溶磷菌对番茄幼苗生长及土壤磷素的影响

黄海洲, 罗旦, 陈吉祥, 王天烽, 张庆芳, 王永刚

引用本文:
黄海洲, 罗旦, 陈吉祥, 等. 溶磷菌对番茄幼苗生长及土壤磷素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3181–3189.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2024–1110

黄海洲, 罗旦, 陈吉祥, 等. 溶磷菌对番茄幼苗生长及土壤磷素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3181-3189.
HUANG H Z, LUO D, CHEN J X, et al. Effects of phosphorus-solubilizing bacteria on tomato seedling growth and soil phosphorus availability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3181-3189.

开放科学 OSID

溶磷菌对番茄幼苗生长及土壤磷素的影响

黄海洲[1], 罗旦[1*], 陈吉祥[1], 王天烽[1], 张庆芳[1], 王永刚[2]

(1.兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050; 2.兰州理工大学生命科学与工程学院, 兰州 730050)

摘 要:利用盆栽试验研究溶磷菌*Acinetobacter baumannii*(鲍曼不动杆菌)B6和*Burkholderia cepacia*(伯克霍尔德菌)Z7对番茄幼苗生长发育指标,根际土壤理化性质、酶活性及微生物群落多样性的影响。结果表明:施加溶磷菌显著促进了番茄幼苗株高和茎粗的增长,其中复合菌株(B6+Z7)处理效果最佳,株高和茎粗分别增加了6.36%和12.35%。此外,溶磷菌处理显著提高了番茄叶片中过氧化物酶(POD)活性和可溶性糖含量,降低了丙二醛(MDA)含量,表明溶磷菌能够增强番茄幼苗的抗逆性。在土壤性质方面,复合菌株处理组显著提高了土壤全磷含量(增幅为4.35%)、速效磷含量(增幅为10.58%)和磷酸酶活性(增幅为5.26%)。而且,施加溶磷菌显著提高了番茄根际土壤细菌Simpson指数,即微生物物种多样性,增加了变形菌门、酸杆菌门和拟杆菌门的相对丰度。

关键词:溶磷菌;番茄;根际土;理化性质;微生物

中图分类号:S641.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2025)12-3181-09 doi:10.11654/jaes.2024-1110

Effects of phosphorus-solubilizing bacteria on tomato seedling growth and soil phosphorus availability

HUANG Haizhou[1], LUO Dan[1*], CHEN Jixiang[1], WANG Tianfeng[1], ZHANG Qingfang[1], WANG Yonggang[2]

(1. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effects of phosphorus-solubilizing bacteria *Acinetobacter baumannii* (B6) and *Burkholderia cepacia* (Z7) on tomato seedling growth parameters, rhizosphere soil physicochemical properties, enzyme activity, and microbial community diversity. The results showed that the application of phosphorus-solubilizing bacteria significantly promoted the increase in plant height and stem diameter of tomato seedlings, with the combined strain (B6+Z7) exhibiting the best effect, increasing plant height and stem diameter by 6.36% and 12.35%, respectively. In addition, phosphorus-solubilizing bacteria treatment significantly enhanced peroxidase (POD) activity and soluble sugar content in tomato leaves while reducing malondialdehyde (MDA) content, indicating improved stress resistance in tomato seedlings. In terms of soil properties, the combined strain treatment significantly increased total phosphorus content (by 4.35%), available phosphorus content (by 10.58%), and phosphatase activity (by 5.26%) in the soil. Moreover, the application of phosphorus-solubilizing bacteria significantly increased the Simpson index of rhizosphere soil bacteria, indicating enhanced microbial diversity, and led to a higher relative abundance of Proteobacteria, Acidobacteriota, and Bacteroidota.

Keywords: phosphorus-solubilizing bacteria; tomato; rhizosphere soil; physical and chemical properties; microbial

番茄作为一种全球广泛栽培与消费的蔬果,在全球农业经济中占据着重要的地位[1]。成熟番茄果实富含番茄红素,具有抗氧化、抗癌和抗动脉粥样硬化特性[2],这促使了人们对番茄需求的持续增长。然

收稿日期:2024-12-19 **录用日期**:2025-04-30

作者简介:黄海洲(1999—),男,甘肃金昌人,硕士研究生,研究方向为环境微生物生态。E-mail:Huang_01629@163.com

***通信作者**:罗旦 E-mail:luodan@lut.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42267017);甘肃省青年科技基金项目(24JRRA970);兰州理工大学红柳优青项目(062404)

Project supported: National Natural Science Foundation of China (42267017); Gansu Youth Science and Technology Fund Program (24JRRA970); Hongliu Young Talents Program of Lanzhou University of Technology (062404)

而，番茄农业生产面临环境污染、土壤有益微生物减少和土壤酸化等一系列挑战。植物根际促生菌在现代农业中扮演着至关重要的角色[3]，它们不仅能够促进植物的生长，还有助于改善土壤质量。

土壤磷的不足已成为限制作物生长的关键因素，导致化学磷肥的需求明显上升[4]。磷肥过量施用带来的环境风险，促使人们寻找环保且经济的替代方案，促进低磷或无磷土壤中植物生长[5]。土壤中的溶磷微生物通过矿化和溶解有机磷及无机磷，发挥着磷循环中的核心作用[6]，根际微生物能增加根际土壤中正磷酸盐含量，帮助植物吸收氮、磷等营养元素，从而促进植物生长[7]。溶磷微生物分解有机物质，为农业生态系统作物改良提供了重要支持，因其环保、低成本和高效而备受关注[8]。

溶磷微生物菌剂可促进作物生长、提高产量，增加土壤有益微生物数量，改善土壤质量，保护生态环境。然而，不同溶磷菌的促生效应因菌株差异而存在特异性，且许多菌株的具体促生机制尚不明确，相关研究仍较为有限。在本研究之前，已对玉米根际土壤样本进行了溶磷微生物的筛选[9]。在NBRIP琼脂培养基上，两株菌能够形成明显的透明溶磷圈。通过液体培养基摇瓶试验定量测定溶磷效果，*Acinetobacter baumannii*（鲍曼不动杆菌）B6和*Burkholderia cepacia*（伯克霍尔德菌）Z7具有较强的溶磷能力，然而，它们对植物的促生长作用仍不清楚。因此，本研究选取鲍曼不动杆菌B6和伯克霍尔德菌Z7这两种溶磷菌作为研究对象，旨在评估其对番茄幼苗生长、根际土壤特性、酶活性以及微生物群落结构的影响，以期为番茄壮苗的培育提供科学依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究选用先前从玉米根际土壤中分离得到的鲍曼不动杆菌B6（GenBank登录号：OR975656）和伯克霍尔德菌Z7（GenBank登录号：OR987444）作为实验菌株[9]。番茄品种选定为“粉冠1号”。试验用土壤取自甘肃省兰州市农田（36°03′48″N，103°44′20″E）。

1.2 菌液制备

将保藏于−80 ℃超低温冰箱中的试验菌株在LB平板上进行活化，随后转接至LB液体培养基中。在30 ℃、180 r·min^{-1}条件下振荡培养至菌液OD_{600}约为1.0。离心收集菌体，用无菌水冲洗2至3次后，再重悬于无菌水中备用。分别制备B6和Z7的菌液后，按1∶1的比例混合得到B6+Z7复合菌液，确保总菌液浓度为1×10^8 CFU·mL^{-1}，与单菌接种的浓度一致。

1.3 试验设计

本研究采用上口径18.2 cm、下口径12.9 cm、高16.2 cm的花盆作为室内盆栽试验容器。试验采用完全随机设计，包括CK（无菌水）、B6（鲍曼不动杆菌B6菌液）、Z7（伯克霍尔德菌Z7）和B6+Z7（B6+Z7复合菌液）共4个处理，每处理3个重复，共计12盆。番茄种子经蒸馏水冲洗，用75%乙醇和5%次氯酸钠溶液浸泡5 min，无菌水洗3~4次后风干备用。种子分为两部分，分别用于催芽和盆栽试验。

各加菌处理组分别用B6、Z7和B6+Z7菌悬液浸泡种子1 h，CK用无菌水浸泡。处理后的种子用镊子转移到底部垫有灭菌滤纸的灭菌培养皿中，每皿10粒，加入10 mL无菌水，置于28 ℃、湿度60%的人工气候箱中避光培养。定期补充无菌水保持湿润，每24 h观察记录一次萌发情况，以胚根露出种皮为萌发标准，连续观察10 d，计算萌发率并测量芽长。

按照0.15 g·kg^{-1} $CO(NH_2)_2$、0.15 g·kg^{-1} K_2O和0.1 g·kg^{-1} P_2O_5的标准配比进行基肥处理，将基肥与土壤混匀。选择10粒经消毒和催芽10 d的番茄种子，用菌悬液浸泡2 h后播种于花盆，每盆2 kg土壤。置于人工气候箱，昼温28 ℃、夜温16 ℃，昼长12 h、夜长12 h，湿度60%，光照强度5 000 lx条件下培养，定期浇水。播种20 d后，每盆选3株长势相近的番茄苗，根灌相应菌液（空白对照组CK使用无菌水），每株番茄施加10 mL的相应菌液（$OD_{600}\approx1$）。培养40 d后采收。

1.4 番茄幼苗生理指标测定及方法

株高为茎基部到生长点的垂直高度，利用卷尺测定。茎粗为子叶下部粗度，利用游标卡尺测定。利用直尺测定叶长和叶宽，并据此计算叶面积，叶面积（cm^2）=叶长×叶宽×0.700 7[10]。采用称质量的方法测定植株鲜质量，干质量采用烘干法测定[11]。采用蒽酮比色法测定叶片可溶性糖含量，采用考马斯亮蓝法测定叶片可溶性蛋白含量，采用硫代巴比妥酸法（TBA法）测定叶片丙二醛含量，采用无水乙醇法测定叶片叶绿素含量[12]。超氧化物歧化酶（SOD）活性采用氯化硝基四氮唑蓝光化还原法（NBT法）测定，过氧化物酶（POD）活性采用愈创木酚法测定，过氧化氢酶（CAT）活性采用滴定法测定，硝酸还原酶（NR）采用磺胺比色法测定[13]。

1.5 土壤理化性质和酶活性的测定

土壤pH值采用pH计测定，电导率采用电导率仪

测定。土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定，全磷含量采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定，有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。土壤全钾和速效钾含量采用火焰光度法测定，速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定。土壤NH_4^+-N和NO_3^--N含量采用KCl浸提法测定。土壤酶活性采用比色法测定。具体试验步骤与Luo等[14]研究中所述方法一致。

1.6 土壤细菌多样性分析

使用ALFA Soil DNA Extraction Kit试剂盒提取土壤样本DNA。选择引物341F(5′-CCTACGGGNGGCWGCAG-3′)和806R(5′-GGACTACHVGGGTATCTAAT-3′)扩增细菌16S rDNA的V3~V4区。后续建库按照NEBNext® Ultra™ DNA Library Prep Kit for Illumina®标准流程进行建库操作，完成后以高通量测序平台HiSeq进行上机测序(广东美格基因科技有限公司)。

1.7 数据分析

使用Excel 2021完成数据标准化处理，数据以平均值±标准偏差表示。利用IBM SPSS 27.0进行单因素方差分析，置信区间为95%(α=0.05)。使用Origin 2021完成图形绘制。

2 结果与分析

2.1 溶磷菌对番茄种子发芽率和芽长的影响

如表1所示，不同菌液处理均不同程度地提升了番茄种子的萌发率。不同处理组的芽长排序为B6+Z7>Z7>B6>CK。施加不同菌液均能够促进番茄种子生长，其中B6+Z7表现出最为显著的促进效果，与CK相比，芽长显著提高了5.73%(P<0.05)。

2.2 溶磷菌对番茄幼苗生长的影响

2.2.1 生长指标

如表2所示，与CK相比，B6+Z7、B6和Z7处理组的株高分别显著增加了6.36%、5.30%和4.64%(P<0.05)。在茎粗方面，相较于CK，B6+Z7、B6和Z7处理组分别显著增加了12.35%、10.76%和10.56%(P<0.05)。此外，在叶片的长度、宽度和面积方面，各处理组与CK之间无显著差异。

表1 溶磷菌对番茄种子萌发率和芽长的影响

Table 1 Effects of phosphorus-solubilizing bacteria on germination and sprout length of tomato seeds

处理 Treatment	最终萌发率 Germination percent/%	芽长 Sprout length/cm
CK	66.67±5.77a	3.14±0.21b
B6	76.67±5.77a	3.20±0.21ab
Z7	70.00±10.00a	3.26±0.22ab
B6+Z7	76.67±5.77a	3.32±0.21a

注：同列数据不同小写字母标记代表不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments(P<0.05). The same below.

2.2.2 干物质积累

如表3所示，加菌处理后的番茄幼苗干物质表现出一定程度的增加。具体而言，对于地上干质量，B6+Z7和B6处理较CK均显著增加了35.59%(P<0.05)，而Z7处理组的效果不显著。

2.3 溶磷菌对番茄幼苗生理指标的影响

2.3.1 番茄幼苗叶片的酶活性

如表4所示，相较于CK，B6+Z7、Z7和B6处理组

表3 不同处理对番茄干物质积累的影响

Table 3 Effects of different treatments on dry matter accumulation of tomato seedlings

处理 Treatment	地上干质量 Shoot dry weight/g	地下干质量 Root dry weight/g
CK	0.59±0.09b	0.22±0.02a
B6	0.80±0.08a	0.22±0.01a
Z7	0.65±0.04ab	0.23±0.01a
B6+Z7	0.80±0.10a	0.23±0.01a

表4 番茄叶片的酶活性($U\cdot g^{-1}$)

Table 4 Enzymatic activities of tomato leaves($U\cdot g^{-1}$)

处理 Treatment	超氧化物歧化酶活性 SOD activity	过氧化物酶活性 POD activity	过氧化氢酶活性 CAT activity	硝酸还原酶活性 NR activity
CK	13.86±0.82a	9.03±0.06b	11.79±0.55a	9.45±0.29a
B6	14.14±0.94a	9.47±0.12a	11.82±0.55a	9.48±0.22a
Z7	14.41±1.25a	9.37±0.31ab	10.77±0.82a	9.53±0.29a
B6+Z7	14.68±0.82a	9.63±0.12a	11.84±0.78a	9.64±0.20a

表2 溶磷菌处理下的番茄幼苗生长指标

Table 2 Growth indicators of tomato seedlings treated with phosphate-solubilizing bacteria

处理 Treatment	株高 Plant hight/cm	茎粗 Stem diameter/mm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶面积 Leaf area/cm^2
CK	15.10±0.52b	5.02±0.08b	4.99±0.40a	2.96±0.30a	10.37±1.60a
B6	15.90±0.65a	5.56±0.27a	5.00±0.25a	3.03±0.28a	10.62±1.00a
Z7	15.80±0.50a	5.55±0.25a	5.02±0.38a	3.00±0.24a	10.50±0.78a
B6+Z7	16.06±0.67a	5.64±0.17a	5.03±0.22a	3.05±0.22a	10.77±0.77a

番茄幼苗叶片SOD活性分别提高了5.92%、3.97%和2.02%。与CK相比，B6和B6+Z7处理组叶片的POD活性显著提高了4.87%和6.64%（$P<0.05$）。除Z7处理外，其他加菌处理均提升了番茄幼苗叶片的CAT活性。此外，在硝酸还原酶NR活性方面，各加菌处理相较于CK均有一定程度的提升。

2.3.2 番茄幼苗叶片的叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白和丙二醛的含量

如表5所示，叶绿素和可溶性蛋白含量在各组间无显著差异。与CK相比，B6和B6+Z7处理组的叶片可溶性糖含量分别显著提高了3.32%和4.06%（$P<0.05$），Z7处理组的叶片丙二醛含量显著降低了4.60%（$P<0.05$）。

2.4 番茄根际土壤理化性质和酶活性

如表6所示，与CK相比，加菌处理后土壤的pH值和电导率值均有所降低，土壤全氮含量均增加，但差异不显著。在土壤全磷和速效磷含量方面，B6和B6+Z7处理相对于CK显著增加了全磷含量，增幅均为4.35%（$P<0.05$），速效磷含量较CK组分别显著增加了10.06%和10.58%（$P<0.05$）。与CK相比，B6+Z7处理显著提高了土壤磷酸酶活性，增幅达到5.26%（$P<0.05$），而其他处理组对土壤磷酸酶活性影响不显著。

相关性网络分析揭示了土壤特性和番茄幼苗指标间的相关性（图1）。番茄幼苗的株高和茎粗与AP（速效磷）和土壤磷酸酶活性均显著正相关（$P<0.05$），地上鲜质量与AP显著正相关（$P<0.05$），地下鲜质量与AK（速效钾）显著正相关（$P<0.05$），番茄幼苗生长指标与（土壤脲酶）之间的相关性不显著。叶片中SOD活性与AK显著正相关，NR活性与TN（全氮）和NO_3^--N（硝态氮）显著正相关（$P<0.05$）。

2.5 土壤微生物群落多样性

如图2a和图2b所示，番茄幼苗根际土壤的Simpson指数在不同处理下存在显著差异，B6处理最高，B6+Z7和Z7处理次之，CK处理最低。Chao1指数各处理间无显著差异。PCoA分析（图2c）显示，加菌处理与CK组显著分离，表明溶磷菌施用显著影响了土壤微生物群落的组成。

如图3a所示，B6+Z7处理组中，变形菌门（Proteobacteria）的相对丰度最高，达到32.02%，比CK组高出11.69%。酸杆菌门（Acidobacteriota）在施菌后有所增加，B6、Z7和B6+Z7组分别较CK增加了7.58%、0.66%和6.00%。拟杆菌门（Bacteroidota）在B6、Z7和

表5 叶片的叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白和丙二醛含量

Table 5 Chlorophyll, soluble sugars, soluble proteins and MDA content of leaves

处理 Treatment	叶绿素含量 Chlorophyll content/（mg·g^{-1}）	可溶性糖含量 Soluble sugar content/（mg·g^{-1}）	可溶性蛋白含量 Soluble protein content/（mg·g^{-1}）	丙二醛含量 MDA content/（μmol·L^{-1}）
CK	2.04±0.02a	2.71±0.04b	99.67±2.52a	0.87±0.02a
B6	2.04±0.01a	2.80±0.05a	101.33±6.03a	0.84±0.01ab
Z7	2.04±0.02a	2.75±0.04ab	100.67±5.69a	0.83±0.02b
B6+Z7	2.04±0.01a	2.82±0.04a	102.33±4.51a	0.84±0.02ab

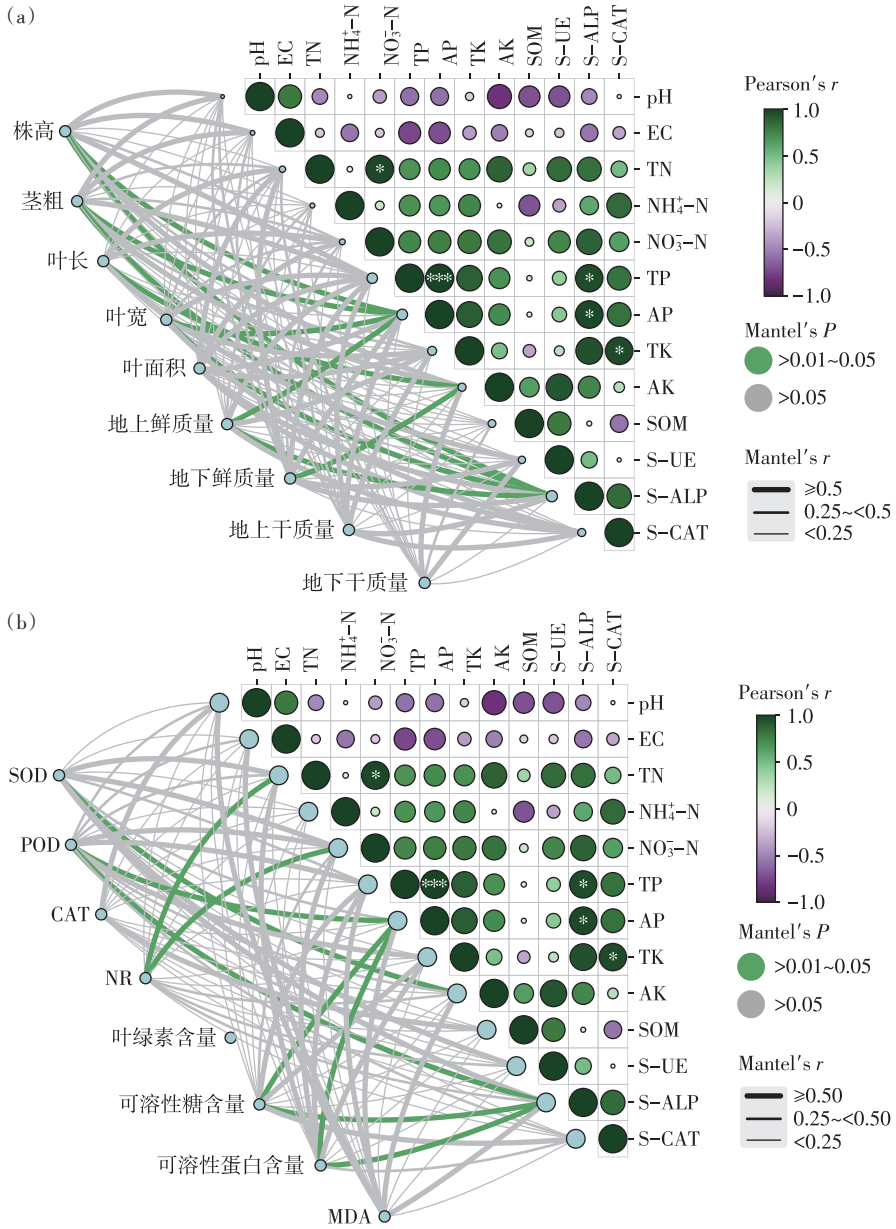
表6 番茄根际土壤理化性质和酶活性

Table 6 Physicochemical properties and enzyme activity of tomato rhizosphere soil

指标 Indicator	CK	B6	Z7	B6+Z7
pH	7.89±0.03a	7.88±0.10a	7.87±0.08a	7.88±0.04a
电导率/（μS·cm^{-1}）	406.67±2.52a	400.67±4.04a	401.33±1.53a	404.00±4.58a
全氮/（g·kg^{-1}）	0.84±0.02a	0.85±0.01a	0.86±0.02a	0.88±0.02a
铵态氮/（mg·kg^{-1}）	8.17±0.02a	8.22±0.04a	8.17±0.05a	8.19±0.02a
硝态氮/（mg·kg^{-1}）	24.33±1.05a	24.66±1.93a	24.74±1.03a	25.37±0.85a
全磷/（g·kg^{-1}）	0.69±0.02b	0.72±0.01a	0.71±0.02ab	0.72±0.01a
速效磷/（mg·kg^{-1}）	26.94±1.19b	29.65±0.55a	28.78±1.81ab	29.79±0.79a
全钾/（g·kg^{-1}）	18.12±0.18a	18.16±0.25a	18.13±0.02a	18.17±0.24a
速效钾/（mg·kg^{-1}）	116.62±2.33a	117.14±3.19a	117.81±1.35a	117.84±2.43a
有机质/（g·kg^{-1}）	35.25±0.77a	35.05±0.72a	35.81±0.24a	35.38±0.85a
脲酶活性/（mg·g^{-1}·d^{-1}）	0.95±0.02a	0.95±0.01a	0.96±0.01a	0.96±0.02a
磷酸酶活性/（mg·g^{-1}·d^{-1}）	0.76±0.02b	0.79±0.01ab	0.78±0.01ab	0.80±0.01a
过氧化氢酶活性/（mL·g^{-1}·h^{-1}）	0.47±0.02a	0.48±0.02a	0.47±0.02a	0.48±0.02a

注：同行数据不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).



EC:电导率;TN:全氮;NH_4^+-N:铵态氮;NO_3^--N:硝态氮;TP:全磷;AP:速效磷;TK:全钾;AK:速效钾;SOM:土壤有机质;S-UE:土壤脲酶;S-ALP:土壤磷酸酶;S-CAT:土壤过氧化氢酶。下同。

EC:Electrical conductivity;TN:Total N;NH_4^+-N:Ammonium nitrogen;NO_3^--N:Nitrate nitrogen;TP:Total P;AP:Available P;TK:Total K;AK:Available K;SOM:Soil organic matter;S-UE:Soil urease;S-ALP:Soil phosphatase;S-CAT:Soil catalase. The same below.

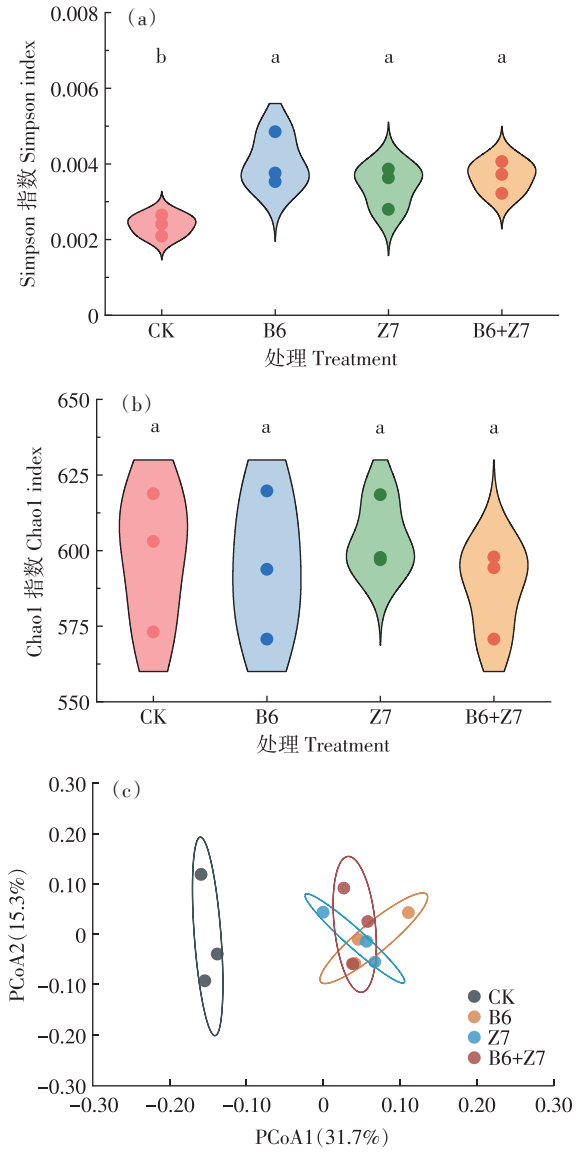
图1 番茄幼苗生长指标和生理指标与土壤特性的相关性网络图

Figure 1 Correlation network diagram of tomato seedling growth index and physiological index with soil properties

B6+Z7组中的相对丰度分别较CK提升了17.00%、20.89%和12.67%。

如图3b所示,溶杆菌属(*Lysobacter*)和硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)在施加菌液后均有增加。溶杆菌属在B6、Z7和B6+Z7组的相对丰度分别提高了55.76%、36.00%和49.12%;硝化螺旋菌属在B6、Z7和B6+Z7组中分别增加了49.19%、40.97%和42.36%。

对土壤根际细菌在门和属水平上的相对丰度前10的优势类群与土壤特性进行了皮尔逊相关性分析(图4)。结果表明:酸杆菌门与全磷(TP)、速效磷(AP)和磷酸酶活性呈显著正相关($P<0.05$);拟杆菌门同样与TP、AP和磷酸酶活性呈显著正相关($P<0.001$);而放线菌门(Actinobacteria)与TP、AP和磷酸酶活性呈显著负相关($P<0.001$)。在属水平的相关性分析中,溶杆菌属与TP和AP呈显著正相关($P<0.001$),硝化螺旋菌属与硝态氮(NO_3^--N)呈显著正相关($P<0.05$),并与TP



不同小写字母代表处理间差异显著(P<0.05)。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments(P<0.05).

图2 根际土壤细菌的Alpha多样性和PCoA分析

Figure 2 Alpha diversity and PCoA analysis of rhizosphere soil bacteria

(P<0.01)和AP(P<0.001)呈显著正相关。

3 讨论

3.1 溶磷菌对番茄幼苗生长指标和生理指标的影响

溶磷菌对植物生长和抗逆性的促进作用显著。吴紫燕等[15]通过盆栽试验发现,溶磷木霉菌Tr940能显著促进番茄幼苗的生长发育和干物质积累,本研究得出相似结论。前期研究表明[9],B6菌株和Z7菌株均具备显著的溶磷能力,在本试验中表现出较好的促生效应。本研究盆栽试验中,番茄株高、茎粗和地上

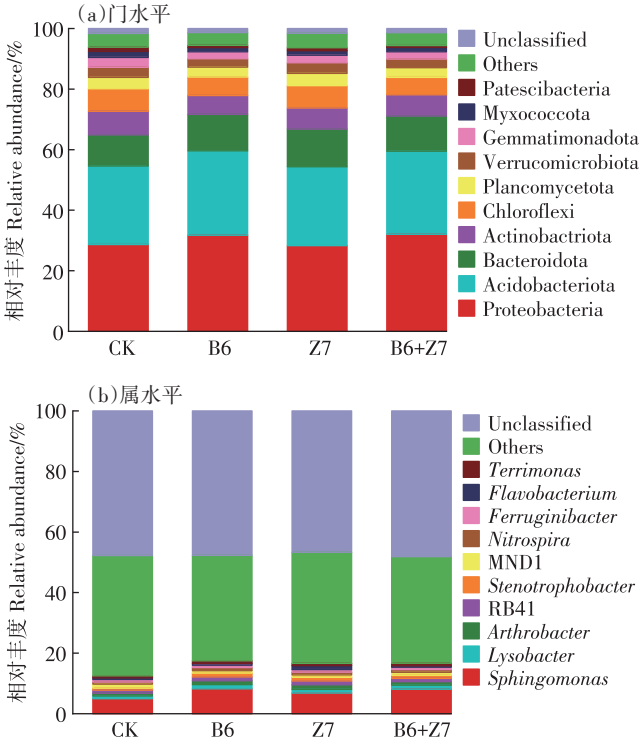


图3 根际土壤细菌门、属水平群落组成

Figure 3 Community composition of rhizosphere soil bacteria phylum and genus at the horizontal level

鲜质量与土壤速效磷含量呈显著正相关(P<0.05),与已有研究结果相符[16]。

Hu等[17]研究发现,施加溶磷菌后,中华松叶片丙二醛含量降低,可溶性糖和蛋白含量提高,抗氧化酶活性增强。本研究显示,施加溶磷菌显著提高番茄叶片的可溶性糖含量和POD活性,降低丙二醛含量,增强细胞生理活性。溶磷菌施用后土壤速效钾含量与番茄叶片SOD活性呈显著正相关(P<0.05),这与刘耀辉等[18]的研究结果类似。

本研究聚焦于番茄幼苗期,探讨溶磷菌对植物早期生长的影响。已有田间试验表明[14],在番茄生长过程中,每30 d测量一次植株生长指标,结果显示,溶磷菌在植株生长初期(0~30 d)对株高和生物量的促进作用较为明显,而在生长后期(60~90 d),其作用主要体现在果实产量和品质的提升。

3.2 溶磷菌对番茄根际土壤特性的影响

溶磷菌可将有机磷转化为无机磷,或将难溶性无机磷溶解为可被植物吸收的磷酸盐[19]。本研究表明,施加溶磷菌显著提高了番茄根际土壤的全磷、速效磷含量和磷酸酶活性,表明溶磷菌提升了土壤肥力,与武燕茹等[20]的研究一致。此外,本研究发现施菌后土

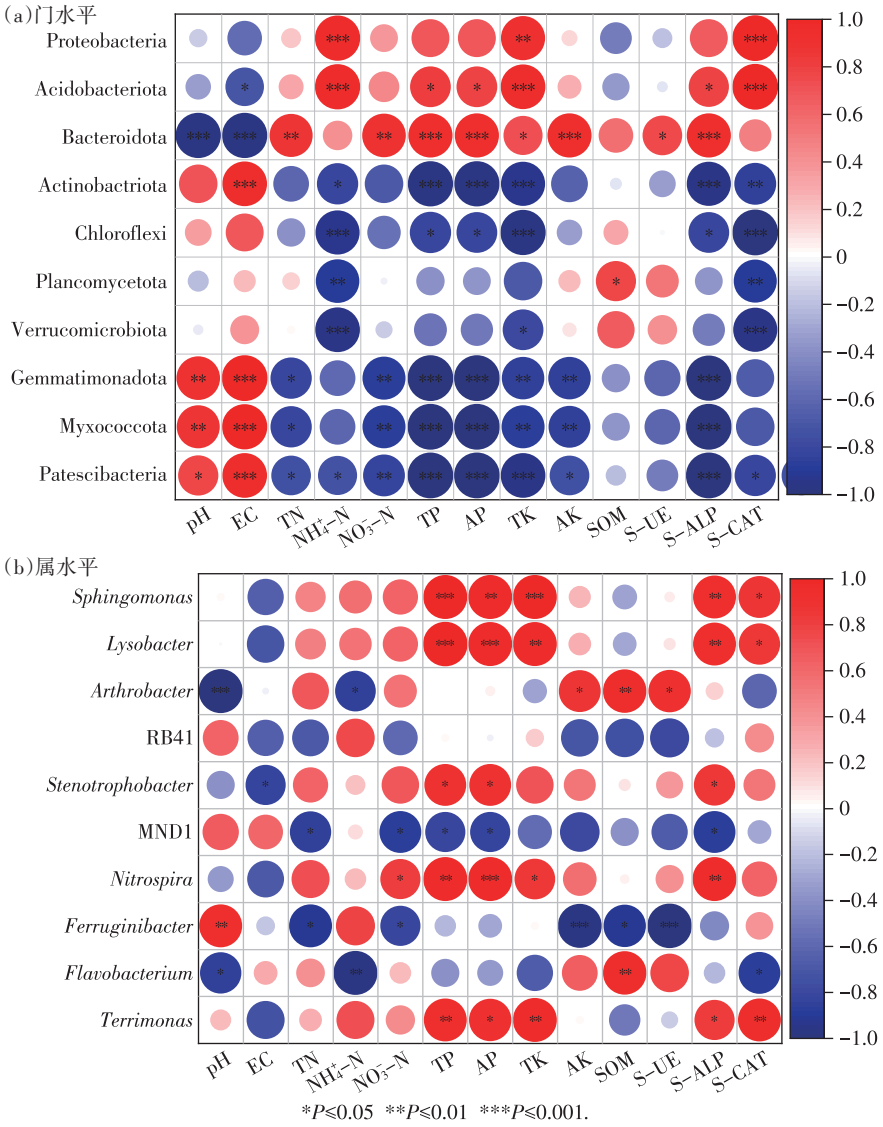


图4 根际土壤细菌门水平和属水平群落与土壤特性的相关性

Figure 4 Correlation between rhizosphere soil bacterial phylum level and genus level community and soil properties

壤总氮含量增加，可能是土壤固氮量超过植物所需氮素[21]；硝态氮含量提高，可能是溶磷菌促进土壤脲酶矿化有机氮[18]，从而提高根际土壤硝态氮含量。

3.3 溶磷菌对番茄根际土壤微生物群落结构的影响

Chao1指数和Simpson指数分析结果表明，施加溶磷菌显著提高了土壤微生物群落的多样性，但对物种丰富度的影响不明显。周妍等[22]研究发现，施用溶磷菌显著提高了绿豆根际变形菌门和酸杆菌门的相对丰度。此外，拟杆菌门与土壤速效磷含量呈正相关[23]，说明拟杆菌门可能在磷循环中发挥着重要作用。

刘耀辉等[18]研究发现，施加溶磷菌显著增加了毛竹根际土壤中硝化螺旋菌属的丰度。Li等[24]的研究表明，溶磷菌促进了小麦生长，并增加了溶杆菌属的丰度。一项田间试验[25]显示，葡萄根际土壤速效磷与硝化螺旋菌属呈正相关，溶磷菌的施加提高了速效磷、铵态氮和硝态氮含量，促进了硝化螺旋菌属的生长[26]。

本研究未设置不同浓度的溶磷菌处理组评估剂量效应，但所选浓度已显著促进番茄生长，符合前期研究[9]。未来可通过设置不同浓度及灭菌土、无菌水对照组，进一步验证溶磷菌的生物学效应。芽孢杆菌和假单胞菌具有较强溶磷能力，已广泛应用于农业生产[27]，后续研究可扩大菌株筛选范围，探讨其实际应用的可行性。

3.4 溶磷菌调控根际微生物群落的机制及其对养分循环和植物健康的影响

溶磷菌通过分泌有机酸、氢离子和酶类物质，将

难溶性磷转化为植物可吸收的可溶性磷[19]，它们能改变土壤理化性质和酶活性，间接影响其他养分的循环，同时调整微生物群落结构，促进养分转化[28]。玉米根际施用溶磷菌后，土壤微生物群落结构显著变化，提高了速效养分含量，改善了土壤肥力[29]。这表明溶磷菌在提高土壤养分循环方面具有重要作用。

溶磷菌不仅提高了土壤中磷的生物有效性，还对植物健康产生了积极影响[30]。溶磷菌可通过调控土壤微生物群落组成，增强植物对病原菌的抵抗力，从而进一步改善植物的健康状况。

结合已有田间试验[14]，*Acinetobacter baumannii* B6（鲍曼不动杆菌）和*Burkholderia cepacia* Z7（伯克霍尔德菌）可有效促进番茄苗生长，增强抗逆性，并提高番茄产量和果实品质，同时改善土壤肥力和微生物群落结构。然而，需要指出的是，这两株菌是潜在致病菌，当前无法直接用于农业生产。但科研环境下对其进行研究仍极具价值，今后研究可借此解析其植物促生长机制，为开发安全的植物有益菌剂和探索其在农业可持续发展中的应用提供理论支撑。

4 结论

（1）施用溶磷菌B6、Z7及其复合菌后，显著改善了番茄幼苗的生长、抗逆性以及根际土壤肥力，但不同菌株的作用存在差异。B6处理在促进幼苗生长和增加干物质积累方面效果更优，Z7处理在降低叶片丙二醛含量方面表现更佳。

（2）B6和Z7处理均能显著提高土壤全磷和速效磷含量以及磷酸酶活性，从而改善土壤肥力。复合菌处理在促进番茄生长、增强抗逆性和改善土壤肥力方面优于单菌处理，表现最佳。此外，施加菌液提高了番茄根际土壤中变形菌门、酸杆菌门和拟杆菌门的相对丰度。在实际生产中可采用复合菌，以最大化促进番茄生长，提高其抗逆性，并改善土壤肥力。

参考文献：

[1] 刘斯晗, 郑旭阳, 钟川, 等. 2种嫁接番茄根系分泌活性物质对番茄青枯病及根际微生物的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(12): 3382-3391. LIU S H, ZHENG X Y, ZHONG C, et al. Effects of active substances secreted from roots of two grafted tomato plants on tomato bacterial wilt and rhizosphere microorganisms[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(12): 3382-3391.

[2] OMONI A O, ALUKO R E. The anti-carcinogenic and anti-atherogenic effects of lycopene: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2005, 16(8): 344-350.

[3] WU L K, LIN X M, LIN W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(3): 298-310.

[4] NIU K Y, LI M Y, LENZEN M, et al. Impacts of global trade on cropland soil-phosphorus depletion and food security[J]. *Nature Sustainability*, 2024, 7: 1128-1140.

[5] 武志海, 孙合美, 杨美英, 等. 水稻根际土壤溶磷菌的分离、鉴定及对水稻的促生作用[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(1): 50-57. WU Z H, SUN H M, YANG M Y, et al. Isolation and identification of phosphate solubilizing bacteria from rice rhizosphere soil, and promoting effect on rice plant growth[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, 38(1): 50-57.

[6] RAWAT P, DAS S, SHANKHDHAR D, et al. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(1): 49-68.

[7] DAS P P, SINGH K R, NAGPURE G, et al. Plant-soil-microbes: a tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices[J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 113821.

[8] GARCÍA-BERUMEN J A, FLORES DE LA TORRE J A, DE LOS SANTOS-VILLALOBOS S, et al. Phosphorus dynamics and sustainable agriculture: the role of microbial solubilization and innovations in nutrient management[J]. *Current Research in Microbial Sciences*, 2025, 8: 100326.

[9] LUO D, SHI J, LI M, et al. Consortium of phosphorus-solubilizing bacteria promotes maize growth and changes the microbial community composition of rhizosphere soil[J]. *Agronomy*, 2024, 14(7): 1535.

[10] 李莹. 不同光质对番茄幼苗生长发育及花青素苷代谢的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022. LI Y. Effects of different light quality on growth and anthocyanin metabolism of tomato seedlings[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022: 7-8.

[11] 鲍瑾, 刘广勤, 俞卫东, 等. 菌肥对长山核桃容器苗生长的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2015, 42(1): 56-59. BAO J, LIU G Q, YU W D, et al. Effects of bacterial fertilizer on the growth of pecanized pecan seedlings[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2015, 42(1): 56-59.

[12] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003. ZHANG Z L, QU W J. The experimental guide for plant physiology[M]. 3th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2003.

[13] 王建华, 刘鸿先, 徐同. 超氧物歧化酶(SOD)在植物逆境和衰老生理中的作用[J]. 植物生理学通讯, 1989, 25(1): 1-7. WANG J H, LIU H X, XU T. The role of superoxide dismutase (SOD) in stress physiology and senescence physiology of plant[J]. *Plant Physiology Communications*, 1989, 25(1): 1-7.

[14] LUO D, HUANG H Z, WANG J H, et al. Inoculations of phosphorus-solubilizing bacteria alter soil properties, microbial communities, and improve crop yield and fruit quality in the tomato production system [J]. *Applied Soil Ecology*, 2025, 207: 105944.

[15] 吴紫燕, 糜芳, 干华磊, 等. 一株具有促生溶磷功能的木霉菌Tr940的筛选及其在番茄上的应用[J]. 生物灾害科学, 2022, 45(2): 156-164. WU Z Y, MI F, GAN H L, et al. Screening of a *Trichoderma*

Tr940 with the function of promoting growth and phosphorus-solubilizing as well as its application in tomatoes[J]. *Biological Disaster Science*, 2022, 45(2):156-164.

[16] VANAMA S, PESARI M, RAJENDRAN G, et al. Correlation of the effect of native bioagents on soil properties and their influence on stem rot disease of rice[J]. *Sustainability*, 2023, 15(15):11768.

[17] HU Z H, WEI S, LI W N, et al. Effect of inoculation with rhizosphere phosphate-solubilizing bacteria on the growth and physiological characteristics of *Parashorea chinensis*[J]. *Forests*, 2024, 15(11):1932.

[18] 刘耀辉, 盛可银, 罗建荣, 等. 溶磷菌混施对土壤微生物群落及毛竹生长的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(2):298-310. LIU Y H, SHENG K Y, LUO J R, et al. Effects of phosphorus solubilizing bacterial compound suspensions on growth of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) and soil microbial community structures[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(2):298-310.

[19] BIELESKI R L, FERGUSON I B. Physiology and metabolism of phosphate and its compounds[M]//Inorganic plant nutrition. Berlin: Springer, 1983:422-449.

[20] 武燕茹, 杨文权, 刘家庆, 等. 1株矮生嵩草根际高效溶磷菌的筛选、鉴定与促生效果研究[J]. 草地学报, 2024:1-12. WU Y R, YANG W Q, LIU J Q, et al. Screening, identification, and growth promoting effect analysis of a highly efficient phosphorus solubilizing bacterium[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024:1-12.

[21] 赵玲玉, 索升州, 赵祺, 等. 梭梭根际促生菌(PGPR)菌肥对番茄产量、品质和土壤特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(3):42-51. ZHAO L Y, SUO S Z, ZHAO Q, et al. Effects of biofertilizers with PGPR strains from rhizosphere of *Haloxylon ammodendron* on fruit yield, quality and soil characteristics of tomato [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2022, 57(3):42-51.

[22] 周妍, 王丽娜, 张美珍, 等. 盐碱土加沙后接种溶磷菌对绿豆根际土壤细菌多样性的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(6):73-81. ZHOU Y, WANG L N, ZHANG M Z, et al. Effects of inoculating phosphorus-solubilizing bacteria on bacterial diversity of mung bean rhizosphere soil mixed with sands in Saline Alkaline Soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(6):73-81.

[23] RAGOT S A, KERTESZ M A, MÉSZÁROS É, et al. Soil *phoD* and *phoX* alkaline phosphatase gene diversity responds to multiple environmental factors[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, 93(1):fiw212.

[24] LI Z, WANG Y, LIU Z, et al. Integrated application of phosphorus-accumulating bacteria and phosphorus-solubilizing bacteria to achieve sustainable phosphorus management in saline soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 885:163971.

[25] WU L N, JIANG Y, ZHAO F Y, et al. Increased organic fertilizer application and reduced chemical fertilizer application affect the soil properties and bacterial communities of grape rhizosphere soil[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):9568.

[26] 刘耀辉, 李新华, 盛可银, 等. 溶磷菌 *Burkholderia* ZP-4 和 *Klebsiella* ZP-2对土壤磷素的转化及细菌多样性的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(2):472-481. LIU Y H, LI X H, SHENG K Y, et al. Effect of phosphate-solubilizing bacteria *Burkholderia* ZP-4 and *Klebsiella* ZP-2 on soil phosphorus fraction and bacterial diversity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(2):472-481.

[27] ALORI E T, GLICK B R, BABALOLA O O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8:971.

[28] YANG L J, YANG K J. Biological function of *Klebsiella variicola* and its effect on the rhizosphere soil of maize seedlings[J]. *PeerJ*, 2020, 8:e9894.

[29] 万水霞, 李帆, 王静, 等. 溶磷菌剂对玉米幼苗生长及根际土壤细菌群落结构和磷素形态的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(2):80-88. WAN S X, LI F, WANG J, et al. Effects of phosphate-solubilizing bacteria on the growth of maize seedling and bacterial community structure and phosphorus fractions in rhizosphere soil[J]. *Soil and fertilizer sciences in China*, 2024(2):80-88.

[30] HUNTER P J, TEAKLE G R, BENDING G D. Root traits and microbial community interactions in relation to phosphorus availability and acquisition, with particular reference to *Brassica*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5:27.

(责任编辑:宋潇)