

电渗析与酸淋洗模拟紫色土酸化的效果比较

王朋顺, 刘莉, 李忠意, 严宁珍, 程永毅

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 为了比较电渗析与酸淋洗试验模拟紫色土酸化的效果, 在重庆地区采集了不同 pH(5.00 和 7.06)的 2 种紫色土, 分别进行不同天数(1, 2, 5, 7, 10 天)的电渗析和酸淋洗试验处理, 并分析了试验处理前后土壤的酸度特征和交换性盐基成分含量变化。结果表明, 在整个 10 天的淋溶处理过程中, 2 种紫色土的 pH 均无显著变化, 说明紫色土具有一定的酸缓冲能力, 短期的酸雨淋溶不能实现紫色土的严重酸化。而采用电渗析处理 10 天后, 中性紫色土和酸性紫色土的 pH 分别降低 3.4 和 1.1 个单位。在整个电渗析处理过程中, 土壤的交换性酸含量显著升高, 盐基离子大量淋失。电渗析可以实现对紫色土的快速酸化处理。2 种紫色土中, 电渗析处理后中性紫色土的酸化程度大于酸性紫色土。这是由于中性紫色土的表面负电荷量更高, 导致更多致酸离子吸附在土壤胶体表面, 最终造成中性紫色土的酸化程度更加严重。因此, 电渗析处理比酸雨淋溶处理对紫色土酸化效果更好, 且可用于紫色土的酸化机理研究。进一步结合 2 种方法的技术可操作性, 认为电渗析法是研究紫色土酸化问题的一种有效技术手段。

关键词: 电渗析; 酸淋洗; 紫色土; 土壤酸化

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0348-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.049

Effect of Electrodialysis and Acid Leaching on the Acidification of Purple Soil

WANG Pengshun, LIU Li, LI Zhongyi, YAN Ningzhen, CHENG Yongyi

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716)

Abstract: In order to better understand the effects of electrodialysis and acid leaching treatments on the acidification process of purple soils, an acid purple soil with the pH value of 5.00 and a neutral purple soil with the pH value of 7.06 collected in Chongqing were treated by electrodialysis and acid leaching treatments for different days (1, 2, 5, 7 and 10 days, respectively). The variation of soil acidity and exchangeable base cations during these treatment processes were analyzed. The results showed that the pH values of both acid purple soil and neutral purple did not change significantly. This could be attributed to the high acid buffering capacity. The purple soils could not be acidified in a short-term acid rain leaching. Differently, after 10-day electrodialysis treatment, the pH values of acid purple soil and neutral purple soil decreased by 3.4 and 1.1, respectively. In the electrodialysis process, the soil exchangeable acidity increased significantly and the content of exchangeable base cations decreased greatly. It was indicated that electrodialysis could be used to rapidly acidify purple soil. The acidification degree of neutral purple soil after electrodialysis treatment was higher than that of acid purple soil. This was because the amount of negative surface charge of neutral purple soil was higher than that of acid purple soil, which caused that more acidic ions (H^+ and Al^{3+}) were adsorbed on the surface of neutral soil, correspondingly, resulting in the increased acidified degree of neutral purple soil. Therefore, compared to acid leaching treatment, electrodialysis treatment was a more effective way to acidify the purple soil in a short time. It also could help us to reveal the acidification mechanism of purple soil. After taking the feasibility of electrodialysis and acid leaching treatments into account, it was concluded that electrodialysis was an effective technique to study the acidification of purple soil.

Keywords: electrodialysis; acid leaching; purple soil; soil acidification

收稿日期: 2019-08-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(41701256); 中国博士后科学基金项目(2017M610584, 2018T110938); 重庆市博士后项目(Xm2016076)

第一作者: 王朋顺(1994—), 男, 安徽宿州人, 主要从事土壤化学研究。E-mail: 18166592715@163.com

通信作者: 李忠意(1987—), 男, 四川宜宾人, 主要从事土壤化学研究。E-mail: zhongyili@swu.edu.cn

土壤酸化是指土壤的 pH 降低、交换性酸含量增加并伴随着盐基离子的降低的土壤发生发育过程,人类活动大大加剧了这一过程^[1]。土壤酸化严重危害着农林业生产与环境,活化土壤中的铝,并使其进入土壤溶液,危害植物根系的生长,产生铝毒^[2]。同时,交换酸的增加还加速了土壤盐基离子等养分的流失,降低土壤肥力^[3]。有研究^[4]表明,土壤酸化显著降低了高粱的产量,pH 降至 5.42 时,高粱减产 10%,当酸化进一步加剧,高粱的产量降低更严重。同时,土壤酸化还会导致土壤中金属离子的活性增加,增加重金属污染。随着 pH 的降低,土壤 Cd 的有效性显著升高。在 pH 为 5 的土壤中,Cd 的有效性是其在 pH 为 7 时的 2 倍,导致植物对这些有害重金属的吸收量增加^[5]。

紫色土发育于紫色母岩,成土时间短,风化程度较低,在我国西南地区有较大面积的分布^[6]。有研究^[7]表明,过去 30 年间,在酸沉降的影响下,紫色土出现了一定程度的酸化。氮肥的过量施用也是造成紫色土酸化的一个重要原因^[8]。作为一种非地带性土壤,紫色土的发育程度较低,含有丰富的原生矿物以及较高的盐基离子。所以紫色土的酸化过程以及机理必然不同于地带性的黄壤和红壤。目前,紫色土的酸化机理仍不明确,所以研究紫色土的酸化问题至关重要。

土壤酸化问题^[9-10]是土壤与环境科学领域的重要研究内容。但土壤酸化的过程相对较慢,即使在酸沉降和氮肥施用等农业措施影响下短期内也难以观察到 pH 及其化学性质的明显变化。所以研究土壤酸化需要长时间的定位监测,如洛桑实验站监测林地土壤 pH 在 110 年间由 6.2 降为 3.8,草地土壤 pH 由 5.2 降至 4.2^[11]。这些原位监测土壤酸化所需的时间极长。所以,为了快速了解土壤的酸化过程,通常采用人工添加致酸离子模拟土壤酸化。传统上采用向土壤中添加不同种类及数量的肥料或者以酸雨淋溶的形式使土壤达到不同的 pH。于伟家等^[12]通过施用不同量的氮肥来模拟土壤酸化,并且发现无机碳的加入可以缓解由氮肥加入导致的酸化;凌大炯等^[13]通过模拟酸雨淋溶试验研究酸雨影响下,砖红壤盐基

离子的迁移和释放规律;Liao 等^[14]通过模拟酸雨淋溶研究酸化土壤的金属离子释放。除模拟酸雨淋溶外,电渗析法近年来被用到了土壤酸化的研究中。该方法是将土壤置于外加直流电场的作用下,土壤不断损失表面所吸附的盐基阳离子并逐渐被致酸离子所饱和,从而实现模拟酸化土壤的目的^[9]。2012 年,中科院南京土壤研究所李九玉等^[15]首次就电渗析法模拟土壤酸化申请了国家发明专利。随后有少量科研人员采用该方法用于土壤酸化研究。程永毅等^[16]利用电渗析法研究紫色土、红壤和黄壤的酸化特征;韦杨嫣等^[17]利用电动模拟土壤酸化与盐基离子释放,快速的制备了不同 pH 的土壤样品。

目前,利用电渗析法研究土壤酸化的报道较少,将电渗析法与传统的模拟土壤酸化的方法对比更是鲜有报道。本研究通过对 2 种紫色土(酸性和中性)分别进行电渗析试验以及酸淋洗试验,探讨 2 种方法模拟紫色土酸化过程的效果,以期为研究紫色土的酸化问题提供有效的技术手段。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集与测定

采集了 2 种不同 pH 的紫色土(酸性和中性)进行模拟酸化试验。供试酸性紫色土(pH 5.00)采自重庆市江津区黄庄,中性紫色土(pH 7.06)采自重庆市北碚区西南大学农场。2 种土壤的成土母质均为中生代侏罗系沙溪庙组(J2s)的紫色泥岩,按土壤系统分类可划归为雏形土纲的紫色湿润雏形土(purpludic cambosols)。土壤样品采自耕层,于室内风干后过筛,然后用于土壤理化性质分析和模拟酸化试验。土壤理化性质分析指标包括 pH、交换性酸(交换性 H⁺ 和交换性 Al³⁺)、交换性盐基离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)和有效阳离子交换量(ECEC)。其中土壤 pH 采用电位法(土水比 1:2.5)测定;交换性酸(交换性 H⁺ 和交换性 Al³⁺)含量采用 KCl 淋溶中和滴定法测定;交换性 K⁺、Na⁺ 含量采用 NH₄OAc 交换火焰光度法测定;交换性 Ca²⁺、交换性 Mg²⁺ 含量采用 NH₄OAc 交换原子吸收分光光度法(ZA3300,日本日立)测定。供试土壤基本性质见表 1。

表 1 供试紫色土的 pH、交换性酸和交换性盐基离子含量

供试土样	pH	交换性酸/	交换性 H ⁺ /	交换性 Al ³⁺ /	交换性盐基离子/(cmol·kg ⁻¹)				ECEC/
		(cmol·kg ⁻¹)	(cmol·kg ⁻¹)	(cmol·kg ⁻¹)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(cmol·kg ⁻¹)
中性紫色土	7.06	0.130	0.130	—	0.486	0.232	40.1	3.81	44.7
酸性紫色土	5.00	2.60	0.565	2.03	0.460	0.152	27.6	2.94	33.8

1.2 电渗析试验方法

电渗析法可以使土壤快速酸化^[18]。试验于 2018 年 6 月开始,试验装置见图 1。样品室中加入 50 g 过

2 mm 筛的土壤和 1 L 去离子水后搅拌均匀,阳极室和阴极室分别加入 1 L 去离子水;然后进行电渗析试验,外加直流电压为 300 V,即电压梯度为 15 V/cm。

为加快电渗析速度,每 24 h 更换阴极室和阳极室的电渗析液为去离子水。分别在第 1,2,5,7,10 天结束电渗析试验。取出土壤悬液,在红外加热器烘干后,过筛,并测定处理后的土壤样品的 pH、交换性酸和交换性盐基离子。

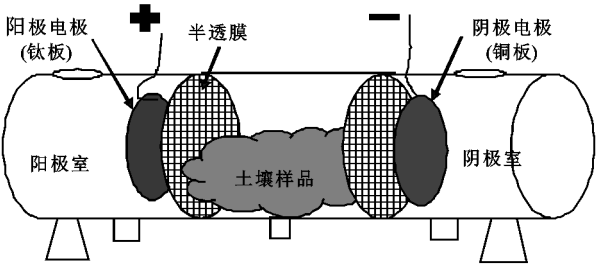


图 1 电渗析模拟土壤酸化的装置结构示意图

1.3 酸淋洗试验方法

采用模拟的酸雨溶液对紫色土进行淋洗(图 2)。将 50 g 过 2 mm 筛的土壤添加到内径为 2.6 cm 和长度为 10 cm(填充的土壤长度约 8 cm)的层析柱中。采用蠕动泵将模拟的酸雨溶液自下而上注入土柱,调节蠕动泵转速以控制酸雨在土柱中的流速为 1 mm/min。模拟酸雨的 pH 为 4.0,酸雨成分由 HNO_3 和 H_2SO_4 按体积比 1:4 混合而成。分别将土柱连续淋洗 1,2,5,7,10 天后,将淋洗后的土壤取出并在室内风干,测定淋洗后土壤样品的 pH、交换性酸和交换性盐基离子。

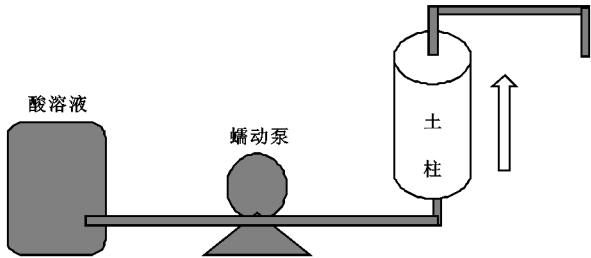


图 2 酸淋洗模拟土壤酸化的装置结构示意图

1.4 数据处理与分析

交换性 Al^{3+} = 交换性酸 - 交换性 H^+ ; 交换性盐基总量 = 交换性 K^+ + 交换性 Na^+ + 交换性 Ca^{2+} + 交换性 Mg^{2+} ; ECEC = 交换性酸 + 交换性盐基总量。

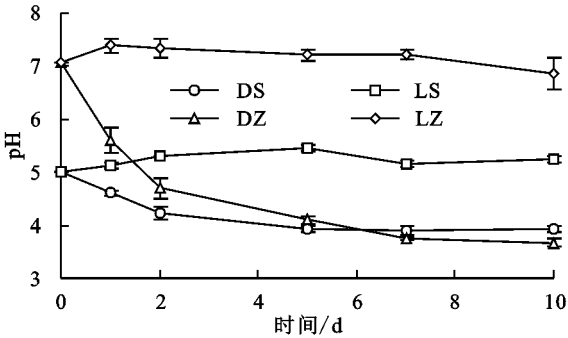
利用 Excel 和 SPSS 25 软件对数据进行统计分析和作图。所有处理均进行了 3 次平行试验,文中数据表示方式为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 土壤酸度指标变化

电渗析和淋溶处理后供试土壤的 pH 见图 3。酸性紫色土和中性紫色土经电渗析处理后,土壤的 pH 均随着电渗析处理天数的增加而不断降低。经过 10 天的处理后,中性紫色土和酸性紫色土都达到显著酸化的水平, pH 分别为 3.6 和 3.9。与初始 pH 相比,2 种紫色土的 pH 分别降低 3.4 和 1.1。可见,2 种酸度不同的紫色土在经过短时间的电渗析处理后

均能达到较严重的酸化程度。而经过模拟酸雨淋洗处理的紫色土 pH 在不同淋溶时间内并没有显著的变化,一直处于较为稳定的水平。土壤 pH 代表土壤的活性酸度水平,而交换性酸含量表示土壤的潜性酸度水平。从图 4 可以看出,在 10 天的试验处理时间内,电渗析处理后的紫色土,其交换性酸含量显著增加,而淋溶处理对土壤交换性酸含量影响不显著。随着电渗析时间的增加,酸性紫色土的交换性酸含量在前 5 天的时间内呈指数形式增加,随后缓慢增加。中性紫色土的交换性酸含量在前 7 天的时间内呈指数形式增加,随后缓慢增加。经过 10 天电渗析处理后,中性紫色土和酸性紫色土的交换性酸含量分别从 $(0.130 \pm 0.02) \text{ cmol/kg}$ 增加至 $(18.900 \pm 0.88) \text{ cmol/kg}$ 以及 $(2.600 \pm 0.06) \text{ cmol/kg}$ 增加至 $(17.900 \pm 0.29) \text{ cmol/kg}$ 。而在 10 天的淋溶处理后,2 种紫色土的交换性酸含量分别为 $(0.335 \pm 0.01) \text{ cmol/kg}$ 和 $(3.040 \pm 0.55) \text{ cmol/kg}$ 。所以,相比于淋溶处理,电渗析处理能够在短时间内极显著地增加紫色土的活性酸和潜性酸含量。汪吉东等^[19]使用 pH 4.5 的酸液淋洗土壤 200 天后表层土壤 pH 下降 0.6,使用 pH 2.5 的酸液淋溶也仅使土壤 pH 的降低 0.8;Li 等^[18]对恒电荷土壤进行电渗析处理后使土壤的 pH 均值从 6.34 降低至 4.24,土壤 pH 的降低幅度达 2.10。可见,相比于酸雨淋溶处理,电渗析处理酸化土壤的能力更强。



注:DS 为电渗析处理的酸性紫色土;LS 为酸淋洗的酸性紫色土;DZ 为电渗析处理的中性紫色土;LZ 为酸淋洗处理的中性紫色土。下同。

图 3 电渗析和酸淋洗处理后土壤的 pH 变化

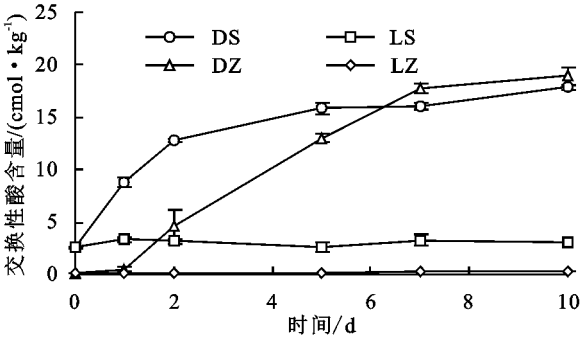


图 4 电渗析和酸淋洗处理后土壤的交换性酸含量变化
土壤的交换性酸由交换性 H^+ 、 Al^{3+} 组成。在前

2 天的电渗析处理中,紫色土的交换性 H^+ 、 Al^{3+} 含量随着电渗析试验的进行而迅速增加(图 5)。而在随后的处理中,紫色土的交换性 H^+ 含量趋于稳定,交换性 Al^{3+} 持续增加,其中中性紫色土增加更快。这是由于当土壤黏粒表面吸附的 H^+ 达到一定数量后, H^+ 会破坏土壤矿物质的铝八面体并释放出 Al^{3+} ,造成土壤的交换性 Al^{3+} 大量增加。另外,从图 3~图 5 还可以看出,在电渗析处理的前 5 天,中性紫色土的 pH 和交换性酸含量均低于酸性紫色土。这可能是由于土壤的初始酸化程度受土壤交换性盐基离子含量影响较大^[20]。中性紫色土的 pH 较高,盐基离子含量更加丰富(表 1),能对土壤酸度起到较好的缓冲作用。而随着电渗析试验的进一步进行,土壤酸化程度继续增加,土壤的表面负电荷量开始对土壤酸化起着重要影响^[16]。本研究中,中性紫色土的 ECEC 值高于酸性紫色土(表 1),所以中性紫色土的黏粒表面能够吸附更多的致酸离子(H^+ 和 Al^{3+}),最终造成土壤的酸化程度更加严重。Li 等^[9]在采用电渗析法研究高岭石和黄壤的酸化特征时也得到类似的结果。在他们的研究中,供试土壤高岭石和黄壤的初始 pH 分别为 6.44 和 6.74,CEC 值分别为 6.44, 21.8 cmol/kg。黄壤的表面负电荷量远大于高岭石。电渗析后,黄壤的 pH 和交换性酸含量约为 4.5,17.0 cmol/kg,高岭石的 pH 和交换性酸含量约为 4.7,3.6 cmol/kg,黄壤的酸化程度显著高于高岭石。可见,土壤的表面负电荷量对土壤的潜在酸化程度具有重要影响,高表面负电荷量能够增加土壤的潜在酸化程度。

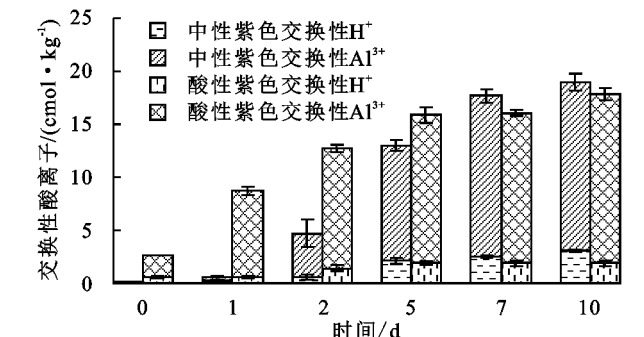


图 5 电渗析处理后土壤的交换性 Al^{3+} 和交换性 H^+ 含量变化

2.2 土壤交换性盐基成分变化

2 种模拟土壤酸化过程的试验在不同处理时间时土壤的交换性盐基离子含量(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})见图 6。电渗析处理的紫色土交换性盐基离子含量均显著降低,4 种盐基离子降低程度的大小关系为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ 。其中电渗析试验的酸性紫色土在前 2 天处理中,交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 快速降低,而中性紫色土的这 3 种盐基离子含量在前 5 天的处理中均处于快速降低过程。随后,土壤的盐基离子含量趋于稳定。可见由于其盐基离子含量较

高,中性紫色土的盐基离子释放时间更长。具有更高盐基离子的中性紫色土的酸缓冲性能更强,对土壤酸化的抵抗能力更强^[20]。值得注意的是紫色土(尤其是中性紫色土)的交换性 Mg^{2+} 在电渗析的初始阶段含量明显上升。其原因可能在于紫色土的矿物组成。紫色土发育程度较浅,土壤中蒙脱石和云母类层状硅酸盐矿物含量丰富^[21]。这些矿物镁含量较高且易于风化^[22]。所以初始的电渗析酸化过程中,矿物风化释放出来的 Mg^{2+} 被土壤胶体表面吸附并成为可交换性 Mg^{2+} ,从而导致中性紫色土初始的酸化过程中交换性 Mg^{2+} 含量升高。

淋溶处理后的紫色土,其盐基离子的变化趋势和电渗析处理相似,但是其盐基离子总淋失量显著低于电渗析处理,说明其使土壤酸化的能力弱于电渗析处理。2 种试验处理紫色土交换性 Na^+ 的变化趋势及淋失总量差异不显著,可能是由于 Na^+ 在土壤中大多以可溶和易溶的状态存在,所以淋溶处理的土壤交换性 Na^+ 含量与电渗析处理的变化趋势较为接近。刘俐等^[23]模拟酸雨淋溶时也发现, Na^+ 的淋失量受酸雨的酸度影响很小。淋溶处理 10 天后,中性紫色土的交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量分别降低 0.103,0.118,6.670,0.259 cmol/kg;酸性紫色土的交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量分别降低 0.153, 0.072,5.870,-0.241 cmol/kg。尽管模拟酸雨淋溶对与土壤 pH 和土壤交换性酸没有显著的影响(图 3、图 4),但是其盐基离子仍出现明显的淋失。这可能是源于盐基离子与 H^+ 的交换作用对土壤的酸化起到一定的缓冲作用。电渗析处理 10 天以后,中性紫色土的交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量分别降低 0.224,0.112,38.600,1.730 cmol/kg;酸性紫色土的交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量分别降低 0.309,0.065, 23.600,2.370 cmol/kg。可以看出电渗析处理的紫色土的盐基离子淋失量明显的高于淋溶处理,尤其是 Ca^{2+} 淋失量最大,远高于其他盐基离子。

2.3 技术可操作性比较

电渗析法模拟土壤酸化的机理是土壤胶体表面所吸附的阴阳离子在外加直流电场的作用下向两极移动。此时,土壤胶体表面的盐基阳离子被水解离出的氢离子取代,并逐渐达到 H^+ 饱和,进一步实现氢铝转换,从而达到快速酸化土壤的目的。电渗析所模拟的土壤酸化过程与土壤实际的酸化过程相同^[24]。电渗析过程产生的 H^+ 就相当于进入土壤的外源性 H^+ ,进而加速土壤的酸化,外源 H^+ 在土壤中的增加是土壤发生酸化的根本原因^[25],所以电渗析法是可以真实地模拟土壤的酸化过程。其模拟土壤酸化的过程是一种强化了了的自然淋溶过程。电渗析法所采

用的试验装置和试验方法均较为简单,试验装置由样品室、阴极室和阳极室构成,试验时只需定时更换阴极室和阳极室的去离子水,以加速电渗析速度和防止由于电流密度过大造成设备损坏。土壤的酸化速度可以通过调节外加电场的大小来调控。在较高的直流电压作用下可实现土壤的快速酸化,并达到极限酸化程度。土壤固相表面所吸附的盐基离子会在外加电场的作用下往阴极室迁移,因此可定期测定阴极室

中盐基离子的含量,从而实现对土壤酸化过程中盐基离子释放过程的动态监测。但是,电渗析试验只能对土壤酸化过程中的 H^+ 与盐基离子交换过程和氢铝转化过程开展研究。适用于在简单体系中研究土壤的酸化机理,而不能模拟实际生产中土壤复杂的酸化过程,如酸沉降或者过量氮肥施用所引起的土壤酸化。因为这些过程涉及微生物活动,氧化还原反应及多组分的离子竞争吸附交换过程^[26-28]。

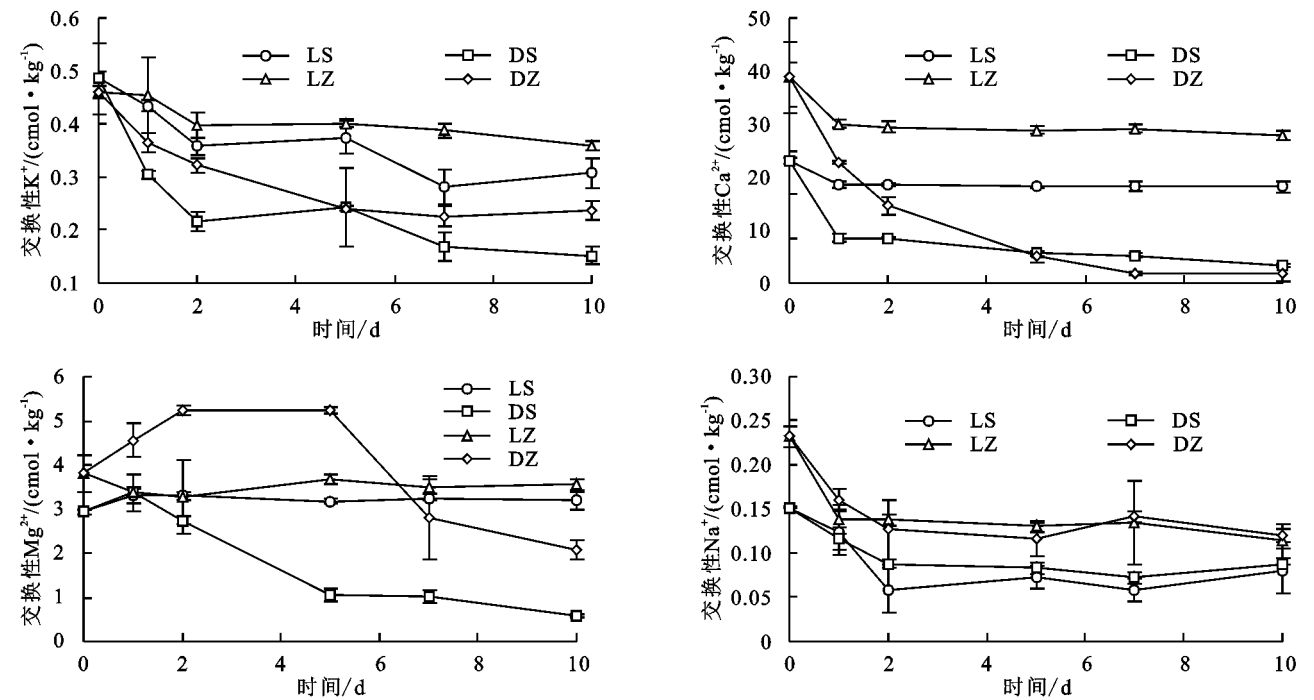


图 6 电渗析和酸淋洗处理对土壤交换性盐基离子含量的影响

酸淋洗试验是模拟酸雨等酸沉降对土壤酸化的影响。一般通过土柱自上而下直接淋溶或通过蠕动泵控制溶液自下而上进行淋溶,以研究各种条件下 H^+ 随径流进入土壤后对土壤酸化过程的影响。模拟酸雨淋溶试验可以模拟土壤受到酸雨等胁迫产生的影响,如外源 H^+ 的进入和水的淋洗实际情况在土壤内部发生的反应,从而模拟土壤的酸化过程。可以通过控制酸的浓度和淋溶速率来调节酸化的速率,通过分析淋出液的元素组成也可分析土壤在酸化的盐基离子释放过程,如汪吉东等^[19]采用不同 pH 的降雨对水稻土酸化的影响,而赵越等^[29]采用酸雨淋溶研究土壤酸化过程中矿物风化与盐基离子的释放。但是由于存在土壤性质差异,相同填充度土壤间的淋出速率也不尽相同,土壤的淋出速率难以掌控。在淋溶过程中土壤颗粒会随水移动,使土壤结构改变和土壤孔径堵塞,导致淋出速率发生改变或者淋溶无法继续进行。本研究的淋溶试验中曾发生了土壤出现裂隙以及溶液渗漏等问题,其原因可能是由于淋洗过程中土壤孔隙度变小,土壤体积减少,淋洗液无法及时淋出,下层积水,部分土壤在重力作用下下降,从而使

得土壤出现裂隙。如果长时间不能及时淋出,淋出孔堵塞,土柱溶液可能会出现渗漏等问题。此外,有些研究者采用间歇式的土柱淋溶以模拟非连续降雨条件下的酸雨淋溶^[19,26,30]。在这种条件下,土体往往会因为干湿收缩膨胀作用与柱壁间形成较大的缝隙(边际效应),造成淋溶液直接经缝隙流过土柱,而没有达到淋溶土体的目的。

可见,电渗析和酸淋洗试验均有各自的优缺点和适用范围。本研究的结果表明,电渗析法的试验可控程度更好,短时间内可实现土壤的快速酸化,而酸淋溶法短期难以实现土壤的严重酸化。因此,电渗析法可用于快速制备不同酸化程度的土壤和研究土壤在快速酸化过程中的酸化机理。

3 结论

(1) 相对于模拟酸雨淋溶试验处理,电渗析试验处理在极短的时间内显著地增加了紫色土的活性酸和潜性酸含量,同时使土壤的交换性盐基离子含量降低。表明电渗析处理相比于酸雨淋溶处理可以更好地实现土壤的快速酸化,并能使土壤达到极限酸化程度。

(2) 初始酸化程度极低的中性紫色土由于 ECEC

含量(表面负电荷量)更高,土壤胶体表面可吸附的致酸离子更多。因此,电渗析处理后中性紫色土的酸化程度反而大于酸性紫色土。说明电渗析法在研究紫色土酸化机理方面能够提供一定的帮助。

参考文献:

- [1] 徐仁扣.土壤酸化及其调控研究进展[J].土壤,2015,47(2):238-244.
- [2] Zhao X Q, Chen R F, Shen R F. Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils[J].Soil Science,2014,179(10/11):503-513.
- [3] Zhu Q C, Vries D W, Liu X, et al. The contribution of atmospheric deposition and forest harvesting to forest soil acidification in China since 1980 [J]. Atmospheric Environment,2016,146:215-222.
- [4] Butchee K, Arnall D B, Sutradhar A, et al. Determining Critical Soil pH for Grain Sorghum Production[J]. International Journal of Agronomy, 2012, 2012:1-6.
- [5] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J].Environmental Science and Technology,2015,49(2):750-759.
- [6] 李忠意,程永毅,杨剑虹.重庆地区中性紫色土酸化特征[J].水土保持学报,2012,26(6):234-237.
- [7] Duan L, Chen X, Ma X, et al. Atmospheric S and N deposition relates to increasing riverine transport of S and N in southwest China: Implications for soil acidification[J].Environmental Pollution,2016,218:1191-1199.
- [8] 汪文强,王子芳,高明,等.施氮对紫色土交换性酸及盐基饱和度的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):138-142.
- [9] Li J Y, Xu R K. Inhibition of acidification of kaolinite and an Alfisol by aluminum oxides through electrical double-layer interaction and coating[J].European Journal of Soil Science,2013,64:110-120.
- [10] Yuan J H, Xu R K, Qian W, et al. Comparison of the ameliorating effects on an acidic Ultisol between four crop straws and their biochars[J].Journal of Soils and Sediments,2011,11:741-750.
- [11] Blake L, Goulding K W T, Mott C J B, et al. Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodland and grass at Rothamsted Experimental Station, UK[J].European Journal of Soil Science,2010,50(3):401-412.
- [12] 于伟家,李雪松,陈竹君,等.氮肥对不同无机碳含量土壤二氧化碳释放的影响[J].应用生态学报,2018,29(8):2493-2500.
- [13] 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.
- [14] Liao B H, Guo Z H, Zeng Q R, et al. Effects of acid rain on competitive releases of Cd, Cu, and Zn from two natural soils and two contaminated soils in Hunan, China[J].Water, Air, and Soil Pollution: Focus,2007,7(1/3):151-161.
- [15] 李九玉,徐仁扣.一种模拟土壤自然酸化的方法:中国, CN102580539A[P].2012.
- [16] 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.
- [17] 韦杨嫣,卢升高.电动模拟土壤酸化及其交换性离子组成变化[J].土壤通报,2017,48(3):618-622.
- [18] Li J Y, Xu R K, Zhang H. Iron oxides serve as natural anti-acidification agents in highly weathered soils[J]. Journal of Soils and Sediments,2012,12(6):876-887.
- [19] 汪吉东,高秀美,陈丹艳,等.不同 pH 降雨淋溶对原状水稻土土壤酸化的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):118-122.
- [20] Yang X D, Ni K, Shi Y Z, et al. Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2018,252:74-82.
- [21] 王朋顺,李忠意,冯勃,等.微地形下紫色土的矿物组成和 pH 的耦合特征[J].水土保持学报,2018,32(4):310-314.
- [22] 席承藩.土壤分类学[M].北京:中国农业出版社,1994:238-243.
- [23] 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,2008,2:49-55.
- [24] 范庆锋,张玉龙,陈重,等.保护地土壤酸度特征及酸化机制研究[J].土壤学报,2009,46(3):466-471.
- [25] Breemen N V, Driscoll C T, Mulder J. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters[J].Nature, 1984,307(5952):599-604.
- [26] Cai J P, Luo W T, Liu H Y. Precipitation-mediated responses of soil acid buffering capacity to long-term nitrogen addition in a semi-arid grassland[J]. Atmospheric Environment,2017,170:312-318.
- [27] Mao Q G, Lu X K, Zhou K J, et al. Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in an N-rich tropical forest[J].Geoderma,2017,285:57-63.
- [28] Chen W Q, Xu R, Hu T M, et al. Soil-mediated effects of acidification as the major driver of species loss following N enrichment in a semi-arid grassland [J].Plant and Soil,2017,419(1/2):541-556.
- [29] 赵越,杨金玲,董岳,等.模拟酸雨淋溶下强风化土壤矿物风化计量关系研究[J].土壤学报,2019,56(2):310-319.
- [30] 刘志彦,杨俊兴,周炎武,等.模拟酸雨对红树林底泥中营养元素及 Cu、Zn 分布的影响[J].生态学报,2016,36(19):6209-6217.