

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.11.018

模拟酸雨淋溶对紫色母岩风化成土特征的影响研究

赵吉霞^{1,2}, 邓利梅^{2,3}, 陆传豪^{2,3}, 刘刚才²

1. 云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201;

2. 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: 为了分析酸化环境对典型紫色母岩的风化特征的影响规律, 本研究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, 通过室内模拟不同的酸化环境, 进行了 24 次动态淋溶试验。结果表明, 与淋溶前各径级的母岩颗粒组成相比, 淋溶液酸性越强, 3 组母岩粒径小于 5 mm 颗粒含量增幅越大, 且遂宁组和沙溪庙组母岩粒径大于 20 mm 颗粒含量减幅越大, 而蓬莱镇组大颗粒减幅随淋溶液 pH 值变化无统一的规律呈现; 3 组母岩在模拟不同 pH 值降雨淋溶处理下的颗粒直径小于 5 mm 组分含量变幅从大到小依次为遂宁组、沙溪庙组、蓬莱镇组。遂宁组母岩覆土淋溶处理的各粒径变化幅度较裸岩淋溶处理低, 但其规律基本一致, 且各粒径含量的变幅随覆盖土层厚度的增加基本呈降低趋势。模拟不同 pH 值降雨淋溶处理下的母岩风化成土速率从大到小依次为遂宁组、沙溪庙组、蓬莱镇组, 酸性越强, 母岩风化成土率越高, 且其成土率随累计淋溶量增加的幅度也越大; 经 pH 值为 2.5、3.5、4.5、5.6 和 7.0 的模拟降雨累计淋溶量达 2 年降雨量时, 遂宁组、沙溪庙组和蓬莱镇组母岩的成土率较 1 年降雨量时分别提高了 0.28~1.86 倍、0.16~1.82 倍和 0.27~1.60 倍, 3 组母岩年均成土率与 pH 值均呈极显著的($p < 0.01$)指数函数关系。与裸岩淋溶相比, 对遂宁组母岩进行覆土淋溶显著降低了母岩的风化成土速率, 覆盖土层厚度越深, 母岩风化成土率越低。

关键词: 紫色母岩; 模拟酸雨; 风化特征**中图分类号:** P512.1**文献标志码:** A**文章编号:** 1673-9868(2021)11-0151-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Simulated Acid Rain Leaching on Weathering and Soil Forming Characteristics of Purple Parent Rock

ZHAO Jixia^{1,2}, DENG Limei^{2,3}, LU Chuanhao^{2,3}, LIU Gangcai²

1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science & Water Resources Ministry, Chengdu 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to analyze the influence of acidification environment on the weathering process of typical purple parent rocks, the weathering characteristics of purple rocks of the Suining Group (J_3s), the Shaxi-

收稿日期: 2020-09-08

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2019J0164); 国家自然科学基金项目(41471232)。

作者简介: 赵吉霞, 讲师, 博士, 主要从事土壤侵蚀和水土保持方面的研究工作。

miao Group (J_2s), and the Penglaizhen Group (J_3p) under different simulated acidizing environments in the laboratory was investigated, and 24 times of dynamic leaching experiment tests were carried out for these purple rock samples. The results showed that compared with the particle composition of the parent rock of each diameter grade before leaching, the more acidic the leaching solution was, the higher the increase ranges of the percentage of particle with a diameter of <5 mm for all the three groups, and the higher the reduction ranges of the percentage of particle with a diameter of ≥ 20 mm for J_3s and J_2s were, while there was no uniform rule for the reduction of large particles in group J_3p with the pH change of the leaching solution. The change range of particle content with a diameter of <5 mm in the three groups of parent rocks after simulated rainfall treatment with different pH values was $J_3s > J_2s > J_3p$. Under the different depths of covering soil, the variation in particle sizes of J_3s showed the same rule with the bare rock, and the change range of each particle size decreased with the increase of the depth of covering soil. The soil formation proportion of parent rocks after simulated rainfall treatment with different pH values were $J_3s > J_2s > J_3p$. The stronger the acidity was, the higher the soil formation proportion of parent rock was, and the larger the increasing range of soil formation proportion was with the increase of cumulative leached amount. Compared with the amount of simulated rainfall with different pH values to 1a, the soil forming proportion of purple rocks of Groups J_3s , J_2s and J_3p increased by 0.28—1.86, 0.16—1.82 and 0.27—1.60 times, respectively, when the amount of simulated rainfall to 2a. The annual soil forming rate of the three groups was in a highly significant exponential functional relationship with pH ($p < 0.01$). Under the different depth of covering soil, the soil formation proportion of J_3s decreased with the increase of covering soil depth.

Key words: purple parent rock; simulated acid rainfall; weathering characteristic

环境酸化是人类面临的全球性环境问题之一^[1-3],它不仅直接对人类的生产生活产生复杂影响,而且也成为生态环境变化的重要驱动因素,是全球环境变化的一个重要方面.因此,有关环境酸化的研究是我国中长期科技规划中的一个重要研究内容.在全球环境酸化背景下,不同生态系统及其不同要素、不同区域等,对酸化应具有不同的响应特征和响应机制,即有差异性的响应^[3-5].也就是说,要全面认识环境酸化下的各种响应规律,必须针对不同生态系统及其演化过程,包括对地球表面重要的地质过程——岩石风化过程等开展相关的研究.

岩石风化是地球表面演化的一个重要的地质过程,不仅为初级生产者提供食物生产的营养物质^[6],而且也是海洋生态系统所需的 Si, Ca 等重要元素的主要来源^[7].无论在何种地质环境条件下,岩石的风化过程主要包括岩体的物理崩解和化学风化过程.物理崩解即在物理作用下导致岩体和矿物颗粒的尺寸发生改变但对其矿物性质不产生影响,而化学风化则是通过一系列的化学作用使矿物成分特征发生改变.通常而言,大多数的风化过程均包括了物理风化和化学风化作用,在接近地表处主要以物理过程为主,这些过程将导致岩石风化产物的原位积累,这不仅可以极大地改变未固结矿床的物理性质^[8],而且强烈影响着地貌构造的演化过程^[9].显然,地形演化很大程度上取决于风化过程.而化学风化过程则可延伸达地表以下数百米的范围,岩石化学风化作用使岩土矿物中的盐基离子释放,并与溶液中的 H^+ 发生交换反应,使土壤溶液中的 H^+ 浓度降低,从而对土壤酸化起缓冲作用.因此,化学风化速率是决定生态系统酸负荷研究的一个关键参数^[10],而区域的气候条件是决定哪种风化过程占主导作用的主要条件^[11].从岩石风化形成土壤的过程大约需要 120~3 000 年的漫长时间,因此,想要探究岩石(母质)的成土过程以及所成土壤间的物质交换非常困难.

由于缺乏对岩石、矿物特性及其所处环境的全面认识,加之研究手段的限制,我们对岩石风化过程的研究很大程度上受到了限制.然而,并非所有岩石的风化过程都极为缓慢,对于紫色母岩,由于其本身的

特殊性,导致其具有较快的风化速率。自其暴露于地面开始,仅需 10 年即可风化成土。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,在冷热和干湿交替的环境变化条件下,呈现极强的物理风化能力。物理风化作为紫色母岩风化的主要方面,其风化速度和堆积体的稳定性主要受气候因素影响,地形因素的影响次之^[12]。开垦、耕作等人为活动对母岩的物理风化速率和土壤的熟化速率亦具有促进作用^[13]。然而岩石的风化是一个复杂的过程,并不是某一过程单一进行的结果。以往对紫色母岩风化过程的研究主要是从物理风化角度考虑,研究紫色母岩在水热条件下的崩解成土过程^[13-14]。而紫色土主要分布的南方地区具有典型的亚热带季风气候特点,也是酸敏感区域,近年来受强烈的工农业活动的影响,酸沉降严重^[15]。基于该地区当前酸沉降的环境条件的下岩石风化特征如何?还尚未清楚。Puckett 等^[16]研究也发现,酸的人为加入对岩层和土壤的风化剥蚀具有促进作用,提高了化学风化的反应速度。邓涛等^[17]通过研究不同 pH 值环境下黏土类岩崩解过程发现,酸性条件对黏土类岩的崩解起到促进作用,其崩解能力随溶液酸性的增强而增加。

紫色土是一种发育程度较低的土壤类型,但由于其继承了母岩高肥力属性,土壤生产能力较高,加上其风化速度较快且侵蚀能力较强,因而被视为一种特殊的土类^[18]。其主要分布于我国南方,特别是在长江上游,其面积占长江上游幅员面积的 18%,占全国土壤总面积的 2.3%,集中分布在四川盆地,该地区紫色土分布数量占该区面积的 42.95%^[18],且这些区域的酸化趋势更明显^[15, 19]。因此,研究紫色母岩在环境酸化条件下的风化作用,揭示紫色母岩风化成土过程的作用机制,不仅对于我们认识土壤生态系统酸沉降敏感性具有重要的意义,而且可以为精准确定紫色土的容许土壤流失量等提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

紫色土主要分布于四川盆地丘陵区(属于亚热带湿润气候区)^[12]。为了在研究期内有明显的结果,本研究采用的试验母岩为易风化的紫色泥(页)岩。因此,分别在四川安岳县工业园区(N30°6'35", E105°23'43")(蓬莱镇组)、资中县工业园区(N29°44'52", E104°51'20")(沙溪庙组)、遂宁市河沙镇砖厂(N30°35'16", E105°41'25")(遂宁组),现场挖掘 3 种新出露的紫色土母岩(泥岩),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要一致。然后运至盐亭紫色土农业生态试验站(N 31°16', E 105°27'),于阴凉处放至完全风干。

1.2 样品制备

事先取上述在野外采集到的整块蓬莱镇组、沙溪庙组和遂宁组 3 种紫色母岩,切割成粒径为 5 mm~60 mm 的岩块用于淋溶试验。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,并对母岩基本特性指标进行测定。

自然环境中酸对岩石的作用是一个较为漫长的过程,为了在较短时间尺度内模拟酸化环境对紫色母岩风化崩解的影响,基于四川省 2006—2013 年酸雨观测站观测资料统计分析,四川降雨 pH 的平均值为 4.74^[20],其中强酸性酸雨($\text{pH} \leq 4.0$)出现频率占 17%,局部地区降雨 pH 值可达 3.0~3.5^[21-22],同时按照四川省近年来降水平均组分中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的离子浓度,采用摩尔浓度比为 4:1 的分析纯 H_2SO_4 和 HNO_3 配置模拟酸雨溶液的母液,再将酸雨母液加入去离子水,将其配制成 pH 值为 2.5, 3.5, 4.5, 5.6 的酸溶液。

试验处理有:溶液 pH 值分别为 2.5, 3.5, 4.5 和 5.6,以及对照(去离子水),各处理重复 3 次。

1.3 试验方法

该室内模拟试验于 2016 年 5 月至 2017 年 11 月在中科院成都山地所盐亭紫色土农业生态试验站进行。母岩淋溶试验包括两个部分,一个为裸岩淋溶试验,一个为土层覆盖淋溶试验。

1.3.1 裸岩淋溶试验方案

土柱制备。选取粒径均匀(5~60 mm)的母岩岩样装入直径约 16 cm,高 20 cm 的圆形 PVC 管。底部封

闭并留一孔,以便收集渗漏液.装管前,在柱底部铺两层尼龙筛网和一层石棉,再铺两层筛网,然后装岩样.母岩前期处理已将其分成不同粒径样品: $>60\text{ mm}$, $40\sim 60\text{ mm}$, $20\sim 40\text{ mm}$, $10\sim 20\text{ mm}$, $5\sim 10\text{ mm}$,将各粒组的岩块等质量,大粒径岩块在下、小粒径岩块在上进行淋溶柱的填充,各母岩分别装 30 个淋溶柱.总共需: $5(\text{酸处理})\times 3(\text{母岩})\times 6(\text{重复})=90$ 个淋溶柱.

淋溶方法.用已配置的模拟酸雨作为淋溶液,根据紫色土丘陵区多年均降雨量约为 863 mm ,采用间歇淋溶法使其接近自然降水,每次淋溶量按月平均降雨量对应的模拟酸雨量淋洗,淋洗强度与中等降雨强度相当,每月淋滤 2 次,以保证酸淋溶液对岩石的充分作用,共淋滤 24 次至淋溶总量达 2 年降雨量.每次淋洗时分别用 pH 值为 2.5,3.5,4.5,5.6 的模拟酸雨和去离子水开始淋溶,每次加入淋溶液后,用收集瓶接收滤液至淋溶结束、柱底无淋滤液渗出,每次淋溶结束时用保鲜膜覆盖柱顶,防止水分蒸发.

1.3.2 土层覆盖淋溶试验方案

土层覆盖淋溶试验仅对遂宁组紫色母岩进行 pH 值为 3.5 的模拟酸雨和去离子水淋溶.此试验的步骤和方法,与“淋溶无土层覆盖样品”的基本一致,不同之处在于事先在试验样品上分别覆盖紫色土 10 cm , 20 cm , 40 cm 土壤,由于紫色土的土层厚度一般较薄,故本研究主要考虑这 3 个土层厚度的处理.需要说明的是,室内土柱的重建需根据各覆土层土壤容重、覆盖深度、淋溶柱直径计算出各土层所需土量,以确保各土层厚度覆盖处理的容重一致.总共需: $1(\text{岩石类型})\times 3(\text{土层深度})\times 2(\text{一个酸度处理+去离子水对照})\times 6(\text{重复})=36$ 个土柱.其测定指标和方法与无土层覆盖的淋溶试验一致.

以上 2 组试验处理均进行了 24 次淋溶试验,累计淋溶量与模拟 2 年的降雨量相当.在淋溶过程中当淋溶总量达 1 年模拟降雨总量时,将每组母岩各酸处理条件下取 3 个重复处理淋溶柱中岩石样品,自然风干后分别用 60 mm , 20 mm , 10 mm , 5 mm , 2 mm , 1 mm , 0.25 mm 等不同规格的标准筛对岩块及崩解的碎屑物进行筛分试验,记录颗粒级别.同时将各组处理下的剩余 3 个重复处理的淋溶柱中岩石样品继续进行淋溶至累计淋溶量达模拟 2 年的降雨量,淋溶结束后以相同规格的标准筛进行筛分处理.筛分处理后将 $<2\text{ mm}$ 颗粒的崩解物进行收集以对风化产物的相关指标进行测定.

1.4 黏土矿物及化学成分的测定

采用 X 射线衍射仪器进行矿物组成及黏土矿物含量的测定^[23]; K_2O , Na_2O , CaO , MgO 和 CaCO_3 均用原子吸收分光光度法; P_2O_5 用磷钼蓝光度法; SiO_2 用聚环氧乙烷重量法; Al_2O_3 用氟化物取代络合滴定法; Fe_2O_3 重铬酸钾容量法; TiO_2 过氧化氢光度法.用油浴加热- $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法测定土壤有机质比例^[24].测定结果见表 1 和表 2.

表 1 3 种紫色泥岩的全岩矿物比例

母岩	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石
遂宁组 J ₃ s	9.1	30.2	0.0	8.7	33.2	1.0	7.2	10.3	0.3
沙溪庙组 J ₂ s	13.2	21.0	6.1	6.8	40.8	2.2	9.7	0.1	0.1
蓬莱镇组 J ₃ p	5.2	23.1	0.0	10.7	38.1	0.9	8.2	11.8	2.0

表 2 3 种紫色泥岩的主要化学元素占比

母岩	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	CaCO ₃
遂宁组 J ₃ s	57.6	12.8	4.9	0.7	2.1	0.9	5.7	1.3	14.1
沙溪庙组 J ₂ s	61.5	16.2	6.6	0.8	2.6	1.3	0.9	2.0	2.2
蓬莱镇组 J ₃ p	58.3	13.0	4.7	0.6	2.4	0.9	5.0	1.3	14.7

2 研究结果

2.1 模拟酸雨淋溶对母岩颗粒级配变化的影响

2.1.1 裸岩淋溶颗粒级配变

环境酸化对紫色土母岩风化成土的影响,也就是酸性环境对母岩的化学作用过程,这种作用主要通过

酸溶液而进行, 而酸雨淋溶作用是出露在地表的裸露母岩最直接的酸作用形式. 因此, 基于研究区酸沉降背景, 在自然条件下, 通过模拟降雨 pH 值为 2.5, 3.5, 4.5, 5.6 的酸溶液和去离子水(7.0)分别对 3 组紫色母岩进行淋溶, 分析其淋溶前后的颗粒级配变化. 各淋溶柱中母岩初始组成的各粒径(>60 mm, $40\sim 60$ mm, $20\sim 40$ mm, $10\sim 20$ mm, $5\sim 10$ mm)质量百分比一致, 均为 20%. 通过对 3 组母岩经不同 pH 值的模拟降雨淋溶后的颗粒分析表明, 淋溶次数的增加导致母岩样品颗粒级配不断变化. 由颗粒级配变化率随淋溶时间的变化关系图(图 1 和图 2)可知, 不同 pH 值溶液下, 颗粒级配的变化率随模拟降雨淋溶量的变化规律基本相似.

累计淋溶量达 1 年降雨量时, 遂宁组 and 沙溪庙组母岩在任意一种 pH 值溶液淋溶处理下的颗粒级配的变化规律基本相似, 粒径大于 20 mm 的组分比例较淋溶前减少显著, 而粒径为小于 20 mm 的组分比例较淋溶前则呈上升趋势, 且粒径越小, 增幅越小. 相较于其余两组母岩颗粒级配的变化规律, 蓬莱镇组母岩则略有不同, 粒径大于 40 mm 的组分比例较淋溶前呈降低趋势, 且粒径大于 60 mm 的组分减少幅度基本随淋溶液 pH 值增大而减少; 而粒径小于 40 mm 的组分比例较淋溶前则呈上升趋势, 且其各颗粒组成比例较淋溶前的变化幅度均明显小于遂宁组和沙溪庙组母岩的变化幅度. 说明蓬莱镇组母岩的崩解程度相对较弱. 不同 pH 值降雨淋溶处理下原始淋溶柱中的颗粒组成均大于 5 mm, 淋溶量达 1 年降雨量时, 3 组母岩小于 5 mm 的颗粒组成均有不同程度的增加, 且均表现为淋溶液酸度越大, 小于 5 mm 的颗粒组分含量增幅越大(图 1).

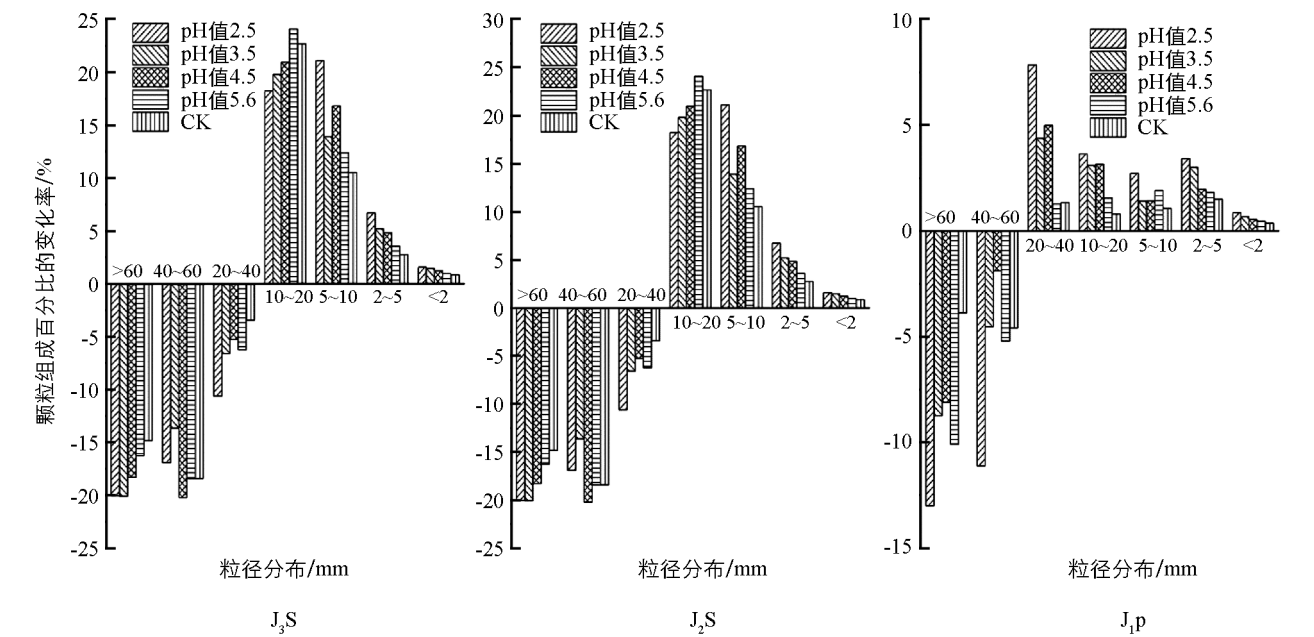


图 1 累计淋溶达 1 年降雨量后各粒径颗粒组成比例的变化率

当累计淋溶量达 2 年降雨量时, 遂宁组与沙溪庙组颗粒各径级比例较淋溶前的颗粒径级比例的变化与淋溶量达 1 年降雨量时的变化规律一致, 但此时不同 pH 值降雨淋溶处理下的两组母岩中颗粒直径大于 40 mm 的组分含量较淋溶前的减幅已达或接近 20%, 说明颗粒直径大于 40 mm 的组分已基本完全崩解. 而蓬莱镇各径级的颗粒比例相较于淋溶前的变幅均明显小于遂宁组和沙溪庙组母岩, 说明其崩解程度相对较弱. 相较于模拟 1 年的降雨量时的颗粒变化, 模拟 2 年的降雨量显著增加了 3 组母岩中颗粒直径小于 5 mm 组分比例的增幅, 且均表现为淋溶液 pH 值越小, 其相较于淋溶前的增幅越大. 遂宁组、沙溪庙组和蓬莱镇组母岩中颗粒直径为 $2\sim 5$ mm 的组分比例较淋溶处理前母岩分别增加了 11.05%~16.25%, 5.45%~10.44% 和 2.81%~4.51%, 而 <2 mm 组分的变幅则分别为 3.51%~5.22%, 1.52%~2.77% 和 0.89%~1.42%. 3 组母岩在不同 pH 值降雨淋溶处理下的颗粒直径小于 5 mm 组分比例变幅从大到小依次均为遂宁组、沙溪庙组、蓬莱镇组(图 2).

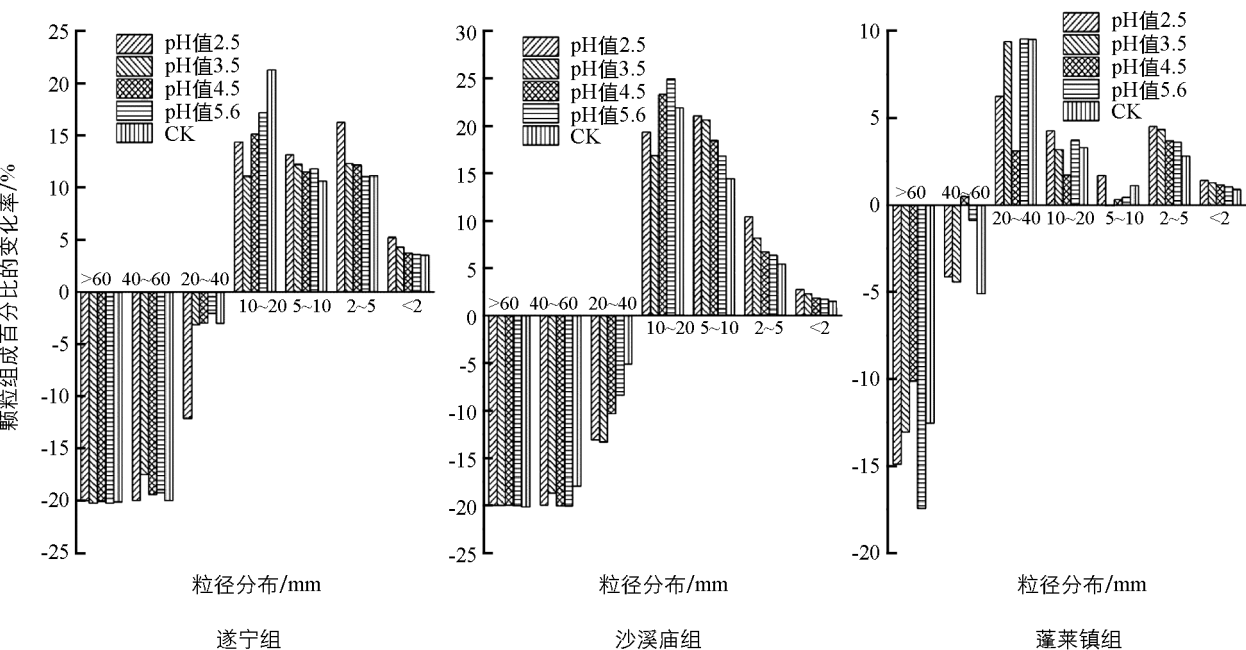


图 2 累计淋溶达 2 年降雨量后各粒径颗粒组成比例的变化率

2.1.2 覆土淋溶颗粒级配变

自然环境中的母岩除了直接出露地表外，大多是土壤覆盖其上的，由于紫色土的土层厚度一般较薄，根据紫色土母岩覆盖土层厚度的一般特征，本研究设计淋溶母岩在淋溶柱中的覆盖土层厚度分别为 10 cm, 20 cm 和 40 cm. 由于考虑到本试验研究重点是不同深度的土层覆盖对紫色母岩风化的影响，为了控制试验样品总数，确保试验的可行性和可操作性，本试验选择崩解程度相对较易的遂宁组母岩为研究对象，模拟酸度的设计仅进行 pH 值为 3.5 的酸溶液与去离子水对照模拟进行淋溶.

试验结果表明，覆土处理下的遂宁组母岩在 pH 值为 3.5 的酸溶液和去离子水模拟降雨淋溶后的母岩颗粒组成的变化规律与相同处理下的裸岩淋溶颗粒组成的变化规律基本一致，但其在不同淋溶阶段各粒径颗粒的变化均明显小于裸岩淋溶处理下对应粒径颗粒的变化率. 在相同 pH 值的模拟降雨条件下，沙溪庙组母岩颗粒组成中粒径大于 40 mm 的组分的减少幅度和粒径小于 20 mm 组分的增加幅度随覆盖土层厚度的增加基本呈降低趋势(图 3).

2.2 模拟酸雨淋溶对母岩成土特征的影响

由于紫色土是一种特殊的母质性土壤(不同于其他大多数土壤)，即紫色土母质(紫色母岩风化物)与紫色土的物质组成等特性比较接近，而且母质的有机质和养分含量丰富，母岩一旦风化成碎屑(母质)就具有肥力特性(其上就能生长植物)即土壤的本质特性(具有养分和水分的储藏和供给能力)^[25]，故通常将<2 mm 的紫色土母质称之为紫色土^[26]. 因此，母岩成土率即为淋溶处理后风化产物中<2 mm 的颗粒占淋溶处理前母岩总质量的百分比.

2.2.1 母岩成土特征

试验结果表明，模拟降雨淋溶液的 pH 值对紫色母岩风化速率影响较大，基本呈现酸性越高，淋溶裸岩的成土速率越高. 与对照淋溶处理相比，经 pH 值为 2.5, 3.5, 4.5 和 5.6 的模拟降雨累计淋溶达 2 年降雨量后，遂宁组母岩成土率分别提高了 1.86, 0.53, 0.33 和 0.28 倍；沙溪庙组母岩成土率分别提高了 1.82, 0.49, 0.22 和 0.16 倍；蓬莱镇组母岩成土率分别提高了 1.60, 0.61, 0.43 和 0.27 倍. 说明随着淋溶量的累积，酸性越强，母岩成土速率的增幅越大，尤其以 pH 值<3.5 的模拟酸雨淋溶处理下的母岩成土率增加显著. 且模拟降雨淋溶作用下的母岩风化成土速率是降雨量和降雨酸度共同作用的结果，模拟降雨量达 1 年时遂宁组、沙溪庙组和蓬莱组母岩的平均成土率分别为 2.19%，1.11%和 0.56%(图 4a)，当模拟降雨量达 2 年时，各组母岩平均成土率均有明显的提高，分别为 3.93%、2.04%和 1.15%(图 4b). 模拟不

同 pH 值降雨淋溶处理下的 3 种紫色母岩的风化成土率基本一致, 从大到小均为 J_3s , J_2s , J_3p . 同一酸度条件下的 3 组母岩成土率差异有统计学意义 ($p < 0.05$), 这主要是由于试验研究的 3 组紫色母岩样品采样点的不同而导致紫色母岩产状的差异, 进而影响母岩颜色、矿物组成、节理发育及致密程度等特征, 最终导致风化程度的差异.

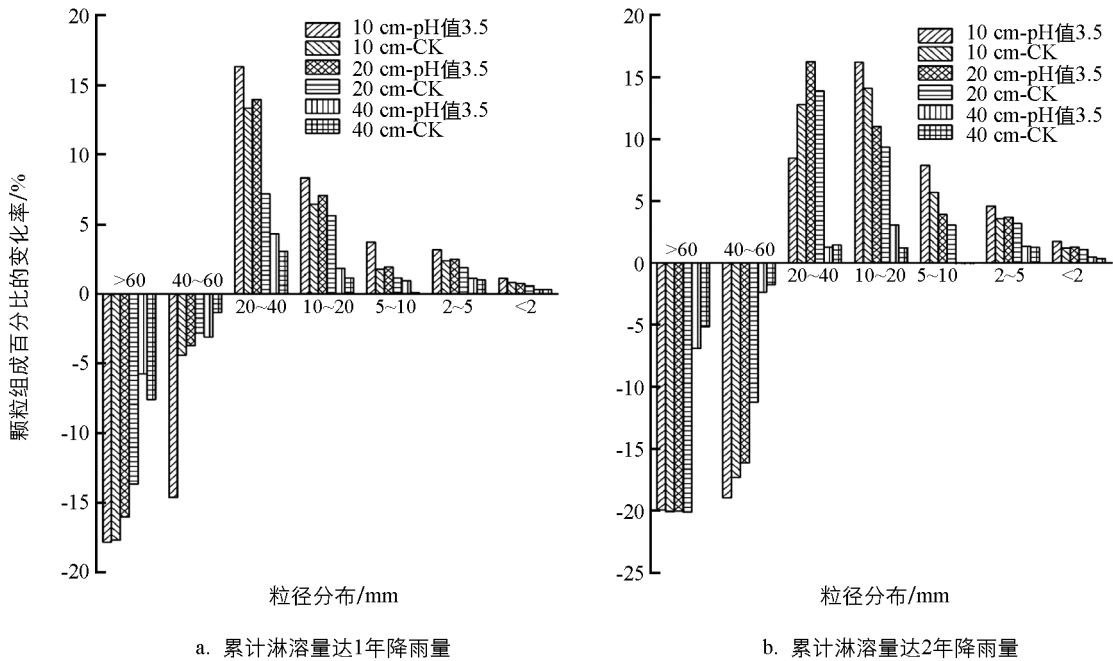
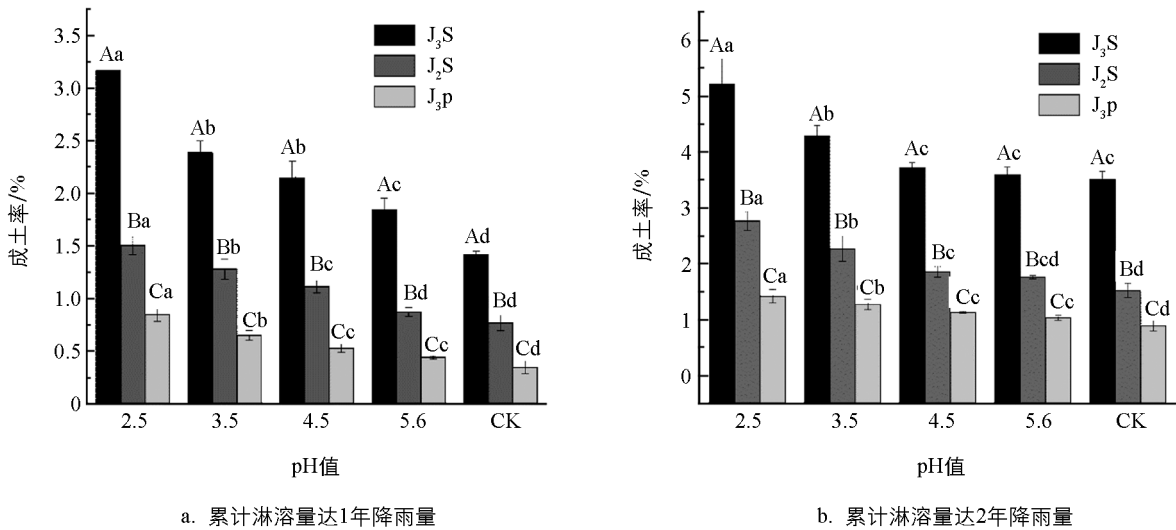


图 3 覆土淋溶后遂宁组母岩各粒径颗粒组成比例的变化率

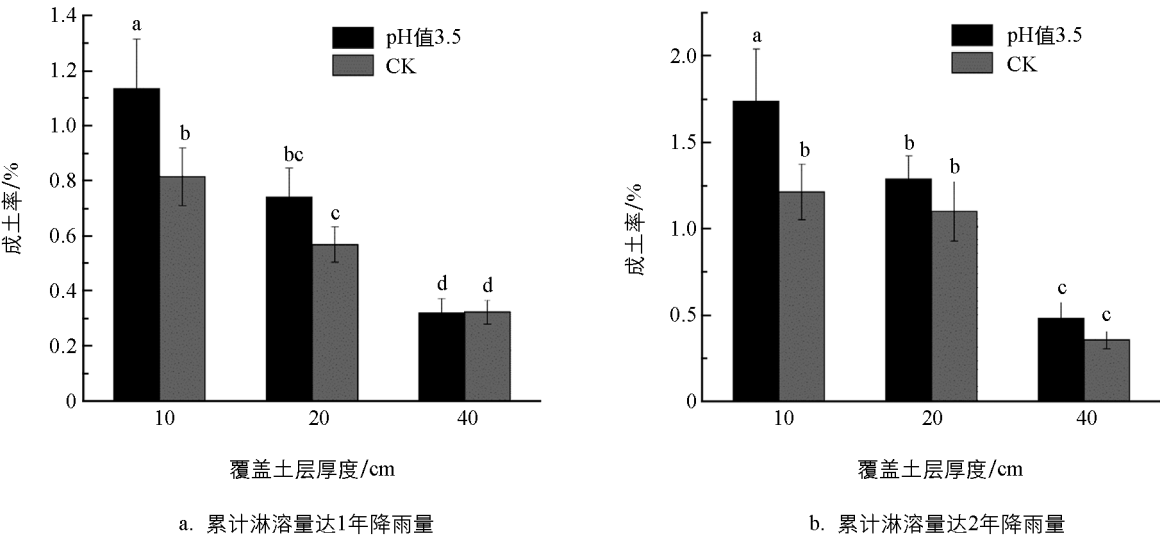


同种酸处理内不同大写字母 ($p < 0.01$) 和同组母岩中的不同小写字母 ($p < 0.05$) 分别均表示差异有统计学意义.

图 4 裸岩淋溶处理下母岩的成土率

与裸岩淋溶相比, 不同土层覆盖下的模拟酸雨淋溶均明显降低了岩石的风化成土率, 模拟不同酸度值降雨淋溶下的母岩成土率随覆土层厚度变化一致, 覆土层厚度越深, 母岩风化成土速率越低, 通过差异性分析发现, 在相同的酸度处理下, 各土层覆盖下的母岩成土速差异有统计学意义 ($p < 0.05$). 与裸岩淋溶变化一致, 除 40 cm 土层覆盖下的母岩在模拟 1 年降雨量条件下成土速率表现为去离子水淋溶略高于 pH 值为 3.5 酸溶液淋溶外, 其余均表现为模拟降雨的淋溶液酸性越大, 各土层覆盖下的母岩成土速越高, 但仅覆土厚度为 10 cm 时, 不同 pH 值淋溶下的母岩成土率差异有统计学意义 ($p < 0.05$). 与去离子水模拟

降雨淋溶相比, pH 值为 3.5 的模拟酸雨累积 1 年和 2 年淋溶处理下的母岩成土率平均增幅仅为 28.58% 和 31.52%, 其增幅明显小于同等环境下裸岩淋溶处理下的母岩成土率的增幅(68.78% 和 52.60%)(图 5).



同种酸处理内和同组母岩中的不同小写字母均表示差异有统计学意义($p<0.05$).

图 5 土层覆盖淋溶处理下沙溪庙组母岩的成土率

2.2.2 母岩年均成土率与淋溶液 pH 值间的相关关系

该模拟降雨淋溶时段内的累计降雨量与 2 年降雨量相当, 因此, 取其年均(1 年降雨量)成土率作为母岩风化成土速率的衡量指标. 就 3 组母岩年均成土率随淋溶液 pH 值的变化来看, 年均成土率均随 pH 值增大呈指数降低, 且以遂宁组和沙溪庙组的降幅较大. 在 pH 值 <4.5 时, 随着淋溶液 pH 值降低, 年均成土率有较大的增幅, 但当淋溶液 pH 值 ≥ 4.5 时, 这种增幅有减小的趋势. 蓬莱镇组年均成土率随淋溶液 pH 值变化的变幅相对较小且变化较为平缓, 说明蓬莱镇组母岩年均成土率对 pH 的敏感性比较小(图 6).

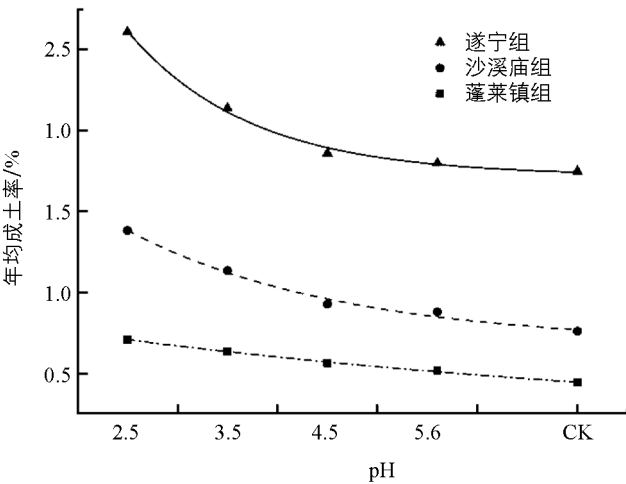


图 6 母岩年均成土率与淋溶液 pH 值的相关关系

为了定量分析淋溶液 pH 值和紫色母岩年均成土率的相互关系, 对不同 pH 值处理下的母岩年均成土率进行回归分析. 结果表明, 3 组母岩年均成土率与 pH 值呈较好的指数函数关系, 相关系数 R^2 都在 0.98 以上, 呈极显著相关($p<0.01$), 说明该回归方程能够较好的定量表达不同 pH 值降雨淋溶处理下的 3 组母岩年均成土率(表 3).

表 3 年均成土率在不同 pH 下的回归分析

母岩类型	回归方程	相关系数 R^2	p
遂宁组	$Y=6.89e^{(-X/1.22)}+1.72$	0.992	<0.001
沙溪庙组	$Y=2.25e^{(-X/2.13)}+0.69$	0.982	0.001
蓬莱镇组	$Y=0.78e^{(-X/6.87)}+0.16$	0.995	<0.001

注: 表中 Y 代表年均成土率, X 为淋溶液 pH 值.

3 讨 论

本研究通过对 3 种紫色母岩的模拟酸雨淋溶试验发现,随着淋溶时间的增加,紫色母岩中小粒径级颗粒比例增加,且 3 组母岩均表现为,淋溶液 pH 值越小,直径小于 5 mm 的颗粒组分比例较淋溶前增幅越大,这与模拟酸雨淋溶处理下,紫色母岩的成土速率变化规律一致.模拟降雨淋溶液的 pH 值对紫色母岩风化速率影响较大,基本呈现酸性越高,淋溶裸岩的成土速率越高.说明淋溶液酸度越高,其对紫色母岩风化成土的促进作用越明显.这主要是由于紫色母岩的结构属性及其含有较多黏土矿物等特征,导致其在 NO_3^- - SO_4^{2-} 为主的模拟酸雨作用下,岩石表面矿物将与淋溶液中离子发生一系列物理化学反应,生成可溶性盐类溶于水,不仅改变岩石细观结构,而且能使岩石颗粒或晶格间的连接减弱,使晶体孔道疏通,促进水分子与黏土矿物的接触,岩石发生风化崩解^[26-29].酸浸泡试验结果已经表明,黏土矿物对强酸(pH 值 < 3.5)溶液敏感性较强,淋溶液酸性越大,岩石矿物与酸溶液中 H^+ 离子的置换速度越快,置换量越大,晶体骨架崩塌速度和风化成土速率也就越快^[30].

3 组紫色母岩矿物组成的差异是引起 3 组紫色母岩在酸溶液中的风化成土速率存在差异的重要原因.构成紫色母岩最主要黏土矿物的蒙脱石和伊利石具有独特的叠层状矿物结构,亲水性强,遇水膨胀、失水收缩特征明显.遂宁组和沙溪庙组黏土矿物比例相当,分别占矿物总量的 48% 和 47%,明显高于蓬莱镇组黏土矿物含量(39%),且具有明显亲水能力的蒙脱石和伊利石比例也以遂宁组比例最高,达 39%;沙溪庙组次之,为 34%;蓬莱镇组含量最小,仅为 28%.由于蓬莱镇组母岩黏土矿物比例明显低于遂宁组和沙溪庙组,导致其在同等酸性条件下的风化能力相对较弱.

母岩上部土层覆盖厚度对成土速率影响显著.以往的研究表明^[31],土层覆盖下的紫色砂岩年均机械风化厚度不足 0.5 cm,而无土层覆盖下的年均机械风化厚度可达 0.5~1.0 cm,紫色泥岩在有无土层覆盖下的年均风化厚度分别为 0.5~3.0 cm 和 3~10 cm.刘刚才^[18]通过对遂宁组、沙溪庙组和蓬莱镇组母岩分别覆盖 10 cm, 20 cm, 40 cm 和 60 cm 厚度土层下的成土速率研究发现,随着覆盖土层厚度的增加,母岩成土速率逐渐减少,主要是由于随着土层厚度的增加,母岩表面的水热变化越弱,从而导致母岩机械风化速率的降低.

方差分析结果表明,覆土层厚度和淋溶液 pH 值均对遂宁组母岩年均成土率有极显著影响($p < 0.001$),而土层厚度和淋溶液 pH 值的交互作用对遂宁组母岩的年均成土率没有显著影响($p = 0.129$),说明覆土层厚度对母岩风化速率的影响不因 pH 值而改变.酸溶液对母岩风化的影响不仅在于水-岩作用下的物理崩解,同时由于酸的化学侵蚀作用使母岩样品中的蒙脱石、伊利石等矿物溶解、分解、胶结物含量降低,破坏岩体完整性,进而促进岩石的风化崩解.裸岩淋溶处理的酸溶液直接作用于岩石表面,因此,处于酸溶液接触面的岩石表面矿物会与酸溶液发生一系列理化反应^[32],改变母岩的微细观结构,破坏岩石颗粒和晶格间的连接,引起岩石力学性能劣化发生崩解.而覆土母岩进行淋溶时,酸溶液首先作用于覆盖土壤层,随后土壤淋滤液才与母岩接触产生作用.土壤作为酸沉降的接收系统,外源酸性物质的输入,导致土壤系统承载 H^+ 的载荷增加,会引起土壤酸化.但同时,土壤及其母质由于化学风化释放盐基离子,并消耗 H^+ ,从而缓冲土壤酸化.研究表明^[33-29],由于土壤对外源质子的缓冲能力,模拟不同酸度的降雨淋溶后的淋滤液 pH 值均有一定程度的提高.土壤的酸缓冲能力主要取决于土壤 pH 值、盐基饱和度及无机离子含量等.紫色土属于典型的岩性土,土壤肥力继承母岩特性,具有高肥力特性.由于其化学成分具有较强的化学稳定性,同时由于母质盐基物质的不断补充,导致紫色土对外源质子具有较强的缓冲能力^[34].因此,模拟酸雨淋溶液经覆盖土层后再作用于母岩时,导致作用于母岩溶液的酸度较初始淋溶液有所降低,且淋滤液中的离子强度和离子浓度也有所增加,在很大程度上阻碍了淋滤液作用于母岩时与母岩表面矿物反应的进行^[35],最终导致在相同的模拟酸淋溶条件下,淋溶裸岩的风化速率明显高于覆土处理下的母岩风化速率.除覆土厚度为 10 cm 外,其余厚度土层覆盖下的紫色母岩经不同 pH 值降雨淋溶后的母岩年均成土率差异无统计学意义($p > 0.05$),说明随着覆土层厚度的增加,淋溶液 pH 值对母岩风化成土率的影响

作用减弱;但随着覆土层厚度的增加,母岩接收到的淋溶液体积减少,母岩年均成土率越低.因此,在土层覆盖影响下的母岩年均风化率的差异主要是由物理风化作用的影响为主,而化学侵蚀作用的影响随覆土层厚度增加而减弱.

4 结 论

基于研究区酸沉降背景,以遂宁组、沙溪庙组和蓬莱镇组紫色泥岩为研究材料,采用模拟自然降雨进行淋溶试验,分析模拟酸雨淋溶对紫色母岩风化的影响,结果表明:

(1) 与淋溶前各径级的母岩颗粒组成相比,淋溶液酸性越强,3 组母岩粒径小于 5 mm 颗粒比例增幅越大,且遂宁组和沙溪庙组母岩粒径大于 20 mm 颗粒比例减幅越大,而蓬莱镇组大颗粒减幅随淋溶液 pH 值变化无统一的规律呈现;3 组母岩在不同 pH 值降雨淋溶处理下的颗粒直径小于 5 mm 组分比例变幅从大到小依次均为遂宁组、沙溪庙组、蓬莱镇组.遂宁组母岩覆土淋溶处理的各粒径变化幅度较裸岩淋溶处理低,但其规律基本一致,且各粒组比例的变幅随覆盖土层厚度的增加基本呈降低趋势.

(2) 模拟不同 pH 值降雨淋溶处理下的母岩风化成土速率因岩石的产状及矿物组成等差异而有所不同,淋溶裸岩和覆土淋溶处理下的母岩成土率从大到小依次均为遂宁组、沙溪庙组、蓬莱镇组,且淋溶液酸性越强,母岩的风化成土速率越高,3 组母岩年均成土率与 pH 值均呈显著的指数函数关系($p < 0.05$).

(3) 通过对比累计淋溶 1 年降雨量和 2 年降雨量下母岩的成土率差异发现,在裸岩淋溶处理下的母岩成土率随累计淋溶量增加而增加的幅度因淋溶液 pH 值的差异而有所不同,酸性越强,母岩成土速率增幅越大.经 pH 值为 2.5, 3.5, 4.5, 5.6 和 7.0 的模拟降雨累计淋溶量达 2 年降雨量时,遂宁组、沙溪庙组和蓬莱镇组母岩的成土速较 1 年降雨量时分别提高了 0.28~1.86 倍、0.16~1.82 倍和 0.27~1.60 倍.

(4) 分别以 pH 值为 3.5 的酸溶液和去离子水对遂宁组母岩覆盖 10 cm, 20 cm 和 40 cm 的紫色土后进行模拟降雨淋溶发现,与裸岩淋溶相比,不同土层覆盖下的模拟不同 pH 值降雨淋溶均明显降低了岩石的风化成土速率,且覆盖土层厚度越深,母岩风化成土速越低;各土层覆盖下的母岩风化成土速率差异有统计学意义($p < 0.05$),且随着覆土层深度的增加,覆土层对酸溶液的缓冲能力增加,酸作用对母岩的影响减弱,导致成土速率因淋溶液 pH 值的差异性随土层深度的增加而降低.

参考文献:

- [1] 朱建林. 大气酸沉降复杂性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [2] KAREN C R, JANET S H. Acidification of Earth: An assessment across mechanisms and scales [J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27: 1-14.
- [3] TIAN D, NIU S. A Global Analysis of Soil Acidification Caused by Nitrogen Addition [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 19-24.
- [4] SULLIVAN T J, LAWRENCE G B, BAILEY S W, et al. Effects of Acidic Deposition and Soil Acidification on Sugar Maple Trees in the Adirondack Mountains, New York [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(22): 12687-12694.
- [5] TAKAHASHI J, HIGASHI T. Long-Term Changes in Sulfate Concentrations and Soil Acidification of Forested Umbrisols and Andosols of Japan [J]. *Soil Science*, 2013, 178(2): 69-78.
- [6] HUH Y. Chemical Weathering and Climate—A Global Experiment: a Review [J]. *Geosciences Journal*, 2003, 7(3): 277-288.
- [7] ANDREANI M, LUQUOT L, GOUZE P, et al. Experimental Study of Carbon Sequestration Reactions Controlled by the Percolation of CO₂-Rich Brine through Peridotites [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(4): 1226-1231.
- [8] BIRKELAND P W. *Soil and Geomorphology* [M]. Oxford Univ Press, New York, 1999.
- [9] EPPES M C, MCFADDEN L D, MATTI J, et al. Influence of Soil Development on the Geomorphic Evolution of Landscapes: an Example from the Transverse Ranges of California [J]. *Geology*, 2002, 30(3): 195-198.

[10] BAIN D J, ROE M J, DUTHIE D M L, et al. The Influence of Mineralogy on Weathering Rates and Processes in an Acid-Sensitive Granitic Catchment [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 931-937.

[11] SUMNER P D, HALL K J, VAN ROOY J L, et al. Rock Weathering on the Eastern Mountains of Southern Africa: Review and Insights from Case Studies [J]. *Journal of African Earth Science*, 2009, 55, 236-244.

[12] 何毓蓉. 中国紫色土-下篇 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[13] WEI C F, NI J P, GAO M. Anthropogenic Pedogenesis of Purple Rock Fragments in Sichuan Basin, China [J]. *Catena*, 2006, 68: 51-58.

[14] ZHANG D, CHEN A Q, XIONG D H, et al. Effect of Moisture and Temperature Conditions on the Decay Rate of a Purple 6 Mudstone in Southwestern China [J]. *Geomorphology*, 2013, 182: 125-132.

[15] 王代长, 蒋 新, 卞永荣, 等. 酸沉降下加速土壤酸化的影响因素 [J]. *土壤与环境*, 2002, 11(2): 152-157.

[16] PUCKETT L J, BRICKER O P. Factors Controlling the Majorion Chemistry of Streams in the Blue Ridge and Valley Physiographic Provinces of Virginia and Maryland [J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6: 79-98.

[17] 邓 涛, 黄 明, 詹金武. 不同 pH 环境下黏土类岩崩解过程分形演化规律 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(10): 1480-1484.

[18] 刘刚才. 紫色土侵蚀规律及其防治技术 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2008.

[19] 叶 强, 陈攀江. 盆地降水酸化范围及发展趋势预测 [J]. *四川环境*, 1992, 11(2): 59-63.

[20] 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.

[21] WANG H, HAN G. Chemical Composition of Rainwater and Anthropogenic Influences in Chengdu, Southwest China [J]. *Atmospheric Research*, 2011, 99: 190-196.

[22] ZHAO M, LI L, LIU Z, et al. Chemical Composition and Sources of Rainwater Collected at a Semi-Rural Site in Ya'an, Southwestern China [J]. *Atmospheric & Climate Sciences*, 2013, 3: 486-496.

[23] 张荣科, 范 光. 粘土矿物 X 射线衍射相定量分析方法与实验 [J]. *铀矿地质*, 2003, 19(3): 180-185.

[24] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.

[25] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土-上篇 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.

[26] 钟 山. 蒙脱石酸溶动力学以及酸溶对蒙脱石结构的影响研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.

[27] PANDA A K, MISHRA B G, MISHRA D K, et al. Effect of Sulphuric Acid Treatment on the Physico-Chemical Characteristics of Kaolin clay [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, 363(1-3): 98-104.

[28] VIEILLARD P. A New Method for the Prediction of Gibbs Free Energies of Formation of Hydrated Clay Minerals Based on the Electronegativity Scale [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2000, 48(4): 459-473.

[29] 唐洪明, 赵 峰, 李 皋, 等. 绿泥石与土酸、氟硼酸反应实验研究 [J]. *油田化学*, 2007, 24(5): 307-315.

[30] 赵吉霞, 陆传豪, 刘刚才. 紫色母岩在不同酸环境中的崩解分维特征 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 127-133.

[31] 郭永明. 紫色泥页岩在自然状态下风化崩解的观察研究 [J]. *土壤农化通报*, 1988, 3(1): 10-14.

[32] 高妹妹. 酸性介质下红层软岩工程特性影响试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

[33] DREVER J I, HURCOMB D R. Neutralization of Atmospheric Acidity by Chemical Weathering in an Alpine Drainage Basin in the North Cascade Mountains [J]. *Geology*, 1986, 14: 221-224.

[34] SVERJENSKY D A, MOLLING P A. A Linear Free Energy Relationship for Crystalline Solids and Aqueous Ions [J]. *Nature*, 1992, 356(6366): 231-234.

[35] 陈秀营. 松辽盆地北部中浅层水化学场特征及其与成岩作用关系研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2011.