

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.005

潘晓莹, 时仁勇, 洪志能, 等. 富里酸对红壤酸度的改良及酸化阻控效果. 土壤, 2020, 52(4): 685–690.

## 富里酸对红壤酸度的改良及酸化阻控效果<sup>①</sup>

潘晓莹<sup>1,2</sup>, 时仁勇<sup>1</sup>, 洪志能<sup>1</sup>, 姜 军<sup>1</sup>, Nkoh Jackson Nkoh<sup>1,2</sup>, 徐仁扣<sup>1,2\*</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:** 用采自安徽由第四纪红色黏土发育的红壤(红黏土)和采自江西由第三纪红砂岩发育的红壤(红砂土)进行室内培养试验, 研究了添加富里酸对红壤酸度的改良效果和红壤酸化的阻控效果。结果表明, 添加富里酸显著提高了两种土壤的 pH, 并且随着富里酸添加量的增加对土壤 pH 的提升效果逐渐增加, 添加 50 g/kg 富里酸处理红黏土和红砂土的土壤 pH 分别由对照的 4.31 和 4.69 提高至 5.91 和 5.97。添加富里酸也提高了两种土壤的 pH 缓冲容量(pHBC), 因而提高了土壤的抗酸化能力。与土壤 pH 的变化趋势相似, 富里酸对土壤 pHBC 的提升效果也随其加入量的增加而增加。添加 50 g/kg 富里酸时, 红黏土和红砂土的 pHBC 分别由对照的 20.73 和 7.78 mmol/(kg·pH) 提高至 35.31 和 23.30 mmol/(kg·pH), 分别比对照提高了 0.70 倍和 1.99 倍。添加富里酸不仅可以有效改良红壤酸度, 还可以提高红壤的抗酸化能力。富里酸对红砂土酸化的阻控效果明显优于对红黏土。

**关键词:** 富里酸; 红壤酸度; 土壤改良; 土壤 pH 缓冲容量

**中图分类号:** S153.2      **文献标志码:** A

### Effect of Fulvic Acid on Ameliorating Soil Acidity and pH Buffering Capacity of Two Ultisols

PAN Xiaoying<sup>1,2</sup>, SHI Renyong<sup>1</sup>, HONG Zhineng<sup>1</sup>, JIANG Jun<sup>1</sup>, NKOH Jackson Nkoh<sup>1,2</sup>, XU Renkou<sup>1,2\*</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:** A clay red soil from Anhui and a sandy red soil from Jiangxi were collected for laboratory incubation experiment to study the effects of applying fulvic acid on ameliorating soil acidity and soil pH buffering capacity. Results showed that applying fulvic acid increased soil pH, and the ameliorating effect increased with the amount of fulvic acid added. Adding 50 g/kg fulvic acid increased soil pH from 4.31 to 5.91 for clay red soil and from 4.69 to 5.97 for sandy red soil, respectively. Moreover, similar to change in soil pH, applying fulvic acid increased soil pH buffering capacity (pHBC), and the more fulvic acid added led to greater increase in soil pHBC. Adding 50 g/kg fulvic acid increased soil pHBC from 20.73 to 35.31 mmol/(kg·pH) for clay red soil and from 7.78 to 23.30 mmol/(kg·pH) for sandy red soil, respectively. In conclusion, applying fulvic acid can not only ameliorate effectively soil acidity of two red soils, but also increase soil pHBC and thus increase soil resistance to acidification, and the effect is better for sandy red soil than for clay red soil.

**Key words:** Fulvic acid; Acidity of red soil; Soil amelioration; Soil pH buffering capacity

红壤是我国南方地区的主要土壤类型和重要土壤资源<sup>[1]</sup>。红壤酸性强, 其酸害、铝毒和低肥力严重限制了该地区的农作物生长和农林业生产<sup>[2-3]</sup>。近年来, 由于酸沉降和铵态氮肥的过量施用等原因, 红壤的酸化速率加快, 酸化范围进一步加大<sup>[4-7]</sup>。因此, 需要对酸化红壤进行改良, 并采取有效措施提高土壤抗酸化能力以减缓酸化速率, 恢复并增强其生产力。施用石灰性物质是改良红壤酸度的传统措施<sup>[8-9]</sup>, 虽

然其对土壤酸度的改良效果很好, 但它不能对土壤的再酸化发挥阻控作用, 因此需要研发新型改良剂。近年来, 生物质炭作为新型改良剂被用于酸性土壤改良<sup>[10-11]</sup>, 生物质炭不仅能有效中和土壤酸度, 而且能提高土壤的酸缓冲容量, 从而提高土壤的抗酸化能力, 阻控土壤的再酸化<sup>[12]</sup>。

富里酸是土壤腐殖质的组分之一, 是动植物残体经微生物分解、转化和聚合形成的含芳香环结构、

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41877036) 资助。

\* 通讯作者(rkxu@issas.ac.cn)

作者简介: 潘晓莹 (1991—), 女, 广东清远人, 博士研究生, 主要从事土壤酸化与调控研究。E-mail: xypan@issas.ac.cn

非晶质天然高分子有机化合物<sup>[13-14]</sup>, 在自然界中广泛分布。富里酸具有很高的 CEC<sup>[15]</sup>, 含羧基、羟基、羰基、醌基、甲氧基等众多有机官能团<sup>[14]</sup>, 其中的弱酸性官能团能够通过解离产生大量负电荷<sup>[16]</sup>, 因此, 富里酸具有较强的离子交换能力和吸附能力, 不仅能增加土壤对养分保持能力, 改良土壤理化性质, 还能提高土壤对酸碱变化的缓冲能力<sup>[15]</sup>。此外, 富里酸能与铝离子发生络合作用<sup>[17]</sup>。富里酸在土壤中与矿质颗粒结合形成有机无机复合胶体而稳定存在<sup>[18-19]</sup>。因此, 可以预期富里酸不仅可以改良土壤酸度, 减轻土壤铝对植物的毒害, 还可以提高土壤的抗酸化能力, 对土壤酸化具有一定的阻控作用。本文研究了富里酸对由第四纪红黏土和第三纪红砂岩发育的两种红壤酸度的改良效果, 并初步分析了富里酸对红壤酸化的阻控作用, 研究结果可为红壤酸化阻控措施的研发提供参考。第四纪红色黏土和第三纪红砂岩发育的红壤在我国南方地区广泛分

布, 且两种红壤在黏粒含量、CEC 和 pH 缓冲容量 (pHBC) 等方面具有明显差异, 本文选择这两种土壤用于比较研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤与富里酸

第四纪红黏土发育的红壤(红黏土)采自安徽省郎溪县(31°3'N, 119°5'E), 第三纪红砂岩发育的红壤(红砂土)采自江西省鹰潭市(28°14'N, 116°55'E)。土样采自 0~20 cm 耕作层, 去除石块和残根后, 风干、研磨、过 2 mm 筛, 用于土壤培养试验。两种土壤的基本性质列于表 1 中。土壤有机质采用重铬酸钾滴定法测定, CEC 则采用醋酸铵法(pH 7.0)测定<sup>[20]</sup>。用 LS13320 激光粒度分析仪(Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, USA)测定土壤粒度分布, 并根据黏粒(直径 < 2 μm)、粉粒(直径 2~20 μm)、砂粒(直径 >20 μm)的分数计算土壤粒度分布。

表 1 两种红壤的基本性质

Table 1 Basic physiochemical properties of two tested red soils

土壤	地点	黏粒	粉粒	砂粒	土壤 pH	有机质 (g/kg)	CEC		交换性铝
							(cmol/kg)		
红黏土	安徽郎溪	305	201	494	4.32	18.2	12.5	3.96	
红砂土	江西鹰潭	170	51	779	5.01	6.4	4.0	0.77	

所用富里酸购自江西省萍乡市红土地腐植酸有限公司。采用复合 pH 电极配 pH 计(Orion Star A211)测得的富里酸 pH 为 4.91(固液比为 1:25), 用元素分析仪(Vario Max CN)测得的 C 和 N 含量分别为 335 和 50.5 g/kg。将富里酸用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消煮后用 HPLC-ICP-MS 联用仪(7700x)测定 P、Ca、Mg、K、Na 等元素含量分别为 1.94、13.83、7.46、79.86 和 0.94 g/kg。用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet 8700)测定富里酸的红外光谱, 结果列于图 1 中。

### 1.2 土壤培养试验及土壤 pH 缓冲容量测定

分别称取 300 g 土壤样品至 500 ml 一次性塑料杯中, 按 10、20 和 50 g/kg 土的比例添加富里酸进行培养试验, 每个处理设置 3 次重复。然后加入适量去离子水, 使含水量为土壤田间持水量的 60%。待水分充分湿润土壤后, 将其搅拌均匀, 用保鲜膜覆盖杯口, 并在其中间扎 2 mm 小孔以保持空气交换并减少水分散发。将土壤放置在 25 °C 恒温培养箱中培养 30 d, 每 3~5 d 添加去离子水维持水分含量基本恒定。培养结束后, 将土壤样品取出, 风干、磨细后过 60 目筛, 用于测定土壤 pH、土壤 pHBC 和进行模拟酸化

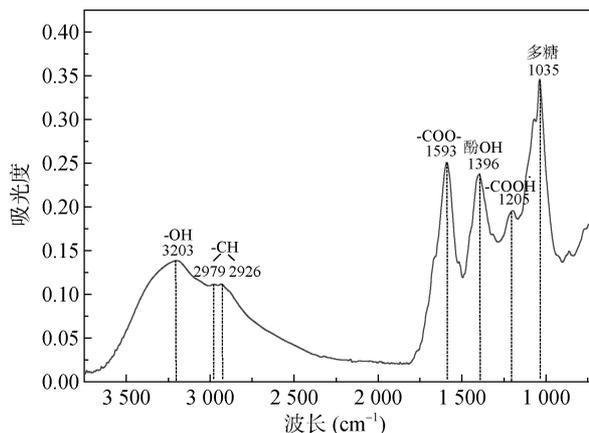


图 1 供试富里酸的红外光谱图

Fig. 1 ATR-FTIR of fulvic acid used

试验。本研究中富啡酸的添加量根据文献调研确定, 一般室内培养试验中腐殖物质的用量在 5.0~25.0 g/kg<sup>[21]</sup>, 本文中 10 和 20 g/kg 添加量与之相似, 同时设置较高添加量(50 g/kg)用于比较研究。

采用滴定法测定土壤 pHBC<sup>[22]</sup>: 分别称取 4.00 g 土壤样品于 10 个 50 ml 塑料离心管中, 然后加入适量的去离子水, 再加入不同体积的 0.04 mol/L(标

定)HCl 或 NaOH, 使溶液总体积达到 20 ml, 并形成 pH 梯度。为维持土壤悬液的离子强度基本恒定, 向每个离心管中加入 1.0 ml 0.04 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液; 每个离心管中还加入 0.25 ml 的氯仿以抑制微生物活动。将土壤悬液放置在 25 °C 环境下振荡 24 h, 再平衡 6 d, 期间每天振荡 2 min。7 d 后, 测定离心管中土壤悬液的 pH, 绘制土壤 pH 与酸碱加入量之间的关系曲线, 计算土壤 pHBC。

### 1.3 模拟酸化试验

土壤培养试验结束后, 土壤 pH 提高, 因此, 在进行模拟酸化试验前, 需要用 Ca(OH)<sub>2</sub> 将不加富里酸对照处理的土壤 pH 调节至与添加富里酸处理相似的值。根据目标土壤 pH 和土壤 pHBC 计算调节土壤 pH 所需的 Ca(OH)<sub>2</sub> 量。Ca(OH)<sub>2</sub> 添加至土壤后, 将两者充分混合, 然后采用与添加富里酸处理相似方法进行为期 30 d 的培养试验。培养结束, 将土壤样品风干、磨细过 60 目筛。

称取 4.00 g 培养后的土壤样品至 50 ml 塑料离心管中, 加入 20 ml 不同浓度的 HNO<sub>3</sub>, 拧紧管盖, 在 25 °C 下振荡 24 h, 再平衡 6 d, 期间每天振荡 2 min 再静置, 共耗时 7 d。7 d 后, 用 Orion 720 pH 计与带有双盐桥(LiCl)的玻璃电极和参比电极测定土壤悬液 pH<sup>[12]</sup>。然后将离心管连同悬液在 4 500 r/min 条件下离心 5 min, 分离上层清液, 将离心管中的土壤样品放置在 50 °C 下烘干, 烘干后磨细, 并过 60 目筛, 用于测定土壤交换性铝含量。交换性铝采用 1 mol/L

KCl 浸提<sup>[20]</sup>、0.01 mol/L NaOH 滴定法测定。

### 1.4 统计分析

所有数据均以 3 个重复的平均值±标准差的形式表示。处理间的差异性分析采用单因素方差分析法进行(ANOVA), 单因素方差分析后用 LSD 和邓肯分析法(Duncan's multiple range)进行显著性分析, ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 富里酸对不同母质发育红壤酸度的影响

由表 2 可知, 与对照相比, 培养前, 添加富里酸使两种土壤 pH 均略有下降, 这可能是由于富里酸中羧基发生解离释放出 H<sup>+</sup>, 使土壤 pH 下降。但培养结束后, 添加富里酸均显著提高两种土壤的 pH ( $P < 0.05$ ), 并且提升效果随富里酸加入量的增加而增加。这主要是由于在培养过程中, 富里酸中部分活性有机物分解, 有机阴离子发生脱羧反应释放 CO<sub>2</sub>, 消耗土壤中的 H<sup>+</sup>, 致使土壤 pH 上升<sup>[23-24]</sup>。两种土壤相比, 添加 10 和 20 g/kg 富里酸对红砂土 pH 的提升效果优于红黏土。比如, 添加 10 g/kg 富里酸后, 红砂土的 pH 比对照提高 0.55 个 pH 单位, 而红黏土的 pH 比对照提高 0.23 个 pH 单位。这主要因为红砂土的 CEC、有机质和黏粒含量均显著低于红黏土, 因而其 pHBC 也显著低于红黏土, 对富里酸等改良剂的添加更敏感。因此, 富里酸对两种不同母质发育的红壤的酸度均有很好的改良效果, 对红砂土的改良效果更显著。

表 2 添加富里酸对土壤 pH 和土壤 pH 缓冲容量的影响  
Table 2 Effects of fulvic acid on soil pH and soil pH buffering capacity

土壤类型	地点	处理	培养前 pH	培养后 pH	土壤 pH 缓冲容量 (mmol/(kg·pH))	R <sup>2</sup>
红黏土	安徽省郎溪县	对照	4.31 ± 0.01 a	4.19 ± 0.03 d	20.73 ± 0.29 d	0.988 0
		10 g/kg 富里酸	4.00 ± 0.01 c	4.42 ± 0.01 c	24.41 ± 0.15 c	0.996 8
		20 g/kg 富里酸	4.08 ± 0.01 b	4.86 ± 0.01 b	27.45 ± 0.37 b	0.998 1
		50 g/kg 富里酸	4.30 ± 0.01 a	5.91 ± 0.01 a	35.31 ± 0.29 a	0.998 1
红砂土	江西省鹰潭市	对照	5.05 ± 0.01 a	4.97 ± 0.05 c	7.78 ± 0.26 d	0.989 0
		10 g/kg 富里酸	4.69 ± 0.01 d	5.52 ± 0.07 b	10.22 ± 0.04 c	0.994 4
		20 g/kg 富里酸	4.76 ± 0.00 c	6.25 ± 0.01 a	13.62 ± 0.09 b	0.994 6
		50 g/kg 富里酸	4.82 ± 0.00 b	5.97 ± 0.04 a	23.30 ± 0.30 a	0.995 8

注: 表中同列小写字母不同表示同一土壤类型不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2.2 添加富里酸对红壤 pHBC 的影响

从表 2 中可以看出, 与土壤 pH 变化趋势相似, 与对照相比, 添加富里酸均显著增加了土壤 pHBC ( $P < 0.05$ ), 并且增幅随富里酸添加量的增加而增加, 这与前人观测到的土壤 pHBC 随土壤有机质含量增加

而增加的结果相似<sup>[25]</sup>。与添加 10 g/kg 富里酸处理相比, 添加 20 g/kg 和 50 g/kg 的富里酸对两种红壤 pHBC 的提升效果尤为显著。相同添加量下, 富里酸对红砂土 pHBC 提升效果显著优于红黏土。如添加 50 g/kg 富里酸处理, 红砂土 pHBC 由对照的

7.78 mmol/(kg·pH)增加至 23.30 mmol/(kg·pH),增加了 1.99 倍;相同添加量下,红黏土的 pHBC 由对照的 20.73 mmol/(kg·pH)增加至 35.31 mmol/(kg·pH),增加了 0.70 倍。这主要是由于红砂土本身的 pHBC 远低于红黏土。富里酸是一种弱酸,含丰富的有机官能团<sup>[15]</sup>。这些官能团的质子化和去质子化是富里酸增加土壤 pHBC 的主要原因。由此可见,添加富里酸不仅能改良土壤酸度,还能提升土壤对酸的缓冲能力。

### 2.3 添加富里酸对红壤酸化的阻控效果

一般来说,土壤抗酸化能力会随土壤 pHBC 的增加而增加。为了验证这一假设,通过模拟酸化试验,研究了添加富里酸对两种红壤抗酸化能力的影响。用 Ca(OH)<sub>2</sub> 将不添加富里酸的对照处理的土壤 pH 调节至与添加富里酸处理相近的值,然后加入不同浓度的

HNO<sub>3</sub> 进行模拟酸化试验,结果列于图 2 中。可以看出,加入相同量 HNO<sub>3</sub> 的情况下,添加富里酸处理的红砂土的 pH 下降幅度显著小于添加 Ca(OH)<sub>2</sub> 处理的,说明添加富里酸提高了土壤的抗酸化能力,添加 50 g/kg 富里酸处理的效果更显著。添加富里酸对红黏土的抗酸化能力有相似的提升效果,添加 20 g/kg 和 50 g/kg 富里酸处理的效果更显著。添加富里酸对红砂土抗酸化能力的提升效果优于红黏土。当加入 30 mmol/kg HNO<sub>3</sub> 后,红黏土和红砂土添加 5% 富里酸处理的土壤 pH 分别比添加 Ca(OH)<sub>2</sub> 处理的高 1.21 和 3.13 个 pH 单位,这与添加富里酸对两种土壤 pHBC 的提升效果一致。因此,添加富里酸能有效提升土壤的 pHBC,从而提高土壤的抗酸化能力,对土壤 pHBC 较低的土壤,富里酸对其抗酸化能力的提升效果更为明显。

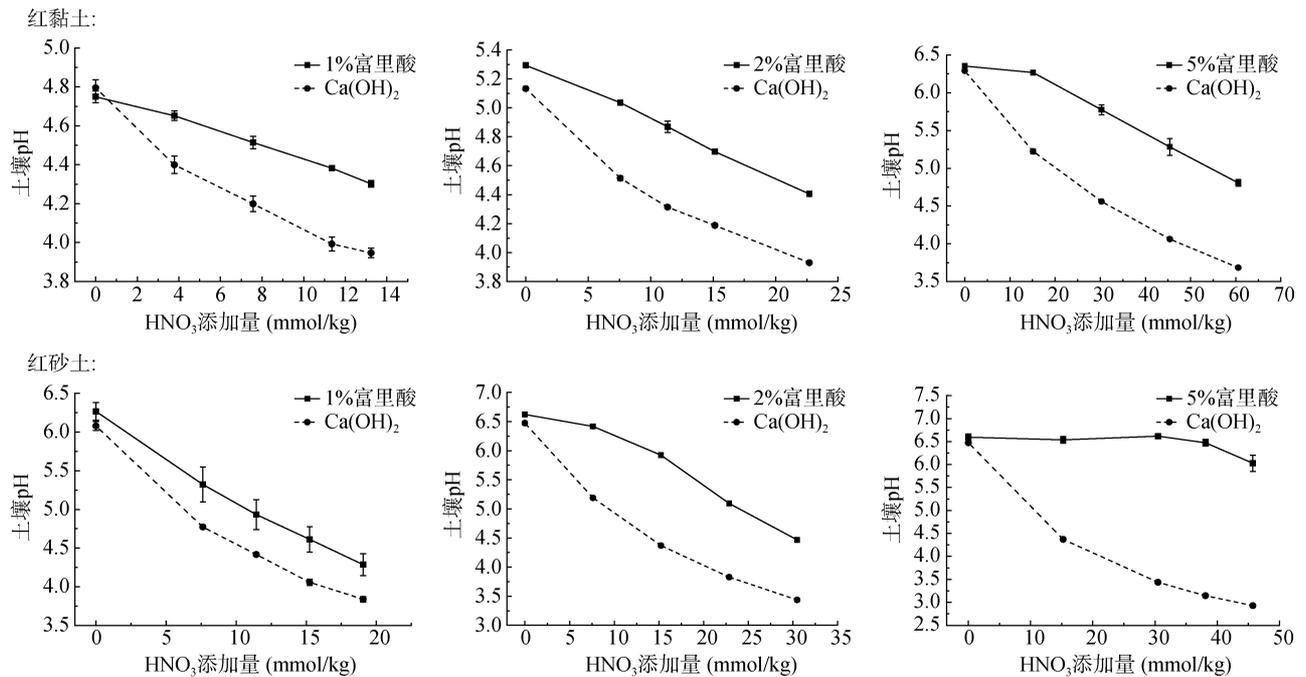


图 2 模拟酸化过程中,两种土壤添加富里酸/Ca(OH)<sub>2</sub> 处理土壤 pH 随 HNO<sub>3</sub> 加入量的变化

Fig. 2 pH changes of soils added with fulvic acid or Ca(OH)<sub>2</sub> with increasing HNO<sub>3</sub> addition during simulated acidification

除了土壤 pH 下降外,土壤酸化的另一个负面效应是土壤铝的活化,尤其是土壤交换性铝的大量产生。从图 3 可看出,两种土壤所有处理中交换性铝含量随土壤 pH 的降低而逐渐增加。但与添加 Ca(OH)<sub>2</sub> 处理相比,加入相同量 HNO<sub>3</sub> 的情况下,添加富里酸显著抑制了土壤交换性铝含量的增加。原因主要有两方面,添加富里酸抑制了模拟酸化过程中土壤 pH 的下降,从而减少了交换性铝的产生,因为酸性土壤的 pH 与交换性铝呈此消彼涨的关系;另一方面,富里酸分子中羧基和酚羟基等有机官能团与铝离子形成

稳定络合物,从而减少了土壤中交换性铝的量。对红黏土而言,添加 10 和 20 g/kg 富里酸对交换性铝的抑制效果差异不大,但 50 g/kg 富里酸的抑制效果较前两者显著。比如,模拟酸化达最低 pH 时,与 Ca(OH)<sub>2</sub> 处理相比,10 和 20 g/kg 富里酸使红黏土交换性铝分别减少了 60.6% 和 60.0%,而 50 g/kg 富里酸使土壤交换性铝减少了 68.9%。富里酸对红砂土交换性铝的抑制作用更显著,模拟酸化达最低 pH 时,添加 10、20 和 50 g/kg 富里酸使土壤交换性铝相较 Ca(OH)<sub>2</sub> 处理分别减少了 47.6%、61.6% 和 86.8%。

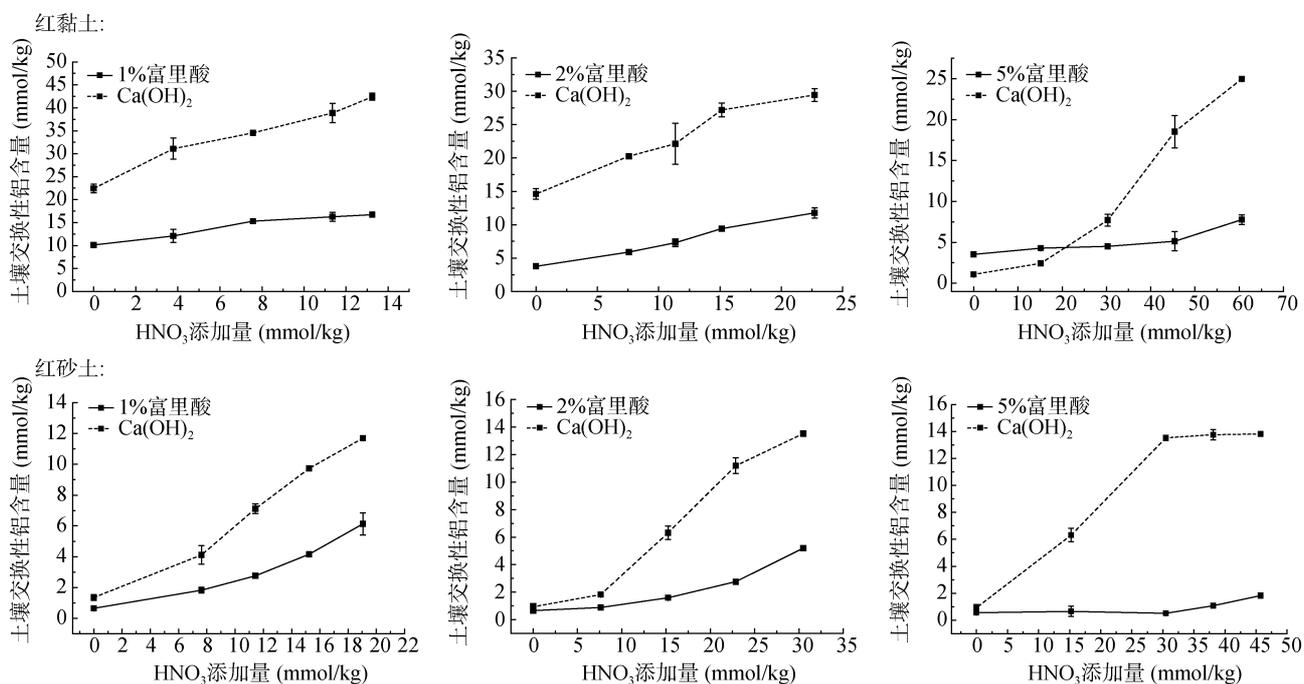


图3 模拟酸化过程中, 两种土壤添加富里酸/Ca(OH)<sub>2</sub>处理土壤交换性铝随HNO<sub>3</sub>加入量的变化

Fig. 3 Exchangeable Al<sup>3+</sup> changes of soils added with fulvic acid or Ca(OH)<sub>2</sub> with increasing HNO<sub>3</sub> addition during simulated acidification

### 3 结论

土壤与富里酸混合培养过程中部分活性有机物发生分解, 消耗土壤中的 H<sup>+</sup>, 因此, 添加富里酸能显著提高酸性红壤的 pH, 对红壤酸度有一定的改良效果。同时, 富里酸是一种含有大量有机官能团和很高阳离子交换量的弱酸, 添加富里酸能增加土壤对酸碱变化的缓冲能力, 提高红壤的抗酸化能力, 抑制红壤交换性铝的产生。因此, 富里酸具有改良红壤酸度及阻控红壤酸化的双重功效, 但实际改良和阻控效果还有待田间试验的进一步验证。

### 参考文献:

- [1] 李庆远. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] 张桃林. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [3] 孙波, 董元华, 徐明岗, 等. 加强红壤退化分区治理, 促进东南红壤丘陵区现代高效生态农业发展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 204-209.
- [4] 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[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 219-224.
- [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[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109-1116.
- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [7] 张忠启, 茆彭, 于东升, 等. 近 25 年来典型红壤区土壤

pH 变化特征——以江西省余江县为例[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1545-1553.

- [8] Adams F. Soil acidity and liming[M]. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1984.
- [9] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244.
- [10] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 541-547.
- [11] 李九玉, 赵安珍, 袁金华, 等. 农业废弃物制备的生物质炭对红壤酸度和油菜产量的影响[J]. 土壤, 2015, 47(2): 334-339.
- [12] Shi R Y, Hong Z N, Li J Y, et al. Mechanisms for increasing the pH buffering capacity of an acidic ultisol by crop residue-derived biochars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(37): 8111-8119.
- [13] 郑平. 煤炭腐植酸的生产和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [14] Stevenson F J. Humus chemistry: Genesis, composition, reactions[M]. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Wiley, 1994.
- [15] 窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] Campitelli P, Velasco M I, Ceppi S. Charge development and acid-base characteristics of soil and compost humic acids[J]. Journal of the Chilean Chemical Society, 2003, 48(3): 91-96.
- [17] Browne B, Driscoll C T. pH-dependent binding of aluminum by a fulvic acid[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27(5): 915-922.
- [18] Rodríguez F J, Schlenger P, García-Valverde M. Monitoring changes in the structure and properties of humic substances following ozonation using UV-Vis, FTIR

- and (1)H NMR techniques[J]. *The Science of the Total Environment*, 2016, 541: 623–637.
- [19] 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(2): 769–782.
- [20] Pansu M, Gautheyrou J. *Handbook of soil analysis*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [21] 隗英华, 陈利军, 武志杰, 等. 尿素氮形态转化对腐殖酸的响应[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 112–116.
- [22] Xu R K, Zhao A Z, Yuan J H, et al. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(4): 494–502.
- [23] Haynes R J, Mokolobate M S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 59(1): 47–63.
- [24] Tang C, Yu Q. Legume materials and amelioration of soil acidity[J]. *Plant and Soil*, 1999, 215: 29–38
- [25] Magdoff F R, Bartlett R J, Ross D S. Acidification and pH buffering of forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1384–1386.