

# 喷施海藻酸钠寡糖对小麦幼苗生长发育和抗旱性的影响

张运红<sup>1,2</sup>,孙克刚<sup>1,2\*</sup>,和爱玲<sup>1,2</sup>,杜君<sup>1,2</sup>,吴政卿<sup>3</sup>

(1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所,河南 郑州 450002; 2. 河南省农业生态与环境重点实验室,河南 郑州 450002; 3. 河南省农业科学院 小麦研究所,河南 郑州 450002)

**摘要:**以河南省3个优质小麦品种(郑麦101、郑麦129和郑麦3596)为材料,在15%PEG6000水分胁迫条件下,研究喷施海藻酸钠寡糖对小麦幼苗生长发育和抗旱性的影响,为其作为新型植物抗旱剂在农业中的应用提供理论参考。结果表明,干旱胁迫后,3个小麦品种的生长发育均受到明显抑制,苗长、根长和生物量均显著下降,叶绿素含量也显著降低(郑麦101除外)。干旱胁迫后喷施海藻酸钠寡糖,可在一定程度上缓解干旱胁迫对小麦生长发育的抑制作用,苗长、根长和生物量均显著增加,丙二醛和脯氨酸含量显著下降,叶绿素含量(除郑麦101)和部分抗氧化酶活性有所提高。3个小麦品种相比,海藻酸钠寡糖对郑麦129和郑麦3596干旱胁迫的缓解效果好于郑麦101。

**关键词:**小麦;海藻酸钠寡糖;生长发育;抗旱性

**中图分类号:**S512;Q945.78   **文献标志码:**A   **文章编号:**1004-3268(2016)02-0056-06

## Effects of Spraying Alginate Oligosaccharides on Seedling Growth and Drought Resistance of Wheat(*Triticum aestivum* L.)

ZHANG Yunhong<sup>1,2</sup>, SUN Kegang<sup>1,2\*</sup>, HE Ailing<sup>1,2</sup>, DU Jun<sup>1,2</sup>, WU Zhengqing<sup>3</sup>

(1. Institute of Plant Nutrient, Resources and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Key Laboratory of Agricultural Eco-environment, Zhengzhou 450002, China; 3. Wheat Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In this research, three high-quality wheat varieties (Zhengmai 101, 129 and 3596) in Henan province were employed as the experimental materials to investigate the effects of spraying alginate oligosaccharides on the seedling growth and drought resistance of wheat, under water stress of 15% polyethylene glycol (PEG) 6000, in order to provide theoretical references for the application of new plant drought-resistant agents in agriculture. The results showed that the growth of three wheat varieties was obviously inhibited by drought stress, as evidenced in the significant decrease of seedling length, root length, biomass and chlorophyll contents (except Zhengmai 101). Spraying alginate oligosaccharides alleviated the growth inhibition of three wheat varieties caused by drought stress in varying degrees, which reflected in that the seedling length, root length and biomass significantly increased, the contents of malondialdehyde and proline significantly decreased, and chlorophyll contents (except Zhengmai 101) and part of antioxidant enzymes activities elevated. However, the alleviate effects of alginate oligosaccharides on the inhibition caused by drought stress in Zhengmai 129 and 3596 were better than that in Zhengmai 101.

收稿日期:2015-09-12

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2013BAD07B07);河南省农业科学院博士启动基金(2068751);河南省农业科学院自主创新项目(2069999)

作者简介:张运红(1983-),女,河南新乡人,助理研究员,博士,主要从事寡糖生物活性及新型植物生长调节剂研究。

E-mail:snowgirl23@126.com

\*通讯作者:孙克刚(1965-),男,河南信阳人,研究员,硕士,主要从事植物营养和精准农业养分管理方面的研究。

E-mail:kgsun@ipni.ac.cn

**Key words:** wheat (*Triticum aestivum* L.); alginate oligosaccharides; growth; drought resistance

小麦是我国最主要的粮食作物之一,种植面积大,且主要分布在干旱和半干旱地区。随着全球气候变暖,我国水资源日趋匮乏,冬春季节干旱灾害已成为制约小麦持续增产的关键生态因素,特别是小麦苗期干旱常导致冬前生长受抑、分蘖不足、难以壮苗越冬,并对中后期生长带来一系列不可逆的负效应,严重影响小麦产量,其造成的损失已超过其他因素所导致产量损失的总和<sup>[1-3]</sup>。河南省是国家重要的粮食生产基地,冬小麦在全国粮食生产中占据重要地位,全省种植面积约占全国的20%,总产量占全国的25%左右,商品粮占全国的30%左右<sup>[4]</sup>。干旱是制约河南省冬小麦生长最主要的农业气象灾害,其发生频率高,持续时间长,波及范围广,对国计民生有严重影响。近年来,大批高产优质小麦新品种的审定与推广对提高河南省小麦产量做出了巨大的贡献,然而目前育种亲本较单一,育成品种亲缘关系近、遗传基础狭窄,适合旱地种植的耐旱耐瘠品种相对缺乏<sup>[5-6]</sup>。因此,采用相应调控技术措施提高小麦抗旱性,对保障粮食安全和增加水资源利用率具有重要意义。最近研究显示,喷施一些外源物质可提高作物抗旱性,这为农业化学抗旱节水技术开辟了一条崭新的途径<sup>[7-9]</sup>。海藻酸钠寡糖(AOS)是海藻酸钠经N-乙酰-B-D-氨基葡萄糖苷酶酶解的产物,由β-D-甘露糖醛酸(M)与α-L-古罗糖醛酸(G)依靠1,4-糖苷键连接而成;其可增强植物抗逆性,促进矿质营养元素吸收,且为生物提取物,具有安全、环保等优势<sup>[10-12]</sup>;其作为新型植物抗旱剂,可减少化学农用制剂的使用,提高农产品安全,但是目前在生产中应用推广的较少。为此,以河南省农业科学院小麦研究所最新选育的郑麦101、郑麦129和郑麦3596为材料,研究了喷施海藻酸钠寡糖对河南优质小麦品种生长和耐旱能力的影响,为其作为新型植物抗旱剂在小麦种植中的应用推广提供理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试海藻酸钠寡糖由中国科学院大连化学物理研究所提供,其聚合度为2~10,糖醛酸组成为M:G=7:3,糖醛酸含量>90%。所试小麦品种为郑麦101、郑麦129和郑麦3596,均由河南省农业科学院小麦研究所吴政卿研究员提供。其中,郑麦101为弱春性多穗型早熟、高产、优质、多抗、广适品种,适

宜在中高水肥地块中晚茬种植;郑麦129属半冬性多穗型中熟品种,耐高温,适合在豫北高水肥地块中茬种植;郑麦3596属半冬性中晚熟强筋品种,抗寒性和抗倒伏能力强,适宜在中高肥力地块中茬种植。

### 1.2 试验设计

将不同品种小麦种子用蒸馏水浸种6 h后,转至铺有滤纸并加有10 mL蒸馏水的培养皿中培养3 d。选择长势一致的小麦幼苗,一部分进行正常培养,一部分置于含有15%PEG6000的培养液中进行干旱胁迫处理,干旱胁迫1 h后喷施1 000 mg/L海藻酸钠寡糖,于每天早晚各喷施1次,共4个处理,即正常培养条件下喷施清水的处理(对照,CK)、正常培养条件下喷施海藻酸钠寡糖的处理(AOS)、干旱胁迫条件下喷施清水的处理(干旱处理,PEG)、干旱胁迫条件下喷施海藻酸钠寡糖的处理(PEG+AOS),每个处理3次重复,每日视蒸发量补加相同的培养液。处理3 d后取样,观察小麦生长状况并分析相关指标。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长发育指标 苗长、根长:采用尺子测量。生物量:以万分之一电子天平测定鲜质量。相对含水量(RWC): $RWC = (W_f - W_d) / (W_t - W_d) \times 100\%$ ,式中W<sub>t</sub>为植物组织被水充分饱和后的质量,W<sub>f</sub>和W<sub>d</sub>分别为植株鲜质量和干质量,三者均采用万分之一电子天平测定。

1.3.2 光合色素含量 光合色素包括叶绿素(Chl)和胡萝卜素(Car),其含量采用95%乙醇浸提比色法测定。称取新鲜小麦叶片约0.1 g,加2 mL 95%乙醇研磨成浆,用95%乙醇定容至终体积10 mL,4 000 r/min下离心10 min,上清液分别于665 nm、649 nm、470 nm处测定吸光值。

1.3.3 抗氧化酶活性 酶液提取:称取新鲜小麦样品约0.5 g置于预冷的研钵中,加1 mL 0.05 mol/L pH值7.0的磷酸缓冲液,在冰浴中研磨成浆,用缓冲液定容至终体积5 mL。于12 000 r/min条件下冷冻离心20 min,上清液用于抗氧化酶活性测定。

超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法。在试管中依次加入0.05 mol/L磷酸缓冲液(pH值7.8)3.1 mL、1 mg/mL EDTA-2Na 0.2 mL、20 mg/mL L-甲硫氨酸0.2 mL、0.1 mg/mL 核黄素0.2 mL、1 mg/mL NBT 0.2 mL、提取酶液0.1 mL。于4 000 lx光照30 min,遮黑布终止反应,在560 nm处测其吸光值。以抑制NBT光还

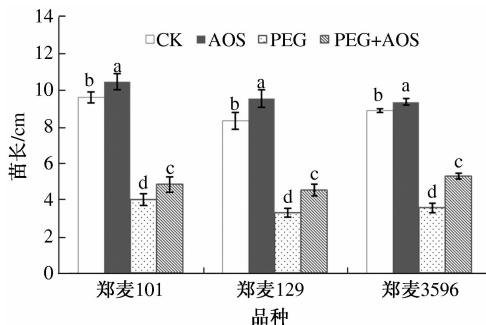
原反应 50% 所需酶量为 1 个 SOD 活力单位 (U) 计算, SOD 酶活性用 U/g 表示。

过氧化物酶 (POD) 活性的测定采用愈创木酚比色法。在试管中依次加入 4 mL 0.3% 愈创木酚、50  $\mu$ L 酶液、50  $\mu$ L 0.3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 摆匀, 在 470 nm 波长下比色, 每分钟记录一次吸光值, 连续记录 5 min。以每分钟吸光值变化 0.01 为 1 个酶活单位, POD 酶活性用 U/(mg · min) 表示。

过氧化氢酶 (CAT) 活性的测定采用高锰酸钾滴定法。取 2 mL 酶液于 50 mL 三角瓶中, 再加入 2.5 mL 0.1 mol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 于 30 °C 恒温水浴中保温 10 min 后, 立即加入 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2.5 mL 终止反应。用 0.1 mol/L KMnO<sub>4</sub> 标准溶液滴定反应剩余 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 至出现粉红色为止, 以灭活的酶液为对照。

**1.3.4 丙二醛含量** 丙二醛 (MDA) 含量的测定采用硫代巴比妥酸比色法。称 0.5 g 左右新鲜小麦叶片, 加入 10% 三氯乙酸 5 mL, 研磨成浆, 于 4 000 r/min 离心 10 min。取 2 mL 上清液, 加 2 mL 0.6% 硫代巴比妥酸混匀, 置沸水浴中加热 15 min。冷却后, 于 4 000 r/min 离心 10 min, 在 532 nm 和 450 nm 处测其吸光值。

**1.3.5 脯氨酸含量** 脯氨酸含量的测定采用茚三酮显色法。取剪碎小麦叶片 0.5 g 左右, 置于试管中, 加入 5 mL 3% 磷基水杨酸溶液, 于沸水浴中浸提 10 min。冷却至室温后, 吸取上清液 2 mL, 加



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

图 1 干旱胁迫下喷施海藻酸寡糖对不同小麦品种苗长和根长的影响

**2.1.2 生物量** 由图 2 可知, 正常培养条件下, 喷施海藻酸寡糖可显著提高小麦生物量, 3 个小麦品种郑麦 101、郑麦 129 和郑麦 3596 的增幅分别为 15.5%、20.2% 和 5.7%; 干旱胁迫后, 3 个小麦品种的生物量分别较对照显著下降 64.1%、60.1% 和 62.3%; 干旱胁迫后喷施海藻酸寡糖, 3 个小麦品种的生物量分别较干旱处理显著增加 25.3%、33.2% 和 34.2%。该结果说明, 干旱胁迫影响小麦正常生长, 喷施海藻酸寡糖可在一定程度上缓解干旱胁迫的抑制作用, 对郑麦 129 和郑麦 3596 的缓解效果好于郑麦 101。

2 mL 冰乙酸和 3 mL 2.5% 酸性茚三酮显色液, 于沸水浴中加热 40 min, 然后采用甲苯萃取, 520 nm 下测其吸光值。

#### 1.4 数据统计与分析

数据用 Excel 2007 作图, DPS 3.01 专业版软件进行统计分析, 采用 LSD 法进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫下喷施海藻酸寡糖对不同小麦品种幼苗生长发育的影响

**2.1.1 苗长和根长** 由图 1 可知, 在正常培养条件下, 喷施海藻酸寡糖可显著促进小麦生长, 3 个小麦品种的苗长和根长均较对照显著增加。干旱胁迫后, 小麦生长状况受到严重抑制, 3 个小麦品种郑麦 101、郑麦 129 和郑麦 3596 的苗长分别较对照显著降低 58.2%、60.5% 和 60.0%, 根长分别较对照显著降低 48.6%、48.3% 和 49.2%; 干旱胁迫后喷施海藻酸寡糖, 3 个小麦品种的苗长和根长均较干旱处理显著增加, 苗长分别较干旱处理增加 21.0%、37.8% 和 49.1%, 根长分别增加 23.7%、29.8% 和 22.1%。该结果说明, 干旱胁迫影响小麦正常生长, 对 3 个小麦品种的抑制作用相当; 喷施海藻酸寡糖可在一定程度上缓解干旱胁迫的抑制作用, 但对不同小麦品种的缓解效果存在差异。

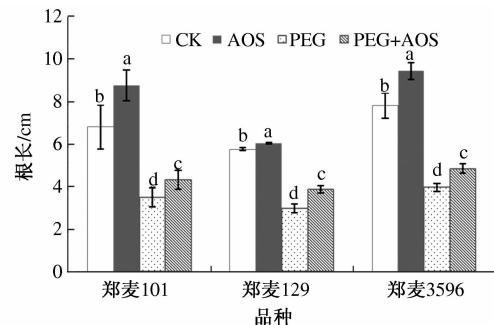


图 2 干旱胁迫下喷施海藻酸寡糖对不同小麦品种生物量的影响

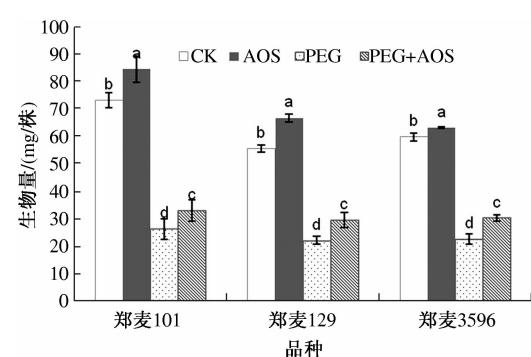


图 2 干旱胁迫下喷施海藻酸寡糖对不同小麦品种生物量的影响

**2.1.3 光合色素含量** 由表1可知,在正常培养条件下,喷施海藻酸钠寡糖可显著提高郑麦129的Chla、Chlb、Car和总Chl含量,增幅分别为15.4%、10.4%、22.0%和13.4%;另外2个小麦品种的Chla、Chlb、Car和总Chl含量在喷施海藻酸钠寡糖前后无显著差异。干旱胁迫后,总体上郑麦129和郑麦3596的光合色素含量较对照均有不同程度下降。干旱胁迫后喷施海藻酸钠寡糖,郑麦129和郑麦3596的叶

绿素含量均有不同程度的增加,其中郑麦129的Chla和总Chl含量达到显著水平,增幅分别为5.1%和7.0%。郑麦101在4个处理间均无显著差异,即正常培养和干旱胁迫下,喷施海藻酸钠寡糖对郑麦101叶片光合色素含量影响均不大。综上,干旱胁迫抑制郑麦129和郑麦3596光合色素合成,喷施海藻酸钠寡糖可在一定程度上缓解干旱胁迫的抑制作用,对郑麦129的缓解效果好于郑麦3596。

表1 干旱胁迫下喷施海藻酸钠寡糖对不同小麦品种光合色素含量的影响

处理	郑麦101				郑麦129				郑麦3596			
	Chla	Chlb	总Chl	Car	Chla	Chlb	总Chl	Car	Chla	Chlb	总Chl	Car
CK	1.031a	0.370a	1.401a	0.202a	1.096b	0.423b	1.519b	0.209b	1.058a	0.381ab	1.439ab	0.201a
AOS	0.955a	0.398a	1.353a	0.191a	1.265a	0.467a	1.732a	0.255a	1.092a	0.411a	1.503a	0.194a
PEG	1.016a	0.402a	1.418a	0.224a	0.977d	0.385b	1.362c	0.223ab	0.889b	0.306c	1.195c	0.196a
PEG+AOS	0.999a	0.382a	1.381a	0.220a	1.027c	0.407b	1.434b	0.222ab	0.920ab	0.321bc	1.241bc	0.196a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

## 2.2 干旱胁迫下喷施海藻酸钠寡糖对不同小麦品种叶片相对含水量的影响

叶片相对含水量是反映植株水分状况的敏感性指标。植物受到干旱胁迫后,叶片相对含水量的多少常用来表示叶片持水能力的强弱<sup>[13]</sup>。由图3可知,在正常培养条件下,喷施海藻酸钠寡糖对小麦叶片相对含水量的影响不显著。干旱胁迫后,3个小麦品种郑麦101、郑麦129和郑麦3596的叶片相对含水量均较对照显著下降,降幅分别为9.3%、13.0%和11.0%。干旱胁迫后喷施海藻酸钠寡糖,郑麦3596的叶片相对含水量较干旱处理显著增加,增幅为2.5%;其他2个小麦品种叶片相对含水量也较干旱处理增加,但是差异不显著。综上,干旱胁迫降低小麦叶片相对含水量,喷施海藻酸钠寡糖可在一定程度上缓解干旱胁迫的抑制作用,对郑麦3596的缓解效果最好。

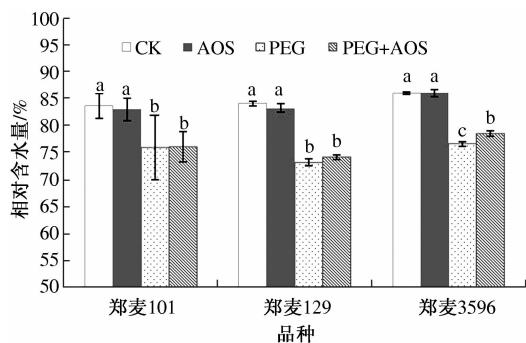


图3 干旱胁迫下喷施海藻酸钠寡糖对不同小麦品种叶片相对含水量的影响

## 2.3 干旱胁迫下喷施海藻酸钠寡糖对不同小麦品种叶片脯氨酸含量的影响

在逆境条件下,植物体积累脯氨酸具有一定普遍

性,其含量多少反映植物的受害程度<sup>[14]</sup>。由图4可知,在正常培养条件下,喷施海藻酸钠寡糖对小麦叶片脯氨酸含量的影响不显著;干旱胁迫后,3个小麦品种郑麦101、郑麦129、郑麦3596脯氨酸含量均较对照显著增加,分别升高为对照的13.6、7.5、4.7倍;干旱胁迫后喷施海藻酸钠寡糖,3个小麦品种脯氨酸含量分别较干旱胁迫处理显著下降24.4%、46.6%和41.7%。该结果说明,喷施海藻酸钠寡糖可一定程度缓解干旱胁迫对小麦生长造成的伤害。

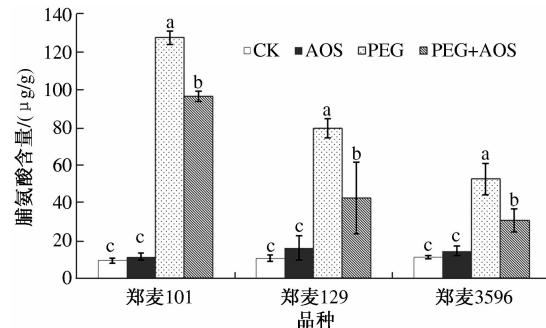


图4 干旱胁迫下喷施海藻酸钠寡糖对不同小麦品种叶片脯氨酸含量的影响

## 2.4 干旱胁迫下喷施海藻酸钠寡糖对不同小麦品种抗氧化伤害能力的影响

**2.4.1 抗氧化酶活性** 由表2可知,在正常培养条件下,喷施海藻酸钠寡糖可不同程度地提高3个小麦品种的SOD活性,其中郑麦129和郑麦3596达到显著水平;POD活性除郑麦101显著下降外,其余2个品种变化不显著;对于CAT活性,3个品种均无显著变化。干旱胁迫后,除郑麦3596 CAT活性显著下降外,3个品种3种酶活性均与对照无显著差异;干旱胁迫后喷施海藻酸钠寡糖,3个小麦品种郑

麦 101、郑麦 129 和郑麦 3596 的 SOD 活性均较干旱处理显著增加, 增幅分别为 17.9%、34.9% 和 46.4%; 郑麦 3596 的 CAT 活性也显著增加, 增幅为 11.5%; 郑麦 129 和郑麦 3596 的 POD 活性也有不

同程度提高。该结果说明, 干旱胁迫下, 喷施海藻酸钠寡糖可在一定程度上提高抗氧化酶活性, 从而有利于活性氧的清除, 缓解干旱胁迫对小麦生长造成的伤害。

表 2 干旱胁迫下喷施海藻酸钠寡糖对不同小麦品种抗氧化酶活性的影响

处理	郑麦 101			郑麦 129			郑麦 3596		
	SOD/ [U/(mg · min)]	POD/ [U/(mg · min)]	CAT/ [mg/(g · min)]	SOD/ [U/(mg · min)]	POD/ [U/(mg · min)]	CAT/ [mg/(g · min)]	SOD/ [U/(mg · min)]	POD/ [U/(mg · min)]	CAT/ [mg/(g · min)]
CK	226.63b	4.852a	5.25a	170.49b	3.479b	5.60a	181.17b	4.372ab	6.28a
AOS	244.31ab	3.747b	4.70a	244.96a	3.480b	5.63a	243.45a	3.890b	6.12ab
PEG	224.59b	4.738a	4.81a	188.98b	4.138ab	5.55a	168.23b	4.371ab	5.90b
PEG + AOS	264.76a	4.687a	4.76a	254.88a	4.783a	5.36a	246.27a	4.807a	6.58a

2.4.2 丙二醛含量 由图 5 可知, 在正常培养条件下, 喷施海藻酸钠寡糖可显著降低郑麦 101、郑麦 129 的丙二醛含量, 郑麦 3596 在喷施海藻酸钠寡糖前后差异不显著; 干旱胁迫后, 3 个小麦品种郑麦 101、郑麦 129 和郑麦 3596 的丙二醛含量均有增加, 增幅分别为 30.8%、55.4% 和 44.6%; 干旱胁迫后喷施海藻酸钠寡糖, 3 个小麦品种的丙二醛含量分别较干旱处理显著下降 27.4%、24.2% 和 28.3%。该结果说明, 喷施海藻酸钠寡糖可在一定程度上缓解干旱胁迫对小麦生长造成的伤害。

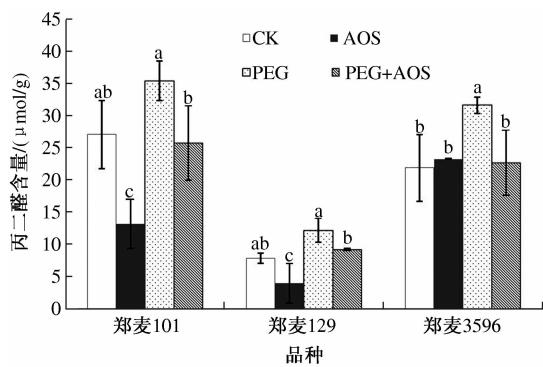


图 5 干旱胁迫下喷施海藻酸钠寡糖对不同小麦品种叶片丙二醛含量的影响

### 3 结论与讨论

当前我国小麦生产过程中干旱胁迫频繁发生, 新型植物抗旱剂的开发和应用是农业防灾减灾技术的一个重要创新, 对保障粮食安全和增加水资源利用率具有重要意义。本研究采用 PEG 模拟干旱胁迫, 研究了喷施植物源物质海藻酸钠寡糖对河南不同优质小麦新品种(郑麦 101、郑麦 129 和郑麦 3596)抗旱性的影响, 为其作为新型抗旱剂的开发提供了理论参考。结果表明, 干旱胁迫严重影响 3 个小麦品种的正常生长, 喷施海藻酸钠寡糖可在

一定程度上提高小麦抗旱性, 但是对不同小麦品种的缓解效果不同, 从相对含水量和光合色素含量来看, 对郑麦 129 和郑麦 3596 的缓解效果好于郑麦 101。然而, 相同培养条件下, 郑麦 101 的长势优于其他 2 个品种, 这表现在干旱胁迫下维持较高的光合色素含量, 叶片相对含水量下降最小, 这可能是其保持较多生物量的生理基础。

小麦品种的抗旱性与其细胞膜的稳定性有着密不可分的关系。在水分胁迫条件下, 植物的代谢失衡, 细胞内产生过剩的活性氧自由基, 造成细胞膜损伤, 使膜透性增加。丙二醛是膜脂过氧化作用的主要产物之一, 其含量高低和质膜透性的大小都是反映膜脂过氧化强弱和质膜破坏程度的重要指标<sup>[15]</sup>。本研究中, 干旱胁迫后, 小麦叶片丙二醛含量均有一定程度的增加, 喷施海藻酸钠寡糖可显著降低 3 个小麦品种的丙二醛含量, 说明海藻酸钠寡糖可在一定程度上提高小麦的抗旱性。植物体内存在的酶促与非酶促 2 类活性氧清除系统对清除植物体内活性氧、减轻活性氧对细胞的伤害起到了重要的作用。有研究表明, 小麦的抗旱性与干旱胁迫下体内 SOD 和 POD 活性呈显著正相关<sup>[15]</sup>。本研究中, 干旱胁迫后, 喷施海藻酸钠寡糖可显著提高 3 个小麦品种 SOD 活性和郑麦 3596 的 CAT 活性, 郑麦 129 和郑麦 3596 的 POD 活性也有一定程度增加。说明海藻酸钠寡糖可通过提高小麦体内抗氧化酶活性, 清除植物体内活性氧, 从而减轻干旱胁迫对植物生长的伤害。有研究显示, 当植物受到胁迫时, 植物体内游离脯氨酸积累量增加<sup>[16]</sup>。宗会等<sup>[14]</sup>研究发现, 逆境下稻苗的脯氨酸含量与丙二醛含量和质膜透性呈极显著正相关。Liu 等<sup>[17]</sup>研究发现, 在盐胁迫下盐敏感的拟南芥突变体(比对照敏感 20 多倍)比耐盐较强的野生型积累更多的脯氨酸。这些结果说明, 植物遭受逆境伤害越严重, 游离脯氨酸含量越高; 相

反植物遭受伤害较轻,脯氨酸积累相对较少。本研究中,干旱胁迫后,3个小麦品种的脯氨酸含量均显著增加,喷施海藻酸钠寡糖后,脯氨酸含量均显著下降,其中郑麦129和郑麦3596的下降幅度大于郑麦101,说明海藻酸钠寡糖对前二者干旱胁迫的缓解效果好于后者。但也有研究发现,脯氨酸含量与抗旱指数呈极显著正相关,故认为脯氨酸的积累可作为小麦抗旱性的指标<sup>[15]</sup>,这可能与不同小麦品种抗旱能力不同,以及试验胁迫时间的长短有关。

#### 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] 曹翠玲,李生秀.水分胁迫下氮素对分蘖期小麦某些生理特性的影响[J].核农学报,2004,18(5):402-405.
- [3] 张正斌,崔玉亭,陈兆波,等.华北平原水资源平衡和节水农业发展的若干问题探讨[J].中国农业科技导报,2003,5(4):42-47.
- [4] 李治国,郭志富,张延伟,等.近36年河南农作物干旱灾情时空规律研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(4):119-124.
- [5] 周新保,宋新莉,程静.河南小麦品种发展变化及利用情况分析[J].农业科技通讯,2013(11):4-7.
- [6] 张福平.从主要农作物育种现状看河南小麦、玉米等作物育种发展方向[J].种子世界,2013(1):9-11.
- [7] 金一锋,陈阳,董亚楠,等.外源水杨酸对草地早熟禾种子萌发及幼苗抗旱性的影响[J].种子,2015,34(4):25-28.
- [8] 李丽杰,顾万荣,张倩,等.外源亚精胺对干旱胁迫下玉米幼苗叶片生理及根系特征参数的影响[J].农药学报,2015,17(3):291-299.
- [9] 刘晓霞,邹成林,李训碧,等.壳寡糖对干旱胁迫下甘蔗叶片生理指标的影响[J].南方农业学报,2014,45(10):1759-1763.
- [10] Zhang Y H, Liu H, Yin H, et al. Nitric oxide mediates alginic oligosaccharides-induced root development in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 7: 49-56.
- [11] 卜宁,王升厚,马莲菊.褐藻寡糖抗三氧化二砷( $As_2O_3$ )诱导蚕豆根尖的细胞遗传毒性[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2008,26(1):102-105.
- [12] 张运红,吴礼树,刘一贤,等.几种寡糖类物质对菜薹矿质养分吸收的影响[J].中国蔬菜,2009(20):17-22.
- [13] 马富举,李丹丹,蔡剑,等.干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):724-730.
- [14] 宗会,刘娥娥,郭振飞,等.干旱、盐胁迫下 $LaCl_3$ 和CPZ对稻苗脯氨酸积累的影响[J].作物学报,2001,27(2):173-177.
- [15] 宋新颖,张玉梅,张洪生,等.干旱胁迫对不同冬小麦品种幼苗期生理特性的影响[J].中国农学通报,2015,31(12):6-11.
- [16] 张春平,何平,袁凤刚,等.外源5-氨基乙酰丙酸对干旱胁迫下甘草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].西北植物学报,2011,31(8):1603-1610.
- [17] Liu J P, Zhu J K. Proline accumulation and salt-stress-induced gene expression in salt-hypersensitive mutant of *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 1997, 114 (2): 591-596.