

生活垃圾堆肥对难溶性磷有效性的影响

魏自民^{1,2}, 王世平³, 席北斗², 赵越^{1*}, 刘鸿亮²

(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固体所, 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:生活垃圾在堆肥过程中将产生有机酸类物质, 这些酸性物质对难溶性磷具有较强的溶解能力. 本研究在生活垃圾堆肥过程中, 加入难溶性磷矿粉, 系统探讨堆肥对难溶性磷的转化及堆肥产品对磷素有效性的影响. 研究表明, 速效磷在堆肥中后期达到最大值, 并在堆肥的后期相对稳定, 堆肥结束后, 扣除磷矿粉本身含有的速效磷对堆肥的影响, 与不加磷矿粉堆肥相比, P_1 、 P_2 堆肥处理方式速效磷含量增加值分别为 $0.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 电镜观察表明, 堆肥结束后, 磷矿粉表面棱角消失, 呈蜂窝状. 堆肥产品培肥后, 富磷垃圾肥在作物生育期内, 土壤速效磷含量、酸性磷酸酶活性均高于垃圾肥、腐熟鸡粪及化肥.

关键词:生活垃圾; 堆肥; 难溶性磷; 磷素有效性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)03-0679-05

Effect of Municipal Solid Waste Composting on Availability of Insoluble Phosphate

WEI Zi-min^{1,2}, WANG Shi-ping³, XI Bei-dou², ZHAO Yue¹, LIU Hong-liang²

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

Abstract: During municipal solid waste (MSW) composting, both organic acid production and sparingly soluble inorganic phosphate solubilization occur simultaneously. In this study, compost consisted of residual MSW with metal, plastic and glass removed, and sparingly soluble phosphate (ground rock phosphate) was mixed in municipal solid wastes composting. The effects of composting on solubilization of sparingly soluble phosphate as well as the effects of compost production (P-enriched MSW compost) on soil rapidly available phosphorus were studied. Mixing ground rock phosphate into composting, rapidly available phosphorus increase at initial stage, achieved maximum at medium stage, and stabilize at final stage of MSW composting. At final stage of composting, the content of rapidly available phosphorus in treatment P_1 and P_2 increase respectively by $0.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ compared with that with no mixing ground rock phosphate. Scanning electron microscopy (SEM) reveals a number of cavities in ground rock phosphate surface. After compost products amended soil, the content of soil rapidly available phosphorus and acid phosphatase activity of P-enriched MSW compost amendment increase obviously compared with MSW compost, chicken manure compost, and chemical fertilizer amendment during crop duration.

Key words: municipal solid waste; composting; insoluble phosphate; rapidly 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%^[1]. 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^[2]. 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问题^[3]. 目前, 研究者们运用解磷微生物及有机弱酸等手段对土壤中难溶性磷的转化开展了大量的研究^[4~8], 同时也进行了施用有机肥料产生的有机酸对土壤固定态磷活化的相应报道^[9]. 研究证实, 小分子有机酸类物质(柠檬酸、琥珀酸、苹果酸、酒石酸等)对难溶性磷具有较强的溶解转化能力. 由于城市生活垃圾(municipal solid waste, MSW)堆肥的实质是有机物质

收稿日期: 2006-04-21; 修订日期: 2006-06-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB724203); 哈尔滨市学科后备带头人基金项目(2005AFXXJ043); 东北农业大学博士基金项目

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

* 通讯联系人, E-mail: yuezhaol_2005@163.com

在微生物的作用下进行降解的过程,在堆肥过程中将会产生有机酸类物质^[10-13].其中厌氧堆肥产生的有机酸以乙酸为主,而好氧堆肥则以柠檬酸、苹果酸、琥珀酸、酒石酸为主,但也含有一定数量的乙酸.同时生活垃圾是微生物活动的极佳场所,其中也含有一定数量的解无机磷细菌^[14].因此,探讨堆肥对难溶性磷的转化能力,一方面为部分堆肥产品替代化学磷肥,减少磷肥的生产成本提供研究依据;另一方面,可为解决生活垃圾堆肥资源化产品中植物可利用磷含量偏低的难题,开拓一条生物学途径.基于此,本研究在生活垃圾堆肥过程中,加入磷矿粉,探讨堆肥对难溶性磷的转化能力,并通过生产富磷垃圾肥(P-enriched MSW compost)培肥土壤,探讨堆肥中磷素在土壤中有效性,为提高生活垃圾堆肥可利用磷素含量,减少土壤中磷素的固定,提高磷素利用率提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 城市生活垃圾堆肥材料与试验设计

城市生活垃圾:选用大庆市实际城市生活垃圾.堆肥前将塑料、金属、玻璃、纸张等可回收利用的物质进行分选后,剩余的可降解的有机物质,C:323.82 g/kg、N:13.88 g/kg、P₂O₅:10.02 g/kg、水分:53.56%.

磷矿粉:贵州开阳磷矿粉,粒径<0.25 mm,P₂O₅:28.27%(质量分数),速效磷1.02%(质量分数).

试验于2003-03~2003-06在大庆美商垃圾肥厂内进行了不加磷矿粉堆肥处理(P₀)、加入5%磷矿粉(磷矿粉的加入量为占生活垃圾干重质量分数,以下同)的堆肥处理(P₁)和加入10%磷矿粉的堆肥处理(P₂)3种处理方式的研究,每次试验是将生活垃圾5 kg,拌入磷矿粉,装入透气尼龙网袋,埋在堆长150 m,宽4.5 m,高2.2 m的堆肥厂垃圾发酵条形堆

中部.堆肥采用二次发酵,通风速率为0.11 m³·(min·m³)⁻¹,一次发酵水分控制在60%左右,大于55℃不少于5 d,最高温度不超过75℃,由于一次堆肥过程中,堆体水分含量较高,局部存在厌氧发酵.二次发酵初期水分控制在55%,后期控制在30%左右.每周翻堆1次,堆肥周期为63 d.在翻堆过程中将尼龙网袋取出通风、透气,并采用四分法取各处理样品,样品总量为500 g,样品风干粉碎后,过1 mm筛贮存备用.

由于混在堆肥中的磷矿粉难以分离,为了观察堆肥对磷矿粉的溶解效果,另取几份磷矿粉50 g(0.25 mm<粒径<0.5 mm),分别放入尼龙网袋(孔径为0.25 mm)中,摊成薄层,埋在条形发酵堆中部,堆肥结束后取出供城市生活垃圾堆肥对磷矿粉溶解能力扫描电镜观察,作定性分析.

1.2 堆肥产品试验设计

主栽品种:作物品种为大豆,品种名称为东农43.

供试无机肥料:尿素(N:46%)、磷矿粉(P₂O₅:28.27%)、硫酸钾(K₂O:50%).

供试有机肥料:腐熟鸡粪,N:1.35%、P₂O₅:0.75%、K₂O:1.05%;垃圾肥(堆肥过程中不加磷矿粉的堆肥产品):N:1.12%、P₂O₅:0.70%、K₂O:0.92%;富磷垃圾肥(堆肥过程中加入5%磷矿粉的堆肥产品):N:1.12%、P₂O₅:3.01%、K₂O:0.92%.

试验于2004-05在东北农业大学试验地内进行了分别使用化肥、垃圾肥、富磷垃圾肥及腐熟鸡粪4种处理方式的研究,每种处理方式重复3次.各处理方式纯N、纯P₂O₅、纯K₂O施用量相同,分别为纯N:60 kg·hm⁻²、纯P₂O₅:90 kg·hm⁻²、纯K₂O:45 kg·hm⁻².使用有机肥各处理方式中有机肥的施用量为3 000 kg·hm⁻²,其纯N、P、K施入量不足部分采用化肥补充,经计算各处理方式肥料施用量见表1.

表1 各处理方式肥料施用量/kg·hm⁻²
Table 1 Fertilizer quantity in different treatments/kg·hm⁻²

处理方式	尿素	磷矿粉	硫酸钾	普通垃圾肥	富磷垃圾肥	鸡粪
化肥	130.4	318.4	90.0	—	—	—
垃圾肥	57.4	244.1	34.8	3 000.0	—	—
富磷垃圾肥	57.4	—	34.8	—	3 000.0	—
鸡粪	42.4	238.8	15.0	—	—	3 000.0

试验采用盆栽,每盆装土15 kg.在大豆生育期内取各处理土壤样品测定土壤速效磷及磷酸酶活性变化.

1.3 测定方法

全磷:H₂SO₄-HClO₄消化,钼钼黄比色法;堆肥速效磷的测定:碱性柠檬酸浸提,钼钼黄比色法;土壤速效磷:Olsen法;以上分析方法见文献[15].

城市生活垃圾堆肥对磷矿粉溶解能力的电镜观

察:取自然状态粉碎过 0.25 mm 筛的磷矿粉与经过城市生活垃圾堆肥处理的磷矿粉,置于样品平台,进行离子溅射镀膜导电处理.扫描电镜观察磷矿粉的变化情况.所用仪器为扫描电子显微镜 KYKY-1000B 型,放大倍数:1 000 倍.

2 结果与讨论

2.1 城市生活垃圾堆肥过程中速效磷含量变化

城市生活垃圾堆肥过程中,速效磷含量在 0~14 d 变化幅度不大,并在第 7 d 内出现一定程度的降低,在 14~42 d 呈明显的上升趋势,而在 42~63 d 则保持相对稳定(图 1).这是由于在堆肥初期,城市生活垃圾中有机酸含量较少^[16],溶解磷的能力有限,而微生物的大量繁殖要消耗垃圾中固有的速效磷,将这些磷素固定在生物体内而导致速效磷含量下降(第 7 d),随着堆肥的进行,微生物数量增多,活性增强,使一些简单的有机物质发生降解,释放出有机酸类物质,同时微生物的生命活动也能分泌有机酸物质,使城市生活垃圾中有机酸的数量明显增加^[16],加速了对外源无机磷的溶解.在堆肥的腐熟时期,由于低分子量有机酸类物质含量明显减少,并且一部分被溶解的磷素可能重新被固定,导致有效磷含量的减少,但由于在堆肥的腐熟时期,微生物大量死亡,将固定在生物体内的磷素重新释放出来,在一定程度上提高堆肥中有效磷的含量,因此在堆肥的腐熟时期,有效磷含量的变化范围不大.

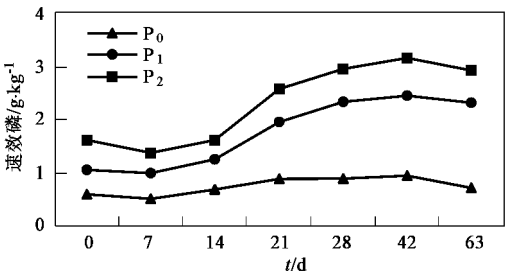


图 1 城市生活垃圾堆肥有效磷变化

Fig.1 Content of aviliable phosphate in the MSW compso

在堆肥周期内,加入难溶性磷堆肥的处理方式使速效磷含量明显高于不加磷矿粉处理方式(P₀),但不同磷素水平,生活垃圾堆肥过程速效磷的含量明显不同,这是由于加入堆肥中的磷矿粉本身含有一定的速效磷(1.02%),在堆肥初期就可以使城市生活垃圾中速效磷含量有明显的提高,并且加入磷素越多,速效磷含量越大.经计算,堆肥开始时,P₁、

P₂ 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 0.51 g·kg⁻¹、1.02 g·kg⁻¹.堆肥后,由于有机物质的分解,堆料质量约为堆肥初期的 70% (3.5 kg),P₁、P₂ 处理方式磷矿粉中速效磷对堆肥处理后期的贡献率分别为 0.73 g·kg⁻¹、1.45 g·kg⁻¹.因此,扣除堆肥后期磷矿粉对堆肥处理中速效磷的贡献率,堆肥后期处理方式 P₁、P₂ 与不加磷矿粉处理方式(P₀)相比,速效磷含量依次增加:0.87 g·kg⁻¹、0.76 g·kg⁻¹,统计分析表明,处理方式 P₁ 与 P₂ 之间速效磷增加量差异不显著,表明城市生活垃圾堆肥对溶性磷的转化存在一定的限度,并不随着难溶性磷加入量的增加而提高.

2.2 城市生活垃圾堆肥对磷矿粉溶解能力的电镜观察

图 2(a)为自然状态磷矿粉电镜观察图片,图 2(b)为深埋于城市生活垃圾堆肥条型发酵堆中,堆肥腐熟后取出的磷矿粉电镜观察图片.由图 2 可以看出,自然状态下的磷矿粉表面呈较为明显的棱角状,为典型的矿物状态,磷矿粉的碎小颗粒较多;而经过城市生活垃圾堆肥对其溶解后,表面棱角消失,呈现明显的蜂窝状.可见,城市生活垃圾堆肥过程中对难溶性磷矿粉具有较强的溶解能力.其溶磷机制,主要

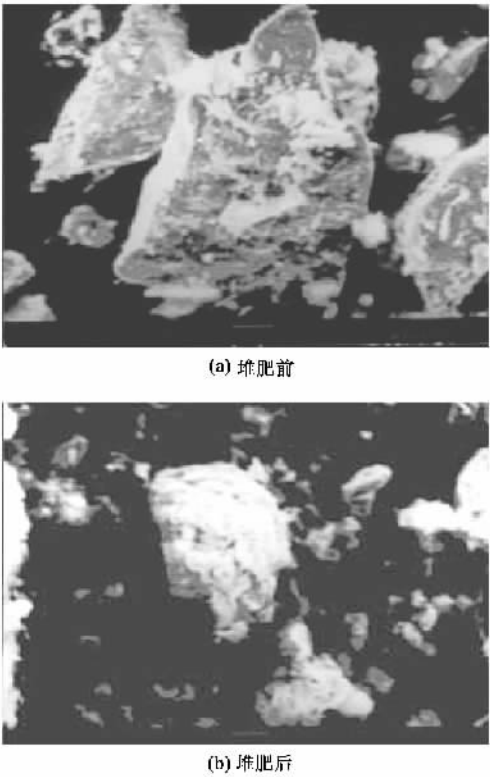


图 2 磷矿粉电镜图片(×1 000)

Fig.2 SEM picture of ground phosphate rock

表现在 2 个方面：一方面城市生活堆肥过程中要产生大量的微生物，其中含有较多的解磷菌属^[14]。另一方面在城市生活垃圾堆肥过程中，随着有机物质的分解，产生有机酸类物质，其中小分子的有机酸（乙酸、柠檬酸、琥珀酸、苹果酸等）与大分子的腐殖酸对难溶性无机磷有较强的溶解转化能力^[3]。

2.3 生活垃圾堆肥对土壤速效磷的影响

由表 2 可以看出，富磷垃圾肥施入土壤后，其速效磷的含量明显高于其它处理方式，而城市垃圾肥、鸡粪处理方式的速效磷含量与化肥处理方式相比，也有一定程度的提高，对各生育期进行多重比较表明，施用富磷垃圾肥与其它处理方式比较，土壤速效磷含量均达极显著水平，其中分别施用垃圾肥、鸡粪处理方式与施用化肥比较，土壤速效磷含量也达极显著水平，并且鸡粪处理对提高土壤速效磷的效果稍优于城市生活垃圾肥。在作物整个生育期内，土壤速效磷的含量呈下降的趋势，这是由于一方面土壤本身对磷素的固定，另一方面是作物对生长发育对磷素的需求。特别是在生育前期，土壤速效磷下降的速度最大。在收获期后，土壤速效磷基本趋于稳定。

以上分析结果表明，施入有机肥可以明显提高土壤中有效磷的含量，而在城市生活垃圾堆肥过程中，加入难溶性无机磷素（磷矿粉），生产富磷垃圾肥，培肥后可明显提高土壤中磷素的利用率，避免磷资源的浪费。

表 2 生活垃圾有机肥对土壤速效磷的影响¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Effect of MSW organic fertilizer on available phosphate in soil /mg·kg⁻¹

处理方式	取样日期				
	06-15	07-15	08-15	09-15	10-15
化肥	53.48D	51.18D	24.25D	17.23C	16.38D
垃圾肥	62.16C	57.88BC	27.21BC	18.56B	18.10B
富磷垃圾肥	98.34A	84.64A	43.01A	29.18A	29.66A
鸡粪	64.57B	58.88B	27.85B	18.68B	18.04BC

1) 不同字母表示差异达 1% 显著水平

2.4 生活垃圾堆肥对土壤磷酸酶活性的影响

土壤磷酸酶是土壤中普遍存在的 1 种水解酶类，其活性在很大程度上取决于土壤中腐殖质的含量、有效磷的含量、能分解有机磷化合物的微生物数量和植物的种类等因素。土壤磷酸酶活性可以表征土壤的肥力状况，特别是磷素状况，不同土壤类型，其磷酸酶活性强弱的种类也不同。图 3 为生活垃圾堆肥培肥后土壤磷酸酶活性在作物生育期内的动态变化。其中磷酸酶的活性(U: phenol, mg·g⁻¹)在生育

初期呈迅速上升的趋势，而在种植 60 ~ 80 d 磷酸酶活性达到最高峰值，在生育后期呈现缓慢下降的态势。不同处理方式磷酸酶活性由大到小分别为富磷垃圾肥、鸡粪、垃圾肥、化肥，这主要是由于有机肥的施入，可矿化的有机态磷增加，从而提高了土壤中可供作物生长所需要磷素的有效性。由于富磷垃圾肥由于在其生产过程中，形成了一定数量的有机磷，其磷酸酶的活性明显高于其它处理方式。

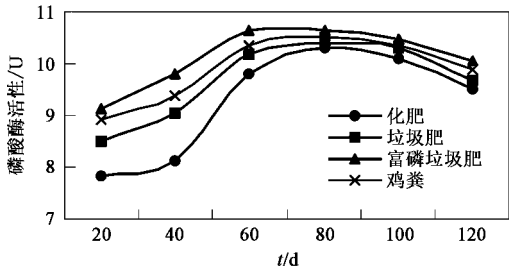


图 3 生活垃圾堆肥对土壤磷酸酶活性影响
Fig.3 Effect of MSW compost amending soil on acid phosphatase activity

3 结论

- (1)生活垃圾堆肥过程，加入难溶性磷矿粉，可明显增加堆肥中速效磷含量，对磷矿粉进行扫描电镜观察表明，堆肥对磷矿分的溶解转化作用明显。
- (2)富磷垃圾肥培肥土壤后，在作物生育期内，可明显增加土壤速效磷含量，与腐熟鸡粪、普通垃圾肥相比，差异达极显著水平。
- (3)在作物生育期内，施用富磷垃圾肥土壤磷酸酶活性明显高于其它处理方式，表明其有机态磷矿化明显，供磷潜力较大。

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.

[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] 章永松, 林咸永, 罗安程. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 151 ~ 155.

[10] 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.

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

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

[13] 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.

[14] 尹瑞龄, 许月蓉, 顾希贤. 解磷接种物对垃圾堆肥中难溶性磷酸盐的转化及在农业上的应用[J]. 应用与环境生物学报, 1995, 4(1): 373 ~ 378.

[15] 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.

[16] 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.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部决定自 2006 年 8 月 1 日起开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址: <http://www.hjkx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。自 2006 年 8 月 1 日起, 我刊所有来稿都将通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部
邮 编: 100085
电 话: 010-62941102, 010-62849343
传 真: 010-62849343
E-mail: hjkx@rcees.ac.cn
网 址: www.hjkx.ac.cn

《环境科学》编辑部