

## 隔沟调亏灌溉对冬小麦-夏玉米光合特性和产量的影响

李彪<sup>1,2</sup>, 孟兆江<sup>1\*</sup>, 申孝军<sup>1</sup>, 刘小飞<sup>1</sup>, 常晓<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南新乡453002; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京100081)

**摘要:**【目的】了解垄栽模式下隔沟调亏灌溉对冬小麦-夏玉米光合特性和产量的影响及其机理。【方法】在移动式防雨棚下测坑内进行试验, 设置3种灌溉方式, 即常规畦灌、隔沟交替灌溉、隔沟调亏灌溉, 分别在冬小麦返青—拔节期、拔节—抽穗期、抽穗—灌浆期以及夏玉米苗期—拔节期、拔节—抽穗期、抽穗—灌浆期进行水分调控, 冬小麦和夏玉米各有5个处理, 并测定了作物各生育期净光合速率、蒸腾速率、产量和WUE等指标。【结果】冬小麦返青期和夏玉米苗期隔沟调亏灌溉处理虽然在调亏时期内降低了光合作用, 但复水后的光合补偿效应有利于实现稳产。冬小麦、夏玉米试验各处理产量顺序均为:T1处理>T2处理>T3处理>T4处理>T5处理, 常规地面灌仍然能够保证作物的最高产量, 但WUE却大幅降低。冬小麦试验中, 与T1处理相比, T2、T3处理分别减产1.98% ( $p>0.05$ )和5.68% ( $p<0.05$ ), 但分别节水10.01% ( $p<0.01$ )和16.91% ( $p<0.01$ ), 水分利用效率分别提高9.04% ( $p<0.05$ )和15.82% ( $p<0.01$ )。夏玉米试验中, T2、T3处理的产量分别较T1处理降低2.93% ( $p>0.05$ )和6.21% ( $p<0.05$ ), 但分别节水12.40% ( $p<0.01$ )和20.59% ( $p<0.01$ ), WUE分别提高10.06% ( $p<0.01$ )和17.32% ( $p<0.01$ )。【结论】在保证底墒充足的情况下, 冬小麦、夏玉米采取隔沟调亏灌溉是可行的, 冬小麦返青—拔节期适度水分胁迫(55%FC~65%FC)和夏玉米苗期—拔节期的适度水分胁迫(60%FC~70%FC), 能够保证作物在不大幅减产的情况下, 具有最高的水分利用效率。

**关键词:**调亏灌溉; 隔沟交替灌溉; 冬小麦; 夏玉米; 光合特性; 产量

中图分类号:S275.9

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180096

李彪, 孟兆江, 申孝军, 等. 隔沟调亏灌溉对冬小麦-夏玉米光合特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 8-14.

### 0 引言

冬小麦和夏玉米是华北地区主要的粮食作物, 但水资源短缺制约了该地区粮食产量的持续增长, 因此, 提高水分利用效率尤为重要。国内外专家和学者就如何高效利用水分做了大量的研究。DU等<sup>[1]</sup>和PANDA等<sup>[2]</sup>认为, 适度水分胁迫会造成小麦轻微的减产, 但可以提高水分利用效率。孟兆江等<sup>[3]</sup>研究表明, 当冬小麦轻度调亏时, WUE以返青—拔节阶段为最高, 而返青前的适当调亏甚至可以增加产量。冯惠玲等<sup>[4]</sup>对玉米的研究表明, 采用苗期或拔节期轻度调亏的控水方式, 可以使产量在降低不明显的情况下, 显著减少耗水量。王增丽等<sup>[5]</sup>认为相较于畦灌和常规沟灌, 隔沟交替灌溉能够提高玉米行粒数、出籽率、产量和水分利用效率。

以上的研究主要集中在调亏灌溉和隔沟交替灌溉。调亏灌溉适用对象较为广泛, 无论宽行作物还是密植作物均可在不同时段内进行水分调控, 但其并未考虑水分在作物根系空间上的作用; 隔沟交替灌溉的研究主要集中在宽行作物, 将之运用到密植作物小麦上的研究鲜有报道。基于此, 进行冬小麦-夏玉米隔沟调亏灌溉试验研究。本研究的基本思路是: 将“调亏灌溉(RDI)”与“隔沟交替灌溉(AFI)”集成于一体, 既考虑在作物生育期内时间上的水分调控或水量优化分配, 调节光合产物向不同组织器官的分配, 调控地上和地下生长动态; 又利用作物在水分胁迫时产生的根信号功能, 在根系活动层的土壤在水平面的某个区域施加一定程度的水分胁迫, 调控植株叶片气孔导度, 减少水分散失, 实现节水、高效的目标。兹以冬小麦-夏玉米

收稿日期:2018-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(U1404528, 51079153, 51309227); 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016019-2); 国家现代农业小麦产业技术体系(CARS-3-1-30)专项经费; 中央级科研院所基本科研业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所)资助项目(FIRI2017-02)

作者简介:李彪(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail: 18146505869@163.com

通信作者:孟兆江(1958-), 男, 研究员, 主要从事作物高效用水和作物水肥耦合理论与技术等研究。E-mail: zhaojiang\_meng@aliyun.com

轮作体系为研究对象,通过探讨隔沟交替灌溉下水分调控对冬小麦、夏玉米光合特性和产量形成的影响,为构建新的田间运行模式-隔沟调亏灌溉模式提供一定理论依据与参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2016年10月—2017年10月在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场移动式防雨棚下进行,下雨时关闭防雨棚隔绝降水,雨后开启。试验场位于黄淮海平原河南省新乡市东北郊(东经113°53′、北纬35°19′),属典型的暖温带半湿润半干旱地区。年平均降雨量为580 mm,年平均气温为13.5℃,年平均积温为5070℃,年日照时间为2497 h,无霜期为220 d,年均潜在蒸散量为2000 mm。试验用土壤类型为潮土,质地为轻沙壤土,均质、各层体积质量相同,土壤体积质量为1.25 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率(FC)为24%(质量含水率)。

### 1.2 试验设计

冬小麦品种为“新麦26”,由河南省新乡市农业科学院小麦研究所提供,夏玉米品种为登海605。测坑面积8 m<sup>2</sup>(2.40 m×3.33 m),深1.8 m,土层底部设置有20 cm厚的沙石过滤层,坑四周及底部通过混凝土防渗结构与周边土体隔离,可有效防止垂向与侧向的水分交换。种植模式分为平作和垄作。垄沟规格为:垄高20 cm,垄宽50 cm,沟底宽20 cm,坡度1:1,每个小区3垄4沟。小麦于2016年10月1日播种,2017年5月27日收获,平作行间距为15 cm,垄作为1垄3行,垄上小麦行距为15 cm。小麦收后留茬。玉米于2017年6月10日播种,9月27日收获,平作行间距为55 cm,垄作为1垄2行,垄上玉米行距为25 cm,株距均为20 cm。所有小区施肥水平、病虫害防治措施相同,垄栽沟灌方式肥料施于沟内,畦灌方式撒施,并在施肥后立即灌水。灌水方式分为隔沟交替灌溉和畦灌2种,垄作栽培示意图见图1和图2,试验设计方案见表1和表2,各生育期灌水量见表3和表4。

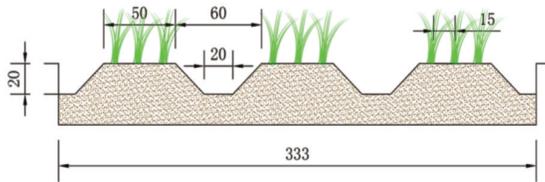


图1 冬小麦垄作栽培示意图(单位:cm)

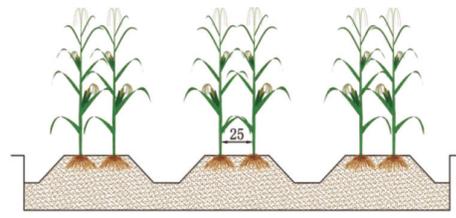


图2 夏玉米垄作栽培示意图(单位:cm)

表1 冬小麦试验设计

处理	处理内容	水分控制下限	备注
T1	常规地面灌,全生育期保持适宜水分,畦灌	80%~85%	当土壤水分下降至80%FC~85%FC区间时,灌至95%FC
T2	1/2隔沟交替灌,垄沟灌	55%~65%	当土壤水分下降至55%FC~65%FC区间时,灌至95%,1/2灌水
T3	隔沟调亏灌:返青-拔节期调亏,垄沟灌	55%~65%	返青-拔节期水分控制在55%FC~65%FC;其余阶段同T2处理
T4	隔沟调亏灌:拔节-抽穗期调亏,垄沟灌	55%~65%	拔节-抽穗期水分控制在55%FC~65%FC;其余阶段同T2处理
T5	隔沟调亏灌:抽穗-灌浆期调亏,垄沟灌	55%~65%	抽穗-灌浆期水分控制在55%FC~65%FC;其余阶段同T2处理

表2 夏玉米试验设计

处理	处理内容	水分控制下限	备注
T1	常规地面灌,全生育期保持适宜水分,畦灌	80%~85%	当土壤水分下降至80%FC~85%FC区间时,灌至95%FC
T2	1/2隔沟交替灌,垄沟灌	60%~70%	当土壤水分下降至60%FC~70%FC区间时,灌至95%,1/2灌水
T3	隔沟调亏灌:苗期-拔节期调亏,垄沟灌	60%~70%	返青-拔节期水分控制在60%FC~70%FC;其余阶段同T2处理
T4	隔沟调亏灌:拔节-抽穗期调亏,垄沟灌	60%~70%	拔节-抽穗期水分控制在60%FC~70%FC;其余阶段同T2处理
T5	隔沟调亏灌:抽穗-灌浆期调亏,垄沟灌	60%~70%	抽穗-灌浆期水分控制在60%FC~70%FC;其余阶段同T2处理

表3 冬小麦各生育期灌水量

处理	返青水			拔节水			扬花水		灌水总量
	0217	0224	0311	0326	0404	0408	0418	0429	
T1	18.8	28.8	35.0	46.3	33.8	25.0	61.3	46.3	295.3
T2	0	33.8	30.0	41.3	42.5	0	56.3	47.5	251.4
T3	0	0	22.5	42.5	38.8	0	55.0	43.8	202.6
T4	0	21.3	27.5	0	26.3	15.0	62.5	32.5	185.1
T5	0	28.8	20.0	48.8	45.0	0	0	36.3	178.9

表4 夏玉米各生育期灌水量

mm

处理	播前	苗期		拔节期		抽穗期		灌浆—成熟期				灌水总量
	0607	0625	0705	0718	0726	0804	0813	0821	0829	0906	0913	
T1	51.05	26.61	24.20	42.35	28.23	40.23	28.10	44.14	38.13	36.87	37.56	397.47
T2	54.16	19.46	18.32	36.28	25.15	34.27	21.27	38.63	30.18	31.05	32.31	341.08
T3	41.57	0	0	40.23	38.67	38.21	22.21	34.15	32.25	31.16	32.37	310.82
T4	53.60	15.23	18.26	12.81	15.16	37.74	20.74	33.68	31.38	29.28	29.64	297.52
T5	50.71	13.79	19.17	33.75	25.11	13.74	12.86	40.13	29.24	28.45	28.73	295.68

### 1.3 观测项目与方法

#### 1.3.1 土壤含水率和灌水量

在冬小麦-夏玉米全生育期每隔2 d用德国IMKO公司制造的TRIME—T3 TDR剖面土壤水分测量系统,观测垄上土壤含水率。在生育期始末段取土,对Trime进行标定,当土壤含水率达到灌水下限时,用取土法加测。灌水量由灌水定额计算公式<sup>[15]</sup>确定,计算式为:

$$m=10H\rho(\beta_i-\beta_f), \quad (1)$$

式中: $m$ 为灌水量(mm); $H$ 为该时段土壤计划湿润层的深度(cm); $\rho$ 为计划湿润层内土壤体积质量( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $\beta_i$ 为目标含水率(田间持水率乘以目标相对含水率); $\beta_f$ 为灌溉前土壤含水率。灌水量用水表计量。

#### 1.3.2 农田耗水量和水分利用效率的计算

耗水量采用水量平衡方程<sup>[16]</sup>计算,计算式为:

$$ET_c=P+M+K-F-S+\Delta W, \quad (2)$$

式中: $ET_c$ 为耗水量(mm); $P$ 为有效降水量(mm); $M$ 为灌水量(mm); $K$ 为地下水补给量(mm); $F$ 为地表径流(mm); $S$ 为深层渗漏量(mm); $\Delta W$ 为全生育期始末段土壤含水量变化量(mm)。试验在防雨棚下的有底测坑中进行,因此, $K$ 、 $F$ 、 $S$ 都为0。

根据各处理产量和耗水量计算水分利用效率( $WUE$ ),计算式为:

$$WUE=Y/ET_c, \quad (3)$$

式中: $WUE$ 为产量水分利用效率( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $Y$ 为产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $ET_c$ 为作物蒸发蒸腾量( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )。

#### 1.3.3 光合特性

采用美国LI-COR公司生产的LI-6400XT便携式光合作用测量系统,于冬小麦、夏玉米每个生育期测定1~2次叶片光合特性,各处理在垄二边行各选取2株、中间取1株进行挂牌标记,每次测定选在晴好天气的09:00—11:00进行;分别测定旗叶的光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )等,重复5次,取其平均值。

#### 1.3.4 产量测定

冬小麦产量测产:冬小麦成熟后,各小区全部收获、考种,小区小麦产量以实收产计算,并折算为单位面积产量。夏玉米产量测产:夏玉米成熟后,各小区全部收获、考种,脱粒晒干后测产。

#### 1.3.5 数据处理与分析

采用Excel 2013进行数据处理,SAS 9.2统计软件进行方差分析,LSD法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬小麦各生育期净光合速率、蒸腾速率

图3(a)反映的是冬小麦叶片净光合速率随生育期变化情况。从图3(a)可以看出,4月20日(开花期)之前各处理冬小麦净光合速率变化并不明显,花后各处理表现出明显差异,且波动较大,并在5月4日(灌浆前期)达到峰值,之后,随着土壤水分减少,温度上升,叶片逐渐衰老,各处理旗叶 $P_n$ 急剧下降。花后,T2处理相对于T3、T4和T5处理具有更高的叶片净光合速率,说明小麦各生育期的水分胁迫对生育后期的光合作用均有一定影响。但在花后,T3处理的 $P_n$ 高于其他隔沟调亏灌溉处理,4月27日T3处理的 $P_n$ 为 $20.87 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,甚至要高于T2处理,说明隔沟调亏灌溉下返青—拔节期的水分胁迫虽会降低花后旗叶 $P_n$ ,但可延长灌浆历时,光合补偿效应明显。T5处理在花后经历水分亏缺,净光合速率相对其他处理明显降低,峰值出现之后,又呈快速下降趋势,并在5月19日(灌浆后期)出现最小值 $4.75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,显著小于其他处理( $p<0.05$ ),说明隔沟调亏灌溉下冬小麦抽穗—灌浆期的水分胁迫对生育后期的光合作用影响较大。

图3(b)给出了冬小麦叶片蒸腾速率随生育期的变化情况。由图3(b)可知,各处理冬小麦 $T_r$ 整体变化趋势与 $P_n$ 并不完全一致。返青—拔节前期 $T_r$ 的变化趋势和 $P_n$ 相似,但在4月10日(孕穗期)之后, $T_r$ 出现2个峰

值,并在5月12日(灌浆中期)达到最大值,之后呈现快速下降趋势。另外,T1和T2处理的旗叶 $T_r$ 高于其他处理,说明小麦各生育期的水分胁迫对生育后期的蒸腾作用均有一定影响,这与对光合作用的影响一致。花后,T5处理的旗叶 $T_r$ 显著小于其他处理,同样在5月19日出现最小值 $3.14 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,表明隔沟调亏灌溉下冬小麦抽穗—灌浆期的水分胁迫对生育后期旗叶蒸腾速率有较大影响。

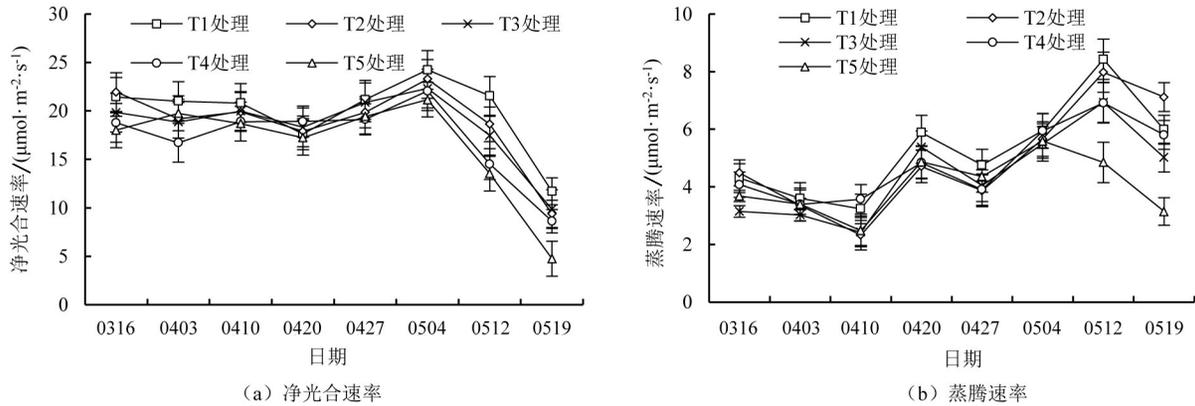


图3 冬小麦各生育期净光合速率和蒸腾速率

## 2.2 夏玉米各生育期净光合速率、蒸腾速率

图4(a)反映的是夏玉米叶片净光合速率随生育期变化情况。从图4(a)可以看出,夏玉米净光合速率整体呈现先升高后下降的趋势,并在7月20日(拔节前期)达到峰值。8月3日(抽雄前期)、8月24日(灌浆前期)和9月8日(灌浆后期)T3处理的 $P_n$ 分别为 $28.34$ 、 $25.62$ 、 $17.62 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,均显著高于T4和T5处理( $p < 0.05$ ),说明隔沟调亏灌溉下苗期—拔节期的水分胁迫虽会降低花后旗叶 $P_n$ ,但也可延长灌浆历时。T5处理在抽雄期经历水分亏缺,光合速率相对其他处理明显降低,呈快速下降趋势,说明隔沟调亏灌溉下夏玉米抽雄—灌浆期的水分胁迫对生育后期的光合速率影响较大,复水后的补偿效应并不明显。

图4(b)给出了夏玉米叶片蒸腾速率随生育期的变化情况。由图4(b)可知,夏玉米 $T_r$ 整体变化趋势与 $P_n$ 基本一致,随叶片逐渐衰老, $T_r$ 急剧下降。在玉米生育后期,T1和T2处理的 $T_r$ 高于其他处理,T2处理在8月3日和8月24日的 $T_r$ 分别为 $6.41 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $5.98 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,均显著高于T3、T4和T5处理( $p < 0.05$ ),说明夏玉米各生育期的水分胁迫对生育后期的蒸腾作用均有一定影响,这与对光合作用的影响一致。T3处理在生育后期的蒸腾速率相对于T4和T5处理有所减小,这有利于提高叶片水分利用效率。9月8日,各处理间差异并不明显( $p > 0.05$ ),说明随着叶片逐渐衰老,叶片蒸腾速率受土壤水分的影响变小。

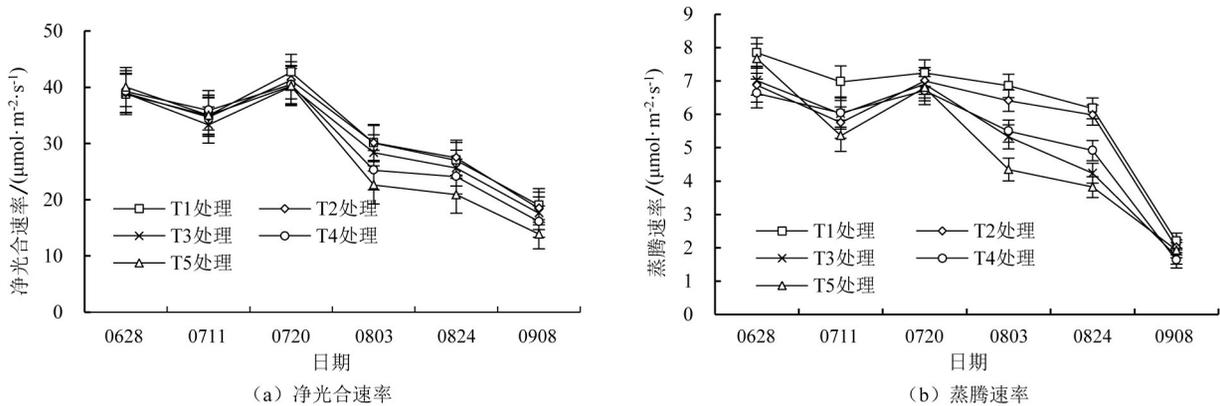


图4 夏玉米各生育期净光合速率和蒸腾速率

## 2.3 隔沟调亏灌溉对冬小麦-夏玉米轮作体系产量与WUE的影响

表5为冬小麦、夏玉米以及周年的产量和WUE。由表5可知,冬小麦各处理间产量均值表现为T1处理>T2处理>T3处理>T4处理>T5处理,其中T1、T2处理之间无显著差异( $p > 0.05$ ),T4和T5处理与其他处理的差异达极显著水平( $p < 0.01$ ),说明隔沟交替灌溉并不会对产量造成显著影响,但隔沟调亏灌溉下拔节期及之后的水分调亏对产量影响较大。从水分利用效率上看,各处理均值表现为:T3处理>T2处理>T4处理>T1处理>T5处理,其中,T3处理与T1、T4、T5处理的差异达极显著水平( $p < 0.01$ ),T1和T5处理显著小于其他

处理( $p<0.05$ )。T2和T3处理的产量分别为7 947.23、7 646.56 kg/hm<sup>2</sup>,较T1处理分别降低1.98%( $p>0.05$ )和5.68%( $p<0.05$ ),但分别节水10.01%( $p<0.01$ )和16.91%( $p<0.01$ ),*WUE*分别为1.93、2.05 kg/m<sup>3</sup>,较T1处理分别提高9.04%( $p<0.05$ )和15.82%( $p<0.01$ ),说明全生育期隔沟交替灌溉和隔沟调亏灌溉下返青期进行适当的水分胁迫均能在保证产量的情况下,大幅节水。

表5 冬小麦-夏玉米产量及*WUE*

处理	冬小麦季			夏玉米季			周年		
	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	耗水量/ mm	<i>WUE</i> / (kg·m <sup>-3</sup> )	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	耗水量/ mm	<i>WUE</i> / (kg·m <sup>-3</sup> )	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	耗水量/ mm	<i>WUE</i> / (kg·m <sup>-3</sup> )
T1	8 107.36aA	458.75aA	1.77cCD	8 863.80aA	494.68aA	1.79cC	16 971.16aA	953.43aA	1.78cC
T2	7 947.23abA	412.82bB	1.93bAB	8 603.91abA	433.32bB	1.97bAB	16 551.14aA	846.14bB	1.96bAB
T3	7 646.56bA	381.19bcC	2.05aA	8 313.75bA	392.81bcC	2.10aA	15 960.31bAB	774.00bcC	2.06aA
T4	7 043.38cB	373.95cC	1.88bBC	7 821.62cB	381.25cC	2.05abA	14 865.00cBC	755.20cC	1.97bA
T5	6 276.65dC	371.83cC	1.69cD	7 019.84dC	378.93cC	1.85cBC	13 296.49dC	750.76cC	1.77cC

注 不同小写字母和大写字母分别表示同一列数值经多重比较,在0.05水平和0.01水平上的差异显著性。

对夏玉米来说,T1处理产量最高,为8 863.80 kg/hm<sup>2</sup>,与T4和T5处理的差异达极显著水平( $p<0.01$ ),与T2处理的差异达显著水平( $p<0.05$ ),但T1和T2处理之间并无显著差异( $p>0.05$ )。从水分利用效率来看,各处理间均值表现为T3处理>T4处理>T2处理>T5处理>T1处理,其中T3处理与T1、T2、T5处理的差异达显著水平( $p<0.05$ ),说明隔沟调亏灌溉下苗期一拔节期适度的水分胁迫能较大程度提高*WUE*,其次为拔节一抽雄期的水分胁迫,而常规地面灌和抽雄一灌浆期的水分胁迫均不利于提高*WUE*。T2和T3处理的产量较T1处理分别降低2.93%( $p>0.05$ )和6.21%( $p<0.05$ ),但分别节水12.40%( $p<0.01$ )和20.59%( $p<0.01$ ),*WUE*为1.97、2.10 kg/m<sup>3</sup>,较T1处理分别提高10.06%( $p<0.01$ )和17.32%( $p<0.01$ ),说明隔沟交替灌溉在提高水分利用效率方面具有显著优势,隔沟调亏灌溉下苗期一拔节期进行适当的水分胁迫能最大程度节水并提高夏玉米的水分利用效率。

综合来看,周年产量均值表现为T1处理>T2处理>T3处理>T4处理>T5处理,其中T2和T1处理间差异不显著( $p>0.05$ ),T3和T1处理间差异显著( $p>0.05$ ),T4、T5和T1处理间差异达极显著水平( $p<0.01$ )。各处理周年水分利用效率均值表现为T3处理>T4处理>T2处理>T1处理>T5处理,T3处理的*WUE*为2.06 kg/m<sup>3</sup>,与其他处理间差异显著( $p<0.05$ )。总的来看,T2和T3处理的周年产量分别为16 551.14和15 960.31 kg/hm<sup>2</sup>,较T1处理分别降低2.47%( $p>0.05$ )和5.96%( $p<0.05$ ),但分别节水11.25%( $p<0.01$ )和18.82%( $p<0.01$ ),*WUE*为1.96 kg/m<sup>3</sup>和2.06 kg/m<sup>3</sup>,较T1处理分别提高10.11%( $p<0.01$ )和15.73%( $p<0.01$ ),说明隔沟调亏灌溉下冬小麦返青一拔节期和夏玉米苗期一拔节期适当的水分胁迫能最大程度节水并提高周年水分利用效率。

### 3 讨论

LIU等<sup>[9]</sup>对冬小麦在移动防雨棚下的试验结果表明,水分胁迫会导致灌浆期光合速率下降,阻碍花后光合产物的合成以及花前光合产物向籽粒的运输,从而引起减产。孙宏勇等<sup>[7]</sup>认为水分胁迫处理的光合特性明显小于其他处理,但随着生育期推进,差异会越来越小。刘帆等<sup>[8]</sup>利用防雨棚以夏玉米为对象进行水分胁迫大田试验,分析不同生育期水分胁迫对玉米光合特性的影响,研究表明土壤水分下降会使玉米叶片的光合速率、蒸腾速率降低,并且对灌浆期光合作用的抑制大于拔节期的。这些结论大多都是在畦灌方式下得出的,关于隔沟调亏灌溉对作物光合特性的影响鲜见报道。本文研究表明,不同生育期的水分胁迫均会影响到冬小麦和夏玉米叶片光合作用和蒸腾速率,复水后均会出现光合补偿效应,但生育前期的补偿效果明显好于生育后期,特别是隔沟调亏灌溉下冬小麦抽穗一灌浆期和夏玉米抽雄一灌浆期的水分胁迫严重削弱了作物的光合作用,光合系统可能受到伤害,即使在灌浆期复水也难以补偿,最终产量显著低于其他处理( $p<0.05$ )。并且冬小麦和夏玉米叶片的蒸腾和光合速率变化趋势不完全一致,并未呈线性关系,这和已有研究结果相似<sup>[9-10]</sup>。

王书吉等<sup>[11]</sup>研究认为,不同生育阶段水分胁迫对小麦产量影响不同<sup>[12]</sup>。拔节期和抽穗一灌浆期的水分胁迫会降低小麦灌浆速率和缩短灌浆时间,从而降低产量<sup>[13-14]</sup>,在拔节期及其以前水分调亏最有利于提高水分利用效率<sup>[15]</sup>。这些结论与本研究的结论相似。本研究表明,隔沟调亏灌溉下返青一拔节期的水分胁迫表现出最高的*WUE*,说明生育前期适度的水分胁迫虽然会造成轻度减产,但可以提高*WUE*,这可能是由于返

青期是小麦的营养生长阶段,水分亏缺减少了植株干物质的积累,但复水后光合产物积累具有显著的补偿效应,光合产物开始向籽粒分配与转移,故籽粒产量降低不显著,且具有最高的  $WUE$ <sup>[16]</sup>。隔沟调亏灌溉下抽穗—灌浆期的水分胁迫会严重影响小麦开花期授粉,加之后期复水的补偿效应并不明显,导致减产严重。曹成等<sup>[17]</sup>的测坑试验表明,抽穗灌浆期是小麦耗水强度最大期,而此阶段的水分胁迫对冬小麦产量影响最大,所以不建议在冬小麦抽穗期之后进行水分调亏。

关于隔沟交替灌溉对玉米产量和  $WUE$  的影响,前人已做了大量的研究。汪顺生等<sup>[18]</sup>认为合理控制水分下限(65%FC)时,夏玉米减产只有3.99%,但耗水量降低21.05%,且具有最高的灌溉水利用效率。王艳等<sup>[19]</sup>的研究表明,当灌水量为充分灌水的75%时,分根交替灌溉有良好的产量和  $WUE$ 。这与本文研究有所不同,因为不同生育期的水分胁迫对产量的影响程度不同。另外有盆栽条件下的分根区交替灌溉试验认为,在拔节—抽雄期轻度亏水(60%FC~70%FC)对玉米各项指标均无显著影响<sup>[20]</sup>,该研究虽然考虑到了不同生育期水分胁迫对产量的影响,但由于为盆栽试验,与本文在测坑中的研究结果有所不同。本研究表明隔沟交替灌溉下苗期—拔节期的轻度调亏对玉米产量无显著影响,且具有最高的水分利用效率。但隔沟调亏灌溉下拔节—灌浆期的水分胁迫对最终产量影响较大,说明拔节—灌浆期是玉米产量形成的关键时期,这一时期缺水对产量构成有较大影响,即使复水也难以补偿。

从冬小麦—夏玉米轮作体系角度来看,隔沟交替灌溉能够保证周年产量,虽然隔沟调亏灌溉下冬小麦返青—拔节期和夏玉米苗期—拔节期适当的水分胁迫会带来一定程度的减产,但可以最大程度节水并提高周年水分利用效率。

## 4 结论

1)隔沟调亏灌溉下冬小麦返青期和夏玉米苗期的调亏虽然在调亏时期内降低了光合作用,但复水后出现明显的光合补偿效应,这可能是最终没有大幅减产的原因之一,但隔沟调亏灌溉下冬小麦抽穗—灌浆期和夏玉米抽雄—灌浆期的水分胁迫严重削弱了冬小麦的光合作用,光合系统可能受到伤害,即使在灌浆期复水也难以补偿,这可能会对最终产量的形成造成严重的影响。

2)隔沟调亏灌溉下不同生育期的水分胁迫对冬小麦产量有不同程度的影响,影响程度由小到大依次为返青—拔节期、拔节—抽穗期、抽穗—灌浆期,其中返青—拔节期水分胁迫的处理具有最高的  $WUE$ 。T3处理的产量较T1处理降低5.68%( $p<0.05$ ),但节水16.91%( $p<0.01$ ), $WUE$ 提高15.82%( $p<0.01$ )。隔沟调亏灌溉下,夏玉米不同生育期水分胁迫对产量影响程度由小到大依次为苗期—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期,其中苗期—拔节期水分胁迫的处理具有最高的  $WUE$ 。T3处理的产量较T1处理降低6.21%( $p<0.05$ ),但节水20.59%( $p<0.01$ ), $WUE$ 提高17.32%( $p<0.01$ )。

3)从冬小麦—夏玉米轮作体系角度来看,常规地面灌仍然能够保证作物的最高产量,但  $WUE$  却大幅降低。在保证底墒充足的情况下,冬小麦、夏玉米采取隔沟调亏灌溉是可行的,冬小麦返青—拔节期适度水分胁迫(55%FC~65%FC)和夏玉米苗期—拔节期的适度水分胁迫(60%FC~70%FC),能够保证作物在不大幅减产的情况下,具有最高的水分利用效率。

### 参考文献:

- [1] DU Taisheng, KANG Shaozhong, SUN Jingsheng, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(1):66-74.
- [2] PANDA R K, BEHERA S K, KASHYAP P S. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 66(3):181-203.
- [3] 孟兆江,贾大林,刘安能,等. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4):66-69.
- [4] 冯惠玲. 调亏灌溉对玉米生长发育特性及水分利用效率的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2016(3):10-13.
- [5] 王增丽,朱兴平,温广贵. 不同灌溉方式对制种玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *节水灌溉*, 2017 (1):12-15.
- [6] LIU Enke, MEI Xurong, YAN Changrong, et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and  $WUE$  in two winter wheat genotypes[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 167:75-85.
- [7] 孙宏勇,张喜英,陈素英,等. 水分胁迫对冬小麦冠层结构及光合特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(2):31-34.
- [8] 刘帆,申双和,李永秀,等. 不同生育期水分胁迫对玉米光合特性的影响[J]. *气象科学*, 2013, 33(4):378-383.
- [9] 郑彩霞,张富仓,张志亮,等. 限量灌溉和施磷对冬小麦光合性能及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(6):78-80, 90.
- [10] 郭旭新,周富彦,寇明蕾,等. 水分胁迫下夏玉米的生理特性及补偿效应[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(3):85-88.

- [11] 王书吉,李彦岭,刘婧然.不同调亏模式对冬小麦产量形成的影响[J].节水灌溉,2016(3):31-34.
- [12] 姚宁,宋利兵,刘健,等.不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(12):2 379-2 389.
- [13] 王书吉,康绍忠,李涛.基于节水高产优质目标的冬小麦适宜水分亏缺模式[J].农业工程学报,2015,31(12):111-118.
- [14] 褚鹏飞,王东,张永丽,等.灌水时期和灌水量对小麦耗水特性、籽粒产量及蛋白质组含量的影响[J].中国农业科学,2009,42(4):1 306-1 315.
- [15] 孟兆江,段爱旺,王景雷,等.调亏灌溉对冬小麦不同生育阶段水分蒸散的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):198-202.
- [16] 黄玲,高阳,邱新强,等.灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响[J].农业工程学报,2013,29(14):99-108.
- [17] 曹成,汤广民.冬小麦受旱减产规律及产量与水关系模型研究[J].灌溉排水学报,2017,36(8):13-17.
- [18] 汪顺生,费良军,孙景生,等.控制性交替隔沟灌溉对夏玉米生理特性和水分生产效率的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):115-119.
- [19] 王艳,张佳宝,张丛志,等.不同灌溉处理对玉米生长及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2008,27(5):41-44.
- [20] 陆文娟,李伏生,农梦玲.不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米生理特性和水分利用的影响[J].生态学报,2014,34(18):5 257-5 265.

## Improving Photosynthesis and Water Use Efficiency of Winter Wheat and Summer Maize by Coupling Alternate Furrow Irrigation and Regulated Water Deficit

LI Biao<sup>1,2</sup>, MENG Zhaojiang<sup>\*</sup>, SHEN Xiaojun<sup>1</sup>, LIU Xiaofei<sup>1</sup>, CHANG Xiao<sup>1</sup>

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** **【Objective】** Improving irrigation efficiency plays a key role in developing sustainable agriculture and the purpose of this paper was to investigate the effects of alternate furrow irrigation with regulated water deficit on photosynthesis and yields of rotated winter wheat and summer maize. **【Method】** Experiments were conducted in lysimeters under a rainproof shelter in 2016—2017 with three treatments: conventional border irrigation (T1), standard alternate furrow irrigation (T2), and alternate furrow irrigation with regulated water deficit (T3). During the experiments, the photosynthesis, water use efficiency (*WUE*) and the yields of the wheat and the maize were measured at different growth stages. **【Result】** The net photosynthetic rate and the transpiration rate of the two crops under T1 were higher than that under T3, but re-watering after water stress could compensate the lost photosynthesis, thereby maintaining yields. The yields of the two crops under T1 was higher than those T2 and T3, but its water use efficiency was low. Compared to T1, T2 and T3 reduced the wheat yield by 1.98% ( $p>0.05$ ) and 5.68% ( $p<0.05$ ), while reduced water consumptions by 10.01% ( $p<0.01$ ) and 16.91% ( $p<0.01$ ) with their associated *WUE* increasing by 9.04% ( $p<0.05$ ) and 15.82% ( $p<0.01$ ) respectively. Similarly, compared to T1, T2 and T3 reduced the maize yield by 2.93% ( $p>0.05$ ) and 6.21% ( $p<0.05$ ) respectively, but increased the *WUE* by 10.06% ( $p<0.05$ ) and 17.32% ( $p<0.01$ ) respectively. **【Conclusion】** Alternate furrow irrigation by imposing a water deficit of 55%~65% of field moisture capacity at the returning green stage of the winter and a water deficit of 60%~70% of field moisture capacity at the seedling stage of summer maize can substantially improve *WUE* without considerably scarifying their yields.

**Key words:** regulated deficit irrigation; alternate furrow irrigation; winter wheat; summer maize; photosynthetic characteristics; yields

责任编辑:陆红飞