



添加生物菌剂对低温条件下大豆幼苗生长的促进作用

解 娇¹,高国荣²,赵敦厚³,关法春¹,张大勇³,祝延立¹,崔彦如¹,孙宝学⁴

(1. 吉林省农业科学院 农村能源与生态研究所,吉林 长春 130033; 2. 内蒙古自治区牙克石市畜牧工作站,内蒙古 牙克石 022150; 3. 东北农业大学 农学院,黑龙江 哈尔滨 150030; 4. 长春德胜宝农业有限公司,吉林 农安 130200)

摘 要:为探究低温条件下生物菌剂对大豆苗期生长的影响,本研究对大豆进行温度和生物菌剂的双重处理,测定其株高、株幅、叶片相对含水量、叶绿素含量、叶面积及酶活性指标,分析大豆生理生化差异。结果表明:在低温条件下添加生物菌剂能够优化大豆幼苗的各项形态指标,添加生物菌剂后大豆幼苗的株高、株幅、叶面积和含水量比正常条件下分别提高了 1.86 cm、2 cm、169.6 mm² 和 25.09%。在低温条件下添加生物菌剂后叶绿素含量下降并且各种抗氧化酶活性发生不同程度的变化。低温下添加菌剂的大豆叶绿素含量比未加菌剂处理低 0.01 mg·g⁻¹。在低温条件下,与未加菌剂处理相比,添加菌剂的 SOD 降低 5.73 μmol·g⁻¹·min⁻¹,POD 和 CAT 活性分别提高了 159.47 和 1.31 μmol·g⁻¹·min⁻¹。投影寻踪综合评价模型的评价结果进一步说明低温条件下添加生物菌剂对大豆苗期生长发育产生积极的影响。

关键词:大豆;生物菌剂;低温;生理;生长

Promoting Effects of Adding Biological Agents on Soybean Seedlings Growth Under Low Temperature

XIE Jiao¹, GAO Guo-rong², ZHAO Dun-hou³, GUAN Fa-chun¹, ZHANG Da-yong³, ZHU Yan-li¹, CUI Yan-ru¹, SUN Bao-xue⁴

(1. Institute of Rural Energy and Ecology, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 2. Yakeshi Animal Husbandry Workstation of Inner Mongolia Autonomous Region, Yakeshi 022150, China; 3. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. Changchun Deshengbao Agriculture Co., Ltd, Nong'an 130200, China)

Abstract: In order to explore the effects of biological agents on the growth of soybean seedlings under low temperature, the plant height, plant width, relative water content of leaves, chlorophyll content, leaf area and enzyme activity of soybean were measured by dual treatment of temperature and biological agents. The results showed that the morphological indexes of soybean seedlings could be improved by adding biological agent under low temperature. The plant height, plant width, leaf area and water content of soybean seedlings increased by 1.86 cm, 2 cm, 169.6 mm² and 25.09% respectively compared with those under normal conditions. Under low temperature, the content of chlorophyll decreased and the activities of antioxidant enzymes changed in varying degrees, and the chlorophyll content of soybean with inoculant was 0.01 mg·g⁻¹ lower than that without inoculant, and the activities of SOD, POD and CAT were decreased by 5.73 μmol·g⁻¹·min⁻¹, increased by 159.47 and 1.31 μmol·g⁻¹·min⁻¹, respectively. The comprehensive evaluation results of projection pursuit comprehensive evaluation model further showed that the addition of biological agents under low temperature had a positive effect on the growth and development of soybean seedlings.

Keywords: Soybean; Biological agent; Low temperature; Physiology; Growth

大豆(*Glycine max*)起源于中国,是重要的粮油作物,也是世界上最大的植物蛋白来源,在全国各地均有种植^[1]。东北地区是中国大豆的主产区,并且是中

国受全球气候变化影响最显著的地区之一^[2-3]。在大豆播种期常遇阶段性低温,严重影响大豆幼苗的生长发育,进而影响大豆的产量^[4-5]。为了确保大豆能够

收稿日期:2021-02-19

基金项目:吉林省科技厅项目(20200702010NC);哈尔滨创新创业人才项目。

第一作者:解娇(1984—),女,硕士,助理研究员,主要从事微生物资源利用研究。E-mail:33843649@qq.com。

通讯作者:关法春(1976—),男,博士,副研究员,主要从事微生物资源利用研究。E-mail:gfc1940@163.com;

张大勇(1976—),男,博士,教授,主要从事大豆遗传育种研究。E-mail:dongnongzhangdy@163.com。

良好生长,减轻低温对大豆的伤害,研究和探索应对低温冷害的技术措施成为近年来研究的热点之一。目前关于低温冷害方面的研究内容主要是筛选耐低温品种^[6-7]和筛选耐低温生理指标^[8],进而提高作物保护酶活性^[9],增强作物抵抗低温的能力。

微生物菌剂是指将目标微生物或有效菌、备用菌经过工业化扩繁后,以多孔物质作为吸附载体制成的活菌制剂^[10]。目前国内外关于生物菌剂对植物生长促进作用的研究甚广,使用生物菌剂的玉米植株高度、穗长、穗粗等都有所提高^[11]。生物菌剂添加能够促进水稻分蘖,还能够提高水稻的叶面积指数^[12]。也有研究指出,施用生物菌剂的烤烟叶片酶活性有不同程度的改变^[13]。生物菌剂的不同用量,使水稻幼苗的形态生理指标表现不同,添加适宜浓度的生物菌剂使低温处理下水稻种子的发芽势、发芽率、株高和干物质含量均有所提高^[14]。低温下对棉花喷施菌剂,立枯病、炭疽病和苗期黄萎病的防治效果大幅提升,棉花的株高、茎粗、根长及产量均有所提高^[15]。刘佳琪等^[16]研究发现,低温条件下生物菌剂对蓖麻的生长有正面影响,使蓖麻的株高、叶绿素含量、叶面积等都不同程度提高。

研究表明,菌剂处理对大豆有增产作用,并且能够提高大豆的根瘤数^[17]。刘文志等^[18]研究发现,几种生物菌剂对大豆根腐病菌有明显的抑制效果,种子发芽率和幼苗植株干重显著提高。葛红莲等^[19]研究发现,复合光合菌剂能提高光合色素含量,增强光合能力,提高大豆幼苗根系活力、生物量、抗氧化酶和根际土壤酶活性,促进光合作用和植物抗逆性,改善土壤肥力,起到促生壮苗的作用。为明确低温条件下生物菌剂对大豆生长发育的影响,本研究分析在低温下使用微生物菌剂后,大豆幼苗形态生理指标和酶活性的变化,运用投影寻踪综合评价模型分析常温和低温条件生物菌剂对大豆幼苗生长发育的促进作用,以期今后探索提高大豆幼苗耐低温能力的技术措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验大豆品种为绥农 26,供试复合菌系为吉林省农业科学院农村能源与生态研究所实验室筛选、驯化的复合菌系 ZM-2,其成分以多黏类芽孢杆菌 (*Paenibacillus polymyxa*) 菌群为主。

1.2 试验设计

每 100 g 土壤配施 0.5 g·L⁻¹生物菌剂,以不施用生物菌剂为对照;在组培室设置两个温度环境:10 ℃ (低温)和 25 ℃ (常温)。共 4 个处理,分别记作 CW0 (常温)、CW1 (常温 + 菌剂)、DW0 (低温)和 DW1 (低温 + 菌剂)。使用 6 穴塑料育苗盒,尺寸为 19.0 cm × 14.5 cm × 5.5 cm,每穴装土 100 g (按土壤干重计)。每种处理 24 株,待大豆长至 2 ~ 3 片真叶时进行试验,测定不同处理下大豆幼苗形态及生理指标,每个处理重复 3 次。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 株高和株幅 使用米尺测量株高 (植物基部至顶端)和株幅 (植株最宽幅度)。

1.3.2 叶面积、相对含水量和叶绿素含量 收集叶片后立即称其鲜质量 (FW/g),并放入蒸馏水中称其饱和质量 (TW/g),最后放入 65 ℃ 烘箱中烘干至恒重后称其干质量 (DW/g)。将叶片铺在透明板上展平,利用 Image J 软件测量叶面积 (mm²)。

1.3.3 抗氧化酶活性 采用紫外吸收法^[20]测定过氧化氢酶 (CAT) 活性。采用氮蓝四唑法^[21]测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性。采用愈创木酚法^[21]测定过氧化物酶 (POD) 活性。

1.3.4 综合评价 以不同处理的株高、株幅、叶面积、含水量、叶绿素、SOD、POD、CAT 为指标建立综合评价指标体系,对各指标按照越大越优的原则进行归一化处理,采用 MATLAB 6.5 软件建立投影寻踪综合评价模型,选定父代初始种群规模为 $n = 400$,交叉概率 $P_c = 0.80$,变异概率 $P_m = 0.80$,优秀个体数目选定为 20 个, $\alpha = 0.05$,加速次数为 20,分析常温和低温条件生物菌剂对大豆幼苗生长发育的促进作用。

1.4 数据分析

通过 Excel 2003 整理数据,采用 SPSS 26.0 Duncan 方法进行单因素方差分析和统计,采用投影寻踪模型 (Projection Pursuit, PP) 进行综合评价分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对大豆株高和株幅的影响

如表 1 所示,不同处理的株高大小排序依次为 CW1 > CW0 > DW1 > DW0,常温下添加菌剂时 CW1 处理的株高比未加菌剂 CW0 处理高 3.72 cm,在低温下添加菌剂 DW1 的株高也比未加菌剂 DW0 处理高 1.86 cm,但上述处理间差异均不显著 ($P > 0.05$)。株

幅大小排序依次为 CW1 > CW0 > DW1 > DW0, 添加菌剂 CW1 的株幅比未加菌剂 CW0 处理高 3. 58 cm, 添加菌剂 DW1 的株幅比未加菌剂 DW0 处理高 2 cm, 其中 CW1 处理显著高于 CW0 处理 ($P < 0. 05$), 但 DW0 和 DW1 处理之间差异不显著 ($P > 0. 05$)。结果表明在不同温度下添加生物菌剂均能够提高大豆的株高和株幅。

表 1 不同处理条件下的大豆株高和株幅
Table 1 The plant height and width of soybean under different treatments 单位: cm

| 处理 Treatment | 株高 Plant height | 株幅 Plant width |
|-----------------|--------------------|-------------------|
| CW0 | 17. 60 ± 3. 03 ab | 13. 32 ± 2. 00 b |
| CW1 | 21. 32 ± 4. 04 a | 16. 9 ± 3. 15 a |
| DW0 | 13. 24 ± 4. 59 b | 6. 9 ± 1. 03 c |
| DW1 | 15. 10 ± 3. 66 b | 8. 9 ± 1. 63 c |

不同小写字母表示差异显著 ($P < 0. 05$)。下同。
Different lowercase indicate significant difference ($P < 0. 05$). The same below.

2. 2 不同处理对大豆叶面积、相对含水量和叶绿素含量的影响

如表 2 所示, 不同处理的叶面积大小排序依次为 CW1 > CW0 > DW1 > DW0。常温下添加菌剂 CW1 的叶面积比未加菌剂 CW0 处理提高 452. 49 mm², 而在低温下添加菌剂的 DW1 处理叶面积比未加菌剂的 DW0 处理提高 169. 6 mm², 其中 CW1 处理显著高于 CW0 ($P < 0. 05$), 但 DW0 和 DW1 处理之间差异不显著 ($P > 0. 05$)。结果说明在不同温度下添加生物菌剂均能够提高大豆的叶面积, 但常温下对叶面积的促进效果优于低温。

不同处理的相对含水量大小排序依次为 DW1 > CW1 > CW0 > DW0。添加菌剂 CW1 的相对含水量比未加菌剂 CW0 处理高 9. 68%, 添加菌剂 DW1 的相对含水量比未加菌剂 DW0 处理高 25. 09%, 各个处理均差异不显著 (表 2)。结果说明在不同温度下添加生物菌剂均能够提高大豆的相对含水量, 但对低温下叶片相对含水量的促进作用更大。

不同处理的叶绿素含量大小排序依次为 CW0 > DW0 > DW1 > CW1。常温下添加菌剂的 CW1 叶绿素含量比未加菌剂的 CW0 处理低 0. 24 mg · g⁻¹, 差异显著 ($P < 0. 05$); 低温下添加菌剂的 DW1 叶绿素含量比未加菌剂 DW0 处理低 0. 01 mg · g⁻¹, 差异不显著 (表 2)。结果说明在不同温度下添加生物菌剂会降低大豆的叶绿素含量。

表 2 不同处理的大豆叶面积、相对含水量和叶绿素含量
Table 2 The leaf area, relative water content and chlorophyll content of soybean under different treatments

| 处理 Treatment | 叶面积 Leaf area /mm ² | 相对含水量 Relative water content/% | 叶绿素含量 Chlorophyll content /(mg · g ⁻¹) |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| CW0 | 954. 51 ± 153. 43 b | 84. 29 ± 5. 56 a | 0. 47 ± 0. 03 a |
| CW1 | 1407. 00 ± 242. 56 a | 93. 98 ± 3. 57 a | 0. 23 ± 0. 01 b |
| DW0 | 390. 31 ± 178. 02 c | 69. 55 ± 36. 94 a | 0. 36 ± 0. 13 ab |
| DW1 | 559. 91 ± 164. 99 c | 94. 64 ± 2. 95 a | 0. 24 ± 0. 09 b |

2. 3 不同处理对大豆抗氧化酶活性的影响

如表 3 所示, 不同处理 SOD 活性大小排序依次为 CW0 > DW0 > CW1 > DW1。常温下添加菌剂 CW1 的 SOD 活性比未加菌剂 CW0 处理低 4. 88 μmol · g⁻¹ · min⁻¹, 而低温下添加菌剂 DW1 的 SOD 活性比未加菌剂 DW0 处理低 5. 73 μmol · g⁻¹ · min⁻¹, 上述处理间均差异不显著 ($P > 0. 05$)。结果表明在不同温度下添加生物菌剂略微降低了大豆的 SOD 活性。

由表 3 可知, 不同处理 POD 活性大小排序依次为 DW1 > DW0 > CW1 > CW0。添加菌剂 CW1 的 POD 活性比未加菌剂 CW0 处理高 392. 53 μmol · g⁻¹ · min⁻¹, 添加菌剂 DW1 的 POD 活性比未加菌剂 DW0 处理高 159. 47 μmol · g⁻¹ · min⁻¹, 各个处理间均差异显著 ($P < 0. 05$)。结果表明在不同温度下添加生物菌剂能够显著提高大豆的 POD 活性。

由表 3 可知, 不同处理 CAT 活性大小排序依次为 CW1 > CW0 > DW1 > DW0。添加菌剂 CW1 的 CAT 活性比未加菌剂 CW0 处理高 8. 2 μmol · g⁻¹ · min⁻¹, 添加菌剂 DW1 的 CAT 活性比未加菌剂 DW0 处理高 1. 31 μmol · g⁻¹ · min⁻¹, 各个处理间均差异不显著 ($P > 0. 05$)。结果表明在不同温度下添加生物菌剂能够提高大豆的 CAT 活性。

表 3 不同处理的大豆叶片 SOD、POD、CAT 活性变化
Table 3 The changes of SOD, POD and CAT activities in soybean leaves under different treatments 单位: μmol · g⁻¹ · min⁻¹

| 处理 Treatment | 超氧化物歧化酶 SOD | 过氧化物酶 POD | 过氧化氢酶 CAT |
|-----------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| CW0 | 89. 28 ± 1. 68 a | 18. 93 ± 10. 13 d | 15. 33 ± 6. 65 a |
| CW1 | 84. 40 ± 7. 70 a | 411. 47 ± 72. 73 c | 23. 53 ± 14. 94 a |
| DW0 | 88. 12 ± 10. 24 a | 1297. 60 ± 42. 47 b | 7. 72 ± 0. 79 a |
| DW1 | 82. 39 ± 1. 78 a | 1457. 07 ± 85. 86 a | 9. 03 ± 2. 43 a |

2.4 综合评价

采用 MATLAB 6.5 软件建立投影寻踪综合评价模型,得出最大投影指标值为:0.399 6,各个状态变量的最佳投影方向为 $a^* = (0.464\ 3, 0.502\ 4, 0.433\ 6, 0.080\ 1, 0.262\ 5, 0.310\ 6, 0.027\ 7, 0.472\ 5)$,CW0、CW1、DW0 和 DW1 处理综合评价的投影值 $Z^*(j) = (1.592\ 3, 1.854\ 2, 0.394\ 7, 0.423\ 6)$ 。将 $Z^*(j)$ 从大到小排列,可得各处理优劣顺序为 CW1 > CW0 > DW1 > DW0。低温条件下,DW1 的投影值为0.423 6,比 DW0 的投影值提高0.028 9;常温条件下,CW1 的投影值为1.854 2,比 CW0 的投影值提高0.261 9。说明在不同温度下添加生物菌剂均能促进大豆幼苗的生长发育。

3 讨论

李凯峰等^[22]研究表明生物菌肥对猕猴桃生长和生理特性有促进作用。本研究结果表明生物菌剂可以改变大豆幼苗的形态和长势。在不同温度下,添加生物菌剂的大豆株高、株幅和叶面积比正常条件下均有所提高,而且在不同温度下添加菌剂的相对含水量均比正常条件下有所提高,且在低温处理中更为明显。

植物在低温胁迫下的生理生化变化主要体现在叶绿素合成受阻,各种光合酶活性受到抑制,故而使光合速率下降^[23]。在本研究中,DW0 处理的叶绿素含量比 CW0 处理有所下降,CW1 比 CW0 处理、DW1 比 DW0 处理均有所下降。本研究中和叶片光合作用相关的有两个指标变化规律不同,叶面积增大,而叶绿素含量下降。出现这种现象的原因暂不明确,还需要进一步研究和探讨生物菌剂添加对大豆的光合速率与光合反应影响。

SOD、POD 和 CAT 均为作物在生长过程中抵抗逆境的重要保护酶,能够清除活性氧自由基(ROS),减少低温对植物的危害,如 SOD 的作用是通过歧化反应清除生物细胞中的超氧阴离子自由基,POD 和 CAT 的主要作用是酶促降解 H₂O₂,减少自由基对机体的伤害^[24-25]。本研究中,在不同温度条件下添加生物菌剂会使 POD 活性提高,SOD 和 CAT 活性下降。大部分的研究认为在低温下植物的 SOD 和 POD 活性会先升高再下降^[26-27]。也有研究认为不同植物在低温下保护酶活性变化的趋势会有所不同^[28]。出现这种现象的原因可能是在低温胁迫下,作物会自动调节组织内的生理生化进程,从而抵抗或减轻低温带来的伤害,不同的作物和品种的生理反应机制不尽相同,需要从大豆生长

各个时期的酶活性变化来分析探究。综上所述,低温条件下生物菌剂对大豆幼苗生长有促进作用,但是对酶活性的影响存在差异,需要进一步的研究和探讨。

4 结论

本研究在一定程度上揭示了添加生物菌剂对大豆幼苗生长的影响效果,研究了在低温条件下添加生物菌剂对大豆苗期形态生理指标的影响。在低温条件下添加生物菌剂后大豆幼苗的株高、株幅、叶面积和含水量比正常条件均有所提高。在低温条件下添加生物菌剂后叶绿素含量下降并且各种抗氧化酶活性发生不同程度的变化。投影寻踪综合评价模型的评价结果进一步说明低温条件下添加生物菌剂对大豆苗期生长发育有着积极的影响。

参考文献

[1] 潘文华,许世卫. 黑龙江省大豆产业困境与差异化发展战略[J]. 农业经济问题, 2014, 35(2): 26-33. (Pan W H, Xu S W. Dilemma and differentiated development strategy of soybean industry in Heilongjiang Province [J]. Issues in Agricultural Economy, 2014, 35(2): 26-33.)

[2] 张永芳,钱肖娜,王润梅,等. 不同大豆材料的抗旱性鉴定及耐旱品种筛选[J]. 作物杂志, 2019(5): 41-45. (Zhang Y F, Qian X N, Wang R M, et al. Identification of drought resistance of different soybean materials and screening of drought tolerant varieties[J]. Crops, 2019(5): 41-45.)

[3] 刘志娟,杨晓光,王文峰,等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206. (Liu Z J, Yang X G, Wang W F, et al. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of northeast china under global climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2199-2206.)

[4] Mullet J E, Whitsitt M S. Plant cellular responses to water deficit [J]. Plant Growth Regulation, 1996, 20(2): 119-124.

[5] 刘珍环,唐鹏钦,范玲玲,等. 1980—2010 年东北地区种植结构时空变化特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4107-4119. (Liu Z H, Tang P Q, Fan L L, et al. Spatio-temporal changes of cropping types in northeast China during 1980-2010 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(21): 4107-4119.)

[6] 盖志佳,张敬涛,刘婧琦,等. 耐低温大豆品种(系)的筛选与研究[J]. 中国种业, 2018(6): 57-60. (Gai Z J, Zhang J T, Liu J Q, et al. Screening and study on low temperature tolerant soybean varieties(lines) [J]. China Seed Industry, 2018(6): 57-60.)

[7] 张大伟,杜翔宇,刘春燕,等. 低温胁迫对大豆萌发期生理指标的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(2): 228-232. (Zhang D W, Du X Y, Liu C Y, et al. Effect of low-temperature stress on physiological indexes of soybean at germination stage [J]. Soybean Science, 2010, 29(2): 228-232.)

[8] 张思河,王萍,马淑英,等. 三个熟期类型大豆种子萌发进程中

耐冷性的比较[J]. 大豆科学,2000,19(3): 218-222. (Zhang S H, Wang P, Ma S Y, et al. Comparative study on the cold tolerance of three maturity type soybean seeds during the course of germination[J]. Soybean Science,2000,19(3): 218-222.)

[9] 郝晶,张立军,谢甫绀. 低温对大豆不同耐冷性中萌发期保护酶活性的影响[J]. 大豆科学,2007,26(2): 171-175. (Hao J, Zhang L J, Xie F T. Effects of the low temperature on defense enzyme activities of different chilling tolerant soybean cultivars during the germination[J]. Soybean Science,2007, 26(2): 171-175.)

[10] 鲁杰,刘宝忠,周传远,等. 生物有机菌肥对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(6): 146-150. (Lu J, Liu B Z, Zhou C Y, et al. Effect of biological manure fertilizer on yield and quality of rice [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2009,25(6): 146-150.)

[11] 朱云娜,刘建国. 生物菌肥在玉米栽培上的效果[J]. 安徽农业科学,2013,41(28):11354-11356. (Zhu Y N, Liu J G. Effects of biological bacterium manure in maize cultivation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2013,41(28): 11354-11356.)

[12] 崔曾杰,耿艳秋,范丽丽,等. 生物菌肥对盐碱地水稻生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业科学,2013,38(5): 32-35. (Cui Z J, Geng Y Q, Fan L L, et al. Effects of bacterial manure on the growth and yield of rice growing in saline-alkali land[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences,2013,38(5): 32-35.)

[13] 毛家伟,张翔,李亮,等. 施用生物菌剂对烤烟叶片生理特征及钾、氯含量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(3): 181-187. (Mao J W, Zhang X, Li L, et al. Effects of biological agent application on leaf physiological characteristics, potassium and chlorine contents of flue-cured tobacco[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2020,38(3): 181-187.)

[14] 侯立刚,刘会芳,田健,等. 不同菌剂浓度对低温处理下水稻种子萌发能力的影响[J]. 种子,2021,40(3): 87-96. (Hou L G, Liu H F, Tian J, et al. Effects of different concentrations of bacterial agents on the germination ability of rice seeds under low temperature treatment[J]. Seed,2021,40(3): 87-96.)

[15] 乌兰,夏尔瓦古丽·吐尔逊江,戴爱梅. 两种生物菌剂对棉花低温抗逆增产的田间试验[J]. 植物医生,2017,30(6): 32-34. (Wu L, Sharvaguli T, Dai A M. Field experiment of two biological agents on low temperature stress resistance and yield increase of cotton[J]. Plant Doctor, 2017, 30(6): 32-34.)

[16] 刘佳琪,关法春,黄风兰,等. 低温条件下生物菌肥对蓖麻生长影响的研究[J]. 辽宁林业科技,2020(6): 19-22. (Liu J Q, Guan F C, Huang F L, et al. The effect of biological bacterial fertilizer on the growth of *Ricinus communis* under low temperature[J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2020(6): 19-22.)

[17] 隋世江,安景文,娄春荣,等. 微生物菌剂对大豆产量和根瘤数的影响[J]. 辽宁农业科学,2010(6): 49-50. (Sui S J, An J W, Lou C R, et al. Effects of microbial agents on soybean yield and nodule number [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2010(6): 49-50.)

[18] 刘文志,王北兰,李鹏,等. 生物制剂对大豆根腐病菌的抑制及对大豆幼苗生长的影响[J]. 现代化农业,2010(12): 21-24. (Liu W Z, Wang B L, Li P, et al. Inhibition of biological agents on soybean root rot and its effect on the growth of soybean seedlings [J]. Modernizing Agriculture,2010(12): 21-24.)

[19] 葛红莲,张福丽,李俐俐. 复合光合菌剂对大豆幼苗生理生化特性和根际土壤酶活性的影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(5): 713-717. (Ge H L, Zhang F L, Li L L. Effects of composite photosynthetic bacteria PS11 on physiological-biochemical characteristics and rhizosphere soil enzyme activities of soybean seedling [J]. Soybean Science, 2014, 33(5): 713-717.)

[20] 王学奎. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006. (Wang X K. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006.)

[21] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-260. (Li H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134-260.)

[22] 李凯峰,姜存良,包昌艳,等. 生物菌肥对猕猴桃生长和生理特性的影响[J]. 中国果树, 2020(3): 72-75. (Li K F, Jiang C L, Bao C Y, et al. Effects of microbial fertilizer on growth and physiological characteristics of kiwifruit [J]. China Fruits, 2020(3): 72-75.)

[23] 郁万文. 银杏抗寒机理及种质资源抗寒性评定的初步研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008. (Yu W W. Preliminary studies on cold-resistance mechanism and identification of *Ginkgo* germplasm[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.)

[24] 李明玉,曹辰兴,于喜艳. 低温锻炼对冷胁迫下黄瓜幼苗保护性酶的影响[J]. 西北农业学报, 2006, 15(1): 160-164. (Li M Y, Cao C X, Yu X Y. Effects of cold acclimation on protective enzymes of cucumber seedling under cold stress [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2006, 15(1): 160-164.)

[25] Silin S N, Guy R D, Lavender D P. Mefluidide-induced drought resistance in seedlings of three cenifer species [J]. Canadian Journal of Botany, 1993, 71(8): 1087-1092.

[26] 崔帅,赵兰勇,李承水,等. 卫矛属3种常绿阔叶树木抗寒性研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(7): 17-20. (Cui S, Zhao L Y, Li C S, et al. Research on cold resistance in three evergreen broadleaf trees of *Euonymus* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(7): 17-20.)

[27] 卢芳,朱鸿菊,秦登. 徐州地区8种常绿阔叶乔木抗寒性研究[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(5): 212-216. (Lu F, Zhu H J, Qin D. Study on cold resistance of 8 evergreen broad-leaved trees in Xuzhou [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(5): 212-216.)

[28] 杜有新,何春林,张乐华,等. 庐山若干常绿树种对冬季低温的生理生化响应[J]. 生态环境学报,2014,23(6): 945-949. (Du Y X, He C L, Zhang L H, et al. Physiochemical response of several evergreen trees to low temperature stress in winter in Lushan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(6): 945-949.)