

谢章书, 廖良秀, 李侃, 等. 种子球化处理、播种密度和播期对直播棉生理特性及生长发育的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(6): 1312-1322.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.06.006

种子球化处理、播种密度和播期对直播棉生理特性及生长发育的影响

谢章书¹, 廖良秀², 李侃¹, 杨丹¹, 周成轩¹, 朱方歌¹, 许豆豆¹, 刘爱玉¹, 周仲华¹

(1. 湖南农业大学农学院/作物生理与分子生物学教育部重点实验室, 湖南长沙 410128; 2. 衡阳县农业农村局, 湖南衡阳 421299)

摘要: 为了适应长江流域油(麦)后直播棉轻简化、机械化栽培模式, 同时提高直播棉棉苗的生理素质, 从而实现棉花高产稳产, 以湖南农业大学棉花研究所选育的早熟直播棉品种 JX0010 为供试材料, 进行棉花种子球化处理, 以未球化处理的棉花种子为对照, 于 2021 年在湖南农业大学耘园科研基地进行不同播种密度和播期的大田比较试验。结果表明, 种子球化处理能够显著提高棉花苗期可溶性蛋白质含量和超氧化物歧化酶活性, 提高棉花苗期株高, 增加棉花蕾期果枝数; 高密度栽培(1 hm² 45 000 株) 较低密度栽培(1 hm² 30 000 株) 能明显增加棉花蕾期的可溶性蛋白质含量, 可提高棉花蕾期的超氧化物歧化酶活性; 晚播(6 月 5 日) 较早播(5 月 25 日) 能提高棉花蕾期的 SPAD 值, 明显提高棉花苗期的可溶性蛋白质含量、吐絮期硝酸还原酶活性, 总体降低棉花苗期、蕾期的丙二醛含量, 缓解棉花叶片细胞衰老。此外, 晚播还可以改善棉花的农艺性状, 明显提高苗期、花铃期棉花株高。综合分析可知, 利用种子球化处理, 结合高密度栽培和晚播可有效提高棉苗的生理素质, 改善棉花的生理代谢, 促进棉花营养生长, 改善源库关系, 为实现棉花高产、稳产奠定基础。同时, 该试验模式也可为长江流域植棉轻简化、机械化栽培提供理论依据。

关键词: 棉花; 播种密度; 播期; 种子处理; 生理特性; 生长发育

中图分类号: S561.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)06-1312-11

Effects of seed spheroidization, sowing density and sowing date on physiological characteristics and growth and development of direct seeding cotton

XIE Zhang-shu¹, LIAO Liang-xiu², LI Kan¹, YANG Dan¹, ZHOU Cheng-xuan¹, ZHU Fang-ge¹, XU Dou-dou¹, LIU Ai-yu¹, ZHOU Zhong-hua¹

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology and Molecular Biology, Ministry of Education, Changsha 410128, China; 2. Agricultural and Rural Bureau of Hengyang County, Hengyang 421299, China)

Abstract: In order to adapt to the simplified and mechanized cultivation mode of cotton planting after rape (wheat) in Yangtze River Basin, and improve the physiological quality of direct-seeded cotton seedlings, so as to achieve high and stable yield, the early-maturing direct-seeded cotton variety-JX0010 selected by the Cotton Research Institute of Hunan Agricultural University was used as the test material, and the cotton seeds were spheroidized. Unspheroidized seeds were used as the control. In 2021, a field comparative experiment with different sowing densities and sowing dates was carried out in the scientific research base of Hunan Agricultural University. The results showed that seed spheroidization treatment could significantly increase the soluble protein content and superoxide dismutase activity of cotton at seedling stage, increase the plant height of cotton at seedling stage, and increase the

收稿日期: 2022-05-22

基金项目: 湖南省棉花产业技术体系栽培与良种繁育岗位专家项目[湘农发(2022)31号]; 湖南省农业农村厅项目[湘财建指(2022)51号]; 湖南省重点研发计划项目(2020NK2023); 国家重点研发计划项目(2018YFD0100404)

作者简介: 谢章书(1996-), 男, 海南海口人, 博士研究生, 主要从事棉花栽培生理研究。(E-mail) 1127466943@qq.com。廖良秀为共同第一作者

通讯作者: 周仲华, (E-mail) zhouzhonghua1976@hotmail.com

university was used as the test material, and the cotton seeds were spheroidized. Unspheroidized seeds were used as the control. In 2021, a field comparative experiment with different sowing densities and sowing dates was carried out in the scientific research base of Hunan Agricultural University. The results showed that seed spheroidization treatment could significantly increase the soluble protein content and superoxide dismutase activity of cotton at seedling stage, increase the plant height of cotton at seedling stage, and increase the

number of fruit branches of cotton at bud stage. High density cultivation (45 000 plants per hectare) could significantly increase the soluble protein content and superoxide dismutase activity of cotton at the bud stage compared with low density cultivation (30 000 plants per hectare). Late sowing (June 5th) increased the SPAD value at bud stage, significantly increased the soluble protein content at seedling stage and nitrate reductase activity at boll opening stage, reduced the malondialdehyde content at seedling and bud stage, and reduced the degree of cotton leaf cell senescence compared with early sowing (May 25th). The late sowing also improved the agronomic traits of cotton and significantly increased the plant height at the seedling and boll stages. In a comprehensive analysis, the use of seed balling treatment, combined with high density and late sowing could effectively improve the physiological quality of cotton seedlings, improve the physiological metabolism of cotton, promote the vegetative growth of cotton, improve the source-sink relationship, and lay the foundation for achieving high and stable cotton yield. The experiment model can also provide theoretical basis for simplified and mechanized cotton cultivation in the Yangtze River Basin.

Key words: cotton; seeding density; sowing date; seed treatment; physiological characteristics; growth and development

棉花素有植物“白金”之称^[1],是重要的经济作物、战略物资和生产原料^[2]。中国是世界上棉花产量最高的国家,棉花主要种植于长江流域、黄河流域和西北内陆等地区。湖南省位于长江以南,热量充足、降水充沛等得天独厚的农业气候特点和区位优势使其成为中国最南端的棉花主产省^[3]，“江花出楚中”更是湖南省农民快乐植棉的生动写照。湖南省种植棉花拥有悠久的历史 and 传统^[4],在保障中国棉花供给安全和促进农民脱贫增收中发挥了重要作用^[5]。进入 21 世纪以来,现代农业机械装备逐渐开始代替传统人工作业,使得种植管理得到简化,劳作强度得到减轻,农艺农机之间相互融合,从而实现棉花生产轻简化和机械化,因此现代农业机械装备化已经成为棉花产业的发展趋势^[6]。机械精播、绿色经济施肥、集约轻简育苗、节水灌溉、集中成铃调控和采收等被认为是棉花轻简化栽培的关键技术^[7]。一播全苗、壮苗是棉花高产稳产的基础环节,但是棉花种子直播入土后,土壤中的病菌、虫害往往会造成棉种迟发、坏死,并引发苗期病虫害大面积发生,造成出苗率下降、棉苗素质低,对棉花产量、品质有较大影响。通过种子播前处理以提高出苗率、棉苗素质是近年来研究的热点和重点^[8],以种子包衣、丸(粒)化等为代表的种子播前处理技术不断应用在棉花生产中^[9]。近年来,受到农业结构调整和种植经济效益等因素的影响,种子、农药、水肥等重要农业生产要素价格上涨,尤其是劳动力成本大幅上涨,使中国的植棉成本优势不断弱化;昂贵的包衣成本,复杂的丸(粒)化工艺制作流程,进一步增加了棉花种植成本,导致棉花种植面积不断

减少。此外,棉花属于子叶出土型植物,吸附在棉种壳上的包衣剂或丸(粒)化剂随着棉苗子叶、胚芽的伸长而滞留在土壤表层,往往具有较短的时效性,或者不能在棉花种子萌发和后期幼苗生长过程中继续发挥作用^[10]。传统的种子包衣及丸(粒)化处理都是作用于单粒棉种,无法在生产种植上形成有效的“种子汇集”,实现多粒种子萌发成苗。因此,进一步探索棉花种子播前处理技术、提高出苗率、实现种子带肥带药入土、延长肥药持效期,对于实现棉花的机械化播种和保障植棉安全非常重要。

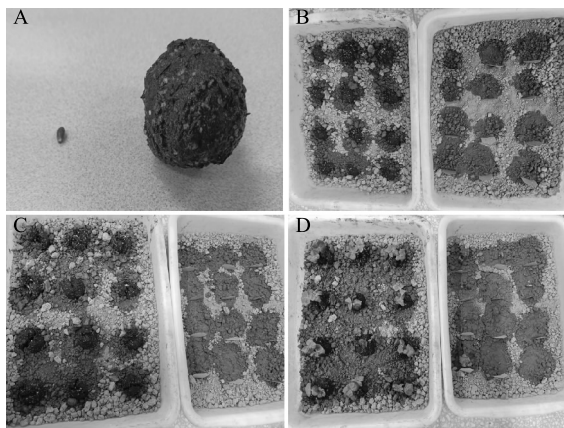
本研究拟在课题组前期盆栽试验的基础上^[11],利用木薯改良型淀粉、硅藻土、凹凸棒土、膨润土和基质对棉花种子进行球化处理,以未球化处理的棉花种子为对照,通过大田试验,探究棉花种子适宜的播期和播种密度,以期最大程度实现“一粒种子,一棵苗”,为长江流域油(麦)后直播棉轻简化、机械化栽培提供技术指导和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2021 年 5 月在湖南农业大学耘园科研基地(现为岳麓山实验室项目建设中心)开展试验。基地土壤为红黄壤,耕作层土壤 pH 值为 6.4,有机质、全氮、全磷含量分别为 6.4 g/kg、0.7 g/kg、2.5 g/kg,速效磷、速效钾含量分别为 7.7 mg/kg、97.7 mg/kg。试验前翻晒土壤并用多菌灵进行消毒处理,以消除其他微生物对试验造成的影响。基于前期研究结果(图 1),采用种子处理(A,主区因素)、播种密度(B,副区因素)、播期(C,副副区因素)3 个因素再作裂

区设计。种子处理设置如下:球化种子(A1)、未球化种子(A2)。播种密度设 2 个水平:1 hm²30 000 株(B1)、1 hm²45 000 株(B2)。播期设 2 个水平:5 月 25 日(C1)、6 月 5 日(C2)。试验重复 3 次,田埂高约 8 cm,共 24 个小区,每个小区种植 4 行棉花,小区面积为 20 m²(5 m×4 m),小区周围设置长、宽各约 1 m 的保护行。根据播种密度,挖孔精播,每孔穴深约 4~5 cm,每穴分别放置 1 颗棉花种子球化物(或 2 粒种子),用基土覆盖后浇水,以保证试验的一致性和准确性。在试验中观察并记录出苗情况,及时进行间苗、补苗。其他田间栽培和管理方法按照湖南省地方规范《棉花栽培技术规范》(DB43/T 286-2006)^[12]执行。



A:播种前的未球化种子(左)与球化种子(右);B:播种当天的球化种子(左)与未球化种子(右);C:播种后 3 d 的球化种子(左)与未球化种子(右);D:播种后 6 d 的球化种子(左)与未球化种子(右)。

图 1 球化棉花种子与对照的盆栽试验

Fig.1 Cotton seed spheroidization and control pot experiment

1.2 供试材料

供试棉花种子为湖南农业大学棉花研究所提供的常规早熟直播棉品种 JX0010,试验前将棉花种子用浓硫酸进行脱绒处理并晒种,精选饱满且大小基本一致的棉籽作为试验材料。

木薯改良型淀粉购买自山东华运达新材料有限公司;硅藻土、膨润土分别购买自山东川山国际矿业有限公司、广州拓亿新材料有限公司;凹凸棒土购买自安徽天科矿物有限公司;基质为湖南省湘晖农业技术开发有限公司产品,由湖南农业大学湘晖农业技术研究所研发,其中有机质含量 $\geq 35\%$,pH 值 5.5~7.5,主要成分为泥炭土、珍珠岩、蛭石、椰子

糠、缓释有机肥等。

1.3 测定项目与方法

棉花出苗后,在每个小区中间行内选择生长相对一致、具有代表性且连续的 5 株棉株进行挂牌标记,进行试验项目的测定。

棉花生理生化指标的测定。在棉花苗期、蕾期、花铃期、吐絮期 4 个时期,选取棉株主茎中下部棉叶用于测定 SPAD 值、可溶性蛋白质(Soluble protein, SP)含量、可溶性糖(Soluble sugar, SS)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量、硝酸还原酶(Nitrate reductase, NR)活性。其中,SPAD 值采用日本 Monita 公司生产的便携式叶绿素测定仪 SPAD-502PLUS 测定,测定时避开叶片中心叶脉部位,每张叶片选取 3 个点进行测定,求平均值,即为该处理的 SPAD 值;可溶性蛋白质含量的测定参照 Bradford 法^[13];超氧化物歧化酶(SOD)、硝酸还原酶(NR)活性及丙二醛(MDA)、可溶性糖(SS)含量的测定均用 Sangon Biotech 公司提供的检测试剂盒,具体测定方法参照试剂盒内的使用说明书。

棉花农艺性状的调查。于棉花苗期、蕾期、花铃期和吐絮期测量各小区棉株的株高;于棉花蕾期、花铃期和吐絮期调查棉株的果枝数;于棉花吐絮期测量棉株的始节高度(第一果枝高度)。以上测量各重复 3 次,取平均值,精确到 0.1。

1.4 数据处理与分析

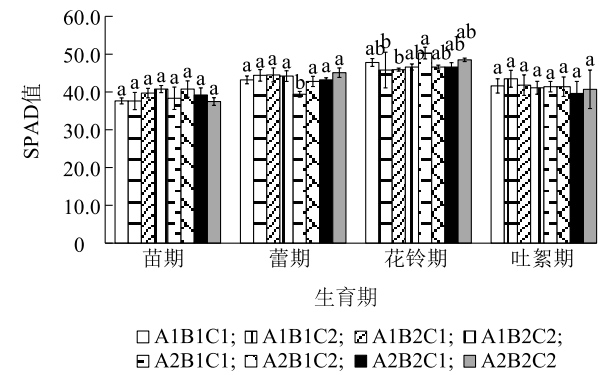
用 Excel 2010 进行数据整理并绘图,用 DPS 7.05 进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理对棉花生理特性的影响

2.1.1 SPAD 值 作为决定作物产量潜力的重要因素,光合作用的强弱影响叶片叶绿素含量,而 SPAD 值可以在一定程度上反映叶片的叶绿素含量^[14]。如图 2、表 1 所示,随着棉花生育进程的推进,不同处理的棉花叶片 SPAD 值先呈现出上升趋势,在花铃期达到最大值。在苗期,各处理组棉花叶片的 SPAD 值为 37.5~40.8, A1B2C2、A2B1C2 处理的 SPAD 值最高(40.8),种子处理×播种密度×播期对 SPAD 值具有显著影响, A2B2C1 处理的 SPAD 值比 A1B1C2 处理提高了 4.26%;在蕾期,播期对 SPAD 值有显著正向影响;在花铃期,播种密度×播期对

SPAD 值具有显著影响,A1B1C1 处理的 SPAD 值比 A1B2C2 处理高 2.58%;在吐絮期,各处理组棉花叶片的 SPAD 值为39.6~43.5,方差分析结果表明,各处理的 SPAD 值虽在不同程度上呈现差异,但并未有显著差异。



A1:球化种子;A2:未球化种子;B1:播种密度 1 hm²30 000株;B2:播种密度 1 hm²45 000株;C1:播期 5 月 25 日;C2:播期 6 月 5 日。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图2 不同处理对棉花叶片 SPAD 值的影响
Fig.2 Effects of different treatments on SPAD value of cotton leaves

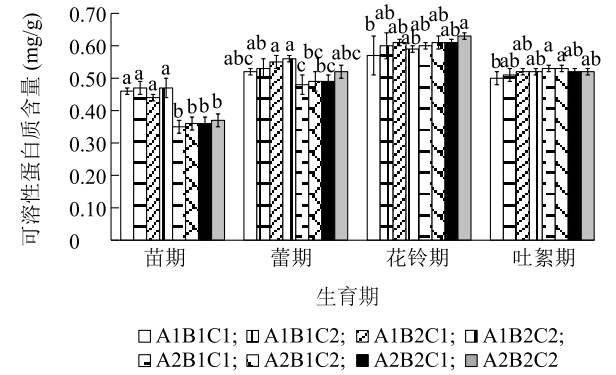
表1 不同处理下棉花叶片 SPAD 值的方差分析结果
Table 1 Variance analysis results of SPAD value of cotton leaves under different treatments

因素	不同因素对棉花叶片 SPAD 值影响的 P 值			
	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期
种子处理	0.988 7	0.083 3	0.171 7	0.384 5
播种密度	0.529 4	0.060 1	0.504 2	0.354 6
播期	0.454 6	0.019 5 *	0.292 9	0.640 0
种子处理×播种密度	0.117 4	0.162 1	0.852 8	0.962 4
种子处理×播期	0.884 3	0.083 6	0.815 0	0.949 7
播种密度×播期	0.196 6	0.214 5	0.011 8 *	0.752 8
种子处理×播种密度×播期	0.036 8 *	0.966 2	0.335 0	0.442 2

* 表示影响显著($P<0.05$)。

2.1.2 可溶性蛋白质含量 可溶性蛋白质作为影响作物生长发育的生理指标,其含量主要与作物对干旱等逆境的抵抗能力相关^[15]。如图 3、表 2 所示,随着棉花生育进程的推进,棉花叶片中的可溶性蛋白质含量呈现出先增加后减少的趋势。从苗期开始,棉花叶片中的可溶性蛋白质含量增加得较快,于花铃期达到最大值,至吐絮期则降低。在苗期,种子处理对棉花叶片中可溶性蛋白质含量有显著影响,A1 处理的可

溶性蛋白质含量比 A2 处理高25.71%~27.03%。播期对棉花苗期叶片中的可溶性蛋白质含量有显著正向影响。在蕾期,播种密度对棉花叶片中可溶性蛋白质含量有显著正向影响,B2 处理的可溶性蛋白质含量比 B1 处理高2.08%~5.66%。在花铃期,棉花叶片的可溶性蛋白质含量为0.59~0.63 mg/g,此时各处理组的可溶性蛋白质含量达到棉花全生育时期的最大值。种子处理×播种密度×播期对花铃期棉花叶片中的可溶性蛋白质含量具有显著影响,A2B2C2 处理的棉花叶片可溶性蛋白质含量比 A1B1C1 处理高 0.06 mg/g。在吐絮期,棉花叶片中的可溶性蛋白质含量为 0.50~0.53 mg/g。



A1:球化种子;A2:未球化种子;B1:播种密度 1 hm²30 000株;B2:播种密度 1 hm²45 000株;C1:播期 5 月 25 日;C2:播期 6 月 5 日。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图3 不同处理对棉花叶片中可溶性蛋白质含量的影响
Fig.3 Effects of different treatments on soluble protein content in cotton leaves

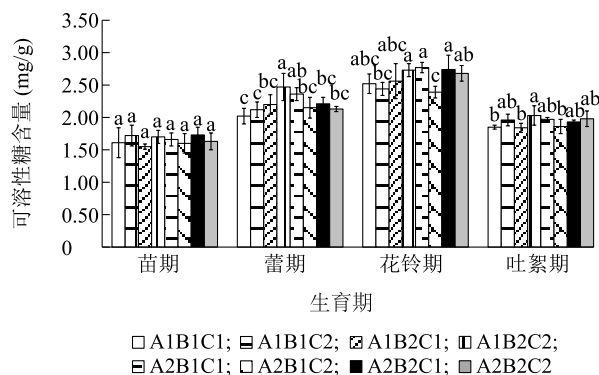
表2 不同处理下棉花叶片中可溶性蛋白质含量方差分析结果
Table 2 Variance analysis results of soluble protein content in cotton leaves under different treatments

因素	不同因素对可溶性蛋白质含量影响的 P 值			
	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期
种子处理	0.048 9 *	0.093 2	0.327 7	0.295 2
播种密度	0.713 1	0.011 1 *	0.320 2	0.650 5
播期	0.029 9 *	0.331 6	0.135 2	0.310 6
种子处理×播种密度	0.307 4	0.326 0	0.916 9	0.084 4
种子处理×播期	0.466 3	0.573 8	0.715 4	0.695 1
播种密度×播期	0.297 0	0.831 1	0.080 6	0.988 2
种子处理×播种密度×播期	0.302 7	0.617 2	0.049 5 *	0.802 0

* 表示影响显著($P<0.05$)。

2.1.3 可溶性糖含量 作物中的可溶性糖是重要的

结构物质基础,其分解和代谢可以为作物生长发育提供能量,可溶性糖含量越高,能提供的物质、能量就越多^[16]。如图 4、表 3 所示,随着棉花生育进程的推进,棉花叶片的可溶性糖含量先呈现上升趋势,在花铃期达到最大值后,到吐絮期时下降。从苗期到蕾期,棉花叶片中可溶性糖含量的上升幅度较大。在苗期,各处理棉花叶片的可溶性糖含量为 1.55~1.73 mg/g,方差分析结果显示,各处理间无显著差异。在蕾期,种子处理×播种密度、种子处理×播期均对棉花叶片中的可溶性糖含量有显著影响,A2B2C1 处理的可溶性糖含量比 A1B1C1 处理提高 9.41%,A2B1C2 处理的可溶性糖含量比 A1B1C1 处理提高 6.44%。在花铃期,种子处理×播期、播种密度×播期均对棉花叶片中的可溶性糖含量有显著影响,A2B2C2 处理的可溶性糖含量比 A1B2C1 处理高 0.12 mg/g,A1B2C2 处理的可溶性糖含量比 A1B1C1 高 0.21 mg/g。在吐絮期,种子处理×播期对棉花叶片中的可溶性糖含量有显著影响,A2B2C2 处理的可溶性糖含量比 A1B2C1 处理高 0.14 mg/g。



A1: 球化种子; A2: 未球化种子; B1: 播种密度 1 hm²30 000 株; B2: 播种密度 1 hm²45 000 株; C1: 播期 5 月 25 日; C2: 播期 6 月 5 日。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同处理对棉花叶片中可溶性糖含量的影响

Fig.4 Effects of different treatments on soluble sugar content in cotton leaves

2.1.4 超氧化物歧化酶活性 超氧化物歧化酶可以减少细胞中初级活性氧的产生,降低其对细胞的毒害作用,提高植物对非生物胁迫的耐受能力^[17]。如图 5、表 4 所示,随着棉花生长发育进程的推进,各处理组棉花叶片中的超氧化物歧化酶活性呈现先增加后降低的趋势,在花铃期达到最大值,在吐絮期降低。在苗期,A1、A2 处理的棉花叶片中的超氧化物歧化酶活性分别为 113.61~119.67 U/g、86.37~

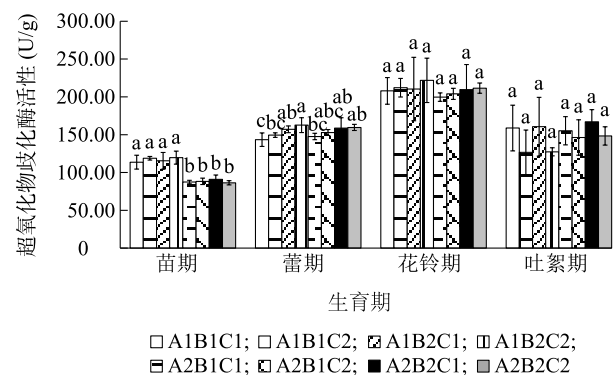
90.97 U/g。在蕾期,播种密度对棉花叶片中的超氧化物歧化酶活性有显著正向影响;B2 处理的棉花叶片中的超氧化物歧化酶活性比 B1 处理高 6.38%~9.61%。在花铃期,棉花叶片中的超氧化物歧化酶活性为 199.68~221.82 U/g,各处理之间无显著差异。在吐絮期,播期对棉花叶片中的超氧化物歧化酶活性有显著影响,C1、C2 处理棉花叶片中的超氧化物歧化酶活性分别为 155.17~167.00 U/g、126.68~148.30 U/g,C2 处理的棉花叶片中的超氧化物歧化酶活性比 C1 处理低 12.61%~22.49%。

表 3 不同处理下棉花叶片中可溶性糖含量的方差分析结果

Table 3 Variance analysis results of soluble sugar content in cotton leaves under different treatments

因素	不同因素对可溶性糖含量影响的 P 值			
	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期
种子处理	0.788 9	0.919 7	0.517 1	0.221 1
播种密度	0.935 2	0.132 1	0.114 7	0.508 1
播期	0.639 1	0.744 5	0.110 6	0.117 1
种子处理×播种密度	0.457 9	0.014 6*	0.806 2	0.968 2
种子处理×播期	0.061 8	0.013 7*	0.019 1*	0.028 9*
播种密度×播期	0.947 0	0.225 0	0.013 2*	0.127 2
种子处理×播种密度×播期	0.703 1	0.912 1	0.765 0	0.579 2

* 表示影响显著 ($P < 0.05$)。



A1: 球化种子; A2: 未球化种子; B1: 播种密度 1 hm²30 000 株; B2: 播种密度 1 hm²45 000 株; C1: 播期 5 月 25 日; C2: 播期 6 月 5 日。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同处理对棉花叶片超氧化物歧化酶活性的影响

Fig.5 Effects of different treatments on superoxide dismutase activity in cotton leaves

2.1.5 丙二醛含量 丙二醛是细胞膜脂质氧化还原后的最终产物,可以破坏核酸、多糖和蛋白质的结

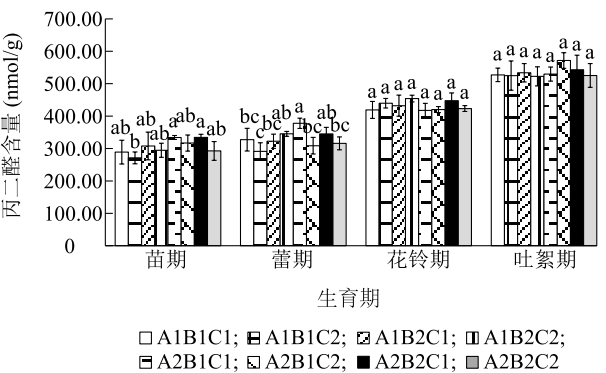
构和功能,其含量与植物受到的胁迫程度呈显著正相关^[18]。如图6、表5所示,随着棉花生育进程的推进,丙二醛含量总体不断增加。在苗期,播期对棉花叶片中的丙二醛含量有显著负向影响,C2处理的丙二醛含量比C1处理低5.20%~6.14%。在蕾期,播期能够显著影响棉花叶片中丙二醛含量,C2处理的丙二醛含量较C1处理低8.59%~9.69%(除A1B2C1处理与A1B2C2处理);种子处理×播期、播种密度×播期均对棉花叶片中的丙二醛含量有显著影响,A1B1C2处理的丙二醛含量比A2B1C1处理低86.57 nmol/g,A1B1C2处理的丙二醛含量比A1B2C1处理低31.23 nmol/g。在花铃期,棉花叶片中的丙二醛含量为417.49~454.01 nmol/g,各处理之间无显著差异。在吐絮期,棉花叶片中的丙二醛含量为522.73~571.54 nmol/g,各处理之间无显著差异。

表4 不同处理下棉花叶片超氧化物歧化酶活性的方差分析结果
Table 4 Variance analysis results of superoxide dismutase activity in cotton leaves under different treatments

因素	不同因素对超氧化物歧化酶活性影响的 P 值			
	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期
种子处理	0.045 6*	0.350 4	0.112 5	0.460 6
播种密度	0.498 4	0.013 9*	0.531 1	0.632 6
播期	0.577 2	0.208 9	0.521 5	0.027 2*
种子处理×播种密度	0.878 2	0.508 9	0.909 3	0.735 2
种子处理×播期	0.214 8	0.685 4	0.779 4	0.329 5
播种密度×播期	0.532 3	0.712 1	0.884 5	0.775 7
种子处理×播种密度×播期	0.657 4	0.783 4	0.776 6	0.819 0

*表示影响显著($P<0.05$)。

2.1.6 硝酸还原酶活性 硝酸还原酶存在于植物细胞的叶绿体和细胞质中,可参与氨基酸的合成和对氮的吸收^[19]。如图7、表6所示,随着棉花生育进程的推进,棉花叶片中的硝酸还原酶活性呈现先增加后减少的趋势。从苗期到花铃期,棉花叶片中的硝酸还原酶活性不断增加,在花铃期时达到最大值,到吐絮期降低。在苗期,各处理棉花叶片中的硝酸还原酶活性为19.32~22.44 U/g,除A2B1C1处理与A1B2C1、A1B2C2、A2B1C2处理间差异显著外,其他各处理之间无显著差异。在蕾期,棉花叶片的硝酸还原酶活性为32.16~37.72 U/g,除A2B2C1处理与A1B1C2、A2B1C1处理间



A1:球化种子;A2:未球化种子;B1:播种密度1 hm²30 000株;B2:播种密度1 hm²45 000株;C1:播期5月25日;C2:播期6月5日。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图6 不同处理对棉花叶片中丙二醛含量的影响
Fig.6 Effects of different treatments on malondialdehyde content in cotton leaves

差异显著外,其他各处理之间无显著差异。在花铃期,棉花叶片的硝酸还原酶活性为36.78~42.49 U/g,除A2B2C1处理与A1B1C1处理间差异显著外,其他各处理之间无显著差异。在吐絮期,播种密度对棉花叶片中的硝酸还原酶活性有显著影响,B2处理的硝酸还原酶活性比B1处理低2.34%~4.08%;此外,播期对硝酸还原酶活性有极显著正向影响,C2处理的硝酸还原酶活性比C1处理高4.78%~14.87%。

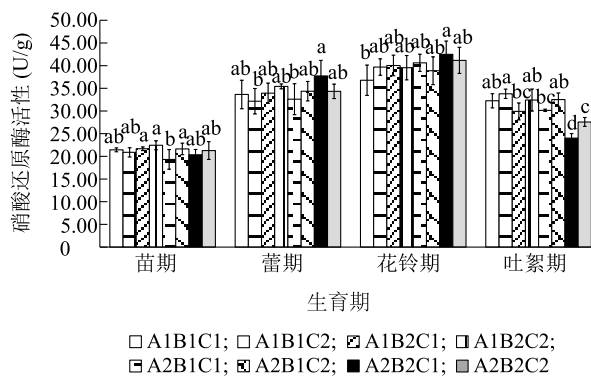
表5 不同处理下棉花叶片中丙二醛含量的方差分析结果
Table 5 Variance analysis results of malondialdehyde content in cotton leaves under different treatments

因素	不同因素对丙二醛含量影响的 P 值			
	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期
种子处理	0.075 9	0.201 5	0.423 9	0.550 5
播种密度	0.731 9	0.676 3	0.097 5	0.220 6
播期	0.041 2*	0.010 7*	0.576 6	0.841 5
种子处理×播种密度	0.254 9	0.220 1	0.857 4	0.128 3
种子处理×播期	0.508 9	0.039 8*	0.103 6	0.503 2
播种密度×播期	0.642 4	0.019 8*	0.462 6	0.228 3
种子处理×播种密度×播期	0.463 6	0.617 5	0.452 7	0.363 4

*表示影响显著($P<0.05$)。

2.2 不同处理对棉花农艺性状的影响

2.2.1 始节高度 由图8可以看出,种子处理、播种密度和播期对棉花始节高度无显著影响,各处理始节高度为20.4~25.3 cm,各处理之间无显著差异。



A1:球化种子;A2:未球化种子;B1:播种密度 $1 \text{ hm}^2 30\ 000$ 株;B2:播种密度 $1 \text{ hm}^2 45\ 000$ 株;C1:播期 5 月 25 日;C2:播期 6 月 5 日。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 不同处理对棉花叶片中硝酸还原酶活性的影响

Fig.7 Effects of different treatments on nitrate reductase activity in cotton leaves

表 6 不同处理下棉花叶片中硝酸还原酶活性的方差分析结果

Table 6 Variance analysis results of nitrate reductase activity in cotton leaves under different treatments

因素	不同因素对硝酸还原酶活性影响的 P 值			
	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期
种子处理	0.387 5	0.2675	0.141 6	0.062 8
播种密度	0.182 4	0.130 8	0.242 3	0.028 3*
播期	0.060 0	0.723 9	0.874 8	0.002 7**
种子处理×播种密度	0.524 1	0.765 2	0.858 5	0.202 9
种子处理×播期	0.094 3	0.721 5	0.191 8	0.485 4
播种密度×播期	0.958 5	0.640 9	0.467 5	0.430 0
种子处理×播种密度×播期	0.134 0	0.093 1	0.354 9	0.926 9

*, ** 分别表示影响显著 ($P < 0.05$)、极显著 ($P < 0.01$)。

2.2.2 株高 由表 7、表 8 可以看出,在棉花各生育时期中,种子球化、播种密度和播期处理对株高具有不同影响。在苗期,种子处理对株高具有显著影响,A1 处理的棉花株高为 33.10~35.80 cm,A2 处理的棉花株高为 25.40~28.50 cm,A1 处理的棉花株高比 A2 处理高 20.70%~30.31%;播期对株高有显著正向影响,随着播期的推迟,棉苗株高增加,C2 处理的株高比 C1 处理提高 3.47%~12.20%。在蕾期,棉花株高为 52.60~70.50 cm,方差分析结果表明,不同因素对棉花株高无显著影响。在花铃期,播期对棉花株高有显著影响,C2 处理的棉花株高比 C1 处理高 4.34%~20.98%。在吐絮期,各处理棉花的

株高为 107.50~123.80 cm,各处理对棉花株高无显著影响。综上可知,种子球化处理能显著提高棉花苗期株高,具体表现为提高棉苗生长速度、加快幼苗的营养生长。播种密度对棉花全生育期株高无显著影响,晚播能显著提高棉花苗期、花铃期的株高。

表 7 不同处理对棉花株高的影响

Table 7 Effects of different treatments on plant height of cotton

处理编号	苗期株高 (cm)	蕾期株高 (cm)	花铃期株高 (cm)	吐絮期株高 (cm)
A1B1C1	34.60±1.91a	66.30±0.98ab	96.00±5.49ab	107.50±12.42a
A1B1C2	35.80±1.15a	68.40±4.16a	108.60±12.78ab	115.10±16.84a
A1B2C1	33.10±3.52a	65.10±7.01ab	103.60±9.20ab	113.20±9.24a
A1B2C2	34.40±3.76a	70.50±3.65a	108.10±12.90ab	117.60±6.27a
A2B1C1	27.00±0.98b	53.50±4.52c	92.00±10.50b	123.80±3.22a
A2B1C2	28.00±3.16b	52.60±9.06c	111.30±8.70a	109.60±12.72a
A2B2C1	25.40±2.57b	56.90±4.72bc	98.00±5.50ab	112.60±5.97a
A2B2C2	28.50±1.85b	58.50±5.52bc	105.30±11.30ab	121.30±9.42a

A1:球化种子;A2:未球化种子;B1:播种密度 $1 \text{ hm}^2 30\ 000$ 株;B2:播种密度 $1 \text{ hm}^2 45\ 000$ 株;C1:播期 5 月 25 日;C2:播期 6 月 5 日。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

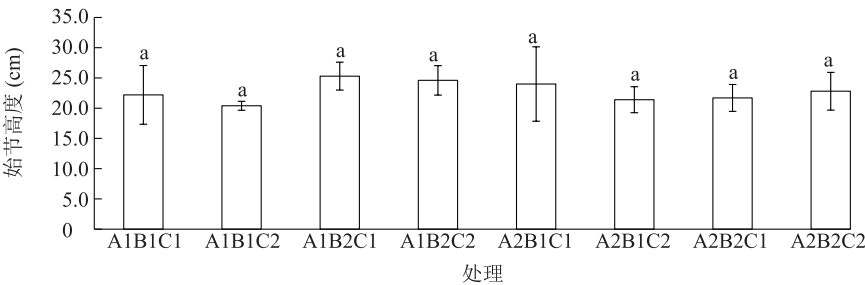
表 8 不同处理对棉花株高影响的方差分析结果

Table 8 Variance analysis results of plant height in cotton leaves under different treatments

因素	不同因素对株高影响的 P 值			
	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期
种子处理	0.035 9*	0.110 4	0.510 9	0.285 1
播种密度	0.462 1	0.309 7	0.666 9	0.404 8
播期	0.028 3*	0.208 4	0.032 0*	0.756 7
种子处理×播种密度	0.735 8	0.392 9	0.672 6	0.447 1
种子处理×播期	0.513 8	0.292 2	0.603 1	0.413 3
播种密度×播期	0.440 7	0.361 0	0.284 6	0.357 2
种子处理×播种密度×播期	0.454 8	0.911 2	0.833 3	0.231 1

* 表示影响显著 ($P < 0.05$)。

2.2.3 果枝数 由表 9、表 10 可以看出,在蕾期,种子处理对棉花果枝数有显著影响,A1 处理的果枝数比 A2 处理多 41.18%~100.00%。在花铃期,播种密度×播期对棉花果枝数具有显著影响,在 A2 处理下,B2C1 处理表现较优;种子处理×播种密度×播期对棉花果枝数具有显著影响,以 A2B2C1 处理最高,果枝数较其他处理多 7.59%~45.79%。在吐絮期,各处理组棉花果枝数为 12.60~16.30 台,方差分析结果表明,各因素对棉花果枝数无显著影响。综上



A1:球化种子;A2:未球化种子;B1:播种密度 1 hm²30 000株;B2:播种密度 1 hm²45 000株;C1:播期 5 月 25 日;C2:播期 6 月 5 日。不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 8 不同处理对棉花始节高度的影响
Fig.8 Effects of different treatments on cotton initial node height

可知,种子球化处理能显著促进棉花蕾期果枝数的增加,从而增大棉花增产潜力。

表 9 不同处理对棉花果枝数的影响
Table 9 Effects of different treatments on the number of branches of cotton

处理编号	蕾期果枝数 (台)	花铃期果枝数 (台)	吐絮期果枝数 (台)
A1B1C1	6.90±1.33a	12.20±2.11bc	15.80±0.40a
A1B1C2	7.20±1.51a	11.30±0.64bc	14.10±3.00a
A1B2C1	8.00±0.92a	11.00±0.92c	14.10±2.53a
A1B2C2	8.30±0.64a	10.70±1.17c	12.60±2.08a
A2B1C1	4.50±0.42b	11.60±0.72bc	13.60±1.11a
A2B1C2	5.10±0.23b	14.50±2.21ab	16.30±3.32a
A2B2C1	4.00±0.20b	15.60±3.22a	16.30±3.00a
A2B2C2	4.30±0.64b	10.90±1.63c	14.00±1.20a

A1:球化种子;A2:未球化种子;B1:播种密度 1 hm²30 000株;B2:播种密度 1 hm²45 000株;C1:播期 5 月 25 日;C2:播期 6 月 5 日。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 10 不同处理对棉花果枝数影响的方差分析结果
Table 10 Variance analysis results of cotton branch number in different treatments

因素	不同因素对果枝数影响的 P 值		
	蕾期	花铃期	吐絮期
种子处理	0.032 7*	0.168 1	0.532 3
播种密度	0.631 3	0.679 4	0.499 7
播期	0.145 1	0.359 6	0.442 7
种子处理×播种密度	0.109 6	0.527 3	0.372 6
种子处理×播期	0.781 8	0.865 4	0.347 1
播种密度×播期	0.889 7	0.040 6*	0.202 6
种子处理×播种密度×播期	0.781 8	0.021 5*	0.180 6

* 表示影响显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 种子球化处理、播期和播种密度对棉花生理代谢及农艺性状的影响

棉花生长发育能力与棉株各项生理生化指标及农艺性状之间的关系密切^[3,20]。目前尚未有种子球化处理等方面的研究报道,但是以其他方式提高种子出苗率的种子处理技术研究成果颇丰。高燕等^[21]研究发现,用适宜浓度 Zn²⁺处理后,棉花种子发芽率、棉苗超氧化物歧化酶活性和过氧化物酶活性较对照表现为不同程度的提高,该处理对不同基因型棉花种子萌发后棉苗的生理生化指标具有显著诱导作用,在提高棉花种子活力方面具有显著效果。这与本试验中种子球化处理能显著提高棉花苗期可溶性蛋白质含量、超氧化物歧化酶活性的结果相似。SPAD 值、可溶性糖含量、丙二醛含量和硝酸还原酶活性同样是表征棉株抗逆性的生理指标,在本试验中却并未呈现出与可溶性蛋白质含量、超氧化物歧化酶活性相似的协同变化,说明种子球化处理这一因素主要通过提高棉苗可溶性蛋白质含量和超氧化物歧化酶活性以增加抗逆性,进而表现为促进棉花生长发育,使棉花种子“生得出”,棉苗“长得好”。文俊^[22]研究发现,棉花叶片中的可溶性糖含量在整个棉花生育过程中呈现先升高后降低的趋势,不同种植密度对棉花叶片的可溶性糖含量的影响存在差异。播种密度对棉花叶片中的叶绿素含量无显著影响,高密度处理下的相关抗氧化酶活性在整个生育期内最高。朱继杰^[23]研究发现,可溶性蛋白质含量受到棉花品种的早熟性影响较大,随着播期的推迟,早熟性较好的品种的可溶性蛋白质含量提高。

与文俊^[22]研究结果相似的是,本研究结果表明,高密度播种(1 hm^2 45 000株)较低密度播种(1 hm^2 30 000株)能增加棉花蕾期的可溶性蛋白质含量,提高棉花蕾期的超氧化物歧化酶活性,但会降低棉花吐絮期的硝酸还原酶活性。晚播能提高棉花蕾期的 SPAD 值及苗期的可溶性蛋白质含量、吐絮期的硝酸还原酶活性,总体降低棉花苗期、蕾期的丙二醛含量,降低棉花叶片细胞衰老程度。

株高、始节高度和果枝数作为关键的农艺性状指标,对棉花的生长和发育有较大影响,合理密植和适当推迟播期能显著增加棉花株高和果枝数^[23-24]。与种子球化处理类似的是,周秀娟^[25]研究发现,用褪黑素处理后,棉花种子的各项出苗指标得到提升,同时对棉株农艺性状也有不同程度的改善。在本试验中,种子球化处理后的果枝数在棉花蕾期显著提高,在花铃期的影响变小,直至吐絮期呈现无显著差异。可能原因是球化处理的棉种出苗后,由于球化基料继续在土中发生肥药缓释作用,提高了棉苗生长素质与抗逆能力,因此表现为在蕾期果枝数分化较快,棉株果枝数显著增加。晚播可以改善棉花的农艺性状,提高苗期、花铃期株高。播种密度在本试验中对棉花农艺性状无显著影响,这与前人的研究结果^[26]不同,可能由于密度设置的处理数较小,需要进一步探究。

3.2 种子球化技术的应用前景及作用机制

本试验中的种子球化技术是在前期盆栽试验成功的基础上进行的^[11],在大田中进一步评价了这一技术的可行性,并初步探索了适宜的播期和种植密度。与本研究中的种子球化技术相似的是,近年来以种子包衣或丸(粒)化技术为代表的现代种子播前处理技术不断发展^[27],有效保障了农业生产的稳定^[28]。种子包衣是以杀菌剂、杀虫剂、复合肥料、生长调节剂等均匀地包裹种子,在其外表形成 1 层薄膜。种子丸(粒)化与包衣类似,可形象地称为增加体积后的种子包衣,多应用于小粒或质量较轻且形状不规则的种子^[29]。种子包衣或丸(粒)化技术都致力于改善种子活力,提高种子入土后的抗逆能力,在提高出苗率的同时以适应农业机械化根本特征。但是棉花属于子叶出土型幼苗,作用在种子外壳表面的丸化剂或包衣剂会由于下胚轴的伸长随着子叶顶出土面,往往不能促进棉苗后续的生长发育,虽然使棉种出苗率提高,但后期棉苗生理素质无法

得到保障,如遇倒春寒等反常天气仍会出现缺垄断行现象。近年来,随着化肥、农药等农资和劳动力成本大幅上升,昂贵的包衣剂或丸化剂及复杂的加工制作成本进一步阻碍了种子包衣或丸(粒)化技术的大幅推广和实际生产应用^[30]。

本试验中的种子球化技术是将硅藻土、凹凸棒土、膨润土、木薯改良型淀粉、基质和水充分搅拌后,捏成直径 3.5~4.5 cm 的球状物,并将种子包裹于其中,不但可以根据播种种植需求及作物种子的自身属性,将一粒或多粒种子以一个“球化单元”的形式进行汇集,而且同一作物的不同品种的种子也可以在播种中实现汇集。此外,较大的球化物也可以在棉种“破球出苗”后继续促进幼苗的生长和发育。种子球化技术不仅可以实现机械化播种,还可以达到节省人力物力成本、增加植棉经济效益的目的。基于此,还可以根据不同植棉区域的气候条件和栽培耕作措施等差异,合理变换各个球化物料,真正实现普适推广。

硅藻土作为一种沉积岩,主要成分为二氧化硅(SiO_2),其吸附能力强、密度低、无毒、混合性好及易获得等特点使其被广泛应用于农作物的复合肥料中^[31],施用硅藻土可以改善作物的结构状态,对耕作层起到软化作用,在土壤中还能保持水分,延长肥效药效时间和改良土壤,提高作物产量^[32]。凹凸棒土作为一种矿质黏土,具有吸附、悬浮、分散以及低比重等特性,还具有良好的相容性和防霉性,已被证明与肥料施用可以促进萌发,提高作物生长速度^[33]。凹凸棒土还具有储量丰富、价格低廉和环保友好等经济实用特点,在不同作物的不同生长阶段施用还可以减少成本,提高肥料的利用效率^[34]。膨润土作为一种土壤调节剂,具有高阳离子交换能力,可以保持土壤肥力,促进作物生长^[35]。胡丽华^[36]研究已证明,膨润土可以提高棉籽的发芽率,并且在田间种植中发现 1 hm^2 土地配施 0.5~1.5 t 膨润土,能使棉花增产 1.5%~4.8%。赵雪淞等^[37]通过研究不同膨润土施用量对花生连作产量和根际土壤肥力的影响发现:施用膨润土后花生叶片酶活性得到明显提高,对花生增产也具有促进作用。前人研究结果^[38]证明,木薯淀粉具有生物可降解性、相容性和无毒性等特点,可作为替代品应用于各种合成聚合物中。木薯淀粉改性后的材料可以在土壤中促进肥料的释放和作物对养分的吸收,在对抗病原体、控制

病虫害以及促进作物生长中具有广泛的应用前景^[39]。本试验中,在水的作用下,凹凸棒土、膨润土和硅藻土充分溶解,并分散附着在颗粒较大的基质中,后者在木薯改良型淀粉的黏结下成球,包裹着种子入土,给棉籽营造了可以抵御部分生物和非生物胁迫的一个相对稳定的“内环境”。一方面凹凸棒土可以吸附土壤周围的水分,并防止球化物在土壤中发生霉变。硅藻土保持了球化物的水分,种子吸水膨胀破壳出苗,基质中椰子糠、蛭石等较大的无机物较为疏松,促进了棉苗下胚轴“破球”伸长。另一方面,球化物裂开后继续保留在幼苗根系周围并分散在土壤中,膨润土可以保持根系周围土壤肥力,硅藻土能延长基质中的肥效时间,木薯改良型淀粉的黏度则随着时间的推移下降,最终无害化生物降解为水和二氧化碳。因此,本试验中的球化处理技术能在促进种子提高出苗率的同时,为出苗后棉苗生理素质的改善奠定物质基础,使种子“不仅出苗率高,幼苗还长得好,长得快”。

4 结 论

将硅藻土、凹凸棒土、膨润土、木薯改良型淀粉、基质和水按8:8:8:13:93:171的质量比混匀后充分搅拌,捏成直径3.5~4.5 cm的球状物,并将棉花种子包裹于其中。结果表明,种子球化处理可以使棉花苗期可溶性蛋白质含量提高,超氧化物歧化酶活性提高,在增强幼苗抗逆能力的同时,种子球化处理的棉花株高较未处理显著增加,说明棉苗生长发育进程加快,进一步体现为蕾期的果枝数增加。综合来看,种子球化处理可以提高棉苗的生理素质,改善棉花生理代谢,促进棉花营养生长,改善源库关系,在实现棉花高产稳产的同时,为长江流域植棉轻简化、机械化栽培奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] MANONMANI V, AMBIKA S, DEEPIKA S, et al. Germination and vigour of polymer coated cotton seeds under different water holding capacities[J]. Journal of Applied and Natural Science, 2019, 11(1): 126-129.
- [2] 韩婉瑞,雷亚平,李亚兵,等.气候变暖背景下中国三大棉区水热时空变化[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(8): 1430-1441.
- [3] 邹佳怡,谢章书,魏忆萍,等.播期、播种深度和覆盖物对直播棉生理特性及生长发育的影响[J].作物研究,2021,35(3):205-213.
- [4] 于绍杰.中国植棉史考证[J].中国农史,1993(2):28-34.
- [5] 曾 球,梅正鼎,郭莉莉,等.湖南棉花产业发展现状、政策环境、存在问题与建议[J].湖南农业科学,2022(1):88-90,95.
- [6] DAI J L, DONG H Z. Intensive cotton farming technologies in China: achievements, challenges and countermeasures [J]. Field Crops Research, 2014, 155: 99-110.
- [7] 齐 明.轻简化栽培是我国棉花生产持续发展的重要技术途径[J].中国棉花,2017,44(9):1-2,7.
- [8] 罗振亚.防治棉花苗期病害的生物丸化种衣剂的研制[D].武汉:华中农业大学,2007.
- [9] 麻正辉,苏 悦,马 雪,等.噬虫毒素种子包衣棉花对棉蚜和棉长管蚜解毒酶活性的影响[J].新疆农业科学,2021,58(9): 1685-1693.
- [10] 张彦才,李巧云,刘全清,等.种子丸粒化对棉花生长发育的影响[J].河北农业科学,2003(增刊1):19-22.
- [11] 谢章书,李 侃,杨 丹,等.棉花种子球化处理对幼苗生长发育的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(3): 265-269.
- [12] 湖南省技术质量监督局.棉花栽培技术规范:DB43/T 286—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [13] RAZAVIZADEH R, ADABAVAZEH F, CHERMAHINI M R. Adaptive responses of *Carum copticum* to *in vitro* salt stress[J]. International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering, 2017, 11(1):37-42.
- [14] TAKAI T, KONDO M, YANO M, et al. A quantitative trait locus for chlorophyll content and its association with leaf photosynthesis in rice[J]. Rice, 2010, 3(2): 172-180.
- [15] ZHANG C, LIU F, KONG W W, et al. Application of visible and near-infrared hyperspectral imaging to determine soluble protein content in oilseed rape leaves[J]. Sensors, 2015, 15(7): 16576-16588.
- [16] ZHOU W L, QI Z Y, CHEN J, et al. Rooting ability of rice seedlings increases with higher soluble sugar content from exposure to light[J]. PLoS One, 2020, 15(10): e0241060.
- [17] MOMCILOVIC I, PANTELIC D. Plant superoxide dismutases: important players in abiotic stress tolerance [M]. New York: Nova Science Publishers, 2018.
- [18] LI Z S, WAN L Q, LI S, et al. Plastic response of *Medicago sativa* L. root system traits and cold resistance to simulated rainfall events[J]. Peer J, 2021, 9: e11962.
- [19] ASLAM M, HUFFAKER R C, TRAVIS R L. The interaction of respiration and photosynthesis in induction of nitrate reductase activity[J]. Plant Physiology, 1973, 52(2): 137-141.
- [20] ZHANG Y X, FAN Y P, RUI C, et al. Melatonin improves cotton salt tolerance by regulating ROS scavenging system and Ca²⁺ signal transduction[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 693690.
- [21] 高 燕,沙 红,赵其波. Zn²⁺对老化棉种活力生理生化指标的诱导效果研究[J].新疆农业科学,2015,52(7):1275-1279.
- [22] 文 俊.种植密度对抗虫杂交棉生育生理特性及产量的影响

- [D].合肥:安徽农业大学,2013.
- [23] 朱继杰.不同熟性棉花品种器官建成及主要生理性状对播期的反应[D].保定:河北农业大学,2004.
- [24] 阳会兵,刘金仓,陈金湘,等.棉花短季直播栽培模式对其农艺性状及干物质积累分配的影响[J].激光生物学报,2016,25(6):564-571.
- [25] 周秀娟.褪黑素引发对陆地棉(*Gossypium hirsutum* L.)的耐盐性及农艺性状的影响[D].杭州:浙江大学,2021.
- [26] 华 烨,周昊楠,许婷婷,等.密度对棉花株间小气候、农艺性状及产量的影响[J].中国农学通报,2021,37(19):36-41.
- [27] 梅俊豪.种子丸粒化在水稻直播上的应用初探[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [28] 滕李洁,满雪晶,李雪明,等.一种种子丸粒化粉对7种蔬菜种子安全性影响[C] // 中国植物病理学会.植物病理科技创新与绿色防控——中国植物病理学会2021年学术年会论文集.贵阳:中国农业科学技术出版社,2021:550.
- [29] 熊自立,朱剑桥,宋文坚.浅谈种子包衣丸化技术[J].中国种业,2004(6):49-51.
- [30] 王少先,彭克勤,萧浪涛,等.种子包衣及丸化技术研究进展[J].种子,2002(5):32-35.
- [31] HUANG C L, ZHANG H Y, ZHAO Y F, et al. Diatomite-supported Pd-M (M = Cu, Co, Ni) bimetal nanocatalysts for selective hydrogenation of long-chain aliphatic esters[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 386(1): 60-65.
- [32] CHEKAEV N P, RYABOV A E, VLASOVA T A, et al. Change in the agrophysical properties of leached chernozem depending on the application of local siliceous rocks and fertilizers[J]. Volga Region Farmland, 2019(4): 63-69.
- [33] 龚光禄,杨通静,陈娅娅,等.凹凸棒土对姬松茸生长发育及出菇的影响[J].中国食用菌,2021,40(4):32-37,46.
- [34] GUAN Y, SONG C, GAN Y T, et al. Increased maize yield using slow-release attapulgite-coated fertilizers[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(3): 657-665.
- [35] GENC N, DOGAN E C. Adsorption kinetics of the antibiotic ciprofloxacin on bentonite, activated carbon, zeolite, and pumice[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(3): 785-793.
- [36] 胡丽华.棉花施用膨润土的效应与技术[J].江西棉花,1995(3):10-12.
- [37] 赵雪淞,宋王芳,杨晨曦,等.膨润土对花生连作根际土壤肥力和作物产量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(3):63-68.
- [38] PEROTTI G F, KIJCHAVENGKUL T, AURAS R A, et al. Nanocomposites based on cassava starch and chitosan-modified clay: physicochemical properties and biodegradability in simulated compost soil[J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2017, 28(4): 649-658.
- [39] SARMENTO D H A, DE S P A, SARMENTO J D A, et al. Armazenamento de banana 'Prata Catarina' sob temperatura ambiente recobertas com fécula de mandioca e PVC[J]. Revista Caatinga, 2015, 28(2): 235-241.

(责任编辑:徐 艳)