

## 灌浆期高温前喷施叶面喷剂对小麦产量及籽粒品质的影响

唐秀巧, 苏 慧, 李 敏, 张梅芳, 黄敬尧, 李金才, 宋有洪, 李金鹏\*

(安徽农业大学农学院, 合肥 230036)

**摘 要:** 为探明不同叶面喷剂对小麦灌浆期高温危害的缓解作用, 于安徽农业大学农萃园 2019—2020 年小麦生长期内选用 0.3%  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (PDP) 和 0.01% 芸苔素内酯溶液 (BR) 开展了大田试验研究。试验设置小麦灌浆期内自然高温来临前连续喷两次 PDP、BR 及二者的混合溶液 (PB), 以喷施等量清水为对照 (CK), 考察喷施后不同处理对小麦旗叶叶绿素含量、干物质积累、产量及产量构成因素和籽粒品质的影响。结果表明: 灌浆期高温前喷施 PDP、BR 均可提升高温后旗叶叶绿素含量, PDP 与 BR 无显著差异, PB 处理叶绿素含量最高; 不同叶面喷剂显著增加小麦干物质积累, PB 总干物质积累量显著高于 BR 和 PDP, 后两者间无显著差异; PB 干物质质量最高是由于其对茎叶及籽粒干物质的提升最多; 和 CK 相比, PDP、BR 和 PB 产量均显著提高, 增产幅度为 5.43%~9.41%, PB 处理产量最高。灌浆期高温前喷施 PDP、BR 和 PB 显著改善籽粒品质, 主要不同程度地提高了籽粒蛋白质和湿面筋含量, 延长面团稳定时间、形成时间及提高面粉沉淀值。综上, 小麦灌浆期高温前通过叶面喷施 PDP、BR 和 PB 均能显著延缓灌浆期叶片衰老, 促进干物质积累, 协同提升产量与籽粒品质。以 0.3% 磷酸二氢钾和 0.01% 芸苔素内酯溶液混合喷施效果最佳。

**关键词:** 小麦; 灌浆期高温; 叶面喷剂; 产量; 籽粒品质

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)05-0707-06

### Effect of foliar sprays on wheat yield and grain quality before high temperature stress during grain filling period

TANG Xiuqiao, SU Hui, LI Min, ZHANG Meifang, HUANG Jingyao, LI Jincai, SONG Youhong, LI Jinpeng  
(School of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** In order to explore the effect of different foliar sprays on the high temperature stress of grain filling period in wheat, a field experiment was carried out in 2019-2020 wheat growing season at Anhui Agricultural University, Nongcui garden.  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  and brassinolide solution were selected in this study. The experiment was designed to spray twice in succession with 0.3%  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (PDP), 0.01% brassinolide solution (BR) and the mixed solution of PDP+BR (PB) before natural air high temperature in wheat filling period, and spraying the same amount of water as control treatment (CK), to investigate the effects of different leaf sprays on chlorophyll content of flag leaf, dry matter accumulation (DMA), grain yield (GY), yield components and grain quality of wheat. The results showed that flag leaf chlorophyll content could be increased by spraying PDP, BR before high temperature of grain filling period, while there was little difference between PDP and BR, and it could be further enhanced in PB compared to PDP or BR. Different leaf spray significantly increased the total DMA at maturity, PB significantly higher than those of PDP and BR, and there was no significantly difference between PDP and BR. The more stem and leaf and grain dry matter accumulation in PB resulted in the highest total DMA. Compared with CK, the GY of PDP, BR and PB was increased by 5.43%~9.41%, and the output was the highest under PB treatment. Spraying PDP, BR and PB before the high weather temperature occurrence during grain filling significantly improved grain quality, which improving grain protein concentration and wet gluten content, prolonging dough stabilization time and formation time as well as increasing flour precipitation value. Overall, spraying PDP, BR and PB on winter wheat leaves before high temperature stress of grain filling period can significantly delay leaf senescence, promote dry matter accumulation, and improve grain yield and grain quality. In this study, PB was the best treatment.

收稿日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金 (32001474) 和“十三五”国家重点研发项目 (2017YFD0301307) 共同资助。

作者简介: 唐秀巧, 硕士研究生。E-mail: 969547140@qq.com

\* 通信作者: 李金鹏, 博士, 讲师。E-mail: jinpeng0103@126.com

**Key words:** wheat; high temperature during filling; foliar sprays; yield; grain quality

小麦作为我国三大主粮作物之一, 确保小麦的生产和供应对保障国家粮食安全至关重要。此外, 随国民经济的不断发展, 人们对作物品质日益关注。因此, 提升小麦产量和籽粒品质具有十分重要的意义。黄淮海平原是我国主要的粮食生产基地, 该地区每年小麦产量占全国的70%左右<sup>[1]</sup>。小麦(*Triticum aestivum* L.) 属喜凉性作物, 籽粒灌浆阶段的适宜温度为20~24℃, 当灌浆期温度超过30℃时将开始对小麦籽粒灌浆及籽粒品质造成不利影响<sup>[2-4]</sup>。然而, 随全球气温不断升高, 黄淮海地区小麦灌浆期易遭受高温胁迫, 造成小麦产量和籽粒品质下降, 且近年来小麦灌浆期高温胁迫发生频率增加<sup>[5]</sup>。研究表明, 灌浆期高温前喷施叶面喷剂可有效缓解高温对籽粒产量的危害, 从而提升籽粒产量<sup>[6]</sup>。此外, 小麦灌浆期高温主要通过加速叶片衰老, 降低其光合性能, 进而对小麦叶片物质生产造成不利影响<sup>[7]</sup>。

磷酸二氢钾作为一种价格低廉的常见磷钾肥, 对提高作物抗逆性也起着重要的作用。许多研究表明, 通过叶面喷施0.3%磷酸二氢钾可增强作物的抗逆能力, 降低逆境下产量损失<sup>[8]</sup>; 在灌浆期进行叶面喷施则可促进叶片光合作用, 提高作物籽粒产量和改善品质<sup>[9-10]</sup>。芸苔素内酯作为一种植物激素, 具有修复植物组织的作用, 在作物抗逆方面有很多研究<sup>[11-13]</sup>。然而, 关于磷酸二氢钾和芸苔素内酯及二者的混合施用对缓解小麦灌浆期高温危害的作用研究较少。因此, 本研究在小麦灌浆期高温来临前通过喷0.3%磷酸二氢钾、0.01%芸苔素内酯及二者的混合溶液, 探讨不同叶面喷剂对小麦灌浆期高温胁迫的缓解作用, 以期磷酸二氢钾和芸苔素内酯在小麦生产过程中防控灌浆期高温胁迫的应用提供一定的理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验于2019—2020年在安徽省安徽农业大学农萃园(31°52′0.99″N, 117°16′57.72″E)开展。试验地土壤类型为黄褐土, 小麦播种前0~20土壤耕层基础土壤养分分别为有机质含量10.6 g·kg<sup>-1</sup>、速效氮含量为81.5 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷为33.1 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾为76.2 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

本试验选用半冬性小麦品种安农0711为供试材料。试验采用裂区设计, 3次重复, 小区面积9 m<sup>2</sup>

(3 m × 3 m)。全生育期总施肥量为纯氮225 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 120 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中磷钾肥作为基肥, 氮肥采用基追并重, 基追为5:5(基肥: 拔节肥)。小麦开花期为4月10号, 根据高温天气预报, 4月30号后连续出现35℃以上高温天气, 利用温湿度自动记录仪测得的实际田间气温最高超过40℃(图1), 于高温前(4月27日)分别进行叶面喷施0.3%磷酸二氢钾(PDP)、0.01%芸苔素内酯(BR)、0.3%磷酸二氢钾+0.01%芸苔素内酯(PB), 其中0.01%芸苔素内酯用量按照300 ml·hm<sup>-2</sup>, 于傍晚时分连续喷两遍, 喷施量为1 125 L·hm<sup>-2</sup>, 对照喷施等量清水(CK)。2019年10月31日播种小麦, 播种后浇水, 于2020年5月25日收获。其他管理措施同大田常规。

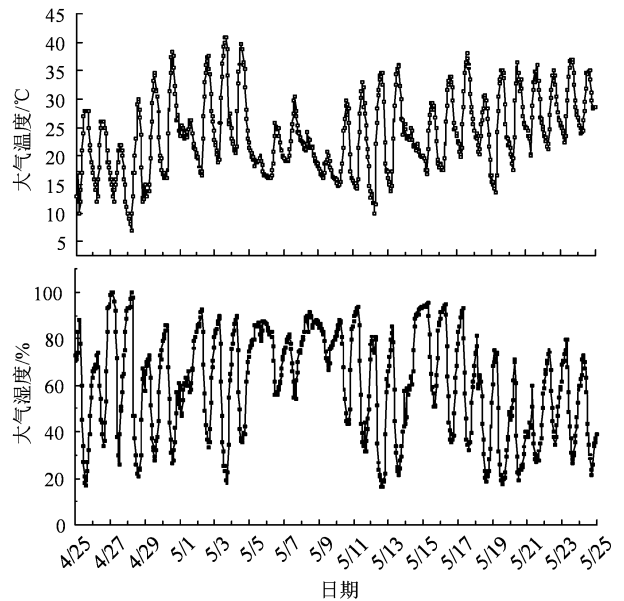


图1 2019—2020小麦季生长后期大气温湿度

Figure 1 The air temperature and humidity in the late growth of winter wheat in 2019-2020 growing season

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 旗叶 SPAD 值** 分别于喷施后5 d、10 d利用502型 SPAD 仪测定旗叶的叶片 SPAD 值。每试验小区选取具有代表性的10片旗叶, 取平均值。

**1.3.2 干物质积累** 于成熟期, 每试验小区选取相邻两行50 cm样段(2×50 cm), 分为茎叶、穗余和籽粒3部分器官, 于105℃鼓风式烘箱内杀青20 min后75℃烘干至恒重测定每部分干物质质量, 用于计算不同器官群体干物质积累量和收获指数。

**1.3.3 籽粒干物质积累动态** 分别于喷施后5 d、10 d、15 d和20 d进行取样, 每试验小区选取开花期

标记的开花日期及穗长一致的 10 个主茎穗。将籽粒全部取出并计数后 105 °C 杀青 20 min 后 75 °C 烘干至恒重, 用于测定籽粒干重。

**1.3.4 测产** 在收获前, 于每试验小区随机选取 1m 6 行样段来确定群体穗数; 于每小区随机选取 60 个穗来确定穗粒数。成熟期每试验小区取 1 m<sup>2</sup> 面积, 采用人工脱粒, 用以籽粒产量的测定。本研究中的籽粒产量含水量为 13%。每个样品中随机选取 1 000 个籽粒, 3 次重复, 取平均值确定千粒重。

**1.3.5 籽粒品质参数** 成熟期收获籽粒自然晒干后, 使用 Perten DA7 200 型近红外分析仪 (瑞典) 测定籽粒中蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值和硬度等品质参数。

## 1.4 数据处理

本研究数据均采用 SPSS 22.0 软件和 Microsoft Excel 2010 软件进行统计分析, 采用 LSD 法对试验数据进行方差分析和显著性检验 ( $P=0.05$ )。并使用 OriginPro 2019 软件作图。

## 2 结果与分析

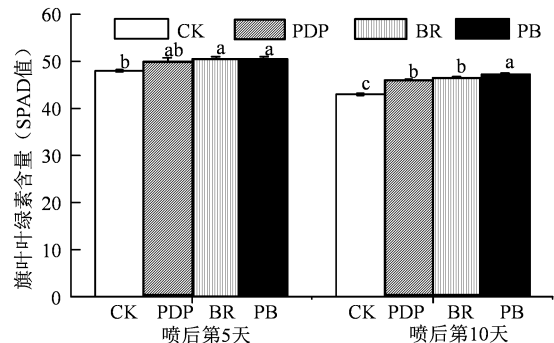
### 2.1 旗叶叶绿素含量

灌浆期小麦旗叶叶片逐渐衰老, 叶绿素含量呈现下降的现象, 不同叶面喷剂喷施后 5 d 旗叶叶绿素含量明显高于喷后 10 d (图 2)。由图 2, 小麦灌浆期高温来临前通过叶片喷施磷酸二氢钾 (PDP)、芸苔素内酯 (BR) 及二者的混合溶液 (PB) 均可提高灌浆后期叶片叶绿素含量。喷施不同叶面喷剂 5 d 后, 不同叶面喷剂间旗叶叶绿素含量无显著差异 ( $P>0.05$ ), BR 和 PB 显著高于 ( $P<0.05$ ) 喷施清水处理 (CK), CK 和 PDP 之间无显著差异。喷施不同叶面喷剂后 10 d 时, 不同叶面喷剂处理旗叶叶绿素含量均显著高于 CK, PDP 和 BR 之间无显著性差异, PB 旗叶叶绿素含量显著高于其他处理。在本研究中, 小麦灌浆期高温前喷施 PDP、BR 及 PB 均提高了旗叶叶片较高的叶绿素含量, 其中 PB 处理下旗叶叶绿素含量最高, 从而更有利于维持高温后叶片较高的物质生产能力; 随灌浆进程的推进, 喷施叶面喷剂缓解叶片衰老的作用越明显。

### 2.2 干物质积累

由图 3 可知, 不同叶面喷剂对小麦成熟期群体干物质积累量有显著影响 ( $P<0.05$ ), PB 总干物质积累量显著高于 BR, BR 显著高于 PDP, 而 CK 最低。不同处理相同器官的干物质积累及分配比例也存在一定的差异。和 CK 相比, PDP、BR 和 PB 均显著提高了茎叶中干物质积累量, 其中 PB 显著高

于 BR, BR 显著高于 PDP; 不同处理之间穗余干物质积累量之间无显著差异 ( $P>0.05$ ); PB 和 BR 之间籽粒的干物质积累量无显著差异, BR 和 PDP 之间无显著差异, 但 PB 显著高于 PDP 处理, CK 显著低于叶片喷剂处理。因此, 灌浆期高温前喷施不同叶面喷剂对小麦总干物质质量的影响主要体现在对茎叶及籽粒部分的干物质积累量, PB 处理对茎叶及籽粒的干物质积累提升最大。这可能是由于 PB 处理下叶片具有较高的叶绿素含量所致 (图 2)。



不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

图 2 不同叶面喷剂对小麦旗叶叶绿素含量的影响

Figure 2 Effects of different foliar sprays on chlorophyll content in flag leaves of wheat

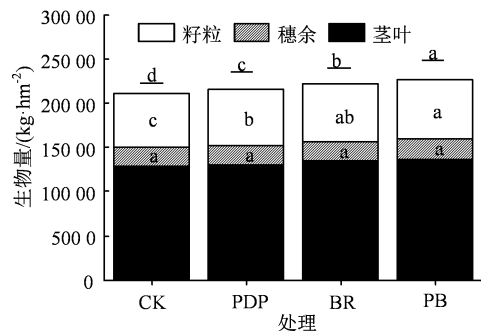


图 3 不同叶面喷剂对小麦干物质积累的影响

Figure 3 Effects of different foliar sprays on dry matter accumulation of wheat

### 2.3 产量及产量构成因素

灌浆期高温下未进行叶面喷剂提前喷施处理小麦产量显著 ( $P<0.05$ ) 低于喷施处理 (表 1)。由表 1 可知, 和 CK 相比, PDP、BR 和 PB 产量分别提高了 5.43%、8.07% 和 9.41%。不同叶面喷剂间 PB 产量最高, 但不同处理间存在一定差异。其中, PB 处理产量比 BR 有所提升, 但未达到显著水平 ( $P>0.05$ ), BR 与 PDP 之间也无显著性差异, 而 PB 产量显著高于 PDP, 相比于 PDP, PB 产量提高了 3.77%。从产量构成因素分析, 不同叶面喷剂对穗数和穗粒数无显著影响, 这可能主要是由于灌浆期不同群体穗数及穗粒数已经形成。相比于 CK,

不同叶面喷剂处理下千粒重显著得到提高,其中PB和BR处理下千粒重最高,但PDP、BR和PB千粒重之间未达到显著性差异。不同叶面喷剂提高了成熟期小麦收获指数,PDP和BR达到显著水平,PB与CK之间无显著差异。因此,在本试验中灌浆期高温前喷施PB、BR和PDP小麦产量的提升主要是由于千粒重的提高。

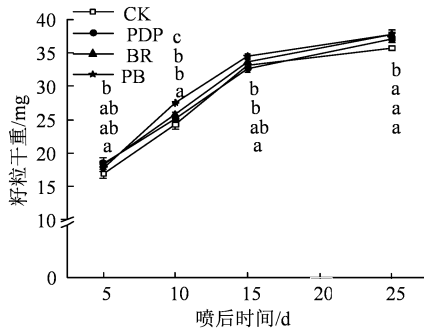


图4 不同叶面喷剂对小麦籽粒干重积累的影响

Figure 4 Effects of different foliar sprays on grain dry weight of wheat

表1 不同叶面喷剂对小麦产量及产量构成的影响

Table 1 Effects of different foliar sprays on yield and yield components of winter wheat

处理	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	穗数/(×10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数	千粒重/g	收获指数
CK	6 936 <sup>c</sup>	718 <sup>a</sup>	28.5 <sup>a</sup>	35.7 <sup>b</sup>	0.286 <sup>b</sup>
PDP	7 313 <sup>b</sup>	718 <sup>a</sup>	29.2 <sup>a</sup>	37.0 <sup>a</sup>	0.294 <sup>a</sup>
BR	7 496 <sup>ab</sup>	720 <sup>a</sup>	29.2 <sup>a</sup>	37.7 <sup>a</sup>	0.294 <sup>a</sup>
PB	7 589 <sup>a</sup>	720 <sup>a</sup>	29.3 <sup>a</sup>	37.7 <sup>a</sup>	0.291 <sup>ab</sup>

注: 数值后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平。下同。

表2 不同叶面喷剂对小麦籽粒品质参数的影响

Table 2 Effects of different foliar sprays on grain quality parameters of winter wheat

处理	蛋白质含量/%	容重/(g·L <sup>-1</sup> )	湿面筋含量/%	稳定时间/min	形成时间/min	硬度指数/%	沉淀值 Zelenyl/mL	出粉率/%
CK	14.4 <sup>b</sup>	790.0 <sup>a</sup>	31.8 <sup>c</sup>	8.53 <sup>b</sup>	4.10 <sup>b</sup>	65.7 <sup>a</sup>	29.6 <sup>b</sup>	62.1 <sup>a</sup>
PDP	15.3 <sup>a</sup>	789.3 <sup>a</sup>	34.3 <sup>a</sup>	9.70 <sup>a</sup>	4.30 <sup>a</sup>	65.9 <sup>a</sup>	32.1 <sup>a</sup>	62.2 <sup>a</sup>
BR	15.1 <sup>a</sup>	790.7 <sup>a</sup>	33.2 <sup>bc</sup>	9.57 <sup>a</sup>	4.37 <sup>a</sup>	66.0 <sup>a</sup>	32.4 <sup>a</sup>	62.1 <sup>a</sup>
PB	15.1 <sup>a</sup>	790.0 <sup>a</sup>	32.7 <sup>b</sup>	9.23 <sup>a</sup>	4.27 <sup>a</sup>	66.0 <sup>a</sup>	31.6 <sup>a</sup>	62.2 <sup>a</sup>

## 2.5 籽粒品质参数

由表2可知,灌浆期高温前喷施叶面喷剂显著提高了籽粒蛋白质含量( $P<0.05$ ),相比于CK,籽粒蛋白质提升4.86%~6.25%,PDP处理下籽粒蛋白质含量最高,PDP、BR和PB之间无显著差异( $P>0.05$ )。PDP、BR和PB对籽粒容重、硬度指数和出粉率无显著性影响,显著提高了湿面筋含量、延长了稳定时间、形成时间和增加了沉淀值。不同叶面喷剂以PDP湿面筋含量最高,稳定时间最长,而形成时间和沉淀值以BR最大。总之,灌浆期高温来临前通过喷施PDP、BR或PB有利于协同提升

## 2.4 籽粒干重积累动态

为考察灌浆期高温前喷施PDP、BR和PB对籽粒干物质积累动态的影响,本研究于喷施后5d、10d、15d及25d(成熟期)对不同处理下粒重进行测定(图4)。结果表明,喷施后5d,CK粒重明显低于喷施处理,不同叶片喷剂之间无显著差异( $P>0.05$ );喷施后10d,PB粒重显著高于其他处理( $P<0.05$ ),而PDP和BR处理粒重高于CK;喷施后15d时,仅PB粒重显著高于CK,PB与BR之间无显著差异,BR、PDP与CK之间无显著差异;喷施后25d时,不同叶片喷剂之间以PB和BR最高,二者与PDP未达到显著差异,PDP、BR和PB粒重均显著高于CK。从喷施不同叶片喷剂籽粒干物质积累动态来看,叶面喷剂使小麦灌浆后期维持了籽粒较多的干物质积累,而CK后期则干物质积累显著下降,最终导致粒重显著降低(表1)。不同叶面喷剂提高粒重可能是由于维持了叶片较高的叶绿素含量,延缓了叶片衰老(图2)。

籽粒产量和籽粒品质。

## 3 讨论与结论

研究表明,灌浆期高温胁迫将造成小麦减产,严重时减产幅度达9.5%~28%<sup>[14]</sup>,同时降低籽粒品质<sup>[15]</sup>。采用化学方法综合防控措施提前预防是减轻高温危害的重要措施,且成效显著,增产提质效果明显<sup>[8,16-17]</sup>。本研究表明,小麦灌浆期高温来临前通过叶面喷施0.3% KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>(PDP)和0.01%芸苔素内酯(BR)及二者混合施用(PB)均可显著提高籽粒产量,较喷施等量清水处理(CK),产量分别

提高了 5.4%, 8.07% 和 9.41% (表 1), 表明了 PDP 和 BR 混合喷施对小麦灌浆期的防御能力最高。

大量研究显示, 高温胁迫主要损伤光合器官, 降低叶片光合速率, 加速叶片衰老, 影响籽粒灌浆, 从而造成粒重下降和产量降低<sup>[18-19]</sup>。叶绿素含量与叶片光合性能直接相关, 维持灌浆期旗叶较高的叶片叶绿素含量能显著的提高成熟期小麦的总干物质积累量, 增加籽粒产量<sup>[20]</sup>。在本研究中, 叶面喷施 PDP, BR 或 PB 均维持了高温后旗叶叶绿素含量, 且以 PB 含量最高 (图 2)。从光合机理的角度来看, 喷施叶面喷剂后提高了高温来临后小麦灌浆后期叶片叶绿素含量, 说明喷施叶面喷剂延缓了叶片衰老, 有利于光合产物的积累和产量的提高。本研究分析发现, 喷施叶面喷剂产量的提升主要是由于提高了千粒重, 而穗数和粒数无显著影响, 可能因为灌浆期穗数和穗粒数已经形成, 高温危害主要影响了灌浆期籽粒形成过程所致, 而叶面喷剂缓解了高温危害对光合器官的影响从而对粒重形成带来有利影响 (图 2, 图 4)。研究表明<sup>[21]</sup>, 小麦叶面喷施  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  后, 其钾元素主要作用是提高了籽粒中玉米素、玉米核苷素及脱落酸含量, 降低乙烯的进化速率, 提高籽粒灌浆速率和粒重; 磷元素则提升了灌浆期叶片抗氧化酶活性 (SOD、POD、CAT), 降低丙二醛含量, 从而延缓叶片衰老。此外, 外源 BR 可使植物在高温下能维持正常的生理功能, 主要是增强 SOD、POD 活性和其同工酶的表达, 清除细胞在高温逆境中产生的自由基, 稳定膜结构, 使电解质外渗率下降, 体内蛋白质含量增加, 减轻对叶绿素破坏的作用<sup>[22]</sup>。并且外源喷施 BR 能够抑制高温对 PS II 反应中心的损伤, 降低高温对光合作用原初反应的抑制程度<sup>[23]</sup>。本研究中, PDP、BR 及二者混合施用均显著提升了成熟期群体干物质积累量, 尤其以 PB 最高 (图 3), 也说明了喷施叶面喷剂能通过减轻高温危害对叶片光合性能的影响, 从而增加干物质生产和提高产量。然而, 由于该年份冬前小麦长势过旺, 本研究试验过程中小麦前期分蘖较多, 后期群体较大, 收获时小麦株高较高, 导致了成熟期植株的收获指数偏低现象。

灌浆期高温对小麦籽粒品质也有一定的影响, 并且高温影响籽粒中蛋白质和淀粉的积累与合成是由于降低了相关合成酶的活性<sup>[24-25]</sup>。本研究发现, 灌浆期高温前喷施 PDP、BR 和 PB 均不同程度地提高了籽粒蛋白质和湿面筋含量, 面团的稳定时间及形成时间也显著延长, 显著提升了面粉沉淀值 (表 2), 也说明了叶面喷剂对高温下提高籽粒品质具有

重要的作用。叶面喷施磷酸二氢钾后, 磷钾可能通过促进氨基酸向籽粒运转的速率, 增大氨基酸转化为籽粒蛋白质的速度, 促进了氮素向籽粒转运和籽粒内蛋白质的合成。而外源 BR 可调节逆境环境下植物体内的代谢平衡, 诱导脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质的产生, 提高相关抗氧化酶类的活性, 及时清除细胞内活性氧和自由基, 从而有利于作物产量和品质的提升<sup>[26]</sup>。

本研究条件下, 小麦灌浆期高温来临前喷施 0.3%  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (PDP) 和 0.01% 芸苔素内酯 (BR) 或二者混合施用 (PB) 均能使小麦增产和改善籽粒品质, 增产率为 5.43%~9.41%, PDP 和 BR 之间增产效果存在较小差异。本研究中以 PB 处理下小麦增产幅度最大。

## 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [2] 代晓华, 康建宏, 邬雪婷. 花后不同时期高温对春小麦淀粉含量和产量的影响研究[J]. 农业科学研究, 2013, 34(4): 5-12.
- [3] OSMAN R, ZHU Y, MA W, et al. Comparison of wheat simulation models for impacts of extreme temperature stress on grain quality[J]. Agric For Meteorol, 2020, 288/289: 107995.
- [4] 李春艳, 付凯勇, 张润琪, 等. 灌浆期高温对冬小麦淀粉粒发育的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(10): 1395-1402.
- [5] 刘万代, 常明娟, 史校艳, 等. 花后高温胁迫对小麦灌浆特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(5): 581-588.
- [6] 曹彩云, 李伟, 党红凯, 等. 8 种叶面喷剂对小麦产量及籽粒灌浆特性的影响[J]. 河北农业科学, 2015, 19(1): 6-9.
- [7] 张英华, 杨佑明, 曹莲, 等. 灌浆期高温对小麦旗叶与非叶器官光合和抗氧化酶活性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 136-144.
- [8] 曹娜, 陈小荣, 贺浩华, 等. 幼穗分化期喷施磷钾肥对早稻抵御低温及产量和生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3562-3570.
- [9] 曹彩云, 党红凯, 郑春莲, 等. 灌浆期高温胁迫对小麦灌浆的影响及叶面喷剂的缓解作用[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1103-1113.
- [10] 吕凤荣, 李向东, 季书勤, 等. 喷施磷酸二氢钾和杀菌剂对强筋小麦郑麦 366 千粒重和品质的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(9): 11-13.
- [11] 周小毛, 黄雄英, 柏连阳, 等. 芸苔素内酯保护玉米免受胺苯磺隆伤害的作用及其机理[J]. 植物保护学报, 2005, 32(2): 189-194.
- [12] 苏前富, 张伟, 王巍巍, 等. 种衣剂添加芸苔素内酯预

- 防玉米冷害药害试验分析[J]. 玉米科学, 2013, 21(1): 137-140.
- [13] 王红红, 李凯荣, 侯华伟. 油菜素内酯提高植物抗逆性的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 213-219.
- [14] 鄧胜军, 李如意, 魏凤珍, 等. 花后不同时期高温处理和行距对不同品种小麦旗叶光合特性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35(3): 340-345.
- [15] 冯波, 曹芳, 李升东, 等. 灌浆期高温胁迫对不同品种小麦蛋白组分及面团揉混特性的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 642-649.
- [16] 阳显斌, 张锡洲, 李廷轩, 等. 施磷量对不同磷效率小麦氮、磷、钾积累与分配的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(1): 141-149.
- [17] 刘文欢, 李胜楠, 侯阁阁, 等. 不同营养复配剂叶面喷施对冬小麦干热风抗性及其产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1600-1606.
- [18] 刘萍, 郭文善, 浦汉春, 等. 灌浆期高温对小麦剑叶抗氧化酶及膜脂过氧化的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2403-2407.
- [19] 王晨阳, 郭天财, 阎耀礼, 等. 花后短期高温胁迫对小麦叶片光合性能的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(1): 88-91.
- [20] LI J P, WANG Y Q, ZHANG M, et al. Optimized micro-sprinkling irrigation scheduling improves grain yield by increasing the uptake and utilization of water and nitrogen during grain filling in winter wheat[J]. Agric Water Manag, 2019, 211: 59-69.
- [21] LV X, HAN J, LIAO Y C, et al. Effect of phosphorus and potassium foliage application post-anthesis on grain filling and hormonal changes of wheat[J]. Field Crop Res, 2017, 214: 83-93.
- [22] 曹云英, 赵华. 高温胁迫下油菜素内酯对水稻幼苗的保护作用[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(5): 525-529.
- [23] 李静, 王俏俏, 徐年军, 等. 24-表油菜素内酯对龙须菜抗高温胁迫的研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(8): 82-90.
- [24] 张平平, 何中虎, 夏先春, 等. 高温胁迫对小麦蛋白质和淀粉品质影响的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 129-132.
- [25] 胡阳阳, 卢红芳, 刘卫星, 等. 灌浆期高温与干旱胁迫对小麦籽粒淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(4): 591-600.
- [26] 肖瑞雪, 郭丽丽, 贾琦石, 等. 油菜素内酯调控植物生长发育及产量品质研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(10): 16-21.

## 安徽农业大学在高水平期刊上发表植物基因工程综述文章

植物基因工程是定向改造植物遗传性状、实现植物精准育种的有力手段。在气候变化和人口增长的情况下, 植物基因工程技术将在改善作物的产量、品质和抗逆性方面表型出突出的优势。而如何高效地将外源基因导入到植物细胞, 是植物基因工程技术的关键。传统的转基因技术体系(农杆菌转化、基因枪等)具有高度的物种依赖性, 且费时费力。近年来兴起的纳米材料介导的外源基因递送技术, 有望克服这些缺陷, 显著提高植物遗传转化的效率。

纳米材料作为基因递送载体已广泛应用于动物转基因, 其在植物基因转化中的应用才刚刚起步, 但已显示出其独特的优势。文章在分析传统植物基因转化体系和纳米技术特点的基础上, 聚焦纳米技术基因递送策略, 综述碳管、磁性纳米材料、多孔硅、纳米金、脂质体等不同纳米材料在植物基因递送中的应用, 并讨论了这些材料应用于植物的局限性、改进的策略以及未来的发展的方向, 以期为提高植物遗传转化的效率和应用范围提供新的思路。

近日, 安徽农业大学茶树生物学与资源利用国家重点实验室张照亮教授团队联合合肥工业大学王峰教授团队在《先进材料》发表综述文章《植物基因工程的纳米技术策略》(Nanotechnology strategies for plant genetic engineering, *Advanced Materials*, 2021, 10.1002/adma.202106945)。

合肥工业大学博士生闫勇、硕士生朱肖俊、硕士生余月是本文的共同第一作者。张照亮教授和王峰教授为共同通讯作者。本工作得到了国家自然科学基金、茶树生物学与资源利用国家重点实验室开放基金、中央高校基本科研基金、安徽省重点研发计划的支持。

原文连接: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202106945>