

DOI: 10.5846/stxb201401130090

郎坤, 刘泉汝, 卞城月, 刘馨惠, 李全起. 推迟拔节水灌溉对宽幅精播麦田冠层温度与叶片水分利用效率的影响. 生态学报, 2015, 35(15): 5262-5268.

Lang K, Liu Q R, Bian C Y, Liu X H, Li Q Q. Effect of delayed irrigation at jointing stage on canopy temperature and leaf water use efficiency of winter wheat in wide-precision planting pattern. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5262-5268.

# 推迟拔节水灌溉对宽幅精播麦田冠层温度与叶片水分利用效率的影响

郎 坤, 刘泉汝, 卞城月, 刘馨惠, 李全起\*

山东农业大学水利土木工程学院, 泰安 271018

**摘要:**为了探讨冬小麦高效节水灌溉模式, 于 2012—2013 年在山东农业大学试验站采用两种种植模式(宽幅精播种植和常规种植), 每种植模式设 3 种灌溉处理(全生育期不灌溉、拔节期灌溉 60 mm 和拔节后 10 d 灌溉 60 mm), 研究了推迟拔节水灌溉对宽幅精播麦田冠层温度、光合速率、蒸腾速率、叶片水分利用效率( $WUE_L$ )和籽粒产量等的影响。结果表明, 推迟拔节水灌溉显著提高了宽幅精播麦田生育后期的冠层温度、旗叶光合速率和蒸腾速率, 且在冬小麦生长后期推迟拔节水灌溉显著提高了宽幅精播麦田的  $WUE_L$ , 有利于实现宽幅精播麦田的节水高产; 产量构成因素中, 推迟拔节水灌溉对两种种植模式的千粒重均没有显著影响, 但推迟拔节水灌溉显著提高了宽幅精播麦田的穗粒数和籽粒产量。统筹考虑冬小麦的  $WUE_L$  和籽粒产量, 推迟拔节水灌溉对宽幅精播麦田实现节水高产具有一定的现实意义。

**关键词:**冬小麦; 宽幅精播; 拔节; 冠层温度; 叶片水分利用效率; 产量

## Effect of delayed irrigation at jointing stage on canopy temperature and leaf water use efficiency of winter wheat in wide-precision planting pattern

LANG Kun, LIU Quanru, BIAN Chengyue, LIU Xinhui, LI Quanqi\*

College of Water Conservancy & Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

**Abstract:** Optimal water-saving and high-efficiency irrigation regime of winter wheat were investigated during 2012—2013 winter wheat growing season, at Experimental Station of Shandong Agricultural University. Two types of planting patterns (wide-precision planting pattern and conventional-cultivation planting pattern) and three different irrigation regimes (no irrigation at any time during the growing season, irrigation of 60.0 mm at jointing stage, and irrigation of 60.0 mm at 10 days after the jointing stage) were conducted to study the effect of delayed irrigation at jointing stage on canopy temperature, photosynthetic rate, transpiration rate, leaf water use efficiency, and grain yield of the winter wheat. The results showed that in the wide-precision planting pattern, compared with conventional-cultivation planting pattern, delayed irrigation at jointing stage significantly increased the canopy temperature, photosynthetic rate, and transpiration rate in flag leaves. In the late winter wheat growth stages, delayed irrigation at the jointing stage significantly increased the efficiency of leaf water use and achieved a reasonable water use efficiency and grain yield in the wide-precision planting pattern. Delayed irrigation at the jointing stage had no significant effect on the 1000-grain weight in both planting patterns; however, delayed irrigation at jointing stage significantly increased the number of kernels per spike and grain yield in the wide-precision

**基金项目:**国家自然科学基金项目(31101114); 国家“十二五”农村领域科技计划课题(2013AA102903); 山东省科技发展计划项目(2011GNC21101); 山东省高等学校优秀中青年骨干教师国际合作培养项目

**收稿日期:**2014-01-13; **网络出版日期:**2014-09-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: quanqili@sdau.edu.cn

planting pattern. The leaf water use efficiency and grain yield of the winter wheat suggest that winter wheat in wide-precision planting pattern should be irrigated with 60 mm of water at 10 days after the jointing stage to achieve reasonable water use efficiency and grain yield in North China.

**Key Words:** winter wheat; wide-precision planting; jointing stage; canopy temperature; leaf water use efficiency; grain yield

水是作物生长过程中溶解、运送和分配养分的重要载体。华北平原作为我国冬小麦的主产区,水资源短缺是限制该地区冬小麦生产的最主要制约因素<sup>[1]</sup>。作物缺水研究对于探讨水分对作物生理生化过程的影响、指导田间灌溉和节约水资源等都有重要意义<sup>[2]</sup>。

干旱可引发植物体内一系列的生理变化,其中冠层温度是作物生理变化中最直观的表现<sup>[3]</sup>。冠层温度是作物冠层不同高度茎、叶表面温度的平均值<sup>[4]</sup>,它作为衡量作物缺水的重要指标,已被广泛地用来推断作物水分状况。目前,关于冠层温度与小麦生育状况之间关系的研究相对较多。李丽等<sup>[5]</sup>观测了不同水分处理下冬小麦冠层温度、叶水势和水分利用效率(WUE)的变化,结果表明,随着含水量的增加,各处理的平均和最高冠层温度整体呈下降趋势;崔新菊等<sup>[6]</sup>研究了不同灌溉条件下冬小麦灌浆期冠层温度和产量,发现冬小麦冠层温度不仅受基因型影响,还受灌浆时期和环境条件的影响;徐银萍等<sup>[7]</sup>利用红外测温仪测定了23个冬小麦品种的冠层温度,并分析了其与产量和WUE的关系,结果显示,无论是灌浆初期还是中期或中后期,旱地冬小麦产量和WUE与冠层温度均呈极显著负相关,并且随着灌浆过程的推移,相关性增大。

WUE是节水农业领域研究的关键问题。叶片水分利用效率(WUE<sub>L</sub>)是WUE在叶片水平上的表征,是作物光合速率与蒸腾速率的比值,可作为叶片的瞬时WUE<sup>[8]</sup>,提高WUE<sub>L</sub>对冬小麦生产具有重要意义。张娟等<sup>[9]</sup>利用抗旱性不同的小麦品种对于干旱状态下叶片相关生理指标间的关系进行了研究,指出WUE<sub>L</sub>与叶片光合速率和蒸腾速率等相关生理指标关系密切。高延军等<sup>[10]</sup>研究表明,冬小麦旗叶WUE<sub>L</sub>与光强、蒸腾速率、胞间CO<sub>2</sub>浓度和气孔导度关系密切,且冬小麦旗叶WUE<sub>L</sub>在土壤水分含量、光强和CO<sub>2</sub>浓度等环境因子方面存在一定的临界值。

大量研究表明,拔节期、抽穗期和灌浆期是冬小麦的需水关键期,且拔节期又是最重要的灌水关键期。Xue等<sup>[11]</sup>、Zhang等<sup>[12]</sup>和Lv等<sup>[13]</sup>研究表明,拔节期是冬小麦的需水关键期,此时灌溉能够提高冬小麦的产量和WUE。但是,王红光等<sup>[14]</sup>通过在相同补灌水平下,由拔节期推迟至拔节后10 d补灌,在不降低降水量和土壤储水消耗量所占总耗水量比例的情况下,能够显著提高穗粒数和千粒重,从而提高了冬小麦籽粒产量、WUE和灌水生产效率。

宽幅精播种植模式为山东农业大学余松烈院士等提出的一种新型小麦种植模式,即在播种量相同的情况下,改传统播种机播幅宽3—5 cm为6—10 cm,改生产上密集一条线条播为单粒分散粒播。应用该模式,2010年在我国北方冬麦区获得了大面积单产的最高纪录<sup>[15]</sup>。该模式能够显著增产,主要在于显著提高了产量构成因素中的穗数<sup>[16]</sup>。但是,推迟拔节水灌溉是否会激发该模式的群体调节能力,从而进一步提高籽粒产量仍鲜见报道。本试验以冬小麦为研究对象,采用宽幅精播种植模式,以冬小麦的需水关键期拔节期为切入点,采取推迟拔节水灌溉的方式,系统探讨其对冬小麦冠层温度、籽粒产量和WUE<sub>L</sub>等的影响,以期为华北平原冬小麦节水高产提供理论依据与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本试验于2012—2013年在山东农业大学试验站(36°10′19″N, 117°9′03″E)水分池内进行。该试验点属温带大陆性半季风气候区,年均降水697.0 mm,其中70%集中在7—9月份的夏玉米生长期间。本试验在

自然状态下进行,2012 年 10 月—2013 年 6 月冬小麦生育期间每月降水量依次为:15.7,18.4,19.0,5.1,13.2,13.6,12.8,98.0 和 0.0 mm,总降水量 195.8 mm,为平水年。该试验点的地下水位超过 5.0 m,可忽略地下水对冬小麦的影响。水分池面积为 3.0 m×3.0 m,深 1.5 m,四周水泥抹面,下不封底,池中土壤为原状土。水分池内 0—20 cm 土层碱解氮、速效钾和速效磷含量分别为 108.1、92.4 和 16.1 mg/kg。底施磷酸二铵 260.9 kg/hm<sup>2</sup>,尿素 192.2 kg/hm<sup>2</sup>,硫酸钾 210.0 kg/hm<sup>2</sup>,拔节期追施尿素 192.2 kg/hm<sup>2</sup>。供试品种为济麦 22,于 2012 年 10 月 9 日按 9.4 g/m<sup>2</sup>进行人工点播。

## 1.2 试验设计

本试验采用裂区设计,主区为 3 种灌溉处理,分别为全生育期不灌溉(0)、拔节期灌溉 60 mm(1)和拔节后 10 d 灌溉 60 mm(2);副区为两种种植模式,即宽幅精播种植(W,播幅和行距分别为 8 cm 和 30 cm)和常规种植(C,播幅和行距分别为 3 cm 和 30 cm)。两种种植模式的播种量相同。灌水时间为 2013 年 4 月 8 日(拔节水)和 2013 年 4 月 18 日(拔节后 10 d)。灌溉时,用水表严格控制灌水量。每处理重复 3 次,共 18 个小区,随机区组排列。

## 1.3 项目测定与计算

### 1.3.1 冠层温度

用 Raytek RAYMX2C 便携式非接触型红外冠层温度测定仪测定,分辨率 0.1℃,响应时间 2—3 s,视场角为 5°。选择典型晴天,于冬小麦开花期(4 月 29 日)、灌浆初期(5 月 11 日)、灌浆中期(5 月 19 日)、灌浆后期(5 月 23 日)和乳熟期(5 月 28 日)测定各小区的冠层温度值,观测时间为 13:30—15:30。观测时,按照农田小气候观测的对称法进行,手持测温仪,置于 1.5 m 高度,为了消除太阳方位角及冬小麦种植方向对观测值的影响,观测时测温仪感应头距穗 20 cm,探棒以 45°角瞄准小区内中间的冠层,其测点为群体生长一致、有代表性的部位,并避开裸地影响,直接在显示屏上读取数据。为减少误差,在小区东西南北 4 个方位循环观测两次,共得到 8 个数据,取其平均值作为该次测定的观测值。

### 1.3.2 光合速率和蒸腾速率

利用便携式光合作用测定系统 LI-6400(LI-COR 公司,美国)测定。在冬小麦的开花期、灌浆期和乳熟期,选择典型晴天,于 9:00—11:00 之间,测定每小区 3 片旗叶的净光合速率和蒸腾速率,取平均值进行分析。测量时,设置光合作用测定系统的内置光照强度为 1600  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

### 1.3.3 叶片水分利用效率的计算

用叶片通过蒸腾消耗一定量的 H<sub>2</sub>O 所同化的 CO<sub>2</sub>量计算 WUE<sub>L</sub>(CO<sub>2</sub>  $\mu\text{mol}$ / H<sub>2</sub>O mmol)。公式如下<sup>[17]</sup>:

$$\text{WUE}_L = P_n / T_r$$

式中,WUE<sub>L</sub>为叶片水分利用效率(CO<sub>2</sub>  $\mu\text{mol}$  /H<sub>2</sub>O mmol);  $P_n$  为净光合速率( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $T_r$  为蒸腾速率( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )。

### 1.3.4 产量及产量构成因素

收获时,取除边 3 行外生长均匀一致的 1 m 双行调查穗数和籽粒产量,另连续取 20 株进行室内考种,考察穗粒数和千粒重。

## 1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS (Data Processing System) 统计分析系统进行数据处理和统计分析,采用 LSD 法进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 冠层温度

冬小麦从开花期到乳熟期,各处理的冠层温度呈先增加后减小的趋势,在灌浆后期达到最高值然后急剧减小(表 1)。在开花期,无论宽幅精播种植模式还是常规种植模式,不灌溉处理的冠层温度均显著高于灌溉

处理。在相同灌溉条件下,W2处理的冠层温度显著高于C2处理,尤其是在乳熟期,W2处理的冠层温度最高且显著高于其余各处理。因此,推迟拔节水灌溉显著提高了宽幅精播麦田生育后期的冠层温度。

表 1 不同处理对冬小麦当冠层温度的影响

Table 1 Effects of different treatments on canopy temperature of winter wheat

| 处理<br>Treatments | 开花期<br>Anthesis | 灌浆初期<br>Early grain filling stage | 灌浆中期<br>Middle grain filling stage | 灌浆后期<br>Late grain filling stage | 乳熟期<br>Milk-ripe stage |
|------------------|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| W0               | 27.46a          | 27.95a                            | 29.91a                             | 33.04a                           | 25.63b                 |
| W1               | 25.27b          | 27.67ab                           | 29.27bc                            | 33.22a                           | 25.13c                 |
| W2               | 24.76b          | 27.61ab                           | 29.42b                             | 33.36a                           | 26.12a                 |
| C0               | 26.47a          | 27.75ab                           | 28.95d                             | 32.37b                           | 24.91c                 |
| C1               | 24.50bc         | 27.38b                            | 29.09cd                            | 33.07a                           | 25.11c                 |
| C2               | 23.43c          | 26.94c                            | 28.54e                             | 32.43b                           | 25.18c                 |

W和C分别表示宽幅精播种植模式和常规种植模式,其后的0、1和2分别表示不灌溉、拔节期灌溉60 mm和拔节后10 d灌溉60 mm;数据后不同字母表示同一生长季内处理间差异达5%显著水平

## 2.2 光合速率

从开花期到乳熟期,不同处理下冬小麦旗叶光合速率呈先增加后减少趋势,在灌浆期达到最大值,然后急剧下降(图1)。在开花期,W2处理的旗叶光合速率大于其余各处理,但不灌水和灌拔节水条件下,常规种植模式的旗叶光合速率均高于宽幅精播种植模式;在灌浆期,相同灌溉条件下,W2处理和W1处理的旗叶光合速率均显著大于C2处理和C1处理,且W2 > W1 > W0;在乳熟期,W2处理的旗叶光合速率最大,且W2处理的旗叶光合速率显著大于C2处理。因此,推迟拔节水灌溉能显著提高宽幅精播冬小麦生育后期旗叶的光合速率,有利于冬小麦的光合作用,从而有利于产量增加。

## 2.3 蒸腾速率

从开花期到乳熟期,不同处理下冬小麦的旗叶蒸腾速率均呈增加趋势(图2)。在开花期,W2处理和W1处理的旗叶蒸腾速率均显著大于W0处理,且W2处理的旗叶蒸腾速率大于C2处理;在灌浆期,相同灌溉条件下,宽幅精播种植模式的旗叶蒸腾速率大于常规种植模式,且W1 > W2 > W0;在乳熟期,灌拔节水处理旗叶蒸腾速率的大小表现为W1 < C1,但W0处理和W2处理的旗叶蒸腾速率分别比C0处理和C2处理高12%和17%。由以上可知,在冬小麦生长后期,W2处理的有效耗水大于C2处理,表明推迟拔节水灌溉更有利于实现宽幅精播麦田对水分的有效利用,这就为推迟拔节水灌溉条件下宽幅精播麦田实现节水高产提供了前提条件。

## 2.4 叶片水分利用效率

从开花期到乳熟期,冬小麦的WUE<sub>L</sub>呈逐渐减小趋势(图3)。在开花期,W2处理的WUE<sub>L</sub>显著大于C2处理,但C0处理和C1处理的WUE<sub>L</sub>分别比W0处理和W1处理高14%和8%;在灌浆期,W2处理的WUE<sub>L</sub>最大,其余各处理间的WUE<sub>L</sub>没有显著差异;在乳熟期,相同灌溉条件下,宽幅精播种植模式的WUE<sub>L</sub>均大于常规种植模式,且W2 > W1 > W0。由以上可知,在冬小麦生长后期,W2处理的WUE<sub>L</sub>最大,有利于实现宽幅精播麦田的节水高产。

## 2.5 产量及产量构成因素

两种种植模式下,推迟拔节水灌溉显著提高了冬小麦的籽粒产量(表2)。相同灌溉条件下,宽幅精播种

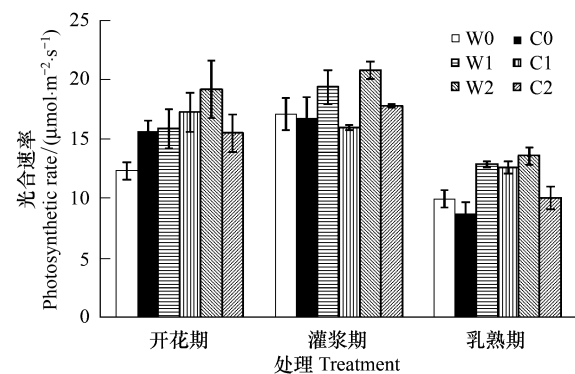


图 1 不同处理对冬小麦旗叶光合速率的影响

Fig.1 Effects of different treatments on photosynthetic rate in flag leaves of winter wheat

W和C分别表示宽幅精播种植模式和常规种植模式,其后的0、1和2分别表示不灌溉、拔节期灌溉60 mm和拔节后10 d灌溉60 mm。数据后不同字母表示同一生长季内处理间差异达5%显著水平

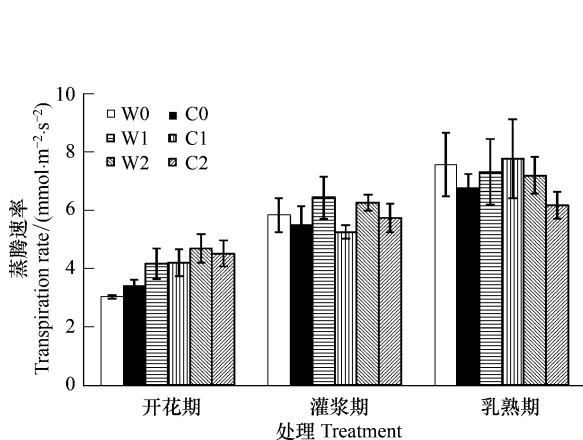


图2 不同处理对冬小麦旗叶蒸腾速率的影响

Fig.2 Effects of different treatments on transpiration rate in flag leaves of winter wheat

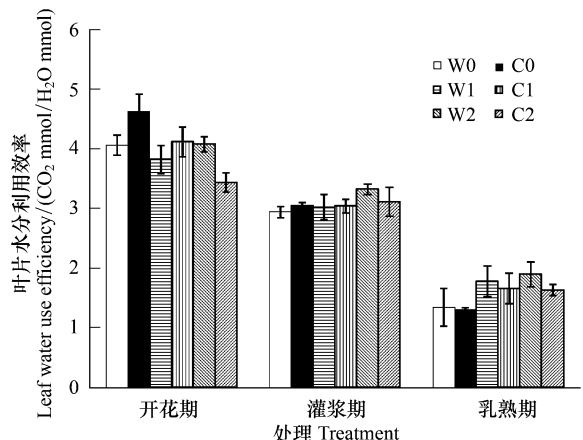


图3 不同处理对冬小麦叶片水分利用效率的影响

Fig.3 Effects of different treatments on leaf water use efficiency of winter wheat

植模式的籽粒产量显著高于常规种植模式。宽幅精播种植模式下,W2 处理的籽粒产量最高,且 W2 处理和 W1 处理的籽粒产量均显著高于 W0 处理。产量构成因素中,相同灌溉条件下,宽幅精播种植模式的穗数显著高于常规种植模式,但 W1 处理的穗数显著大于 W2 处理,说明推迟拔节水灌溉并没有显著增加 W2 处理的穗数;常规种植模式下,C2 处理的穗数显著大于 C1 处理,表明推迟拔节水灌溉可显著增加常规种植模式的穗数。尽管推迟拔节水灌溉对两种种植模式的千粒重均没有显著影响,但推迟拔节水灌溉显著增加了两种种植模式的穗粒数,且 W2 处理的穗粒数显著高于 C2 处理。因此,宽幅精播麦田推迟拔节水灌溉籽粒产量增加的主要原因在于显著提高了产量构成因素中的穗粒数。

表 2 推迟拔节水灌溉对宽幅精播麦田产量及产量构成因素的影响

| 处理<br>Treatments | 穗数<br>Number of spike/<br>(穗/m <sup>2</sup> ) | 穗粒数<br>Kernel numbers per spike/<br>(粒/穗) | 千粒重<br>1000-grain weight/g | 产量<br>Grain yield/<br>(g/m <sup>2</sup> ) |
|------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|
| W0               | 621.67c                                       | 28.48c                                    | 36.08a                     | 582.63c                                   |
| W1               | 685.28a                                       | 29.51b                                    | 33.80b                     | 638.24b                                   |
| W2               | 658.61b                                       | 31.20a                                    | 32.49b                     | 652.14a                                   |
| C0               | 548.61e                                       | 24.67e                                    | 36.12a                     | 517.24e                                   |
| C1               | 565.83d                                       | 26.58d                                    | 33.81b                     | 552.17d                                   |
| C2               | 631.11c                                       | 28.61c                                    | 32.94b                     | 632.51b                                   |

3 讨论

作物冠层温度是作物遗传特性和环境条件共同作用的结果<sup>[18]</sup>。前人多数研究表明,干旱能够提高冠层温度。本研究表明,从开花期到灌浆中期,不灌溉处理的冠层温度普遍高于各灌溉处理,和前人一致;而在乳熟期,W2 处理的冠层温度则显著高于其余各处理。分析认为,这不仅与种植模式有关,还与灌溉处理有关。康绍忠等<sup>[19]</sup>研究表明,大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加会使小麦冠层温度升高且高水分条件升高的值比低水分条件下高 0.7℃ 左右。研究发现,在播种量相同的情况下,宽幅精播麦田的群体数量显著高于常规麦田<sup>[20]</sup>;叶片光合是植物干物质生产的主要途径<sup>[21]</sup>,张秋英等<sup>[22]</sup>研究表明,不同水分条件下冬小麦叶片叶绿素含量及光合速率季节变化趋势基本一致,拔节至抽穗期迅速上升,灌浆期后迅速下降,且叶绿素含量与光合速率呈显著正相

关。分析认为,综合这两方面的原因,乳熟期宽幅精播麦田群体内的  $\text{CO}_2$  浓度大于常规麦田就成为可能,从而使得乳熟期 W2 处理的冠层温度显著高于其余各处理。另外,高温条件下,高土壤水分含量会导致植株群体空间内的水蒸气浓度增加,从而产生群体内部的“水蒸气的温室效应”<sup>[23]</sup>,这也是该处理下冠层温度高于其它处理的一个重要因素。

生育后期冠层温度变化对水分利用和产量形成都产生了影响。由于在 W2 处理下会产生较明显的“水蒸气的温室效应”,因此,在 W2 处理的群体空间中可形成湿度高的环境(可能和叶面积指数有关,不利于水汽扩散),一定程度上避免了棵间蒸发。另外,湿度高还可以减轻干热风的影响,这些因素有利于减少土壤中水分的扩散,从而为提高该处理下的 WUE 提供了前提条件。

大量研究<sup>[24-27]</sup>表明,籽粒中 SS、ADPG-PPase、SSS 和 GBSS 等是淀粉合成的关键酶。房全孝等<sup>[28]</sup>研究表明,土壤干旱使叶面积指数降低,叶面积持续期缩短,旗叶光合速率及 SPS 活性下降,光合产物供应不足;同时籽粒中 SS、ADPG-PPase、SSS、GBSS 活性明显下降,特别是在灌浆中后期更明显,显著降低了光合产物的转化能力,导致粒重和穗重明显下降。李卫民等<sup>[29]</sup>研究表明,叶片光合峰值分布的适宜空气温、湿度分别是 27.5℃ 和 35% 左右。由结果与分析部分知,乳熟期 W2 处理的冠层温度最接近叶片光合峰值的适宜温度,因此分析认为,W2 处理下的温度和湿度同步提高有利于冬小麦生育后期的光合作用,有利于刺激淀粉合成关键酶的活性,在一定程度上促进了干物质的转移,从而有利于实现产量的提高。

与拔节期灌溉相比,推迟拔节水灌溉并没有显著提高产量构成因素中的穗数。究其原因,可能和宽幅精播麦田的群体调节能力有关。赵丹丹等研究表明<sup>[20]</sup>,灌拔节水和抽穗水后,宽幅精播种植麦田的群体数量显著高于常规种植麦田。由于宽幅精播麦田的群体数量大且消亡量减少,推迟拔节水灌溉并没有进一步增加产量构成因素中的穗数。但是,推迟拔节水灌溉导致穗粒数显著增加,从而有利于实现高产。常规种植模式下,推迟拔节水灌溉使得冬小麦的穗数与穗粒数均显著提高,这与王红光等<sup>[14]</sup>研究一致。总之,无论是冬小麦的宽幅精播种植模式还是常规种植模式,推迟拔节水灌溉都有利于籽粒产量提高,具有一定的现实意义。

$\text{WUE}_L$  是研究 WUE 的重要生理基础,本研究表明推迟拔节水灌溉能有效提高冬小麦的  $\text{WUE}_L$ 。但是,在实际生产中衡量冬小麦高效节水模式的关键还要看产量 WUE。推迟拔节水灌溉能否协同提高宽幅精播种植模式下冬小麦农田水资源利用效率和产量 WUE,还需进一步研究。

#### 4 结论

推迟拔节水灌溉显著提高了宽幅精播麦田生育后期的冠层温度及其旗叶光合速率和蒸腾速率。推迟拔节水灌溉显著提高了宽幅精播麦田的  $\text{WUE}_L$  和籽粒产量,增产的原因在于穗粒数显著增加。统筹考虑冬小麦的  $\text{WUE}_L$  和籽粒产量,推迟拔节水灌溉对宽幅精播麦田实现节水高产具有一定的现实意义。

#### 参考文献(References):

- [1] 裴宏伟,孙宏勇,沈彦俊,刘昌明.不同灌溉处理下冬小麦水平衡与灌溉增产效率研究.中国生态农业学报,2011,19(5):1054-1059.
- [2] 袁国富,唐登银,罗毅,于强.基于冠层温度的作物缺水研究进展.地球科学进展,2000,16(1):49-54.
- [3] 张蒿午,王长发.冷型小麦及其生物学特征.作物学报,1999,25(5):608-615.
- [4] 董振国.农田作物层温度初步研究——以冬小麦、夏玉米为例.生态学报,1984,4(2):141-148.
- [5] 李丽,申双和,李永秀,韩小梅,汪秀敏,李倩,邹学智.不同水分处理下冬小麦冠层温度、叶片水势和水分利用效率的变化及相关关系.干旱地区农业研究,2012,30(2):68-72,106-106.
- [6] 崔新菊,赵奇,尤明山,王彩荣,彭云承,董世磊.不同灌溉条件下冬小麦灌浆期冠层温度与产量相关性分析.作物杂志,2010,(6):51-54.
- [7] 徐银萍,宋尚有,樊廷录,李兴茂,辛平.旱地冬小麦灌浆期冠层温度与产量和水分利用效率的关系.麦类作物学报,2007,27(3):528-532.
- [8] 刘庚山,郭安红,任三学,安顺清,阳园燕,毛飞,赵花荣.不同覆盖对夏玉米叶片光合和水分利用效率日变化的影响.水土保持学报,2004,18(2):152-156.

- [9] 张娟, 张正斌, 谢惠民, 董宝娣, 胡梦芸, 徐萍. 小麦叶片水分利用效率及相关生理性状的关系研究. 作物学报, 2005, 31(12): 1593-1599.
- [10] 高延军, 张喜英, 陈素英, 董宝娣. 冬小麦叶片水分利用生理机制的研究. 华北农学报, 2004, 19(4): 42-46.
- [11] Xue Q, Zhu Z, Musick J T, Stewart B A, Dusek D A. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation. Plant and Soil, 2003, 257(1): 151-161.
- [12] Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain. Hydrological Processes, 2004, 18(12): 2275-2287.
- [13] Lv L H, Wang H J, Jia X L, Wang Z M. Analysis on water requirement and water-saving amount of wheat and corn in typical regions of the North China Plain. Frontiers of Agriculture in China, 2011, 5(4): 556-562.
- [14] 王红光, 于振文, 张永丽, 王东. 推迟拔节水及其灌水量对小麦耗水量和耗水来源及农田蒸散量的影响. 作物学报, 2010, 36(7): 1183-1191.
- [15] 余松烈, 于振文, 董庆裕, 王东, 张永丽, 姚德常, 王坚强. 小麦亩产 789.9 kg 高产栽培技术思路. 山东农业科学, 2010, (4): 11-12.
- [16] 韩惠芳, 赵丹丹, 沈加印, 郎坤, 刘泉汝, 李全起. 灌水量和时期对宽幅精播冬小麦产量及品质特性的影响. 农业工程学报, 2013, 29(14): 109-114.
- [17] 彭世彰, 徐俊增, 黄乾, 吴宏霞. 控制灌溉水稻叶片水平的水分利用效率试验研究. 农业工程学报, 2006, 22(11): 47-52.
- [18] 邓强辉, 潘晓华, 石庆华. 作物冠层温度的研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1162-1165.
- [19] 康绍忠, 蔡焕杰, 梁银丽, 马清林, 胡笑涛, 张富仓. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对春小麦冠层温度、蒸发蒸腾与土壤剖面水分动态影响的试验研究. 生态学报, 1997, 17(4): 412-417.
- [20] 赵丹丹, 沈加印, 郎坤, 刘泉汝, 李全起. 宽幅精播和灌溉对冬小麦干物质积累及产量的影响. 灌溉排水学报, 2012, 31(5): 140-142.
- [21] 侯晓林, 吕金印, 山仑. 水分胁迫对抗旱性不同小麦品种叶片光合及根呼吸等生理特性的影响. 干旱地区农业研究, 2007, 06: 37-39, 44.
- [22] 张秋英, 李发东, 刘孟雨. 冬小麦叶片叶绿素含量及光合速率变化规律的研究. 中国生态农业学报, 2005, 03: 95-98.
- [23] 李琰琰, 周少祥. 水汽增强温室效应的探讨. 节能, 2012, (7): 11-13, 39.
- [24] Rufty T W Jr, Kerr P S, Huber S C. Characterization of diurnal changes in activities of enzymes involved in sucrose biosynthesis. Plant Physiology, 1983, 73(2): 428-433.
- [25] 姜东, 于振文, 李永庚, 余松烈. 高产小麦强势和弱势籽粒淀粉合成相关酶活性的变化. 中国农业科学, 2002, 35(4): 378-383.
- [26] Tasi C Y, Salamini F, Nelson O E. Enzymes of carbohydrate metabolism in the developing endosperm of maize. Plant Physiology, 1970, 46(2): 299-306.
- [27] Jenner C F. Effects of exposure wheat ears to high temperature on dry matter accumulation and carbohydrate metabolism in the grain of two cultivars. I. Immediate responses. Australian Journal of Plant Physiology, 1991, 18(2): 165-177.
- [28] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 于舜章, 余松烈, 董庆余, 罗毅, 于强, 欧阳竹. 灌溉对冬小麦灌浆期光合产物供应和转化及有关酶活性的影响. 作物学报, 2004, 30(11): 1113-1118.
- [29] 李卫民, 张佳宝, 朱安宁. 空气温湿度对小麦光合作用的影响. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 90-92.