



白宏宇, 杨培志, 胡跃高, 王小芬. 施用农用酵素对大豆种子萌发及幼苗生长发育的影响[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(01): 11-20.

BAI Hongyu, YANG Peizhi, HU Yuegao, WANG Xiaofen. Effects of agricultural Jiaosu application on soybean seed germination and seedling growth and development[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(01): 11-20.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.01.02

施用农用酵素对大豆种子萌发及幼苗生长发育的影响

白宏宇^{1,2} 杨培志^{1*} 胡跃高² 王小芬²

(1. 西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国农业大学 农学院, 北京 100193)

摘 要 为探究农用酵素对大豆种子萌发及幼苗生长的影响,以‘中华皇1号’为试材,在发芽试验中设置农用酵素稀释 $80\times(J_{80})$ 、 $100\times(J_{100})$ 、 $120\times(J_{120})$ 3个浓度处理,以清水浸种为对照(CK),根据种子的发芽势和发芽率,筛选最适酵素浸种浓度;以最适浓度浸种配合 $200\times$ 酵素稀释液叶面喷施进行双因素盆栽试验,设置清水浸种+清水叶面喷施(Z_0P_0)、酵素浸种+清水叶面喷施(Z_1P_0)、清水浸种+酵素叶面喷施(Z_0P_1)、酵素浸种+酵素叶面喷施(Z_1P_1)4个处理,测定出苗25d后的株高、相对叶绿素含量(SPAD)、根长、植株干物质质量及根冠比等指标。结果表明: J_{80} 、 J_{100} 、 J_{120} 处理的种子发芽势和发芽率均高于CK,其中 J_{80} 的发芽率为90%,显著高于CK(82%)($P<0.05$),农用酵素浸种适宜浓度为稀释 $80\times$ 。盆栽试验中, Z_1P_1 的株高较 Z_0P_0 高13.54%($P<0.05$), Z_1P_0 和 Z_0P_1 的株高分别较 Z_0P_0 高3.26%和5.23%; Z_1P_0 和 Z_1P_1 的根长分别比 Z_0P_0 高60.12%和43.87%($P<0.05$), Z_0P_1 根长较 Z_0P_0 高26.08%; Z_1P_0 和 Z_0P_1 的幼苗干物质积累分别较 Z_0P_0 高47.48%、34.33%($P<0.05$), Z_1P_1 幼苗的干物质积累较 Z_0P_0 高22.85%;而 Z_0P_0 、 Z_0P_1 、 Z_1P_1 的SPAD分别较 Z_1P_0 高7.99%、8.49%、12.01%($P<0.05$),所有盆栽处理的根冠比均 <0.5 。通过隶属函数综合评价可知, Z_1P_1 处理对大豆幼苗生长促进效果优于其他处理。综上,农用酵素 $80\times$ 稀释液浸种配合 $200\times$ 酵素稀释液喷施(Z_1P_1)可有效促进大豆种子萌发、幼苗的株高和生物量积累,有利于实现有机旱作大豆高效优质生产。

关键词 农用酵素; 大豆; 种子萌发; 幼苗生长

中图分类号 S529

文章编号 1007-4333(2026)01-0011-10

文献标志码 A

Effects of agricultural Jiaosu application on soybean seed germination and seedling growth and development

BAI Hongyu^{1,2}, YANG Peizhi^{1*}, HU Yuegao², WANG Xiaofen²

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To study the effects of agricultural Jiaosu on seed germination and seedling growth of soybean, soybean variety ‘Zhonghuahuang No. 1’ was used as test material. In germination test, three concentrations of agricultural Jiaosu were set up, which diluted $80\times(J_{80})$, $100\times(J_{100})$ and $120\times(J_{120})$, and the control was water (CK). The optimal concentration of Jiaosu soaking was selected according to the germination energy and germination rate. A two-factor pot experiment was conducted using seed soaking at the most suitable concentration combined with foliar spray of $200\times$ Jiaosu dilution solution. Four treatments were set up: Seed soaking with clear water + foliar spray with clear water (Z_0P_0), seed soaking with Jiaosu + foliar spray with clear

收稿日期: 2025-01-26; 接受日期: 2025-03-18

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1901103)

第一作者: 白宏宇(ORCID:0009-0000-2956-8861), 硕士研究生, E-mail: 2696450617@qq.com

通讯作者: 杨培志(ORCID:0000-0002-5937-837X), 教授, 主要从事牧草种质资源利用及育种研究, E-mail: yangpeizhi@126.com

water (Z_1P_0), seed soaking with clear water + foliar spray with Jiaosu (Z_0P_1), and seed soaking with Jiaosu + foliar spray with Jiaosu (Z_1P_1). The plant height, relative chlorophyll content (SPAD), root length, plant dry matter weight and root shoot ratio were determined at 25 d after seedling emergence. The results showed that the germination energy and germination rate of seeds treated with J_{80} , J_{100} and J_{120} were higher than those of CK. The germination rate of J_{80} was 90%, which was significantly higher than CK (82%) ($P < 0.05$). The suitable concentration of agricultural Jiaosu for soaking seeds is diluted 80 $\times$. In the pot experiment, plant height of Z_1P_1 was increased by 13.54% ($P < 0.05$) compared to Z_0P_0 , while the plant height of Z_1P_0 and Z_0P_1 was 3.26% and 5.23% higher than that of Z_0P_0 . The root length of Z_1P_0 and Z_1P_1 increased by 60.12% and 43.87% compared to Z_0P_0 ($P < 0.05$), respectively, and root length of Z_0P_1 was 26.08% higher than that of Z_0P_0 . The seedling dry matter accumulation of Z_1P_0 and Z_0P_1 was increased by 47.48% and 34.33% compared with Z_0P_0 , respectively ($P < 0.05$), while dry matter accumulation of Z_1P_1 seedlings was 22.85% higher than that of Z_0P_0 . The SPAD of Z_0P_0 , Z_0P_1 and Z_1P_1 was 7.99%, 8.49%, and 12.01% higher than that of Z_1P_0 ($P < 0.05$). And all pot treatments had root shoot ratios < 0.5 . Comprehensive evaluation based on membership functions indicates that treatment Z_1P_1 has better effect on promoting soybean seedling growth than other treatments. In conclusion, seed soaking in 80 $\times$ diluted agricultural Jiaosu solution combined with spraying with a 200 $\times$ diluted Jiaosu solution (Z_1P_1) can effectively promote soybean seed germination, enhance seedling height and biomass accumulation of seedlings, which is conducive to achieving efficient and high-quality organic dry-farming soybean production.

Keywords agricultural Jiaosu; soybean; seed germination; seedling growth

大豆作为原产于中国的重要粮油作物,富含蛋白质、脂肪等基础营养成分,以及大豆异黄酮、维生素E等功能成分,在食品加工、畜禽饲料及保健品等领域被广泛应用,随着国民饮食结构升级,市场对高品质有机大豆的需求持续攀升^[1-5]。在山西黄土高原地区的有机旱作种植模式下,丘陵坡耕地种植的大豆因缺乏灌溉条件,常面临种子萌发阶段水分不足、幼苗生长缺水萎蔫等问题,导致缺苗率高、苗期长势弱^[6-7],造成大豆严重减产^[8]。因此,在有机旱作模式下,探索提高大豆发芽能力与苗期生长能力的技术措施具有重要意义。

在解除大豆种子休眠方法中,化学药剂浸种的方法被广泛应用^[9],很多研究已经证实,多种外源物质可以促进大豆种子萌发及幼苗生长^[10-17]。相比之下,能够满足有机种植要求且易推广的替代物^[18]则相对少见。已有研究表明,乳酸菌及其衍生的有机酸对植物种子萌发及幼苗生长均具有促进作用^[19-20]。农用酵素是将果蔬等高水高糖有机废弃物转化为富含本地有益微生物的发酵产品,其特点为富含乳酸菌等有益微生物,及有机酸和其他活性成分^[21]。已有研究发现,农用酵素具有重要的生态综合效应^[22],在减少堆肥的氮损失^[23]、促进人粪尿资源化利用^[24],以及改良土壤结构和理化性质^[25-27]等方面均表现出良好的潜力。此外,农用酵素能促进多种作物生长、改善果实品

质^[28-33],并对土传病害具有防治效果^[34-36]。目前,关于农用酵素对大豆种子萌发及幼苗生长作用的研究鲜见报道。本研究以山西省灵丘县新引进的大豆品种‘中华皇1号’为材料,通过设置不同稀释倍数的农用酵素进行种子浸种萌发试验和双因素幼苗盆栽试验,测定发芽势、发芽率、株高、根长、SPAD、干物质量及根冠比等指标,分析农用酵素对大豆种子萌发及幼苗生长的影响,旨在明确农用酵素对大豆种子萌发及幼苗生长的作用效果,以为有机旱作大豆播种及苗期优质高效生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大豆品种为‘中华皇1号’,2022年由山东省滨州市惠民县蛙声小镇引进,来源为田间收获样品。品种特点为籽粒较大,颜色淡黄,百粒重为22 g,株高可达1 m以上,有效分枝数7个,单株结荚160个左右,生育期150~165 d,产量300 kg/667 m²左右。农用酵素来自中国农业大学作物生态循环工程实验室,按 $w_{\text{红糖}}:w_{\text{有机物料}}:w_{\text{水}}=1:3:10$ 均匀混合,厌氧发酵3个月以上制得。农用酵素理化指标:pH 3.71,乳酸4.01 g/L,乙酸15.48 g/L,丙酸7.81 g/L,总碳21.13 g/L,有机质36.43 g/L。发芽试验在山西省大同市灵丘县全域有机农业科技小

院实验室进行,盆栽试验在山西省大同市灵丘县全域有机农业科技小院大棚进行。

1.2 试验方法

1.2.1 发芽试验

设置农用酵素稀释 $80\times(J_{80})$ 、 $100\times(J_{100})$ 、 $120\times(J_{120})$ 3个浓度梯度,以清水浸种作为对照(CK)。浸种时间为12 h。每个处理设3次重复,每个重复100粒均匀饱满的种子。在铺有湿润滤纸的培养皿中进行发芽试验,于25℃恒温培养箱中黑暗培养7 d,统计第3天的发芽数计算发芽势,第7天的发芽数计算发芽率。

1.2.2 盆栽试验

基于萌发试验结果,选取 $80\times$ 酵素稀释液浸种,配合 $200\times$ 酵素稀释液^[37]作为叶面喷施浓度,进行浸种和叶面喷施的双因素盆栽试验。试验共设4个处理:清水浸种+清水叶面喷施(Z_0P_0)、酵素浸种+清水叶面喷施(Z_1P_0)、清水浸种+酵素叶面喷施(Z_0P_1)、酵素浸种+酵素叶面喷施(Z_1P_1)。每个处理为12盆,每盆播种15粒种子,使用北京鸿信达生物有机菌肥有限公司育苗基质。统计出苗情况,于大豆幼苗第一复叶完全展开后测定相对叶绿素含量(SPAD),第一次测定后,每3 d测定1次,共测定5次,每次测量各组处理取长势相同的9株进行测量,每株叶片测量5次,取均值。在出苗后25 d,测量大豆幼苗的株高、根长,并将植株分为根、茎、叶三部分,于60℃烘箱中烘至恒重后称量各部分干重。

1.3 测定指标及方法

分别于种子萌发后的第3和第7天统计发芽种子数,计算发芽势和发芽率,计算公式如下:

发芽势=(第3天发芽种子数/供试种子数) $\times$ 100%;

发芽率=(第7天发芽种子数/供试种子数) $\times$ 100%。

使用连云港金升科技有限公司便捷式叶绿素测定仪 SPAD-502 Plus 测量大豆幼苗植株的第一复叶的相对叶绿素含量(SPAD)。用直尺测量从子叶痕到植株顶端生长点的垂直高度记为株高,cm。用卷尺测量从子叶痕至主根末端的长度记为根长,cm。将植株各部分在60℃下烘至恒重,记为干物质量,g。并计算根冠比,根冠比=根部干重/(茎部干重+叶部干重)。

1.4 隶属函数计算方法

参考朱艳柳等^[38]的方法,对所测的指标进行定量转换,计算不同处理下大豆幼苗各指标的平均隶属函数值,其中数值越高说明该处理对幼苗生长影响越大。若指标与幼苗生长呈正相关,采用隶属函数公式(1),若指标与幼苗生长呈负相关,则用反隶属函数公式(2),公式如下:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (1)$$

$$Z_{ij} = 1 - \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (2)$$

式中: Z_{ij} 为隶属函数值, X_{ij} 为*i*处理下*j*指标的测定值, $X_{j\max}$ 为*j*指标的最大值, $X_{j\min}$ 为*j*指标的最小值。

1.5 数据处理

采用 Excel 进行数据整理和图表绘制,利用 DPS 7.05 和 SPSS 27.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(ANOVA)比较处理间差异,并用 Duncan's 新复极差法进行显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

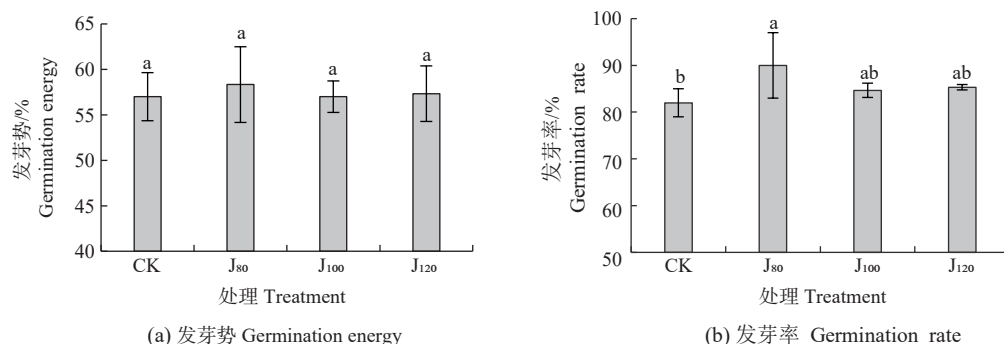
2.1 农用酵素不同浓度浸种对大豆种子萌发的影响

由图1可知,农用酵素不同浓度处理的大豆种子的发芽势、发芽率与清水处理(CK)相比均有所升高。CK、 J_{80} 、 J_{100} 和 J_{120} 的发芽势分别为57.00%、58.33%、57.00%和57.33%;CK、 J_{80} 、 J_{100} 和 J_{120} 的发芽率分别为82.00%、90.00%、84.67%和85.33%。其中 J_{80} 的发芽率(90.00%)较CK(82.00%)高9.76%($P<0.05$)。因此,酵素稀释浓度 $80\times$ 是大豆‘中华皇1号’种子萌发最适浓度,后续盆栽试验浸种浓度为酵素稀释 $80\times$ 。

2.2 农用酵素的施用方式对大豆幼苗生长发育的影响

2.2.1 对大豆幼苗株高的影响

由图2可知,盆栽试验中,清水浸种+清水叶面喷施(Z_0P_0)、酵素浸种+清水叶面喷施(Z_1P_0)、清水浸种+酵素叶面喷施(Z_0P_1)、酵素浸种+酵素叶面喷施(Z_1P_1)处理的大豆幼苗株高分别为8.34、8.61、8.77、9.46 cm; Z_1P_0 、 Z_0P_1 、 Z_1P_1 的株高分别较 Z_0P_0 高3.26%、5.23%、13.54%。其中 Z_1P_1 株高为9.46 cm,较 Z_0P_0 (8.34 cm)提升13.54%($P<0.05$)。综上,农用酵素浸种和叶面酵素喷施处理



(a) 发芽势 Germination energy

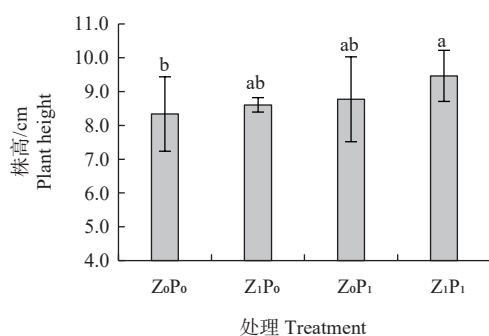
(b) 发芽率 Germination rate

CK、J₈₀、J₁₀₀和J₁₂₀分别代表清水对照及农用酵素稀释80×、100×、120×。不同小写字母表示同一时期处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

CK, J₈₀, J₁₀₀ and J₁₂₀ represent the clear water control and the dilution of agricultural Jiaosu by 80, 100 and 120 times. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 不同处理的种子发芽势和发芽率

Fig. 1 Germination energy and germination rate of seed under different treatments



Z₀P₀为清水浸种+清水叶面喷施, Z₁P₀为酵素浸种+清水叶面喷施, Z₀P₁为清水浸种+酵素叶面喷施, Z₁P₁为酵素浸种+酵素叶面喷施。下同。

Z₀P₀ is clear water soaking seed + clear water foliar spraying, Z₁P₀ is Jiaosu soaking seed + clear water foliar spraying, Z₀P₁ is clear water soaking seed + Jiaosu foliar spraying, Z₁P₁ is Jiaosu soaking seed + Jiaosu foliar spraying. The same below.

图2 不同处理的大豆幼苗株高

Fig. 2 Plant height of soybean seedlings under different treatments

均有助于提高大豆幼苗株高,其中Z₁P₁的提升效果优于其他处理。

2.2.2 对大豆幼苗相对叶绿素含量(SPAD)的影响

由图3可知,各取样时期中,Z₁P₀的SPAD均显著低于Z₀P₀($P < 0.05$)。所有处理的SPAD均随大豆幼苗的生长而逐渐上升。11月24日Z₀P₀的SPAD较Z₁P₀高7.99%。Z₀P₁和Z₁P₁的SPAD分别较Z₁P₀高8.49%和12.01%($P < 0.05$)。Z₁P₁的SPAD最高,其次为Z₀P₁。综上,酵素浸种配合叶面喷施处理(Z₁P₁)的大豆幼苗叶绿素含量最高,叶面喷施酵素(Z₀P₁)次之。叶面喷施酵素能有效提升大豆幼苗的SPAD。

2.2.3 对大豆幼苗根长的影响

由图4可知,Z₀P₀、Z₁P₀、Z₀P₁、Z₁P₁的根长分别为30.73、49.20、38.74、44.21 cm,不同酵素处理的根长与对照相比均有所升高。Z₁P₀、Z₀P₁、Z₁P₁的根长分别较Z₀P₀高60.12%、26.08%、43.87%。

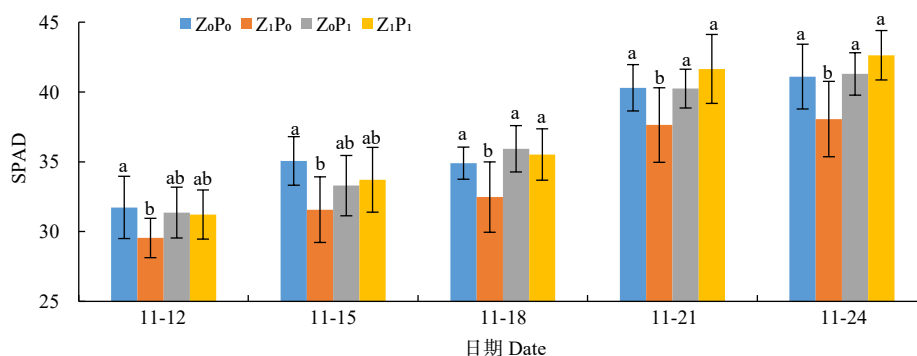


图3 不同处理大豆幼苗的SPAD

Fig. 3 SPAD of soybean seedlings under different treatments

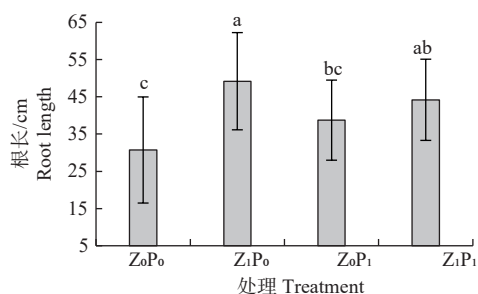


图4 不同处理的大豆幼苗根长

Fig. 4 Root length of soybean seedlings under different treatments

Z0P1与Z0P0间差异不显著。但Z1P0、Z1P1的根长均显著高于Z0P0 ($P < 0.05$)。可见,酵素处理对大豆幼苗主根生长有促进作用,其中酵素浸种处理(Z1P0)的效果最好,酵素浸种配合叶面喷施处理(Z1P1)对大豆幼苗根长的促进作用次之。

2.3 农用酵素的不同施用方式对大豆幼苗干物质积累及分配的影响

由图5可知,Z1P0、Z0P1、Z1P1的根干物质积累量

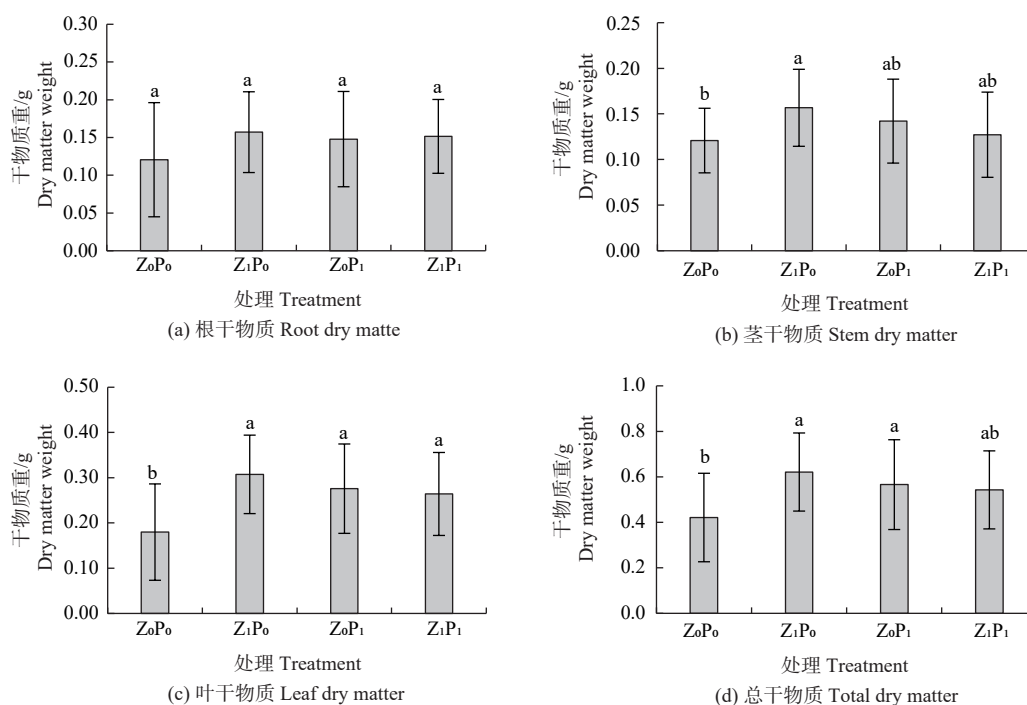


图5 不同处理的大豆幼苗的干物质重

Fig. 5 Dry matter weight of soybean seedlings under different treatments

2.4 不同农用酵素处理下大豆幼苗生长指标的综合评价

由表1可知,各处理的大豆幼苗SPAD、株

与Z0P0相比均有所提高,但是各处理差异不显著。Z0P0、Z1P0、Z0P1、Z1P1的单株根干物质重分别为0.120 6、0.157 1、0.147 9、0.151 5 g。Z1P0、Z0P1、Z1P1的单株根干物质重较Z0P0分别高30.27%、22.64%、25.62%。Z1P0、Z0P1、Z1P1茎的干物质积累量均高于Z0P0。Z1P0茎的干物质重较Z0P0升高29.7% ($P < 0.05$)。Z1P0、Z0P1、Z1P1叶的干物质积累量均高于Z0P0,且Z1P0、Z0P1、Z1P1的叶干物质重均显著高于Z0P0 ($P < 0.05$)。Z1P0、Z0P1的大豆幼苗总干物质重均显著高于Z0P0 ($P < 0.05$),分别较Z0P0高47.48%、34.33%。综上,酵素处理可促进大豆幼苗根、茎、叶及总干物质的积累,Z1P0的总干物质积累量最高,Z0P1次之。

由图6可知,Z0P0、Z1P0、Z0P1、Z1P1的根冠比分别为0.370 8、0.335 8、0.348 5、0.395 4。Z1P0、Z0P1、Z1P1的大豆幼苗的根冠比与Z0P0无显著差异。其中Z1P0、Z0P1的根冠比较Z0P0分别低9.44%、6.01%。Z1P1较Z0P0高6.63%。可见,酵素处理对植物根冠比的影响并不显著。

高、根长、根冠比和总干重等的综合评分在0.250~0.868,排名依次为Z1P1>Z0P1>Z1P0>Z0P0,其中,Z1P1的得分最高。可见,酵素浸种+

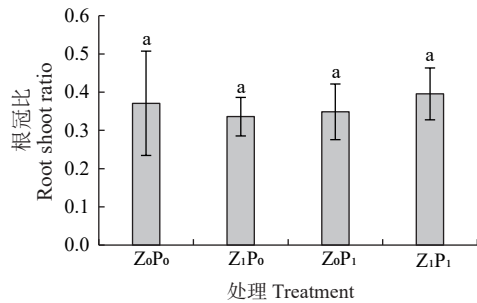


图6 不同处理的大豆幼苗根冠比

Fig. 6 Root shoot ratio of soybean seedlings under different treatments

表1 不同处理下大豆幼苗生长指标综合得分及排名

Table 1 Comprehensive scores and rank of soybean seedling growth indicators under different treatments

指标 Index	SPAD	株高 Plant height	根长 Root length	根冠比 Root shoot ratio	总干重 Dry weight	综合评分值 Comprehensive score value	排名 Rank
Z ₁ P ₁	1.000	1.000	0.730	1.000	0.608	0.868	1
Z ₀ P ₁	0.707	0.386	0.434	0.213	0.723	0.493	2
Z ₁ P ₀	0.000	0.240	1.000	0.000	1.000	0.448	3
Z ₀ P ₀	0.665	0.000	0.000	0.587	0.000	0.250	4

酵素叶面喷施(Z₁P₁)处理对大豆幼苗生长的促进效果优于其他处理。

3 讨 论

3.1 不同浓度的农用酵素浸种对大豆种子萌发的影响

浸种是打破种子休眠的有效手段,且具备成本低效率高的优点^[39]。选择合适的外源试剂处理可以促进大豆种子萌发^[40]。已有研究结果表明,植物有益菌的接种对种子发芽有促生作用^[41]。赵红等^[42]研究表明,大蒜鳞茎浸提液对大豆种子萌发和幼苗生长显示出低浓度促进、高浓度抑制的效果。低浓度丁香酸对发芽率影响不大,但是种子萌发出出现了延迟,发芽势也受到影响^[43]。本试验结果表明,用稀释80×的农用酵素(J₈₀)处理大豆种子发芽势和发芽率最高,分别较清水浸种对照(CK)高2.33%和9.76%(图1)。这可能是农用酵素富含短链有机酸和有益微生物,在低浓度时,有益微生物积极活动,适合浓度的微生物代谢产物可以有效促进大豆种子萌发过程^[44]。然而,高浓度的酸类物质则可能抑制种子萌发,这与 Viard 等^[45]和林雁冰等^[46]研究结论相契合。可见,农用酵素稀释80×处理(J₈₀)大豆种子的发芽势和发芽率最高,适当稀释的农用酵素对大豆种子萌发有促进作用。这一发

现印证了焦浩^[47]提出的低浓度有机酸(如乙酸、丙二酸)对大豆种子萌发具有促进作用的结论。

3.2 农用酵素的不同施用方法对大豆幼苗生长发育的影响

光合作用对维持植株正常生理活动以及合成营养成分具有重要作用^[48-49]。本研究通过分析不同农用酵素施用方式对大豆幼苗相对叶绿素含量(SPAD)的影响,发现清水浸种配合酵素叶面喷施(Z₀P₁)、酵素浸种配合酵素叶面喷施(Z₁P₁)均可有效提高叶片的SPAD,其中酵素浸种结合叶面喷施(Z₁P₁)的效果最为显著,其次为叶面喷施(Z₀P₁)。该结果与 Hao 等^[50]研究结果一致。农用酵素中所含的矿质养分、有机酸、植物激素(如生长素)等活性成分可经叶片表面直接吸收,迅速参与叶片内叶绿素合成代谢途径,进而有效提升叶绿素含量^[21]。

农用酵素的不同施用方法对大豆幼苗的株高和根长均有促进作用。孙培等^[51]研究结果显示,有益菌株可促进玉米株高的增长。张银翠等^[52]研究发现,耐盐促生菌在正常环境中可显著促进燕麦的株高。王子萱等^[15]的研究表明,黑曲霉可促进大豆幼苗的株高。施雨^[53]和陈素玉^[54]的研究表明,外源褪黑素能显著增加NaCl胁迫下紫花苜蓿和大豆幼

苗的根长。连玉武等^[55]研究发现,叶面喷施农用酵素可显著提高水稻幼苗的株高和根长。陶波等^[56]研究表明,一定浓度的青霉菌发酵液浸种及喷施茎叶可显著促进大豆的株高和根长。在本研究中, Z_1P_0 、 Z_0P_1 、 Z_1P_1 处理的株高较 Z_0P_0 均有所提高。其中 Z_1P_1 的株高提升最为显著,较 Z_0P_0 高13.54%(图2)。农用酵素处理对大豆幼苗根长有促进作用,其中 Z_1P_0 效果最佳, Z_1P_1 也能有效提高根长,分别较 Z_0P_0 高60.12%、43.87%(图4)。这一结果与刘珂^[57]用蕈草酵素根施和叶面喷施处理水培生菜的结论一致。Li等^[58]研究证实,农用酵素能提供糖类、氨基酸、植物激素等多种物质,可直接满足作物的营养需求,促进根系与地上部生长。

3.3 农用酵素的不同施用方法对大豆幼苗干物质积累及分配的影响

不同的农用酵素处理方式,对大豆幼苗干物质积累均能产生积极影响。刘希港^[59]的研究表明,施用酵素对番茄植株干物质积累具有促进作用。本研究结果显示, Z_1P_0 的根、茎、叶干物质积累最多, Z_0P_1 的茎、叶干物质积累次之。总干物质积累量方面, Z_1P_0 、 Z_0P_1 、 Z_1P_1 的总干重较 Z_0P_0 分别升高47.48%、34.33%、28.85%(图5),其中 Z_1P_0 、 Z_0P_1 均显著高于 Z_0P_0 ($P<0.05$)。不同的农用酵素处理方式对根冠比影响不显著。农用酵素各处理均可提高根、茎、叶的干物质积累量, Z_1P_0 在干物质积累方面表现最为突出,根、茎、叶的干物质积累量分别比 Z_0P_0 高30.27%、29.72%、70.97%(图5)。这一结果与外源喷施油菜素内酯^[60]、褪黑素^[61]等促进大豆干物质积累的研究结果类似,表明农用酵素可加快大豆幼苗对营养的吸收和利用,促进大豆幼苗干物质的积累^[62]。

3.4 不同农用酵素处理下大豆幼苗生长指标综合评价

隶属函数法通过量化各指标的隶属度,能够有效整合多个指标的影响,从而实现多因素的综合评价^[63]。大豆幼苗的生长表现是产量形成的基础,明确农用酵素对幼苗生长指标的效果具有实践意义。本研究通过隶属函数法进行综合评价,结果表明 Z_1P_1 的综合得分为0.868(表1), Z_1P_1 的大豆幼苗SPAD、株高、根冠比等指标的隶属函数值均高于其他处理,说明 Z_1P_1 可有效协调大豆幼苗的地上部和地下部的生长,提升幼苗的整体长势。其原因可能

为酵素浸种促进了根系早期发育,酵素叶面喷施提高了叶片光合能力,从而协同促进了地上部和地下部的生长,这种类似生物刺激素的协同增效作用在拟南芥^[64]中也有报道。因此,本研究中 Z_1P_1 是促进大豆幼苗生长的最优处理。

4 结 论

发芽试验中,稀释80×的农用酵素浸种处理(J_{80})表现最优,发芽势和发芽率均高于清水对照(CK),发芽率为90%,显著高于CK(82%)($P<0.05$)。盆栽试验中,酵素浸种配合酵素叶面喷施处理(Z_1P_1)促进株高效果最显著,株高为9.46 cm,较清水浸种和叶面喷施(Z_0P_0)高13.54%($P<0.05$)。 Z_1P_1 的SPAD提升最高,较单独酵素浸种(Z_1P_0)高12.01%($P<0.05$)。 Z_1P_0 促进根长的效果最佳, Z_1P_1 次之,分别较 Z_0P_0 高60.12%、43.87%($P<0.05$)。干物质积累上, Z_1P_0 的总干重最高,较 Z_0P_0 高47.48%($P<0.05$)。通过隶属函数综合评价发现, Z_1P_1 综合评分最高,为0.868,对提升大豆幼苗株高、叶绿素含量及根冠比效果最佳。综上,80×酵素稀释液浸种配合200×酵素稀释液叶面喷施处理(Z_1P_1)可有效促进大豆种子萌发,提高幼苗株高和生物量,有利于实现有机旱作大豆高效优质生产。

参考文献 References

- [1] 崔凯宇,李迎秋.大豆中主要活性成分提取的研究进展[J].江苏调味副食品,2016,33(2):12-14
Cui K Y, Li Y Q. The research progress in the extracting active compositions from soybean[J]. *Jiangsu Condiment and Subsidiary Food*, 2016, 33(2): 12-14(in Chinese)
- [2] 张东辉,杨青春,耿臻,张保亮,舒文涛,李金花,李琼.有机大豆营养功效及栽培技术[J].农业工程,2017,7(2):136-137
Zhang D H, Yang Q C, Geng Z, Zhang B L, Shu W T, Li J H, Li Q. Nutritional efficacy and cultivation techniques of organic soybean[J]. *Agricultural Engineering*, 2017, 7(2): 136-137(in Chinese)
- [3] 蔡中雨.浅谈我国大豆产业现状与存在问题[J].现代农业,2019(5):107
Cai Z Y. Discussion on the present situation and existing problems of soybean industry in China[J]. *Modern Agriculture*, 2019(5): 107(in Chinese)
- [4] 曾仕林.大豆油无皂精炼新工艺的研究[D].武汉:武汉轻工大学,2020
Zeng S L. Research on the new technology of soybean oil-free refining[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2020(in Chinese)
- [5] 王开勇,郭岩彬,孟凡乔,焦子伟,吴文良.有机耕作对大豆土壤-植株氮磷吸收及品质的影响[J].中国农学通报,2013,29(33):248-252
Wang K Y, Guo Y B, Meng F Q, Jiao Z W, Wu W L. Effect of organic cultivation on soil nitrogen and phosphorus uptake and quality of soybean[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(33): 248-252(in Chinese)
- [6] 王娟玲.立足有机旱作全面推进功能食品(农业)发展[J].山西农业科学,2017,

- 45(11):1900-1902
- Wang J L. Promoting the development of functional food(agriculture)based on organic dry farming[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(11): 1900-1902 (in Chinese)
- [7] 刘彩霞, 李明, 杜天庆, 崔福柱, 薛建福, 陈梦妮, 祁剑英. 半干旱地区不同前作模式对后茬大豆产量和土壤水分的影响[J]. 作物杂志, 2017(3): 121-126
- Liu C X, Li M, Du T Q, Cui F Z, Xue J F, Chen M N, Qi J Y. Effects of different pre-production patterns on soybean yield and soil moisture in semiarid region[J]. *Crops*, 2017(3): 121-126 (in Chinese)
- [8] 王诗雅, 冯乃杰, 项洪涛, 冯胜杰, 郑殿峰. 水分胁迫对大豆生长与产量的影响及应对措施[J]. 中国农学通报, 2020, 36(27): 41-45
- Wang S Y, Feng N J, Xiang H T, Feng S J, Zheng D F. Water stress: Effects on growth and yield of soybean and the countermeasures[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(27): 41-45 (in Chinese)
- [9] 刘梅清, 徐锦文, 刘媛媛, 魏舒畅. 药用植物种子休眠及萌发特性研究进展[J]. 中兽医医药杂志, 2023, 42(4): 47-51
- Liu M Q, Xu Y W, Liu Y Y, Wei S C. Seed dormancy and germination characteristics of medicinal plants [J]. *Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine*, 2023, 42(4): 47-51 (in Chinese)
- [10] 余小壮, 张燕, 高大鹏, 杨微微. 盐酸环丙沙星对大豆早期生长发育的影响[J]. 生物化工, 2024, 10(4): 43-48
- Yu X Z, Zhang Y, Gao D P, Yang A A. Effects of ciprofloxacin hydrochloride on early growth and development of *Glycine max* (L.) merr[J]. *Biological Chemical Engineering*, 2024, 10(4): 43-48 (in Chinese)
- [11] 杨海燕, 张秋雨, 潘琪芳, 初少华, 杨夕佳, 韩京龙, 周培, 丁文江. 镁氢包衣对大豆萌发和幼苗生长的影响[J]. 科技导报, 2024, 42(15): 58-68
- Yang H Y, Zhang Q Y, Pan Q F, Chu S H, Yang X J, Han J L, Zhou P, Ding W J. The effects of seed coating by magnesium hydrides on germination and seedling growth of soybeans [J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(15): 58-68 (in Chinese)
- [12] 韩俊艳, 王敬言, 刘诗琦, 冷玉莹, 何进, 林楚航. 重金属镉胁迫对大豆种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 沈阳大学学报: 自然科学版, 2023, 35(2): 108-115
- Han J Y, Wang J Y, Liu S Q, Leng Y Y, He J, Lin C H. Effects of cadmium stress on seed germination and seedling growth of soybean seed [J]. *Journal of Shenyang University: Natural Science*, 2023, 35(2): 108-115 (in Chinese)
- [13] 刘佳丽. 重金属镉对大豆种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 农业技术与装备, 2023(12): 13-15
- Liu J L. Effects of heavy metal cadmium on seed germination and seedling growth of soybean seeds [J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2023(12): 13-15 (in Chinese)
- [14] 李傲宇, 李瑞敏, 陈翼芝, 于爽. 外源水杨酸、褪黑素对盐胁迫下大豆种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(19): 31-36
- Li A Y, Li R M, Chen Y Z, Yu S. Effects of exogenous salicylic acid or melatonin on seed germination and seedling growth of soybean under salt stress [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2024, 30(19): 31-36 (in Chinese)
- [15] 王子萱, 王继华. 黑曲霉对大豆种子萌发及幼苗生长的促生作用[J]. 华北农学报, 2022, 37(S1): 133-140
- Wang Z X, Wang J H. Effect of *Aspergillus niger* on seed germination and seedling growth of soybean [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(S1): 133-140 (in Chinese)
- [16] 赵肖琼, 张恒慧, 赵润柱, 张新梅. 聚乙烯与磺胺二甲噻唑复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 5092-5101
- Zhao X Q, Zhang H H, Zhao R Z, Zhang X M. Effects of combined stress of polyethylene and sulfamethazine on seed germination, seedling growth, and physiological characteristics of soybean [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 5092-5101 (in Chinese)
- [17] 徐芬芬, 王爱斌. 干旱胁迫对大豆种子萌发和幼苗生理的影响[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(6): 8-11
- Xu F F, Wang A B. Effects of drought stress seed germination and seedling physiology of soybean [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2022, 41(6): 8-11 (in Chinese)
- [18] 王小芬, 高游慧, 郑泽慧, 陈春虹, 徐鹏举, 胡跃高. 论县域低成本高质量有机农业技术推广131模式[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 49-59
- Wang X F, Gao Y H, Zheng Z H, Chen C H, Xu P J, Hu Y G. Discussion on the 131 model of low cost and high quality organic agriculture technology promotion in the county area [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 49-59 (in Chinese)
- [19] Raman J, Kim J S, Choi K R, Eun H, Yang D, Ko Y J, Kim S J. Application of Lactic Acid Bacteria (LAB) in sustainable agriculture: Advantages and limitations [J/OL]. *International Journal of Molecular Sciences*, (2022-07-14). DOI: doi.org/10.3390/ijms23147784
- [20] Abhyankar P S, Gunjal A B, Kapadnis B P, Ambade S V. Potential of Lactic acid bacteria in plant growth promotion [J]. *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*, 2022, 36(4): 326-329
- [21] Gao Y H, Zhang Y, Cheng X Q, Zheng Z H, Wu X H, Dong X H, Hu Y G, Wang X F. Agricultural Jiaosu: An eco-friendly and cost-effective control strategy for suppressing *Fusarium* root rot disease in *Astragalus membranaceus* [J/OL]. *Frontiers in Microbiology*, (2022-03-31). DOI: doi.org/10.3389/fmicb.2022.823704
- [22] 张越, 王小芬. 农用植物酵素在有机农业生产中的生态作用[J]. 鄱阳湖学刊, 2019(1): 70-74
- Zhang Y, Wang X F. Ecological effect of plant Jiaosu for agriculture in organic agricultural production [J]. *Journal of Poyang Lake*, 2019(1): 70-74 (in Chinese)
- [23] 张越, 赵宇宾, 蔡亚凡, 刘小平, 胡跃高, 王小芬. 农用植物酵素的生态效应研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 25-35
- Zhang Y, Zhao Y B, Cai Y F, Liu X P, Hu Y G, Wang X F. Ecological effects of plant Jiaosu for agriculture: A review [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3): 25-35 (in Chinese)
- [24] Xu S L, Gu X H, Wu Q, Gao Y H, Cai Y F, Ma S S, Zheng Z H, Wang X F. An ecological and economic approach to enhancing the agronomic quality of anaerobic digestate: Effects of adding agricultural Jiaosu on metabolism and the microbial community [J/OL]. *Chemical Engineering Journal*, (2023-07-15). DOI: doi.org/10.1016/j.cej.2023.143648
- [25] 张立超. 环保酵素改良滨海盐碱性土壤的应用研究[J]. 资源节约与环保, 2019(3): 8
- Zhang L C. Application of environmental yeast in the improvement of coastal saline-alkali soil [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2019(3): 8 (in Chinese)
- [26] 韩剑宏, 刘泽霞, 张连科, 李玉梅, 姜庆宏, 王维大. 生物炭和环保酵素对盐碱化土壤特性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 1029-1036
- Han J H, Liu Z X, Zhang L K, Li Y M, Jiang Q H, Wang W D. Effects of biochar and environmental enzymes on the characteristics of salinized soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(5): 1029-1036 (in Chinese)
- [27] 杨园媛, 贾圣青, 杨辉, 张明科. 土壤调理剂与酵素施用对土壤理化性质及甘蓝产量的影响[J]. 蔬菜, 2020(2): 14-19
- Yang Y Y, Jia S Q, Yang H, Zhang M K. Effects of soil conditioners and enzyme application on soil physical and chemical properties and yield of cabbage [J]. *Vegetables*, 2020(2): 14-19 (in Chinese)
- [28] 刘宇, 陈娇月, 赵飞, 刘小平, 张强, 周立宏, 高游慧. 农用酵素对有机番茄高品质生产的作用[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 137-152
- Liu Y, Chen J Y, Zhao F, Liu X P, Zhang Q, Zhou L H, Gao Y H. Effects of agricultural Jiaosu on the high-quality production of organic tomato [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 137-152 (in Chinese)
- [29] 韩亚萍. 硒与酵素混施对番茄与菠菜生长及品质的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020
- Han Y P. Effect of selenium mixed with enzyme on growth and quality of

- tomato and spinach[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [30] 马玉婷. 蔬菜尾菜生物降解及回用技术研究[D]. 扬州:扬州大学, 2018
- Ma Y T. Research on biodegradation and reuse technology of vegetable waste [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018 (in Chinese)
- [31] 普燕爽, 陶津, 林森, 赵敏慧. 环保酵素对朝天椒生长势及土壤有效磷、水解氮的影响研究[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(3): 5-11
- Pu Y S, Tao J, Lin S, Zhao M H. Effect on the growth of pod pepper and soil available phosphorus and hydrolyzable nitrogen by irrigating garbage enzyme[J]. *Environmental Science Survey*, 2019, 38(3): 5-11 (in Chinese)
- [32] 李洁, 陈凯, 郝小燕, 周娴, 蒋卫芬. 植物酵素对大棚青椒生长及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2015 (11): 82-83, 86
- Li J, Chen K, Hao X Y, Zhou X, Jiang W F. Effect of using plant enzymes on growth and yield of green pepper[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015 (11): 82-83, 86 (in Chinese)
- [33] 陶津, 李云龙, 周根国, 赵敏慧. 环保酵素对土壤理化性质及辣椒生长的影响[J]. 玉溪师范学院学报, 2017, 33(4): 35-40
- Tao J, Li Y L, Zhou G G, Zhao M H. Influence of environmental enzyme on the physico-chemical properties of soil and the growth of pepper[J]. *Journal of Yu.xi Normal University*, 2017, 33(4): 35-40 (in Chinese)
- [34] 朱丽梅, 刘艳芝, 王淑霞, 徐祥文, 马井玉. 环保酵素防治 3 种蔬菜病害的初步研究[J]. 中国园艺文摘, 2017, 33(5): 40-41
- Zhu L M, Liu Y Z, Wang S X, Xu X W, Ma J Y. Preliminary study on the use of environmental yeast to control three types of vegetable diseases[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2017, 33(5): 40-41 (in Chinese)
- [35] 覃叶欣. 茄果类蔬菜酵素对西瓜幼苗生长及其枯萎病防治效果的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019
- Qin Y X. Growth of watermelon seedlings by solanaceous vegetable enzymes study on the control effect of *Fusarium* wilt [D]. Nanning: Guangxi University, 2019 (in Chinese)
- [36] 刘艳娜, 崔楠楠, 张杰, 于凤鸣, 张立彬, 姚允聪. 芳香植物源营养液对梨树的抑菌和营养效应[J]. 中国农业科学, 2011, 44(19): 3981-3990
- Liu Y N, Cui N N, Zhang J, Yu F M, Zhang L B, Yao Y C. Effect of aromatic plant-derived nutrient solution on inhibition of harmful bacteria and nutrition for pear plants[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(19): 3981-3990 (in Chinese)
- [37] 马桂军, 刘云, 高树青. 果树喷施酵素菌叶面肥的效果初报[J]. 河北果树, 2005 (4): 16-17
- Ma G J, Liu Y, Gao S Q. Preliminary report on the effect of yeast bacteria foliar fertilizer sprayed on fruit trees[J]. *Hebei Fruits*, 2005(4): 16-17 (in Chinese)
- [38] 朱艳柳, 周雪, 徐伶俐, 王彩云, 马晋芳, 阮培均, 周丹, 葛发欢. 基于隶属函数法的不同产区天麻品质的综合评价研究[J]. 中药材, 2024, 47(2): 409-414
- Zhu Y L, Zhou X, Xu L L, Wang C Y, Ma J F, Ruan P J, Zhou D, Ge F H. Comprehensive evaluation of *Gastrodia elata* Quality in different regions using the subordinate function method[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2024, 47(2): 409-414 (in Chinese)
- [39] 闫文静, 谢辉, 秦丽欢, 阿丽娅·阿力木, 张大海, 胡佳丽, 任晓梅. 不同处理对轮台白杏种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 经济林研究, 2024, 42(1): 168-177
- Yan W J, Xie H, Qin L H, A-liya A, Zhang D H, Hu J L, Ren X M. Study seed germination and seedling growth of Luntai white apricot (*Prunus armeniaca* L.) with different treatments [J]. *Non-wood Forest Research*, 2024, 42(1): 168-177 (in Chinese)
- [40] 于明艳. 不同外源性试剂对大豆种子萌发的影响[J]. 农业科技与装备, 2020 (2): 50-51
- Yu M Y. Effects of different exogenous reagents on soybean seed germination [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2020(2): 50-51 (in Chinese)
- [41] 张悦. 植物促生菌对盐胁迫下大豆生长的调控作用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023
- Zhang Y. Regulation of plant growth promoting bacteria on soybean growth under salt stress[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [42] 赵红, 王婷, 余李. 大蒜鳞茎浸提液对大豆种子萌发和幼苗生长的化感效应[J]. 大豆科学, 2019, 38(4): 548-553
- Zhao H, Wang T, Yu L. Allelopathic effects of garlic bulb aqueous extracts on seed germination and seedling growth of soybean[J]. *Soybean Science*, 2019, 38(4): 548-553 (in Chinese)
- [43] 陈芸, 阿则古丽·麦合木提, 马刘峰. 丁香酸和阿魏酸对大豆种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2017, 36(1): 108-111
- Chen Y, Azegul M, Ma L F. Effects of ferulic acid and syringic acid on seed germination and seedling growth of soybean[J]. *Seed*, 2017, 36(1): 108-111 (in Chinese)
- [44] 靳振江, 黄何, 何曙光. 链霉菌 FB1 的发酵产物对 5 种豆科植物种子萌发的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(3): 443-446
- Jin Z J, Huang H, He S G. Effects of the fermentation production of *Streptomyces* fb1 on germination of 5 plant seeds from leguminous [J]. *Soybean Science*, 2007, 26(3): 443-446 (in Chinese)
- [45] Viard-Cr  tat F, Baptist F, Secher-Fromell H, Gallet C. The allelopathic effects of *Festuca paniculata* depend on competition in subalpine grasslands [J]. *Plant Ecology*, 2012, 213(12): 1963-1973
- [46] 林雁冰, 薛泉宏, 颜霞. 覆膜条件下小麦和玉米根系化感作用对土壤微生物的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(1): 92-95
- Lin Y B, Xue Q H, Yan X. Effects of allelopathy of maize and wheat root on soil microorganism under the plastic film mulching condition [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(1): 92-95 (in Chinese)
- [47] 焦浩. 三种外源酸类物质对大豆种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2015
- Jiao H. Influence of three exogenous acids on germination and seedling growth of soybean[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2015 (in Chinese)
- [48] 牟保民, 刘雅, 郑殿峰, 冯乃杰, 项洪涛, 靳丹, 王诗雅, 刘美玲. 不同时期高氮施肥对大豆光合生理特性及产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2021, 33(6): 7-13
- Mu B M, Liu Y, Zheng D F, Feng N J, Xiang H T, Jin D, Wang S Y, Liu M L. Effects of high nitrogen fertilization at different growth stages on photosynthetic physiological characteristics and yield of soybean [J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2021, 33(6): 7-13 (in Chinese)
- [49] 任廷虎, 李宗尧, 杜斌, 张兴惠, 徐铮, 高大鹏, 郑宾, 赵伟, 李耕, 宁堂原. 有机肥施用及合理密植提高黄淮海地区夏大豆光系统性能与籽粒产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1361-1375
- Ren T H, Li Z Y, Du B, Zhang X H, Xu Z, Gao D P, Zheng B, Zhao W, Li G, Ning T Y. Improving photosynthetic performance and yield of summer soybean by organic fertilizer application and increasing plant density [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1361-1375 (in Chinese)
- [50] Hao J H, Xu J, Li Q Q, Li Z Y, Zhang Y, Wang S, Li J. Phyllosphere microbiota and metabolomic insights of sewage sludge-derived biostimulant in enhancing nutritional quality and disease resistance of Pakchoi cabbage [J/OL]. *Sustainable Horizons*, (2025-09-19). DOI: doi. org/10. 1016/j. horiz. 2025. 100161
- [51] 孙培, 王昱, 张亚楠, 李倩, 季静, 杨丹, 袁东, 王畅, 王昱蓉, 王萍. 一种耐盐促生菌筛选、鉴定及对玉米幼苗生长的影响[J]. 生物技术通报, 2019, 35(8): 27-33
- Sun P, Wang G, Zhang Y N, Li Q, Ji J, Yang D, Yuan D, Wang C, Wang Y R, Wang P. Screening and identification of a salt-tolerant growth-promoting bacterium and its effect on the growth of maize seedlings [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(8): 27-33 (in Chinese)
- [52] 张银翠, 姚拓, 赵桂琴, 徐茜, 王振龙, 包康, 撒冬荣. 耐盐促生菌筛选鉴定

- 及对盐胁迫燕麦生长的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2645-2652
- Zhang Y C, Yao T, Zhao G Q, Xu X, Wang Z L, Bao K, Han D R. Screening and identification of salt-tolerant growth promoting rhizobacteria and its effects on oat growth under salt stress[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(12): 2645-2652 (in Chinese)
- [53] 施雨. 褪黑素对盐胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长生理特性的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022
- Shi Y. Effects of melatonin on seed germination and seedling growth and physiological characteristics of alfalfa under salt stress[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022 (in Chinese)
- [54] 陈素玉. 外源褪黑素对盐胁迫下大豆幼苗生长的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023
- Chen S Y. Effects of exogenous melatonin on the growth of soybean seedlings under salt stress[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [55] 连玉武, 孙文彬, 张艳梅, 隋丽丽, 梁会欣. 植物酶素对水稻增产效应及作用机理[J]. 科技创新与品牌, 2018(3): 67-71
- Lian Y W, Sun W B, Zhang Y M, Sui L L, Liang H X. Effect and mechanism of plant enzyme on rice yield increase[J]. *Sci-Tech Innovations and Brands*, 2018(3): 67-71 (in Chinese)
- [56] 陶波, 张健, 韩玉军, 王小琴, 乔禹欣, 祖永平. 青霉菌发酵液对大豆幼苗生长及生理特性的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(3): 399-404
- Tao B, Zhang J, Han Y J, Wang X Q, Qiao Y X, Zu Y P. Effect of *Penicillium* fermented liquid on seedling on growth and physiological characteristics of soybean[J]. *Soybean Science*, 2017, 36(3): 399-404 (in Chinese)
- [57] 刘珂. 葆草酵素根施和叶面喷施对水培生菜生长及品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021
- Liu K. Effects of *Humulus* enzyme root application and foliar spraying on the growth and quality of hydroponic lettuce[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [58] Li M, Yue T R, Luo W C, Li J Q, Wang H, Wang X T, Du Q J, Wang J Q, Xiao H J. A novel approach for utilizing wild plant resources in green agricultural production: A case study of preparing agricultural Jiaosu from *Humulus scandens*[J/OL]. *Bioresource Technology*, (2025-10-02). DOI: doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133434
- [59] 刘希港. 微生物菌剂和玉米蛋白酶素对长季节栽培番茄生长、产量及品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024
- Liu X G. The Effects of microbial aggregates and maize protein enzyme on tomato growth, yield, and quality in long-season cultivation[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [60] 谢云灿. 外源油菜素内酯对大豆高温胁迫的缓解效应及其生理机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2017
- Xie Y C. Alleviated effects of exogenous EBR on high temperature stress and the underling physiological mechanisms in soybean[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [61] 邹京南. 外源褪黑素对干旱胁迫下大豆光合及生长的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019
- Zou J N. Effects of exogenous melatonin on photosynthesis and growth of soybean under drought stress[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [62] 张向东, 闫路海, 陈申宽, 孙赫君, 于朝贵, 周传余. 内蒙古呼伦贝尔市大豆田间酵素菌肥效试验[J]. 黑龙江农业科学, 2007(2): 46-47
- Zhang X D, Yan L H, Chen S K, Sun H J, Yu C G, Zhou C Y. Experiment on the effect of ferment bacterial fertilizer utilized in soybean field in hulunbeir city of Mongolia[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2007(2): 46-47 (in Chinese)
- [63] 朱萱, 滕文军, 董双慧, 丁国昌, 张辉, 岳跃森, 滕珂, 温海峰, 范希峰, 武菊英. 4种观赏草容器苗最适基质配比的筛选[J]. 草原与草坪, 2024, 44(6): 181-190
- Zhu X, Teng W J, Dong S H, Ding G C, Zhang H, Yue Y S, Teng K, Wen H F, Fan X F, Wu J Y. Screening of the optimal substrate ratio of container seedlings of four ornamental grasses[J]. *Grassland and Turf*, 2024, 44(6): 181-190 (in Chinese)
- [64] Roupheal Y, Spíchal L, Panzarová K, Casa R, Colla G. High-throughput plant phenotyping for developing novel biostimulants: From lab to field or from field to lab[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2018-08-14). DOI: doi.org/10.3389/fpls.2018.01197

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 白宏宇, 西北农林科技大学草业与草原学院农艺与种业专业硕士研究生。2022和2023年曾获西北农林大学硕士校级学业奖学金, 参与十四五国家重点研发计划项目(2021YFD1901103)。



通讯作者简介: 杨培志, 博士, 西北农林科技大学草业与草原学院教授, 博士生导师, 主要从事牧草种质资源利用及育种方面研究。国家牧草产业技术体系-榆林综合试验站站长, 中国草学会牧草育种委员会副主任, 中国草学会教育专业委员会副主任, 陕西省林草品种审定委员会委员。主持国家自然科学基金重点项目、联合重点项目等十余项。曾获2024年梁希林业科学技术奖科技进步二等奖、2011年农业部中华农业科技奖一等奖、2007年陕西省人民政府科学技术奖二等奖, 2000年以来发表论文92篇、专利授权8项, 主编或参编出版著作7部。