

# 褪黑素对干旱胁迫下小麦生长发育和产量的影响

苗含笑,李东晓,王久红,孙亚倩,刘立,刘睿,李红叶

(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:**以抗旱性不同的小麦品种‘济麦22号’和‘衡观35’为研究材料,采用人工气候室箱体土培方法,设置6个试验处理,分别为正常水分(CK)、干旱(D)、D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素、D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素、D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素,研究了不同浓度褪黑素对干旱胁迫下小麦生长、干物质积累以及产量的影响。结果表明:干旱胁迫下,‘济麦22号’的产量比对照降低了25.43% ( $P<0.05$ );D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素浓度处理下的‘济麦22号’产量较D处理增加24.73%,且该处理对株高、叶面积、干物质量、穗粒数和千粒重有显著促进作用。‘衡观35’抗旱性较强,D处理未显著影响其产量;D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素浓度处理使该品种的产量分别比CK和D处理增加了10.46%和8.87% ( $P<0.05$ ),主要表现在千粒重分别增加了39.05%和4.84%,成熟期穗部干物重分配比较CK增加了6.69%;而较高褪黑素浓度(100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )则抑制了该品种的产量增加,分别比对照降低23.81%和24.93%。褪黑素处理对干旱条件下不同品种的改善效果不同,‘济麦22号’增产效应较佳的褪黑素浓度为100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,‘衡观35’则为10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。抗旱性不同的小麦品种应选择适宜浓度褪黑素以有效改善其抗旱性。

**关键词:**褪黑素;包衣;干旱胁迫;小麦;生长;产量;干物质积累分配

**中图分类号:**S512.1;S35 **文献标志码:**A

## Effects of melatonin on the growth and yield of wheat under drought condition

MIAO Hanxiao, LI Dongxiao, WANG Jiuhong, SUN Yaqian, LIU Li, LIU Rui, LI Hongye

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

**Abstract:** An artificial climate chamber experiment was conducted in Hebei Agricultural University. The effects of melatonin on plant height, leaf area, dry matter accumulation, and yield of wheat under drought stress were studied using the methods of crop growth control and indoor soil cultivation with the test materials of Jimai 22 and Hengguan 35. Six experimental treatments were set, including normal water condition(CK), drought(D), D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , and D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  melatonin solutions. The results showed that drought stress significantly reduced the yield of Jimai 22 by 25.43% comparing with CK. The yield of Jimai 22 under the treatment of D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  melatonin was significantly higher than that of D by 24.73%. This treatment significantly improved plant height, leaf area, dry matter weight, and grain plumpness. For Hengguan 35, a drought-resisting variety, the yield under drought treatment did not change significantly. The D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  melatonin significantly increased the yield by 10.46% and 8.87% comparing with CK and D, respectively, mainly increasing in grain weight by 39.05% and 4.84%, increasing in dry matter accumulation ratio of spike by 6.69% at mature. However, higher concentrations (100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) melatonin inhibited the yield and reduced it by 23.81% and 24.93%, respectively, comparing with control. This different effect on different wheat varieties was possibly related to the drought-resisting conditions and concentrations of melatonin. The optional con-

收稿日期:2019-12-25

修回日期:2020-08-22

**基金项目:**国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03-05);国家重点研发计划项目(2017YFD0300909);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019046);河北省自然科学基金(C2019204358)

**作者简介:**苗含笑(1996-),女,河北石家庄人,学士,研究方向为种子科学与工程。E-mail:1357710342@qq.com

**通信作者:**李东晓(1984-),女,河北邢台人,助理研究员,博士,主要从事小麦节水抗旱及逆境生理生化研究。E-mail:lidongxiao.xiao@163.com

centration of melatonin on increasing yield was  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  for Jimai 22,  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  for Hengguan 35. Optimal concentrations of melatonin would be select to use according to different wheat varieties.

**Keywords:** melatonin; coating; drought stress; wheat; growth; yield; accumulation and distribution of dry matter

水资源短缺是制约农业发展的全球性问题。近年来,我国冬春季节干旱已成为制约小麦持续增产的关键生态因素<sup>[1]</sup>。此外,受华北地区地下水资源严重不足限制,通过增加种植面积和灌溉面积提高小麦产量的难度越来越大,而增强小麦个体生产力逐渐成为高产稳产的有效途径。褪黑素作为一种色胺类激素,在提高作物的抗逆境能力上表现突出<sup>[2]</sup>,它可以促进胚芽鞘、侧根生长<sup>[3-4]</sup>,改变花期<sup>[5]</sup>,延缓叶片衰老,提高作物生产力<sup>[6-7]</sup>。环境胁迫可以增加植物的内源褪黑素含量,其作为一个重要的抗氧化剂能促进植物抵御生物或非生物胁迫,如增强植物对干旱、盐害、重金属、高温、冷害等多种逆境的抗性<sup>[8-9]</sup>。因此,外施褪黑素在旱地麦区对持续提高植物的抗逆性将具有广阔的应用前景。

褪黑素可通过提高活性氧清除酶系活性以及抗氧化物质的含量来清除干旱胁迫引起的氧化胁迫,进而上调植株自身防御因子的转录水平,以增强植物对干旱的抵御能力<sup>[10-13]</sup>。小麦幼苗受到干旱胁迫后,根施褪黑素处理的植株表现出较好的水分状况和较轻的氧化伤害,有利于其维持较高的光合能力,从而提高其抗旱性及恢复生长的能力<sup>[10]</sup>。外施  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素可以增强田间小麦苗期的耐旱能力,降低细胞膜损害,保护叶绿体基粒片层完整,提高光合速率,维持细胞膨压和植株持水能力,同时增加谷胱甘肽、抗坏血酸含量及其基因表达,增强抗氧化能力<sup>[14]</sup>。孟祥萍<sup>[15]</sup>利用褪黑素引发小麦种子后明显促进了水分胁迫下小麦穗、茎、叶生物量的积累,显著增加了灌浆期水分胁迫下小麦的经济产量、经济系数和生物学产量。Li 等<sup>[16]</sup>发现不同褪黑素浓度对不同小麦品种发挥的生理效应不同。目前,褪黑素改善作物抗逆效果的机理等方面积累了很多研究<sup>[17-20]</sup>,但有关不同褪黑素浓度对华北地区小麦生长发育及产量影响的研究鲜见报道。本研究以华北地区抗旱性不同的‘济麦 22 号’和‘衡观 35’为供试材料,研究褪黑素对干旱胁迫下小麦植株形态和产量的影响,以明确其对干旱胁迫下小麦生长状况的改善程度,分析其作用机理,为保证小麦在干旱胁迫下的增产稳产提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试小麦品种为‘济麦 22 号’和‘衡观 35’。其

中,‘衡观 35’由河北省农林科学院衡水旱作农业研究所提供,抗旱性较强;济麦 22 号由山东省农业科学院提供,抗旱性一般。

### 1.2 试验处理

本试验在河北农业大学重点实验室的大型人工气候室进行,共设 6 个处理:正常水分(CK)、水分亏缺(D)、 $\text{D}+1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素、 $\text{D}+10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素、 $\text{D}+100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素、 $\text{D}+300 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理。采用栽培箱土培,栽培箱大小为长 $\times$ 宽 $\times$ 高=  $55 \text{ cm} \times 41 \text{ cm} \times 36 \text{ cm}$ 。土壤取自农田表层  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土壤,风干后碾碎,混匀并装箱,每箱土壤干重为  $73.5 \text{ kg}$ ,施基肥量为磷酸二铵  $5.9 \text{ g}$ 、尿素  $7.5 \text{ g}$  和硫酸钾 ( $50\%$ )  $11.8 \text{ g}$ 。每箱浇灌水  $79.82 \text{ mm}$ ,待土壤相对含水量达  $75\%$ ,使用小铲人工破碎、翻整土层  $15 \text{ cm}$ 。播种日期为 2017 年 1 月 14 日,每箱播种 3 行,每行 35 粒,行距  $10 \text{ cm}$ 。

自小麦穗分化期开始,采用称重法控制水分。正常水分(CK)处理每个栽培箱补水  $79.82 \text{ mm}$ ,补水下限为  $55.43 \text{ mm}$ ,即相对含水量控制范围为  $60\% \sim 80\%$ ;亏缺处理(D)则补水  $55.43 \text{ mm}$ (相对含水量为  $40\% \sim 60\%$ ),补水下限为  $24.39 \text{ mm}$ 。CK 和 D 处理的小麦种子为蒸馏水包衣,褪黑素处理的小麦种子分别使用  $1$ 、 $10$ 、 $100$ 、 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素(M8600,分析纯,北京索莱宝科技有限公司)溶液包衣,每个处理重复 3 次。春化阶段设置人工气候室昼/夜温度  $9^\circ\text{C}/7^\circ\text{C}$ ,  $12 \text{ h}/12 \text{ h}$ ,春化时间约  $40 \text{ d}$ 。返青及后期生长阶段设定温度  $20^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}$ (昼/夜),  $14 \text{ h}/10 \text{ h}$ (昼/夜),光照  $28\,000 \sim 30\,000 \text{ lx}$ ,相对湿度为  $60\%$ 。 $7 \text{ d}$  左右称重一次,按照设定处理浇水并计算阶段耗水量<sup>[21]</sup>(图 1)。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 株高 在拔节期、抽穗期、开花期,每处理随机选取 5 株,用刻度尺测量,以小麦地上部茎基部到顶端的长度为准。

1.3.2 叶面积(LA) 与株高测定植株一致,用刻度尺量取小麦植株每片完全展开叶完整叶片的长度和最大宽度。计算公式为:  $LA = L \times W \times K$ 。其中,  $L$  为叶片长度(cm),  $W$  为叶片最宽处的宽度(cm),  $K$  为小麦叶面积系数,取  $0.83$ <sup>[22]</sup>。

1.3.3 叶绿素相对含量(SPAD 值) 在抽穗期、开花前期、开花后期、灌浆期,利用叶绿素测定仪(SPAD-502, Minolta Camera Co. Ltd, 日本)测量小

麦旗叶叶绿素相对含量 (SPAD 值), 每处理测定 5 株, 单株读数 5 次, 取平均值。

1.3.4 干物质质量 与株高测定植株一致, 待前期指标测量完后, 将植株穗、叶、茎秆分别装袋做好标记, 105℃杀青 30 min, 于 75℃烘干至恒重称量。收获之后每处理随机选取 10 株小麦植株测定干物质质量。

1.3.5 产量及产量构成因素 收获后统计各处理每箱小麦的总穗数; 随机取长势一致的 10 株小麦, 人工脱粒, 记录单株穗粒数, 取均值; 各处理随机取 100 粒进行称重, 计算出千粒重 (g), 重复 3 次取均值。产量 (kg · hm<sup>-2</sup>) = 穗数 (穗 · 箱<sup>-1</sup>) × 穗粒数 × 千粒重 / (0.2255 × 100)

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行绘图和数据分析, 选用 SPSS 17.0 软件中 Duncan 法进行显著性比较 (α = 0.05 和 α = 0.01)。

2 结果与分析

2.1 褪黑素对于旱胁迫下小麦产量的影响

由表 1 可知, 与对照 CK 相比, D 处理 ‘济麦 22

号’ 的产量显著降低, 降幅为 25.43%; 千粒重则显著增加, 增幅为 18.43%。D+100 μmol · L<sup>-1</sup> 处理的产量显著高于 D 处理, 增幅为 24.73%, 这与该处理下千粒重显著高于其他处理有关。干旱显著降低了 ‘济麦 22’ 的穗数, 外施 300 μmol · L<sup>-1</sup> 褪黑素后得到缓解, 但未恢复至对照水平。 ‘衡观 35’ 同样表现为 D 处理的穗数显著低于 CK, 降幅为 37.09%, 施加褪黑素未显著改善; 但 D 处理的穗粒数、千粒重显著高于 CK, 增幅分别为 21.46% 和 32.63%, 因此两处理间产量无显著差异。D+10 μmol · L<sup>-1</sup> 处理下穗粒数与千粒重均显著高于 CK, 增幅分别为 17.41% 和 39.05%; 产量亦显著增加, 增幅为 10.46%。D+100 μmol · L<sup>-1</sup> 和 D+300 μmol · L<sup>-1</sup> 处理下的穗粒数和千粒重也均显著高于 CK, 但产量显著降低, 降幅分别为 23.81% 和 24.94%, 这与两处理下穗数降幅较大有关, 分别较 CK 降低 43.19% 和 46.95%。

2.2 褪黑素对于旱胁迫下小麦株高的影响

由图 2A 可知, ‘济麦 22 号’ 的株高表现为 CK 和 D 处理之间差异不显著, 在 D+1 μmol · L<sup>-1</sup>、D+

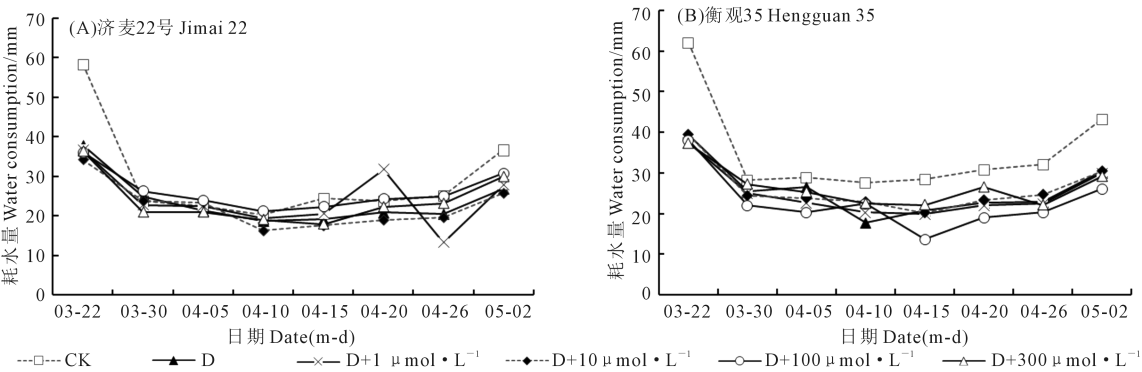


图 1 各处理生育期耗水量  
Fig.1 Water consumption of different treatments during growing season

表 1 不同褪黑素浓度对于旱胁迫下小麦产量及产量要素的影响

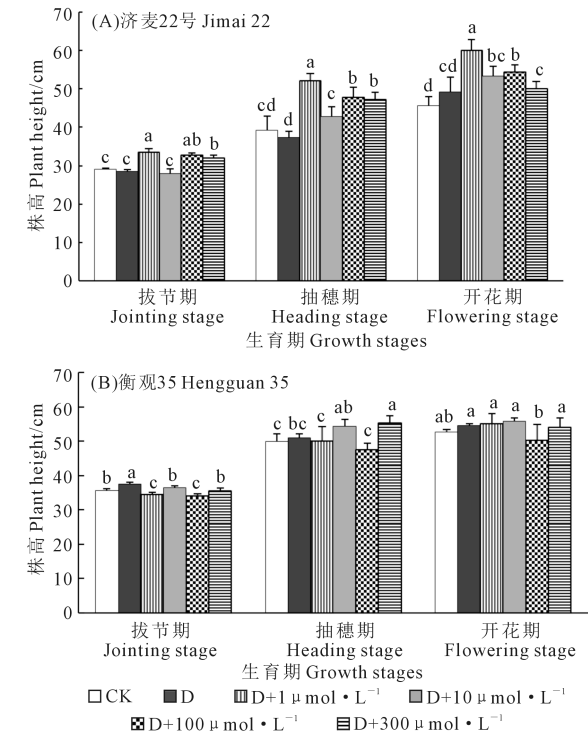
| Table 1 Effect of melatonin on wheat yield and yield components under drought stress |                              |                             |                       |                                 |                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 品种<br>Variety                                                                        | 处理<br>Treatment              | 每箱穗数<br>Ears number per box | 穗粒数<br>Grains per ear | 千粒重/g<br>Thousand kernel weight | 产量/(g · m <sup>-2</sup> )<br>Yield |
| 济麦 22 号<br>Jimai 22                                                                  | CK                           | 170a                        | 27.3ab                | 31.47c                          | 648.6a                             |
|                                                                                      | D                            | 114cd                       | 25.7ab                | 37.27b                          | 483.6cd                            |
|                                                                                      | D+1 μmol · L <sup>-1</sup>   | 126bc                       | 24.7b                 | 30.90c                          | 425.5d                             |
|                                                                                      | D+10 μmol · L <sup>-1</sup>  | 103d                        | 29.0a                 | 32.14c                          | 425.6d                             |
|                                                                                      | D+100 μmol · L <sup>-1</sup> | 115cd                       | 29.0a                 | 40.68a                          | 603.2ab                            |
|                                                                                      | D+300 μmol · L <sup>-1</sup> | 132b                        | 24.3b                 | 37.74b                          | 537.3bc                            |
| 衡观 35<br>Hengguan 35                                                                 | CK                           | 213a                        | 24.7c                 | 25.25d                          | 588.4b                             |
|                                                                                      | D                            | 134bc                       | 30.0ab                | 33.49a                          | 597.0b                             |
|                                                                                      | D+1 μmol · L <sup>-1</sup>   | 125bc                       | 31.3a                 | 32.15ab                         | 558.3b                             |
|                                                                                      | D+10 μmol · L <sup>-1</sup>  | 144b                        | 29.0b                 | 35.11a                          | 650.0a                             |
|                                                                                      | D+100 μmol · L <sup>-1</sup> | 121c                        | 28.3b                 | 29.49b                          | 448.3c                             |
|                                                                                      | D+300 μmol · L <sup>-1</sup> | 113c                        | 29.7ab                | 29.71b                          | 441.7c                             |

注: 同一列数据不同字母表示处理间差异显著 (P<0.05), 下同。  
Note: Different letters in the same column mean significant difference at P<0.05, the same below.

100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下株高改善比较明显。其中,D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下的株高值最大,且在抽穗期、开花期显著高于其他处理;D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下株高在 3 个时期均显著高于 CK 和 D。‘衡观 35’的株高在拔节期表现为 D 显著高于其他处理;抽穗期表现为 D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  显著高于 D 和 CK 处理;开花期则为 D 及褪黑素处理与 CK 差异均不显著,而 D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下株高显著低于 D 及其他褪黑素处理(图 2B)。以上结果说明,在干旱条件下,不同浓度褪黑素对小麦株高的影响不同,且与品种的抗旱性相关。

2.3 褪黑素对干旱胁迫下小麦叶面积的影响

由图 3A 可知,在 D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下,‘济麦 22 号’的叶面积在拔节期、抽穗期、开花期均最低,且显著低于对照,分别降低了 33.01%、26.80%、22.86%,而其他处理与对照之间均没有显著差异。‘衡观 35’的叶面积表现为拔节期各处理间差异不显著(图 3B);抽穗期,D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的叶面积显著高于其他处理;开花期,D 处理的叶面积显著低于对照,降幅为 19.21%。施加褪黑素处理后并无显著改善效应。



注:同一时期不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ),下同。  
Note: Different letters in the same growth stage mean significant difference ( $P < 0.05$ ), the same below.

图 2 不同处理各生育期小麦株高的变化  
Fig.2 Effect of melatonin on plant height of wheat under different treatments

2.4 褪黑素对干旱胁迫下小麦旗叶叶绿素含量的影响

由表 2 可知,抽穗期和开花后期,‘济麦 22 号’各处理间的 SPAD 值差异不显著。开花前期,D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的 SPAD 值显著高于其他处理,分别比对照增加 4.36% 和 3.73%;灌浆期,D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  及以上各浓度褪黑素处理的 SPAD 显著高于对照,增幅分别为 10.19%、8.66%、11.36%。‘衡观 35’不同处理间的 SPAD 值在抽穗期和灌浆期均无显著差异。开花前期,D 处理的 SPAD 显著低于 CK,降幅为 6.16%,而不同浓度褪黑素处理后均可明显改善 D 处理下的 SPAD,达到与 CK 无显著差异水平;开花后期,D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的 SPAD 值最高,比 D 处理显著提高了 10.94%。

2.5 褪黑素对干旱胁迫下小麦干物质积累及分配的影响

2.5.1 褪黑素对干旱胁迫下小麦地上各部位干重的影响 由表 3 可知,随着生育进程的推进,‘济麦 22 号’的穗干重在各处理下大多呈增长趋势,且在成熟期达到最大值。在开花期,除 D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  外,其余处理的穗干重均显著高于对照;D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  显著高于其他处理。灌浆期,D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的穗干重最大,显著高于其他处理。成熟期,与 CK 相比,D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下的穗干重显

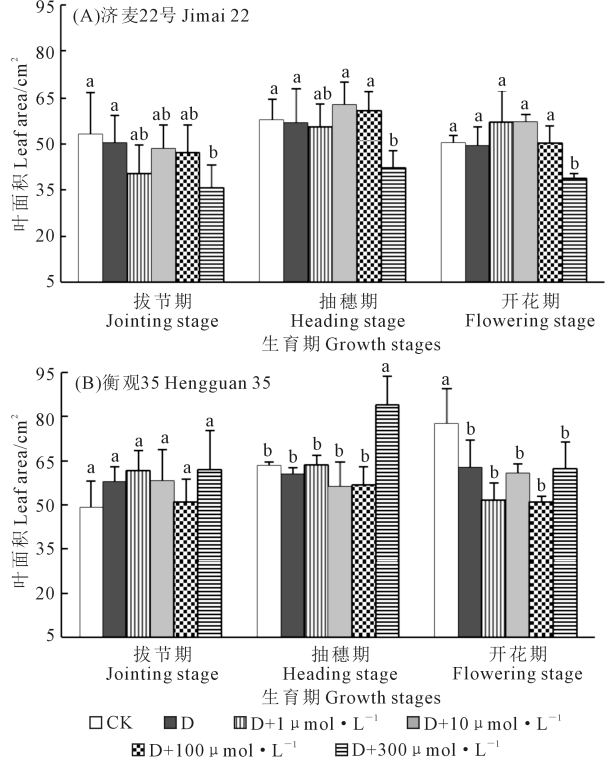


图 3 不同处理各生育期小麦叶面积的变化  
Fig.3 Effect of melatonin on leaf area of wheat under different treatments

著降低,而 D、D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下的穗干重显著增加,其中,D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下的穗干重最大,显著高于其他处理。茎秆干重表现为:开花期,D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  比 D 处理显著增加,而与 CK 无显著差异;灌浆期,D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  显著低于其他处理;成熟期,D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  显著高于 D 和 CK,且以 D+100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的茎秆干重最高。叶干重表现为:开花期,D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  显著高于 D、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理,与 CK 差异不显著;灌浆期,D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的叶干重显著低于其他处理,其他各处理间无显著变化;成熟期,D 和 D+100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理均与 CK 无显著差异,其余褪黑素处理下的叶干重显著低于 CK。

‘衡观 35’的穗干重在 3 个时期 D 处理均显著高于 CK。开花期,各处理的穗干重均显著高于对照,其中 D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的穗干重显著高于其他处理;灌浆期,褪黑素处理的穗干重均与 D 无显著差异,而 D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的值最大;成熟期,D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的穗干重显著高于其他处理。茎秆

干重表现为:开花期,D 以及各褪黑素处理均显著高于 CK,且 D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  显著高于其他处理;灌浆期,D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理均显著高于 D,且 D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  显著高于 CK;成熟期,D、D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  显著高于其他处理,三者间无显著差异。叶干重表现为:开花期,D、D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理与 CK 无显著差异,D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理下的叶干重值最高,且显著高于其他处理;灌浆期,D 的叶干重显著低于 CK,施加褪黑素亦无改善效应;成熟期,D、D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  与对照无显著差异,D+10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  则显著降低。

2.5.2 褪黑素对于旱胁迫下小麦各部位干重分配比的影响 由图 4A 可知,开花期,D 处理下‘济麦 22 号’的茎秆干重分配比较对照减少了 13.94%,穗干重分配比增加了 37.60%。褪黑素各处理的茎秆干重分配比与对照差异不明显,但分别比 D 增加了 11.67%、5.32%、19.99%、13.47%;其中,D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的穗干重分配比较 CK 处理增加了 33.35%。灌

表 2 不同处理小麦旗叶 SPAD 值的变化

Table 2 Effect of melatonin on SPAD of flag leaf under different treatments

| 处理<br>Treatment                           | 济麦 22 号 Jimai 22 |                         |                        |                      | 衡观 35 Hengguan 35 |                         |                        |                      |
|-------------------------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
|                                           | 抽穗期<br>Heading   | 开花前期<br>Early flowering | 开花后期<br>Late flowering | 灌浆期<br>Grain-filling | 抽穗期<br>Heading    | 开花前期<br>Early flowering | 开花后期<br>Late flowering | 灌浆期<br>Grain-filling |
| CK                                        | 58.42a           | 60.08b                  | 62.06a                 | 56.14b               | 56.86a            | 58.42a                  | 56.52ab                | 56.62a               |
| D                                         | 57.78a           | 58.56b                  | 60.48a                 | 59.04ab              | 55.42a            | 54.82b                  | 54.50b                 | 56.22a               |
| D+1 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   | 60.20a           | 59.92b                  | 62.04a                 | 58.74ab              | 56.44a            | 59.64a                  | 57.76ab                | 60.48a               |
| D+10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  | 58.84a           | 62.70a                  | 63.90a                 | 61.86a               | 54.90a            | 57.36ab                 | 55.22b                 | 59.12a               |
| D+100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | 60.12a           | 62.32a                  | 62.74a                 | 61.00a               | 54.52a            | 58.14a                  | 60.46a                 | 55.08a               |
| D+300 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | 59.70a           | 58.52b                  | 60.10a                 | 62.52a               | 57.12a            | 58.18a                  | 58.30ab                | 60.28a               |

表 3 不同处理小麦地上部各器官干重的变化/g

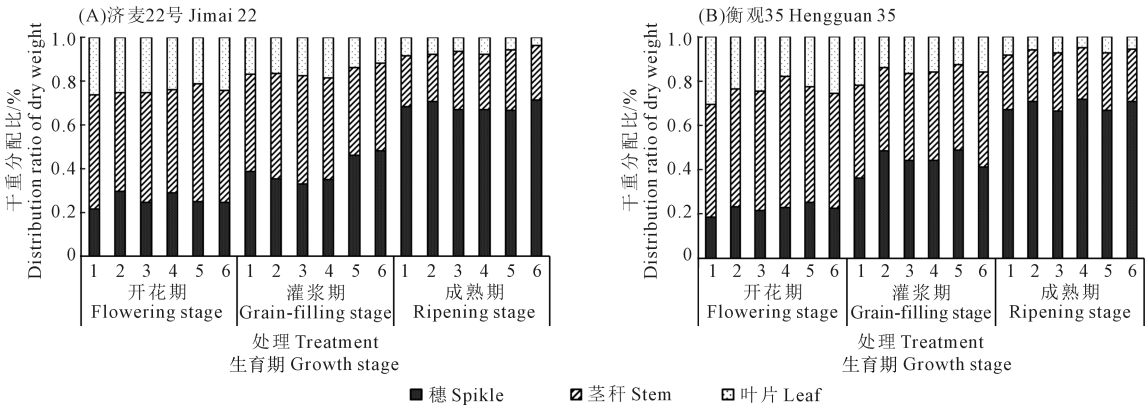
Table 3 Effect of melatonin on dry weight of wheat over-ground organs under different treatments

| 品种<br>Variety        | 处理<br>Treatment                           | 穗部 Spike         |                      |                 | 茎秆 Stem          |                      |                 | 叶片 Leaf          |                      |                 |
|----------------------|-------------------------------------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------|
|                      |                                           | 开花期<br>Flowering | 灌浆期<br>Grain-filling | 成熟期<br>Ripening | 开花期<br>Flowering | 灌浆期<br>Grain-filling | 成熟期<br>Ripening | 开花期<br>Flowering | 灌浆期<br>Grain-filling | 成熟期<br>Ripening |
| 济麦 22 号<br>Jimai 22  | CK                                        | 0.16c            | 0.48b                | 1.05d           | 0.38ab           | 0.54a                | 0.36c           | 0.19abc          | 0.21a                | 0.13a           |
|                      | D                                         | 0.22b            | 0.42b                | 1.21b           | 0.32b            | 0.57a                | 0.37c           | 0.18bcd          | 0.20a                | 0.13a           |
|                      | D+1 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   | 0.21b            | 0.39b                | 1.19bc          | 0.43a            | 0.58a                | 0.47b           | 0.22a            | 0.20a                | 0.11b           |
|                      | D+10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  | 0.25a            | 0.40b                | 0.80e           | 0.41ab           | 0.52a                | 0.30d           | 0.21ab           | 0.21a                | 0.09c           |
|                      | D+100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.21b            | 0.66a                | 1.50a           | 0.44a            | 0.58a                | 0.62a           | 0.18cd           | 0.20a                | 0.13a           |
|                      | D+300 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.16c            | 0.51b                | 1.10cd          | 0.33b            | 0.42b                | 0.38c           | 0.16d            | 0.12b                | 0.06d           |
| 衡观 35<br>Hengguan 35 | CK                                        | 0.12c            | 0.46c                | 1.03d           | 0.34d            | 0.53bc               | 0.38b           | 0.21b            | 0.28a                | 0.13a           |
|                      | D                                         | 0.20b            | 0.66ab               | 1.45b           | 0.46bc           | 0.52c                | 0.48a           | 0.20b            | 0.19b                | 0.12ab          |
|                      | D+1 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   | 0.18b            | 0.56bc               | 1.18c           | 0.46bc           | 0.50c                | 0.47a           | 0.21b            | 0.21b                | 0.13a           |
|                      | D+10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  | 0.21b            | 0.65ab               | 1.53a           | 0.54b            | 0.58ab               | 0.50a           | 0.16c            | 0.23b                | 0.11bc          |
|                      | D+100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.21b            | 0.74a                | 1.06d           | 0.45c            | 0.58ab               | 0.42b           | 0.19bc           | 0.19b                | 0.11abc         |
|                      | D+300 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.27a            | 0.59b                | 1.23c           | 0.63a            | 0.62a                | 0.41b           | 0.31a            | 0.23b                | 0.10c           |

浆期,D、D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的茎秆干重分配比较对照分别增加 8.79%、12.05%、5.44%,穗干重分配比分别减少了 8.65%、14.73%、10.16%;D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的穗干重分配比分别较 D 处理增加了 18.46%和 23.97%。成熟期,D、D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的穗干重比较对照有所增加,而叶干重比较对照分别降低了 9.79%和 55.87%。

由图 4B 可知,‘衡观 35’的干物质积累分配也是由叶片和茎秆逐渐转移到穗部。开花期,D 和各

褪黑素处理的茎秆和穗干重分配比之和较对照分别增加了 10.27%、8.64%、18.29%、11.85 和 7.34%。至灌浆期,穗部干物质积累加快,各处理的穗干重分配比较对照分别增长了 34.14%、22.44%、22.84%、35.75%、14.07%;相应地,叶片干重分配比较对照下降,茎秆变化不明显。成熟期,D 及各褪黑素处理的茎秆和穗干重分配比之和较对照有所增加,但增幅不大;叶片干重变化不明显;D、D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的穗干重分配比较对照分别增加了 5.43%、6.69%和 5.48%。



注 Note: 1-CK;2-D;3-D+1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;4-D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;5-D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;6-D+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

图 4 各处理不同生育期小麦不同器官干重的分配比

Fig.4 The allocation ratios of melatonin on dry weight in each organ under all treatments at different stages

3 讨论与结论

研究表明,褪黑素引发小麦种子可提高小麦成穗数、增加单穗穗重,进而增加产量<sup>[23]</sup>。在干旱胁迫下,褪黑素处理促进了小麦穗、茎、叶的生物量积累,并显著增加了小麦的产量<sup>[15]</sup>。本试验结果显示,干旱主要降低了小麦穗数,施加褪黑素可以促进干物质向籽粒的运转和积累,增加粒重,以保证和提高产量。济麦 22 号在 D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理下产量显著高于 D 处理,这主要在于千粒重的显著提高,而总穗数和穗粒数变化不明显。千粒重的提高主要是由于该品种从开花期开始在 D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素浓度处理下麦穗干重显著增高。此外,干旱胁迫下施加不同浓度褪黑素处理均对济麦 22 号开花前期的 SPAD 和后期的株高有促进作用,为积累较多的干物质奠定了基础。这与前人研究得出褪黑素可以通过促进株高和叶面积增加,进而提高植株生产力的结论基本一致<sup>[24]</sup>。衡观 35 的产量在 D+10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理下有明显提高,

主要是由于千粒重和成熟期的穗部干物质分配比显著增加。褪黑素处理对该品种的株高以及拔节和开花期叶面积的作用并不明显,说明褪黑素的类生长素效应目前仍存在一定争议<sup>[25-26]</sup>。

不同褪黑素浓度的抗旱效应不同。有研究表明,干旱胁迫后,施加褪黑素处理明显延缓小麦叶绿素的降解速度,使小麦叶片维持较高的叶绿素含量和光合能力<sup>[10]</sup>。本试验结果显示,在开花期,施加 1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素对 D 处理下衡观 35 的 SPAD 值有显著提高效应,尤其 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素发挥作用时间较长,这说明植株叶片光合生理具有动态变化性,不同浓度褪黑素在改善叶片生理过程中对光合色素的敏感性不同,调控机制也可能不同<sup>[27-28]</sup>。而 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理并未增加最终产量,甚至是显著降低了衡观 35 的产量。同样,济麦 22 号的产量在 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理下提高幅度最大,300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理的提高幅度有所降低。褪黑素处理未显著增加干旱胁迫下济麦 22 号

的叶面积,甚至 300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低了干旱胁迫下的叶面积,这可能由于高浓度褪黑素抑制了叶片细胞面积、细胞数目以及细胞分化率<sup>[29]</sup>的增加,从而对产量产生一定的抑制效应<sup>[30]</sup>。

此外,不同品种施加褪黑素后产生的效应也不同。干旱胁迫明显抑制作物的生长发育,褪黑素对干旱胁迫下小麦株高有显著性影响,由于 2 个品种抗旱性不同,不同褪黑素浓度对其影响也有差异。本研究结果表明,干旱胁迫下施加不同浓度褪黑素处理均对济麦 22 号株高有明显促进作用,而对衡观 35 株高的影响不显著。由于该品种可能属于较抗旱品种,褪黑素包衣处理对其无明显改善作用,甚至后期 D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素的小麦株高显著低于 D 处理。从产量角度分析,干旱显著降低济麦 22 号的产量,而衡观 35 属于抗旱品种,D 处理的产量与对照并无显著性差异,这可能与水分相对不足或有限亏缺条件下,抗旱品种能加速同化物向籽粒转运,提高收获指数<sup>[31-32]</sup>有关。施加褪黑素可使济麦 22 号在干旱胁迫中的产量最高增幅达 24.73%,可使衡观 35 在干旱胁迫中产量最高增幅达 10.46% (表 1),可能是因为褪黑素处理种子对强势粒和弱势粒的影响效应不同<sup>[23]</sup>。在本试验水分亏缺条件下,衡观 35 能很好地发挥品种优势,在实际生产中,应根据作物和品种特性合理选用适宜浓度的褪黑素等调节物质。

综上所述,干旱胁迫降低了济麦 22 号的产量,施加褪黑素可以通过增加株高、叶面积和储存干物质的重量,保持较高的穗粒数和籽粒重量来补偿水分缺失带来的产量损失,以 D+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理的效果较佳;衡观 35 在本试验干旱条件下,产量并未降低,施加 10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素对该品种产量有明显提高效果,主要是增加了穗部干物质积累和千粒重;而过高褪黑素浓度 (100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 则降低了干旱条件下该品种的产量水平。因此,干旱胁迫下,应根据小麦品种特性,合理、适量施加褪黑素以改善小麦植株形态和促进产量提升。

参 考 文 献:

[1] 吕妍,王让会,蔡子颖.我国干旱半干旱地区气候变化及其影响[J].干旱区资源与环境,2009,23(11):65-71.

[2] 左佳琦,谢佳恒,薛宇轩,等.褪黑素对缓解植物逆境胁迫作用的研究进展[J].基因组学与应用生物学,2014,33(3):709-715.

[3] Hernández-Ruiz J, Cano A, Arnao M B. Melatonin acts as a growth-

stimulating compound in some monocot species[J]. Journal of pineal research, 2005, 39(2):137-142.

[4] Arnao M B, Hernández-Ruiz J. Melatonin promotes adventitious- and lateral root regeneration in etiolated hypocotyls of *Lupinus albus* L. [J]. Journal of Pineal Research, 2007, 42(2):147-152.

[5] Jan K, Carl H J, Ivana M. Exogenously applied melatonin (N-acetyl-5-methoxytryptamine) affects flowering of the short-day plant *Chenopodium rubrum* [J]. Physiologia Plantarum, 2003, 118(4):605-612.

[6] Arnao M, Hernández-Ruiz J. Protective effect of melatonin against chlorophyll degradation during the senescence of barley leaves [J]. Journal of Pineal Research, 2009, 46(1):58-63.

[7] Wang P, Sun X, Chang C, et al. Delay in leaf senescence of *Malus hupehensis* by long-term melatonin application is associated with its regulation of metabolic status and protein degradation [J]. Journal of Pineal Research, 2013, 55(4):424-434.

[8] Wang P, Sun X, Li C, et al. Long-term exogenous application of melatonin delays drought-induced leaf senescence in apple [J]. Journal of Pineal Research, 2013b, 54(3):292-302.

[9] Tan D X, Manchester L C, Reiter R J, et al. Roles of melatonin in abiotic stress resistance in plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 66(3):647-656.

[10] 叶君,邓西平,王仕稳,等.干旱胁迫下褪黑素对小麦幼苗生长、光合和抗氧化特性的影响[J].麦类作物学报,2015,35(9):1275-1283.

[11] Tan D X, Manchester L C, Reiter R J, et al. Significance of melatonin in antioxidative defense system: Reactions and products [J]. Biological Signals and Receptors, 2000, 9(3-4):137-159.

[12] Reiter R J, Tan D X, Burkhardt S, et al. Melatonin in plants [J]. Nutrition Reviews, 2001, 59(9):286-290.

[13] 姜超强,祖朝龙.褪黑素与植物抗逆性研究进展[J].生物技术通报,2015,31(4):47-55.

[14] Cui G B, Zhao X X, Liu S D, et al. Beneficial effects of melatonin in overcoming drought stress in wheat seedlings [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 118:138-149.

[15] 孟祥萍.褪黑素引发种子对冬小麦水分胁迫下生长及生理的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2016.

[16] Li D X, Zhang D, Wang H G, et al. Physiological response of plants to polyethylene glycol (PEG-6000) by exogenous melatonin application in wheat [J]. Zemdirbyste-Agriculture, 2017, 104(3):219-228.

[17] Weeda S, Zhang N, Zhao X L, et al. *Arabidopsis* transcriptome analysis reveals key roles of melatonin in plant defense systems [J]. PLoS One, 2014, 9(3):e93462.

[18] Wang P, Yin L H, Liang D, et al. Delayed senescence of apple leaves by exogenous melatonin treatment: toward regulating the ascorbate-glutathione cycle [J]. Journal of pineal research, 2012, 53(1):11-20.

[19] Li J J, Zeng L, Cheng Y, et al. Exogenous melatonin alleviates damage from drought stress in *Brassica napus* L. (rapeseed) seedlings [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(3):43.

[20] 姜超强,祖朝龙.褪黑素与植物抗逆性研究进展[J].生物技术通报,2015,31(4):47-55.