

韩东伟, 何建宁, 李浩然, 等. 灌水时期对冬小麦个体、群体结构和冠层光合作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(3): 577-586.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.03.001

# 灌水时期对冬小麦个体、群体结构和冠层光合作用的影响

韩东伟, 何建宁, 李浩然, 房琴, 王红光, 李瑞奇

(河北农业大学农学院/省部共建华北作物改良与调控国家重点实验室/河北省作物生长调控实验室, 河北保定 071000)

**摘要:** 为了明确灌水时期对冬小麦群体个体结构特征和光合能力的影响, 于 2020–2021 年开展田间试验, 设置 5 个灌水处理, 分别在拔节初期( $T_2W_1$ )、孕穗期( $T_3W_1$ )、起身中期+开花期( $T_1W_2$ )、拔节初期+开花期( $T_2W_2$ )、孕穗期+开花期( $T_3W_2$ )灌水, 研究灌水时期对冬小麦个体结构、群体大小、冠层光分布、群体光合能力、花后各叶层衰老以及产量的影响。结果表明, 在相同灌水次数下, 随着春季第一水灌溉时期的推迟, 上三叶(旗叶、倒二叶和倒三叶)的长度、面积、旗叶层光能截获率和灌浆前期(开花当天、花后 16 d)的叶面积指数都呈降低趋势; 旗叶叶耳层至倒三叶叶耳层的光合有效辐射截获率显著提高, 花后 16~30 d 叶面积指数和叶绿素相对含量衰退减缓, 单叶和群体光合速率、花后干物质积累量明显提高, 但花前干物质转运量降低。结果显示,  $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  处理籽粒产量无显著差异, 但都显著高于  $T_1W_2$  处理;  $T_2W_1$ 、 $T_3W_1$  处理的籽粒产量也无显著差异, 但显著低于  $T_1W_2$ 、 $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  处理。综上, 在本试验条件下, 于拔节初期或孕穗期灌溉春季第一水加灌开花水有利于优化群体结构, 从而实现增产, 不灌开花水, 会使产量显著减少。

**关键词:** 冬小麦; 灌水时期; 个体结构; 群体结构; 群体光合能力; 产量

**中图分类号:** S512.1<sup>+</sup>10.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)03-0577-10

## Effects of irrigation period on individual structure, population structure and canopy photosynthesis of winter wheat

HAN Dong-wei, HE Jian-ning, LI Hao-ran, FANG Qin, WANG Hong-guang, LI Rui-qi

(College of Agronomy, Hebei Agricultural University/State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation/Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Hebei Province, Baoding 071000, China)

**Abstract:** In order to determine the effects of irrigation period on individual structure, population structure and photosynthetic capacity of winter wheat, field experiments were carried out during 2020–2021 with five irrigation treatments. The irrigation periods were the beginning of the jointing ( $T_2W_1$ ), booting stage ( $T_3W_1$ ), the middle of erecting+ flowering period ( $T_1W_2$ ), the beginning of the jointing+ flowering period ( $T_2W_2$ ), booting stage+ flowering period ( $T_3W_2$ ). Effects of irrigation period on individual structure, group size, canopy light distribution, community photosynthetic capacity, leaf senescence after flowering and yield of winter wheat were studied. The results showed that under the same irrigation times, with the delay of the first irrigation period in spring, the length and area of the upper three leaves, the light energy interception rate of flag

收稿日期: 2021-09-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300909); 国家小麦产业技术体系项目(CARS-03-05); 河北省高校科技研究项目(QN2018219)

作者简介: 韩东伟(1998-), 男, 河北康保人, 硕士研究生, 研究方向为小麦节水高产栽培技术。(E-mail) 1939806391@qq.com

通讯作者: 王红光, (E-mail) jlwanghongguang@163.com; 李瑞奇, (E-mail) li-rq69@163.com

leaf layer and the leaf area index at the early stage of filling showed a decreasing trend. The interception rate of photosynthetically active radiation was significantly increased, the decline of leaf area index and chlorophyll relative content after anthesis was slowed down, the photosynthetic rate of single leaf and population and dry matter accumulation after anthesis were significantly increased, but the dry matter transfer volume before anthesis was decreased. The final grain yield of  $T_2W_2$  and  $T_3W_2$  had no significant

difference, but was significantly higher than that of  $T_1W_2$ . The yield of  $T_2W_1$  and  $T_3W_1$  had no significant difference, but was significantly lower than that of  $T_1W_2$ ,  $T_2W_2$  and  $T_3W_2$ . In conclusion, under the conditions of this experiment, irrigation of the first water in spring at the early jointing stage or booting stage is beneficial to optimize population structure and increase yield, while no irrigation of flowering water significantly reduces yield.

**Key words:** winter wheat; irrigation period; individual structure; population structure; group photosynthetic capacity; yield

河北省是中国小麦生产大省,2019年小麦收获面积达 $2.2035 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,居全国第5位,但是冬小麦生长季降水量仅为100 mm左右<sup>[1]</sup>,只能满足冬小麦生育期需水量的25%。灌溉是河北省冬小麦高产的必需条件<sup>[2]</sup>,但是河北省灌溉水资源极度匮乏,地下水严重超采<sup>[3]</sup>,因此在河北省开展冬小麦节水高产灌溉理论与技术研究具有重要意义。

株高和叶片大小是小麦个体重要的结构特征,二者都受到灌水的影响<sup>[4-7]</sup>。有研究发现,拔节前期灌水比拔节后期灌水对小麦株高的促进作用更大<sup>[8]</sup>,在灌溉拔节水的基础上增灌孕穗水,对冬小麦株高仍有明显的促进效果<sup>[9]</sup>。杨思等<sup>[10]</sup>研究发现,灌水越早、叶面积越大,越冬水对冬小麦倒二叶叶面积的促进效果越明显大于拔节水、孕穗水。Zhao等<sup>[11]</sup>研究发现,在同样灌拔节水的条件下,前期增灌返青水会使旗叶、倒二叶和倒三叶的叶面积显著增加。

构建高质量的群体结构是实现作物高产的根本途径,灌水对冬小麦群体结构大小和分布都有影响。党建友等<sup>[12]</sup>研究发现,拔节期灌水所得小麦穗数要高于返青期灌水;刘丽平等<sup>[13]</sup>研究发现,拔节期灌水比孕穗期灌水得到的小麦穗数更多,成穗率更高。还有研究发现,随着冬小麦春季第一水灌溉时间的推迟,最大叶面积指数表现为起身水>拔节水>孕穗水<sup>[14]</sup>。在灌溉拔节水前增灌返青水,对最大叶面积指数具有明显的促进效果<sup>[15]</sup>。随着叶面积指数的升高,冬小麦冠层的光截获率也会变大<sup>[11]</sup>,但陈雨海等<sup>[16]</sup>指出,冠层光合有效辐射截获率并不是越高越好,当冠层光合有效辐射截获率达到一定值后,继续提高光截获率反而使群体的光能利用率降低,这是因为叶面积指数过大会造成花后群体早衰<sup>[13]</sup>。Zhang等<sup>[17]</sup>研究发现,在灌溉拔节水的基础上增灌开花水能够提高花后旗叶的净光合速率,进而提高产量。Fan等<sup>[18]</sup>研究发现,拔节期后推迟10 d灌溉比拔节期灌溉可使花后叶片衰老减缓,有利于延缓旗叶绿素的降解,提高净光合速率,从而进一步提

高产量。但过度推迟也不利于增产,杨思等<sup>[10]</sup>、张晓琪等<sup>[19]</sup>的研究结果表明,在拔节期灌溉比在孕穗期灌溉所得小麦产量更高。

综上所述,灌水时期对冬小麦个体生长和群体结构有显著影响。因此本试验在河北省春灌一水和二水的条件下,研究在不同灌水时期下冬小麦各叶层叶片大小、节间长度、茎蘖动态、叶面积指数、各叶层光合有效辐射截获率、单叶和群体光合速率、叶绿素相对含量、干物质积累转运和产量的差异,以期从灌水时期调控个体生长、改变群体结构,进而改善冠层光分布和光利用的角度系统阐明灌水时期影响冬小麦产量形成的过程,为河北省及其他地区冬小麦节水高产栽培研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

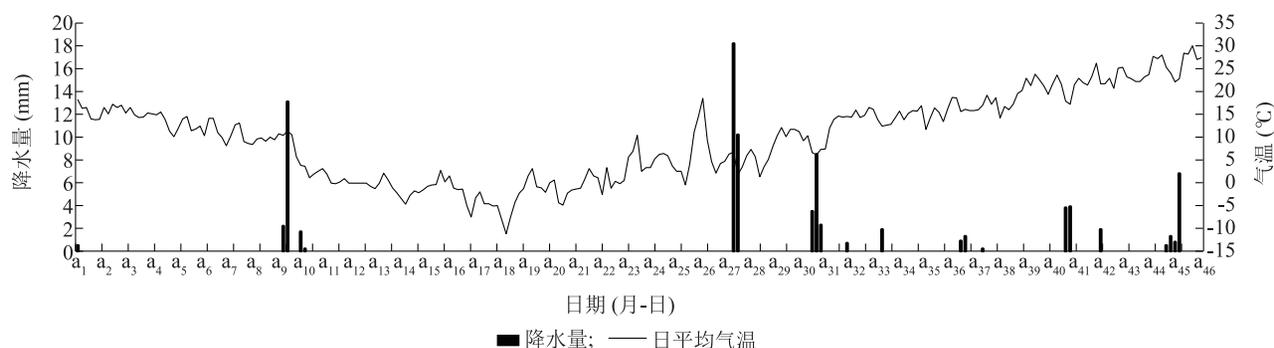
本试验于2020-2021年在河北省石家庄市藁城区梅花镇刘家庄村(38°03'N, 114°53'E)进行,该地属暖温带半湿润大陆性季风气候,平均海拔130 m,年均温12.5℃,年均降水量494 mm。试验田土壤质地为壤质褐土,0~200 cm土层平均容质量为1.47 g/cm<sup>3</sup>,最大田间持水量为28.0%,前茬作物为玉米,秸秆全部粉碎还田。播种前0~20 cm土层基础地力情况如下:速效磷含量20.2 mg/kg,速效钾含量261.74 mg/kg,碱解氮含量137.26 mg/kg,有机质含量18.27 g/kg,冬小麦生育期降水量为84.4 mm。图1为2020-2021年冬小麦生长季的降水量和日平均气温。

### 1.2 试验设计

以多穗型小麦品种婴泊700为种植材料,在适墒播种条件下,设置5个灌水处理:分别在拔节初期(4月6日,春生叶龄3.5叶)灌水( $T_2W_1$ )、孕穗期(4月19日,春生叶龄6.0叶)灌水( $T_3W_1$ )、起身中期(3月22日,春生叶龄2.5叶)+开花期灌水( $T_1W_2$ )、拔节初期+开花期灌水( $T_2W_2$ )、孕穗期+开花期(5月5日)灌水( $T_3W_2$ ),每次灌水60 mm,用

水表控制灌水量。试验按随机区组排列,每个处理设3次重复。小区面积为54 m<sup>2</sup>(6 m×9 m)。小区

之间设置1 m宽的隔离带,在隔离带中种植与试验小区相同的品种,隔离带不灌水。



a<sub>1</sub>:10-01;a<sub>2</sub>:10-07;a<sub>3</sub>:10-13;a<sub>4</sub>:10-19;a<sub>5</sub>:10-25;a<sub>6</sub>:10-31;a<sub>7</sub>:11-06;a<sub>8</sub>:11-12;a<sub>9</sub>:11-18;a<sub>10</sub>:11-24;a<sub>11</sub>:11-30;a<sub>12</sub>:12-06;a<sub>13</sub>:12-12;a<sub>14</sub>:12-18;a<sub>15</sub>:12-24;a<sub>16</sub>:12-30;a<sub>17</sub>:01-05;a<sub>18</sub>:01-11;a<sub>19</sub>:01-17;a<sub>20</sub>:01-23;a<sub>21</sub>:01-29;a<sub>22</sub>:02-04;a<sub>23</sub>:02-10;a<sub>24</sub>:02-16;a<sub>25</sub>:02-22;a<sub>26</sub>:02-28;a<sub>27</sub>:03-06;a<sub>28</sub>:03-12;a<sub>29</sub>:03-18;a<sub>30</sub>:03-24;a<sub>31</sub>:03-30;a<sub>32</sub>:04-05;a<sub>33</sub>:04-11;a<sub>34</sub>:04-17;a<sub>35</sub>:04-23;a<sub>36</sub>:04-29;a<sub>37</sub>:05-05;a<sub>38</sub>:05-11;a<sub>39</sub>:05-17;a<sub>40</sub>:05-23;a<sub>41</sub>:05-29;a<sub>42</sub>:06-04;a<sub>43</sub>:06-10;a<sub>44</sub>:06-16。

图1 2020-2021年冬小麦生长季降水量和日平均气温

Fig.1 Precipitation and daily mean temperature during wheat growing season in 2020-2021

冬小麦于2020年10月7日播种,行距15 cm,基本苗数1 hm<sup>2</sup> 2.10×10<sup>6</sup>株,全生育期1 hm<sup>2</sup>施240 kg纯N、120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、150 kg K<sub>2</sub>O,所用肥料为尿素(含46% N)、磷酸二铵(含18% N、46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和氯化钾(含60% K<sub>2</sub>O),磷、钾肥全部底施,氮肥50%基施,50%随春季第1次灌溉追施。2021年6月7日收获,其他管理措施同一般高产田。

### 1.3 测定项目和方法

1.3.1 叶面积和株高 在挑旗期随机选取有代表性的植株20株,用直尺测量各叶位叶片的长和宽,在花后0 d、16 d和30 d测量绿色叶片的长和宽,在开花期测量各个植株的节间长度、穗长和株高,每个处理设3次重复,计算叶面积指数(LAI)<sup>[11]</sup>,相关公式:

$$\text{叶面积} = \text{长} \times \text{宽} \times 0.83;$$

$$\text{LAI} = \text{单株叶面积} \times \text{单位面积总茎数}。$$

1.3.2 群体茎蘖动态 于小麦3叶期在每个试验小区长势均匀的位置随机选取1 m双行定点标记,在越冬期、起身期、灌水处理前和成熟期调查定点的1 m双行总茎数和穗数,计算成穗率<sup>[13]</sup>:

$$\text{成穗率} = \text{成熟期穗数} / \text{最高总茎数} (\text{起身期总茎数}) \times 100\%$$

1.3.3 叶绿素相对含量(SPAD值) 于花后0 d、16 d和30 d随机选取有代表性植株20株,用SPAD-502叶绿素含量测定仪测定旗叶、倒二叶、倒三叶的SPAD值,重复3次<sup>[20]</sup>。

1.3.4 冠层光合有效辐射(PAR) 于开花期用英国Delta公司生产的SNSCAN冠层分析系统(SUNSCAN Canopy Analysis System)分别测定冠层上方20 cm、旗叶叶耳、倒二叶叶耳、倒三叶叶耳、倒四叶叶耳处和冠层底部的光合有效辐射。测定时光传感器探头与小麦种植行向呈45°,观测时间为10:30-11:30。计算各层光截获率(C<sub>R</sub>)、透射率(P<sub>R</sub>),根据透射率,按冠层上方光合有效辐射强度(PAR')为1800 μmol/(m<sup>2</sup>·s)估算晴朗天气下冠层不同高度的光合有效辐射(DPAR),相关计算公式如下<sup>[21]</sup>:

$$C_R = (PAR_n - PAR_{n-1}) / PAR_n \times 100\%;$$

$$P_R = PAR_{n-1} / PAR_n \times 100\%;$$

$$DPAR = PAR' \times P_R。$$

式中:PAR为入射的光合有效辐射;当n为冠层顶部时,n-1为旗叶叶耳层;当n为旗叶叶耳层时,n-1为倒2叶叶耳层;当n为倒2叶叶耳层时,n-1为倒3叶叶耳层;当n为倒3叶叶耳层时,n-1为倒4叶叶耳层;当n为倒4叶叶耳层时,n-1为地面层。

1.3.5 单叶光合速率(P<sub>n</sub>) 分别于花后10 d、20 d和30 d 9:00-11:00用便携式光合仪LI-6400(LI-COR, USA),在仪器光源模式下测定不同处理旗叶、倒二叶、倒三叶的净光合速率,每个处理3次重复<sup>[11]</sup>。

1.3.6 群体光合速率(CAP) 分别于开花当天与开花后16 d、30 d的10:30-11:30测定小麦群体

的净光合速率。用 LI-840A CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 非色散红外气体分析仪(LI-COR, USA)和透光率较好的同化箱(长×宽×高:0.45 m×0.35 m×0.9 m,透光率达95%以上)组成1个密闭整体,箱内安装2个风扇,在测定过程中对箱内气体进行混匀。在原测定位点拔除植株后测定土壤呼吸速率,群体总光合速率=拔除植株前群体光合速率+土壤呼吸抵消的光合速率。通过计算得出群体光合速率(CAP),公式如下:

$$CAP = dc' \times V \times P_{av} \times (1000 - W_{av}) / [dt \times S \times R \times (T_{av} + 273)]^{[22]}$$

式中: $c'$ 为经过水汽校正的CO<sub>2</sub>浓度; $dc/dt$ 为经水汽校正后的CO<sub>2</sub>浓度变化速率; $W_{av}$ 为测量期间箱内的水汽分压; $P_{av}$ 为测量期间箱内的平均大气压强; $T_{av}$ 为测量期间同化箱内的平均温度; $V$ =同化箱长×宽×高; $S$ =同化箱长×宽; $R$ 为理想气体常数(8.314)。

1.3.7 干物质积累与转运 于开花期和成熟期取样,每个处理设3次重复,每个重复取100个单茎,分穗、茎、叶3个部分,先于105℃烘箱中杀青30 min,而后于75℃烘干至恒质量。相关计算公式如下<sup>[13]</sup>:

花后干物质积累量=成熟期干物质积累量-开花期干物质积累量;

花前干物质转运量=开花期干物质积累量-成

熟期营养器官干物质积累量。

1.3.8 产量 在收获前每个处理随机选取3 m<sup>2</sup>,人工收割、晒干脱粒并称质量,每个处理设3次重复,按13%含水量折算籽粒产量。

#### 1.4 数据处理与分析

用Excel 2003整理数据,用SPSS 24.0进行数据统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌水处理对冬小麦个体结构特征的影响

2.1.1 叶片长、宽和叶面积 由于灌溉开花水对叶片和节间的建成无明显影响,故在本研究中没有列出W<sub>1</sub>处理。从表1可以看出,T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理的旗叶、倒二叶和倒三叶长度分别比T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理增加41.33%、43.79%和11.22%,T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理的旗叶、倒二叶和倒三叶长度分别较T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理增加30.10%、16.28%和1.52%。不同处理间的叶片宽度差异较小,与T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理相比,仅T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理显著增加了倒三叶的宽度。旗叶、倒二叶和倒三叶面积都表现为T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理>T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理>T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理,倒四叶面积在不同处理间的差异很小,说明在起身中期灌水有利于促进旗叶、倒二叶和倒三叶的生长,在拔节初期灌水对旗叶和倒二叶生长有较好的促进效果。

表1 灌水处理对冬小麦叶片大小的影响

Table 1 Effects of irrigation treatment on leaf size of winter wheat

处理	旗叶			倒二叶			倒三叶			倒四叶		
	长(cm)	宽(cm)	面积(cm <sup>2</sup> )	长(cm)	宽(cm)	面积(cm <sup>2</sup> )	长(cm)	宽(cm)	面积(cm <sup>2</sup> )	长(cm)	宽(cm)	面积(cm <sup>2</sup> )
T <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	14.84a	1.88a	23.14a	23.84a	1.56a	30.93a	23.40a	1.52a	29.51a	20.02a	1.22a	20.26a
T <sub>2</sub> W <sub>2</sub>	13.66a	1.94a	22.04a	19.28b	1.68a	26.93ab	21.36b	1.38ab	24.50b	20.84a	1.12a	19.38a
T <sub>3</sub> W <sub>2</sub>	10.50b	1.82a	15.97b	16.58b	1.64a	22.61b	21.04b	1.32b	23.07b	20.86a	1.14a	19.71a

T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>:在起身中期和开花期灌水;T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>:在拔节初期和开花期灌水;T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>:在孕穗期和开花期灌水。同一列数据后标有不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著。

2.1.2 株高和节间长度 由表2可以看出,倒五节间长度、倒三节间长度、穗下节间长度、穗长和株高在不同处理间的差异均不显著,但T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理的倒四节间长度分别比T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理高10.82%、16.10%,T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理的倒二节间长度比T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理高8.31%,且差异达到显著水平,说明在拔节初期+开花期灌水和在孕穗期+开花期灌水分别对倒四节间、倒二节间的伸长有明显的促进效果。在起身中期+开花期灌水对基部节间长度未表现出显著的促进效果,可能与灌水前3~5 d发生14.3 mm的降水

有关。

### 2.2 灌水处理对冬小麦群体结构的影响

2.2.1 田间茎蘖数和成穗率 由表3可见,T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理在起身中期灌水前田间总茎蘖数与最大茎蘖数相比少10.07%,这是因为本试验年度的冬前积温高,导致群体偏大,春生分蘖发生较少,在起身初期已有较多分蘖并且数值高于常年,分蘖退化亦较常年偏早。与T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理相比,T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理灌水前总茎蘖数分别降低了21.81%和37.90%。在成熟期,T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理与T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理间的穗数差异不显著,T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>

比  $T_1W_2$  处理低 4.07%。与  $T_1W_2$  处理相比,  $T_3W_2$  处理的成穗率显著降低, 表明推迟春季第一水灌溉至拔节初期对成穗率无明显影响, 而推迟春季第一水灌溉至孕穗期会显著降低成穗率。

表 2 灌水处理对冬小麦节间长度、穗长和株高的影响

Table 2 Effects of irrigation treatment on internode length, ear length and plant height of winter wheat

处理	节间长度 (cm)					穗长 (cm)	株高 (cm)
	D5	D4	D3	D2	D1		
$T_1W_2$	7.02a	10.54b	13.18a	16.84b	22.36a	8.00a	77.94a
$T_2W_2$	6.04a	11.68a	14.36a	17.78ab	23.24a	7.98a	81.08a
$T_3W_2$	6.48a	10.06b	13.34a	18.24a	24.44a	7.76a	80.32a

$T_1W_2$ : 在起身中期和开花期灌水;  $T_2W_2$ : 在拔节初期和开花期灌水;  $T_3W_2$ : 在孕穗期和开花期灌水。D5: 倒五节间, D4: 倒四节间, D3: 倒三节间, D2: 倒二节间, D1: 穗下节间。同一列数据后标有不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

表 3 灌水处理对冬小麦田间茎蘖数和成穗率的影响

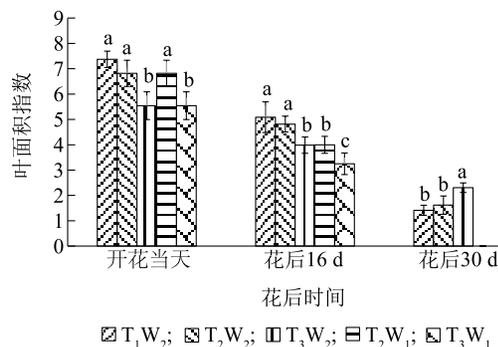
Table 3 Effects of irrigation treatment on tiller number and grain rate in field

处理	越冬期茎蘖数 ( $\times 10^4, 1 \text{ hm}^2$ )	最大茎蘖数 ( $\times 10^4, 1 \text{ hm}^2$ )	春季第一水灌水前茎蘖数 ( $\times 10^4, 1 \text{ hm}^2$ )	成熟期穗数 ( $\times 10^4, 1 \text{ hm}^2$ )	成穗率 (%)
$T_1W_2$	1 692.22a	2 118.89a	1 905.56a	710.00a	33.51a
$T_2W_2$	1 703.33a	2 130.00a	1 490.00b	734.44a	34.48a
$T_3W_2$	1 716.67a	2 143.33a	1 183.33c	681.11b	31.79b

$T_1W_2$ : 在起身中期和开花期灌水;  $T_2W_2$ : 在拔节初期和开花期灌水;  $T_3W_2$ : 在孕穗期和开花期灌水。同一列数据后标有不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

2.2.2 开花后的叶面积指数 由图 2 可以看出, 在春灌两水的条件下, 推迟春季第一水灌溉时期降低了开花当天和花后 16 d 的叶面积指数, 但在花后 30 d 呈相反趋势。  $T_1W_2$ 、 $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  处理的叶面积指数从开花当天到花后 16 d 分别降低了 30.98%、29.41%、28.05%, 从花后 16 d 到花后 30 d 分别降低了 72.19%、66.42%、42.15%, 说明推迟春季第一水灌溉时期有利于延缓叶片衰老。在春季灌溉 1 次水的条件下,  $T_2W_1$ 、 $T_3W_1$  处理花后 0~16 d 的叶片衰老速率分别为 41.39% 和 41.33%, 花后 16~30 d 的叶片衰退速率均为 100.00%, 说明不灌开花水会加速叶片衰老。

2.2.3 开花期冠层光合有效辐射的垂直分布 从图 3A 可以看出, 各冬小麦叶层的光截获率随着叶位的降低呈下降趋势, L1 层的光截获率为 37.63%~62.48%, L2 层的光截获率为 24.55%~33.12%, L3 层的光截获率为 8.25%~20.85%, L4 层的光截获率为 2.50%~3.50%, L5 层的光截获率为 1.00%~2.00%。对不同灌水处理进行比较可知, L1 层光截获率表现为  $T_1W_2$  处理 >  $T_2W_2$  处理 >  $T_3W_2$  处理,  $T_1W_2$  处理分别比  $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  处理高 20.12%、66.02%; L2 层、L3 层的光截获率都表现为  $T_3W_2$  处理 >  $T_2W_2$  处理 >  $T_1W_2$  处理,  $T_3W_2$ 、 $T_2W_2$  处理分别比  $T_1W_2$  处理高 34.89%、16.90%



$T_1W_2$ : 在起身中期和开花期灌水;  $T_2W_2$ : 在拔节初期和开花期灌水;  $T_3W_2$ : 在孕穗期和开花期灌水;  $T_2W_1$ : 在拔节初期灌水;  $T_3W_1$ : 在孕穗期灌水。同一时间不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 灌水处理对冬小麦叶面积指数的影响

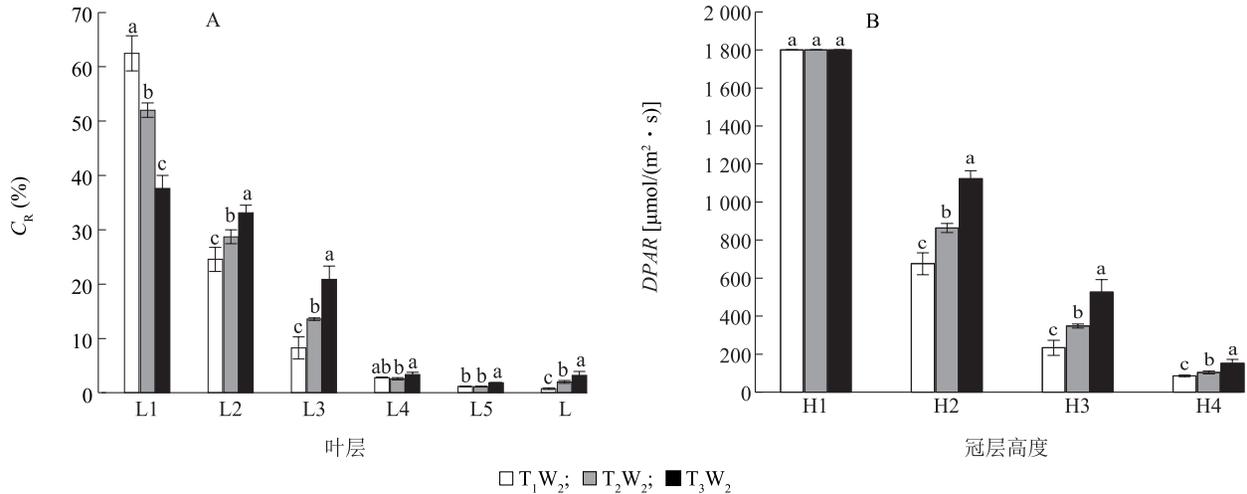
Fig.2 Effects of irrigation treatment on leaf area index of winter wheat

和 152.81%、64.45%; L4 层、L5 层的光截获率在不同处理间的差异较小, 地表的光辐射截获率随着灌水的推迟而呈现增加的趋势, 但均小于 5.00%, 表明推迟灌溉显著改变了冠层内部的光合有效辐射分布。

由图 3B 可以看出,  $DPAR$  随叶层高度降低呈下降趋势。在 H2、H3 和 H4 位置,  $DPAR$  均表现为  $T_3W_2$  处理 >  $T_2W_2$  处理 >  $T_1W_2$  处理; 在 H2 位置,

$T_3W_2$ 、 $T_2W_2$  处理的  $DPAR$  分别比  $T_1W_2$  处理高 66.22%、27.89%；在 H3 位置， $T_3W_2$ 、 $T_2W_2$  处理的  $DPAR$  分别比  $T_1W_2$  处理高 125.55%、48.70%；在 H4 位置， $T_3W_2$ 、 $T_2W_2$  处理的  $DPAR$  分别比  $T_1W_2$  处理高

77.89%、21.18%，说明推迟春季第一水灌溉时期显著增加了到达倒二叶、倒三叶和倒四叶上方的光照度，改善了中下部叶片的受光情况。



A: 开花期冠层光截获率 ( $C_R$ ); B: 开花期冠层不同高度光合有效辐射强度 ( $DPAR$ )。  $T_1W_2$ : 在起身中期和开花期灌水;  $T_2W_2$ : 在拔节初期和开花期灌水;  $T_3W_2$ : 在孕穗期和开花期灌水。 L1: 旗叶及以上层; L2: 旗叶叶耳至倒二叶叶耳层; L3: 倒二叶叶耳层至倒三叶叶耳层; L4: 倒三叶叶耳层至倒四叶叶耳层; L5: 倒四叶叶耳层至地面; L: 地面。 H1: 冠层上方; H2: 旗叶叶耳; H3: 倒二叶叶耳; H4: 倒三叶叶耳。 同一叶层 (冠层高度) 的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图3 灌水处理对冬小麦开花期冠层光截获率 ( $C_R$ ) 和光合有效辐射强度 ( $DPAR$ ) 的影响

Fig.3 Effects of irrigation treatment on canopy light interception rate ( $C_R$ ) and photosynthetically active radiation intensity ( $DPAR$ ) of winter wheat at flowering stage

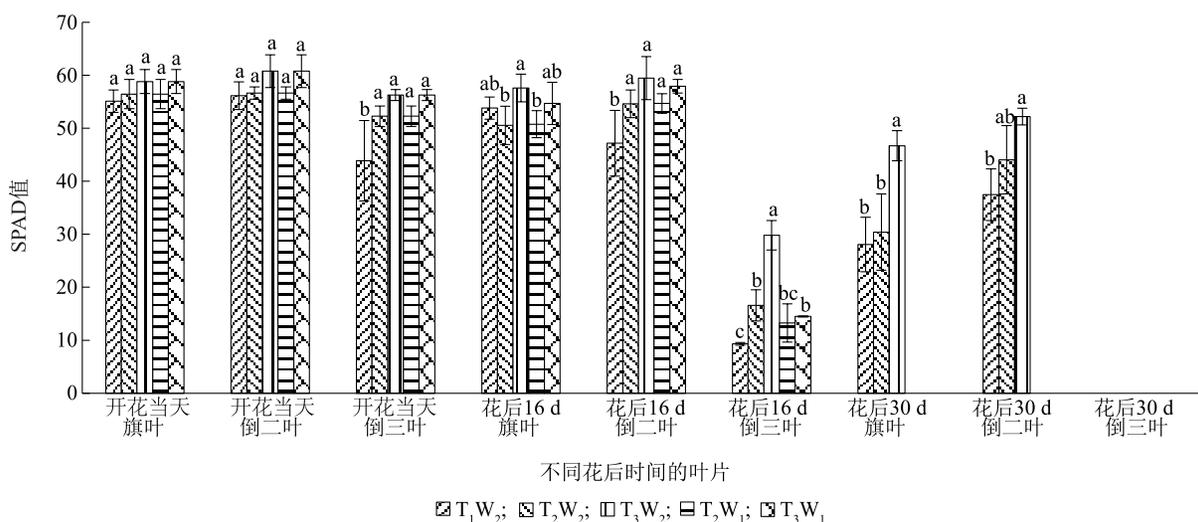
## 2.3 灌水处理对冬小麦开花后光合能力的影响

### 2.3.1 各叶层叶片的叶绿素相对含量 (SPAD 值)

由图4可见,在春季灌溉2次水的条件下,从开花当天到花后16d,  $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  处理的旗叶、倒二叶的SPAD值变化均较小,  $T_1W_2$  处理倒二叶的SPAD值显著下降。从花后16d到花后30d,  $T_1W_2$ 、 $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  这3个处理旗叶、倒二叶的SPAD值均显著下降,其中旗叶SPAD值的降幅分别为47.83%、39.84%和18.92%,倒二叶SPAD值的降幅分别为20.57%、19.35%和12.22%。  $T_1W_2$ 、 $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  处理的倒三叶的SPAD值从开花当天到花后16d已显著下降,  $T_1W_2$ 、 $T_2W_2$  和  $T_3W_2$  处理分别降低了78.72%、68.30%和47.04%,至花后30d时倒三叶已全部枯黄。由此可见,推迟春季第一水灌溉时期可以延缓冬小麦叶片中叶绿素的降解,延长叶片的功能期。在春季灌溉1次水的条件下,随着开花后时间的增加,SPAD值的下降速度整体上较春季灌溉2次水处理明显加快,在花后30d时,旗叶、倒二叶已全部枯黄,说明不灌开花

水会加速叶绿素的降解。

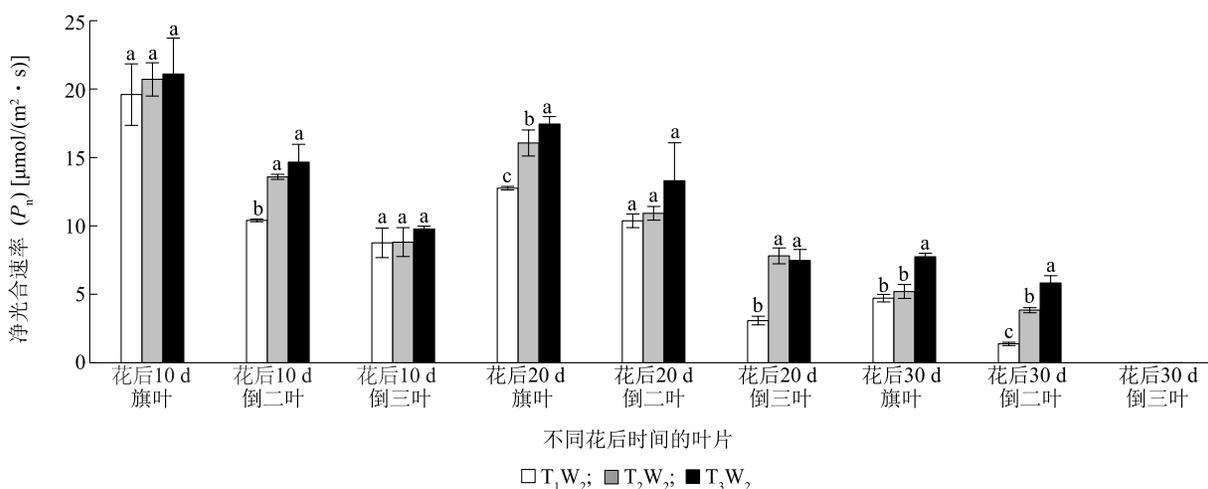
2.3.2 各叶层叶片净光合速率 由图5可以看出,各叶层单叶净光合速率随着生育时期的推进呈下降趋势,花后各时期不同叶位的净光合速率均表现为旗叶>倒二叶>倒三叶。在花后10d,仅在倒二叶上表现出  $T_1W_2$  处理的净光合速率显著低于  $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  处理,旗叶、倒三叶上不同处理间的净光合速率差异都较小。在花后20d,旗叶和倒三叶的净光合速率都表现为  $T_3W_2$ 、 $T_2W_2$  处理高于  $T_1W_2$  处理,且旗叶  $T_3W_2$ 、 $T_2W_2$  处理分别比  $T_1W_2$  处理高36.73%、25.93%,倒三叶  $T_3W_2$ 、 $T_2W_2$  处理分别比  $T_1W_2$  处理高142.76%、153.79%。在花后30d,倒三叶完全枯黄,  $T_3W_2$  处理旗叶、倒二叶的净光合速率最高,旗叶  $T_3W_2$  处理分别比  $T_2W_2$ 、 $T_1W_2$  处理高48.96%、64.36%,倒二叶  $T_3W_2$  处理分别比  $T_2W_2$ 、 $T_1W_2$  处理高51.84%、323.82%。上述结果表明,推迟春季第一水灌溉时期,通过优化冠层内部光分布 (图3),可有效提高灌浆期冠层叶片的净光合速率。



T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>:在起身中期和开花期灌水;T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>:在拔节初期和开花期灌水;T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>:在孕穗期和开花期灌水;T<sub>2</sub>W<sub>1</sub>:在拔节初期灌水;T<sub>3</sub>W<sub>1</sub>:在孕穗期灌水。相同时间同一叶位的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

图4 灌水处理对冬小麦花后 SPAD 值的影响

Fig.4 Effects of irrigation treatment on SPAD value of winter wheat after flowering



T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>:在起身中期和开花期灌水;T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>:在拔节初期和开花期灌水;T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>:在孕穗期和开花期灌水。相同时间同一叶位的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

图5 灌水处理对冬小麦单叶净光合速率的影响

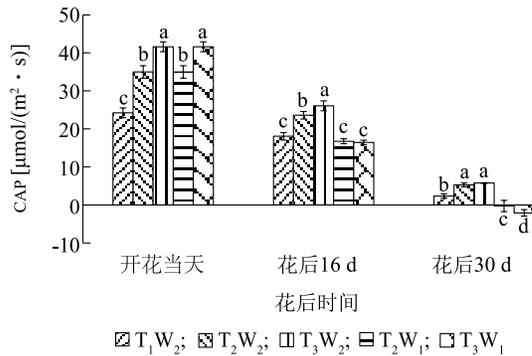
Fig.5 Effects of irrigation treatment on net photosynthetic rate of winter wheat per leaf

2.3.3 群体光合速率 由图6可以看出,随着生育时期的推进,各处理的群体光合速率呈下降趋势。在春季灌2次水条件下,花后各处理的群体光合速率均表现为T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>、T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理高于T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理,在开花当天分别高71.77%、44.49%,在花后16d分别高44.19%、30.53%,在花后30d分别高144.49%、122.88%,说明推迟春季第一水灌溉时期有利于提高花后的群体光合速率。在花后16d、30d,群体光

合速率均表现为春季灌2次水高于春季灌1次水,处理间差异整体上达到显著水平,说明增灌开花水有利于提高花后群体光合速率。

#### 2.4 灌水处理对冬小麦物质积累转运和产量的影响

由表4可见,在春季灌2次水条件下,花前干物质转运量及其对籽粒的贡献率均表现为T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理>T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理>T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理,T<sub>3</sub>W<sub>2</sub>、T<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理的花前干物质转运量分别比T<sub>1</sub>W<sub>2</sub>处理降低了35.06%、9.56%,花



CAP: 群体光合速率;  $T_1W_2$ : 在起身中期和开花期灌水;  $T_2W_2$ : 在拔节初期和开花期灌水;  $T_3W_2$ : 在孕穗期和开花期灌水;  $T_2W_1$ : 在拔节初期灌水;  $T_3W_1$ : 在孕穗期灌水。同一时间的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图6 灌水处理对冬小麦花后群体光合速率的影响

Fig.6 Effects of irrigation treatment on canopy apparent photosynthesis of winter wheat after flowering

后干物质积累量及其对籽粒的贡献率均表现为  $T_3W_2$  处理  $> T_2W_2$  处理  $> T_1W_2$  处理,  $T_3W_2$ 、 $T_2W_2$  处理的花后干物质积累量分别比  $T_1W_2$  处理高 39.22%、20.01%,  $T_3W_2$ 、 $T_2W_2$  处理的籽粒产量分别比  $T_1W_2$  处理高 6.12%、6.83%, 说明推迟春季第一水灌溉时期有利于增加花后干物质积累量和籽粒产量, 这与其花后冠层光合速率较高的特点吻合。

与  $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  处理相比,  $T_2W_1$ 、 $T_3W_1$  处理花后干物质转运量及其对籽粒的贡献率有所提高, 花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率显著降低,  $T_2W_1$ 、 $T_3W_1$  处理的籽粒产量分别降低了 9.60%、10.17%, 且与  $T_2W_2$ 、 $T_3W_2$  处理间差异达到显著水平, 说明不灌开花水不利于花后干物质积累和籽粒产量的提高。

表4 灌水处理对冬小麦物质积累转运和产量的影响

Table 4 Effects of irrigation treatment on matter accumulation, transport and yield of winter wheat

处理	花后干物质积累		花前干物质转运		籽粒产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
	积累量 (kg/hm <sup>2</sup> )	贡献率 (%)	转运量 (kg/hm <sup>2</sup> )	贡献率 (%)	
$T_1W_2$	4 818.53bc	55.44	3 873.56a	44.56	8 692.09b
$T_2W_2$	5 782.53ab	62.27	3 503.21ab	37.73	9 285.73a
$T_3W_2$	6 708.19a	72.73	2 515.63b	27.27	9 223.82a
$T_2W_1$	3 959.47c	47.17	4 434.48a	52.83	8 393.95c
$T_3W_1$	4 773.83bc	57.62	3 511.71ab	42.38	8 285.54c

$T_1W_2$ : 在起身中期和开花期灌水;  $T_2W_2$ : 在拔节初期和开花期灌水;  $T_3W_2$ : 在孕穗期和开花期灌水;  $T_2W_1$ : 在拔节初期灌水;  $T_3W_1$ : 在孕穗期灌水。同一列数据后标有不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

## 3 讨论

### 3.1 灌水时期对冬小麦茎叶生长的影响

各叶位叶片大小和节间长度是影响群体结构的基本要素, 对群体的生产功能有重要影响。Zhao 等<sup>[11,23]</sup> 研究发现, 在冬小麦返青期灌水可显著促进旗叶、倒二叶和倒三叶的生长; 杨思等<sup>[10]</sup> 研究发现, 灌越冬水对倒二叶的促进效应大于灌拔节水和孕穗水; 本研究也得出, 起身中期灌水相比拔节初期、孕穗期灌水明显增加了旗叶、倒二叶和倒三叶的面积, 可见春季灌水越早, 对叶片生长的促进作用越大。这与诸德辉等<sup>[24]</sup> 的研究结果不完全一致, 其研究结果表明, 在第  $n-2$  叶露尖时灌溉, 对第  $n$  叶面积的促进效果最大, 这可能与试验田土壤的类型及其持续供水供肥能力不同有关。

在本试验中, 节间生长对灌水时期的响应规律与叶片不同, 在拔节初期 (春生叶龄  $n=3.5$ ) 灌水和孕穗期 (春生叶龄  $n=6.0$ ) 灌水, 分别会对基部第二节间 (倒第四节间)、第四节间 (倒第二节间) 的伸长表现出最大的促进效果, 灌水时的春生可见叶龄 ( $n$ ) 与相对应的促伸节间 ( $N$ ) 呈现  $N=n-2$  的规律, 这与吕添等<sup>[25-26]</sup> 的研究结果一致。但在本试验中, 起身中期 ( $n=2.5$ ) 灌水对基部第一节间长度未表现出显著的促进效果, 可能与灌水前 3~5 d 发生 14.3 mm 的降水有关。

### 3.2 冬小麦群体结构与光合生产能力的关系

作物群体结构与冠层光分布和光利用密切相关<sup>[27-29]</sup>, 李升东等<sup>[30-31]</sup> 研究发现, 利用技术措施调节群体结构、优化冠层内部光合有效辐射分布、提高群体中下层光合效率是提高作物产量的重要途径<sup>[32]</sup>。Zhao 等<sup>[11]</sup> 研究发现, 在冬小麦返青期灌水较拔节期灌水显著增加了上三叶的面积和光截获率; 刘丽平等<sup>[33]</sup> 研究发现, 冬小麦拔节期灌水处理的叶面积指数和冠层总光截获率高于孕穗期灌水处理; 在本试验的起身中期、拔节初期和孕穗期灌水处理下, 开花期的叶面积指数和冠层总光截获率也随灌水时期的推迟呈现降低的趋势, 与前人的研究结果一致。关于灌水时期对冬小麦花后叶片衰老的影响, 前人从不同角度进行了研究, Xu 等<sup>[20]</sup> 研究发现, 推迟春季第一水灌水时期降低了花后叶片相对叶绿素含量的下降速率; 杨思等<sup>[10,19]</sup> 研究发现, 孕穗期灌水较拔节期灌水可提高花后旗叶的光合速

率;刘丽平等<sup>[33]</sup>研究发现,孕穗期灌水较拔节期灌水可提高花后群体的光合速率;Xu等<sup>[14]</sup>研究发现,开花前推迟灌溉有利于增加花后干物质积累量。以上研究结果表明,推迟春季第一水的灌溉时期有利于延缓花后叶片的衰老。本试验通过对不同灌水时期下冠层内部各叶层的光分布、花后各叶层叶片的衰老速率、单叶光合速率和群体光合速率及花后干物质积累量进行系统研究发现,随着灌水时期的推迟,旗叶层光截获率显著降低,倒二叶层、倒三叶层上方的光照度和这2个叶层的光截获率显著提高。随着冠层光分布的优化,各叶层叶片相对叶绿素含量的衰退速率明显降低,在花后各时期,单叶光合速率和群体光合速率都显著提高,最终花后干物质积累量和籽粒产量均显著增加,这与前人对各个单项指标的研究结果总体一致,说明调节冬小麦春季灌水时期可通过优化冠层光分布来延缓叶片衰老,提高籽粒产量。

## 4 结论

推迟春季第一水灌溉时期可显著降低冠层上部三叶的面积及开花期叶面积指数,进而降低旗叶层光截获率,提高群体中下层光截获率,延缓花后叶面积指数和SPAD值衰退速率,提高花后群体光合能力、花后干物质积累量和籽粒产量。无论春季第一水何时灌溉,不灌开花水都会导致花后叶面积指数和SPAD值衰退速率显著加快,群体光合速率、花后干物质积累量和籽粒产量显著降低。在拔节初期或孕穗期灌溉春季第一水加灌开花水,有利于优化群体结构,实现增产。在2020-2021年冬小麦生育期内,返青期降水28.4 mm,起身期后0~5 d降水14.3 mm,拔节期前后降水2.6 mm,小麦返青至拔节阶段的降水频次和降水量明显多于常年,会弱化不同灌水处理间的差异,最终拔节初期+开花期灌水处理和孕穗期+开花期灌水处理间产量差异较小,在其他降水年型下拔节初期+开花期灌水处理与孕穗期+开花期灌水处理间的差异还有待进一步研究。

### 参考文献:

[1] 陈博,欧阳竹,程维新,等.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):1186-1199.  
[2] 周宝元,马玮,孙雪芳,等.冬小麦-夏玉米高产模式周年气候资源分配与利用特征研究[J].作物学报,2019,45(4):589-600.

[3] 王慧军,张喜英.华北平原地下水压采区冬小麦种植综合效应探讨[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(5):724-733.  
[4] 杨林林,高阳,申孝军,等.播前和不同生育阶段灌溉对冬小麦农艺性状及产量的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(9):1-6.  
[5] 赵国英,王红光,李东晓,等.灌水次数和施钾量对冬小麦茎秆形态特征和抗倒性的影响[J].麦类作物学报,2017,37(6):759-768.  
[6] ZHANG Y P, ZHANG Y H, WANG Z M, et al. Characteristics of canopy structure and contributions of non-leaf organs to yield in winter wheat under different irrigated conditions[J]. Field Crops Research, 2011, 123(3):187-195.  
[7] LI Q Q, DONG B D, QIAO Y Z, et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10):1676-1682.  
[8] 刘志良,曹彩云,潘胤霖,等.不同时间春灌一水对冬小麦生长发育及产量的影响[J].河北农业科学,2020,24(2):35-39.  
[9] 董宝娣,刘孟雨,张正斌.不同灌水对冬小麦农艺性状与水分利用效率的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(1):145-148.  
[10] 杨思,张晓琪,徐家瑞,等.灌水时期对冬小麦生长发育及耗水特性的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(6):36-44.  
[11] ZHAO H X, ZHANG P, WANG Y Y, et al. Canopy morphological changes and water use efficiency in winter wheat under different irrigation treatments[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(4):1105-1116.  
[12] 党建友,裴雪霞,王姣爱,等.灌水时间对冬小麦生长发育及水肥利用效率的影响[J].应用生态学报,2012,23(10):2745-2750.  
[13] 刘丽平,欧阳竹,武兰芳,等.灌溉模式对不同密度小麦群体质量和产量的影响[J].麦类作物学报,2011,31(6):1116-1122.  
[14] XU X X, ZHANG Y H, LI J P, et al. Optimizing single irrigation scheme to improve water use efficiency by manipulating winter wheat sink-source relationships in Northern China Plain[J]. PLoS One, 2018, 13(3):e0193895.  
[15] GAO Y M, ZHANG M, YAO C S, et al. Increasing seeding density under limited irrigation improves crop yield and water productivity of winter wheat by constructing a reasonable population architecture[J]. Agricultural Water Management, 2021, 253: 106951.  
[16] 陈雨海,余松烈,于振文.小麦生长后期群体光截获量及其分布与产量的关系[J].作物学报,2003(5):730-734.  
[17] ZHANG H B, HAN K, GU S B, et al. Effects of supplemental irrigation on the accumulation, distribution and transportation of <sup>13</sup>C-photosynthate, yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2019, 214:1-8.  
[18] FAN Y L, LIU J M, ZHAO J T, et al. Effects of delayed irrigation during the jointing stage on the photosynthetic characteristics and yield of winter wheat under different planting patterns[J]. Agricul-

- tural Water Management, 2019, 221:371-376.
- [19] 张晓琪,杨 思,史勇峰,等.冬小麦花后旗叶光合特性、碳代谢对灌水时期及次数的响应[J].灌溉排水学报,2021,40(5):46-53.
- [20] XU X X, ZHANG M, LI J P, et al. Improving water use efficiency and grain yield of winter wheat by optimizing irrigations in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2018, 221:219-227.
- [21] 郑雪娇,于振文,张永丽,等.施氮量对测墒补灌小麦冠层不同层次光截获和干物质分布的影响[J].应用生态学报,2018,29(2):531-537.
- [22] 孙殿超,李玉霖,赵学勇,等.围封和放牧对沙质草地碳水通量的影响[J].植物生态学报,2015,39(6):565-576.
- [23] XU C L, TAO H B, TIAN B J, et al. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2016, 196:268-275.
- [24] 诸德辉,李鸿祥,陈强生,等.春季不同叶龄追肥浇水对小麦器官建成的影响[J].农业科技资料,1979(2):1-14.
- [25] 吕 添,王红光,李东晓,等.不同春生叶龄期追氮对冬小麦产量形成和抗倒性能的影响[J].麦类作物学报,2018,38(7):825-833.
- [26] 卜冬宁.氮肥基追比和追肥时期对超高产冬小麦生长发育及产量形成的影响[D].保定:河北农业大学,2012.
- [27] 颜景义,郑有飞,张海珍,等.小麦群体结构及光能利用分析[J].中国农业气象,1995(6):5-9,34.
- [28] 张先洁,孙国祥,汪小昆,等.基于超像素特征向量的果树冠层分割方法[J].江苏农业学报,2021,37(3):724-730.
- [29] 李 睿,宗 晨,娄运生,等.不同水分管理和遮阴下水稻株高及成熟期高光谱估算[J].江苏农业科学,2021,49(3):82-90.
- [30] 李升东,王法宏,司纪升,等.垄作小麦群体的光分布特征及其对不同叶位叶片光合速率的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(3):465-468.
- [31] 李升东,王法宏,司纪升,等.不同基因型冬小麦在两种栽培模式下蒸腾速率、光合速率和水分利用效率的比较研究[J].麦类作物学报,2007(3):514-517.
- [32] LONG S P, ZHU X G, NAIDU S L, et al. Can improvement in photosynthesis increase crop yield? [J]. Plant, Cell and Environment, 2006, 29(3):315-330.
- [33] 刘丽平,欧阳竹,武兰芳,等.灌溉模式对不同群体小麦光合特性的调控机制[J].中国生态农业学报,2012,20(2):189-196.

(责任编辑:徐 艳)