

活化磷肥的磷素释放特性、肥效及活化机理研究

孙克君^{1,2}, 赵冰², 卢其明¹, 廖宗文¹

(¹华南农业大学资源与环境学院, 广州 510642; ²广州市园林科学研究所, 广州 510170)

摘要: 【目的】探讨活化磷肥的磷素动态释放特性、分子结构及活化材料与磷矿粉之间的作用和肥效。【方法】采用连续浸提、红外光谱分析仪、差热重联用仪和盆栽试验。【结果】连续浸提表明, 两种活化磷肥连续6次水溶性磷的累积释放量是磷矿粉的3.29、3.59倍; 活化磷肥的红外光谱、差热分析结果表明, 活化材料与磷矿粉之间发生化学作用, 而且活化磷肥中 $H_2PO_4^-$ 特征吸收谱加强, 并出现新的 $H_2PO_4^-$ 特征吸收谱, 使磷矿粉中的磷向有效状态转变; 盆栽试验结果表明, 两种活化磷肥的磷肥利用率、玉米生物量显著高于磷矿粉, 甚至高于过磷酸钙。

【结论】与磷矿粉相比, 活化磷肥的水溶性磷含量、生物量和磷肥利用率均显著提高。

关键词: 活化磷肥; 活化材料; 红外光谱; 差热分析; 活化机理

Study on Release Characteristics, Fertilizer Effect and Activated Mechanism of Activated Phosphoric Fertilizers

SUN Ke-jun^{1,2}, ZHAO Bing², LU Qi-ming¹, LIAO Zong-wen¹

(¹College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642;

²Guangzhou Institute of Landscape Gardening, Guangzhou 510170)

Abstract: 【Objective】To analyse the dynamic release characteristics and molecular structure of water-soluble phosphorus in two kinds of activated phosphate fertilizers (APF), and the interactions between activating materials and phosphate rock. The fertilizer effects of APFs were also studied. 【Method】Continuous water extraction, infrared absorption spectrum and differential thermal analysis were involved. A pot experiment was carried out to study the fertilizer effects. 【Result】The result of continuous water extraction indicated that compared to phosphate rock, accumulative release rates of phosphorous of two APFs were 3.29 and 3.59 times higher, respectively. The results of infrared absorption spectrum and differential thermal analysis showed that chemical reaction happened between activating materials and phosphate rock. Characteristic absorption spectrum of $H_2PO_4^-$ was strengthened and new characteristic absorption spectrum of $H_2PO_4^-$ appeared. These made phosphorus in phosphate rock change into available status. The result of the pot experiment indicated that corn biomass and fertilizer use efficiency of two APFs were obviously higher than that of phosphate rock, even higher than that of superphosphate. 【Conclusion】Compared to phosphate rock, water-soluble phosphorus content, biomass and P use efficiency of APFs were significantly increased.

Key words: Activated phosphoric fertilizer; Activating materials; Infrared absorption spectrum; Differential thermal analysis; Activated mechanism

0 引言

【研究意义】磷素作为植物生长发育的必需营养元素之一, 不仅是植物体内许多重要化合物的组分, 而且还以多种途径参与植物体内的各种代谢过程, 在

人类赖以生存的土壤-植物-动物生态系统中起着不可替代的作用^[1]。作为中国磷肥的主要品种过磷酸钙、磷铵等, 无论是在北方石灰性土壤还是在南方酸性土壤, 因土壤强烈的固磷作用, 当季利用率不足20%, 造成资源的巨大浪费^[2~4]。国土资源部已把磷矿列为

收稿日期: 2006-11-15; 接受日期: 2007-06-13

基金项目: 国家科技支撑计划复合(混)肥养分高效优化技术研究项目(2006BAD10B03)、国家“863”计划环境友好型肥料研制与产业化项目(2001 AA. 246023)和广东省百项工程控释专用肥项目(2KB05601N)

作者简介: 孙克君(1978-), 男, 山东蒙阴人, 博士研究生, 研究方向为新肥料资源、固体废弃物农用资源化。Tel: 13825161928; E-mail: skj1978@163.com。通讯作者廖宗文(1947-), 男, 广东新会人, 教授, 研究方向为环境资源与环境友好型肥料。Tel: 020-85283066; E-mail: zwliao@sohu.com

2010 年不能满足国民经济需要的矿种之一^[5]。因此，提高磷肥的当季利用率是合理施用磷肥的前提，也是土壤科学研究中活跃的前沿领域。【前人研究进展】通过利用磷高效基因型植物、有机酸、生物法、高表面活性矿物、微生物菌种、有机肥及堆肥等活化磷矿粉，提高磷的释放量和生物学效果的研究已有报道^[6~22]，但是对木素活化磷矿粉研制活化磷肥，其磷释放动态特性和机理的研究鲜见报道。【本研究的切入点】本研究应用造纸工业废弃物和副产品用作活化材料研制活化磷肥，研究活化磷肥的磷素释放特性及肥效、应用红外光谱和差热分析研究活化材料提高磷肥利用率的机理，为开发高效低成本的新型活化磷肥及充分利用中低品位磷矿缓解磷危机提供科学依据。【拟解决的关键问题】探讨磷肥释放特性与其肥效的关系，并揭示活化磷肥提高磷肥利用率的机理，为预测活化磷肥肥效和筛选活化材料提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 活化磷肥研制

1.1.1 供试材料 活化材料：木素 H (pH 1.70)，木素 N (pH 8.20)，均未检测到磷、氮和钾，两种木素结构单元均为具有较多的酚羟基、醇羟基、羰基、羧基等多种活性基团，具有三维空间网状结构的高分子化合物。

供试磷肥：磷矿粉 (phosphate rock, 缩写 PR)，云南昆阳产，全磷含量 (P_2O_5) 26.83%；过磷酸钙 (superphosphate, 缩写 SP)，广州产，有效磷含量 (P_2O_5) 11.54%。

1.1.2 研究方法 活化材料 5% (w) 同磷肥 95% (w) 研磨混匀，再向肥料样品加入适量水后在室温下培养 2 d 后风干，磨碎备用。

1.2 活化磷肥的磷释放动态测定

1.2.1 供试材料 活化磷肥：木素 H 活化磷矿粉 LHP、木素 N 活化磷矿粉 LNP。PR、SP 与 1.1.1 相同。

1.2.2 研究方法 称取供试磷肥样品 1.0000 g 放入塑料瓶中，准确加入 100 ml 蒸馏水，拧紧瓶塞，在振

荡机上振荡 15 min (振荡机速率 150~180 次/min)，进行抽滤，滤液承接于 100 ml 三角瓶中，然后把滤渣和滤纸放回三角瓶中加入 100 ml 蒸馏水振荡 15 min，进行抽滤，共重复 6 次。测定滤液中水溶性磷含量采用钼锑抗比色法^[23]。

1.3 活化磷肥的结构分析

1.3.1 供试材料 活化磷肥 LHP、LNP、PR。

1.3.2 研究方法 把活化磷肥研磨、过筛 200 目，制得差热分析和红外光谱分析样品。差热/热重分析 (DTA/TGA) 测试采用岛津 DTG-60 差热重联用仪，TA-60 分析工作站，升温速率 $10^\circ C \cdot min^{-1}$ 。红外光谱分析采用 Perkin-Elmer 1725X 型红外光谱仪，称重 1 mg，溴化钾压片。

1.4 活化磷肥玉米肥效试验

1.4.1 供试材料 供试肥料：PR、SP 与 1.1.1 相同；LHP、LNP 与 1.2.1 相同；尿素 (山西运城产)，含氮 46%；氯化钾 (青海产)，有效钾含量 (K_2O) 60%。

供试土壤：采自广州市五山花岗岩发育的旱地赤红壤，土壤 pH 5.25，有机质含量 $33.8 g \cdot kg^{-1}$ ，全量氮、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 含量分别为 1.80、0.57 和 24.40 $g \cdot kg^{-1}$ ，有效氮、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 含量分别为 116.05、5.56 和 59.55 $mg \cdot kg^{-1}$ 。

供试作物：玉米，农甜三号。

1.4.2 研究方法 试验设 5 个处理，每个处理 4 次重复。每盆装土 4 kg，各处理氮肥、钾肥一致，氮肥用量按每千克 150 mg 施入，每盆尿素用量为 1.30 g；钾肥 (K_2O) 用量按每千克土 120 mg 施入，每盆氯化钾用量为 0.84 g；磷肥 (P_2O_5) 用量按每千克土施 100 mg 计，过磷酸钙处理每盆用量为 3.46 g，磷矿粉、活化磷肥处理的磷肥用量与过磷酸钙处理的用量相同，具体施肥方案见表 1。玉米于 2003 年 4 月 11 日浸种，14 日播种，每盆 3 株，6 月 3 日收获，生长期 53 d。收获时收割玉米地上部分，烘干后称干重，并分析玉米植株内全磷含量。收获后按 5 点法取土样，经风干过筛分析土壤速效磷含量。植株样全磷分析方法采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮——钒钼黄比色法、土样速效磷分析方法采用 $0.05 \sim 0.025 mol \cdot L^{-1}$ ($1/2H_2SO_4$) 法^[23]。

表 1 活化磷肥盆栽试验方案

Table 1 Pot trial with different activated phosphoric fertilizer treatments

处理 Treatment	CK0	CK1	CK2	T1	T2
磷肥种类 Phosphoric fertilizer variety	-	SP	PR	LHP	LNP
磷肥 Phosphoric fertilizer (g/pot)	-	3.46	3.46	3.46	3.46

2 结果与分析

2.1 活化磷肥的磷释放动态结果

蒸馏水连续浸提活化磷肥得到的是动态的释磷量与植物对磷素的吸收动态变化配合,更有利于评价其肥效。每次浸提磷素的溶出量可反映活化磷肥养分释放速率。在浸提温度、肥水比、浸提时间等试验条件一致的情况下,对不同活化材料的活化磷肥的磷素释放速率有一定的可比性。

连续浸提磷肥水溶性磷结果表明,磷矿粉每次浸提量均处于低水平,这是磷矿粉中的磷主要以难溶性磷存在;过磷酸钙第1次浸提水溶性磷甚高,但衰减甚快,降幅很大,第2次浸提量仅为第1次的6%,第6次浸提量仅为第1次的1%。与磷矿粉相比,活化磷肥的水溶性磷明显增加,这既可以解决磷矿粉水

溶性磷含量过低不能满足植物生长需要的缺点,同时又避免过磷酸钙水溶性磷肥磷释放太快,造成早期磷元素过剩,而后期磷元素偏低的现象。活化磷肥 LHP、LNP 连续抽提 6 次的水溶性磷含量均高于磷矿粉(表 2)。LHP 的水溶性磷第 1 次到第 2 次呈上升趋势,第 2 次到第 4 次的水溶性磷都处于较高的水平且变化趋势不明显,随后呈下降趋势。LNP 第 1 次到第 2 次呈上升趋势,且第 2 次是磷素释放高峰期,之后明显下降,第 5 次又回升后再下降,其水溶性磷起伏较大。LHP 水溶性磷含量较为稳定。

磷矿粉加入活化材料后累积水溶性磷含量明显高于磷矿粉处理, LHP、LNP 处理 6 次累积水溶性磷总量分别是磷矿粉处理的 3.29、3.59 倍。这表明活化材料能显著促进磷矿粉中水溶性磷的释放,改变了其水溶性磷含量过低不能满足植物生长需要的缺点。

表 2 过磷酸钙、磷矿粉及两种活化磷肥水溶性磷释放量动态变化

Table 2 Changes of releasing rate of the dynamic water-soluble phosphorus of superphosphate, phosphate rock, activated phosphorus fertilizers

磷肥 Phosphoric fertilizer	第 1 次 First (mg·kg ⁻¹)	第 2 次 Second (mg·kg ⁻¹)	第 3 次 Third (mg·kg ⁻¹)	第 4 次 Fourth (mg·kg ⁻¹)	第 5 次 Fifth (mg·kg ⁻¹)	第 6 次 Sixth (mg·kg ⁻¹)
PR	173.28±5.43d	171.96±5.86d	582.50±6.54d	570.83±5.69d	913.82±8.96d	745.85±8.62d
SP	81653.09±2700.13a	4945.83±75.67a	2378.32±38.56a	1713.03±50.90b	3033.18±91.11a	879.91±53.43c
LHP	1482.50±28.69b	2205.26±38.88c	2033.99±40.12b	2201.72±39.64a	1439.99±20.15c	1009.13±19.63b
LNP	2166.26±28.53c	2702.92±36.58b	1846.68±20.16c	1279.79±16.83c	1826.47±17.67b	1409.40±16.26a

表中所表示的数值为 3 次重复的平均值,其后为标准误,同列数据中具有相同字母的数据无显著性差异 ($P=0.05$)

SSR was used for data multiple comparison, mean values within a column followed by the same letters are not significantly different ($P=0.05$)

2.2 活化磷肥红外光谱、差热分析的结果

2.2.1 活化磷肥的红外光谱分析 与磷矿粉处理相比,活化磷肥 LHP、LNP 的红外光谱也有明显的变化,主要表现为某些峰的出现、新峰的出现及峰位、强度和峰形的变化(图 1)。与磷矿粉红外光谱相比, LHP 出现了新的 $H_2PO_4^-$ 吸收峰 $1\ 098.36\ cm^{-1}$,从分子键角度直接揭示了 LHP 中有效磷增加的原因。P—OH 基中对称振动吸收峰 $2\ 855.07\ cm^{-1}$ 消失,吸附水的伸缩振动吸收谱由 $3\ 433.44\ cm^{-1}$ 漂移到 $3\ 431.19\ cm^{-1}$,峰形变宽,强度减弱。 $H_2PO_4^-$ 振动吸收峰 $1\ 048.74\ cm^{-1}$ 漂移到 $1\ 043.49\ cm^{-1}$,峰形变宽,强度增强,这也揭示了 LHP 中有效磷增加的原因; LNP 出现了新的 $H_2PO_4^-$ 吸收峰 $2\ 527.06$ 、 $1\ 097.82\ cm^{-1}$,这直接从分子键角度揭示了 LNP 有效磷增加的原因。P—OH 中对称振动吸收峰 $2\ 855.07\ cm^{-1}$ 和不对称振动吸收峰 $2\ 922.47\ cm^{-1}$ 消失,吸附水的伸缩振动吸收谱由 3

$433.44\ cm^{-1}$ 漂移到 $3\ 431.92\ cm^{-1}$,峰形变宽,强度减弱。 $H_2PO_4^-$ 吸收峰 $1\ 048.74\ cm^{-1}$ 漂移到 $1\ 042.08\ cm^{-1}$,峰形变宽,强度增强^[24,25],这也揭示了 LNP 中水溶性磷比例增加的原因。LHP、LNP 红外光谱分析结果均揭示了活化材料与磷矿粉之间发生了化学反应, $H_2PO_4^-$ 特征吸收谱加强,并出现新的 $H_2PO_4^-$ 特征吸收谱,使磷矿粉中的磷由难被植物利用状态向有效状态转变,使水溶性磷比例增加。这同室内模拟活化磷的水溶性磷的浸提试验结果相吻合。

2.2.2 活化磷肥的差热分析 差热分析法是应用最广的一种热分析方法,是根据在加热过程中所发生的脱水、分解、氧化、同质多象转变过程中所伴随的吸热或放热反应的温度及能量变化来研究物质变化的一种方法。活化磷肥 LNP 的差热变化曲线与磷矿粉明显的不同(图 2)。在整个升温过程内($0\sim 500\ ^\circ C$),磷矿粉的 DTA 曲线峰形没有出现吸热谷和放热峰;

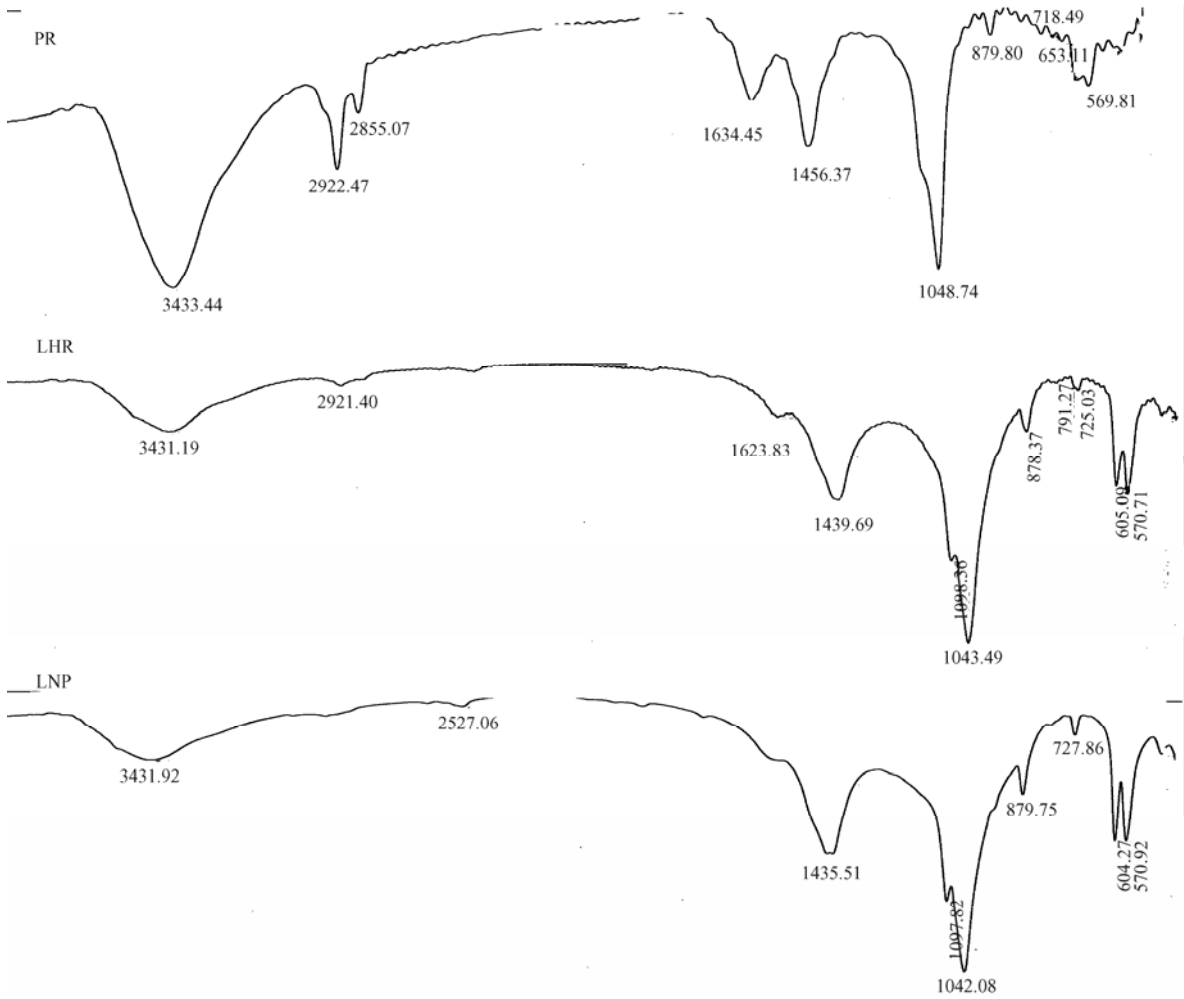


图 1 PR、LHP、LNP 的红外光谱分析
Fig. 1 Infrared absorption spectrum of PR, LHP, LNP (Wavenumbers cm^{-1})

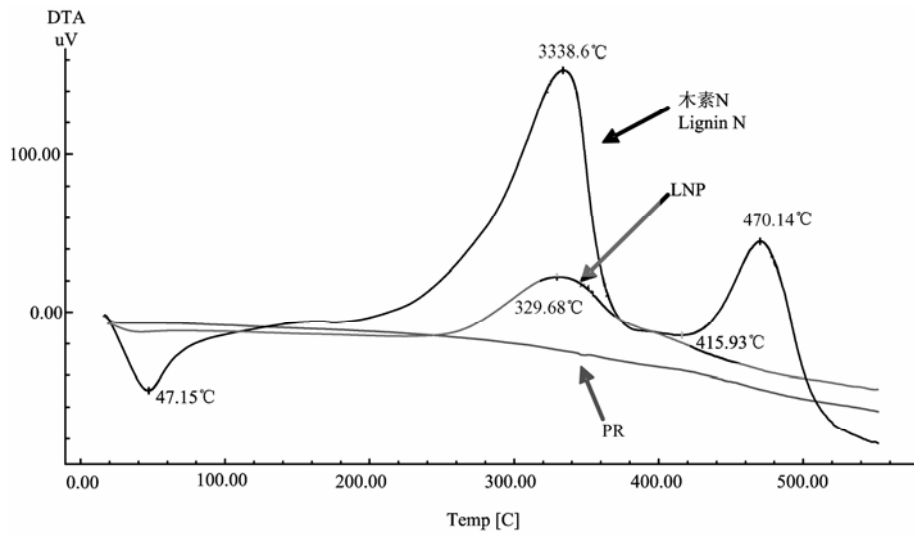


图 2 木素 N、LNP、PR 的差热分析
Fig. 2 The differential thermal analysis of Lignin N, LNP, PR

木素 N 有脱除木素中水引起的吸热谷 47.15℃和木素 N 分解引起的吸热谷 415.93, 两个由木素 N 结晶相变引起的放热峰 333.86℃、470.14℃; LNP 只有一个活化磷肥内有机物质结晶相变引起放热峰 329.68℃^[26]。表明木素 N 同磷矿粉发生了化学反应, 这同红外分析结果相同。

2.3 玉米生物量及磷肥利用率

盆栽试验表明, 施入磷肥后, 玉米生物量显著增加(表 3)。与 CK2 相比, 活化磷肥处理 T1、T2 均显著增产, 增产幅度分别为 10.34%、9.19%, 与 CK1 相比, T1、T2 处理也有增产。磷矿粉加入控释材料的处理(T1、T2)之间玉米生物量差异不显著, 与 CK1

之间差异也不显著。活化磷肥价格低廉, 而磷肥利用率却比过磷酸钙处理提高, 这对开发中国中低品位的磷矿资源有重大意义。

2.4 活化磷肥连续浸提水溶性磷累计总量与玉米生物量的关系

磷矿粉和活化磷肥连续浸提水溶性磷累计总量与盆栽玉米生物量的关系如图 3, 其水溶性磷累计总量与盆栽玉米生物量达显著相关, 相关系数 $r=0.95$ ($P=0.01$)。这表明活化磷肥的水溶性磷的连续释放量能较好的反映其肥效, 因此, 在生产实践中可以通过测定活化磷肥水溶性磷的连续释放量来快速评价一个活化磷肥新品种。

表 3 玉米生物量及磷肥利用率

Table 3 The biomass, P use efficiency of maize

处理 Treatment	磷肥种类 Phosphoric fertilizer variety	生物量 Biomass (g/pot)	增产 Increasing yield (%)		磷肥利用率 P use efficiency (%)
			较 CK1 Than CK1	较 CK2 Than CK2	
CK0	-	33.03c	-	-	-
CK1	过磷酸钙 Superphosphate	38.83a	-	-	11.17c
CK2	磷矿粉 Phosphate rock	36.35b	-	-	3.73d
T1	LHP	40.11a	3.34	10.34	20.35a
T2	LNP	39.69a	2.24	9.19	16.65ab

表中数据用 SAS 软件进行分析, 多重比较采用 Duncan 法。表中所示数值为平均值, 同列数据中具有相同字母的数据无显著性差异 ($P=0.05$)
SSR was used for data multiple comparison, mean values within a column followed by the same letters are not significantly different ($P=0.05$)

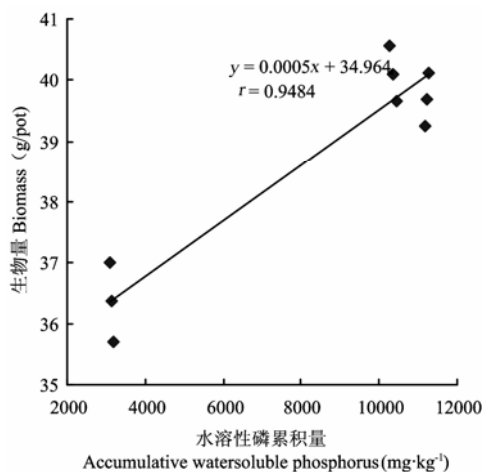


图 3 水溶性磷累积量与盆栽生物量的关系

Fig. 3 Relation between the accumulative water soluble phosphorus and pot biomass

3 讨论

3.1 活化磷肥、过磷酸钙、磷矿粉的磷释放特性及其测定

磷素释放特性是评价磷肥质量的一个重要指标, 与磷肥利用率有密切关系。用连续抽提法得到水溶性磷的动态变化反映了 4 种磷肥释磷特点。在各次抽提中的水溶性磷结果显示: 磷矿粉均处于低水平, 这是磷矿粉难以满足作物需求的内在原因; 而过磷酸钙前期水溶性磷甚高, 但衰减甚快, 降幅很大, 从最高至最低点, 降幅达 $80\ 773.18\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而两种活化磷肥 LHP 和 LNP 的水溶性磷释放则属于两者之间, 前期不太高, 后期降幅小于过磷酸钙, 连续抽提的水溶性磷的波动不大, 反映了一种稳定、维持较高强度供磷的特性。这与该种磷肥处理得以获得明显高于磷矿粉, 甚至高于过磷酸钙产量的肥效是一致的。连续抽提的水溶性磷结果显示, 活化磷肥克服了磷矿粉原有的水溶性磷太低, 而过磷酸钙供磷前期太高, 后期衰减快的缺点, 能较均衡地满足作物生长期尤其是后期的需要。

目前国内外对磷肥有效性的测定均是采用一次测定为标准。这种方法仅能反映其静态有效性, 并未能反映其动态有效性, 而这一动态有效性对于判断其长效性和利用率是很重要的。通过连续测定以了解肥料

养分释放特性在控释氮肥中已有普遍应用，并在对控释氮肥的评价及改进方面发挥了重要作用^[27]。但是，对于磷肥释放特性和评价方面，尚鲜有文献报道。本文初步研究结果已显示出磷肥释磷特性的动态测定与磷肥的肥效和化学键有密切关系。如能象对控释氮肥那样进行相关研究，将为正确评价及改进磷肥，提高其利用率，将是十分有益的。近年来，这一工作在一些科研单位已渐受重视，并由省和国家检测部门立项研究。

3.2 活化磷肥的肥效及其应用前景

试验表明，活化磷肥的肥效明显高于磷矿粉，达到显著水平；比过磷酸钙略高（差异不显著），表明活化磷肥的肥效不亚于过磷酸钙，但过磷酸钙的后效较长，今后要进行更长期的比较和更深入的研究。而活化磷肥的制作无需耗酸，无需加热，无需特殊设备，工艺简单，其原料设备和运行成本均低，可明显降低成本。更重要的是，这一新产品的原料可以利用中低品位磷矿，为中低品位磷矿开拓了高效利用技术途径，可以节约紧缺的磷矿资源，尤其是中低品位磷矿资源，对于缓解日益尖锐的磷危机有重要意义。同时，因能大幅降低成本，对提高磷肥企业的产品竞争力也有重要作用。近几年来，活化磷肥在广东湛江地区水稻、甘蔗、蔬菜、果树等多种作物上使用，具有增产、优质、增收效果明显特点，其中，甘蔗增产、增糖的效果尤为突出^[3]，可明显促进农民增收。这一技术成果在磷矿大省的应用也有很好效果，贵州的肥料企业利用当地低于全磷（ P_2O_5 ）20%的中低品位磷矿生产的活化磷肥成本低而肥效不亚于过磷酸钙，畅销当地及外省。这对于激活大量弃置于矿区的中低品位磷矿，使之得到充分利用意义重大。

3.3 磷肥活化机理的谱学分析及其启示

本文所用的两种活化剂均为造纸木素的衍生物。一种为酸性，另一种为碱性，但连续抽提分析表明都具有相似的活化效果。这表明其活化与酸碱性关系不大。对两种磷的红外光谱分析表明，活化剂与磷矿粉发生了反应，难溶的 Ca—P 键部分转化为有效性高的 $H_2PO_4^-$ ，使其水溶性增加。活化磷肥连续抽提磷总量为磷矿粉处理的 3 倍以上，与此化学键向有效性转化有关，也表明活化磷肥中的活化剂与磷矿粉发生了化学反应。盆栽试验结果也印证了这一点，活化磷肥的释磷速度可较好地满足作物需要，达到与过磷酸钙相当的程度。为研制一种节资节能高效的新磷肥品种提供了重要的依据。

红外光谱分析表征有效性变化的谱峰消长，以化学键水平揭示了活化磷肥的有效性提高了，集中表现在 $H_2PO_4^-$ 新峰的出现和峰的变化。虽然这种强化所表征的有效性远低于过磷酸钙，但其肥效并不低，且当季磷肥利用率明显高于过磷酸钙，由此提出了一个值得深思的问题：磷肥的水溶性磷是否越高越好？从本试验来看，并非如此。若同时把水溶性高的能耗、物耗结合考虑，适度水溶性就很有必要深入研究。磷肥的水溶性、枸溶性和难溶性磷若有一个适当的比例，其效果可能不亚于水溶性高的过磷酸钙或 100% 水溶性的磷铵，这就是不同释放速度组合的“纵向平衡”^[28]。在控释氮肥中，这种纵向平衡的调控得到了重视，这对提高磷肥有效性也是有益的启示。已有的一些研究显示，对磷肥进行活化，把水溶性磷调控至适度水平，可明显提高肥效而大幅降低成本^[29,30]。

4 结论

与磷矿粉相比，活化磷肥可明显提高磷矿粉水溶性磷含量，连续浸提试验表明两种活化磷肥处理的水溶性磷累积溶出量分别为磷矿粉处理的 3.29、3.59 倍；植株磷肥利用率和生物量均显著提高。

红外光谱分析结果显示活化材料与磷矿粉之间发生化学作用，而且活化磷肥中 $H_2PO_4^-$ 特征吸收谱加强，并出现新的 $H_2PO_4^-$ 特征吸收谱，使磷矿粉中的磷向有效状态转变，使水溶性磷含量增加，磷的释放速度适中，因而控释效果好。

活化磷肥具有节资节能，高效的巨大潜力，是农业生产中实施建设节约型社会的一项重大课题。木素与磷矿粉研制活化磷肥是开拓我国中低品位磷矿和工业废弃物新用途的成功尝试，今后深入开展这一领域的研究对缓解磷资源危机和开发磷肥新品种都有重要意义。

References

- [1] 王庆仁, 李继云, 李振声. 高效利用土壤磷酸的植物营养学研究. 生态学报, 1999, 19: 417-421.
Wang Q R, Li J Y, Li Z S. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19: 417-421. (in Chinese)
- [2] Lu Q M, Liao Z W. Comparative study on characteristics of P fixation by Mn, Fe and Al. *Pedosphere*, 1997, 7: 325-330.
- [3] 杜建军, 郑超, 廖宗文, 王新爱, 杨小龙, 李瑞民. 雷州半岛地区磷肥高效利用技术及其应用. 生态环境, 2004, 13: 373-375.

- Du J J, Zheng C, Liao Z W, Wang X A, Yang X L, Li R M. Technique of high efficient utilization of phosphoric fertilizer and its application in Leizhou Peninsula. *Ecology and Environment*, 2004, 13: 373-375. (in Chinese)
- [4] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费——I. 磷矿资源和磷肥生产. *土壤*, 2004, 36 (1): 1-4.
- Lu R K. Phosphorus resource of China and phosphate fertilizer production and consumption I. P resources and P fertilizers production of China. *Soils*, 2004, 36 (1): 1-4. (in Chinese)
- [5] 刘可星, 郑超, 廖宗文. 磷资源危机与磷的高效利用技术. *化肥工业*, 2006, 33(3): 21-23.
- Liu K X, Zheng C, Liao Z W. Phosphate resource crisis and technology for high-efficiency utilization of phosphate. *Journal of the Chemical Fertilizer Industry*, 2006, 33(3): 21-23. (in Chinese)
- [6] 王光华, 周克琴, 金剑, 潘相文, 赵英. 不同碳源对三种溶磷真菌溶解磷矿粉能力的研究. *生态学杂志*, 2004, 23(2): 32-36.
- Wang G H, Zhou K Q, Jin J, Pan X W, Zhao Y. Effect of different C sources on the solubilization of rock phosphate by three phosphate solubilizing fungi (PSF). *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(2): 32-36. (in Chinese)
- [7] Goenadi D H, Siswanto, Sugiarto Y. Bioactivation of poorly soluble phosphate rocks with a phosphate-solubilizing fungus. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 927-932.
- [8] Sahu S N, Jana B B. Enhancement of the fertilizer value of rock phosphate engineered through phosphate-solubilizing bacteria. *Ecological Engineering*, 2000, 15: 27-39.
- [9] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere—a critical review. *Plant and Soil*, 1998, 205: 25-44
- [10] Reyes I, Bernier L, Simard R R, Tanguay P, Antoun H. Characteristics of phosphate solubilization by an isolate of a tropical *penicillium rugulosum* and two UV-induced mutants. *FEMS Microbiology Ecology*, 1999, 28: 291-295.
- [11] 王庆仁, 李继云, 李振声. 不同基因型小麦磷素营养阈值的研究. *西北植物学报*, 1999, 19: 363-370.
- Wang Q R, Li J Y, Li Z S. Studies on the critical values of phosphorus in wheat genotypes with phosphorus efficiencies. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 1999, 19: 363-370. (in Chinese)
- [12] 边武英, 何振立, 黄昌勇. 高效解磷菌对矿物专性吸附磷的转化及生物有效性的影响. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2000, 26: 461-464.
- Bian W Y, He Z L, Huang C Y. Increasing transformation and bioavailability of specifically sorbed P by P-efficient microorganisms (PEM). *Journal of Zhejiang Agricultural University (Agriculture & Life Science)*, 2000, 26: 461-464. (in Chinese)
- [13] 邱慧珍, 张福锁. 活化钙镁磷肥对不同磷效率基因型冬小麦生长及磷效率的影响. *土壤通报*, 2002, 33(4): 295-299.
- Qiu H Z, Zhang F S. Effects of modified calcium-magnesium phosphates on growth and phosphorus efficiency of winter wheat genotypes with different phosphorus efficiency. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4): 295-299. (in Chinese)
- [14] 王光华, 周德瑞, 杨谦, 周克琴, 赵英. 低分子量有机酸对磷矿粉的释磷效应. *农业环境科学学报*, 2004, 23(1): 80-84.
- Wang G H, Zhou D R, Yang Q, Zhou K Q, Zhao Y. Effects of low-molecular-weight organic acids on release of phosphorus from rock phosphate. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1): 80-84. (in Chinese)
- [15] 李亚娟, 邱慧珍. 高表面活性矿物对磷矿粉的活化及其对玉米苗期生长的影响. *甘肃农业大学学报*, 2005, 40: 324-329.
- Li Y J, Qiu H Z. Activation of highly surface-activated minerals to phosphate rock and its effects on the growth of corn seedlings. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2005, 40: 324-329. (in Chinese)
- [16] 冯兆滨, 张夫道, 刘秀梅, 张建峰, 王玉军, 肖强. 活化磷矿粉的生物学效果研究初报. *土壤肥料*, 2006(2): 38-41.
- Feng Z B, Zhang F D, Liu X M, Zhang J F, Wang Y J, Xiao Q. Effects of activated phosphorite powder on the nutrients utilization of maize. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(2): 38-41. (in Chinese)
- [17] 郭荣发, 廖宗文, 陈爱珠. 活化磷矿粉在砖红壤上的施用效果. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2004, 30(3): 233-235.
- Guo R F, Liao Z W, Chen A Z. Effect of application of active ground phosphate rock to latosol. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2004, 30(3): 233-235. (in Chinese)
- [18] 李淑仪, 蓝佩玲, 廖新荣, 徐胜光, 王尚明, 杨国清. 雷州桉树人工林下土壤磷肥活化效果及机理研究. *林业科学研究*, 2002, 15(3): 261-268.
- Li S Y, Lan P L, Liao X R, Xu S G, Wang S M, Yang G Q. Research on activation effects and mechanisms of phosphatic manure in soil under the eucalypt plantation in Leizhou peninsula. *Forest Research*, 2002, 15(3): 261-268. (in Chinese)
- [19] 钟传青, 黄为一. 磷细菌P17对不同来源磷矿粉的溶磷作用及机制. *土壤学报*, 2004, 41: 931-937.
- Zhong C Q, Huang W Y. Effects and mechanism of P-solubilizing bacillus P17 strain on phosphorus solubilization of different phosphate rocks. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41: 931-937. (in Chinese)
- [20] 冯瑞章, 姚拓, 周万海, 龙瑞军, 齐文娟. 溶磷菌和固氮菌溶解磷矿粉时的互作效应. *生态学报*, 2006, 26: 2764-2769.

- Feng R Z, Yao T, Zhou W H, Long R J, Qi W J. Studies on the interactions between phosphate-solubilizing bacteria and nitrogen-fixing bacteria in rock phosphate solubilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 26: 2764-2769. (in Chinese)
- [21] 池汝安, 肖春桥, 高洪, 吴元欣, 李世荣, 王存文, 喻发全. 几种微生物溶解磷矿粉的动态研究. *化工矿物与加工*, 2005, 7: 4-7.
- Chi R A, Xiao C Q, Gao H, Wu Y X, Li S R, Wang C W, Yu F Q. Study on solubilization of rock phosphate by some microbes. *Industrial Minerals and Processing*, 2005, 7: 4-7. (in Chinese)
- [22] 魏自民, 席北斗, 王世平, 赵越, 杨延梅, 何连生, 刘鸿亮. 垃圾堆肥对难溶性磷转化及土壤磷素吸附特性影响. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 142-146.
- Wei Z M, Xi B D, Wang S P, Zhao Y, Yang Y M, He L S, Liu H L. Effects of municipal solid waste composting on solubilization of insoluble phosphate and soil phosphorus sorption characteristics. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 142-146. (in Chinese)
- [23] 鲁如坤主编. 土壤农化分析. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 1-336.
- Lu R K. *Soil Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: Science and Technology of China Agriculture Press, 2000: 1-336. (in Chinese)
- [24] 苏克曼, 潘铁英, 张玉兰. 波谱解析法. 上海: 华东理工大学出版社, 2002, 80-116.
- Su K M, Fan T Y, Zhang Y L. *Spectrum Analytcs*. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2002: 80-116.
- [25] 谢晶曦, 常俊标, 王绪明. 红外光谱在有机化学和药物化学中的应用. 北京: 科学出版社, 2001: 37-382.
- Xie J X, Chang J B, Wang X M. *The Application of IR Spectra on Organic Chemistry and Pharmaceutical Chemistry*. Beijing: Science Press, 2001: 37-382. (in Chinese)
- [26] 沈兴. 差热、热重分析与非等温固相反应动力学. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 22-67.
- Shen X. *DTA, TGA and Non-isothermal Kinetics of Solid-reactions*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 22-67. (in Chinese)
- [27] 孙克君, 毛小云, 卢其明, 贾爱萍, 廖宗文. 几种控释氮肥减少氨挥发的效果及影响因素研究. *应用生态学报*, 2004, 15: 2347-2350.
- Sun K J, Mao X Y, Lu Q M, Jia A P, Liao Z W. Mitigation effect of several controlled-release N fertilizers on ammonia volatilization and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15: 2347-2350. (in Chinese)
- [28] 刘可星, 廖宗文. 平衡施肥概念的发展及其技术开发. 磷肥与复肥, 1997, 6: 64-65.
- Liu K X, Liao Z W. The concept development and technology exploitation of balanced fertilization. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 1997, 6: 64-65. (in Chinese)
- [29] 郑超, 刘可星, 廖宗文, 杜建军. 改性木质素对砖红壤磷素有效性的影响. *华中农业大学学报*, 2004, 23: 528-532.
- Zheng C, Liu K X, Liao Z W, Du J J. Effect of modified lignin on phosphorus availability of latosol. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2004, 23: 528-532. (in Chinese)
- [30] 郑超, 杜建军, 廖宗文, 谭中文, 刘可星. 改性磷铵在砖红壤植蔗土上的施用效果. *甘蔗*, 2004, 11(1): 5-9.
- Zheng C, Du J J, Liao Z W, Tan Z W, Liu K X. Efficiency of developed-ammonium phosphate application on lateritic sugarcane planting soil. *Sugarcane*, 2004, 11(1): 5-9. (in Chinese)

(责任编辑 吴晓丽)