

DOI: 10.11766/trxb202107010339

时仁勇, 王昌军, 闫静, 来宏伟, 陈振国, 李德成, 徐仁扣, 孙敬国. 武陵秦巴山区不同母质植烟土壤抗酸化性能研究[J]. 土壤学报, 2023, 60 (2): 367–377.

SHI Renyong, WANG Changjun, YAN Jing, LAI Hongwei, CHEN Zhenguo, LI Decheng, XU Renkou, SUN Jingguo. Acidification Resistance of Tobacco-planting Soils Derived from Different Parent Materials in Wuling Qinba District, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (2): 367–377.

武陵秦巴山区不同母质植烟土壤抗酸化性能研究*

时仁勇¹, 王昌军², 闫静¹, 来宏伟^{1, 3}, 陈振国², 李德成¹, 徐仁扣¹, 孙敬国^{2†}

(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. 湖北省烟草科学研究院, 武汉 430030; 3. 土壤资源高效利用国家工程实验室(山东农业大学资源与环境学院), 山东泰安 271018)

摘要: 为探究武陵秦巴山区烟田土壤的抗酸化性能及其影响因素, 分别采集区域典型母质发育黄棕壤和黄壤, 比较不同母质发育土壤的酸缓冲容量差异, 结合模拟酸化实验对不同土壤的潜在酸化风险进行了初步评估。结果表明, 土壤初始 pH 和母质类型均显著影响土壤酸缓冲容量大小。除硅质岩发育黄棕壤外, 酸性土壤的酸缓冲容量较相同母质发育的中性土壤低 22%~81%。在中性土壤中, 碳酸盐类母质发育黄棕壤和黄壤含有较多碳酸盐, 酸缓冲容量分别较硅质岩类母质发育黄棕壤和黄壤高 44%和 16%。酸性黄棕壤和黄壤则呈相反趋势。模拟酸化结果表明, 酸缓冲容量较高的土壤, 在外源酸输入时, 土壤 pH 下降较为缓慢, 土壤溶液铝和交换性铝增幅相对较小, 潜在酸化风险较低。12 种供试土壤中, 泥质岩发育的酸性黄棕壤酸缓冲容量最低, 仅为 11.79 mmol·pH⁻¹·kg⁻¹, 对外源酸极度敏感, 潜在酸化风险最高。在武陵秦巴山区不同母质发育土壤中, 需重点关注泥质岩发育黄棕壤酸度的变化, 并采取有效措施增强其抗酸化性能, 降低土壤酸化风险。

关键词: 成土母质; 植烟土壤; 酸缓冲容量; 溶液铝; 交换性铝

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Acidification Resistance of Tobacco-planting Soils Derived from Different Parent Materials in Wuling Qinba District, China

SHI Renyong¹, WANG Changjun², YAN Jing¹, LAI Hongwei^{1, 3}, CHEN Zhenguo², LI Decheng¹, XU Renkou¹, SUN Jingguo^{2†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Hubei Academy of Tobacco Science, Wuhan 430030, China; 3. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

* 中国烟草总公司重点科技项目(110201902005)、江苏省自然科学基金项目(BK20191103)和国家自然科学基金项目(41907019)资助 Supported by the Key Science and Technology Project of China National Tobacco Corporation (No. 110201902005), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (No. BK20191103), the National Natural Science Foundation of China (No. 41907019)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: sunjg596@hotmail.com

作者简介: 时仁勇(1991—), 男, 山东青岛人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤酸化与调控研究。E-mail: ryshi@issas.ac.cn

收稿日期: 2021-07-01; 收到修改稿日期: 2021-10-25; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-01-28

Abstract: 【 Objective 】 This study aimed to investigate the effects of parent materials and initial soil pH on the resistance of soils to acidification. 【 Method 】 Twelve soil samples derived from different parent materials under tobacco-cultivation were collected from Wuling Qinba District, China. The pH buffering capacity (pHBC) of the different soil samples was determined by acid-base titration in the pH range 4.0 to 7.0. Additionally, the changes of soil pH, soluble Al and exchangeable Al following acid input were investigated through simulated acidification with HNO₃. 【 Result 】 The results showed that soil pHBC was significantly affected by parent materials and initial soil pH. Due to the depletion of buffering substances in soils by acidification, the pHBC of weakly acidic yellow-brown soils and yellow soils (11.79–45.15 mmol·pH⁻¹·kg⁻¹) was lower than that of neutral yellow-brown soils and yellow soils (23.74–141.53 mmol·pH⁻¹·kg⁻¹). Therefore, the decrease in soil pH and increase in soil active Al in neutral yellow-brown and yellow soils were slow during the simulated acidification, indicating a weak acidification potential. Among the neutral yellow-brown soils and yellow soils, the soil pHBC increased with an increase in carbonate content in soils. The soils derived from limestone and carbonate parent materials reserved more carbonate (21.14 and 1.18 g·kg⁻¹), which led to a higher pHBC than soils derived from quartzite and siliceous parents. However, the opposite tendencies were observed in the weak acid yellow-brown soils and yellow soils. In weak acid soils, the exchangeable base cations played the major pH buffering role due to the exhaustion of carbonate. Compared with the soils derived from limestone and carbonate parents, soils derived from quartzite and siliceous parents contained more clay and organic matter, which provided more H⁺ exchangeable sites and was thus beneficial to buffer exogenous acid and slow down the activation of soil aluminum during acidification. Among the 12 tested soils, the acidic yellow-brown soil derived from pelite was extremely sensitive to exogenous acids due to the lowest pHBC (11.79 mmol·pH⁻¹·kg⁻¹). When 6 mmol·L⁻¹ HNO₃ was added, the pH of the acidic yellow-brown soil derived from pelite was lower than that of the acid yellow-brown soils derived from carbonate parents and siliceous parents (by 0.74 and 1.10 pH units, respectively). Correspondingly, the soluble Al and exchangeable Al in the acid yellow-brown soil derived from pelite were significantly higher than those in the acid yellow-brown soils derived from carbonate parents and siliceous parents. 【 Conclusion 】 The acid yellow-brown soil derived from pelite presented the highest potential acidification risk. Thus, it is necessary to pay more attention to the acidification trend of soils derived from pelite and improve the resistance of these soils to acidification through the application of organic fertilizer. These findings provide significant guidelines for the management of soil acidification during continuous tobacco cultivation in the Wuling Qinba region, China.

Key words: Parent material; Tobacco-planting soil; pH buffering capacity; Soluble aluminum; Exchangeable aluminum

土壤的自然酸化过程极其缓慢,在自然条件下,土壤 pH 下降 1 个单位需上百万年^[1]。然而,近年来由于酸沉降、过量氮肥施用等因素,导致我国农田土壤酸化速度大大加快^[2-3]。研究^[4]表明,1980 年至 2010 年期间,我国农田耕层土壤 pH 平均下降 0.5 个 pH 单位,其中经济作物(如蔬菜、果木、茶叶、棉花等)土壤 pH 下降 0.30~0.80 个单位,粮食作物(如小麦、玉米、水稻等)土壤 pH 下降 0.13~0.76 个单位。可见,种植经济作物的土壤酸化幅度显著高于粮食作物。烟草(*Nicotiana tabacum*)是我国重要的经济作物之一,长期植烟土壤同样也呈现出明显的酸化趋势。Zhang 等^[5]对重庆市长期植烟土壤的性质比较研究发现,连续种植烟草 10 年后,土壤 pH 平均下降 0.2 个单位,土壤交换性盐基阳离子平均下降 27.6%。随着土壤酸化程度加深,

土壤酸害、铝毒、养分匮乏等因素严重限制了烟草等农作物生长。此外,土壤酸化也是诱发烟草青枯病爆发的主要因素之一^[6-7]。烟田土壤酸化严重影响烤烟产量与品质。

土壤酸化速度主要取决于外源酸输入量和土壤自身抗酸化能力。当等量外源酸输入土壤时,土壤自身抗酸化能力越强,土壤 pH 降低幅度越小^[8-9]。土壤自身抗酸化能力与土壤中酸缓冲物质的种类和含量密切相关。土壤主要酸碱缓冲体系可大体分为碳酸盐(pH 6.2~8.6)、硅酸盐(pH > 5.0)、阳离子交换(pH 4.2~5.0)及铝(pH < 4.2)、铁(pH < 3.8)缓冲体系^[10]。土壤母质类型和初始土壤 pH 可通过影响土壤酸缓冲物质组成影响土壤酸缓冲性能。不同母质发育土壤黏粒含量、矿物组成、阳离子交换量(CEC)、有机质等理化性质不同,从而影响土壤

的缓冲性能和酸化进程^[11-12]。研究^[8]表明，红砂岩发育红壤的缓冲容量显著低于第四纪红黏土、花岗岩、玄武岩发育的红壤、赤红壤和砖红壤。红砂岩母质发育的表层水稻土酸缓冲容量较河流冲积物母质发育的水稻土低 26.8%^[9]。红砂岩母质发育的土壤黏粒含量、CEC 以及有机质含量通常较低，缺少缓冲物质，抗酸化能力较弱。目前这方面研究主要集中于我国南方酸性红壤区，而对于酸化问题广泛存在的西南山地土壤关注较少。山地土壤成土母质复杂多样，在短距离内即可分布多种不同母质发育的土壤类型。科学评估不同成土母质发育山地土壤的抗酸化能力，对山地土壤酸化阻控和科学管理具有重要意义。

本研究以武陵秦巴生态区典型成土母质发育的烟田土壤为研究对象，分析比较不同成土母质对该地区土壤缓冲性能的影响，进一步通过模拟酸化实验，评估不同母质发育烟田土壤的潜在酸化风险，以期为山地烟田土壤酸化的分类调控和科学管理提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为武陵秦巴山区不同母质发育的烟田土壤，采集 0~20 cm 表层土壤用于本研究。黄棕壤分别发育自碳酸盐岩、硅质岩和泥质岩三类成土母质，黄壤分别发育自石灰岩和石英岩母质。土壤初始 pH 范围在 4.5~7.0。土样经自然风干后，磨细分别过 2 mm 和 0.25 mm 孔径筛，用以测定土壤基本理化性质和模拟酸化实验，12 种供试土壤的采样位置信息与基本性质分别列于表 1 和表 2。

1.2 测定方法

土壤 pH 利用复合 pH 电极通过 Orion pH 计 (Thermo Scientific Orion Star A211, 美国) 在土水比为 1:2.5 条件下测定。

土壤交换性酸 (H^+ 和 Al^{3+}) 通过 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾溶液淋洗提取，再用 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 滴定测得。土壤交换性盐基阳离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 通过 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸铵溶液浸提，提取液中 K^+ 和 Na^+ 用火焰光度计 (Sherwood M410, Sherwood Scientific Ltd, Cambridge, 英国) 测定， Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 用原子吸收光谱仪 (nov AA350, Analytik, Jena AG, 德国)

测定。

土壤 CEC 采用醋酸铵法测定 (pH=7.0)，有机质通过重铬酸钾法测定，碳酸盐含量通过气量法测定^[13]。X 射线衍射仪 (XRD, Model ULTIMA IV, Rigaku, 日本) 对过 0.075 mm 筛的土壤样品直接测定以确定土壤矿物组成，矿物百分比含量通过分析样品中矿物的最强衍射峰与标准矿物最强衍射峰比值求得^[14]。土壤颗粒粒径分布用激光粒度分析仪 (LS13320, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, 美国) 测定^[15]，计算获得黏粒 (< 2 μm)、粉粒 (2~20 μm) 和砂砾 (> 20 μm) 各粒级含量，确定土壤机械组成。

土壤 pH 缓冲容量 (pHBC) 指单位质量土壤 pH 升高或降低 1 个单位所需的酸或碱量，通过酸碱滴定法测定，以 pH 4.0~7.0 区间内滴定曲线的斜率作为土壤 pH 缓冲容量^[16-17]。具体操作如下：在聚乙烯离心管中加入 4.00 g 土样，添加 20 mL 不同浓度梯度的 HCl 或 NaOH 溶液。酸碱溶液的浓度梯度设置为 0~100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，为保证酸碱滴定曲线位于 pH 4.0~7.0 之间，酸碱添加量根据土壤初始 pH 调整。0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $CaCl_2$ 作为不同酸碱溶液的背景浓度，以减小土壤离子强度变异。向各离心管中添加 0.25 mL 的氯仿以抑制微生物活动干扰。悬液在 25℃ 下振荡 24 h，平衡 6 d，每天振荡 2 min。结束后测定悬液 pH，获得滴定曲线，计算土壤 pH 缓冲容量。

1.3 模拟酸化实验

称取 4.00 g 过 0.25 mm 筛的风干土壤样品于已称重的塑料离心管中，添加 20 mL 不同浓度梯度的 HNO_3 溶液 (0~100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)，200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 24 h 后静置 6 d，期间每天振荡 2 h。各处理重复三次。反应结束后利用 Orion pH 计和玻璃电极与双盐桥 ($LiCl$) 甘汞参比电极测定悬液 pH^[18]。通过 4 500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 5 min 分离土壤固相与上清液，上清液过 0.45 μm 滤膜，通过电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-AES, Optima 8000 DV, PerkinElmer, 美国) 测定溶液铝含量。将装有残留土壤的离心管称量后，于 45℃ 烘干，再次称量，计算残留溶液和土壤固相质量。烘干后的土样磨细过 0.25 mm 孔筛，通过 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液淋洗，NaOH 滴定法测定交换性酸 (H^+ 和 $1/3 Al^{3+}$) 含量。

1.4 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。采用单因

表 1 采样点基本概况

Table 1 The basic information of soil sampling sites

样点编号 Sample No.	土壤类型 Soil type	地点 Location	母质 Parent materials	所属区域 Region	纬度 (N) Latitude	经度 (E) Longitude	海拔 Altitude/m
1	黄棕壤	湖北恩施	碳酸盐岩	武陵山区	29°58'42"	109°23'59"	930
2	Yellow-brown soil	湖北恩施	硅质岩	武陵山区	29°53'49"	109°31'25"	1 247
3		湖北十堰	泥质岩	秦巴山区	32°06'36"	110°54'41"	778
4		湖北恩施	碳酸盐岩	武陵山区	29°57'54"	109°23'56"	1 047
5		湖北恩施	硅质岩	武陵山区	29°53'49"	109°31'25"	1 247
6		湖北十堰	泥质岩	秦巴山区	32°03'36"	110°30'04"	784
7	黄壤	重庆石柱	石灰岩	武陵山区	30°05'23"	108°31'12"	1 374
8	Yellow soil	重庆石柱	石英岩	武陵山区	29°55'30"	108°17'09"	1 303
9		重庆石柱	石灰岩	武陵山区	29°55'32"	108°17'23"	1 277
10		重庆石柱	石英岩	武陵山区	29°51'59"	108°20'39"	1 414
11		重庆石柱	石灰岩	武陵山区	29°56'54"	108°18'51"	1 341
12		重庆石柱	石英岩	武陵山区	29°58'41"	108°22'21"	1 393

表 2 不同母质发育黄棕壤和黄壤的基本理化性质

Table 2 Basic properties of the yellow-brown soils and yellow soils derived from different parent materials

土样编号 Sample No.	交换性酸		交换性盐基阳离子				碳酸钙当量 CaCO ₃ equivalent/ (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	机械组成 ²⁾ Mechanical composition/%				
	pH	Exchangeable acidity / (cmol·kg ⁻¹)	Exchangeable base cations/ (cmol·kg ⁻¹)						CEC ¹⁾ / (cmol·kg ⁻¹)	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	
		H ⁺	1/3 Al ³⁺	K ⁺	Na ⁺	1/2 Ca ²⁺	1/2 Mg ²⁺						
1	6.47	0.00	0.00	1.62	0.09	14.91	1.42	16.9	1.18	29.2	44.0	39.9	16.1
2	6.35	0.00	0.00	0.84	0.00	6.38	0.82	14.0	0.20	30.1	42.4	37.7	19.9
3	6.55	0.04	0.05	1.19	0.21	13.20	4.17	13.0	0.50	9.1	27.3	35.8	36.9
4	5.06	0.07	0.12	1.47	0.27	8.66	0.96	16.1	N.D. ³⁾	28.5	47.5	48.2	4.3
5	5.09	0.07	0.08	3.13	0.27	15.06	1.14	19.9	N.D. ³⁾	46.1	50.6	43.8	5.6
6	5.11	0.19	0.43	0.29	0.16	2.92	1.08	6.3	N.D. ³⁾	6.8	6.5	22.7	70.8
7	7.60	0.00	0.00	1.67	0.14	N.T. ⁴⁾	1.54	15.2	21.14	35.8	37.7	33.7	28.6
8	7.29	0.00	0.00	2.33	0.00	N.T. ⁴⁾	5.44	22.4	5.29	28.7	39.2	36.8	24.0
9	5.79	0.00	0.05	2.09	0.14	14.34	1.38	16.8	1.72	42.6	39.4	48.2	12.4
10	5.05	0.08	0.14	2.17	0.23	8.00	1.10	12.0	N.D. ³⁾	23.1	36	54.1	9.9
11	4.51	0.22	2.15	0.9	0.11	0.39	0.48	12.0	N.D. ³⁾	23.5	35.4	42.1	22.5
12	4.56	0.27	0.75	3.85	0.17	5.70	1.06	14.7	N.D. ³⁾	22.6	47.3	46.2	6.5

注: 1) CEC: 阳离子交换量; 2) 机械组成采用激光粒度仪测定; 3) N.D.: 未检出; 4) N.T.: 未检测。Note: 1) CEC: Cation exchange capacity; 2) Mechanical composition was determined by laser particle size analyzer; 3) N.D.: No detected; 4) N.T.: Not test.

素方差分析 (AVOVA) 不同处理之间的差异性, 并通过最小显著差异 (LSD) 法检验差异的显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

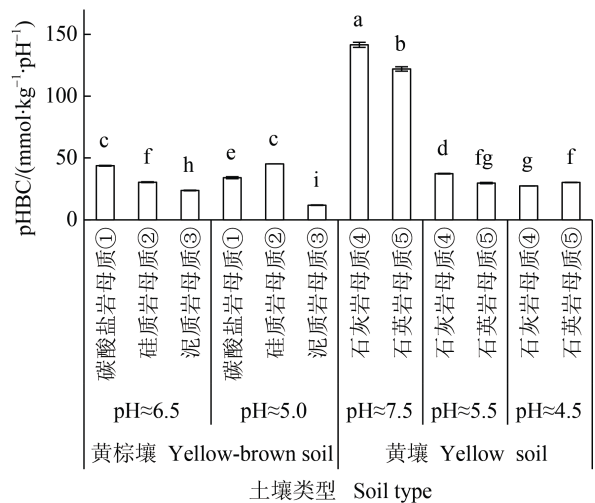
2.1 不同母质发育土壤的酸缓冲容量差异

土壤酸缓冲容量 (pHBC) 是衡量土壤缓冲性能的关键指标。由图 1 可见, 不同初始土壤 pH、不同成土母质发育的黄壤和黄棕壤的 pHBC 表现出显著差异。这是由于成土母质类型和土壤初始 pH 状态决定了土壤中缓冲物质的组成。中性土壤中含有较多缓冲物质, 如碳酸盐等。随着土壤酸化, 土壤中酸缓冲物质被消耗, 缓冲性能减弱^[5]。因此, 初始 pH 低的黄壤和黄棕壤酸缓冲容量低于初始 pH 高的土壤 (图 1)。

在中性土壤中, 土壤酸缓冲容量大小随土壤碳酸盐含量增加而增加 (图 1 和表 2)。土壤酸缓冲容量大小整体呈现碳酸盐类母质发育土壤高于硅质岩母质发育土壤 (图 1)。碳酸盐类母质中含有丰富的方解石、白云石等碳酸盐矿物, 在土壤发生过程中母质中的碳酸盐类物质残留于土壤。例如, 石灰岩母质发育黄壤 pHBC 远高于其他母质发育土壤, 其碳酸盐含量高达 $21.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, XRD 结果显示其矿物组成中含有一定量的方解石 (表 3)。当土壤发生酸化时, 碳酸盐类物质与质子发生中和反应, 维持土壤 pH 稳定。

在酸性黄棕壤和黄壤中, 碳酸盐含量极低 (表 2), 硅酸盐矿物和交换性盐基阳离子成为土壤中主要的缓冲物质^[10]。土壤 pHBC 则与 CEC 呈显著正相关 ($R^2=0.981$, $P < 0.01$), 与我国酸性红壤、紫色土以及澳大利亚酸性土壤具有相似的变化规律^[16, 19-20]。土壤 CEC 越高, 表明土壤具有更多的盐基阳离子交换位点, 可与质子发生交换反应, 缓冲质子输入对土壤酸化的影响。比较发现, 硅质岩发育土壤 CEC 和 pHBC 均高于碳酸盐类母质发育土壤 (图 1)。土壤黏粒和有机质是土壤交换性位点的重要来源。通常土壤黏粒含量和有机质含量越高, 土壤 CEC 越高。硅质岩发育黄棕壤有机质含量显著高于碳酸盐岩母质发育黄棕壤 (表 2), 这可能是由于其海拔高度在 1 300 m 左右, 高于碳酸盐岩母质黄棕壤 (约 1 000 m), 年均温较低, 有利于土壤有机质积累^[21]。石英岩和石灰岩发育黄壤海拔高度相近, 土壤有机质含量无

显著差异, 但石英岩黄壤黏粒含量较石灰岩发育黄壤高 33% (表 2), 蛭石、水云母、高岭石等黏土矿物含量高于石灰岩黄壤 (表 3), 因此其 CEC 显著高于石灰岩发育黄壤, 土壤缓冲性能较强。由于泥质岩发育的酸性黄棕壤中黏粒和有机质含量均远远低于其他母质发育土壤, 导致其酸缓冲容量最低 ($11.79 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{pH}^{-1}$), 仅为硅质岩发育酸性黄棕壤 pHBC 的 26%, 表明其对外源酸输入极度敏感, 潜在酸化风险高。



注: 图中不同小写字母表示不同土壤间差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: The different letters mean the significant differences among different soils ($P < 0.05$). ① Carbonate rock parent material, ② Siliceous rock parent material, ③ Pelite parent material, ④ Limestone parent material, ⑤ Quartzite parent material.

图 1 不同母质发育黄棕壤与黄壤的土壤酸缓冲容量 (pHBC)

Fig. 1 The pH buffering capacity (pHBC) of yellow-brown soils and yellow soils derived from different parent materials

2.2 不同母质发育土壤的模拟酸化过程

通过添加不同浓度梯度 HNO_3 溶液模拟比较不同母质发育土壤的人为酸化过程。结果表明, 不同土壤酸化过程中 pH 下降速度与土壤的酸缓冲容量大小恰恰相反 (图 1, 图 2, 图 3)。在 pH 6.5 的黄棕壤中, 碳酸盐岩发育黄棕壤随外源酸输入 pH 下降最慢, 其次为硅质岩发育黄棕壤, 泥质岩发育黄棕壤 pH 下降最快。在三种 pH 5.0 的黄棕壤中, pH 下降速度由低到高依次为: 硅质岩母质黄棕壤、碳酸盐岩母质黄棕壤、泥质岩母质黄棕壤 (图 2)。

表 3 土壤的矿物组成

Table 3 Mineral composition of the soil/%

土样编号 Sample No.	蛭石 Vermiculite	水云母 Hydromica	闪石 Amphibole	高岭石	绿泥石 Chlorite	石英 Quartz	长石 Feldspar	方解石 Calcite	白云石 Dolomite
				/绿泥石 Kaolinite/ Chlorite					
1	3	2	0	2	0	88	5	0	0
2	3	1	0	2	0	93	1	0	0
3	1	9	2	1	0	59	28	0	0
4	2	1	0	1	0	88	8	0	0
5	1	0	0	2	0	92	5	0	0
6	9	3	0	0	12	32	44	0	0
7	2	1	0	3	0	89	4	1	0
8	3	1	1	2	0	85	3	0	5
9	0	3	0	2	0	90	5	0	0
10	2	1	0	1	0	92	4	0	0
11	0	2	0	1	0	95	2	0	0
12	4	2	0	2	0	87	5	0	0

注：矿物百分含量为样品中矿物的最强衍射峰与标准矿物最强衍射峰比值。 Note: Mineral percentage content is the ratio of the strongest diffraction peak of minerals in the soil sample to the strongest diffraction peak of standard minerals.

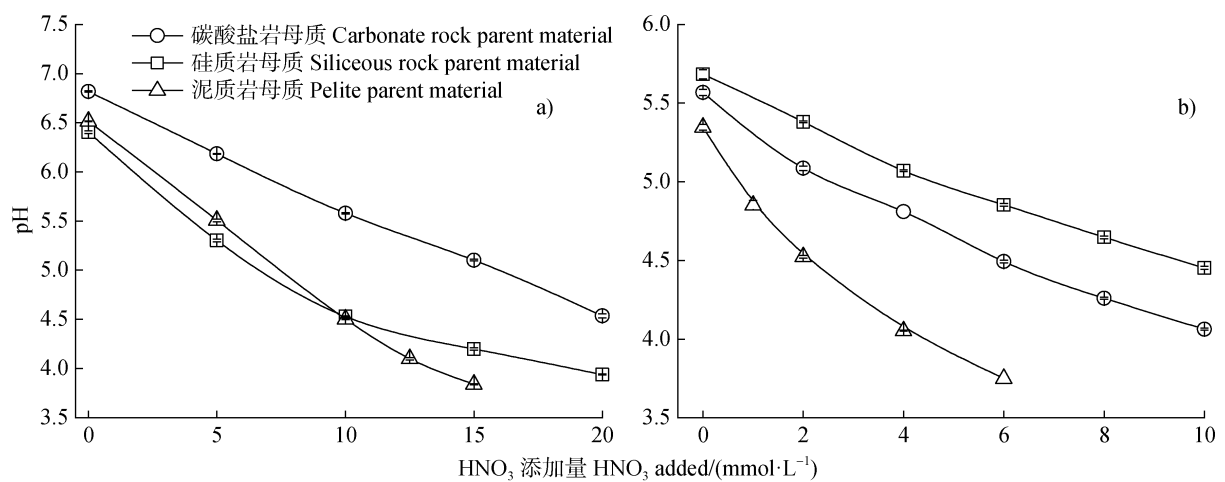


图 2 不同母质发育黄棕壤模拟酸化过程中土壤 pH 的变化 (a. 初始 pH ≈ 6.5 黄棕壤; b. 初始 pH ≈ 5.0 黄棕壤)
Fig. 2 Soil pH change trends of yellow-brown soils derived from different parent materials with increasing HNO₃ addition (a. Yellow-brown soil with initial pH ≈ 6.5; b. Yellow-brown soil with initial pH ≈ 5.0)

在 pH 7.5 的黄壤中，石灰岩发育黄壤 pH 降低速度明显慢于石英岩发育的黄壤 (图 3a)，尤其是在 pH > 6.0 区间内。两种土壤的 pH 变化过程明显分为两个阶段：在酸化初期 pH 下降缓慢；当 pH < 6.0 以后，土壤 pH 快速下降。这也说明在 pH > 6.0 时，

石灰岩母质发育黄壤中的碳酸盐物质发挥主要的缓冲作用。由于石灰岩黄壤中含有更多碳酸盐，因此在缓慢下降阶段能够消耗更多外源酸。初始 pH 5.5 的石灰岩黄壤 pH 降低速度慢于石英岩黄壤 (图 3b)。一方面是由于该石灰岩发育黄壤 pH 较高，尚残存

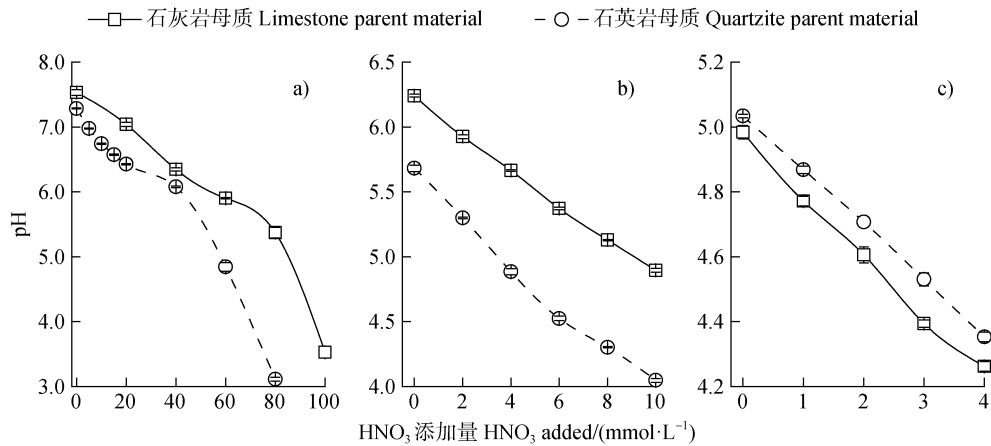


图3 不同母质发育黄壤模拟酸化过程中土壤 pH 的变化 (a. 初始 pH ≈ 7.5 黄壤; b. 初始 pH ≈ 5.5 黄壤; c. 初始 pH ≈ 4.5 黄壤)

Fig. 3 Soil pH change trends of yellow soils derived from different parent materials with increasing HNO₃ addition (a. Yellow soil with initial pH ≈ 7.5; b. Yellow soil with initial pH ≈ 5.5; c. Yellow soil with initial pH ≈ 4.5)

少许碳酸盐类物质,起到缓冲外源酸的作用;另一方面,石灰岩发育的黄壤中有有机质含量较石英岩发育黄壤高 80%以上,可通过有机阴离子的质子化作用消耗部分外源酸^[22]。在 pH 4.5 的黄壤中,石灰岩发育黄壤的酸化速度则略快于石英岩母质黄壤(图 3c)。此时,土壤中的缓冲物质主要是交换性盐基阳离子。石英岩母质发育土壤黏粒含量略高于石灰岩母质发育黄壤,可提供更多消耗质子的盐基阳离子交换位点,减缓土壤 pH 降低。

所有供试土壤中,由于泥质岩母质发育的黄壤中碳酸盐物质、有机质、黏粒矿物等缓冲物质含量较低,其酸化速度快,对外源酸最敏感。当外源质子输入量为 15 mmol·L⁻¹时,泥质岩发育中性黄壤 pH 分别较硅质岩和碳酸盐岩母质发育中性黄壤低 0.36 和 1.26 个 pH 单位(图 2a);当外源质子输入量为 6 mmol·L⁻¹时,泥质岩发育酸性黄壤 pH 分别较硅质岩和碳酸盐岩母质发育酸性黄壤低 1.10 和 0.74 个 pH 单位(图 2b)。

2.3 不同母质发育土壤在酸化过程中固相铝的释放

铝(Al)是土壤中最丰富的金属元素,通常以无毒的铝硅酸盐矿物和铝(氢)氧化物等非活性 Al 形式存在。当土壤发生酸化时,土壤固相铝溶出造成植物铝毒害^[23]。如图 4 所示,随外源酸输入,土壤溶液 Al 浓度呈指数增加。土壤 pH > 5.0 时,溶液 Al 浓度较低,土壤 pH < 5.0 时,溶液 Al 浓度快速增加(图 4 和图 5)。在酸性条件下,土壤溶液 Al 以

Al³⁺为主,其浓度与土壤 pH 呈指数关系^[18, 24]。在初始 pH 6.5 的三种黄棕壤中,添加等量酸的情况下,泥质岩黄棕壤中溶液 Al 浓度最高,其次为硅质岩黄棕壤,碳酸盐岩黄棕壤中溶液 Al 含量最低。初始 pH 5.0 的三种黄棕壤中,土壤溶液 Al 随外源酸输入的增加速度由高到低依次为:泥质岩黄棕壤、硅质岩黄棕壤、碳酸盐岩黄棕壤。在初始 pH > 5.5 黄壤中,石英岩母质发育黄壤溶液 Al 浓度增加幅度均显著高于石灰岩母质黄壤。初始 pH 为 4.5 时,石灰岩母质发育黄壤较石英岩母质发育黄壤更易释放 Al。土壤溶液 Al 增加趋势与土壤 pH 降低趋势一致(图 2 和图 3)。酸缓冲容量高的土壤,外源酸输入时土壤 pH 下降缓慢,溶液 Al 增加相对较缓。比较初始 pH 不同的泥质岩发育黄棕壤发现,在等 pH 条件下,中性泥质岩黄棕壤溶液 Al 浓度显著高于弱酸性泥质岩发育黄棕壤。当土壤 pH 下降至 4.0 时,中性泥质岩黄棕壤中溶液 Al 浓度为酸性泥质岩黄棕壤的 3.5 倍。这可能与不同初始 pH 状态的泥质岩发育黄棕壤中控制 Al 溶解度的固相铝形态不同有关^[25]。中性泥质岩黄棕壤中含有较多的黏土矿物,黏粒含量较高,有利于土壤矿物 Al 释放,而酸性泥质岩黄棕壤中绿泥石等矿物结晶度高,并以砂砾为主,土壤固相 Al 溶解度较低。由此可见,初始 pH 较高的泥质岩黄棕壤一旦发生酸化,将导致更多的固相铝释放至土壤溶液中,极易造成植物铝毒害,危害烟草等作物的生长。

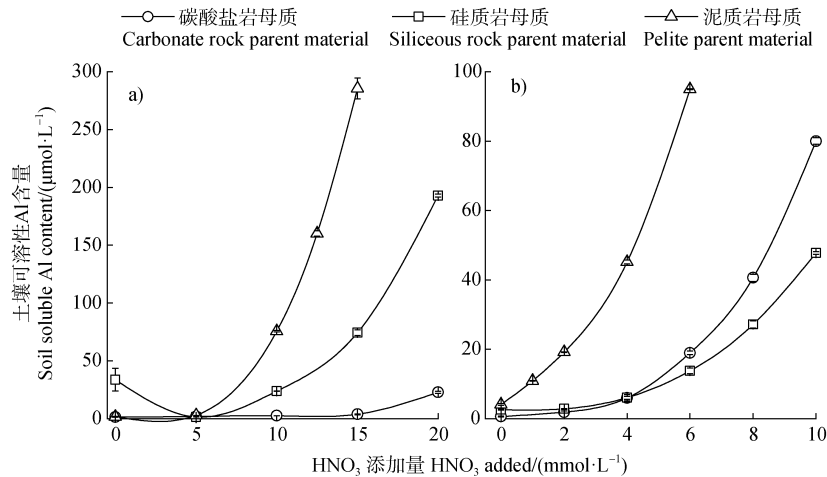


图 4 不同母质发育黄棕壤模拟酸化过程中溶液铝的变化 (a. 初始 pH \approx 6.5 黄棕壤; b. 初始 pH \approx 5.0 黄棕壤)

Fig. 4 Change trends of soluble Al in yellow-brown soils derived from different parent materials with increasing HNO₃ addition (a. Yellow-brown soil with initial pH \approx 6.5; b. Yellow-brown soil with initial pH \approx 5.0)

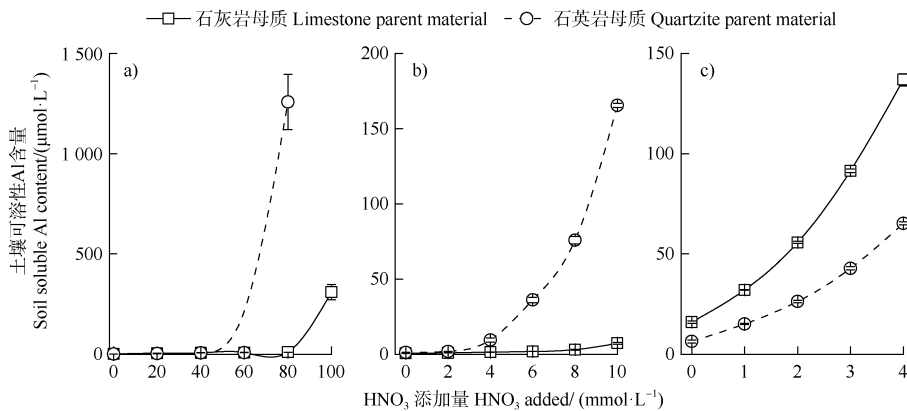


图 5 不同母质发育黄壤模拟酸化过程中溶液铝的变化 (a. 初始 pH \approx 7.5 黄壤; b. 初始 pH \approx 5.5 黄壤; c. 初始 pH \approx 4.5 黄壤)

Fig. 5 Change trends of soluble Al in yellow soils derived from different parent materials with increasing HNO₃ addition (a. Yellow soil with initial pH \approx 7.5; b. Yellow soil with initial pH \approx 5.5; c. Yellow soil with initial pH \approx 4.5)

2.4 不同母质发育土壤在酸化过程中交换性铝的变化

土壤交换性铝通过静电作用吸附于土壤表面, 是土壤酸度的主要组成部分, 可快速释放进入土壤溶液, 造成植物铝毒害。随外源酸输入, 土壤交换性 Al³⁺ 含量逐渐上升 (图 6 和图 7)。在不同母质发育土壤中, 随外源酸输入, 交换性铝的增加趋势存在显著差异。供试黄棕壤中, 泥质岩发育黄棕壤交换性铝增加幅度明显大于相同初始 pH 水平的其他母质发育的土壤。当添加 15 mmol·L⁻¹ HNO₃ 时, 中性泥质岩发育黄棕壤交换性铝含量较硅质岩发育黄棕壤高 36.5%, 较碳酸盐岩发育黄棕壤高 7.8 倍。向弱酸性黄棕壤中添加 6 mmol·L⁻¹ HNO₃ 时, 泥质岩发育黄棕壤分别较碳酸盐岩母质和硅质岩母质发育

黄棕壤高 1.8 倍和 3.2 倍 (图 6)。高初始 pH 的黄棕壤和黄壤中, 石英岩和硅质岩母质发育土壤交换性铝增加快于石灰岩和碳酸盐岩母质发育土壤。在酸性黄棕壤和黄壤中呈相反趋势。土壤交换性 Al 的增加与外源酸输入导致土壤 pH 下降趋势一致。土壤交换性铝含量与土壤 pH 呈指数相关^[26-27]。在等量外源酸输入的情况下, 酸缓冲能力强的土壤 pH 下降速度慢, 土壤 pH 保持在较高水平, 进而导致土壤交换性铝含量较低。

3 结论

不同母质发育黄壤和黄棕壤的抗酸化能力存在显著差异, 导致土壤酸化趋势不同。在初始 pH 较

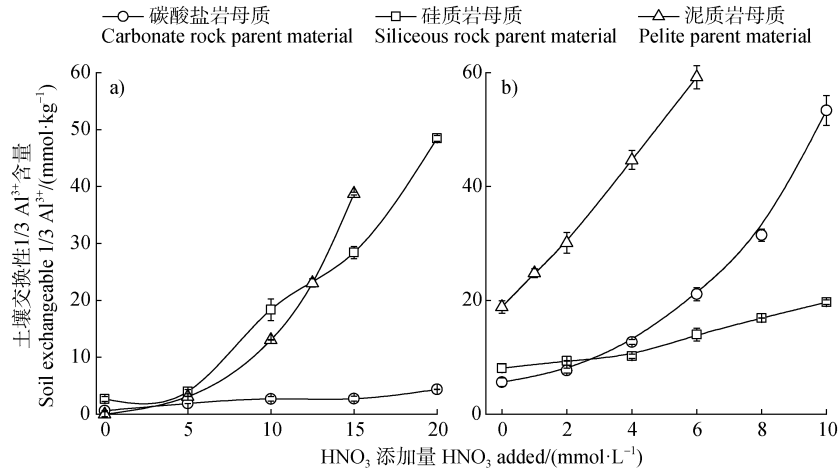


图 6 不同母质发育黄棕壤模拟酸化过程中交换性铝的变化 (a. 初始 pH \approx 6.5 黄棕壤; b. 初始 pH \approx 5.0 黄棕壤)
 Fig. 6 Change trends of exchangeable Al $^{3+}$ in yellow-brown soils derived from different parent materials with increasing HNO $_3$ addition (a. Yellow-brown soil with initial pH \approx 6.5; b. Yellow-brown soil with initial pH \approx 5.0)

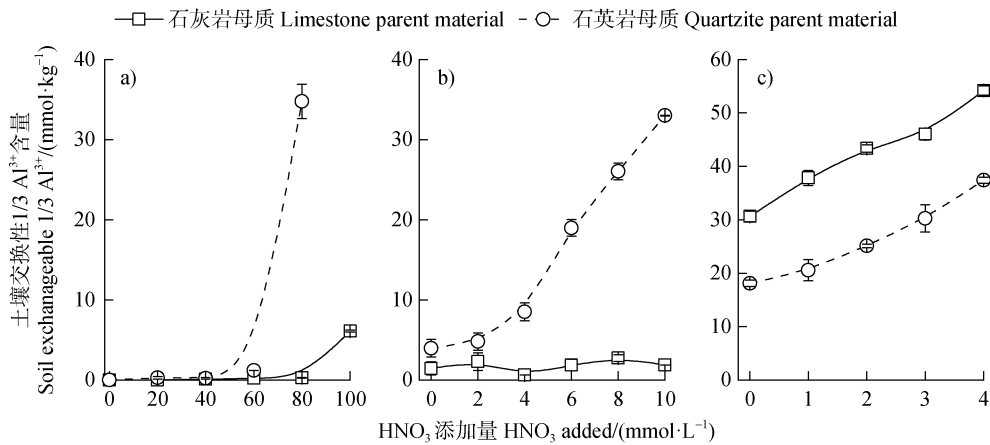


图 7 不同母质发育黄壤模拟酸化过程中交换性铝的变化 (a. 初始 pH \approx 7.5 黄壤; b. 初始 pH \approx 5.5 黄壤; c. 初始 pH \approx 4.5 黄壤)

Fig. 7 Change trends of exchangeable Al $^{3+}$ in yellow soils derived from different parent materials with increasing HNO $_3$ addition (a. Yellow soil with initial pH \approx 7.5; b. Yellow soil with initial pH \approx 5.5; c. Yellow soil with initial pH \approx 4.5)

高的黄壤和黄棕壤中，碳酸盐类物质起主要的酸缓冲作用。碳酸盐类母质发育土壤中碳酸盐含量高，土壤抗酸化能力强，土壤 pH 随外源酸输入下降缓慢，土壤溶液铝和交换性 Al $^{3+}$ 升高趋势较缓。在 pH < 5.0 的黄壤和黄棕壤中，交换性盐基阳离子起到主要的酸缓冲作用。在这一 pH 条件下，碳酸盐类母质发育土壤相较于硅质岩/石英岩母质土壤缓冲性能弱，对外源酸输入更为敏感，易形成土壤活性铝，造成植物铝毒害。所有供试土壤中，泥质岩发育黄棕壤缓冲物质含量最低，酸缓冲性能差，随外源酸输入极易发生土壤酸化并释放大量活性铝，亟需加强对该类土壤酸化趋势的监测，同时采取有效措施提高土壤自身抗酸化能力，降低这

类土壤的酸化风险。

参考文献 (References)

- [1] Jiang J, Xu R K, Zhao A Z. Surface chemical properties and pedogenesis of tropical soils derived from basalts with different ages in Hainan, China[J]. *Catena*, 2011, 87 (3): 334—340.
- [2] Xu R K, Li J Y, Zhou S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33: 160—167. [徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33: 160—167.]
- [3] Hao T X, Zhu Q C, Zeng M F, et al. Quantification of the

- contribution of nitrogen fertilization and crop harvesting to soil acidification in a wheat-maize double cropping system[J]. *Plant and Soil*, 2019, 434 (1/2): 167—184.
- [4] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [5] Zhang Y T, He X H, Liang H, et al. Long-term tobacco plantation induces soil acidification and soil base cation loss[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23 (6): 5442—5450.
- [6] Li S L, Liu Y Q, Wang J, et al. Soil acidification aggravates the occurrence of bacterial wilt in South China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 703.
- [7] Wang H C, Yu J, Cai L T, et al. Effect of temperature, relative humidity, inoculum amount and pH on pathogenicity of *Ralstonia solanacearum* on tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2017, 38 (5): 8—12. [汪汉成, 余婧, 蔡刘体, 等. 温度、湿度、接菌量及 pH 对烟草青枯病菌致病力的影响[J]. *中国烟草科学*, 2017, 38 (5): 8—12.]
- [8] Shi R Y, Li J Y, Jiang J, et al. Incorporation of corn straw biochar inhibited the re-acidification of four acidic soils derived from different parent materials[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (10): 9662—9672.
- [9] Tang X, Cai Z J, Xu M G, et al. Research on buffering capacity and acidification rate of paddy soil profiles in Yujiang County[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36 (6): 774—782. [唐贤, 蔡泽江, 徐明岗, 等. 余江县水稻土剖面酸缓冲性能与酸化速率[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36 (6): 774—782.]
- [10] Ulrich B. Natural and anthropogenic components of soil acidification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1986, 149 (6): 702—717.
- [11] Zhao K L, Wang B R, Xu M G, et al. Changes in pH with depths of soils derived from different parent materials and analysis of acidification in Southern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (8): 1308—1315. [赵凯丽, 王伯仁, 徐明岗, 等. 我国南方不同母质土壤 pH 剖面特征及酸化因素分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (8): 1308—1315.]
- [12] Fujii K, Kanetani S, Tetsuka K. Effects of volcanic parent materials on the acid buffering capacity of forest soils on Yakushima Island, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 66 (5): 680—692.
- [13] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [14] Zhao Y, Yang J L, Dong Y, et al. Stoichiometry of soil mineral weathering in intensely weathered soil as leached by simulated acid rain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (2): 310—319. [赵越, 杨金玲, 董岳, 等. 模拟酸雨淋溶下强风化土壤矿物风化计量关系研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (2): 310—319.]
- [15] Jiang J, Dai Z X, Sun R, et al. Evaluation of ferrolysis in arsenate adsorption on the paddy soil derived from an Oxisol[J]. *Chemosphere*, 2017, 179: 232—241.
- [16] 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.
- [17] Liu L, Cheng Y Y, Li Z Y, et al. Influence of fitting method on the accuracy of measuring soil acid buffering capacity by acid-base titration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (2): 509—516. [刘莉, 程永毅, 李忠意, 等. 拟合方式对酸碱滴定法测定土壤酸缓冲容量准确性的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (2): 509—516.]
- [18] Xu R K, Ji G L. Effects of H_2SO_4 and HNO_3 on soil acidification and aluminum speciation in variable and constant charge soils[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 129 (1/4): 33—43.
- [19] Liu L, Xie D T, Li Z Y, et al. Cations exchange and its effect on acid buffering capacity of acid purple soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (4): 887—897. [刘莉, 谢德体, 李忠意, 等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (4): 887—897.]
- [20] Nelson P N, Su N. Soil pH buffering capacity: A descriptive function and its application to some acidic tropical soils[J]. *Soil Research*, 2010, 48 (3): 201—207.
- [21] Shang B, Zou Y, Xu Y M, et al. Relationship between SOM contents of tobacco fields and elevation and parent materials in central region of Guizhou Province[J]. *Soils*, 2014, 46 (3): 446—451. [尚斌, 邹焱, 徐宜民, 等. 贵州中部山区植烟土壤有机质含量与海拔和成土母质之间的关系[J]. *土壤*, 2014, 46 (3): 446—451.]
- [22] Shi R Y, Liu Z D., Li Y, et al. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 77—84.
- [23] Yamamoto Y. Aluminum toxicity in plant cells: Mechanisms of cell death and inhibition of cell elongation[J]. *Journal of*

- Soil Science and Plant Nutrition, 2019, 65 (1): 41—55.
- [24] Xu R K, Ji G L. Influence of pH on dissolution of aluminum in acid soils and the distribution of aluminum ion species[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35 (2): 162—171. [徐仁扣, 季国亮. pH 对酸性土壤中铝的溶出和铝离子形态分布的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 162—171.]
- [25] Shen R F. The behavior of aluminum in soil-plants and the adaptation mechanism of plants[M]. Beijing: Science Press, 2008. [沈仁芳. 铝在土壤-植物中的行为及植物的适应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [26] Yu T R, Ji G L, Ding C P, et al. Electrochemistry of variable charge soils[M]. Beijing: Science Press, 1996. [于天仁, 季国亮, 丁昌璞, 等. 可变电荷土壤的电化学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [27] Zhang Y P, Zong L G, Shi Y F. Effects of soil pH on characteristics of soil Al in tea plantations[J]. Soils, 2019, 51 (4): 746—751. [张艳萍, 宗良纲, 史艳芙. 茶园土壤 pH 变化对土壤中铝特性的影响[J]. 土壤, 2019, 51 (4): 746—751.]

(责任编辑: 陈荣府)