

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.037

供应链视角小麦与初加工产品生产水足迹分析

冯变变¹ 卓拉^{2,3} 杨西¹ 王伟¹ 徐增辉¹ 吴普特^{2,3}

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

摘要: 针对农产品水足迹量化仅关注农田直接耗水,而忽略间接水足迹的问题,基于国际水足迹标准量化框架,结合生命周期法,构建考虑生产资料及其上游产品完整供应链、国际和国内贸易的农产品生产水足迹量化框架,计算2016年中国大陆省级行政区尺度小麦原粮及其初加工产品(面粉和麦麸)的生产水足迹,分析其耗水特征。结果表明:供应链视角下,全国平均小麦生产水足迹为4 869 m³/t,生产资料的间接水足迹占比为6%;面粉和麦麸生产水足迹分别为3 781 m³/t和11 037 m³/t;省级小麦及其初级加工产品生产水足迹的大小与构成存在显著空间异质性,福建省小麦生产间接蓝水足迹占比高达25%。研究结果可为全面解析区域间农业和工业用水投入内在联系,制定合理的配水方案、落实“以水定产”战略提供一定科学依据。

关键词: 供应链; 水足迹; 生产资料; 小麦; 生命周期; 蓝绿水

中图分类号: S273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)12-0358-10

OSID:



Water Footprint Analysis of Wheat and Derived Products Based on Supply-chain

FENG Bianbian¹ ZHUO La^{2,3} YANG Xi¹ WANG Wei¹ XU Zenghui¹ WU Pute^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The product water footprint (WF) is defined as the direct and indirect consumption of water resources in the process of product production. The complete water consumption of agricultural products includes the direct water consumption of crops in the field and the indirect consumption of relevant inputs in the crop production supply-chain. However, previous studies on the WF of agricultural products only focused on the direct water consumption in the field. Here, within the framework of WF standard quantification and life cycle method, a quantitative framework for the supply-chain based water footprint (SWF) of agricultural products production that indicated both indirect and direct water consumption along the raw material-to-product chain at an intra-national level was proposed. Then, the SWFs of wheat and its processed products (wheat flour and wheat bran) in mainland China's provinces in 2016 was quantified. Results showed that the national average SWF of wheat production was 4 869 m³/t, and the indirect WF related to means of production accounted for 6% of the total SWF of wheat. The SWFs of wheat flour and wheat bran production were 3 781 m³/t and 11 037 m³/t, respectively. There was significant spatial heterogeneity in the intensity and composition of the SWF of wheat and derived products production, and the contribution of the indirect blue WF of Fujian wheat to the total blue WF reached 25%. The results can provide a scientific basis for comprehensively analyzing the internal relationship between agricultural and industrial water input among regions and for formulating reasonable water resources allocation scheme and implementing the stratagem of “deciding production by water”.

Key words: supply-chain; water footprint; means of production; wheat; life cycle; blue and green water

收稿日期: 2021-05-21 修回日期: 2021-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809215)和国家青年人才项目(第14批)

作者简介: 冯变变(1993—),女,博士生,主要从事区域农业高效用水研究,E-mail: fengbb@nwafu.edu.cn

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

0 引言

随着食物需求不断增加,贸易活动日趋频繁以及各行业间用水竞争持续加剧,区域水资源愈加有限,水资源高效可持续利用与管理面临更大挑战^[1-3]。产品生产的上游和下游都具有生态影响,整个供应链各关键环节对水资源的占用和影响同等重要^[4-5]。农业是中国第一用水大户,农业用水占全国总用水量的 61%^[6]。准确量化农业生产过程中的水资源消耗,是落实最严格水资源管理制度和推进区域刚性水资源约束机制的关键基础。农作物单产水平和水分生产力的提高常依赖肥料、农药、能源等生产资料的大量投入。生产资料的生产与消费也消耗水资源,可视为作物生产间接的水消耗。但是,传统的农产品耗水评价往往仅关注农作物在田间生长过程中的直接水消耗,即作物腾发量。与此同时,作物生产资料间接耗水在现实水资源管理中属于工业水管理范畴,其与农业耗水之间的关系尚不明晰。

水足迹作为一种对人类活动产生的水资源消耗及其影响的综合性评价指标,近年来被广泛应用于追踪供应链网络下直接和间接的水分消耗和环境影响^[7]。对作物来说,生产水足迹可分为直接水足迹和间接水足迹,直接水足迹为作物腾发量与稀释污染物的水量,间接水足迹为生产供应链中生产资料的水分消耗。国内外研究一方面多专注于原粮产品直接水足迹及其结构在全球^[8]、国家^[9]、省级^[10]、流域^[11]和灌区^[12]等不同尺度的量化,时间维度也从单个年份、多年均值到长时间序列不等^[13-14]。仅少数研究涉及国家平均水平的作物间接水足迹量化。例如:徐长春等^[15]基于中国生命周期数据库量化了不同流域小麦生产直接水足迹和间接水足迹;ZHAI 等^[16-17]基于生命周期原理量化了包括生产资料投入在内的中国小麦、玉米和水稻作物生产水足迹及其影响。以上研究尚未考虑生产资料及其上游产品生产水足迹的区域差异,以及生产资料及其上游产品区域贸易造成的消费水足迹差异。另一方面,作物生产直接水足迹常被视为加工食品间接水足迹的重要部分。RIDOUTT 等^[18]对玛氏公司巧克力和甜面酱的生命周期水足迹进行研究,量化系统边界包含了原料田间生产、工厂加工、产品包装、销售和运输、食用整个产业链,研究结果表明原料田间生产阶段水足迹占两个产品总水足迹的比例均在 95% 以上。RUINI 等^[19]考虑原料的跨国贸易,计算了 Barilla 公司生产的意大利面的水足迹,研究结果表明由于生产地及其环境状况、农业技术等方面的差

异,其水足迹也呈现差异。除了以上产品,考虑供应链的加工产品水足迹研究还集中于乳制品^[20]和棉质产品^[21],而针对中国农作物加工产品生产供应链各环节耗水特征以及区域差异还需进一步研究。

本文基于水足迹国际标准量化框架^[22],结合生命周期法,尝试构建考虑生产资料及其上游产品完整供应链、国际和国内贸易的农产品生产水足迹量化框架。并以中国大陆 30 个省(不含海南省)为研究空间单元,对供应链视角小麦及其初加工产品面粉和麦麸生产水足迹进行量化,解析其耗水特征以及空间分布特点。以厘清区域农产品的农业和工业用水投入之间的联系,为缓解区域水资源短缺和解决不同用水部门之间供需矛盾提供一定方法和数据参考。

1 材料与方 法

1.1 系统边界

产品水足迹指生产某产品各个阶段直接或间接消耗的所有淡水资源^[22]。一个完整的农产品生产系统耗水环节包括作物在田间种植的直接水消耗、生产供应链中生产资料投入的间接水消耗。所需要的生产资料投入包括种子、氮肥(N)、磷肥(P_2O_5)、钾肥(K_2O)、农药、柴油和电力。图 1 为供应链视角小麦及其初加工产品生产水足迹量化系统边界。

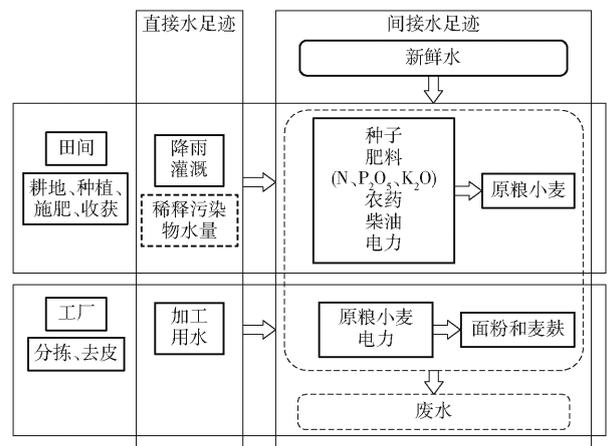


图 1 供应链视角小麦及其初加工产品生产水足迹量化系统边界示意图

Fig. 1 System boundary for quantifying supply-chain based water footprint of wheat and derived products production

1.2 小麦生产水足迹计算

作物生产水足迹由直接水足迹和间接水足迹组成。直接水足迹为作物田间生产水足迹,包括蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹,本研究中蓝水足迹和绿水足迹的量化采用基于 AquaCrop 模型^[23-24]的栅格尺度作物生产水足迹计算方法^[25],分别由单位产量作物生育期腾发量中蓝水量和绿水量表示^[22]。灰水足迹指为吸收农田中因化肥和农药施用过程中因

淋溶等作用而进入水体的水量。本研究中考虑了氮肥和磷肥施用过程中氮和磷的影响,计算方法采用水足迹网络提出的方法进行量化^[22]。

间接水足迹为作物生产供应链中各种生产资料投入产品(包括农产品和工业产品)水足迹之和,各生产资料投入产品水足迹为各产品单位消费水足迹(采用消费水足迹进行计算,是考虑到生产资料产品由于区域贸易其产地和消费地多存在空间上的不匹配)和消耗量的乘积,计算式为

$$I_{WF} = \sum_{t=1}^7 S_{WF_{cons,t}} A_t \quad (1)$$

式中 I_{WF} ——供应链视角下作物生产间接水足迹, m^3/t

$S_{WF_{cons,t}}$ ——第 t 类生产资料消费水足迹, m^3/t

t ——生产资料,表示的 7 类生产资料分别为种子、氮肥、磷肥、钾肥、农药、柴油和电力

A_t ——单位作物生产过程中第 t 类生产资料的消耗量, t/t

本研究中投入的农产品为种子,由于计算为初始计算,种子水足迹采用 2015 年作物田间生产水足迹进行计算,故只需对工业产品消费水足迹进行计算。

1.2.1 产品消费水足迹计算

产品消费水足迹 $S_{WF_{cons}}$ (m^3/t) 按照水资源的来源地不同可划分为本地生产水足迹 $S_{WF_{prod}}$ (m^3/t)、省际进口水足迹 $S_{WF_{pe}}$ (m^3/t) 和国际进口水足迹 $S_{WF_{ce}}$ (m^3/t), 计算式为

$$S_{WF_{cons}} = S_{WF_{prod}} + S_{WF_{pe}} + S_{WF_{ce}} \quad (2)$$

省份 i 的产品消费水足迹的计算需要结合本省产品生产水足迹、出口地区产品生产水足迹、运输水足迹(运输过程中燃料水足迹和直接蓝水足迹)和区域贸易量进行计算,计算式为

$$S_{WF_{cons,i}} = \left\{ S_{WF,i} P_i + \sum_{j=1}^{31} [I_{pe,j} (S_{WF,j} + S_{WF_{cons[E],j}} t_e l_{ij} + d_w)] + I_{ce} (S_{WF,ce} + l_{ce} S_{WF_{cons[E],ce}} t_E) \right\} / \left(P_i + \sum_j I_{pe,j} + I_{ce} \right) \quad (3)$$

式中 $S_{WF_{cons,i}}$ ——省份 i 产品的消费水足迹, m^3/t

$S_{WF,i}$ 、 $S_{WF,j}$ 、 $S_{WF,ce}$ ——省份 i 、出口省份 j 、国外产品的生产水足迹, m^3/t , $S_{WF,ce}$ 取全球平均值

P_i ——省份 i 产品的产量, t

$I_{pe,j}$ ——来自 j 省的净进口量, t

I_{ce} ——来自国际净进口量, t

l_{ij} 、 l_{ce} ——省际运距、国际运距, km , l_{ce} 取全球平均值

d_w ——省际运输时单位产品运输 1 km 消耗的水量, m^3/km

$S_{WF_{cons[E],j}}$ ——省际运输中出口省份 j 的燃料消费水足迹, m^3/t

t_e ——单位产品省际运输 1 km 消耗的能源量, $t/(t \cdot km)$

$S_{WF_{cons[E],ce}}$ ——国际运输的燃料消费水足迹, 采用柴油进行计算, m^3/t , 采用全球平均值计算

t_E ——国际运输中单位产品运输 1 km 消耗的燃料量, $t/(t \cdot km)$

综上所述,只需对各生产资料产品生产水足迹及其区域贸易数据进行计算。此外,能源产品作为燃料水足迹的来源,应首先对能源产品生产和消费水足迹进行计算,能源产品消费水足迹计算同样采用式(3)进行计算,其中 $S_{WF_{cons[E],j}}$ 和 $S_{WF_{cons[E],ce}}$ 均采用出口地的生产水足迹进行计算。

1.2.2 产品区域贸易数据计算

能源产品即煤、石油、天然气和电力。能源产品国际和省际贸易数据来源于《中国能源统计年鉴》^[26]和文献^[27]。其他生产资料产品省际贸易数据则采用最短距离法^[28-29]进行量化:基于各省每年各产品的供需平衡,同时考虑国际与国内各省之间产品流通,以运输距离最短为约束条件,利用线性规划方法得到相应的省际间产品流通量。约束条件为

$$\begin{cases} \min \left(L = \sum_{i=1, j=1}^{i=31, j=31} T_{ij} l_{ij} \right) \\ \sum_{j=1}^{31} T_{ij} \leq S_i \quad (i = 1, 2, \dots, 31) \\ \sum_{i=1}^{31} T_{ij} = D_j \quad (j = 1, 2, \dots, 31) \\ T_i \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 T_{ij} —— i 省运输到 j 省的某一产品贸易量, t
 l_{ij} ——单位产品从 i 省运输到 j 省的距离, km/t

L ——运输总距离, km

S_i —— i 省产品可流出量, t

D_j —— j 省的产品需流入量, t

1.2.3 作物生产供应链工业产品生产水足迹计算

作物生产供应链工业产品水足迹包括直接水足迹和间接水足迹。直接水足迹指工业产品生产过程中新鲜水消耗和稀释污染物所需的水量。间接水足

迹指工业产品生产供应链中投入产品的水足迹,采用消耗的物料量乘以其对应的单位质量产品生产水足迹。当投入产品生产地和消费地存在严重不匹配时采用产品的消费水足迹(如能源产品、合成氨、磷矿、硫铁矿、硫磺)进行计算。因此,工业产品的水足迹量化需要其生产过程中的物料消耗清单,并对其中每个投入产品水足迹进行量化,可能存在多个上游产品,依次进行溯源。

图 2 为作物生产供应链上工业产品生产水足迹量化系统边界。工业产品供应链上游均为能源投

入,故工业产品的水足迹量化以能源产品水足迹为基础,自上而下进行计算。工业产品水足迹仅包括蓝水足迹和灰水足迹。工业产品灰水足迹的核算采用国际标准量化框架的方法进行计算^[22]。各省原煤和天然气产品生产蓝水足迹来自于文献^[27],而灰水足迹则采用 DING 等^[30]的全国平均值。原油产品水足迹数据结合文献^[27,30]的开采和加工数据,然后按照经济价值比例进行计算得到柴油水足迹。表 1 为作物生产工业投入产品及其上游产品的物料消耗清单及数据来源。

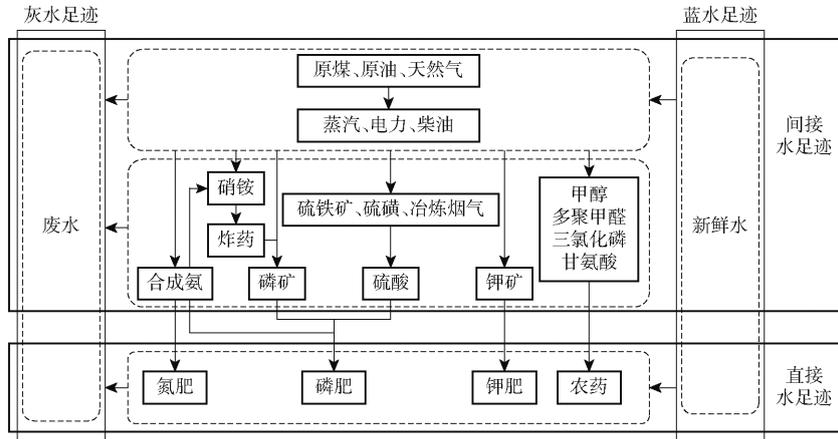


图 2 作物生产供应链上工业产品生产水足迹量化系统边界示意图

Fig. 2 System boundary for water footprint of industrial products production in crop production supply-chain

表 1 作物生产工业投入产品及其上游产品物料消耗清单及数据来源

Tab. 1 Inventory and data sources of material consumption related to production of industrial products

生产资料/ 具体产品	数据来源	上游产品	数据来源
氮肥/尿素	直接蓝水消耗数据来源于各省用水定额 ^[31] ;其他物料消耗来源于文献 ^[32]	合成氨	直接蓝水消耗来源于各省用水定额 ^[31] ;其他物料消耗来源于文献 ^[32] ;污染物排放数据来源于 HJ/T 188—2006《氮肥行业清洁生产标准》;污染物排放标准来源于 GB 13458—2013《合成氨工业水污染物排放标准》
磷肥/普钙、二铵	普钙和二铵分别代表低浓度磷肥和高浓度磷肥,直接蓝水消耗均来源于各省用水定额 ^[31] ,其他物料消耗来源于《磷肥行业清洁生产评价指标体系(试行)》;污染物排放标准来源 GB 15580—2011《磷肥工业水污染物排放标准》	磷矿石	物料消耗均来源于《云南省磷矿采选行业清洁生产评价指标体系(试行)》
		炸药	物料消耗均来源于《云南省民用爆破器材行业工业炸药清洁生产评价指标体系(试行)》
		硝铵	直接蓝水消耗数据来源于文献 ^[33] ;其他物料消耗来源于文献 ^[32]
		硫酸	分为硫铁矿制酸、硫磺制酸和冶炼烟气制酸 3 类,物料消耗均来源于《硫酸行业清洁生产评价指标体系(试行)》;污染物排放标准来源于 GB 26132—2010《硫酸工业污染物排放标准》
钾肥/氯化钾	直接蓝水消耗来源于产品用水定额 ^[31] ;其他物料消耗来源于文献 ^[35]	钾矿	直接蓝水消耗来源于用水定额 ^[31]
		甲醇	直接蓝水消耗来源于产品用水定额 ^[31]
农药/草甘膦	直接蓝水消耗来源于产品用水定额 ^[31] ,其他物料消耗和污染物排放数据来源于 Ecoinvent v3 数据库 ^[36] 和《有机磷农药行业清洁生产评价指标体系(试行)》;污染物排放标准来源于《农药工业水污染物排放标准(征求意见稿)》	多聚甲醛 三氯化磷 甘氨酸	直接蓝水消耗均来源于产品用水定额 ^[31]

注:当缺乏具体行业污染物排放标准时,采用 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》第Ⅳ类标准计算。

1.3 小麦初加工产品生产水足迹计算

对于小麦初加工产品而言,直接水足迹为生产加工用水,间接水足迹为原粮小麦和电力投入的水消耗。由于小麦加工过程为多投入多产出的生产系统,面粉和麦麸生产水足迹还需要根据各自的经济价值进行分配,计算式为

$$S_{WF[fl]} = (S_{WF[w]} + S_{WF_{cons[el]}} + W_{proc}) \frac{f_{v[fl]}}{f_{p[fl]}} \quad (5)$$

$$S_{WF[br]} = (S_{WF[w]} + S_{WF_{cons[el]}} + W_{proc}) \frac{f_{v[br]}}{f_{p[br]}} \quad (6)$$

式中 $S_{WF[fl]}$ 、 $S_{WF[br]}$ ——供应链视角下面粉、麦麸生产水足迹, m^3/t

$S_{WF[w]}$ ——供应链视角下小麦生产水足迹, m^3/t

$f_{v[fl]}$ 、 $f_{p[fl]}$ ——供应链视角下面粉价值比率、产品比率,数据来源于文献[8]

$f_{v[br]}$ 、 $f_{p[br]}$ ——供应链视角下麦麸价值比率、产品比率,数据来源于文献[8]

$S_{WF_{cons[el]}}$ ——供应链视角下电力消费水足迹, m^3/t

W_{proc} ——小麦加工过程中的用水量, m^3/t

1.4 数据来源

本文所需气象数据(日平均降雨量、日平均最高温度和日平均最低温度等)来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。全国各省作物播种面积和产量数据来源于《中国统计年鉴2017》。土壤类型和含水率数据分别来自ISRIC土壤地形数据库^[37]。作物生产中种子、N、P₂O₅、K₂O、农药和电力消耗量均来自《全国农产品成本收益资料汇编2017》,缺失省份数据由邻近省份值代替。其中农药和电力消耗量根据《全国农产品成本收益资料汇编2017》中投入费用与价格换算得到,其中电力消耗主要考虑排灌费。所需产品价格数据来源于中国产业信息网(<http://www.chyxx.com/data/>)。作物生产柴油消耗数据来源于文献[38]。国际贸易运输距离数据来源于网站(<https://sea-distances.org>),国内运输距离通过ArcGIS软件识别最短距离。运输水足迹相关数据来源于文献[39]。与作物生产相关的工业产品省际贸易流动模拟所需的国际进出口数据以及省际间产量和消费量数据均来自《中国统计年鉴2017》、中国产业信息网(<http://www.chyxx.com/data/>)和《中国化学工业年鉴2016》。

2 结果与分析

2.1 小麦原粮生产水足迹

2016年供应链视角下小麦生产水足迹全国平

均值为4869 m^3/t ,灰水足迹占比77%,绿水足迹占比14%,与生产资料相关的间接水足迹占比为6%。区域间小麦生产水足迹及其构成存在较大差异(图3)。其中水足迹低值区集中于华北、黄淮海和东北等北方地区,高值区分布在东南和华南等南方地区。就水足迹构成而言,省际间小麦间接蓝水足迹在总蓝水足迹中的贡献率较大,在4%~25%之间,其中有9个省份间接蓝水足迹占比超过10%,最高值出现在福建省。考虑到较大的直接水足迹和灰水足迹份额,作物生产水足迹在区域间的差异受区域单位面积的化肥施用强度影响较大。此外,全国不同的气候条件、水资源禀赋、灌溉条件、农业和工业生产条件也将影响区域蓝水足迹和绿水足迹的分布。

在小麦间接水足迹各组分中,农产品(种子)水足迹占比最大,工业产品水足迹占比较低。全国平均蓝水足迹和灰水足迹贡献率分别为13%和5%。然而,当具体到省级尺度时则存在较大差异。安徽省工业产品蓝水足迹对小麦间接蓝水足迹的贡献率可达42%(图4)。此外,各工业产品水足迹所占比例在省际间也存在差异。具体而言,北方地区工业产品蓝水足迹以氮肥、磷肥和电力为主,南方地区则以氮肥、磷肥和农药为主。工业产品灰水足迹则以氮肥和磷肥为主,多数区域二者贡献率超90%。在多种工业产品生产资料中,氮肥和磷肥拥有较大的水足迹份额主要是由于拥有较高的生产水足迹(全国平均水足迹分别为254 m^3/t 和141 m^3/t)和较高的消耗量。

由于作物生产供应链端各生产资料投入产品及其上游产品来源于密集的区域间物流,故作物生产水足迹中有部分水消耗并非来源于本地水资源。2016年中国小麦生产蓝水足迹中外部水足迹在0.2~11.0 m^3/t 之间,省际进口水足迹的高值区主要集中在工业化程度较低的西北地区和发达的东南沿海城市,这些地区工业产品消费主要依靠省际进口(表2)。国际进口水足迹主要集中于北京、天津港口城市及其附近城市(表2)。

2.2 小麦初加工产品生产水足迹

2016年小麦面粉和麦麸生产水足迹全国平均值分别为3781 m^3/t 和11037 m^3/t ,灰水足迹占比均为77%,直接水足迹均小于4 m^3/t ,水分消耗主要以生产资料投入的间接水足迹为主,占比近100%。此外,面粉和麦麸生产水足迹及其组成在省际间也呈现较大差异,分别在2131~10763 m^3/t 和6220~31420 m^3/t 之间(图5)。受间接水足迹贡献较大影响,面粉和麦麸水足迹空间分布同小麦水

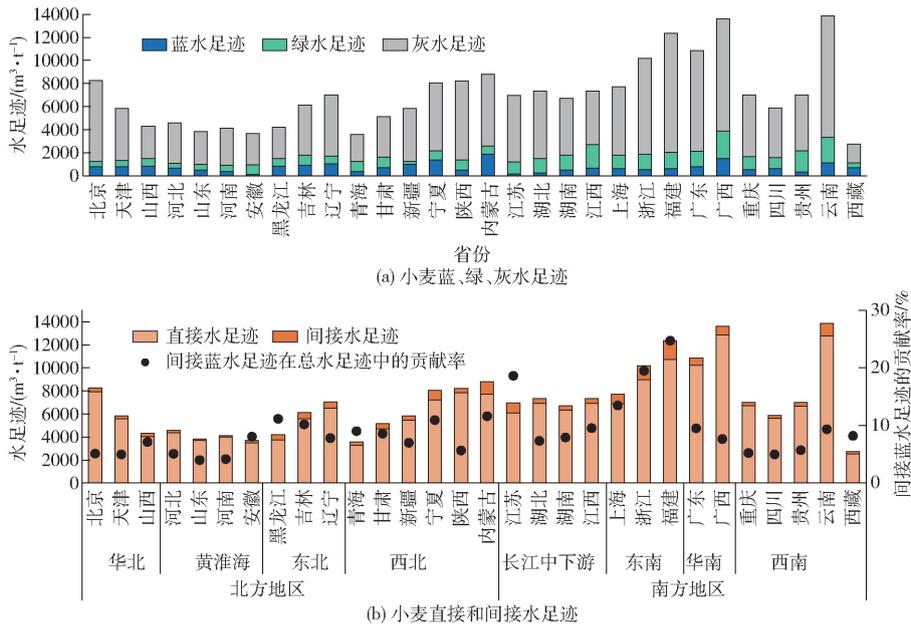


图 3 供应链视角下小麦生产水足迹空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of supply-chain based water footprint of wheat production

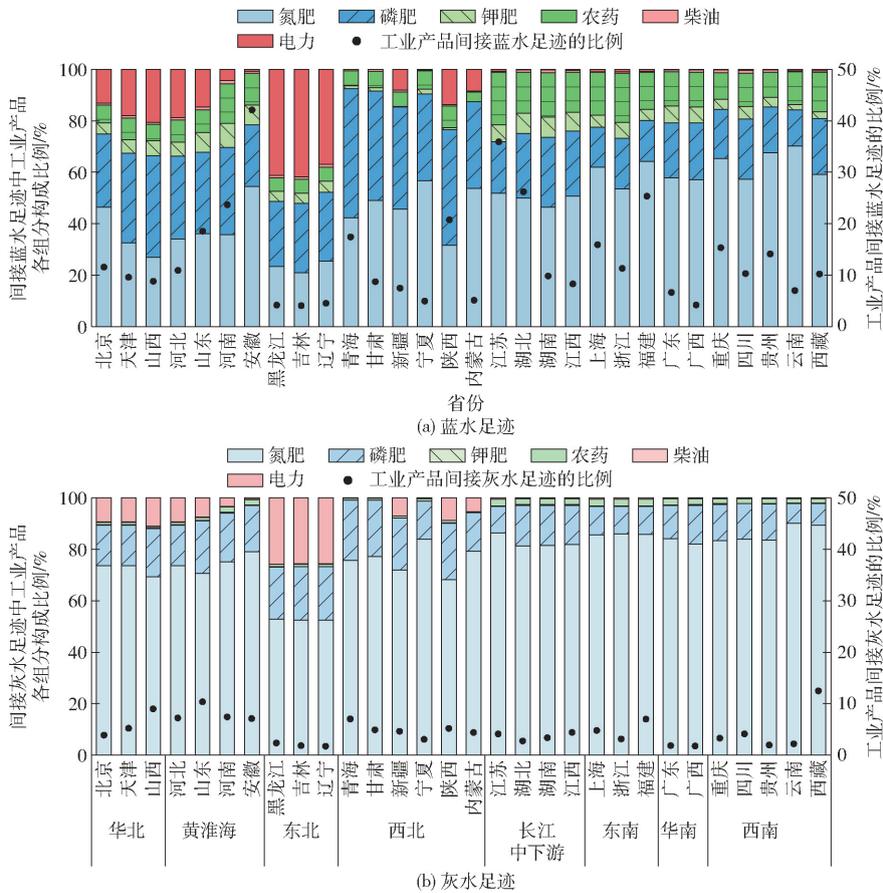


图 4 小麦生产间接水足迹中工业产品水足迹各组分构成及其空间分布

Fig. 4 Spatial distributions and composition of industrial product-related indirect water footprint of wheat production

足迹一致,高值区均分布于南方地区。就水资源来源地而言,面粉和麦麸生产耗水也主要以本地水资源为主,省级和国际进口水足迹较低,分别为 $0.2 \sim 8.5 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $0.5 \sim 24.9 \text{ m}^3/\text{t}$ (表 3),高值区同小麦一样分布于西北和沿海港口城市。

3 讨论

本研究通过构建供应链视角下农产品生产水足迹量化方法,并以中国大陆 30 个省小麦为研究对象,分析了供应链视角下小麦及其加工产品耗水特

表2 小麦生产蓝水足迹

Tab.2 Wheat blue water footprint

 m^3/t

北方地区	省份	本地生产 蓝水足迹	省际进口 蓝水足迹	国际进口 蓝水足迹	南方地区	省份	本地生产 蓝水足迹	省际进口 蓝水足迹	国际进口 蓝水足迹
华北地区	北京	764	0.4	3.9	长江中下游地区	江苏	158	3.3	0.9
	天津	772	0.3	1.8		湖北	212	0.2	0.4
	山西	810	0.2	2.1		湖南	485	2.7	0
河北	646	1.3	0.4	江西		659	3.2	0	
黄淮海地区	山东	497	0.6	0.3	东南地区	上海	614	10.9	0
	河南	334	1.1	0.3		浙江	516	5.9	0.8
	安徽	126	0.6	0	福建	626	7.3	0.2	
东北地区	黑龙江	823	2.0	0	华南地区	广东	771	4.0	0.3
	吉林	882	2.0	0		广西	1 503	4.0	0
	辽宁	1 034	1.6	0.4	西南地区	重庆	498	0.5	0
西北地区	青海	367	3.0	0		四川	624	0.2	0
	甘肃	700	2.8	0		贵州	311	0.7	0
	新疆	960	3.1	0		云南	1 105	3.1	0
	宁夏	1 367	2.3	0		西藏	700	5.9	0
	陕西	479	2.8	0					
	内蒙古	1 849	6.2	0					

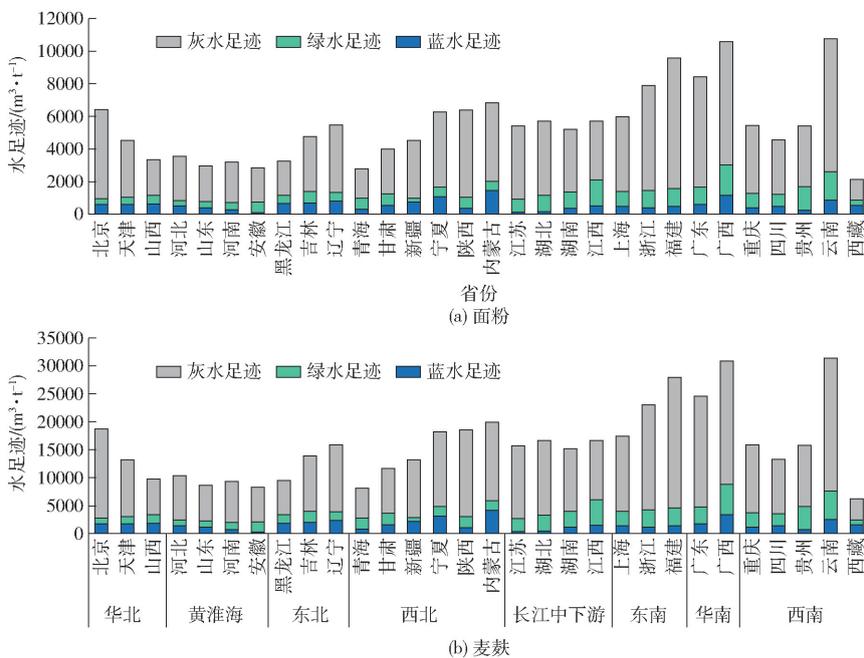


图5 供应链视角下小麦面粉和麦麸生产水足迹空间分布

Fig.5 Spatial distributions of supply-chain based water footprint of wheat flour and wheat bran production

征及其空间分布特点。研究发现2016年供应链视角下小麦生产总水足迹主要以直接水足迹为主,间接水足迹整体较低,但是在区域间却存在较大差异,比如福建省小麦生产间接蓝水足迹占比可达25%。此外,由于生产资料的区域贸易,作物生产除了消耗和污染本地的水资源外,也会消耗和污染其他省份和国外的水资源。因此本文认为生产资料的间接水足迹不应该被忽视,并且提高农产品生产的用水效率不仅是农民和农业管理部门的责任。在耗水强度最大的农田生产阶段,今后应继续推广节水灌溉技

术和提高雨水利用效率,提高农业水分利用效率。考虑到小麦水足迹中较大的灰水足迹占比,各地区均应采取措施控制施肥量,在保证粮食产量的前提下提高肥料利用效率。与此同时,负责化肥、农药产品以及能源产品原材料供应和加工制造的上游合作伙伴也应重视用水效率的提高。加强不同部门的合作,尤其是化工产业和农业的水资源管理合作是有必要的。例如,优化供应链结构,依靠当地供应链的产品需要改善生产工艺,提高资源能源利用效率;对于进口产品,可通过优先从生产效率较高的地区进

表 3 供应链视角下小麦面粉和麦麸生产蓝水足迹

Tab. 3 Blue water footprint of wheat flour and wheat bran production

m³/t

分区	省份	面粉				麦麸			
		直接蓝水 足迹	本地生产 蓝水足迹	省际进口 蓝水足迹	国际进口 蓝水足迹	直接蓝水 足迹	本地生产 蓝水足迹	省际进口 蓝水足迹	国际进口 蓝水足迹
华北地区	北京	0	593	0.3	3.0	0.1	1 731	0.8	8.8
	天津	0	600	0.3	1.4	0.1	1 751	0.8	4.0
	山西	0.2	629	0.2	1.6	0.6	1 835	0.5	4.7
黄淮海地区	河北	0.3	502	1.0	0.3	1.0	1 465	3.0	0.8
	山东	0.5	386	0.5	0.2	1.4	1 126	1.4	0.7
	河南	0.2	259	0.9	0.3	0.5	756	2.6	0.8
	安徽	0.2	98	0.5	0	0.6	286	1.3	0
东北地区	黑龙江	0.7	639	1.5	0	2.1	1 866	4.4	0
	吉林	0.7	685	1.6	0	1.9	1 999	4.6	0
	辽宁	0.6	803	1.2	0.3	1.7	2 344	3.6	1.0
西北地区	青海	0.7	1 061	2.3	0	1.0	3 098	6.7	0
	甘肃	0.3	285	2.2	0	1.9	833	6.4	0
	新疆	0.3	593	2.4	0	0.1	1 731	7.0	0
	宁夏	0.3	745	1.8	0	1.0	2 175	5.3	0
	陕西	0.3	543	2.2	0	0.9	1 586	6.4	0
	内蒙古	0.6	1 435	4.8	0	1.7	4 190	14.0	0
长江中下游地区	江苏	0.1	123	2.6	0.7	0.4	359	7.5	2.0
	湖北	0.5	165	0.1	0.3	1.4	480	0.4	0.9
	湖南	0.5	377	2.1	0	1.4	1 100	6.2	0
	江西	0.5	512	2.5	0	1.4	1 493	7.3	0
东南地区	上海	0.4	477	8.5	0	1.1	1 392	24.8	0.1
	浙江	0.3	400	4.5	0.6	0.8	1 169	13.3	1.8
	福建	0.5	486	5.7	0.1	1.4	1 418	16.5	0.4
华南地区	广东	0.1	599	3.1	0.3	0.4	1 748	9.0	0.8
	广西	1.3	1 167	3.1	0	3.9	3 406	9.1	0.1
西南地区	重庆	0.5	484	0.4	0	1.4	1 414	1.1	0.1
	四川	0.5	241	0.2	0	1.5	704	0.5	0
	贵州	0.5	858	0.5	0	1.9	2 504	1.6	0
	云南	0.7	543	2.4	0	1.9	1 586	7.1	0
	西藏	0.7	372	4.5	0	1.0	1 085	13.3	0

口生产资料,实现贸易结构优化。

本文中中国小麦生产蓝、绿、灰水足迹分别为 446、666、3 756 m³/t,与 MEKONNEN 等^[8]所得中国 1996—2005 年小麦平均生产蓝水足迹(471 m³/t)和绿水足迹(830 m³/t)相比,本研究中小麦蓝、绿水足迹明显较低,这主要是由于量化时间尺度的差异。多数研究表明中国不同区域水足迹估计值在长时间序列中均呈现下降趋势^[9]。在相近的研究时段里,本文研究的蓝、绿水足迹均高于 ZHANG 等^[40]计算的中国 2011 年小麦蓝水足迹(239 m³/t)和绿水足迹(392 m³/t),这和本研究拥有较广的量化系统边界有关。本研究考虑了包含种子、肥料、农药和能源投入在内的生产资料间接水足迹。此外,本研究灰水足迹远高于 MEKONNEN 等^[8]所得的估计值(315 m³/t),这主要归结于:①较高的供应链灰水足迹,本文考虑了生产资料在整个生命周期过程中造成的间接水污染,MEKONNEN 等^[8]只

考虑氮肥施用过程中造成的污染。②本文的污染物的最大允许浓度和自然本底浓度之差采用了更严格的假设值(0.8 mg/L),而 MEKONNEN 等^[8]为 10 mg/L。

4 结束语

构建了供应链视角下农产品生产水足迹计算方法,并应用于中国省级尺度原粮小麦及其初加工产品生产水足迹量化。结果表明:供应链视角下全国平均小麦生产水足迹为 4 869 m³/t,其中,生产资料的间接水足迹占比为 6%;面粉和麦麸生产水足迹分别为 3 781 m³/t 和 11 037 m³/t。小麦及其初级加工产品生产水足迹的大小与构成存在显著空间异质性,福建省小麦生产间接蓝水足迹占比可达 25%。研究结果可为全面解析区域间农业和工业用水投入内在联系、制定合理的配水方案以及落实“以水定产”战略提供一定科学依据。

参 考 文 献

- [1] VÖRÖSMARTY C J, HOEKSTRA A Y, BUNN S E, et al. What scale for water governance? [J]. *Science*, 2015, 349(6247): 478–479.
- [2] DALIN C, WADA Y, KASTNER T, et al. Groundwater depletion embedded in international food trade[J]. *Nature*, 2017, 543(7647): 700–704.
- [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 CSAE*, 2010, 26(6): 1–6. (in Chinese)
- [4] PAGELL M, SHEVCHENKO A. Why research in sustainable supply chain management should have no future[J]. *Journal of Supply Chain Management*, 2014, 50(1): 44–55.
- [5] O’ROURKE D. The science of sustainable supply chains[J]. *Science*, 2014, 344(6188): 1124–1127.
- [6] 水利部. 中国水资源公报(2019)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [7] GALLI A, WIEDMANN T, ERCIN E, et al. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family” of indicators; definition and role in tracking human pressure on the planet[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 100–112.
- [8] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15: 1577–1600.
- [9] ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade; a study for China (1978–2008) [J]. *Water Research*, 2016, 94: 73–85.
- [10] 刘巍, 李雨晴, 付强, 等. 黑龙江省粮食水足迹时空分布规律与影响因素分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 214–222,335.
LIU Wei, LI Yuqing, FU Qiang, et al. Spatial and temporal distributions of crop water footprint and its influence factors analysis in Heilongjiang Province[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(8):214–222,335. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200824&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.024. (in Chinese)
- [11] 卓拉, 王伟, 冯变变, 等. 黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 264–271.
ZHUO La, WANG Wei, FENG Bianbian, et al. Water footprint accounting and evaluation for wheat production in yellow river basin[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 264–271. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190931&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.031. (in Chinese)
- [12] LUAN X B, YIN Y L, WU P T, et al. An improved method for calculating the regional crop water footprint based on a hydrological process analysis[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(10): 5111–5123.
- [13] HOEKSTRA A Y. Water footprint assessment: evolution of a new research field[J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(10): 3061–3081.
- [14] TUNINETTI M, TAMEA S, D’ODORICO P, et al. Global sensitivity of high-resolution estimates of crop water footprint[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(10): 8257–8272.
- [15] 徐长春, 黄晶, RIDOUTT B G, 等. 基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 873–880.
XU Changchun, HUANG Jing, RIDOUTT B G, et al. LCA-based product water footprinting and a case study[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 873–880. (in Chinese)
- [16] ZHAI Y, SHEN X, QUAN T, et al. Impact-oriented water footprint assessment of wheat production in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 90–98.
- [17] ZHAI Y, ZHANG T, BAI Y, et al. Energy and water footprints of cereal production in China[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105150.
- [18] RIDOUTT B G, PFISTER S. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity[J]. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2010, 20(1): 113–120.
- [19] RUINI L, MARINO M, PIGNATELLI S, et al. Water footprint of a large-sized food company: the case of Barilla pasta production[J]. *Water Resources and Industry*, 2013, 1–2(1): 7–24.
- [20] BAI X, REN X, KHANNA N Z, et al. Comprehensive water footprint assessment of the dairy industry chain based on ISO 14046: a case study in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 369–375.
- [21] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(1): 186–203.
- [22] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M. The water footprint assessment manual: setting the global standard

- [M]. London: Earthscan, 2011.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [27] 陈倩云. 我国主要能源产品水足迹量化与虚拟水流动格局研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
CHEN Qianyun. The water footprint assessment and virtual water flow pattern of the major energy products in China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [28] FISCHER M M, GETIS A. Handbook of applied spatial analysis[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [29] 杨足膺, 赵媛. 基于分形理论的中国原油管道网络结构研究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(5): 820–831.
YANG Zuying, ZHAO Yuan. Research on structure of China's crude oil pipeline networks based upon fractal theory[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(5): 820–831. (in Chinese)
- [30] DING N, LIU J R, YANG J X, et al. Water footprints of energy sources in China: exploring options to improve water efficiency[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 1021–1031.
- [31] 水利部. 各省行业用水定额[EB/OL]. [2020-12-01]. <http://qgjsb.mwr.gov.cn/zcfg/bzde/db/>.
- [32] 曹仑. 我国氮肥产业的能耗状况和节能策略研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
CAO Lun. The study on the energy consumption and conservation strategy of China nitrogen fertilizer industry[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [33] 王利. 中国化肥产业体系养分资源流动规律与管理策略研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [34] 袁晓梅, 王斌. 生命周期评价在硫铁矿掺烧亚铁渣制硫酸中的应用研究[J]. *绿色科技*, 2012(6): 132–134.
YUAN Xiaomei, WANG Bin. Application of life cycle assessment in sulphuric acid production from pyrite mixed with ferrous slag[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2012(6): 132–134. (in Chinese)
- [35] 范可正, 冯元琦, 曾宪坤. 中国肥料手册[M]. 北京: 中国化工信息中心, 2001.
- [36] Ecoinvent database[EB/OL]. [2020-12-01]. <https://www.ecoinvent.org/>.
- [37] DIJKSHOORN J A, VAN ENGELEN V W P, HUTING J R M. Soil and landform properties for LADA partner countries[M]. Wageningen, the Netherlands: ISRIC-World Soil Information and FAO, 2008.
- [38] 梁龙. 基于LCA的循环农业环境影响评价方法探讨与实证研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
LIANG Long. Environmental impact assessment of circular agriculture based on life cycle assessment: methods and case studies [D]. Beijing: China Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [39] 林路. 铁路——绿色交通的骄傲[J]. *铁道知识*, 2009(2): 4–11.
- [40] ZHANG G, WANG X, ZHANG L, et al. Carbon and water footprints of major cereal crops production in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 194: 613–623.

(上接第345页)

- [27] 王卫光, 王修贵, 沈荣开, 等. 河套灌区咸水灌溉试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 92–96.
WANG Weiguang, WANG Xiugui, SHEN Rongkai, et al. Experimental research on saline-water irrigation in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5): 92–96. (in Chinese)
- [28] 张幸福. 甘肃白银盐碱地区小麦品种的耐盐性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(4): 102–107.
ZHANG Xingfu. Study on salt-resistance of wheat varieties in saline-alkali areas in Baiyin City of Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(4): 102–107. (in Chinese)
- [29] HUANG M Y, ZHANG Z Y, SHENG Z P, et al. Soil salinity and maize growth under cycle irrigation in coastal soils[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(5): 2276–2286.
- [30] 张万锋, 杨树青, 潘春洋, 等. 优化井渠轮灌下秸秆覆盖对夏玉米根系分布与产量影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊1): 25–33.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, PAN Chunyang, et al. Effects of straw mulching under optimized alternate irrigation of well-canal on root distribution and yield of summer maize [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Suppl. 1): 25–33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s104&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.004. (in Chinese)
- [31] BOWEN G D. Tree roots and the use of soil nutrients[M]//Nutrition of plantation forests. London: Academic Press, 1984: 147–177.