

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.003

李慧敏, 王瑞, 施卫明, 等. 菜地土壤解磷微生物特征及其在磷形态转化调控中的作用. 土壤, 2020, 52(4): 668–675.

菜地土壤解磷微生物特征及其在磷形态转化调控中的作用^①

李慧敏, 王 瑞, 施卫明, 仲月明, 李奕林*

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要: 目前蔬菜生产存在为追求高产而盲目“高磷投入”的现象, 尽管持续高量的磷肥投入导致菜地土壤磷库储量较之粮田更加丰富, 但土壤中的磷极易被固定形成无效态磷, 导致菜地磷肥当季利用率低以及磷高积累带来的环境风险。而解磷微生物可以利用自身的代谢功能驱动土壤难溶性磷向有效磷的转化, 从而直接影响土壤磷素周转及供磷水平。本文探讨了菜地土壤解磷微生物特征、根际磷素周转及其对蔬菜磷吸收利用的贡献、磷肥及碳源种类对解磷微生物的影响、解磷微生物在菜地面源污染防控中的作用及其今后高效应用研究方向, 旨在为今后提高蔬菜磷肥利用率, 以及充分利用菜地累积态磷, 从而进一步降低环境风险提供参考。

关键词: 解磷微生物; 菜地; 磷肥; 根际; 有机肥

中图分类号: S158.3; Q939.96 **文献标志码:** A

Characteristics of Soil Phosphorus-solubilizing Microorganisms and Their Role in Regulation of Phosphorus Morphological Transformation in Vegetable Fields

LI Huimin, WANG Rui, SHI Weiming, ZHONG Yueming, LI Yilin*

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The phenomenon of blind high-input of phosphorus is still existed at present in vegetable production in the pursuit of high yield. Although sustained high-input of phosphate fertilizer has resulted in soil phosphorus pool in vegetable fields being more abundant than in grain fields, phosphorus in soil is easily fixed to form invalid phosphorus. High input of phosphate fertilizer not only leads to low utilization of fertilizer in season, but also brings great environmental risks by high phosphorus accumulation in the soil. However, phosphorus-solubilizing microorganisms (PSMs) can transform insoluble phosphorus into available one by their own metabolism function, which directly affects the turnover of soil phosphorus and the supply of phosphorus. This paper discussed the characteristics of soil PSMs in vegetable fields, their role in regulating rhizosphere phosphorus turnover and utilization by vegetable, and in preventing and controlling of non-point source pollution, the effects of phosphate fertilizer and carbon source types on PSMs, as well as further research direction of efficient application of PSMs. The aim of this paper is to provide theoretical support for improving the utilization of seasonal phosphate fertilizer and making full use of phosphorus accumulated in vegetable fields in order to further reduce environmental risks.

Key words: Phosphorous-solubilizing microorganism; Vegetable field; Phosphate fertilizer; Rhizosphere; Organic fertilizer

蔬菜产业是我国种植业的重要组成部分, 已经成为我国仅次于粮食作物的第二大农作物。据统计, 我国 2017 年蔬菜播种面积为 1.998×10^7 hm^2 , 产量达到 6.919×10^8 $\text{t}^{[1]}$ 。蔬菜属于养分高需求作物, 因此农民通过大量施用化肥来维持蔬菜高产^[2]。Wang 等^[3]指出与旱作和水稻相比, 我国蔬菜生产系统肥料投入量更高。根据黄绍文等^[4]对全国蔬菜的调查结果显

示, 我国设施和露天蔬菜化肥养分用量平均为 $1\ 092.0$ kg/hm^2 , 是粮食作物化肥养分用量的 3.3 倍, 其中设施蔬菜的氮、磷、钾投入总量分别是各自推荐用量的 1.9 倍、5.4 倍和 1.6 倍, 由此可以看出高投入蔬菜种植体系, 磷肥过量现象更为严重。磷肥施入土壤后很快被钙或铁、铝固定, 导致无法被作物有效地吸收利用, 因此农民常常通过施入大量的磷肥来维持

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200200/08)和国家自然科学基金面上项目(31872957)资助。

* 通讯作者(ylli@issas.ac.cn)

作者简介: 李慧敏(1996—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜根际磷转化与调控研究。E-mail: lihuimina@issas.ac.cn

最佳产量,磷肥的利用率一般只有10%~25%^[5]。长期过量施磷肥导致菜地土壤中磷素大量累积,据统计,露天菜地造成我国每年大约0.33 Tg磷的径流损失,分别是旱地作物及稻田磷径流损失总量的2.75倍及6.6倍。其中果菜系统的磷损失率最高,达到磷肥投入量的13.1%^[3],造成的环境风险远大于粮食作物。因此通过充分利用土壤累积态磷从而降低磷肥投入是减少菜地磷面源污染的有效途径之一。解磷微生物(PSMs)广泛分布于各种类型土壤中,作为土壤生态系统的组成部分,通过分泌有机酸、质子或者释放磷酸酶、植酸酶等,将难溶的磷化合物分解或溶解成为可溶性磷,供植物吸收利用,从而充分利用土壤中累积态磷^[5]。此外PSMs还具有分泌铁载体、植物激素以及抗生素,固氮等功能^[6],所以将PSMs应用在蔬菜生产上,不但可以减少化肥施用量,而且能够促进蔬菜生长、提高它的抗病害能力^[7-8]。

目前研究较多的是PSMs在粮食作物(主要包括水稻、小麦、玉米)上的应用和对它们的生长以及土壤有效磷含量的影响,对于菜地的研究相对较少。但就蔬菜在我国农作物中的重要地位和施磷肥的超量程度来说,研究PSMs对富磷菜地土壤磷形态转化对于高投入体系磷肥减施增效调控具有指导意义。本文综述了菜地土壤解磷微生物特征、根际磷素周转及其对蔬菜磷吸收利用的贡献,磷肥及碳源种类对解磷微生物的影响,解磷微生物在菜地面源污染防控中的作用及其今后高效应用研究方向,旨在深入理解根系-土壤-微生物互作对磷高效利用的影响,同时充分利用土壤累积态磷资源,从而达到磷肥源头减施,并有效阻控磷肥损失,实现蔬菜生产绿色可持续发展。

1 不同农作物种植体系解磷微生物的数量和种类差异

土壤中具有解磷功能的微生物种类繁多,包括细菌、真菌、放线菌和蓝藻^[9],按照微生物解磷底物的不同,通常把PSMs划分为无机磷微生物及有机磷微生物两大类^[10]。PSMs的分布及数量常常受到多种因素的制约,如其生态分布主要受土壤质地、土壤类型以及耕作种植方式等影响,而土壤理化性状、有机质含量和土壤磷浓度则主要影响其数量^[5]。

1.1 旱地和水田差异

我国耕地土壤按照耕作栽培方式主要分为旱地和水田^[11]。旱地与水田在土壤水分含量、氧化还原电位及土壤肥力状况等方面都存在显著差异^[12]。旱地土壤为好氧环境,而水田土壤为低氧或厌氧环境。旱

地中每克土壤平均含有大约 10^7 个PSMs,占微生物总数的27.1%~82.1%^[13]。研究发现,旱地作物玉米的根际土壤中有有机磷微生物的数量比无机磷微生物多,其中有机磷微生物菌属有7个,主要为假单胞菌属(*Pseudomonas*)和黄杆菌属(*Xanthomonas*);无机磷微生物有4个菌属,主要是欧文氏菌属(*Erwinia*)^[14]。根据对4种不同生态系统土壤中PSMs数量及种群分布的研究发现,旱地中有机磷微生物主要是芽孢杆菌属(*Bacillus*),其次是假单胞菌属,而无机磷微生物主要是假单胞菌属^[15]。对于水田的研究主要是水稻根际的PSMs,有研究发现水稻根际分布有很多有机磷微生物和无机磷微生物,其中有机磷微生物的数量高达 $(2.15 \sim 6.68) \times 10^5$ cfu/g、无机磷微生物的数量为 $(0.7 \sim 3.9) \times 10^4$ cfu/g,可以看出有机磷微生物的数量远高于无机磷微生物^[16]。陶涛等^[17]从水稻根际共分离出13株具有溶解无机磷能力的菌株,选取其中4株溶磷能力较强的进行鉴定,其中3株是芽孢杆菌属,1株是土壤单胞菌属(*Agromonas*),可以推断出水稻根际的溶磷优势菌属是芽孢杆菌属。总之,不管是旱地还是水田中都存在数量庞大的PSMs,且有机磷微生物的数量高于无机磷微生物,并且由于水田是厌氧环境,厌氧微生物在其中发挥着重要的作用^[18]。

1.2 旱作粮田和菜地差异

旱地作物主要包括粮食作物及蔬菜等,由于蔬菜的施肥强度及管理方式与粮食作物(主要包括玉米、小麦、花生和大豆等)有较大区别,导致旱作粮田与菜地土壤在pH、电导率、肥力水平等方面存在显著差异^[19],因此两者之间PSMs的数量与种类也会有所不同。根据对旱作粮田和菜地土壤中的PSMs的研究,菜地中无论有机磷微生物还是无机磷微生物都是最多的,分别为 5.9×10^6 cfu/g和 4.7×10^6 cfu/g;而粮田土壤中的PSMs最少,仅为菜地土壤的10%^[15]。菜地土壤中PSMs不仅数量多,而且种类也更为复杂,其中无机磷微生物主要为欧文氏菌属;而有机磷微生物种类较多,如芽孢杆菌属、微球菌属(*Micrococcus*)、沙雷氏菌属(*Ferruginia serratis*)、变形杆菌属(*Proteus*)、假单胞菌属^[20]。粮田土壤中PSMs的种类就相对比较简单,其中80%的有机磷微生物是芽孢杆菌属,其余固氮菌属(*Azotobacter*)和欧文氏菌属占20%,而大约一半的无机磷微生物是沙雷氏菌属(*Serratia*)^[15]。总体来说,菜地的PSMs相比旱作粮田土壤不仅数量多而且优势菌属的类型也更复杂。

1.3 露天菜地和设施菜地差异

目前由于设施蔬菜不受季节的限制,可有效满足

蔬菜市场一年四季的巨大需求量,因此其种植面积不断扩大。温室大棚种植一段时间后形成一个小型的生态系统,在管理措施不断地输入下,设施与露天菜地土壤在物理、化学及生物学方面形成了一定的差异。研究表明,长期露天种植蔬菜后,土壤 pH 下降,有机碳含量减少,氮素、磷素、有效钾和盐分的含量明显增加^[21];而长期种植设施蔬菜,由于连年大量施用有机肥及化肥,土壤全盐量显著升高,有机质含量增加^[22],且由于无法翻耕,导致土壤结构被破坏,造成土壤板结。这些土壤物理及化学性质的改变必然会造成土壤微生物种群数量及结构的变化^[23]。设施蔬菜种植过程中往往会降低土壤微生物功能多样性,一部分微生物种群会因大棚蔬菜长期单一连作而消失,而有些微生物会因缺乏与其竞争的微生物而大量繁殖^[22]。相对于集约化生产的设施蔬菜来说,露天蔬菜的生长速度要慢很多,土壤养分损失较慢,土壤质量也较高,因此土壤微生物功能多样性也相对较强^[23]。对 PSMs 的影响也是类似的,露天菜地 PSMs 的种类比较多,其中有机磷微生物种类丰富,包括芽孢杆菌属、微球菌属、沙雷氏菌属、变形杆菌属、假单胞菌属^[20];无机磷微生物主要为欧文氏菌属。目前对设施蔬菜 PSMs 筛选及鉴定的研究较少,这也是今后要研究的方向之一。

2 解磷微生物的根际效应

2.1 根际与非根际解磷微生物的差异

根际微域是植物根系与土壤以及微生物相互作用的区域,在物理、化学及生物学等方面都不同于主体土壤。植物根系分泌物(如糖类、脂类、氨基酸等)与脱落物(如凋亡的根系和脱落的根毛、根表皮细胞等)是根际微生物重要的营养物质来源。因此根际与非根际土壤相比,不论是微生物数量、种类还是代谢活性都更高^[24-25]。而根际微生物又会反过来通过其活动和代谢,来影响根系分泌物的释放。之前的观点认为根际微生物主要从根际获取糖类,但近两年有学者发现真菌主要从根际获取的是脂类而非糖类^[26-27]。在根际微域中,微生物与植物根系是相互影响的互作关系。因此,根际与非根际土壤中 PSMs 的数量与种类都是具有差异的。根据对小麦根际与非根际 PSMs 分布的研究,发现根际土壤 PSMs 的数量远高于非根际土壤,而且有机磷微生物的数量在根际与非根际土壤中都比无机磷微生物的数量多^[28]。玉米根际土壤有机磷微生物数量与无机磷微生物数量几乎相同,非根际土壤有机磷微生物比无机磷微生物要多 133 倍^[14]。

根际土壤中 PSMs 的种类也比非根际土壤中的丰富,其中根际土壤的有机磷微生物主要为假单胞菌属,而无机磷微生物则为欧文氏菌属和假单胞菌属。这是由于植物根系分泌物更加有利于发酵类细菌的生长繁殖,因此成为优势菌属^[14]。研究发现不同作物根际的 PSMs 的种类是不同的,如洋葱假单胞菌属(*Pseudomonas cepacia*)和埃希氏菌属(*Escherichia*)为小麦根际优势菌属^[29],玉米根际则为欧文氏菌属^[13],而大豆根际主要为假单胞菌属、肠杆菌科(*Enterobacteriaceae*)、不动杆菌(*Acinetobacter pittii* strain)和克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)^[30],水稻根际主要为芽孢杆菌属以及土壤单胞菌属(*Agromonas*)^[17];而非根际土壤中则没有较为明显的优势解磷菌属。总之,根际 PSMs 无论是数量还是种类多样性都远高于非根际。

2.2 解磷微生物对蔬菜根际土壤有效磷的影响

磷肥施入土壤后的周转过程大体分为两种:一种是施入土壤当中的磷肥与钙、铝等元素结合,被铁、铝等氧化物吸附固定或被微生物固持成为无效态磷;另一种是被固定的磷素也可以依靠微生物或根系分泌物的作用而被再次释放出来供植物吸收利用^[31]。PSMs 是土壤磷周转的重要驱动因子,其对有效磷的作用主要有以下两方面:首先 PSMs 能够利用自身的代谢功能,如分泌磷酸酶或植酸酶,对无效态磷素进行活化,其中包括对无机磷化合物的溶解和有机磷化合物的分解^[5]。其次 PSMs 可以通过分泌有机酸或质子,改变土壤的酸碱度、离子组成,以及其他环境因子,进而释放结合在微粒有机质、黏土和土壤颗粒上的磷素^[9]。在对大棚茄子的研究中发现,接种 PSMs 能显著增加茄子根际土壤的有效磷含量,与对照相比增加了 10 mg/kg^[8]。盆栽试验结果表明,番茄生长 30 d 后的根际土壤中有效磷的浓度(80 mg/kg)显著高于未接种 PSMs 的番茄根际土壤有效磷的浓度(30 mg/kg)^[32]。因此,根际 PSMs 可以利用自身的代谢功能驱动土壤难溶性磷向有效磷的转化,从而显著提高蔬菜根际土壤有效磷含量。

2.3 根际解磷微生物对蔬菜磷吸收利用的贡献

磷的移动性较低,蔬菜吸收磷的主要途径是磷向根系的扩散,但是蔬菜根系本身分布就比较浅而且密度低,所以蔬菜根系与土壤磷素之间存在空间不匹配性。并且根区土壤中磷的扩散速率低于根系吸收磷的速率,所以在蔬菜根际微域会形成磷素亏缺区^[33]。因此蔬菜种植体系往往通过投入更多的磷肥才能保持蔬菜持续高产。目前我国推行“化肥零增长”政策,因此我们需要通过一些调控措施在保证蔬菜不减产

的前提下减施磷肥。自从发现了能够活化磷素的微生物,越来越多的PSMs被鉴定和筛选出来,制成微生物肥料来促进作物生长。对在缺磷土壤中生长的茄子接种PSMs,接种30d后,茄子的茎干重和根干重分别显著提高30%和27%,光合速率提高12%^[2]。在实验室条件下,对番茄接种从其根际分离到的PSMs,番茄植株的含磷量显著增加,与对照相比,番茄植株干重平均的含磷量增加了1.56 mg/g,而且接种PSMs的番茄对镰刀枯萎病、早疫病等病害的抗性更强,从而显著降低了总体发病率^[32]。施用PSMs菌肥之后油菜植株中磷浓度与吸磷量与对照相比分别提高了33.9%和58.0%^[34]。对黄瓜同时接种PSMs和根际促生菌,黄瓜的长度,茎和根的干重、鲜重,产量都显著提高^[35]。说明PSMs可以通过一系列的生物及化学反应来促进土壤中的累积态磷转化为蔬菜可利用磷,并且可以使根际土壤中有效磷维持在较高浓度,从而改善蔬菜磷素吸收及利用,最终促进其生长,同时能够提高抗病性^[36]。

3 磷肥种类对菜地解磷微生物的影响

3.1 化学磷肥

目前较为常见的磷肥品种包括磷酸一铵(MAP)、磷酸二铵(DAP)、过磷酸钙、重过磷酸钙、钙镁磷肥以及聚磷酸铵等。磷肥的结构、形态及土壤的物理、化学及生物学性质都会直接影响磷肥的有效性,从而间接影响作物的吸收效果^[37]。目前关于磷肥品种对菜地土壤微生物影响方面的研究相对较少。针对菜地土壤,pH是主要考虑的因素,酸性土壤与碱性土壤应施用不同的磷肥调节土壤pH。酸性菜地土壤应考虑施用碱性磷肥,如DAP或钙镁磷肥;而碱性菜地土壤应施用酸性磷肥,例如MAP或过磷酸钙。土壤pH不仅会影响磷肥肥效,同时还会影响PSMs的数量,大体呈现出碱性土壤多于酸性土壤的趋势,因此针对不同菜地土壤应施用不同品种的磷肥,为PSMs生长创造最适条件从而达到进一步发挥磷肥最大肥效的目的。

3.2 有机肥

目前菜地施用有机肥的种类较丰富,常见的如猪粪、鸡粪、牛粪、商品有机肥、豆饼肥等,施用有机肥除可以有效增加土壤磷含量外,还可以通过改变菜地土壤的理化性质以及通过土壤生物和非生物过程,来促进不同形态磷之间的转化。有机肥的长期施用也会显著增加土壤中细菌、真菌和放线菌的数量,且氨化细菌、固氮菌、硝化细菌、反硝化细菌、PSMs和

纤维分解细菌也明显增加^[38]。研究表明,优势种群为放线菌门(Actinobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、未知的放线菌纲(unidentified Actinobacteria)以及芽孢杆菌纲(Bacilli)^[39]。通过对我国贫瘠旱地红壤施用有机肥(猪粪)的长期定位试验田研究,发现长期施用有机肥可显著提高PSMs数量,并且食细菌线虫通过捕食PSMs增加了碱性磷酸酶的活性,进而提高了红壤中有效磷的含量。这种捕食作用不仅增加了PSMs的数量,也显著改变了PSMs的群落结构^[40]。施用有机肥不仅会对蔬菜生长造成影响,同时也会影响土壤中PSMs的生长和群落生态分布,但是在施用有机肥时要结合蔬菜种类、土壤类型及气候等因素,选择最适的有机肥品种,以达到最佳的增产效果。

4 不同碳源对菜地解磷微生物的影响

据文献报道,设施菜地碳磷比低于相应农田碳磷比^[41],在山东寿光开展的设施菜地磷肥施用现状调研工作中发现,尽管有机肥投入量占总肥料投入量的50%以上,但随着设施蔬菜种植年限的增加,磷素在土壤中大量累积,导致碳磷比失衡。因此高投入体系实际上是一个碳限制性体系。碳为微生物生命活动提供主要能量来源,而微生物在土壤磷的生物化学循环中起着举足轻重的作用,其生命活动将直接影响土壤磷素周转过程。同时土壤微生物量磷也是土壤磷库的重要组成部分之一。外源碳的加入可以增加PSMs的活性,驱动土壤难溶性无机磷或有机磷向有效磷的转化,提高植物磷利用的效率。并且不同形态的碳源对PSMs的影响也是不同的。

4.1 绿肥

在我国绿肥的应用中,常见的品种有豆科的紫云英、豌豆,十字花科的油菜和萝卜,禾本科的黑麦草等。绿肥根系分泌物增加了土壤酶活性,翻压带入的有机物料直接增加了土壤有机质含量,并且提供了多种容易被作物利用的营养和能源物质^[42],但是需要根据不同的气候条件、土壤特性和作物来选择最合适的绿肥品种。研究表明,种植紫云英绿肥能够增加水稻的产量^[43],并提高土壤微生物活性^[44]。种植绿肥可以扩大磷素的吸收空间,这是因为这些绿肥具有比较发达的根系,并且根系分泌物还可以活化土壤中的磷,提高磷肥肥效^[45]。绿肥还会对微生物的功能多样性产生影响,相对对照(冬闲)来说,绿肥及绿肥配施化肥这两种处理对土壤微生物群落结构产生了显著影响,细菌、菌根真菌和放线菌都有不同程度的增加^[46-47],其中优势微生物为变形菌门和绿弯菌门^[42]。

4.2 秸秆

我国南方很多地区采用稻菜轮作种植方式,水稻秸秆作为一种有机碳源投入到菜地土壤中,不仅可以提升土壤质量,同时可增加蔬菜产量^[48]。研究表明,化肥减施配合秸秆还田相比常规施肥不仅可以有效地减少农田中可溶性磷素的径流流失量^[49],而且可以增加作物的产量及吸磷量,提高磷肥利用率^[50]。同时秸秆还田会减少土壤中真菌和嫌气性细菌的数量,增加放线菌和好气性细菌的数量^[51]。并且与秸秆旋耕还田相比,秸秆深翻还田可以显著提高土壤中 PSMs 的多样性^[52]。秸秆的添加改变了原有的农田生态环境,增加土壤中有机碳的含量,促进 PSMs 的繁殖,使得土壤中的更多难溶性磷转化为可溶性磷而被作物吸收利用,从而减少了磷素的流失和淋溶。

4.3 生物质炭

生物质炭由于其具有疏松多孔的特点,可以通过与土壤磷的吸附、解吸过程增加有效磷含量^[53]。生物质炭不仅可以增加土壤有效磷含量,并且还参与土壤中磷的转化过程有关。根据对华南地区菜地土壤添加生物质炭的研究,表明生物质炭可以通过增加土壤中活性磷库的种类,如 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和树脂磷,来减少土壤中磷的损失^[54]。当生物质炭添加到土壤中后,将改变土壤微生物的生存环境,进而影响微生物的数量、活性以及群落结构组成。以往的研究结果表明,生物质炭施入土壤后,能够有效提高 PSMs 的活性,促进中华杆菌科、小单孢菌科等细菌的生长繁殖,但抑制了酸杆菌门细菌的生长,降低其丰度^[55]。生物质炭作为一种碳源添加到土壤中优化了土壤中的碳磷比,促进有效磷含量增加,同时由于其对土壤结构的改变也使其成为一种常用的土壤改良剂。

4.4 糖类

目前对于 PSMs 的筛选和鉴定主要还是通过培养基培养的方法,这时候培养基中的糖类碳源类型就会显著影响 PSMs 的生长和繁殖。根据不同糖类碳源对微生物溶磷能力影响的研究,曲霉 2TCiF2 在蔗糖为碳源时解磷效果最好,而节杆菌 1TCri7 只有在葡萄糖为碳源时才具有解磷能力^[56]。对于同一微生物不同的糖类碳源对其溶磷能力也会产生影响,研究表明,在可溶性淀粉、蔗糖、果糖、乳糖、D-半乳糖、麦芽糖和葡萄糖这些糖类碳源中,以葡萄糖为唯一碳源时解磷菌 K3 的解磷效果最好,而以可溶性淀粉为碳源时 K3 表现出最差的解磷效果^[57]。最近的研究发现丛枝菌根真菌菌丝分泌的果糖不仅是一种碳源,还可以作为信号分子诱发 PSMs 分泌更多的磷酸酶,促

进有机磷矿化过程^[58]。PSMs 处在土壤这一生态环境中,必然会受到其他微生物的影响,而糖类是微生物之间交流的语言(信号分子)。不同的 PSMs 对于不同的糖类反应也不相同,因此我们在筛选和使用解磷菌肥时要结合当地的土壤类型及气候等条件来选择最佳的糖类碳源,从而达到最佳的效果。

5 解磷微生物在菜地农业面源污染防控中的作用

磷肥合理施用可以促进农作物生长,提高产量,但盲目的过量施磷肥将会带来环境风险。菜地施肥造成的农业面源污染问题更为严峻。这是因为菜地施用较多的有机肥,其中大部分是粪肥,研究表明粪肥中含有较多移动性相对较强的活性磷,因此将很大程度上降低其固定作用,进而造成较高的磷素淋溶损失^[59]。不仅是有机肥,菜农还会施用大量化学磷肥^[60],总的磷肥施用量超过蔬菜磷需求量的几倍,导致菜地中积累了大量磷素,这些磷素基本上以植物不可利用的形态存在于土壤中。在菜地高强度灌溉和降雨的影响下,磷素更容易流失^[41],造成水体富营养化。磷素的损失主要分为两种,分别是径流和淋溶损失^[61]。菜地面源污染防控一是要从源头控制,减少磷肥的投入;二是最大限度地利用土壤中的累积态磷素,降低菜地土壤磷库损失风险。研究发现,对空心菜及叶莴苣接种溶磷酸铁细菌,在增产的同时,还能够减施 50% 左右的磷肥^[62]。与粮食作物相比,蔬菜生产系统中磷径流损失相对处于一个更高水平^[3],而 PSMs 由于能够将土壤中蔬菜不能吸收利用的磷转化为有效磷,一方面可以有效降低磷肥投入量从而降低磷素在菜地土壤中不断累积而造成的损失风险,另一方面通过提高蔬菜产量增加地表覆盖度而增加对降雨的缓冲性能,从而有效降低磷径流及淋溶损失。通过削减菜地磷损失,可望有效控制我国农业面源污染对环境的负面影响,进而保障我国蔬菜产业的健康持续发展。

6 展望

PSMs 作为一种普遍存在的自然资源,可以活化磷素,提高磷肥利用效率,值得我们去关注和利用。目前市场上已有很多解磷菌肥,但在实际应用中会出现一些问题,例如增产效果不明显、只能针对单一的植物品种施用等等。今后我们要重点抓住以下几个方面来研究,使 PSMs 更好地应用到蔬菜生产中。

6.1 筛选菜地高效解磷菌株

目前的解磷菌株大部分是直接来自大田作物根际

土壤中筛选出来的,针对性不强,往往对这一种作物适用,但却对其他作物不适用。菜地土壤磷含量远高于粮田土壤,且蔬菜根系分泌物类型不同于水稻、小麦等大田作物,并且蔬菜种类繁多,有根菜类(如萝卜、根用芥菜)、叶菜类(如青菜、白菜)、果菜类(如辣椒、茄子)等,不同类型的蔬菜与 PSMs 之间的相互作用也会有差异,因此最适的高效解磷菌株也会不同。因此可以从不同蔬菜品种根际土壤中筛选出高效的解磷菌株,研制蔬菜专用解磷微生物肥料。

6.2 利用宏基因组技术,探索解磷基因

由于目前实验室能够培养出的微生物只占微生物总数的 0.01%~10%,因此大量的微生物是无法通过纯培养被筛选出来的。宏基因组学的迅速发展解决了这一难题,它是以样品中微生物群体的基因组作为分析对象筛选功能基因,因此该技术可用于研究难培养的微生物。目前我们对于 PSMs 解磷基因的了解少之又少,明确解磷基因可以使 PSMs 在分子尺度方面的研究更加容易开展,因此应用宏基因组技术探索解磷基因将成为今后高效研发 PSMs 肥料的有效手段之一。

6.3 施用高碳有机肥,优化菜地碳磷比

蔬菜相对大田作物来说施用较多的有机肥,且大部分是粪肥,研究发现粪肥中磷的含量较高,其中有机磷含量占总磷的 41.18%,活性磷含量占总磷的 52.30%^[63]。并且由于长期大量的施用高磷低碳的粪肥,加之化学磷肥的不断投入,长此以往必然会导致菜地碳磷比失衡。而碳是 PSMs 生命活动必需的物质,碳磷比失衡势必会影响 PSMs 的活性。因此今后我们可以通过施用高碳有机肥来优化菜地土壤碳磷比,从而使得 PSMs 能够更好地发挥其活化土壤磷素的功能。

参考文献:

- [1] 农业部. 2017 年全国各地蔬菜、瓜果(西瓜、甜瓜、草莓等)、马铃薯播种面积和产量[J]. 中国蔬菜, 2019(11): 22.
- [2] Rizvi A, Khan M S, Ahmad E. Inoculation impact of phosphate-solubilizing microorganisms on growth and development of vegetable crops[J]. Phosphate Solubilizing Microorganisms, 2014, Switzerland: Springer International Publishing.
- [3] Wang R, Min J, Kronzucker H J, et al. N and P runoff losses in China's vegetable production systems: Loss characteristics, impact, and management practices[J]. Science of The Total Environment, 2019, 663: 971-979.
- [4] 黄绍文,唐继伟,李春花,等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1480-1493.
- [5] 滕泽栋,李敏,朱静,等. 解磷微生物对土壤磷资源利用影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 229-235.
- [6] Rodríguez H, Fraga R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion[J]. Biotechnology Advances, 1999, 17(4/5): 319-339.
- [7] Banerjee S, Palit R, Sengupta C, et al. Stress induced phosphate solubilization by arthrobacter sp. and bacillus sp. isolated from tomato rhizosphere[J]. Australian Journal of Crop Science, 2010, 4(6): 378-383.
- [8] 蒋欣梅,夏秀华,于锡宏,等. 微生物解磷菌肥对大棚茄子生长及土壤有效磷利用的影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2012, 39(6): 685-688.
- [9] 林英,司春灿,韩文华,等. 解磷微生物研究进展[J]. 江西农业学报, 2017, 29(2): 99-103.
- [10] 林燕青,吴承祯,洪伟,等. 解磷菌的研究进展[J]. 武夷科学, 2015, 31: 161-169.
- [11] 郝瑞军,李忠佩,车玉萍,等. 水田和旱地土壤有机碳矿化规律及矿化量差异研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1325-1329.
- [12] 陈晓娟,吴小红,刘守龙,等. 不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析:基于 PLFA 和 MicroRespTM 方法[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2375-2382.
- [13] 尹瑞龄. 我国旱地土壤的溶磷微生物[J]. 土壤, 1988, 20(5): 243-246.
- [14] 赵小蓉,林启美,孙焱鑫,等. 玉米根际与非根际解磷细菌的分布特点[J]. 生态学杂志, 2001, 20(6): 62-64.
- [15] 林启美,赵小蓉,孙焱鑫,等. 四种不同生态系统的土壤解磷细菌数量及种群分布[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 34-37.
- [16] 臧威,孙剑秋,王鹏,等. 东北地区四种农作物根际解磷细菌的分布[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1206-1210.
- [17] 陶涛,叶明,刘冬,等. 无机解磷细菌的筛选、鉴定及其溶磷能力研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(2): 304-308.
- [18] 冯有智,林先贵,贾仲君,等. 全球气候变化对水稻土两类功能微生物群的影响[C]//第七次全国土壤生物与生物化学学术研讨会暨第二次全国土壤健康学术研讨会论文集. 武汉, 2014: 10.
- [19] Liang L Z, Zhao X Q, Yi X Y, et al. Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China[J]. Soil Use and Management, 2013, 29(2): 161-168.
- [20] Molla M A Z, Chowdhury A A, Islam A, et al. Microbial mineralization of organic phosphate in soil[J]. Plant and Soil, 1984, 78(3): 393-399.

- [21] 黄新灿, 章明奎. 蔬菜种植模式对涂地土壤性状及蔬菜连作障碍的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(22): 151-157.
- [22] 王辉, 董元华, 李德成, 等. 不同种植年限大棚蔬菜地土壤养分状况研究[J]. 土壤, 2005, 37(4): 460-462.
- [23] 王阳, 王奇赞. 种植年限对大棚蔬菜地土壤微生物群落结构多样性的影响[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(3): 567-576.
- [24] Vazquez P, Holguin G, Puente M E, et al. Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semiarid coastal lagoon[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(5/6): 460-468.
- [25] 于星辰, 刘倩, 李春杰, 等. 根际过程和高底物浓度促进黑土有机磷矿化[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 953-963.
- [26] 刘子雄, 朱天辉, 张建. 林木根系分泌物与根际微生物研究进展[J]. 世界林业研究, 2005, 18(6): 25-31.
- [27] Jiang Y N, Wang W X, Xie Q J, et al. Plants transfer lipids to sustain colonization by mutualistic mycorrhizal and parasitic fungi[J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1172-1175.
- [28] 赵小蓉, 林启美, 孙焱鑫, 等. 小麦根际与非根际解磷细菌的分布[J]. 华北农学报, 2001, 16(1): 111-115.
- [29] Mäder P, Kaiser F, Adholeya A, et al. Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat-rice and wheat-black gram rotations in India[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 609-619.
- [30] Liu Z G, Li Y C, Zhang S A, et al. Characterization of phosphate-solubilizing bacteria isolated from calcareous soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96:217-224.
- [31] 甄兰, 廖文华, 刘建玲. 磷在土壤环境中的迁移及其在水环境中的农业非点源污染研究[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(S1): 55-59.
- [32] Hariprasad P, Niranjana S R. Isolation and characterization of phosphate solubilizing rhizobacteria to improve plant health of tomato[J]. *Plant and Soil*, 2009, 316(1/2): 13-24.
- [33] 王瑞, 施卫明, 李奕林, 等. 增氧提高蔬菜磷素吸收利用的作用机制研究进展[J]. 土壤, 2019, 51(3): 419-424.
- [34] 李娟, 王文丽, 卢秉林. 解磷微生物菌剂对油菜生长及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(3): 67-69.
- [35] Isfahani F M, Besharati H. Effect of biofertilizers on yield and yield components of cucumber[J]. *Journal of Biology and Earth Sciences*, 2012, 2(2): 83-92.
- [36] Zhu J, Li M, Whelan M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 522-537.
- [37] 李青军, 张炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 膜下滴灌棉花对 3 种水溶性磷肥的利用效率和产量响应[J]. 棉花学报, 2018, 30(2): 172-179.
- [38] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1591-1599.
- [39] 王文丽, 李娟, 赵旭. 生物有机肥对连作当归根际土壤细菌群落结构和根腐病的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2813-2821.
- [40] Jiang Y J, Liu M Q, Zhang J B, et al. Nematode grazing promotes bacterial community dynamics in soil at the aggregate level[J]. *The ISME Journal*, 2017, 11(12): 2705.
- [41] 严正娟. 施用粪肥对设施菜田土壤磷素形态与移动性的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [42] 包明, 何红霞, 马小龙, 等. 化学氮肥与绿肥对麦田土壤细菌多样性和功能的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 734-743.
- [43] Bi L D, Zhang B, Liu G R, et al. Long-term effects of organic amendments on the rice yields for double rice cropping systems in subtropical China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4): 534-541.
- [44] Liu M Q, Hu F, Chen X Y, et al. Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: The influence of quantity, type and application time of organic amendments[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(2): 166-175.
- [45] Arcand M M, Lynch D H, Voroney R P, et al. Residues from a buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) green manure crop grown with phosphate rock influence bioavailability of soil phosphorus[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(2): 257-266.
- [46] 侣国涵, 王瑞, 袁家富, 等. 绿肥与化肥配施对植烟土壤微生物群落的影响[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1070-1075.
- [47] 陈晓波, 官会林, 郭云周, 等. 绿肥翻压对烟地红壤微生物及土壤养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(4): 74-78.
- [48] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [49] 王志荣, 梁新强, 隆云鹏, 等. 化肥减量和秸秆还田对油菜地磷素地表径流的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(2): 203-207, 211.
- [50] 王明达, 张婷, 张广才, 等. 不同秸秆还田方式对棕壤磷素及玉米吸磷量的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(2): 112-116.
- [51] 陈冬林, 易镇邪, 周文新, 等. 不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1722-1728.
- [52] 萨如拉, 杨恒山, 高聚林, 等. 短期玉米秸秆还田对土壤细菌多样性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9): 145-149.
- [53] 王湛, 李银坤, 徐志刚, 等. 生物质炭对土壤理化性状及氮素转化影响的研究进展[J]. 土壤, 2019, 51(5): 835-842.

- [54] 王荣萍, 余炜敏, 梁嘉伟, 等. 改性生物炭对菜地土壤磷素形态转化的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 872–876.
- [55] Zhou K, Sui Y Y, Xu X, et al. The effects of biochar addition on phosphorus transfer and water utilization efficiency in a vegetable field in Northeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 210: 324–329.
- [56] 赵小蓉, 林启美, 李保国. C、N 源及 C/N 比对微生物溶磷的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 197–204.
- [57] 虞伟斌, 杨兴明, 沈其荣, 等. 不同碳氮源对解磷菌 K_3 溶磷效果的影响[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(5): 81–85.
- [58] Zhang L, Feng G, Declerck S. Signal beyond nutrient, fructose, exuded by an arbuscular mycorrhizal fungus triggers phytate mineralization by a phosphate solubilizing bacterium[J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(10): 2339.
- [59] Pizzeghello D, Berti A, Nardi S, et al. Phosphorus forms and P-sorption properties in three alkaline soils after long-term mineral and manure applications in north-eastern Italy[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 141(1/2): 58–66.
- [60] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 982–989.
- [61] Wang J, Lü G, Guo X S, et al. Conservation tillage and optimized fertilization reduce winter runoff losses of nitrogen and phosphorus from farmland in the Chaohu Lake region, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1): 93–106.
- [62] 杨秋忠, 赵震庆, 洪美华. 溶磷酸铁细菌之功效及应用[C]//中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 沈阳, 2004: 302–308.
- [63] 严正娟, 陈硕, 王敏锋, 等. 不同动物粪肥的磷素形态特征及有效性分析[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1): 31–39.