

叶面喷施外源多胺提高夏玉米灌浆前期抗涝性

刘冰^{1,2,3}, 周新国^{1,3}*, 李彩霞^{1,3}, 甄博^{1,3}, 李会贞^{1,3}, 李中阳¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453000; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100000;
3. 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站, 商丘 476001)

摘要:为缓解玉米涝渍胁迫危害, 该研究在夏玉米灌浆前期设置 3、5、7、9 d 的测坑淹水试验, 分析淹水及淹水后叶面喷施外源多胺对夏玉米叶片可溶性糖、根系活力、地上部干物质、内源亚精胺、籽粒质量动态变化和产量的影响。结果表明: 淹水后与 CK 相比, 淹水 5、7、9 d 叶片可溶性糖含量下降, 地上部干物质质量均显著减少, 淹水 3、7、9 d 百粒质量增加, 5 d 减少, 籽粒质量、穗行数、行粒数、产量均显著降低。叶面喷施外源多胺后, 相同淹水天数处理间比较, 淹水 5、7、9 d 叶片可溶性糖含量增加、根系活力增强, 淹水 7、9 d 叶片内源亚精胺含量增加, 淹水 5 d 百粒质量显著增加, 淹水 3、5 d 植株行粒数分别增加 8.24% 和 7.41%, 产量分别提高 7.92%、5.85% ($P < 0.05$)。因此, 夏玉米灌浆前期遭遇淹水后 5 d 内叶面喷施外源多胺, 能够提高其抗涝性, 减少产量损失。

关键词:灌溉; 糖; 作物; 淹水; 夏玉米; 灌浆前期; 多胺; 叶面喷施

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.018

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0122-07

刘冰, 周新国, 李彩霞, 甄博, 李会贞, 李中阳. 叶面喷施外源多胺提高夏玉米灌浆前期抗涝性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 122—128. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.018 <http://www.tcsae.org>

Liu Bing, Zhou Xinguo, Li Caixia, Zhen Bo, Li Huizhen, Li Zhongyang. Foliar spraying polyamine improving waterlogging resistance of summer maize in early grain filling stage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 122—128. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.018 <http://www.tcsae.org>

0 引言

玉米是中国第一大作物, 生育期大约 110 d 左右, 玉米生育期内降雨量约占全年降雨量的 50%~60%, 降水量过多, 容易形成田间积水和长期土壤水分过高, 发生涝渍灾害, 影响玉米正常生长发育。长江中下游地区以及黄淮平原极易发生涝渍灾害, 其受灾面积占全国的 3/4 以上。夏玉米遭受涝渍胁迫后, 产量显著降低^[1-4]。目前, 已有关于玉米涝渍胁迫的研究大都是玉米涝渍后的生理变化以及涝渍对玉米生长发育的影响等, 如产量明显下降^[1-4], 根系产生大量不定根, 根系总长度、根系面积、根系体积显著升高^[5-6], 抗倒伏能力下降^[7], 茎秆和叶片养分积累和干物质质量减少^[8], 影响籽粒灌浆和品质^[9-10], 光合速率降低^[11-12], 以及植株体内一些物质^[13]和酶^[14]的变化情况, 还有对玉米不同生育阶段耐涝渍能力^[15]及耐淹阈值的研究^[16], 但发生涝渍胁迫后的应对方法却鲜见。寻求有效地缓解涝渍灾害的方法, 是当前玉米生产面临

的主要科学问题之一。

多胺是一类存在于原核生物及真核生物中的具有强生物活性的低分子脂肪族含氮碱。高等植物体内含有的多胺主要有腐胺 (Put)、亚精胺 (Spd)、精胺 (Spm)、尸胺 (Cad) 及鲜精胺 (Agm) 等^[17-18]。已有研究表明, 外源多胺能缓解盐胁迫对植物的危害^[19-23], 提高植物的抗旱性和抗寒性^[24], 缓解玉米苗期涝渍胁迫带来的压力^[25-26]等, 但对夏玉米中后期遭遇涝渍的影响研究鲜见。黄淮海地区每年降雨多集中在夏玉米生长的中后期^[1], 大致在抽雄期与灌浆期。因此, 本研究选择在夏玉米灌浆前期进行试验, 探究淹水后叶面喷施外源多胺对夏玉米根系、生长及产量的影响, 为有效缓解涝渍灾害提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在农业部商丘农业环境科学观测试验站 (24°35'N、115°34'E, 海拔 50.2 m) 进行。商丘处于淮河以北, 属温暖温带半湿润季风气候, 土壤类型为潮土, 0~45 cm 土层为壤土, >45~70 cm 土层为壤质黏土, 80~100 cm 土层为黏土层。试验点 0~100 cm 土层平均田间持水率质量分数为 27.09%, 平均土壤容重 1.46 g/cm³。土壤全氮质量分数为 0.78 g/kg, 碱解氮、速效磷、速效钾质量分数分别为 56.4、10.5、52.6 mg/kg。年均降雨量 700 mm 左右, 由于存在黏土层, 雨后地表水不易下渗, 地面平坦, 易形成涝渍灾害。

收稿日期: 2016-01-15 修订日期: 2016-04-10

基金项目: “十二五”公益性行业 (农业) 科研专项经费资助项目 (201203077、201203032)。

作者简介: 刘冰, 男, 河南驻马店人, 主要从事农业水资源与环境研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453000。

Email: 501251048@qq.com

*通信作者: 周新国, 男, 河南信阳人, 研究员, 主要从事农田排水技术研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453000。

Email: firizhouxg@126.com

1.2 供试材料

多胺混合液为腐胺与亚精胺混合溶液，其中腐胺质量分数为 4 mg/kg、亚精胺质量分数为 6 mg/kg，由周口师范学院生命科学系实验室提供。供试玉米为登海 605。

1.3 试验设计

在玉米灌浆前期进行淹水试验，使离地表 10~15 cm 深度内淹水。设置淹水时间为 3、5、7、9 d，各淹水时间再分喷施多胺和喷施蒸馏水，共 8 个处理，各处理 3 个重复。除此以外，设置不淹水的正常生长处理为对照 (CK)，以高产田标准进行管理。具体见表 1。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatment	淹水时间 Duration of water flooding/d	喷施液 Spraying solution
CK	0	无
T3	3	多胺
T5	5	多胺
T7	7	多胺
T9	9	多胺
W3	3	蒸馏水
W5	5	蒸馏水
W7	7	蒸馏水
W9	9	蒸馏水

1.4 试验过程

玉米淹水试验在防雨棚下有底钢板测坑中进行，共 27 个测坑，长×宽×高为 3.3 m×2 m×2 m。2015 年在测坑内进行试验，6 月 9 日播种，种植密度为 75 000 株/hm²，9 月 26 日收获。试验采用硝酸铵磷 525 kg/hm² (含 N30%、含 P₂O₈8%)，分 2 次施用，即底肥 70%和拔节期追肥 30%。灌浆前期 (8 月 11 日) 进行淹水试验。分别在淹水结束前 3 d 叶面喷施多胺试剂或蒸馏水，各测坑每次喷施 550 mL 多胺混合液或蒸馏水，保证每个叶片上表面均被喷满，每天早晚各 1 次。

1.5 测定指标与方法

1) 叶片可溶性糖、内源亚精胺：分别在喷施结束后 3、6、9、12 d 每个小区选 1 株玉米，取 1 片功能叶，采用蒽酮比色法测定叶片可溶性糖含量^[27]，mg/g；高效液相法测定内源亚精胺含量^[28]，nmol/g (以湿质量计，下同)。

2) 根系活力：分别在喷施结束后 3、6、9、12 d，每个小区选 1 株玉米，取根尖部位，采用氯化三苯基四氮唑 (triphenyl tetrazolium chloride, TTC) 法测定根系活力^[29]，以 TTC 还原强度表示根系活力大小，μg/(g·h)。

3) 地上部干物质质量：分别在喷施结束后 3、6、9、12 d 每个小区选 1 株玉米，取地上部植株，切剪成段，于 105 ℃杀青 30 min，然后 80 ℃烘干至恒质量，称取质量，g。

4) 籽粒质量动态变化：8 月 25 日开始每个小区选 3 穗，用于籽粒取样，每 5 d 取样 1 次，每次在穗中部取 20 粒，直至 9 月 9 日。于 105 ℃杀青 30 min，然后 80 ℃烘干至恒质量，以平均籽粒干质量表示，g。

5) 产量及其组成：9 月 26 日，每个小区玉米单独收获，中间 2 行进行考种，测定穗长、穗周长、穗芯质量、

行粒数、穗行数、秃尖和百粒质量，进行测产。

1.6 数据分析

运用最小显著差数法 (least significant difference, LSD 法) 进行数据显著性分析。

2 结果与分析

2.1 外源多胺喷施对叶片可溶性糖含量的影响

淹水结束后植株叶片可溶性糖含量的变化如表 2 所示。可以看出，喷施后 3 d 时，蒸馏水处理的植株在淹水 5、7、9 d 后，叶片可溶性糖含量相对于 CK 分别下降 12.03%、24.97%、7.51% ($P<0.05$)；多胺处理的植株叶片可溶性糖含量分别比蒸馏水处理的植株高出 12.13%、8.36%、20.01%、12.17% ($P<0.05$)。喷施后 6、9、12 d，随着淹水胁迫的解除，植株自身恢复生长的进行，各处理的叶片可溶性糖含量均有不同的变化。其中，对于淹水历时 7 d 的处理，与 CK 相比，喷施蒸馏水的植株叶片可溶性糖含量减少幅度最大，而喷施多胺的提升幅度也最大。淹水后，外源多胺对叶片可溶性糖的提升效果，对淹水 7 d 的处理最明显，淹水 5 d 次之，淹水 9 d 最小，对淹水 3 d 几乎无提升效果。

可溶性糖是植物体内一种重要的调节物质，在植物的抗胁迫过程中具有重要作用，能够增强其抵御胁迫的能力^[30-33]。植株在遭遇淹水后需要消耗体内的可溶性糖，用来抵御胁迫，而且在淹水解除后可溶性糖要参与玉米的生理恢复和修复过程^[27]，在一定范围内消耗可溶性糖越多，意味着遭受的胁迫程度越高。本研究结果表明，对于淹水 5、7、9 d 的植株，喷施多胺后其叶片可溶性糖含量不同程度地高于喷施蒸馏水的植株，且淹水 7 d 的植株叶片可溶性糖含量提高最明显，表明喷施多胺减少了植株叶片可溶性糖的消耗，即降低了其遭受淹水胁迫的程度。

2.2 外源多胺喷施对根系活力的影响

以 TTC 还原强度表示根系活力的大小。淹水结束后各处理根系活力的变化如表 2 所示。与喷施蒸馏水的植株相比：喷施多胺后 3 d，淹水 5、7、9 d 喷施多胺处理的根系活力分别提高了 24.76%、40.45% 和 31.46% ($P<0.05$)；喷施多胺后 6 d，淹水 3、5、7 d 的植株根系活力得到显著提高 ($P<0.05$)；喷施多胺后 9 d，淹水 7 d 的植株和喷施多胺后 12d，淹水 7 和 9 d 的植株，根系活力均得到显著提高 ($P<0.05$)。淹水 7 和 9 d 的处理，在喷施多胺后的 12d 内 (喷施后 6d 淹水 9 d 处理除外)，根系活力明显高于喷施蒸馏水的处理，说明多胺对长时间淹水的植株根系活力提升效果更显著。喷施多胺对夏玉米淹水后根系活力的提升效果，淹水 7 d>9 d>5 d>3 d。

随着玉米自身恢复生长的进行，植株根系活力呈现出先升高后下降的趋势，与喷施后 3~9 d 比较，喷施后 12 d 时所有处理根系活力下降非常明显，可能是由于淹水结束后初期，土壤含水量较高，对老根产生刺激增强了其活力，而后期土壤含水量下降，前期产生的刺激消失，次生根也相继死亡，根系活力整体呈现出下降趋势，但多胺处理植株的根系活力下降速率较蒸馏水处理慢，说明叶面喷施外源多胺可能减缓夏玉米淹水后根系衰老的速率。

表 2 喷施外源多胺后叶片可溶性糖和内源亚精胺含量、根系活力、及地上部干物质
Table 2 Soluble sugar content and endogenous spermidine content of leaf, root activity and aboveground dry matter after spraying exogenous polyamine

处理 Treatment	喷施后 3 d 3 d after spraying				喷施后 6 d 6 d after spraying			
	叶片可溶性糖 Soluble sugar of leaf/(mg·g ⁻¹)	根系活力 Root activity/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	地上部干物质 Aboveground dry matter/g	叶片内源亚精胺 Endogenous spermidine of leaf/ (nmol·g ⁻¹)	叶片可溶性糖 Soluble sugar of leaf/(mg·g ⁻¹)	根系活力 Root activity/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	地上部干物质 Aboveground dry matter/g	叶片内源亚精胺 Endogenous spermidine of leaf/ (nmol·g ⁻¹)
CK	65.93bc	25.96de	160.90a	99.67c	63.78a	38.01bc	177.20a	96.67cd
W3	63.71cd	25.96de	139.57b	108.00bc	54.90bc	29.46d	161.50ab	104.33bcd
T3	71.43a	26.73cde	138.27b	91.00c	65.96a	36.98bc	160.30ab	86.33d
W5	58.00f	25.53de	129.10bc	124.67ab	47.41d	29.89d	153.60b	118.33abc
T5	62.85cde	31.85b	132.22bc	108.67bc	50.14cd	40.71b	155.70ab	98.33bcd
W7	49.46g	22.62e	127.03bc	92.67c	46.60d	32.45cd	129.27c	91.67d
T7	59.36ef	31.77bc	130.60bc	126.33ab	65.80a	54.42a	136.40bc	121.67ab
W9	60.98def	28.07bcd	113.70c	89.33c	59.74ab	40.03b	128.70c	83.33d
T9	68.40ab	36.90a	121.77bc	141.33a	61.96ab	37.04bc	132.83bc	131.33a

处理 Treatment	喷施后 9 d 9 d after spraying				喷施后 12 d 12 d after spraying			
	叶片可溶性糖 Soluble sugar of leaf/(mg·g ⁻¹)	根系活力 Root activity/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	地上部干物质 Aboveground dry matter/g	叶片内源亚精胺 Endogenous spermidine of leaf/ (nmol·g ⁻¹)	叶片可溶性糖 Soluble sugar of leaf/(mg·g ⁻¹)	根系活力 Root activity/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	地上部干物质 Aboveground dry matter/g	叶片内源亚精胺 Endogenous spermidine of leaf/ (nmol·g ⁻¹)
CK	64.18b	22.43ab	207.30a	98.33cd	53.27b	11.94e	212.37a	97.67b
W3	48.53d	15.19d	180.90b	100.33bcd	47.72bc	12.28de	191.23b	99.67b
T3	49.53d	18.37cd	176.80b	84.67de	50.75b	15.29cde	191.53b	80.33c
W5	53.47cd	15.76d	159.87bc	108.67abc	46.61bc	12.11cde	180.07b	93.67bc
T5	65.09b	17.38cd	177.67b	96.67cd	54.28b	15.70bc	186.43b	91.67bc
W7	49.94d	19.13c	146.80c	87.67de	40.24c	15.36de	158.03c	78.33c
T7	79.44a	24.65ab	163.60bc	119.00ab	71.56a	16.40ab	162.83c	103.00b
W9	61.05bc	25.55a	146.70c	75.00e	40.14c	19.65cd	154.10c	71.67c
T9	66.91b	21.53bc	167.87bc	124.67a	53.78b	22.71a	162.10c	118.33a

注：表中数据为各处理 3 次重复的平均值；同一列中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Data are average of 3 replicates for each treatment; Values with different letters in same column are different significantly ($P<0.05$).

2.3 外源多胺喷施对地上部干物质的影响

淹水结束后植株地上部干物质质量变化如表 2 中所示。喷施后 3 d，对于各淹水处理，喷施蒸馏水及多胺的处理植株地上部干物质质量差异不显著，但均显著低于 CK ($P<0.05$)，且在喷施后 12 d 时各处理仍显著低于 CK ($P<0.05$)。夏玉米遭遇淹水胁迫后，地上部干物质质量显著减少，这与前人研究结果一致^[8]。夏玉米遭遇淹水后，需要消耗自身物质抵御淹水胁迫，因此地上部干物质质量会下降。

2.4 外源多胺喷施对内源亚精胺含量的影响

淹水后植株内源亚精胺含量的变化如表 2 中所示。喷施蒸馏水的植株叶片内源亚精胺含量与 CK 相比：喷施后 3 和 6 d，大部分无显著差异（除淹水 5 d 显著升高外）；喷施后 9 d，淹水 9 d 的植株显著低于 CK ($P<0.05$)；喷施后 12 d，淹水 7 和 9 d 的植株均显著低于 CK ($P<0.05$)。与喷施蒸馏水的植株比较，淹水 7 和 9 d 的植株喷施多胺后，叶片内源亚精胺含量均显著增加 ($P<0.05$)，淹水 3 和 5 d 的植株则无明显变化。

植物遭受逆境胁迫时，其内源亚精胺含量增加，以增强其抵御胁迫的能力^[34-35]。本研究中与 CK 相比，淹水

3 和 5 d 的植株叶片内源亚精胺含量几乎无明显变化，喷施多胺后也无明显效果。淹水 7 d 植株在喷施蒸馏水后 12 d、淹水 9 d 的植株在喷施蒸馏水后 9 和 12 d，与 CK 相比，叶片内源亚精胺含量显著降低 ($P<0.05$)，喷施多胺后均明显提高 ($P<0.05$)。其原因可能为植株具有自我调节功能，能够抵御短期（3 和 5 d）淹水胁迫。当淹水时间过长（7 和 9 d）时，植株自我调节功能遭到破坏，由于植株体内存在一定的传导过程，长时间淹水的植株叶片内源亚精胺含量在胁迫解除后的 9 和 12 d 才出现下降趋势，喷施外源多胺后其含量得到明显提高。

2.5 外源多胺喷施对玉米籽粒质量动态变化的影响

淹水结束后各处理籽粒质量动态变化如图 1 所示。除 9 月 9 日外，各淹水处理夏玉米籽粒质量均显著低于 CK，8 月 25 日淹水 3、5、7、9 d 籽粒质量分别降低 28.14%、38.81%、31.43%、37.38% ($P<0.05$)。这与前人研究结果一致^[1,9]。喷施多胺与喷施蒸馏水的植株籽粒质量无显著差异。

2.6 外源多胺喷施对玉米产量及其构成的影响

各处理玉米产量及其构成如表 3 所示，其中穗周长与秃尖各处理之间无显著差异，不再列出。与 CK 相比，

喷施蒸馏水的处理在淹水后穗长、行粒数、穗行数、穗芯质量和产量均显著降低 ($P<0.05$)，这与前人研究结果一致^[1-2]。与喷施蒸馏水的处理相比，喷施多胺后，淹水 3 和 5 d 的植株穗长分别提高 6.56% 和 7.80%，行粒数分别提高 8.24% 和 7.41%，产量分别提高 7.92% 和 5.85% ($P<0.05$)；淹水 7 和 9 d 的植株无显著差异。穗行数在喷施多胺后无明显提升。玉米籽粒的营养物质是由穗芯直接运输到其内部的，穗芯正常生长，产量才能得到保证。与喷施蒸馏水的处理相比，淹水 3、5、7 d 的植株在喷施多胺后穗芯质量得到显著提高。

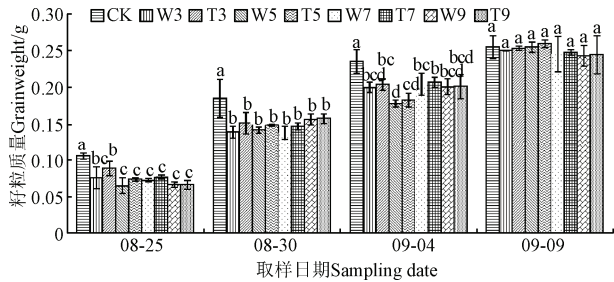


图 1 喷施多胺后籽粒质量动态变化
Fig.1 Changes of grainweight after sprayingexogenous polyamine

表 3 喷施多胺对产量及其组成的影响
Table 3 Maize yield and its components affected by spraying exogenous polyamine

处理 Treatment	穗长 Spike length/cm	行粒数 Kernels per row	穗行数 Rows per spike	穗芯质量 Spike core weight/g	百粒质量 100 grains weigh/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
CK	16.47a	33.33a	16a	18.67cd	43.73cd	9030.30a
W3	14.17cd	28.33cd	14bc	18.80bcd	45.50a	8030.30c
T3	15.10b	30.67b	14.67b	20.87a	43.50d	8666.67b
W5	13.50de	27.00de	14bc	16.67f	41.77f	7242.42e
T5	14.67bc	29.00bc	14bc	18.13de	42.60e	7666.67d
W7	13.17e	26.00e	14bc	17.07e	44.75b	7212.12e
T7	13.83cde	27.00de	14bc	19.40bc	44.08bc	7454.55de
W9	11.97f	23.67f	13.33c	19.50bc	45.33a	7303.03e
T9	12.07f	24.33f	14bc	19.97ab	43.47d	7424.24de

夏玉米遭遇不同时间的淹水胁迫后，百粒质量变化不同。与 CK 相比，喷施蒸馏水的植株淹水 3、7、9 d 后百粒质量分别提高 4.05%、1.91%、3.67% ($P<0.05$)，而淹水 5 d 的植株则降低 4.49% ($P<0.05$)，这与前人研究结果不同^[2,14]，有可能是品种和淹水时期不同导致的。与喷施蒸馏水的处理相比，叶面喷施外源多胺后，淹水 3、9 d 的植株百粒质量分别降低 4.40%、4.12% ($P<0.05$)；而淹水 5 d 的植株百粒质量则升高 2.00% ($P<0.05$)。

3 讨 论

作物受涝渍后，植株体内会产生不同的代谢反应抵御胁迫，减少淹水带来的伤害。通过外源物质强化植株体内代谢活动，减缓植株所受的伤害，进而提高作物抵御逆境能力，实现恢复生长，是作物受涝渍后一种有效的修复途径。由于作物存在多种抵御淹水逆境的途径或生理机制，本文研究了涝后叶面喷施外源多胺条件下植株体内多胺变化、可溶性糖含量变化、根系活力变化及产量结构的影响。

研究发现，淹水 3 和 5 d 的植株叶片内源亚精胺含量无显著变化，这与杜红阳等^[36]在玉米幼苗根系中的研究结果不一致，可能是由于本试验是在灌浆前期进行，玉米对于 3~5 d 的淹水胁迫有一定的抵御能力，因此在反映到叶片内源亚精胺含量变化不明显；淹水 7 和 9 d 的玉米，喷施多胺则显著提高其叶片内源亚精胺含量，进而提高玉米植株的抗涝性，这与前人研究结果一致^[36]。前人研究表明，玉米遭遇淹水胁迫后，叶片可溶性糖含量会升高，用以抵御胁迫，说明可溶性糖有利于增强玉米的而抗胁迫能力^[30]。本试验中淹水结束 3 d 后，与喷施蒸

馏水处理对比，喷施多胺处理玉米叶片内可溶性糖含量显著提高，说明喷施多胺后，能够有效促进玉米体内的可溶性糖的代谢，增加了植株的抗涝性。淹水状态下的根系活力增强，则能提高其根部营养物质的利用效率，使其更多的用于籽粒干物质的积累，进而提高遭遇淹水胁迫植株的产量，减少损失。淹水后各淹水处理的根系活力与 CK 相比无明显变化，这与前人研究结果不同^[36]，原因可能在于本研究是在夏玉米灌浆前期进行，其根系是成熟老根，对淹水环境有一定的适应性。在喷施后的 6 d 内，与喷施蒸馏水的处理相比，喷施多胺的植株根系活力整体呈现出增加的趋势，且在试验后期其根系活力下降速率明显较低，即其根系衰老减慢。淹水 7 和 9 d 的处理百粒质量虽然高于 CK，但是其升高幅度并不能弥补行粒数和穗行数下降所造成的损失，因此产量显著下降；与喷施蒸馏水的处理相比，淹水 3 d 的处理百粒质量在喷施多胺后虽然显著下降，但是行粒数的提高幅度远远高于其下降幅度，因此产量得到明显提升。

4 结 论

- 1) 夏玉米灌浆前期淹水后，功能叶内可溶性糖含量下降，喷施外源多胺后，增加了叶片内的可溶性糖的含量。淹水结束 3 d 后，淹水 3、5、7、9 d 喷施多胺处理比喷施蒸馏水处理分别高 12.13%、8.36%、20.01%、12.17%，且整体呈现出升高的趋势。
- 2) 淹水结束 3 d 后，淹水 5、7、9 d 喷施多胺处理比喷施蒸馏水处理的根系活力均有不同程度的提高，分别提高了 24.76%、40.45%和 31.46% ($P<0.05$)。根系活力整体呈现出先升高后下降的趋势。

3) 淹水后穗长、行粒数、穗行数和产量均明显下降。喷施外源多胺后, 淹水 3 和 5 d 的植株穗长分别提高 6.56%、7.80%, 行粒数分别提高 8.24%、7.41%, 产量分别提高 7.92%、5.85%。

结合可溶性糖、根系活力和产量的数据, 可以得出以下结论: 夏玉米灌浆前期淹水后, 5 d 内叶面喷施外源多胺, 能提高其抗涝性, 减少产量损失。本试验可以为夏玉米涝后修复提供一定的理论依据。然而仍然存在不足之处, 如喷施外源多胺明显提升了淹水 7 和 9 d 植株叶片内源亚精胺的含量, 但对产量无提升效果, 对地上部干物质和籽粒质量动态变化也无明显影响, 这可能是由于外源多胺的喷施量不够或者浓度配比没有达到最适宜的比例等, 需要进一步的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 周新国, 韩会玲, 李彩霞, 等. 拔节期淹水玉米的生理性状和产量形成[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 119—125. Zhou Xinguo, Han Huiling, Li Caixia, et al. Physiological characters and yield formation of corn (*Zea mays* L.) under waterlogging stress in jointing stage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 119—125. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘祖贵, 刘战东, 肖俊夫, 等. 苗期与拔节期淹涝抑制夏玉米生长发育、降低产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 44—52. Liu Zugui, Liu Zhandong, Xiao Junfu, et al. Waterlogging at seedling and jointing stages inhibits growth and development, reduces yield in summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(5): 44—52. (in Chinese with English abstract)
- [3] 余卫东, 冯利平, 盛绍学, 等. 黄淮地区涝渍胁迫影响夏玉米生长及产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 127—136. Yu Weidong, Feng Liping, Sheng Shaoxue, et al. Effect of waterlogging at jointing and tasseling stages on growth and yield of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 127—136. (in Chinese with English abstract)
- [4] 余卫东, 冯利平, 胡程达, 等. 苗期涝渍对黄淮地区夏玉米生长和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2161—2166. Yu Weidong, Feng Liping, Hu Chengda, et al. Effects of waterlogging during seedling stage on the growth and yield of summer maize in Huang-Huai Region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(8): 2161—2166. (in Chinese with English abstract)
- [5] Zaidi P H, Selvan P M, Sultana R, et al. Association between line per se and hybrid performance under excessive soil moisture stress in tropical maize (*Zeamays* L.)[J]. Field Crops Research, 2007, 101: 117—126.
- [6] 梁哲军, 陶洪斌, 王璞. 淹水解除后玉米幼苗形态及光合生理特征恢复[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3977—3985. Liang Zhejun, Tao Hongbin, Wang Pu. Recovery effects of morphology and photosynthetic characteristics of maize (*Zey mays* L.) seedlings after waterlogging[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3977—3985. (in Chinese with English abstract)
- [7] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对高产夏玉米抗倒伏性能的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2440—2448. Ren Baizhao, Zhang Jiwang, Li Xia, et al. Effects of Waterlogging on stem lodging resistance of summer maize under field conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(12): 2440—2448. (in Chinese with English abstract)
- [8] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米养分吸收与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 298—308. Ren Baizhao, Zhang Jiwang, Li Xia, et al. Effect of waterlogging on nutrient uptake and transport of summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 298—308. (in Chinese with English abstract)
- [9] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 淹水胁迫对夏玉米籽粒灌浆特性和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4435—4445. Ren Baizhao, Zhang Jiwang, Li Xia, et al. Effect of waterlogging on grain filling and quality of summer maize[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2013, 46(21): 4435—4445. (in Chinese with English abstract)
- [10] 余卫东, 冯利平, 盛绍学, 等. 涝渍胁迫下夏玉米的灌浆特征及其动态模拟[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1142—1149. Yu Weidong, Feng Liping, Sheng Shaoxue, et al. Analysis of the dynamics and characteristics of grain filling in summer maize under waterlogging stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(9): 1142—1149. (in Chinese with English abstract)
- [11] Bragina T V, Ponomarova Y u V, Drozdova I S, et al. Photosynthesis and dark respiration in leaves of different stages of partly flooded maize seedlings[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2004, 51(3): 342—347.
- [12] 僧珊珊. 淹水胁迫对不同基因型玉米生长发育影响及其机理研究[D]. 河南农业大学, 2012: 22—22. Seng Shanshan. Effects Waterlogging Stress on Growth and Physiological Metabolism of Different Maize Genotypes[D]. Henan Agricultural University, 2012: 22—22. (in Chinese with English abstract)
- [13] 周自强, 王福友, 陈建飞, 等. 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米糖、氮代谢底物量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 715—719. Zhou Ziqiang, Wang Fuyou, Chen Jianfei, et al. Effect of water-logging and nitrogen form on substrates of sugar and nitrogen metabolism in maize (*Zea mays* L.) at seedling stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(6): 715—719. (in Chinese with English abstract)
- [14] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米叶片衰老特性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1022—1028. Ren Baizhao, Zhang Jiwang, Li Xia, et al. Effect of waterlogging on leaf senescence characteristics of summer maize in the field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1022—1028. (in Chinese with English abstract)
- [15] 马玉平, 孙琳丽, 俄有浩. 黄淮海夏玉米不同发育阶段对旱涝灾害的敏感性[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(6): 90—96. Ma Yupin, Sun Linli, E Youhao. Sensitivity of summer maize in different developmental stages in Huang-Huai-Hai

- plain to drought and waterlogging[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(6): 90—96. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈敏, 徐珊, 蒋丽娜, 等. 淹水条件下玉米耐淹阈值研究[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(4): 585—591.
Chen Min, Xu Shan, Jiang Lina, et al. Submergence tolerance threshold of maize under flooded conditions[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2013, 40(4): 585—591. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘颖, 王莹, 龙萃, 等. 植物多胺代谢途径研究进展[J]. 生物工程学报, 2011, 27(2): 147—155.
Liu Ying, Wang Ying, Long Cui, et al. Metabolic pathway of polyamines in plants: A review[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2011, 27(2): 147—155. (in Chinese with English abstract)
- [18] 徐呈祥, 马艳萍, 徐锡增. 盐胁迫对不同耐盐性枣树品种根系和叶片中多胺含量及多胺氧化酶活性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(4): 297—304.
Xu Chengxiang, Ma Yanping, Xu Xizeng. Polyamine contents and polyamine oxidase activities in roots and leaves of two jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) cultivars with contrary salt tolerance under salt stress[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2013, 21(4): 297—304. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王晓云, 李向东, 邹琦. 外源多胺、多胺合成前体及抑制剂对花生连体叶片衰老的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(3): 30—35.
Wang Xiaoyun, Li Xiangdong, Zou Qi. Effect of Polyamines on Senescence of Attached Peanut Leaves[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(3): 30—35. (in Chinese with English abstract)
- [20] Sum C, Liu Y L, Zhang W H. Mechanism of the effect of polyamines on the activity of tonoplast in barley roots under salt stress[J]. Acta Bot Sinica, 2002, 44: 1167—117.
- [21] 徐仰仓, 王静, 刘华, 等. 外源精胺对小麦幼苗抗氧化酶活性的促进作用[J]. 植物生理学报, 2001, 27(4): 349—352.
Xu Yangchang, Wang Jing, Liu Hua, et al. Promoting effect of exogenous spermine on anti-oxidative enzyme activity in wheat seedlings[J]. Acta Phytobiologica Sinica, 2001, 27(4): 349—352. (in Chinese with English abstract)
- [22] 江行玉, 赵可夫, 窦君霞. NaCl 胁迫下外源亚精胺和二环己基胺对滨藜内源多胺含量和抗盐性的影响[J]. 植物生理学通讯, 1999, 35(3): 188—190.
Jiang Xingyu, Zhao Kefu, Dou Junxia, et al. The effects of exogenous spermidine and dicyclohexylamine on the content of endogenous polyamines and salt resistance of *Atriplex* under NaCl stress[J]. Plant Physiology Communications, 1999, 35(3): 188—190. (in Chinese with English abstract)
- [23] 江行玉, 窦君霞, 赵可夫, 等. 精胺对盐胁迫下玉米衰老和生长的影响[J]. 山东师范大学学报, 1997, 12(1): 75—79.
Jiang Xingyu, Dou Junxia, Zhao Kefu, et al. Effects of spermine on the senescence and growth of corn under salt-stress[J]. Journal of Shandong Normal University, 1997, 12(1): 75—79. (in Chinese with English abstract)
- [24] Yang D, Jing R, Chang X, et al. Identification of quantitative trait loci and environmental interactions for accumulation and remobilization of water-soluble carbohydrates in wheat (*Triticum aestivum* L.) tems[J]. Genetics, 2007, 176(1): 571—584.
- [25] 僧珊珊, 王群, 张永恩, 等. 外源亚精胺对淹水胁迫玉米的生理调控效应[J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1042—1050.
Seng Shanshan, Wang Qun, Zhang Yongen, et al. Effects of exogenous spermidine on physiological regulatory of maize after waterlogging stress[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(6): 1042—1050. (in Chinese with English abstract)
- [26] 程明明, 杜红阳, 刘怀攀. 外源亚精胺对涝胁迫下玉米幼苗根的氧化伤害缓解效应[J]. 南方农业学报, 2015, 46(1): 36—41.
Cheng Mingming, Du Hongyang, Liu Huaipan. Mitigating effects of exogenous spermidine on oxidative injury induced by waterlogging stress in the roots of maize seedlings[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(1): 36—41. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李晓旭, 李家政. 优化葱酮比色法测定甜玉米中可溶性糖的含量[J]. 保鲜与加工, 2013, 13(4): 24—27.
Li Xiaoxu, Li Jiazhen. Determination of the content of soluble sugar in sweet corn with optimized anthrone colorimetric method[J]. Storage and Process, 2013, 13(4): 24—27. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘俊, 吉晓佳, 刘友良, 等. 检测植物组织中多胺含量的高效液相色谱法[J]. 植物生理学通讯, 2002, 28(6): 596—598.
Liu Jun, Ji Xiaojia, Liu Youliang, et al. High performance liquid chromatography method for measuring polyamine content in plant tissue[J]. Plant Physiology Communications, 2002, 28(6): 596—598. (in Chinese with English abstract)
- [29] 白宝璋, 金锦子, 白崧, 等. 玉米根系活力 TTC 测定法的改良[J]. 玉米科学, 1994, 11(4): 44—47.
Bai Baozhang, Jin Jinzi, Bai Song, et al. Improvement of TTC method determining root activity in corn[J]. Maize Science, 1994, 11(4): 44—47. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郭相平, 郭枫, 刘展鹏, 等. 水分胁迫及复水对玉米光合速率及可溶性糖的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(6): 68—70.
Guo Xiangping, Guo Feng, Liu Zhanpeng, et al. Effects of water stress and rewatering on photosynthetic rate and soluble sugar of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(6): 68—70. (in Chinese with English abstract)
- [31] 方志红, 董宽虎. NaCl 胁迫对碱蒿可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(16): 147—149.
Fang Zhihong, Dong Kuanhu. Effects of NaCl stress on soluble protein contents and soluble carbohydrate contents of *artemisia cnethifolia*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(16): 147—149. (in Chinese with English abstract)
- [32] 喻方圆, 徐锡增, Robert D Guy. 水分和热胁迫对苗木针叶可溶性糖含量的影响[J]. 南京林业大学学报, 2004, 28(5): 1—5.
Yu Fangyu, Xu Xizeng, Robert D Guy. Effects of water and heat stress on the needle sugar content of four coniferous tree seedlings[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2004, 28(5): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [33] 马秀芳, 沈秀瑛, 杨德光, 等. 不同耐旱性玉米品种对干旱的生理生化反应[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(3): 167—170.
Ma Xiufang, Shen Xiuying, Yang Deguang, et al. The physiological and biochemical reaction to drought of different drought-tolerant maize[J]. Journal of Shenyang

- Agricultural University, 2002, 33(3): 167—170. (in Chinese with English abstract)
- [34] 陆芳勤, 王欣, 沈潼, 等. 多胺代谢与环境胁迫[J]. 天津农业科学, 2014, 20(3): 15—17.
Lu Fangqin, Wang Xin, Shen Tong, et al. Relationship between polyamine metabolism and environmental stress[J]. Tianjin Agricultural Science, 2014, 20(3): 15—17. (in Chinese with English abstract)
- [35] 杜红阳, 常云霞, 刘怀攀. 多胺的作用机理研究进展[J]. 周口师范学院学报, 2010, 27(5): 88—91.
Du Hongyang, Chang Yunxia, Liu Huaipan. Study advance of function mechanism of polyamines[J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2010, 27(5): 88—91. (in Chinese with English abstract)
- [36] 杜红阳, 程明明, 杨青华, 等. 外源亚精胺对涝胁迫下玉米幼苗根系无氧呼吸代谢的调控效应[J]. 华北农学报, 2015, 30(4): 110—116.
Du Hongyang, Cheng Mingming, Yang Qinhua, et al. Regulating effects of exogenous spermidine on anaerobic respiratory metabolism in the roots of maize seedling under waterlogging Stress[J]. Acta Agriculture Boreali-sinica, 2015, 30(4): 110—116. (in Chinese with English abstract)

Foliar spraying polyamine improving waterlogging resistance of summer maize in early grain filling stage

Liu Bing^{1,2,3}, Zhou Xinguo^{1,3*}, Li Caixia^{1,3}, Zhen Bo^{1,3}, Li Huizhen^{1,3}, Li Zhongyang¹

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453000, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100000, China;

3. National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu, Shangqiu 476001, China)

Abstract: Exogenous polyamine is a type of bioregulators and often used for drought resistance. This study investigated the feasibility to use it for waterlogging resistance in summer maize. A test-pit experiment was carried out in Shang qiu, China (24°35'N, 115°34'E, elevation 50.2 m). The waterlogging treatments for 3, 5, 7 and 9 days were designed in early grain filling stage of summer maize. At 3 days before ending waterlogging, the exogenous polyamine solutions or equivalent distilled water were sprayed 2 times per day (at 8:00 a.m. and 18:00 p.m.) to the maize in each treatment, respectively. Meanwhile, the field without waterlogging was set up as the control (CK). Samples were taken at 3, 6, 9 and 12 days after spraying for determination of soluble sugar content of leaves, root activity, shoot dry biomass, and endogenous spermidine content of leaves. At harvest, grain weight, yield and its components were measured. The results showed that: 1) After waterlogging in the early grain filling stage of summer maize, the soluble sugar content of leaves decreased. Spraying exogenous polyamine greatly increased the soluble sugar content. At 3 days after waterlogging, compared with distilled water treatment, the exogenous polyamine treatments for 3, 5, 7 and 9 days waterlogging significantly increased the soluble sugar content by 12.13%, 8.36%, 20.01%, and 12.17%, respectively ($P<0.05$); 2) At 3 days after waterlogging, compared with the distilled water treatments, the root activity for exogenous polyamine treatments in 3, 5, 7 and 9 days waterlogging was significantly increased by 24.76%, 40.45% and 31.46%, respectively ($P<0.05$). Overall, the root activity presented a upward-to-downward trend after the waterlogging; 3) The shoot dry biomass, spike length, rows per spike, kernels per row and yield of all the treatments were reduced significantly ($P<0.05$) compared to the CK. The spike core weight of 5 and 7 days of water flooding treatments decreased significantly ($P<0.05$), while there weren't significantly different at 3 and 9 days of water flooding treatment. The hundred-grain weight of 3, 7, and 9 days of water flooding treatment increased significantly ($P<0.05$), while dropped significantly after 5 days of waterlogging treatment. For the 3 and 5 days of waterlogging treatments, compared with treatments with distilled water, spraying exogenous polyamine increased the spike length by 6.56% and 7.80%, respectively, increased the rows per spike by 8.24% and 7.41%, respectively, and the increased the yield by 7.92% and 5.85%, respectively ($P<0.05$). In general, spraying exogenous polyamine was effective for waterlogging resistance in the early grain filling stage of summer maize when waterlogging lasted for 5 days or less, but the effect was not obvious for 7-9 days of waterlogging. In the future, different spraying amount and concentrations should be explored in order to find an optimal spraying amount and concentration. This study could provide useful information for the recovery of summer maize after waterlogging.

Keywords: irrigation; sugar; crops; water flooding; summer corn; early grain filling stage; exogenous polyamine; foliar spraying