

doi: 10.11838/sfsc.20160318

氮素形态对解磷细菌发酵液解磷效果及小白菜生长和品质的影响

闫辉, 白冰, 刘明一, 李沁芸, 曹翠玲*

(西北农林科技大学生命学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了施用硝态氮、铵态氮对解磷细菌发酵液不同组分解磷活性及其对小白菜产量、品质的影响。结果表明, 施用相同氮肥时, 浇灌解磷细菌原发酵液处理 T3 的作用效果明显优于菌体悬浮液 T2 及菌液上清 T1; 以硝态氮为底肥时, 施用发酵原液的土壤有效态磷含量较高, 小白菜产量最高, 品质明显优化, 即硝态氮含量下降, V_c 、可溶性糖、可溶性蛋白、纤维素以及植株磷含量显著增加, 且增加变幅均高于以铵态氮为底肥的效果。由此可知, 硝态氮与解磷细菌发酵原液配施时, W1 菌株解磷效果更好, 可能是解磷菌株 W1 最适的氮源。因此, 种植小白菜时直接向其根际施用解磷细菌发酵液并配施硝态氮肥, 更有利于提高小白菜的品质及产量。

关键词: 解磷细菌; 铵态氮; 硝态氮; 小白菜品质; 无机磷形态; 植株全磷

中图分类号: Q945.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257 (2016) 03-0110-07

磷 (P) 是植物生长所需最重要的元素之一, 是植物体内核酸及各种酶、辅酶、三磷酸腺苷 (ATP) 等重要物质的组成成分^[1], 而上述物质在植物光合作用、能量转移、信号转导及大分子物质合成过程中起着至关重要的作用^[2-3], 因此, 土壤中有效磷低下会对植物生理代谢及生长产生极大的负面影响^[4-5]。

我国北方大部分土壤为石灰性土壤, 其最大特点是 pH 值、钙含量高, 对磷素有强烈的固定作用; 施入的磷素, 大部分会与 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 等金属离子形成难溶态的磷酸盐, 致使磷肥利用效率极低, 仅为 5%~25%^[6]。长期以来, 为了追求作物高产, 农田中施入了大量磷肥, 过去十年中, 平均每年国内磷肥消耗量均在 1 200 万 t 以上^[7], 致使农田土壤中难溶性磷素大量累积, 这不仅加大了农业成本, 造成大量浪费, 还会使农田地表径流磷浓度升高造成对水体的面源污染^[8]。另外, 商品磷肥中含有镉、铅等重金属离子, 长期大量施用, 会造成植物体内重金属的积累^[9], 进而通过食物链对人体健康产生危害。

国际上常用解磷细菌 (Phosphate Solubilizing

bacteria, PSB) 来提高土壤有效磷含量^[10], 施用解磷细菌, 具有低成本、无污染的特点, 可明显提高水稻、小麦和马铃薯等作物产量^[11-12]; 将有解磷能力的巨大芽孢杆菌施入茄子根际, 其光合效率增加 12%, 地上、地下部分干重分别增加 30% 和 27%^[13]; 盆栽番茄根际施用两株解磷细菌 (*Pantoea agglomerans* and *Burkholderia anthina*) 后, 均显著增加了植物株高、根长、生物量及产量, 且明显提高了磷素利用效率^[14]; 王亚艺^[15] 试验表明, 施用溶磷菌 y5-2 可使小油菜磷吸收量增加 42.0%, 使用解磷菌 y9-4 则可使其增加 141.0%; 张倩等^[16] 的研究结果表明, Ca_2-P 为陕西地区农田速效磷的主体; 还有研究表明施加解磷细菌可提高石灰性土壤中 Ca_2-P 含量^[17]。上述这些研究表明, PSB 能活化土壤难溶性磷从而替代当季磷肥。但是土壤氮源是制约解磷细菌发挥解磷能力的主要因素, 因为 PSB 对不同形态氮素的利用能力有较大差异, 如覃丽金等^[18] 报道以硝酸钾为氮源时, 解磷菌株 G12-6 和 G19-4-3 具有最大的菌体量, 解磷效果最好; 原海冰等^[19] 却指出, 解磷菌株 L-P1 对硫酸铵利用效率高于硝酸钾; Relwani 等^[20] 也报道不同氮源对解磷细菌有类似影响。但是很多试验都是在实验室内进行的, 在土壤条件下氮素形态是否也影响了解磷细菌的解磷效果, 值得进一步的探究。故本文拟通过盆栽试验, 探究以不同形态氮肥为底肥时, PSB 发酵液不同组分对石

收稿日期: 2015-04-08; 最后修订日期: 2015-05-24

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划项目 (2013K01-38)。

作者简介: 闫辉 (1990-), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要从事植物养分生理方面的研究。E-mail: yanh343@gmail.com。

通讯作者: 曹翠玲, E-mail: cuilingcao@163.com。

灰性土壤难溶性磷素形态转化,小白菜品质及产量的影响,以期为在蔬菜生产中大面积施用 PSB,合理配施氮肥,提高蔬菜品质及产量提供理论依据及技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验所用菌种为本课题组筛选出的无机 PSBW1,经 16S rRNA 鉴定,聚类为蜡样芽胞杆菌。试验前 W1 经无机磷液体培养基 [葡萄糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.3 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, 磷酸钙 10 g, pH 值 7.0] 在 30℃ 200 r/min 条件下振荡培养 48 h 后获得 W1 发酵液 (pH 值: 4.2, 活菌数: 1.4×10^{10} cfu/mL), 发酵液经 4℃ 10 000 r/min 条件下离心 10 min 后获得上清液, 菌体收集后, 加与上清液等量无菌水悬浮后为菌体悬浮液。

小白菜 (*Brassica rapa* L. *Chinensis* Group.), 品种为四月慢, 购自杨凌某种子公 司。

供试土壤为塿土 (石灰性土壤), 取自连续多年未施肥的西北农林科技大学北校区药用植物园 (北纬 34°16'56.24", 东经 108°4'27.95"), 土壤基础理化性质: pH 值 8.2, 有机质 16.2 g/kg, 土壤全磷 (P) 含量为 0.565 g/kg, 有效磷 (P) 含量为 9.01 mg/kg, 速效钾 (K) 118.1 mg/kg。土壤理化性质用鲍士坦的方法测定^[21]。

1.2 试验设计

试验于 2014 年 3~6 月在西北农林科技大学北校区进行。采用盆栽方法, 试验用盆为塑料盆 (上口直径 24 cm, 下口直径 17 cm, 高 16 cm)。每盆装土 3.5 kg (风干土, 过 2 mm 筛)。每千克土壤施纯氮总量 0.2 g, 铵态氮处理采用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 施用量为 3.5 g/盆, 其中 1.4 g 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 作基肥施入, 然后在小白菜 3~4 片及 5~6 片真叶时, 每盆各追施 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1.05 g,; 硝态氮处理采用 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 施用量为 5.39 g/盆, 其中 1.35 g 的 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 作基肥施入, 在小白菜 3~4 片及 5~6 片真叶时, 每盆追施 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 1.88 和 2.15 g, 追肥时将肥料溶解后均匀施入。

选择无损伤、颗粒饱满、均匀大小一致的种子点播。每盆 15 粒, 出苗后每盆定苗 9 株 (1 片真叶)。小白菜 3~4 片真叶进行处理: 浇水 (对照, CK1), 施用无机磷液体培养基 (CK2), 施用发酵

液上清液 (T1), 施用菌体悬浮液 (T2), 施用细菌发酵液 (T3)。各处理施用量均为 6 mL/100 g 土, 即 270 mL/盆, T1 为 270 mL 菌液 4℃ 离心后上清, T2 为 270 mL 菌液 4℃ 离心后, 经无菌水悬浮后的菌体液, T3 为 270 mL 菌液。小白菜 5~6 片真叶时按之前用量重复一次; 第二次发酵液处理 12 d 后采集小白菜样品供测定; 采用抖根分离法取根系所粘土壤为根际土壤测定其无机磷形态。培养期间常规管理。土壤绝对含水量用称重法保持在 20%~22%。

1.3 测定指标与方法

生物量采用烘干称重法测定; 硝态氮含量采用水杨酸比色法测定^[22]; 可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[22]; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定^[22]; Vc 含量采用 2, 6-二氯酚磺法测定^[22]; 纤维素含量采用酸解法测定^[23]; 全磷含量 (P) 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$ 消煮, 钼黄比色法测定^[21]; 土壤磷形态测定采用顾益初的石灰性土壤无机磷分级测定方法^[24]。所有测定均进行 3 次重复。

1.4 数据处理

所得数据用 Excel 以及 SPSS 软件进行整理与统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同形态氮肥与 PSB 配施对小白菜生物量的影响

由表 1 可知, 施用两种氮素与 PSB 发酵液不同组分后均能在一定程度上提高小白菜生物量, 施用细菌发酵液处理 (T3) 的小白菜的鲜、干重均较对照显著增加; 发酵液组分各处理间差异显著 ($p < 0.05$)。施用硝态氮时, 小白菜的鲜、干重较 CK2 分别增加了 86.6% 和 91%。施用菌体悬浮液 (T2) 处理, 在施用硝态氮时小白菜生物量低于 T3, 但大于 T1 处理; 但当施用铵态氮时, 以 T2 处理生物量最低, T1 和 T3 处理较 CK2 增加了 49.5% 和 37.3%, 说明 PSB 与硝态氮配施更有利于提高小白菜的生物量。

2.2 不同形态氮肥与 PSB 配施对小白菜品质指标的影响

不同形态氮肥与 PSB 配施对小白菜硝态氮、Vc、可溶性蛋白、可溶性糖、纤维素含量会产生不同的影响。

表 1 不同形态氮肥与 PSB 配施对小白菜鲜、干重的影响 (g/盆)

处理	铵态氮		硝态氮	
	鲜重	干重	鲜重	干重
CK1	3.66 ± 0.42d	0.45 ± 0.03c	4.99 ± 0.55d	0.60 ± 0.01d
CK2	4.02 ± 0.52cd (100.0)	0.49 ± 0.01bc (100.0)	6.14 ± 0.20c (100.0)	0.70 ± 0.05c (100.0)
T1	5.11 ± 0.63b (149.5)	0.56 ± 0.02a (114.3)	7.59 ± 0.78c (123.6)	0.76 ± 0.02c (108.5)
T2	4.86 ± 0.15bc (120.8)	0.53 ± 0.02ab (108.2)	9.46 ± 0.19b (154.1)	0.99 ± 0.08b (141.4)
T3	5.55 ± 0.75a (137.3)	0.56 ± 0.02a (114.3)	11.47 ± 0.56a (186.8)	1.34 ± 0.02a (191.4)

注：同列数值后不同字母分别表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2.1 对硝态氮含量的影响

硝态氮是衡量蔬菜品质最主要指标。本研究表明，施用硝态氮时，各处理小白菜叶片硝态氮含量均低于施用铵态氮（图 1），说明施用硝态氮肥有利于降低小白菜叶片硝态氮含量。

不论施用哪种氮肥，施用 PSB 发酵液不同组分的小白菜叶片硝态氮含量显著低于对照 ($p < 0.05$)。PSB 发酵液不同组分对小白菜叶片硝态氮含量的影响顺序为 T3 < T1 < T2。这是因为 T3 和 T1 中都带有大量的 PSB 产生的活性产物，土壤中有效磷含量可能较高，有利于小白菜中氮素的同化；而 T2 处理，只有 PSB 菌体进入土壤，与小白菜竞争土壤养分，可能使小白菜还原硝态氮的能力下降。对此还需做进一步的研究。

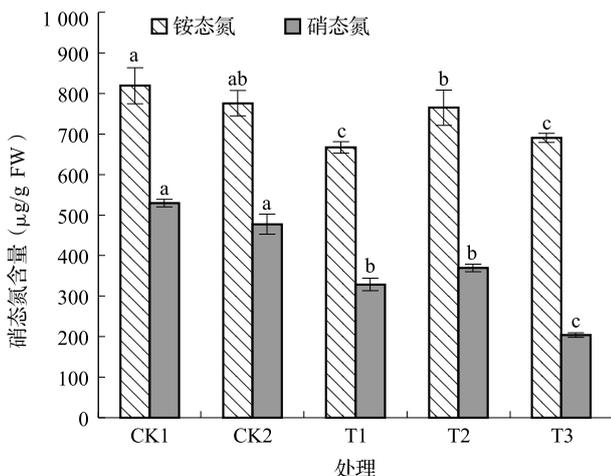


图 1 不同形态氮肥与 PSB 配施对小白菜硝态氮含量影响

注：柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

2.2.2 对 Vc 含量的影响

Vc 含量也是衡量蔬菜品质的重要指标。从试验结果（图 2a）可以看到，施用硝态氮时，小白菜叶片 Vc 含量显著高于施用铵态氮处理 ($p < 0.05$)。

配施铵态氮或是硝态氮均为发酵液不同组分处

理的小白菜 Vc 含量较高，且与对照之间差异达显著水平 ($p < 0.05$)。通过比较施加发酵液不同组分处理之间的差异可以发现，施加硝态氮的 T3 处理，Vc 含量最高，T2 次之，T1 相对较低，3 种处理间差异显著 ($p < 0.05$)，而施加铵态氮的 T1、T2、T3 处理之间差异未达显著水平。说明硝态氮对解磷细菌的解磷活性促进效果更强，可显著提高带有 PSB 菌体处理 (T2、T3) 小白菜叶片的 Vc 含量。

2.2.3 对可溶性糖含量的影响

可溶性糖影响小白菜的口感，也是重要的品质指标。本研究表明，配施铵态氮处理的小白菜可溶性糖含量增加量高于硝态氮（图 2b），说明铵态氮更适合小白菜增加可溶性糖含量。

而比较施加发酵液不同组分处理之间的差异可以发现，无论是配施硝态氮还是铵态氮，均是 T3 处理最高，且与 CK2 之间差异显著 ($p < 0.05$)。施加硝态氮时 T3 处理的可溶性糖含量较 CK2 增加了 31.7%，而施加铵态氮的 T3 处理只比 CK2 增加 13.4%，表明 PSB 发酵液不同组分处理后，小白菜可溶性糖含量的增加比率是配施硝态氮高于铵态氮。

2.2.4 对可溶性蛋白含量的影响

可溶性蛋白含量高低影响了人们对植物蛋白摄入的水平，是评价小白菜营养品质的重要指标。试验结果（图 2c）显示，不含 PSB 菌体的处理 (CK1、CK2、T1)，施加铵态氮小白菜可溶性蛋白含量高于硝态氮，与此相反，包含菌体的 T2、T3 却是施加硝态氮的小白菜可溶性蛋白含量高于铵态氮，说明 PSB 与硝态氮配施，对小白菜可溶性蛋白含量增加效果优于铵态氮。无论是配施铵态氮还是硝态氮，可溶性蛋白含量最高的均是 T3，T2 次之，T1 较低。施加硝态氮时，T1、T2、T3 均较 CK2 有显著增加 ($p < 0.05$)，分别增加 45%、69% 和 77.9%。而施加铵态氮时，PSB 发酵液各组分处理之间差异不显著。

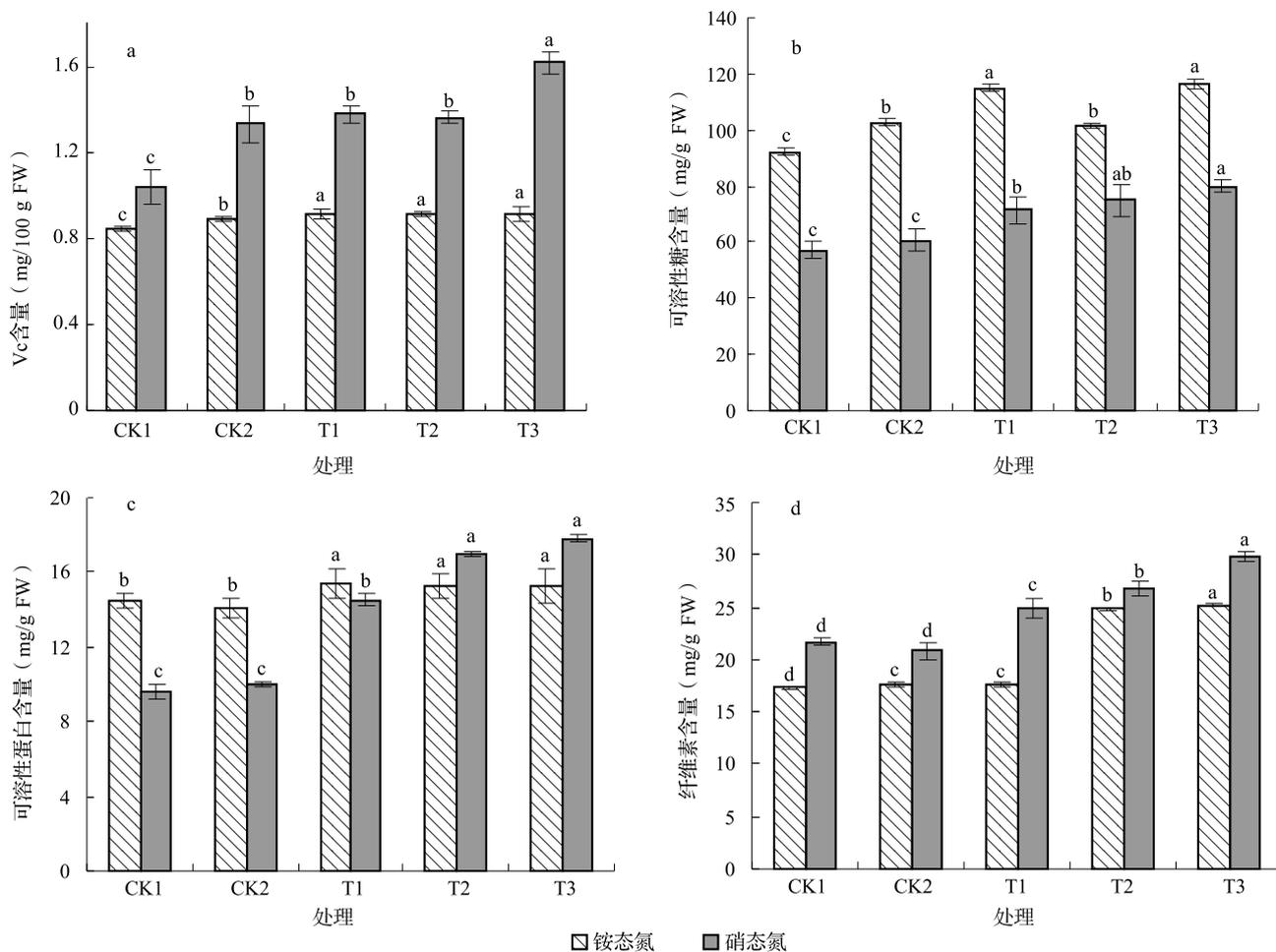


图2 不同形态氮肥与PSB配施对小白菜品质 (Vc、可溶性糖、可溶性蛋白、纤维素) 的影响

2.2.5 对纤维素含量的影响

蔬菜是人们获取膳食纤维的重要来源,提高纤维素含量可明显改善蔬菜品质。本试验结果(图2d)表明,配施硝态氮的各处理小白菜叶片纤维素含量均高于铵态氮,说明硝态氮提高小白菜叶片纤维素含量作用更强。

无论是配施铵态氮还是硝态氮,施加PSB的不同组分各处理,纤维素含量变化趋势一致,均表现为CK1 < CK2 < T1 < T2 < T3,增加效果显著 ($p < 0.05$)。

2.3 不同形态氮肥与PSB配施对小白菜磷吸收的影响

PSB对小白菜的促生作用可通过其叶片磷含量高低来反映。由图3可以看到,配施铵态氮的CK1、CK2、T1,其全磷含量略高于配施硝态氮,但T2、T3却与之相反,表现为配施硝态氮高于铵态氮。这证明了小白菜植株全磷含量的变化确实是由PSB与硝态氮肥共同作用的结果。

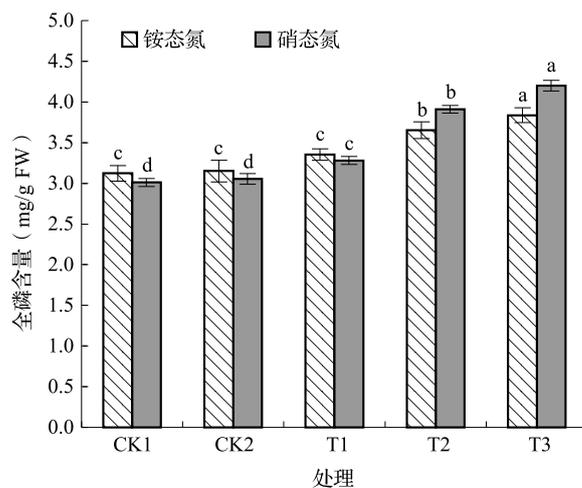


图3 不同形态氮肥与PSB配施对小白菜全磷含量的影响

由图3还能看出,无论是配施硝态氮还是铵态氮,发酵液不同组分对小白菜磷吸收效果均表现为:CK1与CK2最低,T1、T2、T3较CK2增加。配施硝态氮,T1、T2、T3较CK2分别增加10.5%、16.3%和31.9%,且差异显著 ($p < 0.05$);配施铵态氮的

T2、T3 小白菜植株磷含量较 CK2 分别增加了 15.9% 和 21.8%，T1 虽有增加，但与 CK2 相比未达显著水平。以上结果表明，发酵液配施硝态氮对改善小白菜磷吸收效果最明显。

2.4 不同形态氮肥与 PSB 配施对土壤无机磷形态的影响

PSB 能够促进土壤难溶性态无机磷转化为有效态磷。其机制主要是 PSB 能分泌小分子量有机酸、 H^+ ，通过降低土壤 pH 值、局部酸化土壤而使固定态磷溶解，或通过 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等发生络合、螯合反应将磷酸盐中的磷释放出来^[25-27]。本文测定结果（表 2）显示，施用铵态氮或硝态氮，发酵液不同组分处理的土壤无机磷形态变化具有相同的趋势：与 CK2 相比，T1、T2、T3 土壤中可被植物利用的 Ca_2-P 和 Ca_8-P 含量均有上升，而植物难以利用的 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 含量均有一定程度下降，4 种形态磷含量变化幅度均为 $T3 > T2 > T1$ 。这可能是发酵液中的有机酸通过螯合

或离子交换作用，将与 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等结合的部分磷酸根离子释放出来，导致 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 含量下降，释放出的磷酸根又转化为 Ca_2-P 与 Ca_8-P ，导致其含量升高，而对 $O-P$ 和 $Ca_{10}-P$ 含量无明显影响。

从氮肥形态的效果来看，施用硝态氮时，PSB 的解磷效果要优于铵态氮：就 Ca_2-P 和 Ca_8-P 的变化来说，施用硝态氮时，T3 比 CK2 分别增加了 28.5%、15.9%，增加量要高于施用铵态氮所增加的 19.5%、15.8%。这说明施用硝态氮能增强 PSB 的解磷效果。同样 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 含量的降低幅度也是硝态氮大于铵态氮。由表 2 还可以看出，不管哪种氮素形态下，都是 $Fe-P$ 和 $Al-P$ 减少总量高于 Ca_2-P 与 Ca_8-P 增加总量，这是因为土壤中增加的 Ca_2-P 被植物所吸收引起的^[28]。因此，施用 PSB 能促进石灰性土壤中 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 向 Ca_2-P 和 Ca_8-P 的转化，同时配施硝态氮更能促进 PSB 对石灰性土壤难溶磷的活化作用。

表 2 不同形态氮肥与 PSB 配施对土壤无机磷形态的影响 (mg/kg)

处理		Ca_2-P	Ca_8-P	$Al-P$	$Fe-P$	$O-P$	$Ca_{10}-P$
铵态氮	CK2	14.46 ± 2.84bc	41.46 ± 2.35b	47.32 ± 0.80b	39.24 ± 2.90ab	67.38 ± 1.60b	139.76 ± 4.37a
	T1	13.56 ± 1.37c	42.75 ± 2.25b	43.69 ± 5.31bc	36.19 ± 2.77bc	65.38 ± 1.35b	141.42 ± 3.16a
	T2	16.84 ± 3.29b	46.15 ± 1.24a	42.27 ± 3.37bc	35.01 ± 3.60bc	66.27 ± 1.38b	138.20 ± 4.39a
	T3	17.28 ± 1.42b	48.04 ± 0.81a	40.21 ± 2.04c	34.66 ± 1.99c	66.36 ± 3.64b	137.80 ± 1.46a
硝态氮	CK2	15.24 ± 2.31c	43.86 ± 1.77c	46.89 ± 1.23ab	38.64 ± 1.98ab	67.34 ± 3.03ab	140.56 ± 1.34ab
	T1	15.43 ± 1.29c	45.11 ± 2.44c	42.99 ± 1.98bc	35.47 ± 2.13bc	67.54 ± 1.76b	141.03 ± 2.97a
	T2	17.93 ± 1.86b	48.23 ± 2.65b	41.03 ± 1.56c	32.03 ± 2.09cd	66.32 ± 2.59b	139.15 ± 4.04b
	T3	19.59 ± 2.03a	50.81 ± 3.11a	39.61 ± 2.11c	30.19 ± 1.42d	66.08 ± 2.21b	138.77 ± 3.65b

3 小结与讨论

有机肥与氮、磷、钾化肥合理配施能有效促进 PSB 的生长繁殖，氮肥的促进作用显著^[29]。解磷细菌的最主要解磷机制是分泌小分子量的有机酸活化难溶态磷^[30]，而不同形态氮源，影响了 PSB 有机酸合成代谢途径^[31]，最终导致分泌有机酸种类及数量发生了变化，而不同有机酸对土壤难溶态磷素活化能力又有较大差异^[32]，因此氮素形态对 PSB 解磷活性有较大影响。乔志伟等^[33]研究表明，解磷菌株 W25 以铵态氮为氮源时主要分泌甲酸和乙酸，以硝态氮为氮源则产生草酸和琥珀酸。草酸、琥珀酸可通过螯合、竞争吸附位点的作用，对土壤难溶磷素活化作用效果优于甲酸及乙酸，且土壤有

效磷含量更高^[34]。供给硝态氮时，PSB 能更好的促进植物对土壤有效磷的吸收，而作物磷素水平提升可促进光合效率、光合产物运输，故玉米、甘蔗等作物产量提高更显著^[35]。本试验结果也与前人研究结果相似：以硝态氮为氮源时，土壤中可利用磷素 Ca_2-P 和 Ca_8-P 含量明显高于施用铵态氮，植株全磷含量也较施用铵态氮为高，小白菜生物量增幅明显高于施用铵态氮。说明在土壤栽培条件下，硝态氮是 PSB 菌株 W1 较为适合的氮源。

硝态氮和 Vc 是评价蔬菜营养品质的最主要指标。硝酸盐对人体的危害性极大^[36]；Vc 具有清除人体内过剩自由基，提高机体免疫力的作用，在防癌和抗衰老方面具有重要功能^[37]，所以降低硝态氮含量并提高 Vc 含量是提高蔬菜品质最重要的任

务。本文结果显示,以 PSB 替代磷肥与硝态氮肥配施后,不但提高了小白菜产量,其营养品质也得到了较好优化,体现在显著降低了小白菜叶片硝态氮含量,增加了 Vc 含量。此结果与张永清^[38]的研究结果一致。硝态氮含量降低可能是因为在配施硝态氮时,PSB 解磷活性更强,土壤有效磷素供给充足,小白菜光合作用增强,碳水化合物含量提高^[35],同时也导致小白菜硝酸还原酶活性上升^[39],即小白菜叶片碳素同化和氮素同化同时增强,故硝态氮含量降低;而 Vc 含量升高,是因为小白菜体内磷素水平提高后,导致小白菜光合产物葡萄糖-6-磷酸含量升高,为 Vc 的 GDP-mannose 合成途径提供了足够的前体物质 G-6-P^[40],促进了 Vc 的合成。

由此看来,种植小白菜时,可以用 PSB W1 菌株发酵液替代部分磷肥,可生产绿色高品质小白菜,而配施适量硝态氮肥,可使小白菜品质更优,产量最高。鉴于本文进行的是盆栽试验,在大面积推广应用 PSB 之前,还需进行大田试验对此结果进行进一步验证。

参考文献:

- [1] Rizvi A, Khan M S, Ahmad E. Inoculation impact of phosphate-solubilizing microorganisms on growth and development of vegetable crops [M]. Phosphate Solubilizing Microorganisms. Springer International Publishing, 2014. 287-297.
- [2] Fernández L A, Zalba P, Gómez M A, et al. Phosphate-solubilization activity of bacterial strains in soil and their effect on soybean growth under greenhouse conditions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43 (6): 805-809.
- [3] Zaidi A, Khan M S, Ahemad M, et al. Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria [J]. Acta Microbiologica ET Immunologica Hungarica, 2009, 56 (3): 263-284.
- [4] 齐炳林,曹翠玲,王菲,等.磷胁迫对豇豆幼苗硝酸还原酶活性和硝态氮含量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, (1): 147-151.
- [5] 李玉琴,赵丹丹,余永芳,等.磷胁迫对油菜幼苗 Apase·POD·CAT 活性的影响 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (16): 9548-9550.
- [6] 郎敬,杨洪一,李丽丽,等.解磷细菌研究进展与应用前景 [J]. 农业与技术, 2014, 34 (5): 1-1.
- [7] 王莹,廖康程.2013 年我国磷肥及硫资源生产运行情况及发展趋势 [J]. 中国石油和化工经济分析, 2014, (5): 25-27.
- [8] 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮、磷的流失与水体富营养化 [J]. 土壤, 2000, 32 (4): 188-193.
- [9] 区惠平,刘昔辉,黄金生,等.广西典型红壤旱地施用钙镁磷肥对玉米产量及其镉累积的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34 (18): 5301-5305.
- [10] Khan A A, Jilani G, Akhtar M S, et al. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production [J]. J Agric Biol Sci, 2009, 1 (1): 48-58.
- [11] Selvakumar G, Mohan M, Kundu S, et al. Cold tolerance and plant growth promotion potential of *Serratia marcescens* strain SRM (MTCC 8708) isolated from flowers of summer squash (*Cucurbita pepo*) [J]. Letters in Applied Microbiology, 2008, 46 (2): 171-175.
- [12] Kumar K V, Srivastava S, Singh N, et al. Role of metal resistant plant growth promoting bacteria in ameliorating fly ash to the growth of *Brassica juncea* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170 (1): 51-57.
- [13] Han H S, Lee K D. Phosphate and potassium solubilizing bacteria effect on mineral uptake, soil availability and growth of eggplant [J]. Res J Agric Biol Sci, 2005, 1: 176-180.
- [14] Walpola B C, Min-Ho Y. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria and their co-inoculation efficiency on tomato plant growth and phosphorous uptake [J]. Afr J Microbiol Res, 2013, 7: 266-275.
- [15] 王亚艺. 使用解磷细菌对小油菜产量及土壤磷含量的影响 [J]. 北方园艺, 2014, (5): 155-158.
- [16] 张倩,张素霞,刘克,等.陕北不同土地利用类型下土壤无机磷形态分布及有效性研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29 (4): 133-136.
- [17] 姜佰文,刘玲慧,陈晓武,等.生物菌剂对土壤无机磷活化效果的研究 [J]. 东北农业大学学报, 2014, 45 (9): 62-66.
- [18] 覃丽金,杨礼富,袁坤,等.10 种热带牧草根际高效解磷细菌的筛选及其培养条件 [J]. 热带作物学报, 2009, 30 (11): 1630-1636.
- [19] 原海冰,刘军,韩志双,等.土壤中 1 株解磷细菌的筛选及其生长特性的研究 [J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40 (5): 843-848.
- [20] Relwani L, Krishna P, Reddy M S. Effect of carbon and nitrogen sources on phosphate solubilization by a wild type strain and uv-induced mutants of *Aspergillus tubingensis* [J]. Curr Microbiol, 2008, 57: 401-406.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [23] 熊素敏,左秀凤,朱永义.稻壳中纤维素、半纤维素和木质素的测定 [J]. 粮食与饲料工业, 2005, (8): 40-41.
- [24] 顾益初,蒋柏藩.石灰性土壤无机磷分级的测定方法 [J]. 土壤, 1990, 22 (2): 101-102.
- [25] Rashid M, Khalil S, Ayub N, et al. Organic acids production and phosphate solubilization by phosphate solubilizing microorganisms (PSM) under in vitro conditions [J]. Pak J Biol Sci, 2004, 7 (2): 187-196.
- [26] Khan M S, Zaidi A, Ahemad M, et al. Plant growth promotion

- by phosphate solubilizing fungi – current perspective [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2010, 56 (1): 73–98.
- [27] Marra L M, Soares C R F S, de Oliveira S M, et al. Biological nitrogen fixation and phosphate solubilization by bacteria isolated from tropical soils [J]. Plant and Soil, 2012, 357 (1–2): 289–307.
- [28] 张英鹏, 陈清, 李彦, 等. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响 [J]. 中国农学通报, 2008, 7: 245–248.
- [29] 罗明, 文启凯, 慕玉俊, 等. 不同施肥措施对棉田土壤磷细菌及磷转化强度的影响 [J]. 土壤与环境, 2001, 10 (4): 316–318.
- [30] Sagoe CI, Ando T, Kouno K, et al. Relative importance of protons and solution calcium concentration in phosphate rock dissolution by organic acids [J]. Soil Sci Plant Nutr, 1998, 44: 617–625.
- [31] Kucera I, Kaplan P. A study on the transport and dissimilatory reduction of nitrate in *Paracoccus denitrificans* using viologen dyes as electron donors [J]. Biochim Biophys Acta, 1996, 1276: 203–209.
- [32] 刘丽, 梁成华, 王琦, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化影响的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (3): 593–600.
- [33] 乔志伟, 洪坚平, 谢英荷, 等. 石灰性土壤拉恩式溶磷细菌的筛选鉴定及溶磷特性 [J]. 应用生态学报, 2013, 24 (8): 2294–2300.
- [34] Braithwaite A C, Eaton A C, Groom P S. Factors affecting the solubility of phosphate rock residues in 2% citric acid and 2% formic acid [J]. Fertilizer Research, 1990, 23 (1): 37–42.
- [35] 李迟园, 田霄鸿, 曹翠玲. 外源有机酸对玉米磷吸收及其生长发育的影响 [J]. 西北植物学报, 2011, 31 (7): 1376–1383.
- [36] Bryan N S, Loscalzo J. Nitrite and nitrate in human health and disease [M]. New York: Humana Press, 2011.
- [37] 龙勇, 孙谦, 冯靖媛, 等. 提高果蔬维生素 C 含量研究进展 [J]. 食品工业科技, 2014, 35 (1): 385–389.
- [38] 张永清. 氮肥与磷钾肥配施对青花菜产量和品质的影响 [J]. 山西师范大学学报 (自然科学版), 2004, 18 (2): 77–80.
- [39] 黄彩变, 王朝辉, 王小英, 等. 菠菜硝态氮累积和还原与植株生长的关系 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (4): 613–618.
- [40] Yu T S, Lue W L, Wang S M, et al. Mutation of Arabidopsis plastid phosphoglucose isomerase affects leaf starch synthesis and floral initiation [J]. Plant Physiology, 2000, 123 (1): 319–326.

Effects of nitrogen forms on the phosphate-solubilizing activity of phosphate solubilizing bacteria, growth and quality of pakchoi

YAN Hui, BAI Bing, LIU Ming-yi, LI Qin-yun, CAO Cui-ling* (Northwest A&F University, College of Life Science, Yangling Shanxi 712100)

Abstract: Pot experiments were conducted with pakchoi as test crops to study the effect of application ammonium and nitrate on the phosphate-solubilizing activity of phosphate solubilizing bacteria fermentation broth, growth and quality of pakchoi. Obtained results showed that application of single form of nitrogen fertilizer, the effect of fermentation broth (T3) was better than that of the bacteria suspension (T2) and the supernatant (T1). When combined application of fermentation broth and nitrate nitrogen, the effect was better than that with ammonium nitrogen, which was reflected in the increase of soil available phosphorus content, more crop yields and better nutritional quality. The better pakchoi nutritional quality included higher contents of Vc, solubilizing sugar, solubilizing protein, cellulose, phosphorus and less nitrate content. Therefore, phosphate solubilizing bacteria fermentation broth could be used instead of phosphatic fertilizer in pakchoi production, what's more, nitrate was better nitrogen source for PSB strain W1. So it would have a great increase of pakchoi yield and nutritional quality when combining application with nitrate nitrogen.

Key words: phosphate solubilizing bacteria; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; pakchoi quality; inorganic phosphorus forms; plant total phosphorus content