

# 我国南方不同母质土壤 pH 剖面特征及酸化因素分析

赵凯丽<sup>1,3</sup>, 王伯仁<sup>1,2\*</sup>, 徐明岗<sup>1,4\*</sup>, 蔡泽江<sup>1,2</sup>, 石伟琦<sup>4</sup>, 马海洋<sup>4</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2 中国农业科学院衡阳红壤实验站/祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南祁阳 426182; 3 北京市土肥工作站, 北京 100029; 4 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东湛江 524091)

**摘要:** 【目的】母质是影响土壤理化性质的主要因素之一, 研究不同母质土壤 pH 的剖面特征及主要影响因素, 为防治土壤酸化提供依据。【方法】选取湖南祁阳白茅草植被下七种母质 (第四纪红土、红砂岩、板页岩、花岗岩、石灰岩、紫色页岩、河流冲积物) 发育的土壤, 测定不同层次 (0—20、20—40、40—60、60—80 和 80—100 cm) 土壤 pH, 通过比较表层 (0—20 cm) 与底层 (60—100 cm) pH 的差异来表征表层土壤是否酸化及酸化程度; 测定 0—20 cm 土层的酸碱缓冲容量、有机质含量、阳离子交换量、比表面积及颗粒组成, 分析影响表层酸化的主要因素。【结果】石灰岩剖面土壤的 pH (8.46~8.72) 最高, 呈强碱性, 其次为河流冲积物 (7.37~7.87)、紫色页岩土壤 (7.41~8.00), 呈碱性; 花岗岩、第四纪红土、红砂岩、板页岩四种母质发育的红壤呈酸性或强酸性, 以花岗岩红壤 pH (5.31~5.70) 较高, 其次为第四纪红土 (4.62~4.97)、红砂岩红壤 (4.31~4.67), 板页岩红壤 pH (4.25~4.49) 最低。比较表层 (0—20 cm) 与底层 (60—100 cm) 土壤的 pH, 发现七种母质剖面土壤的表层均出现了 pH 降低, 说明表层已出现酸化现象, 酸化程度大小依次为: 紫色页岩土壤 > 河流冲积物土壤、花岗岩红壤 > 第四纪红土、红砂岩红壤 > 石灰岩土壤、板页岩红壤。对表层土壤的比表面积、颗粒组成 (黏粒、粉粒、砂粒含量) 和 pH、酸碱缓冲容量、阳离子交换量、有机质含量共八种理化因素进行逐步线性回归分析, 由于多种因素的相互影响, 七种母质土壤并未发现影响表层酸化的主要因素, 但在四种母质 (第四纪红土、红砂岩、板页岩、花岗岩) 发育的酸性红壤中阳离子交换量是影响表层酸化的主要因素。【结论】土壤阳离子交换量与表层红壤酸化差值呈显著负相关, 是影响第四纪红土、红砂岩、板页岩和花岗岩四种酸性红壤表层酸化的主要因素之一。

**关键词:** 母质; 酸化; 阳离子交换量; 土壤剖面

## Changes in pH with depths of soils derived from different parent materials and analysis of acidification in Southern China

ZHAO Kai-li<sup>1,3</sup>, WANG Bo-ren<sup>1,2\*</sup>, XU Ming-gang<sup>1,4\*</sup>, CAI Ze-jiang<sup>1,2</sup>, SHI Wei-qi<sup>4</sup>, MA Hai-yang<sup>4</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2 Red Soil Experimental Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang, Hunan 426182, China; 3 Beijing Soil Fertilizer Extension Service Station, Beijing 100029, China; 4 South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Science, Zhanjiang, Guangdong 524091, China)

**Abstract:** 【Objectives】To investigate changes in pH at different depths of soil derived from seven parent materials to help prevent soil acidification. 【Methods】Soil samples at layers of 0–20, 20–40, 40–60, 60–80 and 80–100 cm were collected from seven sites with different parent materials (Quaternary red earth, Red sandstone, Plate shale, Granite, River alluvial material, Limestone, and Purple shale) under *Imperata cylindrica* meadow, in Qiyang County, Hunan Province. Soil pH, soil acid and alkaline buffering capacity, soil organic

收稿日期: 2018-04-24 接受日期: 2018-07-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFE0112700); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金项目 (1630062018005)。

联系方式: 赵凯丽 E-mail: zhaokaili101@163.com

\* 通信作者 王伯仁 Email: wangboren@caas.cn; 徐明岗 E-mail: xuminggang@caas.cn

matter, soil cation exchange capacity, soil specific surface area, and particle size were measured, and soil acidification was estimated by the difference in the soil pH between 0–20 cm and 60–100 cm layers.

**【 Results 】** The pH values of red soil from Quaternary red earth, red sandstone, plate shale and Granite were below 6.0, river alluvial material soil (pH 7.37–7.87) and purple shale soil (pH 7.41–8.00) were neutral with pH 7.0–8.0, and limestone soil was strongly alkaline with pH 8.46 – 8.72. For all the seven parent materials, the average acidification rate of red soils was in the order: purple shale soil > river alluvial material soil, granite red soil > Quaternary red earth red soil, and red sandstone red soil > limestone soil, plate shale red soil. Based on analysis of pH, soil acid and alkaline buffering capacity, soil organic matter, soil cation exchange capacity, soil specific surface area and particle size, no key factors were found in the seven parent materials that led to soil acidification. However, soil cation exchange capacity was found to be the key factor for soil acidification in four parent materials, including Quaternary red earth, red sandstone, plate shale and granite.

**【 Conclusions 】** Soil cation exchange capacity is negatively correlated with the soil acidification, which is one of the main factors limiting the acidification in four parent materials, including Quaternary red earth, red sandstone, plate shale, and granite.

**Key words:** soil parent materials; acidification; cation exchange capacity; soil profile

土壤 pH 值降低将引起  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $NH_4^+$  等盐基离子的淋失, 交换性酸、铝的增加<sup>[1-2]</sup>及重金属元素的有效性提高<sup>[3]</sup>, 严重影响土壤质量。母质可通过影响土壤的物理性质 (质地、团粒结构等) 和化学性质 (pH、阳离子交换量、酸碱缓冲容量、有机质含量等)<sup>[4-6]</sup>, 进而影响土壤的酸化进程<sup>[7-9]</sup>。明确不同母质土壤的酸化现状, 分析主要酸化因素, 可采取有效措施减缓酸化进程, 减少因酸化造成经济损失及生态环境恶化。Fujii 等<sup>[10]</sup>提出, 母质可通过影响土壤中酸的强度、分布及酸中和能力来影响酸化过程。在物理性质方面, 朱丽东<sup>[11]</sup>对浙江红土粒度组成的研究表明, 砂岩红土最粗, 花岗岩红土次之, 玄武岩红土最细。田冬<sup>[7]</sup>等选取不同质地的土壤研究氮添加对 pH 的影响, 结果发现培养后砂土、粉黏壤土和黏土的平均 pH 分别下降了 0.49~0.69、0.82~1.02、0.59~0.67 个单位, 以粉黏壤土下降的幅度最大。在化学性质方面, 何腾兵等<sup>[12]</sup>研究发现, pH 对母岩有较大继承性, 石灰岩、钙质紫色砂页岩、河流冲积物土壤 pH 为中性至微碱性, 红色黏土、砂岩、页岩土壤 pH 为酸性至强酸性; 相比砂岩土壤, 紫色砂页岩、河流冲积物土壤的有机质含量及阳离子交换量较高。曹丹等<sup>[9]</sup>研究发现, 随着有机质含量增加, 茶园土壤酸化速率呈下降趋势。吴甫成<sup>[13]</sup>、王晓燕<sup>[14]</sup>等研究表明, 不同母质红壤酸碱缓冲能力的强弱程度不同。沈月<sup>[8]</sup>等研究发现棕壤的酸化速率不仅与酸碱缓冲容量有关, 也与 pH 的变化有关。综上, 不同母质土壤的理化性质有较大差异,

可影响土壤酸化的进程。目前, 对不同母质土壤的酸化因素有较多研究, 但综合这些因素分析主要影响因素方面仍相当薄弱。本研究以湖南祁阳白茅草植被下七种母质发育的土壤为研究对象, 分析不同层次的 pH, 比较表层 (0—20 cm) 与底层 (60—100 cm) pH 的差异, 揭示不同母质土壤 pH 的剖面特征及酸化现状, 明确比表面积等物理指标和酸碱缓冲容量等化学指标中影响不同母质土壤表层酸化的关键因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

湖南省祁阳县位于中国南方典型红壤丘陵区, 该区域年平均日照时数为 1613.1 h, 太阳辐射量为 108.7 kcal/cm<sup>2</sup>, 年平均气温为 17.8~18.4℃, 无霜期 293 d, 年降雨量 1150~1350 mm, 祁阳县主要成土母质有: 第四纪红土 (占全县土壤总面积的 6.2%)、板页岩 (占全县土壤总面积的 23.6%)、红砂岩 (占全县土壤总面积的 34.7%)、花岗岩 (占全县土壤总面积的 7.1%)、石灰岩 (占全县土壤总面积的 19.7%)、河流冲积物 (占全县土壤总面积的 2%)、紫色页岩 (占全县土壤总面积的 6.9%)。

本研究所选取土壤于 2014 年 10 月采自中国农业科学院祁阳红壤站 (111°52'E, 26°45'N) 周边乡镇, 为减少气候、酸沉降等环境因素对酸化的影响, 更好地说明母质对酸化的作用, 本研究采用小范围局部采样, 具体植被和采样地点见表 1。

表 1 供试土壤采样地点基本情况  
Table 1 Location details of the tested soils

采样地点 Location	成土母质 Parent material	土壤类型 Soil type	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	海拔 (m) Altitude
文富市镇官山坪村	第四纪红土 Quaternary red earth	红壤 Red soil	111°52'06.6"	26°45'42.8"	132
茅竹镇大岭村	红砂岩 Red sandstone	红壤 Red soil	111°48'00.2"	26°29'20.7"	116
文富市镇铁塘冲村	板页岩 Plate shale	红壤 Red soil	111°53'20.8"	26°45'24.7"	143
白果市乡仁光村	花岗岩 Granite	红壤 Red soil	111°59'51.7"	26°08'45.8"	702
文富市镇坪阳甸村	河流冲积物 River alluvial materia	河沙土 River alluvial material soil	111°50'25.3"	26°45'13.1"	107
进宝塘镇大塘村	石灰岩 Limestone	石灰土 Limestone soil	112°04'38.9"	26°27'17.5"	103
黄泥塘镇一居委会	紫色页岩 Purple shale	紫色土 Purple shale soil	112°07'42.3"	26°28'54.0"	82

注 (Note): 所有土壤样品均采自湖南省祁阳县内, 为野生荒山白茅草地, 自然生长多年, 无人干扰。All the soils were collected from Qiyang County, Hunan Province, China. The sampling point is wild barren mountain with perennial *Imperata cylindrica*.

## 1.2 试验材料

在每个土壤样地上随机选取 3 个地表条件相同的采样点, 分别采集 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 共 5 个层次的土壤样品, 自然风干后, 去除石块和残根等杂物, 磨碎, 过 2 mm 筛, 用四分法取约 300 g 作为待测样品。不同层次土壤用于 pH 测定, 0—20 cm 土壤用于测定比表面积、颗粒组成、酸碱缓冲容量、有机质含量和阳离子交换量。

## 1.3 试验方法

土壤 pH 采用电极电位法测定, 水土比为 2.5 : 1; 有机质采用重铬酸钾外加热法, 阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定; 土壤的比表面积测定采用氮气吸附法测定<sup>[15]</sup>, 土壤颗粒组成利用激光颗粒分析仪 (美国 Beckman Coulter LS13320) 测定, 采用转换模型计算颗粒含量<sup>[16]</sup>。土壤的酸碱缓冲容量测定<sup>[17-18]</sup>: 称取 4 g 风干土壤 15 份于 50 mL 离心管, 分别加入已标定浓度 (0.00125~0.04 mol/L) 的 HCl 和 NaOH 溶液 20 mL, 使水土比为 5 : 1, 最终加入的酸碱量分别为 0、3.125、6.25、12.5、25、37.5、75、100 mmol/kg, 所有处理均重复 1 次; 土壤悬液振荡 1 h 后, 恒温 25℃ 培养, 期间每天用力往复摇匀一次, 平衡 7 天后测定土壤 pH, 以 pH 为横坐标, 加入酸碱的量为纵坐标作图得到土壤酸碱缓冲曲线, 对曲线突跃范围内斜率相近的部分进行局部直线拟合计算, 斜率值即为土壤的酸碱缓冲容量<sup>[17]</sup>。

所有图和数据分析分别采用 Excel2003 和 SPSS Statistics 20 软件, 不同处理间的显著性 ( $P < 0.05$ ) 采

用 Duncan 法检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同母质土壤的剖面 pH 值

白茅草植被下, 由不同母质土壤 pH 值的剖面变化 (图 1) 可知, 第四纪红土、红砂岩、板页岩、花岗岩四种母质发育的剖面红壤均呈酸性或强酸性 ( $pH < 6$ ), 以花岗岩红壤 pH (5.31~5.70) 最高, 其次为第四纪红土红壤 (pH 4.62~4.97), 红砂岩红壤 (pH 4.31~4.67), 板页岩红壤的 pH (4.25~4.49) 最低。石灰岩土壤 (pH 8.46~8.72) 呈强碱性, 河流冲积物 (pH 7.37~7.87)、紫色页岩 (pH 7.41~8.00) 土壤呈碱性。

第四纪红土、红砂岩、板页岩红壤, 石灰岩、河流冲积物和紫色页岩土壤的 pH 随土层 (0—60 cm) 深度增加呈增加趋势, 增加幅度为 0.11、0.19、0.12 和 0.1、0.4、0.37 个 pH 单位。花岗岩红壤的 pH 随土层 (0—40 cm) 深度的增加呈降低趋势, 降低幅度为 0.13 个 pH 单位; 七种母质剖面土壤的各层次间, 底土两个层次 (60—80 cm 和 80—100 cm) 间差异性不显著, 但均与表层 (0—20 cm) 的差异性显著。

### 2.2 不同母质土壤的酸化特征

选取白茅草根系分布的表层 (0—20 cm) 和底土差异性不显著的两个层次 (60—80 cm 和 80—100 cm) 分别作为表层和底层, 通过比较表层 (0—20 cm) 与底层 (60—100 cm) pH 的差异来表征表层土壤的酸化状况。由表 2 可看出, 0—20 cm 土层, 以石灰岩土壤 pH 最高, 其次为紫色页岩、河流冲积物土壤,

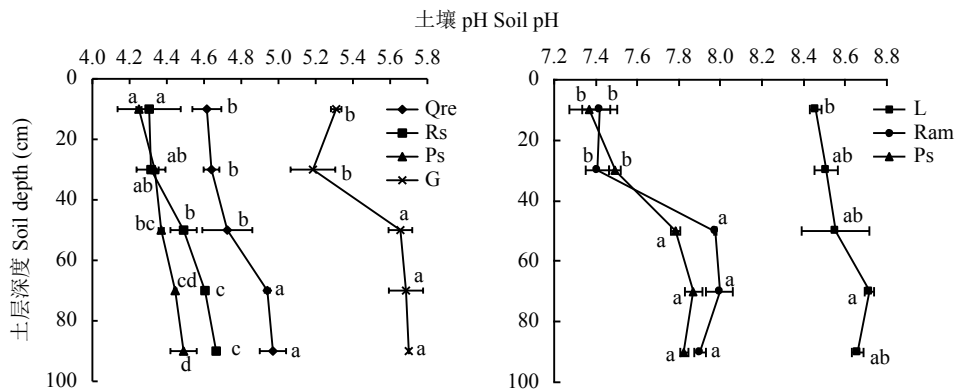


图 1 不同母质土壤 pH 剖面特征

Fig. 1 Soil pH in profiles of soils derived from different parent materials

[注 (Note): Qre—第四纪红土 Quaternary red earth; Rs—红砂岩 Red sandstone; Ps—板页岩 Plate shale; G—花岗岩 Granite; Ram—河流冲积物 River alluvial material; L—石灰岩 Limestone; Ps—紫色页岩 Purple shale; 图中不同小写字母表示单个剖面不同土层间土壤 pH 差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters indicates significant differences at 0.05 level in soil pH at depths of each profile.]

表 2 0—20 cm、60—100 cm 土壤 pH 值及差值

Table 2 Soil pH values in 0—20 cm, 60—100 cm layers and their difference in each soil

成土母质 Parent material	0—20 cm	60—100 cm	差值 Difference
第四纪红土 Quaternary red earth	4.62 ± 0.08 d	4.96 ± 0.07 e	-0.34 ± 0.04 b
红砂岩 Red sandstone	4.31 ± 0.17 e	4.64 ± 0.01 f	-0.33 ± 0.06 b
板页岩 Plate shale	4.25 ± 0.01 e	4.47 ± 0.07 g	-0.22 ± 0.02 a
花岗岩 Granite	5.31 ± 0.03 c	5.69 ± 0.01 d	-0.38 ± 0.02 bc
河流冲积物 River alluvial material	7.37 ± 0.10 b	7.85 ± 0.02 c	-0.48 ± 0.13 bc
石灰岩 Limestone	8.46 ± 0.03 a	8.69 ± 0.03 a	-0.23 ± 0.02 a
紫色页岩 Purple shale	7.42 ± 0.08 b	7.95 ± 0.03 b	-0.53 ± 0.04 c

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示各指标成土母质间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters in the same column mean significant differences among the parent materials at 0.05 level.

再次为花岗岩、第四纪红土红壤, 板页岩、红砂岩红壤的 pH 最低; 底层的 pH 也呈现了类似的变化规律。

通过与底层 pH 的比较可发现, 0—20 cm 出现了 pH 降低的现象, 说明表层土壤已出现酸化现象, 酸化程度大小依次为: 紫色页岩土壤 > 河流冲积物土壤、花岗岩红壤 > 第四纪红土、红砂岩红壤 > 石灰岩土壤、板页岩红壤; 石灰岩土壤和板页岩红壤的酸化程度显著小于紫色页岩土壤。

### 2.3 不同母质土壤 0—20 cm 土层的酸碱缓冲容量、有机质含量及阳离子交换量

表 3 表明, 除第四纪红土、板页岩红壤, 各母质土壤酸碱缓冲容量的差异水平达到显著; 河流冲积物土壤的酸碱缓冲容量最大, 对酸的抵抗力最强, 其次为紫色页岩、石灰岩土壤; 第四纪红土土壤的酸碱缓冲容量最小, 其次为板页岩、红砂岩、花

岗岩红壤, 对酸的抵抗力较弱。

0—20 cm 土层的有机质含量以红砂岩红壤最高, 其次为花岗岩红壤、河流冲积物土壤, 与其它母质差异水平达到显著, 再次为第四纪红土、板页岩红壤和石灰岩土壤, 紫色页岩土壤的有机质含量最低, 显著低于其它母质土壤。

0—20 cm 土层以花岗岩红壤的阳离子交换量最高, 其次为紫色页岩土壤, 均显著高于其它母质土壤; 再次为石灰岩土壤、第四纪红土、红砂岩红壤、河流冲积物土壤, 板页岩红壤的阳离子交换量最低, 显著低于其它母质土壤。

相关性分析结果表明, 七种母质土壤的酸碱缓冲容量与有机质含量 ( $r = 0.0029$ )、阳离子交换量 ( $r = 0.0666$ ) 未呈现显著相关关系 ( $n = 21$ )。但四种母质酸性红壤 (第四纪红土、红砂岩、板页岩、花岗岩红壤) 的酸碱缓冲容量与阳离子交换量 ( $r = 0.8646^{**}$ ) 呈

表 3 0—20 cm 土壤酸碱缓冲容量、有机质含量及阳离子交换量

Table 3 pH buffer capacity, organic matter content and cation exchange capacity in 0—20 cm layer of soil from different parent materials

成土母质 Parent material	酸碱缓冲容量 pH buffer capacity (mmol/kg)	有机质 Organic matter (g/kg)	阳离子交换量 CEC (cmol/kg)
第四纪红土 Quaternary red earth	8.94 ± 0.33 f	15.44 ± 1.91 ab	11.01 ± 0.32 bc
红砂岩 Red sandstone	10.47 ± 0.19 e	17.99 ± 1.69 a	11.08 ± 0.49 bc
板页岩 Plate shale	9.34 ± 0.46 f	12.25 ± 0.32 bc	7.70 ± 0.13 d
花岗岩 Granite	13.88 ± 1.33 d	17.91 ± 0.97 a	18.45 ± 0.32 a
河流冲积物 River alluvial material	20.67 ± 0.94 a	17.79 ± 2.04 a	9.01 ± 0.05 cd
石灰岩 Limestone	17.44 ± 0.03 c	12.72 ± 2.74 bc	11.66 ± 2.29 b
紫色页岩 Purple shale	17.82 ± 1.62 b	9.50 ± 0.30 c	16.15 ± 1.18 a

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示各指标成土母质间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters in the same column mean significant differences among the parent materials at the 0.05 level.

极显著正相关, 与有机质含量 ( $r = 0.3377$ ) 未呈现出显著相关性 ( $n = 12$ )。

#### 2.4 不同母质土壤 0—20 cm 土层比表面积及颗粒组成

表 4 显示, 花岗岩红壤的比表面积最大, 显著高于其它母质土壤, 其次为第四纪红土、红砂岩红壤, 其余四种母质土壤间的比表面积无显著差异。根据土壤的颗粒组成可得出, 紫色页岩土壤黏粒含量最高, 属粉砂质黏壤土; 石灰岩、河流冲积物土壤砂粒含量最高, 属黏壤土; 第四纪红土、红砂岩、板页岩红壤属于粉砂质黏土, 粉粒含量高; 花岗岩红壤属壤质黏土。

#### 2.5 不同母质土壤酸化的主要影响因素

综合以上与表层酸化过程可能有关的因素 (包括 pH、比表面积、颗粒组成、缓冲容量、阳离子交换量、有机质含量), 运用 SPSS 软件进行逐步回归分析<sup>[19-20]</sup> 结果发现没有变量被输入到方程中, 即未得出影响七种母质土壤表层酸化的主要因素; 而针对其中由四种母质发育的酸性红壤 (即第四纪红土、红砂岩、花岗岩、板页岩红壤) 的结果发现, 阳离子交换量是影响四种母质红壤表层酸化的主要因素。

首先对 0—20 cm 与 60—100 cm 土层的  $\Delta$ pH 进行正态检验, 选适用小样本检验 (本研究  $n = 12$  属于小样本) 的 Shapiro-Wilk Test 模型, 结果表明, 数据

表 4 0—20 cm 土壤的比表面积及颗粒组成

Table 4 Specific surface area and mineral composition of soil particles in 0—20 cm soil layer from different parent materials

成土母质 Parent material	比表面积 (m <sup>2</sup> /g) Specific surface area	颗粒组成 Particle size (g/kg)			土壤质地 Texture
		黏粒 Clay <2 μm	粉粒 Silt 2~20 μm	砂粒 Sand 20~2000 μm	
第四纪红土 Quaternary red earth	29.59 ± 0.34 b	352.1 ± 8.4 a	486.3 ± 2.21 a	161.7 ± 10.6 c	粉砂质黏土 Silty clay
红砂岩 Red sandstone	32.01 ± 8.02 b	361.8 ± 44.6 a	457.2 ± 17.2 a	181.0 ± 61.8 c	粉砂质黏土 Silty clay
板页岩 Plate shale	19.31 ± 1.52 c	383.3 ± 40.8 a	487.7 ± 14.1 a	129.0 ± 26.7 c	粉砂质黏土 Silty clay
花岗岩 Granite	43.27 ± 2.62 a	344.3 ± 1.5 a	444.6 ± 12.1 a	211.1 ± 13.6 c	壤质黏土 Loam clay
河流冲积物 River alluvial material	12.55 ± 0.56 c	205.2 ± 92.7 b	220.6 ± 50.2 b	574.2 ± 42.5 a	黏壤土 Clay loam
石灰岩 Limestone	15.84 ± 3.54 c	191.9 ± 42.6 b	391.5 ± 79.8 a	416.6 ± 37.2 b	黏壤土 Clay loam
紫色页岩 Purple shale	20.92 ± 0.12 c	400.3 ± 20.4 a	450.6 ± 42.4 a	149.1 ± 22.0 c	粉砂质黏壤土 Silty clay loam

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示各指标成土母质间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters in the same column mean significantly different among the parent materials at the 0.05 level.



统计量为 0.893, 显著性大于 0.05 水平 ( $P = 0.249$ ), 故因变量 ( $\Delta\text{pH}$ ) 服从正态分布, 可进行回归分析。

由表 5 的分析结果可得出线性回归方程为:

$$y = 0.157 - 0.013x_1$$

式中:  $y$ — $\Delta\text{pH}$ ;  $x_1$ —阳离子交换量。回归系数的显著性均小于 0.05, 即自变量与因变量之间存在显著性差异, 有统计学意义故留在方程中。自变量  $x_1$  对  $y$  的直接作用是  $P_{1y} = 0.785$ , 说明阳离子交换量对表层酸化有直接影响。

### 3 讨论

#### 3.1 不同母质土壤的酸化特征

土壤 pH 对母岩有较大继承性<sup>[12]</sup>。根据中国土壤的酸碱度分级标准 (中国科学院南京土壤研究所, 1987), 本文中第四纪红土、红砂岩、板页岩红壤均属于强酸性红壤 ( $\text{pH} < 5$ ), 主要原因可能是三种母质红壤经历了较完全的风化成土过程, 处于脱硅富铝化阶段, 大部分盐基淋失殆尽, 导致土壤 pH 较低<sup>[4]</sup>。花岗岩红壤属于酸性红壤 ( $\text{pH} < 6$ ), 0—40 cm 的 pH 显著低于底层, 主要原因是此采样点为次生白茅草地, 曾种过茶树, 种植方法采用深耕松土条栽, 种植过程中施用氮肥、有机肥等, 加速了表层酸化<sup>[21-22]</sup>, 且 0—40 cm 的 pH 随土层深度增加呈降低趋势, 可能是因为 0—20 cm 生长白茅草后, 承接的大量枯枝落叶增加了有机质积累, 减缓了酸化进程, 故 pH 高于 20—40 cm。河流冲积物、紫色页岩土壤属于碱性土壤 ( $7.5 < \text{pH} < 8.5$ ), 河流冲积物为多种地表物质的混合沉积物, 受水分作用影响, 发育的土壤接近中性<sup>[12]</sup>; 紫色页岩发育程度迟缓, 不具脱硅富铝化特征, 风化微弱, 含有碳酸钙, 盐基饱和度高<sup>[23]</sup>, 土壤呈碱性。石灰岩土壤属强碱性土壤 ( $\text{pH} > 8.5$ ), 主要是因为土壤中含丰富的碳酸钙<sup>[24]</sup>且盐基丰富, 母岩风化过程中碳酸钙延缓了盐基的淋失和土壤的酸化进程, 土壤碱性较强。

白茅草根系主要分布在 0—20 cm 的土壤表层<sup>[25]</sup>, 是枯枝落叶分布的主要区域, 受植被因素影响显

著, 在一定程度上土壤性质发生了变化; 而 60—100 cm 位于底层, 主要受母质等结构因素影响, 外界因素的干扰小, pH 较接近原始值<sup>[26]</sup>。因此, 本研究选取 0—20 cm 作为表层, 底土差异性不显著的两个层次 (60—80 cm 和 80—100 cm) 作为底层, 通过比较表层 (0—20 cm) 与底层 (60—100 cm) pH 的差异来表征表层土壤的酸化状况。比较发现, 七种母质土壤的 0—20 cm 均出现 pH 降低, 说明表层土壤已出现酸化现象, 可能原因是: 植物根系可分泌有机酸, 植物从土壤中吸收盐基阳离子时可分泌质子, 根系及根际微生物呼吸作用产生的  $\text{CO}_2$  溶于水也可离解出质子, 促进了土壤酸化。

本研究表明, 七种母质土壤, 以紫色页岩表层酸化最为严重, 显著高于石灰岩土壤, 石灰岩土壤、板页岩红壤表层酸化程度最小; 可能原因是石灰岩、紫色页岩发育的碱性土壤主要通过碳酸盐对外源酸碱起缓冲作用, 石灰岩土壤中的碳酸盐含量显著高于紫色页岩土壤, 故紫色页岩表层酸化程度显著大于石灰岩土壤。板页岩发育的红壤 pH 偏低 ( $\text{pH} 4.25 \sim 4.49$ ), 属于强酸性红壤, 酸化空间较小, 酸化程度较弱。

#### 3.2 不同母质土壤酸化的影响因素

本研究对与表层酸化可能有关的八种因素 [比表面积、颗粒组成 (黏粒、粉粒、砂粒含量)、pH、缓冲容量、阳离子交换量、有机质含量] 进行逐步回归分析: 对七种母质土壤分析, 未得出影响表层酸化的主要因素; 分析四种母质 (第四纪红土、红砂岩、花岗岩和板页岩) 发育的酸性红壤, 得出阳离子交换量是影响表层酸化的主要因素。这可能是由于本研究选取的七种母质土壤的酸碱度差异较大 (pH 跨度范围为 4.25~8.46), 酸性土壤的酸化空间小于碱性土壤; 且七种母质土壤的酸碱缓冲机制不同, 根据 Ulrich<sup>[27-28]</sup> 对土壤酸碱缓冲体系的分类, 可认为石灰岩、紫色页岩和河流冲积物发育的碱性土壤主要是通过碳酸盐对外源酸碱起缓冲作用, 第四纪红土、红砂岩、板页岩、花岗岩等发育的酸性红壤主要通过阳离子交换量等对外源性酸碱起到缓冲作用, 故

表 5 回归方程的系数

Table 5 The coefficients of regression equation

模型 Model	非标准化系数 Unstandardized coefficient		标准系数 Standardized coefficient	$t$	$P$
	回归系数 Betain (B)	标准误差 SD			
常量 Constant	0.157	0.054		2.889	0.028
阳离子交换量 CEC	0.013	0.004	0.785	3.107	0.021

影响不同母质土壤酸化的因素需分类研究。本文仅得出影响第四纪红土、红砂岩、板页岩和花岗岩四种酸性母质表层红壤酸化的主要因素之一是阳离子交换量,对于影响碱性土壤酸化的因素还需进一步分析。

研究表明,阳离子交换量是影响第四纪红土、红砂岩、板页岩、花岗岩四种母质红壤酸化的主要因素,0—20 cm 以花岗岩红壤的阳离子交换量显著高于其它母质红壤,其次为第四纪红土、红砂岩红壤,板页岩红壤的阳离子交换量最低。主要原因可能是板页岩红壤属于粉砂质黏土,粉粒和黏粒含量相对较高,且酸碱缓冲容量较小,故阳离子交换量低。第四纪红土、红砂岩红壤在成土过程中,矿物化学风化、淋溶强烈,导致质地粗,结构松,极易造成盐基流失,故阳离子交换量也不高。本研究中的花岗岩红壤采样点曾种植过茶树,施用的氮肥、有机肥等增加了土壤中的盐基离子<sup>[29]</sup>,故阳离子交换量显著高于其它三种母质土壤。

王文婧<sup>[30]</sup>在研究皖南红壤阳离子释放特征中发现,模拟酸雨作用下,第四纪红土红壤盐基离子的释放总量明显增加,在缓冲中起主要作用。研究表明,第四纪红土、红砂岩、板页岩、花岗岩四种母质红壤的酸碱缓冲容量与阳离子交换量呈现极显著的正相关,处于交换性阳离子缓冲体系<sup>[31]</sup>,故可增加红壤中的交换性阳离子含量来减缓酸化进程。

## 4 结论

白茅草植被下七种母质发育的土壤中,与底层(60—100 cm)相比,0—20 cm 土层酸化程度大小依次为:紫色页岩土壤 > 河流冲积物土壤、花岗岩红壤 > 第四纪红土、红砂岩红壤 > 石灰岩土壤、板页岩红壤。影响不同母质土壤酸化的因素需分类研究,在本文所选取的八种可能因素中,阳离子交换量是影响第四纪红土、红砂岩、板页岩和花岗岩四种酸性红壤表层酸化的主要因素。

### 参考文献:

- [1] Ritchie G S P. The chemical behavior of aluminium, hydrogen and manganese in acid soils[A]. Robson A D. Soil acidity and plant growth[M]. Sydney: Academic Press, 1989. 1–60.
- [2] Cregan P D, Scott B J. Soil acidification-an agricultural and environmental problem[A]. Pratley J E, Robertson A. Agricultural and the environmental imperative[M]. Melbourne: CSIRO Publishing, 1998. 98–128.
- [3] 王浩,章明奎. 有机质积累和酸化对污染土壤重金属释放潜力的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(3): 538–541.  
Wang H, Zhang M K. Effects of organic matter accumulation and acidification on release potential of heavy metals from polluted soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(3): 538–541.
- [4] 赵其国. 昆明地区不同母质对红壤发育的影响[J]. 土壤通报, 1964, 12(3): 253–265.  
Zhao Q G. Effect of parent materials on the genesis and classification of red soils in Kunming district, Yunnan[J]. Acta Pedologica Sinica, 1964, 12(3): 253–265.
- [5] 吴蔚东,张桃林,高超,等. 中亚热带天然常绿阔叶林下不同母质的土壤质量性状[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 73–79.  
Wu W D, Zhang T L, Gao C, et al. Study on the soil quality of soils formed from two kinds of parent material under mid sub-tropic primary broad-leaved forest[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(1): 73–79.
- [6] 郭建军,李惠卓. 不同母岩母质上土壤特性的分析研究[J]. 内蒙古林业科技, 2003, (1): 21–23.  
Guo J J, Li H Z. Analysis and research on soil characteristics of different parent materials[J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2003, (1): 21–23.
- [7] 田冬,高明,徐畅. 土壤水分和氮添加对3种质地紫色土氮矿化及土壤 pH 的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 255–261.  
Tian D, Gao M, Xu C. Effects of soil moisture and nitrogen addition on nitrogen mineralization and soil pH in purple soil of three different textures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 255–261.
- [8] 沈月,依艳丽,张大庚,等. 耕地棕壤酸碱缓冲性能及酸化速率研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 95–100.  
Shen Y, Yi Y L, Zhang D G, et al. Research on pH buffer capacity and acidification rate of arable brown soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 95–100.
- [9] 曹丹,张倩,肖峻,等. 江苏省典型茶园土壤酸化速率定位研究[J]. 茶叶科学, 2009, 29(6): 443–448.  
Cao D, Zhang Q, Xiao J, et al. Localized monitoring of soil acidification rate of tea garden in Jiangsu Province[J]. Journal of Tea Science, 2009, 29(6): 443–448.
- [10] Fujii K, Hartono A, Funakawa S, et al. Acidification of tropical forest soils derived from serpentine and sedimentary rocks in East Kalimantan, Indonesia[J]. Geoderma, 2011, 160(3–4): 311–323.
- [11] 朱丽东,姜永见,叶玮,等. 浙江省内不同成土母质红土粒度特征比较[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2008, 31(4): 361–366.  
Zhu L D, Jiang Y J, Ye W, et al. Comparative study of red earth grain-size from different parent materials in Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang Normal University (Natural Science), 2008, 31(4): 361–366.
- [12] 何腾兵,董玲玲,刘元生,等. 贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 157–162.  
He T B, Dong L L, Liu Y S, et al. Change of physical-chemical properties and heavy metal element in soil from different parent material/rock[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 157–162.
- [13] 吴甫成,王晓燕,邹君,彭世良. 湖南土壤酸缓冲性能研究[J]. 农业现代化研究, 2001, 22(1): 58–62.  
Wu F C, Wang X Y, Zou J, Peng S L. A study on acidic buffering

- ability of soils in Hunan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2001, 22(1): 58–62.
- [14] 王晓燕, 吴甫成, 田均良. 亚热带红壤酸缓冲特性试验研究[J]. *热带地理*, 2003, 23(1): 26–29.  
Wang X Y, Wu F C, Tian J L. A study on the acid buffer characters of subtropical red soils through experiments[J]. *Tropical Geography*, 2003, 23(1): 26–29.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao S D. Soil and agro-chemical analysis methods (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] 吴焕焕, 吕家珑, 段英华, 等. 激光衍射法测定中国典型土壤颗粒分布的模型建立与验证[J]. *中国农业科学*, 2013, 40(20): 4293–4300.  
Wu H H, Lv J L, Duan Y H, et al. Establishment and validation of model of soil particle size distribution of main soils in China by laser diffraction method[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 40(20): 4293–4300.
- [17] 成杰民, 胡光鲁, 潘根兴. 用酸碱滴定曲线拟合参数表征土壤对酸缓冲能力的新方法[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(3): 569–573.  
Cheng J M, Hu G L, Pan G X. New method of evaluating buffering capacity and equilibrium pH of paddy soil with simulation parameter[J]. *Journal of Agro-Environment science*, 2004, 23(3): 569–573.
- [18] 姜军, 徐仁扣, 赵安珍. 用酸碱滴定法测定酸性红壤的pH缓冲容量[J]. *土壤通报*, 2006, 37(6): 1247–1248.  
Jiang J, Xun R K, Zhao A Z. Determination of pH buffer capacity of acid red soils by acid-base titration[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(6): 1247–1248.
- [19] 宋小园, 朱仲元, 刘艳伟, 赵宏瑾. 通径分析在SPSS逐步线性回归中的实现[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(1): 108–113.  
Song X Y, Zhu Z Y, Liu Y W, Zhao H J. Application of path analysis in stepwise linear regression SPSS[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(1): 108–113.
- [20] 杜家菊, 陈志伟. 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法[J]. *生物学通报*, 2010, 45(2): 4–6.  
Du J J, Chen Z W. SPSS linear regression was used to realize path analysis[J]. *Bulletin of biology*, 2010, 45(2): 4–6.
- [21] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008–1010.
- [22] Schroder J L, Zhang H L, Girma K, et al. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75: 957–964.
- [23] 于寒青. 长期施肥下红壤地区三种母质土壤熟化过程中肥力的变化特征[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2009.
- Yu H Q. The characteristics of fertility in anthropogenic mellowing of three parent materials raw soils in red soil area under long-term fertilization[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2009.
- [24] 孙兆地. 石灰岩、花岗岩母质发育的土壤油松林生态系统中有有机碳、氮、磷、钾的垂直分布特征—以松山自然保护区为例[D]. 北京: 北京林业大学硕士学位论文, 2012.  
Sun Z D. Vertical distribution characters of organic carbon, nitrogen and phosphorus in soil—Chinese pine forest ecosystem developed from limestone and granite parent materials—taking Song mountain nature reserve for example[D]. Beijing: MS Thesis of Beijing Forestry University, 2012.
- [25] 刘更另, 黄新江, 冯云峰. 红壤丘陵自然植被恢复及其对某些土壤条件的影响[J]. *中国农业科学*, 1990, 23(3): 60–69.  
Liu G L, Huang X J, Feng Y F. Restoring natural vegetative cover and its effects on some soil conditions in hilly red soil region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23(3): 60–69.
- [26] 黄运湘, 曾希柏, 张杨珠, 等. 湖南省丘岗茶园土壤的酸化特征及其对土壤肥力的影响[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3): 633–638.  
Huang Y X, Zeng X B, Zhang Y Z, et al. Tea garden soil acidification and its impact on soil fertility in hillrock of Hunan province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3): 633–638.
- [27] Ulrich B, Pankrath T. Effects of accumulation air pollutions in forest ecosystems[M]. Dordrecht: Springer, 1983. 331–342.
- [28] Ulrich B. Natural and anthropogenic components of soil acidification[J]. *Journd of Plant Nutrition and Soil Science*, 1986, 149(6): 702–712.
- [29] 姬钢. 不同土地利用方式下红壤酸化特征及趋势[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2015.  
Ji G. Acidification characteristics and trend of red soil under different land uses[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Science, 2015.
- [30] 王文婧. 模拟酸雨影响下皖南红壤阳离子释放特征的研究[D]. 合肥: 安徽师范大学硕士学位论文, 2012.  
Wang W J. The effects of simulated acid rain on cation releases characteristics in red soils collected from southern Anhui[D]. Hefei: MS Thesis of Anhui Normal University, 2012.
- [31] 雷永程. 长期施肥土壤的酸碱缓冲性能及红壤石灰改良[D]. 福州: 福建农林大学硕士学位论文, 2010.  
Lei Y C. Acid-base buffering ability of long-term fertilization soil-red soil improvement with quicklime[D]. Fuzhou: MS Thesis of Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.