

枯草芽孢杆菌对马铃薯的促生防病效应

胡金雪, 樊建英, 相丛超, 贾明飞, 封志明, 李东玉, 张淑青

(石家庄市农林科学研究院 石家庄 050021)

摘要:以中原二作区主栽品种中薯5号为材料,比较5种不同药剂处理对马铃薯种薯萌发、生长、叶绿素含量、产量和疮痂病防治效果的影响,进一步明确枯草芽孢杆菌对马铃薯促生防病的潜力。枯草芽孢杆菌可湿性粉剂处理可以促进种薯萌发,在发芽势、萌芽质量、芽长等营养参数方面均优于其他处理;在收获期,株高、茎粗、叶片数、叶面积分别比对照增加了8.81%、18.45%、19.72%、12.07%,优于其他药剂处理;此外,叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量比对照分别显著提高11.76%、65.90%、77.71%;马铃薯产量较对照CK增产14.51%,防治效果达到49.35%,显著优于其他药剂处理对马铃薯疮痂病的防治效果。基于PCA主成分分析结果显示,植株主茎数、叶绿素含量、萌芽鲜质量、活力指数及收获期的株高、茎粗、叶面积与产量之间呈正相关;防效越好,产量越高;疮痂病的防效与收获期株高、茎粗、叶面积之间无相关性;病薯率、病情指数与防效、产量之间呈负相关;生物防治效果优于化学防治。以上结果表明,枯草芽孢杆菌生物制剂能更好地促进马铃薯生长,增加产量,抑制马铃薯疮痂病发生,具有生产实践价值。

关键词: 马铃薯; 枯草芽孢杆菌; 促生; 防病

中图分类号: S532

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2023)10-121-08

Effects of *Bacillus subtilis* on growth promotion and disease control of potato

HU Jinxue, FAN Jianying, XIANG Congchao, JIA Mingfei, FENG Zhiming, LI Dongyu, ZHANG Shuqing

(Shijiazhuang Academy of Agricultural and Forestry Science, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

Abstract: Zhongshu No. 5, the main cultivar in the second cropping area of central plains, was used as material. The effects of five medicinal treatments on the sprouting of seed potato, plant growth, chlorophyll content, yield and the control effect of scab disease were compared to further clarify the potential of *Bacillus subtilis* on potato bio-promoting disease prevention. The results showed that *B. subtilis* can promote seed potato germination, which is superior to the other treatments in terms of germination potential, bud weight and bud length. Meanwhile, the plant height, stem thick, number of blades and leaf area increased by 8.81%, 18.45%, 19.72% and 12.07%, respectively, compared with CK, which was significantly better than other medicinal treatments on bio-promoting. In addition, the total chlorophyll a, chlorophyll b and chlorophyll were also significantly increased by 11.76%, 65.90% and 77.71%, respectively, than the other treatments. Compared with CK, the production was increased by 14.51%, and the prevent reached 49.35%, which was significantly better than the other medicinal treatments. Based on PCA principal component analysis, main stems number, chlorophyll content, bud fresh weight, vitality index, plant height, stem diameter, leaf area at harvest stage were positively correlated with yield. There was no relationship between the control effect of scab and plant height, stem diameter and leaf area at harvest time. There is a negative correlation between diseased potato rate, disease index to prevent and the yield. Biological control is more effective than chemical control. These results indicated that *B. subtilis* could better promote potato growth, increase yield and inhibit potato scab.

Key words: Potato; *Bacillus subtilis*; Growth promotion; Disease prevention

马铃薯是世界第三大重要的粮食作物,仅次于水稻和小麦,全球超过10亿人口食用马铃薯^[1]。中国是世界上最大的马铃薯生产国。2021年马铃薯总产量1 830.9万t,播种面积460.6万hm²,单产达

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-06-27

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系薯类产业创新团队专项(HBCT2023060201); 河北省重点研发计划项目—现代种业科技创新专项(21326336D); 石家庄市科技计划项目(221490062A)

作者简介: 胡金雪,女,助理农艺师,专业方向为马铃薯分子抗病育种。E-mail: 1770073043@qq.com

通信作者: 张淑青,女,研究员,专业方向为马铃薯育种及栽培。E-mail: shjzsj@163.com

到 $3.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。随着我国马铃薯种植面积和产量的不断增加,生产中马铃薯病害问题也日益突出。而马铃薯作为无性繁殖作物,每年都受到各种致病细菌感染,严重威胁马铃薯的健康生产。其中,马铃薯疮痂病是由革兰氏阳性链霉菌引起的一种重要的土传病害,被视为全球第四大病害^[3]。其通过分泌链霉菌素损伤表皮组织,在块茎表面出现坏死病变或者结痂状,降低马铃薯的品质和经济价值。在马铃薯规模化生产过程中,受高温干旱、管理不当等不利条件影响,疮痂病的发生也日益严重,疮痂病发病率在 60%以上,产量损失在 20%以上,经济损失严重^[4]。马铃薯疮痂病广泛分布于德国^[5]、加拿大^[6-7]、英国^[8]、中国等国家的主要马铃薯种植区^[9]。张建平等^[10]研究发现,内蒙古种薯生产单位马铃薯疮痂病发生率达 83%,部分地区病薯率高达 100%;李青青等^[11]研究发现,在甘肃省农业科学院马铃薯脱毒中心网棚内马铃薯疮痂病发病率在 90%以上;张涵辉等^[12]调查的结果显示,义乌市马铃薯疮痂病发病率在 50%以上。疮痂病的发生因年份、地点和马铃薯品种而变化^[13],是世界马铃薯种植面临的重大生产问题。

马铃薯疮痂病病原菌通过产生毒素进入薯块,致病链霉菌毒素复杂多样,并且不同地区的优势种也不尽相同,使得马铃薯疮痂病的有效防治具有挑战性。传统的防治方法包括作物轮作、灌溉、对低 pH 值的土壤进行改良、使用无病害块茎和抗病马铃薯品种等^[14],对防治马铃薯疮痂病有一定的效果,但是效果不明显。利用枯草芽孢杆菌对马铃薯疮痂病进行生物防治是一个新兴领域。芽孢杆菌是土壤中分离出的一种革兰氏阳性、非致病性的细菌,已被用作研究次生代谢物的产生、产孢、生物膜发育的模式生物^[15]。芽孢杆菌通过增加土壤中的矿物质、提高氮和磷的利用率^[16]及合成植物激素^[17-18]促进植物生长,还可以通过生产抗生素、捕食和寄生、铁离子竞争、营养和生态位竞争以及诱导植物抗性来保护马铃薯免受土传细菌的危害^[19]。芽孢杆菌除了较强的定殖能力外,还可以分泌抗菌代谢物,为替代合成杀菌剂提供了巨大的前景^[20-22]。潘子旺等^[23]的研究结果表明,枯草芽孢杆菌制剂可提高不同马铃薯品种的产量,防控疮痂病的发生;徐雪亮等^[24]利用 5 种生物药剂在旱地和水旱轮作地块研究马铃薯疮痂病的防治效果,发现枯草芽孢杆菌在旱地的防治效果最好,因为旱地湿度及降雨量小,限制了马铃薯疮痂病的发展,利于药效发挥;邢嘉韵

等^[25]研究发现,枯草芽孢杆菌通过产生细胞分裂素促进马铃薯根系生长,从而提高马铃薯吸收水分的能力,提高块茎产量。尽管在体外研究中枯草芽孢杆菌具有较大的潜力和高效性,但生物防治剂的缺点是在生产条件下性能不一致和不可预测,可能是土壤中不断变化的生物和非生物条件影响生物防治剂的适应性和性能^[26-27]。因此关于枯草芽孢杆菌在大田中对马铃薯的促生作用及疮痂病防治方面的研究较少。

笔者通过比较不同药剂处理对马铃薯的促生防病效果,探究枯草芽孢杆菌促进马铃薯生长的综合潜力及对马铃薯疮痂病的防治效果,为进一步研究枯草芽孢杆菌对马铃薯疮痂病的防治效果提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

供试马铃薯品种为早熟品种中薯 5 号一级种薯,由秦皇岛市昌黎县嘉诚实业集团提供。

供试药剂:100 亿·g⁻¹ 枯草芽孢杆菌可湿性粉剂,由德强生物股份有限公司生产;100 万孢子·g⁻¹ 寡雄霉素可湿性粉剂,由捷克生物制剂股份有限公司生产;2.5%咯菌腈悬浮种衣剂,由浙江博仕达作物有限公司生产;40%噻唑锌悬浮剂,由浙江新农化工股份有限公司生产;20%噻菌酮悬浮剂,由浙江龙湾化工有限公司生产。试验用药剂相关信息见表 1。

1.2 设计

试验地点在秦皇岛市昌黎县新集镇河北省薯类创新团队试验示范田。采用随机区组排列。

萌芽试验:将种薯进行切块处理,每个薯块(3 cm × 3 cm)含有 1~2 个健康芽眼,试验药剂设 5 个处理,1 个对照(表 1),将薯块浸泡在不同处理中 30 min。然后将薯块晾干,放置在育苗穴盘中,置于温室,每个处理 20 个薯块,3 次重复,共 360 个薯块。在处理 8 d 时调查发芽势,25 d 时调查发芽率,30 d 时测芽长、芽鲜质量和干质量,计算活力指数。

田间试验设置处理与萌芽试验相同。根据表 1 试验药剂使用方法处理马铃薯薯块,于 2022 年 3 月 15 日播种。其中 A1 和 A2 处理采用沟施方法,每 667 m² 施用 50~60 g。A3~A5 处理进行拌种。试验设置 3 垄,行长 10 m、行距 70 cm、株距 22 cm,小区面积 21 m²,每个处理 3 次重复。马铃薯苗期取样时采用 5 点取样法,随机选取 10 株,测定株高、茎粗、叶片数和叶面积,块茎膨大期和成熟期取样

表 1 供试生物制剂种类及施药量
Table 1 Types and dosages of tested biological agents

处理	药剂	用量	方式
A1	100 亿·g ⁻¹ 枯草芽孢杆菌可湿性粉剂	300 倍液 (50~60 g·667 m ⁻²)	沟施
A2	100 万孢子·g ⁻¹ 寡雄霉素可湿性粉剂	300 倍液 (50~60 g·667 m ⁻²)	沟施
A3	2.5% 咯菌腈悬浮种衣剂	1:200~300	拌种
A4	40% 噻唑锌悬浮剂	500 倍液 (60~85 g·667 m ⁻²)	拌种
A5	20% 噻菌酮悬浮剂	100~130 g·667 m ⁻²	拌种
CK	清水对照		

法同苗期。在马铃薯生长至 5~6 片复叶完全展开时测定叶绿素含量。2022 年 6 月 7 日收获,调查马铃薯产量、发病情况及防治效果。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 发芽势及发芽率 发芽势/%=8 d(N1/N)×100。发芽率/%=25 d(N2/N)×100。活力指数=发芽率×芽干质量(g)。N1/N2:指定天数发芽的薯块数量,N:总薯块数量。

1.3.2 农艺性状 叶面积参照赵春燕等^[28]的方法,采用直尺测株高、游标卡尺测茎粗。

1.3.3 叶绿素含量 叶绿素含量参照景岚等^[29]的方法测定计算。

1.3.4 产量 产量测定方法同植株生长测定方法相同,3 次重复,测定主茎数、计算 667 m²产量及商品薯率。

1.3.5 马铃薯疮痂病病害分级标准及发病情况 马铃薯疮痂病病害按照张建平等^[30]的方法进行分级,统计病薯率,病情指数及防治效果按照方中达^[31]的方法进行计算。

病情指数 =

$$\frac{\sum (\text{各发病级别发病种薯数} \times \text{对应发病级别值})}{\text{调查种薯总数} \times \text{最高发病级别值}} \times 100;$$

防治效果 /% =

$$\frac{\text{对照病情指数} - \text{处理组病情指数}}{\text{对照病情指数}} \times 100。$$

1.4 数据分析

采用 Excel 2020 整理数据并绘图,使用 SPSS 软件进行单因素方差分析,利用最小显著性检验(LSD)进行多重比较。应用 OriginPro 22 进行主成分分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对马铃薯块茎萌发的影响

由图 1-A 可知,不同药剂处理的发芽势均与对

照存在显著差异。其中,A1 处理的发芽势显著高于其他处理,比 CK 处理高 66.67%。由图 1-B 可知,药剂处理 A1、A2 的发芽率均显著高于 CK 处理,其中 A1 处理的发芽率比 CK 处理高 8.17%。由图 1-C 可知,A1~A4 处理的活力指数均显著高于 CK 处理,A1 处理的活力指数比 CK 高 1.168,A5 处理的活力指数与 CK 处理之间无显著差异。

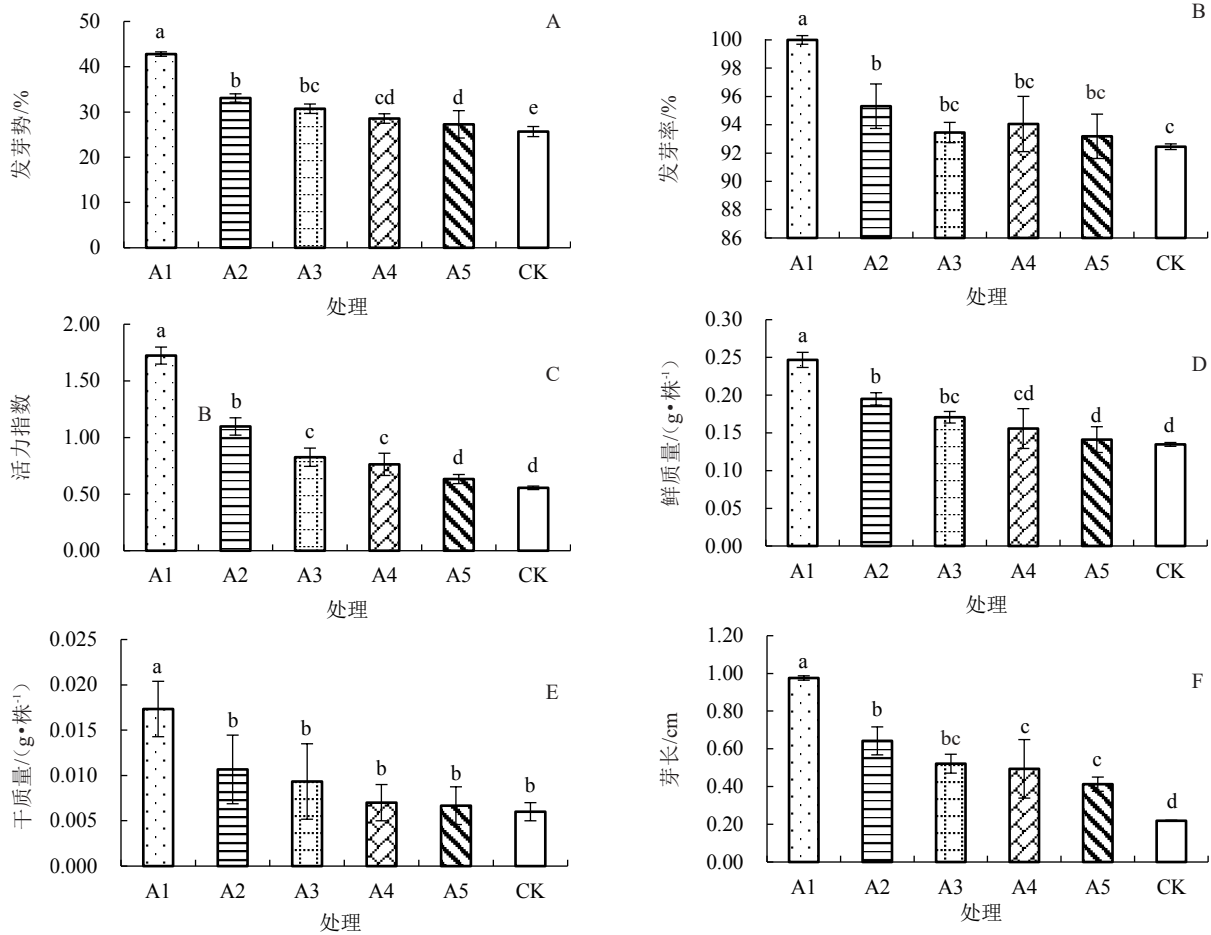
由图 1-D~F 可知,A1 处理的萌芽鲜质量、干质量和芽长均与对照处理存在显著差异。其中,A1 处理的鲜质量比 CK 处理高 0.112 g,A2、A3 处理的鲜质量均显著高于 CK 处理。A1 处理的干质量显著高于 CK 处理,比 CK 处理高 0.011 g,A2~A5 处理的干质量均与 CK 处理无显著差异。A1 处理的芽长比 CK 处理高 0.757 cm。综上所述,A1 处理可以显著促进马铃薯种薯萌发。

2.2 不同处理对马铃薯植株生长的影响

由图 2-A~D 可知,在苗期时,A1 处理的植株株高、茎粗均显著高于 CK 处理,比 CK 处理分别高 0.55 cm、0.34 mm,不同药剂处理与 CK 处理的叶片数、叶面积均无显著差异。到块茎膨大期时,A1 处理的植株株高、茎粗、叶面积与对照处理具有显著差异。其中,A1 处理的株高、茎粗、叶面积分别比 CK 处理高 2.46 cm、0.10 mm、4.42 cm²。在马铃薯块茎成熟期时,与其他处理相比,A1 处理的株高、茎粗、叶片数和叶面积均最大,均与 CK 处理存在显著差异,比 CK 处理分别增加了 8.81%、18.45%、19.72%、12.07%。综上所述,A1 处理可促进马铃薯株高、茎粗、叶片数及叶面积的增加,进而促进植株生长。

2.3 不同处理对马铃薯叶片叶绿素含量的影响

由图 3-A~C 可知,A1 处理的马铃薯叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均显著高于其他处理。A1 处理的叶绿素 a 含量(w,后同)比 CK 处理提高 11.76%;A1 处理的叶绿素 b 含量比 A2~A5 处理高 0.215~0.468 mg·g⁻¹,比 CK 处理提高



注:不同小写字母表示各处理在 0.05 水平差异显著。下同。

图 1 不同处理对马铃薯块茎萌发的影响

Fig. 1 Effect of different treatment on potato tuber germination

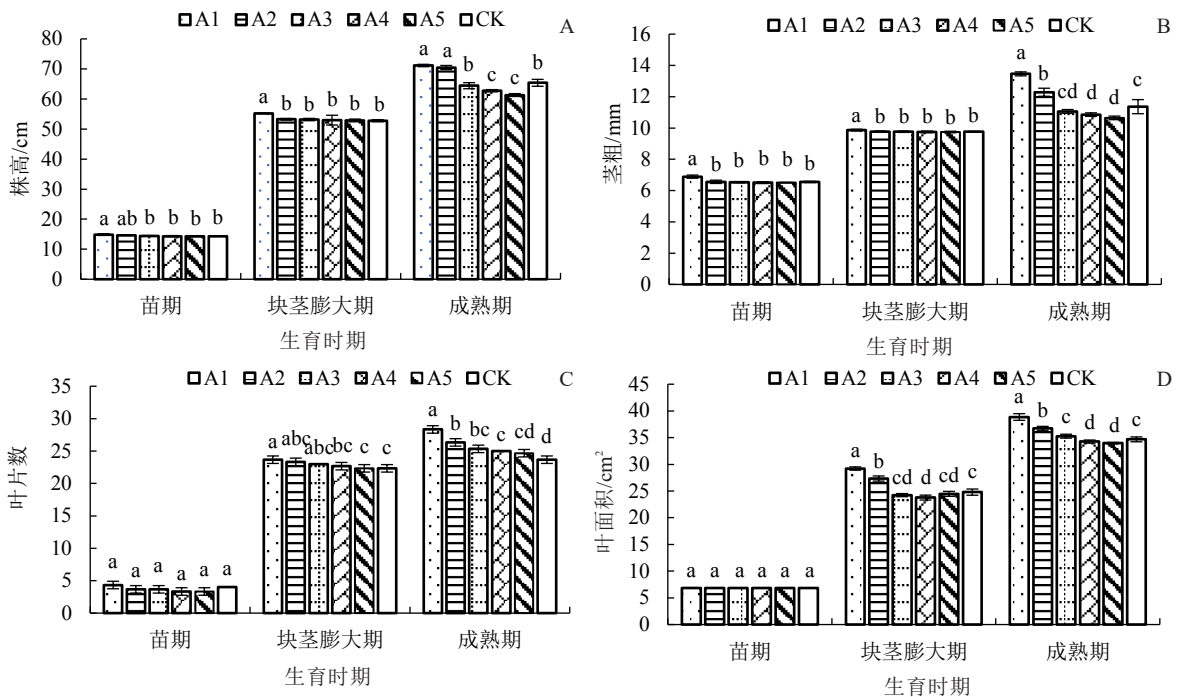


图 2 不同处理对马铃薯植株生长的影响

Fig. 2 Effects of different treatment on the growth of potato plants

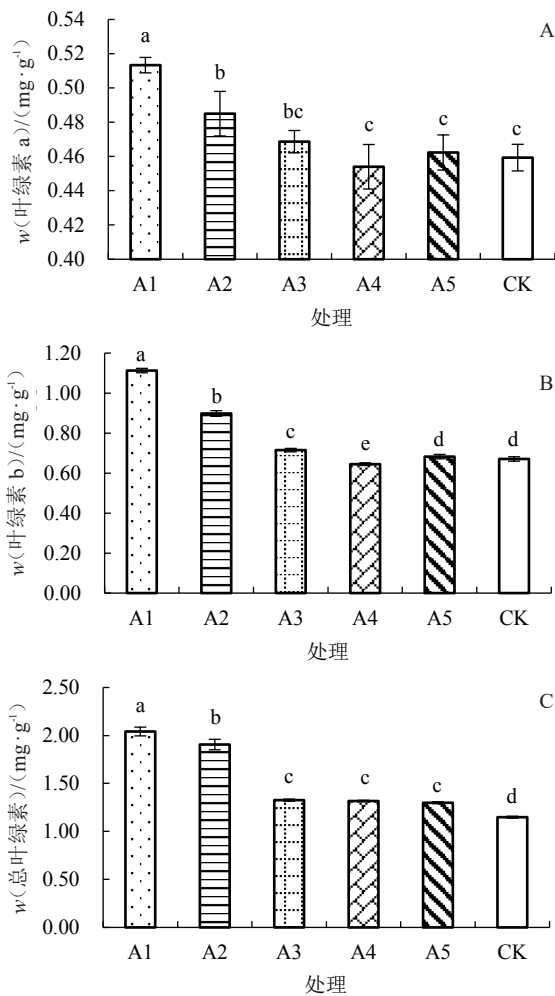


图3 不同处理对马铃薯叶片叶绿素含量的影响
Fig. 3 Effects of different treatment on chlorophyll content of potato leaves

65.87%;A1处理的总叶绿素含量比A2~A5处理提高0.135~0.742 mg·g⁻¹,比CK处理提高77.63%。综上可知,A1处理可以增加叶片的叶绿素含量,从而促进马铃薯光合作用。

2.4 不同处理对马铃薯产量的影响

由图4-A~C可知,A1处理的马铃薯产量、商品薯率和主茎数均显著高于CK处理。A1~A5处理马铃薯产量与CK处理之间存在显著差异,其中A1处理的马铃薯产量最高,为4 584.13 kg·667 m⁻²,较CK处理增产14.51%。A1处理的商品薯率最高,达到98.73%,较CK处理提高2.56%;A2处理的商品薯率显著高于CK处理,A5处理的商品薯率显著低于CK处理。单株主茎数同样以A1处理最高,其次是A2处理,分别比CK处理显著提高46.15%和30.77%,A3~A5处理单株主茎数与CK处理之间无显著差异。综上可知,A1处理可以增加马铃薯单株主茎数,提高马铃薯产量,提高

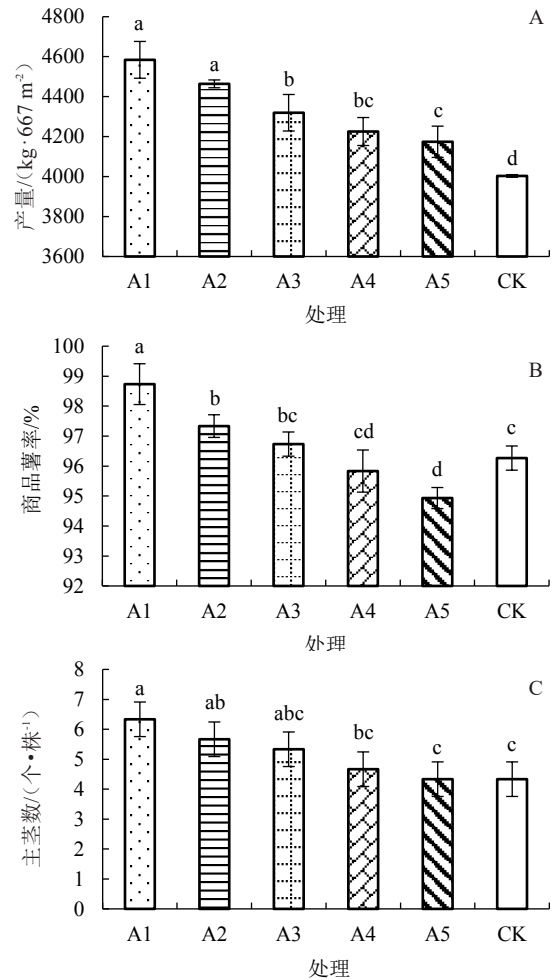


图4 不同处理对马铃薯产量的影响
Fig. 4 Effect of different treatment on potato yield

商品薯率。

2.5 不同处理对马铃薯疮痂病的防病效果

由图5-A~C可知,不同处理的病薯率、病情指数与CK处理之间存在显著差异。A1处理的防治效果最好,与A2~A5处理之间存在显著差异。其中,A1处理之后疮痂病发病率为41.18%,较CK降低了41.74%,A3~A5处理也可以降低疮痂病病薯率,降低了21.77%~31.12%;A1处理之后病情指数为19.34,防治效果为49.35%,防治效果比A2~A5处理高8.25%~44.19%。A1处理防治马铃薯疮痂病的效果最佳,与其他处理之间具有显著差异。

2.6 主成分相关性分析

由图6可知,不同防治药剂对马铃薯农艺性状的影响不同,其对疮痂病的防治效果也有差异。距离CK处理由近到远依次分别为化学防治的噻菌铜处理、噻唑锌处理和咯菌腈处理,以及生物防治的寡雄霉素处理和枯草芽孢杆菌处理。

此外,马铃薯主茎数、叶绿素含量、萌芽鲜质

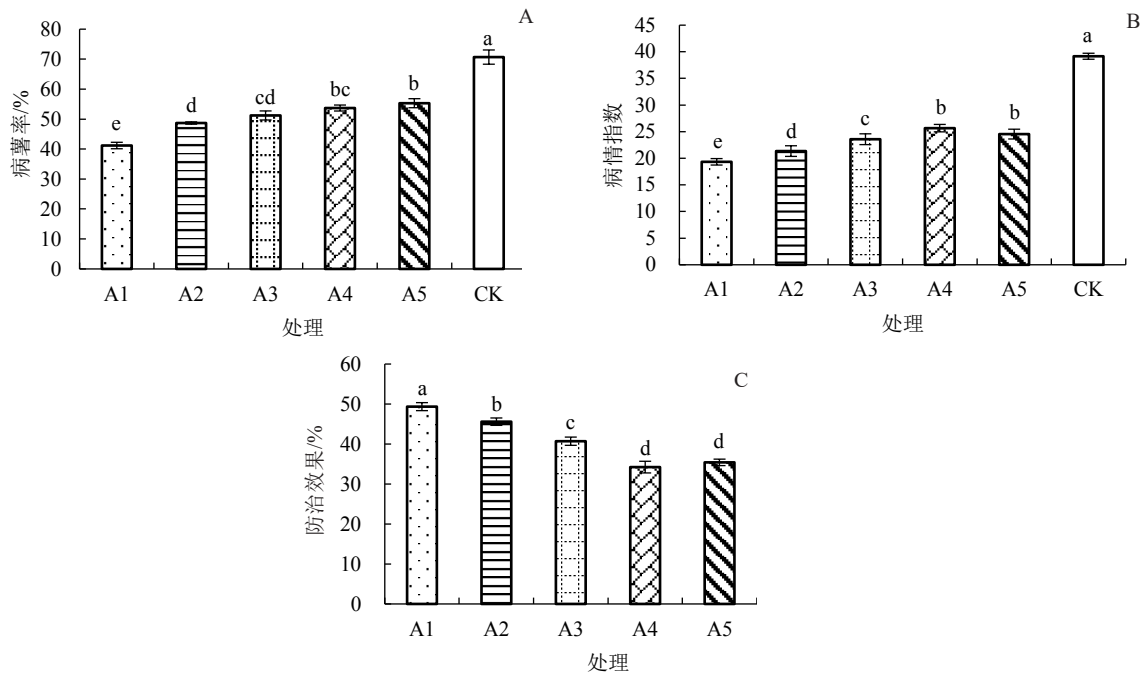
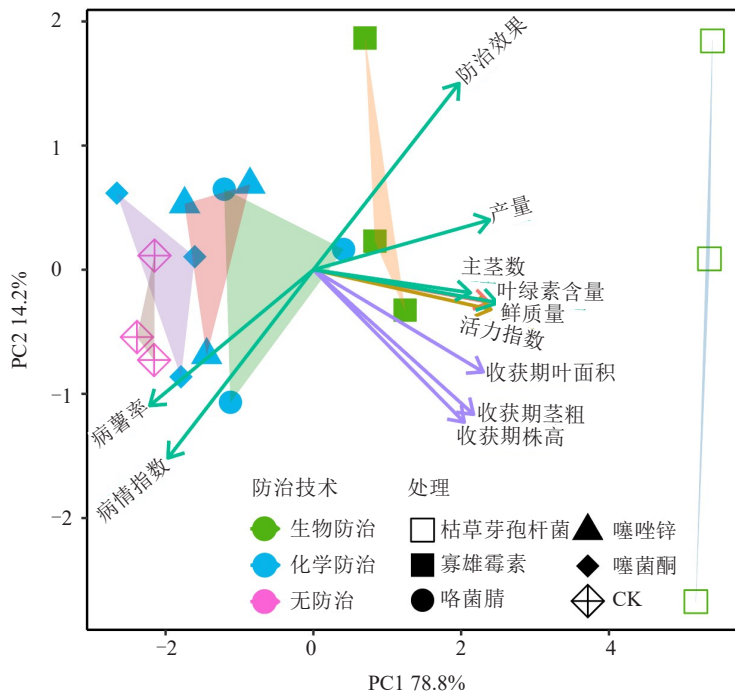


图5 不同处理对马铃薯疮痂病的防病效果

Fig. 5 Preventive effect of different treatment on potato scab



注:图中不同形状代表各处理的样本点,同一处理的3个样本被三角形所连接。箭头代表各特征指标,箭头横坐标代表特征指标对PC1的贡献值,箭头纵坐标代表特征指标对PC2的贡献值。

图6 主成分相关性分析

Fig. 6 Principal component correlation analysis

量、活力指数及收获期的植株株高、茎粗、叶面积与产量之间形成正向相关关系;且对疮痂病的防治效果越好,马铃薯产量越高。疮痂病的防治效果与收获期株高、茎粗、叶面积之间无相关性。病薯率、病情指数与防治效果、产量之间存在负相关关

系,表现为防治效果越好则病情指数越低,病情指数越高则马铃薯产量越低。

3 讨论与结论

疮痂病病原菌通过感染马铃薯块茎,在块茎表

面形成凸起或凹陷的斑点,影响马铃薯的商品价值和抗病性,最终导致马铃薯价格下降20%~40%,造成巨大的经济损失,严重限制了马铃薯产业的健康可持续发展。疮痂病作为一种全球严重的马铃薯病害,很难通过单一管理进行控制,化学药剂的过度使用或不适当使用导致严重的农业污染问题,特别是环境污染和食品安全问题^[32-33]。为了减少化学药物的使用,保证环境安全和农业生态系统平衡,需要找到无毒高效的防治马铃薯疮痂病的方法。目前,防治马铃薯疮痂病的最佳方法是使用生物菌剂,通过改善土壤微环境,丰富马铃薯块茎表面的有益菌,降低马铃薯疮痂病的发生率^[34]。

芽孢杆菌属可以通过直接和间接的机制促进植物生长,从而增加作物产量,包括提高养分利用率、改变植物生长激素稳态、降低非生物胁迫的危害^[35],从而达到防治病害的效果。枯草芽孢杆菌挥发物可以通过改变细胞分裂素和乙烯稳态来促进植物生长^[36]。李正^[37]研究表明,枯草芽孢杆菌制剂可以有效提高马铃薯产量,增幅达到19.25%,对疮痂病的防效达到31.95%。同样,李中奇^[38]研究发现,在内蒙古太仆寺旗进行的马铃薯田间试验中施用枯草芽孢杆菌药剂可以增产15.15%,对疮痂病防效达38.20%。以枯草芽孢杆菌为基础的商业产品可以降低马铃薯疮痂病发病率,增加产量,并为生物制剂控制马铃薯疮痂病诱导损伤的有效性提供依据。

马铃薯农艺性状与产量、产量与病害防效之间的关系比较复杂,在遗传育种的研究中,性状之间的促进或者制约影响着彼此之间的相关关系。张绍荣等^[39]的研究结果表明,马铃薯产量与单株叶面积之间呈正相关关系,接种枯草芽孢杆菌后,叶绿素含量提高,产量增加。田丰等^[40]的研究结果表明,马铃薯叶片光合速率高,块茎产量也随之增加;李军等^[41]研究表明,随着单株主茎数与茎粗的增加,马铃薯产量也随之提高;何二良等^[42]研究表明,植物地上部生长影响马铃薯的产量。这说明马铃薯产量与植株地上部分息息相关,协调马铃薯植株农艺性状与产量的关系,可以增强植株生长势,降低马铃薯疮痂病的发生率,提高产量。枯草芽孢杆菌是研究最广泛的植物促生长根际细菌之一,它能够通过多种机制促进植物生长,控制植物病原体,改变植物激素稳态,促进抗菌素的产生。

笔者通过枯草芽孢杆菌可湿性粉剂沟施处理,发现其可以促进马铃薯块茎的萌发及萌芽;促进植

株的生长,提高马铃薯株高、茎粗、叶片数和叶面积。与对照相比,枯草芽孢杆菌处理之后马铃薯叶片中叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量分别提高11.76%、65.87%、77.63%;马铃薯产量较对照CK增产14.51%,防效达到49.35%。枯草芽孢杆菌可以有效降低马铃薯疮痂病的发病率和病情指数,同时提高马铃薯的各种生长指标。这是由于枯草芽孢杆菌与疮痂病病原菌的拮抗作用抑制了马铃薯疮痂病病原菌的生长,有利于马铃薯萌发、生长和光合作用,进而提高马铃薯产量。通过对马铃薯农艺性状及产量的主成分分析,发现马铃薯主茎数、叶绿素含量、萌芽鲜质量、活力指数及收获期的植株株高、茎粗、叶面积与产量之间呈正相关关系;病薯率、病情指数与防效、产量之间呈负相关关系。因此,生物制剂枯草芽孢杆菌不仅可以促进马铃薯萌发和植株生长,还可以降低马铃薯疮痂病的发生率,表明枯草芽孢杆菌具有较大的生产应用潜力。

参考文献

- [1] HERMANSEN A, LU D, FORBES G. Potato production in China and Norway: Similarities, differences and future challenges[J]. *Potato Research*, 2012, 55(3/4):197-203.
- [2] FAOSTAT[DB/OL]. [2021-03-25]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- [3] NOVY R G, GILLEN A M, WHITWORTH J L. Characterization of the expression and inheritance of potato leafroll virus (PLRV) and potato virus Y (PVY) resistance in three generations of germplasm derived from *Solanum tuberosum*[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2007, 114(7):1161-1172.
- [4] XU J, ZHU W T, SUN L. Prevention and control technology of potato soil-borne diseases[J]. *Asian Agricultural Research*, 2022, 14(5):45-46.
- [5] LEIMINGER J, FRANK M, WENK C, et al. Distribution and characterization of *Streptomyces* species causing potato common scab in Germany[J]. *Plant Pathology*, 2013, 62(3):611-623.
- [6] WANNER L A. A new strain of *Streptomyces* causing common scab in potato[J]. *Plant Disease*, 2007, 91(4):352-359.
- [7] ST-ONGE R, GOYER C, COFFIN R, et al. Genetic diversity of *Streptomyces* spp. causing common scab of potato in eastern Canada[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2008, 31(6/7/8):474-484.
- [8] THWAITES R, WALE S J, NELSON D, et al. *Streptomyces turgidiscabies* and *S. acidiscabies*: Two new causal agents of common scab of potato (*Solanum tuberosum*) in the UK[J]. *Plant Pathology*, 2010, 59(4):804.
- [9] ZHAO W Q, YANG W X, LI Y N, et al. Characterization and identification of the pathogen causing potato scab in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2):313-318.

- [10] 张建平,尹玉和,闫任沛,等.内蒙古马铃薯疮痂病发生与防治途径[J].中国马铃薯,2013(1):56-59.
- [11] 李青青,李继平.5种药剂不同稀释液浇灌防治脱毒马铃薯疮痂病效果初报[J].甘肃农业科技,2006(8):31-32.
- [12] 张涵辉,杜志贵.义乌市马铃薯疮痂病发生原因及防控措施[J].中国植保导刊,2010,30(5):26-27.
- [13] WANNER L A. A survey of genetic variation in *Streptomyces* isolates causing potato common scab in the United States[J]. Phytopathology, 2006, 96(12): 1363-1371.
- [14] DEES M W, WANNER L A. In search of better management of potato common scab[J]. Potato Research, 2012, 55(3/4): 249-268.
- [15] KOVÁCS Á T. *Bacillus subtilis*[J/OL]. Trends in Microbiology, 2019, 27(8): 724-725. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2019.03.008>.
- [16] IDRIS E E, MAKAREWICZ O, FAROUK A, et al. Extracellular phytase activity of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB45 contributes to its plant-growth-promoting effect[J]. Microbiology-SGM, 2002, 148(7): 2097-2109.
- [17] IDRIS E E, IGLESIAS D J, TALON M, et al. Tryptophan-dependent production of indole-3-acetic acid (IAA) affects level of plant growth promotion by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42[J]. Molecular Plant-microbe Interactions, 2007, 20(6): 619-626.
- [18] ORTÍZ-CASTRO R, VALENCIA-CANTERO E, LÓPEZ-BUCIO J. Plant growth promotion by *Bacillus megaterium* involves cytokinin signaling[J]. Plant Signaling and Behavior, 2008, 3(4): 263-265.
- [19] PLIEGO C, DE WEERT S, LAMERS G, et al. Two similar enhanced root-colonizing *Pseudomonas* strains differ largely in their colonization strategies of avocado roots and *Rosellinia necatrix* hyphae[J]. Environmental Microbiology, 2008, 10(12): 3295-3304.
- [20] ANAND A, CHINCHILLA D, TAN C, et al. Contribution of hydrogen cyanide to the antagonistic activity of *Pseudomonas* strains against *Phytophthora infestans*[J]. Microorganisms, 2020, 8(8): 1144.
- [21] EIDA A A, BOUGOUFFA S, L'HARIDON F, et al. Genome insights of the plant-growth promoting bacterium *Cronobacter mytjensii* JZ38 with volatile-mediated antagonistic activity against *Phytophthora infestans*[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 369.
- [22] WANG Y Y, LIANG J, ZHANG C Y, et al. *Bacillus megaterium* WL-3 lipopeptides collaborate against *Phytophthora infestans* to control potato late blight and promote potato plant growth[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 1602.
- [23] 潘子旺,张东旭,张冬梅,等.枯草芽孢杆菌制剂在不同马铃薯品种上的应用试验[J].农业科技通讯,2021(10):94-97.
- [24] 徐雪亮,刘子荣,曾绍民,等.5种生物药剂防治马铃薯主要病害田间药效试验[J].中国农学通报,2020,36(9):122-126.
- [25] 邢嘉韵,兰时乐,李姣,等.巨大芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌混合对马铃薯生长及土壤微生物含量的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2017,43(4):377-381.
- [26] BERINI F, KATZ C, GRUZDEV N, et al. Microbial and viral chitinases: Attractive biopesticides for integrated pest management[J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(3): 818-838.
- [27] PARNELL J J, BERKA R, YOUNG H A, et al. From the lab to the farm: An industrial perspective of plant beneficial microorganisms[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1110.
- [28] 赵春燕,赵春晓,方子森,等.马铃薯叶面积速测方法的研讨[J].湖南农业科学,2010(13):49-51.
- [29] 景岚,王丽芳,康俊.不同抗性的向日葵品种接种锈菌后叶片中可溶性蛋白、可溶性总糖及叶绿素含量的变化[J].临沂师范学院学报,2008,30(6):76-80.
- [30] 张建平,哈斯,林团荣,等.不同杀菌剂对马铃薯疮痂病的防治试验[J].中国马铃薯,2013(2):83-86.
- [31] 方中达.植病研究方法[M].3版.北京:农业出版社,1998.
- [32] WANG Z, LI Y, ZHUANG L, et al. A rhizosphere-derived consortium of *Bacillus subtilis* and *Trichoderma harzianum* suppresses common scab of potato and increases yield[J]. Computational and structural biotechnology journal, 2019, 17: 645-653.
- [33] DAI W B. Research on prevention and control of chinese agricultural ecological environment pollution to ensure food safety[J]. Advanced Materials Research, 2013, 616: 2247-2250.
- [34] DEWEN Q, YIJIE D, YI Z, et al. Plant immunity inducer development and application[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2017, 30(5): 355-360.
- [35] BLAKE C, CHRISTENSEN M N, KOVÁCS Á T. Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2021, 34(1): 15-25.
- [36] RYU C M, FARAG M A, HU C H, et al. Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(8): 4927-4932.
- [37] 李正.枯草芽孢杆菌 SYST2 对西葫芦、向日葵和马铃薯的促生及防病功能研究[D].南京:南京农业大学,2017.
- [38] 李中奇.枯草芽孢杆菌 SYST2 对马铃薯和向日葵的促生功能研究[D].南京:南京农业大学,2016.
- [39] 张绍荣,龙国,梅艳,等.马铃薯光合速率、单株叶面积与产量的相关性研究[J].农业科技通讯,2007(12):67-69.
- [40] 田丰,张永成.马铃薯光合速率与产量相关性研究[J].种子,2004,23(6):30-31.
- [41] 李军,滕丽伟.马铃薯产量与某些性状相关性的研究[J].马铃薯杂志,1990(4):215-220.
- [42] 何二良,赵跟虎,郭天顺,等.覆膜早熟马铃薯主要数量性状主成分分析[J].中国马铃薯,2002,16(4):219-221.