

东北半干旱地区膜下滴灌玉米生产水足迹研究

谭智湘^{1,2}, 张忠学^{1*}, 聂堂哲¹

(1. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 农业部 农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要:在作物生产中,田间尺度的水足迹变化在制定可持续发展的农业用水策略中发挥着重要作用。【目的】探讨中国东北半干旱地区玉米生产中水足迹田间尺度的变化。【方法】通过3 a的田间试验,确定了膜下滴灌玉米全生育期水足迹的蓝、绿、灰水的组成;分析了气温、降雨和灌溉时间与次数组合下的土壤水量平衡和水足迹变化。【结果】①玉米生育期的水足迹中,绿水足迹占65.5%~67.9%,蓝水足迹占8.7%~9.4%,灰水足迹占23.3%~25.1%。②在降雨能满足玉米各生育期耗水需求的年份,有效降雨量占绿水量的103.2%,玉米耗水高峰期(6—8月)的高温和多有效降雨具有显著地增产效果,且能有效降低玉米生产水足迹。③在生育期水分亏缺较大的年份,玉米耗水高峰期少次多量(灌水总量一定)的灌水可以有效地保证玉米产量,同时降低玉米生产水足迹。④在生育期各时期降雨均匀的年份,玉米产量最低,水足迹最高。【结论】覆膜条件下玉米生产的绿水资源得到有效保护,而为了提高产量和降低水足迹,应根据不同水文年型制定合理的灌溉制度。

关键词:膜下滴灌;玉米;水足迹;东北半干旱地区

中图分类号:S274

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0581

谭智湘,张忠学,聂堂哲. 东北半干旱地区膜下滴灌玉米生产水足迹研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(9):36-42.

0 引言

淡水供应对粮食安全有重要的影响。近年来,淡水资源的竞争因人口的不断增长一直在增加^[1]。农业作为淡水的最大消费体,消耗了全球超过70%的淡水。因为水需求的显著增加及其可用性和质量的下降,淡水资源短缺和水污染的相关问题在未来会加剧^[2-3]。因此作物生产过程中的水资源消耗评价非常重要^[4]。Hoekstra^[5]于2002年基于虚拟水研究提出了水足迹理论,这一理论在之后得到了充分发展,为解决区域水资源问题提供了新的角度^[6-8]。蓝水、绿水和灰水概念的引用,更好地评价了干旱和半干旱地区农业生产中水资源的作用^[9-12]。

目前,国际上对水足迹的研究大致可分为理论和量化方法研究、水足迹案例研究、基于水足迹的水资源评价和管理研究。在实际案例研究方面,作物生长的水足迹研究主要在全球、国家或区域尺度展开,例如Chapagain等^[13]进行了全球尺度上水稻生产和消费水足迹研究,指出了蓝水是影响水稻生产的主要因素;孙世坤等^[11,14]研究了中国大陆2001—2010年的小麦生产水足迹,得出太阳辐射和降水量是影响作物水足迹的主要气象因子的结论;评估了北京1978—2008年玉米生产水足迹变化,提出改善灌溉用水管理和提高雨水利用效率可以减少蓝水消耗。近年来众多国内学者也在田间作物农产品水足迹核算方面进行了深入研究,如段青松等^[15]通过农场试验对玉米的经济产量、生物量生产水足迹进行了测定和计算;Cao等^[16]通过田间试验研究了华东淮安地区水稻生产的水足迹;吴楠等^[17]通过试验提出了一种稻田作物生产水足迹计算方法。但这些研究中鲜有特定灌溉条件下某一作物水足迹的计算,而作为半干旱地区所推广的膜下滴灌技术,作物水足迹研究值得进一步探讨。

收稿日期:2017-09-21

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAD12B01)

作者简介:谭智湘(1993-),男,硕士研究生。主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: ziksong@163.com

通信作者:张忠学(1967-),男,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zhangzhongxue@163.com

中国东北是粮食主产区和主要的虚拟水出口地区,黑龙江省是东北的粮食生产大省,而因粮食出口和虚拟水输出所引起的水分胁迫指数(*WSI*)增长已经达到了138%^[18]。玉米是黑龙江省的主要粮食作物,播种面积占粮食作物种植面积的51%,产量也占该省粮食总产量的50%以上。然而黑龙江省西部的春旱发生频率高达54%,因此膜下滴灌技术可以有效提高土壤温度,预防春旱和低温冷害,保障作物出苗和根系生长^[19-20]。作为粮食输出地区,粮食生产和水足迹模式的可持续性发展问题值得进一步探索。兹进行了3 a的田间试验,在相同土壤条件和农田管理条件下,对该地区膜下滴灌玉米生产水足迹的特性进行深入研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在黑龙江省大庆市肇州县水利科学研究所进行,地处北纬45°17',东经125°35'。属中温带大陆性季风气候,多年平均气温4.6℃,多年平均降雨量463 mm(6—8月降水量占全年71%)。多年平均蒸发量1 733 mm,大于10℃有效积温2 845℃,无霜期138 d,属第一积温带。试验土壤为碳酸盐黑钙土,国际制土壤质地分级为黏壤土,含黏土22%、粉砂37%和砂粒41%。试验土壤田间质量持水率为30.2%,永久凋萎系数为5.6%,平均体积质量1.22 g/cm³。多年平均风速3.6 m/s,最大风速多发生于春季。春季(3—5月)的降水量不足全年的13%。2014—2016年试验地0~20 cm土层土壤理化性质如表1所示。

表1 2014—2016年试验地0~20 cm土层土壤理化性质

理化性质	2014年	2015年	2016年
有机质/(g·kg ⁻¹)	28.2	27.8	27.7
电导率/(dS·m ⁻¹)	2.0	2.3	2.5
全氮量/(g·kg ⁻¹)	1.1	1.2	1.4
有效磷量/(mg·kg ⁻¹)	43.7	47.6	45.2
有效钾量/(mg·kg ⁻¹)	206.1	223.1	257.3
pH值	7.1	7.1	7.1

1.2 试验设计

供试玉米品种为龙育3号,按照当地习惯采用大垄双行种植,种植模式为1膜2管2行布置,垄宽130 cm,垄上行距50 cm,株距20 cm,滴灌带形式为单翼迷宫式。玉米播种后滴灌保苗水80 m³/hm²,同时施底肥尿素(含N量:46%)2.9 g/株,过磷酸钙(含P₂O₅量:16%)12.5 g/株,硫酸钾(含K₂O量:54%)7.7 g/株。生育期灌水总量为450 m³/hm²,根据当年降雨情况选择在拔节期、抽雄期或灌浆期灌水(2014年和2015年拔节期、抽雄期、灌浆期灌3次,2016年抽雄期、灌浆期灌2次)。随滴灌水追施尿素,肥量底追比为1:1。试验小区长13.6 m,宽5.2 m,共3次重复。每个小区所有处理均相同,田间管理措施均与当地习惯方式一致。

1.3 数据获取

利用土壤水分传感器(TRIME-PICO)定期测量试验区1 m深土层土壤含水率。试验区历史降雨数据来源于当地气象站,试验年份降雨量由试验区小型气象站测取。

试验共进行3 a,分别在2014年月5月1日、2015年5月3日和2016年4月27日播种,并都于每年10月上旬收获。供试玉米品种生育期为128 d,测产日期为各年生育期结束后1 d。

试验区1981—2010年玉米生育期(5—9月)平均降雨量为403.1 mm。2014、2015、2016年玉米生育期降水量分别为420.9、448.6、386.0 mm。玉米生育期内降雨量分布如图1所示。

1.4 水足迹的计算

首先定期对土壤含水率进行监测并且收集降雨数据,玉米生育期耗水量由水量平衡原理计算。然后根据玉米生育期水分的消耗和收获产量,计算玉米生产过程中的水足迹。最后比较各水足迹年际差异以及特征。根据水量平衡原理^[21],计算每月水分消耗,即:

$$ET = I + \Delta W + P_{\text{eff}} + K - D - R, \quad (1)$$

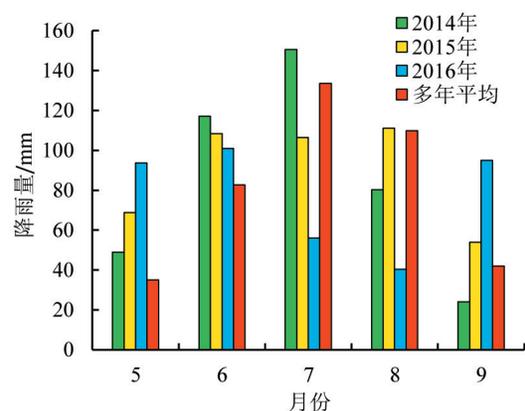


图1 试验年玉米生育期各月降雨量

式中： ET 为时段内蒸散发(mm)； I 为时段内灌溉水量(mm)； ΔW 为时段内1 m深度内土壤储水量变化量(mm)； P_{eff} 为时段内有效降雨量(mm)； K 为时段内地下水补给量(mm)； D 为时段内渗漏量(mm)； R 为时段内地表径流量(mm)。因试验区平均地下水位埋深较深(大于8 m)且滴灌灌水量小， K 和 D 不予以考虑。由于有限的降雨和较深的土壤剖面以及膜下的灌水方式，径流很少产生。根据实地观察， R 在计算中假定为0。

有效降雨量 P_{eff} 根据覆膜条件下经验公式计算^[22]，即：

$$P_{\text{eff}} = \eta P_{\text{total}}, \quad (2)$$

$$EP = 10P_{\text{eff}}, \quad (3)$$

式中： P_{total} 为日总降雨量(mm)； η 为有效降雨系数($P_{\text{total}} \leq 5$ mm时取0.56， $5 \text{ mm} < P_{\text{total}} \leq 10$ mm时取0.76， $P_{\text{total}} > 10$ mm时取0.82)。将有效降雨量 P_{eff} (mm)换算成有效降雨量 $EP(\text{m}^3/\text{hm}^2)$ 。

同时将玉米蒸散发 ET (mm)换算成玉米耗水量 $CWU(\text{m}^3/\text{hm}^2)$ ^[23]，即：

$$CWU = 10ET. \quad (4)$$

1) 蓝水足迹，试验中玉米膜下滴灌的灌水量等于蓝水量。玉米生育期蓝水足迹计算公式^[23]为：

$$WF_{\text{blue}} = \frac{IU}{Y}, \quad (5)$$

式中： WF_{blue} 为玉米生育期蓝水足迹(m^3/kg)； IU 为滴灌实际灌水量(根据《微灌工程技术规范 GB-T-50485—2009》，膜下滴灌土壤湿润比取为65%，灌溉水利用系数取为0.95)； Y 为玉米产量(kg/hm^2)。

2) 绿水足迹，本试验定义绿水等于玉米生育期耗水减去灌溉用水。绿水足迹的计算公式^[23]为：

$$WF_{\text{green}} = \frac{GWU}{Y} = \frac{CWU - IU}{Y}, \quad (6)$$

式中： WF_{green} 为玉米生育期绿水足迹(m^3/kg)； GWU 为绿水消耗量(m^3/hm^2)。

一般情况下，绿水消耗量等于作物生育期有效降雨量。在非充分灌溉或无灌溉条件下，有效降雨量可能无法满足作物水分消耗，故产生水分亏缺。因试验区常年干旱，玉米生育期内土壤水分不能维持平衡。当生育期有效降雨量不能满足绿水消耗量，即 $EP < GWU$ 时，土壤水分失衡，产生水分亏缺，因此需要灌水。

在这种情况下，水分亏缺量计算公式^[24]为：

$$MD = GWU - EP, \quad (7)$$

式中： MD 为玉米生育期水分亏缺量(m^3/kg)。

3) 灰水足迹，根据灰水足迹的“短板原理”，定义所需稀释水量最大的污染物氮肥为灰水足迹的来源。这种稀释污染物所需的水并非真实消耗掉了，因此灰水足迹并不是消耗用水足迹。根据Hoekstra等^[23]所述，试验中氮的淋溶率假设为10%。由于试验区域地势平坦且无河流环绕，地下水容易受主要用肥尿素的污染。因此有必要计算以满足地下水含氮量标准所需的稀释氮肥水量。根据中国地下水质量标准(GB/T 14848-93)中III类地下水的标准，地下水含氮量不能超过20 mg/L。由于缺乏有效数据，假定氮在自然水体中的质量浓度为0。玉米灰水足迹计算公式^[23]为：

$$WF_{\text{gray}} = \frac{(\alpha \cdot AR) / (c_{\text{max}} - c_{\text{nat}})}{Y}, \quad (8)$$

式中： WF_{gray} 为玉米灰水足迹(m^3/kg)； α 为氮的淋溶率； AR 为氮肥(NO_3)的使用量(kg/hm^2)； c_{max} 为地下水中氮的标准质量浓度(kg/m^3)； c_{nat} 为氮在自然水体中的质量浓度(kg/m^3)。

4) 玉米生育期总水足迹，玉米生育期总水足迹表示为每单位产量耗水体积，总水足迹(WF_{total})为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹之和^[23]，即：

$$WF_{\text{total}} = WF_{\text{blue}} + WF_{\text{green}} + WF_{\text{gray}}. \quad (9)$$

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌玉米水分消耗

膜下滴灌玉米耗水量自苗期逐步上升，7月耗水量最高，之后耗水量减少(图2)。在生长初期，玉米植株体积小，耗水量低。拔节期—抽雄期，蒸腾量随着叶面积的增加而增加。2015年玉米耗水量在6月即达到峰值，然后逐月降低。2015年降雨量为3 a中最高年份，降雨时间分布也较均匀，耗水量为3 a中最高，玉米耗水高峰期(6—8月)耗水量占生育期总耗水量的77%。2016年降雨量低且分布不均匀，玉米生育期总耗水量

为3 a中最低,而高峰期耗水量占生育期总耗水量的61%,同样为3 a中最低。2014年高峰期耗水量占生育期总耗水量的90%,为3 a中最高。

2.2 膜下滴灌玉米蓝水足迹和绿水足迹

玉米膜下滴灌蓝水指的是灌溉用水,所有其他用水都归为绿水。虽然试验处理(包括实验场地、种子化肥、播种方法和田间管理)都是一样的,但3 a玉米产量由于气候条件的不同而有所不同。因此玉米的蓝水足迹和绿水足迹也不同,特别是绿水足迹差别较大(表2)。膜下滴灌玉米蓝水足迹在0.031~0.039 m³/kg之间,绿水足迹在0.220~0.306 m³/kg之间。总的来说,2015年的玉米绿水足迹最高,而2014年的玉米绿水足迹最低。

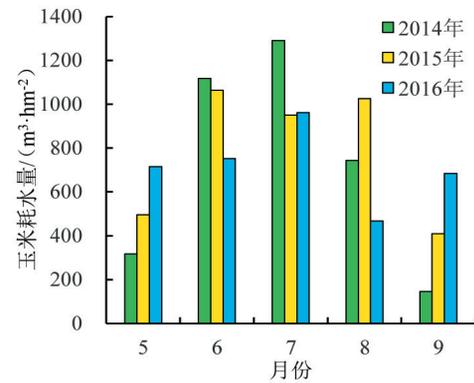


图2 玉米生育期每月耗水量

表2 2014—2016年玉米生育期的蓝水足迹和绿水足迹

年份	CWU/(m ³ ·hm ²)	IU/(m ³ ·hm ²)	GWU/(m ³ ·hm ²)	Y/(kg·hm ²)	WF _{blue} /(m ³ ·kg ⁻¹)	WF _{green} /(m ³ ·kg ⁻¹)
2014	3 618	450	3 168	14 367	0.031	0.220
2015	3 944	450	3 494	11 412	0.039	0.306
2016	3 582	450	3 132	13 252	0.034	0.236

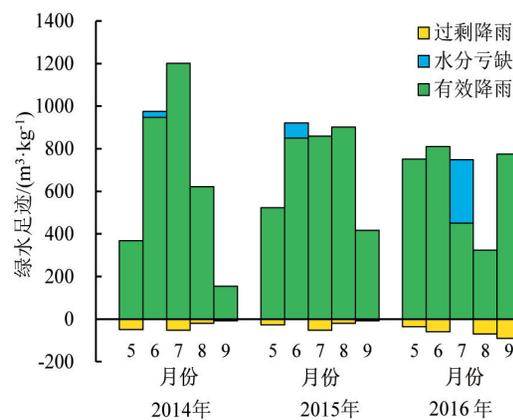


图3 玉米生长绿水足迹构成比较

3 a的大部分时间内(特别是在玉米耗水高峰期),有效降雨量不能满足玉米水分消耗(图3)。因此膜下滴灌玉米绿水由2部分组成:有效降雨和水分亏缺。

由图3并结合表3可知,2014年各月降雨基本能满足玉米水分的消耗,5月过剩降雨(50 m³/hm²)能缓解6月的水分亏缺(28 m³/hm²),玉米生育期总有效降雨量为3 291 m³/hm²。2015年,5月的过剩降雨(26 m³/hm²)有助于缓解6月的水分亏缺(71 m³/hm²),玉米生育期总有效降雨量为3 551 m³/hm²。2016年,7月产生了较大的水分亏缺,6月过剩降雨(59 m³/hm²)与7月水分亏缺(297 m³/hm²)相差较大;2016年玉米生育期总有效降雨量为3 112 m³/hm²。

表3 试验年各月的有效降雨量、水分亏缺和灌水量

年份	5月			6月			7月			8月			9月		
	EP	MD	IU	EP	MD	IU	EP	MD	IU	EP	MD	IU	EP	MD	IU
2014	368	0	0	948	28	150	1 200	0	150	621	0	150	154	0	0
2015	522	0	0	850	71	150	859	0	150	902	0	150	417	0	0
2016	752	0	0	811	0	0	451	297	225	324	0	225	774	0	0

2.3 膜下滴灌玉米灰水足迹

本试验中灰水主要计算氮所污染的水体,每年的玉米生育期总施氮量为240 kg/hm²。根据10%的氮作为污染源进入地下水或地表水的假设,每年的淋溶氮为24 kg/hm²。淋溶氮存在渗入地下水的危险,因此为了确保地下水氮质量浓度达到III类地下水(以人体健康基准值为依据,主要适用于集中式生活饮用水水源及工、农业用水)的标准,有必要计算稀释氮所需的水量。通过式(8)计算得出2014—2016年膜下滴灌玉米生育期灰水足迹分别为0.084、0.105、0.091 m³/kg。一般而言,肥料使用越多灰水足迹越大。

2.4 膜下滴灌玉米总水足迹

玉米生育期水足迹的变化与气候条件密切相关。图4为

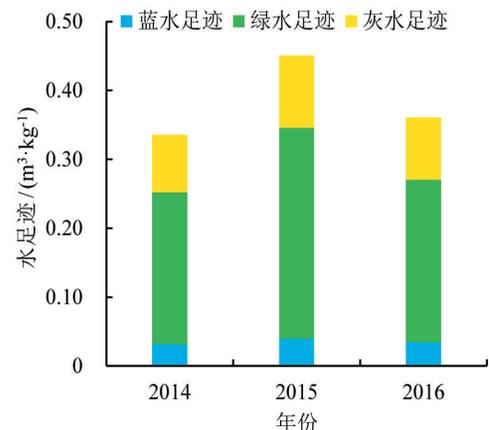


图4 2014—2016年水足迹构成比较

2014—2016年玉米生育期水足迹构成图,图5为2014—2016年玉米生育期降水量和气温分布图。由图4和图5可知,2014年降雨分布正常,玉米生育期总水足迹为 $0.335 \text{ m}^3/\text{kg}$,其中蓝、绿、灰水足迹分别占9.3%、65.8%和24.9%。2015年降雨量较高但时间分布不平衡,玉米生育期总水足迹为 $0.451 \text{ m}^3/\text{kg}$,包括8.7%的蓝水足迹,67.9%的绿色水足迹和23.3%的灰色水足迹。2016年降雨量不仅低且时间分布不均衡,玉米生育期总水足迹为 $0.361 \text{ m}^3/\text{kg}$,其中9.4%为蓝水足迹,65.5%为绿水足迹,25.1%为灰水足迹。绿水足迹是膜下滴灌玉米生育期总水足迹的主要部分(超过65%),其次为灰水足迹,在玉米生产中占重要比例(约1/4)。

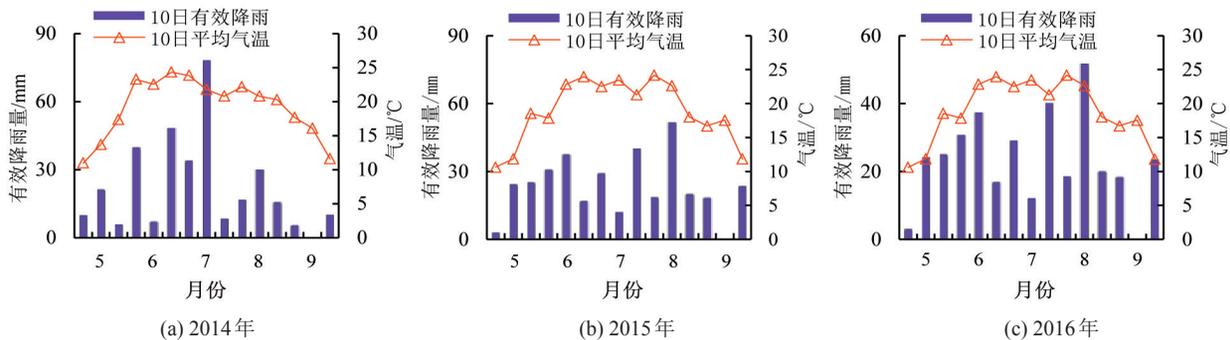


图5 试验年玉米生育期的降雨量和气温分布

3 讨论

本试验中,土壤条件、灌溉量、田间管理措施、施肥方式和施肥量都相同,因此气象条件的差异和灌水时间与次数是影响玉米生长水足迹的主要因素,而有效降雨是影响玉米生育期水足迹的最重要因素。结果表明,多有效降雨量并不能带来高产量低水足迹。所以气温、有效降雨和灌溉时间与次数的组合对玉米生长起了关键作用,而年际间这一组合的变化使每年玉米的生长环境产生差异。气温和有效降雨属于气象条件组合,玉米耗水高峰期的高温和多有效降雨有显著的增产效果,且能有效降低玉米生产水足迹;在降水较少的干旱年份,玉米耗水高峰期少次多量(灌水总量一定)的灌水模式可有效保证玉米产量,还能降低玉米生产水足迹。

2014年,气温和有效降雨的组合有利于玉米生长,7月中旬(拔节期—抽雄期)和8月中旬(抽雄期—灌浆期)临界生育期的强降雨和高温,有利于玉米穗的形成和成熟。2014年的灌水分分别在6月下旬、7月下旬和8月中旬,灌水量都为15 mm,进一步为该时期的玉米生长提供了充足的水分。因此2014年产量最高,水足迹最低。2015年生育期总有效降雨量为3 a最高,但10日有效降雨比较分散。在玉米耗水高峰(7月)不能满足需求,导致玉米生长关键期耗水量低。由于全生育期没有较高的10日有效降雨量,且灌水时间、灌水次数和灌水量都和2014年相同,不能在生长发育的关键阶段玉米提供良好的水分条件,所以2015年产量最低,水足迹最高。2016年有效降雨量为3 a最低,而且6—8月连续的高温,连续高温和缺雨的组合不利于玉米的生长。但由于2016年5月上旬的有效降雨充足,保证了幼苗的生长发育;同时灌水次数根据气候特征调整为7月上旬和8月上旬2次(各22.5 mm),为玉米生长发育关键时期提供了较为充分的水分。因此2016年的产量低于2014年而高于2015年。然而2016年的生育期耗水量为3 a最低,使得水足迹也为3 a最低。

基于水足迹统计的作物生长水足迹研究为分析全球或区域水足迹特征差异提供依据。然而,统计仅能反映平均值,而不是一个区域内的空间差异,并且缺乏作物灌溉面积和灌溉量的特定数据。因此,为了进一步研究水足迹,应进行田间试验,获取作物品种、播期、施肥量,水分利用和产量数据,准确反映当地作物生长。田间试验可以探索作物在相同土壤条件和田间管理生长条件下水分足迹的变化。此外,田间试验可以充分剖析作物水分利用的来源及其对环境的影响。所以,在特定的区域进行一些典型的田间试验有益于区域尺度作物生长水足迹研究,可为进一步的全球或全国范围内的水足迹研究提供依据。田间试验应强调水足迹研究,长期实地试验是最可取的捕获水足迹趋势的方式。此外,较大规模的田间试验应考虑区域复杂性。试验典型地区的分类能反映区域特色和差异,这有助于理解区域复杂性。应通过气象条件、农田管理、作物水足迹差异划分典型区域,反映研究区域农业用水的特点。

4 结论

研究区域内,膜下滴灌蓝水为灌溉用水、绿水为灌溉用水之外的作物生育期耗水量。玉米生育期总水足迹中,绿水足迹占65.5%~67.9%,蓝水足迹占8.7%~9.4%,灰水足迹占23.3%~25.1%。有效降雨量占绿水量的98.6%~103.2%,*EP*占*GWU*分别为103.2%(2014年)、101.0%(2015年)、98.6%(2016年),绿水严重影响了土壤水分平衡。在本研究中,一定量的灌溉水应用于试验区域内,而在不同的年份产生了不同的土壤水分平衡效应。为了半干旱地区农业的高效发展,应根据水文年型确定相应的灌溉方案。

参考文献:

- [1] FRAITURE C D, WICHELNS D, MOLDEN D, et al . Satisfying future water demands for agriculture[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(4): 502-511.
- [2] 胡彬, 刘俊国, 赵丹丹, 等. 基于水足迹理念的水资源短缺评价: 以2022年冬奥会雪上项目举办地为例[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(7): 108-116.
- [3] ERCIN E A, HOEKSTRA A Y. Water footprint scenarios for 2050: a global analysis[J]. *Environment International*, 2014, 64: 71-82.
- [4] 单纯宇, 王素芬. 海河流域作物水足迹研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(5): 50-55.
- [5] HOEKSTRA A Y. Virtual water: an introduction [C]//*Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade-Value of Water Research Report Series No.12*. Delft, Netherlands: IHE, 2003.
- [6] ALLAN J A. Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits[J]. *Ground Water*, 1998, 36(4): 545-546.
- [7] RIDOUTT B G, EADY S J, SELLAHEWA J, et al. Water footprinting at the product brand level: case study and future challenges[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(13): 1 228-1 235.
- [8] RODRIGUEZ C I, GALARRETA A R D V, KRUSE E E. Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 90(1): 91-96.
- [9] ROCKSTRÖM J. On-farm green water estimates as a tool for increased food production in water scarce regions[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 1999, 24(4): 375-383.
- [10] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 63-72.
- [11] 孙世坤, 王玉宝, 吴普特, 等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 142-148.
- [12] ALDAYA M M, ALLAN J A, HOEKSTRA A Y. Strategic importance of green water in international crop trade[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(4): 887-894.
- [13] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 749-758.
- [14] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. Temporal variability of water footprint for maize production: the case of Beijing from 1978 to 2008[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(7): 2 447-2 463.
- [15] 段青松, 何丙辉, 字淑慧, 等. 两种玉米的生产水足迹研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(8): 78-82.
- [16] XINCHUN C, MENG YANG W, RUI S, et al. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 84-93.
- [17] 吴楠, 郑雅莲, 栾雅璐, 等. 基于试验的稻田作物生产水足迹计算方法研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(11): 19-24.
- [18] 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.
- [19] 邹立尧, 赵秀兰. 黑龙江省农业气候背景分析[J]. *黑龙江气象*, 2000(1): 34-38.
- [20] 张治, 田富强, 钟瑞森, 等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 44-51.
- [21] ZHANG X, CHEN S, SUN H, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. *Irrigation Science*, 2008, 27(1): 1-10.
- [22] 刘庆华, 王立坤, 马永胜. 行间覆膜节水技术集雨作用的研究[J]. *东北农业大学学报*, 2006, 37(3): 367-369.
- [23] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment Manual[J]. *Social and Environmental Accountability Journal*, 2012: 181-182.
- [24] QIN L, JIN Y, DUAN P, et al. Field-based Experimental Water Footprint Study of Sunflower Growth in a Semiarid Region of China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(9): 3 266-3 273.
- [25] 李仙岳, 彭遵原, 史海滨, 等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 97-103.
- [26] 王罕博, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 88-94.
- [27] 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 93-104.

Study on the Water Footprint of Maize under Mulched Drip Irrigation in a Semiarid Region of Northeast China

TAN Zhixiang^{1,2}, ZHANG Zhongxue^{1*}, NIE Tangzhe¹

(1.College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2.Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agriculture Water Resources Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: 【Objective】 Water footprint of crop growing at field scale plays an important role in developing sustainable agricultural water use strategy, and this paper aimed to investigate the changes in the water footprint of maize production in a semi-arid area of Northeast China. 【Method】 We conducted a three-year field experiment. During the experiment, the composition of blue, green and grey water during the whole growth season of maize under mulched drip irrigation was determined. We also analyzed soil water balance and the water footprint under different temperatures, precipitation and irrigation timing. 【Result】 ①In the water footprint for the maize production, the green water footprint accounted for 65.5%~67.9%, blue water footprint for 8.7%~9.4%, and gray water for 23.3%~25.1%. ②When temporal rainfall distribution can meet the water demand of the maize, the effective precipitation accounted for 103.2% of the green water. High temperature and sufficient effective precipitation at the peak of water consumption by the maize could significantly increase the yield, thus effectively reducing the water footprint. ③In years with large water deficit, under the same total amount of irrigation, reducing irrigation frequency during peaking water consumption period could effectively increase yield and thereby reduce water footprint. ④An even rainfall distribution in the growth season of the maize reduced its yield and increased the water footprint. 【Conclusion】 According to our experimental results, the green water resources in the maize production can be effectively protected by plastic film mulching. It is necessary to formulate a reasonable irrigation schedule for different hydrological years to enhance the yield and reduce the water footprint.

Key words: mulched drip irrigation; maize; water footprint; semi-arid area of Northeast China

责任编辑:白芳芳

关于评选优秀论文的公告

为鼓励创新,本刊已开启优秀论文评选活动,每年评选优秀论文10篇,每篇奖励1000元,并颁发获奖证书,届时将在期刊网站首页展示,同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部