

徐笑笑,朱建强,吴启侠. 小麦孕穗期受涝后对喷施叶面肥和 2,4-表芸薹素内酯的响应[J]. 江苏农业科学,2017,45(5):46-50.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.05.012

# 小麦孕穗期受涝后对喷施叶面肥和 2,4-表芸薹素内酯的响应

徐笑笑,朱建强,吴启侠

(长江大学主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心,湖北荆州 434025)

**摘要:**在江汉平原以及我国南方平原地区,小麦生育中后期因降水较多受涝渍很普遍,严重影响小麦生长和产量。因此,研究适当的涝后技术措施,对防控涝渍危害、降低产量损失具有重要意义。试验用种为郑麦 9023,在孕穗期保持垄沟充满水 10 d,涝水排除后作不同叶面喷施处理。结果表明,与喷施清水相比,渍害结束后第 3 天、第 10 天配合施用 2,4-表芸薹素内酯(2,4-EBR)与 NPK 肥 2 次的处理净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )显著升高,叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素(a+b)和可溶性蛋白含量显著升高,丙二醛(MDA)、可溶性糖含量和过氧化物酶(POD)活性显著降低,超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性显著升高;从产量看,涝后喷施 NPK 比对照(涝后喷清水)高 13%,2,4-EBR 与 NPK 肥配合施用比对照高 17%,说明 2,4-EBR 与 NPK 肥配合施用可有效缓解孕穗期涝渍灾害对小麦生理代谢的影响。

**关键词:**小麦;孕穗期;涝渍;叶面肥;2,4-表芸薹素内酯;产量

**中图分类号:**S512.106 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2017)05-0046-04

江汉平原属亚热带季风气候,冬小麦春季易受涝渍危害。不少研究表明,较重涝渍胁迫会明显影响小麦正常代谢和生长,并造成一定减产<sup>[1-7]</sup>。因此,在田间排水的基础上根据雨后涝情进一步采取修复措施,对促进作物生长、减少产量损失具有重要意义。对作物涝后的修复通常采取叶面喷施植物生长调节剂、叶面肥,或二者配合使用的措施。植物生长调节剂主要是通过改善代谢来缓解逆境胁迫,在此基础上进一步补充营养则更有利于作物生长恢复。现有研究表明,单独使用植物生长调节剂或补充营养均有助于提高作物的抗逆性、减少产量损失<sup>[8-13]</sup>,综合运用植物生长调节剂和补充营养的促生减损效果更佳<sup>[14-15]</sup>。鉴于植物在较重涝渍胁迫下代谢降低,而油菜素内酯具有改善植物生理代谢、提高植物抵御生物及非生物胁迫的能力<sup>[16-18]</sup>,并在缓解油菜和大豆幼苗涝渍危害上有明显作用<sup>[19-20]</sup>。在已有研究<sup>[4,12,15]</sup>的基础上,采用高活性的油菜素内酯同分异构体——2,4-表芸薹素内酯(2,4-epibrassinolide,2,4-EBR)和叶面肥,对孕穗期受涝渍危害 10 d 的小麦(郑麦 9023)进行涝后修复试验,了解喷施 2,4-表芸薹素内酯(2,4-EBR)和叶面肥对涝后小麦的调控机理,进行合理高效调控,对更好的减少产量损失具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

收稿日期:2016-04-20

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(编号:201203032)。

作者简介:徐笑笑(1990—),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事水土环境与作物生产研究。E-mail:498995756@qq.com。

通信作者:朱建强,教授,博士生导师,主要从事农业涝渍灾害防御、水土环境研究。Tel:(0716)8066541;E-mail:zyjb@sina.com。

试验所用的小麦品种为郑麦 9023,在江汉平原有着广泛栽培,前茬作物为水稻;涝后喷施的叶面肥为尿素和磷酸二氢钾,喷施的植物生长调节剂为 2,4-表芸薹素内酯。尿素和磷酸二氢钾的溶液浓度分别按 2% 和 0.3% 配备,采取混合配施。施用 2,4-表芸薹素内酯前,用 98% 乙醇溶解后兑清水稀释到适宜浓度(0.01 mg/L),同时加入吸附剂吐温 80(体积比为 0.1%)作为展开剂,以便 2,4-表芸薹素内酯喷施后能吸附在叶片上并为叶面更好吸收。

### 1.2 试验设计

小麦于 2014 年 11 月 6 日播种,播种时施肥折合纯氮 240 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>。试验在田间小区进行,每小区 15 m<sup>2</sup>(10 m×1.5 m),种植 50 行,均匀定播 100 粒/行。

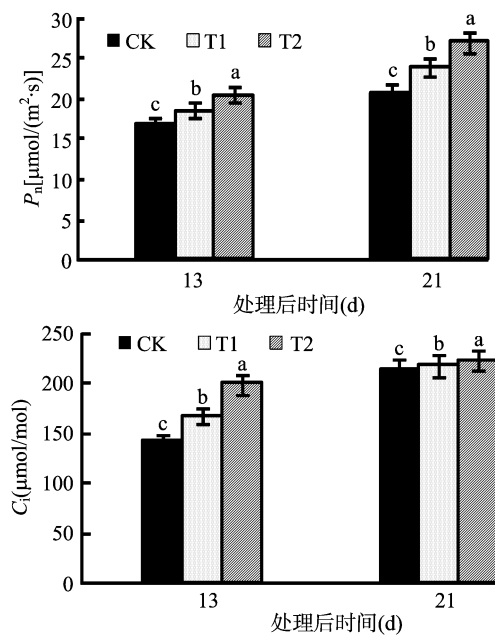
田间渍水时段处于小麦孕穗期,2015 年 3 月 19 日开始渍水,保持垄沟水面与田面基本平齐,使作物根系土壤处于完全饱和状态持续 10 d。在田间涝水排除后第 3 天(2015 年 4 月 1 日)进行不同处理,试验方案见表 1。本试验采用完全随机区组设计,共设 3 个处理:CK,涝后第 3 天喷清水,第 10 天再次喷清水;T1,涝后第 3 天喷施 2% 尿素+0.3% 磷酸二氢钾(简写 NPK),第 10 天再次喷施 NPK;T2,涝后第 3 天喷施 0.01 mg/L 2,4-表芸薹素内酯(2,4-EBR),第 10 天喷施 NPK+2,4-EBR。每处理设 3 次重复。

### 1.3 项目测定与方法

在田间涝水排除后进行作物修复,分别于 4 月 3 日(第 1 次修复后第 3 天,即涝水排除后第 6 天)、4 月 9 日(第 1 次修复后第 9 天,即第 2 次修复前 1 d)、4 月 12 日(第 2 次修复后第 3 天)、4 月 22 日(第 2 次修复后第 13 天)在每个小区(包括对照)随机取 4~5 张旗叶,带回实验室按文献[21]的方法测定有关指标。叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、叶绿素

(a+b) [Chl (a+b)] 的含量测定采用乙醇比色法; 丙二醛 (MDA) 的含量用硫代巴比妥酸显色法; 可溶性蛋白的含量采用考马斯亮蓝 G-250 法; 可溶性糖含量测定采用蒽酮法; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氯化硝基四氮唑蓝 (nitroterrazolium blue chloride, NBT) 法, 以抑制 NBT 光化还原 50% 为 1 个酶活性单位 (U) 表示; 过氧化物酶 (POD) 活性测定用愈创木酚法, 以 470 nm 处吸光度 1 min 变化 0.01 为 1 个酶活性单位 (U) 表示; 过氧化氢酶 (CAT) 活性用紫外吸收法测定, 以 240 nm 处吸光度 1 min 变化 0.1 为 1 个酶活力单位 (U) 表示。

涝后作物恢复过程用美国产便携式光合仪 LI-6400 每隔一段时间测定旗叶的净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ), 每个处理测定 10 张叶片, 每张叶片读取 5 个数, 求平均值。



图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同

图1 不同叶面喷施处理下小麦旗叶光合特征参数

## 2.2 不同处理对小麦旗叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的重要物质, 在光合作用的光吸收中起核心作用。而小麦孕穗期遭受涝渍, 会加速叶片衰老, 使叶绿素的结构逐渐裂解、含量减少, 叶片呈现黄绿色或黄色 (CK), 涝后喷施叶面肥和植物生长调节剂的小麦叶色则都呈深绿色。由图 2 可知, 涝渍后喷施叶面肥或植物生长调节剂与叶面肥配合施用, 其叶片中 Chl (a+b)、Chla、Chlb

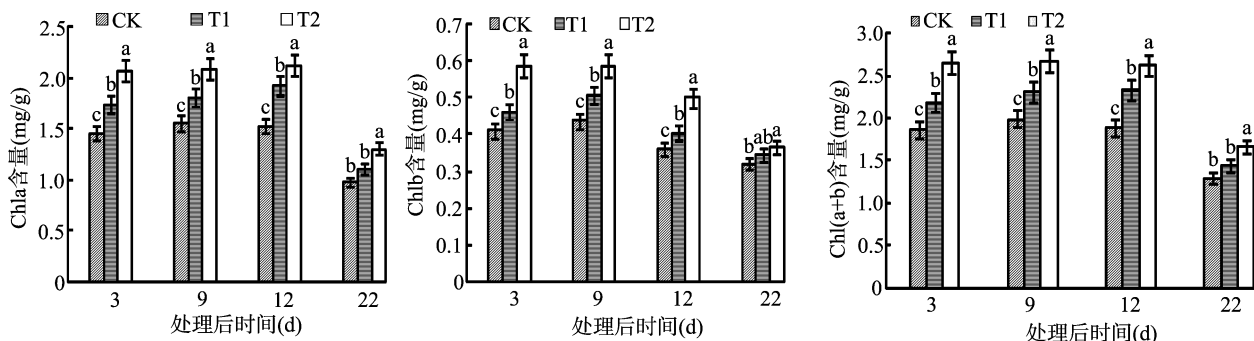


图2 不同叶面喷施处理下小麦旗叶的叶绿素含量

小麦成熟时测产, 收获  $5 \text{ m}^2$  植株/小区, 脱粒、风干, 称质量计产, 重复 3 次。

## 1.4 数据处理与分析

应用 DPS 15.1 进行数据分析, 利用 Excel 2003 作图, 采用 LSD 法进行处理间多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对小麦旗叶光合参数的影响

由图 1 可知, 在小麦孕穗期田间渍水 10 d 的条件下, 排除田间渍水后采取适当的涝后修复措施在一定程度可改善植株代谢。与涝后仅喷清水的对照 (CK) 相比, 采取 T1 和 T2 进行涝后修复, 可显著提高小麦旗叶  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$ , 促进光合作用, 其中以处理 T2 的效果最好。

含量均高于涝后仅喷清水的处理 (CK), CK、T1 和 T2 各处理之间叶绿素含量差异在修复后前 12 d 均显著 ( $P < 0.05$ ), 在进入修复阶段 20 d 后差异缩小 (4 月 22 日为涝后进入修复阶段的第 22 天)。从涝后改善植株光合作用的效果看, 以涝后先喷施 2,4-EBR, 9 d 后再喷施叶面肥的处理 T2 最佳。

### 2.3 不同处理对小麦旗叶丙二醛含量的影响

MDA 是膜脂过氧化最重要的产物之一, 在植物衰老生理

和抗性生理研究中 MDA 含量是一个常用指标,并且可以通过 MDA 含量间接测定膜系统受损程度以及植物的抗逆性。当小麦受到涝渍胁迫后,膜脂过氧化产物 MDA 大量积累,导致细胞产生氧化胁迫和膜系统损伤,从而对植物造成严重的氧化伤害。由图 3 可见,从第 1 次叶面处理后第 3 天(4 月 3 日)开始,CK 旗叶中 MDA 整体含量随处理后时间的变化而升高,在第 1 次叶面处理后的第 22 天(4 月 22 日)达到最高点(其原因是小麦已处于灌浆成熟期)。与受涝后仅喷洒清水的对照 CK 相比,处理 T1 和 T2 均有效的清除了小麦受涝渍胁迫后旗叶中堆积的 MDA 含量且显著( $P < 0.05$ ),其中以 T2 处理的效果最好。

#### 2.4 不同处理对小麦旗叶可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

可溶性蛋白是植物体内氮素存在的主要形式,是了解植物体总代谢的一个重要生理生化指标。孕穗期小麦遭受涝渍胁迫后,细胞核结构和功能破坏、核仁体积变小、功能降低、蛋白质合成趋于停顿,这与合成酶活性下降、水解酶活性增强有关。从图 4 试验结果可以看出,与 CK 相比,各处理下的可溶性蛋白含量均显著上升( $P < 0.05$ );从可溶性蛋白含量动态看,在第 1 次处理后的第 9 天(4 月 9 日)达到最大值,呈现先

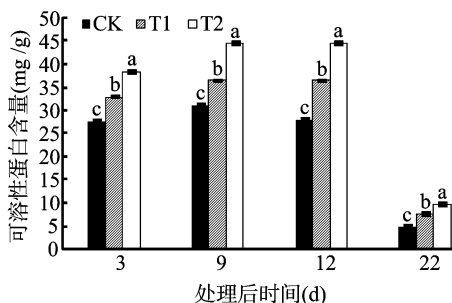


图4 不同处理下小麦旗叶可溶性蛋白和可溶性糖含量

#### 2.5 不同处理对小麦抗氧化酶活性的影响

逆境胁迫下,植物体内活性氧大量积累,破坏正常代谢过程中活性氧产生与清除的平衡。SOD、CAT、POD 是作物内在的保护酶系统,均可清除植物体内的活性氧,减少对细胞的伤害。由图 5 可以看出,与 T1 和 T2 相比,CK 涝渍 10 d 后喷施清水会打破植物体内活性氧代谢系统的平衡,促使植物体内

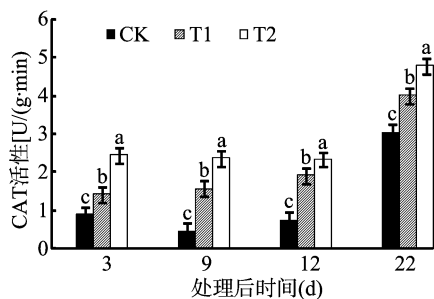
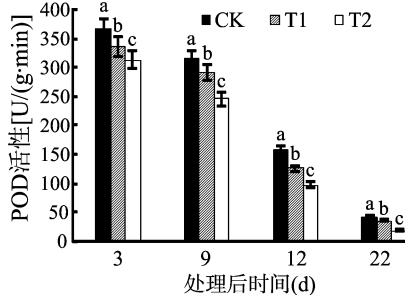
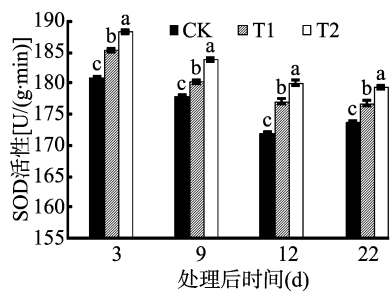


图5 不同叶面喷施处理下小麦旗叶 CAT、POD、SOD 活性

#### 2.6 不同处理对小麦产量构成的影响

通过喷施叶面肥和植物生长调节剂,可明显促进植株生长、减少产量损失(表 1)。与 CK 相比,在总小穗数一定的情况下,T1 和 T2 等 2 个处理显著降低了不孕小穗数数量( $P < 0.05$ ),其中 T2 的不孕小穗数减少 41.4%,T1(NPK)的不孕

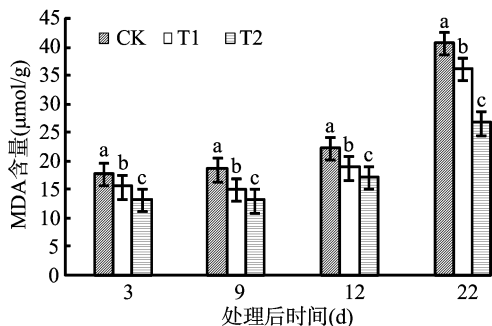
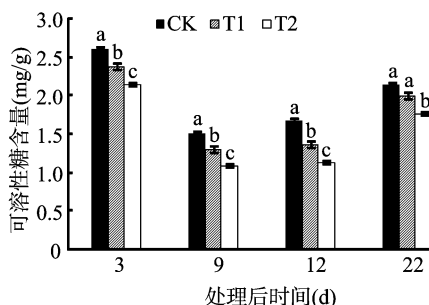


图3 不同叶面喷施处理下小麦旗叶 MDA 含量

升升降的变化趋势。

可溶性糖是高等植物的主要代谢产物之一,在植物体内具有渗透保护、碳储存和清除自由基的作用,且作为代谢的中间产物或终产物调节了植物生长、发育、抗性形成等多个生理过程。从图 4 可以看出,渍水胁迫后喷施叶面肥和调节剂可以降低旗叶中可溶性糖含量。T1 和 T2 等 2 个处理下的旗叶可溶性糖含量在涝后第 3 天(4 月 3 日)均低于 CK,且差异显著( $P < 0.05$ );从可溶性糖动态看,在第 1 次处理后的第 9 天(4 月 9 日)达到最小值,呈现先降后升的变化趋势。



SOD、CAT 活性下降,POD 活性上升,而喷施叶面肥和调节剂使清除酶的活性上升、活性氧造成的伤害得以缓解,植物的抗氧化能力提高。与 CK 相比,T1 和 T2 等 2 个处理中 SOD、POD、CAT 活性在旗叶中变化显著( $P < 0.05$ ),SOD、CAT 活性呈现上升趋势,POD 活性呈下降趋势。

小穗数减少 38.1%;有效穗数、千粒质量、每穗粒数变化显著( $P < 0.05$ ),其中 T2 的有效穗数、千粒质量、每穗粒数增加 20.9%、4.0%、19.5%,相应地,T1 各指标分别增加 7.9%、6.7%、10.9%。从对产量的影响看,T2 较 CK 增加 17.4%,T1 较 CK 增加 13.4%,T1 和 T2 等 2 个处理产量增加的主要

表 1 不同叶面喷施处理下小麦的产量构成

处理	单株有效穗数(个)	穗长(cm)	总小穗数(个)	不孕小穗数(个)	每穗粒数(个)	千粒质量(g)	产量(kg/hm <sup>2</sup> )
CK	4.94±0.38c	9.30±0.20a	17.07±0.44a	2.10±0.23a	36.57±0.51c	39.77±0.53c	3 457.10±0.40c
T1	5.33±0.42b	8.78±0.26b	16.17±0.44b	1.30±0.35b	40.57±0.50b	42.45±0.42a	3 919.15±0.26b
T2	5.97±0.42a	9.69±0.15a	17.66±0.40a	1.23±0.31b	43.70±0.50a	41.38±0.32b	4 059.45±0.49a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

原因是单株有效穗数得到有效恢复增多、每穗粒数增加、千粒质量变大。

3 结论与讨论

涝后喷施叶面肥(2% 尿素和 0.3% 磷酸二氢钾混合液)和 0.01 mg/L 2,4-EBR 可显著改善植株代谢,光合作用相关指标  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  等显著升高,叶绿素指标 Chl a、Chl b、Chl(a+b) 含量和可溶性蛋白含量升高,MDA 和可溶性糖含量显著降低,SOD、CAT 活性显著升高,POD 活性显著下降。

与涝后喷施清水相比,涝后第 3 天喷施 0.01 mg/L 2,4-EBR、第 10 天再喷施 NPK(2% 尿素和 0.3% 磷酸二氢钾混合液)及 2,4-EBR 的处理产量提高 17%;涝后第 3、第 10 天均喷施 NPK 的处理产量高 13%,其减少产量损失的主要原因是单株有效穗数增加、千粒质量增大、不孕小穗数减少、穗粒数增多。

不同时期涝渍对小麦产量影响不同,苗期和拔节期涝渍的影响较小,灌浆期的影响较大,孕穗期影响最大<sup>[22-23]</sup>。研究表明,孕穗期渍水将会影响小麦株高、分蘖数、主茎绿叶片数、绿叶面积和根系的呼吸能力,叶片光合速率、气孔导度、细胞间隙 CO<sub>2</sub> 浓度下降,蒸腾强度下降,可溶性糖含量升高,可溶性氮含量降低,且籽粒灌浆期缩短,干物质向各器官的分配比例会发生改变,植株总干质量将减少,显著影响作物生长发育,引起严重减产<sup>[24-35]</sup>。本研究表明,在小麦孕穗期田间渍水 10 d 的条件下,旗叶叶绿素含量、光合速率、可溶性蛋白含量、SOD 活性、CAT 活性均显著降低,丙二醛含量、可溶性糖含量、POD 活性均显著升高,与前人研究结果一致。

在比较严重的涝渍条件下,根系受到伤害,植株的正常代谢遭到破坏,出现了涝后代谢紊乱。为使作物从涝渍逆境下尽快恢复,首先要从改善代谢入手,然后进行根外补肥。试验表明,针对小麦孕穗期渍水 10 d 的灾害,以在田间涝水排除后第 3 天先喷施表芸苔素内酯(2,4-EBR),相隔 9 d 后再混合喷施尿素和磷酸二氢钾与的 2,4-EBR 混合液的修复手段最佳,其产量比涝后仅喷清水的高 17%。

参考文献:

[1]周广生,梅方竹,周竹青,等. 小麦孕穗期湿害对产量性状的影响[J]. 华中农业大学学报,2000,19(2):95-98.

[2]谢祝捷,姜 东,曹卫星,等. 花后干旱和渍水条件下生长调节物质对冬小麦光合特性和物质运转的影响[J]. 作物学报,2004,30(10):1047-1052.

[3]王小燕,高春保,卢碧林,等. 江汉平原小麦开花前降水分布特点及同期渍涝的产量效应[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(12):1642-1647.

[4]吴启侠,朱建强,杨 威,等. 小麦对渍涝的响应及排水指标确定[J]. 农业工程学报,2014,30(16):91-98.

[5]Zheng C F, Jiang D, Liu F L, et al. Effects of salt and waterlogging

stresses and their combination on leaf photosynthesis, chloroplast ATP synthesis, and antioxidant capacity in wheat [J]. Plant Science, 2009, 176: 575-582.

[6]Brisson N, Rebiere B, Zimmer D, et al. Response of the root system of winter wheat crop to waterlogging[J]. Plant and Soil, 2002, 243(1): 43-55.

[7]Mohd I, Shamsulh H, Qaiser H, et al. Physiological and biochemical changes in wheat under waterlogging [J]. Protoplasma, 2010, 241(1): 3-17.

[8]Swarup A, Sharma D P. Influence of top-dressed nitrogen in alleviating adverse effects of flooding of growth and yield of wheat in a sodic soil [J]. Field Crops Res, 1993, 35(2): 93-100.

[9]Huang B, Johnson J W, Nesmith S, et al. Growth, physiological and anatomical responses of two wheat genotypes to waterlogging and nutrient supply [J]. J Exp Bot, 1994, 45(2): 193-202.

[10]董登峰, 骆炳山, 陈大清. 涝渍逆境下化学调节对孕穗期小麦生理特征和产量性状的影响[J]. 广西农业生物科学, 1999, 18(4): 258-260, 273.

[11]李晓玲, 骆炳山. 油菜素甾醇类物质对小麦孕穗期抗渍性的影响[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(1): 63-66.

[12]张淑贞, 朱建强, 杨 威, 等. 江汉平原小麦湿害分析及其防控措施[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3916-3919.

[13]吴进东, 李金才, 魏凤珍, 等. 氮肥后移对花后受渍冬小麦灌浆特性及产量构成的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(3): 570-576.

[14]吴进东, 李金才, 魏凤珍, 等. 氮肥和 6-BA 对花后受渍冬小麦抗渍性的调控效应[J]. 西北植物学报, 2012, 32(12): 2512-2517.

[15]杨笑彦, 朱建强. 多效唑与氮磷钾肥配合运用减轻小麦抽穗期渍涝研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(2): 289-291, 456.

[16]Upreti K K, Murit G S R. Effects of brassinosteroids on growth, nodulation, phytohormone content and nitrogenase activity in French bean under water stress [J]. Biologia Plantarum, 2004, 48(3): 407-411.

[17]Fariduddin Q, Yusuf M, Chalkoo S, et al. 28-homobrassicin improves growth and photosynthesis in *Cucumis sativus* L. through an enhanced antioxidant system in the presence of chilling stress [J]. Photosynthetica, 2011, 49(1): 55-64.

[18]马国瑞, 侯 勇. 常用植物生长调节剂安全施用指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008, 109-125.

[19]梁建秋, 梁 颖. 几种生长物质对油菜幼苗抗湿性的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2009, 34(1): 58-62.

[20]陆晓民, 陈 勇, 贡 伟, 等. 油菜素内酯对毛豆幼苗生长及其抗渍性的影响[J]. 生物学杂志, 2006, 23(3): 37-38, 7.

[21]张治安, 陈展宇. 植物生理学实验指导[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008.

[22]魏凤珍, 李金才, 尹 钧, 等. 不同生育时期根际土壤渍水逆境对冬小麦 N、P、K 素营养的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 162-165.

耿丽平, 李小磊, 赵全利, 等. 添加微生物菌剂对小麦产量及土壤生物学性状的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(5): 50–54.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.05.013

# 添加微生物菌剂对小麦产量及土壤生物学性状的影响

耿丽平<sup>1</sup>, 李小磊<sup>2</sup>, 赵全利<sup>3</sup>, 刘文菊<sup>1</sup>

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院/河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 071001;

2. 河北黄骅市农牧局动物卫生监督所, 河北黄骅 061100; 3. 河北农业大学教学实验场, 河北保定 071001)

**摘要:**在玉米秸秆还田的基础上, 于冬小麦季通过田间小区试验研究添加微生物菌剂对土壤速效钾含量、土壤微生物量碳氮含量、土壤纤维素酶活性及产量动态变化特征的影响。结果表明, 添加微生物菌剂在一定程度上提高了小麦产量、土壤速效钾含量、土壤微生物量碳氮含量和土壤纤维素酶活性, 且表层土壤微生物量碳、氮含量明显高于下层。与对照相比, 添加微生物菌剂后, 土壤速效钾含量、土壤微生物量碳含量、土壤微生物量氮含量、土壤纤维素酶活性分别提高 14.40%~21.80%、20.89%~25.52%、24.92%~32.02%、21.85%~25.87%; 在小麦收获期, 添加 M1 (硅酸盐细菌) 和 M1 + M2 (硅酸盐细菌 + 根际促生菌) 处理的土壤速效钾含量分别比 CK 显著增加 40.82% 和 38.84% ( $P < 0.05$ ); 在添加微生物菌剂 M1、M2、M1 + M2 处理分别比 CK 处理增产 1 681、1 264、1 387 kg/hm<sup>2</sup>, 增产率分别达 24.23%、18.22%、20.00%, M1 处理与 CK 相比差异极显著 ( $P < 0.01$ ); 土壤纤维素酶活性与土壤微生物量碳、氮含量都呈极显著正相关关系 ( $r = 0.946^{**}$ ,  $r = 0.910^{**}$ ,  $n = 12$ )。

**关键词:**小麦; 生育期; 微生物菌剂; 产量; 土壤; 速效钾; 微生物量; 纤维素酶

**中图分类号:** S512.106

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-1302(2017)05-0050-05

从高产、优质、环保的目标出发, 为进一步加强土壤改良、提高土壤肥力, 加强土壤肥料新技术的研发及推广, 从而提高农田的综合生产力, 为农业的可持续稳定发展提供积极作用<sup>[1]</sup>。近年来, 化学肥料的过量使用导致土壤肥力降低, 环境污染严重, 土壤中有益微生物量减少, 土壤酶活性也显著降低, 不仅影响了土壤养分的转化和作物吸收, 而且导致作物品

质和产量也不断降低, 因此迫使人们积极寻找新的肥源<sup>[2]</sup>。随着绿色农业的兴起和发展, 微生物肥料的研究与应用日益受到人们的重视。硅酸盐细菌 (silicate bacteria) 由于其生命活动作用可将含钾矿物中的难溶性钾溶解出来供作物利用, 对作物生长、产量提高及品质改善有良好作用<sup>[3]</sup>。配施微生物菌剂, 不仅可使土壤中无效营养有效化, 而且可以预防和控制农作物病害, 减少农药和化肥的使用, 被普遍认为是一种环境友好、经济有效提高作物产量的方法。土壤微生物量碳氮是土壤有机碳组成成分之一, 为土壤有机碳的分解和氮矿化提供动力, 而土壤作为“类生命体”, 几乎所有的生物化学反应都是由酶来驱动的, 土壤酶活性随着生育期在土壤中进行动态变化, 在土壤生态系统的物质循环和能量转化中起着非常重要的作用<sup>[4]</sup>。其中土壤纤维素酶是土壤碳素循环中的一个重要的酶系, 可以水解纤维素生成纤维二糖, 进而可水解

收稿日期: 2016-02-01

基金项目: 河北省高等学校创新团队领军人才培养计划 (编号: LJRC016)。

作者简介: 耿丽平 (1984—), 女, 河北石家庄人, 硕士, 讲师, 主要从事土壤环境质量研究。Tel: (0312) 7528215; E-mail: genglip486@126.com。

通信作者: 刘文菊, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤污染与防治研究。Tel: (0312) 7528228; E-mail: liuwj@hebau.edu.cn。

[23] 李金才, 董琦, 余松烈. 不同生育时期根际土壤淹水对小麦品种光合作用和产量的影响[J]. 作物学报, 2001, 27(4): 434–441.

[24] 李金才, 魏凤珍, 余松烈, 等. 孕穗期湿害对小麦灌浆特性及产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 1999, 26(1): 89–94.

[25] 李金才, 魏凤珍, 王成雨, 等. 孕穗期土壤渍水逆境对冬小麦根系衰老的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(9): 1355–1360.

[26] 傅前虎, 李金才, 雷鸣. 孕穗期根际土壤淹水对小麦氮素代谢和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2001, 29(5): 608–610.

[27] 肖梦华, 俞双恩, 胡秀君. 涝渍胁迫对冬小麦生长因子变化的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 33–39.

[28] 蒋丽娜, 徐 娜, 常 江, 等. 持续淹水对小麦养分吸收动态和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(27): 113–117.

[29] 吕 军. 渍水对冬小麦生长的危害及其生理效应[J]. 植物生理学报, 1994, 20(3): 221–226.

[30] 朱旭彤, 胡业正, 马平福, 等. 小麦抗湿性研究——I. 小麦湿害的临界期[J]. 湖北农业科学, 1993(9): 3–7.

[31] 胡继超, 曹卫星, 姜 东, 等. 小麦水分胁迫影响因子的定量研究 I. 干旱和渍水胁迫对光合、蒸腾及干物质积累分配的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(4): 315–320.

[32] 蔡士宾, 曹 暘, 方先文, 等. 小麦灌浆期水渍和高温对植株早衰和籽粒增重的影响[J]. 作物学报, 1994, 20(4): 457–464.

[33] 范雪梅, 姜 东, 戴延波, 等. 花后干旱和渍水下氮素供应对小麦籽粒蛋白质和淀粉积累关键调控酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1132–1141.

[34] 范雪梅, 姜 东, 戴延波, 等. 花后干旱或渍水逆境下氮素对小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 71–77.

[35] 李晓玲, 骆炳山. 油菜素甾醇类物质对小麦孕穗期抗渍性的影响[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(1): 63–66.