

文章编号:1000-8551(2020)04-0839-10

# 微喷灌对夏玉米产量和水分利用效率的影响

郑孟静<sup>1</sup> 张丽华<sup>1</sup> 董志强<sup>1</sup> 申海平<sup>1</sup> 姚海坡<sup>1</sup> 张丽荣<sup>2</sup> 贾秀领<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>河北省农林科学院粮油作物研究所,河北 石家庄 050035;<sup>2</sup>衡水市林业局,河北 衡水 053000

**摘要:**为研究微喷灌对夏玉米产量和水分利用效率(WUE)的影响,本试验在早棚条件下以郑单958为试验材料,设置2种灌水方式:微喷灌P(灌水定额:38 mm/次)和畦灌Q(灌水定额:75 mm/次),3种灌水次数:1次(W1)、2次(W2)和3次(W3),采用土壤水分测定仪实时监测整个夏玉米生长季多土层(0~200 cm)土壤体积含水量的动态变化。结果表明,在2种灌水模式下,随着灌水次数的增加(总灌水量增加),夏玉米产量呈增加趋势;相同灌水次数下,微喷灌处理的产量均低于畦灌。与QW1相比,PW2灌水量相同、灌水次数较多,产量提高5.0%;与QW2相比,PW3灌水量减少24%、灌水次数增加,产量提高14.3%。与QW1和QW2相比,PW3植株具有较高的穗位叶光合速率和干物质积累量,且增加了粒重和产量。进一步分析微喷灌(PW2)和畦灌(QW2)的耗水特性发现,与QW2相比,PW2叶面积指数、穗位叶蒸腾速率、阶段耗水量、耗水强度、灌水后日蒸散量及对0~100 cm土层水分的消耗均降低,而深层尤其是100 cm以下土壤水分的利用比例增加,进而PW2全生育期总蒸散量降低10.8%,WUE提高10.3%。综上所述,在华北地区夏玉米足墒播种前提下,采用微喷灌控水方式,灌水定额38 mm、灌水2~3次,可在保障产量的前提下,提高WUE。本研究对华北缺水地区压采地下水,实现节本增效具有重要的理论指导意义。

**关键词:**夏玉米;微喷灌;产量;水分利用效率

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.04.0839

华北平原是我国夏玉米主产区,该地区自70年代以来夏季降水量逐年递减<sup>[1]</sup>,且时空分布不均,干旱时常发生<sup>[2]</sup>,补充灌溉是提高该地区玉米产量及水分利用效率的重要措施。该区灌水方式常采用大水漫灌,灌水量大且不易控制,水分利用效率(water use efficiency, WUE)低,易造成灌溉水大量下渗、养分淋溶和地下水污染等一系列生态环境问题<sup>[3]</sup>。因此,采用先进的节水灌溉技术,减少灌水定额、提高水分利用效率是该地区夏玉米节本增效和实现可持续发展的重要途径。

与传统畦灌相比,喷灌作为一种先进的节水灌溉方式,具有灌水均匀度高、灌水时间和灌水量可控、对土壤和作物扰动小等特点<sup>[4]</sup>。微喷灌是在喷灌基础上演变的一种新型灌溉方式,其水分蒸发损失小、灌溉水利用系数较高<sup>[5-6]</sup>。微喷灌对农田小气候及土壤性状具有一定的调节作用,进而影响作物的生长发育<sup>[7-8]</sup>。王东等<sup>[9]</sup>研究表明,在小麦灌浆初期,微喷灌

可通过降低冠层温度、提高相对湿度来显著提高粒重和籽粒产量。董志强等<sup>[10]</sup>研究认为,与畦灌相比,在同等产量水平下,微喷灌在平水年可节水20~50 mm,枯水年可节水70~110 mm。同时有研究认为,少量多次或调亏灌溉可显著提高叶片净光合速率,促进生育中后期干物质积累,减少作物冗余生长,优化库源比,实现增产增效<sup>[11-12]</sup>。前人有关微喷灌的研究多集中于冬小麦<sup>[13-14]</sup>、花生<sup>[15]</sup>等作物,而鲜见针对夏玉米生长发育和水分利用特征的研究。因此,研究微喷灌条件下夏玉米耗水动态变化特征,掌握夏玉米全生育期的耗水规律,明确夏玉米生长发育进程、生理活动与夏玉米耗水的相互关系,对制定田间灌溉决策和水分高效管理具有重要的指导意义。基于此,本试验以生产中大面积推广的高产夏玉米品种郑单958为试验材料,采用云智能土壤水分测定仪实时监测夏玉米全生育期多土层(0~200 cm)的水分动态变化,研究不同灌

收稿日期:2018-09-17 接受日期:2018-12-04

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0300106,2017YFD030090403),河北省农林院创新工程项目(2019-4-5)

作者简介:郑孟静,女,助理研究员,主要从事作物栽培生理研究。E-mail:zhengmj96@126.com

\*通讯作者:贾秀领,女,研究员,主要从事作物高产与资源高效利用研究。E-mail:jiaxiuling2013@163.com

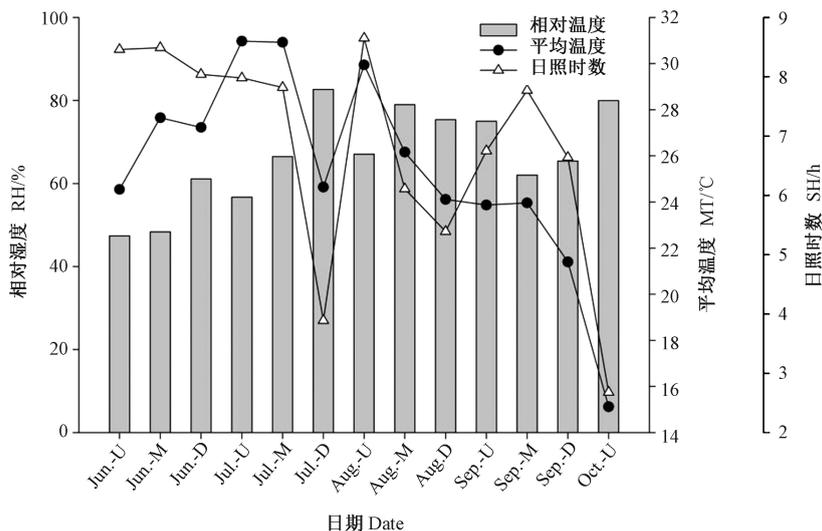
水模式对夏玉米产量和水分利用效率差异的影响机制,以期为华北地区夏玉米节水稳产栽培技术体系的建立提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2017 年在河北省农林科学院粮油作物研

究所藁城堤上试验站测渗水分池内进行,全生育期遇雨自动关闭遮雨棚。水分池下方为深 3 m 的观测道,可收集水分渗漏量。该区属华北地区太行山山前平原(116°85'E,38°41'N)。试验地 0~20 cm 土壤含有机质 15.7 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 1.0 g·kg<sup>-1</sup>、全磷 2.1 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 80.0 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 21.4 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 113.9 mg·kg<sup>-1</sup>。夏玉米生长季大气温度、湿度和日照时数见图 1。



注:RH:相对湿度;MT:平均温度;SH:日照时数;横坐标上的U、M和D分别代表上旬、中旬和下旬。

Note: RH: Relative humidity. MT: Mean temperature. SH: Sunshine hours. U, M and D on the X-axis represent the first, middle and last ten-day of a month, respectively.

图 1 夏玉米生长季的相对湿度、平均温度和日照时数

Fig.1 The relative humidity, mean temperature and sunshine hours in growing season of summer maize

### 1.2 试验设计

以大面积推广的高产品种郑单 958 为试验材料,由河南省农业科学院粮食作物研究所提供。种植密度为 82 500 株·hm<sup>-2</sup>,小区面积 2.1 m×3.0 m=6.3 m<sup>2</sup>,每小区种植 5 行,行距 46.7 cm,行长 3 m。于 2017 年 6 月 20 日进行人工点播,播前施入复合肥 600 kg·hm<sup>-2</sup>(N:P:K 为 26:10:15),有机肥 2.25×10<sup>4</sup>kg·hm<sup>-2</sup>,大喇叭口期追施 90 kg·hm<sup>-2</sup>纯氮。播种前浇足底墒水,土壤含水量达到田间持水量,其他管理同一般高产田。

采用随机区组设计,主区为灌水方式,设置微喷灌 P(灌水定额为 38 mm/次)和畦灌 Q(灌水定额为 75 mm/次),畦灌作为对照(CK);副区为灌水次数,分为 1 次(W1)、2 次(W2)和 3 次(W3),微喷灌处理每小区铺设微喷带,微喷带为斜 5 孔、孔径 0.8 mm、带宽 40 mm、喷射角范围 45°~70°,微喷带铺设在玉米行间;畦灌处理每小区安装直径为 5 cm 的 PVC 出水口。每小区均有流量计控制流量和灌水量。每处理重复 4 次,

具体灌水处理见表 1。

表 1 微喷灌和畦灌条件下夏玉米不同生育期的灌水量  
Table 1 The irrigation amount of summer maize at different growth stages micro-sprinkling irrigation and border irrigation

处理 Treatments	灌水量 Irrigation amount/mm			总灌水量 Total irrigation amount/mm
	V6	V12	R2	
PW1	0	0	38	38
PW2	0	38	38	76
PW3	38	38	38	114
QW1	0	0	75	75
QW2	0	75	75	150
QW3	75	75	75	225

注: V6, V12 和 R2<sup>[16]</sup> 分别表示六展叶(2017 年 7 月 11 日)、十二展叶(2017 年 7 月 31 日)和乳熟早期(2017 年 8 月 24 日)。

Note: V6, V12 and R2<sup>[16]</sup> represent sixth leaf stage(July 11, 2017), twelfth leaf stage(July 31, 2017) and early milk stage(August 24, 2017).

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶面积指数 在 V3 时期选择 8 株长势均匀一致的无病虫害植株标记,分别于 V3、V5、V7、V9、V11、V13、VT、R2、R4 和 R6 时期测量叶长和最大叶宽。按照公式计算叶面积和叶面积指数 (leaf area index, LAI):

$$\text{叶面积} = \text{叶长} \times \text{叶宽} \times 0.75 \quad (1)$$

$$\text{LAI} = \text{单株叶面积} \times \text{单位面积株数} \quad (2)$$

V3、V5、V7、V9、V11 和 V13 分别代表全田 50% 以上植株达 3、5、7、9、11 和 13 片展开叶的时期;VT 代表全田有 50% 以上植株达吐丝期;R2、R4 和 R6 分别代表全田 50% 以上植株籽粒分别达乳熟早期、蜡熟期和生理成熟期。

1.3.2 光合参数 分别于 V11、V15、VT、R2 和 R6 时期采用 LCI-SD 便携式光合仪 (ADC, 英国) 测定叶片的净光合速率 (photosynthesis,  $P_n$ ) 和蒸腾速率 (transpiration,  $T_r$ ), 其中 V15 代表全田 50% 以上植株达 15 片展开叶的时期。测定时间为晴天 10:30–12:00, 采用人工光源, 光强设置为  $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 处理间光强保持一致。处理间采用交叉测定方式, 开花前测定最新完全展开叶, 开花后测定穗位叶, 每小区测定 6 株。

1.3.3 干物质积累 分别于 VT、R2、R4 和 R6 时期, 每小区取代表性植株 5 株,  $105^\circ\text{C}$  杀青 30 min,  $80^\circ\text{C}$  烘干至恒重后称重。

1.3.4 夏玉米蒸散量和水分利用效率 采用云智能土壤水分测定仪 (北京东方润泽生态科技股份有限公司) 实时监测夏玉米整个生长季 0~200 cm 土层土壤水分动态变化, 每 10 cm 为一个土壤层次, 每小时记录一次数据。蒸散量为整个生育期日蒸散量的和。因设备数量限制, 水分分析数据仅为 PW2 和 QW2 两处理。按照公式计算水分利用效率 (WUE):

$$\text{WUE} = Y/ET \quad (3)$$

式中,  $Y$  为籽粒产量,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $ET$  为作物全生育期总蒸散量, mm。

1.3.5 阶段耗水量、耗水强度、阶段耗水层耗水比 阶段耗水层分析以 2 次灌水时间为节点划分了 3 个阶段, 定义为生育前期 (2017 年 6 月 22 日至 2017 年 7 月 30 日)、生育中期 (2017 年 8 月 1 日至 2017 年 8 月 23 日) 和生育后期 (2017 年 8 月 25 日至 2017 年 10 月 1 日), 分 5 个耗水层 0~20、20~40、20~60、60~100 和 100~200 cm。阶段耗水量为该阶段日耗水量的总和, 耗水强度 = 阶段耗水量 / 该阶段的天数; 阶段耗水层耗水比 = 每土层的耗水量 / 阶段总耗水量  $\times 100\%$ 。

1.3.6 产量及产量构成因素 在成熟期计算测产面积, 调查穗数、穗行数、行粒数, 重复 3 次, 收获后脱粒, 烘干称重, 采用 PM-8188NEW 型谷物水分测定仪 (郑州机械设备有限公司) 测定籽粒含水量, 折算为含水量 14% 的标准产量。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2010 进行数据处理, 采用 DPS 7.05 统计软件对数据进行方差分析和 LDS 法差异显著性检验 ( $P < 0.05$ ); 采用 SigmaPlot 10.0 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌水模式对夏玉米产量及构成因素的影响

由图 2 可知, 与 PW3 相比, PW2、PW1、QW3、QW2、QW1 的增水比例和增产比例分别为 -33.3% 和 -13.9%、-66.7% 和 -23.4%、97.4% 和 3.3%、31.6% 和 -12.5%、-34.2% 和 -18.0%。由表 2 可知, 微喷灌方式下, 产量随灌水量的降低而降低; PW2 与 QW1 的灌水量相同, 但其产量显著高于 QW1 ( $P < 0.05$ ), PW3 的灌水量低于 QW2, 但产量显著高于 QW2 ( $P < 0.05$ )。2 种灌水方式下, W1 的穗数、穗粒数、千粒重和产量均低于 W2 和 W3; W2 与 W3 的穗数差异不显著, 穗粒数、千粒重和产量均表现为 W2 显著低于 W3。相同灌水次数下, 微喷灌和畦灌的穗数差异不显著, 而穗粒数、千粒重和产量均表现为微喷灌低于畦灌。与 QW1 相比, PW2 的灌水量相同、灌水次数增加, 产量提高 5.0%; 与 QW2 相比, PW3 的灌水量减少、灌水次数增加, 产量提高 14.3%。结果表明, 2 种灌水方式下减少灌水量均导致夏玉米产量降低, 而采用微喷灌方式, 在控水条件下减少灌水定额、增加灌水次数有利于夏玉米产量的提高。

### 2.2 产量差形成解析

2.2.1 不同处理下夏玉米叶片净光合速率变化 由图 3 可知, 灌水方式对穗位叶净光合速率具有显著调控效应 ( $P < 0.05$ )。2 种灌水模式下, 穗位叶净光合速率均随着灌水次数的增加而增加, 相同灌水次数下, 微喷灌的净光合速率低于畦灌; PW3 的穗位叶净光合速率在 VT 和 R2 时显著高于 QW2, 平均高 8.8%, PW2 的穗位叶净光合速率在各生育时期均高于 QW1。结果表明, 采用微喷灌方式, 减少灌水定额、增加灌水次数可提高穗位叶光合能力, 为产量的提高提供物质基础。

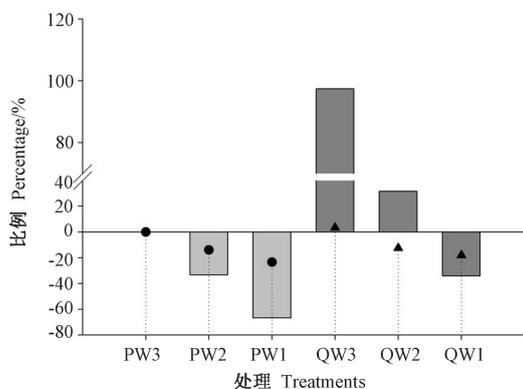
表2 灌水模式对夏玉米产量及构成因素的影响

Table 2 Effect of irrigation mode on the grain yield and components of summer maize

处理 Treatments	穗数 Number of ears	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Grain yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )
PW1	77 781. 6b	371. 8d	294. 1d	7 508. 3d
PW2	86 512. 3a	409. 8c	306. 4c	8 439. 8b
PW3	87 104. 7a	422. 3b	310. 8b	9 805. 5a
QW1	79 368. 9b	416. 9b	305. 6c	8 037. 0c
QW2	86 776. 8a	426. 6b	309. 1b	8 580. 5b
QW3	87 512. 2a	451. 4a	314. 3a	10 131. 8a
灌水方式(A)		**	**	
灌水次数(B)	**	**	**	**
A×B		**	**	

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。\*\*表示各处理间在0.01水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. \*\* represents significant difference at 0.01 level among treatments.



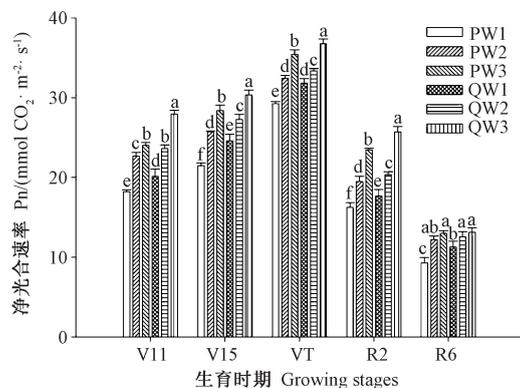
注:浅灰色柱形图代表与PW3相比微喷灌处理灌水增加量,深灰色柱形图代表与PW3相比畦灌处理灌水增加量;黑点代表与PW3相比微喷灌产量增加量,黑三角代表与PW3相比畦灌产量增加量。

Note: Gray column represents the increased water percentage of micro-sprinkling compared with PW3. Dark gray column represents that of border compared with PW3. Blank dot represents the increased grain yield percentage of micro-sprinkling compared with PW3. Blank triangle represents that of border compared with PW3.

图2 其他处理较PW3的产量和水分增加比例

Fig.2 The increased percentage of grain yield and water irrigation of other treatments compared with PW3

2.2.2 不同处理下夏玉米干物质积累变化 由图4可知,自吐丝期(VT)各处理地上部干物质积累量呈增加趋势。灌水方式和灌水次数对灌浆期干物质积累具有调控效应。2种灌水方式下,干物质积累量均随着灌水次数的增加而增加;与PW1相比,PW2和PW3的干物质积累量分别增加12.4%和25.3%(各时期的平均值);与QW1相比,QW2和QW3的干物质积累量分



注:不同小写字母表示同一生育时期处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同

Note: Different lowercase letters represent significant difference at 0.05 level among treatments during the same growing stage. The same as following.

图3 不同生育时期灌水模式对夏玉米植株净光合速率的影响

Fig.3 Effect of irrigation mode on the photosynthetic rate of summer maize during different growing stages

别增加了10.0%和25.8%(各时期的平均值)。PW3的灌水量低于QW2,而PW3的干物质积累量高于QW2且在R2、R4和R6时期达显著水平( $P<0.05$ ),相同灌水量下,PW2的干物质积累量高于QW1,且在R2和R4时期达到显著水平( $P<0.05$ )。上述结果表明,采用微喷灌方式,减少灌水定额、增加灌水次数可提高灌浆期干物质积累量,促进后期籽粒灌浆,进而增加粒重,提高产量。

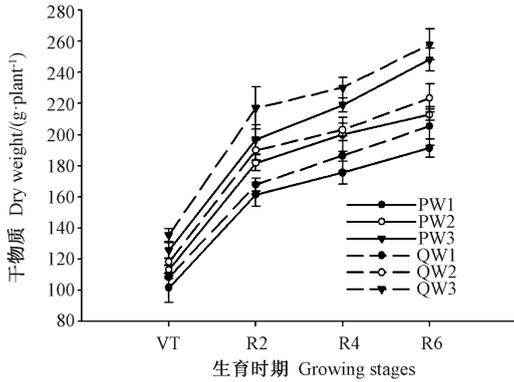
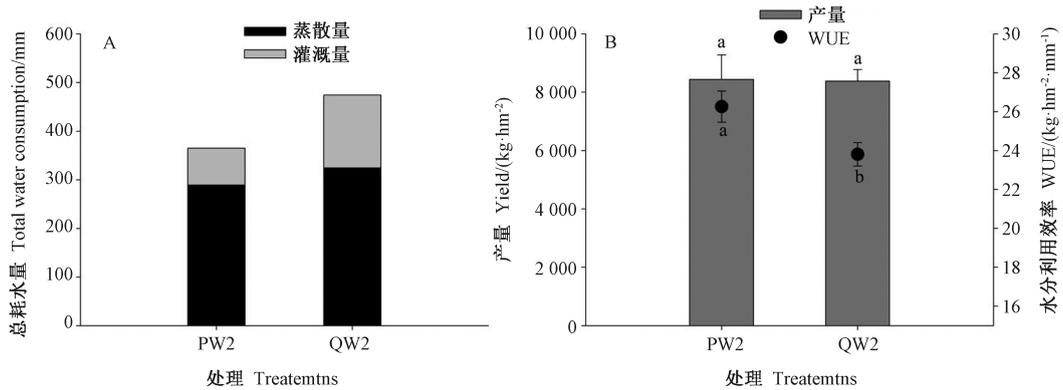


图 4 不同时期灌水模式对夏玉米干物质积累的影响

Fig.4 Effect of irrigation mode on the dry matter accumulation of summer maize during different growing stages

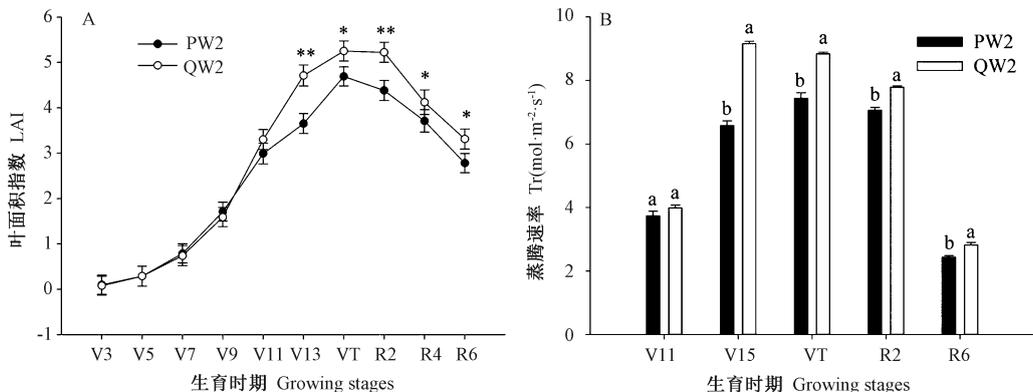


注:不同小写字母表示同一指标在处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters represent significant difference at 0.05 level among treatments of the same indicator.

图 5 不同灌水方式下全生育期总蒸散量及产量和水分利用效率的差异

Fig.5 The difference of total evapotranspiration, grain yield and water use efficiency in different irrigation patterns



注: \* 和 \*\* 分别表示处理间在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

Note: \* and \*\* represent significant difference at 0.05 and 0.01 level among treatments, respectively.

图 6 不同生育时期不同灌水方式对夏玉米 LAI 和蒸腾速率的影响

Fig.6 Effect of irrigation patter on LAI and transpiration rate during different growing stages

## 2.3 不同灌水模式下夏玉米的水分利用效率

基于对 PW2 和 QW2 的产量分析,进一步深入分析这 2 种灌水模式下的水分利用效率差异。由图 5-A 可知,PW2 整个生育期的总蒸散量和灌水量分别为 289.2 mm 和 76 mm, QW2 整个生育期的总蒸散量和灌水量为 324.3 mm 和 150 mm。与 QW2 相比,PW2 的蒸散量减少 10.8%。由图 5-B 可知,PW2 的产量高于 QW2,但差异不显著( $P > 0.05$ ),而其 WUE 存在显著差异。与 QW2 相比,PW2 的 WUE 提高 10.3%。上述结果表明,采用微喷灌方式,减少灌溉定额 50%,可实现节水,同时提高 WUE。

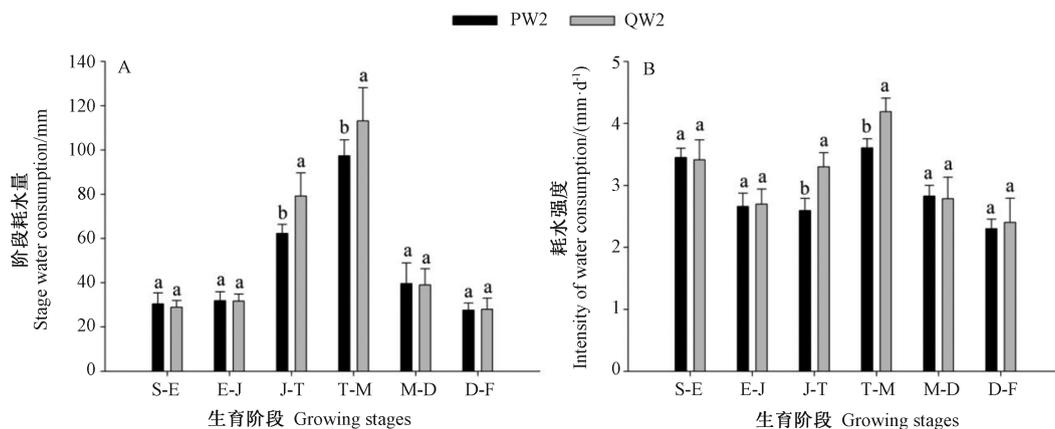
## 2.4 水分利用效率差形成解析

2.4.1 不同处理下夏玉米 LAI 和蒸腾速率变化 由图 6-A 可知,LAI 在整个生育期呈先升高后降低的趋

势,在吐丝期(VT)达到最大值。V3~V11时期两处理的LAI差异不显著( $P < 0.05$ ) (此阶段未灌水),之后PW2的LAI显著或极显著低于QW2。作物的生理性耗水即为蒸腾耗水,其强度可通过叶片蒸腾速率来表征。通过分析两处理的蒸腾速率发现(图6-B),PW2的蒸腾速率在各生育时期均低于QW2,平均低21.4%(各时期的平均值)。结果表明,微喷灌方式通过降低LAI和蒸腾速率,降低蒸腾耗水量,进而降低总蒸散量,提高了WUE。

2.4.2 不同处理下的阶段耗水量和耗水强度 由图7可知,2种灌水模式下,夏玉米阶段耗水量均表现为S-E和E-J耗水量相对较少,平均在33~35 mm之间;J-T和T-M阶段耗水量较高,平均为62~113 mm,是整

个生育期耗水量较多的时期;M-D和D-F阶段耗水量较T-M显著降低,平均为27~39 mm。在耗水量较多的时期(J-T和T-M),PW2的耗水量显著低于QW2,平均低21.4%和13.9%(图7-A)。S-E阶段两处理的耗水强度均为 $3.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;E-J和J-T阶段的耗水强度为 $2.6 \sim 3.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;T-M是整个生育期耗水强度最高的时期,平均为 $3.6 \sim 4.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。S-E和E-J阶段PW2的耗水强度与QW2差异不显著( $P > 0.05$ );J-T和T-M阶段PW2的耗水强度显著低于QW2( $P < 0.05$ ),平均低21.5%和13.9%(图7-B)。结果表明,微喷灌方式可通过降低高耗水时期的耗水量和耗水强度来降低总蒸散量,从而提高WUE。



注:S-E:播种-出苗;E-J:出苗-拔节;J-T:拔节-吐丝;T-M:吐丝-乳熟;M-D:乳熟-蜡熟;

D-F:蜡熟-完熟。不同小写字母代表同一生育阶段处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: S-E: Seeding to seedling emerge. E-J: Seedling emerge to jointing. J-T: Jointing to tasseling. T-M: Tasseling to milking. M-D: Milking to dough. D-F: Dough to mature. Different lowercases letters represent significant difference at 0.05 level among treatments of the same growing stage.

图7 不同灌水方式下不同生育阶段的耗水量及耗水强度

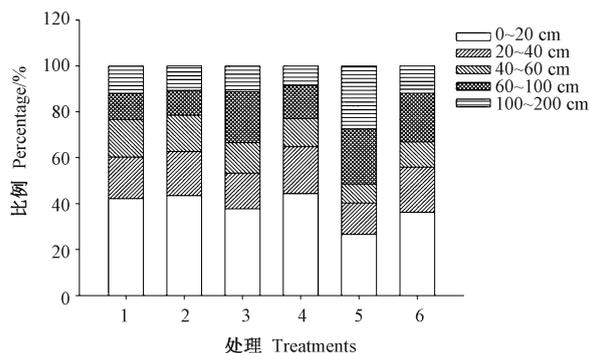
Fig.7 The stage water consumption and intensity of water consumption under sprinkling irrigation and border irrigation during different growing stages

2.4.3 不同生育阶段夏玉米不同土层的耗水比例变化 由图8可知,在夏玉米生育前期,PW2和QW2不同土层耗水比例相似,主要耗水层在0~60 cm,分别占阶段耗水量的71.7%和78.5%。在夏玉米生育中期,PW2的0~20 cm和20~40土层耗水比例均低于QW2,平均低14.8%和24.5%;40~60、60~100和100~200 cm土层的耗水比例均高于QW2,平均高8.7%、34.9%和24.7%。PW2和QW2的0~100 cm土层的耗水比例占此阶段耗水量的88.9%和91.6%。在夏玉米生育后期,PW2的0~20、20~40、40~60 cm土层的耗水比例均低于QW2,而60~100和100~200 cm土层的耗水比例显著高于QW2( $P < 0.05$ ),PW2和

QW2的100~200 cm土层的耗水比例分别为27.3%和11.9%。结果表明,采用微喷灌方式减少灌溉定额、降低灌水量,相对降低作物对上层土壤水分的消耗而显著增加作物对100 cm以下土层水分的利用。

2.4.4 不同灌水模式下灌水后夏玉米日蒸散量变化

利用土壤水分监测仪实时监测了2次灌水后日蒸散量变化。结果表明,2次灌水后日蒸散量呈波动变化,2次灌水后PW2的日蒸散量整体低于QW2,平均低22.5%(图9-A)和52.2%(图9-B)。2次灌水后日蒸散量均表现为灌水后1~5 d QW2显著高于PW2( $P < 0.05$ )。表明微喷灌可降低日蒸散量和灌水后水分的无效蒸发。



注:1 和 2 分别代表生育前期 PW2 和 QW2;3 和 4 分别代表生育中期 PW2 和 QW2;5 和 6 分别代表生育后期 PW2 和 QW2。  
Note: 1 and 2 represent PW2 and QW2 at the earlier stages, respectively. 3 and 4 represent PW2 and QW2 at the middle stages, respectively. 5 and 6 represent PW2 and QW2 at the late stages, respectively.

图 8 不同生育阶段夏玉米不同土层的吸水比例

Fig.8 The percentage of water uptake from different soil layers during different growing stages of summer maize

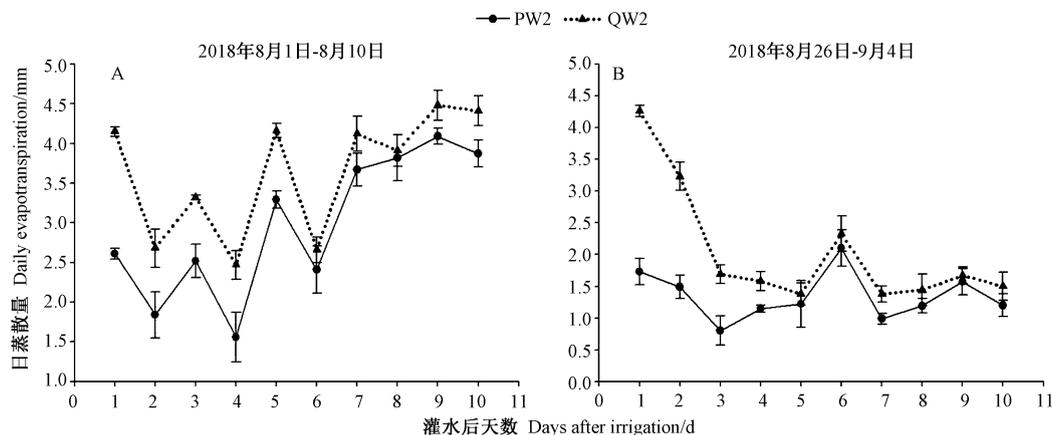


图 9 2 种灌水模式下灌水后 10 d 蒸散量变化

Fig.9 The change of daily evapotranspiration during ten days after irrigation under two irrigation mode

QW2 发现, PW3 灌水量低于 QW2, 灌水次数多于 QW2, 其产量高于 QW2, 说明采用微喷灌小额多次灌溉有利于夏玉米产量的提高。研究表明, 通过喷灌方式减少 25% 灌水量可实现夏玉米相对较高的产量水平<sup>[25]</sup>。

也有研究认为, 灌水量过多会导致净光合速率和气孔导度降低, 减少光合产物向籽粒的分配, 使产量降低<sup>[26-27]</sup>。本研究通过分析产量构成因素发现, 不同灌水模式对产量的影响主要是通过影响穗粒数和粒重, 说明采用微喷灌少量多次灌溉有利于玉米的穗花发育及籽粒灌浆。前人研究认为, 通过改善玉米灌浆期的光合特性, 可增强花后干物质积累, 提高穗粒数和粒

### 3 讨论

水分亏缺严重限制了华北地区夏玉米生产<sup>[17]</sup>。采用节水灌溉技术来提高作物的水分利用效率是实现农业可持续发展的技术关键<sup>[18-21]</sup>。土壤水分状况是作物生长的关键, 对作物生长发育和产量形成具有重要作用。

#### 3.1 不同灌水模式对夏玉米产量的影响

本试验条件下灌水方式和灌水次数是夏玉米产量差异形成的主控因素。在 2 种灌水方式下, 随着灌水次数的增加(总灌水量的增加), 夏玉米产量呈增加趋势。相同灌水次数下微喷灌的夏玉米产量均低于畦灌。前人研究表明, 夏玉米产量与灌水量呈二次抛物线关系, 在一定范围内产量随灌水量的增加而增加<sup>[22-24]</sup>。本研究结果与前人研究一致。通过比较 PW2 和 QW1 发现, 两处理的灌水量相同, PW2 灌水次数多于 QW1, PW2 产量显著高于 QW1; 比较 PW3 和

重, 提高产量<sup>[28]</sup>。崔吉晓等<sup>[29]</sup>研究表明, 微喷灌方式可促进玉米灌浆期生物量积累, 其产量较漫灌提高 6.7%。本试验分析了不同生育期夏玉米植株的穗位叶净光合速率和干物质积累, 发现与大额少次畦灌相比, 采用微喷灌方式, 减少灌溉定额、增加灌溉次数可提高穗位叶净光合速率, 增加干物质积累, 进而有利于夏玉米花后灌浆, 增加粒重, 提高产量。

#### 3.2 不同灌水模式对夏玉米 WUE 的影响

前人研究表明, 采用作物生理节水灌溉方式可在减产不显著的情况下提高 WUE<sup>[20,23,30]</sup>。Zhang 等<sup>[31]</sup>研究表明, 灌水量减少 10%, 其产量无显著变化, 而蒸散量降低, WUE 提高 4.61%~6.66%。本试验对比 2

种灌溉模式(PW2 和 QW2)发现,其灌水次数相同但灌水方式和灌水定额不同,PW2 采用微喷灌的节水方式,灌水定额较传统畦灌(QW2)减少 50%。结果显示,PW2 产量略低于 QW2,但差异不显著,而 PW2 的 WUE 提高 10.3%。PW2 产量降低主要是由于植株的光合作用受到了限制,WUE 提高主要是由于降低了总蒸散量。

进一步从耗水特性来阐明微喷灌方式总蒸散量降低的生理基础。本研究通过分析两处理的 LAI 和蒸腾速率发现,自 V11 时期 PW2 的 LAI 和蒸腾速率显著低于 QW2,进而导致微喷灌模式下植株在高耗水阶段(J-M)的阶段耗水量和耗水强度显著低于畦灌。前人对玉米耗水特性的研究也表明,玉米全生育期耗水量随着灌溉定额的增大而增加;玉米阶段耗水量表现为生育前期少,中后期多的趋势,且采用节水灌溉模式可显著降低阶段耗水量和耗水强度<sup>[32-33]</sup>。此外,本研究发现 2 种灌水模式在不同生育阶段的主要耗水层存在差异。在玉米生育前期,PW2 和 QW2 均未进行灌溉,此阶段夏玉米不同土层的耗水比例相似,主要耗水层在 0~60 cm,这主要是由于前期植株干物质积累相对较少,且根系主要集中在上层。在玉米生育中期,进行一次灌溉导致 QW2 的 0~20 和 20~40 cm 土层的耗水比例显著大于 PW2,主要是由于畦灌灌水定额大,加之气温较高,导致灌溉水大量蒸发。为进一步证实畦灌导致高耗水强度,对 2 次灌水后 1~10 d 的日蒸散量进行分析,结果显示,采用微喷灌方式在灌水后 1~5 d 的日蒸散量显著低于畦灌( $P<0.05$ ),说明采用微喷灌方式、小额灌溉可减少无效耗水,提高 WUE。在玉米生育后期,PW2 增加了植株对 100 cm 以下土壤贮水的消耗。究其原因,微喷灌方式的灌水定额和总灌溉量少,当上层土壤水分不足时,上、下层土壤产生水势差,水分通过毛管作用发生向上迁移,以达到水势平衡。因此,采用微喷灌、小额灌溉充分利用灌溉水的同时可高效利用深层土壤贮水,提高植株的 WUE。李全起等<sup>[34]</sup>研究认为,苗期保证较充足的底墒水,能增强夏玉米在干旱环境下利用深层土壤水分的能力,这与本试验结果基本一致。也有研究认为,玉米根系在生育后期主要吸收层在 100 cm 以上<sup>[35-36]</sup>。本研究结果与之存在差异,可能是因为本试验与前人研究的试验地点、试验条件和灌溉措施等存在差异。

本试验中植株耗水量与相同试验条件下的结果大体一致<sup>[37]</sup>,而低于雨养条件下的研究结果<sup>[38]</sup>。分析其原因,一方面是由于本试验是在旱棚中进行,目的是通过排除自然降雨,精确控制灌水定额及灌水量,采用

土壤水分实时监测系统阐明夏玉米整个生育期的耗水规律;另一方面是由于夏玉米播种前灌足底墒水,土壤水分达到田间持水量,前期未发生水分亏缺,土壤含水量高于雨养条件。前人研究也认为旱区夏玉米采用播前灌溉可提高产量和 WUE<sup>[39-40]</sup>。

## 4 结论

本研究结果表明,与畦灌大水、少次灌溉相比,采用微喷灌方式、减少灌水定额、增加灌水次数,可降低夏玉米叶片蒸腾、增加干物质积累,同时可高效吸收利用深层土壤水分,在保障夏玉米产量的前提下,减少总耗水量,提高 WUE。在玉米等高秆作物中应用微喷灌可节省人工成本,增加经济效益,对华北缺水地区压采地下水具有重要的推广价值。

## 参考文献:

- [1] 郝立生, 闵锦忠, 姚学祥. 华北地区夏季降水减少的原因分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 522-527
- [2] 邱新强, 路振广, 张玉顺, 孟春红, 刘祖贵, 刘战东, 肖俊夫. 不同生育时期干旱对夏玉米耗水及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(27): 68-75
- [3] Fang Q X, Ma L, Green T R, Yu Q, Wang T D, Ahuja L R. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: Current status and agronomic management options[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97: 1102-1116
- [4] 缪学文, 王爱忠. 国内外喷灌对作物及土壤的影响机理研究[J]. 节水灌溉, 2014(2): 29-31
- [5] The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1361-2007 Agriculture standard system of the People's Republic of China - Agricultural irrigation equipment-Micro-sprinkling Hose[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2007
- [6] 周斌, 封俊, 张学军, 吴政文, 沈雪民. 微喷带单孔喷水量分布的基本特征研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 101-103
- [7] Liu H J, Kang Y H. Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84: 3-19
- [8] 刘海军, 康跃虎, 刘士平. 喷灌农田小气候变化及其对作物生长影响的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(3): 54-58
- [9] 王东, 徐学欣, 张洪波, 林祥, 赵阳. 微喷带灌溉对小麦灌浆期冠层温湿度变化和粒重对影响[J]. 作物学报, 2015, 41(10): 1564-1574
- [10] 董志强, 张丽华, 李谦, 吕丽华, 申海平, 崔永增, 梁双波, 贾秀领. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特征[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 725-733
- [11] 吕丽华, 李谦, 董志强, 张丽华, 梁双波, 贾秀领, 姚海坡. 灌水方式和灌水量对冬小麦根冠结构的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(11): 1537-1544
- [12] 郑健, 蔡焕杰, 陈新明, 王健. 调亏灌溉对温室小型西瓜水分利

- 用效率及品质的影响[J]. 核农学报, 2009, 23(1): 159-164
- [13] Man J G, Yu G S, White P J, Gu S B, Zhang Y L, Guo Q F, Shi Y, Wang D. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water distribution in soil and grain yield of winter wheat [J]. *Field Crops Research*, 2014, 161: 26-37
- [14] 满建国, 王东, 张永丽, 石玉, 于振文. 不同喷射角微喷带灌溉对土壤水分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(24): 5098-5112
- [15] 冯绍元, 王凤新, 黄冠华. 喷灌条件下花生水肥耦合效应的田间试验研究[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(4): 98-102
- [16] Ritchie S W, Hanway J J, Benson G O, Herman J C, Lupkes S J. How a corn plant develops [R]. Iowa: Iowa State University of Science and Technology Cooperative Extension Service, 1993: 48
- [17] 陈博, 欧阳竹, 程维新, 刘丽平. 近 50a 华北平原冬小麦-夏玉米耗水规律研究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(7): 1186-1198
- [18] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 王志琴, 杨建昌. 干湿交替对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(7): 1026-1036
- [19] 于爱忠, 柴强. 供水与地膜覆盖对干旱灌区玉米产量的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(5): 778-786
- [20] 孙景生, 肖俊夫, 张寄阳. 夏玉米产量与水分关系及其高效用水灌溉制度[J]. *灌溉排水*, 1998, 17(3): 17-21
- [21] Li C, Sun J, Li F S, Zhou X G, Li Z Y, Qiang X M, Guo D D. Response of root morphology and distribution in maize to alternate furrow irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98: 1789-1798
- [22] Wang Y S, Janz B, Engedal T, Neergaard A D. Effect of irrigation regimes and nitrogen rates on water use efficiency and nitrogen uptake in maize [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 157: 124-133
- [23] Doorenbos J, Kassam A H. Yield response to water [R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1979: 33
- [24] El-Hendawy S E, El-Lattief A, Ahmed M S, Schmidhalter U. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95: 836-844
- [25] Kresovic B, Tapanarova A, Tomic Z, Zivotic L, Vujovic D, Srefojevic Z, Gajic B. Grain yield and water use efficiency of maize as influenced by different irrigation regimes through sprinkler irrigation under temperate climate [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 169: 34-43
- [26] 王平, 陈举林, 王均华, 闫保罗, 李平海, 候玮, 宗燕. 灌水模式对夏玉米耗水特性和干物质积累及分配的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(24): 20-27
- [27] 王振华, 郑旭荣, 姜国军. 不同滴灌量对滴灌春小麦生长与生理指标的影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(3): 538-548
- [28] 许菁, 贺贞昆, 冯倩倩, 张亚运, 李晓莎, 许娇娇, 林祥, 韩惠芳, 宁堂原, 李增嘉. 耕作方式对冬小麦-夏玉米光合特性及周年产量形成的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 101-109
- [29] 崔吉晓, 檀海斌, 吴佳迪, 刘占卯, 隋鹏, 闫鹏, 沈亚文, 陈源泉. 微喷灌水肥一体化对河北夏玉米生长及产量对影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(3): 105-110
- [30] 赵宏亮, 王麒, 孙羽, 曾宪楠, 张小明, 王萍, 王曼力, 冯延江. 秸秆还田下灌溉方式对水稻产量及水分利用率的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(5): 959-969
- [31] Zhang G Q, Liu C W, Xiao C H, Xie R Z, Ming B, Hou P, Liu G Z, Xu W J, Shen D P, Wang K, Li S K. Optimizing water use efficiency and economic return of super high yield spring maize under drip irrigation and plastic mulching in arid areas of China [J]. *Field Crops Research*, 2017, 211: 137-146
- [32] 张国强, 王克如, 肖春华, 谢瑞芝, 侯鹏, 李健, 徐文娟, 初振东, 刘广周, 刘朝巍, 李少昆. 滴灌量对新疆高产春玉米产量和水分利用效率对影响研究[J]. *玉米科学*, 2015, 23(4): 117-123
- [33] 刘战东, 肖俊夫, 刘祖贵, 南纪琴, 杨道成. 膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量对影响[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(3): 60-64
- [34] 李全起, 房全孝, 陈雨海, 于舜章, 王吉顺, 罗毅, 于强. 底墒差异对夏玉米耗水特性及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 93-96
- [35] Wu Y J, Du T S, Li F S, Li S, Ding R S, Tong L. Quantification of maize water uptake from different layers and root zones under alternate furrow irrigation using stable oxygen isotope [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 168: 35-44
- [36] Aina P O, Fapohunda H O. Root distribution and water uptake patterns of maize cultivars field-grown under differential irrigation [J]. *Plant Soil*, 1986, 94: 257-265
- [37] 翟超, 周和平, 赵健. 北疆膜下滴灌玉米年际需水量及耗水规律[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2769-2780
- [38] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 穆心愿, 李潮海. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(17): 3359-3371
- [39] Yan Z X, Gao C, Ren Y J, Zong R, Ma Y Z, Li Q Q. Effects of pre-sowing irrigation and straw mulching on the grain yield and water use efficiency of summer maize in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 186: 21-28
- [40] Kisekka I, Schlegel A, Ma L, Gowda P H, Prasad P V V. Optimizing preplant irrigation for maize under limited water in the High Plains [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 187: 154-163

## Effects of Micro-sprinkling Irrigation on Yield and Water Use Efficiency in Summer Maize

ZHENG Mengjing<sup>1</sup> ZHANG Lihua<sup>1</sup> DONG Zhiqiang<sup>1</sup> SHEN Haiping<sup>1</sup> YAO Haipo<sup>1</sup>  
ZHANG Lirong<sup>2</sup> JIA Xiuling<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Grain and Oil Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050035;

<sup>2</sup>Forestry Bureau of Hengshui City, Hengshui, Hebei 053000)

**Abstract:** In irrigation agricultural region of north China, water resources deficit, high input and low efficiency are serious constraints for crop production. Based on this situation, the experiment was performed to explore the physiology mechanism of different irrigation mode affecting the yield and WUE of summer maize at rainproof shelter. The experiment was set up two irrigation mode, micro-sprinkling (38 mm per time) and border irrigation (75 mm per time), and three kinds of irrigation frequency with one time (W1), two times (W2) and three times (W3). The soil water dynamic change of summer maize at all growing stages were monitored by real-time monitor system to clarify the water consumption characters of summer maize under different irrigation modes. Results showed that the grain yield increased with the irrigation times (i.e. the increased total irrigation amount) under the two irrigation patterns. The yield of micro-sprinkling irrigation was lower than that of border irrigation under the same irrigation times. PW2 treatment has more irrigation times and the same irrigation amount but higher yield by 5.0% in comparison with QW1. Compared with QW1, PW3 has reduced irrigation amount by 24% and more irrigation times, but the yield has increased by 14.3%. PW3 contributed to improving the photosynthetic rate and the accumulation of dry matter, hence increasing the grain weight and grain yield. The water consumption characters of PW2 and QW2 were further analyzed. Compared with QW2, PW2 reduced leaf area index (LAI), the transpiration rate, stages water consumption amount and intensity, daily evapotranspiration amount after irrigation and increased the use of deeper soil water, especially under 100 cm. These treatment resulted in the reduced total water consumption of whole growing periods of PW2 by 10.8% and increased WUE by 10.3% compared to QW2. The findings indicated that adopting micro-sprinkling irrigation pattern irrigation quota of 38 mm and irrigation 2–3 times can increase WUE in the premise of stable yield. This study provide guidance for reducing groundwater overdrawn, saving cost and increasing efficiency.

**Keywords:** summer maize, micro-sprinkling irrigation, grain yield, water use efficiency