

湖南两个小流域土壤中铝和铁的形态分布及其相关性研究

薛南冬^{1,2} 廖柏寒¹

(1 湖南农业大学资源环境学院 长沙 410128; 2 中国科学院生态环境研究中心 北京 100085)

摘 要 分别在湖南的郴州和长沙选定两小流域 (SZY 和 LKS), 从小流域规模分析了酸雨频降区两小流域土壤的主要理化特性和土壤 Al、Fe 形态。结果表明: 在小流域 SZY 土壤中, 各种形态的 Al、Fe 含量均高于小流域 LKS 土壤中对对应形态的 Al、Fe 含量; 在同一剖面, 各种形态的 Al、Fe 含量有表土高于底土的趋势。两小流域土壤中, 除 Fe_{ox} 外各种形态的 Al、Fe 均与土壤有机质呈正相关, 酸沉降能影响 Al、Fe 形态的转化和淋溶。酸沉降影响 Al、Fe 的溶出可能是通过形成可溶性的有机物-Al、Fe 的复合物而从难溶性 Al、Fe 转化而来。土壤中各种形态的 Al 与对应形态的 Fe 呈线性正相关, 酸沉降增加了毒性元素 Al 的溶出, 同时也能增加营养元素 Fe 的有效性。

关键词 小流域; 铝形态; 酸沉降; 土壤酸化; 湖南

中图分类号 S154.1; X13

近几十年来随着经济的高速发展, 我国已有 30% 的地区受到酸沉降的威胁^[1]。研究发现, 在酸性土壤分布地区, 酸沉降加速了土壤酸化的进程^[2~4]。土壤一般具有一定的缓冲能力可以缓和大气污染对生态系统的危害, 而土壤的缓冲能力与土壤酸度、土壤有机物、阳离子交换量以及 Al 的可溶性和可移动性等土壤特性有关。酸雨对土壤性质产生严重影响, 例如增加土壤酸度、增加 Al 和 Fe 可溶性和移动性^[5~7]、增加阳离子淋失、减少盐基饱和度等。土壤中溶解性 Al 对生态系统产生毒害, 而土壤溶解性 Fe 是植物必需的微量营养元素, 能促进植物生长^[7]。因此酸雨频降区土壤 Al、Fe 形态的分析有助于阐明酸沉降影响下土壤 Al、Fe 的形态转化和迁移特征, 同时对探讨酸沉降对土壤及生态系统影响有重要意义。

1 研究地点与方法

1.1 地点描述

一个小流域 (SZY) 选择在郴州 (25.78°N, 113.01°E) 柿竹园, 郴州市以东 20 km 处, 海拔约 500 m, 小流域面积 0.15 km², 年均降水量约为 1500 mm。主要生长着杉木 (*Cunninghemia Lanceolata*) 和马尾松 (*Pinus massoniana*), 灌丛为针芒、铁芒箕、蕨类、藤本属植物等, 植被茂密。土壤是由花岗岩、板岩

等形成的变质岩发育而成的红壤, 质地粘重。

另一个小流域 (LKS) 选择在长沙县林科所林区, 距长沙市 (28.21°N, 113.08°E) 区约 40 km, 主要生长有约 30 年的人工杉木 (*Cunninghemia Lanceolata*) 林, 灌丛为针芒、蕨类、藤本属植物等, 植被茂密。土壤是由板岩、砂砾岩等发育而成的红壤, 质地粘重, 主要粘土矿物是高岭土, 也有少量伊利石和蒙脱石。此地区海拔约为 100 m, 小流域面积约 0.12 km², 年均降水量约为 1300 mm, 年均气温 17.5 °C (图 1)。

1.2 方法

在两个小流域采用梅花形布点法, 每个小流域设 5 个采样点 (图 1), 分别编号为 1~5 和 6~10 号。在每个采样点按土壤剖面 (A, AB, B 和 C 层) 分层采集土样, 经风干、除杂、研碎, 过 2 mm 筛。部分土壤化学性质测定在挪威奥斯陆大学化学系完成。土壤有机质含量通过测定烧失量 (LOI, loss on ignition) 表示, 在马福炉 ((550 ± 25) °C) 中烧 3 h 后测定^[8]; 测定交换性阳离子时用 40 ml 0.1 mol/L BaCl₂ 溶液浸提 6 g 土壤, 振荡 2 h 后, 提取液中金属阳离子 (Ca, Mg, Na, K 和 Al) 用电感耦合等离子体—原子发射光谱法 (ICP-AES) 测定^[9], H⁺ 离子用 pH 计测定^[9], 计算出土壤有效阳离子交换量 (CEC_e)、盐基饱和度 (BS)、Al 饱和度 (AIS)。

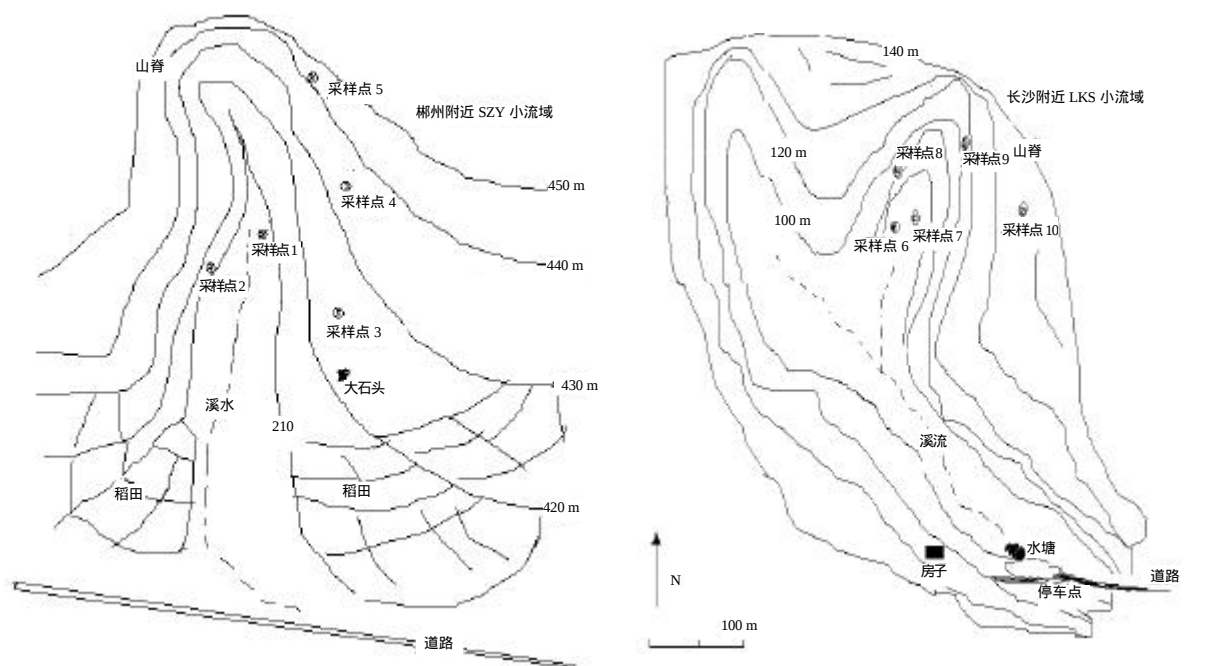


图 1 两小流域地形以及取样点

Fig. 1 Topographical map and soil sampling sites in two small catchments

土壤中的 Al 和 Fe, 可以几种形态存在: 交换态 (Al_{ex} 和 Fe_{ex}), 弱有机结合态 (Al_c 和 Fe_c), 有机结合态 (Al_p 和 Fe_p), 无定形态 (Al_{ox} 和 Fe_{ox}) 和结晶态 (Al_{cry} 和 Fe_{cry})^[9~12]。其中结晶态对土壤性质影响较小因而在本研究中没有测定和分析, 本文中提到的各形态不包括结晶态。测定 Al_{ex} 和 Fe_{ex} 时用 40 ml 0.1 mol/L $BaCl_2$ 液浸取 6 g 土壤^[9]; 测定 Al_c 和 Fe_c 时用 30 ml 0.5 mol/L $CuCl_2$ 提取 3 g 土壤^[10]; 测定 Al_p 和 Fe_p 时用 100 ml 0.1 mol/L $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$ 提取 1 g 土壤^[11]; 测定 Al_{ox} 和 Fe_{ox} 时用 50 ml $H_2C_2O_4/(NH_4)_2C_2O_4$ 缓冲液提取 1 g 土壤^[12]。提取液中 Al 和 Fe 用 ICP-AES 测定。

土壤样品分析重复 3 次, 相对标准差 (SD) 低于 7.0%。为了校正 ICP-AES 仪器可能产生的漂移, 每测 7 个样品插入标准系列, 并在相同条件下测定由挪威国家水研究所 (NIVA) 提供的标准比较样品, 以检验测定准确度。

2 结果与讨论

2.1 两小流域土壤性质

两小流域不同地点不同层次土壤的性质 (有机质含量, pH 值, 交换性酸度, CEC_e , BS 和 AIS 等) 列于表 1。从表中可以看出, 在同一地点表层

土壤 pH 低于深层土壤、并有随土壤深度增加而增大的趋势; 土壤表层有机质含量高于土壤深层, 并随土壤深度增加而降低。交换性 Al 是主要的交换性酸离子, 在两小流域中, 土壤交换性 Al 含量与土壤有机质呈正相关, 与土壤 pH 值呈负相关 (图 2)。在同一地点, 交换性 Al 和交换性 H^+ 离子随土壤深度增加而有降低的趋势。在交换性盐基离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+) 中, K^+ 离子随土壤深度增加而降低; 而对于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 离子, 未发现随土壤深度变化的规律。两小流域比较, SZY 土壤有机质和 AIS 较高, 土壤 pH 和 BS 较低, 在土壤表层两小流域这些差异更大。比较两小流域 CEC_e 可以看出, 在 SZY 的各个地点土壤剖面的垂直分布差异较明显, 在 SZY 中一些地点 (如 1、2 和 5), CEC_e 随土壤深度增加而降低的幅度较大, 而在 LKS 各地点 CEC_e 随土壤深度变化幅度较小。

2.2 两小流域土壤中 Al、Fe 形态及其分布

Al、Fe 的形态分析结果见表 2。在两小流域中 Al_{ex} 的变化范围从深层土壤的 0.13 g/kg 到表层土壤的 0.62 g/kg; Al_c 的变化范围从 0.36 ~ 1.33 g/kg, 约是 Al_{ex} 的 2.0 ~ 4.5 倍; 而 Al_p 从 0.68 ~ 5.62 g/kg, 约是 Al_c 的 1.8 ~ 5.5 倍; Al_{ox} 从 0.98 ~ 3.63 g/kg, 约是 Al_c 的 2.5 ~ 4.0 倍。在这两小流域土壤

表 1 土壤样品的基本性质

Table 1 Basic properties of soil in the two Hunan catchments

小流域	采样点/ 土壤层次	深度 (cm)	LOI (g/kg)	pH	CECe (cmol/kg)	交换性酸		交换性盐基				BS (%)	AIS (%)
						(cmol/kg)		(cmol/kg)					
						Al	H	Ca	K	Mg	Na		
SZY	1A	0 ~ 10	10.15	4.26	5.47	4.38	0.139	0.43	0.219	0.15	0.043	15.4	80.1
	1B	10 ~ 30	8.00	4.39	4.99	4.02	0.121	0.40	0.192	0.13	0.047	15.4	80.6
	1BC	30 ~ 45	9.31	4.80	4.24	2.64	0.103	1.07	0.124	0.19	0.048	33.8	62.3
	1C	45 ~ 70	9.55	4.93	2.94	1.47	0.070	0.91	0.086	0.32	0.062	46.9	50.0
	2A	0 ~ 6	10.5	3.94	7.81	6.90	0.184	0.31	0.137	0.13	0.086	8.5	88.4
	2B	6 ~ 30	5.64	4.37	2.22	1.93	0.067	0.08	0.032	0.02	0.070	9.1	86.8
	2BC	30 ~ 60	6.31	4.32	2.13	1.82	0.067	0.08	0.035	0.02	0.072	9.7	85.6
	2C	60 ~ 90	2.65	4.44	1.77	1.46	0.057	0.09	0.036	0.02	0.070	12.2	82.4
	3A	0 ~ 5	12.37	4.08	6.06	5.39	0.143	0.26	0.094	0.08	0.067	8.3	89.0
	3B	5 ~ 30	9.49	4.29	4.55	4.11	0.092	0.20	0.026	0.05	0.064	7.5	90.3
	3BC	30 ~ 65	9.04	4.40	5.61	5.12	0.099	0.21	0.026	0.05	0.077	6.5	91.3
	3C	65 ~ 90	9.11	4.30	5.08	4.59	0.088	0.22	0.027	0.05	0.070	7.2	90.4
	4A	0 ~ 5	12.03	4.11	4.68	4.07	0.101	0.24	0.097	0.06	0.080	10.2	87.0
	4B	5 ~ 30	9.44	4.25	4.91	4.39	0.103	0.19	0.031	0.04	0.124	7.8	89.4
	4BC	30 ~ 70	9.77	4.39	4.06	3.60	0.099	0.18	0.031	0.04	0.080	8.2	88.7
	4C	70 ~ 85	9.17	4.60	4.01	3.43	0.099	0.27	0.032	0.07	0.074	11.1	85.5
	5A	0 ~ 6	12.33	3.99	6.98	5.99	0.206	0.36	0.163	0.12	0.080	10.4	85.9
	5B	6 ~ 30	10.70	4.09	5.35	4.80	0.090	0.25	0.052	0.04	0.085	8.0	89.7
	5BC	30 ~ 50	8.91	4.16	4.85	4.44	0.090	0.15	0.033	0.03	0.073	5.9	91.6
	5C	50 ~ 70	8.97	4.19	3.99	3.62	0.103	0.12	0.047	0.02	0.067	6.4	90.6
LKS	6A	0 ~ 6	6.22	4.52	4.40	3.31	0.121	0.52	0.062	0.15	0.073	18.3	75.2
	6B	6 ~ 21	5.63	4.58	4.03	3.09	0.111	0.42	0.043	0.12	0.073	16.3	76.7
	6BC	21 ~ 50	5.22	4.58	3.81	3.00	0.106	0.35	0.035	0.18	0.071	16.7	78.8
	6C	50 ~ 80	6.22	4.51	3.66	3.13	0.113	0.21	0.023	0.09	0.070	10.7	85.4
	7A	0 ~ 10	6.47	4.70	5.09	2.20	0.119	1.61	0.083	0.90	0.080	52.5	43.2
	7B	10 ~ 30	6.28	4.73	4.98	2.62	0.119	1.32	0.034	0.75	0.083	43.9	52.6
	7BC	30 ~ 60	1.62	5.00	4.68	1.97	0.096	1.37	0.025	1.12	0.079	55.4	42.1
	7C	60 ~ 80	1.57	4.95	4.97	1.96	0.099	1.47	0.033	1.25	0.083	57.1	40.0
	8A	0 ~ 5	5.62	4.62	4.33	2.90	0.130	0.69	0.099	0.30	0.079	27.0	67.1
	8B	5 ~ 25	5.30	4.69	3.69	2.73	0.116	0.41	0.053	0.28	0.069	22.0	73.9
	8BC	25 ~ 50	5.22	4.73	4.13	2.67	0.116	0.32	0.048	0.88	0.072	31.9	64.6
	8C	50 ~ 80	4.30	4.86	4.93	2.97	0.103	0.25	0.039	1.44	0.077	36.6	60.2
	9A	0 ~ 10	6.30	4.90	6.64	2.07	0.101	2.61	0.208	1.50	0.081	66.4	31.3
	9B	10 ~ 40	5.99	4.98	5.66	1.64	0.103	2.20	0.151	1.47	0.079	57.7	40.0
	9BC	40 ~ 60	4.40	5.03	5.13	2.36	0.101	1.28	0.119	1.18	0.081	45.1	52.4
	9C	60 ~ 82	5.19	5.19	5.55	2.52	0.099	1.27	0.116	1.43	0.081	45.4	51.9
	10A	0 ~ 10	5.58	4.34	4.77	3.69	0.139	0.52	0.072	0.19	0.060	17.7	77.4
	10B	10 ~ 30	5.19	4.48	4.34	3.52	0.121	0.36	0.038	0.19	0.067	15.1	81.0
	10BC	30 ~ 45	1.86	4.76	4.15	1.96	0.103	1.05	0.034	0.91	0.056	49.4	47.3
	10C	45 ~ 75	4.09	4.77	4.08	2.28	0.101	0.52	0.032	0.47	0.060	26.5	70.6

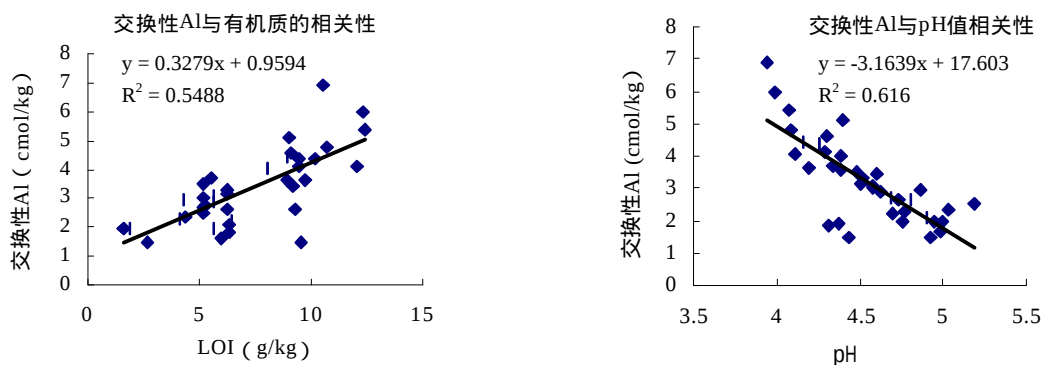


图 2 两小流域的土壤交换性 Al 与土壤有机质含量和土壤 pH 值的关系

Fig. 2 Soil exchangeable Al in relation to soil organic matter content or soil pH value in the two

中的各种形态 Al 的含量范围与重庆、贵阳的森林土壤^[4]和在欧洲、北美洲的森林土壤^[13~15]的研究结果相一致。从两小流域土壤的各种形态 Al 的含量范围可以看出,几种形态 Al 在土壤中的含量以 Al_p 和 Al_{ox} 为主;交换性 Al 占各种形态的 Al 总量的比例较低,但它决定着土壤的交换性酸度,在很大程度上制约着土壤的 pH 值。而且土壤交换性 Al 与土壤溶液以及周围水体中的 Al 密切相关,对生物和生态系统的危害很大。 Fe_{ex} 含量的变化范围从 0.37 ~ 4.48 mg/kg, Fe_c 为 0.16 ~ 19.04 mg/kg, Fe_p 为 0.46 ~ 10.42 g/kg, Fe_{ox} 为 0.65 ~ 4.59 g/kg。不同地点、不同土层之间土壤 Fe 变化幅度较大,不同形态的数量相差也较大。土壤 Fe 是植物所必需的微量营养元素,尽管在地壳和土壤中丰度大,但是往往由于其可溶态或交换态浓度低,可利用性小,因此提高 Fe 在土壤中的溶解性和有效性,可改善土壤养分状况,促进植物生长,增强植物的抗性。已有研究表明,土壤中 Fe 形态及其有效性受土壤 pH 值影响,酸雨淋溶土壤能提高土壤 Fe 的有效性^[7]。

从表 2 可以看出,在小流域 SZY 中不同形态的 Al、Fe 值均比 LKS 高。在小流域 SZY 中 Al_p 比 Al_{ox} 高, Fe_p 比 Fe_{ox} 高,而在小流域 LKS 中 Al_p 比 Al_{ox} 低, Fe_p 比 Fe_{ox} 低。在小流域 SZY 土壤中几种形态 Al 含量顺序大致为 $Al_p > Al_{ox} > Al_c > Al_{ex}$; 几种形态 Fe 含量顺序大致为 $Fe_p > Fe_{ox} > Fe_c > Fe_{ex}$ 。在小流域 LKS 土壤中几种形态 Al 含量顺序大致为 $Al_{ox} > Al_p > Al_c > Al_{ex}$; 几种形态 Fe 含量顺序为 $Fe_{ox} > Fe_p > Fe_c > Fe_{ex}$ 。Merino 等^[16] 报告在西班牙的一些土壤中发现 Al_p 超过 Al_{ox} 。在我国重庆南山、贵阳郊区也发现 Al_p 值比 Al_{ox} 高^[17] 的情况。高 Al_p/Al_{ox} 值可能与土壤高度风化有关,因为在高度风化

的土壤中, $Na_4P_2O_7$ 可能提取出一部分无机 Al 而使 Al_p 偏高^[18]。从表 2 还可以看出,在两小流域中, Al_{ex} , Fe_{ex} , Al_c 和 Fe_c 有表土大于底土的趋势。

2.3 两小流域土壤 Al、Fe 相关性分析

分析发现,两小流域土壤中 Fe_p 与 Al_p 呈线性正相关,线性回归方程为 $Fe_p = 2.13Al_p - 0.885$, 相关显著性达 $p < 0.001$ 的显著水平。 Fe_{ex} 与 Al_{ex} 、 Fe_c 与 Al_c 和 Fe_{ox} 与 Al_{ox} 呈线性相关关系,它们的相关显著性也达 $p < 0.05$ 显著水平。两小流域土壤中,除了 Fe_{ox} 外不同形态的 Al、Fe 均与有机质 (LOI) 呈良好正相关,相关显著性均达 $p < 0.05$ 显著水平。两小流域土壤中 Al、Fe、有机质之间的相关性、回归方程及其显著性检验列于表 3。土壤酸度的本质是活性 Al 的存在,土壤酸性强度受交换性 Al^{3+} 与盐基离子比例影响。由于在酸敏感地区酸沉降能促进 Al、Fe 的淋溶^[3],可使土壤溶液中的活性 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 增加。鉴于两小流域土壤中 Al、Fe、有机质之间的相关性,土壤 Al、Fe 与有机质之间可能形成了有机物-Al、Fe 的络合物,而酸沉降影响 Al、Fe 的溶出,通过促进形成可溶性的有机物-Al、Fe 的络合物而从难溶态淋溶出来。因而,除了可溶态和交换态外,酸沉降能促进其他形态 Al、Fe 的转化而淋溶。汪雅各等^[7] 的模拟酸雨淋溶试验表明:酸雨淋溶后,土柱表层可提取性 Fe 大大增加。在表层土壤或植物根际有机质含量较高,酸沉降影响下,Al、Fe 形态较容易在这里被转化和溶出。因此,酸沉降一方面促进 Al 的溶出,可能对植物根系及周围水体产生毒害,另一方面它可能增加植物营养元素 Fe 的可利用性。至于是否酸沉降提高了 Fe 的有效性而增强了植物的抗逆性还有待进一步研究。

表 2 湖南两小流域土壤 Al、Fe 形态

Table 2 Various forms of Aluminum and Iron in soils of the two Hunan catchments

小流域	采样点/ 土壤层次	Al 形态				Fe形态			
		Al _{ex}	Al _c	Al _p	Al _{ox}	Fe _{ex}	Fe _c	Fe _p	Fe _{ox}
		(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(g/kg)	(g/kg)
SZY	1A	0.39	0.90	3.45	3.16	2.61	5.60	7.06	3.22
	1B	0.36	0.88	3.30	3.10	1.49	3.55	6.26	3.04
	1BC	0.24	0.87	3.33	3.11	1.49	6.44	6.67	4.57
	1C	0.13	0.66	2.38	2.61	1.31	4.85	3.37	1.56
	2A	0.62	1.22	4.11	2.96	4.48	19.04	8.07	3.15
	2B	0.17	0.53	2.03	1.64	1.12	2.24	3.55	1.44
	2BC	0.16	0.49	1.97	1.61	0.93	1.87	3.45	1.74
	2C	0.13	0.36	1.41	1.56	0.37	1.49	2.59	2.13
	3A	0.49	1.17	4.14	3.18	2.24	8.40	8.43	2.67
	3B	0.37	1.01	4.63	3.46	1.12	3.73	10.01	2.58
	3BC	0.46	0.80	3.33	2.77	2.01	2.05	6.90	1.88
	3C	0.41	0.78	2.96	2.74	2.05	2.80	5.78	1.93
	4A	0.37	1.33	5.26	3.63	1.87	4.48	10.42	4.59
	4B	0.40	0.76	2.75	2.14	2.99	3.73	6.55	1.06
	4BC	0.32	0.59	1.64	1.56	2.24	4.48	2.33	0.65
	4C	0.31	0.53	1.35	1.55	2.05	1.87	2.48	0.68
	5A	0.54	0.91	4.16	2.60	3.92	17.17	8.57	1.89
	5B	0.43	0.97	5.09	3.18	3.73	2.61	8.05	1.67
	5BC	0.40	0.76	3.99	2.77	2.80	4.67	7.12	1.19
	5C	0.33	0.68	3.24	2.33	0.93	2.99	3.13	1.07
LKS	6A	0.30	0.60	1.19	1.55	0.95	4.85	1.78	2.14
	6B	0.28	0.57	1.12	1.56	0.93	3.92	1.53	2.27
	6BC	0.27	0.62	1.23	1.61	0.75	3.73	1.77	2.62
	6C	0.28	0.56	1.08	1.59	0.57	1.31	1.49	2.72
	7A	0.20	0.57	1.17	1.54	0.57	2.43	1.69	3.06
	7B	0.24	0.55	1.13	1.52	0.56	1.49	1.62	3.29
	7BC	0.18	0.46	0.91	1.34	0.56	0.75	1.32	2.72
	7C	0.18	0.49	0.97	1.49	0.55	0.80	1.53	3.36
	8A	0.26	0.59	1.24	1.60	0.56	2.80	1.46	2.49
	8B	0.25	0.58	1.23	1.63	0.37	1.31	1.32	2.63
	8BC	0.24	0.58	1.20	1.65	0.56	1.31	1.25	2.58
	8C	0.27	0.38	0.68	0.98	1.49	1.87	0.46	1.64
	9A	0.23	0.56	1.00	1.34	0.56	2.05	1.08	2.37
	9B	0.21	0.50	1.20	1.69	0.56	1.49	1.25	2.71
	9BC	0.19	0.43	1.06	1.55	0.75	0.19	1.06	2.44
	9C	0.21	0.40	1.12	1.75	1.12	0.16	0.90	2.91
	10A	0.33	0.56	1.08	1.38	0.37	5.60	1.50	2.03
	10B	0.32	0.52	1.08	1.28	0.56	2.80	1.25	1.97
	10BC	0.18	0.45	1.10	1.49	0.56	1.68	1.66	2.80
	10C	0.26	0.42	0.88	1.33	0.56	1.49	1.15	2.29

表 3 两小流域土壤中 Al、Fe、有机质之间的相关性

Table 3 Soil Fe and Al in relation to soil organic matter in two small catchments

变量	回归方程	样本数 (n)	相关系数 (r)	显著性
Fe _p 与 Al _p	Fe _p =2.13Al _p -0.885	40	0.970	***
Fe _{ex} 与 Al _{ex}	Fe _{ex} =7.76Al _{ex} -0.908	40	0.822	***
Fe _c 与 Al _c	Fe _c =10.68 Al _c -3.21	40	0.618	**
Fe _{ox} 与 Al _{ox}	Fe _{ox} =0.307 Al _{ox} +1.72	40	0.510	**
Al _{ex} 与 LOI	Al _{ex} = 17.8 LOI +2.00	40	0.717	***
Al _c 与 LOI	Al _c =9.81 LOI +0.747	40	0.809	***
Al _p 与 LOI	Al _p =1.70LOI +3.61	40	0.814	***
Al _{ox} 与 LOI	Al _{ox} =3.06 LOI +1.04	40	0.796	***
Fe _p 与 LOI	Fe _p =1.97 LOI+4.54	40	0.800	***
Fe _{ex} 与 LOI	Fe _{ex} =0.391LOI +5.75	40	0.753	***
Fe _c 与 LOI	Fe _c =0.764 LOI +4.44	40	0.746	***
Fe _{ox} 与 LOI	Fe _{ox} =- 0.121 LOI +7.55	40	0.037	

***表示 (p 0.001) 显著, **表示 (p 0.05) 显著

3 结 论

根据试验结果及讨论可得出以下结论：

(1) 郴州和长沙的两小流域 (SZY 和 LKS) 相比较, 在小流域 SZY 土壤中, 土壤有机质、Al 饱和度和有机 Al、Fe 含量较高, 土壤 pH 和 BS 较低。在同一剖面, 交换态和弱有机结合态 Al、Fe 浓度均为表土高于底土, 并有随土壤深度增加而降低的趋势。

(2) 在两小流域土壤中, 除无定形 Al、Fe 外, 各种形态的 Al、Fe 均与土壤有机质呈线性正相关。酸沉降能促进 Al、Fe 形态在土壤表层或植物根际有机质较丰富的区域转化和溶出。

(3) 酸沉降促进 Al 的溶出, 可能对植物根系及对周围水体产生毒害的同时, 也增加了植物营养元素 Fe 在土壤中的可利用性。但鉴于我国南方红壤上很少有缺 Fe 的报道, 可溶性 Fe 的增加对植物或生态的有益作用还有待进一步研究。

本研究大部分工作在挪威奥斯陆大学化学系完成, 曾受到 Hans Martin Seip 教授的指导, 并得到 Vogt RD 博士宝贵的建议, 谨以谢忱。

参考文献

- 1 杨浩, 孙波, 赵其国. 中国酸雨的分布、成因及其对土壤环境的影响. 土壤, 1999, 31 (1): 13 ~ 18
- 2 刘全友. 模拟酸雨对森林土壤风化影响的研究. 环境科学学报, 1993, 13 (1): 31 ~ 37
- 3 Driscoll CT, Otton JK, Iverfeldt Å Biogeochemistry of

Small Catchments—A Tool for Environmental Research. Chapter 13: Trace Metals Speciation and Cycling. 1994, SCOPE 51

- 4 Zhao D, Seip HM, Zhao DW, Zhang D. Pattern and cause of acidic deposition in Chongqing region, Sichuan Province, China. Water, Air and Soil Pollution, 1994, 77: 27 ~ 48
- 5 郭景恒, 张晓山, 汤鸿霄. 酸沉降对地表生态系统的影响. 土壤中铝的活化与迁移. 土壤, 2003, 35 (2): 89 ~ 93
- 6 徐仁扣, 季国亮. pH 对酸性土壤中铝的溶出和离子形态分布的影响. 土壤学报, 1998, 35 (2): 162 ~ 171
- 7 汪雅各, 盛沛麟, 袁大伟. 模拟酸雨对土壤金属离子的淋溶和植物有效性的影响. 环境科学, 1989, 9 (2): 22 ~ 24
- 8 Krogstad T, Methods in Soil Analysis. Report 6/92. Department of soil science, Agricultural University of Norway, 1992, Es. ISSN0803-1304
- 9 Hendershot WH, Duquette M. A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50: 605 ~ 608
- 10 Jou ASR, Kamprath EJ, Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive Aluminium pool in acid soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1979, 43: 35 ~ 38
- 11 Van Reeuwijk LP. Procedures for Soil Analysis. 3rd ed. ISRIC, Wageningen, The Netherlands, 1995, 121 ~ 128
- 12 McKeague JA, Day JH. Dithionite- and oxalate- extractable

- Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. *Soil Science*, 1966, 46: 13 ~ 22
- 13 Koptsik G, Mukhina I. Effects of acid deposition on acidity and exchangeable cations in Podzols of the Kola Peninsula. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 85: 1209 ~ 1214
- 14 Matzner E, Prezel J. Acid deposition in the German Solling area: effects on soil solution chemistry and Al mobilization. *Water, Air and Soil Pollution*, 1992, 61: 221 ~ 234
- 15 Berggren D, Mulder J. The role of organic matter in controlling Aluminium solubility in acidic mineral soil horizons. *Geochem. Acta*, 1995, 59: 4167 ~ 4180
- 16 Merino A, Alvarez E, Garcia-Rodeja E. Response of some soils of Galicia (NW Spain) to H_2SO_4 acidification. *Water, Air and Soil Pollution*, 1994, 74, 89 ~ 101
- 17 Liao B, Larssen T, Seip HM. Response of five Chinese forest soils to acidic input: batch experiment. *Geoderma*, 1998, 86: 295 ~ 316
- 18 Higashi T, De Coninck F, Gelaude F. Characterization of some spodic horizons of campine (Belgium) with dithionite-citrate, pyrophosphate and sodium hydroxide-tetraborate. *Geoderma*, 1981, 25, 131 ~ 142

DISTRIBUTION OF Al(Fe)-POOLS IN TWO SMALL CATCHMENTS IN HUNAN

XUE Nan-dong^{1,2} LIAO Bo-han¹

(1 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Abstract Soil Al(Fe)-pools and basic properties of the forest soils gathered from five profiles (consisting of four horizons) in two catchments (SZY and LKS) in Hunan were determined. Al- and Fe-pools were higher in SZY than in LKS and generally higher in the top soils than in the subsoils. They, except Fe_{ox} , were positively correlated to the content of soil organic matter in the two catchments. Acid deposition may affect transformation and leaching of soil Al and Fe through formation of soluble organo-metal complexes. Significant positive correlations were observed between various forms of Al and their corresponding forms of Fe in the soils. Moreover, acid deposition also increased leaching of toxic Al and possibly availability of nutrient Fe.

Key words Small catchment, Al (Fe)-pools, Acid deposition, Hunan

(上接第 404 页)

that is to say the volume of CO_2 emitted in the daytime was lower than at nighttime. The research showed that change in CO_2 emission from Loess soil in Xi'an tended to keep pace with the change in temperature, but lag a bit in time. CO_2 emission from Loess soil in Xi'an varied with the season, being the highest in summer, moderate in autumn, and the lowest in winter. The volume of CO_2 released per day was found to be the highest in July, over $8\text{ g}/(\text{m}^2\text{ d})$, the second highest in August, and the lowest in December, January and February, less than $0.5\text{ g}/(\text{m}^2\text{ d})$. Statistic analysis showed the emission was in extremely obvious positive correlation with temperature. CO_2 emission also varied with the vegetation. Generally speaking, CO_2 emission is high on the bare ground, but low on the woodland and grassland. The experiment showed that vegetation played an important role in slowing down the release of soil carbon and protecting the environment. The protection of vegetation and enhancement of the ecosystem is one of the effective measures to curb CO_2 in the atmosphere. Therefore, restoration and construction of forests, and enlargement of Carbon sinks on the continent is an important aspect in the environment construction from now on.

Key words Loess soil, CO_2 from soil, Emission, Change law, Xi'an