

不同土壤水分条件下吲哚丁酸钾对大豆根系形态建成及生理代谢的影响

刘美玲^{1,2}, 冯乃杰^{1,3,2*}, 郑殿峰^{1,3,2*}, 冯胜杰², 王诗雅², 项洪涛⁴

(1. 广东海洋大学滨海农业学院, 广东 湛江, 524088;

2. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆, 163319;

3. 广东海洋大学深圳研究院, 广东 深圳, 518108;

4. 黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所, 黑龙江 哈尔滨, 150086)

摘要: 为了研究吲哚丁酸钾(IBA-K)在减轻干旱对大豆根系的伤害中的作用,以垦丰 16(干旱敏感型)和合丰 50(耐旱型)为材料,采用盆栽法研究 IBA-K 拌种对两个品种大豆在正常供水、干旱和复水条件下根系形态建成及生理代谢的影响。结果表明,与正常供水相比,干旱胁迫抑制了大豆根系的生长发育,而 IBA-K 处理后,大豆根系干物质积累量、形态建成、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量在不同土壤水分条件下均高于其干旱对照,膜受损程度减轻。IBA-K 处理下,大豆根系 SOD 活性、POD 活性、可溶性糖和脯氨酸含量在干旱条件下均显著高于其干旱对照;MDA 含量、相对电导率显著低于其干旱对照。IBA-K 处理下的两个品种大豆根表面积、根平均直径、根体积、POD 活性和 CAT 活性在复水条件下分别高于其干旱对照,均未达到显著性差异。复水后,IBA-K 处理下的垦丰 16 根干重和总根长分别较其干旱对照显著增加了 3.13% 和 24.51%,合丰 50 根干重和总根长较其干旱对照未达到显著性差异。IBA-K 处理下的合丰 50 相对电导率和 MDA 含量分别较其干旱对照显著降低 11.80% 和 15.09%,SOD 活性和可溶性糖含量分别较其干旱对照显著增加 14.90% 和 3.94%,垦丰 16 相对电导率、MDA 含量、SOD 活性和可溶性糖含量较其干旱对照未达到显著性差异。IBA-K 处理下的两个品种大豆根系脯氨酸含量分别较其干旱对照显著增加了 10.62% 和 10.70%。IBA-K 处理和不同土壤水分处理对两个品种大豆根系形态和生理指标存在显著或极显著影响,二者间的交互作用无明显调控作用。综上,IBA-K 通过提高根系干物质积累量、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,降低 MDA 含量和相对电导率,减轻干旱胁迫对苗期大豆根系的伤害。

关键词: 大豆;根系;干旱;吲哚丁酸钾

中图分类号:S565.1 文献标识码:A 文章编号:1007-9084(2022)03-0621-11

Effects of potassium indole butyrate on root morphogenesis and physiological metabolism of soybean under different soil water conditions

LIU Mei-ling^{1,2}, FENG Nai-jie^{1,3,2*}, ZHENG Dian-feng^{1,3,2*}, FENG Sheng-jie², WANG Shi-ya², XIANG Hong-tao⁴
(1. College of Coastal Agricultural Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agriculture University, Daqing 163319, China; 3. Shenzhen Research Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518108, China; 4. Institute of Crop Cultivation and Tillage, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: In this paper, Kenfeng 16 (drought-sensitive) and Hefeng 50 (drought-tolerant) were used as test materials, the potted method was used to study the effects of indole butyrate potassium (IBA-K) seed dressing on root morphogenesis and physiological metabolism of the two varieties of soybean under normal water supply, drought and rewatering conditions. The result showed that compared with normal water supply, drought stress inhibited the growth and development of soybean roots. Dry matter accumulation, morphogenesis, antioxidant enzyme activity and

收稿日期:2021-02-26

基金项目:国家自然科学基金(31571613);黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD 2017003);国家重点研发计划(2017YFD0201306-03)

作者简介:刘美玲(1996-),女,硕士研究生,主要从事豆类作物化学控制原理与技术的研究,E-mail: lml19960416@126.com

* 通讯作者:冯乃杰(1970-),女,教授,博士,研究方向为作物化学控制原理与技术,E-mail: byndfj@126.com;

郑殿峰(1969-),男,教授,博士,研究方向为作物化学控制原理与技术,E-mail: zdfnj@163.com

osmotic adjustment substance content of two varieties under IBA-K treatment were higher than their drought control under different soil moisture conditions, reducing the degree of membrane damage. SOD activity, POD activity, soluble sugar and proline content of the two varieties under IBA-K treatment were significantly higher than the drought control under drought conditions, MDA content and relative conductivity were significantly lower than the drought control. Root surface area, average root diameter, root volume, POD activity and CAT activity of the two varieties under IBA-K treatment were higher than their drought control under rewatering conditions, and no significant difference was reached. After rewatering, the dry weight and total root length of Kenfeng 16 roots under IBA-K treatment were significantly increased by 3.13% and 24.51% compared with the drought control, respectively. Dry weight and total root length of Hefeng 50 did not reach significant differences compared with its drought control. The MDA content and relative conductivity of Hefeng 50 under the IBA-K treatment were significantly lower than the drought control by 11.80% and 15.09%, and the SOD activity and soluble sugar content were significantly increased by 14.90% and 3.94% compared with the drought control. The relative conductivity, MDA content, SOD activity and soluble sugar content of Kenfeng 16 did not reach significant differences compared with its drought control. The proline content in the roots of two soybean varieties under IBA-K treatment was significantly increased by 10.62% and 10.70% respectively compared with the drought control. IBA-K treatments and different soil moisture treatments had significant or extremely significant effects on the morphology and physiological indexes of the roots of both varieties, and the interaction between the two had no significant regulatory effect. In summary, IBA-K can reduce the MDA content and relative conductivity by increasing root dry matter accumulation, antioxidant enzyme activity and osmotic adjustment substance content, reducing drought stress on soybean roots at the seedling stage.

Key words: soybean; root system; drought stress; potassium indole butyrate

大豆(*Glycine max*)是一种重要的粮油作物,富含蛋白质和不饱和脂肪酸,不含胆固醇^[1]。干旱是东北大豆主产区的典型灾害之一^[2,3]。大豆是对干旱最敏感的作物,严重时产量会减少大约40%^[4]。根作为植物的主要组成部分,会吸收植物所需水分并吸收溶解的矿物质,有助于增加产量和提高对不利环境条件的抗逆性^[5]。大豆苗期侧根数量快速增加,对土壤湿度特别敏感^[6]。干旱条件下的作物需要保持较高的水分状态,以维持其生理功能^[7],还可以通过发育更长的主根以获得土壤更深层次的水分和养分来适应干旱^[8]。研究表明,营养生长早期阶段生长出较大根系,有利于维持大豆在干旱胁迫的生长^[9]。Liang^[5]等认为干旱胁迫会影响根的形态、体积和重量,提高抗逆性最有效的方法之一是通过提高根系的吸收和固定功能来促进大豆的生理功能和活性。根系是最先感受到干旱胁迫的器官,干旱胁迫的早期阶段会增加植物根的生长^[10,11]。

为了应对干旱胁迫,包括大豆在内的植物会激活多种防御机制,以增强对水分限制条件的耐受性^[12]。干旱会提高氧化应激,产生过量的活性氧,这些活性氧具有高毒性,会导致碳水化合物、蛋白质、脂质和DNA的损伤,通过氧化损伤导致正常的植物代谢恶化,并最终导致细胞死亡^[13-15]。清除过量的

活性氧需通过一个有效的抗氧化系统来实现,该系统内主要的抗氧化酶包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)^[4]。

近年来,多种植物生长调节剂已广泛应用于农业作物^[16]。前人研究发现S3307^[17]和三唑酮^[18]均可缓解干旱胁迫对大豆根系生长发育造成的影响。吲哚丁酸钾(IBA-K)是一种促进型植物生长调节剂^[19]。以往对IBA-K的研究多用于观赏性植物^[20,21],而在粮食作物上的应用相对较少。王红^[22]等研究表明IBA-K可增加玉米根长和根量,从而提高了玉米整体生长发育质量。IBA-K对大豆生长的影响鲜有报道。本试验研究干旱胁迫下IBA-K对苗期大豆叶片光合特性及生理代谢的影响,旨在探明IBA-K缓解干旱对大豆生长发育影响的机理,从而为大豆防灾减灾和抗逆栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种为垦丰16(干旱敏感品种)和合丰50(抗旱品种)^[23]。

供试植物生长调节剂为IBA-K,由黑龙江八一农垦大学植物生长调节剂工程技术研究中心提供,处理浓度为80 mg/kg,由前期浓度筛选试验确定。

1.2 试验设计

试验于2018–2019年在黑龙江省大庆市国家杂粮技术研究中心防雨棚内采用盆栽法进行,选取籽粒饱满,均匀一致的大豆种子用5%次氯酸钠消毒3 min后利用蒸馏水冲洗多次,直至洗净,留作播种。栽培基质为土壤和蛭石3:1混合而成。使用IBA-K拌种,处理浓度为80 mg/kg,播种于装有等量栽培基质的双色盆(上口径×下口径×高=15 cm×11.5 cm×14.7 cm)中。每盆播种8粒,播深3 cm,出苗后,每盆定苗4株。

本试验采用完全随机设计,大豆第一节期(V1)进行自然干旱,不同土壤水分处理通过称重法进行人工补水,通过调节土壤相对含水量设置不同土壤水分程度^[24,25]:正常供水(即土壤含水量占田间持水量的75%)、干旱(即土壤含水量占田间持水量的30%)和复水(干旱处理24 h后进行复水,使土壤含水量恢复到占田间持水量的75%,维持24 h后进行取样)3个水平。

两个品种各设6个处理,分别为(1)无IBA-K拌种+正常供水,文中用CK表示;(2)无IBA-K拌种+干旱,文中用DCK表示;(3)IBA-K拌种+正常供水,文中用I表示;(4)IBA-K拌种+干旱,文中用DI表示;(5)无IBA-K拌种+干旱处理+复水,文中用RDCK表示;(6)IBA-K拌种+干旱+复水,文中用RDI表示。每个处理测定3次重复。

1.3 取样、测定项目与方法

取样方法:将各处理大豆根系用水洗净剪下后,用液氮速冻后立即放入-80℃冰箱保存用于测定生理指标。

各处理选取5株完整根系,洗净后放入装有去离子水的玻璃槽内,调整根系位置,使用扫描仪(EPSON1680)获取根系图像,并使用配套的根系分析软件进行分析,获得总根长,根表面积、根平均直径和根体积等形态指标。将冲洗干净的根系放入烘箱,105℃杀青半小时,80℃烘干至恒重称量其干重。氧化物歧化酶(SOD)活性采用NBT光还原法^[26]测定;过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性采用Jumrani等^[27]方法测定;按照李合生^[26]的方法测定可溶性糖含量,脯氨酸含量采用水和茚三酮法^[26]测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[26]测定;相对电导率采用Kim等^[28]方法测定,使用PP-20-P11电导率仪进行测定。

1.4 数据处理

利用Excel 2019对数据进行整理与作图,利用

SPSS 20进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分处理下IBA-K对大豆根系干物质积累量及形态建成的影响

与正常供水相比,干旱胁迫抑制了两个大豆品种根系生长速度,两个大豆各根系形态指标在不同土壤水分条件处理下呈上升趋势(表1)。两个品种大豆DI处理下的根干重、总根长、根表面积、根平均直径和根体积在干旱条件下分别较DCK处理高3.85%和6.90%、2.68%和7.33%、4.52%和4.52%、4.65%和10.42%、3.60%和2.54%,但未达到显著性差异,IBA-K处理在干旱条件下对合丰50根系指标的上调效果优于垦丰16。两个品种根系形态指标在复水条件下均有所恢复,两个品种RDI处理下的根表面积、根平均直径和根体积在复水后分别较RDCK处理增幅为5.47%和9.82%、14.89%和13.79%、9.45%和6.52%,均未达到显著性差异;垦丰16 RDI处理下的根干重和总根长分别较RDCK处理显著增加了3.13%和24.51%,合丰50 RDI处理下的根干重和总根长分别较RDCK处理增幅为6.06%和9.86%,未达到显著性差异。IBA-K处理过的垦丰16总根长、根平均直径和根体积在复水后的恢复能力较强。

2.2 不同土壤水分处理与IBA-K处理对不同品种大豆根系干重及各形态指标的影响(F值)

如表2所示,不同土壤水分处理对垦丰16除根平均直径外的根长、表面积和根体积及干重存在极显著影响,对合丰50干重及各根系形态指标均存在极显著影响。而IBA-K处理对垦丰16根系干重、总根长及根表面积存在显著影响,对合丰50根表面积存在显著影响。不同土壤水分处理与IBA-K处理间的交互作用对两个品种大豆根系干重及各形态指标均无显著或极显著调控作用。

2.3 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆根系膜脂过氧化程度的影响

2.3.1 对丙二醛含量的影响 与正常供水对照相比,干旱胁迫增加了MDA含量,在不同土壤水分条件下的整体变化趋势表现为先升后降(图1)。两个品种大豆MDA含量在不同土壤水分条件处理下变化均表现为I<CK<RDI<RDCK<DI<DCK;两个品种大豆DI处理下的MDA含量在干旱条件下达到最大,分别较DCK处理降幅为10.24%和10.24%,达到显著性差异。两个品种大豆根系MDA含量在

表1 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆根系干重及形态建成的影响

Table 1 Effects of potassium indole butyrate on dry weight and morphogenesis of soybean roots under different soil water conditions

品种	处理	干重	总根长	根表面积	根平均直径	根体积
Variety	Treatment	Dry weight/g	Total rootlength/cm	Root surface area/cm ²	Root average diameter/mm	Root volume/cm ³
垦丰 16 Kenfeng 16	CK	0.11±0.00d	647.41±24.48c	75.24±3.24c	0.35±0.02a	0.89±0.05d
	I	0.12±0.00d	770.37±35.86c	92.69±4.32b	0.37±0.00a	0.97±0.02cd
	DCK	0.26±0.01c	1163.30±37.02ab	125.32±9.10a	0.43±0.08a	1.11±0.05bc
	DI	0.27±0.00c	1194.50±21.81ab	130.99±2.53a	0.45±0.09a	1.15±0.04bc
	RDCK	0.32±0.01b	1115.61±123.10b	132.78±6.65a	0.47±0.07a	1.27±0.10ab
	RDI	0.33±0.00a	1389.01±115.86a	140.04±2.26a	0.54±0.10a	1.39±0.09a
合丰 50 Hefeng 50	CK	0.13±0.01c	869.79±85.03d	79.53±1.83c	0.38±0.02c	0.98±0.02d
	I	0.13±0.00c	928.63±17.95cd	100.33±7.18c	0.41±0.03bc	1.16±0.01cd
	DCK	0.29±0.02b	1148.65±47.95bc	127.77±8.80b	0.48±0.08abc	1.18±0.05bcd
	DI	0.31±0.02ab	1232.84±52.64ab	133.55±3.02ab	0.53±0.07abc	1.21±0.03bc
	RDCK	0.33±0.01ab	1325.63±152.45ab	138.92±12.12ab	0.58±0.08ab	1.38±0.12ab
	RDI	0.35±0.03a	1456.31±56.60a	152.56±3.31a	0.66±0.02a	1.47±0.07a

注: 同列不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$); CK: 无 IBA-K 拌种+正常供水, DCK: 无 IBA-K 拌种+干旱, I: IBA-K 拌种+正常供水, DI: IBA-K 拌种+干旱, RDCK: 无 IBA-K 拌种+干旱处理+复水, RDI: IBA-K 拌种+干旱+复水
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$) between different treatments; CK: No IBA-K seed dressing + normal water supply, DCK: No IBA-K seed dressing + drought, I: IBA-K seed dressing + normal water supply, DI: IBA-K seed dressing + drought, RDCK: No IBA-K seed dressing + drought treatment + rewatering, RDI: IBA-K seed dressing + drought + rewatering

表2 不同土壤水分处理与IBA-K处理对不同品种大豆根系干重及各形态指标的影响(F值)

Table 2 Effects of soil water treatment and IBA-K treatment on root dry weight and morphological indexes of different soybean varieties

品种	处理	根干重	总根长	根表面积	根平均直径	根体积
Variety	Treatment	Root dry weight	Total root length	Root surface area	Root average diameter	Root volume
垦丰 16 Kenfeng 16	不同土壤水分处理 Different soil water treatment (A)	757.13**	32.29**	56.88**	2.21	19.48**
	IBA-K 处理 Treatment (B)	4.96*	5.66*	5.50*	0.42	2.60
	A×B	0.69	1.39	0.73	0.05	0.17
合丰 50 Hefeng 50	不同土壤水分处理 Different soil water treatment (A)	90.40**	18.80**	33.42**	7.00**	15.69**
	IBA-K 处理 Treatment (B)	0.78	1.92	5.40*	1.28	3.52
	A×B	0.18	0.10	0.57	0.06	0.62

注: *表示在 0.05 水平上显著, **表示在 0.01 水平上显著, 下表同
Note: * means significance at 0.05 level, ** mean significance at 0.01 level; Same as below

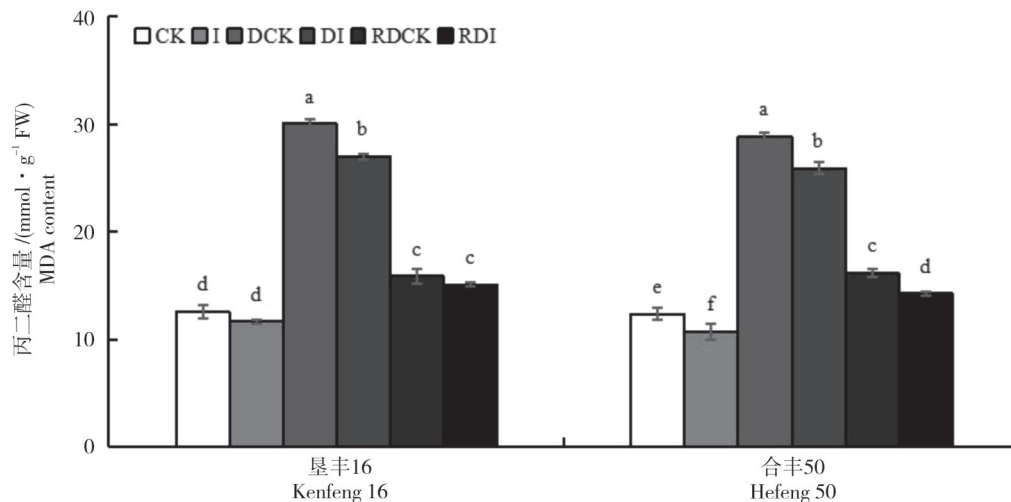
复水条件下均有不同程度的下降, 垦丰 16 RDI 处理下的 MDA 含量在复水后较 RDCK 处理降幅为 4.97%, 未达到显著性差异, 合丰 50 MDA 含量在复水后较 RDCK 处理显著降低 11.80%。

2.3.2 对相对电导率的影响 干旱胁迫导致大豆根系细胞膜渗透增加, 相对电导率变大(图 2)。两个品种大豆根系相对电导率变化在干旱条件下(DCK)达到最大。两个品种大豆 I 处理下的相对电导率在正常供水条件下低于 CK 处理。两个品种大豆 DI 处理下的相对电导率在干旱条件下分别较 DCK 处理显著降低 6.85% 和 8.45%。复水后, 垦丰

16 RDI 处理的相对电导率较 RDCK 处理降低 7.02%, 未达到显著性差异, 合丰 50 RDI 相对电导率较 RDCK 处理显著降低 15.09%, 合丰 50 根系相对电导率更接近于 CK 处理。

2.4 不同土壤水分条件下 IBA-K 对大豆根系抗氧化酶活性的影响

2.4.1 对 SOD 活性的影响 干旱胁迫通过增强两品种大豆根系 SOD 活性来抵御活性氧造成的细胞损伤(图 3)。合丰 50 SOD 活性普遍高于垦丰 16。两个品种大豆 SOD 干旱条件下达到最大, DI 处理 SOD 活性分别较 DCK 处理显著增加 9.45% 和



注:同一品种标以不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著,下同

Note: Different lowercase letters in the same variety indicate significant difference at 0.05 level among treatments. Same as below

图1 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆MDA含量的影响

Fig. 1 Effects of potassium indole butyrate on MDA content of soybean under different soil moisture conditions

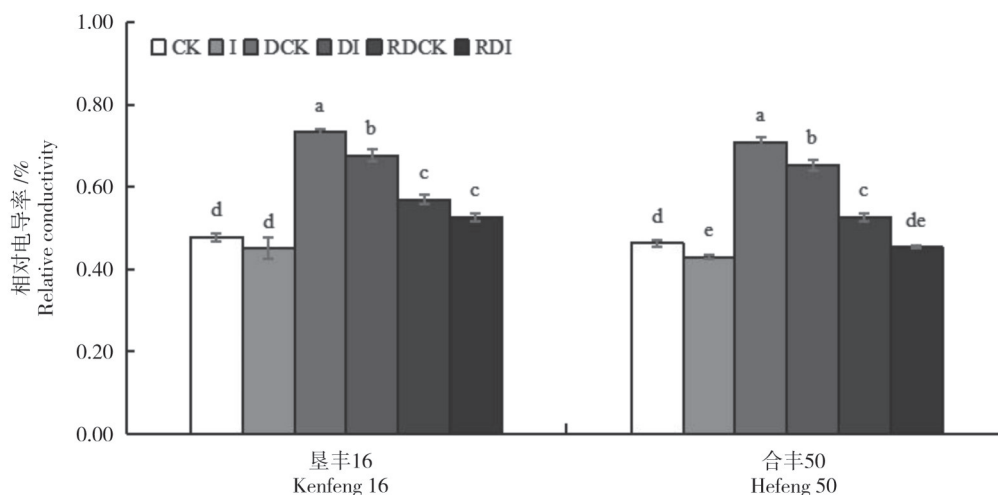


图2 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆根系相对电导率的影响

Fig. 2 Effects of potassium indole butyrate on relative electrical conductivity of soybean roots under different soil moisture conditions

21.18%, IBA-K对合丰50 SOD活性在干旱胁迫下的上调效果更好。复水后,垦丰16 SOD活性有所恢复, RDI处理的SOD活性与RDCK处理极为相近;合丰50 RDI处理的SOD活性较RDCK处理显著增加了14.90%。

2.4.2 对POD活性的影响 与正常供水相比,干旱胁迫显著提高大豆根系POD活性(图4)。两个品种大豆POD活性在不同土壤水分条件下的变化均表现为DI>DCK>RDI>RDCK>I>CK,干旱条件下达到最大。两个品种大豆DI处理的POD活性在干旱条件下分别较DCK处理显著增加了5.54%和16.00%。复水后,两个品种大豆POD活性均有所下降,合丰50 POD活性略高于垦丰16。RDI处理的POD活性分别较RDCK处理增幅为4.96%和

3.09%,未达到显著性差异。

2.4.3 对CAT活性的影响 干旱胁迫下导致两个品种大豆根系CAT活性增加(图5)。两个品种大豆DI处理的CAT活性在干旱条件下高于DCK处理,均未达到显著性差异。复水后,两个品种大豆CAT活性均恢复至正常水平左右, RDI处理的CAT活性分别较RDCK处理增幅为27.27%和21.43%,未达到显著性差异。

2.5 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆根系渗透调节物质含量的影响

2.5.1 对可溶性糖含量的影响 由图6可知,干旱胁迫导致大豆根系可溶性糖含量增加,在不同土壤水分条件下呈先升后降的变化趋势,干旱条件下达到峰值。两个品种大豆DI处理的可溶性糖含量分

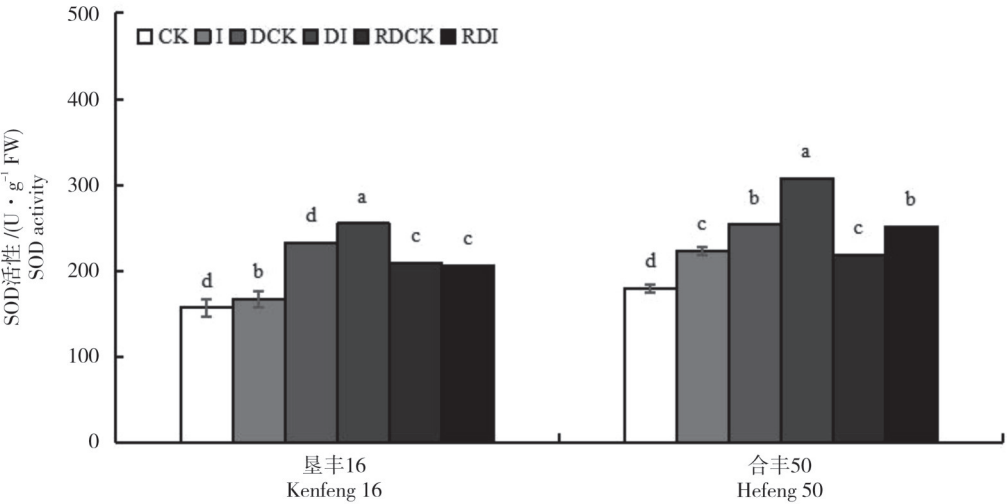


图3 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆SOD活性的影响

Fig. 3 Effect of potassium indole butyrate on SOD activity of soybean under different soil water conditions

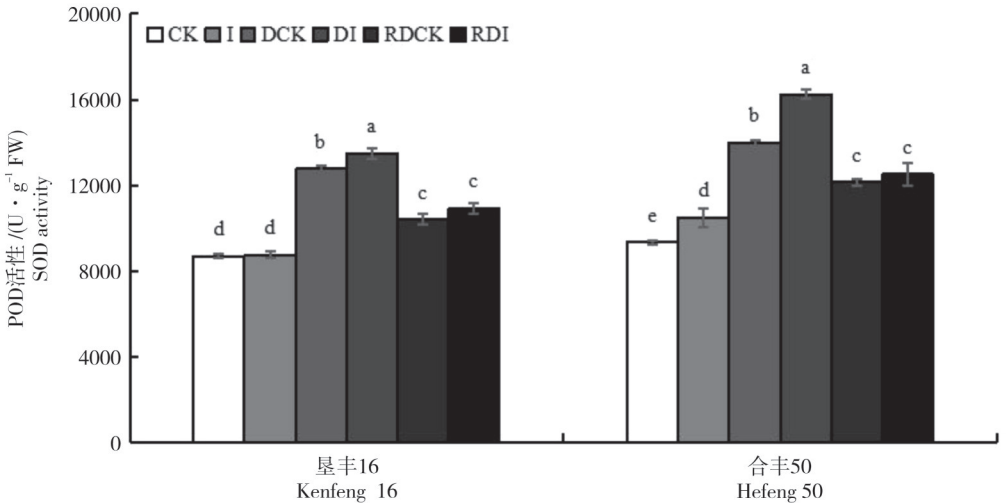


图4 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆POD活性的影响

Fig. 4 Effect of potassium indole butyrate on POD activity of soybean under different soil water conditions

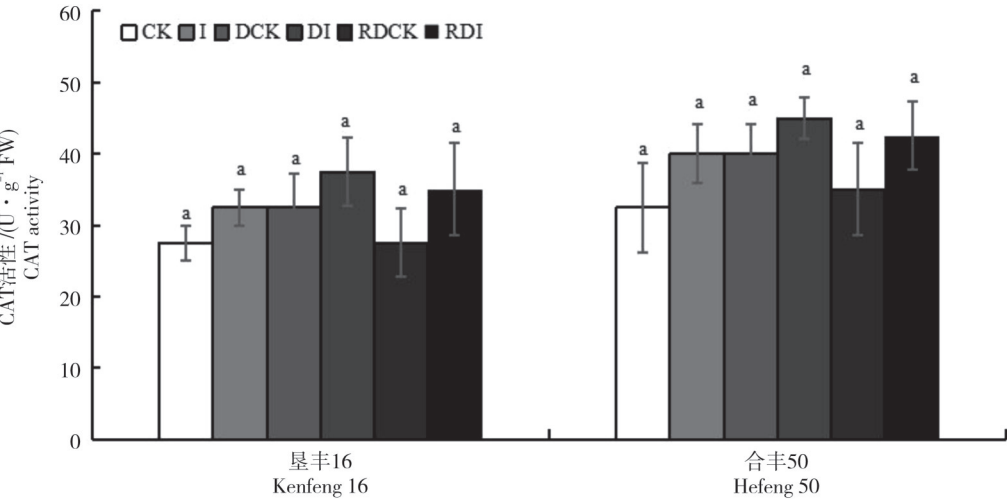


图5 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆CAT活性的影响

Fig. 5 Effects of potassium indole butyrate on CAT activity of soybean under different soil moisture conditions

别较DCK处理显著增加了7.13%和11.47%。合丰50可溶性糖含量普遍高于垦丰16。复水后,垦丰16 RDI处理的可溶性糖含量与RDCK处理极为接近,合丰50 RDI处理的可溶性糖含量较RDCK处理显著提高3.94%。

2.5.2 对脯氨酸含量的影响 与正常供水相比,干旱胁迫导致大豆根系脯氨酸含量升高(图7)。合丰50脯氨酸含量普遍高于垦丰16。两个品种大豆DI处理的脯氨酸含量分别较DCK处理显著增加32.15%和42.92%,IBA-K处理对合丰50脯氨酸含量在干旱条件下的上调效果优于垦丰16。复水后,两个品种大豆脯氨酸含量有所降低,RDI处理的脯氨酸含量分别较RDCK处理高10.62%和10.70%,达到显著性差异。

2.6 不同土壤水分处理与IBA-K处理对不同品种

大豆根系各生理指标的影响(F值)

如表3所示,不同土壤水分处理对两个品种大豆根系膜损伤程度、渗透调节物质含量、SOD活性和POD活性均存在极显著影响。IBA-K处理对两个品种大豆根系膜损伤程度及渗透调节物质含量存在极显著影响,对垦丰16 SOD活性和POD活性存在显著影响,对合丰50 SOD活性和POD活性存在极显著影响。不同土壤水分处理与IBA-K处理间的交互作用对两个品种大豆根系可溶性糖和脯氨酸含量存在极显著调控作用,对垦丰16根系MDA含量存在显著调控作用,对合丰50根系POD活性存在显著调控作用。

3 讨论

根系大小和分布的多少与植株的用水量有

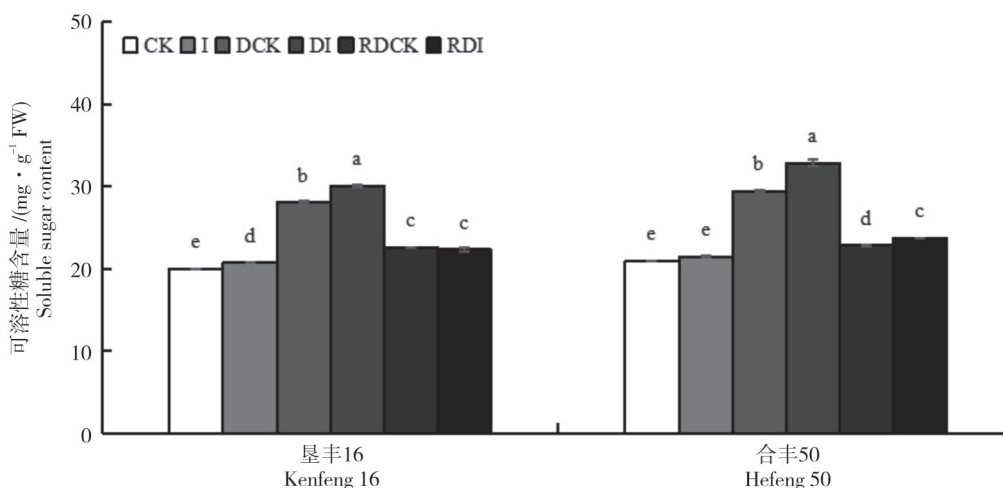


图6 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆可溶性糖含量的影响

Fig. 6 Effect of potassium indole butyrate on soluble sugar content of soybean under different soil moisture conditions

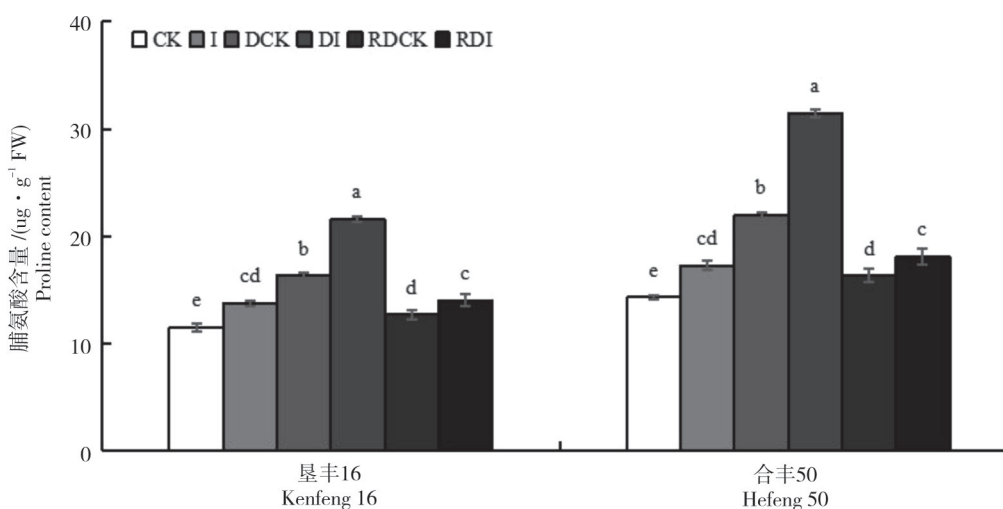


图7 不同土壤水分条件下IBA-K对大豆脯氨酸含量的影响

Fig. 7 Effect of potassium indole butyrate on proline content in soybean under different soil water conditions

表3 不同土壤水分处理与 IBA-K 处理对不同品种大豆根系各生理指标的影响(F 值)

Table 3 Effects of different soil water treatments and IBA-K treatments on root physiological indexes of different soybean varieties

品种 Variety	处理 Treatment	MDA 含量 MDA content	相对电导率 Relative conductivity	可溶性糖含量 Soluble sugar content	脯氨酸含量 Proline content
垦丰 16 Kenfeng 16	不同土壤水分处理 Different soil water treatment (A)	761.46**	144.92**	1844.69**	158.90**
	IBA-K 处理 Treatment (B)	19.36**	12.89**	45.06**	87.36**
	A×B	4.18*	0.55	27.93**	13.74**
合丰 50 Hefeng 50	不同土壤水分处理 Different soil water treatment (A)	572.35**	422.28**	1534.65**	309.79**
	IBA-K 处理 Treatment (B)	29.13**	60.03**	105.63**	146.77**
	A×B	1.02	2.73	33.81**	37.52**
品种 Variety	处理 Treatment	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity	
垦丰 16 Kenfeng 16	不同土壤水分处理 Different soil water treatment (A)	126.43**	253.95**	0.66	
	IBA-K 处理 Treatment (B)	5.04*	7.36*	2.49	
	A×B	3.15	1.38	0.05	
合丰 50 Hefeng 50	不同土壤水分处理 Different soil water treatment (A)	76.64**	152.93**	0.81	
	IBA-K 处理 Treatment (B)	68.36**	26.58**	2.74	
	A×B	1.37	4.97*	0.04	

关^[29]。根部分枝有利于从根部占据的土壤中更完全地吸收水分和养分^[30]。Manavalan^[8]等人提出植物在其早期营养生长过程中发育出较大根系,则在干旱条件下可保持良好状态。大豆抗旱性与各种根系性状如干重、总长度、侧根体积和数量之间存在显著的相关性^[8]。本试验结果表明,合丰 50 的各项根系形态指标均高于垦丰 16。干旱胁迫抑制大豆根系的生长速度,在不同土壤水分条件处理下,两个品种大豆根系干重、总根长、根表面积、根平均直径和根体积呈缓慢上升趋势,干旱胁迫对大豆根系造成的影响较大。IBA-K 处理对垦丰 16 各根系形态指标的调控效果优于合丰 50,IBA-K 处理与不同土壤水分处理间的交互作用对两个品种大豆根系形态指标的调控作用不显著。在不同土壤水分条件处理下,IBA-K 对两个品种大豆根系各形态指标均有不同程度的提高,复水后的恢复能力也略高于其干旱对照,说明 IBA-K 有效提高干旱胁迫下两个品种大豆根系干物质积累量,增强大豆根系对干旱的适应能力。这与 Zhang^[31]等人研究施用褪黑素提高干旱胁迫下根系干物质积累量的结论一致。

干旱胁迫通过产生过量的活性氧(ROS),如超氧自由基或过氧化氢直接或间接对细胞造成损害^[32]。植物细胞通过激活抗氧化酶系统减轻活性氧的伤害^[33]。超氧化物歧化酶是抗氧化系统的一种重要酶,可将超氧化物转化为 H₂O₂ 和氧,被认为是抵御 ROS 的第一道防线^[13]。本研究表明,干旱胁迫导致两个品种大豆根系膜脂过氧化程度加重,膜渗漏

增多,抗氧化酶活性升高,在不同土壤水分条件处理下呈先升后降的变化趋势。IBA-K 处理和不同土壤水分处理对两个品种大豆根系 SOD 和 POD 活性存在显著或极显著影响,对膜损伤程度存在极显著影响,二因素间的互作效应间接表明通过影响抗氧化酶活性来抵御膜脂过氧化程度的加剧。Gill^[15]等人认为耐受品种中的抗氧化酶活性高于敏感品种。不同土壤水分条件处理下的合丰 50 根系膜脂过氧化程度轻于垦丰 16,抗氧化酶活性普遍高于垦丰 16。ROS 通过膜脂过氧化作用导致严重的细胞损伤^[34]。IBA-K 处理在干旱胁迫下显著降低了两个品种大豆根系 MDA 含量和相对电导率,说明 IBA-K 有效减轻干旱胁迫下大豆根系膜脂过氧化程度。Abogadallah^[14]和 Zhang^[35]等人认为耐旱型品种具有较高的抗氧化能力,高抗氧化酶活性对氧化应激具有更高的耐受性。IBA-K 处理下的两个品种大豆根系抗氧化酶活性在不同土壤水分条件下均高于其干旱对照,其中两个品种大豆根系 SOD 活性和 POD 活性在干旱胁迫下显著高于其干旱对照。说明 IBA-K 通过提高抗氧化酶活性,增强清除 ROS 的能力,降低细胞膜脂过氧化程度来应对干旱胁迫,增强大豆的耐旱性。这与前人研究烯效唑通过提高大豆抗氧化酶活性,降低 MDA 含量和相对电导率,进而提高大豆耐旱性的效果一致^[35]。

植物适应干旱胁迫的机制是细胞渗透调节。在这种机制下,有机化合物的合成和积累会降低渗透势,从而导致细胞中的水势降低,且不会限制酶

的功能并维持细胞的膨胀^[36]。脯氨酸积累可能有助于膜和蛋白质的稳定、自由基清除、细胞信号传导、氧化还原平衡和基因表达的激活^[33,37]。在应激反应中积累的糖可以作为渗透压调节剂来维持细胞膨胀,并具有保护细胞膜和蛋白质免受应激损伤的能力^[38,39]。本试验研究表明,合丰50根系渗透调节物质含量在不同土壤水分条件下普遍高于垦丰16。IBA-K处理和不同土壤水分处理及其二因素间的互作效应对两个品种大豆根系渗透调节物质含量存在极显著调控作用。两个品种大豆根系细胞在干旱胁迫下失水加重,渗透势降低,渗透调节物质含量增加。Nguyen^[40]等人提出干旱胁迫下大豆中的渗透调节物质含量提高有利于提高大豆的抗性。IBA-K处理在干旱胁迫下显著增加了两个品种大豆根系可溶性糖含量和脯氨酸含量,其中合丰50根系脯氨酸含量急剧升高,这可能与IBA-K对不同品种大豆的调控效应不同有关。说明IBA-K通过提高渗透调节物质含量来缓解干旱胁迫下的渗透压,增强细胞保水能力,进而提高大豆耐旱性。Dong^[25]和 Mattioli^[41]等人认为经历干旱胁迫后复水的大豆渗透调节物质含量均有所下降,但复水后脯氨酸含量较高对植物细胞是有益的。IBA-K处理下的合丰50根系渗透调节物质含量在复水后较其干旱对照增幅略高于垦丰16,与干旱胁迫下IBA-K处理之间的降幅大于垦丰16,说明合丰50经历干旱后的恢复能力强于垦丰16,IBA-K对合丰50渗透调节作用的调控效果优于垦丰16。本研究及相关报道均表明IBA-K是一类对植物根系生长有促进作用的植物生长调节剂,且稳定性好,使用安全,可将其用于提高作物生根率,增强作物在逆境下的生长发育,为作物增产稳产提供保障。

4 结论

IBA-K处理和不同土壤水分处理对两个品种大豆根系形态指标及生理指标存在显著或极显著影响,其中IBA-K处理对合丰50 SOD活性和POD活性的调控效果优于垦丰16;二者间的交互作用对两个品种大豆根系形态及生理指标均无明显调控作用。干旱胁迫致使苗期大豆根系生长缓慢,抗氧化酶系统受到攻击,膜脂过氧化程度加重,细胞膜严重受损。与正常供水相比,IBA-K通过提高根系抗氧化酶活性,渗透调节物质含量,降低MDA含量和相对电导率来减轻干旱对细胞造成的损伤,进而减轻干旱对大豆根系生长发育的影响,提高大豆耐

旱性。

参考文献:

- [1] Wang W, Wang C, Pan D, et al. Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence images of soybean (*Glycine max*) seedlings[J]. Int J Agric Biol Eng, 2018, 11 (2): 196-201. DOI: 10.25165/ijabe.20181102.3390.
- [2] Yang X J, Liu Y, Bai W, et al. Spatiotemporal assessment of drought related to soybean production and sensitivity analysis in Northeast China[J]. J Appl Meteorol Climatol, 2017, 56 (4): 937-952. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0195.1.
- [3] Yu X Y, He X Y, Zheng H F, et al. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over northeast China[J]. Nat Hazards, 2014, 71 (1): 275-289. DOI:10.1007/s11069-013-0909-2.
- [4] Thao N P, Tran L S P. Potentials toward genetic engineering of drought-tolerant soybean[J]. Crit Rev Biotechnol, 2012, 32 (4): 349-362. DOI: 10.3109/07388551.2011.643463.
- [5] Liang H, Yu Y, Yang H, et al. Inheritance and QTL mapping of related root traits in soybean at the seedling stage[J]. Theor Appl Genet, 2014, 127 (10): 2127-2137. DOI:10.1007/s00122-014-2366-z.
- [6] 阙宝忠. 浅议大豆苗期田间管理[J]. 农业与技术, 2019, 39 (21): 123-124. DOI: 10.19754/j. nyyjs. 20191115053.
- [7] Luo L J. Breeding for water-saving and drought-resistance rice (WDR) in China[J]. J Exp Bot, 2010, 61 (13): 3509-3517. DOI:10.1093/jxb/erq185.
- [8] Manavalan L P, Guttikonda S K, Tran L S, et al. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean[J]. Plant Cell Physiol, 2009, 50 (7): 1260-1276. DOI:10.1093/pcp/pcp082.
- [9] Song L, Prince S, Valliyodan B, et al. Genome-wide transcriptome analysis of soybean primary root under varying water-deficit conditions[J]. BMC Genomics, 2016, 17: 57. DOI:10.1186/s12864-016-2378-y.
- [10] Bellaloui N. Soybean seed phenol, lignin, and isoflavones and sugars composition altered by foliar boron application in soybean under water stress[J]. Food Nutr Sci, 2012, 3 (4): 579-590. DOI: 10.4236/fns.2012.34080.
- [11] 李琬. 干旱对大豆根系生育的影响及灌溉缓解效应研究进展[J]. 草业学报, 2019, 28(4): 192-202. DOI: 10.11686/cyxb2018222.
- [12] Le D T, Nishiyama R, Watanabe Y, et al. Differential gene expression in soybean leaf tissues at late developmental stages under drought stress revealed by genome-

- wide transcriptome analysis [J]. PLoS One, 2012, 7 (11): e49522. DOI:10.1371/journal.pone.0049522.
- [13] Abogadallah G M. Antioxidative defense under salt stress [J]. Plant Signal Behav, 2010, 5(4): 369–374. DOI: 10.4161/psb.5.4.10873.
- [14] Abogadallah G M. Insights into the significance of antioxidative defense under salt stress [J]. Plant Signal Behav, 2010, 5(4): 369–374. DOI:10.4161/psb.5.4.10873.
- [15] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. Plant Physiol Biochem, 2010, 48(12): 909–930. DOI:10.1016/j.plaphy.2010.08.016.
- [16] Zhang M C, Zhai Z X, Tian X L, et al. Brassinolide alleviated the adverse effect of water deficits on photosynthesis and the antioxidant of soybean (*Glycine max* L.) [J]. Plant Growth Regul, 2008, 56(3): 257–264. DOI: 10.1007/s10725-008-9305-4.
- [17] 刘春娟, 宋双伟, 冯乃杰, 等. 干旱胁迫及复水条件下烯效唑对大豆幼苗形态和生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 222–227, 256. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2016.06.34.
- [18] 刘凤刚, 巨鹏飞, 王福政, 等. 三唑酮对大豆花期干旱胁迫下根系 AsA-GSH 循环的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(05): 740–746. DOI: 10.11861/j.issn.1000-9841.2019.05.0740.
- [19] 齐德强, 冯乃杰, 郑殿峰, 等. 不同壮秧剂对水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 核农学报, 2019, 033(008): 1611–1621. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.08.1611.
- [20] Knight P R, Coker C H, Anderson J M, et al. Mist Interval and K-IBA concentration influence rooting of orange and Mountain Azalea [J]. Native Plants J, 2005, 6(2): 111–117. DOI: 10.2979/NPJ.2005.6.2.111.
- [21] Griffin J J, Lasseigne F T. Effects of K-IBA on the Rooting of stem cuttings of 15 taxa of snowbells (*Styrax* spp.) [J]. J Environ Hortic, 2005, 23(4): 171–174. DOI: 10.24266/0738-2898-23.4.171.
- [22] 王红, 宋涛, 刘辉, 等. 不同浓度生根剂对玉米根系生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2016(2): 57–60. DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2016.02.0057.
- [23] 王利彬, 刘丽君, 裴宇峰, 等. 大豆种质资源芽期抗旱性鉴定[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(1): 36–43. DOI:10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2012.01.007.
- [24] Ohashi Y, Nakayama N, Saneoka H, et al. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants [J]. Biol Plant, 2006, 50(1): 138–141. DOI: 10.1007/s10535-005-0089-3.
- [25] Dong S, Jiang Y, Dong Y, et al. A study on soybean responses to drought stress and rehydration [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(8): 2006–2017. DOI: 10.1016/j.sjbs.2019.08.005.
- [26] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 高等教育出版社, 2000.
- [27] Jumrani K, Bhatia V S. Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean [J]. Physiol Mol Biol Plants, 2019, 25(3): 667–681. DOI: 10.1007/s12298-019-00657-5.
- [28] Kim H J, Cho H S, Pak J H, et al. Confirmation of drought tolerance of ectopically expressed *AtABF3* gene in soybean [J]. Mol cells, 2018, 41(5): 413. DOI: 10.14348/molcells.2018.2254.
- [29] He J, Du Y L, Wang T, et al. Conserved water use improves the yield performance of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought [J]. Agric Water Manag, 2017, 179: 236–245. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.07.008.
- [30] Smith D M, Inman-Bamber N G, Thorburn P J. Growth and function of the sugarcane root system [J]. Field Crops Res, 2005, 92(2–3): 169–183. DOI: 10.1016/j.fcr.2005.01.017.
- [31] Zhang M, He S, Zhan Y, et al. Exogenous melatonin reduces the inhibitory effect of osmotic stress on photosynthesis in soybean [J]. PLoS One, 2019, 14(12): e0226542. DOI:10.1371/journal.pone.0226542.
- [32] Roldán A, Díaz-Vivancos P, Hernández J A, et al. Superoxide dismutase and total peroxidase activities in relation to drought recovery performance of mycorrhizal shrub seedlings grown in an amended semiarid soil [J]. J Plant Physiol, 2008, 165(7): 715–722. DOI:10.1016/j.jplph.2007.02.007.
- [33] Freitas P A F, Miranda R, Marques E C, et al. Salt tolerance induced by exogenous proline in maize is related to low oxidative damage and favorable ionic homeostasis [J]. J Plant Growth Regul, 2018, 37(3): 911–924. DOI:10.1007/s00344-018-9787-x.
- [34] Golladack D, Li C, Mohan H, et al. Tolerance to drought and salt stress in plants: Unraveling the signaling networks [J]. Front Plant Sci, 2014, 5: 151. DOI:10.3389/fpls.2014.00151.
- [35] Zhang M, Duan L, Tian X, et al. Uniconazole-induced tolerance of soybean to water deficit stress in relation to changes in photosynthesis, hormones and antioxidant system [J]. J Plant Physiol, 2007, 164(6): 709–717. DOI: 10.1016/j.jplph.2006.04.008.
- [36] Nohong B, Nampo S. Effect of water stress on growth, yield, proline and soluble sugars contents of Signal grass and Napier grass species [J]. American-Eurasian J Sustain Agr, 2015: 14–22. ISSN: 1995-0748, EISSN: 1998-1074.
- [37] Szabados L, Savouré A. Proline: a multifunctional amino acid [J]. Trends Plant Sci, 2010, 15(2): 89–97.

- DOI:10.1016/j.tplants.2009.11.009.
- [38] Kheirizadeh Arough Y, Seyed Sharifi R, Sedghi M, et al. Effect of zinc and bio fertilizers on antioxidant enzymes activity, chlorophyll content, soluble sugars and proline in *Triticale* under salinity condition[J]. Not Bot Horti Agrobi, 2016, 44(1): 116–124. DOI: 10.15835/nbha44110224.
- [39] Krasensky J, Jonak C. Drought, salt, and temperature stress-induced metabolic rearrangements and regulatory networks [J]. J Exp Bot, 2012, 63(4): 1593–1608. DOI:10.1093/jxb/err460.
- [40] Nguyen T T Q, Pham H B V, Le T V, et al. Evaluation of proline, soluble sugar and ABA content in soybean *Glycine max* (L.) under drought stress memory [J]. AIMS Bioeng, 2020, 7(3): 114–123. DOI: 10.3934/bioeng.2020011.
- [41] Mattioli R, Costantino P, Trovato M. Proline accumulation in plants: not only stress [J]. Plant signal behav, 2009, 4(11): 1016–1018. DOI: 10.4161/psb.4.11.9797.

(责任编辑:胡志勇)