



外源褪黑素缓解干旱胁迫对春大豆苗期影响的生理调控效应

张明聪¹, 何松榆¹, 秦彬¹, 金喜军¹, 王孟雪¹, 任春元¹, 吴耀坤², 张玉先¹

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江省农业科学院 大庆分院, 黑龙江 大庆 163316)

摘要:为研究外源褪黑素对干旱胁迫下春大豆的缓解作用,以绥农 26 为试验材料,采用盆栽试验方法,以 PEG6000 引起的水分渗透势模拟干旱胁迫,研究干旱胁迫下叶面喷施和根施褪黑素对苗期春大豆的生理调控效应。结果表明:干旱胁迫降低了大豆叶片光合色素含量(叶绿素 a、b、总叶绿素含量)和光合作用强度(净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度),提高了相对电导率、超氧阴离子(O₂⁻)、过氧化氢(H₂O₂)和丙二醛(MDA)含量,增加了渗透调节物质(可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和游离脯氨酸)含量,增强了抗氧化剂活性(超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶)。干旱胁迫条件下施用褪黑素,与干旱处理相比,大豆光合色素含量、干物质积累量、光合速率、抗氧化剂活性、可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量均显著增加,而 O₂⁻、H₂O₂、MDA 含量和相对电导率则显著降低。结果表明外源褪黑素能够缓解干旱胁迫对大豆苗期相关生理指标的不利影响,提高大豆幼苗耐旱性,其中根施褪黑素处理好于叶面喷施处理。

关键词:干旱胁迫;褪黑素;大豆;苗期;生理调控

The Physiological Regulation Effect of Exogenous Melatonin Relieving Drought Stress at Seedling Stage of Spring Soybean

ZHANG Ming-cong¹, HE Song-yu¹, QIN Bin¹, JIN Xi-jun¹, WANG Meng-xue¹, REN Chun-yuan¹, WU Yao-kun², ZHANG Yu-xian¹

(1. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Daqing Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing 163316, China)

Abstract: In order to study the relieving effect of exogenous melatonin on soybean under drought stress. This study investigated the effects of exogenous melatonin on soybean physiological regulation effect of osmotic stress under water deficit stress induced by PEG6000. We conducted a potting experiment using the soybean (*Glycine max* L. Merrill) cultivar Suinong 26 to study the effects of the application of exogenous melatonin by leaf spray and root application on relieving the physiological regulation effect of osmotic stress at seedling stage of spring soybean. The results showed that the drought stress treatment reduced photosynthetic pigments (Chla, Chlb and total Chl) and photosynthesis (*Pn*, *Tr*, *Gs* and *Ci*) in soybean leaves, increased electrolyte leakage, O₂⁻, H₂O₂ and MDA, enhanced osmotic antioxidant activity (SOD, POD, CAT, APX, GSH and AsA) and adjustment substances content (soluble protein content, soluble sugar content and proline content). The application of exogenous melatonin under drought stress significantly relieved the inhibitory effects of PEG6000 stress on seedling growth, compared with drought stress, photosynthetic pigment content, dry matter accumulation, photosynthesis of soybean leaves, antioxidant activity, the soluble sugar, soluble protein and proline content were significantly higher, while O₂⁻, H₂O₂, MDA content and electrolyte leakage were significantly decreased. Overall, the results showed that application of exogenous melatonin at the seedling stage of soybean was effective in alleviating the adverse effects of drought stress on physiological indexes and improving the drought tolerance of soybean seedlings. In addition, the results showed that application of exogenous melatonin by root is superior to foliar spraying.

Keywords: Drought stress; Melatonin; Soybean; Seedling stage; Physiological regulation

干旱胁迫是影响作物生长发育最主要的环境因素之一。研究表明,因干旱导致的大豆产量的直接损失高达 25% ~ 50%^[1]。干旱胁迫会引起大豆体内的水分亏缺,从而扰乱大豆体内源库流的正常

运行,导致大豆生长受阻和产量降低^[2-3]。近些年植物生长调节剂在提高作物抗逆方面取得较多成果,褪黑素作为一种新型植物生长调节剂可有效减缓非生物胁迫对植物造成的损伤。研究表明,褪黑

收稿日期:2020-04-18

基金项目:国家自然科学基金(31801303);中国博士后科学基金(2016M591561);黑龙江省自然科学基金(C2016042);黑龙江省应用技术与开发计划(GA19B101-02);黑龙江省农垦总局重点科研计划(HKKY190206-1);黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金项目(XYB2014-04);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-01A)。

第一作者简介:张明聪(1983-),男,博士,讲师,主要从事大豆逆境生理研究。E-mail: zhangmingcong@163.com。

通讯作者:张玉先(1968-),男,博士,教授,主要从事大豆高产栽培研究。E-mail: zyx_lxy@126.com。

素在植物逆境研究中有积极的缓解作用,如缓解盐胁迫对大豆萌发和幼苗生长的抑制作用^[4-5],提高低温环境下大豆种子的萌发率^[6],提高黄瓜的耐高温能力^[7]等。在干旱条件下,褪黑素提高大豆苗期的抗氧化酶^[8]活性,清除干旱胁迫下大量积累的活性氧;缓解干旱导致的氧化胁迫对大豆叶片造成的伤害^[9];缓解由 PEG 引发的渗透胁迫对大豆种子萌发的抑制作用,促进侧根生长,增强根系活力^[10];褪黑素被认为是内源性的自由基清除剂和抗氧化剂^[11],能够有效清除过量的 ROS,防止细胞过度氧化。尽管褪黑素在大豆应对非生物胁迫过程中作用的研究较多,但同时针对大豆不同器官并采用叶面喷施和根部浇灌施加褪黑素的对比研究较少。

本研究以绥农 26 为试验材料,采用盆栽试验方法,用 PEG6000 模拟干旱胁迫环境,研究叶面喷施和根施外源褪黑素对大豆苗期的生理调控作用,明确外源褪黑素缓解干旱胁迫对春大豆苗期的生理调控效应,以期为提高春大豆苗期抗旱能力和大豆产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为绥农 26,无限结荚习性,生育期 120 d。褪黑素($C_{13}H_{16}N_2O_2$)购自 Sigma Aldrich 公司,相对分子质量为 232.28,纯度大于 99%。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 5-9 月在黑龙江省大庆市黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心实验基地防雨大棚内进行。采用盆栽方法,桶高 36 cm、直径 29 cm,桶底钻 5 个直径 0.5 cm 小孔并垫上纱网,以 1:1 比例的蛭石和珍珠岩混拌作栽培基质。播种前选取饱满、色泽均匀、大小一致的种子,用 5% 次氯酸钠消毒。每盆播 9 粒种子,真叶期间苗,每盆保留均匀一致的幼苗 3 株。

试验设 4 个处理:①正常浇灌营养液处理(WW):浇灌 1 L Hoagland 营养液(底部有水渗出);②干旱胁迫处理(D):浇灌含 15% PEG 的 Hoagland 营养液;③干旱胁迫处理+叶喷褪黑素处理(LM):浇灌含 15% PEG 的 Hoagland 营养液+叶面喷施 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的褪黑素(喷施以雾状水汽在叶片表面形成水滴自然落下为止);④干旱胁迫处理+根施褪黑素处理(RM):浇灌含 15% PEG 的营养液+根施 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的褪黑素。

各处理每 2 d 浇灌 1 L Hoagland 营养液,其中干旱胁迫处理分别于大豆 V4 期的第 0,3 和 6 天进行处理。于最后一次处理结束后的第 3 天上午 9:00

取样,地上部叶片取完全生长的倒 2 叶、根系取根尖 1 cm 处,分别用锡箔纸包好,并置于 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下保存,用于试验相关指标测定。每个处理 5 次重复,每个重复 6 盆。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质及光合生理指标 采用烘干称重法^[12]测定干物质积累量;采用 LI-6400 光合仪测定叶片气体交换参数:净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)。采用丙酮法^[12]测定叶绿素含量。

1.3.2 大豆苗期叶片抗氧化系统活性 采用氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性;采用比色法测定过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性;采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量^[12]。参照郭欣欣等^[13]的方法测定谷胱甘肽(AsA)、抗坏血酸含量(GSH)和相对电导率(REC)。参照 Chaitanya 等^[14]的方法测定 O_2^- 含量。参照 Mukherjee 等^[15]的方法测定 H_2O_2 含量。

1.3.3 渗透调节物质含量 采用磺基水杨酸法测定游离脯氨酸(Pro)含量;采用蒽酮法测定可溶性糖(SS)含量;采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白(SP)含量^[12]。

1.4 数据分析

使用 Excel 2019 进行数据处理和制表,采用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),通过 LSD 检验($P < 0.05$)分析处理间的差异显著性。使用 Origin 2018 软件进行图形绘制。

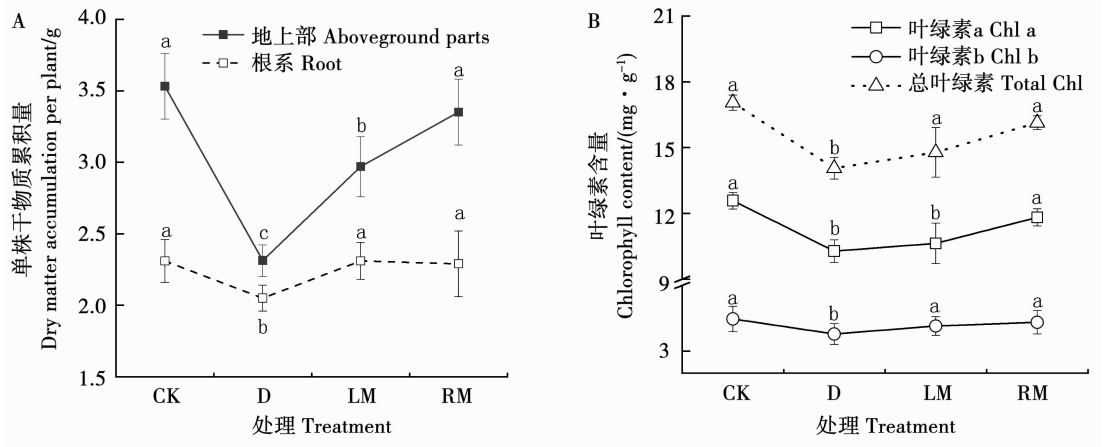
2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下外源褪黑素对大豆苗期植株光合生理指标的影响

2.1.1 对干物质积累量和叶绿素含量的影响 D 处理大豆地上部和根系干物质积累量分别较 CK 降低 34.5% 和 11.3% ($P < 0.05$)。与 D 处理相比,LM 和 RM 处理能够显著提高大豆的干物质积累量,其中 LM 处理的地上部和根系干物质积累量较 D 处理分别提高了 28.4% 和 44.9%,RM 处理分别提高了 12.7% 和 11.7% ($P < 0.05$),RM 处理地上部干物质积累量高于 LM 处理(图 1A)。干旱胁迫下大豆叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均低于 CK。与 CK 相比,D 处理大豆叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量分别降低 18.3% 和 15.4%,总叶绿素含量降低 17.5% (图 1B)。干旱胁迫下施用褪黑素处理提高了大豆叶片的叶绿素含量(LM 处理下的叶绿素 a 含量除外),其中 RM 处理下的叶绿素 a、叶

绿素 b 和总叶绿素含量较 D 处理分别提高 14.9%、14.3% 和 14.8% ($P < 0.05$)。结果表明干旱胁迫降

低了大豆叶片的叶绿素含量,而褪黑素的施用提高了干旱胁迫下叶绿素的含量。



不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 干旱胁迫下外源褪黑素对大豆苗期植株干物质积累量和叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effect of exogenous melatonin on dry matter accumulation and chlorophyll content of soybean seedling under drought stress

2.1.2 对气体交换参数的影响 与CK相比,干旱胁迫下大豆的 P_n 、 Tr 、 G_s 以及 C_i 均显著降低,其中D处理与CK相比分别降低41.1%、26.5%、57.8%和15.9% ($P < 0.05$)。而与D处理相比,干旱胁迫下施用褪黑素后大豆叶片的 P_n 、 Tr 、 G_s 以及 C_i 均有所提高,其中LM和RM处理下的 P_n 较D处理分别

提高26.9%和18.7%;RM处理下的 Tr 和 G_s 比D处理分别提高15.7%和57.4%;LM处理下的 C_i 较D处理提高8.49%,均有显著差异 ($P < 0.05$) (图2)。结果表明干旱胁迫降低了大豆叶片的气体交换参数,而施用褪黑素处理提高了干旱胁迫下的气体交换参数。

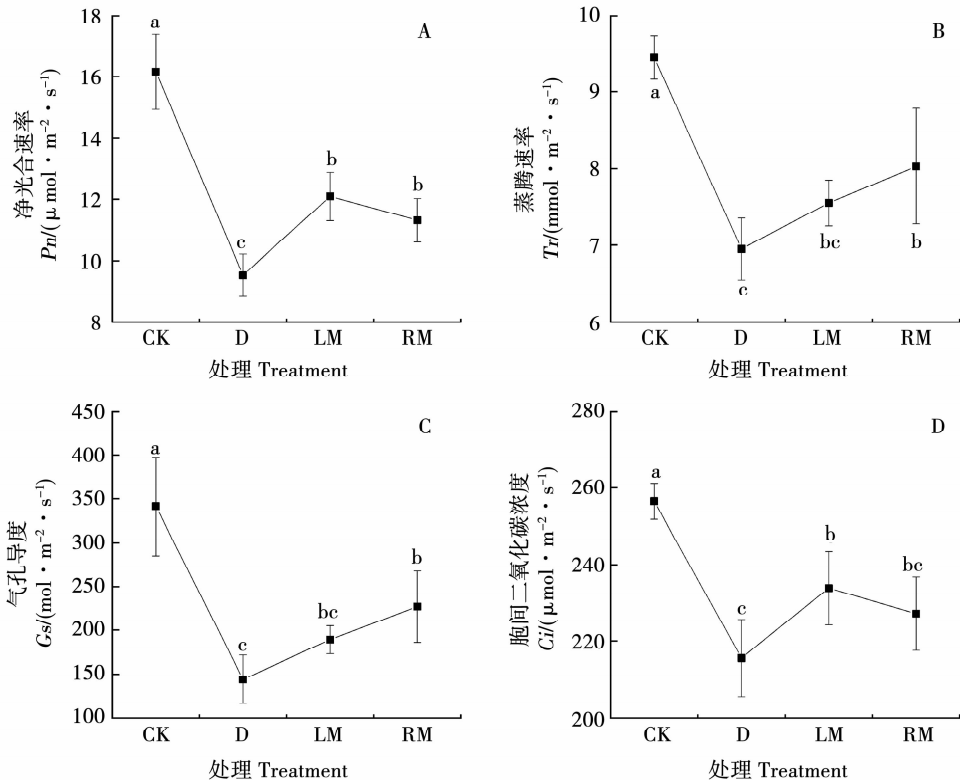


图2 外源性褪黑激素对干旱胁迫下大豆苗期气体交换参数的影响

Fig. 2 Effect of exogenous melatonin on gas exchange parameters of soybean seedling under drought stress

2.2 干旱胁迫下外源褪黑素对大豆苗期叶片抗氧化系统的影响

2.2.1 对抗氧化酶活性的影响 干旱胁迫下大豆叶片和根系的 SOD 活性均高于 CK。其中 RM 处理叶片的 SOD 活性最高,较 D 处理提高 36.1% ($P < 0.05$),显著高于 CK 和 D 处理(图 3A)。与 CK 相比,其它处理干旱胁迫条件下大豆叶片和根系的 POD 活性均显著提高,其中 D 处理叶片的 POD 活性较 CK 提高 132.1% ($P < 0.05$),而与 D 处理相比,LM 处理和 RM 处理分别提高 8.13% 和 14.6% ($P < 0.05$)(图 3B)。与 CK 相比,D、LM 和 RM 处

理大豆叶片和根系的 CAT 活性均显著增加,叶片中增幅分别为 15.2%、19.0% 和 20.3% ($P < 0.05$),根系 CAT 活性的整体趋势与叶片基本一致(图 3C)。不同处理大豆叶片的 APX 活性与 CK 相比均有所提高,但无明显差异。根系的 APX 活性在 D 和 LM 处理下与 CK 相比有所提高,但无明显差异,而 RM 处理与 CK 相比则显著增加,增幅为 46.7% ($P < 0.05$)(图 3D)。结果表明干旱胁迫下大豆体内的抗氧化酶活性提高,而施用褪黑素后提高幅度增大,进一步缓解了干旱胁迫对植株造成的损伤。

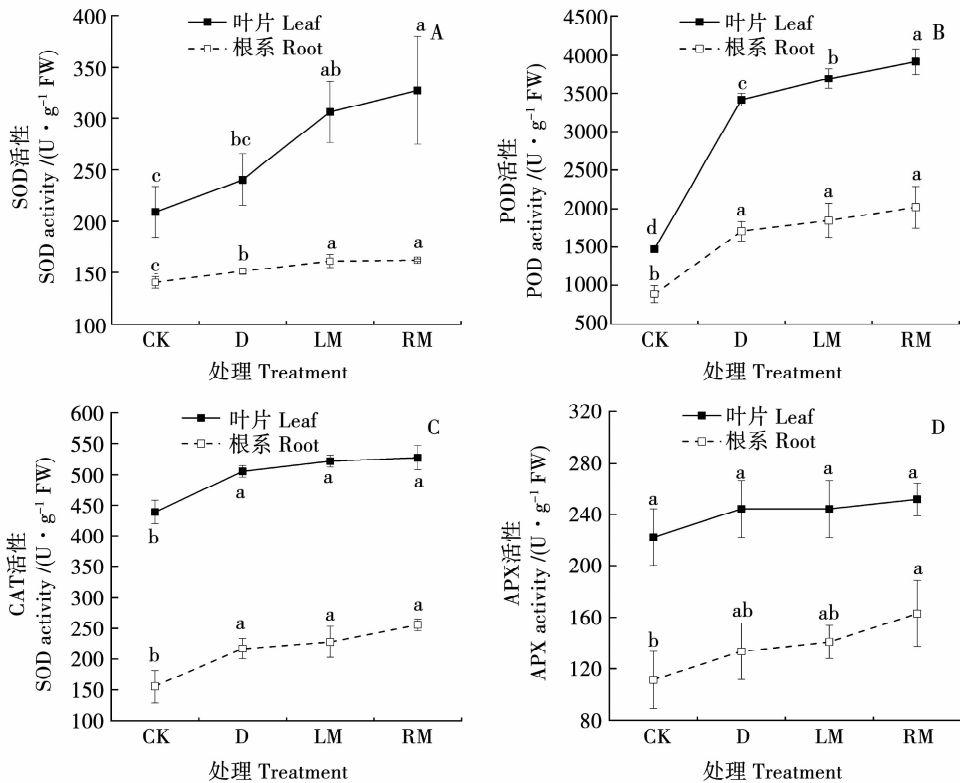


图 3 外源性褪黑素对干旱胁迫下大豆苗期抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effect of exogenous melatonin on antioxidant enzyme activities in soybean seedling under drought stress

2.2.2 对 O_2^- 和 H_2O_2 含量的影响 与 CK 相比,D 处理下大豆叶片和根系的 O_2^- 含量显著增加,其中叶片增加 177.5%,根系增加 213.5% ($P < 0.05$);而干旱胁迫下施用外源褪黑素后,大豆叶片和根系的 O_2^- 含量降低,其中叶片中 LM 和 RM 处理与 D 处理相比分别降低 49.0% 和 51.2% ($P < 0.05$)(图 4A)。干旱胁迫下大豆叶片的 H_2O_2 含量均显著高于 CK,其中 D 处理较 CK 提高 250.3% ($P < 0.05$);而与 D 处理相比,LM 和 RM 处理大豆叶片的 H_2O_2 含量分别降低 25.5% 和 32.9% ($P < 0.05$)。大豆根系的 H_2O_2 含量在干旱胁迫后均高于 CK,其中 D

处理下的 H_2O_2 含量较 CK 增加 100.8% ($P < 0.05$),而施用褪黑素后,大豆根系的 H_2O_2 含量较 D 处理显著降低,LM 和 RM 处理分别降低 27.0% 和 30.9% ($P < 0.05$)(图 4B)。结果表明干旱胁迫导致大豆体内活性氧(ROS)的大量积累,而施用褪黑素后降低了 ROS 含量,其中 RM 处理的效果比较明显。

2.2.3 对抗氧化剂活性的影响 干旱胁迫下大豆叶片的 GSH 含量与 CK 相比均显著增加,其中 D 处理较 CK 增加 117.3%;而与 D 处理相比,LM 和 RM 处理分别增加 15.8% 和 17.9% ($P < 0.05$)(图

5A)。与CK相比,干旱胁迫下不同处理大豆叶片的AsA含量均有所增加,其中,LM和RM处理较CK分别显著增加24.8%和29.4% ($P < 0.05$)。根系AsA含量的变化趋势与叶片基本保持一致(图5B)。

结果表明干旱胁迫下大豆体内的GSH和AsA含量均有所增加,而施用褪黑素后GSH和AsA含量进一步增加。

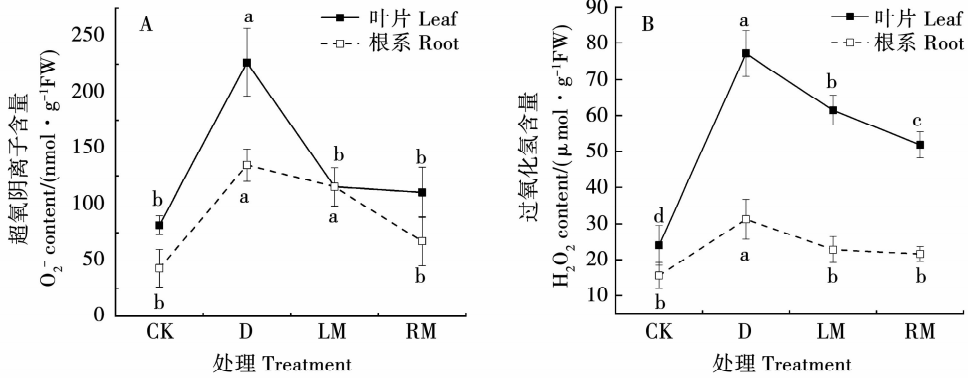


图4 干旱胁迫下外源性褪黑素对大豆苗期 O_2^- 和 H_2O_2 含量的影响

Fig. 4 Effects of exogenous melatonin on O_2^- and H_2O_2 contents in soybean seedling under drought stress

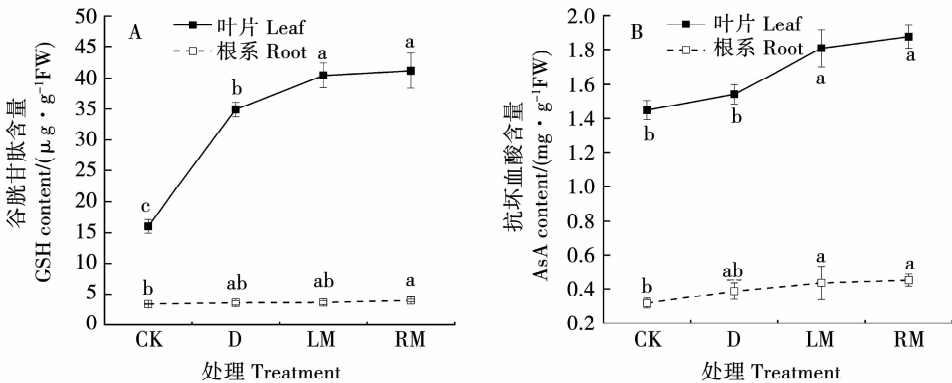


图5 干旱胁迫下外源性褪黑素对大豆苗期 GSH 和 AsA 含量的影响

Fig. 5 Effect of exogenous melatonin on the contents of GSH and AsA in soybean seedling under drought stress

2.3 干旱胁迫下外源褪黑素对大豆苗期 MDA 含量和相对电导率的影响

与CK相比,D处理大豆叶片和根系的MDA含量分别增加26.8%和7.99% ($P < 0.05$)。与D处理相比,LM处理叶片的MDA含量则显著降低,降幅为13.3% ($P < 0.05$);LM和RM处理根系的MDA含量分别降低6.38%和5.25% ($P < 0.05$) (图6A)。干旱胁迫下不同处理大豆叶片的相对电导率与CK相比均显著增加,其中D处理较CK相比增加17.1% ($P < 0.05$);而与D处理相比,LM和RM处理则分别降低9.45%和8.94% ($P < 0.05$) (图6B)。结果表明干旱胁迫会引起大豆体内MDA含量和相对电导率显著增加,而褪黑素的施用能够降低MDA含量和叶片相对电导率。

2.4 干旱胁迫下外源褪黑素对大豆苗期渗透调节物质的影响

与CK相比,干旱胁迫下大豆叶片和根系的可溶性蛋白含量均显著增加,其中LM处理下叶片的可溶性蛋白含量最高,较CK处理提高28.8%,较D处理提高13.4%,均达到显著差异水平 ($P < 0.05$);D处理根系可溶性蛋白含量最高,较CK增加37.4% ($P < 0.05$),但与LM和RM处理没有明显差异(图7A)。除RM处理,与CK相比,干旱胁迫下大豆叶片和根系的可溶性糖含量显著增加,以D处理最高,其中叶片可溶性糖含量较CK相比增加57.3%,根系增加114.5%,均达到显著差异水平 ($P < 0.05$);与D处理相比,LM和RM处理下大豆叶片和根系的可溶性糖含量均显著下降(图7B)。

除 D 处理,与 CK 相比大豆叶片和根系的脯氨酸含量在干旱胁迫后显著增加,其中 RM 处理叶片脯氨酸含量最高,与 D 处理相比增加 97.5% ($P <$

0.05);LM 处理根系脯氨酸含量最高,较 D 处理提高 72.6% ($P < 0.05$) (图 7C)。

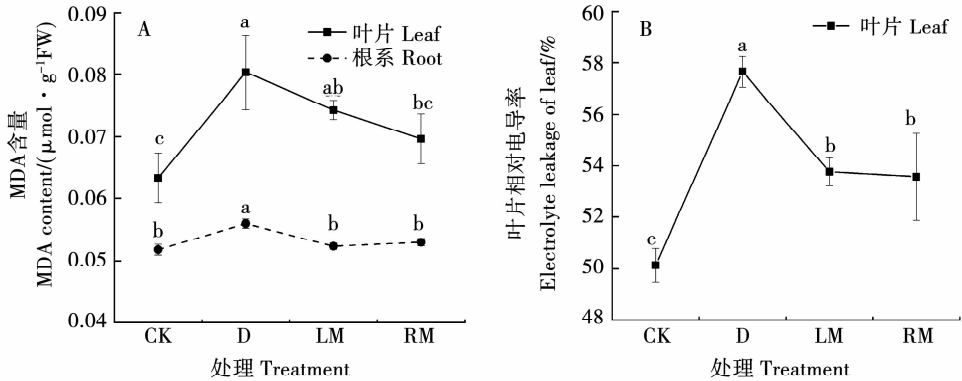


图 6 干旱胁迫下外源性褪黑素对大豆苗期 MDA 含量及 EL 的影响

Fig. 6 Effect of exogenous melatonin on MDA content and EL in soybean seedling under drought stress

in soybean seedling under drought stress

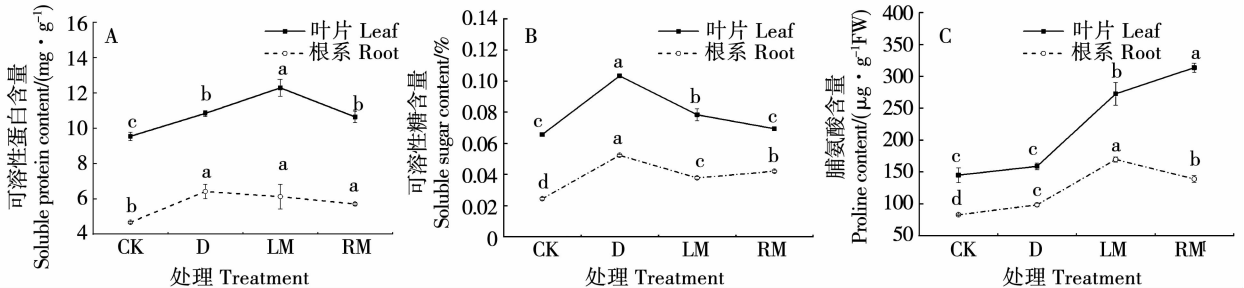


图 7 干旱胁迫下外源性褪黑素对大豆苗期渗透调节物质的影响

Fig. 7 Effects of exogenous melatonin on soybean seedling osmotic adjustment substances under drought stress

adjustment substances under drought stress

2.5 主成分分析

2.5.1 叶片相关生理指标的主成分分析

如图 8 所示,第 1 和第 2 主成分的效应分别为 $\text{PC1} = 71.05\%$ 、 $\text{PC2} = 25.01\%$,双标图反映了各处理真实信息的 96.06%。通过将最外层处理点 (CK、RM、LM、D) 与直线连接形成多边形。从中心点垂直于两边的 3 条虚线将整个图形分成 3 个区域。其中 O_2^- 、 H_2O_2 和膜脂过氧化产物 MDA 分布在以 D 处理为顶点的区域内,表明这 3 个指标在 D 处理下高于其它处理,指标向量间的夹角呈锐角,说明彼此间为正相关关系。因此,D 处理下大豆叶片的 O_2^- 、MDA 和 H_2O_2 含量相对较高,损伤程度大于其它处理。CK 区域内分布的指标有叶绿素含量和气体交换参数,且各指标向量间为锐角,呈正相关关系,表明大豆叶片的叶绿素含量和气体交换参数以 CK 处理的数值最高。以 RM 处理为顶点的区域内还包括了 LM 处理,抗氧化酶、抗氧化剂及渗透调节物质等指标则分布在该区域内,其中 SOD、GSH

以及游离脯氨酸 (Pro) 靠近 RM 处理, CAT、POD、APX、可溶性蛋白以及抗坏血酸则靠近 LM 处理,表明对应的指标分别在 RM 和 LM 处理下较高,褪黑素处理下提高了抗氧化酶活性,增加了渗透调节物质。由此可知,在干旱胁迫下,大豆叶片的活性氧增加,导致膜脂过氧化加剧,破坏了氧化代谢平衡,而褪黑素处理后,通过提高抗氧化酶活性、抗氧化剂和渗透调节物质含量,缓解了胁迫损伤,稳定了氧化代谢水平。研究结果反映了褪黑素对 PEG 胁迫下抗氧化酶活性和渗透调节含量的调节作用。

2.5.2 根系相关生理指标的主成分分析 如图 9 所示,第 1、第 2 主成分的效应分别为 $\text{PC1} = 59.75\%$ 、 $\text{PC2} = 33.70\%$,双标图反映了各处理真实信息的 93.45%。连接最外层各处理顶点 (CK、RM、D),作各边的垂直虚线将整个图形分成 3 个区域。由图可知,根干重分布在以 CK 为顶点的区域内,表明对照的根干重最大。以 D 处理为顶点的区域内分布的指标为 MDA、 H_2O_2 、 O_2^- 、可溶性糖 (SS) 以及

可溶性蛋白 (SP), 表明干旱胁迫导致大豆根系活性氧含量的增加, 膜脂过氧化作用增强, 其渗透调节物质含量也有所增加, 因此损伤程度大于其它处理。而抗氧化酶、抗氧化剂以及 Pro 等指标则分布在以 RM 处理为顶点的区域内, 表明干旱胁迫下根施褪黑素处理的抗氧化酶活性、Pro 和抗氧化剂含量最高, 降低了膜脂的过氧化程度, 缓解了干旱胁迫对大豆根系的影响, 各指标间的正相关关系及协调作用能够更好地清除由干旱胁迫产生的过量活性氧, 稳定细胞的氧化代谢平衡, 其中 RM 与各指标的相关系数优于 LM。

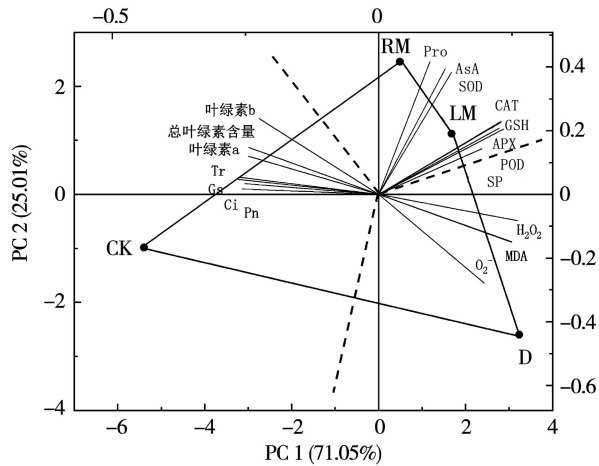


图8 干旱胁迫下外源褪黑素对大豆苗期叶片生理指标影响的主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis on the effects of exogenous melatonin on relative physiological indexes of soybean leaves in soybean seedling under drought stress

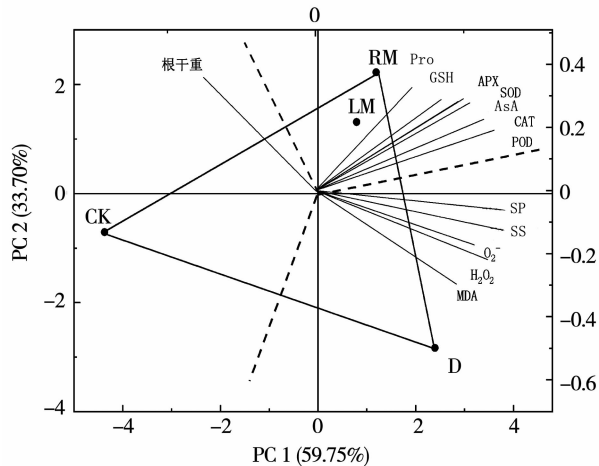


图9 干旱胁迫下外源褪黑素对大豆苗期根系生理指标影响的主成分分析

Fig. 9 Principal component analysis on the effects of exogenous melatonin on relative physiological indexes of soybean roots in soybean seedling under drought stress

3 讨论

光合作用是植物利用太阳光能将 CO_2 和水转化为碳水化合物的过程^[16]。干旱胁迫下, 植株叶片气孔关闭, 降低 Tr 、 Ci 和叶绿素含量, 影响光能捕捉能力, 使净光合速率降低^[17], 从而降低碳水化合物的合成, 减少生物量的积累。本研究中, 与 CK 相比, 干旱胁迫下, 大豆叶片的叶绿素 a、b 和总叶绿素含量显著降低, Pn 、 Tr 、 Gs 和 Ci 均显著降低, 说明干旱胁迫降低了大豆的光合作用。而与不施加褪黑素处理相比, 干旱胁迫下施用褪黑素后, 大豆叶片的叶绿素 a、b 和总叶绿素含量显著增加, 气体交换参数和干物质积累量显著提高。这与刘领等^[18]、杨小龙等^[19] 研究干旱胁迫下褪黑素对烤烟和番茄光合作用的影响结果一致。表明外源褪黑素能够缓解干旱胁迫带来的光合损伤, 满足了光合作用所需的场所和加工原料, 提高干旱胁迫下大豆的光合作用能力。

干旱条件下大量积累的光量子与氧分子结合, 加剧了 ROS 的产生, 研究指出低浓度的 ROS (O_2^- 和 H_2O_2) 有利于植物的生理代谢, 但高浓度的 ROS 则会损害植物生物膜系统^[20]。相对电导率和 MDA 含量也显著增加^[21]。本研究中, 与 CK 相比, 干旱胁迫下大豆叶片和根系中 O_2^- 、 H_2O_2 、MDA 和相对电导率含量显著增加, 说明干旱胁迫打破了大豆体内氧化代谢平衡, ROS 大量积累导致细胞生物膜受损。而干旱胁迫下施用褪黑素后, O_2^- 、 H_2O_2 和 MDA 含量以及相对电导率均显著下降, 其中 RM 处理降低的幅度大于 LM 处理。

逆境胁迫下, 植物体内的活性氧清除剂 (如抗氧化酶 SOD、POD、CAT、APX 和非酶类抗氧化剂 AsA、GSH) 显著增加, 以清除过量的 ROS^[11, 20], 缓解逆境胁迫对植株的损伤。本研究中, 干旱胁迫下大豆叶片和根系中抗氧化酶活性、AsA 和 GSH 含量均有所增加。而干旱胁迫下施用褪黑素后, 这些抗氧化酶活性和非酶类抗氧化剂含量均得到了进一步的提高, 其中 RM 处理提高的幅度大于 LM 处理, 但 CAT、APX 活性与 D 处理相比则没有达到显著差异水平, 这可能是不同种类活性氧清除剂作用的先后顺序和途径所影响的。结果表明外源褪黑素通过提高抗氧化酶活性和非酶类抗氧化剂含量, 来清除由干旱胁迫积累过多的 O_2^- 和 H_2O_2 , 缓解细胞生物膜的损伤, 使得 MDA 含量和相对电导率得到降

低。叶片喷施的大豆植株在遭遇干旱胁迫后相较于根系浇灌处理,其受到的伤害较大,这一点在 O_2^- 、 H_2O_2 和 MDA 等指标上均有体现,推测根系浇灌直接将褪黑素作用于根部,利于褪黑素吸收,起到了提高可溶性糖和可溶性蛋白含量的作用,增强了根系细胞壁的防御能力,有效防止了干旱胁迫对根部的进一步侵害。

渗透调节是植物在干旱胁迫下维持细胞膨压,保证作物正常代谢的重要过程,当植物受到干旱胁迫时,植物体内的可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸等渗透调节物质便会增加^[22],通过渗透调节降低细胞水势,保持膨压,有助于保持细胞水分和膜的完整性,以应对干旱环境^[23]。本研究中,与 CK 相比,干旱胁迫下大豆叶片和根系的可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸含量显著增加,说明大豆体内的渗透调节系统对干旱胁迫做出了应激反应。而干旱胁迫下施用褪黑素后,可溶性蛋白、游离脯氨酸含量较 D 处理进一步上升,但可溶性糖含量则有所降低,这可能是不同有机调节物质相互作用的影响。本研究结果表明干旱胁迫下褪黑素的施用能够进一步提高渗透调节物质的含量,更好地调节细胞渗透势,缓解干旱胁迫对细胞膨压带来的负面影响。后续研究可采用叶片喷施和根部浇灌方法施用褪黑素后进行转录组或其它组学分析,以探究褪黑素缓解干旱胁迫损伤的相关代谢通路以及差异功能基因,从而明确褪黑素在叶片和根中的作用机理。

4 结 论

干旱胁迫下施用褪黑素能够提高抗氧化酶活性、非酶类抗氧化剂和渗透调节物质的含量,清除过量的活性氧,降低 MDA 含量和相对电导率,缓解干旱胁迫对细胞的氧化损伤,提高叶片光合色素含量,调节气孔关闭状态,进而促进叶片对光能的利用以及 CO_2 的交换,最终提高大豆的光合作用,促进碳水化合物合成和积累,增加干物质积累量,而且根施(RM)的效果好于叶喷(LM)。

参考文献

[1] 庞艳梅. 水分胁迫对大豆生长发育、生理生态特征及养分转移的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008. (Pang Y M. Effects of water stress on growth and development, physiological characteristics and nutrient distribution of soybean [D]. Beijing:

Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.)

- [2] 刘丽君, 林浩, 唐晓飞, 等. 干旱胁迫对不同生育阶段大豆产量形态建成的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(3): 405-412. (Liu L J, Lin H, Tang X F, et al. Drought stress influence soybean yield morphogenesis in different growth stages [J]. Soybean Science, 2011, 30(3): 405-412.)
- [3] 赵立琴. 干旱胁迫对大豆抗旱生理指标及产量和品质影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014. (Zhao L Q. Effect of drought stress on soybean biological drought-resistance indexes yield and quality [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.)
- [4] 刘月, 寇从贤, 付桂萍, 等. 褪黑素对大豆幼苗盐害的缓解效应及机理研究[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(6): 813-819. (Liu Y, Kou C X, Fu G P, et al. Effect of exogenous melatonin on soybean seedlings under salt stress [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2017, 39(6): 813-819.)
- [5] 王明瑶, 曹亮, 于奇, 等. 褪黑素浸种对盐碱胁迫下大豆种子萌发的影响[J]. 作物杂志, 2019(6): 195-202. (Wang M Y, Cao L, Yu Q, et al. Effects of melatonin soaking on germination of soybean seeds under saline-alkali stress [J]. Crops, 2019(6): 195-202.)
- [6] 于奇, 曹亮, 金喜军, 等. 低温胁迫下褪黑素对大豆种子萌发的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(1): 56-62. (Yu Q, Cao L, Jin X J, et al. Effects of melatonin on seed germination of soybean under low temperature stress [J]. Soybean Science, 2019, 38(1): 56-62.)
- [7] 徐向东, 孙艳, 郭晓芹, 等. 褪黑素对高温胁迫下黄瓜幼苗抗坏血酸代谢系统的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2580-2586. (Xu X D, Sun N, Guo X Q, et al. Effects of exogenous melatonin on ascorbate metabolism system in cucumber seedlings under high temperature stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2580-2586.)
- [8] 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.
- [9] 何松榆, 秦彬, 张明聪, 等. 水分胁迫下外源褪黑素对大豆苗期抗氧化特性和产量的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(3): 407-412. (He S Y, Qin B, Zhang M C, et al. Effects of exogenous melatonin on antioxidant properties and yield of soybean seedling under water stress [J]. Soybean Science, 2019, 38(3): 407-412.)
- [10] 秦彬, 张明聪, 何松榆, 等. 褪黑素浸种对大豆种子萌发过程中干旱胁迫的缓解效应及其生理机制[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 192-198. (Qin B, Zhang M C, He S Y, et al. Alleviating effect of melatonin soaking on drought stress during soybean seed germination [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 192-198.)
- [11] Reiter R J, Tan D X, Terron M P, et al. Melatonin and its metabolites: New findings regarding their production and their radical scavenging actions [J]. Acta Biochimica Polonica-English

Edition, 2007, 54(1): 1-9.

- [12] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. (Zou Q. Plant physiology experiment guide [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.)
- [13] 郭欣欣, 李晓锋, 朱红芳, 等. 淹水胁迫对不结球白菜抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(12): 2181-2187. (Guo X X, Li X F, Zhu H F, et al. Effects of water logging stress on ascorbate-glutathione cycle in *Brassica campestris* ssp [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(12): 2181-2187.)
- [14] Chaitanya K K, Naithani S C. Role of superoxide, lipid peroxidation and superoxide dismutase in membrane perturbation during loss of viability in seeds of *Shorea robusta* Gaertn. f. [J]. New Phytologist, 1994, 126(4): 623-627.
- [15] Mukherjee S P, Choudhuri M A. Implications of water stress-induced changes in the levels of endogenous ascorbic acid and hydrogen peroxide in *Vigna* seedlings[J]. Physiologia Plantarum, 1983, 58(2): 166-170.
- [16] Takahashi S, Badger M R. Photoprotection in plants: A new light on photosystem II damage[J]. Trends in Plant Science, 2011, 16(1), 53-60.
- [17] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. Annals of Botany, 2009, 103(4): 551-560.
- [18] 刘领, 李冬, 马宜林, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下烤烟幼苗生长的缓解效应与生理机制研究[J]. 草业学报, 2019, 28(8): 95-105. (Liu L, Li D, Ma Y L, et al. Alleviation of drought stress and the physiological mechanism in tobacco seedlings treated with exogenous melatonin [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(8): 95-105.)
- [19] 杨小龙, 须晖, 李天来, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下番茄叶片光合作用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(16): 3186-3195. (Yang X L, Xu H, Li T Li, et al. Effects of exogenous melatonin on photosynthesis of tomato leaves under drought stress [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(16): 3186-3195.)
- [20] Wang W B, Kim Y H, Lee H S, et al. Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and drought stresses [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47: 570-577.
- [21] Dingkuhn M, Cruz R T, O'Toole J C, et al. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits. III. Accumulation of abscisic acid and proline in relation to leaf water-potential and osmotic adjustment [J]. Field Crops Research, 1991, 27: 103-117.
- [22] 李菁华. 干旱胁迫下外源 ABA 对鼓粒期大豆抗旱生理特性及产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2017. (Li J H. Effects of ABA on physiological characteristics and yield at drum-grain stage of soybean under drought stress [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017.)
- [23] 吴燕, 连洪燕, 牟雪姣, 等. 干旱胁迫下叶面喷施褪黑素对滁菊幼苗生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(11): 2241-2246. (Wu Y, Lian H Y, Mu X J, et al. Effects of foliar spraying exogenous melatonin on physiological and biochemical characteristics of dendrothermal moratorium Chuju seedlings under drought stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(11): 2241-2246.)

欢迎订阅 2021 年《大豆科学》

《大豆科学》是由黑龙江省农业科学院主管主办的大豆专业性学术期刊,被国内外多家重要数据库和文摘收录源收录的重点核心期刊。主要刊登有关大豆遗传育种、品种资源、生理生态、耕作栽培、植物保护、营养肥料、生物技术、食品加工、药用功能及工业用途等方面的学术论文、科研报告、研究简报、国内外研究述评、学术活动简讯和新品种介绍等。

《大豆科学》主要面向从事大豆科学研究的科技工作者,大专院校师生、各级农业技术推广部门的技术人员及科技种田的农民。

《大豆科学》为双月刊,16开本,国内外公开发行。国内每期定价:40.00元,全年240.00元,邮发代号:14-95。国外每期定价:40.00美元(含邮资),全年240.00美元,国外代号:Q5587。全国各地邮局均可订阅,也可向编辑部直接订购。

地址:哈尔滨市南岗区学府路368号《大豆科学》编辑部

邮编:150086

电话:0451-86668735

网址:<http://ddkx.haasep.cn>

E-mail:soybeanscience@vip.163.com

