

# 高温解磷菌对堆肥所添加难溶性磷素转化的试验研究

魏自民<sup>1,2</sup>, 席北斗<sup>2</sup>, 王世平<sup>3</sup>, 李鸣晓<sup>1</sup>, 赵越<sup>1\*</sup>, 姜永海<sup>2</sup>, 何连生<sup>2</sup>

(1. 东北农业大学生命科学学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国环境科学研究院城市系统工程研究室, 北京 100012; 3. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

**摘要:**为提高堆肥产品中可利用磷素含量, 采用不接种解磷菌剂、不添加磷矿粉处理(CK), 不接种解磷菌剂、添加磷矿粉处理(CP), 接种解无机磷菌剂、添加磷矿粉处理(CMP)3种处理进行了堆肥试验, 并对堆肥不同时期样品中磷组分的动态变化进行分析. 结果表明, 与CK比较, 在堆肥不同时期, CMP、CP处理有机态磷、水溶性磷、速效磷均呈不同程度的增加. 堆肥结束后, CP、CMP处理有机态磷、水溶性磷、速效磷与CK比较的增加值分别为2049.8、4188.6 mg/kg, 264.2、648.7 mg/kg, 954.0、3576.4 mg/kg, 其中CMP处理分别是CP处理的2.04、2.46、3.75倍. 试验结果证明, 采用高温解无机细菌接种, 可明显促进堆肥中添加难溶性磷矿粉的转化效率, 提高堆肥产品中植物可利用磷素含量.

**关键词:** 高温解无机磷菌剂; 堆肥; 磷矿粉; 可利用磷素

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)07-2073-04

## Phosphate Transform of Composting with Pre-mixing Insoluble Phosphate Using High Temperature Dissolved Phosphorus Microbes Inoculation

WEI Zi-min<sup>1,2</sup>, XI Bei-dou<sup>2</sup>, WANG Shi-ping<sup>3</sup>, LI Ming-xiao<sup>1</sup>, ZHAO Yue<sup>1</sup>, JIANG Yong-hai<sup>2</sup>, HE Lian-sheng<sup>2</sup>

(1. College of Life Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Laboratory of Urban Environmental Systems Engineering, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to enhance the available phosphorus (P) of compost production, the experimental design of composting included three treatments was conducted. The treatments were: Control (CK) with no dissolved phosphate microbes inoculation, no rock phosphate mixing; CP with no dissolved phosphate microbes inoculation, rock phosphate mixing; CMP with dissolved phosphate microbes inoculation, rock phosphate mixing. At different composting phases, the samples were taken for the determination of phosphorus forms. Compared to CK, organic P, dissolved P and rapidly available P of CP increase by 2049.8, 264.2, 954.0 mg/kg at final stage of composting, respectively; while that of CMP increase by 4188.6, 648.7, 3576.4 mg/kg, respectively. The increase of organic P, dissolved P and rapidly available P in CMP is 2.04, 2.46, 3.75 times as that of CP, respectively. The results indicated dissolved phosphate microbes inoculation composting with pre-mixing rock phosphate would accelerate transform efficiency of insoluble phosphate, increase the available P of compost production.

**Key words:** high temperature dissolved phosphate microbes; composting; rock phosphate; available phosphorus

在农业种植方面, 磷是植物必需的营养元素之一, 我国有 74% 的耕地土壤缺磷. 而化学磷肥的当季利用率也仅为 10% ~ 25%<sup>[1]</sup>. 目前, 我国农用磷肥主要是磷矿粉经加工而成, 需要大量硫酸, 生产成本较高, 长期施用不仅造成土壤板结, 也会污染环境. 磷矿粉如直接施用于土壤时, 肥效又受许多因素限制<sup>[2]</sup>. 中国的磷资源只占世界磷资源的 1.1%, 按照目前的开采速度, 这些磷矿仅够开采约 25 a. 为缓解我国人口增长对粮食需求的压力, “高投入”的农业生产方式已经成为粮食生产的重要途径, 对磷肥的需求量也就会日益增大, 这与我国有限的磷肥资源缺乏形成尖锐的矛盾. 因此, 如何在我国磷资源有限的情况下研究和总结一套能在农业生产中应用的生物学途径, 以维持土壤的磷素供应水平, 保证农业稳产高产, 是广大科研工作者普遍关心的课题<sup>[3]</sup>. 目

前, 研究者们运用解磷微生物及有机弱酸等手段对难溶性磷的转化开展了大量研究<sup>[4~11]</sup>. 近年来的堆肥试验表明, 在堆肥过程中产生的有机酸类物质<sup>[12]</sup>, 对难溶性磷具有较强的溶解能力<sup>[13~20]</sup>, 但由于堆肥产品中有机酸含量过高对作物的生长发育具有毒害作用, 堆肥产品中低有机酸含量是其腐熟的重要指标之一, 致使堆肥过程对难溶性磷转化效率受到限制. 因此, 为提高堆肥对难溶性无机磷的转化能力, 应将堆肥中解磷的重点放在微生物对磷素的

收稿日期: 2007-07-25; 修订日期: 2007-10-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB724203); 哈尔滨学科后备带头人基金项目(2005AFXXJ043); 国家科技支撑计划项目(2006BAC06B04); 农业科技成果转化基金项目(2006GB24420465)

作者简介: 魏自民(1969~), 男, 博士, 主要研究方向为固体废物处理处置, E-mail: weizm691120@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: yuezhaol\_2005@163.com

转化上.通常微生物解无机磷存在多种机制,多数研究者认为,其转化机制主要靠分泌有机酸溶解难溶性磷,但不同菌株间差异较大.近年来随着对解磷微生物研究的深入,有较多的解磷菌面世,但都是一些常温菌,不适合于堆肥的高温环境.目前,有关高温解无机磷菌的筛选、驯化及在堆肥中的应用研究国内外缺乏相应的报道.本课题组经过长期试验研究,已成功地从自然界样品中筛选、驯化得到若干耐高温解无机磷菌株.本研究采用高温解无机磷微生物接种,探讨其对堆肥中添加难溶性磷矿粉的转化能力,以期为提高生活垃圾堆肥可利用磷素含量,提高磷素利用率的生物学途径提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

- (1)生活垃圾 取自中国环境科学研究院,C:46.79%、N:2.84%、P:0.357% .
- (2)干草 取自中国环境科学研究院,C:58.24%、N:1.69%、P:0.366% .
- (3)磷矿粉 取自贵州,全 P:16.56%、速效磷:3.55%、水溶性磷:0.25% .
- (4)高温解无机磷菌剂 自制,菌种为芽孢杆菌属,主要通过分泌有机酸溶解难溶性磷.适宜温度:20 ~ 55℃,致死温度 70℃ 以上.解磷能力:152.0 mg/kg,接种菌种浓度:1 × 10<sup>9</sup> CFU/mL.

### 1.2 堆肥装置

堆肥装置见图 1.其中反应筒尺寸为:高 400 mm,直径 330 mm,总容积 34 L,出气管直径 6 mm.配有渗滤液收集装置、供气及计量系统、温控系统、出口气体在线检测仪器.

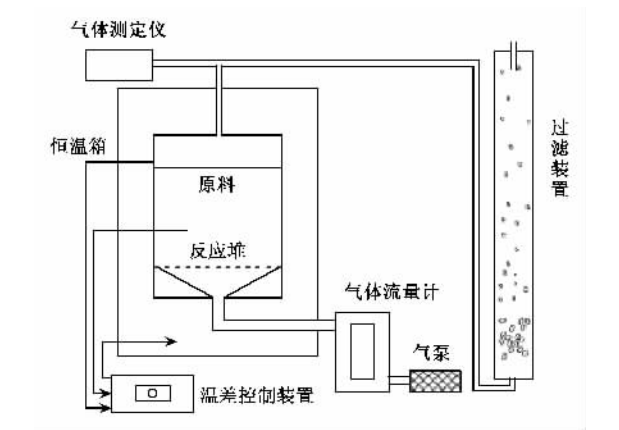


图 1 堆肥装置  
Fig.1 Compost equipment

### 1.3 试验方法

高温解无机磷菌剂接种量体积与堆料干重比为

5:10 (mL/kg),磷矿粉添加质量占堆料干重比为 2.5%.堆肥初期将含水率调节至 60%,供氧量为 0.5 L/(min•kg),堆料以餐厨垃圾为主,采用干草调节堆料 C/N 为 25:1,堆料干重质量为 12 kg.试验设不接种微生物、不添加磷矿粉处理(CK);不接种微生物、添加磷矿粉处理(CP);接种微生物、添加磷矿粉处理(CMP).

### 1.4 样品采集

分别在堆肥的不同时期进行采样,样品质量为 300 g,风干粉碎后,过 1 mm 筛贮存备用.

### 1.5 测定项目与方法

全磷:钼钒黄比色法;有机磷、无机磷的测定:硫酸与氢氧化钠浸提法,钼锑抗比色法;速效磷的测定:柠檬酸浸提,钼钒黄比色法.以上方法均参考文献[21]进行.

## 2 结果与讨论

### 2.1 堆肥过程中全磷变化

在堆肥过程中,各处理全磷含量均呈明显的增加趋势(图 2),这主要是由于堆肥过程中有机物质的分解,同时堆料中的磷素也不易损失引起.由 CP、CMP 处理堆料中混有磷矿粉,因此,堆肥初期,其全磷含量明显高于 CK,其中 CP、CMP 处理之间呈交错状,差异不显著.

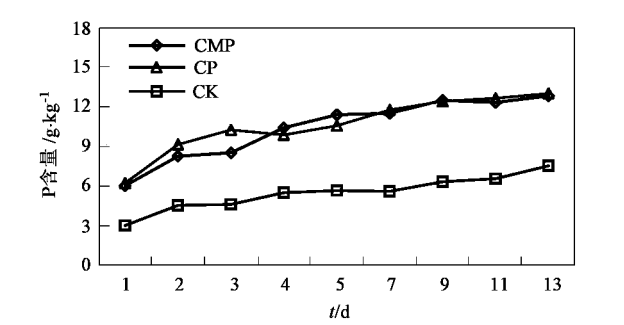


图 2 堆肥过程中全磷变化  
Fig.2 Changes of TP during composting

### 2.2 堆肥过程中有机态磷变化

由图 3 可以看出,虽然堆肥过程中存在有机态磷的矿化,但有机磷总量仍随着堆肥的进行而呈逐渐增高的趋势.其原因在于,一方面堆肥中有机物的分解速率大于有机磷的矿化速率,使有机磷的相对含量升高;另一方面,在堆肥过程中,部分有机磷矿化释放的可溶性磷又被堆料中的微生物生命活动重新利用,合成其有机体的一部分.由于堆肥处理不同,在堆肥过程中,有机态磷增加趋势也明显存在差

别.在堆肥周期内 CMP 处理有机态磷含量均明显高于其它处理,并且有机态磷增加主要集中在堆肥的第 0~9 d. CP、CK 处理有机态磷增加趋势类似,呈先增加(0~4 d)→平稳(4~7 d)→增加(7~9 d)→再稳定.对 CMP、CP 各时期与 CK 处理有机态磷差值比较表明(图 4),随着堆肥过程的进行,有机态磷增加值有提高的趋势,尤其在堆肥的中后期(7~13 d)增加效果更为明显.与 CK 相比,在堆肥 13 d, CMP、CP 处理有机态磷增加值分别为 4 188.6、2 049.8 mg/kg, CMP 增加值是 CP 处理的 2.04 倍.这表明在添加难溶性磷矿粉堆肥中接种高温解无机磷微生物,可明显增加堆肥中有机态磷含量.与无机磷肥比较,堆肥产品中有机态磷培肥土壤后有以下优点<sup>[3]</sup>:首先,有机磷是土壤的磷库,通过磷酸水解酶降解,释放出植物可直接利用的无机磷.其次,有机态磷可以通过在土壤表面形成有机保护膜和与金属离子形成稳定复合体减少磷固定或同时与金属和磷形成复合体,使磷以一种特殊有机形态存在,提高了磷的活性.因此,通过接种微生物技术,实现堆肥对难溶性磷的转化,生产富含有机磷的堆肥产品,对改善土壤肥力、提高磷素利用及降低农业面源污染等方面均具有较好应用前景.

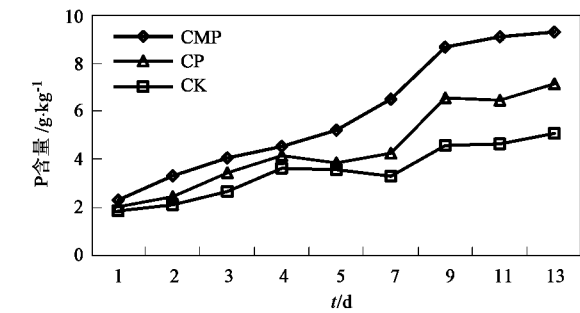


图 3 堆肥过程中有机态磷含量变化

Fig.3 Changes of organic phosphorus during composting

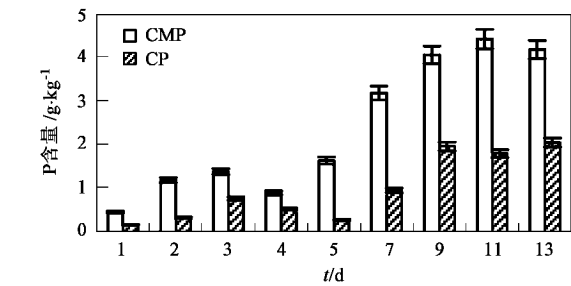


图 4 堆肥过程中有机磷增加量比较

Fig.4 Increase of organic phosphorus during composting

2.3 堆肥过程中水溶性磷变化

由图 5 可以看出,堆肥过程中水溶性磷含量呈先降低(CMP、CP, 0~5 d; CK, 0~4 d),而后呈逐渐增加的趋势.这是由于堆肥初期,微生物大量繁殖,在其代谢过程中要消耗一定数量的磷素,因此,致使堆料中的水溶性磷素含量明显降低;而在堆肥的中后期,微生物的代谢旺期结束,对水溶性磷需求降低,同时部分微生物开始死亡,其有机体发生矿化,造成堆料中的水溶性磷素含量呈明显增加的趋势.在堆肥过程中 CMP、CP 处理在堆肥的各阶段水溶性磷含量均明显高于 CK,同时 CMP 处理又明显高于 CP 处理.在堆肥的 13 d,与 CK 处理比较, CMP、CP 水溶性磷增加值分别为 648.7、264.2 mg/kg, CMP 水溶性增加值是 CP 处理的 2.46 倍.与 CP 处理比较, CMP 处理水溶性磷增加值是接种解磷微生物菌剂直接作用的结果,在某种程度上,也表明解磷微生物对溶性磷的转化效果.在土壤中,水溶性磷是植物直接可以吸收利用的磷组分,因此,相对较高的水溶性磷含量的堆肥产品施入土壤后,可以立即发挥其肥效,克服了常规堆肥产品养分释放缓慢的缺陷.

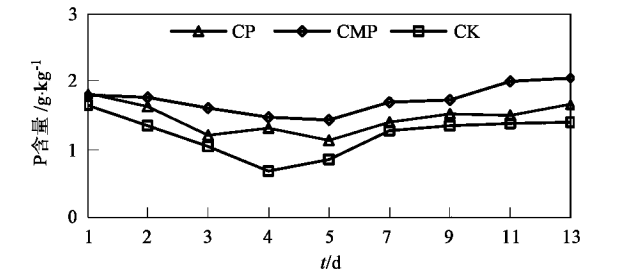


图 5 堆肥过程中水溶性磷含量变化

Fig.5 Profile of dissolved phosphorus during composting

2.4 堆肥过程速效磷变化

生活垃圾堆肥过程中,速效磷含量呈明显的增加趋势(图 6),其中 CK 处理在堆肥的不同时期内,上升幅度比较平稳,而 CP、CMP 处理在分别在堆肥的 0~7 d、0~4 d 上升幅度较小,而后增加幅度加大.在堆肥周期内,加入难溶性磷矿粉堆肥 CMP、CP 处理速效磷含量明显高于不加磷矿粉处理方式(CK),同时接种耐高温解无机磷微生物处理明显高于不接种 CP 处理.堆肥结束后(13 d),CMP、CP 处理速率磷含量分别是 CK 处理的 1.77、1.37 倍.为了更加准确地计算接种解磷微生物对难溶性磷的转化状况,需将加入磷矿粉含有的速率磷对堆肥的贡献率给予扣除.在堆肥初期,加入堆肥中的磷矿粉速效磷含量为 3.5%,因此在堆肥初期就可以使生活垃圾中 CMP、CP 处理速效磷含量明显高于 CK.经计算,

堆肥开始时, CP、CMP 处理方式磷矿粉中速效磷对堆肥处理初期的贡献率分别为0.087 5%(堆肥初始干物料质量为 12 kg). 堆肥后, 由于有机物质的分解, 堆料质量约为堆肥初期的 60%, 即 7.2 kg, CP、CMP 处理磷矿粉中速效磷对堆肥后期的贡献率分别为 0.146%. 因此, 扣除堆肥后期磷矿粉对堆肥处理中速效磷的贡献率, 在堆肥第 13 d, CMP、CP 处理与 CK 相比, 速效磷含量依次增加: 3 576.4、954.0 mg/kg, 其中 CMP 处理速效磷的增加量是 CP 处理的 3.75 倍.

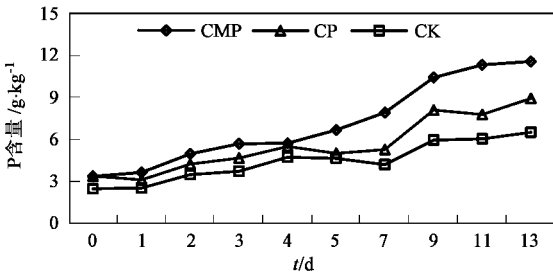


图 6 堆肥过程中速效性磷含量变化

Fig.6 Profile of rapidly available phosphorus during composting

### 3 结论

(1)与 CK 处理比较, 堆肥不同时期, CMP、CP 处理有机态磷、水溶性磷、速效磷均呈不同程度的增加, 并且 CMP 处理优于 CP 处理.

(2)堆肥结束后, 与 CK 处理比较, CMP 处理有机态磷、水溶性磷、速效磷的增加值分别是 CP 处理的 2.04、2.46、3.75 倍.

(3)试验结果表明, 采用高温解无机细菌接种, 可明显促进堆肥中添加难溶性磷矿粉的转化效率, 提高堆肥产品中速效磷及易降解有机态磷含量.

#### 参考文献:

[1] 赵小蓉, 林启美. 微生物解磷的研究进展[J]. 土壤肥料, 2001, 3: 7-11.

[2] 钟传青, 黄为一. 提高磷矿粉肥效的生物学途径[J]. 化肥工业, 2002, 29(2): 15-17.

[3] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 47-55.

[4] Fox T R, Comerford N B. Low-molecular weight organic acids in selected forest soils of the southeastern USW[J]. Soil Sci Soc Am J,

1990, 54: 1139-1144.

[5] Strobel B W. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution - A review[J]. Geoderma, 2001, 99: 169-198.

[6] 陆文龙, 曹一平, 张福锁. 低分子量有机酸对不同磷酸盐的活化作用[J]. 华北农学报 2001, 16(1): 99-104.

[7] 陆海明, 盛海君, 毛健, 等. 有机酸根阴离子对土壤无机磷生物有效性的影响[J]. 扬州大学学报, 2003, 24(2): 49-53.

[8] 赵小蓉, 林启美, 李保国. 溶磷菌对 4 种难溶性磷酸盐溶解能力的初步研究[J]. 微生物学报, 2002, 42(2): 236-241.

[9] Rodriguez H, Fraga R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion[J]. Biotechnol Adv, 1999, 17: 319-339.

[10] Whitelaw M A. Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi[J]. Adv Agron, 2000, 69: 99-151.

[11] Vassilev N, Vassileva M, Fenice M, et al. Immobilized cell technology applied in solubilization of insoluble inorganic (rock) phosphates and P plant acquisition[J]. Bioresour Technol, 2001, 79: 263-271.

[12] 魏自民, 席北斗, 赵越, 等. 城市生活垃圾外源微生物堆肥对有机酸变化及堆肥腐熟度的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 376-380.

[13] Makela M, Galkin S, Hatakka A, et al. Production of organic acids and oxalate decarboxylase in lignin-degrading white-rot fungi[J]. Enzyme Microb Technol, 2002, 30: 542-549.

[14] Roukas T. Citric acid production from carob pod by solid state fermentation[J]. Enzyme Microb Technol, 1998, 24: 54-59.

[15] Singh C P, Amberger A. Organic acids and phosphorus solubilization in straw composted with rock phosphate[J]. Bioresour Technol, 1998, 63: 13-16.

[16] Van der Berghe L, Soccol C R, Pandey A, et al. Solid-state fermentation for the synthesis of citric acid by aspergillus niger[J]. Bioresour Technol, 2000, 74: 175-178.

[17] 魏自民, 王世平, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥对难溶性磷有效性的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 679-683.

[18] Singh C P, Amberger A. Solubilization and availability of P during decomposition of rock phosphate enriched straw and urine[J]. Biol Agric Hortic, 1991, 7: 261-269.

[19] Singh C P, Amberger A. The effect of rock phosphate enriched compost on the yield and phosphorus nutrition of rye grass[J]. Am J Altern Agric, 1995, 10: 82-87.

[20] Biswas D R, Narayanasamy G. Mobilization of phosphorus from rock phosphate through composting using crop residue[J]. Fert News, 2002, 47: 53-56.

[21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 166-186.