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:为了分析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规律。本研究以侏罗纪紫色岩层中的遂宁组(J₃s)、沙溪庙组(J₂s)和蓬莱镇组(J₃p)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(J₃s)、蓬莱镇组(J₃p)和沙溪庙组(J₂s)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(J₃s)、沙溪庙组(J₂s)和蓬莱镇组(J₃p)风化产物中交换性盐基总量较模拟淋溶 12 次时分别减小为 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 Jixia¹, 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

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhaojixiacc@163.com
 作者简介:李春培(1997—),男,湖北恩施人,硕士,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

^{*} 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).

259

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_{15}) , Shaximiao Group (J_{25}) , 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⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺ 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 $J_{3}s$, $J_{3}p$, and $J_{2}s$ 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 J₃s, J₃p, and J₂s 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率。 通常认为紫色母岩风化产物粒径<2 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 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 明十壤中的碳酸盐、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 5~10.5 cmol·kg⁻¹ 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 Ca²⁺ 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 Ca²⁺和 Mg²⁺。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 为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(J₃p)、沙溪庙组(J₂s) 和遂宁组(J₃s)紫色泥岩分别采自四川安岳县工业 园区 (30°6'35"N, 105°23'43"E)、资中县工业园区 (29°44′52″N, 104°51′20″E)和该宁市河沙镇砖厂 (30°35′16″N, 105°41′25″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°16'N, 105°27'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 mm, 40~60 mm, 20~40 mm, 10~ 20 mm, 5~10 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 ($pH \le 4.0$)出现频率占 17%,局部 地区降雨 pH 可达 3.0~3.5,而且四川省降雨中的无 机阴离子主要以 SO₄和 NO₃为主^[25],且 SO₄和 NO₃ 摩尔浓度比为 4:1^[26]。因此,本试验采用 1 mol·L⁻¹ 的 H₂SO₄和 1 mol·L⁻¹的 HNO₃ 配置成摩尔浓度比为

表1 紫色母岩矿物含量

Tabla 1	Mineral	content o	f the	three	nurnle	narent rock/%
Table 1	winerar	content o	1 the	unee	puipie	parent lock/70

紫色母岩	矿物含量 Mineral content/%							
Purple	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	石英			
parent rock	Montmorillonite	Elysium	Kaolinite	Chlorite	Quartz			
J ₃ s	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	钾长石	斜长石	方解石	白云石				
parent rock	Potassium feldspar	Plagioclase	Calcite	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				

	Table 2 Main chemical element content of the three purple parent rock/%								
此在风山Durnelserverterst	化学元素 Chemical element /%								
系巴马石 ruipie parent lock -	SiO_2	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K_2O	Na ₂ O	CaO	MgO	CaCO ₃
J_3s	57.6	12.8	5.0	0.7	2.1	0.9	5.7	1.3	14.1
J_2s	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

表 2 紫色母岩的主要化学元素含量

注: J_3s 、 J_3p 和 J_2s 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 J_3s , J_3p , and J_2s . 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,且各粒径 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 液的总体积均为 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:

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⁺、Ca²⁺、Mg²⁺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⁺、Ca²⁺、Mg²⁺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⁺、Ca²⁺、Mg²⁺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(J₃s)母岩风化产物的交换性 K⁺、 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺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⁺、Ca²⁺、Mg²⁺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⁺、Ca²⁺、Mg²⁺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⁺、Ca²⁺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 Mg²⁺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 (J₃s)的风化产物中交换 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含量 分别减小 0.00~0.13 cmol·kg⁻¹、0.22~0.58 cmol·kg⁻¹、 -0.38~1.71 cmol·kg⁻¹, -0.07~0.46 cmol·kg⁻¹、沙溪 庙组 (J₂s)的风化产物中交换 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含 量分别下降 0.00~0.07 cmol·kg⁻¹、0.06~0.60 cmol·kg⁻¹、 0.26~1.28 cmol·kg⁻¹、0.19~0.29 cmol·kg⁻¹,蓬莱镇 组 (J₃p)的风化产物中交换 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 含 量 分 别 减 小 -0.01 ~ 0.13 cmol·kg⁻¹、 0.11~ 0.51 cmol·kg⁻¹、0.48~2.05 cmol·kg⁻¹、-0.50 ~0.17 cmol·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(J₃s)、蓬莱镇组 (J₃p)及沙溪庙组(J₂s)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(J₃s)> 蓬莱镇组(J₃p)>沙溪 庙组(J₂s)。

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 (J₃s)、沙溪庙组(J₂s)和蓬莱镇组(J₃p)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 Ca²⁺、Mg²⁺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 Ca²⁺、Mg²⁺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(J₃s)、沙溪 庙组(J₂s)和蓬莱镇组(J₃p)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(J₃s)、沙溪庙组(J₅s)和蓬莱镇组(J₃p)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(J₃s)>蓬莱镇组(J₃p)>沙溪庙组 (J₂s), 且沙溪庙组(J₂s)风化产物的酸缓冲容量 分别为遂宁组(J₃s)和蓬莱镇组(J₃p)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(J₃s)、 蓬莱镇组(J₃p)和沙溪庙组(J₂s)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(J₃s)、 蓬莱镇组(J₃p)和沙溪庙组(J₂s)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、079、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:同种酸处理内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 6 风化产物的酸缓冲容量对酸性浸泡的响应特征 Fig. 6 The acid buffering capacity of weathering products' response to acid-soaked

Table 3 T	The coefficient of correlation between acid buffering capacity and contents of base exchangeable cations of weathering products								
	pH	\mathbf{K}^{+}	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg^{2+}	TEA	pHBC		
pH	1.00								
\mathbf{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		

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

注:表中 TEA 为盐基交换总量,*在 *P* < 0.05 水平下显着相关; ** 在 *P* < 0.01 水平下极显着相关。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 Ca²⁺> Mg²⁺> Na⁺> K⁺, 且 3 组风化产物交换性盐基离子含 量特征表现为 Ca²⁺和 Mg²⁺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 Ca²⁺和 Mg²⁺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 其进行交换性盐基离子的测定,研究表明酸性紫色 土的交换性 Ca²⁺和 Mg²⁺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 Ca²⁺ 和 Mg²⁺含量最高,分别为 4.25~22.80 coml·kg⁻¹ 和 1.20~5.94 coml·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 coml·kg⁻¹ 和 2.11 coml·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⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的累积释放量分别为 0.22~ 0.45 mmol·kg⁻¹、 1.55~2.34 mmol·kg⁻¹、 2.18~ 16.02 mmol·kg⁻¹和 0.60~3.59 mmol·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 Ca²⁺、 Mg²⁺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 Ca²⁺和 Mg²⁺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 Ca²⁺和 Mg²⁺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 Ca²⁺和 Mg²⁺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(J₃s)、蓬莱镇 组(J₃p)和沙溪庙组(J₅s)紫色母岩淋溶液中盐基 离子总累积淋失量分别为 5.98~26.12 mg·kg⁻¹、 5.04~25.53 mg·kg⁻¹和 3.61~21.16 mg·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

1期

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(J₃s)>蓬莱镇组(J₃p)>沙 溪庙组(J₂s),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 mmol·kg⁻¹·pH⁻¹, 而本试验中遂宁组(J₃s)和 蓬莱镇组(J₃p)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(J₂s)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(J₃s)、蓬莱镇组(J₃p)和沙 溪庙组(J₂s)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 pH>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 pH<3.5 时,可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(J₃s)和蓬莱镇组(J₃p)的碳酸盐含量远大于 沙溪庙组(J₂s)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(J₃s)、蓬莱镇组(J₃p) 和沙溪庙组(J_{-s})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,也在很多程度上抑制 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Ca²⁺和Mg²⁺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 后的研究发向提供了新的思路。

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,而且减小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 Ca²⁺>Mg²⁺>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(J₂s)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(J₃s)和蓬莱镇组(J₃p)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⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含量均呈 极显著正相关关系(P<0.01)。此外,遂宁组(J₃s) 和蓬莱镇组(J₁p)风化产物的酸缓冲容量在不同酸 处理下的表现特征为: pH5.6>CK>pH4.5>pH3.5> pH2.5。(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.
- 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 SA, Ge TD, Xiao HA, 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. [赵旋形, 王鸿斌, 赵兰坡,等. 吉林省三种典型农耕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.
- 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.]
- 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]. Joural 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 electrodialysis 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.]
- 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.
- 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的响 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 QF, 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)