

# 四种改良剂对酸性黄壤土壤酸度和肥力的影响

李阳<sup>1,2</sup>, 李心清<sup>1\*</sup>, 王兵<sup>1</sup>, 王倩<sup>1,2</sup>, 程红光<sup>1</sup>,  
程建中<sup>1</sup>, 张立科<sup>1,2</sup>, 黄一敏<sup>1,2</sup>, 吴维<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对贵州黄壤酸和瘠的特点, 采用正交实验设计方法对牛粪、生物炭、磷矿粉和钾长石粉四种改良剂对黄壤酸度和氮磷钾含量的改良效果进行了探索, 分析了它们对黄壤氮磷钾含量的影响。结果显示, 四种改良剂不仅能有效调节黄壤酸度, 将酸性黄壤改变为中性或弱碱性土壤, 而且能够有效改善黄壤氮磷钾养分含量。生物炭、牛粪、磷矿粉和钾长石粉混合施用能提高土壤肥力, 与原始黄壤相比, 混合后土壤的有效氮提升近 10 倍, 有效磷提高达百倍, 速效钾提高 9 倍。通过回归分析, 给出了氮磷钾养分含量与改良剂之间的关系式。

**关键词:** 黄壤; 改良剂; 酸度; 氮磷钾; 正交实验设计

中图分类号: S153 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2016)06-0683-08 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.06.013

酸性土壤广泛分布在我国热带和亚热带地区。云、贵、川三地的酸性土壤面积约  $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占全国酸性土壤总面积的 21% 左右<sup>[1]</sup>, 是我国酸性土壤分布的主要区域。黄壤是酸性土壤的代表性土壤之一。全国有黄壤  $23.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 以贵州最多, 占黄壤总面积的 30% 以上。黄壤也是贵州省分布最广、面积最大的地带性土壤, 其面积约  $7.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占全省土地总面积的 41.4%。由黄壤开垦来的黄泥土, 占全省旱地总面积的 46.2%; 由黄壤发育成的黄泥田, 占全省稻田面积的 46.3%<sup>[2]</sup>。农业和林业的发展不可避免地需要依赖黄壤土地资源。

酸性土壤的高含量的活性铝会造成植物根系的毒害<sup>[3]</sup>, 其典型特征是根系生长明显受阻, 根短小, 出现畸形卷曲, 脆弱易断。酸性土壤另一个特征是有效性养分低, 主量营养元素氮、磷和钾普遍缺乏, 导致植物的营养供给不足。酸性土壤的第三个特征是土质粘重, 有机质含量低, 易板结。酸性土壤的第四个特征是水肥保持性差, 漏水漏肥严重。概括而言, 我国酸性土壤具有“酸、瘠、毒、板、漏”的特性<sup>[4]</sup>。黄壤 pH 值一般在 4.5~5.5; 总氮

含量约为 0.2% 左右, 总磷一般不到 0.1%, 总钾 1%~1.5%, 速效养分普遍缺乏<sup>[5]</sup>。

为了有效地利用酸性土壤, 许多学者对酸性土壤的改良进行了研究。目前, 改良酸性土壤主要有两种方法。一是运用化学改良剂, 这种方法通过向酸性土壤中施加石灰(石灰粉)、矿物和工业副产品(白云石、磷矿粉、粉煤灰等)改变其性状, 达到作物增产的目的。前人研究发现, 石灰可中和土壤中的活性酸和潜性酸, 显著降低土壤酸度<sup>[6-7]</sup>, 减少土壤对磷的吸附固定<sup>[3,8]</sup>, 但长期或大量施用石灰会造成土壤板结<sup>[9]</sup>, 破坏土壤结构, 引起土壤中钾钙镁等营养元素的失调, 从而使作物减产。近几年, 一些学者将矿物和工业副产品(白云石、磷矿粉、粉煤灰等)应用于酸性土壤改良, 王文军等<sup>[10]</sup>和胡德春等<sup>[11]</sup>研究发现白云石粉能较好地改良酸性土壤, 提高土壤 pH 和交换性钙镁含量, 降低土壤交换性铝含量; 另外, 相关研究表明磷矿粉<sup>[12]</sup>、粉煤灰<sup>[13]</sup>、磷石膏<sup>[14]</sup>等也可作为酸性土壤的改良剂。虽然以上矿物和工业副产品原料充足, 对酸性土壤具有一定的改良效果, 但存在农业成本高, 具有潜在有毒重金属污染等问题。另一种是将有机物料作为改良

收稿日期: 2016-01-20; 改回日期: 2016-03-28

基金项目: 国际科技合作专项(2015DFG92450); 国家自然科学基金项目(41021062、40872212); 贵州省农业攻关计划项目(黔科合 NY 字[2011]3079 号); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070400)和院地合作项目。

第一作者简介: 李阳(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地球化学。E-mail: ly22ly22@163.com.

\* 通讯作者: 李心清(1965-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为环境地球化学和土地利用。E-mail: lee@mail.gyig.ac.cn.

剂。国内外学者研究了不同有机物料包括农作物秸秆、禽畜粪肥、绿肥和草木灰等及其组合对土壤的改良效果,指出它们在增强土壤酸缓冲性能的同时,还能在一定程度上提供作物需要的养分,提高土壤肥力,增加微生物活性<sup>[15-23]</sup>。总体来看,使用单一土壤改良剂存在改良效果不全面和不同程度负面影响等不足之处。以天然材料(特别是工农业废弃物)为原料研制新型多功能土壤改良剂,将不同改良剂配合施用,特别是生物改良剂与工农业废弃物的配合施用,无机固体废弃物与有机固体废弃物的配合施用等进行低产土壤的改良是土壤改良剂研究的热点,近年来引起较多研究者的关注。

生物炭是生物质在无氧或微氧条件下低温热转化后的固体副产物。生物炭作为一种新的土壤改良添加剂,具有较高的 pH,一般呈碱性,可调节土壤的酸碱度,同时还能改善土壤理化性质,促进土壤微生物种群发育和微生物活性,增强保水能力,增加土壤有机碳的含量等,从而促进植物生长<sup>[24-27]</sup>。牛粪是一种很好的生物质资源,含有丰富的有机质和较高的 N、P、K 及微量元素,其质地细密、含水较多、分解慢、发热量低,是一种迟效性肥料,相较于其它禽畜粪便,其产量高、总量大。牛粪直接还田或经堆肥发酵制成肥料还田后,有利于提高土壤的有机质和肥力,改良土壤结构,改善土壤理化环境和微生物环境<sup>[28-30]</sup>。本文以黄壤为酸性土壤代表,利用牛粪、生物炭、磷矿粉、钾长石粉对其酸度和肥力进行调控,通过正交实验评估了四种组分对酸性土壤的改良效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

生物炭:以法国梧桐的枝干为原料,干燥后经粉碎机粉碎,过 2 mm 筛。将梧桐粉末在 500 °C 厌氧下停留 15 min,得到实验所用生物炭。

牛粪:取贵州修文好一多奶牛养殖场粪污经“水冲+固液分离”后的固体部分,风干后备用。

磷矿粉:购自襄阳隆福矿业有限公司(湖北),细度 300 目  $P_2O_5$  含量 25%~32%。

钾长石粉:购自石家庄雨馨建筑材料有限公司(河北灵寿县)细度 100 目。

黄壤:采集自贵州省贵阳市森林公园,非耕作土,过 20 目筛。

### 1.2 实验设计

正交试验法是研究多因素多水平的一种设计

方法,它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点。为了考察牛粪(A)、生物炭(B)、磷矿粉(C)、钾长石粉(D)四种改良剂对黄壤肥力和 pH 的影响,进而确定其对特定植物的最佳配比,本实验采用  $L_{16}(4^5)$  正交实验,其中牛粪、磷矿粉和钾长石粉取 0(w/w)、3%(w/w)、5%(w/w)、10%(w/w) 四个水平;生物炭取 0(w/w)、5%(w/w)、10%(w/w)、15%(w/w) 四个水平,正交实验设计如表 1。依据表 1 中比例将黄壤和 4 种改良剂混合,得到不同水平组合土壤各 1 kg,将该土壤于 25 °C 放置 4 周,然后测定其各项指标,包括总氮磷钾,有效氮磷钾和 pH。

表 1 4 种改良剂对黄壤改良的正交实验设计表

Table 1 Orthogonal experimental design for improving yellow soils by using four amendments %(w/w)

试验号	水平组合	实验条件			
		牛粪 (A)	生物炭 (B)	磷矿粉 (C)	钾长石粉 (D)
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	0	0	0	0
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	0	5	3	3
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>	0	10	5	5
4	A <sub>1</sub> B <sub>4</sub> C <sub>4</sub> D <sub>4</sub>	0	15	10	10
5	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub>	3	0	3	5
6	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>4</sub>	3	5	0	10
7	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>4</sub> D <sub>1</sub>	3	10	10	0
8	A <sub>2</sub> B <sub>4</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub>	3	15	5	3
9	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>4</sub>	5	0	5	10
10	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>4</sub> D <sub>3</sub>	5	5	10	5
11	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	5	10	0	3
12	A <sub>3</sub> B <sub>4</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	5	15	3	0
13	A <sub>4</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub> D <sub>2</sub>	10	0	10	3
14	A <sub>4</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>	10	5	5	0
15	A <sub>4</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	10	10	3	10
16	A <sub>4</sub> B <sub>4</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	10	15	0	5

### 1.3 分析方法

总氮含量采用 CHNS 元素分析仪测定;有效氮含量采用碱解扩散法测定<sup>[31]</sup>;总磷含量采用碱融-钼锑抗分光光度法测定<sup>[32]</sup>;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定<sup>[33]</sup>;总钾含量采用碱融-火焰光度计法测定<sup>[34]</sup>;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定<sup>[35]</sup>;pH 采用精密酸度计(土:水=1:5)测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 黄壤 pH 的变化

四种土壤改良剂在四个施用量水平下 16 个不

同水平组合混合土壤的 pH 变化如图 1 所示。从图中可以看出,按照设计的水平组合混合土壤后,各处理土壤的 pH 较原始黄壤显著提高,分别提高了 2~3 个单位,从初始的 5.26 提高到 7~8 左右。

不同组合 pH 的 K 值分析和方差分析如图 1 所示。由图可见,牛粪、生物炭、磷矿粉和钾长石粉在 K1~K4 四个水平上,土壤 pH 整体上呈递增关系,同时,改良剂 A、C 的 F 比值大于 1,改良剂 B、D 的 F 比值小于 1。综合均值分析和方差分析,各因素影响 pH 的主次顺序为磷矿粉、牛粪、钾长石粉、生物炭,且即磷矿粉和牛粪对 pH 的影响显著,而钾长石粉和生物炭对 pH 有一定影响。正交试验不同水平组合中 pH 较大者,牛粪和磷矿粉的含量都较高;当 pH 最大值 8.07 时(试验号 13),对 pH 影响显著的两个因素牛粪和磷矿粉质量百分比都达到最大 10%,这与分析结果相一致。

## 2.2 总氮磷钾的变化

### 2.2.1 总氮的变化

原始黄壤的总氮(TN)含量为 0.27 g/kg,不同水平组合的总氮含量在 0.8 g/kg~3.45 g/kg 之间,混合后土壤较初始总氮含量提高了 3~13 倍,组合中总氮含量最高值 3.45 g/kg,相应的水平组合为 A<sub>4</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub>(试验号 16),具体组合含量为牛粪 10%、生物炭 15%、磷矿粉 0%、钾长石粉 5%。经均值分析和方差分析(图 2)可知,各因素对总氮含量影响大小的先后顺序为牛粪、生物炭、钾长石粉、磷矿粉,且牛粪和生物炭对总氮含量的影响显著且呈正相

关关系,而磷矿粉和钾长石粉对总氮含量的影响可忽略不计。

利用 SPSS 多元回归分析,对总氮含量进行逐步回归分析得到其回归方程如下:

$$Y = 0.321 + 0.171 * a + 0.082 * b \quad (1)$$

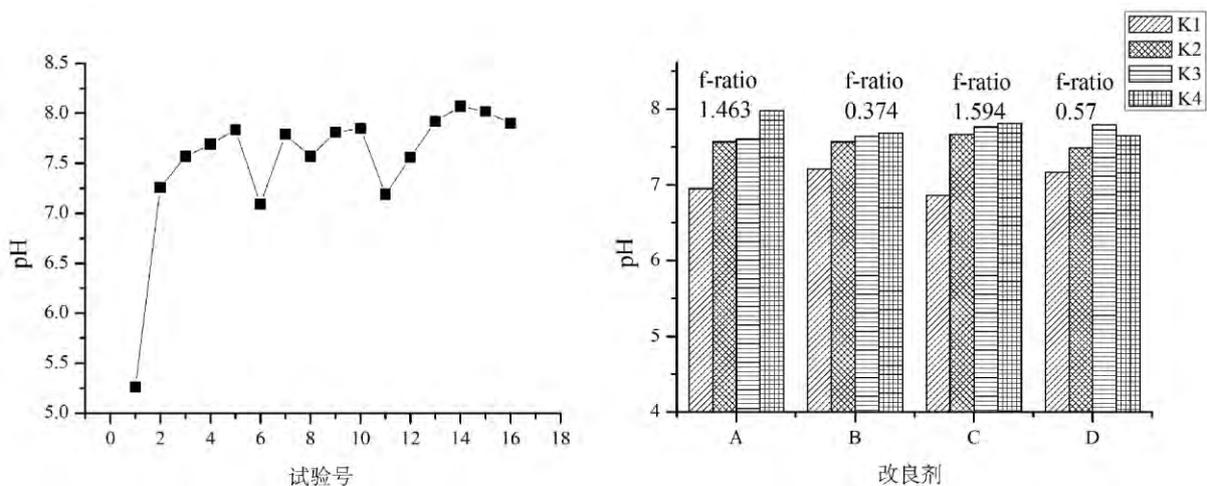
式中, Y 为总氮含量(g/kg), a 为牛粪的质量百分比(%), b 为生物炭的质量百分比(%). 相关系数 R 为 0.989, R<sup>2</sup> 为 0.977, 调整 R<sup>2</sup> 为 0.974, sig 为 0, 方程(1)中 a 和 b 的单位都为质量百分比,因此可通过比较两者的系数判别其影响程度大小。通过该回归方程可知,牛粪和生物炭是引起黄壤总氮含量变化的主要因素,且牛粪的影响程度比生物炭大,与均值分析和方差分析结果一致。

### 2.2.2 总磷的变化

原始黄壤的总磷(TP)含量为 0.07 g/kg,试验中不同水平组合的总磷含量均较原始总磷含量有提高,但差异较大,总磷含量最大的水平组合为 A<sub>1</sub>B<sub>4</sub>C<sub>4</sub>D<sub>4</sub>(试验号 4),即牛粪 0%、生物炭 15%、磷矿粉 10%、钾长石粉 10%,其值为 2.24 g/kg。由均值分析和方差分析可知,各因素对总磷含量影响大小的先后顺序为磷矿粉、牛粪、生物炭、钾长石粉,且磷矿粉对总磷含量的影响特别显著且呈正相关关系,而牛粪、生物炭和钾长石粉对总磷含量的影响可忽略不计。

利用 SPSS 多元回归分析,对总磷含量进行逐步回归分析得到其回归方程如下:

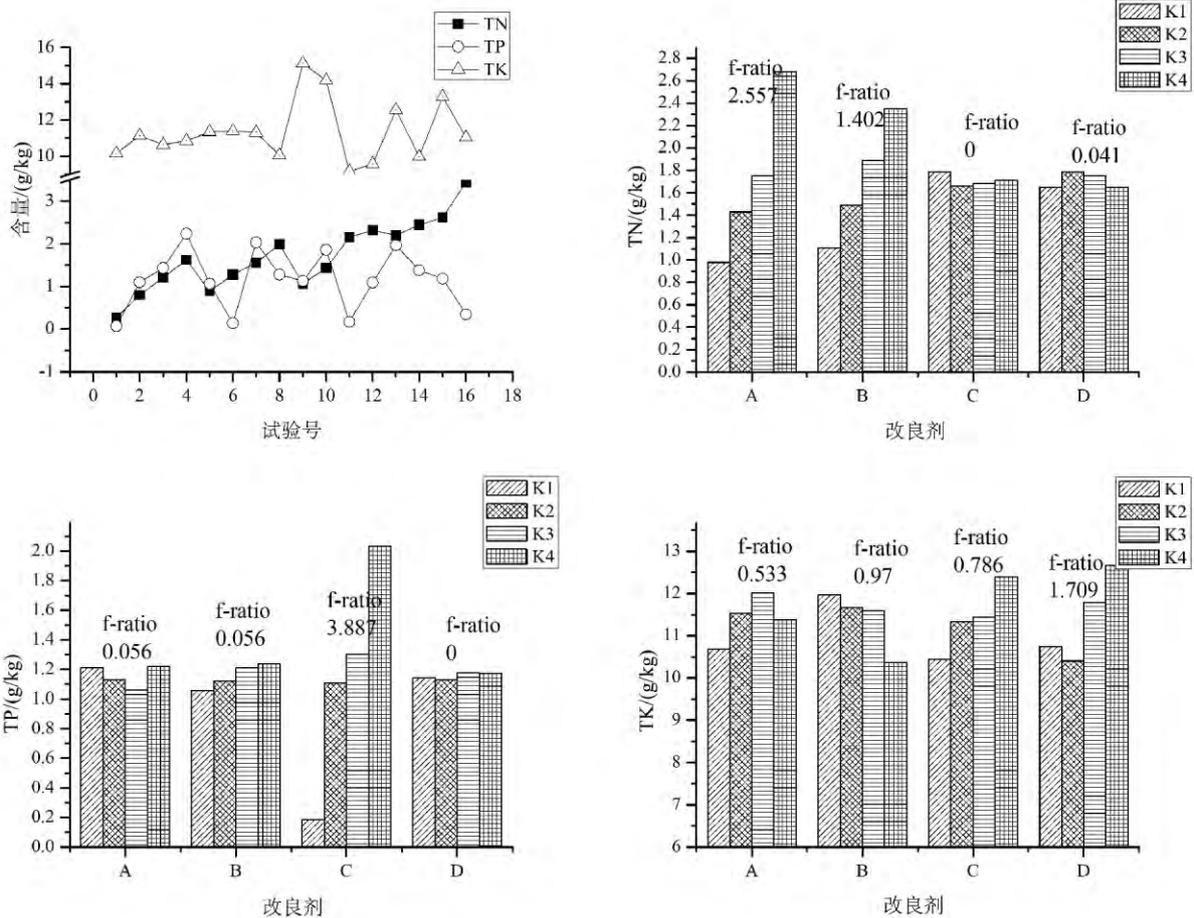
$$Y = 0.367 + 0.176 * c \quad (2)$$



A、B、C、D 依次代表改良剂牛粪、生物炭、磷矿粉和钾长石粉; K1、K2、K3、K4 所对应的水平度分别为 0、3%、5%、10%(因素 ACD)和 0、5%、10%、15%(B); 方差分析通过计算 F 比值,为试验提供了因素显著性检验的标准; f-ratio 是正交实验的方差分析中的 F 比值(自由度=3)

图 1 不同水平组合的 pH 值变化和 K 值分析图

Fig.1 pH values for different orthogonal experiments and K-value analysis of pH



A、B、C、D 依次代表改良剂牛粪、生物炭、磷矿粉和钾长石粉；K1、K2、K3、K4 所对应的水平度分别为 0.3%、5%、10% (因素 ACD) 和 0.5%、10%、15% (B)；方差分析通过计算 F 比值，为试验提供了因素显著性检验的标准；f-ratio 是正交实验的方差分析中的 F 比值(自由度=3)

图 2 不同水平组合的总氮磷钾含量变化和 K 值分析图

Fig.2 TNPK values for different orthogonal experiments and K-value analysis of TNPK

式中  $Y$  为总磷含量 (g/kg)  $a$  为磷矿粉的质量百分比 (%)。相关系数  $R$  为 0.960  $R^2$  为 0.921, 调整  $R^2$  为 0.915  $sig$  为 0, 通过该回归方程可知, 黄壤中总磷的含量由磷矿粉决定, 随着磷矿粉质量百分比的增加, 总磷的含量逐渐增加。

### 2.2.3 总钾的变化

在添加 4 种改良剂之后, 黄壤总钾 (TK) 的含量出现了波动。原始黄壤总钾含量为 10.35 g/kg, 试验中总钾含量最大为 15.13 g/kg, 相应的水平组合为  $A_3B_1C_3D_4$  (试验号 9), 即牛粪 5%、生物炭 0%、磷矿粉 5%、钾长石粉 10%; 总钾含量最小为 9.17 g/kg, 相应的水平组合为  $A_3B_3C_1D_2$  (试验号 11), 即牛粪 5%、生物炭 10%、磷矿粉 0%、钾长石粉 3%。通过均值分析和方差分析图 (图 2) 知, 各因素对总钾含量影响大小的先后顺序为钾长石粉、生物炭、磷矿粉、牛粪, 且钾长石粉对总钾含量的影响显著且呈正相关关系, 生物炭对总钾含量有影响且呈负相关关

系, 而磷矿粉和钾长石粉对总钾含量的影响不明显。

利用 SPSS 多元回归分析, 对总钾含量进行逐步回归分析得到其回归方程如下:

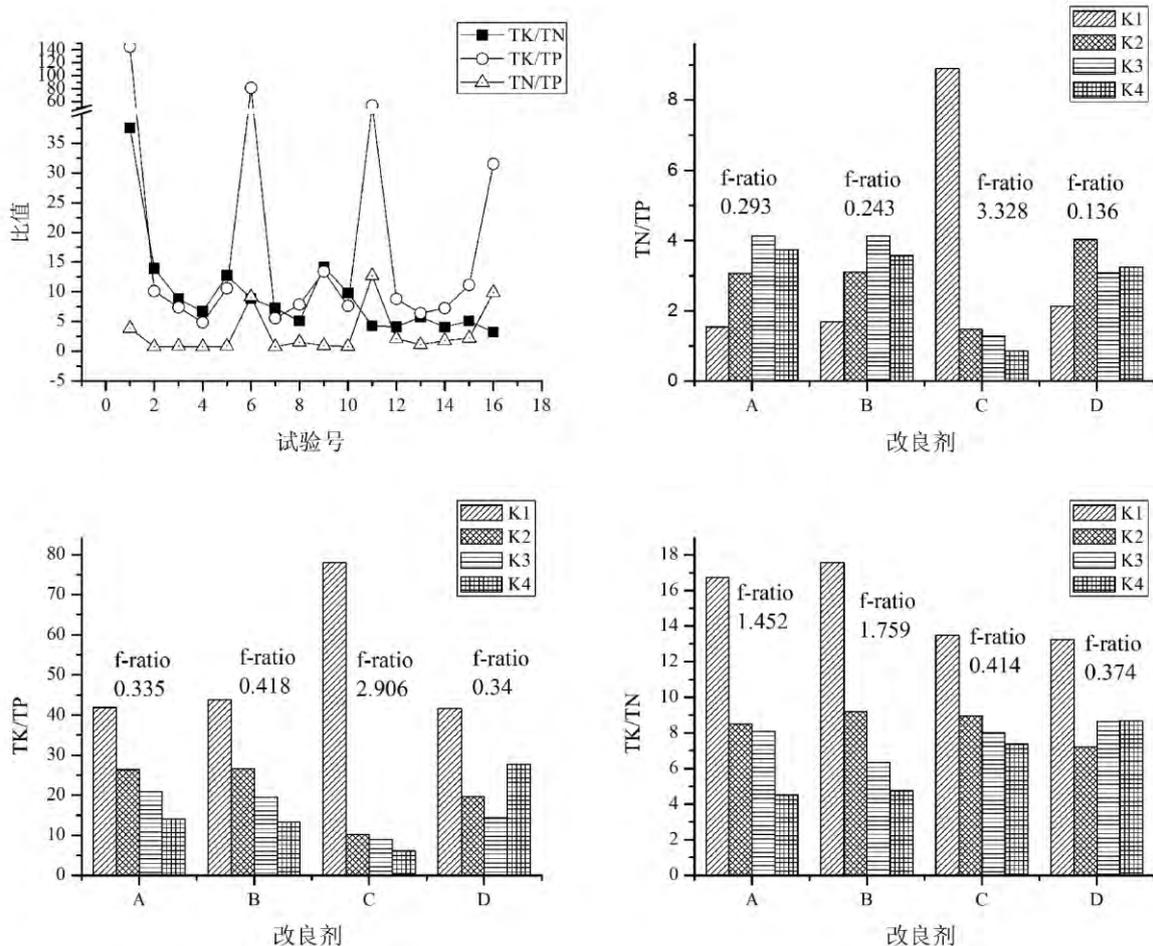
$$Y = 23.873 + 0.112 * d - 0.266 * b - 0.14 * e \quad (3)$$

式中  $Y$  为总钾含量 (g/kg)  $d$  为钾长石粉的质量百分比 (%)  $b$  为生物炭的质量百分比 (%)  $e$  为黄壤的质量百分比 (%)。相关系数  $R$  为 0.847,  $R^2$  为 0.717, 调整  $R^2$  为 0.646,  $sig$  为 0.001, 通过该回归方程可知, 黄壤中总钾含量由钾长石粉、生物炭和黄壤的质量百分比决定, 且与钾长石粉的质量百分比成正相关关系, 与生物炭和黄壤的质量百分比呈负相关关系; 三者对总钾含量的影响程度先后顺序为生物炭、黄壤、钾长石粉。该结果与均值分析和方差分析结果差异较大, 这可能是由于回归方程的  $R^2$  为 0.717, 即该方程对 71.7% 的数据拟合一致的关系。

### 2.3 总氮磷钾比变化

图 3 为不同组合总量氮磷钾比值图和均值分析图。从图 3 可知,不同水平组合的氮磷钾比例具有较大差异,变化幅度大。TK/TN 为 3.20~37.59,变化区间较大。初始黄壤的 TK/TN 为 37.59,在加入不同改良剂后,除水平组合 2,5,9 的比值在 10 以上,其余的比值在 10 以内,其 TK/TN 比明显降低。在 K 值分析中可以看到,TK/TN 随着牛粪、生物炭和磷矿粉水平度的提升而降低,随着钾长石粉水平度的提升则表现为先降后升,表明四种改良剂都能很好的降低黄壤的 TK/TN 比。通过极差值比较,牛粪和生物炭的作用最明显,这正好与 TK/TN 方差分析结果相一致。TK/TP 为 4.85~145,且初始黄壤在与不同水平的改良剂混合之后,TK/TP 大幅下降,从原始比值 145 降低到 81 以下,最低达 4.85。

在 15 个混合土壤中,TK/TP 大于 10 的组合 7 个,小于 10 的组合 8 个。当牛粪、生物炭和磷矿粉的水平度从 K1 到 K4 时,TK/TP 逐渐降低,对钾长石粉而言,则先降低再升高。综合极差值和方差分析可知,磷矿粉对 TK/TP 的影响最大,其次为生物炭,最后为牛粪和钾长石粉。原始黄壤的 TN/TP 为 3.86,在不同的水平组合中 TN/TP 的变化范围在 0.76~12.71 之间,其中大于 3.86 的组合 3 个,小于 3.86 的组合 12 个。在 K 值分析中,混合土壤 TN/TP 随着牛粪、生物炭和钾长石粉水平度升高先升后降,其值在牛粪和生物炭 K3 水平达到最大,在磷矿粉 K2 水平达到最大,且随着磷矿粉的升高而急剧降低。综合极差和方差分析,磷矿粉是导致混合土壤 TN/TP 变化的最重要因素,其它改良剂对 TN/TP 也有影响,但相对磷矿粉影响效果不明显。



A、B、C、D 依次代表改良剂牛粪、生物炭、磷矿粉和钾长石粉; K1、K2、K3、K4 所对应的水平度分别为 0、3%、5%、10% (因素 ACD) 和 0、5%、10%、15% (B); 方差分析通过计算 F 比值,为试验提供了因素显著性检验的标准; f-ratio 是正交实验的方差分析中的 F 比值(自由度=3)

图 3 不同水平组合的总量氮磷钾比值和 K 值分析图

Fig.3 TNPK ratios for different orthogonal experiments and K-value analysis of TNPK ratios

### 2.4 有效氮磷钾的变化

#### 2.4.1 有效氮的变化

土壤有效氮磷钾的分析结果见图4。原始黄壤的有效氮(A-N)含量为9.71 mg/kg,各个水平组合有效氮测定含量均高于原始黄壤,说明牛粪、生物炭、磷矿粉和钾长石粉的添加有效提升了黄壤的有效氮养分含量。试验中有效氮含量最大时相对原始黄壤提升了近10倍,水平组合为A<sub>4</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub>(试验号16),含量为92.26 mg/kg,即牛粪10%、生物炭15%、磷矿粉0、钾长石粉5%,这与总氮含量达到最大值时的水平组合相一致。由均值分析和方差分析可知,四种改良剂的水平度从K1~K4,土壤有效氮含量随牛粪水平度提高而快速提高,约是其它改良剂的10倍;方差分析中,牛粪的F比值为3.87,说明牛粪添加对黄壤有效氮含量的影响特别明显。综合均值分析和方差分析可见,各因素对总有效氮

含量影响大小的先后顺序为牛粪、生物炭、磷矿粉、钾长石粉,且牛粪对有效氮含量的影响极显著且呈正相关关系,而生物炭、磷矿粉和钾长石粉对有效氮含量的影响可忽略不计。

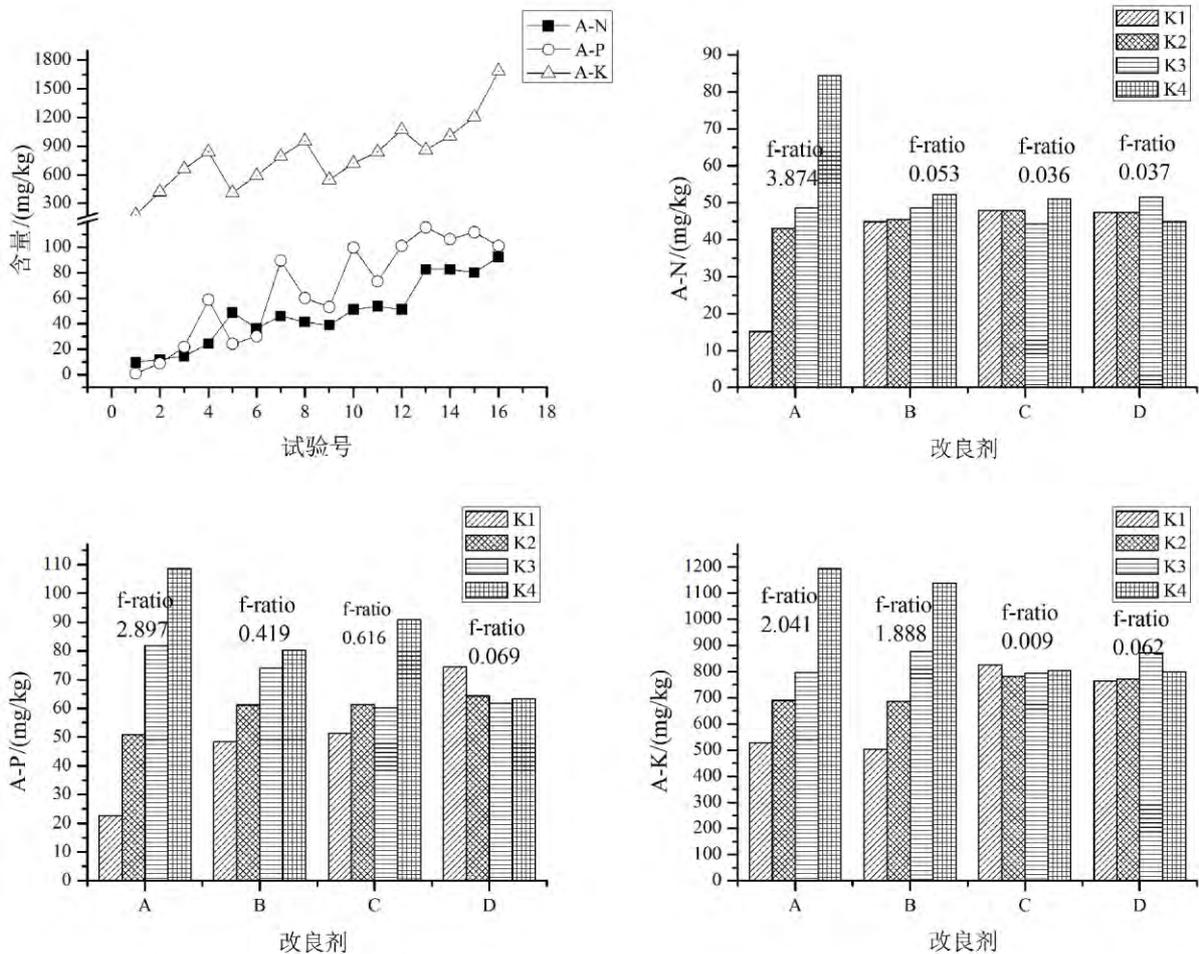
利用SPSS多元回归分析,对有效氮含量进行逐步回归分析得到其回归方程如下:

$$Y = 17.627 + 6.705 * a \quad (4)$$

式中,Y为有效氮含量(mg/kg),a为牛粪的质量百分比(%).相关系数R为0.970,R<sup>2</sup>为0.942,调整R<sup>2</sup>为0.937,sig为0,通过该回归方程可知,黄壤中有效氮含量由牛粪的质量百分比决定,且与牛粪质量百分比成正相关关系,其系数较大,说明随着牛粪的增加黄壤中有效氮的含量升高速度较快。这与均值分析和方差分析结果相一致。

#### 2.4.2 有效磷的变化

原始黄壤的有效磷(A-P)含量为0.981 mg/kg,



A、B、C、D依次代表改良剂牛粪、生物炭、磷矿粉和钾长石粉; K1、K2、K3、K4所对应的水平度分别为0、3%、5%、10%(因素ACD)和0、5%、10%、15%(B); 方差分析通过计算F比值,为试验提供了因素显著性检验的标准; f-ratio是正交实验的方差分析中的F比值(自由度=3)

图4 不同水平组合有效氮磷钾含量和K值分析图

Fig.4 A-NPK values for different orthogonal experiments and K-value analysis of A-NPK

试验中不同水平组合有效磷含量虽各不相同,但均高于其原始含量,说明4种改良剂的添加有效增加了土壤的有效磷养分含量。有效磷含量最大值115.302 mg/kg,相应的水平组合为 $A_4B_1C_4D_2$ (试验号13),即牛粪10%、生物炭0、磷矿粉10%、钾长石3%。由K值分析和方差分析得知,各因素对有效磷含量影响大小的先后顺序为牛粪、磷矿粉、生物炭、钾长石粉,且牛粪对有效磷含量的影响非常显著且呈正相关关系,而磷矿粉和生物炭对有效磷含量有影响且呈正相关关系,钾长石粉对有效磷含量的影响不大。

利用SPSS多元回归分析,对有效磷含量进行逐步回归分析得到其回归方程如下:

$$Y = 0.831 * a + 0.374 * c + 0.32 * b \quad (5)$$

式中, $Y$ 为有效磷含量(mg/kg), $a$ 为牛粪的质量百分比(%), $b$ 为生物炭的质量百分比(%), $c$ 为磷矿粉的质量百分比。相关系数 $R$ 为0.966, $R^2$ 为0.933,调整 $R^2$ 为0.916, $sig$ 为0.001,通过该回归方程可知,黄壤中有效磷含量由牛粪、磷矿粉和生物炭的质量百分比共同决定,且与它们的质量百分比成正相关关系。这与均值分析和方差分析结果相一致。

#### 2.4.3 有效钾的变化

各个水平组合混合土壤中有效钾(A-K)含量相对原始黄壤有较大提高,最大提高近9倍。原始黄壤的速效钾含量为181.85 mg/kg,试验中速效钾含量最大值1687.68 mg/kg,相应水平组合为 $A_4B_4C_1D_3$ (试验号16),即牛粪10%、生物炭15%、磷矿粉0、钾长石粉5%。由K值分析和方差分析得知,各因素对有效钾含量影响大小的先后顺序为牛粪、生物炭、钾长石粉、磷矿粉,且牛粪和生物炭对

有效钾含量的影响显著且呈正相关关系,而磷矿粉和钾长石粉对有效钾含量有影响不大。

利用SPSS多元回归分析,对有效钾含量进行逐步回归分析得到其回归方程如下:

$$Y = 184.828 + 66.931 * a + 42.008 * b \quad (6)$$

式中, $Y$ 为有效钾含量(mg/kg), $a$ 为牛粪的质量百分比(%), $b$ 为生物炭的质量百分比(%).相关系数 $R$ 为0.980, $R^2$ 为0.961,调整 $R^2$ 为0.955, $sig$ 为0,通过该回归方程可知,黄壤中有效钾含量由牛粪和生物炭的质量百分比共同决定,且与它们的质量百分比成正相关关系。这与均值分析和方差分析结果相一致。

### 3 结 论

1) 试验结果表明物炭、牛粪、磷矿粉和钾长石粉混合施用,可以显著提高黄壤的pH,将酸性黄壤改变为中性或弱碱性土壤。

2) 生物炭、牛粪、磷矿粉和钾长石粉混合施用能够改变酸性土壤的营养成分特征,提高土壤肥力。与原始黄壤相比,混合后的土壤的氮磷钾含量显著提高,有效氮含量提升近10倍,有效磷含量提高达百倍,有效钾含量最高值9倍。

3) 四种改良剂对土壤中氮磷钾的供给能力各有差异。牛粪的施用是黄壤中总氮、有效钾、有效磷、有效氮的主要来源,尤其对有效磷含量和有效氮含量具有显著影响;生物炭对黄壤有效钾的含量影响较大,对其它营养元素的提供能力有限;磷矿粉能够有效增加黄壤中总磷的含量,但不能迅速地为黄壤提供有效磷;钾长石粉的添加,则为黄壤中的总钾提供了良好的来源。

### 参 考 文 献

- [1] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机制及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 70-75.
- [2] 贵州省土壤普查办公室. 贵州土种志[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994: 23-65.
- [3] Meng C F, Lu X N, Cao Z H, et al. Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields on a red soil in central Zhejiang [J]. Soil and Plant, 2004, 265(1-2): 101-109.
- [4] 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.
- [5] 苗其硕. 贵州黄壤的利用改良和综合治理[J]. 贵州农业科学, 1982, 10(5): 11-15+5.
- [6] Haling R E, Richardson A E, Culvenor R A, et al. Root morphology, root-hair development and rhizosheath formation on perennial grass seedlings is influenced by soil acidity [J]. Plant and Soil, 2010, 335(1-2): 457-468.
- [7] Houle D, Duchesne L, Moore J-D, et al. Soil and tree-ring chemistry response to liming in a sugar maple stand [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(6): 1993-2000.
- [8] Souza R F D, Faquin V, Andrade A T D, et al. Phosphorus forms in soils under influence of liming and organic fertilization [J]. Revista Brasileira de Ciéncia do Solo, 2007, 31(6): 1535-1544.
- [9] 姜勇, 张玉革, 梁文举. 温室蔬菜栽培对土壤交换性盐基离子组成的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 80-83.

- [10] 王文军,郭熙盛,武际,等.施用白云石对酸性黄红壤作物产量及化学性质的影响[J].土壤通报,2006,37(4):723-726.
- [11] 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.
- [12] 王代长,胡红青,李学垣.酸性土壤上磷矿粉释磷机理与农学效应[J].中国农学通报,2006,22(9):242-245.
- [13] 王娟,熊又升,张志毅,等.粉煤灰在土壤改良和污染治理中研究进展[J].安徽农业科学,2012,40(30):14811-14813.
- [14] Carvalho M, Van Raij B. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth [J]. Plant and Soil, 1997, 192(1): 37-48.
- [15] 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等.不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J].中国农业科学,2013,46(17):3594-3603.
- [16] 姜军,徐仁扣,李九玉,等.两种植物物料改良酸化茶园土壤的初步研究[J].土壤,2007,39(2):322-324.
- [17] Xu R, Coventry D. Soil pH changes associated with lupin and wheat plant materials incorporated in a red-brown earth soil [J]. Plant and Soil, 2003, 250(1): 113-119.
- [18] Yan F, Schubert S. Soil pH changes after application of plant shoot materials of faba bean and wheat [J]. Plant and Soil, 2000, 220(1-2): 279-287.
- [19] Xu J M, Tang C, Chen Z L. The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(4): 709-719.
- [20] Shen Q, Shen Z. Effects of pig manure and wheat straw on growth of mung bean seedlings grown in aluminium toxicity soil [J]. Bioresource Technology, 2001, 76(3): 235-240.
- [21] Shamsuddin J, Muhrizal S, Fauziah I, et al. Effects of adding organic materials to an acid sulfate soil on the growth of cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings [J]. Science of the Total Environment, 2004, 323(1-3): 33-45.
- [22] Norström S H, Bylund D, Vestin J L K, et al. Initial effects of wood ash application to soil and soil solution chemistry in a small, boreal catchment [J]. Geoderma, 2012, 187: 85-93.
- [23] Nkana J V, Demeyer A, Verloo M. Effect of wood ash application on soil solution chemistry of tropical acid soils: incubation study [J]. Bioresource Technology, 2002, 85(3): 323-325.
- [24] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil [J]. Plant and Soil, 2007, 291(1-2): 275-290.
- [25] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1301-1310.
- [26] Sánchez M, Lindao E, Margaleff D, et al. Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflowers: Production and characterization of bio-fuels and biochar soil management [J]. Journal of Analytical and Applied pyrolysis, 2009, 85(1): 142-144.
- [27] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green [J]. Nature, 2006, 442(7103): 624-626.
- [28] 袁立,王占哲,刘春龙.国内外牛粪生物质资源利用的现状与趋势[J].中国奶牛,2011,197(5):3-9.
- [29] 国辉,袁红莉,耿兵,等.牛粪便资源化利用的研究进展[J].环境科学与技术,2013,36(5):68-75+107.
- [30] 王胤晨,袁扬,张锦华,等.牛粪的处理及资源化利用[A].中国畜牧业协会.第十届(2015)中国牛业发展大会论文汇编[C].中国畜牧业协会:2015:7.
- [31] LY/T 1229-1999 森林土壤水解性氮的测定[S].
- [32] HJ 632-2011 土壤总磷的测定碱融-钼锑抗分光光度法[S].
- [33] HJ 704-2014 土壤有效磷的测定碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法[S].
- [34] GB 9836-88 土壤总钾测定法[S].
- [35] NY/T 889-2004 土壤速效钾和缓效钾含量的测定[S].

## Effects of Four Soil Amendments on Improving Soil Quality and Acidity of Yellow Soils

LI Yang<sup>1,2</sup>, LEE Xinqing<sup>1</sup>, WANG Bing<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1,2</sup>, CHENG Hongguang<sup>1</sup>,  
CHENG Jianzhong<sup>1</sup>, ZHANG Like<sup>1,2</sup>, HUANG Yimin<sup>1,2</sup>, WU Wei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** According to the characteristics of acid condition and low fertility of yellow soils from Guizhou Province, China, the orthogonal experimental design method was used to study effects of cow manure, biochar, ground phosphorite and potassium feldspar powders on acidity and NPK values of yellow soils. Results show that the four amendments not only can efficiently improve the soil acidity, making the soils transformed from acid to neutral; but also can improve soil nutrients as well as soil fertility. Compared with original soils, available N improves about ten-fold, available P improves about 100-fold and available K improves 9-fold in mixed soils. Based on regression analysis, the functional relation between soil nutrients and amendments was also acquired.

**Key words:** yellow soil; soil amendment; acid condition; NPK; orthogonal design