

## 生物质灰渣等对红壤性状的影响

谷健云<sup>1</sup>, 崔 健<sup>2,3,4</sup>, 周 静<sup>2,3,4</sup>, 黄界颖<sup>1</sup>, 徐 磊<sup>2,3,4</sup>, 陶志慧<sup>1</sup>, 章力干<sup>1\*</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008;  
3. 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330200; 4. 中国科学院红壤生态实验站, 鹰潭 335211)

**摘 要:** 为评估生物质灰渣等改良剂对红壤酸度的改良效果, 通过土壤培养实验研究了生物质灰渣、磷灰石和石灰 3 种改良剂对红壤酸度的改良效应。结果表明, 3 种改良剂均能提高土壤 pH 和降低土壤交换性  $Al^{3+}$  含量, 其中, 生物质灰渣在培养前期表现差异明显, 随着培养时间延长, 实验设定的生物质灰渣用量对土壤 pH 的影响差异不明显; 石灰和磷灰石用量对土壤 pH 和土壤交换性  $Al^{3+}$  含量影响显著。培养期间, 添加改良剂后土壤 pH 保持上升趋势, 且 pH 增幅随改良剂用量增加而增加。3 种改良剂的施用均可提高土壤 CEC 和土壤交换性钙含量, 用量为  $4500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最大值, 生物质灰渣处理土壤 CEC 提高  $0.90\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤交换性钙提高  $1.11\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 磷灰石处理土壤 CEC 提高  $2.17\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤交换性钙提高  $0.78\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 石灰处理土壤 CEC 提高  $1.85\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤交换性钙提高  $3.47\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。生物质灰渣施用提高土壤速效磷和速效钾含量显著,  $4500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  用量时达到最大值, 分别为  $19.49$  和  $225.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 磷灰石施用提高土壤速效磷含量且随磷灰石用量增加而增加; 石灰施用提高土壤速效磷和碱解氮含量。

**关键词:** 磷灰石; 生物质灰渣; 石灰; pH; 交换性铝; 土壤肥力

中图分类号: S156.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2016)02-0258-08

### Influence of biomass ash as a kind of soil amendment on acidity and fertility of red earth

GU Jianyun<sup>1</sup>, CUI Jian<sup>2,3,4</sup>, ZHOU Jing<sup>2,3,4</sup>, HUANG Jieying<sup>1</sup>, XU Lei<sup>2,3,4</sup>, TAO Zhihui<sup>1</sup>, ZHANG Ligan<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;

3. National Engineering Research and Technology Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200;

4. Red Soil Ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Yingtan 335211)

**Abstract:** In order to investigate the influence of soil amendments on the acidity and fertility of red earth soil, soil incubation experiments were conducted using three soil amendments, apatite, biomass ash, and lime. The results indicated that all the three amendments increased soil pH and decreased exchangeable  $Al^{3+}$  in the order of lime > apatite > biomass ash, with biomass ash only having these effects at the early stage of culture. The application rates of lime and apatite significantly changed soil pH and exchangeable  $Al^{3+}$  contents. There was a significantly positive relationship between soil pH and the application rates of soil amendments, except for biomass ash, whereas a significantly negative correlation between the application rates of soil amendments and exchangeable  $Al^{3+}$  was observed. All the three amendments increased cation exchange capacity (CEC) and soil exchangeable  $Ca^{2+}$ , with the maximum effect reached at the application rate of  $4500\text{ kg}/\text{hm}^2$ . At this optimal rate, compared with the control the application of biomass ash, apatite, and lime increased CEC and soil exchangeable  $Ca^{2+}$  by 0.9 and  $1.11\text{ cmol}/\text{kg}$ ,  $2.17$  and  $0.78\text{ cmol}/\text{kg}$ , and  $1.85$  and  $3.47\text{ cmol}/\text{kg}$ , respectively. The application of biomass ash increased soil available phosphorus and available potassium, with their maxima  $19.49$  and  $225.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively, obtained at the application rate of  $4500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ . Apatite increased soil available phosphorus and a positive relationship was observed between the application rate of apatite and soil available phosphorus. Finally, lime increased alkali-hydrolyzable nitrogen and soil available phosphorus.

**Key words:** apatite; biomass ash; lime; pH; exchangeable aluminum; CEC

收稿日期: 2014-04-24

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2011BAD41B01) 资助。

作者简介: 谷健云, 硕士研究生。E-mail: sandy19900830@163.com

\* 通信作者: 章力干, 副教授。E-mail: zhangligan1965@163.com

土壤酸化是全球土壤资源退化的主要过程之一,也是土壤退化研究的一个重点方向,成为近年来土壤科学研究的前沿和热点之一<sup>[1]</sup>。在高温高湿的自然条件下,红壤的脱硅富铝化作用强烈,土壤溶液中的盐基离子易随水向下移动,氢离子则取代盐基离子,导致土壤的盐基饱和度下降,氢饱和度增加。氢质黏土稳定性不高,晶格结构容易遭到破坏,铝氧八面体解体释放出铝离子,转变成交换性 $Al^{3+}$ 。土壤交换性 $Al^{3+}$ 的水解使土壤表现出酸度特征,一个铝离子( $Al^{3+}$ )水解可以产生1~3个氢离子<sup>[2-3]</sup>。我国华南、华东、华中等地区均有红壤分布,是我国南方地区重要的土壤类型之一。在不合理的施肥模式,环境污染等诸多因素的影响下,红壤酸化问题日趋严重,甚至制约了农业的可持续发展。因此,很多学者开展了不同改良剂对红壤酸度的改良工作,目前已有大量研究围绕磷灰石、石灰等天然矿物改良剂展开。结果表明石灰改良土壤酸性效果明显,但长期单一使用或大量施用会造成土壤板结、有效养分钙化、复酸化等问题<sup>[4-8]</sup>;磷灰石在改良土壤酸性的效果上没有石灰显著,但可为土壤带来矿质养分磷<sup>[9]</sup>,且磷灰石在固定重金属方面效果明显<sup>[10-11]</sup>。考虑到改良土壤酸性的同时提高土壤肥力这一目的,研究者将目光投向了工业副产品,如生物质灰渣、碱渣等。一方面工业副产品含有矿质养分,如生物质灰渣中含有大量钾和硅;另一方面,

随着工业的发展,工业副产品的产量与日俱增,我国每年将产生2000多万t生物质灰渣,迫切需要廉价的处理方法。研究表明碱渣可以替代石灰成为酸性土壤改良剂<sup>[12]</sup>;生物质灰渣可作为钾肥和硅肥应用于农业生产<sup>[13-14]</sup>。目前关于生物质灰渣的研究和资源化利用多局限于化工、建筑等行业,而在酸性土壤改良方面研究较少。为此,作者研究了生物质灰渣、磷灰石和石灰对红壤酸性的改良,探讨生物质灰渣等在改良土壤酸性上的作用效果以及对土壤养分的影响,以期能为生物质灰渣在酸性土壤上利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试土壤来自中国科学院红壤生态实验站的第四纪红黏土发育的旱地红壤,耕层(0~20 cm)土壤pH4.61,全氮 $0.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全磷 $0.44\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全钾 $12.38\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有机质 $10.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷 $25.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $167.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮 $58.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试改良剂为磷灰石,石灰,生物质灰渣,性质见表1。生物质灰渣来自阜阳国祯跨克生态肥业有限公司,主要原材料为农作物秸秆;磷灰石来自湖北省南漳县长白矿化实业有限责任公司;石灰源自当地建材市场。

表 1 改良剂的某些性质及主要组成

Table 1 Major constituents and properties of soil ameliorants

材料性质 Properties of material	磷灰石 Apatite	石灰 Lime	生物质灰渣 Biomass ash
pH	8.85	12.21	8.26
$Fe_2O_3/\%$	0.49	0.20	1.54
$CaO/\%$	25.83	13.76	6.04
$MgO/\%$	4.68	0.58	1.09
$K_2O/\%$	0.26	0.25	3.99
$Na_2O/\%$	0.08	0.48	0.57
$MnO/\%$	0.02	0.00	0.04
$P_2O_5/\%$	23.59	0.03	0.94
$Cl/\%$	0.00	0.03	1.23
$SO_4^{2-}/\%$	ND	ND	0.22
$Cu/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.12	10.11	35.29
$Cd/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.21	1.92	1.96
$Pb/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ND	ND	5.15
$Zn/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16.57	102.26	150.98
$Cr/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.47	35.61	22.30
$As/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ND	ND	ND
$Ni/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	111.77	485.32	177.70
$F/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16.08	118.85	8.48

注: ND 表示未测出。Note: ND means not detected.

## 1.2 方法

生物质灰渣、磷灰石和石灰大田试验分别设 3 个用量: 1500、3000 和 4500 kg·hm<sup>-2</sup>。模拟培养试验称取风干土样 200 g (过 2 mm 筛) 于塑料杯中, 加入供试材料, 用量分别为 0.154 g、0.308 g 和 0.462 g, 充分混匀, 编号为 A1~A3、B1~B3、C1~C3; 不加材料为对照 CK, 每个处理各设 3 次重复。实验期间用去离子水保持土壤含水量为田间持水量的 70%, 塑料杯上覆保鲜膜并开小孔, 于 25℃ 恒温箱中培养 35 d<sup>[12]</sup>, 每 7 d 取 1 次样品。土壤测定项目包括 pH (水:土=2.5:1), 交换性酸(氯化钾浸提), 盐基离子 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 CEC (乙酸铵浸提)<sup>[14]</sup>, 土壤碱解氮, 土壤速效钾 (乙酸铵浸提-火焰光度计测定), 土壤速效磷 (碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法)。改良剂采用离子选择电极、ICP 等方法测定主要化学组成; 质子消耗容量 (PCC) 采用酸碱中和滴定法<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物质灰渣等改良剂及用量对红壤 pH 的影响

土壤 pH 随改良剂种类和用量变化见表 2。生物质灰渣处理在培养初期, 不同用量处理间差异显著, 土壤 pH 分别为 4.67 (1500 kg·hm<sup>-2</sup>), 4.74 (3000 kg·hm<sup>-2</sup>) 和 4.79 (4500 kg·hm<sup>-2</sup>), 培养后期, 生物质灰渣用量对土壤 pH 影响较小。这与生物质灰渣的作用机制有关, 一般生物质灰渣水溶液呈碱性, 试验用生物质灰渣 pH 为 8.26, 施入土壤后生物质灰渣中的碳酸钾与土壤溶液中游离的 H<sup>+</sup> 会发生如

下反应:  $\text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2\uparrow$ , 降低了土壤溶液中 H<sup>+</sup> 的浓度, 从而提高土壤 pH 值。不同生物质灰渣用量的作用过程对培养初期土壤 pH 影响明显, 不同用量之间土壤 pH 差异显著。随着培养时间的延长, 实验设定的生物质灰渣用量对土壤 pH 的影响差异不明显, 这一结果与 Staffan<sup>[16]</sup> 在瑞典松树区域和混合植被区域进行的木灰用量为 3000 kg·hm<sup>-2</sup> 和 6000 kg·hm<sup>-2</sup> 时对矿质层土壤 pH 值提高无显著差异的结果一致。

培养期间, 磷灰石和石灰不同用量处理间则始终表现出明显差异, 各处理间差异达到显著水平。这与磷灰石的和石灰的化学特性和在酸性土壤中发生中和作用的化学机制有关。磷灰石以氟磷灰石 Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>F<sub>2</sub> 居多, 水溶液中与 H<sup>+</sup> 的作用机制可用如下溶解方程式表示:  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2 + 14\text{H}^+ \rightarrow 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{HF}^{[17]}$ ; 石灰水溶液 pH 达 12.21, 施入土壤主要发生如下化学反应  $\text{OH}^- + \text{H}^+ = \text{H}_2\text{O}$ , 消耗土壤 H<sup>+</sup>, 从而提高土壤 pH 值; 磷灰石和石灰的这种中和酸度作用机制持续时间长, 其中和值也远远高于生物质灰渣, 因而对土壤 pH 的影响强于生物质灰渣。3 种改良剂对土壤 pH 值提高大小顺序为石灰>磷灰石>生物质灰渣。培养期间, 土壤 pH 值随磷灰石和石灰用量增加而提高, 均在用量为 4500 kg·hm<sup>-2</sup> 时达到最大值, 分别为 4.93/5.22 (7 d), 4.81/5.11 (14 d), 4.54/4.81 (21 d), 4.64/4.95 (28 d), 4.57/4.86 (35 d), 石灰不同用量处理间差异显著。

表 2 改良剂种类及其用量对土壤 pH 的影响

Table 2 The influence of soil amendment type and application rate on pH value of red earth

编号 Identifier	pH				
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
CK	4.66±0.00 <sup>g</sup>	4.62±0.00 <sup>h</sup>	4.35±0.01 <sup>f</sup>	4.31±0.02 <sup>g</sup>	4.31±0.00 <sup>i</sup>
A1	4.67±0.00 <sup>g</sup>	4.65±0.00 <sup>g</sup>	4.35±0.00 <sup>f</sup>	4.41±0.02 <sup>f</sup>	4.41±0.00 <sup>g</sup>
A2	4.74±0.01 <sup>f</sup>	4.72±0.00 <sup>def</sup>	4.36±0.01 <sup>ef</sup>	4.44±0.01 <sup>e</sup>	4.36±0.00 <sup>h</sup>
A3	4.79±0.00 <sup>e</sup>	4.71±0.00 <sup>ef</sup>	4.38±0.00 <sup>ef</sup>	4.51±0.00 <sup>d</sup>	4.40±0.02 <sup>g</sup>
B1	4.75±0.00 <sup>f</sup>	4.71±0.01 <sup>f</sup>	4.39±0.01 <sup>ef</sup>	4.49±0.00 <sup>d</sup>	4.48±0.00 <sup>f</sup>
B2	4.81±0.03 <sup>e</sup>	4.73±0.00 <sup>de</sup>	4.48±0.00 <sup>d</sup>	4.51±0.01 <sup>d</sup>	4.50±0.00 <sup>e</sup>
B3	4.93±0.00 <sup>c</sup>	4.81±0.01 <sup>c</sup>	4.54±0.01 <sup>c</sup>	4.64±0.00 <sup>c</sup>	4.57±0.00 <sup>d</sup>
C1	4.86±0.00 <sup>d</sup>	4.75±0.00 <sup>d</sup>	4.38±0.01 <sup>ef</sup>	4.65±0.01 <sup>c</sup>	4.62±0.00 <sup>c</sup>
C2	5.05±0.02 <sup>b</sup>	4.92±0.00 <sup>b</sup>	4.60±0.04 <sup>b</sup>	4.80±0.00 <sup>b</sup>	4.77±0.01 <sup>b</sup>
C3	5.22±0.00 <sup>a</sup>	5.11±0.04 <sup>a</sup>	4.81±0.01 <sup>a</sup>	4.95±0.00 <sup>a</sup>	4.86±0.00 <sup>a</sup>

注: A1~A3 表示生物质灰渣 1500、3000 和 4500 kg·hm<sup>-2</sup> 处理, B1~B3 表示磷灰石 1500、3000 和 4500 kg·hm<sup>-2</sup> 处理, C1~C3 表示石灰 1500、3000 和 4500 kg·hm<sup>-2</sup> 处理; 同列数据后不同小写字母分别表示处理间差异达 5% 显著水平。下同。

Note: A1-A3, B1-B3, C1-C3 represented the three use levels of soil conditioners which were biomass ash, apatite and lime at the levels of 1500, 3000 and 4500 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively. Values followed by different small letters in the same column mean significant difference at the 5% level. The same below.

和对照 (CK) 比较, 改良剂种类及其用量对红壤 pH 的增幅影响明显。由表 3 可见, 培养期间, 除 A1 处理在 21d 时的 pH 值异常变化外, 其他处理均表现出明显提高土壤 pH, 在改良剂施入土壤 21d 时, 土壤 pH 增幅最小 (B2、B3 处理除外), 到 28d 时土壤 pH 增幅达最大 (A1 处理除外), 土壤 pH 增幅显著高于培养初期, 3 种改良剂对土壤 pH 的提高呈现出一定的滞后效应。培养 35d 时, 改良剂对土壤 pH 增幅的影响减小, 生物质灰渣 A2 和 A3 处理

的土壤 pH 增幅效应甚至不及初期, 而磷灰石和石灰处理的土壤 pH 增幅仍然明显高于初期, 表明生物质灰渣的滞后效应不及磷灰石和石灰明显。因此 3 种材料作为酸性土壤改良剂施用应适当提前, 尤其是磷灰石和石灰的施用需要时间保证, 以满足播种和幼苗期生长期作物对土壤 pH 的要求。培养期间改良剂种类对土壤 pH 增幅影响大小顺序为: 石灰>磷灰石>生物质灰渣, 而且随改良剂用量增加, 土壤 pH 增幅增加更为明显。

表 3 改良剂种类及其用量对红壤 pH 相对增幅(%)的影响

Table 3 The influence of soil amendment type and application rate on the changing amplitude of red earth pH

编号 Identifier	pH 相对增幅/% Changing amplitude of pH				
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
A1	0.29±0.10 <sup>g</sup>	0.43±0.31 <sup>c</sup>	-0.15±0.11 <sup>e</sup>	2.25±0.59 <sup>f</sup>	2.40±0.11 <sup>g</sup>
A2	1.79±0.20 <sup>f</sup>	1.66±0.37 <sup>d</sup>	0.23±0.38 <sup>de</sup>	2.71±0.89 <sup>f</sup>	1.16±0.19 <sup>h</sup>
A3	2.79±0.18 <sup>e</sup>	1.95±0.53 <sup>d</sup>	0.84±0.11 <sup>de</sup>	4.72±0.50 <sup>d</sup>	2.17±0.29 <sup>g</sup>
B1	1.93±0.00 <sup>f</sup>	1.51±0.47 <sup>d</sup>	0.92±0.19 <sup>d</sup>	4.10±0.50 <sup>e</sup>	3.95±0.00 <sup>f</sup>
B2	3.22±0.81 <sup>e</sup>	2.45±0.62 <sup>d</sup>	3.07±0.29 <sup>c</sup>	4.64±0.78 <sup>de</sup>	4.41±0.00 <sup>e</sup>
B3	5.51±0.26 <sup>c</sup>	3.46±0.94 <sup>c</sup>	3.98±0.38 <sup>c</sup>	7.51±0.81 <sup>c</sup>	6.11±0.12 <sup>d</sup>
C1	4.44±0.36 <sup>d</sup>	2.45±0.21 <sup>d</sup>	0.61±0.54 <sup>de</sup>	7.82±0.90 <sup>c</sup>	7.28±0.12 <sup>c</sup>
C2	8.52±0.26 <sup>b</sup>	6.19±0.29 <sup>b</sup>	5.67±0.94 <sup>b</sup>	11.22±0.67 <sup>b</sup>	10.76±0.22 <sup>b</sup>
C3	12.38±0.36 <sup>a</sup>	10.44±1.09 <sup>a</sup>	10.27±0.27 <sup>a</sup>	14.85±0.65 <sup>a</sup>	12.77±0.20 <sup>a</sup>

注: pH 相对增幅 (%) = 100 × (处理土壤 pH 值 - 空白处理土壤 pH 值) / 空白处理土壤 pH 值

Note: Changing amplitude of pH (%) = 100 × (the soil pH value of soil conditioner treatment - the soil pH value of CK) / the soil pH value of CK.

表 4 改良剂种类及其用量对红壤交换性 Al<sup>3+</sup>含量影响

Table 4 The influence of soil amendment type and application rate on red earth exchangeable aluminum

编号 Identifier	Al <sup>3+</sup> / cmol·kg <sup>-1</sup>				
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
CK	8.32±0.02 <sup>a</sup>	9.05±0.02 <sup>a</sup>	8.41±0.01 <sup>a</sup>	8.74±0.06 <sup>a</sup>	8.41±0.17 <sup>b</sup>
A1	7.88±0.14 <sup>b</sup>	8.92±0.04 <sup>a</sup>	8.09±0.05 <sup>b</sup>	8.33±0.00 <sup>ab</sup>	8.76±0.00 <sup>a</sup>
A2	7.91±0.25 <sup>b</sup>	8.74±0.00 <sup>ab</sup>	8.22±0.25 <sup>ab</sup>	8.09±0.02 <sup>b</sup>	8.59±0.31 <sup>ab</sup>
A3	7.62±0.17 <sup>bc</sup>	8.53±0.02 <sup>b</sup>	8.38±0.06 <sup>a</sup>	7.58±0.14 <sup>c</sup>	8.38±0.10 <sup>b</sup>
B1	7.44±0.05 <sup>c</sup>	8.44±0.09 <sup>b</sup>	7.70±0.03 <sup>c</sup>	8.38±0.04 <sup>ab</sup>	8.33±0.24 <sup>b</sup>
B2	7.65±0.31 <sup>bc</sup>	8.10±0.21 <sup>c</sup>	7.39±0.012 <sup>d</sup>	7.44±0.00 <sup>cd</sup>	8.52±0.02 <sup>ab</sup>
B3	7.03±0.12 <sup>d</sup>	7.82±0.35 <sup>c</sup>	7.39±0.04 <sup>d</sup>	7.27±0.02 <sup>cd</sup>	8.59±0.00 <sup>ab</sup>
C1	6.38±0.02 <sup>e</sup>	7.41±0.07 <sup>d</sup>	7.06±0.04 <sup>e</sup>	7.10±0.22 <sup>d</sup>	6.79±0.11 <sup>c</sup>
C2	4.16±0.31 <sup>f</sup>	5.47±0.04 <sup>e</sup>	4.22±0.04 <sup>f</sup>	5.49±0.55 <sup>e</sup>	5.57±0.04 <sup>d</sup>
C3	2.52±0.00 <sup>g</sup>	2.86±0.26 <sup>f</sup>	2.86±0.20 <sup>g</sup>	3.79±0.32 <sup>f</sup>	4.90±0.04 <sup>e</sup>

## 2.2 生物质灰渣等改良剂及用量对红壤交换性 Al<sup>3+</sup>的影响

土壤交换性 Al<sup>3+</sup>含量随改良剂种类和用量变化见表 4。培养 7d 时, 所有处理交换性 Al<sup>3+</sup>含量均与空白处理间呈现明显差异, 表明 3 种改良剂在培养初期都能显著降低土壤交换性 Al<sup>3+</sup>含量; 与空白处

理比较, 随培养时间的延长, 生物质灰渣及其用量对土壤交换性 Al<sup>3+</sup>含量影响不明显, 而磷灰石处理土壤交换性 Al<sup>3+</sup>含量与对照均呈现显著差异, 但磷灰石不同用量之间对红壤交换性 Al<sup>3+</sup>含量影响无明显差异; 石灰及其不同用量在培养条件下对土壤交换性 Al<sup>3+</sup>含量均有明显影响, 处理间差异显著。3

种改良剂对土壤交换性  $Al^{3+}$  含量降低幅度大小顺序为石灰>磷灰石>生物质灰渣。这种影响差异与不同改良剂及其用量对土壤中铝形态的转化影响机制有关。土壤 pH 是影响土壤交换态铝和吸附态羟基铝的转化的重要因素, pH 提高促进土壤部分交换态铝向非交换态铝的转变, 从而降低土壤交换性  $Al^{3+}$  的含量<sup>[18-21]</sup>, 除培养初期外, 生物质灰渣及其用量对红壤 pH 值的影响不明显, 因而生物质灰渣及其用量对土壤交换性  $Al^{3+}$  含量影响亦不显著; 磷灰石的施用可以提高土壤 pH 值, 但在土壤 pH 6 以下时, 磷酸钙盐施入土壤促进磷酸铁铝盐的形成, 且磷酸铝盐总是倾向于向磷酸铁盐转化<sup>[16]</sup>, 磷灰石用量对土壤交换性  $Al^{3+}$  含量影响不明显与处理条件下磷酸对铝的沉淀作用过程不明显有关。石灰用量增加, 土壤交换性  $Al^{3+}$  含量降低且不同用量处理间差异达到显著水平, 用量为  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最小值, 分别为  $2.52 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (7 d),  $2.86 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (14 d),  $2.86 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (21d),  $3.79 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (28 d),  $4.90$

$\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (35 d)。同一用量条件下, 改良剂种类对降低红壤交换性  $Al^{3+}$  含量影响顺序为石灰>磷灰石>生物质灰渣。

改良剂种类及其用量对红壤交换性  $Al^{3+}$  含量变化幅度的影响见表 5。由表可以看出, 石灰处理土壤交换性  $Al^{3+}$  含量降低幅度最大, 同一时间同一用量下, 石灰处理对土壤交换性  $Al^{3+}$  含量的降低幅度是生物质灰渣的 4~10 倍, 是磷灰石的 2~6 倍, 说明同一用量水平的石灰在降低土壤交换性  $Al^{3+}$  含量方面的能力大于生物质灰渣和磷灰石。改良剂种类对土壤交换性  $Al^{3+}$  含量的变化幅度影响顺序为: 石灰>磷灰石>生物质灰渣。随培养时间延长, 改良剂对土壤交换性  $Al^{3+}$  含量降低幅度有减小的趋势, 其中生物质灰渣处理和磷灰石处理在培养初期土壤交换性  $Al^{3+}$  含量降低幅度明显, 到 35 d 时, 部分处理土壤交换性  $Al^{3+}$  含量升高, 与对照相比, 增幅差异未达到显著水平。

表 5 改良剂种类及其用量对红壤交换性  $Al^{3+}$  相对变化幅度(%)的影响

Table 5 The influence of soil amendment type and application rate on the changing amplitude of red earth exchangeable aluminum

编号 Identifier	$Al^{3+}$ 相对变化幅度/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ Changing amplitude of red earth exchangeable aluminum				
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
A1	-5.26±1.57 <sup>a</sup>	-1.44±0.71 <sup>a</sup>	-3.82±0.45 <sup>b</sup>	-4.66±0.66 <sup>a</sup>	4.22±2.08 <sup>a</sup>
A2	-4.94±2.79 <sup>a</sup>	-3.41±0.23 <sup>ab</sup>	-2.18±3.07 <sup>ab</sup>	-7.46±0.75 <sup>a</sup>	2.16±3.11 <sup>ab</sup>
A3	-8.38±1.86 <sup>ab</sup>	-5.76±0.38 <sup>b</sup>	-0.36±0.67 <sup>a</sup>	-13.22±2.19 <sup>b</sup>	-0.30±0.87 <sup>b</sup>
B1	-10.62±0.59 <sup>b</sup>	-6.67±1.08 <sup>b</sup>	-8.45±0.39 <sup>c</sup>	-4.11±0.94 <sup>a</sup>	-0.93±0.91 <sup>b</sup>
B2	-8.07±3.62 <sup>ab</sup>	-10.49±2.46 <sup>c</sup>	-12.09±1.47 <sup>d</sup>	-14.88±0.57 <sup>b</sup>	1.34±1.93 <sup>ab</sup>
B3	-15.50±1.31 <sup>c</sup>	-13.54±3.80 <sup>c</sup>	-12.09±0.51 <sup>d</sup>	-16.81±0.47 <sup>b</sup>	2.19±2.06 <sup>ab</sup>
C1	-23.32±0.06 <sup>d</sup>	-18.07±0.67 <sup>d</sup>	-15.99±0.35 <sup>de</sup>	-18.79±2.90 <sup>b</sup>	-19.23±2.54 <sup>c</sup>
C2	-49.95±3.69 <sup>e</sup>	-39.53±0.53 <sup>e</sup>	-49.78±0.52 <sup>f</sup>	-37.23±6.07 <sup>c</sup>	-33.76±1.59 <sup>d</sup>
C3	-69.73±0.07 <sup>f</sup>	-68.42±1.12 <sup>f</sup>	-65.93±2.39 <sup>g</sup>	-56.59±3.96 <sup>d</sup>	-41.75±1.02 <sup>e</sup>

注: 交换性  $Al^{3+}$  含量相对变化幅度 (%) =  $100 \times (\text{处理土壤交换性 } Al^{3+} \text{ 含量} - \text{空白处理交换性 } Al^{3+} \text{ 含量}) / \text{空白处理交换性 } Al^{3+} \text{ 含量}$ 。

Note: Changing amplitude of red earth exchangeable aluminum (%) =  $100 \times (\text{the exchangeable aluminum of soil conditioner treatment} - \text{the exchangeable aluminum of CK}) / \text{the exchangeable aluminum of CK}$ .

### 2.3 生物质灰渣等改良剂及用量对红壤速效养分的影响

从 35 d 的土壤培养速效养分的测试结果看, 改良剂种类及其用量对土壤速效养分有明显影响 (图 1)。改良剂种类和用量对土壤碱解氮含量的影响表现不一致 (图 1)。生物质灰渣降低土壤碱解氮含量, 但各用量处理之间差异未达到显著水平; 而石灰能提高土壤碱解氮含量, 且随石灰用量增加土壤碱解氮含量增加, 各用量处理间差异显著。磷灰石处理土壤碱解氮呈现上升趋势, 但与用量间无明显规律,

在施用量为  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最大值  $53.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与石灰施用土壤的碱解氮含量相当。

3 种改良剂显著增加土壤速效磷含量, 土壤速效磷含量基本上呈现随改良剂用量增加而增加的规律 (图 1)。土壤速效磷含量在改良剂施用量  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最大值, 分别为:  $19.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (生物质灰渣)、 $18.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (磷灰石)、 $18.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (石灰), 生物质灰渣施用提升土壤速效磷最高。从 3 种材料的磷含量看, 磷灰石矿质养分磷的含量居 3 种材料之首, 但磷主要以难利用形态矿物态存在,

施入土壤借助土壤中的酸度缓慢释放, 而释放出来的磷又容易被红壤中的粘土矿物吸附或者与红壤中的铁形成磷酸铁沉淀, 因此磷灰石施用以及用量对土壤速效磷影响程度受到制约, 但在培养 35 d 时, 速效磷含量与石灰施用相当; 石灰中磷的含量只有 0.03%, 带入到土壤中的很少, 石灰施入土壤后增加土壤速效磷的含量主要与它可显著提高土壤 pH 有关, 土壤 pH 增加可以促使土壤中磷的活化, 表现为土壤速效磷的提高; 生物质灰渣中磷的含量为 0.94%, 大多以有效磷形态存在, 施入土壤后可转变成土壤速效磷, 且生物质灰渣一定程度上提升土壤 pH 促进土壤磷的释放, 因此土壤速效磷提升最为明显, 其处理的土壤速效磷含量甚至超出磷灰石处理。

3 种改良剂施用均可提高土壤速效钾的含量。生物质灰渣效果显著, 土壤速效钾随其用量增加而增加, 生物质灰渣施用量  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最大值  $225.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图 1); 磷灰石各处理间差异不显著, 磷灰石施用量  $1500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时土壤速效钾含量达  $197.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  最大值; 石灰表现出与磷灰石相似的规律。这种变化规律与 3 种材料的特性有关, 生物质灰渣中矿质养分钾含量居 3 种材料之首, 约为磷灰石和石灰的 16 倍, 土壤速效钾含量的增加主要与其带入的钾有关; 而磷灰石和石灰增加土壤速效钾含量主要与这 2 种材料施用对土壤中钾的转化影响有关。生物质灰渣可同时提高土壤速效钾和速效磷含量的结果与李晶关于生物质灰渣的研究结果一致<sup>[13]</sup>。

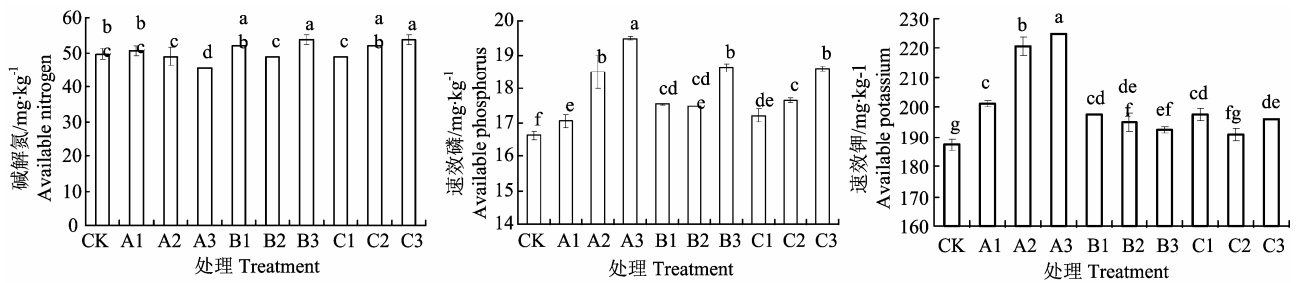


图 1 改良剂种类及其用量对红壤速效养分的影响

Figure 1 The influence of soil amendment type and application rate on red earth nutrients

表 6 改良剂种类及用量对红壤 CEC 和盐基离子的影响

Table 6 The influence of soil amendment type and application rate on red earth CEC and base ion  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$

编号 Identifier	CEC	Ex. $\text{Ca}^{2+}$ (1/2)	Ex. $\text{Mg}^{2+}$ (1/2)	Ex. $\text{K}^{+}$	Ex. $\text{Na}^{+}$
CK	$15.60\pm 0.41^f$	$3.41\pm 0.04^i$	$0.69\pm 0.01^{cd}$	$0.58\pm 0.00^c$	$0.21\pm 0.00^a$
A1	$15.85\pm 0.12^{ef}$	$3.63\pm 0.04^{gh}$	$0.63\pm 0.00^d$	$0.58\pm 0.00^c$	$0.16\pm 0.00^c$
A2	$16.10\pm 0.16^{de}$	$3.66\pm 0.07^g$	$0.66\pm 0.01^{cd}$	$0.61\pm 0.00^b$	$0.19\pm 0.00^b$
A3	$16.50\pm 0.08^d$	$4.52\pm 0.02^d$	$0.78\pm 0.08^b$	$0.66\pm 0.01^a$	$0.19\pm 0.00^b$
B1	$17.05\pm 0.20^{bc}$	$3.54\pm 0.03^h$	$0.65\pm 0.03^{cd}$	$0.58\pm 0.03^c$	$0.19\pm 0.00^a$
B2	$17.20\pm 0.08^b$	$4.07\pm 0.09^f$	$0.71\pm 0.01^{cd}$	$0.58\pm 0.00^c$	$0.16\pm 0.00^b$
B3	$17.77\pm 0.26^a$	$4.19\pm 0.05^e$	$0.89\pm 0.04^c$	$0.54\pm 0.00^d$	$0.19\pm 0.00^c$
C1	$16.27\pm 0.24^{de}$	$4.98\pm 0.07^c$	$0.64\pm 0.01^a$	$0.58\pm 0.00^c$	$0.19\pm 0.02^b$
C2	$16.60\pm 0.00^{cd}$	$5.87\pm 0.01^b$	$0.62\pm 0.01^{cd}$	$0.50\pm 0.01^e$	$0.16\pm 0.00^a$
C3	$17.45\pm 0.29^{ab}$	$6.88\pm 0.01^a$	$0.67\pm 0.03^{cd}$	$0.54\pm 0.00^d$	$0.16\pm 0.00^b$

#### 2.4 生物质灰渣等改良剂及用量对红壤 CEC 和盐基离子的影响

改良剂种类和用量对红壤 CEC 和盐基离子影响明显 (表 6)。改良剂均可提高土壤 CEC 且随改良剂用量增加而增加。改良剂施用量为  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最大值, 分别为  $16.50 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (生物质灰渣)、 $17.77 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (磷灰石)、 $17.45 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (石灰)。这与 3 种改良剂施入土壤后可增加土壤有效负

电荷有关, 从而表现为土壤 CEC 的提高<sup>[22-23]</sup>。土壤交换性  $\text{Ca}^{2+}$  含量有类似趋势, 施用量为  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最大值, 分别为  $4.52 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (生物质灰渣)、 $4.19 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (磷灰石)、 $6.88 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (石灰), 3 种改良剂不同用量条件下均以石灰施用对土壤交换性  $\text{Ca}^{2+}$  含量提升最大。这种变化既与 3 种改良剂的 CaO 含量有关, 也与改良剂在土壤中转化过程有关, 从 3 种改良剂的 CaO 含量看, 磷灰石最高 (23.85%),

远远高于石灰(13.76%)和生物质灰渣(6.04%)。但磷灰石处理土壤交换性  $\text{Ca}^{2+}$  含量较石灰处理低的原因可能是磷灰石在培养期间溶解缓慢,  $\text{Ca}^{2+}$  释放量少。土壤交换性  $\text{Mg}^{2+}$  含量未呈现明显规律性变化, 在改良剂用量  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 磷灰石与生物质灰渣处理土壤交换性  $\text{Mg}^{2+}$  含量与对照有显著差异, 并以磷灰石处理为最高, 石灰处理对土壤交换性  $\text{Mg}^{2+}$  含量影响不明显。生物质灰渣显著影响土壤交换性  $\text{K}^{+}$  含量, 土壤交换性  $\text{K}^{+}$  含量随用量呈增加趋势, 施用量为  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最大值, 为  $0.66 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 磷灰石处理对土壤交换性  $\text{K}^{+}$  含量影响不明显, 石灰处理则呈现下降趋势, 这种变化趋势主要与改良剂  $\text{K}_2\text{O}$  含量有关, 生物质灰渣中矿质养分钾含量约为石灰和磷灰石的 16 倍, 施入土壤后可显著提高土壤交换性  $\text{K}^{+}$  含量。3 种改良剂对土壤交换性  $\text{Na}^{+}$  的影响未见明显规律性。

从生物质灰渣对土壤速效养分和土壤肥力的影响方面看, 生物质灰渣具有明显的优势, 最突出的表现在提升土壤速效钾和速效磷含量, 既能补充红壤钾和磷素的不足, 又能够从营养生理方面提高作物抗性和生物适应性, 弥补了生物质灰渣提升土壤 pH 能力不足的弱点。生物质灰渣和磷灰石中镁的含量相对高于石灰, 生物质灰渣处理土壤交换性镁含量高于石灰处理, 且差异达到显著水平, 这对改善植物镁素营养水平具有重要作用。据报道, 镁素能够促进植物对磷的吸收利用, 有助于提高农产品产量<sup>[24-26]</sup>。石灰施用促进土壤有机质分解可能是土壤碱解氮含量提高的重要影响因素, 也是石灰长期施用导致土壤结构破坏的一个重要原因, 而生物质灰渣和磷灰石尽管在中和土壤酸度方面明显比不上石灰, 但其在提升土壤速效养分含量和改善作物磷、钾营养, 提升酸性土壤上栽培作物的抗性和适应性具有石灰不可替代的优势, 尤其是生物质灰渣所含有的硅以及其他微量元素更具有改善作物微量元素营养作用<sup>[28]</sup>。

石灰和磷灰石在土壤酸度改良上效果优于生物质灰渣, 但石灰和磷灰石均属于天然矿物, 为不可再生资源, 有相应的局限, 而生物质灰渣含有较为全面的养分, 可做钾肥甚至硅肥、锌肥施用<sup>[29]</sup>, 同时其水溶液呈碱性, 也可做酸性土壤改良剂<sup>[12]</sup>。生物质灰渣作为生物质发电厂产生的工业废弃物, 长期大量堆放不仅增加工厂运营成本, 还会造成环境污染。因此, 在实际酸性土壤改良过程, 可综合考虑 3 种改良剂的特性和其在土壤中转化特点以及对土壤养分和肥力的影响, 将 3 种材料混合施用, 既

能改良红壤酸性, 又能提高红壤肥力、改善作物营养、提高作物抗性和生物适应性的目的。

### 3 结论

3 种土壤改良剂均可提高土壤 pH 值, 降低土壤交换性  $\text{Al}^{3+}$  含量; 3 种改良剂对土壤 pH 值提高和土壤交换性  $\text{Al}^{3+}$  含量降低幅度大小顺序为石灰>磷灰石>生物质灰渣。生物质灰渣对红壤 pH 影响不明显; 磷灰石和石灰不同用量处理间则始终表现出明显差异。3 种改良剂对土壤 pH 的提高呈现出一定的滞后效应, 3 种改良剂的施用时间应适当早于播种时间。

改良剂种类及其用量对土壤速效养分有明显影响。生物质灰渣处理明显提高土壤速效磷和土壤速效钾含量, 且土壤速效磷含量基本呈现随改良剂用量增加而增加, 培养 35 d 土壤速效磷含量和土壤速效钾含量均以生物质灰渣施用量为  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  处理为最高, 分别为  $19.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $225.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

改良剂种类和用量对红壤 CEC 和盐基离子影响明显。3 种改良剂均可提高土壤 CEC 且随改良剂用量增加, 其中以磷灰石处理  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 土壤 CEC 最大。改良剂对土壤交换性  $\text{Ca}^{2+}$  含量影响有类似趋势, 以石灰施用对土壤交换性  $\text{Ca}^{2+}$  含量提升最大。土壤交换性  $\text{K}^{+}$  含量随生物质灰渣用量呈增加趋势, 施用量为  $4500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时达到最大值。3 种改良剂对土壤交换性  $\text{Na}^{+}$  影响未见明显规律性变化。

3 种改良剂对红壤酸度都有改良效应, 但从 3 种改良剂的特性和在酸性红壤中转化特点以及其对土壤养分和肥力的影响看, 建议 3 种改良剂配合施用具有最佳环境和经济效应, 具体 3 种改良剂的配比和田间施用方法需要进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] 张桃林, 王兴祥. 土壤退化研究的进展与趋向[J]. 自然资源学报, 2000, 15(3): 280-284.
- [2] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 土壤酸化及酸性土壤的改良和管理[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(23): 48-51.
- [3] 赵其国. 我国红壤的退化问题[J]. 土壤, 1995, 27(6): 281-285.
- [4] 赵妍, 马爱军, 宗良纲, 等. 不同调控措施在强酸性高硒茶园土壤中的应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2306-2312.
- [5] 孟赐福, 傅庆林, 水建国, 等. 浙江中部红壤施用石灰对土壤交换性钙、镁及土壤酸度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 129-136.
- [6] 胡德春, 李贤胜, 尚健, 等. 不同改良剂对棕红壤酸性的改良效果[J]. 土壤, 2006, 38(2): 206-209.

- [7] 邵玉翠, 张余良, 李悦, 等. 天然矿物改良剂在微咸水灌溉土壤中应用效果的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 100-103.
- [8] 解开治, 徐培智, 严超, 等. 不同土壤改良剂对南方酸性土壤的改良效果研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 160-165.
- [9] 胥焕岩, 马成国, 金立国, 等. 磷灰石晶体化学性质及其环境属性应用[J]. 化学工程师, 2011, 3: 34-38.
- [10] 杜志敏, 周静, 郝建设, 等. 4 种改良剂对土壤-黑麦草系统中镉行为的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2728-2732.
- [11] 崔红标, 梁家妮, 范玉超, 等. 磷灰石等改良剂对铜污染土壤的修复效果研究—对铜形态分布、土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 247-252.
- [12] 李九玉, 王宁, 徐仁扣. 工业副产品对红壤酸度改良的研究[J]. 土壤, 2009, 41(6): 932-939.
- [13] 李晶, 杨海征, 胡红青, 等. 生物灰渣对小白菜生长的影响及对酸性土壤的改良[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(4): 822-824.
- [14] NKANA J C V, DEMEYER A, VERLOO M G. Effect of wood ash application on soil solution chemistry of tropical acid soils: incubation study[J]. Bioresource Technology, 2002, 85: 323-325.
- [15] WONG M T F, NORTCLIFF S, SWIFT R S. Method for determining the acid ameliorating capacity of plant residue compost, urban waste compost, farmyard manure, and peat applied to tropical soils[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1998, 29: 2927-2937.
- [16] JACOBSON S, HÖGBOM L, RING E, et al. Effects of wood ash dose and formulation on soil chemistry at two coniferous forest sites [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2004, 158 (1): 113-125.
- [17] 雷涵韞. 三种磷矿粉的结构组成、化学活性及其在稻田土壤中的溶解动态规律[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [18] 杜志敏, 郝建设, 周静, 等. 四种改良剂对铜和镉复合污染土壤的田间原位修复研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 508-517.
- [19] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施 I. 退化状况评价及酸害纠正措施[J]. 土壤, 2000, 4: 198-200.
- [20] 朱宏斌, 王文军, 武际, 等. 天然沸石和石灰混用对酸性黄红壤改良及增产效应的研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 26-29.
- [21] GARRIDO F, ILLERA V, VIZCAYNO C, et al. Evaluation of industrial by-products as soil acidity amendments: chemical and mineralogical implications[J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54 (2): 411-422.
- [22] ILLERA V, GARRIDO F, VIZCAYNO C, et al. Field application of industrial by-products as Al toxicity amendments: chemical and mineralogical implications[J]. European Journal of Soil Science, 2004, 55 (4): 681-692.
- [23] PARK B B, YANAI R D, SAHM J M, et al. Wood ash effects on soil solution and nutrient budgets in a willow bio-energy Plantation[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2004, 159(1): 209-244.
- [24] 谭宏伟, 周柳强, 谢如林, 等. 木薯对氮、磷、钾、镁、锌、硼的吸收特性及施肥效应[J]. 南方农业学报, 2013, 44(1): 81-86.
- [25] 李金玲, 熊寅森, 赵致, 等. 钙镁元素缺乏对何首乌生长发育的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(11): 68-70.
- [26] 吴旭银, 吴贺平, 李彦生, 等. 地膜覆盖花生对钙、镁、硫吸收特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 171-174.
- [27] 张治安, 王振民, 徐克章. 镍对大豆离体叶片衰老的影响[J]. 中国油料作物学报, 2005, 27(2): 46-50.
- [28] 朱敏, 胡心庆, 谢幸华, 等. 叶面喷施硼钼锌对大豆产量和品质的影响[J]. 河北农业科学, 2007, 11(6): 30-32.
- [29] 陈龙, 王敏, 王硕, 等. 生物质灰渣与化肥配施对土壤性质及油菜生长的影响[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(6): 727-733.