

文章编号:1000-582X(2010)03-092-07

模拟酸雨对三峡库区土壤中铝溶出及 不同土壤缓冲性能的影响

刘 莉^{a,b}, 周志明^c, 林 勇^c, 卢义玉^{a,b}

(重庆大学 a. 资源及环境科学学院; b. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验;
c. 化学化工学院, 重庆 400044)

摘 要:采用室内模拟酸雨土柱淋溶实验,研究了酸雨对三峡库区 4 种典型土壤铝离子的淋失规律。研究表明,长时间受酸雨淋洗,土壤对酸雨的缓冲性能降低,且酸雨 pH 值越低,对土壤酸化影响越大。土壤铝离子的淋容量随酸雨 pH 值下降而上升,在 $\text{pH} \geq 3.5$ 的酸雨作用下,土壤中铝离子的淋容量较少;而当酸雨 $\text{pH} = 2.50$ 时,铝离子的淋容量骤然升高;同时,经酸雨淋洗后土壤中交换性铝的含量发生了改变(红棕紫泥除外),酸雨 pH 值越低变化越明显。

关键词:模拟酸雨;缓冲性能;淋溶实验;土壤;铝离子;交换性铝

中图分类号: X131.3

文献标志码: A

Effects of simulated acid rain on the release of Al^{3+} in typical soils from Three Gorges Reservoir region

LIU Li^{a,b}, ZHOU Zhi-ming^c, LIN Yong^c, LU Yi-yu^{a,b}

(a. College of Resources and Environment Science; b. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education; c. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The releasing pattern of Al^{3+} in different horizons in four types of typical soils, which samples were collected from the Three Gorges Reservoir Region, is studied by simulated acid rain leaching of soil columns equipment indoor. The results indicate that the buffering capacity of the tested soils against acid rain is weakened after a long time of leaching, and acid rain of a lower pH presents a stronger impact on the acidification of the soil. The leaching amount of Al^{3+} in four types of typical soils increases with the decline of acid rain pH value. The leaching quantities are low while the pH value is equal or greater than 3.50 levels, but increase remarkably while the pH is 2.50. Meantime, leaching of simulated acid rain changes the concentration of exchangeable Al^{3+} in soil (except for red-brown purplish soil). These changes are more remarkable in soils with the pH decrease of simulated acid rain.

Key words: simulated acid rain; buffering; leaching tests; soil; Al^{3+} ; exchangeable Al^{3+}

土壤中的铝主要存在于铝硅酸盐矿物的晶格中,如长石、云母等;其他的铝则以水溶性铝、交换态铝和有机配合态铝等化学形态存在^[1-2]。酸雨对

土壤的酸化将导致铝的活化和释放,这势必破坏土壤的结构和性质,使得土壤对酸雨的缓冲性能降低,并最终导致植物生存的生态环境受到影响。因

收稿日期:2009-10-14

基金项目:教育部重点课题资助项目(104156)

作者简介:刘莉(1971-),女,重庆大学副教授,主要从事环境科学及工程方向研究,(E-mail)zhliuli@cqu.edu.cn。

此,酸雨对土壤中铝溶出的影响已受到了研究者的广泛关注^[3-8]。刘俐等^[9]的研究结果指出当酸雨的pH在3.0~5.6时,红壤的铝释放量很小,但当pH值低于3.0时,就会有大量的铝溶出;郭景恒等^[10]研究了酸性土壤铝的释放规律。虽然已有不少相关研究,但是不同地区或者同一地区的不同类型土壤,其中的铝迁移活化都存在各自特点,并且三峡库区由于库区蓄水,将改变其原有环境,酸雨对三峡库区土壤的影响也会变得更加突出。因此,研究酸雨对三峡库区土壤的酸化机理,加强防止酸雨淋洗下土壤中铝溶出的研究有着重要的现实意义。

笔者在广泛调查采样的基础上,采用模拟酸雨淋溶实验研究了酸雨严重的三峡库区^[11]4种典型土

壤(黄壤、灰棕紫泥、红棕紫泥、红紫泥)铝的淋失规律及酸雨对不同土壤缓冲性能的影响。

1 实验材料与方法

1.1 供试土壤

供试黄壤采自三峡库区重庆市万州区铁峰山国家森林公园,冷沙黄壤;灰棕紫泥采自重庆市万州区高粱镇天鹅村,沙岩发育;红棕紫泥采自重庆市万州区郭村乡瑞河村;红紫泥采自重庆市万州区天城镇落凶乡工农村,属新田沟组。采样剖面分为A层表土(0~20 cm)、B层土(20~40 cm)、C层土(40~60 cm),供试土壤的基本性质见表1。从表中可以看出,Al³⁺在表层土壤中的含量均大于在底土中的含量,与Dong^[12]所取重庆黄壤的结果一致。

表1 供试土壤样品的主要理化性质

土壤类型	土层编号及深度/cm	pH		交换性阳离子/(cmol·kg ⁻¹)							土壤容重/(g·cm ⁻³)	有机质(OM)(g·kg ⁻¹)	BS/%
		H ₂ O	KCl	H ⁺	Al ³⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Total			
黄壤	A 0~20	4.70	3.99	0.31	3.86	0.29	2.03	2.07	1.24	9.80	0.84	55.94	45.01
	B 20~40	5.03	4.13	0.18	2.67	0.21	1.87	1.76	1.66	8.35	1.20	5.97	48.13
	C 40~60	5.20	4.21	0.16	1.75	0.22	1.91	1.55	1.45	7.04	1.30	5.91	57.97
灰棕紫泥	A 0~20	5.80	4.59	0.25	0.29	0.27	2.08	5.59	2.11	10.59	1.32	4.93	56.31
	B 20~40	6.23	4.70	0.22	0.19	0.49	1.87	6.06	1.71	10.54	1.40	2.08	58.81
	C 40~60	6.35	5.00	0.17	0.17	0.36	1.91	4.25	1.24	8.10	1.40	2.01	65.73
红棕紫泥	A 0~20	8.20	7.21	0.00	0.00	0.60	1.63	11.00	3.68	16.91	1.38	7.33	100.00
	B 20~40	8.35	7.30	0.00	0.00	0.42	1.56	9.67	4.56	16.21	1.42	4.35	100.00
	C 40~60	8.42	7.48	0.00	0.00	0.31	1.38	8.54	4.29	14.52	1.48	3.74	100.00
红紫泥	A 0~20	6.25	4.70	0.18	0.30	0.26	1.46	8.81	2.49	13.50	1.30	8.89	53.68
	B 20~40	7.00	5.60	0.09	0.17	0.28	1.77	8.39	2.69	13.39	1.34	5.52	61.30
	C 40~60	7.07	5.82	0.05	0.12	0.23	1.66	7.87	2.74	12.67	1.38	5.97	63.75

1.2 模拟酸雨的配制

按照重庆市万州区近3年降雨平均组分(见表2)配制模拟酸雨,并采用物质的量浓度比为5:1的分析纯H₂SO₄和HNO₃调节pH为2.50、3.50、4.50和5.60。

表2 模拟酸雨离子的质量浓度 mg/L

组分	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
浓度	12.31	1.46	1.56	1.56	2.34	1.61	0.59	4.92	0.44

1.3 模拟酸雨土柱淋溶实验

将制备好的土样,按照自然剖面的上下秩序(A、B和C层土)及采样深度,分别装入内径为5 cm、柱长为25 cm(A)、45 cm(AB)和65 cm

(ABC)的透明玻璃管内。淋溶管底铺一层玻璃纤维及慢速定量滤纸,土样上铺一层玻璃纤维以防土粒溅出,并将土柱置于支架上,上部设淋溶装置,下部用三角烧瓶收集淋滤液。从土柱的上端分别用pH值为2.50、3.50、4.50和5.60模拟酸雨开始连续淋溶,收集不同时间的淋出液进行检测。淋溶量按万州区近3年的平均降雨量1200 mm,考虑到地表径流的流量损失,确定模拟实验雨量为年平均降雨量的60%,一年实际淋溶雨量为720 mm,累积3年的实际淋溶雨量2160 mm。

1.4 测定方法

土壤理化性质的测定方法参照土壤农化分析方法^[13]。K⁺、Na⁺用原子吸收分光光度计测定,Ca²⁺、Mg²⁺用EDTA络合滴定法测定,pH值用

pHS-2型酸度计测定,交换性酸和交换性铝用1 mol/L KCl交换—中和滴定法测定,淋出铝用玫瑰红三羧酸铵比色法测定。

2 结果与讨论

2.1 模拟酸雨对土壤缓冲性能的影响

土壤缓冲性能是指土壤具有缓解土壤溶液 H^+

或 OH^- 浓度变化的能力,如果施入生理酸性、碱性肥料时或当土壤在发生发展过程中产生碱性或酸性物质时,它可缓和土壤 pH 值,而不至于发生剧变,保持在一定范围内^[14]。一定程度上,淋滤液 pH 值的高低反映了土壤的缓冲性能^[15]。三峡库区 4 种典型土壤经不同 pH 值模拟酸雨淋洗后,其淋滤液 pH 值变化趋势如图 1-4 所示。

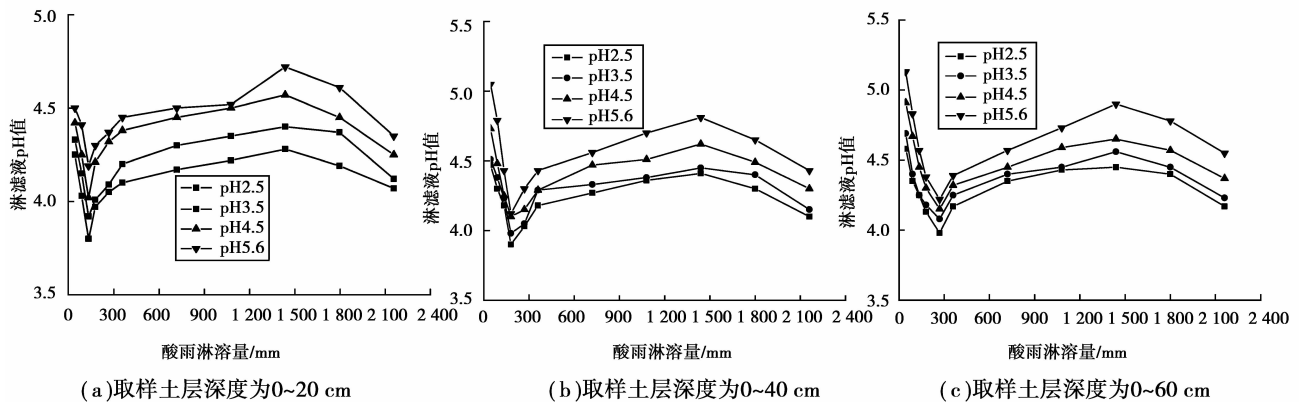


图1 不同 pH 值模拟酸雨淋洗下黄壤淋滤液 pH 值的变化

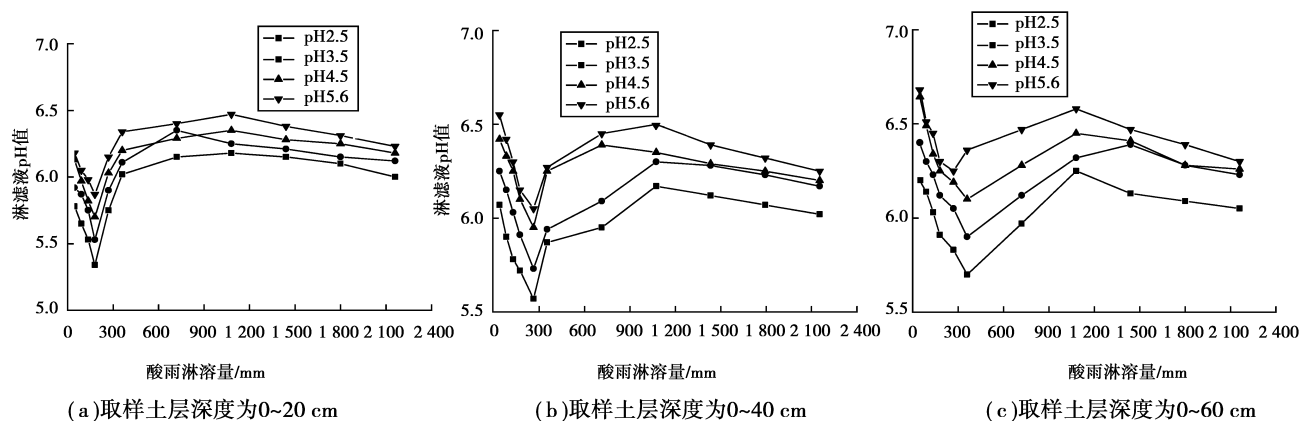


图2 不同 pH 值模拟酸雨淋洗下灰棕紫泥淋滤液 pH 值的变化

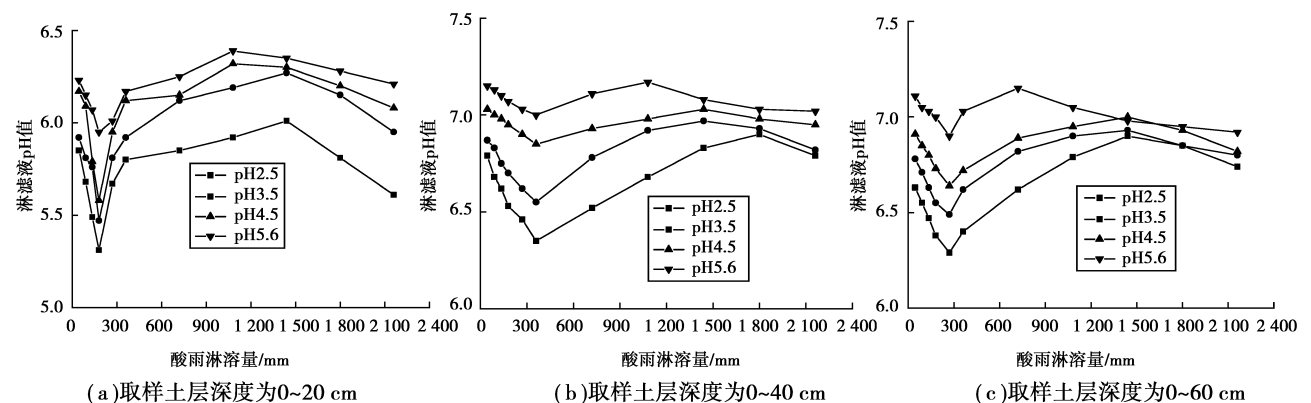


图3 不同 pH 值模拟酸雨淋洗下红紫泥淋滤液 pH 值的变化

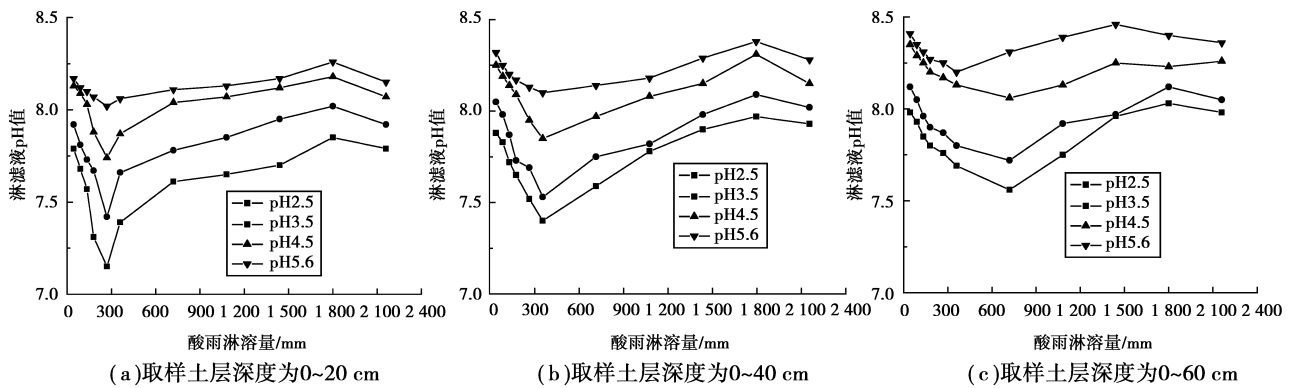


图 4 不同 pH 值模拟酸雨淋洗下红棕紫泥淋滤液 pH 值的变化

分析淋滤液 pH 值变化趋势不难看出,不同酸雨淋溶时,各种土壤不同土层淋滤液 pH 值开始阶段都呈现先下降后上升趋势,存在一个最低点,这是由于随着淋洗的进行,土壤中交换性盐基释放量减少,缓冲酸雨的能力下降;过了最低点后,随着淋洗的进一步深入,土壤淋滤液 pH 值略有上升并趋于相对稳定,这是因为土壤中交换性盐基的释放和铝及其他一些矿物的溶出,使得土壤对酸雨表现出一定的缓冲能力;不同土壤不同土层淋滤液 pH 值也存在一定的差异,尤其是淋滤液 pH 值达到最低点时的淋溶量明显不同,其大小顺序为:红棕紫泥>红紫泥>灰棕紫泥>黄壤,说明红棕紫泥对酸的缓冲能力最大,黄壤最小;对于含钙量高的红棕紫泥来说,淋滤液的 pH 值稳定在 7.0 以上,进一步表明这种土壤对外源质子具有较强的缓冲能力。

2.2 模拟酸雨对土壤淋滤液中铝含量的影响

有研究表明^[16],在酸雨的作用下,当淋滤液 pH<4.50 时,土壤铝的溶出量开始增加,在 pH<4.00 时,铝的溶出量显著增加;土壤溶液中单体铝的形态决定于土壤溶液的 pH 值,在 pH 值较低(4.00~4.50)的酸化环境下,这些形态的铝可被活化、溶出,并水解成一系列单体和多聚体的羟基铝,其中以 Al(OH)²⁺ 和 Al(OH)₂⁺ 对生物的毒性最大。

分析表 3-5 的数据可以发现,酸雨淋洗导致

土壤中铝的溶出(红棕紫泥未见溶出铝),铝的溶出量随酸雨和土壤 pH 值的下降而上升,这与上述研究结果较为吻合。不同性质的土壤其活性铝溶出受酸雨的影响也有差异,酸雨的酸度对强酸性土壤(pH<5.00)黄壤活性铝的溶出有很大的影响,而对微酸性和近中性的灰棕紫泥和红紫泥活性铝的溶出影响相对较弱。随着酸雨 pH 值降低,土壤中铝的溶出量逐渐增多,尤其在 pH 值为 2.50 的酸雨淋洗后,铝的溶出量出现了显著的增加,这同时也证实了铝的溶出与酸雨 pH 值有关(低 pH 下铝的溶解度升高)。在相同 pH 值的酸雨淋洗时,随着土层的深入,淋滤液中铝的最大浓度呈现较大程度的下降,这预示着表土受酸雨影响最为严重。另外,土壤有机质含量不同,铝的溶出量也有明显差异。通常情况下,土壤有机质含量越高,淋滤液中铝的浓度越大。在酸雨酸度和淋溶量相同的情况下,三峡库区的 4 种供试土壤溶出铝大小顺序为:黄壤>灰棕紫泥>红紫泥>红棕紫泥。红棕紫泥淋滤液中未测得溶出铝,其原因是红棕紫泥为碱性土壤,它本身不含交换性铝,而且在模拟酸雨作用下,淋滤液的 pH 值稳定在 7.0 以上,土壤主要处于阳离子缓冲范围和碳酸盐及硅酸盐缓冲范围,存在于土壤矿物晶格中的铝还不能被溶出。

表 3 不同 pH 值模拟酸雨淋洗下黄壤淋滤液中的 Al³⁺ 浓度

酸雨淋溶量/mm		45	90	135	180	270	360	720	1 080	1 440	1 800	2 160
AR ₁	A 层	4.02	4.44	5.01	4.79	4.79	4.80	4.68	4.55	3.93	3.68	2.77
	AB 层	1.59	1.66	2.54	3.79	3.63	3.44	3.48	3.28	3.01	2.86	2.27
	ABC 层	0.45	0.53	0.58	1.02	1.77	1.34	1.17	0.95	0.92	1.29	0.89
AR ₂	A 层	1.43	1.89	2.51	1.95	1.75	1.62	1.53	1.46	1.34	1.27	0.77
	AB 层	0.82	0.88	1.15	1.55	1.08	0.95	0.83	0.70	0.77	0.80	0.47
	ABC 层	0.72	0.86	1.00	1.04	1.33	0.95	0.86	0.86	0.81	0.76	0.25

续表 3

酸雨淋溶量/mm	45	90	135	180	270	360	720	1 080	1 440	1 800	2 160
AR ₃ A层	1.97	2.04	2.38	2.22	2.10	1.67	1.37	1.20	1.19	1.27	1.36
AR ₃ AB层	0.75	0.98	1.03	1.22	0.80	0.72	0.87	0.91	0.78	0.79	0.52
AR ₃ ABC层	0.60	0.90	1.05	1.10	1.01	0.96	0.92	0.72	0.68	0.62	0.52
AR ₄ A层	1.19	1.76	1.79	1.65	1.60	1.51	1.34	1.48	1.02	1.16	0.91
AR ₄ AB层	0.62	0.83	0.96	1.19	0.75	0.58	0.52	0.44	0.54	0.52	0.40
AR ₄ ABC层	0.57	0.60	0.93	0.98	0.59	0.53	0.43	0.38	0.43	0.50	0.33

说明:表中 AR₁、AR₂、AR₃、AR₄ 分别代表 pH 值为 2.50、3.50、4.50 和 5.60 的酸雨,下同。

表 4 不同 pH 值模拟酸雨淋洗下灰棕紫泥淋滤液中的 Al³⁺ 浓度

μg/mL

酸雨淋溶量/mm	45	90	135	180	270	360	720	1 080	1 440	1 800	2 160
AR ₁ A层	0.40	0.66	0.70	0.36	0.20	0.19	0.17	0.18	—	—	—
AR ₁ AB层	0.30	0.29	0.27	0.44	0.28	0.20	0.12	—	—	—	—
AR ₁ ABC层	0.17	0.26	0.38	0.19	0.20	0.11	—	—	—	—	—
AR ₂ A层	0.31	0.54	0.60	0.33	0.25	0.15	—	—	—	—	—
AR ₂ AB层	0.23	0.31	0.38	0.18	0.09	—	—	—	—	—	—
AR ₂ ABC层	0.16	0.14	0.24	0.07	—	—	—	—	—	—	—
AR ₃ A层	0.17	0.22	0.35	0.23	0.08	—	—	—	—	—	—
AR ₃ AB层	0.12	0.20	0.24	0.06	—	—	—	—	—	—	—
AR ₃ ABC层	0.05	0.12	0.18	0.05	—	—	—	—	—	—	—
AR ₄ A层	0.08	0.13	0.16	0.04	—	—	—	—	—	—	—
AR ₄ AB层	0.05	0.03	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—
AR ₄ ABC层	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 5 不同 pH 值模拟酸雨淋洗下红紫泥淋滤液中的 Al³⁺ 浓度

μg/mL

酸雨淋溶量/mm	45	90	135	180	270	360	720	1 080	1 440	1 800	2 160
AR ₁ A层	0.22	0.29	0.33	0.40	0.23	0.14	0.11	0.08	0.06	—	—
AR ₁ AB层	0.09	0.12	0.15	0.27	0.17	0.10	0.06	0.04	—	—	—
AR ₁ ABC层	0.05	0.08	0.23	0.16	0.12	0.07	0.03	—	—	—	—
AR ₂ A层	0.12	0.17	0.25	0.29	0.16	0.08	0.04	—	—	—	—
AR ₂ A+B层	0.06	0.11	0.14	0.05	0.03	—	—	—	—	—	—
AR ₂ ABC层	0.03	0.07	0.11	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—
AR ₃ A层	0.08	0.13	0.18	0.10	0.06	0.02	—	—	—	—	—
AR ₃ AB层	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AR ₃ ABC层	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AR ₄ A层	0.04	0.08	0.05	0.01	—	—	—	—	—	—	—
AR ₄ AB层	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AR ₄ ABC层	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

2.3 模拟酸雨对土壤可交换性铝含量的影响

模拟酸雨淋溶实验表明,酸雨淋洗导致三峡库区的4种供试土壤中可交换性铝的浓度发生改变,酸雨pH值越低这种变化越明显(红棕紫泥除外)。同时,不同性质的土壤其交换性铝的浓度受酸雨的影响也有差异,酸雨的酸度对强酸性黄壤(pH<5.00)活性铝的溶出有很大的影响,而对微酸性的灰棕紫泥和近中性的红紫泥活性铝的溶出影响相

对较弱。经不同pH值的模拟酸雨淋洗后,红棕紫泥中仍然未测得交换性铝,其原因是红棕紫泥为碱性土壤,在模拟酸雨pH值不太低和淋溶量不太高(本研究中酸雨淋溶雨量为2160mm,估计有些偏小)的条件下,淋滤液的pH值稳定在7.0以上,土壤主要处于阳离子缓冲范围和碳酸盐及硅酸盐缓冲范围,存在于土壤矿物晶格中的铝还不能被溶出。

表6 模拟酸雨淋洗后土壤中可交换性铝含量

土壤类型	土层编号	地层深度/cm	可交换性铝(Al_{ex})含量/($cmol \cdot kg^{-1}$)				原始土样
			AR ₁	AR ₂	AR ₃	AR ₄	
黄壤	A	0~20	5.87	4.40	4.12	3.78	3.86
	B	20~40	3.70	3.08	2.77	2.48	2.67
	C	40~60	2.63	2.28	1.81	1.62	1.75
灰棕紫泥	A	0~20	0.43	0.38	0.25	0.28	0.29
	B	20~40	0.36	0.33	0.21	0.17	0.19
	C	40~60	0.32	0.30	0.19	0.12	0.17
红紫泥	A	0~20	0.43	0.36	0.33	0.27	0.30
	B	20~40	0.28	0.25	0.22	0.15	0.17
	C	40~60	0.23	0.21	0.19	0.11	0.12
红棕紫泥	A	0~20	—	—	—	—	—
	B	20~40	—	—	—	—	—
	C	40~60	—	—	—	—	—

不同pH值模拟酸雨淋洗后,三峡库区的4种供试土壤交换性铝含量如表6所示。分析表中数据可知,黄壤、灰棕紫泥和红紫泥中交换性铝的含量随模拟酸雨pH值的下降而上升。经pH值为2.50、3.50、4.50的模拟酸雨淋洗后,黄壤、灰棕紫泥和红紫泥中交换性铝的含量较原土壤均有所提高,这是因为较多的 H^+ 输入使得活化铝增多,其他形态的铝转化为交换性铝;pH值为5.60的模拟酸雨作用后,黄壤、灰棕紫泥和红紫泥中交换性铝的含量较原土壤均有所下降,这是因为此时 H^+ 输入较少,由其他形态的铝转化为交换性铝的量也随之明显下降,而土壤中部分交换性铝被模拟酸雨淋溶。

3 结论

1)在酸雨作用下,4种典型土壤淋滤液pH值开始阶段都呈现先下降后上升趋势,存在一个最低点,这是由于随着淋洗的进行,土壤中交换性盐基释放量减少,缓冲酸雨的能力下降;过了最低点后,随着

淋洗的进一步深入,土壤淋滤液pH值略有上升并趋于相对稳定。

2)土壤铝的淋溶量随酸雨pH值下降而上升,在 $pH \geq 3.50$ 的酸雨作用下,土壤中铝的淋溶量较少;而当酸雨 $pH=2.50$ 时,铝的淋溶量骤然升高;在酸雨酸度和淋溶量相同的情况下,三峡库区的4种供试土壤溶出铝大小顺序为:黄壤>灰棕紫泥>红紫泥>红棕紫泥。

3)经酸雨淋洗后土壤中交换性铝的含量发生了改变,酸雨pH值越低这种变化越明显(红棕紫泥除外)。经pH值为2.50、3.50、4.50的模拟酸雨淋洗后,黄壤、灰棕紫泥和红紫泥中交换性铝的含量较原土壤均有所提高,这是因为较多的 H^+ 输入使得活化铝增多,其他形态的铝转化为交换性铝;pH值为5.60的模拟酸雨作用后,3种土壤中交换性铝的含量较原土壤均有所下降,这是因为此时 H^+ 输入较少,由其他形态的铝转化为交换性铝的量也随之明显下降,而土壤中部分交换性铝被模拟酸雨淋溶。

参考文献:

- [1] 王维君,陈家坊. 土壤铝形态及其溶液化学的研究[J]. 土壤学进展, 1992, 20(3): 10-18.
WANG WEI-JUN, CHEN JIA-FANG. Aluminum form and its solution chemistry in soils[J]. *Agrology Advances*, 1992, 20(3): 10-18.
- [2] 邵宗臣,何群,王维君. 红壤中铝的形态[J]. 土壤学报, 1998, 235(1): 39-48.
SHAO ZONG-CHEN, HE QUN, WANG WEI-JUN. Aluminum form in red soils[J]. *Journal of Soil*, 1998, 235(1): 39-48.
- [3] 郭朝晖,黄昌勇,廖柏寒. 模拟酸雨对红壤中铝和水溶性有机质溶出及重金属活动性的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 380-385.
GUO CHAO-HUI, HUANG CHANG-YONG, LIAO BAI-HAN. Effects of simulated acid rain on release of Al^{3+} and water-soluble organic matters and heavy metal activity in red soil[J]. *Journal of Soil*, 2003, 40(3): 380-385.
- [4] 俞元春,丁爱芳. 模拟酸雨对酸性土壤铝溶出及其形态转化的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 87-90.
YU YUAN-CHUN, DING AI-FANG. Effects of simulated acid rain on the release of Al^{3+} and its form transform[J]. *Soil and Environment*, 2001, 10(2): 87-90.
- [5] 许中坚,徐冬梅,刘广深,等. 红壤中铝、锰和铁在酸雨作用下的释放特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 20-23.
XU ZHONG-JIAN, XU DONG-MEI, LIU GUANG-SHEN, et al. Release characteristics of aluminum manganese and iron caused by acid rain in red soil[J]. *Journal of Water-soil Conservation*, 2004, 18(3): 20-23.
- [6] 董汉英,仇荣亮,吕越娜. 模拟酸雨对南方土壤硅铝释放的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(1): 75-77
DONG HAN-YING, QIU RONG-LIANG, LV YUE-NA. Effects of simulated acid rain on release of silicon and aluminum in south soil[J]. *Environment Science*, 2000, 21(1): 75-77.
- [7] 黄运湘,廖柏寒,王志坤. 模拟酸雨对森林红壤中铝的溶出及不同土层酸度变化的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 478-482.
HUANG YUN-XIANG, LIAO BO-HAN, WANG ZHI-KUN. Effects of simulated acid rain on release of Al^{3+} and the acidity change of different soil layers in forest soil [J]. *Eco-environment*, 2005, 14(4): 478-482.
- [8] LARSSSEN T, SEIP H, SEMB A, et al. Acid deposition and its effects in China: an overview[J]. *Environmental Science & Policy*, 1999, 2(1): 9-24.
- [9] 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.
LIU LI, SONG CUN-YI, LI FA-SHENG. Effects of simulated acid rain on the release of aluminum silicon and iron in red soil[J]. *Environment Science*, 2007, 28(10): 2376-2382.
- [10] 郭景恒,张晓山,蒋春来,等. 偏最小二乘法回归(PLS)研究酸性森林土壤中铝的释放过程[J]. 地球化学, 2006, 35(3): 304-310.
GUO JING-HENG, ZHANG XIAO-SHAN, JIANG CHUN-LAI, et al. Aluminum release from acid forest soils using partial least square regression [J]. *Geochemistry*, 2006, 35(3): 304-310.
- [11] 汪家权,吴劲兵,李如忠,等. 酸雨研究进展与问题探讨[J]. 水科学进展. 2004, 15(4): 526-529.
WANG JIA-QUAN, WU JIN-BING, LI RU-ZHONG, et al. Acid rain research advance and problems [J]. *Water Science Advance*, 2004, 15(4): 526-529.
- [12] DONG X H, SAKAMOTO K, WANG Z K, et al. Emission control for precursors causing acid rain (V): Improvement of acid soil with the bio-briquette combustion ash [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(5): 705-711.
- [13] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [14] 刘绮. 环境化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [15] 俞元春,丁爱芳,胡茄,等. 模拟酸雨对土壤酸化和盐基迁移的影响[J]. 南京林业大学学报, 2001, 25(2): 39-42.
YU YUAN-CHUN, DING AI-FANG, HU JIA, et al. Effects of simulated acid rain on soil acidification and dibasic transfer [J]. *Journal of Nanjing Forest University*, 2001, 25(2): 39-42.
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

(编辑 王维朗)