

# 造纸污泥堆肥农用对酸性土壤性质影响研究

林云琴,王德汉,陈晓燕,余佳琳,陆承刚

(华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系,广东 广州 510642)

**摘要** 通过玉米盆栽试验,研究了添加富含铝盐的造纸污泥堆肥对酸性赤红壤理化性质的影响。结果表明,添加造纸污泥堆肥能有效减缓土壤酸化,增加土壤有机质和有效磷含量,提高土壤质量,同时添加堆肥的各处理土壤中的总酸溶性铝和总单核铝浓度在盆栽初期较CK有显著增加,并随堆肥用量的增加而增加,但随着玉米生长时间推移,各处理(除了CK)总酸溶性铝和总单核铝浓度明显下降,在盆栽结束时各处理总酸溶性铝浓度均低于原赤红壤中总酸溶性铝浓度,可见造纸污泥堆肥农用不会对酸性土壤形成活性铝累积问题。

**关键词** 造纸污泥堆肥;赤红壤;农用;理化性质;活性铝

中图分类号:X793 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)06-1159-05

## The Influence on Red Soil Added with Paper Mill Sludge Compost

LIN Yun-qin, WANG De-han, CHEN Xiao-yan, YU Jia-lin, LU Cheng-gang

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract** The paper concerned on the influence on red soil when paper mill sludge compost (PMSC) was used in a pot maize experiment. The experiment result showed that pH, organic carbon (OC) concentration and effective phosphate concentration of red soil increased after added with PMSC; The active aluminum concentration of treatments added with PMSC was also higher than CK, but the former decreased more sharply than latter during cultivating; At the end of planting, the active aluminum concentration of treatments added with PMSC was almost equal to the original red soil, which mean there was no active aluminum remaining in soil.

**Keywords** paper mill sludge compost; red soil; agricultural application; physicochemical characteristics; active aluminum

造纸污泥堆肥是一种良好的具有高价值的有机肥料资源<sup>[1]</sup>,污泥堆肥农用可以促进作物生长、提高作物产量<sup>[2-3]</sup>,所以农用资源化是解决日益增多的造纸污泥问题的有效途径。但是,造纸污泥由于在制浆造纸以及造纸废水的处理过程中大量使用了明矾( $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ ),这些铝盐主要以絮凝沉淀形式转移到污泥中,使得造纸污泥中富集了大量的铝盐<sup>[4]</sup>。土壤溶液中的铝离子浓度超过一定的量,就会对一些植物产生毒性<sup>[5-6]</sup>。铝离子毒害是酸性土壤上植物生长最主要的限制因子,它会严重影响植株根系发育及其他生长状况<sup>[7-8]</sup>,这种表现在酸性土壤上尤为突出。例如我国华南地区广泛分布的酸性土壤<sup>[9]</sup>,土壤的酸化使土

壤中的营养元素淋失,固定铝的释放迅速增加,成为植物可吸收的活性铝<sup>[10]</sup>,因此在酸性土壤上施用造纸污泥堆肥,必须考虑铝污染问题。

关于造纸污泥堆肥农用的肥效及重金属污染等问题国内外多有研究<sup>[11-14]</sup>,而造纸污泥堆肥农用的铝污染问题鲜见报道。本文旨在通过玉米盆栽试验,研究酸性土壤中施加造纸污泥堆肥后,土壤活性铝含量和其他理化指标的变化以及它们之间的变化关系,分析造纸污泥堆肥农用铝污染效应及机理,为造纸污泥堆肥安全农用提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤:华南农业大学校园内赤红壤。

造纸污泥堆肥:选择广州造纸厂的造纸污泥,利用自制反应器堆肥系统经好氧堆肥而得。

供试玉米:华宝1号F1,购于华南农业大学科技实业发展总公司。

收稿日期:2008-10-04

基金项目:广东省自然科学基金(06025856),华南农业大学校长基金(05E0806),华南农业大学资源环境学院院长基金(0505)

作者简介:林云琴(1977—),女,讲师,博士研究生,主要从事固体废物资源化利用研究。

通讯作者:王德汉 E-mail: wdehanwang@scau.edu.cn

表1 造纸污泥堆肥主要理化性质及活性铝含量

Table 1 Active aluminum concentration and other characteristics of paper mill sludge compost

项目	pH	水分/%	有效磷( $P_2O_5$ )/ $mg \cdot kg^{-1}$	有机质/ $mg \cdot kg^{-1}$	总酸溶性铝/ $mg \cdot kg^{-1}$	总单核铝/ $mg \cdot kg^{-1}$	酸溶性铝/ $mg \cdot kg^{-1}$
赤红壤	5.25	42.12	3.66	2.69	4.94	4.20	0.74
造纸污泥堆肥	7.05	70.68	1 470.60	249.22	146.17	103.12	43.05

注:总酸溶性铝=总单核铝+酸溶性铝。

将采集的土壤和腐熟的污泥堆肥自然风干磨碎,过5 mm筛,用于盆栽试验。

## 1.2 试验设计

试验设4个处理,每个处理做3个重复。称取3 kg赤红壤放入瓦盆中作为试验对照,编号为CK;再分别称取90、180、300 g的造纸污泥堆肥与3 kg赤红壤混匀后加入各花盆中,编号为3%、6%、10%。试验为期2个月左右,每日浇水2次,以保持盆栽土壤的湿润情况适合植株的生长,每次各处理浇水量相同。为了测定盆栽过程中土壤各种理化性质的变化情况,在盆栽试验的第10、22、38、52 d,取各盆栽土样,第52 d收割玉米植株。土样风干后过筛,用于理化性质及活性铝的测定与分析。

表2 盆栽试验设计方案

Table 2 The design of pot experiment

处理编号	原料用量	造纸污泥堆肥/赤红壤(%)
CK	0 g 造纸污泥堆肥+3 kg 赤红壤	—
3%	90 g 造纸污泥堆肥+3 kg 赤红壤	3
6%	180 g 造纸污泥堆肥+3 kg 赤红壤	6
10%	300 g 造纸污泥堆肥+3 kg 赤红壤	10

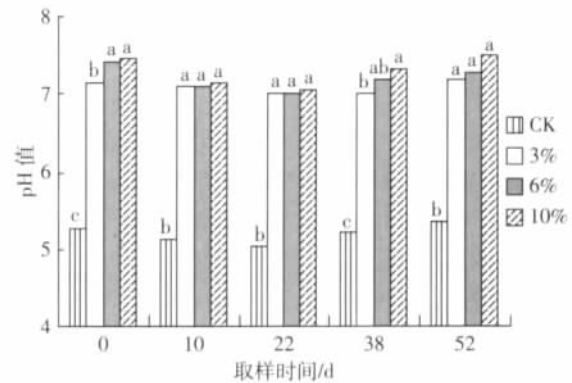
## 1.3 测试项目与方法

试验分析土壤中的活性铝(总酸溶性铝、总单核铝)、pH、OM(有机质)、有效磷等指标,其中活性铝采用8-羟基喹啉(pH8.3)分光光度法测定<sup>[15]</sup>,其他指标分析方法详见《土壤农业化学分析方法》<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 添加造纸污泥堆肥后土壤 pH 的变化

pH值是土壤的一个重要理化指标,不仅会影响土壤的一般理化性质,还会影响土壤中铝的形态分布。由图1可见,在整个试验过程中,pH值总体上大小关系遵循CK<3%<6%<10%,各处理与CK的pH值存在显著差异,主要是由于添加的造纸污泥堆肥呈碱性,而赤红壤呈酸性,且污泥堆肥配比越大,土壤碱性越强,说明添加造纸污泥堆肥后对酸性土壤起到一定的中和作用,在一定程度上能改善土壤,减



所有数据均作3个重复,利用DUNCAN( $P=0.05$ )检验进行显著性差异分析(下同)

Data points represent the mean of triplicate tests and analysis with Duncan ( $P=0.05$ ); This was the same to latter data.

图1 不同取样时间各处理土壤的pH值  
Figure 1 The variation of soil pH for each treatment during maize growth

轻土壤酸化。

由图中各柱子的高低变化可见,CK与各配比的pH值均是先略有降低后升高,可能原因是前期某些有机物被不完全分解,生成了一定量的有机酸,致使土壤pH降低<sup>[17]</sup>,而后期由于水的淋失作用和生物的分解吸收作用,有机酸的含量降低,土壤pH升高。

### 2.2 添加造纸污泥堆肥后土壤有效磷的变化

有效磷含量是反映土壤肥力的一个重要指标,添加造纸污泥堆肥后土壤有效磷含量较CK显著增加,各处理增幅分别高达1718.85%(3%)、2258.20%(6%)、2560.93%(10%),可见造纸污泥堆肥农用具有较高的磷肥肥效。与此同时,堆肥的供磷作用对土壤铝毒控制具有重要意义,有试验显示,土壤中的有效磷能与铝形成 $Al(OH)_2 \cdot H_2PO_4$ 沉淀,土壤有效磷含量增高,有利于活性铝的络合,从而降低了土壤中活性铝含量,也就降低或消除了铝对植物毒性<sup>[19-20]</sup>。因此堆肥的供磷作用能有效降低或消除释放到土壤中的铝元素对植物的毒害,缓解铝毒问题,促进植物吸收养分,有利于植物生长发育。

另外,pH值是影响土壤中有效磷的重要因素,主要影响土壤的固磷作用。在碱性条件下,当pH值略

有降低时就能增加磷酸钙的溶解度,从而增加有效磷的含量;而对酸性土壤,适当施用石灰调节其 pH 至中性附近(以 pH6.5~6.8 之间为宜),可促使铁、铝形成氢氧化物沉淀,减少了它们对磷的固定,提高了土壤磷的有效性<sup>[17]</sup>,故土壤酸碱度在中性条件附近时,土壤有效磷含量最大。由图 2 可知,在盆栽试验前期各配比土壤 pH 值均逐渐降低至 7(中性)附近,土壤的固磷作用逐渐减少,有效磷含量在试验前期呈上升的趋势;而在盆栽试验后期,各配比土壤酸碱度均由中性逐渐升高至偏碱性,土壤磷的有效性逐渐降低,加之作物对有效磷的吸收,使得土壤中有效磷含量略有降低。因此有效磷的变化趋势与图 1 中 pH 的变化趋势相吻合。

图 2 还反映添加不同量造纸污泥堆肥的各处理间土壤有效磷含量的差异性随盆栽时间的推移而减弱,说明堆肥提供的大部分有效磷能被作物充分吸收,堆肥用量越大,作物可利用的有效磷越多。

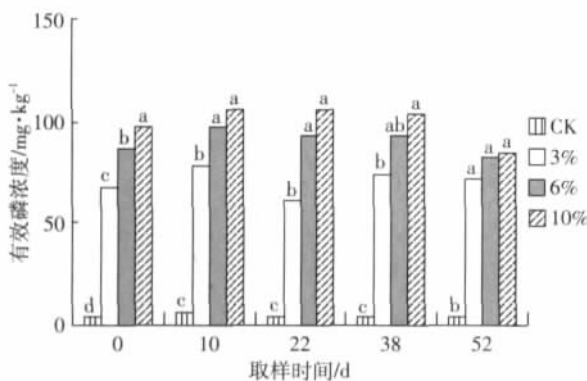


图 2 不同取样时间各处理土壤中有有效磷浓度  
Figure 2 The effective phosphate concentration of soil for each treatment during maize growth

### 2.3 添加造纸污泥堆肥后土壤有机质(OM)的变化

由图 3 可见,CK 中有机质含量仅约为  $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其他处理有机质含量随造纸污泥堆肥量的增加而显著增加,各处理较 CK 增幅高达 271.83%(3%)、598.77%(6%)、878.45%(10%),说明添加造纸污泥堆肥,具有改良土质的功能,同时有机质中的大分子腐植酸中含有许多活性基团,可与部分铝络合反应,而且腐植酸主要带负电荷,可大量吸附阳离子,使部分  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})^+$  等毒性较大的活性铝转化为毒性较小的形态,从而降低酸性土壤的铝毒效应<sup>[21]</sup>。在整个盆栽过程中,各处理土壤有机质含量变化不大,大致呈略上升后下降的趋势。

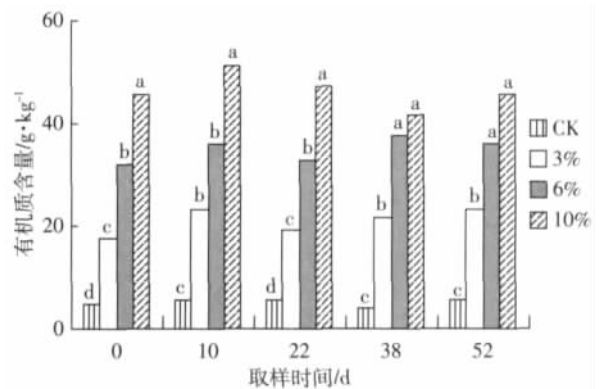


图 3 不同取样时间各处理土壤中有有机质浓度  
Figure 3 The OM concentration of soil for each treatment during maize growth

土壤中有有机质的变化趋势同图 2 有效磷的变化趋势类似,主要是由于土壤有机质含量同其固磷作用有关。含有机质多的土壤,其固磷作用往往较弱,有效磷含量较高,其原因除了有机质矿化能提供部分无机磷外,还存在下列作用:①有机阴离子与磷酸根竞争固相表面专性吸附点位,从而减少了土壤对磷的吸附;②有机物分解产生的有机酸和其他螯合剂的作用,将部分固定态磷释放为可溶态;③腐殖质可在铁、铝氧化物等胶体表面形成保护膜,减少对磷酸根的吸附;④有机质分解产生的  $\text{CO}_2$  溶于水形成  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,增加钙、镁、磷酸盐的溶解度<sup>[17]</sup>。可见土壤中有有效磷含量与有机质含量表现为正相关关系。

### 2.4 添加造纸污泥堆肥后土壤中总酸溶性铝的变化

总酸溶性含量代表土壤中活性铝的总量,由图 4 可见,各处理总酸溶性铝浓度基本符合“随处理堆肥用量的增加而增加”的规律,在第 0 d 添加堆肥的处理较 CK 表现出显著差异,主要原因是造纸污泥堆肥本身含有的总酸溶性铝远高于赤红壤(表 1);后期(10~52 d,除 38 d)CK 与 3% 差异不显著主要是由于种植过程中堆肥能有效降低土壤中活性铝的含量<sup>[22-23]</sup>,CK 与 6%、10% 差异显著主要是由于堆肥降低土壤中活性铝浓度的作用小于增加堆肥而增加土壤中活性铝浓度的作用。

由图中柱子的高低变化可见,各处理总酸溶性铝浓度随种植时间推移均呈降低趋势。在盆栽结束时各处理总酸溶性铝浓度均低于原赤红壤中总酸溶性铝浓度,这种降低趋势在种植前期(0~10 d)表现最为明显,说明在盆栽初期,部分总酸溶性铝通过络合、淋溶等方式被有效去除<sup>[21]</sup>。总体来看,10% 总酸溶性铝浓度降低最多,达  $6.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而 CK 的总酸溶性铝浓

度降低最少,仅  $3.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,说明赤红壤添加造纸污泥堆肥后,土壤中的总酸溶性铝浓度增加,但在种植过程中,土壤中总酸溶性铝浓度的降低值与土壤堆肥含量成正比,主要是由于造纸污泥堆肥 pH 较高,含有较多的有机质、有效磷等,能有效降低铝的活性<sup>[21-23]</sup>。

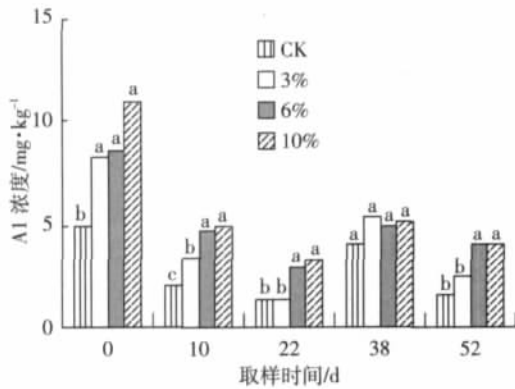


图4 不同取样时间各处理土壤中总酸溶性铝浓度

Figure 4 The total active aluminum concentration of soil for each treatment during maize growth

### 2.5 添加造纸污泥堆肥后土壤中总单核铝的变化

总单核铝浓度代表土壤中高活性铝浓度,具有最强的生物毒性。由图5可见,各处理总单核铝浓度均随堆肥的用量增加而增加,在第0d添加堆肥的处理较CK有显著性差异(除3%——堆肥添加量最少),主要是由于堆肥中的总单核铝浓度远高于赤红壤(表1);在整个盆栽期间,各处理总单核铝浓度的总趋势是下降的,降低幅度分别为CK  $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,3%  $1.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,6%  $3.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,10%  $3.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,降低幅度最大的是6%,最小是CK,说明添加堆肥会提高土壤中高活性铝浓度,但同时土壤体系高活性铝的去除也起到促进作用,主要是由于造纸污泥堆肥含有较高的

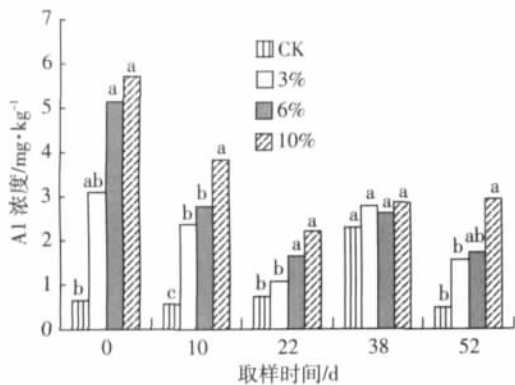


图5 不同取样时间各处理土壤中总单核铝浓度

Figure 5 The most active aluminum concentration of soil for each treatment during maize growth

pH、有机质、有效磷。综合图4和图5结果可见,总单核铝和总酸溶性铝具有相同的变化规律,但总单核铝随种植时间的降低幅度小于总酸溶性铝;总单核铝在总酸溶性铝中占较高比例,分别为CK:15%~53%;3%:44%~98%;6%:44%~71%;10%:47%~89%,说明添加造纸污泥堆肥后,土壤中的活性铝主要以总单核铝的形态存在,这点在农用时需引起注意,其可能存在的铝毒效应将在后续研究成果中介绍。

### 3 结论

(1)添加造纸污泥堆肥能提高酸性土壤的pH值,有效降低土壤酸化度,同时还能显著增加土壤有机质和有效磷含量,改良土壤结构,提高土壤质量,具有明显的生态效益。

(2)盆栽初期,添加造纸污泥堆肥后赤红壤中的总酸溶性铝(活性铝)和总单核铝(高活性铝)浓度较CK均呈显著上升,且上升幅度随堆肥用量的增加而增加,但随着种植时间的推移,各处理(除了CK)总酸溶性铝和总单核铝浓度明显下降,在盆栽结束时各处理总酸溶性铝浓度均低于原赤红壤中总酸溶性铝浓度,说明造纸污泥堆肥由于其含有较高的pH、有机质、有效磷等,农用时具有良好的降低铝活性作用,不会对土壤形成活性铝累积问题。

(3)添加造纸污泥堆肥后,总单核铝是土壤中活性铝的主要存在形态。

#### 参考文献:

- [1] 王德汉, 彭俊杰, 戴苗. 造纸污泥作为肥料资源的评价与农用于试验[J]. 纸和造纸, 2003(3): 47-50.  
WANG De-han, PENG Jun-jie, DAI Miao. The feasibility study of paper mill sludge application in agriculture [J]. *Paper and Paper Making*, 2003(3): 47-50.
- [2] Bevacqua R F, Mellano V J. Crop response to sewage sludge compost a preliminary report[J]. *California Agric*, 1993, 47(3): 22-24.
- [3] Epstem E, Taylor J M, Chaney R L. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties[J]. *J Environ Qual*, 1976, (5): 422-426.
- [4] 武书彬. 造纸工业水污染控制与治理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 124-135.  
WU Shu-bin. Treatment technology for waste water of paper making industry[M]. Chemical Industry Press, 2001: 124-135.
- [5] Cronan C S, Grigal D F. Use of calcium /aluminum ratios as indicators of stress in forest ecosystems[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24: 209-226.
- [6] Sverdrup H, De Vries W. Calculating critical loads for acidity with the simple mass balance method[J]. *Water Air Soil Pollut*, 1994, 72: 143-162.
- [7] Ma J F, Ryan P R, Delhaize E. Aluminum tolerance in plant and the complexing role of organic acids[J]. *Trends in Plant Sci*, 2001(6): 273-278.

- [8] Talor G J. The physiology of aluminum phytotoxicity[C]// H Sigel, A Sigel, eds, metal ions in biological systems. Marcel Dekker, New York, 1988, 24 :123-163.
- [9] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M](第2版). 北京: 科学出版社, 1987 : 39-84, 559-571.  
XIONG Yi, LI Qing-kui. Chinese soil(2nd)[M]. Beijing: Science Press, 1987 : 39-84, 559-571.
- [10] 王维君. 我国南方一些酸性土壤铝存在形态的初步研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(1) :1-8.  
WANG Wei-jun. Study on aluminum forms in some acid soils in south China[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1995, 4(1) :1-8.
- [11] 周少奇, 林云琴, 李端. 造纸污泥交替式好氧厌氧堆肥试验[J]. 中国造纸, 2005(6) :26-30.  
ZHOU Shao-qi, LIN Yun-qin, LI Duan. The alternative aerobic and anaerobic composting of pulp and paper mill sludge[J]. *China Paper*, 2005(6) :26-30.
- [12] 林云琴, 周少奇, 李端. 造纸污泥交替好氧厌氧堆肥中氮素的形态转变研究[J]. 环境卫生工程, 2007(6) :1-5.  
LIN Yun-qin, ZHOU Shao-qi, LI Duan. Investigation on the behavior of nitrogen transition in alternative aerobic and anaerobic composting of pulp and paper mill sludge[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2007(6) :1-5.
- [13] 林云琴, 周少奇, 王德汉. 重金属在土壤-作物体系中的累积行为研究(一)——造纸污泥堆肥农用的重金属污染研究[J]. 中国造纸学报, 2007(2) :35-39.  
LIN Yun-qin, ZHOU Shao-qi, WANG De-han. Accumulation behavior of heavy metals in crops and soil—the pollution of heavy metals caused by using paper mill sludge compost in agriculture[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2007(2) :35-39.
- [14] 林云琴, 周少奇, 王德汉. 施加堆肥后土壤中重金属形态变化研究——造纸污泥堆肥农用的重金属污染研究之二[J]. 中国造纸学报, 2007(12) :51-56.  
LIN Yun-qin, ZHOU Shao-qi, WANG De-han. Study on the chemical forms of heavy metals in soil amendment with compost—the pollution of heavy metals caused by paper mill sludge compost in agriculture(二)[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2007(12) :51-56.
- [15] 李九玉, 徐仁扣, 季国亮. 8-羟基喹啉(pH8.3)分光光度法测定酸性土壤中的可溶性铝[J]. 土壤, 2004, 36(3) :307-309.  
LI Jiu-yu, XU Ren-kou, JI Guo-liang. Determination of soluble Al in acid soil solution using spectrophotometry with 8-hydroxyquinoline at pH 8.3[J]. *Soil*, 2004, 36(3) :307-309.
- [16] 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 :258-296.  
LU Ru-kun. The chemical analysis methods for soil in agriculture[M]. Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000 :258-296.
- [17] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000 :199-201.  
HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Chinese Agriculture Press, 2000 :199-201.
- [18] 李淑仪, 蓝佩玲. 赤红壤磷的有效性研究[J]. 生态环境, 2003, 12(2) :170-171.  
LI Shu-yi, LAN Pei-ling. Activating effects and mechanisms of phosphatic fertilizers in lateritic red soil derived from arenaceous shale[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2) :170-171.
- [19] 肖厚军, 王正银. 酸性土壤铝毒与植物营养研究进展[J]. 西南农业学报, 2006, 19(2) :1180-1188.  
XIAO Hou-jun, WANG Zheng-yin. Advance on study of aluminum toxicity and plant nutrition in acid soils[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 19(2) :1180-1188.
- [20] 雷宏军, 朱端卫, 周问兵, 等. 酸性土壤在改良条件下磷的吸附-解吸特性[J]. 土壤学报, 2004, 41(4) :636-640.  
LEI Hong-jun, ZHU Duan-wei, ZHOU Wen-bing, et al. Phosphorus adsorption-desorption characteristics in acid soils under amendment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4) :636-640.
- [21] 臧小平. 土壤铝毒与植物钙镁营养[J]. 广西农业科学, 1997(2) :80-82.  
ZANG Xiao-ping. Aluminum toxicity in soil and Ca/Mg nutrients to plants[J]. *Agricultural Science of Guangxi*, 1997(2) :80-82.
- [22] 沈翼. 添加污泥堆肥后土壤与根吸收铝的变化研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2008. 6.  
SHEN Yi. Research on aluminum content in maize root and lateritic soil added with papermaking sludge compost[D]. Guangzhou: Bachelor Thesis of South China Agricultural University, 2008. 6.
- [23] 刘振堃. 造纸污泥堆肥农用肥效研究[D]. 广州: 华南农业大学学士学位论文, 2008. 6.  
LIU Zhen-kun. Research on fertilizer effectiveness of paper mill sludge compost applied in agriculture[D]. Guangzhou: Bachelor Thesis of South China Agricultural University Guangzhou, 2008. 6.