

3 株芽孢杆菌及其混合发酵液对西瓜幼苗生长的影响

陈 甦, 段海明, 李 帅, 杨胜雨, 周 慧, 高青海

(安徽科技学院农学院 安徽凤阳 233100)

摘要: 为探究芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗生长的影响, 提高西瓜幼苗质量, 以西瓜品种早佳(8424)为材料, 研究不同浓度的3株芽孢杆菌(解淀粉芽孢杆菌 sj1606, 贝莱斯芽孢杆菌 sj1616, 枯草芽孢杆菌 sj1701)及其混合发酵液对西瓜幼苗生长及生理特性的影响。结果表明, 不同芽孢杆菌发酵液均能促进西瓜幼苗的生长发育, 其中混合发酵液 D4(250 mL·L⁻¹)处理的西瓜幼苗株高和鲜质量较对照(蒸馏水)分别提高了 23.27% 和 21.89%, 叶绿素含量相比对照提高了 49.66%, 解淀粉芽孢杆菌 sj1606 中 A4(250 mL·L⁻¹)处理的过氧化氢酶活性最高, 达到 243.83 mg·g⁻¹·min⁻¹。通过隶属函数的综合指标分析得出, 混合发酵液 D4 处理的西瓜幼苗生长优势最为明显。

关键词: 西瓜; 芽孢杆菌; 幼苗生长; 壮苗指数; 生理特性

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)02-046-06

Effects of three strains of *Bacillus* and their mixed fermentation broth on the growth of watermelon seedlings

CHEN Su, DUAN Haiming, LI Shuai, YANG Shengyu, ZHOU Hui, GAO Qinghai

(College of Agriculture, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, Anhui, China)

Abstract: In order to explore the effect of *Bacillus* fermentation broth on the growth of watermelon seedlings and improve the quality of watermelon seedlings, the watermelon variety Zaojia 8424 was used as the material to study the effects of different concentrations of three *Bacillus* strains (*Bacillus amyloliquefaciens* sj1606, *Bacillus velezensis* sj1616, *Bacillus subtilis* sj1701) and their mixed fermentation broth on the growth and physiological characteristics of watermelon seedlings. The results showed that all the three *Bacillus* fermentation broths could promote the growth and development of watermelon seedlings. Among them, the plant height and fresh weight of watermelon seedlings treated with mixed fermentation broth D4 increased by 23.27% and 21.89%, respectively, compared with the control, and the chlorophyll content increased by 49.66%. The catalase activity of *Bacillus amyloliquefaciens* sj1606 A4 treatment reached 243.83 mg·g⁻¹·min⁻¹. Through the comprehensive index analysis of membership function, it was concluded that the growth advantage of watermelon seedlings treated with mixed fermentation broth D4 was the most obvious.

Key words: Watermelon; *Bacillus*; Seedling growth; Seedling strength index; Physiological characteristics

西瓜(*Citrullus lanatus*)属于葫芦科西瓜属作物, 中国是世界上西瓜生产和消费第一大国, 根据联合国粮农组织(FAO)数据显示, 中国西瓜产业发展迅速, 2022年我国西瓜产量占世界产量的59.3%, 种植面积达到140.59万hm²[1-2]。培育高质量的西瓜幼苗是西瓜高产稳产的基础, 在育苗过程中添加有益微生物是实现西瓜壮苗的一种重要手段[3]。

到目前为止, 已经证实有20多个种属的根际微生物具有促进植物生长的能力, 其中芽孢杆菌属是研究最多且应用最广泛的一类细菌[4-6]。芽孢杆

菌(*Bacillus* spp.)是一类重要的微生物菌种资源, 其具有耐热性好、抗逆性强、稳定性高, 且来源广泛等特点[7-8]。同时, 芽孢杆菌能够固氮、解磷和解钾, 还可以合成植物激素, 如植物生长素(IAA)、细胞分裂素(CTK)、赤霉素(CA)和乙烯等物质来刺激和调节植物的生长状况[9-10]。刘丽英等[11]研究表明, 枯草芽孢杆菌制备的菌肥SNB-86处理连作平邑甜茶, 其幼苗鲜质量和干质量分别比连作土对照增加了171.5%和142.3%, 株高和地径分别比连作土对照增加了97.9%和57.6%。姜海燕[12]研究指出, 接种枯

收稿日期: 2023-05-22; 修回日期: 2023-11-23

基金项目: 安徽省科技重大专项(202003b06020029)

作者简介: 陈 甦, 男, 在读硕士研究生, 主要从事西瓜抗病栽培研究。E-mail: c1746548377@163.com

通信作者: 高青海, 男, 教授, 主要从事西瓜高产栽培研究。E-mail: gaoqh1977@163.com

草芽孢杆菌可以促进西瓜植株的生长发育,植株干、鲜质量及叶片数均有所提高。毕延刚等^[13]研究表明,堆肥中的微生物和枯草芽孢杆菌均可显著减弱病原菌对黄瓜生长的抑制作用,在接种病原菌的基质中,添加堆肥和微生物的黄瓜幼苗植株总生物量均显著高于未添加处理。笔者以西瓜品种早佳(8424)为试验材料,研究3株芽孢杆菌及其混合发酵液对西瓜幼苗生长和生理特性的影响。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试西瓜材料为早佳(8424),由昌吉市绿力种业有限公司生产;3株芽孢杆菌分别为解淀粉芽孢杆菌(sj1606)、贝莱斯芽孢杆菌(sj1616)和枯草芽孢杆菌(sj1701),由安徽科技学院农学院实验室保存提供;育苗基质为园艺作物育苗有机基质,由江苏培蕾科技发展有限公司生产。

1.2 方 法

1.2.1 发酵液制备方法 将培养3 d的解淀粉芽孢杆菌 sj1606、贝莱斯芽孢杆菌 sj1616 和枯草芽孢杆菌 sj1701 分别接种于装有 LB 液体培养基^[9]的试管中,摇培 20 h,以空白 LB 培养基调零,在 600 nm 波长下调节 OD 值到 1.0,将 3 株菌分别接种至装有 LB 液体培养基的三角瓶中,混合菌液以 1:1:1 的比例接种,然后以 33 °C、130 r·min⁻¹ 摇培 3 d。将培养好的芽孢杆菌发酵液分别用蒸馏水稀释至 100、150、200、250 和 300 mL·L⁻¹ 备用。

1.2.2 试验设计 试验于 2023 年 3—5 月在安徽科技学院农学院实验室中进行。将西瓜种子浸种催芽后播种于 50 孔的穴盘(54 cm×28 cm)中,每孔播种 1 粒种子,放到人工气候箱中培养。待西瓜出苗 7 d 后,选择整齐一致无病害的幼苗进行处理,在西瓜幼苗根际周围灌入 20 mL 不同浓度芽孢杆菌发酵液,采用完全随机区组设计,每个处理 10 次重复,共 210 株。本试验共设置 21 个处理,其中 A1、A2、A3、A4、A5 处理分别为 100、150、200、250、300 mL·L⁻¹ 的解淀粉芽孢杆菌 sj1606 发酵液,B1、B2、B3、B4、B5 处理分别为 100、150、200、250、300 mL·L⁻¹ 的贝莱斯芽孢杆菌 sj1616 发酵液,C1、C2、C3、C4、C5 处理分别为 100、150、200、250、300 mL·L⁻¹ 的枯草芽孢杆菌 sj1701 发酵液,D1、D2、D3、D4、D5 处理分别为 100、150、200、250、300 mL·L⁻¹ 的混合发酵液,以每株 20 mL 的蒸馏水处理为 CK。待西瓜幼苗生长到 4 叶 1 心时测定西

瓜幼苗生长指标和生理指标,各处理重复测定 3 次。

1.2.3 西瓜生长指标测定 测量子叶至根基部位置为株高,子叶下方 1/3 处直径为茎粗测量点。用清水将整株植株清洗干净,吸干多余水分,用天平分别称量地上部和地下部质量后,于 105 °C 下杀青 15 min,并于 75 °C 烘干至恒质量,分别称量地上部和地下部干质量。

1.2.4 叶绿素含量测定 使用手持式叶绿素仪 (SPAD 502-plus) 测定叶绿素含量,测定方法:每个处理测定 3 株,叶片选择西瓜幼苗相同叶位的叶片,每个叶片测量 3 次取平均值。

1.2.5 生理指标测定 采用紫外吸收法^[14]测定过氧化氢酶活性;采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[14]测定可溶性蛋白含量;采用硫代巴比妥酸法^[14]测定丙二醛含量;采用 TTC 法^[14]测定根系活力;采用活体法^[15]测定硝酸还原酶活性。

1.2.6 壮苗指数及隶属函数值 壮苗指数及隶属函数值计算公式如下,其中丙二醛含量的隶属函数值用(1)式计算,其他指标均用(2)式计算。

壮苗指数=(茎粗/株高+根干质量/地上部分干质量)×全株干质量。

$$X_u = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}); \quad (1)$$

$$X_u = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})。 \quad (2)$$

式中 X 为测定指标值, X_{\min} 为该指标测定最小值, X_{\max} 为该指标测定最大值,平均隶属函数值越大表示西瓜综合指标越好。

1.3 数 据 分 析

采用 Excel 2003 处理数据及绘图,采用 SPSS 26.0 对数据进行单因素方差分析和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗生长的影响

由表 1 可知,不同芽孢杆菌发酵液,以及不同浓度对西瓜幼苗生长的影响各有差异。与对照相比,不同发酵液处理在一定浓度下对西瓜幼苗的生长具有促进作用。其中,混合发酵液 D4 处理的株高和茎粗均最大,分别达到 23.63、0.467 cm,较 CK 分别提高了 23.27% 和 26.22%,显著高于其他处理。在植株鲜质量方面,D4 处理也达到最高,地上部和地下部鲜质量分别达到 8.854 g 和 0.923 g,分别较 CK 提高了 21.19% 和 29.09%;B3 处理的地上部和地下部鲜质量分别达到 8.321 g 和 0.830 g,相比 CK 分别提高了 13.89% 和 16.08%,均显著高于 CK。从壮苗指数看,A4 和 D4 处理分别达

表1 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗生长的影响

Table 1 Effects of different *Bacillus* fermentation broth on the growth of watermelon seedlings

处理 Treatment	株高 Height/cm	茎粗 Stem diameter/cm	鲜质量 Fresh mass/g		干质量 Dry mass/g		壮苗指数 Seedling index
			地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root	
CK	19.17±0.31 j	0.370±0.003 j	7.306±0.014 h	0.715±0.026 ghi	0.735±0.005 g	0.038±0.003 g	0.055±0.003 f
A1	19.53±0.59 ij	0.381±0.006 fghi	7.413±0.009 efgh	0.738±0.009 fghi	0.757±0.002 def	0.045±0.002 f	0.063±0.002 e
A2	20.87±0.38 def	0.388±0.007 ef	7.562±0.034 defg	0.749±0.020 efgh	0.766±0.003 cde	0.052±0.003 abc	0.070±0.003 bc
A3	21.30±0.53 de	0.417±0.006 d	7.876±0.089 c	0.803±0.033 bcd	0.783±0.002 c	0.051±0.005 bcd	0.071±0.006 bc
A4	22.37±0.55 bc	0.440±0.006 c	8.173±0.111 b	0.832±0.029 bc	0.805±0.010 b	0.056±0.002 a	0.076±0.002 a
A5	20.43±0.71 efgh	0.379±0.003ghij	7.560±0.143 defg	0.772±0.025 def	0.752±0.005 efg	0.044±0.002 f	0.061±0.001 e
B1	19.57±0.35 ij	0.376±0.004 hij	7.344±0.054 gh	0.736±0.014 fghi	0.748±0.007 efg	0.046±0.003 ef	0.064±0.003 de
B2	21.10±0.36 de	0.387±0.004 efg	7.733±0.107 cd	0.789±0.020 cde	0.772±0.010 cd	0.050±0.001 bcde	0.069±0.002 cd
B3	22.87±0.25 b	0.451±0.004 b	8.321±0.422 b	0.830±0.018 bc	0.812±0.007 b	0.054±0.002 ab	0.074±0.002 ab
B4	20.00±0.36 ghij	0.376±0.003 hij	7.648±0.044 cde	0.817±0.019 bc	0.766±0.012 cde	0.046±0.003 f	0.064±0.003 de
B5	19.97±0.12 ghij	0.382±0.001 fgh	7.543±0.023 defgh	0.758±0.028 defg	0.759±0.008 def	0.044±0.003 f	0.062±0.003 e
C1	19.60±0.20 hij	0.377±0.002 hij	7.320±0.016 gh	0.702±0.015 i	0.743±0.004 fg	0.045±0.003 f	0.063±0.004 e
C2	20.20±0.26 fghi	0.381±0.004 fghi	7.377±0.058 fgh	0.723±0.027 ghi	0.736±0.002 g	0.045±0.002 f	0.062±0.002 e
C3	21.17±0.40 de	0.384±0.003 fgh	7.620±0.031 def	0.755±0.009 efg	0.760±0.007 def	0.043±0.002 f	0.060±0.002 e
C4	21.60±0.26 cd	0.384±0.005 fgh	7.715±0.083 cd	0.761±0.018 defg	0.761±0.003 de	0.047±0.004 def	0.064±0.005 de
C5	19.47±0.31 ij	0.373±0.004 ij	7.498±0.082 defgh	0.709±0.014 hi	0.750±0.008 efg	0.044±0.001 f	0.062±0.001 e
D1	19.50±0.35 ij	0.376±0.003 hij	7.522±0.015 defgh	0.733±0.019 fghi	0.757±0.008 def	0.045±0.001 f	0.063±0.001 e
D2	20.73±0.67 efg	0.383±0.003 fgh	7.740±0.158 cd	0.792±0.010 cde	0.779±0.012 c	0.048±0.001 cdef	0.066±0.001 cde
D3	22.30±0.53 bc	0.394±0.009 e	8.167±0.172 b	0.837±0.034 b	0.820±0.021 b	0.052±0.003 abc	0.071±0.003 bc
D4	23.63±0.61 a	0.467±0.006 a	8.854±0.218 a	0.923±0.052 a	0.879±0.022 a	0.055±0.001 ab	0.077±0.001 a
D5	20.50±0.87 efg	0.380±0.003 fghi	7.412±0.007 efgh	0.801±0.012 bcd	0.755±0.003 def	0.045±0.002 f	0.062±0.002 e

注:表中数据为平均值±标准误,同列数据后不同字母表示在0.05水平差异显著。下同。

Note: The data in the table are mean ± standard error, and the different letters after the same column data indicate significant difference ($p < 0.05$). The same below.

到 0.076 和 0.077, 与 CK 相比分别提高了 38.18% 和 40.00%, 显著高于除 B3 外的其他处理。不同发酵液在一定浓度下处理的西瓜幼苗生长指标相较于 CK 均有提高, 说明芽孢杆菌发酵液在一定程度上能够促进西瓜幼苗的生长发育, 但不同芽孢杆菌发酵液的最适促生浓度不同, 其中解淀粉芽孢杆菌 sj1606、枯草芽孢杆菌 sj1701 和混合发酵液对西瓜幼苗促生最适宜浓度

(φ) 为 250 mL·L⁻¹, 其株高、茎粗和干鲜质量均在此浓度下达到最高值; 贝莱斯芽孢杆菌 sj1616 的最适浓度则为 200 mL·L⁻¹。

2.2 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素含量能够在一定程度上反映植物的光合作用质量。由图 1 可知, 不同芽孢杆菌发酵液处理均可使西瓜幼苗叶片叶绿素 SPAD 值有一定

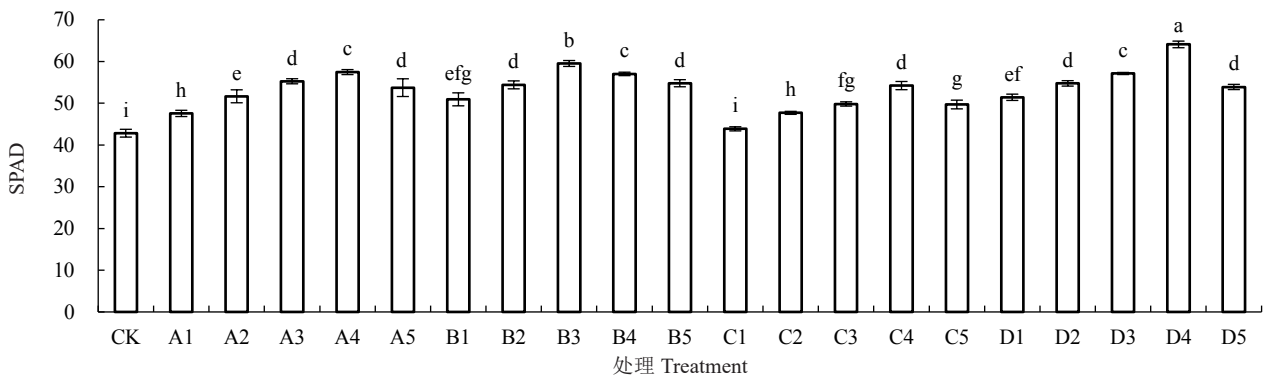


图1 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of different *Bacillus* fermentation broth on chlorophyll content of watermelon seedlings

的提高,其中混合发酵液 D4 处理的西瓜幼苗叶片叶绿素 SPAD 值最高,达到 64.10,较 CK 提高了 49.66%,其次是 B3 处理,达到了 59.53,D3 和 A4 处理次之,分别达到 57.13 和 57.46,而枯草芽孢杆菌 sj1701 的处理中,C4 处理为 54.23,均显著高于 CK。

2.3 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗根系活力的影响

从图 2 可以看出,混合发酵液 D4 处理西瓜幼苗根系活力高达 $39.49 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,较 CK 提高了 27.05%,显著高于其他处理。单一菌株发酵液处理中根系活力最高的分别为:A4($37.96 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)、B3

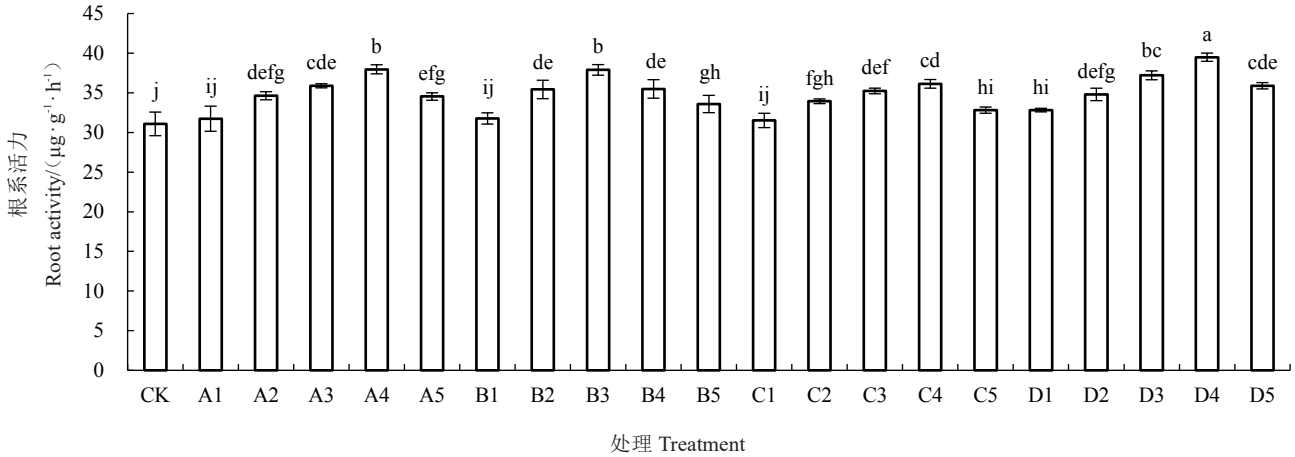


图 2 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗根系活力的影响

Fig. 2 Effects of different *Bacillus* fermentation broth on root activity of watermelon seedlings

($37.89 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)和 C4($36.13 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$),与 CK 相比分别显著提高了 22.13%、21.91%和 16.25%。由此说明,单一菌株发酵液和混合发酵液均能提高西瓜幼苗的根系活力,其中以混合发酵液 D4 处理

效果最好。

2.4 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗生理特性的影响

从表 2 中可以看出,单一菌株发酵液 A4 处理的西

表 2 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗生理特性的影响

Table 2 Effects of different *Bacillus* fermentation broth on physiological characteristics of watermelon seedlings

处理 Treatment	过氧化氢酶活性 Catalase activity/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	硝酸还原酶活性 Nitrate reductase activity/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	b(丙二醛) MDA content/ $(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$
CK	217.74±4.09 i	24.13±0.25 k	26.70±0.50 f	3.15±0.03 a
A1	236.01±1.50 defg	25.23±0.60 ij	27.30±0.16 ef	3.05±0.06 b
A2	239.39±2.83 bcd	26.17±0.68 fgh	28.49±0.16 cdef	3.00±0.07 bc
A3	242.89±0.89 ab	27.03±0.32 cde	28.91±0.71 bcdef	2.79±0.03 fgh
A4	243.83±0.68 a	27.97±0.31 b	29.74±0.28 abcd	2.97±0.04 c
A5	239.36±0.67 bcd	25.63±0.45 ghi	30.76±0.45 abc	2.82±0.01 ef
B1	234.90±0.71efgh	25.80±0.40 ghi	28.47±0.40 cdef	2.87±0.03 de
B2	236.65±0.78 def	26.83±0.61 cdef	28.78±0.14 bcdef	2.89±0.10 d
B3	241.79±2.32 abc	28.10±0.20 b	30.13±0.43 abcd	2.78±0.02 fghi
B4	235.74±1.08 defg	26.30±0.36 efgh	29.30±0.29 bcde	2.76±0.02 fghi
B5	231.55±1.23 h	25.47±0.15 hij	28.06±0.29 def	2.74±0.04 ghi
C1	231.68±2.29 h	24.80±0.44 jk	27.29±0.36 ef	2.81±0.02 fg
C2	238.39±5.89 cde	25.80±0.40 ghi	28.79±0.37 bcdef	2.90±0.02 d
C3	237.23±0.95 def	26.70±0.36 cdef	28.81±0.48 bcdef	2.79±0.01 fgh
C4	239.50±1.57 bcd	27.17±0.42 cd	29.97±0.17 abcd	2.74±0.04 ghi
C5	232.69±2.22 gh	25.23±0.60 ij	30.68±0.48 abc	2.74±0.03 ghi
D1	231.50±0.68 h	26.73±0.51 cdef	28.51±0.19 cdef	2.75±0.00 ghi
D2	234.20±0.32 fgh	27.43±0.45 bc	29.70±0.38 abcde	2.72±0.01 hi
D3	236.82±1.41 def	29.40±0.80 a	30.42±0.30 abcd	2.64±0.03 j
D4	242.83±1.19 ab	28.17±0.42 b	31.03±0.71 ab	2.71±0.00 i
D5	239.34±0.89 bcd	26.37±0.25 defg	31.82±5.40 a	2.74±0.01 ghi

瓜幼苗过氧化氢酶活性最高,为 243.83 mg·g⁻¹·min⁻¹,与 CK 相比显著提高了 11.98%。混合发酵液 D3 处理的可溶性蛋白含量(w)最高,为 29.40 mg·g⁻¹,较 CK 显著提高了 21.84%。混合发酵液 D5 硝酸还原酶活性最高,为 31.82 μg·g⁻¹·h⁻¹,较 CK 显著提高了 19.18%。丙二醛含量(b)最低的处理为混合发酵液 D3(2.64 mmol·g⁻¹),CK 的丙二醛含量最高,为 3.15 mmol·g⁻¹。

2.5 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗生长的综合评价

从表 3 中可以看到,混合发酵液 D4 处理的平均隶属函数值最高,达 0.95,贝莱斯芽孢杆菌 sj1616 中的 B3 处理和混合发酵液 D3 处理次之,分别达到 0.76 和 0.70,CK 的隶属函数值为 0.00。由此可见,不同处理的西瓜幼苗综合生长指标均高于 CK,其中 D4 处理的西瓜幼苗质量明显优于其他处理。

表 3 不同芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗生长的综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of watermelon seedling growth by different *Bacillus* fermentation solution

处理 Treatment	各指标隶属函数值 Membership function values of various indicators of malondialdehyde											
	株高 Height	茎粗 Stem diameter	鲜质量 Shoot mass	干质量 Root mass	壮苗指数 Seedling index	叶绿素含量 Chlorophyll content	过氧化氢酶活性 Catalase activity	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	硝酸还原酶活性 Nitrate reductase activity	根系活力 Root activity	丙二醛含量 MDA content	平均值 Average value
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A1	0.08	0.11	0.07	0.17	0.36	0.22	0.70	0.21	0.12	0.08	0.19	0.21
A2	0.38	0.19	0.17	0.28	0.68	0.42	0.83	0.39	0.35	0.41	0.30	0.40
A3	0.48	0.48	0.37	0.38	0.73	0.58	0.96	0.55	0.43	0.42	0.71	0.55
A4	0.72	0.72	0.56	0.55	0.95	0.69	1.00	0.73	0.59	0.57	0.36	0.68
A5	0.28	0.09	0.18	0.14	0.27	0.50	0.83	0.28	0.79	0.82	0.65	0.44
B1	0.09	0.06	0.03	0.13	0.41	0.38	0.66	0.89	0.35	0.08	0.54	0.33
B2	0.43	0.18	0.29	0.30	0.64	0.54	0.72	0.51	0.41	0.52	0.51	0.46
B3	0.83	0.84	0.64	0.58	0.86	0.79	0.92	0.75	0.67	0.81	0.72	0.76
B4	0.19	0.06	0.25	0.24	0.41	0.67	0.69	0.41	0.51	0.52	0.77	0.43
B5	0.18	0.12	0.16	0.18	0.32	0.56	0.53	0.25	0.27	0.30	0.79	0.33
C1	0.10	0.07	0.00	0.09	0.36	0.05	0.53	0.13	0.11	0.05	0.67	0.20
C2	0.23	0.11	0.04	0.05	0.32	0.23	0.79	0.32	0.41	0.34	0.49	0.30
C3	0.45	0.14	0.20	0.19	0.23	0.33	0.75	0.49	0.41	0.49	0.70	0.40
C4	0.54	0.14	0.26	0.22	0.41	0.54	0.83	0.58	0.64	0.60	0.79	0.50
C5	0.07	0.03	0.11	0.13	0.32	0.32	0.57	0.21	0.78	0.21	0.81	0.32
D1	0.07	0.06	0.13	0.18	0.36	0.40	0.53	0.49	0.35	0.21	0.79	0.32
D2	0.35	0.13	0.29	0.34	0.50	0.56	0.63	0.63	0.59	0.44	0.84	0.48
D3	0.70	0.25	0.56	0.61	0.73	0.67	0.73	1.00	0.73	0.73	1.00	0.70
D4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	0.77	0.85	1.00	0.85	0.95
D5	0.30	0.10	0.11	0.17	0.32	0.52	0.83	0.42	1.00	0.57	0.80	0.47

3 讨论与结论

西瓜幼苗生长质量对西瓜的产量和品质都有直接影响,因此,提高西瓜幼苗质量对西瓜产量和品质的提升具有重要意义^[16]。有研究表明,微生物能够在代谢过程中分泌植物生长激素(如 IAA、CA 和乙烯等),可以直接促进作物生长^[17-18]。武慧等^[19]研究表明,枯草芽孢杆菌与哈茨木霉的混合菌液灌根能够显著提高黄瓜幼苗的净光合速率,从而促进黄瓜幼苗生长。孙中华等^[20]研究表明,枯草芽孢杆菌 B67 对黄瓜幼苗根系的生长具有促进作用,在水培条件下,20%枯草芽孢杆菌 B67 发酵液处理 21 d

的黄瓜幼苗根长相比清水处理提高了 82.6%。栾换换等^[21]和杨倩等^[22]研究发现,芽孢杆菌 ZJM-P5 能够提高小红豆幼苗的氮肥利用率和对磷肥的吸收效率,促进其根系伸长、增大根面积和提高根冠比。本研究结果表明,3 株芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗均有促生效果,在一定浓度下芽孢杆菌发酵液能够显著提高西瓜幼苗的株高、茎粗、干鲜质量和壮苗指数,其中混合发酵液处理的促生效果优于单一菌剂,这可能与微生物之间的互作机制有关。这与黄文茂等^[23]的研究结果相似,其研究表明,贝莱斯芽孢杆菌 HP9 和坚强芽孢杆菌 HP10 混合菌剂灌根,花生的茎部、根部整体增长更均衡,植株的鲜质

量明显增加,呈现出一定的协同促生效应。

作物益生菌不仅能够促进作物生长,还能对作物的生理指标产生影响,改善作物品质并提高抗逆性^[24]。有研究指出,植物根际促生菌如假单胞属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、农杆菌属(*Agrobacterium*)、埃文氏菌属(*Eriwinia*)和黄杆菌属(*Flavobacterium*)等能够诱导植物细胞的防御反应从而增强植株的抗逆性^[25]。叶绿素含量与光合作用有很大的关系,叶绿素含量提高,光合反应增强,从而提高植物的光合速率^[26]。本研究结果表明,3株芽孢杆菌及其混合发酵液在一定浓度时均能提高西瓜幼苗叶绿素含量、过氧化氢酶活性和可溶性蛋白含量,降低丙二醛含量,提高根系活力。这与买买提吐逊·肉孜等^[27]的研究结果相似,其研究发现育苗基质中添加解淀粉芽孢杆菌 FZB-42 能够显著提高黄瓜幼苗的叶绿素含量和 SOD、POD、CAT 活性,降低 MAD 含量,可能是微生物的分泌物(如 ACC 脱氧酶、吲哚乙酸和铁载体等物质)刺激植物发生一系列的生理生化反应。

综上所述,3株芽孢杆菌发酵液和混合发酵液均能在一定程度上促进西瓜幼苗生长发育,提高幼苗质量并影响其生理特性。笔者仅研究了3株芽孢杆菌及其混合发酵液对西瓜品种早佳(8424)苗期生长的影响,3株芽孢杆菌制成混合菌剂的最佳比例配置,以及3株菌的协同作用机制等仍需进一步研究。

参考文献

- [1] TANG L L, NIE S R, LI W H, et al. Wheat straw increases the defense response and resistance of watermelon monoculture to *Fusarium* wilt[J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19(1): 551-566.
- [2] 孙立新, 王晓君, 吴敬学, 等. 中国西瓜甜瓜生产区域布局变迁及驱动因素研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(8): 42-51.
- [3] 王红梅, 贺申魁, 曾成. 不同浓度多效唑浸种对西瓜苗期生长的影响[J]. *南方园艺*, 2021, 32(1): 21-25.
- [4] 陈梦多, 胡春艳, 马肖静, 等. 植物根际细菌 HQ1-2 的根际定殖与土壤微生态调节及枯萎病防治[J]. *中国生物防治学报*, 2023, 39(4): 924-932.
- [5] 范卓莹. *Microbacterium trichothecenolyticum* XY-3 生物防治应用潜能及机理分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [6] 陈国军, 李鹏燕, 刘丽媛, 等. 芽孢杆菌对菜心种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(7): 129-131.
- [7] ZHAO S, LIU D Y, LING N, et al. Bio-organic fertilizer application significantly reduces the *Fusarium oxysporum* population and alters the composition of fungi communities of watermelon *Fusarium* wilrhizosphere soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50: 765-774.
- [8] 刘丹丹, 李敏, 刘润进. 我国植物根围促生细菌研究进展[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 815-824.
- [9] 李成果. 解淀粉芽孢杆菌 L3 对西瓜的防病促生作用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [10] SHARIFI M, EBRAHIMZADEH H. Improved growth of salinity-stressed soybean after inoculation with salt pretreated mycorrhizal fungi[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 164 (9): 1144-1151.
- [11] 刘丽英, 刘珂欣, 迟晓丽, 等. 枯草芽孢杆菌 SNB-86 菌肥对连作平邑甜茶幼苗生长及土壤环境的影响[J]. *园艺学报*, 2018, 45(10): 2008-2018.
- [12] 姜海燕. AM 真菌和枯草芽孢杆菌对西瓜枯萎病的防效[J]. *北方园艺*, 2016(24): 124-127.
- [13] 毕延刚, 田永强. 堆肥和枯草芽孢杆菌协同调控黄瓜幼苗生长的机制探究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(28): 71-78.
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 贾云鹤, 王喜庆, 闫闻, 等. 不同生长调节物质对西瓜幼苗生长发育的影响[J]. *中国瓜菜*, 2020, 33(8): 16-20.
- [17] UMAMAHESWARI T, ANBUKARASI K, HEMALATHA T. Studies on phytohormone producing ability of indigenous endophytic bacteria isolated from tropical legume crops[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2013, 2(6): 127-136.
- [18] 何红, 蔡学清, 兰成忠, 等. 辣椒内生菌 BS-2 在白菜体内的定殖、促生和防炭疽病作用[J]. *植物保护学报*, 2004, 31(4): 347-352.
- [19] 武慧, 刘畅, 樊航, 等. 枯草芽孢杆菌与哈茨木霉对黄瓜幼苗生长的协同促进作用[J]. *吉林师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(3): 95-99.
- [20] 孙中华, 赵铂锤, 陈仕红, 等. 枯草芽孢杆菌 B67 对黄瓜幼苗生长发育的影响[J]. *中国瓜菜*, 2017, 30(2): 15-18.
- [21] 栾换换, 裴红宾, 张永清, 等. 芽孢杆菌 ZJM-P5 与氮配施对红小豆幼苗生长和氮吸收的影响[J]. *西北植物学报*, 2017, 37(8): 1550-1558.
- [22] 杨倩, 裴红宾, 高振峰, 等. 芽孢杆菌 ZJM-P5 与磷肥互作对红小豆根系及产量的影响[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(7): 1192-1200.
- [23] 黄文茂, 韩丽珍, 王欢. 两株芽孢杆菌对花生幼苗生长及其根际土壤微生物群落结构的影响[J]. *微生物学通报*, 2020, 47(11): 3551-3563.
- [24] 张德锋, 高艳侠, 王亚军, 等. 贝莱斯芽孢杆菌的分类、拮抗功能及其应用研究进展[J]. *微生物学通报*, 2020, 47(11): 3634-3649.
- [25] RABBEE M F, AII M S, CHOI J H, et al. *Bacillus velezensis*: A valuable member of bioactive molecules within plant microbiomes[J]. *Molecules*, 2019, 24(6): 1046.
- [26] 张树生, 杨兴明, 黄启为, 等. 施用氨基酸肥料对连作条件下黄瓜的生物效应及土壤生物性状的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(4): 689-694.
- [27] 买买提吐逊·肉孜, 段奇珍, 高丽红. 育苗基质添加菌剂对黄瓜幼苗质量及耐贮性影响[J]. *北方园艺*, 2010(15): 118-121.