

# 多粘类芽孢杆菌与化肥不同配施处理对生菜生长和品质的影响

陈敏洁<sup>1a</sup>, 姜晓茹<sup>1b</sup>, 李亚飞<sup>1b</sup>, 戚兴来<sup>1a</sup>, 刘徽<sup>2</sup>, 满梅莲<sup>1a</sup>, 石春芳<sup>1a</sup>, 郑春丽<sup>1b,2</sup>

(1.内蒙古科技大学 a. 生命科学与技术学院; b. 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010;  
2. 白云鄂博多金属资源综合利用省部共建国家重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:**多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)隶属类芽孢杆菌属,其有利于促进植物生长和营养吸收。为探讨该菌株对植物生长及营养品质的应用价值,将该菌株与化肥进行不同配施处理,进行生菜盆栽试验。结果表明,多粘类芽孢杆菌剂具有解磷、解钾能力;菌剂对生菜地上部分有促生作用,使得生菜植株鲜质量、单株叶片数的增加趋势都非常明显,其植株鲜质量与空白相比最大增加 387.60%;菌剂对根系生长的促进作用也非常明显,氮钾肥与菌剂配施可使根鲜质量增加 373.00%;在优化生菜食用品质的基础上,菌剂与化肥配施,增加了生菜维生素 C 质量分数,达到 9.96 mg/100 g,同时又降低其亚硝酸盐含量。综上所述,多粘类芽孢杆菌菌剂与化肥配施后促生效果较好,可促进生菜的生长及其品质的提高。

**关键词:**多粘类芽孢杆菌;微生物菌剂;化肥配施;生长指标;微量元素

**中图分类号:**Q939.96

**文献标志码:**A

蔬菜是人体获得维生素、矿物质的重要途径。近年来,随着化肥使用量不断增加,导致设施菜地土壤的表现基本物理特性发生了改变,如土壤团粒结构被破坏,保水能力与通透性降低,土壤板结和次生盐渍化趋势显著,最终导致蔬菜的品质和产量下降<sup>[1]</sup>。随着国家对于生态农业的发展日渐重视,改善化肥不合理使用、实施化肥农药零增长行动势在必行。研究一种对环境适应性强的菌剂,探究其对作物的促生效果及食用品质的影响就显得至关重要。微生物菌剂能够促进植物生长<sup>[2]</sup>,增强植物的抗旱抗病能力<sup>[3]</sup>,还能够改善土壤理化性质和土壤内生物种类及丰度<sup>[4]</sup>,进而增加土壤肥力<sup>[5-7]</sup>。多粘类芽孢杆菌是一种对植物根际具有促生作用的细菌,大量地存在于土壤和植物的根系中,能够起到促进植物生长、增加作物抗逆性的作用<sup>[8]</sup>,且对植物和动物无致病性<sup>[9]</sup>,广泛地应用于微生物菌剂。包头市地处河套平原,土壤偏碱性,一般市面上的微生物菌剂对土壤环境要求高,尤其对偏碱性的土壤环境很难适应,甚至无法生长。包头尾矿库区土壤为高盐高碱土壤,环境相对恶劣,从该地区筛选的多粘类芽孢杆菌生命力顽强,完全能够适应包头本地的盐碱化土壤<sup>[10]</sup>,因此选用包头本地尾矿库原位筛选的多粘类芽孢杆菌进行配施,对于促进本地微生物菌剂与化肥合理配施改进,提高蔬菜产量与食用品质具有非常重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

供试土壤为包头市麻池镇普通菜地土壤(取 0~20 cm 处,室温烘干,过 80 目筛)其含水质量分数为 4%,

收稿日期:2018-08-14;修回日期:2019-01-10.

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1802900);国家自然科学基金(41561094);内蒙古自然科学基金(2017MS0401,2018MS03066);内蒙古科技计划项目(0406031801);内蒙古青年科技英才支持计划项目(NJYT 14-B12);内蒙古科技大学青年学术骨干计划项目(2014QNGG05);草原英才后备人才;内蒙古自治区大学生创新创业训练计划项目。

作者简介:陈敏洁(1985-),女,内蒙古包头人,内蒙古科技大学讲师,博士研究生,研究方向为环境微生物,E-mail:chenminjie0601@163.com.

通信作者:郑春丽,E-mail:zhengchunli1979@163.com.

pH 值 7.71,有机质 3.72%,速效磷  $1.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $166.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效氮  $29.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;供试肥料为尿素,过磷酸钙,硫酸钾;供试作物为生菜苗,由包头市万开生物技术有限公司提供;供试菌种多粘类芽孢杆菌筛选自包钢集团尾矿库土壤[蔗糖 1%;酵母膏 0.05%; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  0.05%; $\text{MgSO}_4$  0.01%; $\text{KCl}$  0.01%; $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  0.01%; $\text{CaCO}_3$  0.1%;调 pH 至 6.8~7.2<sup>[11-14]</sup>].

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 多粘类芽孢杆菌解磷解钾能力测试

将多粘类芽孢杆菌分别接种于无机磷培养基[ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ : $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$   $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ : $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{NaCl}$ : $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{KCl}$ : $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ : $0.03 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ : $0.03 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$ : $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,琼脂粉: $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[15]</sup>]与解钾培养基[蔗糖  $0.75 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$   $0.15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $0.075 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$   $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 钾长石精矿粉(自磨)  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 琼脂粉: $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[16]</sup>]中, $30 \text{ }^\circ\text{C}$  培养 3~5 d,观察透明圈的生成.

### 1.2.2 盆栽试验

供试菌剂多粘类芽孢杆菌以数字 2 表示,氮肥、磷肥、钾肥分别用 N、P、K 来表示,以纯水作为对照.试验用盆钵为 12 cm 的聚乙烯塑料盆,每盆土与蛭石的质量比例为 1:1,尿素按 0.226 g/盆、过磷酸钙为 0.180 g/盆、硫酸钾为 0.158 g/盆(各处理设置详见表 1),将待活化菌种在  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  摇床培养至 OD 值为 1.2 的菌液浇至盆中,混匀.每组设 3 盆作为重复,每盆定植 3 棵生菜苗,每隔 2 d 浇水 1 次,每次 300 mL, $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,光照 24 h,种植 27 d.

表 1 实验设计

Tab.1 Design the experiment

处理	N	P	K	2	处理	N	P	K	2
CK	-	-	-	-	CK <sup>+2</sup>	-	-	-	+
N	+	-	-	-	N <sup>+2</sup>	+	-	-	+
P	-	+	-	-	P <sup>+2</sup>	-	+	-	+
K	-	-	+	-	K <sup>+2</sup>	-	-	+	+
NP	+	+	-	-	NP <sup>+2</sup>	+	+	-	+
NK	+	-	+	-	NK <sup>+2</sup>	+	-	+	+
PK	-	+	+	-	PK <sup>+2</sup>	-	+	+	+
NPK	+	+	+	-	NPK <sup>+2</sup>	+	+	+	+

注: + 施加; - 不施加.

### 1.2.3 生菜株高、鲜质量、干物质含量的测定

株高用直尺测定,鲜质量用天平测定.干物质测定取称量皿,开盖放入  $115 \text{ }^\circ\text{C}$  烘箱,30 min 后取出,在干燥器中冷却到室温称重,重复烘干称量至恒重.

### 1.2.4 矿物质元素及其他物质的测定含量的测定

生菜中钾、钠的含量测定参考火焰原子吸收分光光度法测量,生菜中的磷、镁采用钼蓝法测定<sup>[17-20]</sup>,生菜维生素 C 含量的测定采用 2,6-二氯靛酚滴定法,生菜亚硝酸盐含量的确定采用紫外分光光度法,生菜总氮的测定采用凯氏定氮法<sup>[21-22]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 多粘类芽孢杆菌解磷、解钾能力验证

将多粘类芽孢杆菌接种于无机磷和含钾矿的固体培养基上, $30 \text{ }^\circ\text{C}$  培养 3~5 d,观察透明圈产生情况,验证其是否有解磷、解钾能力,其结果如图 1 所示.

由图 1(A)可见,该菌株在无机磷固体培养基上具有明显的解磷圈,解磷圈为多粘类芽孢杆菌利用低溶解性的磷酸盐为唯一磷源生长造成,该现象表明此菌株具有解磷能力;由图 1(B)可见,多粘类芽孢杆菌可以

在以钾矿石为唯一钾源的培养基上生长, 将其将钾矿石分解为菌体可利用的可溶性钾盐, 表明该菌具有解钾能力. 以上证明多粘类芽孢杆菌可通过胞外分泌物对难溶性的磷、钾化合物进行溶解, 使其转换成可溶性的、可供植物吸收利用的磷元素和钾元素, 促进植物的生长<sup>[23-24]</sup>. 综合分析该菌的胞外分泌物为酸性物质, 通过扩散作用向四周延伸, 形成溶磷圈. 亦有研究表明, 其他具有螯合性或络合性的分泌物也可能具有解磷、解钾的效果<sup>[16]</sup>.

## 2.2 多粘类芽孢杆菌与化肥不同配施对生菜生长指标的影响

### 2.2.1 多粘类芽孢杆菌与化肥不同配施对生菜株高的影响

通过对不同配施处理下生菜株高的测量, 观察不同配比肥料下生菜生长情况, 结果如图 2 所示.

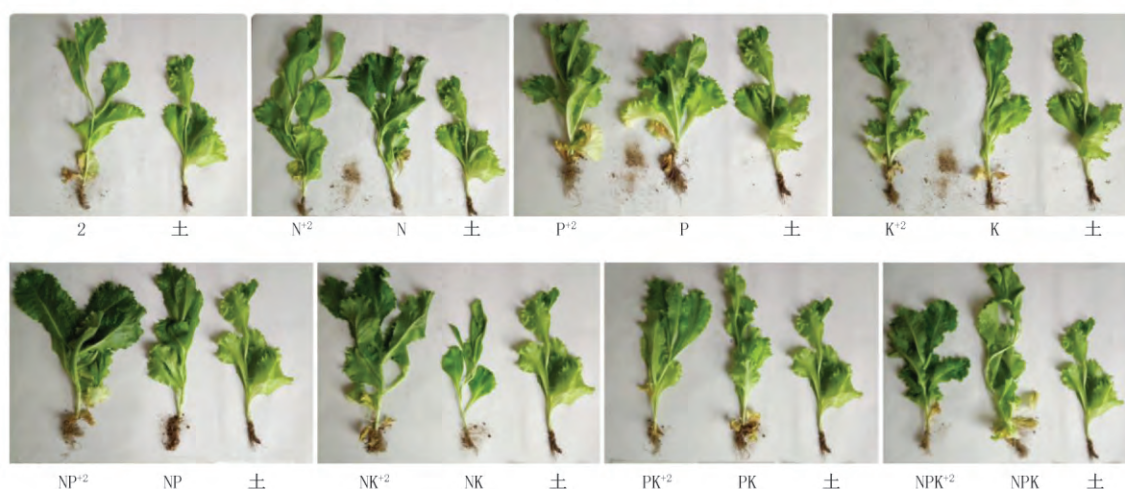


图 2 菌剂与化肥不同配施生菜的株高变化

Fig. 2 Plant height of lettuce under different combined application of *P. polymyxa* and fertilizers

通过对不同配施处理生菜地上部分进行株高测量, 可见施加菌剂后, 生菜株高明显增加. 以氮钾肥与菌剂配施处理生菜株高增加 18.6%; 氮肥与菌剂配施组株高增加 10.2%. 化肥组成种类不同, 其与菌剂配施对植物生长的促进作用也有所差异<sup>[25]</sup>.

### 2.2.2 多粘类芽孢杆菌与化肥不同配施对生菜株鲜质量、单株叶片数、根鲜质量、根长的影响

对化肥处理和化肥与多粘类芽孢杆菌配施处理下种植的生菜株鲜质量、单株叶片数、根长、根鲜质量进行了测量, 结果如图 3 所示.

通过对多粘类芽孢杆菌与化肥不同配施条件下生菜地上指标的分析. 如图 3 可知, 增施菌剂后, 生菜的株鲜质量与对照组相比有明显增加, 其中氮钾肥与菌剂配施, 株鲜质量增加 387.6%; 氮磷肥与菌剂配施的增加比例高达 103.2%; 同时, 施加菌剂对生菜的单株叶片数、根长及根鲜质量的增加有明显的促进作用. 其中菌剂与磷肥的配施对生菜的根长促进效果最佳, 而氮钾肥与菌剂配施可使根鲜质量增加 373.00%. 另外, 钾肥、氮磷肥与菌剂配施, 生菜根长虽然变短, 但其根鲜质量反而增加, 同时也有研究发现, 作物对钾的吸收具有奢侈性吸收的特点, 在氮肥、磷肥缺失的状态下, 钾肥的过量可能会导致其对作物起抑制作用<sup>[26-27]</sup>; 土壤中植物可利用磷元素的增加, 会造成土壤中的硅被固定, 使植物生长受阻, 导致生菜的根系发育不良<sup>[28]</sup>.

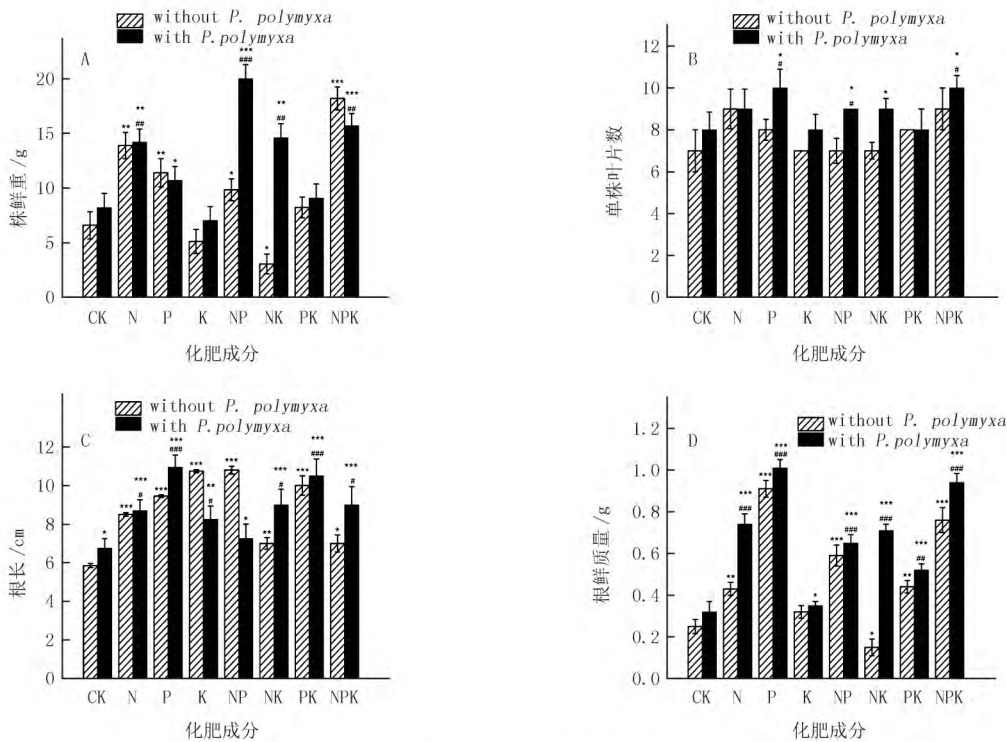


图 3 菌剂与化肥不同配施对生菜株鲜重 (A), 单株叶片数 (B), 根长 (C) 和根鲜质量 (D) 的影响  
 Fig. 3 Effects of fresh weight(A), number of leaves per plant(B), root length (C) and root fresh weight of lettuce under different combined of *P. polymyxa* and fertilizers

2.3 多粘类芽孢杆菌与化肥不同配施对生菜元素含量的影响

钠、镁、钾、磷均是植物所需的微量元素<sup>[29]</sup>, 其中钠元素可以提高细胞原生质的亲水性, 从而提高细胞的保水潜力, 在一定程度上可以降低植物的蒸腾作用, 有利于干旱地区植物的生长<sup>[30]</sup>; 镁元素是植物合成叶绿素过程中是必不可少的元素<sup>[31]</sup>; 钾元素能促进植物生长, 提高作物的抗病性<sup>[32]</sup>; 磷元素在植物体内是细胞原生质的组分, 对细胞的生长和增殖起重要作用; 磷元素也参与植物的光合作用以及糖和淀粉的利用及能量传递过程<sup>[30]</sup>. 因此, 钠、镁、钾、磷元素的含量在一定程度上能够体现植株的生长能力及健康性.

肥料与多粘类芽孢杆菌的配施处理下, 生菜中钠元素含量有一定程度地提高. 由图 4(A) 可知, 氮钾肥与菌剂配施下, 生菜中钠含量增加了 169.32%; 氮磷钾肥与菌剂配施, 其钠含量增加 132.99%. 肥料的施加对于生菜中镁、钾、磷元素的含量影响不大, 而菌剂与化肥的配施, 又使得镁、磷元素含量略有升高. 由图 4(B) 可见, 单施菌剂使生菜中镁元素的含量略有增加, 钾肥配施菌剂后, 镁含量增加 22.9%, 氮磷肥与菌剂配施后, 镁含量增加 16.3%; 如图 4(C) 可知, 菌剂的添加, 使得生菜中钾元素的积累有一定负作用.; 如图 4(D) 所示, 施加多粘类芽孢杆菌后, 生菜中磷含量明显上升. 其中氮磷肥与菌剂配施增加比例最大为 120.3%, 磷肥与菌剂配施次之, 增加 43.9%.

由此可见, 多粘类芽孢杆菌对生菜中微量元素的含量会产生影响, 但变化趋势并不显著, 当菌剂与氮钾肥和氮磷钾肥配施时, 生菜中钠元素的含量较高; 磷肥与菌剂配施, 对生菜中磷元素的增加有显著效果; 生菜中镁元素受菌剂的影响较小, 而钾元素总的趋势是呈下降状态, 究其原因, 至今尚不明确, 还需要进一步探索.

2.4 多粘类芽孢杆菌与化肥不同配施对生菜营养品质的影响

蔬菜中的 Vc 可以帮助人体对铁的吸收, 预防坏血病<sup>[33]</sup>, 绿叶蔬菜如生菜、甜菜和菠菜容易积累硝酸盐, 全氮是硝酸盐含量的一个重要指标<sup>[34]</sup>. 生菜叶片中含有高浓度的硝酸盐<sup>[35]</sup>, 而其中亚硝酸盐的含量与硝酸盐含量有密切的关系. 长期低剂量的摄入亚硝酸盐可以使动物患癌症<sup>[36]</sup>. 因此, 对化肥处理和化肥与菌剂配施处理下种植的生菜 Vc、全氮及亚硝酸盐含量进行了测量. 其结果如图 5 所示.

从图 5(A) 所示多粘类芽孢杆菌的配施可使生菜中 Vc 含量有所增加, 其中钾肥与菌剂的配施下, 生菜叶中维生素 C 质量分数最高, 达 9.96 mg/100 g.; 由图 5(B) 可知, 单一种类化肥、氮磷钾化肥与菌剂配施可

使生菜全氮含量显著下降,而双化肥与菌剂配施,生菜全氮含量明显上升.不同种类化肥的施用,使得生菜中全氮含量差异较大,而菌剂的配施,一定程度上使生菜全氮含量趋于稳定水平.适量的氮素有利于植物的生长发育,特别是能够促进果实的生长;而过多的氮素摄入则会转化为硝态氮,进而转化成亚硝酸盐,被人体摄入后会造成一定的影响<sup>[35]</sup>.从图 5(C)可以看出,本次试验种植的生菜亚硝酸盐含量均低于国标(4 mg · kg<sup>-1</sup>),配施菌液后,生菜中的亚硝酸盐含量均有不同程度地减少.蔬菜中所含的亚硝酸盐与硝酸盐含量有密切关系,即蔬菜中亚硝酸盐的含量受到硝酸盐含量的影响.不同种类氮肥的施加导致蔬菜中硝酸盐的累积不同,进而影响蔬菜中亚硝酸盐含量的差异<sup>[37]</sup>.因此,通过化肥与菌剂的配施,生菜中维生素 C 含量普遍增加而亚硝酸盐含量普遍减少,改善了生菜的营养品质.

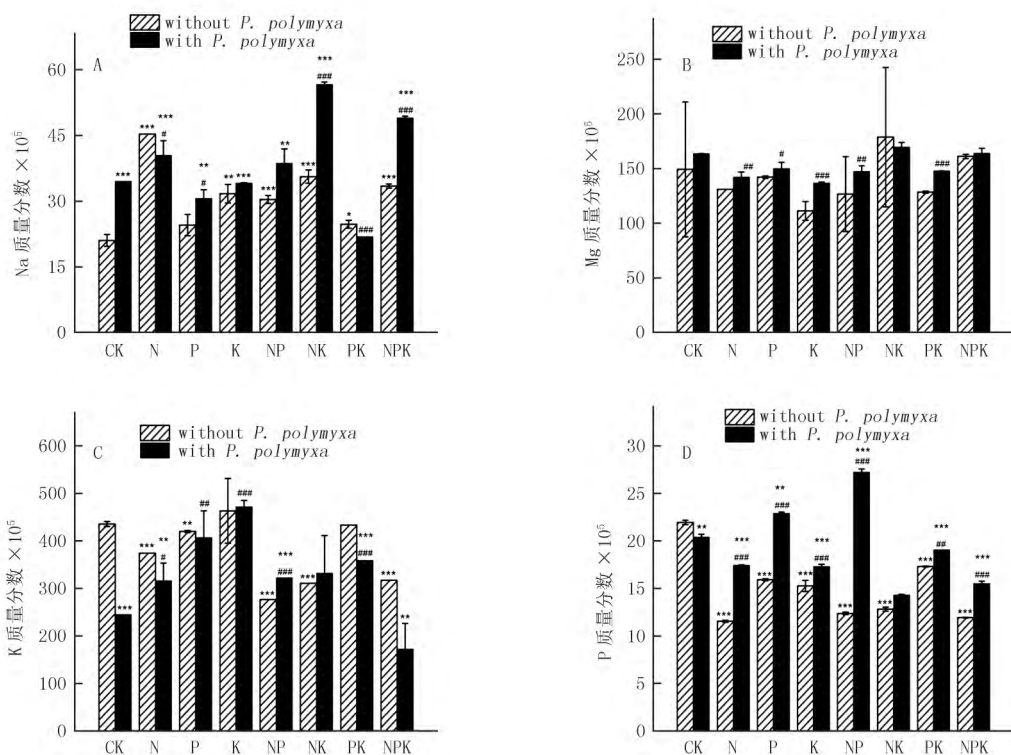


图4 菌剂与化肥不同配施生菜中钠(A), 镁(B), 钾(C), 磷(D) 元素质量分数

Fig.4 Contents of sodium(A),magnesium(B),potassium(C) and phosphorus(D) in lettuce under different combined application of *P. polymyxa* and fertilizers

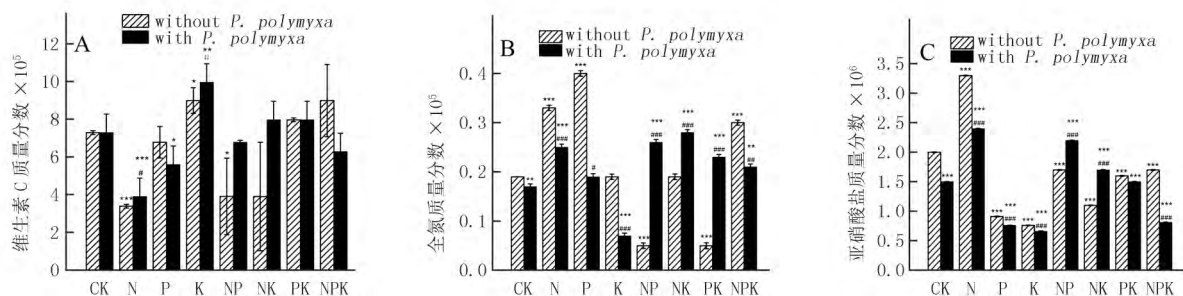


图5 菌剂与化肥不同配施生菜中维生素C(A), 全氮(B) 及亚硝酸盐(C) 质量分数

Fig.5 Contents of Vc(A),total Nitrogen(B) and Nitrite(C) in lettuce under different combined application of *P. polymyxa* and fertilizers

### 3 讨 论

多粘类芽孢杆菌是一种对植物根际具有促生作用的细菌,同时具有生物防治的作用<sup>[38]</sup>.它具有解磷、解钾能力,有助于将土壤中不可利用的磷、钾元素转化为可被生菜吸收的磷肥、钾肥,从而促进生菜生长.由此推测多粘类芽孢杆菌可通过自身合成并向外分泌释放有机酸,使周围 pH 值下降,同时与镁、钙、铁等离子结合,从而使难溶的磷酸盐溶解,形成解磷圈;多粘类芽孢杆菌能够在以钾矿石为唯一钾源的培养基上生长,说明其具有解钾功能.多数研究者认为,微生物的解钾能力主要为其代谢中分泌的小分子有机酸对矿物有一定程度的酸溶作用及络合作用<sup>[39]</sup>;同时,微生物分泌的胞外多糖可以与矿物发生黏结作用,形成细菌-矿物复合物,对矿物的风化也具有积极的作用,加速钾矿的溶解<sup>[40]</sup>.经多粘类芽孢杆菌处理后生菜各项生理指标,包括地上部分的株高、株鲜质量、单株叶片数,及地下部分的根长、根鲜质量均与对照相比有所提高,说明多粘类芽孢杆菌的培养液可能对植物的营养生理代谢产生影响,促进植物对氮、磷等营养元素的吸收<sup>[27]</sup>.研究表明,多粘类芽孢杆菌可以合成植物生长素、胞外多糖、细胞分裂素等,能够促进植物的生长发育<sup>[41-42]</sup>.多粘类芽孢杆菌对于改善生菜的品质也有一定的作用,通过配施,生菜中维生素 C 含量均有不同的程度地提高.大量使用氮肥会引起蔬菜中硝酸盐含量超标的问题<sup>[43-44]</sup>,通过配施多粘类芽孢杆菌,生菜中亚硝酸盐含量显著下降,可能是由于多粘类芽孢杆菌的生长,消耗掉一部分多余的氮源,减少了生菜的吸收,作物体内的硝酸盐还原的速度与对于氮肥的吸收速度协调统一,使得硝酸盐不会过多积累,从而转化为亚硝酸盐<sup>[45]</sup>.由此可见,经多粘类芽孢杆菌配施处理后生菜中的各项生理指标和品质指标与对照相比都有所提高,说明多粘类芽孢杆菌对植物的营养生理代谢产生影响,促进植株生长以及植物对氮、磷等营养元素的吸收<sup>[46-47]</sup>,同时提高植物的品质.

### 参 考 文 献

- [1] 周鑫鑫.设施农业肥料高投入对土壤环境次生盐渍化的影响[D].上海:东华大学,2013.
- [2] 寇永磊.微生物肥料对玉米的促生作用及 G1 菌株抗逆性研究[D].郑州:郑州大学,2012.
- [3] 葛诚.微生物肥料研究、生产和应用的几个问题[J].微生物学通报,1995(6):375-379.
- [4] 张密密,陈诚,刘广明,等.适宜肥料与改良剂改善盐碱土壤理化特性并提高作物产量[J].农业工程学报,2014,30(10):91-98.
- [5] 郝尚华,刘林贵,王冠男.康地宝改良盐碱地试验研究[J].内蒙古科技与经济,2004,12(2):22-78.
- [6] 古述江,房娜娜,章淑艳,等.磷细菌剂与化肥配施对小豆生育性状及产品品质的影响[J].河北省科学院学报,2016,33(1):62-67.
- [7] Posada-Urbe L F, Romero-Tabarez M, Villegas-Escobar V. Effect of medium components and culture conditions in *Bacillus subtilis* EA-CB0575 spore production[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2015, 38 (10): 1879-1888.
- [8] 苍桂璐,张付云,杨阳,等.多粘类芽孢杆菌的研究进展[J].安徽农业科学,2013,41(2):487-489.
- [9] 王刘庆,王秋影,廖美德.多粘类芽孢杆菌生物特性及其机理研究进展[J].中国农学通报,2013,29(11):158-163.
- [10] 吴晓卫.微生物菌肥改良渭北地区盐碱化土壤作用及效果研究[D].西安:西北大学,2015.
- [11] 唐亮,张进忠,于萍萍,等.硅酸盐细菌的分离、纯化、鉴定及生物学特性研究[J].山东农业科学,2008(1):71-73.
- [12] 罗华元,常寿荣,王绍坤,等.云烟高端品牌植烟区根际土壤高效解钾菌的筛选[J].西南农业学报,2011,24(5):1813-1817.
- [13] 胡洲,吴毅歆,毛自朝,等.硅酸盐细菌的分离、鉴定及其生物学特性研究[J].江西农业大学学报,2013,35(3):609-614.
- [14] 李佳,张爱民,王伟,等.几株硅酸盐细菌菌株的分离及解钾、解硅活性[J].湖北农业科学,2013,52(21):5147-5152.
- [15] 麻瑞阳.高效解磷解钾菌株 NX-11 的分离筛选鉴定及作用效果分析[D].保定:河北农业大学,2013.
- [16] 潘虹.石灰性土壤解磷细菌分子鉴定与解磷能力及机理初探[D].西安:西北农林科技大学,2014.
- [17] 李力,冯瑞华,关大伟,等.火焰原子吸收法测定微生物肥料中总钾含量的研究[J].中国土壤与肥料,2009(9):87-90.
- [18] 曹勇,沈治荣,杜勇军,等.复混肥料中钾含量的测定-火焰原子吸收光度法[J].化肥工业,2010,37(1):32-35.
- [19] 张颖.复混肥中钾含量测定方法探讨[J].中氮肥,2010(5):34-37.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 23375-2009 蔬菜及其制品中铜、铁、锌、钙、镁、磷的测定[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [21] 中华人民共和国农牧渔业部.GB 6195-1986 水果、蔬菜维生素 C 含量的测定[S].北京:中国标准出版社,1986.
- [22] 中华人民共和国卫生部.GB 5009.5-2010 食品中蛋白质的测定[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [23] 陈阳.鄂尔多斯解磷、解钾芽孢杆菌的筛选、鉴定及其接种效应的研究[D].成都:四川农业大学,2008.
- [24] 胡容平,邓香洁,龚国淑,等.成都市郊区土壤芽孢杆菌的解磷、解钾潜力[J].四川农业大学学报,2008,26(2):167-169.
- [25] 赵佐平,同延安,高义民,等.不同肥料配比对富士苹果产量及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1130-1135.



- [26] 常莹.钾肥施用量对超高产玉米主要生理特性及茎秆相关特征的影响[D].长春:吉林农业大学,2014.
- [27] 武勇军,沈玉芳,颜秦峰,等.缺氮复氮处理对玉米根系生长、根系活力、硝态氮及氨基酸含量的影响[J].西北农业学报,2012,21(12):61-64.
- [28] 李晴,成少华,迟金和,等.水稻种植过程中缺硅症状及其防治措施[J].现代农业科技,2014(1):90-91.
- [29] 叶尔肯·沙尔巴斯.植物中微量元素缺乏症状及补救措施[J].农村实用科技信息,2015(5):24.
- [30] 范彩霞.植物缺乏大量元素症状及补救措施[J].现代农业研究,2016(2):64.
- [31] 张亚晨.简述镁元素对植物的作用[J].农业开发与装备,2018(11):166.
- [32] 陆志峰.钾素营养对冬油菜叶片光合作用的影响机制研究[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [33] 邓怡萌.浅谈维生素C的生理功能和膳食保障[J].科技展望,2015,25(30):52-54.
- [34] 周芳.NPK与有机肥配施对番茄氮素代谢和产量影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [35] 王倩,刘尤军,安晶晶,等.亚硝酸盐对机体的作用[J].职业与健康,2016,32(23):3297-3299.
- [36] Ferdinandy P. Myocardial ischaemia/reperfusion injury and preconditioning: effects of hypercholesterolaemia/hyperlipidaemia[J]. British Journal of Pharmacology, 2003, 138(2): 283-285.
- [37] Rassaf T, Poll LW, Brouzos P, et al. Positive effects of nitric oxide on left ventricular function in humans[J]. Eur Heart J, 2006, 27(14): 1699-1705.
- [38] 田宇曦, 闵勇, 杨自文, 等. 多粘类芽孢杆菌研究进展[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(18): 3404-3404, 3409.
- [39] Taghavi S, van der Lelie D, Hoffman A, et al. Genome sequence of the plant growth promoting endophytic bacterium *Enterobacter* sp. 638 [J]. PLoS Genet, 2010, 6(5): e1000943.
- [40] 周跃飞, 王汝成, 陆现彩. 玄武岩微生物分解过程中的矿物表面效应[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27: 59-66.
- [41] Lal S, Tabacchioni S. Ecology and biotechnological potential of *Paenibacillus polymyxa*: a minireview[J]. Indian Journal of Microbiology, 2009, 49(1): 2-10.
- [42] 郭芳芳, 谢镇, 卢鹏, 等. 一株多粘类芽孢杆菌的鉴定及其生防促生效果初步测定[J]. 中国生物防治学报, 2014, 30(4): 489-496.
- [43] 徐爱华, 于洪斌, 丁蕴铮. 施用氮肥对蔬菜中硝酸盐积累的影响[J]. 磷肥与复肥, 2004, 19(1): 71-73.
- [44] 王庆, 王丽, 赫崇岩, 等. 过量氮肥对不同蔬菜中硝酸盐积累的影响及调控措施研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(1): 46-49.
- [45] 宿燕明, 彭霞薇, 吕欣, 等. 多粘类芽孢杆菌对油菜中硝酸盐含量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12): 144-148.
- [46] 高绘菊, 付信芝, 董法宝, 等. 桑树内生拮抗细菌枯草芽孢杆菌 L144 对植物生长及营养代谢的影响[J]. 蚕业科学, 2010, 36(2): 0214-0220.
- [47] 陈益, 王正银, 唐静, 等. 磷肥用量对石灰性紫色土壤油麦菜产量、品质和养分形态的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(10): 183-193.

## Effects based on *Paenibacillus polymyxa* combined application with chemical fertilizers on the growing and quality of lettuce

Chen Minjie<sup>1a</sup>, Jiang Xiaoru<sup>1b</sup>, Li Yafei<sup>1b</sup>, Qi Xinglai<sup>1a</sup>, Liu Hui<sup>2</sup>, Man Meilian<sup>1a</sup>, Shi Chunfang<sup>1a</sup>, Wei Ying<sup>1a</sup>, Zheng Chunli<sup>1b,2</sup>

(1.a.School of Life Science and Technology;b.School of Energy and Environment,

Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Key Laboratory of Integrated Exploitation of Bayan Obo Multi-Metal Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** The *Paenibacillus polymyxa* strain belongs to the Paenibacillus, which is advantageous for the promotion of plant growth and nutrient absorption. The strain was treated with chemical fertilizer under different combinations to explore the application value to plant growth and nutrient quality. The results showed that *P. polymyxa* had the ability to release phosphorus and potassium. In addition, combined with chemical fertilizers, the strain had a growth promoting effect on lettuce, which increased the fresh weight, numbers of leaves per plant significantly. The fresh weight and root weight were increased by 387.60% and 373.00% respectively, compared with the blank control group. The content of vitamin C in the treatment that combined application of *P. polymyxa* and chemical fertilizers increased to 9.96 mg/100 g, with the content of nitrite decreased. In summary, *P. polymyxa* and chemical fertilizers could have good growth-promoting effects after application and obtained higher quality of lettuces.

**Keywords:** *Paenibacillus polymyxa*; microbial agent; formula application of fertilizer; growth index; microelement

[责任编辑 王凤产 杨浦]