长期定位施肥对亚热带丘陵地区红壤旱地质量的影响*

Ⅰ. 酸度

王小兵[1,2,3]　骆永明[1,2†]　李振高[1]　刘五星[1]　何园球[1]

（1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室，中国科学院南京土壤研究所，南京　210008）

（2 中国科学院研究生院，北京　100049）

（3 扬州大学环境科学与工程学院，江苏扬州　225009）

摘　要　研究了中国科学院红壤生态实验站长期定位施肥试验 5 种不同施肥处理对土壤 pH、土壤交换性氢、铝的影响，及其与土壤有机质之间的相关性。结果表明，长期不同施肥处理均提高了土壤 pH，降低了土壤交换性氢和交换性铝含量，改良了红壤的酸性。施用有机肥（M）、有机肥 + 菌剂（BM）、有机肥 + 菌剂 + 微量元素（BMT）显著优于施用化肥（F）和化肥 + 微量元素（TF）的处理。添加微量元素和有效菌剂后土壤交换性氢、铝含量略有提高。土壤有机质与土壤 pH 呈显著正相关，与土壤交换性氢含量的相关性不显著，而与土壤交换性铝含量呈显著负相关。随着土壤有机质含量的增加，土壤交换性氢占土壤交换性酸度比例越大。长期施用有机肥、提高土壤有机质含量是改良红壤酸度和减轻铝毒较好的农艺措施。

关键词　长期定位施肥；红壤；酸度；有机质

中图分类号　S153.4　　**文献标识码**　A

红壤是我国重要的土壤资源之一。红壤由于土壤发育完全，淋溶强烈，养分淋失严重，造成土壤养分缺乏和土壤酸化。土壤酸化已成为热带、亚热带土壤的主要问题，酸害和铝毒是该地区农业生产和生态环境建设的主要障碍因素之一[1-2]。土壤酸度是土壤的一个重要的化学性质，其不仅反映了土壤中许多物理、化学以及生物学的发生过程和性质，亦是制约土壤肥力发挥作用的重要因素。土壤交换性酸度反映土壤胶体上吸附的氢、铝离子，同时很大程度上取决于这两种致酸离子与盐基离子的相对比例。

迄今为止，在较多文献中涉及施肥措施对土壤酸度的影响。有研究表明，施用化肥会导致土壤 pH 下降，土壤交换性酸铝成倍增加，土壤严重酸化，而施用有机肥料、有机肥料与化学肥料配合施用，土壤 pH 趋于稳定和提高，土壤交换氢、铝离子降低[3-5]。但对长期定位施肥对红壤旱地酸度影响机理，以及土壤有机质与土壤酸度的相关关系的系统研究较少[6]。本课题组在中国科学院红壤生态实验站布置了红壤旱地长期定位试验，研究长期不同施肥措施对红壤旱地酸度的影响，探讨土壤酸度变化规律，为红壤持续农业合理施肥制度以及优化生态环境、提高土壤质量提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　实验地概况

中国科学院红壤生态实验站位于江西省鹰潭市余江县刘家站（东经 116°55′，北纬 28°12′）。该地属于中亚热带地区，气候温热多雨，年平均温度 17.6 ℃，≥10 ℃积温 5 528 ℃，年降水量 1 795 mm，年蒸发量 1 318 mm。供试土壤为第四纪红色黏土上的红壤荒地。试验开始前土壤基础理化性质为：pH 3.9，有机质 8.44 g kg^{-1}，全氮 0.594 g kg^{-1}，全磷 0.20 g kg^{-1}，全钾 14.50 g kg^{-1}，水解氮 43.3 mg kg^{-1}，速效磷痕迹，速效钾 84 mg kg^{-1}。交换性总酸度 4.72 cmol kg^{-1}、交换性氢 1.01 cmol kg^{-1}，交换性铝 3.71 cmol kg^{-1}。

1.2　试验材料

长期定位试验始于 1996 年 4 月，试验布置之前

* 国家自然科学基金重点项目（40432005）、中国科学院知识创新工程重要方向项目（KSCX2 - YW - G - 053 - 3，CXTD - Z2005 - 4）资助

† 通讯作者，E-mail：ymluo@issas.ac.cn

作者简介：王小兵（1976—），男，江苏东台人，博士研究生，研究方向为土壤环境生态。E-mail：xbwangxl@sina.com.cn

收稿日期：2009 - 09 - 28；收到修改稿日期：2010 - 03 - 21

该地是未开垦的荒地。共设 5 个处理,单施化肥(F),化肥 + 微量元素(TF),有机肥(M),有机肥 + 有效菌剂(BM),有机肥 + 有效菌剂 + 微量元素(BMT),各处理小区面积为 33.3 m^2,有机肥(M)2 次重复,其他处理 4 次重复,共 18 个小区,随机排列。无机氮肥用尿素(N 46%),磷肥用钙镁磷($P_2O_5$14%),钾肥用氯化钾(K_2O 60%),其用量分别为 90、300 和 225 kg hm^{-2};有机肥为当地猪场的猪粪,用量为 18 750 kg hm^{-2}(猪粪干重约 9%,干猪粪全氮含量约 24.8 g kg^{-1});有效菌剂为 EM 菌与本实验室分离的有效菌株混合而成,施用量为 20.55 L hm^{-2},菌种含量为 1×10^9 cfu ml^{-1};微量元素处理:硼砂 1.5 kg hm^{-2},钼酸铵 0.15 kg hm^{-2},硫酸锌 2.25 kg hm^{-2}。所有肥料在每年花生播种之前,作基肥一次性施入。花生品种为赣花 5 号,每年 4 月中旬播种,8 月中旬收获,一季花生,冬季休闲,常规田间管理。花生收获后按五点取样法采集根际土壤,室内风干,磨细过 1 mm 和 0.25 mm 筛,装瓶保存备用。

1.3　分析方法

pH 采用 1∶2.5(W∶V)土水比,梅特勒 LP115 pH 计测定;有机质采用重铬酸钾-硫酸消化法测定;交换性氢、铝采用氯化钾交换—中和滴定法测定[7]。

1.4　数据分析

采用 Origin 7.5 作图,SPSS 13.0 进行数据分析,ANOVA 检测显著性差异。

2　结果与讨论

2.1　长期定位施肥对土壤 pH 的影响

由于红壤受特定的成土过程的影响,土壤矿物风化淋溶强烈,酸性较强。1996 年试验地基础土壤 pH 为 3.9,属于强酸性土壤(pH < 4.50),随着种植时间的延长,尽管其中有些年份由于取样和测定误差而有所波动,但各处理的土壤 pH 均显著提高(图 1)。表明种植花生条件下,长期施肥均能改善土壤 pH,至 2008 年,添加有机肥的 3 个处理(M,BM 和 BMT)pH 分别为 6.03、5.76、5.83,而添加化肥的 2 个处理(F 和 TF)分别为 5.38 和 5.25,土壤平均 pH 已达 5.76,土壤属于微酸性(pH 5.12 ~ 6.5),表明施用有机肥改善红壤 pH 优于施用化肥。Malhi 等[8]研究表明,在一定条件下,土壤长期施用尿素会导致酸化。本试验布置之前试验地为荒地,土壤淋溶强烈,盐基饱和率较低,交换性氢和铝含量较高,通过长期施肥和种植,特别是施有机肥,增加土壤有机质的含量,促进土壤熟化,改良土壤结构,提高了盐基饱和度,从而改良土壤酸性。此外,化肥处理(F)除施用了尿素外,还施用碱性肥料钙镁磷肥,因此,总的效应提高了土壤 pH,并未导致土壤酸化。添加微量元素和有效菌剂对于土壤 pH 影响不明显。

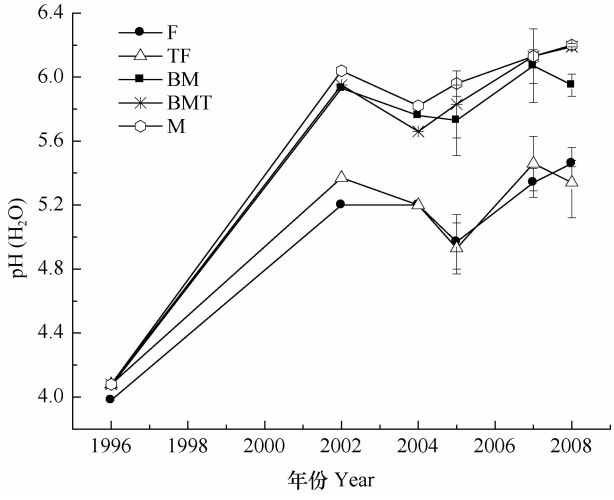

图 1　长期定位施肥对土壤 pH 的影响

Fig. 1　Effect of long-term fertilization on soil pH

2.2　长期定位施肥对土壤交换性酸的影响

经过 10 多年定位施肥后,2008 年花生收获后测定的土壤交换性酸、交换性氢和交换性铝各处理与基础土壤相比有显著下降(图 2)。添加有机肥处理(M)土壤交换性酸为 0.12 cmol kg^{-1},较 1996 年下降了 3.72 cmol kg^{-1}。交换性氢为 0.07 cmol kg^{-1},下降了 0.13 cmol kg^{-1},交换性铝为 0.05 cmol kg^{-1},下降了 3.59 cmol kg^{-1}。而单施化肥处理(F)的土壤交换性酸值为 0.94 cmol kg^{-1},下降了 2.9 cmol kg^{-1},交换性氢为 0.12 cmol kg^{-1},下降了 0.08 cmol kg^{-1},交换性铝为 0.82 cmol kg^{-1},下降了 2.82 cmol kg^{-1},表明与添加化肥相比,添加有机肥能够显著降低交换性酸度,减少铝毒。有研究表明,添加有机肥,土壤的吸附络合能力大大提高,使有机酸等小分子化合物络合铝的能力增强,使交换性铝向铝-有机复合物的方向转化,减少交换性铝的含量[9]。陈福兴[10]研究表明通过施加石灰,种植绿肥、施有机肥等,增加了土壤有机质及矿质元素,土壤交换性铝减少。孔晓玲[11]研究表明,在任何 pH 下,有机质的增加均可明显降低土壤交换性铝量。本试验中,有机肥的施用以及花生根系的残留提高了土壤有机质的

含量从而降低了土壤交换性氢铝的含量。于天仁等[12]研究表明土壤有机质含量越高,氢离子在总酸度中所占的比例越大。本试验也有相同的结论,施用化肥的土壤交换性氢与土壤交换性酸度之比为0.13。而施用有机肥的土壤交换性氢与土壤交换性酸度之比为0.53。

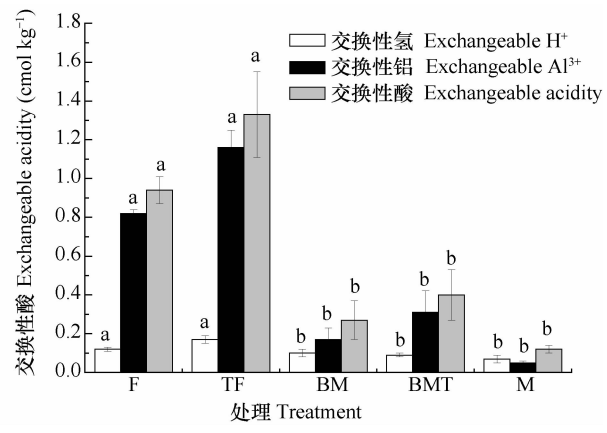

图2 长期定位施肥对土壤交换性酸度的影响

Fig. 2 Effect of long-term fertilization on exchangeable acidity of soil

有研究表明,施用有机肥或作物秸秆能显著降低土壤中交换性铝的浓度[13-14]。统计分析表明,添加有机肥的处理(M、BM和BMT)土壤中交换性总酸度和交换性氢铝均显著低于施用化肥的处理(F和TF)。添加微量元素(TF和BMT)土壤交换性酸度均高于未添加微量元素(F和BM),是因为有机质含有大量的羟基和酚羟基等负电荷与微量元素结合,减少了与铝离子结合的几率,从而增加了土壤交换性酸度,但两者差异未达到显著水平。添加有效菌剂(BM)处理中交换性氢、铝含量要略高于未添加有效菌剂(M)的处理,这可能与有效菌剂偏酸(pH3.5)有关。

2.3 长期定位施肥12年后土壤pH和土壤交换性酸与土壤有机质的相关关系

土壤pH和土壤交换性氢、铝代表土壤活性酸和潜在性酸,两者又受到土壤有机质等的影响,了解其间的相互关系,有利于改良酸性土壤。本研究利用2008年花生收获后18个小区土壤pH和土壤交换性酸与土壤有机质(表1)进行相关性分析。

表1 长期施肥红壤旱地土壤pH、土壤交换性酸以及土壤有机质[1)]

Table 1 pH, exchangeable acidity, and OM of upland red soil under long-term fertilization

处理 Treatments	pH (H_2O)	交换性氢 Exchangeable H^+	交换性铝 Exchangeable Al^{3+}	交换性酸 Exchangeable acidity	土壤有机质 SOM ($g\ kg^{-1}$)
		($cmol\ kg^{-1}$)			
F	5.46±0.02	0.12±0.01	0.82±0.02	0.94±0.07	19.51±1.13
TF	5.34±0.22	0.17±0.02	1.16±0.09	1.33±0.22	20.71±0.24
BM	5.95±0.07	0.10±0.02	0.17±0.06	0.27±0.10	23.05±1.44
BMT	6.19±0.02	0.09±0.01	0.31±0.11	0.40±0.13	22.62±2.51
M	6.20±0.01	0.07±0.02	0.05±0.01	0.12±0.02	21.88±2.50

1)F、TF、BM和BMT处理,4个重复;M处理2个重复 $n=4$ for Treatments F, TF, BM and BMT and $n=2$ for Treatment M

有机质含有大量的羟基和酚羟基,这些基团的解离会产生大量的负电荷,因此它对交换性铝的影响是不可低估的[15]。由图3和图4可见,土壤有机质与土壤交换性氢的相关性不显著,相关系数为-0.4138,而与土壤交换性铝呈显著负相关,相关系数为-0.5116。由于本试验前该地是荒地,旱地红壤贫瘠,有机质含量低,在相同的种植制度和长期不同施肥措施下,土壤有机质的含量均有所积累,吸附阳离子的能力增强,交换性氢铝的含量逐渐降低,而且施用有机肥的处理显著优于化肥处理。凌云霄和于天仁[16]在对我国南方红壤和黄壤酸度性质的研究中表明土壤的交换性酸是以铝离子为主体,土壤交换性酸度与交换性铝有着紧密联系[17]。土

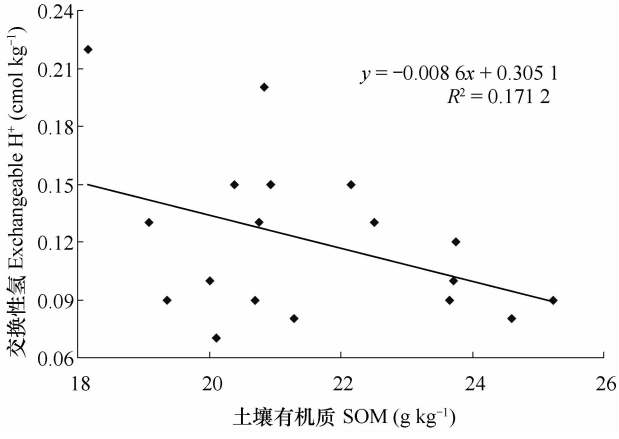

图3 土壤交换性氢与土壤有机质的关系

Fig. 3 Relationship between exchangeable H^+ in soils and SOM

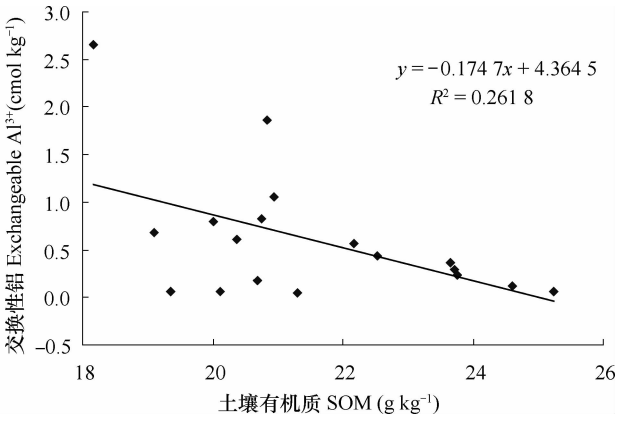

图 4　土壤交换性铝与土壤有机质的关系

Fig. 4　Relationship between exchangeable Al^{3+} in soils and SOM

壤有机质(腐殖质)和黏粒矿物组成的有机矿质胶体,既是吸持阳离子的载体,也是酸性土壤解离释放 H^+、Al^{3+} 离子的"胶体酸"[18],从而影响交换性酸。

土壤 pH 与土壤有机质相关关系见图 5,两者呈正显著相关,相关系数为 0.4878。表明土壤有机质对于土壤 pH 的大小有着重要的制约作用,随着土壤有机质含量的增加而增加。因此,提高土壤有机质的含量,对于改善土壤的微酸状况也有着重要的作用。尽管土壤有机质分解的有机酸会降低土壤 pH,但是土壤有机质对于进入土壤的酸基离子尤其是铝离子的毒性有着很好的缓冲作用。从本试验结果来看,红壤旱地施用有机肥对土壤有机质的积累、提高土壤 pH、改善土壤酸度、减轻铝毒的危害作用较化肥处理更显著。

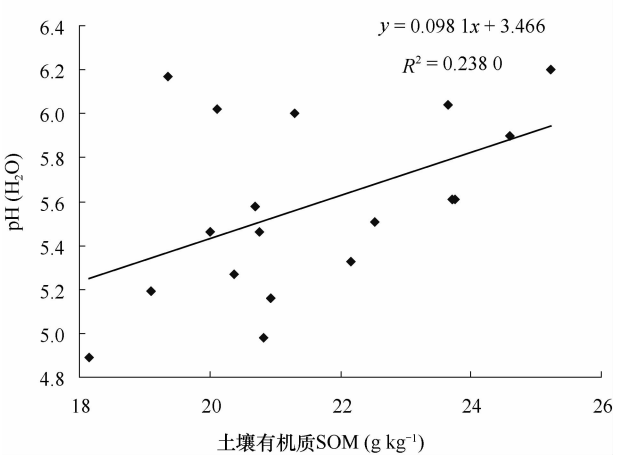

图 5　土壤 pH 与土壤有机质的关系

Fig. 5　Relationship between pH in soils and SOM

3　结　论

长期定位不同施肥均能使红壤旱地土壤 pH 呈逐渐上升趋势,土壤交换性氢铝呈下降趋势,土壤从强酸性向微酸性转变。施用有机肥对土壤酸性的改良效果显著高于施用化肥。添加微量元素和有效菌剂提高了土壤交换性氢铝。随着土壤有机质含量的增加,土壤交换性氢占总交换性酸度比例越大。

土壤交换性氢铝、土壤 pH 与土壤有机质相关性分析表明,土壤有机质与土壤 pH 呈显著正相关,与土壤交换性氢没有相关性,而与土壤交换性铝呈显著负相关。施用有机肥、提高土壤有机质含量是改善土壤酸度和减轻铝毒较好的农艺措施。

参 考 文 献

[1] 李庆逵. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1983. Li Q K. Red soil of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1983

[2] 于天仁. 中国土壤的酸度特点和酸化问题. 土壤通报, 1988, 18(2): 49—51. Yu T R. Characteristic and problem of acidity in Chinese soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1988, 18(2): 49—51

[3] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响. 水土保持学报, 2005, 19(1): 94—100. Wang B R, Xu M G, Weng S L. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 94—100

[4] Zhang H M, Wang B R, Xu M G, et al. Crop yield and soil responses to long-term fertilization on a red soil in southern China. Pedosphere, 2009, 19(2): 199—207

[5] 吴晓晨, 李忠佩, 张桃林. 长期不同施肥措施对红壤水稻土有机碳和养分含量的影响. 生态环境, 2008, 17(5): 2 019—2 023. Wu X C, Li Z P, Zhang T L. Long-term effect of fertilization on organic carbon and nutrients content of paddy soils in red soil region (In Chinese). Ecology and Environment, 2008, 17(5): 2 019—2 023

[6] 范庆锋, 张玉龙, 陈重, 等. 保护地土壤酸度特征及酸化机制研究, 土壤学报, 2009, 46(3): 466—471. Fan Q F, Zhang Y L, Chen Z, et al. Acidity characteristics and acidification mechanism of soils in protected fields (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 466—471

[7] 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. Analytic methods of soil and agricultural chemistry (In Chinese). Beijing: China Agicultural Science and Technology Press, 1999

[8] Malhi S J, Nyborg M, Harapiak J T. Effects of long-term N fertilizer-induced acidification and liming on micronutrients in soil and in brome grass hay. Soil Tillage Res, 1998, 48: 91—101

[9] 王维君. 酸性土壤交换性铝形态的研究. 科学通报, 1991, 36(6): 460—463. Wang W J. Research of exchangeable aluminum in acidity soil (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1991, 36(6): 460—463

[10] 陈福兴，秦瑞君. 湘南丘陵红壤利用方式对交换性铝分布的影响. 土壤，1996，28(6)：295—297. Chen F X, Qian R J. Effect of use types of red soil hillyon distribution of exchangeable aluminum in southern Hunan (In Chinese). Soils, 1996, 28(6): 295—297

[11] 孔晓玲，季国亮. 我国南方土壤的酸度与交换性氢铝的关系. 土壤通报，1992，23(5)：203—204. Kong X L, Ji G L. Relationship between southern soil acidity and exchangeable H^+ and Al^{3+} of China (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1992, 23(5): 203—204

[12] 于天仁，季国亮，丁昌璞，等. 可变电荷土壤的电化学. 北京：科学出版社，1996. Yu T R, Ji G L, Ding C P, et al. Electrochemistry of variable charge soils (In Chinese). Beijing: Science Press, 1996

[13] 吕焕哲，王凯荣，谢小立，等. 施用稻草对酸性红壤活性铝的动态影响. 土壤通报，2008，39(2)：321—324. Lü H Z, Wang K R, Xie X L, et al. Dynamic effects of rice Straw on different forms of active aluminum in acidic red soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2): 321—324

[14] Shen Q R, Shen Z G. Effects of pig manure and wheat straw on growth of mung bean seedlings grown in aluminum toxicity soil. Bioresearch Technology, 2001, 76: 235—240

[15] Schnitzer M. Some observation on the chemistry of humic substances. Agrochimica, 1978, 22: 216—225

[16] 凌云霄，于天仁. 土壤酸度与代换性氢、铝的关系. 土壤学报，1957，5(3)：234—246. Ling Y X, Yu T R. Relationship between Exchangeable H^+, Al^{3+} and soil acidity (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1957, 5(3): 234—246

[17] 于天仁. 土壤化学原理. 北京：科学出版社，1987：325—363. Yu T R. Principle of soil chemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1987: 325—363

[18] 郭荣发，杨杰文. 成土母质和种植制度对土壤 pH 和交换性铝的影响. 生态学报，2004，24(5)：984—990. Guo R F, Yang J W. pH and the exchangeable aluminum content in acid soils as affected by parent materials and cropping systems (In Chinese). Acta Ecol Sin, 2004, 24(5): 984—990

EFFECT OF LONG-TERM STATIONARY FERTILIZATION ON UPLAND RED SOIL QUALITY IN SUBTROPICAL HILLY REGIONS Ⅰ. ACIDITY

Wang Xiaobing[1,2,3] Luo Yongming[1,2†] Li Zhengao[1] Liu Wuxing[1] He Yuanqiu[1]

(1 *Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *China*)

(2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

(3 *College of Environmental Sciences and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu* 225009, *China*)

Abstract A long-term stationary field experiment consisting of 5 fertilization treatments was carried out in the Red Soil Ecological Experiment Station of CAS to study effects of fertilization on pH and exchangeable H^+ and Al^{3+} in soil and analyze relationships of organic matter (OM) content with soil pH, and contents of exchangeable H^+ and Al^{3+}. Results show that fertilization in all treatments increased soil pH and decreased contents of exchangeable H^+ and Al^{3+}. Treatment M (organic manure), Treatment BM (organic manure + microbial agent) and Treatment BMT (organic manure + microbial agent + microelement fertilizer) were significantly superior to Treatment F (chemical fertilizer) and Treatment TF (chemical fertilizer + microelement fertilizer) in reducing soil acidity. Addition of microelements and microbial agent increased the contents of exchangeable H^+ and Al^{3+} slightly. Soil OM content was significantly correlated positively with soil pH value, and not significantly related with exchangeable H^+ content in soil, but negatively with exchangeable Al^{3+} content in soil. With rising soil OM content, the proportion of exchangeable H^+ increased in exchangeable acidity of soil. Long-term application of organic manure to increase soil OM content is a good agronomic practice to reduce acidity and aluminum toxicity in red soil.

Key words Long-term stationary fertilization; Red soil; Acidity; Organic matter