



不同浓度吲哚丁酸钾对大豆苗期生长发育及生理代谢的影响

刘美玲¹, 冯乃杰^{1,2,3}, 郑殿峰^{1,2,3}, 梁喜龙¹, 王诗雅¹, 左官强¹, 靳 丹¹, 牟保民¹

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 广东海洋大学 滨海农业学院, 广东 湛江 524088; 3. 广东海洋大学 深圳研究院, 深圳 518108)

摘 要:为探究吲哚丁酸钾(IBA-K)对苗期大豆生长发育的影响,以大豆品种垦丰 16 和合丰 50 为试验材料,研究吲哚丁酸钾包衣剂量分别为 0(CK), 20, 40, 80, 160 和 320 mg·kg⁻¹时,对苗期大豆叶片生长发育及生理代谢的调控效应。结果表明:与对照相比,不同剂量 IBA-K 包衣处理时苗期大豆地上部形态建成、光合作用、保护酶活性及渗透调节物质含量均有不同程度的提高,除株高外,均在 IBA-K 浓度为 80 mg·kg⁻¹时达到最大值,且显著高于对照。垦丰 16 株高在 IBA-K 浓度为 20 和 160 mg·kg⁻¹时达到最大,较对照均增加了 10.78%; SOD 活性在 IBA-K 浓度为 80 mg·kg⁻¹时较其对照增加了 4.81%。合丰 50 的株高和 SOD 活性在 80 mg·kg⁻¹时达到最大,较对照显著增加了 27.78% 和 8.83%。IBA-K 处理下的垦丰 16 和合丰 50 VPD 分别较对照显著降低了 17.24% 和 23.74%、MDA 含量分别较对照显著降低了 38.11% 和 46.44%。综上分析表明,采用 80 mg·kg⁻¹ IBA-K 进行种子包衣处理时,对促进大豆苗期生长,提高大豆苗期的光合能力,增强大豆叶片抗氧化酶活性,降低 MDA 含量,提高渗透调节物质含量的效果最佳。

关键词:大豆; 叶片; 吲哚丁酸钾; 生长发育; 生理代谢

Effects of Different Concentrations of Potassium Indole Butyrate on Soybean Growth Development and Physiological Metabolism at Seedlings Stage

LIU Mei-ling¹, FENG Nai-jie^{1,2,3}, ZHENG Dian-feng^{1,2,3}, LIANG Xi-long¹, WANG Shi-ya¹, ZUO Guan-qiang¹, JIN Dan¹, MU Bao-min¹

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agriculture University, Daqing 163319, China; 2. College of Coastal Agricultural Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. Shenzhen Research Institute, Guangdong Ocean University, Shenzhen 518108, China)

Abstract: In order to explore the effect of potassium indole butyrate (IBA-K) on the growth development and physiological metabolism at soybean seedling stage, this study took soybean varieties Kenfeng 16 and Hefeng 50 as the experimental materials, and studied the regulatory effects of IBK-K under 0 (CK), 20, 40, 80, 160 and 320 mg·kg⁻¹, respectively. The results showed that, compared with the control, different doses of IBA-K coating treatment improved the morphogenesis, photosynthesis, protective enzyme activity and osmotic adjustment substance content of soybean at the seedling stage to varying degrees. Except for the plant height, all reached the maximum when the IBA-K concentration was 80 mg·kg⁻¹, and was significantly higher than the control. The plant height of Kenfeng 16 reached the maximum when the IBA-K concentration was 20 and 160 mg·kg⁻¹, which both increased by 10.78% compared with the control. The SOD activity of Kenfeng 16 increased by 4.81% when the IBA-K concentration was 80 mg·kg⁻¹ compared with the control. The plant height and SOD activity of Hefeng 50 reached the maximum at 80 mg·kg⁻¹, which was a significant increase of 27.78% and 8.83% than its control. Compared with the control, the VPD of Kenfeng 16 and Hefeng 50 under the IBA-K treatment were significantly reduced by 17.24% and 23.74%, and the MDA content was significantly reduced by 38.11% and 46.44%, respectively. The above analysis showed that when the concentration of IBA-K was 80 mg·kg⁻¹ for seed coating treatment, it could effectively promote the growth of soybean seedlings, increase the photosynthetic capacity of soybeans, enhance the antioxidant enzyme activity of soybean leaves, reduce the MDA content, and increase the content of osmotic adjustment substances.

Keywords: Soybean; Leaf; Potassium indole butyrate; Growth and development; Physiological metabolism

收稿日期: 2020-10-25

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(ZD2017003); 国家重点研发计划(2017YFD0201306-03)。

第一作者: 刘美玲(1996—), 女, 在读硕士, 主要从事豆类作物化控原理与技术研究。E-mail: lml19960416@126.com。

通讯作者: 冯乃杰(1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事作物化控原理与技术研究。E-mail: byndfnj@126.com;

郑殿峰(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事作物化控原理与技术研究。E-mail: zdfnj@163.com。

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, 被视为世界范围内重要的工业原料和经济作物^[1]。黑龙江省是中国的大豆主要产地之一^[2-3], 由于气候变化导致降水分布不均, 大豆时常遭受干旱或涝害影响^[4]。研究表明, 大豆苗期受到干旱^[5]、渍水^[6]等逆境会导致植株生长发育和产量的严重损失。大豆苗期是整个生育期内的关键时期, 与群体发育质量及产量密切相关^[7]。因此增强苗期大豆生长发育能力极为重要。叶片参与光合作用过程, 是植物长期进化过程中最重要的部分^[8], 也是植物合成有机物质和获得能量的主要来源^[9]。Minobu 等^[10]认为光合作用与净生产力直接相关, 因此被认为是植物生长的重要指标, 同时, 光合作用对干物质存在直接影响。光合作用过程中产生的活性氧会被抗氧化酶清除, 维持代谢平衡, 保证植物正常生长^[11]。

近年来, 各类植物生长调节剂种类繁多, 其主要作用是通过调节植物内部代谢强度, 诱导植物不定根或不定芽的形成来实现提高植物的成活率、作物产量及抗逆性等目的。前人研究发现, 植物生长调节剂有效增加逆境胁迫下的大豆叶片抗氧化酶活性, 降低 $\cdot O_2^-$ 的产生速率, 提高渗透调节物质含量, 降低细胞膜脂过氧化程度, 从而抑制 MDA 含量和相对电导率的增加^[12-14]。吲哚丁酸钾 (IBA-K) 是一种促进型植物生长调节剂, 具有促进细胞分裂和增殖等特性^[15]。以往对吲哚丁酸钾的研究多为观赏性植物方面的应用^[16-17], 而在主要农作物上的应用研究相对较少。王红等^[18]研究表明吲哚丁酸钾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。吲哚丁酸钾对大豆生长发育的影响鲜有报道。本研究通过研究不同浓度吲哚丁酸钾对苗期大豆叶片的影响, 寻找可以达到壮苗目的适宜的吲哚丁酸钾浓度, 以减少因环境条件导致的缺苗和苗弱等现象, 为丰富植物生长调节剂种类以及大豆壮苗提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验品种为垦丰 16 和合丰 50, 由国家杂粮技术研究中心提供。

供试调节剂为吲哚丁酸钾 (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。

1.2 试验设计

试验于 2019 年在国家杂粮技术研究中心防雨

棚内进行, 采用盆栽方法。双色盆上口径、底径和高分别为 15.0, 11.5 和 14.7 cm, 盆底带有排水孔。试验用土采用腐殖土: 蛭石 = 3:1 比例均匀混合组成。选取籽粒饱满, 大小均匀一致的种子, 利用 10% 次氯酸钠消毒 3 min, 蒸馏水冲洗 3~5 次, 待种子表面干燥后, 采用 6 个不同浓度 (0, 20, 40, 80, 160 和 320 mg·kg⁻¹) 的 IBA-K 对大豆种子进行包衣处理, 10 次重复, 每盆等距播种 6 粒, 播深 3 cm, 保持每盆土壤相对含水量为 80%。试验采用单因素完全随机设计, 出苗后每盆定苗 4 株。待大豆生长至第一节期 (V1) 时, 选取长势一致的植株, 测定形态指标和光合指标, 并将大豆真叶迅速用液氮冷冻后立即置于 -40℃ 冰箱中保存, 供测定生理指标使用。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 形态指标 大豆生长至 V1 期时, 各处理选取长势一致植株, 测定株高、茎粗、叶面积和地上部干鲜重。

1.3.2 光合参数 利用 LI-6400XT 便携式光合仪在上午 9:00—11:00 测定各处理大豆 V1 期的真叶 (三片真叶中间的小叶) 净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO₂ 浓度 (C_i)、蒸腾速率 (T_r) 和蒸汽压亏缺 (VPD)。

1.3.3 生理指标 采用 NBT 还原法^[19]测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性, 采用 Jumrani 等^[20]的方法测定过氧化物酶 (POD) 活性, 采用 Prochazkova 等^[21]的方法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性, 采用 Jumrani 等^[20]的方法测定丙二醛 (MDA) 含量, 采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[22]测定可溶性蛋白质含量, 采用水合茚三酮法^[22]测定脯氨酸含量。

1.4 数据分析

利用 Excel 2019 整理数据和作图, 使用 SPSS 17.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度吲哚丁酸钾对大豆生长发育的影响

由表 1 可知, 不同浓度 IBA-K 处理的合丰 50 绝大部分地上部形态指标均高于垦丰 16。垦丰 16 株高在不同浓度 IBA-K 处理下均未与对照 (0 mg·kg⁻¹) 达到显著性差异, IBA-K 浓度为 20 和 160 mg·kg⁻¹ 处理的大豆株高最高, 均较对照提高了 10.78%; IBA-K 浓度为 80 mg·kg⁻¹ 处理下的合丰 50 株高最高, 较其对照显著增加了 27.78%。随 IBA-K 处理浓度的增加, 两品种大豆茎粗、叶面积和地上部干

鲜重的变化趋势表现为先升后降,且均在 IBA-K 浓度为 80 mg·kg⁻¹时达到最大,垦丰 16 和合丰 50 茎粗、叶面积、地上部干重和鲜重均较对照分别显著增加了 30.56% 和 49.51%、31.11% 和 36.51%、30.56% 和 28.21%、46.57% 和 37.21%。

表 1 不同浓度吡啶丁酸钾对大豆生长发育的影响

Table 1 Effects of different concentrations of potassium indole butyrate on soybean growth development										
浓度 concentration /(mg·kg ⁻¹)	株高 Plant height/cm		茎粗 Stem diameter/mm		叶面积 Leaf area/cm ²		地上部干重 Dry weight above ground/g		地上部鲜重 Fresh weight above ground/g	
	垦丰 16	合丰 50	垦丰 16	合丰 50	垦丰 16	合丰 50	垦丰 16	合丰 50	垦丰 16	合丰 50
	Kenfeng 16	Hefeng 50	Kenfeng 16	Hefeng 50	Kenfeng 16	Hefeng 50	Kenfeng 16	Hefeng 50	Kenfeng 16	Hefeng 50
0	9.28±0.29 a	9.90±0.25 b	2.16±0.18 b	2.06±0.16 c	67.00±1.45 b	68.84±0.16 e	0.36±0.03 b	0.39±0.03 bc	2.04±0.09 c	2.15±0.16 c
20	10.28±0.73 a	10.90±0.54 b	2.53±0.13 a	2.63±0.08 b	71.81±1.59 b	73.06±1.01 cd	0.36±0.02 b	0.42±0.01 bc	2.27±0.07 bc	2.49±0.04 b
40	8.85±0.29 a	10.15±0.33 b	2.60±0.11 a	2.71±0.02 b	66.94±3.17 b	70.69±1.42 de	0.39±0.01 b	0.37±0.02 c	2.32±0.07 bc	2.37±0.04 b
80	10.00±0.49 a	12.65±0.16 a	2.82±0.03 a	3.08±0.08 a	87.84±4.17 a	93.98±0.99 a	0.47±0.01 a	0.50±0.01 a	2.99±0.20 a	2.95±0.01 a
160	10.28±0.40 a	11.00±0.55 b	2.61±0.08 a	2.74±0.04 b	72.94±0.51 b	77.69±0.67 b	0.40±0.01 b	0.43±0.01 b	2.45±0.09 b	2.59±0.04 b
320	9.70±0.25 a	9.85±0.25 b	2.60±0.03 a	2.68±0.02 b	72.56±2.79 b	75.06±1.96 bc	0.40±0.01 b	0.42±0.00 b	2.24±0.06 bc	2.40±0.05 b

不同小写字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。
Different lowercase indicate significant differences between treatments at the $P < 0.05$ level. The same below.

2.2 不同浓度吡啶丁酸钾对大豆叶片光合参数的影响

整体来看,净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)随 IBA-K 浓度的增加呈升-降-升-降的变化趋势,蒸汽压亏缺(VPD)的变化趋势则相反。合丰 50 光合参数普遍高于垦丰 16。两品种大豆 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 均在

IBA-K 浓度为 80 mg·kg⁻¹时达到最大值,分别较对照(0 mg·kg⁻¹)显著增加了 35.31% 和 31.05%、85.00% 和 85.71%、25.28% 和 24.52%、56.33% 和 59.08%。除 IBA-K 浓度 40 mg·kg⁻¹外其它浓度处理下的 VPD 均显著低于对照,80 mg·kg⁻¹浓度的 IBA-K 处理 VPD 最低,分别较对照显著降低了 17.24% 和 23.74%(表 2)。

表 2 不同浓度吡啶丁酸钾对大豆叶片光合参数的影响

Table 2 Effects of different concentrations of potassium indole butyrate on photosynthetic parameters of soybean leaves										
IBA-K 浓度 IBA-K concentration /(mg·kg ⁻¹)	净光合速率 P_n /(mol·m ⁻² ·s ⁻¹)		气孔导度 G_s /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		胞间 CO_2 浓度 C_i /(μL·L ⁻¹)		蒸腾速率 T_r /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		蒸汽压亏缺 VPD /(mg·L ⁻¹)	
	垦丰 16	合丰 50	垦丰 16	合丰 50	垦丰 16	合丰 50	垦丰 16	合丰 50	垦丰 16	合丰 50
	Kenfeng 16	Hefeng 50	Kenfeng 16	Hefeng 50	Kenfeng 16	Hefeng 50	Kenfeng 16	Hefeng 50	Kenfeng 16	Hefeng 50
0	12.97±0.28 c	13.88±0.59 c	0.20±0.01 d	0.21±0.01 c	217.10±0.39 d	223.10±3.65 c	4.74±0.10 d	4.79±0.08 d	2.61±0.04 b	2.57±0.02 b
20	16.54±0.05 b	17.04±0.30 b	0.28±0.00b c	0.29±0.00 b	255.35±0.24 b	260.85±1.73 b	6.60±0.01 b	6.64±0.02 b	2.46±0.00 c	2.43±0.00 c
40	11.79±0.54 d	12.29±0.05 d	0.14±0.00 e	0.15±0.01 d	210.77±0.21 e	214.02±1.52 d	3.79±0.11 e	3.86±0.03 e	2.93±0.00 a	2.89±0.02 a
80	17.55±0.15 a	18.19±0.22 a	0.37±0.01 a	0.39±0.01 a	271.99±0.24 a	277.81±1.03 a	7.41±0.09 a	7.62±0.16 a	2.16±0.00 d	1.96±0.04 d
160	16.56±0.28 b	16.81±0.20 b	0.29±0.00 b	0.30±0.00 b	253.67±0.61 c	256.50±1.28 b	6.71±0.05 b	6.76±0.02 b	2.43±0.01 c	2.40±0.00 c
320	15.95±0.06 b	16.22±0.23 b	0.28±0.01 c	0.29±0.01 b	253.84±0.48 c	257.24±0.94 b	6.30±0.11 c	6.34±0.09 c	2.41±0.00 c	2.39±0.00 c

2.3 不同浓度吡啶丁酸钾对大豆叶片膜脂过氧化程度的影响

两品种大豆叶片丙二醛(MDA)含量随 IBA-K 浓度的增加呈升-降-升的变化趋势(图 1A)。合丰 50 叶片膜脂过氧化程度在各 IBA-K 浓度处理下均小

于垦丰 16。IBA-K 浓度为 0,80,160 和 320 mg·kg⁻¹处理下的合丰 50 MDA 含量分别较垦丰 16 显著降低 4.05%、16.96%、13.49% 和 10.17%, IBA-K 浓度为 80 和 160 mg·kg⁻¹处理下的垦丰 16 和合丰 50 叶片 MDA 含量分别较其对照(0 mg·kg⁻¹)显著降

低了38.11%和46.44%、35.41%和41.76%。

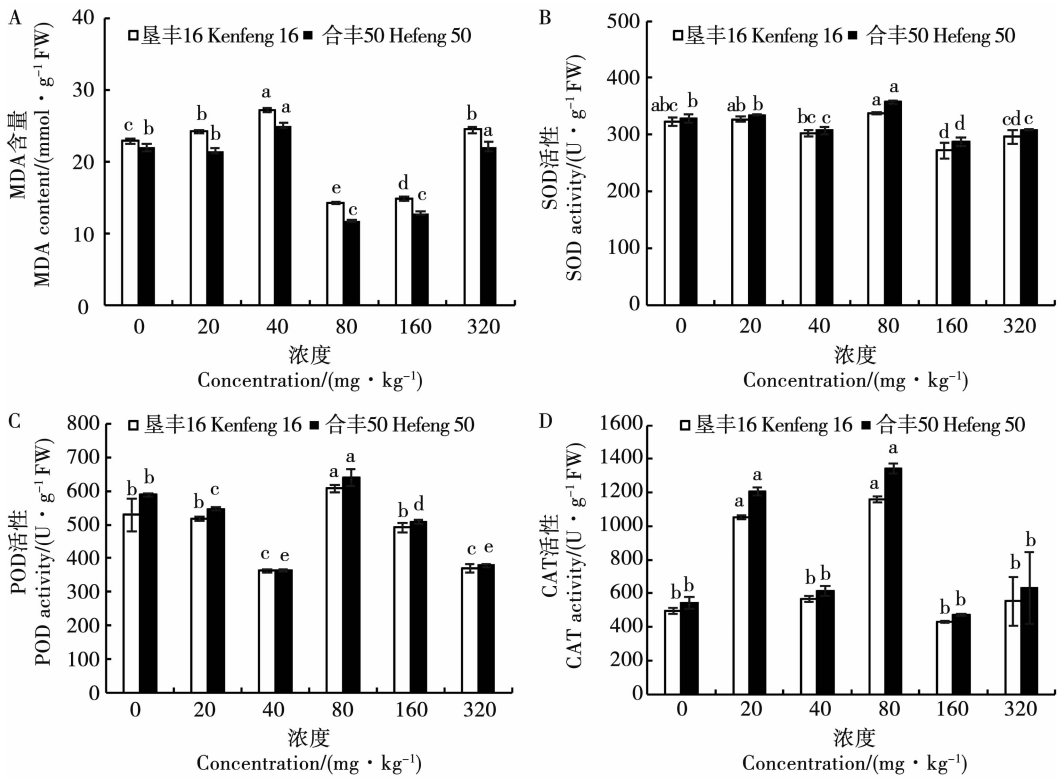
2.4 不同浓度吲哚丁酸钾对大豆叶片保护性酶活性的影响

2.4.1 SOD 活性 由图1B可以看出,两品种大豆叶片SOD活性在不同浓度IBA-K处理下无明显变化规律,具体表现为80 mg·kg⁻¹ > 20 mg·kg⁻¹ > CK > 40 mg·kg⁻¹ > 320 mg·kg⁻¹ > 160 mg·kg⁻¹。各浓度IBA-K处理下合丰50的SOD活性略高于垦丰16。合丰50在IBA-K浓度为80 mg·kg⁻¹处理下较对照(0 mg·kg⁻¹)显著增加了8.83%。垦丰16在IBA-K浓度为80 mg·kg⁻¹处理下较对照增幅为4.81%,未达到显著性差异。

2.4.2 POD 活性 整体来看,两品种大豆叶片POD活性随IBA-K浓度的增加呈降-升-降的变化趋势(图1C),具体变化为80 mg·kg⁻¹ > CK >

20 mg·kg⁻¹ > 160 mg·kg⁻¹ > 320 mg·kg⁻¹ > 40 mg·kg⁻¹。IBA-K浓度为20,40,160和320 mg·kg⁻¹处理下的合丰50 POD活性均高于垦丰16;IBA-K浓度为80 mg·kg⁻¹处理下的POD活性达到最大值,两品种大豆POD活性分别较其对照(0 mg·kg⁻¹)显著增加了14.89%和8.49%。

2.4.3 CAT 活性 不同浓度IBA-K处理下的两品种大豆叶片CAT活性变化各异(图1D),具体表现为80 mg·kg⁻¹ > 20 mg·kg⁻¹ > 40 mg·kg⁻¹ > 320 mg·kg⁻¹ > CK > 160 mg·kg⁻¹。不同浓度IBA-K处理下的合丰50 CAT活性均高于垦丰16。两品种大豆CAT活性在IBA-K浓度为20和80 mg·kg⁻¹处理下分别显著高于其对照,合丰50 CAT活性在20和80 mg·kg⁻¹处理下分别较垦丰16高14.63%和16.50%。



不同小写字母表示不同浓度各品种间在P<0.05水平上差异显著。下同。

Different lowercase indicate significant differences among treatments and varieties at the P<0.05 level. The same below.

图1 不同浓度吲哚丁酸钾对MDA含量及叶片保护酶活性的影响

Fig. 1 The effects of different concentrations of potassium indole butyrate on leaf protective enzyme activity and MDA content

2.5 不同浓度吲哚丁酸钾对大豆叶片渗透调节物质含量的影响

2.5.1 可溶性蛋白质含量 整体来看,两品种大豆叶片可溶性蛋白质含量在各IBA-K浓度处理下的变化趋势较为平缓(图2A),具体表现为80 mg·kg⁻¹ > 160 mg·kg⁻¹ > 20 mg·kg⁻¹ > CK > 320 mg·kg⁻¹ >

40 mg·kg⁻¹。两大豆品种叶片可溶性蛋白质含量在IBA-K浓度为80 mg·kg⁻¹时达到最大,分别较其对照显著增加了3.28%和4.65%,合丰50可溶性蛋白质含量较垦丰16增幅为2.72%。

2.5.2 脯氨酸含量 由图2B可知,两大豆品种叶片脯氨酸含量随IBA-K浓度的增加呈升-降-升-降

的变化趋势,具体表现为 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 160\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 320\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > \text{CK}$ 。各浓度 IBA-K 处理下的垦丰 16 脯氨酸含量均显著高于对照($0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),合丰 50 脯氨酸含量在 IBA-K

浓度为 $20, 80, 160$ 和 $320\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下显著高于对照。两大豆品种脯氨酸含量在 IBA-K 浓度为 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大,分别较对照增幅为 71.00% 和 79.90% ,合丰 50 脯氨酸含量较垦丰 16 高 9.58% 。

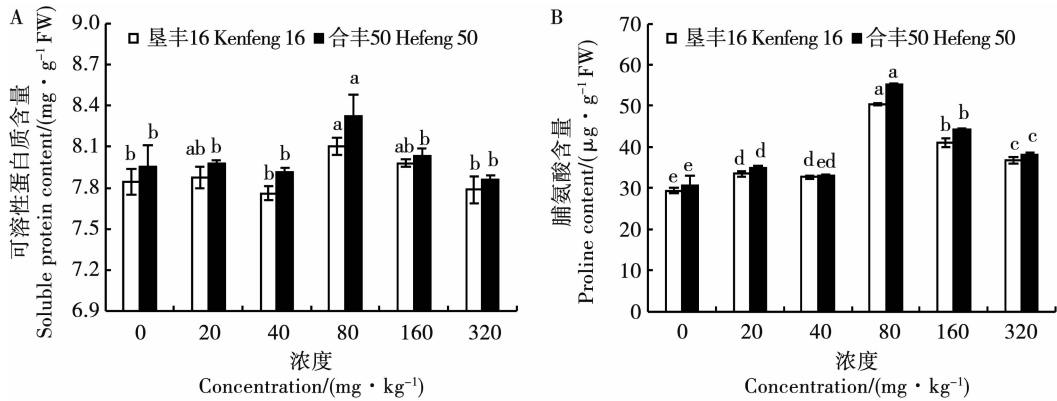


图2 不同浓度吡啶丁酸钾对叶片可溶性蛋白质和脯氨酸含量的影响

Fig. 2 The effects of different concentrations of potassium indole butyrate on the soluble protein and proline content of leaves

3 讨 论

光合作用是作物生长发育的基础^[23],同时是直接 影响生物量生产,转化效率和粮食产量的生理特征之一^[24]。叶片是光合作用的主要功能器官,叶片的发育对大豆抗性及产量有着重要的影响^[25-26]。黄文婷等^[27]研究发现植物生长调节剂通过调节大豆叶片光合作用和生理代谢达到高产。本研究结果表明,不同浓度 IBA-K 对两品种大豆地上部形态指标和光合参数均有不同程度的促进,地上部形态指标变化趋势大致表现为先上升后下降;光合参数除 *VPD* 外的变化趋势表现为升-降-升-降。合丰 50 各形态指标和光合参数普遍高于垦丰 16,证明合丰 50 的生长发育特性强于垦丰 16。大豆地上部干物质积累量在 IBA-K 浓度为 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时最大,可能是与此时大豆叶片光合作用受到显著促进有关。蒸气压亏缺 (*VPD*) 是影响植物叶片膨大和蒸腾速率 (*Tr*) 的重要因子^[26,28]。IBA-K 浓度为 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下的大豆叶片 *Pn*、*Gs*、*Ci* 和 *Tr* 达到最大,*VPD* 达到最小。这与前人研究发现植物生长调节剂显著提高大豆叶片光合速率和干物质积累量的结论一致^[29-30]。

活性氧是植物细胞代谢过程中产生的一种正常副产物^[31],过量的活性氧自由基导致细胞膜遭受破坏,膜透性增加,产生大量 MDA^[32-33]。超氧化物歧化酶 (*SOD*)、过氧化物酶 (*POD*) 和过氧化氢酶 (*CAT*) 是植物体内主要用于清除活性氧的抗氧化酶^[34]。Gill 等^[35]认为存在高抗氧化酶活性的植株具有更高的耐受性。在本研究中,合丰 50 抗氧化酶

活性高于垦丰 16,MDA 含量则相反,由此推测合丰 50 抗逆性优于垦丰 16。与对照相比,IBA-K 浓度为 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著提高了两品种大豆叶片 *POD* 和 *CAT* 活性,叶片 *SOD* 活性在 IBA-K 浓度为 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下达到最大,减少细胞内活性氧的积累;MDA 含量在 IBA-K 浓度为 80 和 $160\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著降低,细胞膜脂过氧化作用减轻。说明 IBA-K 对提高大豆叶片保护酶活性,降低 MDA 含量,减轻细胞损伤具有明显效果, $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ IBA-K 处理效果最佳。这与前人研究植物生长调节剂对大豆生理方面的结论相符^[36-37]。

植物细胞内渗透调节物质的合成在维持细胞强度方面发挥重要作用^[38]。脯氨酸在细胞质中起渗透保护作用,有助于稳定蛋白质、膜和亚细胞结构,并通过清除活性氧来保护细胞功能^[39-41];可溶性蛋白质能够增加细胞的保水能力^[42]。本研究发现,各浓度 IBA-K 处理均不同程度提高了两品种大豆叶片可溶性蛋白质和脯氨酸含量,但浓度为 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ IBA-K 处理下的效果尤为显著,IBA-K 处理下的合丰 50 渗透调节物质含量增幅大于垦丰 16。这说明 IBA-K 对提高大豆叶片渗透调节物质含量积累具有正向调控效应,有利于增强细胞保水能力,浓度为 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 IBA-K 处理效果最佳。这与魏湜等^[43]研究植物生长调节剂在玉米上的应用结果相类似。 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ IBA-K 对大豆叶片生长发育及生理代谢均有较好的调控效果,因此推测 IBA-K 可能对苗期大豆根系生长及生理代谢存在较好促进作用。由于 IBA-K 能有效提高苗期大豆叶片抗逆指标参数,可将 IBA-K 与大豆抗逆境联系在一

起,继续深入挖掘 IBA-K 对苗期大豆抗逆作用的调控效应。

4 结 论

本研究结果表明,IBA-K 处理下合丰 50 的生长发育状况优于垦丰 16。80 mg·kg⁻¹ IBA-K 处理下的大豆苗期茎粗、叶面积和地上部干鲜重均显著增加,合丰 50 株高达到各 IBA-K 浓度处理中的最大值;不同浓度 IBA-K 均显著提高大豆苗期叶片的光合能力。同时,IBA-K 通过提高抗氧化酶活性,降低 MDA 含量,增加可溶性蛋白质和脯氨酸含量来促进大豆的生长发育。综合各剂量 IBA-K 对大豆叶片各项指标的作用效果,分析得出 80 mg·kg⁻¹ IBA-K 的综合处理效果最佳。

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]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2):196-201.
- [2] Wang C, Linderholm H W, Song Y, et al. Impacts of drought on maize and soybean production in northeast China during the past five decades[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(7): 2459.
- [3] Pathan M S, Lee J D, Shannon J G, et al. Recent advances in breeding for drought and salt stress tolerance in soybean [M]// Jenks M A, Hasegawa P M, Jain S M. ed. Advances in molecular breeding toward drought and salt tolerant crops. Springer, 2007: 739-773.
- [4] 李秀芬, 郭昭滨, 朱海霞, 等. 黑龙江省大豆生长季旱涝时序特征及其对产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1223-1232. (Li X F, Guo Z B, Zhu H X, et al. Time-series characteristics of drought and flood in spring soybean growing season and its effect on soybean yield in Heilongjiang Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1223-1232.)
- [5] 臧紫薇, 赵雪, 李海燕, 等. 大豆种质资源苗期抗旱性评价[J]. 大豆科学, 2016, 35(6): 964-968. (Zang Z W, Zhao X, Li H Y, et al. Evaluation of drought resistance of soybean germplasm in seedling stage[J]. Soybean Science, 2016, 35(6): 964-968.)
- [6] 李建英, 周长军, 杨柳, 等. 水分胁迫对大豆苗期叶片内源激素含量与保护酶活性的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(6): 959-963. (Li J Y, Zhou C J, Yang L, et al. Effect of water stress on endogenous hormone and protective enzymes in soybean seedling leaves[J]. Soybean Science, 2010, 29(6): 959-963.)
- [7] 刘文夫, 董守坤, 徐亚会, 等. 大豆苗期干旱胁迫对糖分吸收与相关酶活性的影响[J]. 作物杂志, 2014(3): 117-120. (Liu W F, Dong S K, Xu Y H, et al. Effects of drought stress on sugar absorption and related enzyme activities at soybean seedling[J]. Crops, 2014(3): 117-120.)

- [8] Fan Y F, Chen J X, Cheng Y J, et al. Effect of shading and light recovery on the growth, leaf structure, and photosynthetic performance of soybean in a maize-soybean relay-strip intercropping system[J]. PLoS One, 2018, 13(5): e0198159.
- [9] Jumrani K, Bhatia V S, Pandey G P. Impact of elevated temperatures on specific leaf weight, stomatal density, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in soybean [J]. Photosynthesis Research, 2017, 131(3): 333-350.
- [10] Minobu K. Effect of growing soybean plants under continuous light on leaf photosynthetic rate and other characteristics concerning biomass production[J]. Journal of Agronomy, 2008, 7(2): 156-162.
- [11] 余明龙, 左官强, 李瑶, 等. 调环酸钙对盐碱胁迫下大豆幼苗光合特性和保护酶活性的调节作用[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(5): 741-749. (Yu M L, Zuo G Q, Li Y, et al. Effects of prohexadione-calcium on photosynthetic characteristics and protective enzyme activity of soybean seedlings under saline-alkali stress[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(5): 741-749.)
- [12] Feng N J, Liu C J, Zheng D F, et al. Effect of uniconazole treatment on the drought tolerance of soybean seedlings [J]. Pakistan Journal of Botany, 2020, 52(5): 1515-1523.
- [13] Attarzadeh M, Balouchi H, Baziar M R. Effects of paclobutrazol's pre-treatment on cold tolerance induction in soybean seedling (*Glycine max* L.) [J]. Italian Journal of Agronomy, 2018: 155-162.
- [14] Zou J N, Jin X J, Zhang Y X, et al. Effects of melatonin on photosynthesis and soybean seed growth during grain filling under drought stress[J]. Photosynthetica, 2019, 57(2): 512-520.
- [15] 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, 33(8): 1611-1621. (Qi D Q, Feng N J, Zheng D F, et al. Effects of different seedling strengthening agents on growth and physiological characteristics of rice seedlings [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(8): 1611-1621.)
- [16] 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 Journal, 2005, 6(2): 111-117.
- [17] Griffin J J, Lasseigne F T. Effects of K-IBA on the rooting of stem cuttings of 15 taxa of snowbells (*Styrax* spp.) [J]. Journal of Environmental Horticulture, 2005, 23(4): 171-174.
- [18] 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. (Wang H, Song T, Liu H, et al. Effect of different concentrations of rooting agents on maize radicle growth [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(2): 57-60.)
- [19] Porcel R, José M B, Ruiz-Lozano J M. Antioxidant activities in mycorrhizal soybean plants under drought stress and their possible relationship to the process of nodule senescence [J]. New Phytologist, 2003, 157(1): 135-143.
- [20] Jumrani K, Bhatia V S. Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2019, 25(3): 667-681.
- [21] Prochazkova D, Sairam R K, Srivastava G C, et al. Oxidative stress and antioxidant activity as the basis of senescence in maize

leaves[J]. Plant Science, 2001, 161(4): 765-771.

[22] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000. (Li H S. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.)

[23] Yang F,Feng L Y, Liu Q L, et al. Effect of interactions between light intensity and red-to-far-red ratio on the photosynthesis of soybean leaves under shade condition [J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 150: 79-87.

[24] Lopez M A, Xavier A, Rainey K M. Phenotypic variation and genetic architecture for photosynthesis and water use efficiency in soybean (*Glycine max* L. Merr) [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 680.

[25] Wang W S, Wang C, Pan D Y, et al. Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence images of soybean (*Glycine max*) seedlings[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 196-201.

[26] Fan Y, Chen J, Wang Z, et al. Soybean (*Glycine max* L. Merr.) seedlings response to shading: Leaf structure, photosynthesis and proteomic analysis[J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1): 34.

[27] 黄文婷, 冯乃杰, 郑殿峰, 等. 烯效唑和胺鲜酯对大豆叶片光合特性与碳代谢的调控效应[J]. 大豆科学, 2020, 39(2): 243-251. (Huang W T, Feng N J, Zheng D F, et al. Regulatory effects of uniconazole and diethyl hexanoate on photosynthetic characteristics and carbon metabolism of soybean leaves [J]. Soybean Science, 2020, 39(2): 243- 251.)

[28] Devi M J,Taliercio E W, Sinclair T R. Leaf expansion of soybean subjected to high and low atmospheric vapour pressure deficits [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(7): 1845-1850.

[29] Ramesh R, Ramprasad E. Effect of plant growth regulators on morphological, physiological and biochemical parameters of soybean (*Glycine max* L. Merrill) [J]. Biotechnology and Bioforensics, 2015: 61-71.

[30] Zhang M C, He S Y, Zhan Y C, et al. Exogenous melatonin reduces the inhibitory effect of osmotic stress on photosynthesis in soybean[J]. PLoS one, 2019, 14(12): e0226542.

[31] Osman H S. Enhancing antioxidant-yield relationship of pea plant under drought at different growth stages by exogenously applied glycinebetaine and proline[J]. Annals of Agricultural Sciences, 2015, 60(2): 389-402.

[32] Akitha Devi M K, Giridhar P. Variations in physiological response, lipid peroxidation, antioxidant enzyme activities, proline and isoflavones content in soybean varieties subjected to drought stress[J]. Proceedings of the National Academy of ences India, 2015, 85(1): 35-44.

[33] Sallam A, Alqudah A M, Dawood M F A, et al. Drought stress tolerance in wheat and barley: Advances in physiology, breeding and genetics research [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(13): 3137.

[34] Karami S, Sanavy S A M M, Ghanehpour S, et al. Effect of foliar zinc application on yield, physiological traits and seed vigor of two soybean cultivars under water deficit [J]. Notulae Scientia Biologicae, 2016, 8(2): 181-191.

[35] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12):909-930.

[36] 郑殿峰, 赵黎明, 冯乃杰. 植物生长调节剂对大豆叶片内源激素含量及保护酶活性的影响[J]. 作物学报, 2008,34(7): 1233-1239. (Zheng D F, Zhao L M, Feng N J. Effects of plant growth regulators (PGRs) on endogenous hormone contents and activities of protective enzymes in soybean leaves [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008 ,34(7): 1233-1239.)

[37] 冯亚楠. 植物生长调节剂对大豆苗建成及产量品质的调控效应[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2010. (Feng Y N. Regulatory effects of plant growth regulators on soybean seedling establishment, yield and quality [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agriculture University, 2010.)

[38] Nguyen 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 Bioengineering, 2020, 7(3): 114.

[39] Kocsy G, Laurie R, Szalai G, et al. Genetic manipulation of proline levels affects antioxidants in soybean subjected to simultaneous drought and heat stresses [J]. Physiologia Plantarum, 2005, 124(2): 227-235.

[40] Mwenye O J, Van Rensburg L, Van Biljon A, et al. The role of proline and root traits on selection for drought-stress tolerance in soybeans: A review[J]. South African Journal of Plant and Soil, 2016, 33(4): 245-256.

[41] Porcel R, Ruiz-Lozano J M. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(403): 1743-1750.

[42] 李爽. 干旱和高温对大豆苗期抗氧化特性的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2018. (Li S. Effects of drought and high temperature on the antioxidative characteristics of soybean seedlings [D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2018.)

[43] 魏湜, 张嵩, 顾万荣, 等. DCPTA 对盐胁迫下玉米叶片渗透调节生理生化特征影响[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(9): 1-8. (Wei S, Zhang H, Gu W R, et al. Effect of DCPTA on the physiological and biochemical characteristics of osmotic adjustment in maize seedling leaves under salt stress[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(9): 1-8.)