, 中国农业机械工业协会. 中国农业机械工业年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2000–2014.
- [27] HARRIS I, JONES P D, OSBORN T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 dataset[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 623–642.
- [28] DIJKSHOORN K, VAN ENGELEN V, HUTING J. Soil and landform properties for LADA partner countries [M]. Wageningen, the Netherlands: ISRIC-World Soil Information and FAO, 2008.
- [29] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [30] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 1–8.
XIE Guanghui, HAN Dongqian, WANG Xiaoyu, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 1–8. (in Chinese)
- [31] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数[J]. 中国农业科学, 1990, 23(2): 83–87.
ZHANG Fuchun, ZHU Zhihui. Harvest index for various crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23(2): 83–87. (in Chinese)
- [32] ALLEN R G, PEREIRA L S, RASES D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56, 300[M]. Rome: FAO, 1998; D05109.
- [33] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21: 35–48.
- [34] CONTOR B A, TAYLOR R G. Why improving irrigation efficiency increases total volume of consumptive water use[J]. *Irrigation and Drainage*, 2013, 62(3): 273–280.
- [35] GRAFTON R Q, WILLIAMS J, PERRY C J, et al. The paradox of irrigation efficiency[J]. *Science*, 2018, 361(6404): 748–750.