

## 灌溉畦田规格对张杂谷生长、产量及水分利用的影响

赵欢<sup>1,2</sup>, 董宝娣<sup>1</sup>, 乔匀周<sup>1</sup>, 张明明<sup>1,2</sup>, 刘孟雨<sup>1</sup>, 杨红<sup>1,2</sup>, 郑鑫<sup>1,2</sup>(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省节水农业重点实验室/  
中国科学院农业水资源重点实验室, 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**以张杂谷3号为材料,设置不同畦田规格(T1规格为2 m×5 m,T2规格为6 m×5 m)进行灌溉处理,探究不同畦田规格灌溉对张杂谷生理、产量及水分利用效率的影响。结果表明,①2个处理相同生育期耗水量均差异不显著,T1处理总灌溉水量较T2处理减少33.35%;②T2处理叶片水势、叶绿素、光合速率、蒸腾速率、气孔导度分别比T1处理提高9.0%、2.67%、26.44%、33.0%、40%,但叶片蒸腾效率较T1处理下降4.52%;③2个处理生物量差异不显著,T2处理产量虽较T1处理提高4.59%,但未达到显著性水平。与T2处理相比,T1处理 $WUE_{BM}$ 、 $WUE_V$ 分别提高17.05%、19.67%。综合分析,张杂谷生育期进行地面水灌溉时,宜实施小畦灌溉,一方面有助于提高谷子水分利用效率,另一方面是实现节约灌溉用水的最直接的手段。

**关键词:**灌溉;畦田规格;产量;水分利用效率

**中图分类号:** S515

**文献标志码:** A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.01.003

赵欢,董宝娣,乔匀周,等.灌溉畦田规格对张杂谷生长、产量及水分利用的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(1):16-21.

## 0 引言

地面畦灌因其易操作、低成本的优势得到广泛的应用,尤其在北方地区,畦田灌溉是目前最主要和最广泛的灌水方式之一,但受气候、农业特点及经济状况的约束,这种灌溉方式还将持续很长时间<sup>[1-3]</sup>。然而,不合理灌溉畦田规格不仅浪费水资源,也会影响作物的生长和产量。崔振岭<sup>[4]</sup>指出,长畦(180 m)处理比短畦(90 m)处理多损失44 mm灌溉水,氮素损失增加20 kg/hm<sup>2</sup>,造成田块尺度上土壤水分和养分的空间变异,影响冬小麦的生长发育及产量。马尚宇等<sup>[5-6]</sup>研究指出灌溉畦田宽度、长度均对小麦耗水及生理特性产生影响。应用于黄淮海地区最节水高效的畦田大小设置为畦宽2 m,畦长60~80 m;然而在缺水的华北地区,畦田大小虽较黄淮海地区有所缩减(宽5~6 m,长10 m左右),但因缺乏科学指导,不合理灌溉造成的水资源浪费现象仍普遍存在。

谷子耐旱耐贫瘠,张家口市农科院利用光温敏两系法选育出的一系列杂交谷子品种,其旱地种植平均产量保持在6 000 kg/hm<sup>2</sup>以上<sup>[7]</sup>。补充灌溉能进一步提高张杂谷产量及水分利用效率<sup>[8]</sup>。目前,有关灌水时期及不同生育期胁迫对谷子影响的研究较多,樊修武等<sup>[9]</sup>指出拔节期补灌30 mm,张杂谷6号水分利用效率较不灌水提升2.25%,产量提高7.23%。LU<sup>[10]</sup>指出拔节期干旱胁迫导致张杂谷5号光合速率和产量分别下降37.6%和16.7%。有关灌溉畦田规格对作物生长的研究大多主要针对小麦和玉米<sup>[1,11-12]</sup>。对于进一步缩小畦田规格,改善张杂谷生育时期灌水利用效率的研究鲜见报道。为此,研究2种灌溉畦田规格对张杂谷生长及耗水特性的影响,并深入探讨通过缩小畦田面积实现节水的可行性,为优化地面灌溉方式及张杂谷灌溉水高效利用提供一定理论依据。

收稿日期:2016-07-04

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAD06B02-3,2012BAD08B02,2013BAD05B02);2016年河北省渤海粮仓科技示范工程

作者简介:赵欢(1990-),女。硕士研究生,主要从事作物用水及节水技术方面研究。E-mail: zhaohuan14@mails.ucas.ac.cn

通信作者:刘孟雨(1961-),男。研究员,主要从事逆境生理等方面的研究。E-mail: mengyuliu@ms.sjziam.ac.cn

# 1 材料与方法

## 1.1 试验地概况

试验于2014年在河北省西北部张家口市宣化县沙岭子镇张家口农科院宣化实验站(115°3'N, 40°63'E, 海拔642 m)进行, 该地属半干旱大陆性季风气候, 十年九旱, 风多风大。年降水量约为300~400 mm, 且降水量的70%~80%集中在6—9月, 多年平均蒸发量364.7 mm<sup>[13]</sup>。土壤类型为褐色砂壤土, 该试验区耕层土(0~40 cm)土壤有机质质量分数为12.12 g/kg, 碱解氮、速效磷、速效钾质量分数分别为43.46、18.24、130.17 mg/kg, 全氮、全磷、全钾质量分数分别为0.52、0.62、28.86 g/kg。0~40 cm平均土壤体积质量为1.57 g/cm<sup>3</sup>。2014年张杂谷生育期试验地降雨量为253 mm。各生育期降雨情况统计如下: 播种至抽穗期降雨103 mm, 抽穗至灌浆期降雨40.7 mm, 灌浆至成熟期降雨109.6 mm。

## 1.2 试验设计

供试谷子品种为张杂谷3号, 由河北省张家口市农科院提供。于2014年5月16日播种, 2014年9月23日收获。采用随机区组设计, 畦田规格试验设计2个处理, 小区面积分别为小畦田(T1)2 m×5 m=10 m<sup>2</sup>, 大畦田(T2)6 m×5 m=30 m<sup>2</sup>, 留苗密度为225 000株/hm<sup>2</sup>, 每处理3个重复。各处理均在约50%植株达到拔节、抽穗、灌浆期时进行灌水, 各生育期灌水时间分别为6月20日、7月23日、8月16日。选用塑料软管, 将其放置在畦首, 当输水水流前锋到达畦长90%时停止灌水。灌水量用水表严格计量。

试验均于播种前灌底墒水60 mm, 二胺、尿素施量分别为160、230 kg/hm<sup>2</sup>, 其他同常规管理。

## 1.3 测定项目与方法

### 1.3.1 土壤含水率

分别于播种前、抽穗期、灌浆期、成熟后取土, 采用烘干称质量法测定土壤含水率, 测定0~150 cm土层水分, 每10 cm测定1次, 共测15层。

### 1.3.2 生理指标

株高: 在张杂谷抽穗期和灌浆期, 用量尺由植株的基部立尺, 量至穗顶的全长。

叶片水势: 在张杂谷抽穗期和灌浆期, 选择晴朗天气, 每个小区随机选取谷子旗叶3片, 用WP4露点水势仪测定叶片水势, 每个处理3次重复。

叶绿素(SPAD值): 在张杂谷抽穗期和灌浆期, 用SPAD-502 Plus便携式叶绿素测定仪测定谷子旗叶的叶绿素量, 每个处理每测30次求平均, 取3个值。

叶片光合参数: 张杂谷灌浆期, 选择晴天上午, 每个处理随机选取3株植株, 用LI-6400便携式光合仪测定谷子旗叶的光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度; 计算叶片蒸腾效率, 计算公式为 $T_n=P_n/T_r$ 。

考种、测产: 谷子成熟后, 不同灌溉处理张杂谷各取100株杂交谷子, 剪下穗晒干去皮后称质量测定; 每处理谷子产量以3次重复产量平均值代表该处理实际产量。

### 1.3.3 计算方法

$WUE_{BM}$ 的计算公式为:

$$WUE_{BM}=BM/ET, \quad (1)$$

式中:  $WUE_{BM}$ 为群体水分利用效率(kg/(hm<sup>2</sup>·mm));  $BM$ 为总的干物质积累量(kg/hm<sup>2</sup>);  $ET$ 为整个生育期的蒸散量(mm)。

$WUE_Y$ 的计算公式为:

$$WUE_Y=Y/ET, \quad (2)$$

式中:  $WUE_Y$ 为产量水分利用效率(kg/(hm<sup>2</sup>·mm));  $Y$ 为产量(kg/hm<sup>2</sup>)。

土壤质量含水率计算公式:

$$\omega=(w_0-w_s)/w_s \times 100\%, \quad (3)$$

式中:  $\omega$ 为土壤质量含水率(%);  $w_0$ 为湿土质量(g);  $w_s$ 为烘干土质量(g)。

土壤储水量的计算公式为:

$$W_i=\rho_i \times h \times \omega_i, \quad (4)$$

$$W_t=\sum W_i, \quad (5)$$

式中:  $W_i$ 为*i*层土壤储水量(mm);  $W_t$ 为土壤水分总储水量(mm);  $\rho_i$ 为*i*层土壤干体积质量(g/cm<sup>3</sup>);  $h$ 为土层

厚度(mm); $\omega_i$ 为*i*层土壤质量含水率(%)。

利用土壤水分平衡方程计算生育期耗水量,计算公式为:

$$ET=P+I-R-D-\Delta W,$$
 (6)

式中: $ET$ 为蒸散量(mm); $P$ 为降雨量(可通过该站气象观测场直接获得)(mm); $I$ 为灌溉量(由水表直接读取)(mm); $R$ 为地表径流量(mm); $D$ 为深层渗漏量(mm); $\Delta W$ 为时段内土壤蓄存水变化量(mm)。由于试验地张杂谷生育期未出现强降雨天气及水淹情况,且试验该地地下水埋深>5 m,因此地表径流和深层渗漏可忽略不计<sup>[14]</sup>。故水量平衡方程可近似写为:

$$ET=P+I-\Delta W。$$
 (7)

1.4 数据统计与分析

试验数据用SPSS 13.0和Excel进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同畦田规格灌溉对张杂谷各生育期灌水、土壤剖面水分变化及耗水的影响

由表1可知,各生育期T1处理的灌水量均比T2处理少,T1处理总灌水量比T2处理减少了33.35%。同一畦田规格处理在不同生育期的灌水量随作物生育期推进而逐渐减少。T1、T2处理相同生育期耗水量均差异不显著。2个处理均在播种-抽穗期耗水量最高,并随作物成熟耗水量逐渐减少。

表1 不同畦田灌溉张杂谷各生育期耗水量

| 生育期     | 灌水量/mm  |         | 耗水量/mm  |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | T1处理    | T2处理    | T1处理    | T2处理    |
| 播种—抽穗期  | 60.00b  | 107.83a | 327.13a | 371.26a |
| 抽穗期—灌浆期 | 75.40a  | 80.73a  | 115.06a | 147.03a |
| 灌浆—成熟期  | 41.25b  | 76.48a  | 94.50a  | 134.22a |
| 全生育期    | 176.65b | 265.05a | 536.69b | 652.51a |

注 同行不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

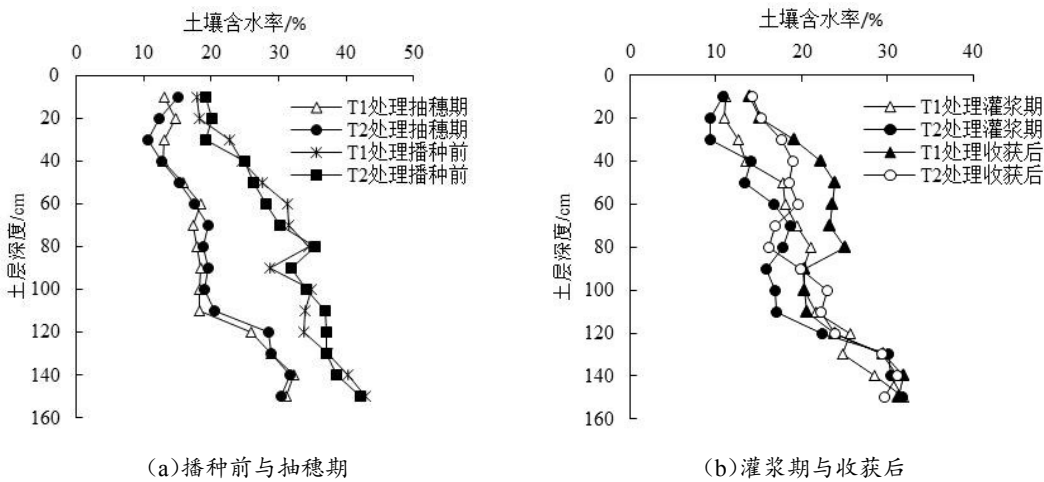


图1 不同生育期0~150 cm土壤剖面水分变化

由图1(a)可得,张杂谷抽穗期,2个处理土壤各个剖面土壤含水率均比播种前大幅降低。20~60 cm土层含水率表现为T1处理>T2处理,70~120 cm土层含水率表现为T2处理略高于T1处理。由图1(b)可知,灌浆期0~120 cm土层T1处理含水率均高于T2处理;收获后,T1处理40~90 cm土层均高于T2处理。2个处理各生育期0~30 cm土层土壤含水率由高到低均表现为收获后>抽穗期>灌浆期。畦田规格大小影响灌水量,畦田面积增大,灌水增多,但对作物各生育期耗水量影响不明显,小畦灌各生育期对水分富集较好。综上表明,缩小畦田面积能有效减少灌水量。

2.2 不同畦田规格灌溉对株高和生物量的影响

由表2可知,不同畦田规格处理条件下,2个处理抽穗期株高差异不显著,灌浆期T1处理株高较T2处理显著提高4.4%。2个处理各生育期生物量对比得到,在灌浆期,T2处理生物量比T1处理显著提高了

表2 不同畦田灌溉处理各生育期生物量

| 生育期 | 株高/cm   |         | 生物量/(kg·hm <sup>2</sup> ) |            |
|-----|---------|---------|---------------------------|------------|
|     | T1处理    | T2处理    | T1处理                      | T2处理       |
| 抽穗期 | 118.00a | 119.80a | 4 559.40a                 | 5 032.35a  |
| 灌浆期 | 163.75a | 156.86b | 8 271.68b                 | 10 165.28a |
| 成熟期 | -       | -       | 15 204.08a                | 16 157.35a |

22.89%，而在抽穗期和成熟期 T1、T2 处理生物量均差异不显著。由此表明，不同畦田灌溉处理对作物生长影响并不明显，小畦田规格在减少灌溉用水同时保证了作物的生长发育，是该试验条件下最优处理。

2.3 不同畦田规格灌溉对叶片水势和叶绿素的影响

由表 3 可知，T1、T2 处理 2 种畦田规格条件下，不同生育期间，2 个处理抽穗期与灌浆期叶片水势均差异不显著。2 个处理叶绿素量均表现为灌浆期显著高于抽穗期。T1、T2 处理叶片水势、叶绿素量在抽穗期均差异不显著。灌浆期，T2 处理比 T1 处理叶片水势显著提高了 9.0%，叶绿素量比 T1 处理显著提高了 2.67%。由此可知，张杂谷抽穗期、灌浆期叶片水势变化不明显，叶绿素量在不同生育期变化较大。大畦田灌溉处理水分条件使叶片保持了良好的水分状态。

2.4 不同畦田规格灌溉对光合参数的影响

由表 4 可知，T2 处理光合速率、蒸腾速率、气孔导度较高，各指标分别比 T1 处理显著提高了 26.44%、33.0%、40%。而 T2 处理蒸腾效率较 T1 处理降低 4.52%，但 2 个处理间差异不显著。小畦田处理光合速率、蒸腾速率虽较低，但其光合速率和蒸腾速率协调最优，有较高的叶片蒸腾效率。

| 表 4 张杂谷不同畦田灌溉主要光合参数 |                                                              |                                                            |                                                           |                                                 |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 处理                  | 光合速率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 蒸腾速率/( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 气孔导度/( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 叶片蒸腾效率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ ) |
| T1                  | 11.84±0.89b                                                  | 2.97±0.22b                                                 | 0.10±0.01b                                                | 3.98±0.01a                                      |
| T2                  | 14.97±0.85a                                                  | 3.95±0.34a                                                 | 0.14±0.01a                                                | 3.80±0.12a                                      |

注 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )，下同。

2.5 不同畦田规格灌溉对产量的影响

由表 5 可知，T1 处理张杂谷茎粗、单株穗质量、单位面积穗数、千粒质量等产量相关因子较 T2 处理偏低，除单株穗质量与 T2 处理差异显著外，其余均差异不显著。T2 处理虽较 T1 处理产量提高了 4.59%，但差异不显著。T1 处理收获指数较 T2 处理高，但未达到显著性水平。

| 表 5 张杂谷不同畦田灌溉产量及相关因子的影响 |       |         |                                   |        |                                         |       |
|-------------------------|-------|---------|-----------------------------------|--------|-----------------------------------------|-------|
| 处理                      | 茎粗/cm | 单株穗质量/g | 穗数/( $10^4$ 穗· $\text{hm}^{-2}$ ) | 千粒质量/g | 籽粒产量/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | 收获指数  |
| T1                      | 0.82a | 27.74b  | 3.38a                             | 1.695a | 7 278.47a                               | 0.48a |
| T2                      | 0.83a | 29.75a  | 3.43a                             | 1.703a | 7 612.62a                               | 0.47a |

| 表 6 不同畦田规格灌水对张杂谷 WUE 的影响 |                                                                 |                                                                |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 处理                       | 生物量水分利用效率/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) | 产量水分利用效率/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) |
| T1                       | 28.29a                                                          | 13.63a                                                         |
| T2                       | 24.17b                                                          | 11.39b                                                         |

2.6 不同畦田规格灌溉对水分利用效率(WUE)的影响及分析

由表 6 可知，张杂谷水分利用效率和产量水平水分利用效率在 T1 处理下均表现为较高水平，且分别比 T2 处理显著提高了 17.05%、19.67%。结果表明，不同畦田规格灌溉影响水分利用效率。小畦田规格灌溉处理生物量水分利用效率和产量水分利用效率最高，不仅节约了大量灌溉用水，且促进了张杂谷对水分的利用，是该试验中最优试验处理。

3 讨 论

3.1 不同畦田规格对各生育期灌溉及耗水的影响

华北地区，水资源匮乏，灌溉畦田习惯设置一般为宽 5~6 m，长 10 m 左右，但灌水量过大现象仍存在；而过小的畦田面积设计如 5 m×1 m 灌水较为频繁，劳动投入较高。为此，设计了介于以上情况之间的 2 种畦田规格进行研究，T1 处理：2 m×5 m=10 m<sup>2</sup>，T2 处理：6 m×5 m=30 m<sup>2</sup>。研究表明，畦田大小影响灌水及作物耗水。李世瑶等<sup>[15]</sup>在对畦灌质量评价的研究中指出，随着畦长增大，灌水定额增大很多，畦长为 235 m 的畦田灌水定额分别比畦长 80、120 m 畦田多灌水 288.75、486.15 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。杂交谷子是耐旱作物，姜净卫等<sup>[16]</sup>指出，杂交谷子需水高峰期具有较强的吸水能力，在不进行灌溉的条件下张杂谷 3、5、9、10 号耗水量在 330~365 mm 左右，较常规谷子更好的维持较高的产量水平，进一步提高水分利用效率，但并非是减少自身耗水。于亚军等<sup>[17]</sup>研究表明，同一施肥水平，灌水量提高，谷子耗水量提高。本研究表明，畦田规格增大，灌水量及作物耗水量增加，这与前人的研究结果一致。此外，对比同一畦田规格处理张杂谷不同生育时期的灌



水量发现,各个生育期灌水量差异较大,这与李久生等<sup>[18]</sup>研究结果一致。分析认为,灌浆期0~30 cm土层土壤含水率虽较其他时期低,但灌水量最少,因此各生育期表层土壤含水率变化对灌水的影响不明显,其原因可能是由于谷子的生长改变了畦田微地形及土壤紧实度,进而影响水流在畦田的流速和水分入渗速率。

试验中,2种处理收获后土壤含水率较抽穗、灌浆期高,且灌浆期、成熟期张杂谷对水分的消耗均低于播种—抽穗期,说明此时期张杂谷对水分的需求减少,使得灌浆期灌溉水分并未得到充分利用,但也可能是后期降雨增加的原因。因此,灌浆期灌水与否及最佳生育期灌溉方案,还需结合气候条件进一步研究。

### 3.2 不同畦田规格灌溉对生长及光合参数的影响

灌溉畦田大小对生长及光合参数有影响。Dong等<sup>[14]</sup>研究表明,覆膜条件下,土壤水分提高,杂交谷子生物量增多。表2得到T1、T2处理张杂谷灌浆期生物量差异显著,其他时期均差异不显著,其原因是张杂谷拔节、抽穗期需水多,T1处理灌水量少于T2处理,因此造成2个处理生物量差异显著。而成熟期,虽然T1处理灌水量较T2处理减少46.06%,但此期间张杂谷对水分需求明显减少,由于该生育期降水较多,T1处理后期弥补性生长,最终表现为T1、T2处理差异不显著。

叶片水势是衡量作物水分关系的重要标志。叶绿素具有吸收、传递、转换光能的作用,是影响光合作用的重要因素<sup>[19]</sup>。此外,光合、蒸腾以及气孔运动随外界环境变化的响应决定了叶片 *WUE* 的水平,而叶片 *WUE* 是群体 *WUE* 的基础<sup>[20]</sup>。LU等<sup>[10]</sup>研究指出张杂谷3和5号拔节期水分亏缺导致光合速率分别下降27.9%、37.6%。姜净卫<sup>[19]</sup>研究得到,与不覆膜处理相比,土壤水分条件好的覆膜处理使张杂谷3号叶水势提高0.16 MPa,叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度、叶片蒸腾效率分别提高10.87%、8.5%、0.009 2 mol/(m<sup>2</sup>·s)、13.8%。本试验中,不同畦田规格灌水影响张杂谷叶片水势、叶绿素量及光合速率等参数,这与前人研究结果一致,即T2处理灌浆期叶片水势、叶绿素量及光合速率、蒸腾速率、气孔导度均高于T1处理,这与T2处理水分条件在各个生育时期均高于T1处理有关。但T2处理叶片 *WUE* 并未显著升高,反而较T1处理有所下降,说明缩小畦田面积虽在一定程度上降低了作物的光合能力,但其光合速率与蒸腾速率的协调较大畦田处理较为理想,维持了较高的叶片水分利用效率。

### 3.3 不同畦田规格灌溉对张杂谷产量及水分利用效率的影响

畦田规格大小影响产量及水分利用效率。房全孝等<sup>[21]</sup>研究指出,随着土壤水分增加,冬小麦产量持续增加,但 *WUE* 先于产量提前降低。杨静敬等<sup>[12]</sup>研究指出,随着灌水定额增大,冬小麦产量越高,但 *WUE* 越低。李兴等<sup>[22]</sup>研究表明,不同灌溉方式处理谷子 *WUE* 在不同降雨年型表现不同,丰水年不灌水谷子产量及 *WUE* 即可达到最高值。洪瑜等<sup>[11]</sup>研究指出,小麦的产量与水分利用效率在不同畦灌小区处理表现一致,由大到小为30 m×3 m>50 m×2 m>30 m×5 m>50 m×3 m。本试验得到,T1、T2处理张杂谷除单株穗质量差异显著,单位面积穗数、千粒质量差异不显著。T2处理籽粒产量虽比T1处理增加4.6%,但未达到显著性水平,说明T2处理增加的灌水量对谷物产量增加作用不明显。T1处理 *WUE*<sub>BM</sub>、*WUE*<sub>Y</sub>比T2处理分别显著提高17.05%、19.67%,且灌溉用水量较T2处理节约了33.35%。综上表明,在实施小畦灌溉即能有效地提高张杂谷各水平的水分利用效率,更能减少不合理灌溉造成的水资源浪费。

## 4 结 论

小畦田较大畦田处理节约灌溉用水33.35%。小畦田灌溉处理叶片 *WUE* 较大畦田灌溉有所升高,群体和产量水平 *WUE* 均表现为显著升高。因此,张杂谷生育期进行地面水灌溉时,设置畦宽为2 m、畦长为5 m,即实施小畦灌溉,一方面有助于提高谷子水分利用效率,另一方面是实现节约灌溉用水的最直接手段。

### 参考文献:

- [1] 汤英,鲍子云,仝炳伟,等. 宁夏中部干旱带玉米畦灌灌溉制度研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(3):61-65.
- [2] 刘恩民,刘晓云,刘传收,等. 低压管道输水小畦灌的优势与发展前景[J]. 灌溉排水学报,2003,22(3):37-40.
- [3] 朱艳,缴锡云,王维汉,等. 畦灌土壤入渗参数的空间变异性及其对灌水质量的影响[J]. 灌溉排水学报,2009,28(3):46-49.
- [4] 崔振岭,陈新平,张福锁,等. 不同灌溉畦长对麦田灌水均匀度与土壤硝态氮分布的影响[J]. 中国生态农业学报,2006,14(3):82-85.
- [5] 马尚宇,于振文,张永丽,等. 不同畦宽灌溉对小麦耗水特性和产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(8):1 531-1 540.
- [6] 马尚宇,于振文,石玉,等. 不同灌溉畦长对小麦光合特性、干物质积累及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(4):997-1 005.
- [7] 赵治海,冯晓磊,史高雷,等. 抗旱杂交谷子在敦煌极干旱地区节水效果研究[J]. 农业科学与技术,2014,15(2):231-235,247.

- [8] DB 13/T 2153—2014, 杂交谷子高产节水栽培技术规程[S].
- [9] 樊修武, 池宝亮, 张冬梅, 等. 不同水分梯度和种植密度对谷子杂交种产量及水分利用效率的影响[J]. 山西农业科学, 2010, 38(8): 20-23, 26.
- [10] LU H B, QIAO Y M, GONG X C, et al. Influence of drought stress on the photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of hybrid millet[J]. *Photosynthetica*, 2015, 53(2): 306-311.
- [11] 洪瑜, 王芳, 刘汝亮, 等. 不同畦灌方式对冬小麦土壤水分和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 70-75.
- [12] 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.
- [13] 张亚琦, 李淑文, 杜雄, 等. 施钾对杂交谷子水分利用效率和产量的影响[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(6): 1-6.
- [14] DONG BAO DI, LIU MENG YU, JIANG JING WEI, et al. Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybrid millet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and unmulched fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143: 93-101.
- [15] 李世瑶, 蔡焕杰, 陈新明. 基于主成分分析的畦灌质量评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 86-93.
- [16] 姜净卫, 刘孟雨, 董宝娣. 谷子及杂交种的水分利用效率以及节水技术研究思考[J]. 节水灌溉, 2013 (10): 63-66, 70.
- [17] 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 不同水肥条件对宁夏旱地谷子产量、WUE及光合特性的影响[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 87-90.
- [18] 李久生, 饶敏杰. 地面灌溉水流特性及水分利用率的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 54-58.
- [19] 姜净卫, 董宝娣, 司福艳, 等. 地膜覆盖对杂交谷子光合特性、产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 154-158, 194.
- [20] 孙昌禹, 董文琦, 刘孟雨, 等. 作物不同品种间水分利用效率差异机理的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 117-121.
- [21] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 土壤水分对冬小麦生长后期光能利用及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34-39.
- [22] 李兴, 史海滨, 程满金, 等. 集雨补灌区谷子种植方式对产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(2): 106-109.

## Effect of Different Border Dimensions Irrigation on Growth, Yield and Water Use of Hybrid Millet

ZHAO Huan<sup>1,2</sup>, DONG Baodi<sup>1</sup>, QIAO Yunzhou<sup>1</sup>, ZHANG Mingming<sup>1,2</sup>, LIU Mengyu<sup>1</sup>, YANG Hong<sup>1,2</sup>, ZHENG Xin<sup>1,2</sup>

(1.Center for Agricultural Research, Institute of Genetics and Development Biology, Chinese Academy of Sciences/  
Hebei Key Laboratory of Water Saving Agriculture/Key Laboratory of Agriculture Water Resources, Chinese Academy of Sciences,  
Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the hybrid millet cultivar zhang 3 as the test material, field experiment was conducted to examine the effects of different border irrigation treatments on physiological, yield and water use efficiency of hybrid millet. Two field border irrigation treatments were designed as T1: 2 m × 5 m, T2: 6 m × 5 m during 2014 growing season. The result showed that, ①Compared with T2 treatment, total irrigation amount of T1 treatment reduced by 33.35%. In addition, the water consumption in major growing periods had no significant difference between T1 and T2 treatments. ②The leaf water potential, leaf chlorophyll content, photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of T2 treatment increased by 9.0%, 2.67%, 26.44%, 33.0% and 40% respectively, compared with T1 treatment. However, transpiration efficiency of T2 treatment decreased by 4.52%, while there was no difference between the two treatments. ③Biomass of T2 treatment had no significant difference with T1 treatment. Compared with T1 treatment, yield of T2 treatment increased by 4.59%, but the difference was not significant. Water use efficiencies at grain yield level and group level of T1 treatment were 17.05%, 19.67% dramatically higher than T2 treatment, respectively. Comprehensive analysis, small border irrigation is better to improve water use efficiency and is the most direct way to save irrigation water when surface irrigation at hybrid millet growing stage.

**Key words:** irrigation; border dimensions; yield; water use efficiency

责任编辑: 白芳芳