

不同岩性发育的红壤关键带土壤酸缓冲容量的垂直分异特征及主控因素*

李雅琼^{1,2}, 吴华勇^{1,3,4†}, 李继福², 宋效东¹, 杨顺华¹, 王昭¹, 张甘霖^{1,3}

(1. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2. 长江大学农学院, 湖北荆州 434025; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 解析不同岩性发育的林地覆盖红壤关键带土壤酸缓冲容量(pHBC)的特征及影响因素, 以期为中国南方红壤酸化防控及林地生态稳定性维持提供理论依据。以千枚岩、红砂岩、花岗岩发育的林地覆盖红壤关键带土壤为研究对象, 于 4.5~6.0 m 深度采集三种岩性来源的土壤样品, 系统测定其 pHBC、pH、机械组成、矿物组成以及有机质、铁铝氧化物、交换性酸和交换性盐基的含量。基于土壤酸缓冲理论, 利用线性回归和随机森林模型, 解析土壤 pHBC 的垂直变异特征及主要影响因素。结果表明, 土壤 pHBC 呈现明显的垂直分异特征, 在一定深度范围内随深度增加而降低, 在到达拐点后随深度增加而升高。在 pH 4.4~5.6 范围内, 土壤 pHBC 垂直分异特征由 pH、黏粒和有机质含量主导, 随 pH 降低及黏粒和有机质含量的升高呈现单调升高的规律。在 pH 总体主导下, 千枚岩发育土壤的 pHBC 与有机质、黏粒、高岭石、晶形氧化铁含量呈显著线性正相关。红砂岩发育土壤的 pHBC 与黏粒、粉粒、高岭石、无定形氧化铝含量呈显著线性正相关。花岗岩发育土壤的 pHBC 与有机质、黏粒、粉粒、水云母、无定形氧化铝、晶形氧化铝、交换性 K⁺、交换性 Na⁺含量呈显著线性正相关。红壤关键带土壤风化程度高, 交换性酸含量和铝饱和度高, 交换性盐基总量较低且随深度变异较小, 在 4.5~6.0 m 的深度范围内, 盐基离子交换作用总体上对土壤 pHBC 的贡献较小。土壤有机质、黏粒、粉粒、铁铝氧化物、高岭石的固相表面质子化作用, 以及铝氧化物溶解作用对 pHBC 的贡献较大。土壤中的次生硅酸盐黏土矿物以及含有的少量钙长石、钠长石或微斜长石等原生矿物, 也可通过矿物溶解反应发挥一定的酸缓冲作用。

关键词: 土壤酸化; 酸缓冲机制; 千枚岩风化壳; 红砂岩风化壳; 花岗岩风化壳; 地球关键带

中图分类号: S153.4 文献标志码: A

Vertical Differentiation Characteristics and Main Controlling Factors of Soil Acid Buffering Capacity in the Red Soil Critical Zone Derived from Different Lithologies

LI Yaqiong^{1,2}, WU Huayong^{1,3,4†}, LI Jifu², SONG Xiaodong¹, YANG Shunhua¹, WANG Zhao¹, ZHANG Ganlin^{1,3}

* 国家自然科学基金项目(42477311)和中国科学院南京土壤研究所自主部署项目(ISSASIP2209)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42477311) and the Self Deployment Project of the Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (No. ISSASIP2209)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hywu@issas.ac.cn

作者简介: 李雅琼(2002—), 女, 青海海东人, 硕士研究生, 主要从事土壤地球化学研究。Email: 202005333@yangtzeu.edu.cn
收稿日期: 2025-12-08; 收到修改稿日期: 2026-05-12; 网络首发日期(www.cnki.net):

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to analyze the characteristics and influencing factors of soil acid buffering capacity (pHBC) in the critical zone of forested red soils derived from different lithologies, to provide a theoretical basis for controlling red soil acidification and maintaining the stability of forest ecosystems in southern China.

【Method】 The selected soils within the forested red soil critical zone are derived from phyllite, red sandstone, and granite. Soil samples were collected at depths of 4.5-6.0 m and were systematically analyzed for pHBC, pH, mechanical composition, mineral composition, as well as the contents of organic matter, iron and aluminum oxides, exchangeable acidity, and exchangeable base cations. Based on soil acid buffering theory, linear regression and random forest modeling were employed to analyze the vertical variation of soil pHBC and its main influencing factors. **【Result】** Soil pHBC showed distinct vertical differentiation: it decreased with increasing depth within a certain range, and increased after reaching an inflection point. Within the pH range of 4.4-5.6, the vertical variation of pHBC was primarily governed by soil pH, clay content, and organic matter content, showing a monotonic increase with decreasing pH and increasing clay and organic matter. Under the overall dominance of pH, the pHBC of phyllite-derived soils showed significant positive linear correlations with the contents of organic matter, clay, kaolinite, and crystalline iron oxides. In the red sandstone-derived soils, pHBC correlated positively with the contents of clay, silt, kaolinite, and amorphous aluminum oxides. For granite-derived soils, pHBC was positively correlated with the contents of organic matter, clay, silt, hydromica, amorphous aluminum oxides, crystalline aluminum oxides, exchangeable K^+ , and exchangeable Na^+ . **【Conclusion】** Soils within the studied red soil critical zone are highly weathered, featuring high exchangeable acidity and aluminum saturation but low total exchangeable base cation content that varied little with depth. Within the 4.5–6.0 m depth range, base cation exchange contributed minimally to pHBC. The primary buffering mechanisms were proton adsorption onto solid surfaces (organic matter, clay, silt, iron and aluminum oxides, kaolinite) and the dissolution of aluminum oxides. Secondary silicate clay minerals, along with minor amounts of primary minerals such as anorthite, albite, and microcline, also provided a measurable acid buffering effect via mineral dissolution reactions.

Key words: Soil acidification; Acid buffering mechanism; Phyllite regolith; Red sandstone regolith; Granite regolith; Earth's critical zone

热带与亚热带地区作为全球生物多样性热点区域和重要的森林碳库,其森林生态系统的稳定对全球生态平衡具有不可替代的作用^[1]。然而,受高温多雨气候、高强度大气酸沉降以及林地经营活动的叠加影响,该区域土壤酸化问题日益凸显,对林地生态系统功能发挥构成巨大威胁。土壤酸化不仅会导致土壤胶体表面正电荷增加^[2],显著降低土壤对钾、钙、镁等速效养分的保持能力,影响植物正常生长^[3],抑制根系对水分和养分的吸收^[4];还会加速土壤中铝、锰等金属离子的活化^[5],形成对植物根系具有强毒性的铝、锰离子,导致根系生长受阻^[6]。同时,酸化环境还会显著改变土壤微生物的群落结构,降低土壤微生物活性^[7-8],改变土壤有机质转化速率^[9],打破林地生态系统的物质循环平衡,最终导致土壤生产力下降、林下植被退化,甚至引发区域性的林地生态系统退化。

母质作为五大自然成土因素之一,可调控土壤颗粒组成、矿物类型、有机质含量、酸度及盐基离子组成等理化性质,影响红壤的酸缓冲性能^[10-11]。因此,明确不同母质发育土壤的酸化现状及其酸缓冲能力,分析酸化的主要驱动因素,是采取有效措施减缓土壤酸化进程、降低酸化导致的经济损失、缓解生态环境恶化的关键前提。已有研究围绕母质与红壤酸缓冲性能的关系开展了多方面探索,发现土壤阳离子交换量是影响我国南方第四纪红黏土、红砂

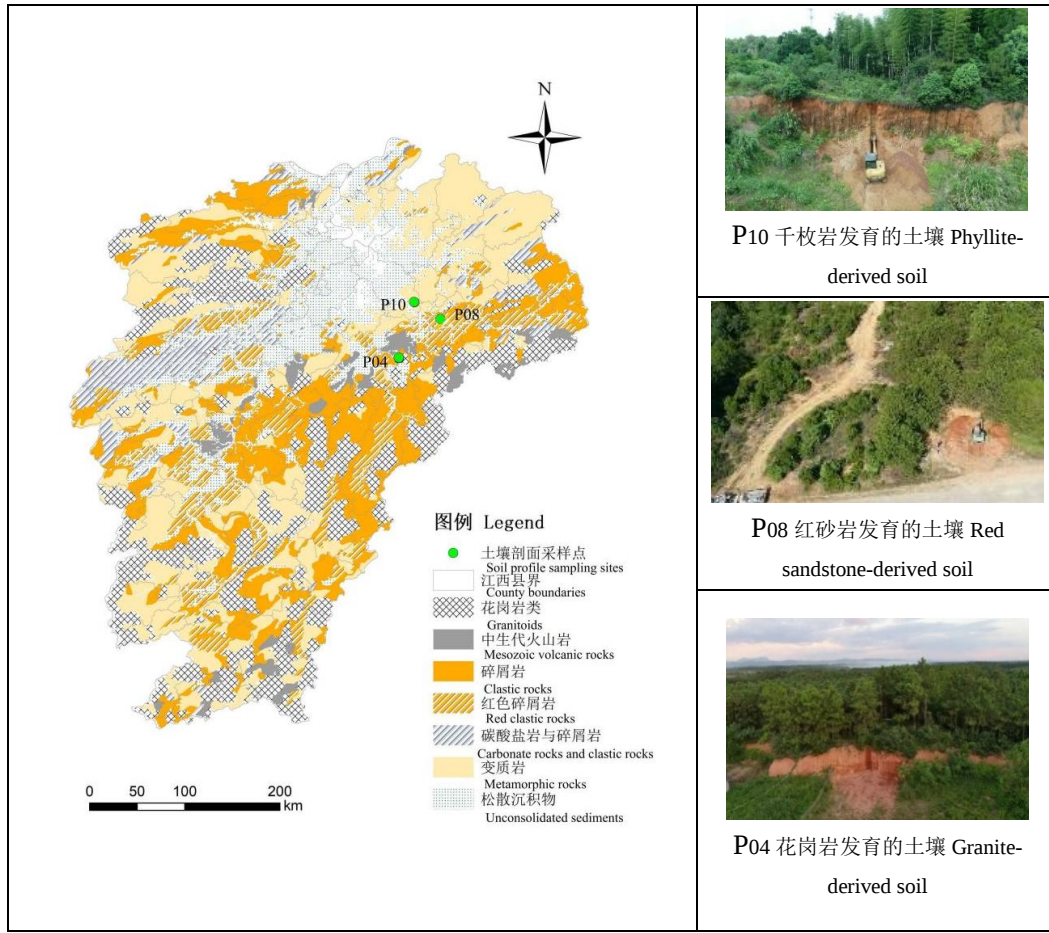
岩、板页岩和花岗岩母质发育的酸性红壤表层土壤酸化的主要因素之一^[12]。红壤性水稻土酸度呈现明显的深度分异特征,在 0~20 cm 土层酸度较大,主要受交换性酸、有机质、交换性 Ca^{2+} 与交换性 Mg^{2+} 等土壤理化性质调控,而在 80~100 cm 土层酸度较低,其变化主要受成土母质控制^[13]。典型赤红壤区花岗岩母质发育的表层土壤(0~20 cm)和表下层土壤(20~40 cm)较冲积物发育的土壤有更低的酸缓冲容量^[14]。第四纪红黏土发育的强酸性红壤剖面酸缓冲容量的主要影响因素为铁铝氧化物的质子化与溶解过程^[15]。然而,尽管学者们已关注母岩、母质对土壤酸缓冲能力的影响,但仍未形成系统性的认知;且研究范围多聚焦于 1 m 以内土层甚至仅表层土壤的性质及过程对酸缓冲作用的影响,从表层土壤至基岩面的地球关键带视角的研究极度缺乏^[15]。地球关键带是指植物冠层顶部至新鲜基岩面或浅层地下水底部的垂直连续体域,处于大气圈、生物圈、水圈和岩石圈的交汇区域^[16-17]。多孔可渗透的土壤是关键带地下结构的重要组分,是固液气界面相互作用的中心场所,深刻影响生态系统功能。因此,开展红壤关键带的土壤酸缓冲能力研究,有望从地表系统整体角度,深刻认识红壤关键带酸缓冲性能及其生态与环境效应。

本研究以江西林地覆盖的典型红壤关键带土壤为研究对象,选择千枚岩、红砂岩、花岗岩三种类型,开展土壤样品采集、酸缓冲容量及关键理化性质测定,基于土壤酸缓冲理论,利用线性回归和随机森林模型,拟阐明不同岩性发育的红壤关键带土壤酸缓冲容量的垂直分异特征,量化土壤有机质、机械组成、矿物组成、铁铝氧化物、交换性盐基和 pH 对酸缓冲容量垂直变异的相对贡献。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取江西省中东部的余干县、金溪县及贵溪市为研究区域(图 1),处于长江中下游南岸,且在地势上呈现一定的过渡性特征。三地地形均以丘陵为主,地势起伏相对较为平缓,有一定面积的山地、平原和河谷盆地穿插其中。三地境内河流众多,河网密度较大,主要河流有信江及其支流。研究区属于亚热带湿润季风气候,四季分明,气候温和,降水充沛,光照充足,无霜期长。夏季高温多雨,冬季相对温和少雨,降水主要集中在每年的 4—6 月。红壤在三地的分布范围广,主要覆盖丘陵、山地等区域。三地的森林覆盖率较高,植被丰富,拥有大量的松树、杉树、竹子等林木资源,是江西省重要的林业产区。千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的土壤在江西省丘陵区广泛分布。



注：本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的中国标准地图绘制，底图无修改。

Note: This map is based on the Chinese standard map with the approval number of GS(2024)0650 downloaded from the standard map service website of the Ministry of Natural Resources, and the base map is not modified.

图 1 供试红壤关键带土壤剖面分布与采样场景

Fig. 1 Distribution and sampling context of the studied soil profiles within the red soil critical zone

1.2 样品处理与分析

于 2024 年 7 月，采集了千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的土壤剖面样品。采样流程如下：利用挖掘机沿红壤自然断面向内深挖约 0.5 m，修整断面使其露出新鲜面，继续向下深挖至挖掘机极限操作深度。其中，千枚岩发育的土壤剖面（编号 P10）和花岗岩发育的土壤剖面（编号 P04）的采样深度为 6 m，红砂岩发育的土壤剖面（编号 P08）的采样深度为 4.5 m（表 1）。针对三个岩性发育的土壤剖面，采用了相同的采样间隔策略，50 cm 深度以内采集 0~20 cm、20~50 cm 的土壤样品，50 cm 深度以下按每 50 cm 深度间隔分层采集土壤样品。

表 1 不同岩性发育的红壤关键带土壤剖面信息

Table 1 The information of soil profiles within the red soil critical zone derived from different lithologies

岩性类型 Lithology type	土壤剖面编号 Soil profile number	经度 Longitude	纬度 Latitude	采样地 Sampling site	采样深度 Sampling depth/cm	样品数 Number
千枚岩 Phyllite	P10	116.8316° E	28.5269° N	余干县 Yugan County	0~600	13
红砂岩 Red sandstone	P08	117.1048° E	28.3492° N	贵溪市 Guixi City	0~450	10

花岗岩	P04	116.6883°	27.9963°	金溪县	0~600	13
Granite		E	N	Jinxi County		

土壤样品经自然风干、研磨及过筛处理后,得到不同粒径的土样,用于土壤酸缓冲容量(pHBC)及其他主要理化性质的分析测定。根据土壤酸碱缓冲理论,土壤 pHBC 主要受控于其固相组分及其表面化学性质。因此,测定的指标包括土壤有机质、机械组成(砂粒、粉粒、黏粒)、矿物组成(层状硅酸盐黏土矿物、铁铝氧化物等)、固相表面化学性质(交换性盐基等),以及影响固相组分发挥作用的性质(pH 等)。pHBC 参照 Nelson 和 Su^[18]的酸碱滴定法测定。称取 5.00 g 过 2 mm 筛的土样置于 11 个 50 mL 聚乙烯离心管中,编号 1~11。向 1~5 号离心管分别加入 0.5、1.0、2.0、4.0、8.0 mL 的 0.1 mol·L⁻¹ HCl 溶液,向 7~11 号离心管分别加入 0.5、1.0、2.0、4.0、8.0 mL 的 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液,6 号离心管作为对照不添加酸碱。各离心管均加入无 CO₂ 水,使体系总体积为 20 mL。将离心管置于 25℃、300 r·min⁻¹ 的恒温摇床振荡 2 h,使土样与溶液充分混匀,然后避光培养 3 d;培养期间,每隔 1 d 振荡悬液 2 min,培养结束前最后一次振荡后静置 2 h,立即使用 pH 计测定悬液 pH。土壤机械组成采用吸管法测定,粒径分级参照美国土壤质地分类标准:砂粒(2 000~50 μm)、粉粒(50~2 μm)、黏粒(< 2 μm)^[19]。土壤矿物组成采用 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku, Ultima IV, 日本)分析,利用沉降法分离黏粒、粉粒与砂粒组分,砂粒与粉粒采用粉末法测定,黏粒采用定向片法测定。基于加权平均法对土壤矿物组成进行半定量分析。土壤 pH、有机质、交换性盐基、交换性酸、无定形铁铝及游离氧化铁铝等理化指标参照《土壤调查实验室分析方法》^[20]测定。土壤 pH 采用电位法测定,水土质量比为 2.5:1。土壤有机质采用重铬酸钾-硫酸消化法测定。土壤交换性盐基离子(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺)采用 pH 7.0 的 1.0 mol·L⁻¹ 乙酸铵溶液浸提,电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES, PerkinElmer, Avio200, 美国)测定。土壤交换性酸采用 0.1 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提,NaOH 滴定法测定。交换性 H⁺ 采用 NaF 掩蔽 Al³⁺后,NaOH 滴定至酚酞终点测定;交换性 Al³⁺含量为交换性酸与交换性 H⁺之差。交换性阳离子含量以厘摩尔一价电荷每千克土(cmol·kg⁻¹)表示。土壤无定形氧化铁/铝含量采用酸性草酸-草酸铵溶液(Tamm 液)浸提测定。土壤游离氧化铁/铝采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠法(DCB 法)浸提测定。晶形氧化铁/铝含量为游离态与无定形态含量之差。

1.3 数据处理

采用 Nelson 和 Su^[18]提出的式(1)“S”形函数对酸碱滴定曲线进行拟合,并依据式(2)计算酸缓冲容量(pHBC)。该模型已被广泛应用于土壤酸碱滴定数据的拟合,能够较好地表征土壤对外加 H⁺或 OH⁻的缓冲特性。通过逐步滴定实验,获得土壤在不同酸碱添加量下的 pH,构建(pH, A)数据点。将实验数据录入 Excel 2021,利用“规划求解”工具对式(1)进行非线性回归拟合,获取 pH_{min}、A_{mid}、a、b 等模型参数,用以表征土壤滴定曲线的形态特征。对式(1)计算酸碱添加量关于 pH 的导数(dA/dpH),得到式(2) pHBC 计算的表达式,其物理意义为单位 pH 变化所需的酸碱添加量,可定量表征土壤的酸碱缓冲能力。

$$\text{pH} = \text{pH}_{\min} + \frac{a}{1 + e^{\frac{-(A - A_{\text{mid}})}{b}}} \quad (1)$$

$$\text{pHBC} = \frac{ab}{(a + \text{pH}_{\min} - \text{pH})(\text{pH} - \text{pH}_{\min})} \quad (2)$$

式中, pH_{min} 为土壤滴定曲线上最小的 pH; A 为滴定过程中酸(以负值表示)或碱(以正值表示)的加入量; A_{mid} 为滴定曲线拐点对应的酸或碱的添加量。a、b 为拟合得到的模型参数。

采用 Origin 2022 软件绘制土壤理化性质随土层深度的变化分布曲线。基于土壤酸碱缓冲理论遴选土壤关键理化性质,采用线性回归和随机森林模型,验证并量化其对土壤 pHBC 变异的贡献。采用 SPSS 25 软件进行线性回归模型拟合。利用 RStudio 平台中的“randomForest”

包构建并拟合随机森林模型。采用克鲁斯卡尔-沃利斯检验 (Kruskal-Wallis 非参数检验) 进行单因素组间均值比较。采用图基检验 (Tukey 检验) 对多个独立样本的均值进行事后两两比较, 以确定具体样本之间是否存在统计学差异。统计显著性标准为 $P < 0.05$ (*)、 $P < 0.01$ (**) 和 $P < 0.001$ (***)。文中数据表示方式为均值 $\pm$ 标准差。

2 结果

2.1 不同岩性发育的土壤酸度与酸缓冲容量特征

图 2 结果显示, 不同岩性发育的土壤剖面样品的酸碱滴定曲线拟合度 R^2 均大于 0.98。千枚岩发育的土壤剖面不同深度样品的酸碱滴定曲线重合度较高, 红砂岩发育的重合度次之, 花岗岩发育的重合度较低, 说明土壤剖面不同深度样品酸碱缓冲特性存在明显差异。

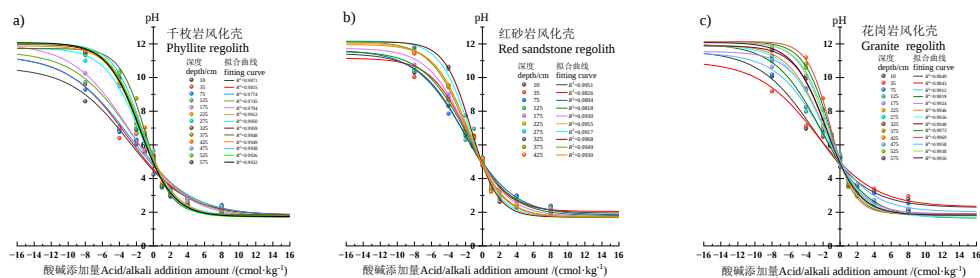


图 2 千枚岩 (a)、红砂岩 (b) 和花岗岩 (c) 发育的红壤关键带土壤不同深度样品的酸碱滴定曲线
Fig. 2 Acid-base titration curves of soil samples at different depths within the red soil critical zone derived from phyllite (a), red sandstone (b), and granite (c)

不同岩性发育的土壤剖面酸缓冲容量 (pHBC) 随深度变化呈现差异化特征 (图 3a)。千枚岩发育的土壤 pHBC 在 0~50 cm 内随深度增加而锐减, 在 50~600 cm 内随深度增加而逐渐降低。花岗岩发育的土壤 pHBC 在 0~150 cm 内随深度增加而锐减, 在 150~400 cm 内随深度增加而逐渐降低, 在 400~600 cm 内随深度增加而缓慢升高。红砂岩发育的土壤 pHBC 在 0~350 cm 内随深度增加而锐减, 在 350~450 cm 内随深度增加而迅速升高。千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的土壤 pHBC 均值为 $1.07 \pm 0.49 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{pH}^{-1}$, 其中, 千枚岩、红砂岩、花岗岩发育的土壤 pHBC 均值分别为 0.95 ± 0.54 、 1.15 ± 0.41 、 $1.09 \pm 0.53 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{pH}^{-1}$, 三个均值间无显著差异 ($P = 0.814$)。

整体上千枚岩、花岗岩和红砂岩发育的土壤 pH 随深度的变化趋势与 pHBC 相反 (图 3b)。三种岩性发育的土壤 pH 均值为 5.18 ± 0.05 , 其中, 千枚岩、红砂岩、花岗岩发育的土壤 pH 均值分别为 5.23 ± 0.06 、 5.09 ± 0.03 、 5.21 ± 0.05 。方差分析 (ANOVA) 结果显示, 三个均值间无显著差异 ($P = 0.40$)。

三种岩性发育的土壤交换性酸中以交换性 Al^{3+} 为主。千枚岩、花岗岩、红砂岩发育的土壤交换性 Al^{3+} 含量均值分别为 12.54 ± 0.82 、 10.57 ± 0.55 、 $9.98 \pm 0.62 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铝饱和度均值分别为 $70.37\% \pm 4.60\%$ 、 $66.57\% \pm 3.80\%$ 、 $56.81\% \pm 6.10\%$ (图 3c, 图 3d)。千枚岩、花岗岩、红砂岩发育的土壤交换性酸中交换性 H^+ 含量相对较少, 均值分别为 0.84 ± 0.57 、 1.19 ± 0.50 、 $1.35 \pm 0.68 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别占交换性酸的 $2.96\% \pm 0.92\%$ 、 $3.34\% \pm 0.76\%$ 、 $4.46\% \pm 0.74\%$ 。Tukey 检验结果显示, 红砂岩与千枚岩发育的土壤交换性 H^+ 含量均值间存在显著差异, 其他两两间无显著差异。

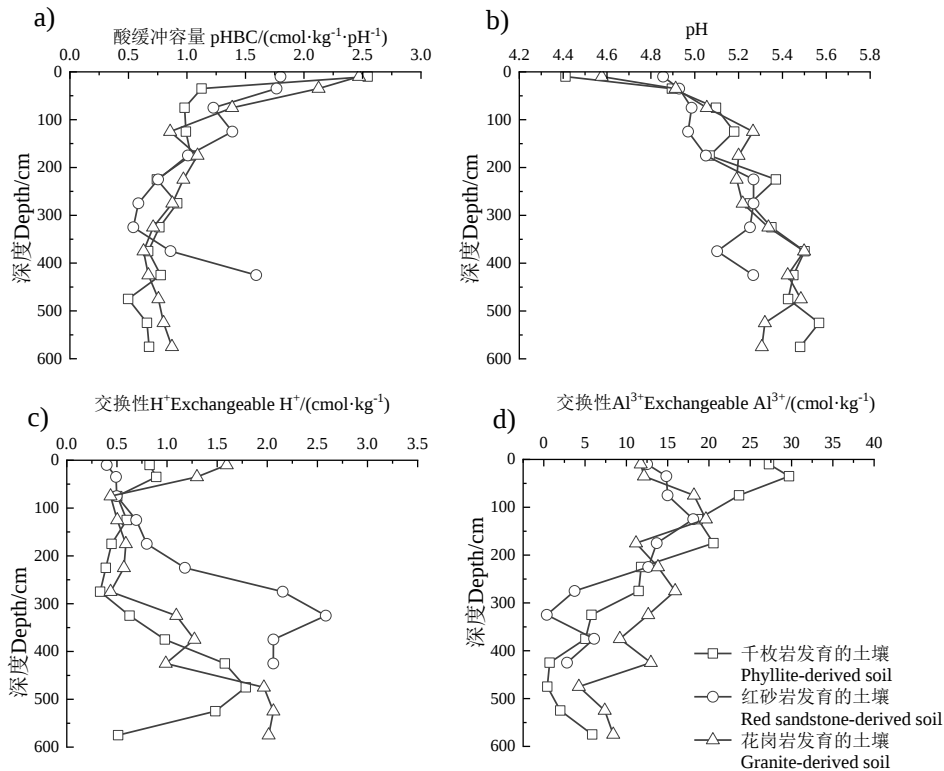


图3 不同岩性发育的红壤关键带土壤酸度与酸缓冲容量 (pHBC) 的深度变化特征 (a.酸缓冲容量, b. pH, c.交换性 H^+ , d.交换性 Al^{3+})

Fig. 3 Depth variations of soil acidity and acid buffering capacity (pHBC) within the red soil critical zone derived from different lithologies (a. Acid buffering capacity, b. pH, c. Exchangeable H^+ , d. Exchangeable Al^{3+})

千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的土壤交换性盐基组分含量整体上均表现为由高到低依次为交换性钠、交换性钙、交换性镁、交换性钾 (图4)。ANOVA 结果显示, 不同岩性发育的土壤间交换性钠、交换性钾含量均值无显著差异, 而交换性镁含量均值有显著差异; 花岗岩和千枚岩发育的土壤间交换性钙存在显著差异。千枚岩和红砂岩发育的土壤盐基饱和度随深度变化相对稳定, 均值分别为 $26.61\% \pm 8.93\%$ 与 $27.66\% \pm 16.79\%$ 。花岗岩发育的土壤盐基饱和度均值为 $34.32\% \pm 21.86\%$, 在 35 cm 和 175 cm 处均出现了高值, 在 350~550 cm 之间交换性钙和交换性镁含量增加, 而交换性钠含量降低。

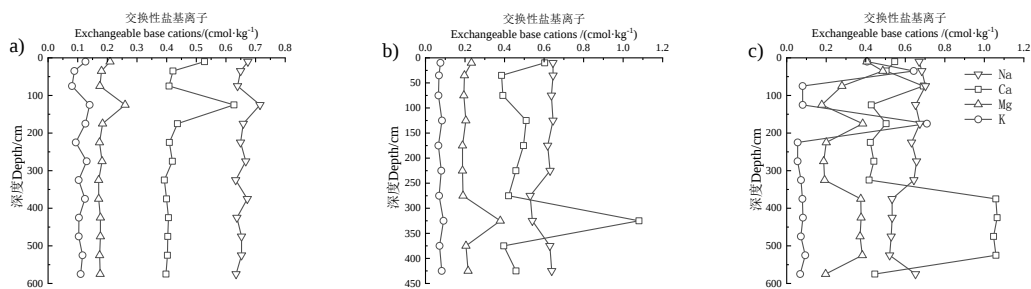


图4 千枚岩 (a)、红砂岩 (b) 和花岗岩 (c) 发育的红壤关键带土壤交换性盐基离子含量的深度变化特征

Fig. 4 Depth variations of soil exchangeable base cation content within red soil critical zone derived from phyllite (a), red sandstone (b), and granite (c)

2.2 不同岩性发育的土壤固相组分与矿物组成特征

ANOVA 结果显示, 三种岩性发育的土壤砂粒、粉粒、黏粒含量间均存在显著差异, 其

中,砂粒和粉粒在千枚岩与红砂岩、千枚岩与花岗岩发育的土壤间均存在显著差异,黏粒则仅在千枚岩与花岗岩发育的土壤间存在显著差异。红砂岩发育的土壤砂粒含量显著高于花岗岩和千枚岩发育的土壤(图 5a),且三种岩性发育的土壤砂粒含量在 50 cm 或 100 cm 以内随深度降低,之后随深度增加或保持稳定。黏粒含量变化趋势大体上与之相反(图 5c)。不同岩性发育的土壤黏粒含量均值由高到低依次为花岗岩、红砂岩、千枚岩。千枚岩发育的土壤粉粒含量远高于花岗岩和红砂岩发育的土壤(图 5b)。花岗岩发育的表层土壤有机质含量远高于其他两种岩性发育的土壤(图 5d),随深度增加有机质含量先降低,后趋于稳定,整体上三种岩性发育的土壤有机质含量无显著差异。千枚岩和花岗岩发育的土壤有机质含量随深度变化趋势与其酸缓冲容量相似。

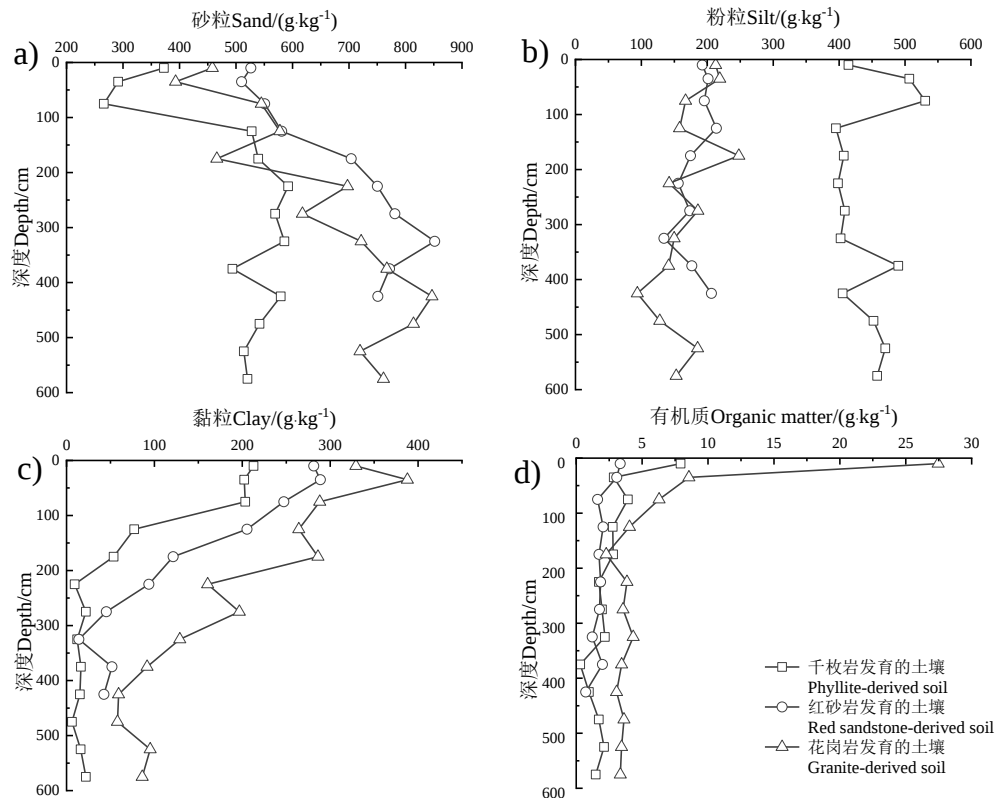


图 5 不同岩性发育的红壤关键带土壤机械组成 (a.砂粒, b.粉粒, c.黏粒) 和有机质含量 (d) 的深度变化特征

Fig. 5 Depth variations of soil mechanical composition (a. Sand, b. Silt, c. Clay) and organic matter content (d) within the red soil critical zone derived from different lithologies

土壤样品的 XRD 图谱(图 6)显示,千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的土壤黏粒的主要矿物为高岭石,含量分别为 $72.38\% \pm 5.25\%$ 、 $71.50\% \pm 13.23\%$ 、 $82.79\% \pm 10.48\%$,三种土壤的次要矿物为水云母、蛭石、绿泥石、针铁矿、赤铁矿和三水铝石。千枚岩发育的土壤粉粒的主要矿物为高岭石($41.85\% \pm 6.85\%$)、石英($30.85\% \pm 7.99\%$)和水云母($18.77\% \pm 9.34\%$),次要矿物为三水铝石、钙长石、钠长石(0~600 cm 深度范围,含 1%~5%)和针铁矿。红砂岩和花岗岩发育的土壤粉粒的主要矿物为高岭石(红砂岩: $33.90\% \pm 15.51\%$,花岗岩: $78.71\% \pm 13.04\%$)和石英(红砂岩: $60.50\% \pm 18.11\%$,花岗岩: $9.64\% \pm 2.65\%$),次要矿物为水云母、针铁矿或赤铁矿、长石类矿物(仅红砂岩发育的土壤在 250~500 cm 深度含 1%的钙长石、钠长石或微斜长石)。三种岩性发育的土壤砂粒的矿物组成以石英为主,含量大于等于 90%。

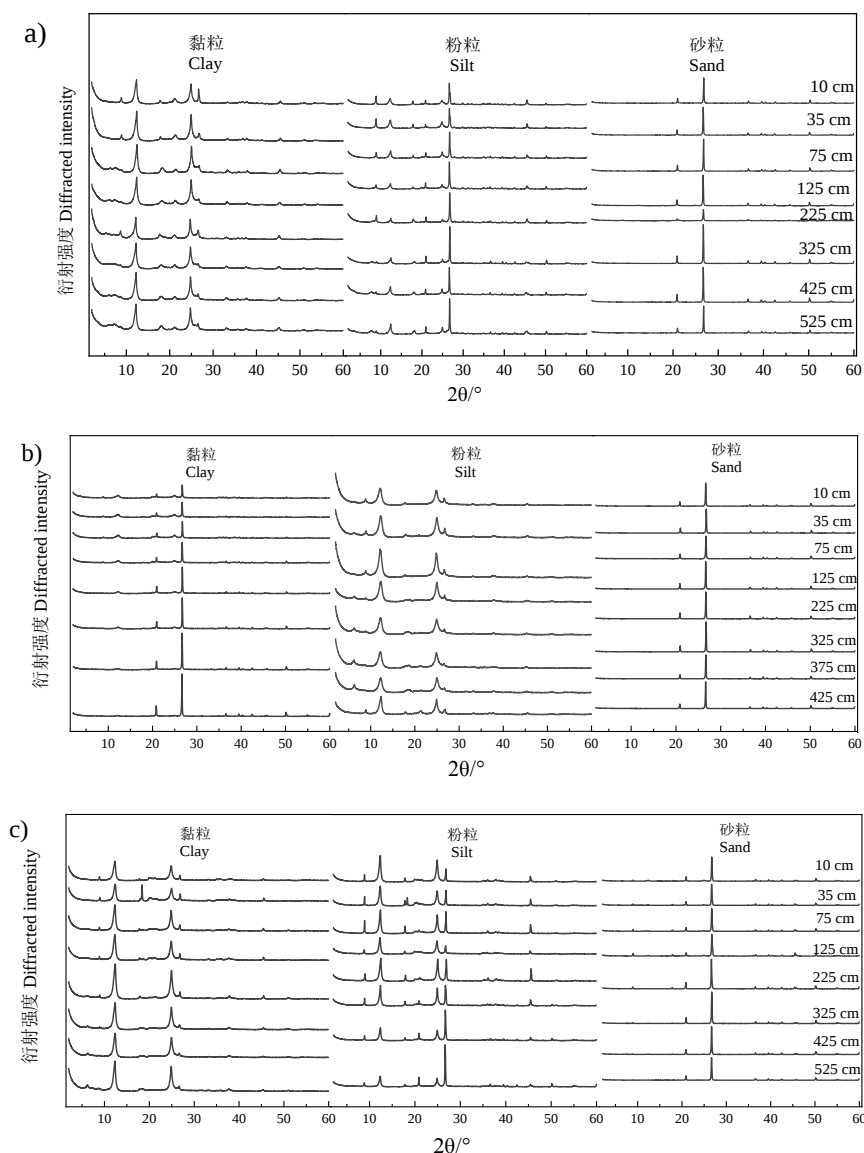


图6 千枚岩 (a)、红砂岩 (b)、花岗岩 (c) 发育的土壤不同深度样品的 X 射线衍射 (XRD) 图谱
Fig. 6 X-ray diffraction (XRD) patterns of phyllite-derived soil (a), red sandstone-derived soil (b), and granite-derived soil (c) samples from different depths

就全土而言, 千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的土壤主要矿物均为石英, 平均含量分别为 $51.01\% \pm 0.10\%$ 、 $76.64\% \pm 0.10\%$ 和 $56.90\% \pm 0.17\%$ (图 7a)。与千枚岩和花岗岩相比, 红砂岩发育的土壤石英含量更高, 红砂岩和花岗岩发育的土壤石英含量均随深度增加呈现先升高后降低趋势。千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的土壤黏土矿物主要为高岭石 (图 7b), 其含量均值在三种岩性间由高到低依次为: 花岗岩 ($34.33\% \pm 0.23\%$)、千枚岩 ($29.90\% \pm 0.12\%$)、红砂岩 ($17.37\% \pm 0.29\%$)。高岭石含量随深度整体上呈下降趋势, 与石英的趋势相反。千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的土壤水云母含量均值分别为 $9.47\% \pm 0.61\%$ 、 $1.33\% \pm 0.64\%$ 和 $2.57\% \pm 0.32\%$ (图 7c)。

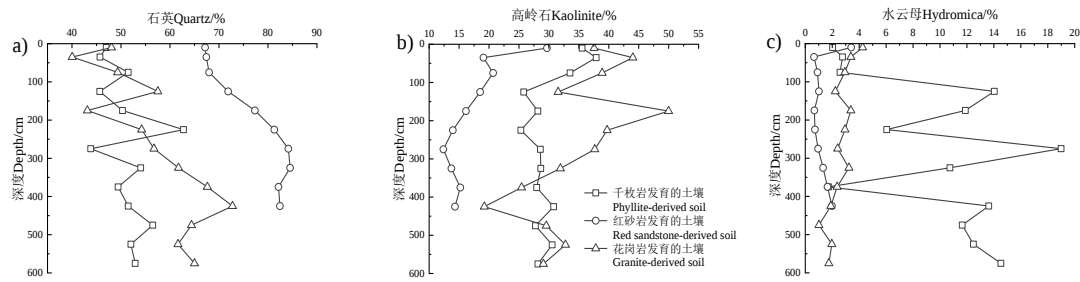


图7 不同岩性发育的红壤关键带土壤矿物组成 (a.石英, b.高岭石, c.水云母) 的深度变化特征

Fig. 7 Depth variations of soil mineral composition (a. Quartz, b. Kaolinite, c. Hydromica) within the red soil critical zone derived from different lithologies

不同土层中,同一形态铁氧化物的含量均显著高于铝氧化物,且游离态与晶形态氧化物的含量远高于无定形态(图8)。其中,晶形氧化铁占游离氧化铁的比例为 $88.27\% \pm 18.30\%$,无定形氧化铝占游离氧化铝的比例为 $66.39\% \pm 27.03\%$ 。ANOVA 结果显示,三种岩性发育土壤间的游离氧化铁和晶形氧化铁含量均值存在显著差异。千枚岩和红砂岩发育的土壤中,游离态和晶形态氧化铁含量随深度增加而下降,与酸缓冲容量的变化趋势相似。

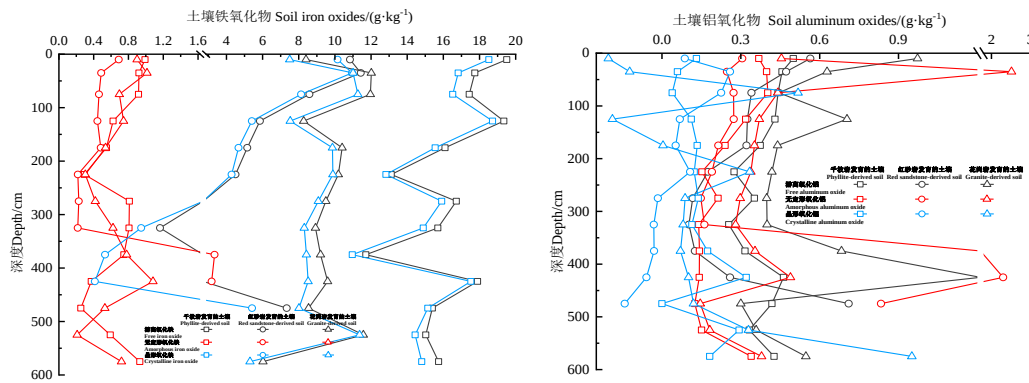


图8 不同岩性发育的红壤关键带土壤中铁铝氧化物含量(以单质 Fe 和 Al 的形式表征含量)的深度变化特征

Fig. 8 Depth variations of soil iron and aluminum oxide content (in the form of elemental Fe and Al) within the red soil critical zone derived from different lithologies

2.3 不同岩性发育的土壤酸缓冲容量影响因素

千枚岩发育的土壤 pHBC 与黏粒、有机质含量呈极显著正相关,与粉粒和砂粒含量无显著线性关系(表2)。红砂岩发育的土壤 pHBC 与粉粒含量呈极显著正相关,与黏粒含量呈显著正相关,与砂粒含量呈极显著负相关。花岗岩发育的土壤 pHBC 与有机质、黏粒和粉粒含量呈显著正相关,与砂粒含量呈极显著负相关。

千枚岩和红砂岩发育的土壤 pHBC 与高岭石含量呈显著正相关,与水云母和石英含量间的线性关系不显著(表2)。花岗岩发育的土壤 pHBC 与水云母含量呈极显著正相关,与石英呈极显著的负相关, pHBC 与高岭石含量的相关性不显著。

千枚岩发育的土壤 pHBC 与晶形铁含量呈显著正相关,与无定形铁、无定形铝和晶形铝含量无显著线性关系(表2)。红砂岩发育的土壤 pHBC 与无定形铝呈极显著正相关,与无定形铁、晶形铁和晶形铝含量无显著线性相关关系。花岗岩发育的土壤 pHBC 与无定形铝、晶形铝含量呈极显著正相关,与无定形铁含量呈极显著负相关,与晶形铁无显著线性关系。千枚岩和红砂岩发育的土壤 pHBC 与交换性钾、钠、钙、镁含量均无显著性线性关系,而花岗岩发育的土壤 pHBC 与交换性钾和交换性钠含量呈显著正相关(表2)。

表 2 不同岩性发育的红壤关键带土壤 pHBC 与其影响因素的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients of soil pHBC with its influencing factors in the red soil critical zone derived from different lithologies

土壤性质 Soil properties	土壤酸缓冲容量 pHBC		
	千枚岩 Phyllite	红砂岩 Red sandstone	花岗岩 Granite
有机质 Organic matter	0.932**	0.502	0.844**
黏粒 Clay	0.719**	0.751*	0.812**
粉粒 Silt	-0.148	0.816**	0.621*
砂粒 Sand	-0.473	-0.814**	-0.799**
石英 Quartz	-0.426	-0.764	-0.753**
高岭石 Kaolinite	0.573*	0.713*	0.533
水云母 Hydromica	-0.412	0.435	0.729**
无定形铁 Amorphous iron	0.503	0.383	-0.744**
无定形铝 Amorphous aluminum	0.559	0.885**	0.693**
晶形铁 Crystalline iron	0.559*	0.532	-0.557
晶形铝 Crystalline aluminum	-0.265	0.595	0.716**
Ca ²⁺	0.524	-0.335	-0.331
交换性盐基离子 K ⁺	0.244	-0.159	0.646*
Exchangeable base cations Mg ²⁺	0.400	-0.282	-0.474
Na ⁺	0.274	0.565	0.560*

注：“*”、“**”和“***”分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 。下同。Note: “*”, “**” and “***” indicate $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$, respectively. The same below.

为更好地区分机械组成与有机质、矿物组成、铁铝氧化物和交换性盐基离子这四个分组内指标的相对贡献及其整体贡献,随机森林拟合采用了分组建模和整体建模的形式(图 9)。分组建模结果显示,黏粒的贡献高于粉粒、有机质和砂粒;晶形铝和无定形铝的贡献高于晶形铁和无定形铁。整体建模结果显示,土壤有机质、机械组成、矿物组成、铁铝氧化物和交换性盐基等土壤理化性质可解释酸缓冲容量 52% 的垂直变异,其中,土壤黏粒、交换性 Mg^{2+} 和有机质含量等理化性质对酸缓冲容量变异的贡献较大。

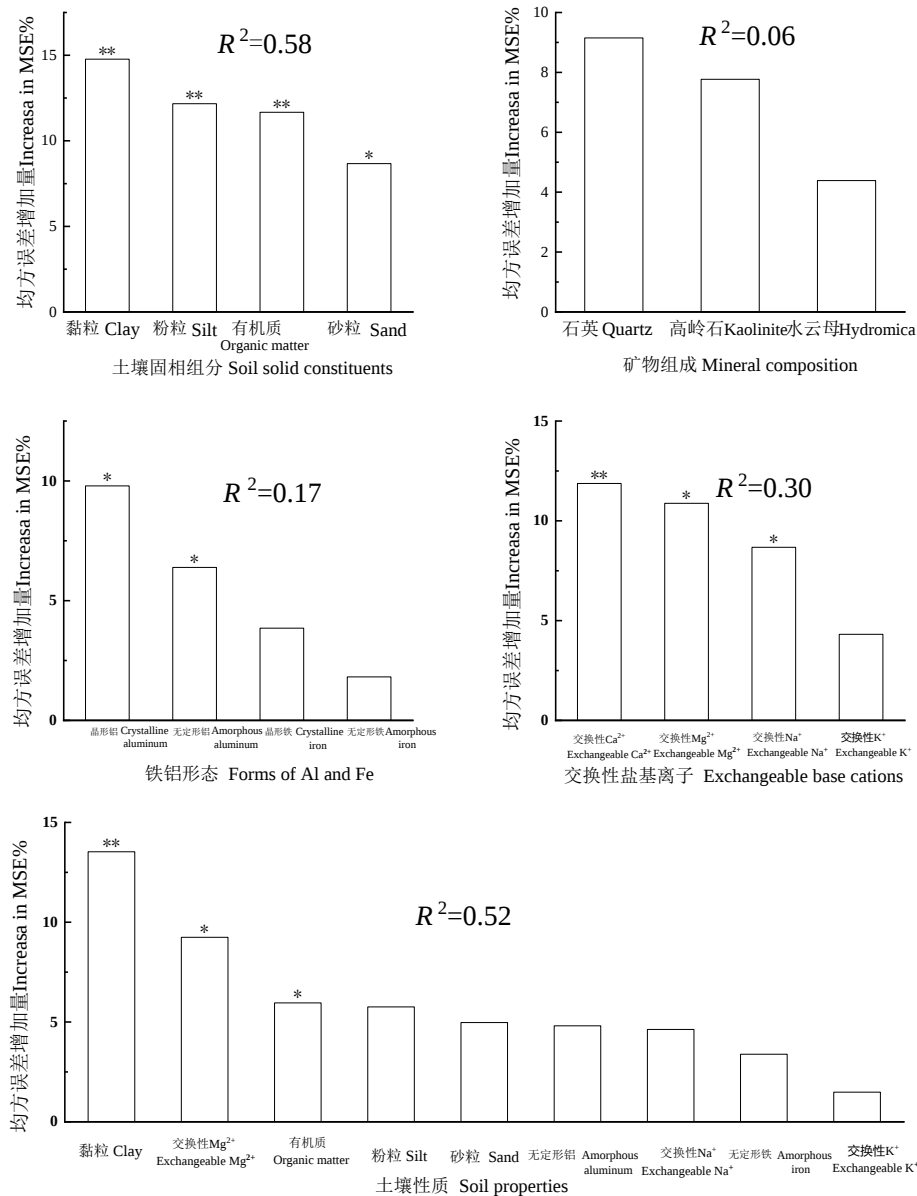


图9 基于随机森林模型拟合的红壤关键带土壤有关理化性质对 pHBC 深度变异的相对贡献
Fig. 9 Relative contribution of the related soil physicochemical properties to pHBC changes with depth within the red soil critical zone based on the random forest fitting

3 讨论

3.1 不同岩性发育的土壤剖面酸缓冲容量的垂直分异模式

本研究显示,千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的土壤 pHBC 呈现典型的垂直分异特征,在一定深度范围内随深度增加而降低,在到达拐点后随深度增加而升高(图 3a)。在本研究的深度范围内,红砂岩发育的土壤 pHBC 出现了较为明显的拐点,花岗岩次之,而千枚岩发育的土壤尚未到达(图 3a)。与这三种岩性发育的土壤 pHBC 垂直分异特征不同,第四纪红黏土发育的土壤 pHBC 在一定深度范围内随深度增加而降低,在达到拐点后随深度增加而降低,在接近基岩面的半风化体区域,转而升高^[15]。本研究基于线性回归、随机森林模型以

及酸缓冲理论分析发现, 在 pH 为 4.4~5.6 时, 土壤 pHBC 的垂直分异总体特征由 pH、黏粒和有机质含量主导, 随 pH 降低、黏粒和有机质含量升高又呈现出单调升高的规律(图 10), 这与第四纪红黏土发育的土壤 pHBC 随 pH 的变化趋势相似^[15]。基于 pHBC 的定义和本研究中 pH 随酸添加量的变化特征(图 2)可知, 在低 pH 条件下(pH<5.5), 土壤 pH 越低, 单位 pH 变化所需酸添加量越大, 即表现为 pHBC 越高, 这种变化特征符合酸缓冲理论。然而, 红壤 pHBC 随 pH 降低而单调升高的规律, 并不适用于所有的土壤, 这与土壤 pH 变化范围、碳酸钙含量等有密切关系。比如, 澳大利亚新南威尔士州北部变性土表层土壤 pHBC 与土壤 pH 无明显的关系^[21], 这可能与变性土以中性或碱性为主, 且含有较多的碳酸钙有关。美国 2024 年出版的《环境土壤化学》(第三版)也引述此文例证土壤缓冲过程复杂且相互叠加, 仅依据土壤的实测属性可能难以准确预测其缓冲容量^[22]。但在酸性土壤条件下本研究探索出了准确预测土壤酸缓冲容量的可行方法。

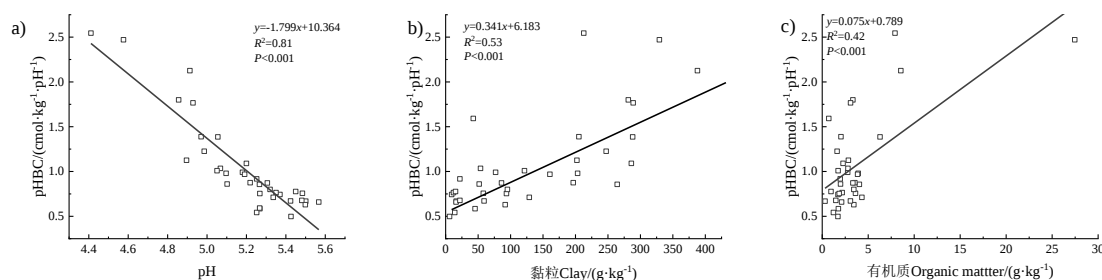


图 10 红壤关键带土壤酸缓冲容量随 pH (a)、黏粒含量 (b) 和有机质含量 (c) 的变化特征

Fig. 10 Changes of soil acid buffering capacity with pH (a), clay content (b), and organic matter content (c) within the red soil critical zone

3.2 不同岩性发育的土壤剖面酸缓冲机制及其驱动因素

已有研究表明, 酸性土壤可通过多种缓冲机制阻控土壤酸化^[22-25], 这些机制在不同的、部分重叠的 pH 范围内发挥作用, 包括 pH 在 4.2~5.5 时的阳离子交换作用; pH 在 3.0~4.8 时的铝氧化物溶解作用; pH 在 2.4~3.8 时的铁氧化物溶解作用; pH<4.0 时的次生硅酸盐黏土矿物溶解作用; pH>3.0 时有机质的羧基和羟基、铁铝氧化物羟基以及层状硅酸盐黏土矿物铝羟基的质子化作用; pH>5.0 时的原生硅酸盐矿物溶解作用^[22]。但在不同 pH 条件下, 尚未阐明盐基离子交换、质子化和矿物溶解作用对红壤剖面酸缓冲性能的相对贡献。在红壤剖面的不同 pH 条件下, 有机质、黏粒、铁铝氧化物和易风化原生矿物等固相组分, 因含量、组成及界面活性的不同, 可能发挥了差异化的作用。

在本研究中, 千枚岩发育的土壤 pH 范围为 4.4~5.6, 红砂岩发育的土壤 pH 范围为 4.8~5.3, 花岗岩发育的土壤 pH 范围为 4.6~5.5, 且以表层和表下层土壤 pH 最低, 深层土壤 pH 回升(图 3b)。三种岩性发育的土壤 pH 覆盖了已报道的盐基离子交换发挥缓冲作用^[21]的主要 pH 范围, 但由于红壤关键带的土壤风化程度高, 交换性酸含量和铝饱和度较高, 交换性盐基总量较低且随土层深度变化幅度较小, 在 4.5~6.0 m 的深度范围内, 盐基离子交换作用总体上对土壤 pHBC 的贡献较小, 千枚岩和红砂岩发育的土壤中均未发现交换性盐基组分与 pHBC 有显著的相关关系, 仅在花岗岩发育的土壤中发现交换性 K⁺、交换性 Na⁺与 pHBC 呈显著正相关关系(表 2)。千枚岩和花岗岩发育的土壤 pH 部分覆盖了已报道的铝氧化物溶解发挥缓冲作用的 pH 范围, 红砂岩发育的土壤 pH 则接近该范围。本研究发现, 花岗岩发育的土壤 pHBC 与无定形氧化铝、晶形氧化铝含量呈显著正相关, 红砂岩发育的土壤 pHBC 与无定形氧化铝呈显著正相关(表 2), 这些结果表明铝氧化物的溶解作用对土壤 pHBC 的贡献较大。在 pH>3.0 时固相表面质子化可起到酸缓冲作用^[21], 因此, 红壤有机质^[26-27]、铁铝氧化物^[28-29]、黏粒和粉粒的含量越高, 其质子化作用缓冲酸的性能越强。这与陈瑞燕等^[30]研究发现 pH>3.0 时耕作层土壤有机质含量、阳离子交换量等与酸缓冲能力呈极显著正相关

的结果一致,此外,胡波等^[31]对重庆缙云山酸雨区森林 1 m 深土壤酸缓冲机制的研究也得到了相似的结论。本研究还发现,千枚岩发育的土壤 pHBC 与有机质、黏粒、高岭石和晶形氧化铁的含量呈显著正相关,红砂岩发育的土壤 pHBC 与黏粒、粉粒、高岭石和无定形氧化铝的含量呈显著正相关,花岗岩发育的土壤 pHBC 与有机质、黏粒、粉粒、水云母、无定形氧化铝和晶形氧化铝的含量呈显著正相关(表 2)。在 pH>5.0 时,千枚岩、花岗岩和红砂岩发育的土壤含有少量的钙长石、钠长石或微斜长石,其可通过原生矿物的溶解反应发挥酸缓冲作用。尽管本研究的土壤 pH 均大于 4.0,但次生硅酸盐黏土矿物的缓慢溶解作用,也可能会缓冲酸化^[32-33],但因这种反应相对缓慢,在本研究通过 3 d 反应时间测定的酸缓冲容量中难以体现。

4 结 论

我国南方亚热带千枚岩、红砂岩和花岗岩发育的红壤关键带土壤 pHBC 呈现明显的垂直分异特征,在一定深度范围内随深度增加而降低,在到达拐点后随深度增加而升高。在 pH 为 4.4~5.6 时,土壤 pHBC 垂直分异特征由 pH、黏粒含量和有机质含量主导,具有随 pH 降低、黏粒和有机质含量升高呈现单调升高的规律。红壤关键带土壤风化程度高,交换性酸含量和铝饱和度高,交换性盐基总量较低且随深度变异较小,在 4.5~6.0 m 的深度范围内,盐基离子交换作用总体上对土壤 pHBC 的贡献较小。土壤有机质、黏粒、粉粒、铁铝氧化物和高岭石的固相表面质子化作用以及铝氧化物溶解作用对 pHBC 的贡献较大。土壤中的次生硅酸盐黏土矿物,以及含有的少量钙长石、钠长石或微斜长石等原生矿物,也可通过矿物溶解反应发挥一定的酸缓冲作用。本研究深入揭示了不同岩性发育的红壤关键带土壤酸缓冲容量的垂直分异特征及其主控机制,为亚热带红壤区土壤酸化防控及维持林地生态系统稳定性提供了关键科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Zheng Z H. The influence mechanism of subtropical forest types on soil organic carbon sources and stability[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2025. [郑智恒. 亚热带森林类型对土壤有机碳来源及稳定性的影响机制[D]. 福州: 福建农林大学, 2025.]
- [2] Tao R H, Hu J Y, Bao G L, et al. A review of the present situation and harm of farmland soil acidification and its control measures in South China[J]. Ecological Science, 2025, 44(2): 271-279. [陶荣浩, 胡婧怡, 鲍广灵, 等. 我国南方农田土壤酸化现状和危害及防治措施综述[J]. 生态科学, 2025, 44(2): 271-279.]
- [3] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of Southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(2): 260-270.
- [4] Nan H Y. The impact of garden waste biochar to the adsorption properties of nitrogen and phosphorus and the leaching of nitrogen and phosphorus in the soil[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. [南红岩. 园林废弃物生物炭对氮磷的吸附特性及其对土壤氮磷的淋溶影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.]
- [5] Zhao T G, Wu D Y, He S B, et al. Progress in research of surface acidity of silicate clay minerals[J]. Soils, 2006, 38(1): 17-22. [赵统刚, 吴德意, 何圣兵, 等. 硅酸盐黏土矿物的表面酸性研究进展[J]. 土壤, 2006, 38(1): 17-22.]
- [6] Samac D A, Tesfaye M. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils—A review[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2003, 75(3): 189-207.
- [7] Li Z X, Gao X Y, Li D D, et al. Differential responses of bacteria, fungi, and C, N, P functions to soil acidification in farmland: A meta-analysis[J]. Environmental Technology & Innovation, 2025, 40: 104499.

- [8] Hu Z K, Delgado-Baquerizo M, Fanin N, et al. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 2858.
- [9] Wang C Q, Kuzyakov Y. Soil organic matter priming: The pH effects[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(6): e17349.
- [10] Zhao K L, Cai Z J, Wang B R, et al. Changes in pH and exchangeable acidity at depths of red soils derived from 4 parent materials under 3 vegetations[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4818-4826. [赵凯丽, 蔡泽江, 王伯仁, 等. 不同母质和植被类型下红壤 pH 和交换性酸的剖面特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4818-4826.]
- [11] 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. [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.]
- [12] 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.]
- [13] Zhang Q, Tang X, Zhou H Y, et al. Acidity characteristics of paddy soil profiles derived from different parent materials[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2020, 42(5): 561-568. [张群, 唐贤, 周海燕, 等. 不同母质发育水稻土剖面酸度特征[J]. *吉林农业大学学报*, 2020, 42(5): 561-568.]
- [14] Wen H Y, Wu H Y, Dong Y, et al. Differential soil acidification caused by parent materials and land-use changes in the Pearl River Delta region[J]. *Soil Use and Management*, 2023, 39(1): 329-341.
- [15] Cui Z X, Wu H Y, Song X D, et al. Vertical differentiation characteristics and main controlling factors of acid buffering capacity of strongly acidic red soil weathering crust[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026, DOI:10.11766/trxb202503090107. [崔子霄, 吴华勇, 宋效东, 等. 强酸性红壤风化壳酸缓冲容量的垂直分异特征及主控因素[J]. *土壤学报*, 2026, DOI:10.11766/trxb202503090107.]
- [16] National Research Council. Basic research opportunities in earth science[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2001.
- [17] Riebe C S, Hahn W J, Brantley S L. Controls on deep critical zone architecture: A historical review and four testable hypotheses[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(1): 128-156.
- [18] Nelson P N, Su N H. Soil pH buffering capacity: A descriptive function and its application to some acidic tropical soils[J]. *Soil Research*, 2010, 48(3): 201-207.
- [19] Ma Z H, Tang H Y, Li W H, et al. Comparative study on the determination method of soil mechanical composition between pipette method and hydrometer method[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2023, 13(6): 645-651. [马作豪, 唐昊治, 李文红, 等. 吸管法和比重计法测定土壤机械组成的比对研究[J]. *中国无机分析化学*, 2023, 13(6): 645-651.]
- [20] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [21] Singh B, Odeh I O A, McBratney A B. Acid buffering capacity and potential acidification of cotton soils in northern New South Wales[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(5): 875-888.
- [22] Sparks D L, Singh B, Siebecker M G. Environmental soil chemistry[M]. 3rd ed. London: Academic Press, 2024.
- [23] Yang J L, Dong Y, Feng W L, et al. Proton production and consumption in red soil critical zone and their environmental effects: A review[J]. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(3): 231-247. [杨金玲, 董岳, 冯文澜, 等. 红壤关键带质子产生和消耗及其环境效应综述[J]. *地学前缘*, 2025, 32(3): 231-247.]
- [24] Chadwick O A, Chorover J. The chemistry of pedogenic thresholds[J]. *Geoderma*, 2001, 100(3/4): 321-353.
- [25] van Breemen N, Mulder J, Driscoll C T. Acidification and alkalinization of soils[J]. *Plant and Soil*, 1983, 75(3): 283-308.
- [26] Jiang J, Wang Y P, Yu M X, et al. Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils[J]. *Chemical Geology*, 2018, 501: 86-94.

- [27] Wu S W, Suo Y Y, Liang G, et al. Soil acidification and buffering capacity of bamboo plantation soils under intensive cultivation management[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(5): 1120-1125. [吴士文, 索炎炎, 梁钢, 等. 集约经营下南方竹园土壤酸化特征与缓冲容量研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1120-1125.]
- [28] Yang Y, Wang Y, Peng Y M, et al. Acid-base buffering characteristics of non-calcareous soils: Correlation with physicochemical properties and surface complexation constants[J]. Geoderma, 2020, 360: 114005.
- [29] Li K W, Xu R K. Effect of aluminum oxides on the activation of aluminum during phyllosilicate minerals and red soil acidification[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(6): 1557-1567. [李科伟, 徐仁扣. 铝氧化物对层状硅酸盐矿物和红壤酸化过程中铝活化的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1557-1567.]
- [30] Chen R Y, Han J J, Xing B, et al. Acid buffering and acidification characteristics of farmland soils in the eastern subtropical zone[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2023, 8(2): 100-111. [陈瑞燕, 韩晶晶, 邢波, 等. 亚热带东部稻田土壤酸缓冲性能与酸化特点研究[J]. 三峡生态环境监测, 2023, 8(2): 100-111.]
- [31] Hu B, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Acidic buffering capability and its influencing factors of typical forests soil in Jinyun Mountain, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 77-83. [胡波, 王云琦, 王玉杰, 等. 重庆缙云山酸雨区森林土壤酸缓冲机制及影响因素[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 77-83.]
- [32] Li K W, Lu H L, Nkoh J N, et al. The important role of surface hydroxyl groups in aluminum activation during phyllosilicate mineral acidification[J]. Chemosphere, 2023, 313: 137570.
- [33] Li K W, Lu H L, Nkoh J N, et al. Effect of high-temperature dehydroxylation on acidification-induced aluminum activation in montmorillonite[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(6): 2473-2481.

(责任编辑: 陈荣府)