

黄淮海北片麦田微喷灌水量对土壤贮水耗水及水分利用效率的影响

亢秀丽, 靖华, 马爱平, 王裕智, 崔欢虎

(山西省农业科学院小麦研究所, 山西 临汾 041000)

摘要: 为有效应对灌溉水资源短缺, 明确麦田微喷灌水量的土壤贮水耗水特征, 在山西临汾盆地采用大区对比方法, 开展了微喷灌水量对土壤贮水耗水及水分利用效率影响的研究。结果表明: 返青期、拔节期、灌浆期及成熟期 0—100、0—200、100—200 cm 土层土壤贮水量基本呈现随微喷灌水量的增加而提高, 微喷灌水量 150 mm 与 75 mm、150 mm 与 0 mm、75 mm 与 0 mm 处理间返青期至成熟期 0—200 cm 土层贮水量均存在显著性差异; 播前至成熟期阶段 0—100、0—200、100—200 cm 土层的土壤耗水量呈现随灌水量的增加而减小, 其中浅层(0—100 cm)耗水量所占 0—200 cm 耗水量比例各处理均大于深层(100—200 cm)耗水量所占 0—200 cm 耗水量比例, 随灌水量的增加浅层(0—100 cm)耗水所占比例提高, 而深层(100—200 cm)耗水所占比例则降低, 不同微喷灌水量 0—100、100—200 cm 土层在不同生育阶段的耗水量与该阶段的初始贮水量均分别呈正相关和负相关; 在微喷灌水量 0~150 mm 范围内, 水分利用效率和产量均随微喷灌水量的增加而提高, 当灌水量达 525 mm 时, 产量虽有增加但水分利用效率下降, 而灌溉水利用效率则表现为随灌水量的上升而下降。研究结果可为水资源短缺对小麦生产系统的影响提供理论依据和技术支撑。

关键词: 微喷灌; 小麦; 土壤水分; 水分利用效率

中图分类号: S152.7; S275.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0221-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.035

Effects of Micro Sprinkler Irrigation Amounts on Soil Water Storage and Consumption and Water Use Efficiency in the North of Huang-Huai-Hai Wheat Field

KANG Xiuli, JING Hua, MA Aiping, WANG Yuzhi, CUI Huanhu

(Wheat Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen, Shanxi 041000)

Abstract: In order to effectively cope with the shortage of irrigation water resources and to clarify the soil water storage and consumption characteristics in wheat field under micro sprinkler irrigation, the effects of micro sprinkler irrigation amounts on soil water storage and consumption and water use efficiency (WUE) were studied in Linfen Basin, Shanxi Province, by means of large-scale contrast method. The results showed that the soil water storage in 0—100, 0—200 and 100—200 cm soil layers at greening stage, jointing stage, filling stage and maturity stage increased with the increase of micro sprinkler irrigation amounts. The soil water storage in 0—200 cm soil layers from greening stage to maturity stage had significant differences between 150 mm and 75 mm of micro sprinkler irrigation amounts, 150 mm and 0 mm, and even between 75 mm and 0 mm. With the increase of micro sprinkler irrigation amounts from pre-sowing to maturity stage, soil water consumption in 0—100, 0—200 cm and 100—200 cm soil layers decreased. All the proportions of soil water consumption in shallow layer (0—100 cm) to the entire 0—200 cm were greater than those in deep layer (100—200 cm). And the proportions of shallow layer (0—100 cm) increased with the increase of micro sprinkler irrigation amounts, while those in deep layer (100—200 cm) decreased. The soil water consumption in 0—100 and 100—200 cm soil layers at different growth stages had positive and negative correlations

收稿日期: 2018-08-20

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300203-2); 山西省科技厅重大科技专项(201703D211002-5)

第一作者: 亢秀丽(1971—), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事旱作节水农业研究。E-mail: kxiuli03@163.com

通信作者: 马爱平(1966—), 女, 学士, 研究员, 主要从事旱作节水农业研究。E-mail: mapingliff@163.com

respectively with the initial soil water storage in the corresponding stage. The WUE and yield increased with the increase of micro sprinkler irrigation amounts in 0~150 mm. When micro sprinkler irrigation amount reached 525 mm, the yield increased but WUE decreased. The irrigation water use efficiency (IWUE) decreased with increase of irrigation amounts. These findings provide theoretical basis and technical support for the impacts of water shortage on wheat production system.

Keywords: micro sprinkler irrigation; wheat; soil water; water use efficiency

黄淮海北片麦区是我国小麦的主产区,其包括晋南盆地、河北和山东大部。该区水浇地小麦产量丰欠直接关系到本区小麦总产,但随着该区灌溉水资源紧缺局面的加重,本区灌溉小麦将面临严峻的挑战。为此,广大科技工作者围绕有限灌溉开展了较多研究,主要集中在限量控制灌水与小麦生理特性^[1]、根系发育^[2]、播期密度^[3-4]、产量提高^[5]及水分利用效率^[6-7]等方面,这些研究成果为有限灌溉奠定了良好的理论基础及技术支持。但以往这些研究成果其灌溉方式大多采用小畦定额灌溉,其研究结果与目前节水灌溉方式的微喷带灌溉对各种参数的影响存在一定差异^[8],以往畦灌方式条件下有关不同灌水量对浅层(0—100 cm)、深层(100—200 cm)土壤贮水耗水特征研究较少,而有关微喷带灌溉方式对浅层(0—100 cm)、深层(100—200 cm)不同生育阶段的土壤贮水耗水特征、某一生育阶段耗水量与该阶段初始贮水量的线性关系及其对水分利用效率的研究也较少。本项研究旨在采用微喷带灌溉方式,通过设置不同微喷灌水量,探明不同微喷灌水量对不同生育阶段不同土层土壤的贮水耗水特征及对水分利用效率的影响,以期小麦实施微喷带灌溉方式及节水灌溉提供理论与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017—2018 年在山西省农业科学院小麦研究所韩村试验基地进行。试验地海拔 459.00 m,常年平均降水量 457.71 mm,年平均气温 13.08 °C,≥0 °C 积温 4 965.60 °C,≥10 °C 积温 4 436.22 °C。试验年度休闲期(6 月中下旬至 9 月)降水量 336.90 mm 较常年(295.93 mm)多 40.97 mm,小麦生育期间(10 月至翌年 6 月上旬)降水量 203.00 mm,较常年(161.78 mm)多 41.22 mm,小麦生育期间属降雨偏多年型。试验地地势平坦,土壤质地为轻黏土质。

1.2 试验材料

微喷灌输水管(φ 90 mm)、微喷带(φ 40 mm、孔口形式为斜 5 孔)、四通(φ 90 mm)、旁通(φ 40 mm)均由河北省雨燕灌溉设备有限公司生产;桂湖牌复合

肥(N、P₂O₅、K₂O 分别为 25.0%,14.0%,6.0%)由成都市新都化工股份有限公司生产。

1.3 试验方法

试验采用大区组对比方法,根据黄淮海北片(山西)麦田降水趋势特征^[9]与缺水灌溉区的水资源条件^[10],试验共设 4 个处理,分别为雨养条件即生育期微喷灌水量 0 mm、生育期微喷灌水量 75 mm(起身期 25 mm + 孕穗期 30 mm + 灌浆期 20 mm,简称微喷灌水量 75 mm,下同)、生育期微喷灌水量 150 mm(冬前 25 mm + 起身期 35 mm + 孕穗期 60 mm + 灌浆期 30 mm)、邻近大田生育期大水漫灌 525 mm(冬前 250 mm、拔节期 150 mm、灌浆期 150 mm)。其中微喷灌水量 75,150 mm 处理冬前、起身期、孕穗期、灌浆期微喷灌时间均分别为 2017 年 12 月 1 日、2018 年 3 月 18 日、2018 年 4 月 16 日、2018 年 5 月 16 日。邻近大田生育期大水漫灌 525 mm 处理冬前、拔节期、灌浆期灌水时间分别为 2017 年 12 月 5 日、2018 年 4 月 5 日、2018 年 5 月 16 日。试验小区面积为长 18 m,宽 10 m,每个小区中设计有 4 条微喷带即微喷带间距 2.50 m,其微喷带铺设方向与小麦种植方向垂直^[11]。试验于 2017 年 10 月 14 日播种,播种量 525 万粒/hm²,播前底施化肥 750 kg/hm²。

1.4 测定内容

(1)土壤水分测定。用烘干称重法(质量百分率)测定土壤水分,土壤贮水量计算公式为: $A=W \times \rho \times H$ 。式中: A 为土壤贮水量(mm); W 为质量百分数(%); H 为土层厚度(mm); ρ 为土壤容重(g/cm³);某生育阶段土壤耗水量(mm) = 该生育阶段初始土壤贮水量(mm) - 该生育阶段终止土壤贮水量(mm);各生育时期土壤水分测定时间,播前 2017 年 10 月 6 日,返青起身期 2018 年 3 月 4 日,拔节孕穗期 2018 年 4 月 1 日,灌浆期 2018 年 5 月 12 日,成熟期 2018 年 6 月 13 日。各处理各生育期均对 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120, 120—140, 140—160, 160—180, 180—200 cm 土层水分测定;2018 年 3 月 9 日用环刀法测定 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120, 120—140, 140—160, 160—180, 180—200 cm 的土壤容重。

(2)产量测定。收获期对每个处理单收单打计产。

(3)水分利用效率和灌溉水利用效率测定。水分利用效率计算公式为: $WUE=Y/((PSS-MS)+P+IW)$ 。式中: WUE 为水分利用效率($kg/(mm \cdot hm^2)$); Y 为单位面积收获籽粒产量(kg/hm^2); PSS 为播前土壤贮水量(mm); MS 为成熟期土壤贮水量(mm); P 为全生育期降水量(mm); IW 为全生育期灌溉水量(mm)。灌溉水利用效率计算公式为: $IWUE=(Y_1-Y_2)/(IW)$ 。式中: $IWUE$ 为灌溉水利用效率($kg/(mm \cdot hm^2)$); Y_1 为某灌溉量单位面积收获籽粒产量($kg/(mm \cdot hm^2)$); Y_2 为无灌溉单位面积收获籽粒产量($kg/(mm \cdot hm^2)$); IW 为灌溉水量(mm)^[12]。

1.5 数据处理

试验数据用 Excel 2003 和 DPS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 微喷灌水量对不同生育期不同土层贮水量的影响

由图 1、表 1 可知,不同微喷灌水量对不同生育期不同土层贮水量的影响不同。0—100, 0—200, 100—200 cm 土层返青期、拔节期、灌浆期及成熟期土壤贮水量基本随微喷灌水量的上升在增加,即返青期、拔节期、灌浆期及成熟期各土层的贮水量微喷灌水量 $150\text{ mm} > 75\text{ mm} > 0\text{ mm}$;对各生育期不同土层土壤贮水量进行配对两处理 t 检验分析,微喷灌水量 150 mm 与 75 mm 对返青期、拔节期、灌浆期、成熟期 0—100, 0—200 cm 土层贮水量存在显著性差异,而对 $100—200\text{ cm}$ 土层贮水量不存在显著性差异;微喷灌水量 75 mm 与 0 mm 对返青期、拔节期、灌浆期、成熟期 0—100, $100—200\text{ cm}$ 土层贮水量不存在显著性影响,对 $0—200\text{ cm}$ 土层贮水量存在显著性影响;微喷灌水量 150 mm 与 0 mm 对返青期、拔节期、灌浆期、成熟期 0—100, $0—200\text{ cm}$ 土层的贮水量影响均存在显著性差异,而对 $100—200\text{ cm}$ 土层的贮水量不存在显著差异。

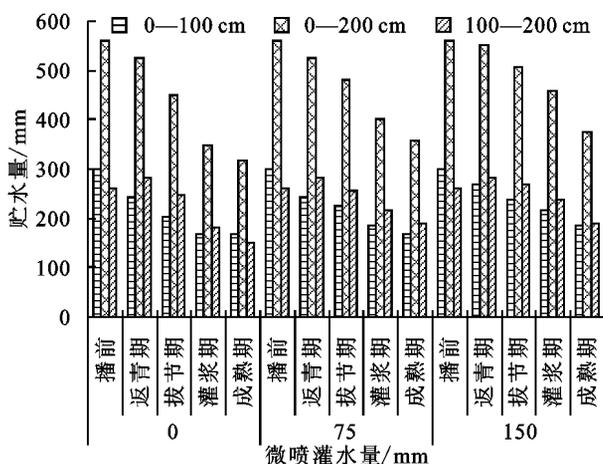


图 1 微喷灌水量对不同生育期不同土层贮水量的影响

表 1 不同微喷灌水量处理的不同生育期不同土层贮水量配对 t 值显著性检验

土层深度/cm	微喷灌水量/mm	0 mm	75 mm
0—100	75	1.7769—	
	150	4.8957+	5.6006+
0—200	75	2.7114+	
	150	3.7299+	4.0865+
100—200	75	2.1679—	
	150	2.4841—	1.7262—

注: +表示两处理差异显著($p < 0.05$); —表示两处理差异不显著($p > 0.05$)。

2.2 微喷灌水量对不同生育阶段不同土层耗水量、耗水比例的影响

2.2.1 微喷灌水量对不同生育阶段不同土层耗水量的影响 由图 2 可知,不同微喷灌水量对不同生育阶段不同土层耗水量的影响不同。不同微喷灌水量对不同生育阶段 0—100 cm 土层土壤耗水量的影响为:播前至成熟全生育阶段 0—100 cm 土层的土壤耗水量大小为微喷灌水量 $0\text{ mm} > 75\text{ mm} > 150\text{ mm}$,其中微喷灌水量 0 mm 与 75 mm 处理二者差异不大,二者与微喷灌水量 150 mm 处理相差约 20 mm ;其他生育阶段土壤耗水量表现为播前至返青以微喷灌水量 $0, 75\text{ mm}$ 最大,返青期至拔节期以 0 mm 最大,拔节期至灌浆期以 75 mm 最大,灌浆期至成熟期以 150 mm 最大;不同微喷灌水量对不同生育阶段 $100—200\text{ cm}$ 土层土壤耗水量的影响为:播前至成熟全生育阶段 $100—200\text{ cm}$ 土层的土壤耗水量大小为微喷灌水量 $0\text{ mm} > 75\text{ mm}$ 或 150 mm ,其中微喷灌水量 150 mm 与 75 mm 处理耗水量基本相同,二者与微喷灌水量 0 mm 处理相差约 39 mm ;播前至返青期阶段各处理的耗水量均为负值,主要是由于播后冬前降雨量较大所致,但三者差异不大;微喷灌水量 150 mm 处理在播前一返青期、返青期—拔节期、拔节期—灌浆期、灌浆期—成熟期 4 个阶段土壤耗水量均呈现随生育期延后其耗水量增加,而微喷灌水量 $0, 75\text{ mm}$ 处理在播前一返青期、返青期—拔节期、拔节期—灌浆期 3 个阶段土壤耗水量也呈现随生育期延后其耗水量增加,但在灌浆期—成熟期阶段二者的耗水量均减小。不同微喷灌水量对不同生育阶段 0—200 cm 土层土壤耗水量的影响为:播前至成熟全生育阶段土壤耗水特点与不同微喷灌水量对不同生育阶段 0—100 cm 土层土壤贮水量的影响趋势一致,即随微喷灌水量提高耗水量减小;其中 150 mm 处理在播前一返青期、返青期—拔节期、拔节期—灌浆期、灌浆期—成熟期 4 个阶段土壤耗水量均呈现随生育期延后其耗水量增加,而微喷灌水量 $0, 75\text{ mm}$ 处理在播前一返青期、返青期—拔节期、拔节期—灌浆期 3 个阶段土壤耗水量也呈现随生育期延后其耗水量增加,

但在灌浆期—成熟期阶段二者的耗水量均减小,其与100—200 cm 土层土壤耗水量趋势一致。综合以上分析表明,0—100,100—200,0—200 cm 的土壤耗水量均随着微喷灌水量的增大在减小,表明微喷灌水量大并不利于土壤水分的供给或输出。

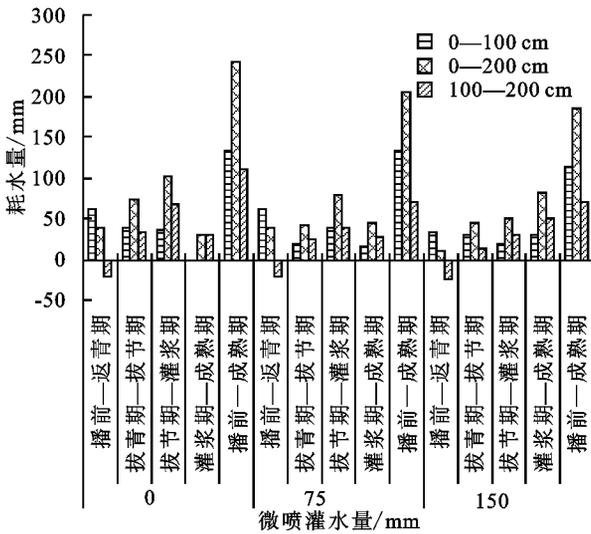


图 2 微喷灌水量对不同生育阶段不同土层耗水量的影响

2.2.2 灌水量对播种至成熟全生育阶段不同土层耗水比例的影响 由图 3 可知,灌水量对播种至成熟全生育阶段不同土层耗水比例的影响不同。无论灌溉与不灌溉、灌水量大与小,0—100 cm 土壤耗水量所占 0—200 cm 土壤耗水量比例均大于 100—200 cm 土壤耗水量占 0—200 cm 土壤耗水量比例,表明 0—100 cm 土层是供水的主要来源;进一步分析不同灌水量对浅层土壤(0—100 cm)耗水量、深层土壤(100—200 cm)耗水量所占 0—200 cm 土层耗水量的比例看出,浅层土壤(0—100 cm)耗水量所占比例基本呈现随灌水量的加大在提高,而深层土壤(100—200 cm)耗水量所占比例则是随灌水量的加大在降低,特别是大水漫灌即生产对照处理 525 mm 深层土壤(100—200 cm)耗水比例均较不同微喷灌水量处理低,表明常规生产对照灌溉方式及灌水量其深层土壤(100—200 cm)贮水可视为无效水或渗漏水。

2.3 微喷灌水量不同土层在不同生育阶段的初始贮水量对该生育阶段耗水量的影响

由表 2 可知,微喷灌水量不同土层在不同生育阶段

的初始贮水量对该生育阶段耗水量的影响不同。各微喷灌水量条件下 0—100 cm 土层在不同生育阶段的耗水量与该阶段的初始贮水量均呈正相关,其中微喷灌水量 0 mm 处理基本接近显著水平;100—200 cm 土层在不同生育阶段的耗水量与该阶段的初始贮水量均呈负相关;0—200 cm 土层在不同生育阶段的耗水量与该阶段的初始贮水量在微喷灌水量 0 mm 条件下呈正相关,而在 75,150 mm 条件下均呈负相关。

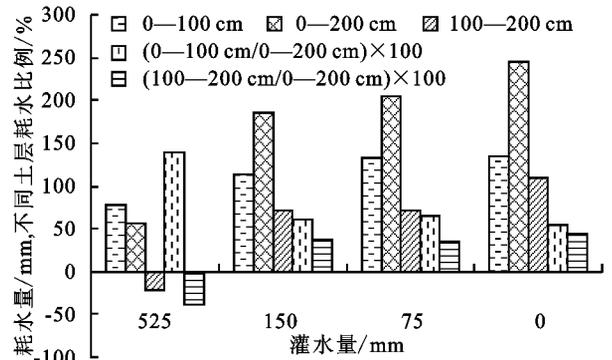


图 3 灌水量对播种至成熟期不同土层耗水比例的影响

表 2 微喷灌水量不同土层在不同生育阶段的初始贮水量对该生育阶段耗水量的影响

微喷灌水量/mm	土层深度/cm	回归方程	R^2	p
0	0—100	$y = -59.5522 + 0.4091x$	0.88	0.06
	100—200	$y = 48.8098 - 0.0885x$	0.01	0.89
	0—200	$y = 30.8461 + 0.0641x$	0.03	0.82
75	0—100	$y = -49.3160 + 0.3480x$	0.67	0.18
	100—200	$y = 57.0119 - 0.1547x$	0.02	0.85
	0—200	$y = 81.5801 - 0.0618x$	0.05	0.77
150	0—100	$y = 6.9234 + 0.0849x$	0.25	0.50
	100—200	$y = 179.9535 - 0.6165x$	0.14	0.63
	0—200	$y = 333.5213 - 0.5528x$	0.85	0.08

注: y 为不同生育阶段耗水量(mm); x 为不同生育阶段初始贮水量(mm)。

2.4 灌水量对水分利用效率及灌溉水利用效率的影响

由表 3 可知,灌水量对水分利用效率及灌溉水利用效率的影响不同。在微喷灌水量 0~150 mm 范围内,水分利用效率和产量均随微喷灌水量的增加而提高,当灌水量达 525 mm 时,产量虽有增加但水分利用效率在下降;灌溉水利用效率随着灌水量的上升呈下降趋势。

表 3 灌水量对水分利用效率及灌溉水利用效率的影响

微喷灌水量/mm	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤贮水量/mm		生育期 降水量/mm	总耗 水量/mm	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌溉水利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)
		播前	收获				
0	2962.65	561.86	317.85	185.1	429.11	6.90	
75	3632.10	561.86	357.07	185.1	464.89	7.81	8.93
150	4096.05	561.86	383.63	185.1	513.33	7.98	7.56
525	5610.15	561.86	506.22	185.1	765.74	7.33	5.04

3 讨论

3.1 微喷灌水量及其节水效果

随着灌溉水资源硬性约束愈加凸现,山仑^[9]从植物抗旱生理研究的角度提出了发展半旱地农业,并认为在缺水灌区保持现有灌溉农田高产的同时,做到大量减少灌溉用水,其低限可考虑在 $100 \text{ m}^3/667 \text{ m}^2$,即 150 mm 的灌溉水量;董志强等^[8]研究认为在平水年灌水量 90~120 mm,枯水年灌水量 105~150 mm,单次灌水定额 30~45 mm,可获得较高的籽粒产量;王裕智等^[11]研究表明实施微喷灌方式其节水率可达 63.25%,且可提高耕地利用率 16.5%(去除畦埂);本课题组 2016—2017 年度在山西省农业科学院小麦研究所韩村试验基地示范微喷灌 1 hm^2 ,全生育期喷施 4 次(冬前、返青期、孕穗期、灌浆期),每次喷灌水量 30 mm,共灌水量 120 mm,产量达 $8\ 250 \text{ kg/hm}^2$ 。这些理论与技术研究结果均表明,微喷灌灌溉方式既可有效节水又可显著提高产量,是目前应对水资源危机的有效措施。本年度试验在灌水量 150 mm 的单产水平与前人^[8,11]和本课题组 2016—2017 年度的单产结果相比偏低,其主要原因是由于 2018 年 4 月 6—7 日发生低温过程对小麦造成了冻害所致。在以后的微喷灌理论与技术研究中应重视与极端气象因子如温度变化的相关研究。

3.2 浅层水与深层水的利用比例

在灌溉条件下,居辉等^[13]在畦灌条件下有关不同灌溉制度冬小麦产量效应与耗水特征研究结果认为,春无灌水处理的土壤耗水占到了总耗水量的 84.9%,其中 19.0%来自于 130—200 cm 的深层贮水,而春灌 2 水处理的土壤耗水则分别为 49.9%和 1.9%,褚桂红等^[14]同样开展了灌水量 0,75,150,225 mm 对不同土层耗水量的研究,结果表明,随着灌水量的增加 120—160 cm 土层的耗水比例呈降低的趋势,这与本研究的结果相近;但刘庚山等^[15]在畦灌条件下对不同供水处理的研究结果表明,一次性供水(拔节期 75 mm)、分次供水(返青期供水 37.5 mm,拔节期供水 37.5 mm)、返青期后无水分供应在 100—200 cm 土层土壤供水率则表现为一次供水和分次供水均大于返青期后无水分供应,马瑞昆等^[16]同样在畦灌条件下开展了足水(浇越冬、拔节、抽穗和灌浆 4 水共 279 mm)和节水(拔节前控水、浇拔节、抽穗和灌浆 3 水共 204 mm)的研究,其

通过测定不同灌水处理在不同土层的根量,认为节水处理可更多利用土壤深层水库的水分,这与本研究结果不尽相同,这可能是由于试验条件所处的气候条件、土壤质地特征不同所致;本研究的大水漫灌 525 mm 其深层(100—200 cm)土壤贮水不但没有消耗而且增加,表明过量灌溉是造成深层(100—200 cm)土壤贮水量增加的主要原因,可视为无效水或渗漏水,这较崔欢虎等^[17]关于旱地小麦最佳土壤库容深度模拟结果偏低。在雨养条件下,马爱平等^[18]开展了覆膜种植模式与露地条播种植模式对不同土层耗水比例的影响研究,结果表明,100—200 cm 土层的耗水量占 0—200 cm 耗水量比例覆膜种植模式大于露地条播种植模式。综合灌溉与雨养条件分析,麦田灌溉水量的不同会造成不同土层耗水比例的不同,而麦田所处环境温度(覆膜种植模式较露地条播种植模式增温)的不同,同样会造成不同土层耗水比例的不同。因此,在未来气候变暖情景下,应注重研究温度与不同土层耗水量及比例的相关性。

3.3 水分利用效率和灌溉水利用效率

褚桂红等^[14]开展了灌水量 0,75,150,225 mm 对水分利用效率和灌溉水利用效率的研究,结果表明,水分利用效率在灌水量 0~150 mm 范围内,其水分利用效率随灌水量的增加而提高,当灌水量达 225.0 mm 时水分利用效率有下降的趋势,灌溉水利用效率则表现为随灌水量的增加而降低;曹刚等^[19]同样开展了春季 1 水(60 mm)、春季 2 水(120 mm)、春季 3 水(180 mm)对灌溉水利用效率的研究,结果表明,随着灌溉次数与灌水量的增大,其灌溉水利用效率呈降低趋势。综合以上研究及本研究结果,灌水量在 0~150 mm 范围内其水分利用效率随灌水量的增加而提高,而灌溉水利用效率则表现为灌水量 >75 mm 则会降低灌溉水利用效率。

4 结论

(1) 试验不同微喷灌水量条件下,小麦关键生育时期不同土层的贮水量随微喷灌水量的增加在提高,且微喷灌水量 150 mm 与 75 mm、150 mm 与 0 mm、75 mm 与 0 mm 处理间,在关键生育时期 0—200 cm 土层贮水量均存在显著性差异。

(2) 试验不同灌水量条件下,全生育阶段不同土层的耗水量表现为 0—100,0—200,100—200 cm 土层的土壤耗水量呈现随灌水量的增大而减小;全生育

阶段不同土层的耗水比例表现为:浅层(0—100 cm)土壤耗水量比例大于深层(100—200 cm)土壤耗水量比例,浅层(0—100 cm)土壤耗水量所占比例呈现随灌水量的增加在提高,而深层(100—200 cm)土壤耗水量所占比例则是随灌水量的增加在降低。

(3) 试验不同灌水量条件下,各微喷灌水量处理 0—100 cm 土层在不同生育阶段的耗水量与该阶段的初始贮水量均呈正相关,100—200 cm 土层在不同生育阶段的耗水量与该阶段的初始贮水量均呈负相关,有关微灌条件下不同生育阶段的耗水量与该阶段的初始贮水量的线性关系未见报道,这可能是本项研究新颖之处;在微喷灌水量 0~150 mm 范围内,水分利用效率和产量均随微喷灌水量的增加而提高,当灌水量达 525 mm 时,产量虽有增加但水分利用效率在下降,灌溉水利用效率在灌水量 >75 mm 则出现大幅度下降。

参考文献:

- [1] 杨静敬,蔡焕杰,王健,等. 灌水处理对冬小麦生理生长特性等的影响研究[J]. 灌溉排水学报,2009,28(1):52-55.
- [2] 关军锋,李广敏. 施磷对限水灌溉小麦根冠及产量的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2004,12(4):108-111.
- [3] 郭凌云. 限量灌溉条件下不同播期对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 山东农业科学,2010,42(8):44-45.
- [4] 郭凌云. 限量灌溉下不同密度对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 山东农业科学,2010,42(7):51-52.
- [5] 杨静敬,路振广,邱新强,等. 不同灌水定额对冬小麦耗水规律及产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2013,32(3):87-89.
- [6] 于利鹏,黄冠华,刘海军,等. 喷灌灌水量对冬小麦生长、耗水与水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(8):2031-2037.

(上接第 220 页)

- [19] Jiang G M, He W M. Species and habitat variability of photosynthesis, transpiration and water use efficiency of different plant species in Maowusu Sand Area [J]. Acta Botanica Sinica, 1999, 41(10):1114-1124.

- [7] 崔欢虎,王娟玲,马步州,等. 茬口和灌水对小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2009,17(3):479-483.
- [8] 董志强,张丽华,李谦,等. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特性[J]. 作物学报,2016,42(5):725-733.
- [9] 山仑. 植物抗旱生理研究与发展半旱地农业[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(1):1-5.
- [10] 张卉,程永明,江渊. 山西省近 49 年降水量变化特征及趋势分析[J]. 中国农学通报,2014,30(8):197-204.
- [11] 王裕智,靖华,亢秀丽,等. 窄行距条播密植作物微喷带高效节水喷灌方法研究[J]. 农学学报,2018,8(2):51-54.
- [12] 段爱旺. 水分利用效率的内涵及使用中需要注意的问题[J]. 灌溉排水学报,2005,24(1):8-11.
- [13] 居辉,兰霞,李建民,等. 不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究[J]. 中国农业大学学报,2000,5(5):23-29.
- [14] 褚桂红,杨丽霞. 非充分灌溉对冬小麦产量及水分利用效率影响研究[J]. 节水灌溉,2016(8):54-56,60.
- [15] 刘庚山,郭安红,任三学,等. 人工控制有限供水对冬小麦根系生长及土壤水分利用的影响[J]. 生态学报,2003,23(11):2342-2352.
- [16] 马瑞昆,贾秀领,蹇家利,等. 前期控水条件下冬小麦的根系和群体光合作用特点[J]. 麦类作物学报,2001,21(2):88-91.
- [17] 崔欢虎,张松令,闫翠萍,等. 黄土高原旱地小麦最佳土壤库容深度模拟研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):110-112.
- [18] 马爱平,亢秀丽,靖华,等. 旱地冬小麦茬口、种植模式对土壤贮水、耗水及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):168-171.
- [19] 曹刚,崔彦生,孟建. 春季不同灌水处理对冬小麦产量的影响[J]. 中国农学通报,2007,23(3):466-468.
- [20] Xia J B, Zhang S Y, Zhang G C, et al. Critical responses of photosynthetic efficiency in *Campsis radicans* (L.) Seem to soil water and light intensities [J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(77): 17748-17754.