

ISSN 0564-3929

# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



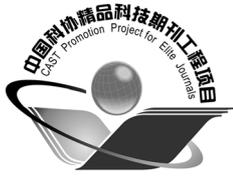
中国土壤学会  
科学出版社

主办  
出版

2015

第52卷 第5期

Vol.52 No.5



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

## 目次

### 综述与评论

- 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析 ..... 宋长青 谭文峰 (957)  
土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应 ..... 吴绍华 虞燕娜 朱江等 (970)

### 研究论文

- 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异 ..... 李玲 张少凯 吴克宁等 (979)  
皖南第四纪红土伊利石结晶度值与风化强度的关系 ..... 刘莉红 胡雪峰 叶玮等 (991)  
青海民和官亭盆地喇家遗址古耕作土壤层微形态研究 ..... 张玉柱 黄春长 庞奖励等 (1002)  
基于成像光谱技术预测氮素在土壤剖面中的垂直分布 ..... 李硕 汪善勤 史舟 (1014)  
基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测 ..... 王升 陈洪松 付智勇等 (1024)  
淮河流域地表干湿变化的时空分布特征 ..... 曹永强 徐丹 曹阳 (1031)  
神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测 ..... 郭明明 王文龙 李建明等 (1044)  
砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究 ..... 赵丹 李毅 冯浩 (1058)  
pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响 ..... 周鑫斌 于淑慧 谢德体 (1069)  
土壤非交换性钾释放动力学特征及其生物有效性 ..... 李婷 王火焰 陈小琴等 (1078)  
生物质灰对红壤酸度的改良效果 ..... 时仁勇 李九玉 徐仁扣等 (1088)  
小麦秸秆生物炭对高氯代苯的吸附过程与机制研究 ..... 李洋 宋洋 王芳等 (1096)  
不同温度玉米秸秆生物炭对萘的吸附动力学特征与机理 ..... 张默 贾明云 卞永荣等 (1106)  
十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫毒性研究 ..... 王赢利 陈建松 阳宇翔等 (1116)  
稻草和三叶草分解对微型土壤动物群落的影响 ..... 王慧 桂娟 刘满强等 (1124)  
沿海区土壤线虫对海水入侵土壤盐渍化的响应 ..... 王诚楠 张伟东 王雪峰等 (1135)  
土壤团聚体 $N_2O$ 释放与反硝化微生物丰度和组成的关系 ..... 周汉昌 张文钊 刘毅等 (1144)  
基于产量、氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例 ..... 王寅 冯国忠 张天山等 (1153)

### 问题讨论

- 中国土壤系统分类基层单元土族建设现状与命名上存在的问题 ..... 易晨 马渝欣 杨金玲等 (1166)

### 研究简报

- 干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响 ..... 吴丽 杨红 兰书斌等 (1173)  
咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响 ..... 李从娟 唐俊妍 高培等 (1180)  
不同 $NaNO_3$ 浓度下可变电荷土壤铜离子解吸率的分配及影响因素 ..... 张政勤 罗文贱 陈勇等 (1188)

封面图片: 不同浓度十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫的毒性 (由王赢利提供)

DOI: 10.11766/trxb201412150652

# 生物质灰对红壤酸度的改良效果\*

时仁勇<sup>1, 2</sup> 李九玉<sup>1</sup> 徐仁扣<sup>1†</sup> 钱薇<sup>1</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 用采自安徽、浙江、湖南和广东的4种红壤和1种赤红壤, 通过室内培养实验研究了添加生物质灰对酸性土壤的改良效果。结果表明, 添加生物质灰提高了土壤pH, 降低了土壤交换性铝含量, 且阳离子交换量(CEC)越小改良效果越明显。改良后土壤交换性K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量也显著增加, 交换性Ca<sup>2+</sup>增幅最大, 其次为交换性K<sup>+</sup>。有效磷含量也有增加, 磷含量较高的土壤有效磷增幅更大。虽然生物质灰含有一定量的重金属, 但由于用量较少, 对土壤有效态重金属含量的影响小, 施用生物质灰的环境风险较小。总之, 添加生物质灰不仅可以有效改良红壤酸度, 还可提高红壤肥力。

**关键词** 生物质灰; 红壤酸度; 土壤改良; 重金属; 环境风险

**中图分类号** S153 **文献标识码** A

红壤是我国南方丘陵地区的主要土壤类型, 是亚热带地区的重要土壤资源<sup>[1]</sup>。但红壤酸性强, 其酸害和铝毒以及较低的肥力水平导致这类土壤上农作物生长不良或产量较低<sup>[2]</sup>。近年来, 由于酸沉降、施肥等原因红壤酸化速率显著加快<sup>[3-5]</sup>, 因此需要对酸化红壤进行改良, 以消除酸害, 提高土壤肥力, 恢复其生产力。施用石灰性物质是改良红壤酸度的传统措施<sup>[6-7]</sup>, 石灰性物质能有效中和土壤酸度, 提高土壤交换性钙含量。但由于石灰的溶解度较小, 其改良效果主要局限于土壤表层, 长期施用还可能造成土壤板结及钙、镁养分失衡<sup>[8-9]</sup>。因此寻找新型改良剂来替代传统改良方法一直是酸性土壤改良的热点之一。

生物质灰是利用生物质(有机废弃物)燃烧发电后的副产品。由于生物质能源来源于光合作用, 属于可再生资源, 对其利用不会相对增加CO<sub>2</sub>的排放, 并且储量大, 因此生物质发电近年在我国开始逐步发展, 同时伴随大量生物质灰的产生。分析表明生物质灰一般呈碱性, 具有较高的pH, 并且生物质灰中含有较多的钙、钾、镁等植物生长所必需的营养元素<sup>[10-11]</sup>, 因此可以预期生物质灰不仅可

以改良红壤酸度, 还可提高土壤肥力。虽然黄兰芬等人用1种酸性红壤初步研究了生物质灰对酸性土壤的改良效果<sup>[12]</sup>, 但生物质灰对于不同酸化红壤的改良效果以及施用生物质灰可能存在的环境风险仍有待研究。本文研究了由杨树皮与稻草和小麦秸秆混合燃烧发电后产生的生物质灰对几种酸性红壤的改良效果, 并初步分析生物质灰中重金属的环境风险。研究结果可为新型酸性土壤改良剂的研发提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤和改良剂

供试土壤为采自安徽郎溪、浙江金华、湖南祁阳的4种红壤和广东广州的1种赤红壤, 均为0~15 cm表层土壤。土样经自然风干后, 研磨过2 mm孔径筛供培养实验用, 过0.25 mm孔径筛供土壤基本性质测定, 供试土壤的基本性质见表1。

所用生物质灰为某生物质发电厂用杨树皮与稻草和小麦秸秆混合燃烧发电后的灰渣。在1:5的悬液中测定的生物质灰的pH为12.28, 电导率为

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB441003)资助

† 通讯作者, E-mail: rkxu@issas.ac.cn

作者简介: 时仁勇(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事酸化红壤修复研究

收稿日期: 2014-12-15; 收到修改稿日期: 2015-04-03

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the soils used

土壤 Soil	采样点 Location	利用方式 Use type	pH	有机质OM (g kg <sup>-1</sup> )	CEC <sup>1)</sup>	交换性酸	交换性盐基阳离子			
						Exchangeable acidity	Exchangeable base cations			
						(cmol kg <sup>-1</sup> )				
						K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
红壤 <sup>①</sup>	安徽郎溪 <sup>③</sup>	农田 <sup>⑦</sup>	4.60	18.0	14.3	4.59	0.31	0.34	3.16	0.63
红壤 <sup>①</sup>	浙江金华 <sup>④</sup>	农田 <sup>⑦</sup>	4.20	14.3	15.1	6.79	0.45	0.08	3.30	0.74
红壤 <sup>①</sup>	浙江金华 <sup>④</sup>	林地 <sup>⑧</sup>	4.52	14.5	12.4	4.07	0.72	0.12	2.28	0.69
红壤 <sup>①</sup>	湖南祁阳 <sup>⑤</sup>	农田 <sup>⑦</sup>	4.23	11.2	11.5	5.15	0.25	0.12	1.67	0.24
赤红壤 <sup>②</sup>	广东广州 <sup>⑥</sup>	林地 <sup>⑧</sup>	4.56	11.9	8.1	3.19	0.02	0.17	0.15	0.10

1) CEC: 阳离子交换量Cation exchange capacity. ①Red soil, ②Lateritic red soil, ③Langxi, Anhui, ④Jinhua, Zhejiang, ⑤Qiyang, Hunan, ⑥Guangzhou, Guangdong, ⑦Farmland, ⑧Forestland

17.73 mS cm<sup>-1</sup>, CEC为123 cmol kg<sup>-1</sup>。用酸溶解和NaOH反滴定法测定<sup>[13]</sup>的生物灰的碱含量为4.92 mol kg<sup>-1</sup>。将生物质灰用硝酸-高氯酸-氢氟酸消解<sup>[14]</sup>, 然后用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定元素含量。K、Na、Ca、Mg、Al、Fe和P含量分别为34.5、5.9、78.1、10.2、4.4、10.1和21.1 g kg<sup>-1</sup>, Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Zn、Hg、As和Se含量分别为3.1、6.6、39.3、43.6、818.6、2.2、17.0、43.3、478.3、0.2、12.5和1.1 mg kg<sup>-1</sup>。

## 1.2 培养实验

培养实验分为两批, 第一批培养实验以安徽红壤为对象研究不同生物质灰添加量对酸化红壤的改良效果, 第二批培养实验研究添加生物质灰对不同红壤的改良效果。

第一批培养实验: 称取300 g过2 mm筛的土壤样品放入塑料杯中, 加入生物质灰并充分混匀, 生物质灰添加量分别为0、4和8 g kg<sup>-1</sup>。用去离子水将土壤含水量调节至田间持水量的60%, 塑料杯用塑料保鲜膜封口, 塑料膜中间留有小孔, 以便气体交换并防止水分损失过大。将塑料杯置于25 °C的恒温培养箱中恒温培养, 每隔三天称重一次并补充水分, 以保证土壤含水量恒定。培养实验共持续60 d, 在培养过程中不定期取新鲜土样测定pH。每个处理设置3次重复。实验结束后将剩余土壤样品取出风干、研磨过2 mm和0.25 mm筛供土壤其他性质测定。

第二批培养实验: 分别称取采自浙江、湖南的3种红壤和广东的赤红壤各300 g, 加入8 g kg<sup>-1</sup>生物

质灰, 充分混匀后装入塑料杯中, 用去离子水将土壤含水量调节至田间持水量的60%, 其他处理同第一批培养实验。以不加生物质灰的处理为对照。

## 1.3 分析方法

将土壤样品按1:2.5的土水比与去离子水充分混合, 放置30 min后用复合pH电极测定土壤pH。土壤交换性酸用1 mol L<sup>-1</sup>氯化钾溶液浸提, 碱滴定法测定。土壤有效磷用盐酸-氟化铵浸提, 钼蓝比色法测定<sup>[14]</sup>。土壤交换性盐基用1 mol L<sup>-1</sup>乙酸铵溶液提取, 提取液中钙和镁用原子吸收分光光度法测定, 钾和钠用火焰光度法测定<sup>[14]</sup>。土壤有效态重金属采用0.1 mol L<sup>-1</sup> HCl溶液浸提, 提取液中重金属用ICP-AES测定。

## 1.4 数据处理

数据分析采用SPSS 20.0软件进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物质灰加入量对安徽红壤改良效果的影响

添加生物质灰后安徽红壤pH的动态变化如图1所示, 三种处理在培养实验前20天, 土壤pH均呈现明显的下降趋势, 20天以后处于平缓状态。此变化过程主要由于安徽红壤采自农田耕层, 其中残留有较高量的铵态氮(54.17 mg kg<sup>-1</sup>), 培养过程中铵态氮发生硝化反应, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>+2O<sub>2</sub>→NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+H<sub>2</sub>O+2H<sup>+</sup>, 此过程释放质子, 导致土壤pH下降。与对照相比, 添加生物质灰显著提高土壤pH, 说明生物质灰对红壤酸度有很好的改良效果。从培养实验期间土壤pH的动态变化可以看出, 生物质灰对红壤酸

度的改良作用能很快见效。添加8 g kg<sup>-1</sup>生物质灰后土壤pH的增加幅度高于添加4 g kg<sup>-1</sup>生物质灰处理, 培养实验结束时土壤pH相对对照分别增加0.68和0.34。由于添加生物质灰提高土壤pH, 也促进了土壤中铵态氮的硝化作用, 导致添加生物质灰处理在培养过程中土壤pH的下降幅度大于对照处理。

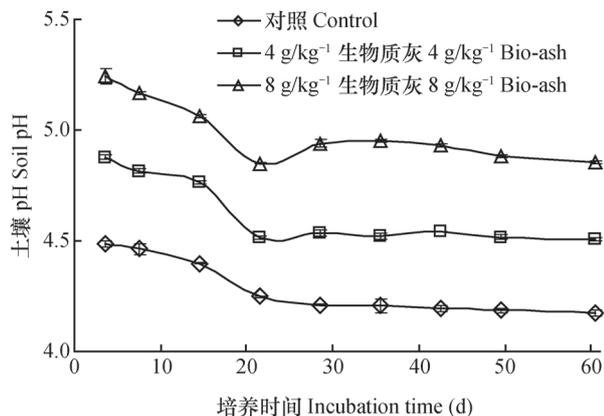


图1 安徽红壤添加不同量生物质灰培养过程中土壤pH的动态变化

Fig.1 Dynamics of soil pH during the incubation of red soil from Anhui as affected by bio-ash application rate

表2结果表明添加生物质灰对土壤交换性H<sup>+</sup>几乎没有影响, 但显著降低土壤交换性铝含量, 随着生物质灰用量增加, 交换性铝降幅增加, 添加4 g kg<sup>-1</sup>和8 g kg<sup>-1</sup>生物质灰使交换性铝相对对照分别降低37%和70%。土壤中交换性酸主要以交换性铝存在, 而交换性H<sup>+</sup>在交换性酸中所占比例很小, 这是生物质灰对交换性H<sup>+</sup>没有影响的主要原因。添加生物质灰后土壤交换性铝的降低幅度与土壤pH升高幅度一致, 说明生物质灰中的碱性物质中和了土壤酸度, 并促进交换性铝的水解和羟基铝化合物沉淀的形成, 从而降低土壤交换性铝含量, 降低铝的活性<sup>[15-16]</sup>。

添加生物质灰后土壤表面交换性K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>均有显著提高(表2), 且提高幅度随生物质灰添加量的增加而增加。添加4 g kg<sup>-1</sup>和8 g kg<sup>-1</sup>生物质灰后, 土壤交换性K<sup>+</sup>分别较对照增加83.9%和129%, 交换性Ca<sup>2+</sup>分别较对照增加53.5%和121%, 交换性Mg<sup>2+</sup>分别增加53.1%和102%。可见添加生物质灰能够有效提高土壤K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等养分的含量。而传统的利用石灰改良酸性土壤, 虽然增加了土壤交换性Ca<sup>2+</sup>的含量, 但是会显著降

表2 添加不同量生物质灰对安徽红壤交换性盐基阳离子和交换性酸的影响

Table 2 Effect of bio-ash on exchangeable base cations and exchangeable acidity of red soil from Anhui relative to bio ash application rate

处理 Treatment	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	ECEC <sup>(1)</sup>
	(cmol kg <sup>-1</sup> )						
对照Control	0.31c	0.32b	3.16c	0.64c	0.11a	4.51a	9.05c
4 g kg <sup>-1</sup> 生物质灰 <sup>①</sup>	0.57b	0.42a	4.85b	0.98b	0.17a	2.84b	9.83b
8 g kg <sup>-1</sup> 生物质灰 <sup>②</sup>	0.71a	0.31b	6.99a	1.29a	0.12a	1.36c	10.78a

注: 同一列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $p < 0.05$ 显著水平 Note: The different lowercase letters affixed to data within the same data column mean significant difference between treatments ( $p < 0.05$ ). ① ECEC: 有效阳离子交换量 Effective cation exchange capacity. ①4 g kg<sup>-1</sup> Bio-ash, ②8 g kg<sup>-1</sup> Bio-ash

低土壤交换性Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>的含量, 造成养分失衡。因此, 生物质灰在农田中施用不会出现像石灰那样造成农田除Ca<sup>2+</sup>外其他阳离子的缺乏, 反而可以显著补充K、Ca、Mg等作物生长所必需的营养元素, 改善酸性红壤养分缺乏的症状。当对不同盐基阳离子的变化进行比较时, 我们发现, 土壤交换性K<sup>+</sup>和交换性Ca<sup>2+</sup>的增幅大于交换性Mg<sup>2+</sup>, 与生物质灰中这3种盐基阳离子含量大小基本一致。由于Na<sup>+</sup>交换能力很小, 而且生物质灰中Na<sup>+</sup>含量较低, 因此添加

生物质灰对土壤交换性Na<sup>+</sup>影响很小。

生物质灰中的K、Ca、Mg主要以氧化物或碳酸盐形态存在, 当生物质灰加入酸性土壤中, 这些碱性物质与酸发生酸碱中和反应并溶解, K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等盐基阳离子释放到土壤溶液中, 随后与土壤交换性铝发生离子交换反应, 促进交换性铝释放并进入土壤溶液。土壤溶液中的Al<sup>3+</sup>随pH升高发生水解反应, 形成羟基铝并进一步随pH升高形成氢氧化铝沉淀。这是生物质灰改良红壤酸度的主要机

制。这一过程使土壤交换性铝显著减小，而土壤交换性盐基阳离子含量和盐基饱和度增加。

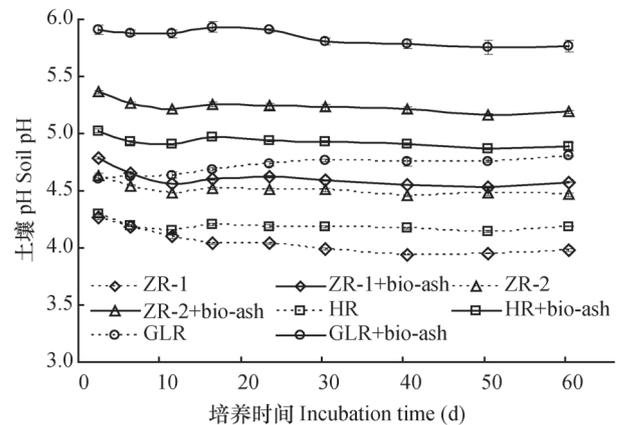
添加生物质灰也提高了土壤有效阳离子交换量（ECEC），且随生物质灰添加量增加土壤ECEC增加。生物质灰本身具有很高的阳离子交换量（CEC： $123 \text{ cmol kg}^{-1}$ ），因此生物质灰可直接提高土壤CEC；另一方面，随着土壤pH升高，红壤可变负电荷数量增加。这两方面原因导致土壤ECEC增加。

研究发现添加生物质灰可提高红壤有效磷含量，当添加 $4 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $8 \text{ g kg}^{-1}$ 生物质灰后，土壤有效磷含量由对照的 $165.7 \text{ mg kg}^{-1}$ 分别提高至 $181.5 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $185.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ，相对对照分别增加9.5%和12%。生物质灰提高土壤有效磷含量的主要原因有两个方面：生物质灰本身含有一定量的磷，添加生物质灰可直接增加土壤有效磷含量；另一方面，添加生物质灰后土壤pH显著升高，降低了活性铁、铝对磷的固定作用<sup>[17-18]</sup>

## 2.2 添加生物质灰对不同红壤的改良效果

选择添加量为 $8 \text{ g kg}^{-1}$ ，研究了生物质灰对4种不同红壤酸度的改良效果。从图2中土壤pH的动态变化结果可以看出，除广东赤红壤外，其他3种红壤的对照和添加生物质灰处理，培养过程的前期均存在土壤pH随培养时间逐渐下降的趋势，与安徽红壤相似，也主要由于残留铵态氮的硝化作用所致。广东赤红壤培养过程中pH变化较平缓，因为广东赤红壤采自竹林，铵态氮含量较少（ $10.90 \text{ mg kg}^{-1}$ ），硝化作用微弱，产酸较少。添加生物质灰提高了4种酸性土壤的pH，但不同土壤pH增加幅度有所不同。培养实验结束时土壤pH的增幅大小顺序为：浙江金华农田红壤<湖南农田红壤≈浙江金华桂花园红壤<广东竹林赤红壤，土壤pH分别提高0.59、0.69、0.72、0.96，与4种土壤阳离子交换量（CEC）的大小顺序基本一致，说明CEC是影响酸性土壤改良的关键土壤因素。本研究所用4种红壤的pH在4.2~5.0范围内，处于阳离子交换缓冲区，因此土壤CEC越大，对酸碱的缓冲能力越强<sup>[19]</sup>。相同改良剂加量下由于广东赤红壤的CEC最低，生物质灰对其改良效果最好。

与安徽红壤中的结果相似，添加生物质灰也显著降低了4种土壤交换性铝含量，对交换性 $\text{H}^+$ 影响很小（表3）。培养实验结束时，浙江金华农田红壤、浙江金华桂花园红壤、湖南农田红壤、广



注：ZR-1表示浙江农田红壤，ZR-2表示浙江桂花园红壤，HR表示湖南红壤，GLR表示广东赤红壤

Note: ZR-1 means red soil collected from a crop land in Zhejiang, ZR-2 means red soil collected from an osmanthus garden in Zhejiang, HR means red soil collected from Hunan, GLR means latosolic red soil collected from Gungdong  
图2 不同红壤添加生物质灰培养过程中土壤pH动态变化  
Fig.2 Dynamics of soil pH during the incubation of red soil amended with bio-ash, relative to type of the soil

东竹林赤红壤交换性铝相对对照分别下降59.7%、92.9%、80.9%和93%，因此添加生物质灰可有效降低这些酸性红壤中铝对植物的潜在毒害。添加生物质灰显著提高4种红壤交换性 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的含量，对交换性 $\text{Na}^+$ 的影响很小（表3），与安徽红壤中的结果一致。培养实验结束时，浙江金华农田红壤、浙江桂花园红壤、湖南农田红壤、广东竹林赤红壤交换性 $\text{K}^+$ 相对对照分别增加115%、83.3%、171%、630%，交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 分别增加102%、133%、217%、1586%，交换性 $\text{Mg}^{2+}$ 分别增加89.3%、100%、365%、986%。虽然生物质灰对不同红壤交换性 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的增加百分比不同，但增加量几乎相同，交换性 $\text{K}^+$ 约增加 $0.6 \text{ cmol kg}^{-1}$ ，交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 约增加 $4 \text{ cmol kg}^{-1}$ ，交换性 $\text{Mg}^{2+}$ 约增加 $0.7 \text{ cmol kg}^{-1}$ ，说明交换性 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的增量主要来自生物质灰含有的K、Ca、Mg。因此生物质灰可改善红壤K、Ca、Mg等养分状况。添加生物质灰显著增加4种红壤的ECEC，广东赤红壤ECEC的增加最显著，说明生物质灰能有效提高ECEC较低土壤的表面负电荷量。

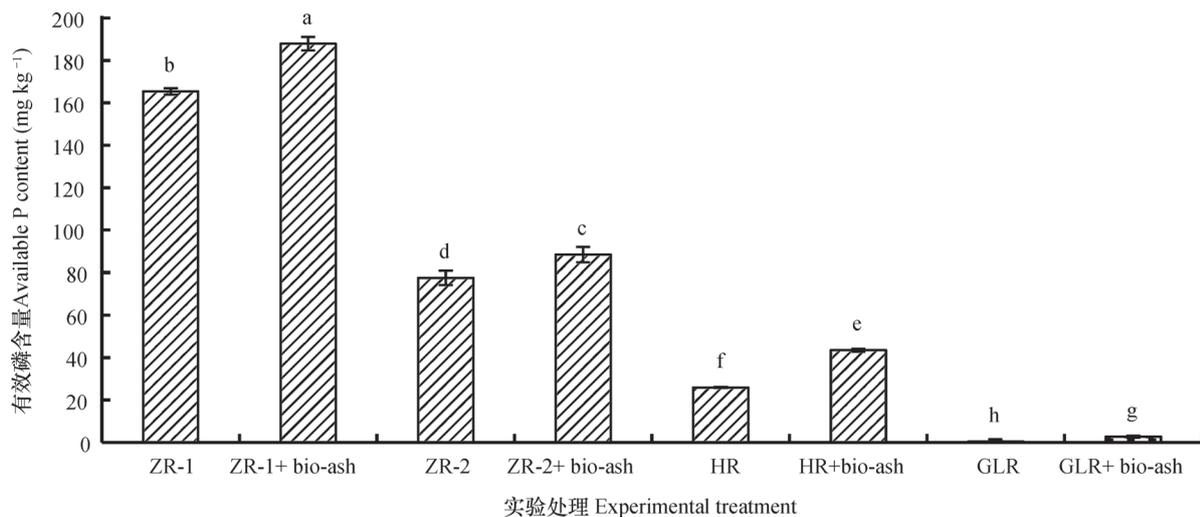
添加生物质灰显著增加4种红壤的有效磷含量，培养实验结束时浙江金华农田红壤、浙江金华桂花园红壤、湖南农田红壤、广东竹林赤红壤有效磷分别增加22.5、10.9、17.7和 $2.25 \text{ mg kg}^{-1}$ 。这一

表3 添加生物质灰对不同红壤交换性盐基阳离子和交换性酸的影响

Table 3 Effect of incorporation of bio-ash on exchangeable base cations and exchangeable acidity in red soils

采样点 Location	利用方式 Use type	处理 Treatment	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	ECEC
			(cmol kg <sup>-1</sup> )						
浙江 <sup>①</sup>	农田 <sup>④</sup>	对照 <sup>⑥</sup>	0.48e	0.38b	3.78d	0.75c	0.25a	6.40a	12.05b
		生物质灰 <sup>⑦</sup>	1.03b	0.25a	7.64a	1.42a	0.08c	2.58d	13.00a
浙江 <sup>①</sup>	林地 <sup>⑤</sup>	对照 <sup>⑥</sup>	0.72d	0.21a	3.12e	0.70d	0.15b	3.81c	8.70e
		生物质灰 <sup>⑦</sup>	1.32a	0.25a	7.26a	1.40a	0.04cd	0.27g	10.55c
湖南 <sup>②</sup>	农田 <sup>④</sup>	对照 <sup>⑥</sup>	0.35f	0.17a	2.01f	0.20e	0.13b	4.35b	7.21f
		生物质灰 <sup>⑦</sup>	0.95c	0.25a	6.38b	0.93b	0.07cd	0.84f	9.41d
广东 <sup>③</sup>	林地 <sup>⑤</sup>	对照 <sup>⑥</sup>	0.10g	0.21a	0.29g	0.07f	0.15b	2.30e	3.12g
		生物质灰 <sup>⑦</sup>	0.73d	0.17a	4.89c	0.76c	0.03d	0.16g	6.74f

注：同一列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $p < 0.05$ 显著水平 Note: The different lowercase letters affixed to data within the same data column mean significant difference between treatments ( $p < 0.05$ ). ①Zhejiang, ②Hunan, ③Guangdong, ④Farmland, ⑤Forestland, ⑥Control, ⑦Bio-ash



注：ZR-1表示浙江农田红壤，ZR-2表示浙江桂花园红壤，HR表示湖南红壤，GLR表示广东赤红壤。小写字母不同表示处理间差异达到 $p < 0.05$ 显著水平 Note: ZR-1 means red soil collected from a crop land of Zhejiang, ZR-2 means red soil collected from an osmanthus garden in Zhejiang, HR means red soil collected from Hunan, GLR means latosolic red soil collected from Gungdong. The different lowercase letters affixed to data within the same column mean significant difference between treatments ( $p < 0.05$ )

图3 添加生物质灰对不同红壤有效磷含量的影响

Fig.3 Effect of incorporation of bio-ash on available phosphorus in red soils

结果说明，生物质灰主要通过提高土壤pH增加土壤有效磷含量，对全磷含量较高的土壤，生物质灰对提高土壤有效磷含量更有效。

### 2.3 添加生物质灰对红壤有效态重金属的影响

表4结果表明，添加生物质灰后，安徽红壤中有效态Cd、Cr、Zn并无显著变化，有效态Zn含量略微升高但并不显著，添加生物质灰后Co、Cu、

Ni、Pb四种重金属的有效态含量较未添加生物质灰者有明显降低。虽然生物质灰中含有较高量的Zn，但添加生物质灰并未使该重金属有效态含量显著升高，主要原因是添加生物质灰使土壤pH升高，降低了Mn、Zn等的活性<sup>[20]</sup>。

分析不同红壤添加生物质灰后重金属有效性的变化(表5)，发现4种红壤添加8 g kg<sup>-1</sup>生物质

表4 添加生物质灰对安徽红壤有效态重金属含量的影响

**Table 4** Effects of bio-ash incorporation on the contents of available heavy metals in the red soil from Anhui (mg kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
对照 Control	0.05a	3.87a	0.10a	2.48a	0.48a	5.98a	4.10a
4 g kg <sup>-1</sup> 生物质灰 <sup>①</sup>	0.05a	2.65b	0.10a	2.32ab	0.42b	5.11b	4.23a
8 g kg <sup>-1</sup> 生物质灰 <sup>②</sup>	0.05a	1.98c	0.10a	2.27b	0.40b	4.89b	4.58a

注：同一列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $p < 0.05$ 显著水平。Note: The different lowercase letters affixed to data within the same data column mean significant difference between treatments ( $p < 0.05$ ). ①4 g kg<sup>-1</sup> Bio-ash, ②8 g kg<sup>-1</sup> Bio-ash

表5 添加生物质灰对不同红壤有效态重金属含量的影响

**Table 5** Effects of bio-ash incorporation on the contents of available heavy metals in the different red soils (mg kg<sup>-1</sup>)

地点 Location	利用方式 Use type	处理 Treatment	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
浙江 <sup>①</sup>	农田 <sup>④</sup>	对照 <sup>⑥</sup>	0.05a	0.40d	0.10b	1.03a	0.25a	6.68d	3.80c
		生物质灰 <sup>⑦</sup>	0.05a	0.35e	0.15a	0.97ab	0.25a	6.23e	5.70b
浙江 <sup>①</sup>	林地 <sup>⑤</sup>	对照 <sup>⑥</sup>	0.05a	0.10f	0.10b	0.88bc	0.20b	7.23c	5.13b
		生物质灰 <sup>⑦</sup>	0.05a	0.10f	0.12b	0.83c	0.20b	7.16c	4.80b
湖南 <sup>②</sup>	农田 <sup>④</sup>	对照 <sup>⑥</sup>	0.05a	1.45a	0.05c	0.85c	0.18b	8.26b	5.12b
		生物质灰 <sup>⑦</sup>	0.05a	0.80b	0.05c	0.87c	0.15c	8.09b	7.13a
广东 <sup>③</sup>	林地 <sup>⑤</sup>	对照 <sup>⑥</sup>	未检出 <sup>⑧</sup>	0.60c	0.05c	0.13d	0.02d	10.96a	0.90e
		生物质灰 <sup>⑦</sup>	未检出 <sup>⑧</sup>	0.80b	0.07b	0.18d	0.05e	10.94a	2.63d

注：同一列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $p < 0.05$ 显著水平。Note: The different lowercase letters affixed to data within the same data column mean significant difference between treatments ( $p < 0.05$ ). ①Zhejiang, ②Hunan, ③Guangdong, ④Farmland, ⑤Forestland, ⑥Control, ⑦Bio-ash, ⑧Not detected

灰后有效态Cd含量无变化，且含量极低。其他重金属在不同土壤的表现不一。浙江农田红壤添加生物质灰后有效态Cr、Zn含量显著增加，而有效态Co、Pb含量显著降低。浙江挂花园红壤中，重金属有效态含量无显著变化。湖南农田红壤中，有效态Zn含量显著升高，有效态Co、Ni含量显著下降。广东赤红壤中，有效态Co、Cr、Ni、Zn含量均显著增加，而有效态Cu、Pb变化并不大。土壤重金属有效态含量受包括pH、CEC、有机质含量、黏粒含量等多种因素的影响，不同的土壤性质差异导致添加生物质灰后重金属有效态含量变化不同。虽然某些土壤添加生物质灰后有效态Zn显著增加，但是生物质灰中Zn含量低于酸性土壤农用污泥污染物控制标准。此外，根据我国《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284-84)规定，污泥用量每年每公顷不得超过30 000 kg，按土壤容重

1.2 g cm<sup>-3</sup>、耕层厚度20 cm计算，农用污泥最大容许添加量约为12.5 g kg<sup>-1</sup>，而本研究添加生物质灰量最大为8 g kg<sup>-1</sup>，要小于农用污泥最大容许添加量。因此，从累积效应考虑，添加生物质灰改良酸性土壤的重金属环境风险较低。添加生物质灰后对其他重金属的有效性影响并不大。

与传统的施用石灰相比，添加生物质灰有明显的优势，不仅可以中和土壤酸度，而且能够有效改善土壤K、P、Ca、Mg的营养状况。而施用石灰虽然显著提高了土壤pH和Ca<sup>2+</sup>含量，但是长期施用容易导致K、Mg、P养分失调，甚至出现土壤板结和复酸化现象。虽然生物质灰中含有一定量的重金属，但含量低于农用污泥标准，且施用量也较少，因此其重金属环境风险小。本研究为酸化土壤改良提供一种新方法，也为生物质电厂产生的大量生物质灰的再利用提供了新途径。

### 3 结 论

由于生物质灰含有碱性物质, 因此添加生物质灰能显著提高酸性红壤的pH, 降低土壤交换性酸含量, 对红壤酸度有较好的改良效果。生物质灰含有丰富的盐基阳离子, 添加生物质灰能增加红壤交换性 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 和有效磷含量, 有效改善土壤K、P、Ca、Mg的养分状况, 同时可以增加酸化红壤的有效阳离子交换量, 提高土壤的保肥能力。虽然生物质灰含有一定量的重金属, 但是由于其含量低于污泥农用标准且用量较低, 重金属环境风险较小。因此, 生物灰具有改良酸化红壤的潜力, 但是实际改良效果还有待田间实验的进一步验证。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 李庆逵. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1983. Li Q K. Red soils in China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1983
- [ 2 ] 张桃林. 中国红壤退化机制与防治. 北京: 中国农业出版社, 1999. Zhang T L. The mechanisms and prevention strategies for the degradation of red-soil in China (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1999
- [ 3 ] 吴甫成, 彭世良, 王晓燕, 等. 酸沉降影响下近20年来衡山土壤酸化研究. 土壤学报, 2005, 42 (2): 219—224. Wu F C, Peng S L, Wang X Y, et al. Soil acidification caused by acid precipitation in MT. Hengshan over last 20 years (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (2): 219—224
- [ 4 ] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. Science, 2010, 327 (5968): 1008—1010
- [ 5 ] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的pH演变. 土壤学报, 2013, 50 (6): 1109—1116. Meng H Q, Liu J, Xu M G, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (6): 1109—1116
- [ 6 ] Adams F. Soil acidity and liming. 2nd ed. Agronomy Monograph 12. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America, 1984
- [ 7 ] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 土壤酸化及酸性土壤的改良和管理. 安徽农学通报, 2007, 13 (23): 48—51. Wang N, Li J Y, Xu R K. Soil acidification, acid soil amelioration and management (In Chinese). Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 13 (23): 48—51
- [ 8 ] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 51 (2): 123—137
- [ 9 ] 张效朴, 郑根宝. 连续施石灰对作物生长及其养分吸收的影响. 土壤学报, 1987, 24 (4): 343—351. Zhang X P, Zheng G B. Effect of continuous liming on crop growth and their absorption of nutrients (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1987, 24 (4): 343—351
- [ 10 ] Mozaffari M, Rosen C J, Russelle M P, et al. Chemical characterization of ash from gasification of alfalfa stems: Implications for ash management. Journal of Environmental Quality, 2000, 29 (3): 963—972
- [ 11 ] Mozaffari M, Russelle M P, Rosen C J, et al. Nutrient supply and neutralizing value of alfalfa stem gasification ash. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66 (1): 171—178
- [ 12 ] 黄兰芬, 李九玉, 陈中华, 等. 碱渣和生物质灰配施改良酸性土壤的效果初探. 中国南方果树, 2014, 43 (4): 65—67. Huang L F, Li J Y, Chen Z H, et al. The primary exploration on amelioration effects of alkaline slag combined with bio-ash on acid soil (In Chinese). South China Fruits, 2014, 43 (4): 65—67
- [ 13 ] Slattey W J, Ridley A M, Windsor S M. Ash alkalinity of animal and plant products. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1991, 31 (2): 321—324
- [ 14 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [ 15 ] Li J Y, Wang N, Xu R K, et al. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation. Pedosphere, 2010, 20 (5): 645—654
- [ 16 ] 李九玉, 王宁, 徐仁扣. 工业副产品对红壤酸度改良的研究. 土壤, 2009, 41 (6): 932—939. Li J Y, Wang N, Xu R K. Amelioration of industrial by-products on soil acidity in red soil (In Chinese). Soils, 2009, 41 (6): 932—939
- [ 17 ] Arai Y, Sparks D L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: A multiscale approach. Advances in Agronomy, 2007, 94: 135—179
- [ 18 ] 马良, 徐仁扣. pH和添加有机物料对3种酸性土壤中磷吸附-解吸的影响. 生态与农村环境学报, 2010, 26 (6): 596—599. Ma L, Xu R K. Effects of regulation of pH and application of organic material on adsorption and desorption of phosphorus in three types of acid soils (In Chinese). Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26 (6): 596—599
- [ 19 ] Ulrich B. Natural and anthropogenic components of soil

- acidification. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1986, 149 (6) : 702—717
- [20] 丁炳红, 俞巧刚, 叶静, 等. 土壤重金属有效性影响因素及其防治对策. 浙江农业科学, 2012 (5) : 729—732. Ding B H, Yu Q G, Ye J, et al. The influence factors of soil heavy metal availability and countermeasures (In Chinese). Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2012 (5) : 729—732

## EFFECTS OF BIO-ASH AMELIORATING RED SOIL IN ACIDITY

Shi Renyong<sup>1, 2</sup> Li Jiuyu<sup>1</sup> Xu Renkou<sup>1†</sup> Qian Wei<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In this study, 4 types of red soils and a lateritic red soil collected from Anhui, Hunan, Zhejiang and Guangdong were used in an indoor incubation experiment to investigate effects of bio-ash ameliorating these soils in acidity. The bio-ash was produced by the burning of poplar skin mixed with rice and wheat straws in a power plant. Results show that application of bio-ash increased soil pH, decreased soil exchangeable  $\text{Al}^{3+}$ . The ameliorating effect of  $8 \text{ g kg}^{-1}$  bio-ash on soil acidity was better than that of  $4 \text{ g kg}^{-1}$  bio-ash, and the effects were more pronounced when soil cation exchange capacity (CEC) was lower. Because the pHs of the five soils were in the range from 4.2 to 5.0 in which soil acidity was buffered by cation exchange reactions, therefore CECs of soils had important influences on ameliorating effect of the bio-ash on soil acidity. The soil with the higher CEC had the greater buffering capacity to acid, thus the pH of the soil was more difficult to be increased. The increase in pH for different soils due to the incorporation of the bio-ash followed the order: the red soil from crop land in Zhejiang < the red soil from crop land in Anhui < the red soil from osmanthus garden in Zhejiang  $\approx$  the red soil from crop land in Hunan < the lateritic red soil from forest in Guangdong, which was opposite to the changing trend of CECs for these soils. The lateritic red soil from Guangdong with the minimum CEC obtained the greatest increase of soil pH by 1.1 pH units after the bio-ash incorporated; while the maximum CEC of the red soil from crop land in Zhejiang led to the minimum increase in soil pH by 0.59 pH units. The contents of exchangeable  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in these acid soils were also significantly increased due to the incorporation of the bio-ash. The soil exchangeable  $\text{K}^+$  was increased by  $0.40 \sim 0.63 \text{ cmol kg}^{-1}$ , the exchangeable  $\text{Ca}^{2+}$  was increased by  $1.93 \sim 2.57 \text{ cmol kg}^{-1}$ , and the exchangeable  $\text{Mg}^{2+}$  was increased by  $0.30 \sim 0.36 \text{ cmol kg}^{-1}$ . Therefore, the effect was the highest with soil exchangeable  $\text{Ca}^{2+}$  and then soil exchangeable  $\text{K}^+$ . The content of available phosphorus also increased in these soils, particular in soils high in P content. Although bio-ash contains a certain amount of heavy metals, the application of bio-ash would not have much impact on contents of available heavy metals in the soil because of its low application rate. Therefore, the environmental risk of bio-ash application in acidic red soils is small. To sum up, application of bio-ash will not only effectively ameliorate red soil in acidity, but also improve red soil in fertility.

**Key words** Bio-ash; Acidity of red soil; Soil amelioration; Heavy metal; Environmental risk

(责任编辑: 陈德明)

CONTENTS

**Reviews and Comments**

- The historical venation of soil science in the past 30 years—Based on the bibliometric analysis ..... Song Changqing, Tan Wenfeng ( 968 )  
 Soil ecosystem services: Concept, quantification and response to urbanization ..... Wu Shaohua, Yu Yanna, Zhu Jiang, et al. ( 977 )

**Research Articles**

- Analysis on spatial-temporal variability of soil organic matter in Henan Province based on Soil Taxonomy ..... Li Ling, Zhang Shaokai, Wu Kening, et al. ( 989 )  
 Relationship between illite crystallinity ( IC ) value and weathering degree of Quaternary Red Clay in southern Anhui Province, Southeast China ..... Liu Lihong, Hu Xuefeng, Ye Wei, et al. ( 1000 )  
 Micromorphology of ancient plow layer of paleosol in the Lajia Ruins in the Guanting Basin, Minhe County, Qinghai Province ..... Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. ( 1013 )  
 Prediction of vertical distribution of soil nitrogen content in soil profile using spectral imaging technique ..... Li Shuo, Wang Shanqin, Shi Zhou ( 1022 )  
 Estimation of thickness of soil layer on typical karst hillslopes using a ground penetrating radar ..... Wang Sheng, Chen Hongsong, Fu Zhiyong, et al. ( 1030 )  
 Spatio-temporal distribution of dry-wet alteration in surface soil layer of the Huaihe River Basin ..... Cao Yongqiang, Xu Dan, Cao Yang ( 1042 )  
 Erosion on dunes of overburden and waste slag in Shenfu coalfield and prediction ..... Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. ( 1056 )  
 Dynamics of soil water evaporation from soil mulched with sand-gravels in stripe ..... Zhao Dan, Li Yi, Feng Hao ( 1067 )  
 Effect of pH and three kinds of anions on selenium absorption and desorption in purple soil ..... Zhou Xinbin, Yu Shuhui, Xie Deti ( 1076 )  
 Release kinetics and bioavailability of nonexchangeable potassium in soil ..... Li Ting, Wang Huoyan, Chen Xiaoqin, et al. ( 1086 )  
 Effects of bio-ash ameliorating red soil in acidity ..... Shi Renyong, Li Jiuyu, Xu Renkou, et al. ( 1095 )  
 Effect of wheat straw biochar on high chlorinated benzene sorption process and mechanism ..... Li Yang, Song Yang, Wang Fang, et al. ( 1104 )  
 Sorption kinetics and mechanism of naphthalene on corn-stalk-derived biochar with different pyrolysis temperature ..... Zhang Mo, Jia Mingyun, Bian Yongrong, et al. ( 1114 )  
 Toxicity of deca-brominated diphenyl ether to *Caenorhabditis elegans* ..... Wang Yingli, Chen Jiansong, Yang Yuxiang, et al. ( 1122 )  
 Effects of clover and straw decomposition on soil microfaunal community ..... Wang Hui, Gui Juan, Liu Manqiang, et al. ( 1133 )  
 Response of soil nematodes to soil salinization induced by seawater intrusion in coastal areas ..... Wang Chengnan, Zhang Weidong, Wang Xuefeng, et al. ( 1142 )  
 Relationships of N<sub>2</sub>O emission with abundance and composition of denitrifying microorganisms in soil aggregates ..... Zhou Hanchang, Zhang Wenzhao, Liu Yi, et al. ( 1151 )  
 Optimizing blending ratio of controlled release N fertilizer for spring maize based on grain yield, N efficiency, and economic benefit ..... Wang Yin, Feng Guozhong, Zhang Tianshan, et al. ( 1164 )

**Communications and Comments**

- Status quo and problems in setting-up and naming of basic taxon-Soil family in Chinese Soil Taxonomy ..... Yi Chen, Ma Yuxin, Yang Jinling, et al. ( 1172 )

**Research Notes**

- Effects of drought and rehydration on photosynthetic characteristics of artificial algal crusts ..... Wu Li, Yang Hong, Lan Shubin, et al. ( 1179 )  
 Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along desert highways ..... Li Congjuan, Tang Junyan, Gao Pei, et al. ( 1186 )  
 Distribution of Cu ( II ) desorption rate in variable charge soils relative to concentrations of NaNO<sub>3</sub> and its affecting factors ..... Zhang Zhengqin, Luo Wenjian, Chen Yong, et al. ( 1194 )

**Cover Picture:** Toxicity of deca-brominated diphenyl ether ( BDE-209 ) to *Caenorhabditis elegans* ( by Wang Yingli )

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

## 土 壤 学 报

### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

## ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 5 Sep., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会  
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008  
电话: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica  
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China  
Tel: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正  
主 管 中 国 科 学 院  
主 办 中 国 土 壤 学 会  
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng  
Superintended by Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Soil Science Society of China  
Undertaken by Institute of Soil Science,  
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社  
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司  
总发行 科 学 出 版 社  
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717  
电话: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company  
Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China  
Tel: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation  
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156