

DOI: 10.11766/trxb202203200121

李春培, 李雪, 汪璇, 刘刚才, 赵吉霞, 熊俊芬. 酸化环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其酸缓冲容量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61 (1): 258–271.

LI Chunpei, LI Xue, WANG Xuan, LIU Gangcai, ZHAO Jixia, XIONG Junfen. Effect of the Acidification Environment on Exchangeable Cations and Acid Buffering Capacity of Weathering Products of Purple Parent Rock[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (1): 258–271.

酸化环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其酸缓冲容量的影响*

李春培¹, 李雪¹, 汪璇^{2, 3}, 刘刚才², 赵吉霞^{1†}, 熊俊芬¹

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650000; 2. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为研究酸化环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其酸缓冲容量的影响, 以侏罗纪紫色岩层中的遂宁组 (J_{3s})、沙溪庙组 (J_{2s}) 和蓬莱镇组 (J_{3p}) 为研究对象, 设置 pH 分别为 2.5、3.5、4.5、5.6 等 4 个酸性环境, 以及去离子水 (pH=7.0) 为对照处理 (CK), 采用循环浸泡试验和模拟淋溶试验, 研究酸性环境对紫色母岩风化产物特征的影响。结果表明, 通过酸化环境处理后, 3 组紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其总量均随酸化环境的 pH 降低而减小, 且 3 组紫色母岩风化产物的酸缓冲容量与其交换性 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 含量以及交换性盐基总量均呈极显著正相关关系 (P<0.01)。以 pH=7.0 (CK) 处理为对照, 循环浸泡处理后的遂宁组 (J_{3s})、蓬莱镇组 (J_{3p}) 和沙溪庙组 (J_{2s}) 风化产物中交换性盐基总量的减小幅度分别为 8.75%~18.21%、10.83%~23.18% 和 5.85%~18.41%。而且模拟淋溶 24 次后, 遂宁组 (J_{3s})、沙溪庙组 (J_{2s}) 和蓬莱镇组 (J_{3p}) 风化产物中交换性盐基总量较模拟淋溶 12 次时分别减小 1.77%~24.85%、8.99%~25.75% 和 8.05%~25.66%。此外, 在同一酸度处理下, 风化产物中的交换性盐基离子均表现为 Ca²⁺>Mg²⁺>Na⁺>K⁺。本试验中淋溶处理下风化产物酸缓冲容量、交换性盐基离子及盐基总量低于浸泡处理。可见, 丘陵地带坡面的矿物或养分的迁移以淋溶作用为主, 平地的矿物或养分的迁移以浸泡作用为主。因此, 酸沉降可能在一定程度上加速坡面土壤侵蚀的发生, 进而导致平原化进程的加速。

关键词: 紫色母岩; 模拟酸雨; 循环浸泡; 淋溶; 成土特征

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Effect of the Acidification Environment on Exchangeable Cations and Acid Buffering Capacity of Weathering Products of Purple Parent Rock

LI Chunpei¹, LI Xue¹, WANG Xuan^{2, 3}, LIU Gangcai², ZHAO Jixia^{1†}, XIONG Junfen¹

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650000, China; 2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of

* 国家自然科学基金项目 (42007002) 和云南省基础研究计划 (202101AT070220) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42007002), Yunnan Basic Research Project (No. 202101AT070220).

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhaojixia@163.com

作者简介: 李春培 (1997—), 男, 湖北恩施人, 硕士研究生, 主要从事土壤发生演化方面的研究。E-mail: pcl0416@163.com

收稿日期: 2022-03-20; 收到修改稿日期: 2022-09-13; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-10-31

Sciences, and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objectives】This study aimed to analyze the influence of the acidification environment on weathering products of the typical purple parent rock. The weathering products of purple parent rocks from the Suining Group (J_3s), Shaximiao Group (J_2s), and Penglaizhen Group (J_3p) were investigated under different acidification environments in the laboratory. **【Method】** The acid solutions used for acidification of purple parent rock samples were used to cycle soaking and simulate leaching experiment tests at pHs of 2.5, 3.5, 4.5, and 5.6. In addition, deionized water (pH = 7.0) was set as a control treatment (CK). **【Result】** The results showed that the exchangeable cations and content of total exchangeable cations of weathering products of these purple parent rocks decreased as the acidity of the acidifying solutions increased. The acid buffering capacity of weathering products had an extremely significant correlation with the content of the exchangeable K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} and the content total of exchangeable cations ($P < 0.01$). Compared with the value at pH = 7.0 (CK), the total content of exchangeable cations of the weathering products of purple parent rock of the groups J_3s , J_3p , and J_2s in cycle soaking experiment tests decreased by 8.75%-18.21%, 10.83%-23.18%, and 5.85%-18.41%, respectively. When the amount of simulated rainfall at 24 times was compared with that at 12 times, the total content of exchangeable cations in J_3s , J_3p , and J_2s decreased by 1.77%-24.85%, 8.99%-25.75%, and 8.05%-25.66%, respectively. In addition, the exchangeable cations characteristics of the weathering products were $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$ under the same acidity treatment. **【Conclusion】** The acid buffer capacity, exchangeable salt ions, and total salt of weathering products under the soaking treatment in this experiment were lower than under the leaching treatment. It can be seen that the transport of minerals or nutrients on the slopes of hilly areas is dominated by leaching, while the transport of minerals or nutrients on the plains is dominated by leaching. Therefore, acid deposition may accelerate the occurrence of soil erosion on slopes to some extent, which in turn leads to an acceleration of the plain side process.

Key words: Purple parent rock; Simulated acid rainfall; Cycle soaking; Leaching; Soil formation characteristics

岩石风化是地表生物地球化学循环的重要过程，岩石的风化成土过程极为缓慢^[1]，但由于紫色母岩岩质较为松软，且构造裂缝、成岩裂缝和风化裂缝较为发育丰富，导致其具有较快的风化速度。通常认为紫色母岩风化产物粒径 $< 2\text{ mm}$ 的颗粒已初步具有供给生物生长的水、肥、气、热的基本条件，因此 $< 2\text{ mm}$ 颗粒的紫色母岩形成过程即为紫色母岩的成土过程^[2]。岩石风化作用的类型可分为物理风化、化学风化及生物风化。目前，较多学者探明紫色母岩风化前期主要以物理风化作用为主^[2]，也有部分学者研究紫色母岩化学风化过程中紫色母岩的成土特征^[3]。现阶段的研究以紫色母岩风化成土特征及影响因素为主，而酸化环境对紫色母岩风化产物的盐基离子含量和酸性缓冲容量的研究有所欠缺。

环境酸化是当前人类面临的全球性环境问题之一^[4]，它不仅对生态系统和生态环境产生明显影响^[5]，而且会对母岩风化成土速率和土壤生产力等产生影响，有研究表明环境酸化对母岩的风化成土有一定的促进作用^[6-7]。周修萍等^[8]通过对我国南方几种典

型土壤酸雨淋溶特性进行研究，结果表明，淋溶液酸度愈强，淋溶处理后的土壤的交换性盐基离子含量越低，而且土壤矿物的风化作用也随之增强^[9]。此外，较多学者通过红壤^[10-11]、黄壤^[8]、紫色土^[11]对模拟酸雨淋溶的响应特征，结果表明，不同土壤类型的盐基离子淋失量均随淋溶液酸度增加而增加。然而，现阶段主要研究熟化土壤的理化特征对酸沉降的响应，但关于酸沉降对岩石成土过程中风化产物的性质特征研究尚不清楚。土壤中的交换性盐基离子与土壤肥力息息相关^[12-13]，而酸沉降促进初级和次级黏土矿物的裂解，进而促进黏土矿物中的阳离子释放至土壤溶液中^[14-15]。因此，研究酸性环境对于风化产物交换性盐基离子的影响，具有重要的科学意义及实践价值。此外，土壤中盐基离子的交换作用是体现土壤酸性缓冲性能的重要方面之一。研究表明土壤中的碳酸盐、阳离子交换量、交换性酸等与酸性缓冲容量呈相关关系^[11, 16-18]。土壤对酸的缓冲能力强弱是土壤抵抗酸雨侵害能力强弱及土壤酸化难易程度的重要标志，土壤的缓冲能力受到土壤形

成过程中的母质、气候、生物以及人为因素等多因素综合影响^[19]。研究表明,土壤含钙量较高的黑钙土对酸的缓冲容量较强,为 $5 \sim 10.5 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ pH}^{-1}$ ^[20]。有学者证明碳酸钙和阳离子交换作用是三峡库区黄壤和紫色土对酸、碱起缓冲作用主要因素,而且黄壤的缓冲能力略强于紫色土^[21]。即使紫色土被认为是具有较强的潜在酸化能力^[22],但由于紫色土含有丰富的交换性盐基离子,尤其是交换性 Ca^{2+} 的含量较高,从碳酸盐缓冲体系来看,酸性紫色土富含交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。因此,该类型的紫色土对酸化环境具有一定的缓冲作用^[11]。

目前,较多学者关注农业生产活动中土壤的酸性缓冲性能及发生机制的研究,但较少关注岩石风化产物的酸性缓冲性能。因此,本试验以四川盆地的典型紫色母岩为试验材料,通过室内的循环浸泡试验和模拟酸雨淋溶试验,研究酸化环境对紫色母岩风化产物盐基离子及酸性缓冲容量的影响,以期维持紫色土肥力的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验所用的蓬莱镇组 (J_3p)、沙溪庙组 (J_2s) 和遂宁组 (J_3s) 紫色泥岩分别采自四川安岳县工业园区 ($30^\circ 6' 35'' \text{N}$, $105^\circ 23' 43'' \text{E}$)、资中县工业园区

($29^\circ 44' 52'' \text{N}$, $104^\circ 51' 20'' \text{E}$) 和遂宁市河沙镇砖厂 ($30^\circ 35' 16'' \text{N}$, $105^\circ 41' 25'' \text{E}$)。现场挖掘 3 组新出露的紫色土母岩(泥岩),而且要求同种母岩采自同一地点,尽可能使母岩样品的理化特性一致,采集的每块母岩的颜色和质地等一致。然后运至盐亭紫色土农业生态试验站 ($31^\circ 16' \text{N}$, $105^\circ 27' \text{E}$),于阴凉处放至完全风干。待阴干后,将其中一部分紫色母岩进行粒径 ($>60 \text{ mm}$ 、 $60 \sim 40 \text{ mm}$ 、 $40 \sim 20 \text{ mm}$ 、 $20 \sim 10 \text{ mm}$ 、 $10 \sim 5 \text{ mm}$) 筛分,筛分完成后的母岩样品将被应用于模拟酸雨淋溶试验,即淋溶试样。而将另外一部分整块母岩切割成若干小块,并将各切割小块处理成浑圆状试样,每块重 (660 ± 3) g,为了避免同种母岩样品间的异质性,同种母岩试样从同一块母岩样品切割,尽可能使各组母岩试样的理化特性一致,切割完成后的母岩样品将被应用于循环浸泡试验,即浸泡试样。各组紫色母岩的基本性质见表 1、表 2。

1.2 试验设计

基于 Li 等^[23]和赵晓莉等^[24]对四川省降雨资料进行统计分析,四川省降雨 pH 的平均值为 4.74,其中强酸性降雨 ($\text{pH} \leq 4.0$) 出现频率占 17%,局部地区降雨 pH 可达 $3.0 \sim 3.5$,而且四川省降雨中的无机阴离子主要以 SO_4^- 和 NO_3^- 为主^[25],且 SO_4^- 和 NO_3^- 摩尔浓度比为 $4:1$ ^[26]。因此,本试验采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HNO_3 配置成摩尔浓度比为

表 1 紫色母岩矿物含量

Table 1 Mineral content of the three purple parent rock/%

紫色母岩	矿物含量 Mineral content/%				
Purple parent rock	蒙脱石 Montmorillonite	伊利石 Elysium	高岭石 Kaolinite	绿泥石 Chlorite	石英 Quartz
J_3s	9.1	30.2	0.0	8.7	33.2
J_2s	13.2	21.0	6.1	6.8	40.8
J_3p	5.2	23.1	0.0	10.7	38.1

紫色母岩	矿物含量 Mineral content /%			
Purple parent rock	钾长石 Potassium feldspar	斜长石 Plagioclase	方解石 Calcite	白云石 Dolomite
J_3s	1.0	7.2	10.3	0.3
J_2s	2.2	9.7	0.1	0.1
J_3p	0.9	8.2	11.8	2.0

表 2 紫色母岩的主要化学元素含量

Table 2 Main chemical element content of the three purple parent rock/%

紫色母岩 Purple parent rock	化学元素 Chemical element /%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	CaCO ₃
J ₃ S	57.6	12.8	5.0	0.7	2.1	0.9	5.7	1.3	14.1
J ₂ S	61.5	16.2	6.6	0.8	2.6	1.3	0.9	2.0	2.2
J ₃ P	58.3	13.0	4.7	0.6	2.4	0.9	5.0	1.3	14.7

注：J₃S、J₃P 和 J₂S 分别表示遂宁组、蓬莱镇组和沙溪庙组紫色泥岩。下同。Note: The Suining group, Penglai group, and Shaximiao group were represented by J₃S, J₃P, and J₂S. The same as below.

4:1 的酸性溶液的母液, 再向酸性母液中加入去离子水, 将酸性母液配制成 pH 为 2.5、3.5、4.5、5.6 的酸性溶液, 此外, 采用去离子水 (pH=7.0) 为空白试验。分别设计模拟酸雨淋溶试验和循环浸泡试验。

淋溶试验采用的室内模拟土柱淋洗试验。将淋溶试样按照由大到小的粒径装入土柱内, 且各粒级质量为 600±3 g。由于四川盆地的年均降雨量为 863 mm, 因此, 每次淋溶量按月平均降雨量为 72 mm 进行模拟降雨, 且每月进行 2 次淋洗, 共计进行 24 次淋洗, 淋溶方法采用间歇淋溶法使其接近自然降雨。分别在淋洗 12 次 (模拟 1 a 降雨量) 和 24 次 (模拟 2 a 降雨量) 后, 收集 3 组紫色泥岩风化产物 (颗粒 < 2 mm) 进行交换性盐基离子 (K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺) 和交换性盐基总量的测定。其试验实施过程与赵吉霞等^[3]的裸岩淋溶试验方案保持一致。

循环浸泡试验将事先切割完成的浸泡试样放入 500 mL 的烧杯中, 并对浸泡试样进行称重, 保持每块紫色母岩的质量为 660±3 g, 然后向烧杯中加入 300 mL 预先配置的不同酸度 (pH=2.5, 3.5, 4.5, 5.6) 和对照 (CK) 的浸泡液, 静置 72 h 后, 分离浸泡试样和浸泡液, 并收集浸泡液中崩解物, 在 105℃ 下将浸泡液中崩解物烘干至恒重且冷却至室温后, 将其返还至相对应的烧杯中, 至此 1 次循环浸泡试验完成。本试验进行 24 次循环浸泡为止或崩解物全部过 2 mm 为止, 收集 3 组紫色母岩的风化产物, 并测定 3 组紫色母岩风化产物中交换性盐基离子 (K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)、交换性盐基总量及酸性缓冲容量。

1.3 指标测定

参照 Xu^[27]和成杰民^[28]的方法测定母岩风化产物的酸碱缓冲容量。

分别取 5.00 g 各处理后的风化产物于 100 mL 塑料瓶中 (各处理后的风化产物取 7 组), 滴入一定量的去离子水使样品刚好湿润为止, 然后分别加入 0、0.25、0.5、1.0、2.0、4.0、6.0 mL 已标定的 HCl (0.1 mol·L⁻¹) 溶液, 然后再加入去离子水至外加溶液的体积均为 25 mL, 最后将密闭好的塑料瓶放入摇床进行震荡, 所有处理均重复 3 次。土壤悬液在 25℃ 条件 (30~50 r·min⁻¹) 下振荡 24 h 后, 恒温 25℃ 培养 7 d, 期间每天往复摇匀 30 min, 最后用 pH 计测定土壤悬浊液的 pH, 并记录悬浊液温度。以 pH 为纵坐标, 酸加入量为横坐标, 建立线性方程为:

$$\text{pHBC} = [(5 - b)/m] - [(6 - b)/m]^{[29]}$$

式中, pHBC 为风化产物的酸缓冲容量; b 为截距; m 为斜率。

经测定, 各处理后的风化产物 pH 均大于 7.0, 属碱性土壤, 因此根据 NY/T1615-2008 石灰性土壤交换性盐基及盐基总量的测定方法, 以 pH8.5 的氯化铵-乙醇溶液作为交换液, 利用原子吸收分光光度计测定风化产物中的交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量, 并用火焰光度计测定风化产物中交换性 K⁺、Na⁺ 含量。

此外, 紫色母岩矿物组成及黏土矿物采用 X 射线衍射仪测定; 化学物质中 K₂O、Na₂O、CaO、MgO 和 MnO 采用原子吸收分光光度法测定; P₂O₅ 采用钼锑抗比色法测定; SiO₂ 采用聚环氧乙烷重量法测定; Al₂O₃ 采用氟化物取代络合滴定法测定; Fe₂O₃ 采用重铬酸钾容量法测定; TiO₂ 采用过氧化氢比色法测定。

1.4 数据统计与分析

本试验的相关试验数据的预处理均在 Excel 2019 中进行, 数据的统计分析采用 IBM SPSS Statistics 25 软件, 单因素方差分析采用最小显著差

异法 (LSD), 相关性分析采用皮尔逊系数法 (Pearson), 绘图采用 origin 2021 软件。

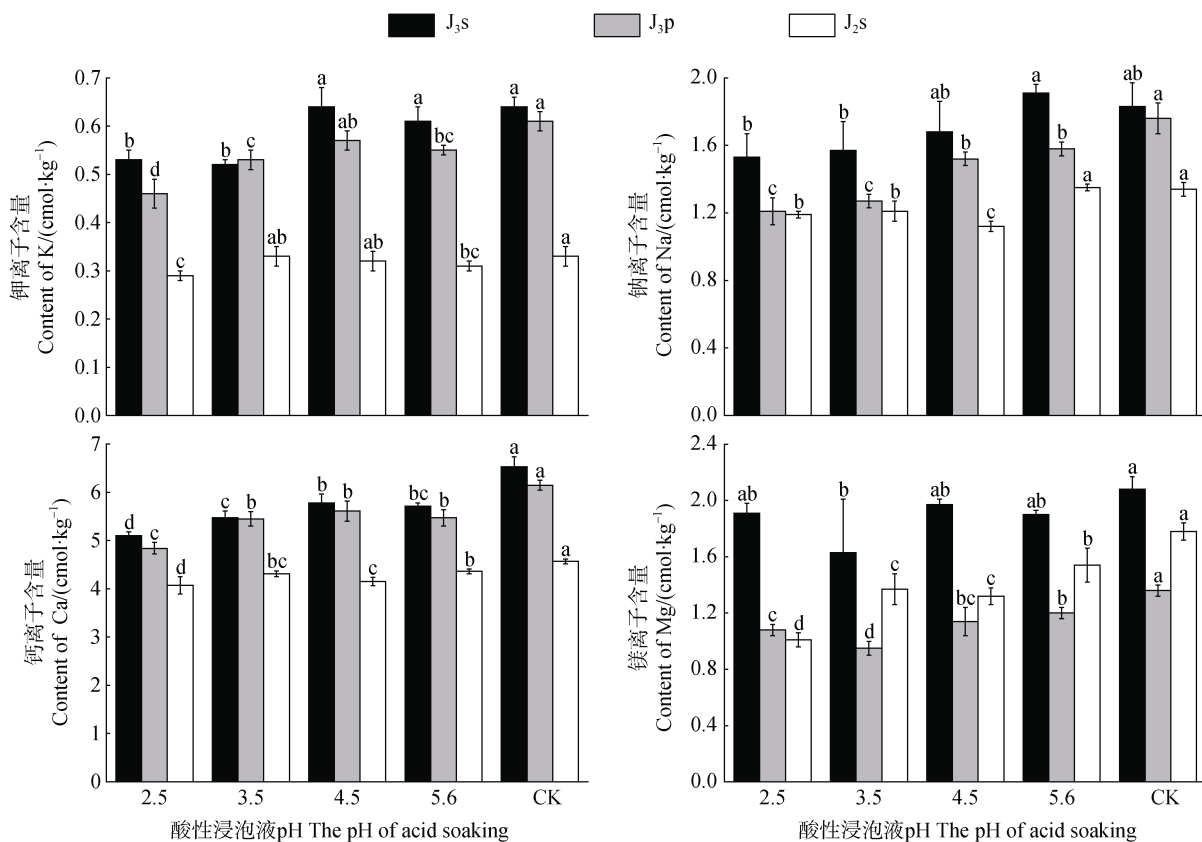
2 结果

2.1 酸化环境对风化产物盐基离子变化特征的影响

通过对循环浸泡处理后的紫色母岩风化产物的交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进行测定。结果表明, 随着浸泡液酸度的增强, 3 组紫色母岩风化产物的交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量均呈现下降趋势, 而且不同 pH 酸溶液处理下的母岩风化产物中的交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量较 CK 处理均有不同程度的减少 (图 1)。在 pH 5.6~pH 2.5 的酸溶液处理下, 遂宁组 (J_{3s}) 母岩风化产物的交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量分别较 CK 处理减少 0.00%~17.19%、-4.37%~16.39%、11.49%~21.90%、

5.29%~8.17%, 蓬莱镇组 (J_{3p}) 母岩风化产物交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量分别较 CK 处理减少 5.65%~24.59%、10.23%~31.25%、8.78%~21.30%、11.76%~20.59%, 沙溪庙组 (J_{2s}) 母岩风化产物交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量分别较 CK 处理减少 0.00%~12.12%、-0.75%~11.19%、4.6%~10.94%、13.48%~43.26%。此外, 在相同酸度处理下, 3 组母岩风化产物的交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量的特征为遂宁组 (J_{3s}) > 蓬莱镇组 (J_{3p}) > 沙溪庙组 (J_{2s}), 而交换性 Mg^{2+} 含量表现为遂宁组 (J_{3s}) > 沙溪庙组 (J_{2s}) > 蓬莱镇组 (J_{3p})。

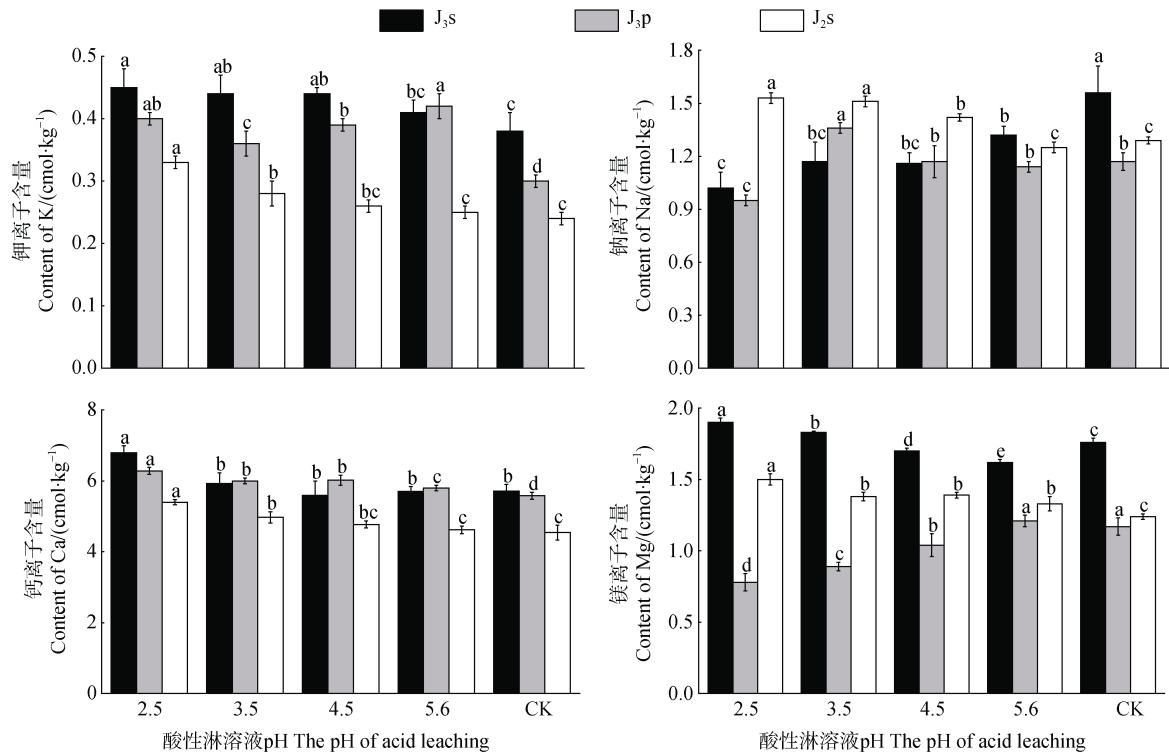
在模拟淋溶 12 次和 24 次后, 分别收集 3 组紫色母岩的风化产物 (<2 mm), 并对风化产物交换性盐基离子进行测定。结果表明, 随着淋溶液的酸度和降雨量的增加, 3 组紫色母岩风化产物中交换性盐基离子呈现减小的趋势 (图 2、图 3)。模拟淋溶 24 次后 3 组紫色母岩风化产物交换性盐基离子



注: 图中同组母岩不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters in the graph for the same group of parent rocks indicate significant differences ($P < 0.05$).

图 1 酸循环浸泡处理后紫色母岩风化产物中交换性盐基离子的含量

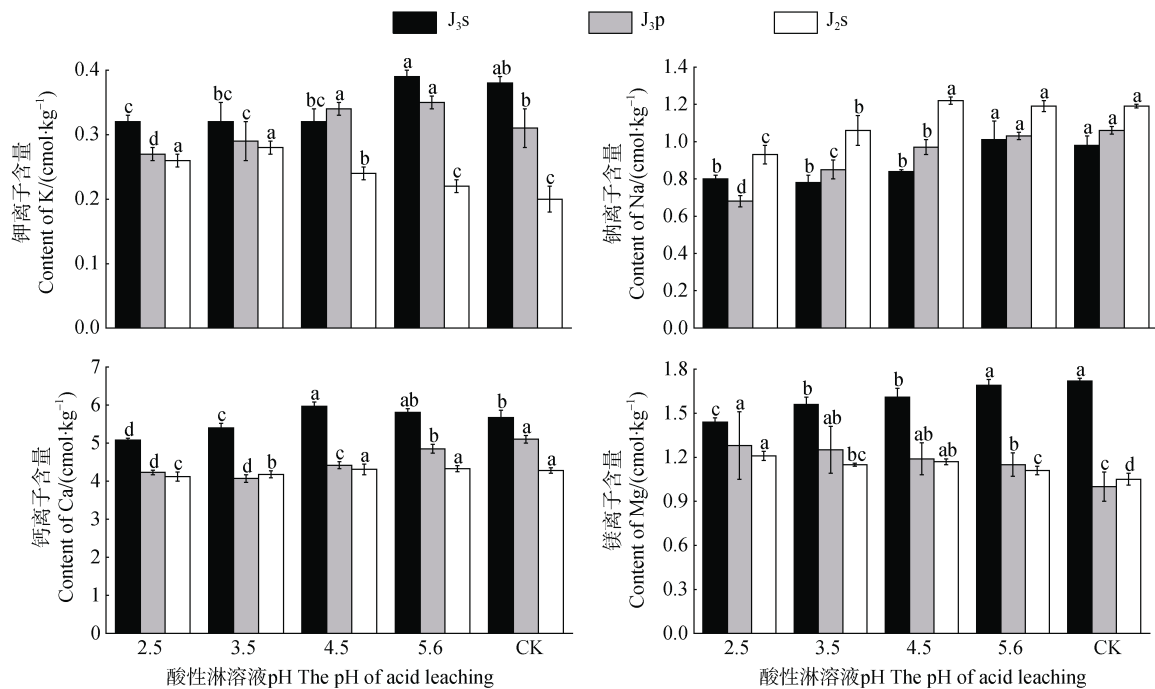
Fig. 1 The contents of exchangeable salt-based ions of weathering products after treatment soaked at different pH values



注：图中同组母岩不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters in the graph for the same group of parent rocks indicate significant differences ($P < 0.05$).

图2 模拟酸雨淋溶 12 次紫色母岩风化产物中交换性盐基离子的含量

Fig. 2 The contents of exchangeable salt-based ions of weathering products after treatment simulated rain 12 times at different pH values



注：图中同组母岩不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters in the graph for the same group of parent rocks indicate significant differences ($P < 0.05$).

图3 模拟酸雨淋溶 24 次紫色母岩风化产物中交换性盐基离子的含量

Fig. 3 The contents of exchangeable salt-based ions of weathering products after treatment simulated rain 24 times at different pH values

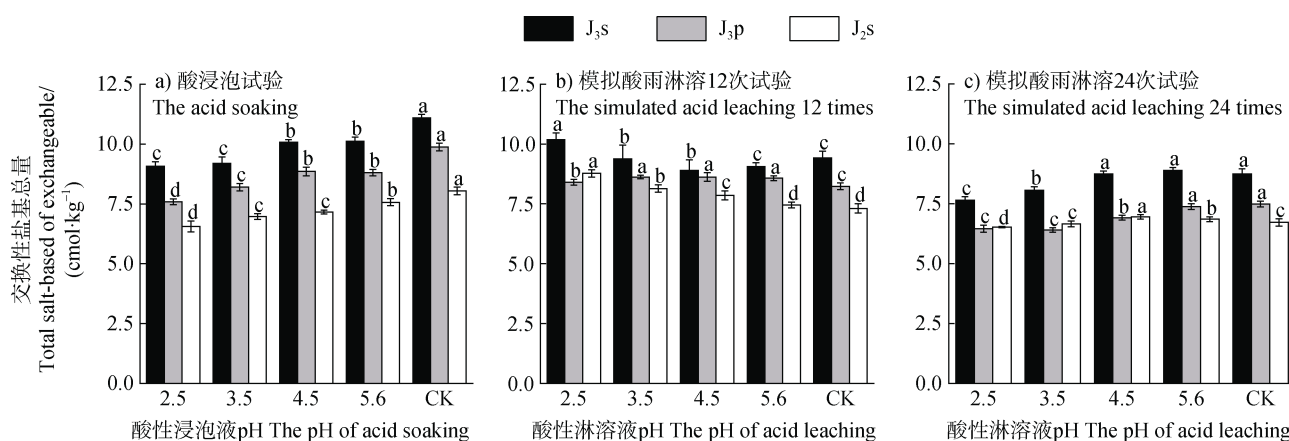
较模拟淋溶 12 次均呈现下降的趋势, 其中遂宁组 (J_{3s}) 的风化产物中交换 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量分别减少 $0.00\sim 0.13\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.22\sim 0.58\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $-0.38\sim 1.71\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $-0.07\sim 0.46\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 沙溪庙组 (J_{2s}) 的风化产物中交换 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量分别下降 $0.00\sim 0.07\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.06\sim 0.60\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.26\sim 1.28\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.19\sim 0.29\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 蓬莱镇组 (J_{3p}) 的风化产物中交换 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量分别减小 $-0.01\sim 0.13\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.11\sim 0.51\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.48\sim 2.05\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $-0.50\sim 0.17\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.2 酸化环境对风化产物交换性盐基离子总量的影响

通过测定循环浸泡试验中 3 组紫色母岩风化产物的交换性盐基总量。结果表明, 以 CK 处理为对照, 3 组紫色母岩风化产物的交换性盐基总量均随浸泡液 pH 的减小而减小 (图 4 a)。在 pH5.6~pH2.5 的酸溶液处理下, 遂宁组 (J_{3s})、蓬莱镇组 (J_{3p}) 及沙溪庙组 (J_{2s}) 紫色母岩风化产物的交换性盐基总量分别较 CK 处理减少 8.75%~18.21%、10.83%~23.18%、5.85%~18.41%。此外, 在相同

酸浸泡处理下, 交换性盐基总量的减小幅度由大到小的顺序为遂宁组 (J_{3s}) > 蓬莱镇组 (J_{3p}) > 沙溪庙组 (J_{2s})。

模拟淋溶 12 次和 24 次后, 分别收集并测定 3 组紫色母岩风化产物交换性盐基总量。结果表明, 模拟淋溶 12 次后, 随酸性淋溶液 pH 的减小, 3 组紫色母岩风化产物交换性盐基总量呈现增加的趋势。而模拟淋溶 24 次后, 随酸性淋溶液酸度的增加, 3 组紫色母岩风化产物中交换性盐基总量有明显的减少 (图 4)。当模拟降雨 pH 为 2.5~7.0 且模拟淋溶 24 次, 相同酸性淋溶液处理后的遂宁组 (J_{3s})、沙溪庙组 (J_{2s}) 和蓬莱镇组 (J_{3p}) 母岩风化产物中交换性盐基总量较模拟淋溶 12 次分别降低 1.77%~24.85%、8.99%~25.75% 和 8.05%~25.66%, 且 3 组紫色母岩风化产物交换性盐基总量的减少幅度随模拟淋溶液酸度的增加而增大 (图 4b 和图 4c)。此外, 循环浸泡 24 次后, 3 组紫色母岩风化产物交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 占交换性盐基总量的 75.12% 以上, 而模拟淋溶 24 次后, 3 组紫色母岩风化产物交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 占交换性盐基总量的 78.96% 以上。



注: 图中同组母岩不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters in the graph for the same group of parent rocks indicate significant differences ($P < 0.05$).

图 4 酸化环境中紫色母岩风化产物交换性盐基离子的总量

Fig. 4 The contents of exchangeable salt-based ions of weathering products at different pH acid conditions

2.3 酸化环境对紫色母岩风化产物酸缓冲容量的影响

土壤酸缓冲能力是土壤对酸敏感性的度量指标, 是土壤质量评价体系中的重要因子, 通常将土

壤酸缓冲容量, 即单位质量的土壤降低 1 个 pH 单位所需酸的量作为评价土壤抵抗酸能力的重要指标^[30-31]。因此, 参照 Tarkalson 等^[32]的方法, 对各母岩风化产物的酸缓冲容量进行测定。结果表明,

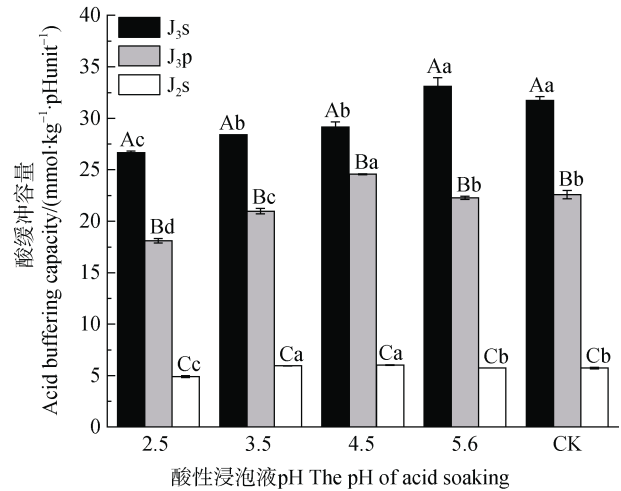
环境中 pH 为 2.5~7.0 处理下的遂宁组 (J_{3s})、沙溪庙组 (J_{2s}) 和蓬莱镇组 (J_{3p}) 母岩风化产物的酸缓冲容量分别为 26.65~33.11 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹、4.91~6.03 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹ 和 18.11~24.57 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹ (图 5)。随着浸泡液酸度增强, 3 组紫色母岩风化产物的酸缓冲容量均呈现先增加后减小的趋势, 其中遂宁组 (J_{3s})、沙溪庙组 (J_{2s}) 和蓬莱镇组 (J_{3p}) 紫色母岩的酸缓冲容量分别在 pH 为 5.6、4.5 和 4.5 处理下达到最大值, 且最大值分别为 33.11 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹、6.03 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹ 和 24.57 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹。在 CK 处理与 pH=5.6 处理下, 同类型紫色母岩风化产物的酸缓冲容量均无显著差异 ($P>0.05$), 但 pH=4.5 酸处理与 CK 处理和 pH=5.6 酸处理相比, 同类型紫色母岩风化产物的酸缓冲容量均存在显著差异 ($P<0.05$), 而且在 pH=2.5 处理下同类型紫色母岩风化产物的酸缓冲容量与其他处理均呈现显著性差异 ($P<0.05$) (图 5)。此外, 通过酸性溶液浸泡处理后, 3 组紫色母岩风化产物酸缓冲容量特征表现为遂宁组 (J_{3s}) > 蓬莱镇组 (J_{3p}) > 沙溪庙组 (J_{2s}), 且沙溪庙组 (J_{2s}) 风化产物的酸缓冲容量分别为遂宁组 (J_{3s}) 和蓬莱镇组 (J_{3p}) 酸缓冲容量的 19% 和 26%。

通过采用高斯混合模型对风化产物酸缓冲容量和酸性浸泡液的 pH 进行非线性拟合。遂宁组 (J_{3s})、蓬莱镇组 (J_{3p}) 和沙溪庙组 (J_{2s}) 紫色母岩风化产物酸缓冲容量与酸浸泡液的 pH 拟合方程如图 6 所示。此外, 高斯混合模型拟合结果表明, 遂宁组 (J_{3s})、蓬莱镇组 (J_{3p}) 和沙溪庙组 (J_{2s}) 紫色母岩风化产物酸缓冲容量分别在酸浸泡液的 pH 为 5.6、5.46 和 5.16 时达到峰值, 且拟合峰值分别为 32.60 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹、23.84 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹ 和 6.03 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹。此外, 高斯混合模型拟合结果的 R^2 分别为 0.73、0.65 和 0.53。

2.4 紫色母岩风化产物酸缓冲容量的影响因素

土壤中的交换性盐基离子是土壤产生缓冲作用的主要原因, 通过对 3 组紫色母岩风化产物的酸缓冲容量与交换性盐基离子的相关分析 (表 3), 结果表明, 不同 pH 处理下的 3 组紫色母岩风化产物的酸缓冲容量与其交换性 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 含量及交换性盐基总量均呈现极显著正相关关系 ($P<$

0.01), 这与刘莉等^[11]的研究结果相似。而且酸缓冲容量与交换性 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 以及交换性盐基离子的相关系数分别为 0.93、0.79、0.87、0.44、0.88。此外, 结果表明, 紫色母岩风化过程中受到酸性环境影响而引起风化产物中交换性盐基离子含量的差异是紫色母岩风化产物酸缓冲容量差异的主要原因^[11, 20-21]。



注: 同种酸处理下不同大写字母和同组母岩中的不同小写字母分别表示差异显著 ($P<0.05$)。Note: Both capital letters in the same acid treatment and small letters in the same purple rock group indicate significance at $P<0.05$.

图 5 不同酸浸泡处理下母岩风化产物的酸缓冲容量
Fig. 5 The acid buffering capacity of weathering products after treatment soaked at different pH values

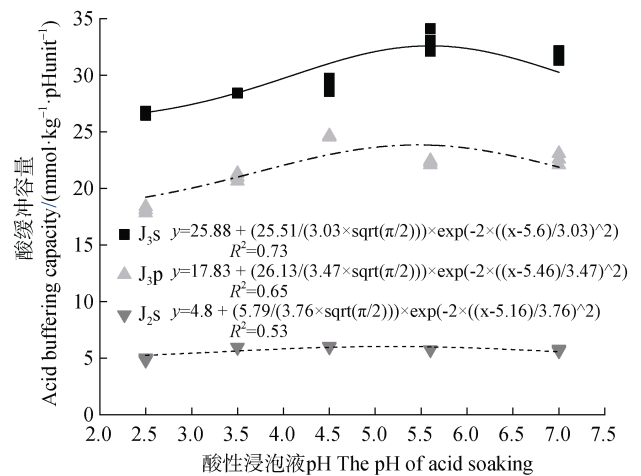


图 6 风化产物的酸缓冲容量对酸性浸泡液的响应特征
Fig. 6 The acid buffering capacity of weathering products' response to acid-soaked

表 3 风化产物酸缓冲容量与风化产物盐基离子含量的相关系数

Table 3 The coefficient of correlation between acid buffering capacity and contents of base exchangeable cations of weathering products

	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	TEA	pHBC
pH	1.00						
K ⁺	0.26	1.00					
Na ⁺	0.52**	0.79**	1.00				
Ca ²⁺	0.44**	0.95**	0.82**	1.00			
Mg ²⁺	0.40**	0.35*	0.56**	0.372*	1.00		
TEA	0.50**	0.90**	0.91**	0.94**	0.65**	1.00	
pHBC	0.10	0.93**	0.79**	0.87**	0.44**	0.88**	1.00

注: 表中 TEA 为盐基交换总量, *在 $P < 0.05$ 水平下显著相关; ** 在 $P < 0.01$ 水平下极显著相关。Notes: The TEA is the total amount of the base exchangeable ions, * Significant at $P < 0.05$ level, ** extremely significant at $P < 0.01$ level.

3 讨论

3.1 酸性环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子的影响

酸化环境显著影响紫色母岩的成土特征^[3, 33], 而且酸化环境降低紫色土的 pH 和微团聚体含量^[34], 进而对作物的生长产生负影响^[5, 35]。本试验结果表明, 随着浸泡液酸度增加, 风化产物交换性盐基离子和盐基总量均呈现减小的趋势, 而且 3 组风化产物中交换性盐基离子组分大小顺序均呈现 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 且 3 组风化产物交换性盐基离子含量特征表现为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量最高。酸性环境中的 H^+ 依次与矿物进行盐基离子的交换反应^[18, 36]、次生黏土矿物裂解释放阳离子^[15], 而且交换反应过程中高价盐基离子优先被 H^+ 置换到土壤溶液中, 进而促进土壤溶液中的盐基离子含量增加, 最终形成风化产物所处环境的 H^+ 浓度、黏土矿物交换性盐基离子和土壤溶液中盐基离子的系统平衡态^[37-38]。风化产物所处环境的 H^+ 浓度增加或土壤溶液中盐基离子减少均会使得上述系统平衡态往右进行。谭孟溪等^[39]研究发现不同微地形下酸性紫色土的交换性盐基离子特征表现为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量最高。而且刘莉等^[11]通过采集重庆合川的 38 个酸性紫色土, 并对其交换性盐基离子的测定, 研究表明酸性紫色土的交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 较红壤分别高出 5.9 倍和 3.9 倍, 且酸性紫色土交换性盐基离子特征表现为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量最高, 分别为 $4.25 \sim 22.80 \text{ coml} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.20 \sim 5.94 \text{ coml} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。程永毅等^[40]研究表明土壤酸

化后土壤的交换性盐基离子均降低, 尤其以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的降幅最大, 降幅分别为 $16.74 \text{ coml} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.11 \text{ coml} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此外证实一价盐基离子快速释放, 而二价盐基离子释放缓慢。本试验中 3 组紫色母岩风化产物交换性盐基离子含量特征与前人试验结果^[39-40]一致。此外, 在不同酸浸泡处理下, 浸泡液中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的累积释放量分别为 $0.22 \sim 0.45 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.55 \sim 2.34 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.18 \sim 16.02 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.60 \sim 3.59 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且不同酸处理之间浸泡液中盐基离子累积释放量呈现显著性差异^[41]。

淋溶试验结果表明, 3 组紫色母岩交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 随淋溶次数的增加而下降, 且减小幅度远大于 K^+ 、 Na^+ 。淋溶过程中盐基离子被淋洗出土体^[42], 进而促进交换性盐基离子^[18, 36]和黏土矿物中盐基离子^[15]的释放, 而且 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是淋溶过程中最主要的淋失组分^[43-44]。樊后保和林德喜^[45]通过对福建 4 种土壤类型进行模拟酸雨淋溶试验, 研究发现模拟酸雨淋溶处理后, 紫色土的交换性盐基离子含量特征表现为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量最高。淋溶试验结果与前人研究结果相似, 且通过测定 3 组紫色母岩交换性盐基离子含量的变化特征, 证明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是淋溶过程中最主要的淋失组分。此外, 通过测定淋溶液中盐基离子总量, 结果表明, 遂宁组 (J_3s)、蓬莱镇组 (J_3p) 和沙溪庙组 (J_2s) 紫色母岩淋溶液中盐基离子总累积淋失量分别为 $5.98 \sim 26.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.04 \sim 25.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.61 \sim 21.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且各模拟淋溶处理之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

3.2 酸性环境对紫色母岩风化产物酸性缓冲能力的差异性

随着浸泡液酸度增强, 3 组紫色母岩风化产物酸缓冲容量均呈现先增加后降低趋势, 且酸性缓冲容量表现为遂宁组 (J_{3s}) > 蓬莱镇组 (J_{3p}) > 沙溪庙组 (J_{2s}), 且在同一酸浸泡处理下, 3 组紫色母岩风化产物的酸性缓冲容量均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。一方面, 不同紫色母岩的黏土矿物组成及矿质元素全量存在差异 (表 1 和表 2), 从而影响不同紫色母岩风化产物交换性盐基离子存在差异, 进而影响风化产物的酸缓冲容量^[11]。另一方面, 易风化黏土矿物形成土壤的酸性缓冲能力越强^[46]。杨杉等^[21]通过对三峡库区典型土壤酸缓冲容量进行测定, 研究发现紫色土酸缓冲容量分别为 $10.13 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{pH}^{-1}$, 而本试验中遂宁组 (J_{3s}) 和蓬莱镇组 (J_{3p}) 紫色母岩风化产物酸缓冲容量均大于杨杉等^[21]的测定结果, 但沙溪庙组 (J_{2s}) 紫色母岩风化产物酸缓冲容量小于此结果。赵旋彤等^[20]研究表明土壤酸缓冲容量与土壤碳酸盐含量呈现极显著相关关系 ($R^2 = 0.941$, $P < 0.01$)。上述结果表明, 紫色母岩中碳酸盐的含量可能决定风化产物中酸缓冲容量, 且随风化过程的进行, 风化产物的酸缓冲容量可能呈现减小的趋势。此外, 酸性缓冲容量与碳酸盐、阳离子交换量、交换性酸等均存在相关关系^[16-18], 本试验的相关性分析结果与前人的结论相似。

循环浸泡 24 次后, 浸泡液的 pH 为 5.60、5.46 和 5.16 分别为遂宁组 (J_{3s})、蓬莱镇组 (J_{3p}) 和沙溪庙组 (J_{2s}) 紫色母岩风化产物酸缓冲容量达到峰值 (图 6)。目前, 酸性缓冲体系被较多学者划分为初级缓冲体系和次级矿物风化缓冲体系, 而且酸化环境的 pH 为 4.0 为酸性缓冲体系转变的临界点^[18, 46]。此外, 仇荣亮和于锡军^[36]将初级缓冲体系划分为初级质子缓冲体系和次级质子缓冲体系, 而且认为淋溶液 $\text{pH} \geq 3.5$ 时, 以盐基离子的溶解淋溶和离子交换反应为主, 该过程被认为是初级质子缓冲体系, 淋溶液 $\text{pH} < 3.5$ 时, 矿物固相中的金属氧化物对外源 H^+ 产生影响, 该阶段被解释为次级质子缓冲过程。有研究表明碱化土壤以碳酸盐缓冲体系为主^[36], 通过循环浸泡试验处理后, 3 组紫色母岩风化产物的 pH 均大于 7.0, 属于碱化土壤。根据表 2 可知, 遂

宁组 (J_{3s}) 和蓬莱镇组 (J_{3p}) 的碳酸盐含量远大于沙溪庙组 (J_{2s}) 的碳酸盐含量, 因此, 3 组紫色母岩风化产物的酸缓冲体系可能以碳酸盐缓冲体系为主。

3.3 基于循环浸泡和淋溶条件下风化产物中交换性盐基离子的差异性

循环浸泡 24 次后, 遂宁组 (J_{3s})、蓬莱镇组 (J_{3p}) 和沙溪庙组 (J_{2s}) 紫色母岩风化产物交换性盐基总量较淋溶 24 次处理分别提高 13.17%~26.89%、17.49%~31.91%、0.61%~19.64%。酸性环境中 H^+ 依次与碳酸盐^[36]、交换性盐基离子^[18]、黏土矿物中的盐基离子^[15]发生中和或交换反应。一方面, 循环浸泡试验中浸泡液与风化产物的接触时间约为 72 h^[41], 而淋溶试验中淋溶液与风化产物的接触时间小于 24 h^[3]。这可能是 H^+ 与风化产物交换性盐基离子进行充分的交换反应, 从而促进浸泡试验过程中交换性盐基离子与 H^+ 含量达到动态平衡, 溶液中的离子强度和浓度逐渐增大, 也在很大程度上抑制反应的进行和离子的进一步释放^[47]。邢世和等^[48]通过研究耕地土壤非交换性钾的释放速率, 研究表明, 耕地非交换性钾释放速率随提取时间的增长而逐渐降低。张博等^[49]通过研究发现, 土壤矿物钾的快速释放阶段为 0~100 h, 而浸提时间大于 100 h 为土壤矿物钾的缓慢释放阶段。而郭小雪等^[50]研究表明, 不同浸提剂处理下, 钾矿中钾的快速释放阶段为 0~1.5 h, 而缓慢释放阶段为浸提时间大于 1.5 h。另一方面, 持续淋溶过程引起淋溶试验中紫色母岩风化产物交换性盐基离子及交换总量的降低。刘莉等^[51]通过三峡库区典型土壤对模拟酸雨的响应研究, 结果表明, 盐基离子的淋失量随酸性溶液的酸度增加而增加。而且岑慧贤等^[44]研究发现, 不同土壤类型均表现 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的淋失量随模拟淋溶液酸度增加而增加。上述结果表明, 长期酸性环境处理下, 3 组紫色母岩风化产物交换性盐基离子及盐基总量对酸性环境酸度的响应特征一致。

淋溶处理 12 次后, 3 组紫色母岩风化产物交换性盐基离子及盐基总量随淋溶液酸度增加而增加, 但淋溶处理 24 次后, 风化产物交换性盐基离子及盐基总量随淋溶液酸度增加而减小。本试验所采用的紫色母岩中含有较为丰富的碳酸盐 (表 2), 淋溶处理 0 次至 12 次, 淋溶过程中的 H^+ 可能以碳酸盐的缓冲过程^[20]为主, 而对紫色母岩风化产物交换性盐

基离子及盐基总量的影响较小,但淋溶处理 12 次至 24 次过程中,风化产物交换性盐基离子及盐基总量与淋溶液中 H^+ 发生交换反应^[18],这可能是淋溶处理 12 次与淋溶处理 24 次后,风化产物交换性盐基离子及盐基总量对淋溶液酸度的响应特征产生差异的主要原因之一。此外,淋溶处理 24 次的淋溶量远大于淋溶处理 12 次的淋溶量,而盐基离子的淋失量随淋溶量的增加而增加,从而降低土壤盐基饱和度^[44-45, 51],这可能是引起上述差异的主要原因。

本试验的模拟淋溶强度为中等降雨强度接近大雨强度等级,且高于实际状态下的天然降雨强度,而且杨景田等^[52]的研究表明矿物中可溶性盐基离子的溶解速率与淋溶速率成反比。因此,自然状态下紫色母岩中盐基离子的淋失量可能要高于本试验的盐基离子的淋失量,进而导致自然条件下紫色母岩风化产物交换性盐基离子、盐基总量及酸缓冲容量可能低于本试验中的结果。自然条件下的降雨因子是影响土壤发生侵蚀的原动力,降雨过程对坡面岩土矿物的迁移主要以淋溶作用为主,而对平地岩土矿物的迁移则以浸泡作用为主。此外,地形条件作为坡面土壤侵蚀的主要影响因素,其对土壤侵蚀的影响主要表现在坡度、坡长和微地形条件等因素对径流的影响进而对土壤侵蚀产生影响^[53]。基于本试验中模拟淋溶和循环浸泡条件下的紫色母岩风化产物交换性能与酸缓冲容量的差异性,浸泡处理后 3 组紫色母岩风化产物交换性盐基离子、盐基总量及酸缓冲容量均高于淋溶处理,此外,降雨溶液 pH 是影响岩土矿物风化释放的关键因子^[3],因此,酸沉降可能在一定程度上加速坡面土壤侵蚀的发生,进而导致平原化进程的加速。这一研究推论也为今后的研究方向提供了新的思路。

4 结 论

本研究通过室内的循环浸泡试验和模拟酸雨淋溶试验,以川中地区典型的 3 组紫色母岩为试验材料,研究不同酸性环境处理对紫色母岩风化产物中酸性缓冲性能、交换性盐基离子及其总量的影响。结果表明:(1)不同酸性环境条件下的母岩风化产物中交换性盐基离子及其总量随处理 pH 降低而减少。在相同酸度处理 24 次后,3 组紫色母岩风化产物的交换性盐基总量较 CK 处理均存在不同程度的

减小,而且减幅度随浸泡液酸度的增强而增大,同时,风化产物中的交换性盐基离子含量均表现 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$ 。此外,模拟淋溶 24 次后 3 组紫色母岩风化产物中的交换性盐基总量较模拟淋溶 12 次均有明显的降低。(2)沙溪庙组 (J_2s) 紫色母岩风化产物的酸缓冲容量最低,其平均值不足遂宁组 (J_3s) 和蓬莱镇组 (J_3p) 紫色母岩风化产物酸缓冲容量的 30%,而且 3 组紫色母岩风化产物的酸缓冲容量与其交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。此外,遂宁组 (J_3s) 和蓬莱镇组 (J_3p) 风化产物的酸缓冲容量在不同酸处理下的表现特征为: $pH_{5.6} > CK > pH_{4.5} > pH_{3.5} > pH_{2.5}$ 。(3)本试验中浸泡处理后 3 组紫色母岩风化产物酸缓冲容量、交换性盐基离子及盐基总量均高于淋溶处理,表明淋溶处理下的盐基离子的损失高于浸泡处理。可见,丘陵地带坡面的矿物或养分的迁移以淋溶作用为主,平地的矿物或养分的迁移以浸泡作用为主,因此,酸沉降可能在一定程度上加速坡面土壤侵蚀的发生,进而导致平原化进程的加速。

参考文献 (References)

- [1] Barton D. Notes on the disintegration of granite in Egypt[J]. The Journal of Geology, 1916, 24: 382—393.
- [2] He Y R, et al. Purple Soils in China: Part II [M]. Beijing: Science Press, 2003. [何毓蓉, 等. 中国紫色土: 下篇[M]. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [3] Zhao J X, Deng L M, Lu C H, et al. Effects of simulated acid rain leaching on weathering and soil forming characteristics of purple parent rock[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2021, 43 (11): 151—161. [赵吉霞, 邓利梅, 陆传豪, 等. 模拟酸雨淋溶对紫色母岩风化成土特征的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43 (11): 151—161.]
- [4] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10 (2): 024019.
- [5] Shi Z J, Zhang J E, Xiao Z H, et al. Effects of acid rain on plant growth: A meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 297: 113213.
- [6] Uchikawa J, Zeebe R E. Influence of terrestrial weathering on ocean acidification and the next glacial inception[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (23): L23608.
- [7] Hartmann J, West A J, Renforth P, et al. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification[J]. Reviews of Geophysics,

- 2013, 51 (2): 113—149.
- [8] Zhou X P, Jiang J R, Qin W J. The leaching characteristics of acid rain on some types of soil in Southern China[J]. *Rural Eco-Environment*, 1988, 4 (1): 17—22. [周修萍, 江静蓉, 秦文娟. 中国南方几种土壤的酸雨淋溶特性[J]. *农村生态环境*, 1988, 4 (1): 17—22.]
- [9] Zhuang X Y, Yang J L, Zhang G L, et al. Release characteristics of base cations during soil mineral weathering in subtropical granite area[J]. *Soils*, 2016, 48 (2): 374—380. [庄翔宇, 杨金玲, 张甘霖, 等. 亚热带花岗岩地区土壤矿物风化过程中盐基离子的释放特征[J]. *土壤*, 2016, 48 (2): 374—380.]
- [10] Liu L, Zhou Y Y, Song C Y, et al. Release of basic cations in red soil under simulated acid rain and buffering mechanism[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21 (2): 49—55. [刘俐, 周友亚, 宋存义, 等. 模拟酸雨淋溶下红壤中盐基离子释放及缓冲机制研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21 (2): 49—55.]
- [11] 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.]
- [12] Chen Z L, Shu Y G, Zhou P P. Exchange and distribution characteristics of soil base ions under different ecological restoration pattern in the Karst mountainous area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (4): 304—311, 319. [陈忠柳, 舒英格, 周鹏鹏. 喀斯特山区不同生态恢复模式土壤盐基离子的交换及分布特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (4): 304—311, 319.]
- [13] Nie S A, Ge T D, Xiao H A, et al. Variation analysis of soil exchangeable bases in different cultivation management[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (5): 1064—1069. [聂三安, 葛体达, 肖和艾, 等. 不同栽培管理方式下土壤交换性盐基特征差异分析[J]. *土壤通报*, 2011, 42 (5): 1064—1069.]
- [14] Zhang Q Y, Wang Q F, Zhu J X, et al. Spatiotemporal variability, source apportionment, and acid-neutralizing capacity of atmospheric wet base-cation deposition in China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262: 114335.
- [15] Tabatabai M A, Olson R A. Effect of acid rain on soils[J]. *Critical Reviews in Environmental Control*, 1985, 15 (1): 65—110.
- [16] Jiang J, Cao N N, Yu M X, et al. A review of the key mechanisms of acidic forest soils to buffer acid deposition[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2019, 27 (5): 491—499. [江军, 曹楠楠, 俞梦笑, 等. 酸性森林土壤缓冲酸沉降关键机理研究进展[J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27 (5): 491—499.]
- [17] Li B, Zhao Q, Mao B, et al. Factors influencing acid buffering capacity of main soil types in Eastern China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40 (12): 3901—3910. [李博, 赵琼, 毛兵, 等. 我国东部主要类型土壤酸缓冲能力的影响因素[J]. *生态学杂志*, 2021, 40 (12): 3901—3910.]
- [18] Liao B H, Li C S. Buffering mechanism of soil for acidic precipitation[J]. *Environmental Science*, 1989, 10 (1): 30—34, 96. [廖柏寒, 李长生. 土壤对酸沉降缓冲机制探讨[J]. *环境科学*, 1989, 10 (1): 30—34, 96.]
- [19] Mao Y F, Qiu R L, Wen Z L. Factors influencing buffering ability of land-ecosystem[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8 (2): 141—143. [毛友发, 仇荣亮, 温志良. 陆地生态系统酸沉降缓冲能力影响因素[J]. *土壤与环境*, 1999, 8 (2): 141—143.]
- [20] Zhao X T, Wang H B, Zhao L P, et al. Acid-base buffering properties and influencing factors of three typical agricultural soils in Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2020. [赵旋彤, 王鸿斌, 赵兰坡, 等. 吉林省三种典型农耕地土壤酸碱缓冲性能及影响因素[J]. *吉林农业大学学报*, 2020.]
- [21] Yang S, Wu S J, Zhou W Z, et al. Acid and alkaline buffering capacity and its influencing factors of typical soils in the Three Gorges reservoir area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25 (1): 163—170. [杨杉, 吴胜军, 周文佐, 等. 三峡库区典型土壤酸碱缓冲性能及其影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25 (1): 163—170.]
- [22] Li Z Y, Wang P S, Liu L, et al. High negative surface charge increases the acidification risk of purple soil in China[J]. *Catena*, 2021, 196.
- [23] Li J L, Li R, Cui L L, et al. Spatial and temporal variation of inorganic ions in rainwater in Sichuan Province from 2011 to 2016[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 112941.
- [24] Zhao X L, Yan J, Chen Z Y, et al. Variation characteristics analysis of acid rain in Sichuan from 2006 to 2013[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2015, 38 (2): 54—59. [赵晓莉, 闫军, 陈中钰, 等. 2006—2013年四川酸雨变化特征分析[J]. *气象与环境科学*, 2015, 38 (2): 54—59.]
- [25] Wang H, Han G L. Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in Chengdu, Southwest China[J]. *Atmospheric Research*, 2011, 99 (2): 190—196.
- [26] Yang X H, Shu L, Chen S L. Study on changing characteristics of acid rain and chemistry composition of rain water in Nanchong in recent decade[J]. *Sichuan Environment*, 2014, 33 (1): 26—31. [杨先红, 舒丽, 陈善莉. 南充市近十年酸雨变化特征及降水化学组成研究[J]. *四川环境*, 2014, 33 (1): 26—31.]
- [27] Xu J M, Tang C, Chen Z L. The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38 (4): 709—719.

- [28] Cheng J M, Hu G L, Pan G X. New method for evaluating buffering capacity and equilibrium pH of paddy soil with simulation parameter[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23 (3): 569—573. [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.]
- [29] Zhang Y C, Wang J D, Shen M X, et al. Effects of long-term fertilization on soil acidification in Taihu Lake region, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (3): 465—472. [张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47 (3): 465—472.]
- [30] Weaver A R, Kissel D E, Chen F, et al. Mapping soil pH buffering capacity of selected fields in the coastal plain[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (2): 662—668.
- [31] Aitken R, Moody P. The effect of valence and ionic strength on the measurement of pH buffer capacity[J]. *Soil Research*, 1994, 32: 975.
- [32] Tarkalson D D, Payero J O, Hergert G W, et al. Acidification of soil in a dry land winter wheat-*Sorghum*/corn-fallow rotation in the semiarid US great Plains[J]. *Plant and Soil*, 2006, 283 (1/2): 367—379.
- [33] Wang L J. Chemical and mineralogical changes of soil under the influence of simulated acid rain[J]. *Journal of Yuzhou University: Natural Sciences Edition*, 1995, 12 (2): 6—10. [王力军. 模拟酸雨淋洗下土壤化学和矿物风化特性的变化[J]. *渝州大学学报: 自然科学版*, 1995, 12 (2): 6—10.]
- [34] Qing C L. Studies on the effect of acid precipitation on soil fertility[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1988, 10 (1): 1—11. [青长乐. 酸沉降物对土壤肥力的影响研究[J]. *西南农业大学学报*, 1988, 10 (1): 1—11.]
- [35] Yang X C, Zhu Y P. Acidification of purple soil and its ecological effects[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1995 (6): 532—537. [杨学春, 朱亚萍. 四川紫色土的酸化及其生态效应[J]. *西南农业大学学报*, 1995 (6): 532—537.]
- [36] Qiu R L, Yu X J. Study on buffering mechanisms and buffering ability of terrestrial ecosystem to acid deposition[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1998, 37 (S2): 161—165. [仇荣亮, 于锡军. 陆地生态系统酸沉降缓冲机制与缓冲能力[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 1998, 37 (S2): 161—165.]
- [37] Huang X C. Soil fertility status and improvement with carbon-based amendments to purple soil in the Sichuan Basin[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. [黄兴成. 四川盆地紫色土养分肥力现状及炭基调理剂培肥效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.]
- [38] Mangold D C, Tsang C F. A summary of subsurface hydrological and hydrochemical models[J]. *Reviews of Geophysics*, 1991, 29 (1): 51—79.
- [39] Tan M X, Liu L, Wang P S, et al. Effect of microtopography on the acidification characteristics of soils developed from purple parent rock[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (6): 1441—1449. [谭孟溪, 刘莉, 王朋顺, 等. 微地形作用下紫色母岩发育土壤的酸化特征[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (6): 1441—1449.]
- [40] Cheng Y Y, Li Z Y, Bai Y Y, et al. Acidification characteristics of purple soil, yellow soil and latosol with electro-dialysis method[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (7): 1325—1333. [程永毅, 李忠意, 白颖艳, 等. 电渗析法研究紫色土、黄壤和砖红壤的酸化特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (7): 1325—1333.]
- [41] Zhao J X, Lu C H, Deng L M, et al. Impacts of simulated acid solution on the disintegration and cation release of purple rock (mudstone) in Southwest China[J]. *Geomorphology*, 2018, 316: 35—43.
- [42] Liu C S, Song G H, Shi Y X, et al. Characteristics of acid leaching of brown soil and cinnamon soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16 (3): 5—8.
- [43] Liu W, Zhou Y C, Zhang C L. Response of base cations migration of lime soil to simulated acid rain[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37 (3): 336—342. [刘炜, 周运超, 张春来. 石灰土盐基离子迁移对模拟酸雨响应[J]. *中国岩溶*, 2018, 37 (3): 336—342.]
- [44] Cen H X, Wang S G, Qiu R L, et al. Effect of simulating acid rain on cation release of some soils[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2001, 23 (1): 13—15, 26. [岑慧贤, 王树功, 仇荣亮, 等. 模拟酸雨对土壤盐基离子的淋溶释放影响[J]. *环境污染与防治*, 2001, 23 (1): 13—15, 26.]
- [45] Fan H B, Lin D X. Leaching and weathering effects of simulated acid rain on four types of mountain soils in Fujin, China[J]. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20 (5): 570—577. [樊后保, 林德喜. 模拟酸雨对福建四种山地土壤的淋溶与风化作用[J]. *山地学报*, 2002, 20 (5): 570—577.]
- [46] Liao B H, Dai Z H. Soil buffering capacity to acid precipitation and weathering characteristics of soil minerals[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1991, 11 (4): 425—431. [廖柏寒, 戴昭华. 土壤对酸沉降的缓冲能力与土壤矿物的风化特征[J]. *环境科学学报*, 1991, 11 (4): 425—431.]
- [47] Huang L M, Zhang G L, Yang J L. Weathering and soil formation rates based on geochemical mass balances in a small forested watershed under acid precipitation in subtropical China[J]. *Catena*, 2013, 105: 11—20.
- [48] Xing S H, Zhou B Q, Zhang M S, et al. Releasing rate of nonexchangeable K in some cultivated soils[J]. *Journal of Fujian Agricultural University (Natural Science)*, 2000, 29 (2): 219—223. [邢世和, 周碧青, 张美寿, 等. 耕

- 作土壤的非交换性 K 释放速率[J]. 福建农业大学学报 (自然科学版), 2000, 29 (2): 219—223.]
- [49] Zhang B, Li J Y, Li H C. Dynamics analysis of low molecular weight organic acids on soil potassium release[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44 (35): 140—142. [张博, 李佳颖, 李洪臣. 低分子量有机酸对土壤钾释放的动力学分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44 (35): 140—142.]
- [50] Guo X X, Liu K X, Wang Y, et al. Kinetics of potassium release of activated insoluble potassium ores[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36 (6): 62—67. [郭小雪, 刘可星, 王瑶, 等. 活化钾矿的钾释放动力学研究[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36 (6): 62—67.]
- [51] Liu L, Li X H, Zhou Z M, et al. Effects of simulated acid rain on soil acidification and base cations release of four types of typical soils from the Three Gorges reservoir region[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30 (8): 63—69. [刘莉, 李晓红, 周志明, 等. 模拟酸雨对三峡库区 4 种典型土壤酸化及盐基离子淋溶释放的影响[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30 (8): 63—69.]
- [52] Yang J T, Su X J, Wu Q F, et al. Hazardous characteristics and leaching behaviour of waste lead and zinc slags[J]. Environmental Science, 1988, 9 (6): 17—22, 96. [杨景田, 苏欣捷, 武庆芬, 等. 铅锌冶炼弃渣有害特征及其浸出行为研究[J]. 环境科学, 1988, 9 (6): 17—22, 96.]
- [53] Wang A P, Li F H, Yang S M. Effect of polyacrylamide application on runoff, erosion, and soil nutrient loss under simulated rainfall[J]. Pedosphere, 2011, 21 (5): 628—638.

(责任编辑: 檀满枝)