

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.09.016

谢宇, 蒙薪赟, 慈恩, 等. 模拟酸雨淋溶紫色土盐基离子及黏粒迁移特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(9): 178-188.

# 模拟酸雨淋溶紫色土盐基离子及黏粒迁移特征

谢宇, 蒙薪赟, 慈恩, 胡瑾, 杨凯, 刘彬

西南大学 资源环境学院, 重庆 400715

**摘要:** 为揭示酸雨条件下紫色土盐基离子及黏粒的迁移特征, 以不同类型(酸性、中性和石灰性)紫色土为供试土壤, 采用室内模拟淋溶的方法, 考察不同 pH 值(3.5、4.5 和 5.5)的酸雨淋液(简称淋液)对紫色土盐基离子和黏粒迁移的影响。结果表明: ①在模拟酸雨淋溶下, 各类紫色土均表现为  $\text{Ca}^{2+}$  淋失总量最大、 $\text{Mg}^{2+}$  淋失比例最高, 且两种离子淋失量在迁移过程中呈显著正相关( $p < 0.05$ ), 土壤 pH 值对其盐基离子淋失有极显著影响( $p < 0.01$ ), 石灰性紫色土盐基离子迁移量显著高于中性和酸性紫色土; ②淋液 pH 值变化对紫色土  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  迁移影响不明显, 但对石灰性和酸性紫色土  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  迁移影响显著( $p < 0.05$ ), 在中性紫色土中仅对  $\text{K}^+$  迁移有显著影响( $p < 0.05$ ); ③淋液 pH 值变化对 3 种类型紫色土的黏粒迁移有显著影响( $p < 0.05$ ), 石灰性紫色土和中性紫色土相对于酸性紫色土存在较大的黏粒迁移风险。综上所述, 在模拟酸雨淋溶下, 淋液 pH 值对于紫色土  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  迁移影响显著, 石灰性紫色土盐基离子淋失量高于其他两种紫色土; 黏粒在酸性紫色土中迁移风险显著高于其他紫色土, 且随淋溶次数增加, 黏粒迁移量显著升高。

**关键词:** 紫色土; 盐基离子; 土壤黏粒; 酸雨淋溶

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2025)09-0178-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Characteristics of Salt-Based Ion and Clay Particle Migration in Purple Soil under Simulated Acid Rain Leaching

XIE Yu, MENG Xinyun, CI En,

HU Jin, YANG Kai, LIU Bin

College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** In order to reveal the migration characteristics of saline ions and clay particles in purple soil under acid rain conditions, this paper used different types of purple soils (acidic, neutral and calcareous) as test soils, and indoor simulated leaching to investigate the effects of acid rain leaching solution (referred to as leaching solution) at different pH (3.5, 4.5 and 5.5) on the migration of saline ions and clay particles

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977002)。

作者简介: 谢宇, 硕士, 主要从事土壤物质迁移研究。

in purple soil. The results showed that: ① Under the simulated acid rain drenching, all types of purple soils showed the largest amount of  $\text{Ca}^{2+}$  loss and the highest proportion of  $\text{Mg}^{2+}$  loss, and the loss of the two kinds of ions showed a significant positive correlation during the migration process ( $p < 0.05$ ). Soil pH had a highly significant effect on the loss of salt ions ( $p < 0.01$ ), and the migration of salt ions from calcareous purple soils was significantly higher than that from neutral and acidic purple soils. ② The change of leaching solution pH had no significant effect on migration of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  C in purple soils, but the migration of  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  in acidic and calcareous soils was significantly affected ( $p < 0.05$ ), while in neutral purple soil, only the migration of  $\text{K}^+$  was affected ( $p < 0.05$ ). ③ The change of leaching solution pH had a significant effect on the migration of clay particles in three types of purple soils ( $p < 0.05$ ), and calcareous and neutral purple soils had a greater risk of clay particles migration compared with acidic purple soil. In summary, under the simulated acid rain leaching, the leaching solution pH had a significant effect on the migration of  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  in purple soils, and the loss of salt-based ions from calcareous purple soils was higher than that of from other two types of purple soils. The risk of migration of clay particles in calcareous and neutral purple soils was significantly higher than that of in acidic purple soil, and the amount of migration of clay particles was significantly increased with the increase of the number of drenching.

**Key words:** purple soil; salt-based ions; soil clay particles; acid rain leaching

环境酸化是人类面临的重要环境问题之一,它不仅对人类的生产生活产生直接影响,也是生态环境变化的重要驱动因素,影响着全球环境的变化,是我国中长期科技规划中的一项重要研究内容<sup>[1-2]</sup>。在全球环境酸化的背景下,不同生态系统及其不同要素、不同区域等,对酸化有不同的响应特征和机制<sup>[3]</sup>。紫色土因其具有紫色而得名,是我国重要的土壤资源,有 2 000 多万  $\text{hm}^2$ ,在我国诸多省份均有分布,以川渝地区最为集中、面积最大。紫色土成土迅速、矿质养分丰富、可耕作性较强、垦殖指数高,是川渝两地最重要的旱地土壤资源,但其分布区生态较为脆弱,存在土壤酸化侵蚀强烈、退化严重等问题<sup>[4]</sup>。紫色土成土过程中的物质迁移主要包括盐基淋溶和黏粒迁移<sup>[5]</sup>,因此,研究酸雨导致的紫色土酸化过程中物质迁移规律,必须针对土壤盐基离子及黏粒迁移过程展开研究。目前,已有研究通过模拟土壤经酸雨淋溶后盐基离子的释放速率来计算土壤矿物风化速率和土壤酸化速率<sup>[6]</sup>,例如:强酸性酸雨淋溶下红壤矿物风化所导致  $\text{Na}^+$  释放的机理和来源可能与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  不同,酸度大的雨水对红壤的矿物风化作用相对较大<sup>[7]</sup>。砖红壤经酸雨淋溶后,某些矿物会发生风化,释放出盐基离子,也会使部分交换性盐基离子转化成非交换态<sup>[8]</sup>。目前针对紫色土盐基离子和黏粒迁移的研究相对较少,基于上述现状和需求,本研究选取重庆市紫色土典型分布区域,采用模拟酸雨淋溶方法,探明不同类型紫色土盐基离子及黏粒迁移对酸雨淋溶的响应,揭示不同 pH 值淋液对紫色土盐基离子及黏粒迁移的影响,其结果可为深入解读紫色土物质迁移的内在影响机制,认清酸雨作用下紫色土演变特征提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

重庆市土壤母质类型丰富,其属性主要决定于岩石风化物的类型以及这些风化物的迁移、堆积形态和古气候条件的残留特征等。全市成土母质的主要类型为第四系新冲(洪)积物、第四系更新统沉积物、紫色岩风化残坡积物、黄色砂、泥(页)岩风化残坡积物、碳酸盐岩类风化残坡积物和碎屑、泥质岩类灰黄色风化残坡积物,其中沉积岩广泛发育区域,中生代地层出露面积甚大。紫色土是重庆市分布面积最广的土类,占全市土地面积的 33.22%,主要分布在渝西方山丘陵区和中部平行岭谷区<sup>[9-11]</sup>。

### 1.2 样品采集与分析

本研究所用供试土壤均采自重庆市涪陵区珍溪镇渠溪村(29°53'N, 106°23'E),供试土壤分为 3 个亚

类: 石灰性紫色土(JT)、中性紫色土(ZT)和酸性紫色土(ST), 成土母质为侏罗系蓬莱镇组砂岩、泥(页)岩风化残坡积物。在样地内沿“S”形路线进行采样, 采集表层(0 ~ 20 cm)土样共 20 个, 同时去除活体根系及肉眼可见的有机物残体。混合均匀后于室内避光自然风干至恒质量, 研磨过 2 mm 筛后部分用于测定土壤理化指标, 部分用于室内酸雨淋溶模拟试验。供试土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本理化性质

土壤 编号	pH 值	交换性钾/	交换性钠/	交换性钙/	交换性镁/	黏粒	粉粒	砂粒
		[cmol(K <sup>+</sup> )· kg <sup>-1</sup> ]	[cmol(Na <sup>+</sup> )· kg <sup>-1</sup> ]	[cmol(1/2Ca <sup>2+</sup> )· kg <sup>-1</sup> ]	[cmol(1/2Mg <sup>2+</sup> )· kg <sup>-1</sup> ]	<0.002 mm/%	0.002~0.05 mm/%	0.05~2 mm/%
JT	8.15	0.07	0.11	11.72	5.11	32.88	47.63	19.49
ZT	7.23	0.16	0.12	5.85	2.34	31.03	48.60	20.37
ST	4.49	0.12	0.12	2.21	0.83	37.78	47.64	14.58

### 1.3 模拟试验

本研究采用的试验方法为淋溶法, 用 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 以 3 : 1 的摩尔比配成(母液稀释)pH 值为 3.5、4.5、5.5 的 3 种不同酸度的淋溶液, 以蒸馏水(即时测定 pH 值)为对照, 进行间歇淋溶以模拟自然界干湿交替的环境。将土壤样品风干、除杂, 过 2mm 筛磨碎, 称取 250 g 粒径 2 mm 的供试样品, 装入内径 4.6 cm、高 25 cm 的硬 PVC 管内(在样品填装前, 用有孔橡皮塞堵住硬 PVC 管底部, 并在管底加铺一层玻璃纤维和慢速定量滤纸)每隔 24 h 淋溶 1 次, 每次 200 mL 淋洗液, 共淋洗 10 次, 淋洗液累计用量为 2 000 mL, 用医用输液器控制流速, 调节注射器阀门使流速控制在约 1.5 mL/min, 用以模拟研究区降雨。淋出液用比浊法测定总量(半定量进行比较)。将塑料瓶中淋出液摇匀后, 根据斯托克斯沉降公式计算出沉降后, 用移液枪吸取 10 mL 上层 <0.002 mm 的淋出液于比色管中, 加 2 mL 无水乙醇和 1 mL 5%阿拉伯胶, 搅拌均匀, 静置 5 min 后, 在分光光度计上以 450 nm 波长、3 cm 比色杯比浊。

称取 20 g 土壤于 500 mL 三角瓶中, 加水至 250 mL 静置过夜, 煮沸 1 h, 过筛后倒入 1 000 mL 的沉降量筒中, 搅拌后按时间进行沉降, 用 1 000 mL 的量筒搅拌后, 用虹吸法将量筒 10 cm 以上的液体全部吸出来(约 295 mL), 摇匀后, 用移液管定量吸取 25 mL 至铝盒中, 烘干称质量, 其余用来配制标准曲线, 吸取 10 mL 原黏粒液体至 250 mL 容量瓶中定容(此时稀释倍数为 25 倍), 吸取 0、0.5、1、2、4、8、10 mL 黏粒液体至 25 mL 比色管中, 加 2 mL 无水乙醇和 1 mL 5%阿拉伯胶, 搅拌均匀, 静置 5 min 后, 在分光光度计上以 450 nm 波长、3 cm 比色杯比浊。定量吸取 10 mL 至塑料管中, 测定各粒径颗粒组成及粒径分布。淋出液测定盐基离子。将淋出液摇匀, 用普通滤纸滤至 50 mL 的烧杯中, 分别吸取 1、2、5、10、20 mL 至 25 mL 容量瓶中, 加入 1 mL 50g/L 的 LaCl<sub>3</sub> 溶液, 用水定容后测定交换性 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>, 烧杯中剩余滤液用于测定交换性 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>。

### 1.4 测定方法

土壤 pH 值采用酸度计法测定, 水土比为 2.5 : 1; K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 采用火焰光度计法测定; Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 采用原子吸收分光光度计法测定; 黏粒含量采用吸管法测定。

### 1.5 数据处理

采用 Excel 2016 和 Origin 2018 对试验数据进行统计和作图, 利用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析, 并采用最小显著差异法比较不同处理间差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟酸雨淋溶对紫色土盐基离子迁移的影响

#### 2.1.1 K<sup>+</sup> 迁移

如图 1 所示, 在模拟酸雨淋溶过程中, 不同降雨酸度的 K<sup>+</sup> 迁移表现出相同趋势: 随淋溶次数增加, 盐基离子释放量逐渐减少, 最终趋于稳定。在不同 pH 值淋液淋溶下, 石灰性紫色土中, K<sup>+</sup> 淋出量在第 8 次

达到最低值,总迁移量为:  $J_4 > J_2 > J_1 > J_3$ ,  $J_3$  相比  $J_4$  显著降低 17.78%,  $J_1$ 、 $J_2$  与  $J_4$  无显著差异; 中性紫色土中,  $Z_3$ 、 $Z_4$  处理的  $K^+$  迁移量在第 6 次达到最低, 分别为 1.314 mg/L 和 2.163 mg/L,  $Z_1$ 、 $Z_2$  在第 8 次淋溶时达到最低点, 总迁移量为:  $Z_1 > Z_4 > Z_2 > Z_3$ ,  $Z_3$  相比  $Z_4$  显著降低 19.58%,  $Z_1$ 、 $Z_2$  与  $Z_4$  无显著差异; 酸性紫色土中,  $S_4$  处理的  $K^+$  淋出量在第 9 次达到最低值, 为 2.562 mg/L,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  处理在第 7 次达到最低值, 分别为 2.314、2.387、2.532 mg/L, 总迁移量为:  $S_1 > S_3 > S_2 > S_4$ , 各处理间无显著差异。图 1d 可以显示不同 pH 值条件下酸液淋洗对  $K^+$  迁移总量的影响。当 pH 值为 3.5 时,  $Z_1$  和  $S_1$  的  $K^+$  迁移总量无显著差异, 但显著高于  $J_1$ , 分别高出 32.28% 和 21.05%。当 pH 值为 4.5 时,  $Z_2$  的  $K^+$  迁移量显著高于  $J_2$ , 增加 24.65%, 但  $Z_2$  与  $S_2$ 、 $S_2$  与  $J_2$  之间无显著差异。当 pH 值为 5.5 时,  $J_3$ 、 $Z_3$ 、 $S_3$  的  $K^+$  迁移总量无显著差异。使用去离子水(pH 值为 7.0)淋洗时,  $Z_4$  的  $K^+$  迁移总量显著高于  $J_4$  和  $S_4$ , 分别增加 19.46% 和 10.24%。淋溶次数和土壤类型对  $K^+$  迁移产生了极显著的影响 ( $p < 0.01$ ), 而淋液 pH 值对石灰性和中性紫色土中的  $K^+$  迁移有显著影响 ( $p < 0.05$ ), 对酸性紫色土无显著影响。

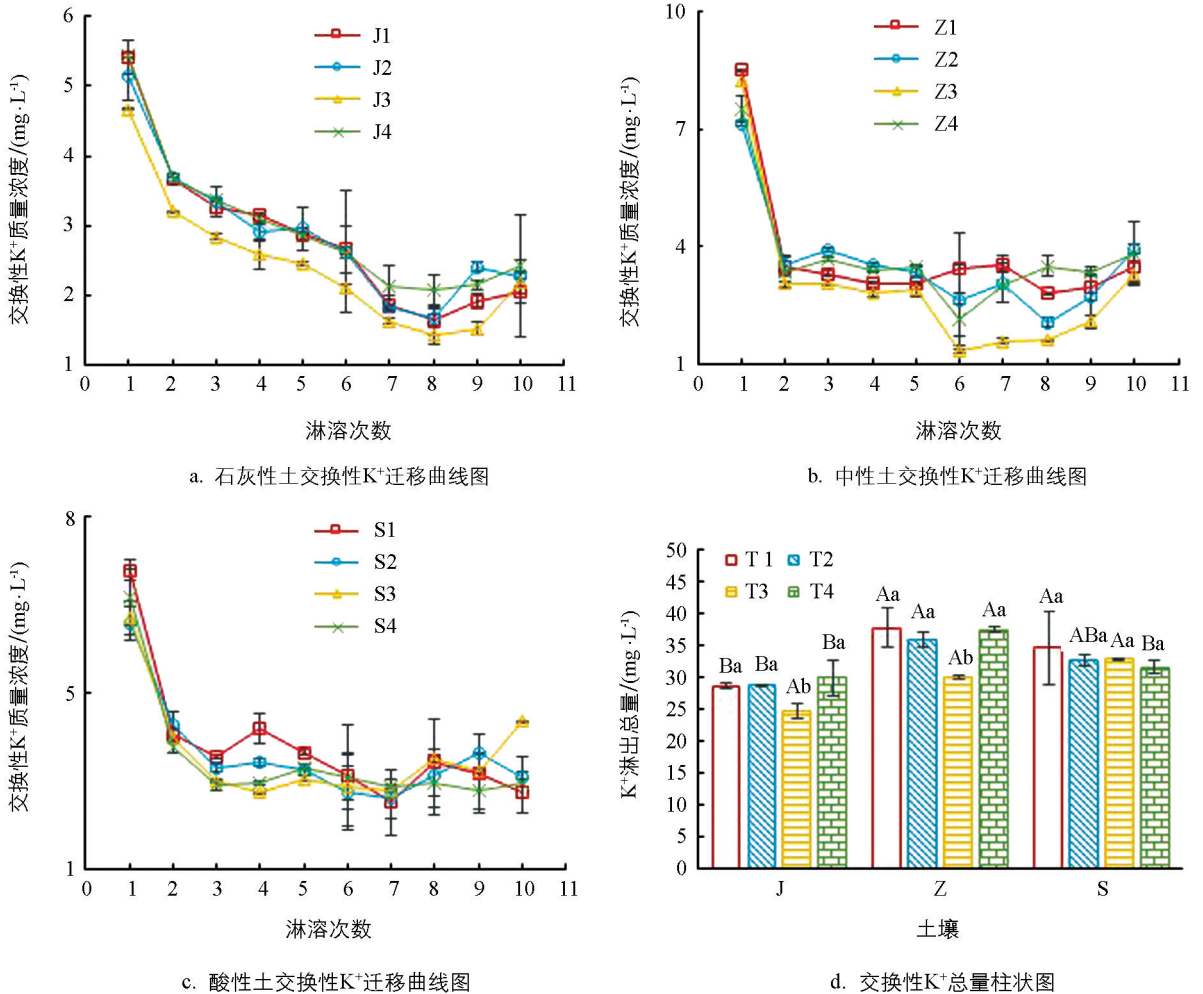


图 1 不同 pH 值淋液作用下紫色土  $K^+$  迁移情况

### 2.1.2 $Na^+$ 迁移

在淋溶前期,淋出液  $Na^+$  迁移量在第 1 次淋溶后达到最大值(图 2), 第 3 次后变幅减小。石灰性和酸性紫色土在第 6 次淋溶时  $Na^+$  迁移量有所回升, 中性紫色土在达到最低值后趋于稳定。不同 pH 值酸液处理中, 石灰性紫色土  $Na^+$  迁移量( $J_1$ ) 在第 8 次淋溶时达到最小值, 为 1.522 mg/L, 对照处理( $J_4$ ) 时最大,

为 6.369 mg/L。J1、J2 在第 8 次淋溶时达到最小值, J3、J4 在第 4 次达到最小值, 各处理 Na<sup>+</sup> 迁移量在第 6 次淋溶时均有回升, 总量为: J4>J2>J3>J1, 各处理间无显著差异; 中性紫色土 Na<sup>+</sup> 迁移量 Z1、Z2 在第 8 次淋溶时最小, 分别为 1.906 mg/L 和 2.457 mg/L, Z3、Z4 在第 7 次最小, 分别为 2.380 mg/L 和 2.847 mg/L。Na<sup>+</sup> 迁移总量为: Z3>Z4>Z2>Z1, Z1、Z3、Z4 显著高于 Z2; 酸性紫色土中, Na<sup>+</sup> 迁移量变化幅度较大, 各处理在第 7 次淋溶后均达最低值, 总量为: S1>S2>S4>S3, 各处理间无显著差异。在 pH 值为 3.5 的酸液淋洗条件下, Z1 的 Na<sup>+</sup> 迁移总量显著高于 J1 和 S1, 分别提高了 112.91% 和 61.44%。此外, J1 的 Na<sup>+</sup> 迁移总量也显著高于 S1, 提高了 31.93%。当 pH 值提升至 4.5 时, Z2 的 Na<sup>+</sup> 迁移总量显著高于 J2 和 S2, 分别提高了 79.87% 和 42.78%, 但 J2 和 S2 之间无显著差异。pH 值为 5.5 时, J3 的 Na<sup>+</sup> 迁移总量显著高于 Z3 和 S3, 分别提高了 110.76% 和 92.92%, 但 Z3 和 S3 之间无显著差异。使用去离子水(pH 值 7.0)淋洗时, Z4 的 Na<sup>+</sup> 迁移总量显著高于 J4 和 S4, 分别提高了 93.24% 和 78.21%。淋洗总量和土壤类型对 Na<sup>+</sup> 迁移量有极显著影响( $p<0.05$ ), 淋液酸度对石灰性和酸性紫色土中 Na<sup>+</sup> 迁移有显著影响( $p<0.05$ ), 而中性紫色土对此则不敏感。

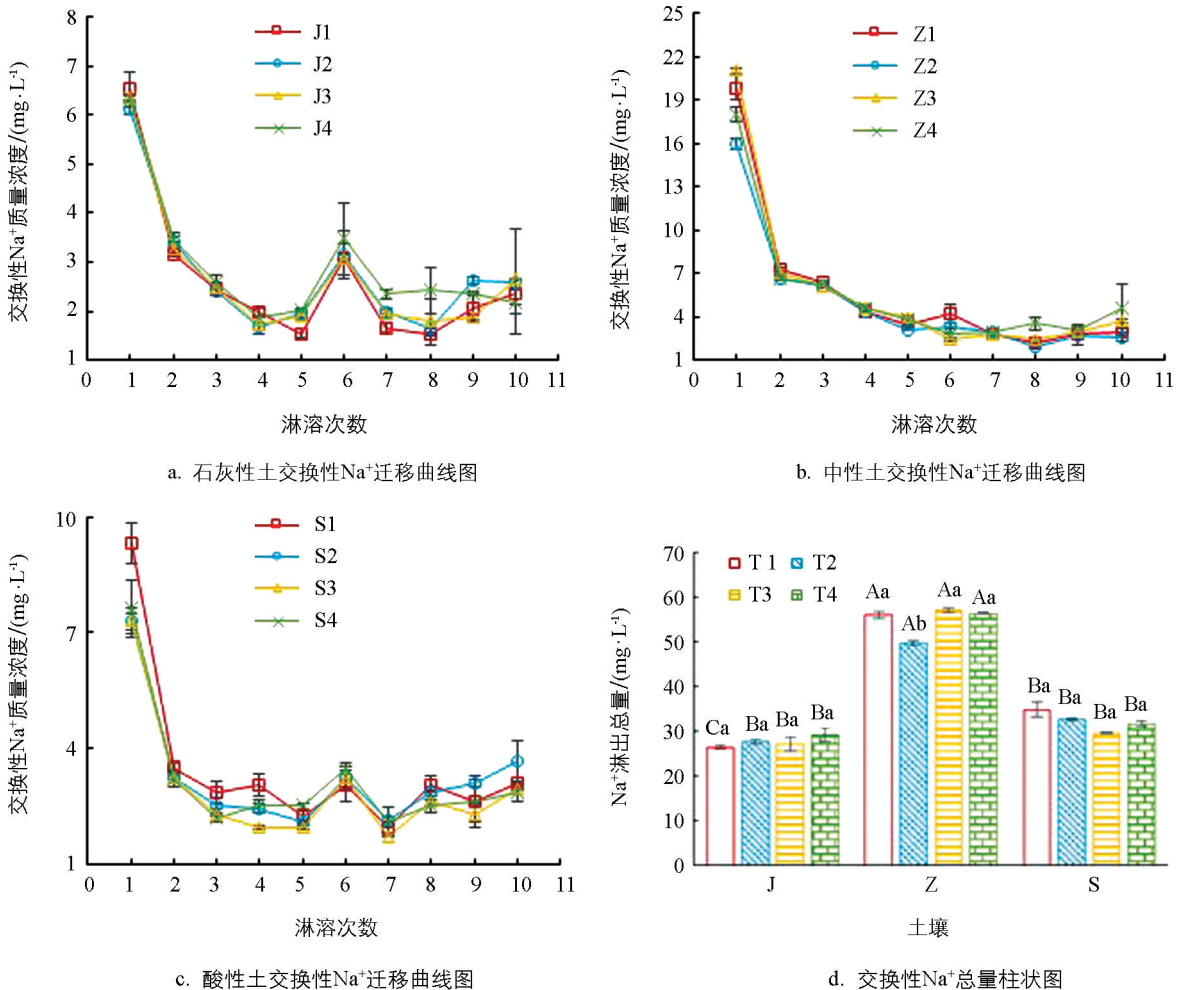
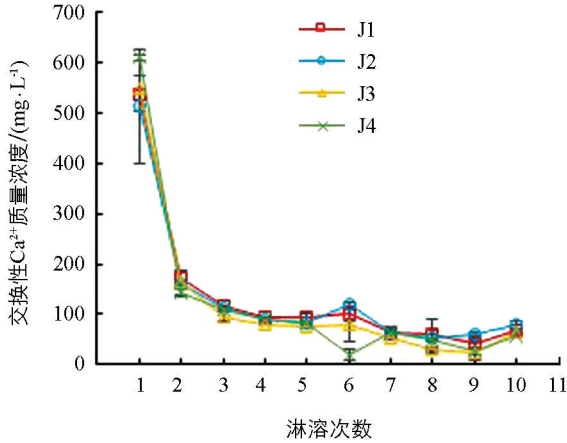
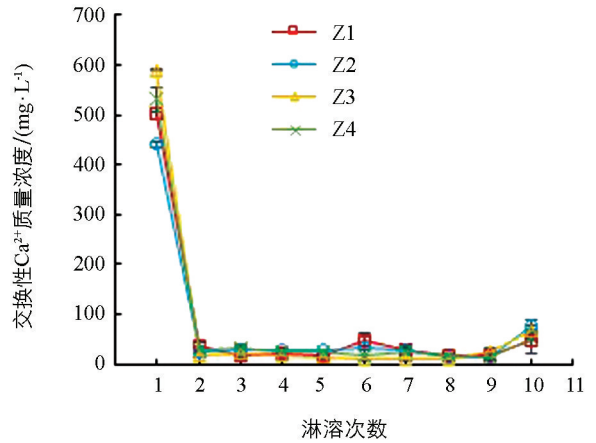
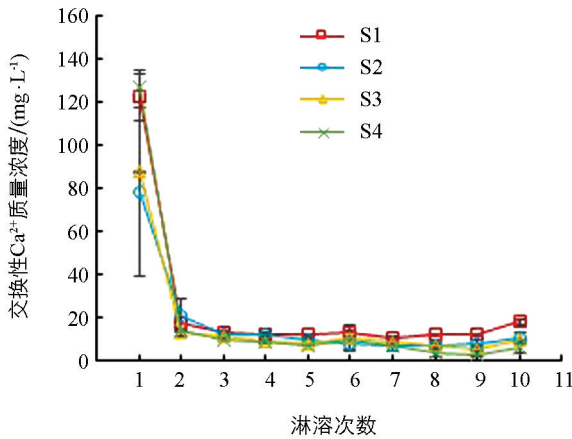
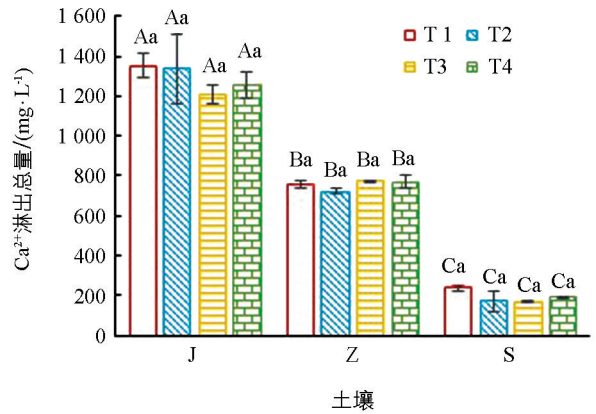


图 2 不同 pH 值淋液作用下紫色土 Na<sup>+</sup> 迁移情况

### 2.1.3 Ca<sup>2+</sup> 迁移

各处理淋出液迁移量呈线性下降的趋势(图 3), Ca<sup>2+</sup> 迁移量均在第 1 次淋溶后达到最大值, 在第 2 次淋溶后 Ca<sup>2+</sup> 迁移量变幅减小, 在达到最低值后趋于稳定。石灰性紫色土中 Ca<sup>2+</sup> 迁移量各处理中 J1、J3 在第 9 次达到最小值, 分别为 40.519、24.165 mg/L, J2 在第 8 次达到最大值, 为 53.515 mg/L, J4 则第 6 次就达到最小值, 为 19.477 mg/L。Ca<sup>2+</sup> 迁移总量表现为: J1>J2>J4>J3, 各处理之间无显著差异; 中性紫色土中 Ca<sup>2+</sup> 迁移量 Z1、Z2 和 Z4 均第 9 次淋溶达到最小值, 分别为 16.979、

12.550、12.080 mg/L, Z3 则在第 6 次淋溶达到最小值, 为 8.346 mg/L。Ca<sup>2+</sup> 迁移总量无显著差异, 表现为: Z4>Z3>Z1>Z2; 在酸性紫色土 Ca<sup>2+</sup> 的迁移过程中, S1、S2 均第 7 次达到最低值, 分别为 9.940、6.910 mg/L, S3、S4 均第 9 次达到最低值, 分别为 5.841、2.617 mg/L。Ca<sup>2+</sup> 迁移总量各处理之间无显著差异, 表现为: S4>S1>S2>S3。鉴于试验土壤中 Ca<sup>2+</sup> 含量的显著差异, 相同 pH 值条件下的 Ca<sup>2+</sup> 迁移量表现出 JT 土壤显著超过 ZT, 而 ZT 则显著超过 ST。淋洗总量及土壤的类型对 Ca<sup>2+</sup> 的迁移产生了极显著影响 ( $p<0.01$ ), 而淋溶液 pH 值的变化对 Ca<sup>2+</sup> 迁移未显示出显著影响。

a. 石灰性土交换性Ca<sup>2+</sup>迁移曲线图b. 中性土交换性Ca<sup>2+</sup>迁移曲线图c. 酸性土交换性Ca<sup>2+</sup>迁移曲线图d. 交换性Ca<sup>2+</sup>总量柱状图图 3 不同 pH 值淋液作用下紫色土 Ca<sup>2+</sup> 迁移情况

#### 2.1.4 Mg<sup>2+</sup> 迁移

各处理淋出液 Mg<sup>2+</sup> 迁移量与 Ca<sup>2+</sup> 迁移量均呈线性下降的趋势(图 4)。石灰性紫色土中 Mg<sup>2+</sup> 迁移量各处理中均第 9 次达到最小值, 分别为 1.517、2.256、0.826、1.320 mg/L, Mg<sup>2+</sup> 迁移总量表现为: J2>J1>J4>J3, J3 显著低于其余 3 组; 中性紫色土中 Mg<sup>2+</sup> 迁移量 Z1、Z2 和 Z4 均第 9 次淋溶达到最小值, 分别为 1.079、1.037、1.063 mg/L, Z3 则第 8 次淋溶达到最小值, 为 0.611 mg/L。不同 pH 值淋溶液处理下 Mg<sup>2+</sup> 迁移总量无显著差异, 表现为: Z2>Z3>Z4>Z1; 酸性紫色土中 Mg<sup>2+</sup> 迁移量变化与中性紫色土类似, S1、S2 和 S4 均第 9 次达到最低值, 分别为 0.885、0.460 mg/L, S3 第 8 次达到最低值, 为 0.604 mg/L。Mg<sup>2+</sup> 迁移总量各处理之间无显著差异, 表现为: S1>S3>S2>S4。如图 4d 所示, 在 pH 值为 3.5 的酸雨淋溶下, 石灰性紫色土的 Mg<sup>2+</sup> 迁移总量(J1)显著超过了中性紫色土(Z1)和酸性紫色土(S1), 其中 J1 比 Z1 高出约 104.90%, 而 Z1 比 S1 高出约 41.17%。当淋溶液 pH 值调整至 4.5 时, J2 的 Mg<sup>2+</sup> 迁移总量显著超过 Z2 和 S2, 分别增加了 19.87% 和 171.94%。在 pH 值 5.5 条件下, J3 的

$Mg^{2+}$  迁移量与 Z3 相当, 但两者均显著高于 S3, 提高幅度分别为 147.83% 和 151.00%。使用去离子水 (pH 值=7.0) 淋洗时, J4 的  $Mg^{2+}$  迁移总量显著高于 Z4 和 S4, 分别增加了 15.95% 和 161.54%。淋洗过程淋洗总量和土壤 pH 值对  $Mg^{2+}$  迁移具有显著影响 ( $p < 0.01$ ), 而淋溶液 pH 值对  $Mg^{2+}$  迁移无显著影响。

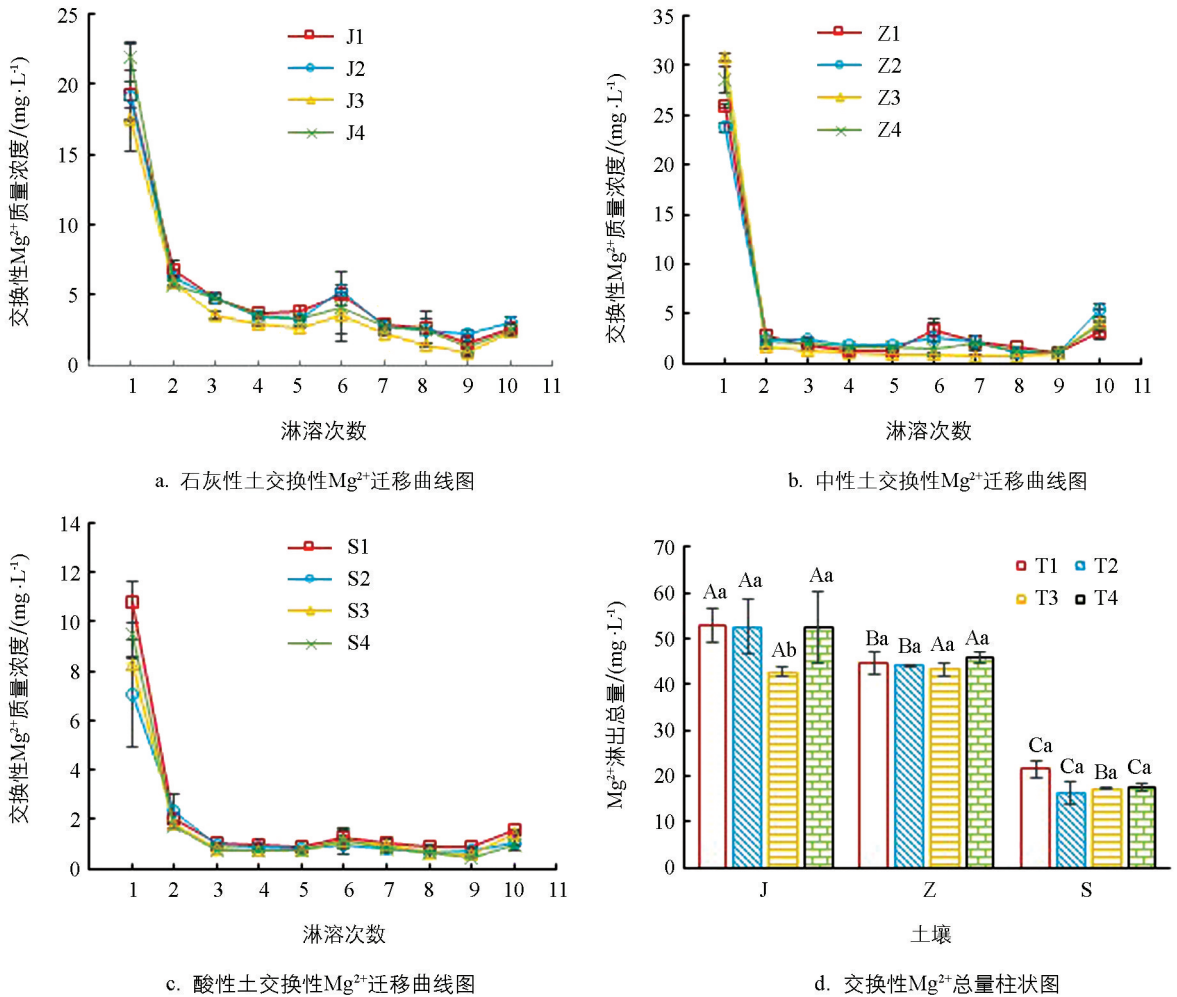


图 4 不同 pH 值淋液作用下紫色土  $Mg^{2+}$  迁移情况

## 2.2 模拟酸雨淋溶对土壤黏粒迁移的影响

由图 5 可知, 当累计淋溶量达到 1 000 mL 时, 3 种紫色土黏粒迁移量呈线性显著上升, 随着淋溶次数持续增加, 在进行第 7 次淋溶时黏粒迁移量有所下降, 当淋溶到第 10 次时, 不同 pH 值紫色土黏粒迁移量均有所增加。在去离子水淋洗 (pH 值为 7.0) 条件下, 不同类型紫色土的黏粒含量差异显著, 其中 Z4 处理的黏粒释放总量达到 127.38 mg, 明显高于 J4 和 S4 处理, 分别增加了 68.85% 和 19.93%。相比之下, S4 处理的黏粒释放总量显著超过 J4, 增加了 40.79%。在 pH 值为 5.5 的淋洗液条件下, Z3 处理的黏粒释放总量显著超过 S3, 平均增加了 30.15%, 而 J3 处理与 Z3、S3 处理之间的黏粒释放总量没有显著差异。当淋洗液的 pH 值降至 4.5 时, Z2 和 S2 处理的黏粒释放总量均显著高于 J2 处理, 分别增加了 68.04% 和 103.44%, 而 Z2 和 S2 之间的差异不显著。在淋溶液 pH 值为 3.5 的条件下, 黏粒释放总量 S1 显著高于 J1 和 Z1, 增幅分别为 71.95% 和 73.06%, 而 J1 与 Z1 之间的差异不显著。在石灰性紫色土中, 相比于 J4, J3 黏粒迁移总量显著提高了 21.29%, J1、J2 则分别显著降低了 20.57%、54.56%。中性紫色土中, Z1、Z2、Z3 的黏粒迁移量均显著低于 Z4, 平均分别降低了 104.89%、55.32%、21.20%。酸性紫色土中, S1、S2、S4 之间均无显著差异, 但是这 3 种处理均显著高于 S3, 分别为 33.24%、22.97%、31.52%。淋溶总量对黏粒迁移的影响极为显著 ( $p < 0.01$ ), 土壤 pH 值显著影响黏粒迁移 ( $p < 0.05$ ), 而淋洗液 pH 值对黏粒迁移的影响不显著 ( $p > 0.05$ )。

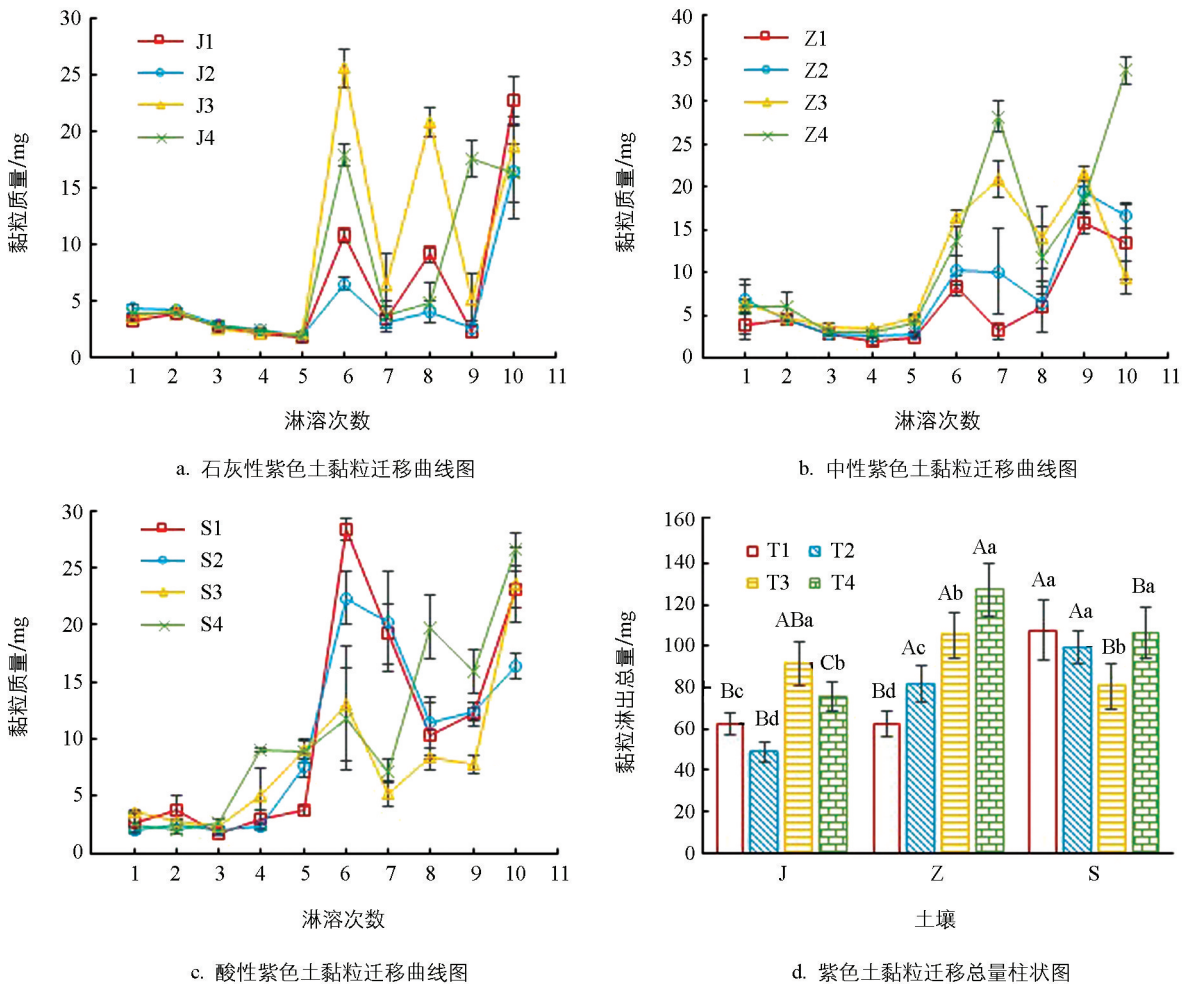


图 5 不同 pH 值淋液作用下紫色土黏粒迁移情况

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

研究结果显示,模拟酸雨淋溶下盐基离子的淋溶迁移量与土壤对酸碱的敏感性密切相关,这与前人的研究结果类似<sup>[12-14]</sup>。紫色土的盐基离子对于淋液 pH 值变化所表现出响应呈现出显著差异。在淋溶前期,土壤结构因为在经过研磨后被破坏,从而导致更容易进行盐基离子的迁移<sup>[15]</sup>。其中  $\text{Ca}^{2+}$  迁移量虽然远大于  $\text{Mg}^{2+}$ ,但两者的比例类似,两者的释放在相关分析中呈显著线性相关且两者在淋液淋洗中起主要的缓冲作用(表 2)。石灰性紫色土受酸液 pH 值的影响不大,这与王辉等<sup>[16-18]</sup>的研究一致,原因可能是当降雨酸度高于 3.5 时,因石灰性土壤本身对于酸雨具备极强的缓冲能力,使石灰性紫色土的碱性和淋液的酸性产生中和反应,导致淋液的酸性在石灰性紫色土中对于盐基离子迁移的表达不明显,使控制盐基离子迁移的主要因素是淋溶总量。有研究表明,土壤中  $\text{K}^+$  的淋出量常随着酸液 pH 值的升高而降低<sup>[13,19]</sup>。这与文中的研究规律一致,中性紫色土中  $\text{K}^+$  的迁移量随着 pH 值的升高而降低,在 pH 值为 5.5 时,达到最低值,较 Z1、Z2 显著降低了约 20%。而  $\text{Na}^+$  的迁移量则在 pH 值为 4.5 时达到最低值,中性紫色土中  $\text{Na}^+$  的迁移对于 pH 值变化的敏感性相比于  $\text{K}^+$  较低,故  $\text{Na}^+$  的淋出量没有随 pH 值的增大达到最低值。酸性紫色土因为土壤本身为酸性,所以淋液 pH 值的变化对于盐基离子的迁移并无显著影响。淋溶总量对紫色土盐基离子的迁移有极显著影响,盐基离子随土壤水分运动的离子迁移是盐基离子的主要迁移模式<sup>[20]</sup>,淋溶总量成为影响盐基离子迁移的主要因素。总体来说,3 种类型紫色土盐基离子淋失量大小均为:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ ,说明在模拟酸雨淋溶时  $\text{Ca}^{2+}$  淋失量最大,但  $\text{Mg}^{2+}$  的淋失

比例最高,  $K^+$ 、 $Na^+$  最低。中性紫色土淋失的  $K^+$  和  $Na^+$  含量均高于石灰性紫色土和酸性紫色土, 这是因为中性紫色土具有相对平衡的 pH 值, 这有利于盐基离子在土壤颗粒表面的吸附和交换, 离子交换是影响盐基离子迁移的关键过程, 土壤的阳离子交换容量(CEC)直接影响着  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  的保持和移动<sup>[21-22]</sup>。而石灰性紫色土淋出液的  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  含量均高于中性紫色土和酸性紫色土, 其原因可能是: ① 石灰性紫色土的 pH 值通常较高, 这意味着土壤中含有较多的碱性成分<sup>[23]</sup>。② 石灰性紫色土因其较高的 pH 值, 往往具有较高的阳离子交换容量(CEC)。这增强了土壤吸附和保持  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  的能力, 相对于酸性和中性土壤, 使得  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  在石灰性紫色土中更易于被水分子带出。在风干样土柱—酸液淋溶下, 盐基离子迁移量随酸液淋溶量加大而逐渐减小, 说明盐基离子释放能力随淋溶量增加而衰减。不同 pH 值紫色土释放能力较强, 在一定的淋溶量后呈线性变化, 但最终仍趋于稳定值。通过表 2 可得, 盐基离子  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  之间的迁移呈极显著线性相关( $p < 0.01$ ), 这表示在盐基离子迁移的过程中, 盐基离子间的相互作用也是应该考虑的影响因素之一。 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  之间的相关系数高达 0.962, 说明酸雨淋溶下紫色土中  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  的释放机理具有高度的相关性。土壤 pH 值对除  $Mg^{2+}$  外的其他盐基离子均呈现极显著相关( $p < 0.01$ ), 酸液 pH 值的变化虽然对  $Mg^{2+}$  的迁移没有显著影响, 但是也显示出极显著的相关性( $p < 0.01$ ), 而淋溶总量对于盐基离子的释放和迁移呈极显著的负相关( $p < 0.01$ ), 这与前人的研究结果一致<sup>[13-14,24]</sup>, 紫色土的盐基离子也会随着淋溶次数的增加, 导致盐基离子的释放能力逐步减弱, 且随酸雨酸度的影响也会逐渐降低。

研究表明, 模拟酸雨淋溶中淋溶总量对于黏粒呈极显著正相关( $p < 0.01$ ), 且对于黏粒的迁移有显著影响, 这与前人研究结果一致<sup>[25-26]</sup>, 这是由于土壤黏粒迁移的主要自然因素就是降雨量, 特别是冲刷作用下的水蚀作用, 在进行模拟降雨时, 水滴会撞击土壤表面打散土壤团聚体, 释放出细小的黏粒颗粒, 然后水流将这些黏粒颗粒从土壤表层带走, 通过土壤孔隙淋溶下来。在模拟酸雨淋溶下的黏粒迁移时, 土壤 pH 值不仅表达了显著的相关性, 还呈现了显著影响。其原因可能是因为土壤 pH 值对于原状土淋溶下的黏粒迁移有影响, 但是土壤质地与黏粒迁移有着极显著相关性( $p < 0.01$ ), 还呈现出极显著的影响(表 2), 这与许多研究结果具有一致性<sup>[27-29]</sup>。土壤质地主效应强烈的表达使不同 pH 值土壤中黏粒迁移差异性缩小, 最后导致土壤 pH 值的变化在不同土壤之间无法表达出显著差异。pH 值的变化会影响土壤溶液中阳离子和阴离子的浓度和种类, 这些离子与黏粒表面的相互作用可以改变黏粒的荷电状态, 从而影响它们的吸附和脱附行为<sup>[30-31]</sup>。土壤 pH 值改变还会影响土壤中一些矿物的溶解度, 这可能会间接影响黏粒的稳定性<sup>[32-33]</sup>。所以在模拟酸雨淋溶中, 土壤 pH 值对于黏粒具有显著影响。与此同时, 研究结果表明, 淋溶液 pH 值与黏粒的迁移呈显著负相关( $p < 0.01$ ), 但对其无显著影响。而一些学者的研究指出<sup>[12,34-35]</sup>, 随着淋液 pH 值的降低, 土壤粒径分布的变化增大, 这与本研究结果一致。

表 2 不同指标之间的相关性分析

	$K^+$	$Ca^{2+}$	$Na^+$	$Mg^{2+}$	土壤 pH 值	淋液 pH 值	淋溶次数	黏粒
$K^+$	1							
$Ca^{2+}$	0.661**	1						
$Na^+$	0.842**	0.689**	1					
$Mg^{2+}$	0.780**	0.962**	0.831**	1				
土壤 pH 值	0.159*	-0.345**	0.052	-0.231*	1			
淋液 pH 值	-0.034	-0.012	0.009**	-0.009**	0.000	1		
淋溶次数	-0.439**	-0.484**	-0.453**	-0.506**	0.004	0.004	1	
黏粒	-0.231	-0.133	-0.342	-0.143	0.138*	-0.019**	0.357**	1

注: \* 显著相关( $p < 0.05$ ); \*\* 极显著相关( $p < 0.01$ )。

### 3.2 结论

1) 研究表明,在模拟酸雨淋溶下,土壤 pH 值对盐基离子的淋失具有显著影响,石灰性紫色土中盐基离子的迁移量较酸性和中性紫色土更高;3 种紫色土淋失的盐基离子中,  $\text{Ca}^{2+}$  淋失量最为显著,而  $\text{Mg}^{2+}$  淋失速度最快,二者呈现出明显的线性相关,盐基离子淋失量大小依次为:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ ; 淋液 pH 值对于紫色土中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  迁移影响显著,且盐基离子淋失量随淋液 pH 值增加而增加。

2) 模拟淋溶试验显示,淋溶次数与紫色土黏粒迁移量之间存在显著正相关,不同类型紫色土的黏粒迁移量对淋液酸度变化的响应差异显著,尤其是酸性紫色土相较于中性和石灰性紫色土,表现出更高的黏粒淋失和迁移风险。

### 参考文献:

- [1] ZHANG J E, OUYANG Y, LING D J. Impacts of Simulated Acid Rain on Cation Leaching from the Latosol in South China [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2131-2137.
- [2] PENG S L, GUO T, LIU G C. The Effects of Arbuscular Mycorrhizal Hyphal Networks on Soil Aggregations of Purple Soil in Southwest China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 411-417.
- [3] LARSEN T, CARMICHAEL G R. Acid Rain and Acidification in China: The Importance of Base Cation Deposition [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110(1): 89-102.
- [4] 慈恩, 唐江, 连茂山, 等. 重庆市紫色土系统分类高级单元划分研究 [J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 569-584.
- [5] 何毓蓉, 郑霖, 陈学华. 中国紫色土-下篇 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 凌大炯, 章家恩, 黄倩春, 等. 模拟酸雨对砖红壤盐基离子迁移和释放的影响 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 444-450.
- [9] 刁承泰, 吕韬, 陈敏, 等. 重庆市地貌特点与城市用地 [J]. *中国土地科学*, 2004, 18(3): 35-40.
- [10] 杨存建, 刘纪远, 张增祥. 重庆市土壤侵蚀与其背景的空间分析 [J]. *水土保持学报*, 2000, 14(3): 84-87.
- [11] 施建平, 宋歌. 中国土种数据库——基于第二次土壤普查的全国性土壤数据集 [J]. *中国科学数据*, 2016, 1(2): 1-12.
- [12] 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.
- [13] 赵越, 杨金玲, 许哲, 等. 模拟酸雨淋溶下不同母质发育雏形土矿物风化中的盐基离子与硅计量关系 [J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1456-1467.
- [14] 李春培, 李雪, 汪璇, 等. 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.
- [15] 解文艳, 樊贵盛. 土壤结构对土壤入渗能力的影响 [J]. *太原理工大学学报*, 2004, 35(4): 381-384.
- [16] 王辉, 龚恩磊, 刘常, 等. 模拟酸雨多次淋溶对红壤入渗特性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 127-130, 164.
- [17] LING D J, ZHANG J E, OUYANG Y, et al. Role of Simulated Acid Rain on Cations, Phosphorus and Organic Matter Dynamics in Latosol [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 52(1): 16-21.
- [18] 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.
- [19] 卓小可, 程中华, 张弛, 等. 酸沉降背景下太湖流域碱基离子流失特征模拟研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 666-674.
- [20] HU A Y, YU Z Y, LIU X H, et al. The Effects of Irrigation and Fertilization on the Migration and Transformation Processes of Main Chemical Components in the Soil Profile [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(6): 2631-2648.
- [21] ZHANG Y G, XU Z W, JIANG D M, et al. Soil Exchangeable Base Cations along a Chronosequence of Caragana Microphylla Plantation in a Semi-Arid Sandy Land, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(1): 42-50.

- [22] ROBERTSON G P, SOLLINS P, ELLIS B G, et al. Exchangeable Ions, pH and Cation Exchange Capacity [M] // Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research. Oxford: Oxford University Press, 1999: 106-114.
- [23] THOMAS G W. Soil pH and Soil Acidity [M] // Methods of Soil Analysis. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 2018: 475-490.
- [24] 郑梅迎, 彭玉龙, 刘明宏, 等. 模拟酸雨下生物炭添加对土壤盐基离子淋失的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 163-173.
- [25] 张佛熠, 承勇, 阳雅荧, 等. 南昌不同城市化强度土壤粒度组成和分形特征及其影响因素 [J]. 土壤, 2023, 55(5): 1138-1145.
- [26] 周雷, 曲潇琳, 周涛, 等. 宁夏土壤颗粒组成特点及其影响因素分析 [J]. 中国农业科学, 2023, 56(21): 4272-4287.
- [27] ABBASPOUR-GILANDEH Y, HASANKHANI-GHAVAM F, SHAHGOLI G, et al. Investigation of the Effect of Soil Moisture Content, Contact Surface Material and Soil Texture on Soil Friction and Soil Adhesion Coefficients [J]. Acta Technologica Agriculturae, 2018, 21(2): 44-50.
- [28] MINASNY B, MCBRATNEY A B. The Australian Soil Texture Boomerang: A Comparison of the Australian and USDA/FAO Soil Particle-Size Classification Systems [J]. Soil Research, 2001, 39(6): 1443.
- [29] WANG J R, O'NEILL P E, JACKSON T J, et al. Multifrequency Measurements of the Effects of Soil Moisture, Soil Texture and Surface Roughness [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1983, 21(1): 44-51.
- [30] RUEHLMANN J, KÖRSCHENS M. Soil Particle Density as Affected by Soil Texture and Soil Organic Matter: Predicting the Effect of the Mineral Composition of Particle-Size Fractions [J]. Geoderma, 2020, 375: 114543.
- [31] HADDIX M L, GREGORICH E G, HELGASON B L, et al. Climate, Carbon Content and Soil Texture Control the Independent Formation and Persistence of Particulate and Mineral-Associated Organic Matter in Soil [J]. Geoderma, 2020, 363: 114160.
- [32] 李强, 文唤成, 胡彩荣. 土壤 pH 值的测定国际国内方法差异研究 [J]. 土壤, 2007, 39(3): 488-491.
- [33] SHI W J, LIU J Y, DU Z P, et al. Surface Modelling of Soil pH [J]. Geoderma, 2009, 150(1/2): 113-119.
- [34] 刘鹤, 姚华彦, 崔强, 等. 不同 pH 值溶液下岩石崩解特性试验研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(9): 1218-1223, 1273.
- [35] RICHARDS B K, STEENHUIS T S, PEVERLY J H, et al. Effect of Sludge-Processing Mode, Soil Texture and Soil pH on Metal Mobility in Undisturbed Soil Columns under Accelerated Loading [J]. Environmental Pollution, 2000, 109(2): 327-346.

责任编辑 包颖