

喀斯特红壤盐基离子及硅铝铁随径流流失研究

熊佰炼^{1,2}, 张进忠³, 彭韬^{4,5}, 宋贤威^{2,3}

(1. 遵义师范学院 资源与环境学院, 贵州 遵义 563006; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所/
生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 4. 中国科学院
地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 5. 普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100)

摘要:采用模拟降雨试验,研究了黔中喀斯特红壤区坡地盐基离子、铁、铝、硅和碱度随径流淋溶流失的特征,分析了由此产生的环境效应。结果表明:红壤中7种无机成分随径流流失的总负荷呈现 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{SiO}_2 > \text{Na}^+ > \text{Fe} > \text{Al}$ 的趋势,其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 SiO_2 流失较为严重,Fe和Al随径流的流失量非常小。当雨强为45 mm/h时,红壤坡地开始产生地表径流,流失在地表径流中的物质以 K^+ 、 Na^+ 为主,二者含量之和占地表径流中7种无机成分总流失量的90.91%。当雨强达到70 mm/h时,地表径流产流量超过壤中流,流失在地表径流中的物质以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主,占地表径流中7种无机成分总流失量的53.78%;壤中流物质组成受雨强的影响较小, K^+ 的浓度比率最高。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 SiO_2 和Fe的流失以地表径流为主,不同雨强下 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SiO_2 的地表流失负荷可用一元线性回归方程预测。红壤碱度淋溶流失量随雨强的增加而增大,但未超过红壤的临界碱度淋溶,不会造成喀斯特红壤酸化。

关键词:喀斯特; 红壤; 模拟降雨; 盐基离子; 硅; 临界碱度淋溶

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0068-07

Study on the Losses of Base Cations, Silicon, Aluminum and Iron in Karst Red Soil Along With Runoff

XIONG Bailian^{1,2}, ZHANG Jinzhong³, PENG Tao^{4,5}, SONG Xianwei^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563006, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 5. Puding Karst Ecosystem Research Station, Puding, Guizhou 562100, China)

Abstract: The loss characteristics of base cations, silicon, aluminum, iron and alkalinity in sloping land of Karst red soil in central Guizhou along with runoff were studied by using simulated rainfall experiments, and the environmental effects were analyzed. The results showed that the total loss load of seven inorganic constituents in red soil appeared the decreasing order: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{SiO}_2 > \text{Na}^+ > \text{Fe} > \text{Al}$ along with runoff. Among them, the losses of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ and SiO_2 were significant, whereas the loss amounts of Fe and Al were very little. When the rainfall intensity was 45 mm/h, the surface runoff began to appear on the sloping land, and the mainly lost substances to surface runoff were K^+ and Na^+ , which accounted for 90.91% of the total lost amount of seven inorganic constituents. When the rainfall intensity was 70 mm/h, the surface runoff flow exceeded the interflow, and the mainly lost substances to surface runoff were Ca^{2+} , Mg^{2+} , which accounted for 53.78% of the total lost amount of seven inorganic constituents. The substance composition in the interflow was little affected by rainfall intensity, and was dominated by K^+ . The losses of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SiO_2 and Fe were mainly through surface runoff, and the single-variable linear regression equation can be used to predict the surface loss loads of Ca^{2+} , Mg^{2+} and SiO_2 under various rainfall intensities.

收稿日期: 2017-05-27

修回日期: 2017-06-29

资助项目: 国家自然科学基金中英合作重大项目“喀斯特关键带岩石—土壤—生物—大气连续体的碳过程及其控制机制”(41571130043); 遵义师范学院博士资助项目(遵师 BS[2014]04 号)

第一作者: 熊佰炼(1978—),男,湖南南县人,博士,副教授,主要从事喀斯特关键带环境地球化学过程研究。E-mail: xblxnq@126.com

The leaching amount of red soil alkalinity increased with the increase of rainfall intensity, but did not exceed the critical alkalinity leaching of red soil, which may not cause soil acidification in karst red soil.

Keywords: karst; red soil; simulated rainfall; base cations; silicon; critical alkalinity leaching

以贵州为中心的西南地区是全球面积最大、发育最成熟、生态环境最复杂的喀斯特集中连片分布区。喀斯特地区岩溶作用强烈,地下水与岩石发生化学反应生成裂隙、空腔和管道,塑造出独特的地表地下二元水文结构^[1]。贵州喀斯特地区碳酸盐岩风化成土速率低,土层普遍浅薄,加上降雨较为集中,土壤被降雨侵蚀后通过地表与地下两条途径流失,造成了较为严重的石漠化现象。红壤是西南地区重要的土壤类型,由红色风化壳经过漫长的脱硅富铝化和生物富集过程发育而成^[2],在贵州地形平缓的喀斯特低山丘陵和台地上分布较为广泛,是支撑贵州农林业发展的主要土壤资源之一。贵州红壤分布区往往也是人口稠密区,高强度的农业活动加上红壤结构稳定性差、抗蚀性弱的特点^[3],出现了明显的水土流失和退化现象^[4]。目前,有关喀斯特红壤退化过程中土壤表层团聚体变化规律^[3]、土壤剖面有机质与养分变异^[5]等方面的研究较多,但降雨条件下喀斯特红壤物质流失及其环境效应的研究鲜见报道。

土壤盐基离子 Ca^{2+} , K^{+} , Mg^{2+} 和 Na^{+} 是植物生长所须的营养元素,也是衡量土壤质量的重要方面,其淋溶流失可导致土壤养分耗损及酸中和能力下降,促进土壤酸化。Si, Al, Fe 是重要的成土元素,也是

地壳中除 O 以外含量最丰富的 3 种元素,其迁移转化对土壤发生、土壤生态有重要意义。本文选取黔中喀斯特坡地红壤为研究对象,通过原位径流小区模拟降雨试验,探讨不同降雨强度(以下简称“雨强”)下红壤 Ca^{2+} , K^{+} , Mg^{2+} , Na^{+} , Al, Fe, Si 和碱度随地表径流和壤中流迁移流失的特征,分析由此产生的环境效应,以期为喀斯特地区红壤降雨侵蚀环境效应评估和治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站营盘村($26^{\circ}15'23''\text{N}$; $105^{\circ}44'35''\text{E}$),海拔 1 294 m,亚热带季风湿润气候,年平均气温 15.1°C ,年降水量 1 396 mm,主要集中于 5—8 月。普定处于贵州喀斯特高原中心区域,喀斯特地貌占全县国土面积的 84%,石漠化面积超过 35%,在南方喀斯特地区极具典型性和研究价值。

普定红壤多分布于地形较为平缓、坡度 15° 左右的低山丘陵,大多种植果树、玉米或烟草。试验小区所在田块稀疏种有树龄 3 a 左右的梨树,无人耕种管理,为半撂荒状态。红壤的基本理化性质列于表 1。

表 1 试验样地土壤的基本性质

pH	各级粒径组成/%			交换性盐基离子/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)				有效 Si/	交换态 Al/	有效 Fe/
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	>0.02 mm	Ca^{2+}	K^{+}	Mg^{2+}	Na^{+}	($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
7.82	14.03	69.79	16.19	1004.35	140.79	98.42	34.27	216.39	0.11	46.84

注:土壤有效 Si 含量用 SiO_2 表示。

1.2 模拟降雨试验设计

设置 3 个紧邻的重复降雨小区,每个小区的坡度 15° 、长 1.7 m、宽 1.2 m、有效降雨面积 1.89 m^2 ,四边挖深 70 cm 至紧实的母质层,边框混凝土浇筑。地表径流和壤中流集水槽用水泥浇筑后涂刷防水材料。壤中流集水槽中填充卵石,对上层地表集水槽起支撑作用,同时防止中层土壤垮塌进入地下水。模拟降雨装置购自南京南林电子科技有限公司,型号为 NLJY-10。下喷式降雨,降雨高度 3 m,降雨均匀度系数 >0.86 。降雨支架四周采用吸水绒布包围,消除风对降雨的影响,小区四周用防水篷布遮盖,防止边缘处雨水渗透。根据普定降雨特点,设 5 种雨强梯度:30,45,70,90,120 mm/h,单次降雨时长为 60 min,间隔 48~72 h。雨量计实时监

测以确保雨强稳定,其占用面积不计入有效降雨面积。在集水槽处连接导管,塑料容器收集降雨产生的全部径流,取 100 ml 水样待测。

1.3 土样和水样的测定

土壤交换性 Ca^{2+} , K^{+} , Mg^{2+} , Na^{+} 采用乙酸铵浸提,土壤有效 Si 含量(以 SiO_2 表示)采用柠檬酸溶液提取,土壤交换性 Al 采用 KCl 溶液提取,土壤有效 Fe 采用二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提剂提取,以上提取液用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜抽滤后用 ICP-OES (PerkinElmer Optima 5300 DV)测定。地表径流和壤中流测定的指标有: Ca^{2+} , K^{+} , Mg^{2+} , Na^{+} , Al, Fe、以 SiO_2 表示的 Si 和以 CaCO_3 表示的总碱度,水样用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜抽滤后用 ICP-OES 测定。水样总碱度用便携

式光度计(Palintest 7500)测定。流失负荷以单位面积土地上的径流量乘以径流中溶质浓度获得。

1.4 土壤临界碱度淋溶评价

根据文献^[6-7]可知,以不允许耗尽土壤中的次生铝化物、防止导致土壤结构变化为标准的临界碱度淋溶($ANC_{L,crit}$)估算公式为:

$$ANC_{L,crit} = Q \cdot [HCO_3^-] - r \cdot BC_w - Q^{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{r \cdot BC_w}{K_{gibb}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$[HCO_3^-] = \frac{K_1 K_H P_{CO_2}}{[H^+]} \quad (2)$$

式中: $ANC_{L,crit}$ 单位为 $kmol/(hm^2 \cdot a)$; $[HCO_3^-]$ 和 $[H^+]$ 分别表示 HCO_3^- 和 H^+ 的浓度; r 是原生矿物风化产生的 Al^{3+} 与产生的盐基阳离子的当量比,常用值是 2; BC_w 是土壤风化产生的盐基阳离子的总和 ($BC_w = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$), 根据土壤典型矿物估算, 红壤为 $0.16 kmol/(hm^2 \cdot a)$ ^[6]; Q 为剩余降雨量 [$m^3/(hm^2 \cdot a)$], 通常用该地区年平均降雨量 \times 径流系数 \times 土地面积获得, 黔中地区该值为 $890 m^3/(hm^2 \cdot a)$; K_{gibb} 是水铝矿平衡常数, 常用值为 $300 m^6/mol^{[6]}$; K_1 为碳酸一级电离常数; K_H 为亨利常数^[6]; P_{CO_2} 为土壤中 CO_2 分压力, 其值受昼夜、土层厚度、温度和含水率等影响, 据梁福源等^[8]对喀斯特红壤 CO_2 浓度的研究结果, 本文取值 $506 Pa$ 。

2 结果与分析

2.1 产流特征

不同雨强下地表径流与壤中流产流量变化见图 1A 所示。从中可知, 地表径流和壤中流的产流量均随雨强的增加而持续增大。其中, 雨强为 $30 mm/h$ 时地表不产

生径流, $45 mm/h$ 时地表径流产流量为 $3.64 L$, $120 mm/h$ 时增大至 $174.85 L$; 雨强为 $30 mm/h$ 时壤中流产流量为 $10.82 L$, $120 mm/h$ 时增大至 $33.61 L$ 。研究表明, 地表径流具有临界雨强, 雨强小于该值时, 无地表径流产生^[9]。胡奕等^[9]的研究表明, $80 mm/h$ 是典型喀斯特坡地地表产流临界雨强。Peng 等^[10]对普定陈旗喀斯特小流域的观测也表明超过 $60 mm$ 的降雨才可导致典型喀斯特坡地产生明显的地表径流。从图 1A 可知, 本研究中坡度为 15° 的黔中红壤产生地表径流的雨强阈值在 $30 \sim 45 mm/h$ 范围之内, 小于典型喀斯特坡地的临界雨强。其原因可能是: 土壤性质、坡度、地表—地下二元水文结构和岩石裸露度等因素可对喀斯特地区地表与地下径流的分配产生重要影响^[9-10], 典型喀斯特坡地土壤以石灰土和黄壤为主, 土层薄, 坡度大, 岩石裸露度较大, 岩溶裂隙发育充分, 相比之下, 本研究的对象黔中喀斯特红壤是由红色风化壳发育而来, 质地粘重, 土层较厚, 且主要分布在缓坡与台地上, 更易形成地表径流。

研究发现, 雨强与地表产流总量呈显著正相关^[9], 本研究也证实了这一结论。从图 1A 可知, 雨强从 $45 mm/h$ 增加到 $120 mm/h$, 地表径流量增长了 47 倍, 地表径流量与壤中流量的比值由 0.36 增加至 5.20 , 而壤中流产流量在 $23.67 \sim 33.61 L$ 之间变动, 无显著性差异 ($n=3, p>0.05$)。这表明, 当降雨量超过临界雨强后, 壤中流产流量相对稳定, 受雨强的影响较小。研究表明, 典型喀斯特坡地降水主要以壤中流的形式流失^[10], 而黔中喀斯特红壤坡地雨强达到 $70 mm/h$ 后以地表径流为主, 其原因与前面分析的红壤坡地产生地表径流的雨强小于典型喀斯特坡地临界雨强的原因一致。

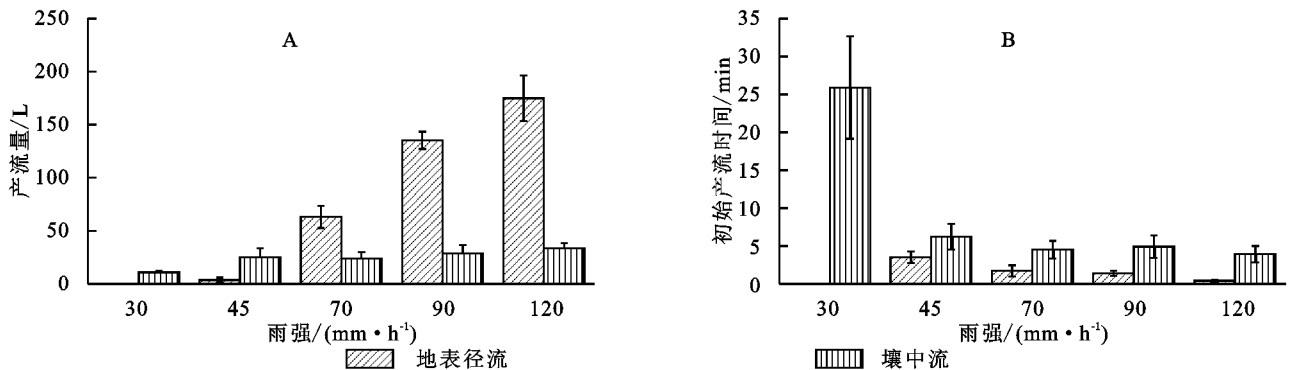


图 1 不同雨强下的产流量(A)和初始产流时间(B)的变化

初始产流时间是指从降雨开始到小区中出现径流并从集水槽流出所经历的时间, 是衡量土壤侵蚀产流过程的一个重要指标。不同雨强下初始产流时间变化见图 1B 所示。从中可知, 地表径流的初始产流时间为 $3.7 \sim 0.4$

min, 壤中流的初始产流时间为 $25.90 \sim 3.9 min$, 均随雨强的增加而减少, 与前人研究结果一致^[11-12]。

2.2 地表径流物质浓度流失特征

不同雨强下地表径流中各物质浓度变化见图 2。

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度范围分别为 4.70 ~ 29.86 mg/L, 8.06 ~ 18.46 mg/L, 均随雨强的增加而增大, 与关共凑等^[13] 对粤北喀斯特石灰土 Ca^{2+} , Mg^{2+} 流失的研究结果相一致。岩溶土壤中的钙、镁离子有 85% 以水溶态和交换态存在^[14]。雨强由 45 mm/h 增加至 120 mm/h, 雨滴对红壤表面击打与冲蚀力增大, 地表径流携带流失的土粒增加, 水与土粒相互作用更加充分, 有利于土粒中水溶态和交换态钙、镁溶出进入到地表径流中。 K^+ , Na^+ 浓度对雨强的响应具有一致性, 均表现为: 45 mm/h 时浓度最大, 分别为 265.47 mg/L, 33.23 mg/L; 雨强增大至 70 mm/h 时浓度大幅下降至 21.53 mg/L, 1.89 mg/L; 90 mm/h, 120 mm/h 时浓度继续下降, 但降幅明显减小。 K , Na 为易溶元素, 土壤胶体中交换性 K^+ , Na^+ 和土壤溶液中的 K^+ , Na^+ 在雨水的侵蚀淋溶下可快速进入地表径流, 较小雨强即可造成 K^+ , Na^+ 大量流失。雨强较大时, K^+ , Na^+ 流失量增加较少, 降水量快速增加, 导致流失浓度反而减小。Yan 等^[15] 对 1987—2008 年普定后寨岩溶小流域地表径流监测发现, K^+ 和 Na^+ 的总浓度范围为 1.2 ~ 8.9 mg/L, 明显小于本研究的试验结果。后寨岩溶小流域土壤类型主要为石灰土、水稻土和黄壤, 可以推测在地表径流的侵蚀作用下黔中喀斯特红壤保持 K^+ , Na^+ 的能力可能弱于这 3 种土壤。

雨强为 45 mm/h 时地表径流中的 Al 的浓度为 86.67 $\mu\text{g/L}$, 70~120 mm/h 时已检测不出 Al 。研究表明, 土壤铝的释出存在一个 pH 值阈值, 降雨或淋溶液 pH 值降低至 4.0 左右时, 才会导致非水溶性 Al 的大量释出^[16]。本研究降雨 pH 值为 7.61, 非水溶性 Al 难以随降雨产生的地表径流流失。70~120 mm/h 时检测不出 Al 可能的原因有两点: 一是本研究中同一降雨小区降雨场次间隔只有 48~72 h, 红壤中含量较低的交换性 Al (0.11 mg/kg) 在 30 mm/h, 45 mm/h 的降雨场次中已基本流失且未得到恢复; 二是雨强增加使地表径流量急剧增大, 带来了较强的稀释效应。研究表明, 亚热带地区土壤 Fe 可发生较强烈的淋溶迁移^[17]。本研究中, 45 mm/h 时地表径流中 Fe 的浓度已达最大值 181.43 $\mu\text{g/L}$, 70, 90, 120 mm/h 时的浓度在 0.23~0.90 $\mu\text{g/L}$ 之间变动。

土壤硅除石英外, 主要以硅酸盐矿物的形态存在, 通过水解作用释放出可随水分移动的 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 。从图 2 可知, 地表径流中 SiO_2 的浓度在雨强为 45 mm/h 时最大, 达到 16.54 mg/L; 雨强 70, 90, 120 mm/h 时 SiO_2 的

浓度分别为 6.32, 5.77, 6.55 mg/L, 无显著性差异 ($n=3$, $p>0.05$), 表明在降雨冲蚀作用下表层土壤中的 Si 可持续释出并进入到地表径流中。

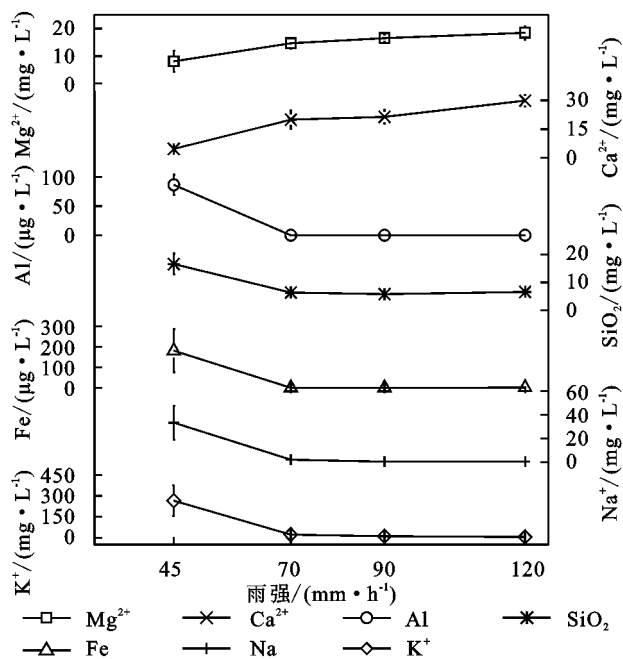


图2 不同雨强下地表径流中溶质的浓度变化

图 3A 为地表径流中 K^+ , Na^+ , SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} 的浓度占 7 种无机成分总浓度的比率 (以下简称浓度比率) 随雨强的变化。 Fe 和 Al 浓度比率之和不足 0.1%, 未在图中进行表示。从图 3A 可知, 雨强为 45 mm/h 时地表径流物质的流失以 K^+ , Na^+ 为主, 二者浓度比率之和达到了 90.91% (分别为 80.8% 和 10.11%), 但由于 K^+ 和 Na^+ 的浓度比率随着雨强的增加而大幅下降, 120 mm/h 时浓度比率已分别降至 7.79% 和 0.43%。 Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度比率随着雨强的增加而大幅上升, 45 mm/h 时分别为 1.43%, 2.45%, 70 mm/h 时二者浓度比率之和已增至 53.78% (分别为 31.02% 和 22.76%), 120 mm/h 时分别增至 49.93%, 30.88%。有研究表明, Ca^{2+} , Mg^{2+} 是地表径流中最主要的阳离子^[18], 本研究结果则表明雨强达到 70 mm/h 后 Ca^{2+} , Mg^{2+} 成为黔中红壤随地表径流流失量最多的两种盐基阳离子。从图 3A 还可知, SiO_2 的浓度比率由 45 mm/h 时的 5.04% 增至 70 mm/h 时的 9.81%, 之后随降雨量的增加无明显变化。各雨强下 SiO_2 的浓度比率均较大, 降雨可能是造成黔中表层红壤 Si 流失的重要原因。

2.3 壤中流物质浓度流失特征

从图 4 可知, 壤中流 K^+ , Na^+ 的浓度对雨强的响应具有一致性, 均表现为: 30 mm/h 时的浓度最大, 分别为 63.34 mg/L, 7.92 mg/L; 雨强增大至 45

mm/h 时浓度分别下降至 31.37, 39.45 mg/L, 70~120 mm/h 时浓度有所起伏, 但相对于 45 mm/h 时均有进一步下降。30 mm/h 时壤中流 Al 的浓度为 1.80 $\mu\text{g/L}$, 45 mm/h 时增至 6.97 $\mu\text{g/L}$, 70 mm/h 降至 0.2 $\mu\text{g/L}$, 90, 120 mm/h 时已检测不出 Al。Fe 浓度随雨强的变化与 Al 一致, 30 mm/h, 45 mm/h

时浓度为 3.45 $\mu\text{g/L}$, 6.10 $\mu\text{g/L}$, 70~120 mm/h 时下降至 0.63~0.2 $\mu\text{g/L}$ 。各雨强下壤中流 Ca^{2+} 浓度在 11.29~13.57 mg/L 变动, 无显著性差异 ($n=3, p>0.05$)。Mg²⁺ 的浓度随雨强的增加而增大, 浓度范围为 3.16~10.96 mg/L。壤中流 SiO_2 的浓度变化范围为 5.58~7.79 mg/L, 受雨强的影响并不显著。

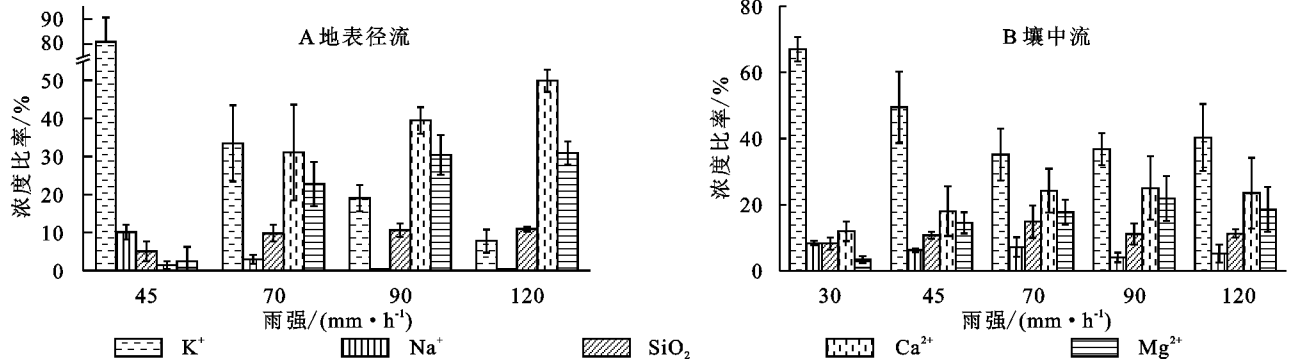


图3 不同雨强下径流中钾、钠、硅、钙和镁的浓度比率

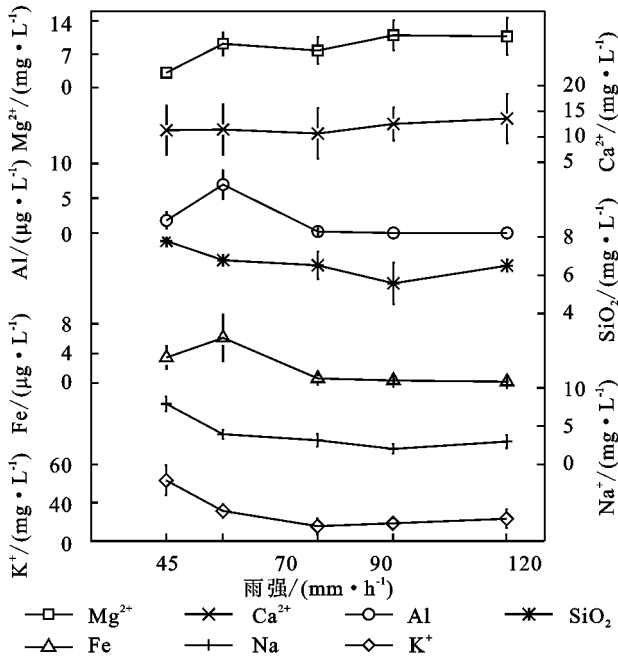


图4 不同雨强下壤中流中溶质的浓度

从图 3B 中可知, 雨强 30 mm/h 时 K⁺ 的浓度比率为 66.98%, 45 mm/h, 70 mm/h 时分别降至 49.47% 和 35.11%, 90, 120 mm/h 有所增加但与 70 mm/h 时没有显著性差异 ($n=3, p>0.05$)。壤中流 Na⁺ 的浓度比率受雨强的影响较小, 在 4.06%~8.37% 之间变动, 无明显的规律性。30~70 mm/h 时, Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的浓度比率分别由 11.93% 和 3.33% 增加至 24.23% 和 17.67%, 表现出随雨强增加而增大的趋势。70~120 mm/h 时, 雨强对 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的浓度比率的影响不大。壤中流中 SiO_2 的浓度比率受雨强影响较小, 在 8.23%~14.84% 变动。对比图 3A 和图 3B 可知, 不同雨强下, 壤中流中盐基离子及铁、铝、硅浓度比率相

对于地表径流而言更为稳定。

2.4 雨强对盐基离子及硅铝铁随径流流失负荷的影响

从表 2 可知, 红壤中 7 种无机成分随地表径流和壤中流流失总负荷呈现出 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{SiO}_2 > \text{Na}^+ > \text{Fe} > \text{Al}$ 的趋势。其中, Ca²⁺, Mg²⁺ 和 SiO_2 的径流流失总负荷随雨强的增加持续增大, 分别由 30 mm/h 时的 62.52, 19.40, 28.10 mg/m² 增至 120 mm/h 时的 3 000.96, 1 901.30, 722.55 mg/m²。关共凑等^[13]发现, 50 mm/h 以上的大雨是造成粤北喀斯特石灰土 Ca²⁺, Mg²⁺ 流失的主要降雨类型, 本研究中 45 mm/h 以上的大雨是造成喀斯特红壤 Ca²⁺, Mg²⁺ 和 SiO_2 流失的主要降雨类型。Tian 等^[19]研究表明, 贵州开阳县喀斯特黄壤山林径流中流失的阳离子以 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 为主, 流失量分别超过 25 000 mg/m²/a, 15 000 mg/m²/a; 普定年降雨量约 1 396 mm, 超过 80% 的降雨集中在 5—8 月^[10], 以此估算, 本研究 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 随径流流失总负荷与其大体相当。

从表 2 中可知, 30~120 mm/h 雨强下降雨 1 h, 地表径流与壤中流 K⁺ 流失总负荷达到了 355.88~1 001.89 mg/m²。Alfaro 等^[20]的研究表明, 英国 North Wyke 地区普通潮始成土(haplaquept)在 1 231~1 266 mm/a 降雨的淋溶作用下, K⁺ 的径流流失负荷为 500~3 100 mg/m²/a, 对比可知由降雨径流导致的黔中红壤 K⁺ 流失要远比这严重。我南方红壤普遍缺钾, 袁东海等^[21]认为土壤钾素的坡面径流流失是造成红壤缺钾重要原因, 本研究结果支持这一观点。

从表 2 可知, 红壤 Ca²⁺, Mg²⁺ 和 SiO_2 地表径流

流失负荷随雨强的变化表现出了较好的规律性,皆为:45 mm/h<70 mm/h<90 mm/h<120 mm/h。将 3 个降雨小区 Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 SiO_2 的地表径流流失负荷数据与雨强做回归分析发现,一元线性回归相关系数 R 均大于 0.97,都通过了 F 显著性检验,拟合效果好(表 3)。因而,不同雨强下, Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 SiO_2 的

地表径流流失负荷可运用相对应的一元回归模型进行估算。从表 2 还可知,除 Na^+ 和 Al 外, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , Fe 和 K^+ 的流失负荷表现为地表径流>壤中流,且雨强越大地表流失负荷所占比例越大,120 mm/h 时分别达到了 91.77%,89.98%,83.92%,96.84%和 52.33%,其流失以地表径流为主。

表 2 不同雨强下地表径流和壤中流中溶质流失负荷 mg/m²

项目	地表径流				壤中流				
	45	70	90	120	30	45	70	90	120
K^+	365.74±19.89	688.99±349.02	738.70±205.20	445.49±241.45	355.88±55.25	397.40±90.21	201.05±200.45	263.19±5.86	405.87±135.84
Na^+	44.21±6.01	64.15±34.69	16.42±1.72	24.13±2.58	44.91±2.68	52.47±22.48	41.37±20.58	27.77±5.78	51.59±18.99
Fe	0.302±0.47	0.007±0.011	0.018±0.0203	0.092±0.131	0.015±0.009	0.097±0.136	0.008±0.006	0.006±0.007	0.003±0.002
SiO_2	34.11±14.34	208.6±20.92	412.40±34.37	606.37±79.15	28.10±12.75	90.16±33.32	80.49±13.99	88.39±24.31	116.18±22.50
Al	0.142±0.20	0	0	0	0.010±0.009	0.125±0.217	0.003±0.005	0	0
Ca^{2+}	13.22±9.10	694.68±284.86	1532.20±292.34	2754.21±243.42	62.52±21.66	165.69±117.50	141.09±98.78	205.98±146.96	246.75±174.90
Mg^{2+}	19.49±10.25	490.81±123.36	1180.84±128.22	1710.80±244.88	19.40±10.16	128.69±46.58	100.69±49.42	175.93±46.94	190.50±53.50

表 3 地表径流中物质流失量(y)与雨强(x)的一元线性回归分析

项目	一元回归模型	R	Sig. F	N
SiO_2	$y=7.92x-317.69$	0.982	0	12
Ca^{2+}	$y=37.05x-1761.55$	0.973	0	12
Mg^{2+}	$y=23.32x-1044.28$	0.974	0	12

2.5 红壤物质随降雨径流流失的环境效应

2.5.1 盐基离子流失对喀斯特红壤碱度的影响 土壤碱度主要来源于 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的碱金属(Na , K)和碱土金属(Ca , Mg)盐类。本研究中地表径流和壤中流中携带迁移的 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 会造成红壤碱度流失。图 5 为地表径流和壤中流碱度淋溶流失总量与红壤 $\text{ANC}_{\text{L,crit}}$ 的关系图,按公式(1)和(2)计算,黔中红壤 $\text{ANC}_{\text{L,crit}}$ 的值为 4.25 $\text{kmol}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。从中可知,雨强 30~120 mm/h 时,降雨导致的碱度淋溶流失总量均低于 $\text{ANC}_{\text{L,crit}}$,不会造成黔中红壤的酸化。但是,碱度淋溶流失总量随雨强增加呈增大的趋势,120 mm/h 时已达到 3.33 $\text{kmol}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,接近 $\text{ANC}_{\text{L,crit}}$ 。可以推测,雨强大于 120 mm/h 时,碱度淋溶流失总量有可能超过 $\text{ANC}_{\text{L,crit}}$,有造成黔中喀斯特红壤酸化的危险。

2.5.2 Si, Al 和 Fe 流失的环境效应 Si 是地壳中含量第二的元素,约占土壤总重量的 32%,但土壤中能被植物利用的有效 Si 甚微,约为 50~250 mg/kg。在碳酸盐岩地区,径流可造成硅酸盐溶质的大量流失^[22]。本研究中,土壤 Si 的流失负荷达 28.10~722.55 mg/m^2 ,接近易迁移元素 Mg 的 19.40~1 901.30 mg/m^2 。陆地植物可将从土壤中吸收的 Si

转化成植硅体,并将活细胞中的有机碳包裹在其中,形成植硅体闭蓄有机碳(PhytOC)。植硅体在土壤环境具有高度抗分解能力,PhytOC 可以长期封存在土壤剖面中,是陆地土壤长期(万年尺度)固碳的重要机制^[23]。降雨造成土壤 Si 大量流失会导致植物可吸收的 Si 减少,降低土壤生产力,减少 PhytOC 的产生。同时,随径流流失的 Si 中必定含有土壤封存的 PhytOC。因而,Si 随径流的大量流失会削弱红壤的固碳能力。

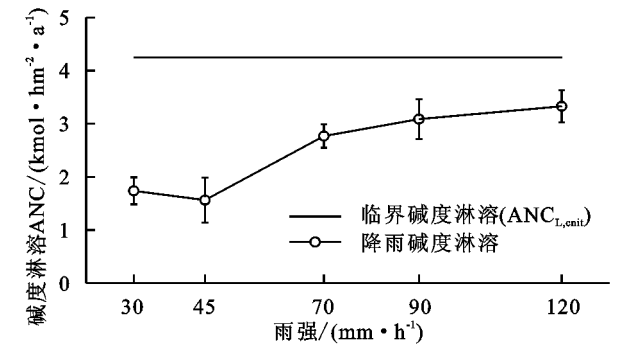


图 5 不同雨强下的碱度淋溶

脱硅富铝化是亚热带地区红壤形成的重要过程,其特点是土体中硅和盐基淋失,铁铝聚积。西南喀斯特红壤属于古土壤,但在当前的气候条件下,仍在进行着不同程度的脱硅与富铝化过程^[4]。本研究红壤 Si 和盐基随径流大量流失而 Al 和 Fe 流失量十分微小的试验结果可进一步佐证这一点。

3 结论

(1) 坡度为 15°的黔中红壤坡地产生地表径流的雨强阈值小于典型喀斯特坡地的临界雨强。雨强达

到 70 mm/h 后,地表径流产流量超过壤中流,成为降水的主要流失形式,壤中流产流量相对稳定,受雨强的影响较小。

(2) 黔中红壤中 7 种无机成分随地表径流和壤中流流失总负荷呈现出 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{SiO}_2 > \text{Na}^+ > \text{Fe} > \text{Al}$ 的趋势,Fe 和 Al 随径流的流失量非常小。 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , Fe 和 K^+ 的流失以地表径流为主,且雨强越大地表流失负荷所占比例越大,不同雨强下 Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 SiO_2 的地表径流流失负荷可运用相对应的一元回归模型进行估算。

(3) 基于土壤稳定态的黔中喀斯特红壤临界碱度淋溶量 $\text{ANC}_{\text{L,crit}}$ 为 4.25 kmol/(hm² · a)。在 30~120 mm/h 雨强下,红壤碱度淋溶流失量随雨强的增加而增大,但低于红壤 $\text{ANC}_{\text{L,crit}}$,不会造成红壤酸化。

参考文献:

- [1] 郭红艳,周金星.石漠化地区水土地下漏失治理[J].中国水土保持科学,2012,10(5):71-76.
- [2] 朱显谟.中国南方的红土和红色风化壳[J].第四纪研究,1993,13(1):75-84.
- [3] 张磊,王嘉学,代云川,等.滇东喀斯特地区红裸土层团聚体稳定性及其影响因素研究[J].土壤,2015,47(4):790-796.
- [4] 梁娟珠.南方红壤区不同植被措施坡面的水土流失特征[J].水土保持研究,2015,22(4):95-99.
- [5] 许路艳,王嘉学,余洁芳,等.滇东山原红壤退化过程中的土壤剖面有机质与养分变异[J].土壤,2015,47(5):947-952.
- [6] 郝吉明.酸沉降临界负荷及其应用[M].北京:清华大学出版社,2001
- [7] 段雷.中国酸沉降临界负荷区划研究[D].北京:清华大学,2000.
- [8] 梁福源,宋林华,王静.土壤 CO₂ 浓度昼夜变化及其对土壤 CO₂ 排放量的影响[J].地理科学进展,2003,22(2):170-176.
- [9] 胡奕,戴全厚,王佩将.喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(6):46-51.
- [10] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. Catena, 2012,90(1):53-62.
- [11] 辛伟,朱波,唐家良,等.紫色土丘陵区典型坡地产流及产沙模拟试验研究[J].水土保持通报,2008,28(2):31-35.
- [12] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [13] 关共凑,魏兴琥.自然降雨对粤北岩溶区土壤钙、镁离子流失影响模拟试验[J].水土保持学报,2013,27(5):73-76.
- [14] Yan J, Li J, Ye Q, et al. Concentrations and exports of solutes from surface runoff in Houzhai Karst Basin, southwest China[J]. Chemical Geology, 2012,304:1-9.
- [15] Lesturgez G, Poss R, Noble A, et al. Soil acidification without pH drop under intensive cropping systems in Northeast Thailand [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006,114(2/4):239-248.
- [16] 刘俐,宋存义,李发生.模拟酸雨对红壤中硅铝铁释放的影响[J].环境科学,2007,28(10):2376-2382.
- [17] 张斌,阳运秀,刘凡,等.淋溶土柱中铁和锰的运移淀积特征[J].华中农业大学学报,2015,34(2):56-64.
- [18] 青长乐,牟树森.地球化学原理[M].北京:中国农业出版社,2001.
- [19] Tian Y, Haibara K, Chang S X, et al. Acid deposition strongly influenced element fluxes in a forested karst watershed in the upper Yangtze River region, China [J]. Forest Ecology & Management, 2013,310(1):27-36.
- [20] Alfaro M A, Gregory P J, Jarvis S C. Dynamics of potassium leaching on a hillslope grassland soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33(1):192-200.
- [21] 袁东海,王兆骞,陈欣,等.不同农作措施下红壤坡耕地土壤钾素流失特征的研究[J].应用生态学报,2003,14(8):1257-1260.
- [22] 张信宝,王世杰,曹建华.西南喀斯特山地的土壤硅酸盐矿物物质平衡与土壤流失[J].地球与环境,2009,37(2):97-102.
- [23] Parr J F, Sullivan L A. Soil carbon sequestration in phytoliths[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005,37(1):117-124.