

引用格式:

彭世清, 欧阳宁相, 张杨珠, 盛浩, 周清. 湖南旱地土壤铝的化学结合形态垂直分布及其发生学特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 723–732.

PENG S Q, OUYANG N X, ZHANG Y Z, SHENG H, ZHOU Q. Vertical distribution and their genetic characteristics of chemically combined forms of aluminum in upland soils of Hunan Province[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(6): 723–732.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 湖南旱地土壤铝的化学结合形态垂直分布 及其发生学特征

彭世清, 欧阳宁相, 张杨珠\*, 盛浩, 周清

(湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

**摘 要:** 选取湖南省不同地区第四纪红色黏土、石灰岩风化物、紫色页岩风化物、花岗岩风化物等 4 种母质发育的 12 个典型土壤剖面的分层土样进行分析, 探究土壤铝的化学结合形态在不同的土壤剖面、不同母质、各特征土层和不同土壤类型间的分布, 及其与各土壤基本理化性质的相关关系。结果表明: 供试土壤中, 交换态铝( $\text{Ex-Al}$ )、吸附态无机羟基铝( $\text{Hy-Al}$ )、有机配合态铝( $\text{Or-Al}$ )、氧化铁结合态铝( $\text{DCB-Al}$ )、层间铝( $\text{In-Al}$ )、非晶态铝硅酸盐及三水铝石( $\text{Nc-Al}$ )、矿物态铝( $\text{Min-Al}$ )、全铝( $\text{Alt}$ )质量分数在表土层分别为 $(0.31 \pm 0.24)$ 、 $(1.57 \pm 0.80)$ 、 $(7.24 \pm 4.77)$ 、 $(2.47 \pm 1.72)$ 、 $(5.10 \pm 2.85)$ 、 $(18.91 \pm 7.91)$ 、 $(126.78 \pm 18.49)$ 、 $(162.37 \pm 24.86)$  g/kg, 在表下层分别为 $(0.26 \pm 0.18)$ 、 $(1.24 \pm 0.89)$ 、 $(4.17 \pm 3.09)$ 、 $(3.24 \pm 2.69)$ 、 $(6.09 \pm 2.97)$ 、 $(23.81 \pm 10.68)$ 、 $(122.13 \pm 40.12)$ 、 $(160.91 \pm 51.39)$  g/kg, 在母质层分别为 $(0.16 \pm 0.16)$ 、 $(1.09 \pm 0.92)$ 、 $(2.93 \pm 2.46)$ 、 $(2.61 \pm 2.67)$ 、 $(5.49 \pm 3.12)$ 、 $(21.81 \pm 9.94)$ 、 $(137.44 \pm 27.01)$ 、 $(171.53 \pm 32.79)$  g/kg; 在土壤剖面上,  $\text{Ex-Al}$ 、 $\text{Hy-Al}$  和  $\text{Or-Al}$  质量分数随土层深度的增加逐渐降低, 而  $\text{DCB-Al}$ 、 $\text{In-Al}$ 、 $\text{Nc-Al}$  质量分数则先增加后减小; 在 4 类母质中, 表土层中的  $\text{Ex-Al}$  质量分数在第四纪红土发育土壤中的最高, 表下层和母质层中的  $\text{Ex-Al}$  质量分数在花岗岩风化物发育土壤中的最高,  $\text{Hy-Al}$  和  $\text{In-Al}$  质量分数在花岗岩风化物发育的土壤中的最高,  $\text{Or-Al}$  和  $\text{DCB-Al}$  质量分数在石灰岩风化物发育的土壤中的最高, 表土层和表下层中的  $\text{Nc-Al}$  质量分数在石灰岩风化物发育土壤中的最高, 而母质层中的  $\text{Nc-Al}$  则在花岗岩风化物发育土壤中的最高; 在 6 种特征土层中,  $\text{Ex-Al}$ 、 $\text{DCB-Al}$ 、 $\text{In-Al}$  和  $\text{Nc-Al}$  质量分数在低活性富铁层中最高, 而  $\text{Hy-Al}$  和  $\text{Or-Al}$  质量分数则在腐殖质表层中最高; 在 4 种土壤类型中, 富铁土中的  $\text{Ex-Al}$ 、 $\text{DCB-Al}$ 、 $\text{In-Al}$  和  $\text{Nc-Al}$  质量分数最高, 新成土中的  $\text{Hy-Al}$  和  $\text{Or-Al}$  质量分数最高; 影响土壤中铝的化学结合形态和分布的因素主要有 pH、有机质、CEC、游离铁、全铝和黏粒等。

**关 键 词:** 旱地; 土壤类型; 铝形态; 诊断层; 成土母质; 连续提取法; 湖南

中图分类号: S153.6<sup>+1</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2020)06-0723-10

## Vertical distribution and their genetic characteristics of chemically combined forms of aluminum in upland soils of Hunan Province

PENG Shiqing, OUYANG Ningxiang, ZHANG Yangzhu\*, SHENG Hao, ZHOU Qing

(College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** To investigate the chemical combination forms of soil aluminum and its variation in different soil profiles, parent materials, characteristic soil layers and soil types, this study selected layered soil samples from 12 typical soil

收稿日期: 2019-10-17

修回日期: 2019-12-18

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2014FY110200); 湖南省研究生科研创新项目(CX2018B410)

作者简介: 彭世清(1995—), 男, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事土壤地理学研究, 397644366@qq.com; \*通信作者, 张杨珠, 博士, 教授, 主要从事土壤肥力与作物施肥、土壤退化与修复、土壤系统分类等研究, zhangyangzhu2006@163.com

profiles of 4 parent materials developed in different regions of Hunan Province as the experimental material. The results indicated the mass fractions of exchanged aluminum(Ex-Al), adsorbed inorganic hydroxy aluminum(Hy-Al), organic complex aluminum(Or-Al), iron oxide-bound aluminum(DCB-Al), interlayer aluminum(In-Al), amorphous aluminosilicate and gibbsite(Nc-Al), mineral aluminum(Min-Al), and total aluminum(Alt) in the test soil were  $(0.31\pm0.24)$ ,  $(1.57\pm0.80)$ ,  $(7.24\pm4.77)$ ,  $(2.47\pm1.72)$ ,  $(5.10\pm2.85)$ ,  $(18.91\pm7.91)$ ,  $(126.78\pm18.49)$ ,  $(162.37\pm24.86)$  g/kg in the topsoil layer,  $(0.26\pm0.18)$ ,  $(1.24\pm0.89)$ ,  $(4.17\pm3.09)$ ,  $(3.24\pm2.69)$ ,  $(6.09\pm2.97)$ ,  $(23.81\pm10.68)$ ,  $(122.13\pm40.12)$ ,  $(160.91\pm51.39)$  g/kg in the lower layer of the surface,  $(0.16\pm0.16)$ ,  $(1.09\pm0.92)$ ,  $(2.93\pm2.46)$ ,  $(2.61\pm2.67)$ ,  $(5.49\pm3.12)$ ,  $(21.81\pm9.94)$ ,  $(137.44\pm27.01)$ ,  $(171.53\pm32.79)$  g/kg in the matrix layer, respectively. On the soil profile, the mass fractions of Ex-Al, Hy-Al and Or-Al gradually decreased with the increase of soil depth, while the mass fractions of DCB-Al, In-Al and Nc-Al increased firstly and then decreased. Among the 4 types of parent materials, the Ex-Al mass fraction in the topsoil layer was the highest in the quaternary red soil, while those in the subsurface layer and the parent material layer were the highest in the granite weathered soil; the mass fractions of Hy-Al and In-Al were the highest in the granite weathered soil; the mass fractions of Or-Al and DCB-Al were the highest in the limestone weathered soil; the Nc-Al mass fraction in the topsoil layer and the subsurface layer were the highest in the limestone weathered soil, while that in the parent layer was the highest in the granite weathered soil. Among the 6 characteristic soil layers, the mass fractions of Ex-Al, DCB-Al, In-Al and Nc-Al were the highest in the low-activity iron-rich layer, while the mass fractions of Hy-Al and Or-Al were the highest in the humus surface layer. Among the 4 soil types, the Ex-Al, DCB-Al, In-Al and Nc-Al mass fractions of the iron-rich soil were the highest, and the Hy-Al and Or-Al mass fractions of the newly formed soil were the highest. The main factors affecting the chemical binding form and distribution of aluminum in the soil were pH, organic matter, CEC, free iron, total aluminum and clay particles.

**Keywords:** dry land; soil types; aluminum form; diagnostic horizons; soil parent material; sequential extraction method; Hunan

在土壤风化发育的成土过程中,原生矿物中的铝不断地释放出来,为土壤中的游离铝提供来源<sup>[1]</sup>,铝经水解、聚合、络合、吸附沉淀等反应,其化学结合形态发生改变。活化后的铝离子将与土壤中的物质形成不同的结合形态,按照铝离子在其结合物的结构组成和性质上固有的特征,可将土壤中的铝区分为交换态铝(Ex-Al)、吸附态无机羟基铝(Hy-Al)、有机配合态铝(Or-Al)、氧化铁结合态铝(DCB-Al)、层间铝(In-Al)、非晶态铝硅酸盐和三水铝石(Nc-Al)及矿物态铝(Min-Al)。不同化学结合形态铝与土壤的相应性质和生态特征都密切相关<sup>[2]</sup>。根据铝形态的相对稳定性,把 Ex-Al、Hy-Al 和 Or-Al 归属于高活性铝,而 DCB-Al、In-Al 和 Nc-Al 的活性较小,归为低活性铝。铝的活性大小影响土壤中作物生长与元素的循环<sup>[3]</sup>。当土壤中铝的含量超过一定的界限,森林植被会因此而发生退化,严重时将会引起植物的死亡<sup>[4-5]</sup>。许多研究<sup>[6-9]</sup>表明,土地利用方式、成土母质及植被类型影响着土壤中铝的有效性,但对不同发育程度土壤中铝的化学结合形态的分布研究鲜见报道。

湖南省成土母质多样,主要有花岗岩风化物、

板岩和页岩风化物、砂岩风化物、紫色砂页岩风化物、石灰岩风化物、第四纪红色黏土和河湖沉积物等七大类型<sup>[10]</sup>。脱硅富铝化作用是湖南省土壤形成过程中的一个重要特征,该地区土壤中铝的活性较强,铝的形态转化剧烈。前人<sup>[11-15]</sup>对湖南省不同发育程度的土壤进行了系统分类归属研究,但未对各类型土壤发生发育性状进行深入分析。基于此,本研究中,选取 4 种母质发育的土壤,探究铝的化学结合形态在土壤剖面、不同母质、各特征土层和各土壤类型间的演变规律及其与各土壤基本理化性质的相关关系,以期土壤系统分类的检索体系修订和湖南土壤资源合理利用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土样采自湖南省的长沙、株洲、湘潭、常德、张家界、湘西自治州和永州等 7 个地区不同海拔高度地带的第四纪红色黏土、石灰岩风化物、紫色页岩风化物、花岗岩风化物等 4 种成土母质类型的土壤(表 1)。研究区(E109°58'3"~E114°8'7"、N25°18'29"~N29°42'27")属中亚热带季风湿润气候

区,年均气温为 16.5~18.3 ℃,年均降水量为 1 300~ 1 600 mm,植被类型多样。

表 1 供试土壤的成土环境

Table 1 Soil forming conditions of studied soil profiles							
剖面 编号	采样 地点	土体构型	海拔 高度/m	地理坐标	植被类型	母质类型	亚类
CS01	长沙县	Ah-Bw-B11-B12	66	E113°6'30", N28°12'5"	杂木林	第四纪红色黏土	网纹筒育湿润富铁土
ZZ02	浏口区	Ah-Bt1-Bt2-Bts1-Bts2	75	E113°9'41", N27°38'50"	油茶	第四纪红色黏土	普通铝质湿润淋溶土
CD04	临澧县	Ah-Bw-B11-B12	102	E111°35'54", N29°42'27"	常绿矮小灌木	第四纪红色黏土	红色铁质湿润锥形土
YZ05	江华县	Ah-Bts1-Bts2-Bts3-Bts4	228	E113°31'33", N25°18'29"	杉木、楠竹、蕨类、 马尾松	石灰岩风化物	斑纹黏化湿润富铁土
ZJJ01	慈利县	Ah1-Ah2-Bs1-Bs2	124	E111°15'3", N29°33'36"	柑橘	石灰岩风化物	普通铁质湿润锥形土
XT06	湘潭县	Ah-ACr-R	86	E112°46'15", N27°38'42"	马尾松	紫色页岩风化物	普通红色正常新成土
XX08	吉首市	Ah-AC-R	205	E109°58'3", N28°21'33"	女贞、合欢	紫色页岩风化物	石质湿润正常新成土
LY03	浏阳市	Ah-Bt1-Bt2-Bt3-Bt4	179	E114°0'57", N28°27'3"	箭竹、油茶、香樟、 杉木、铁芒箕	花岗岩风化物	普通黏化湿润富铁土
LY04	浏阳市	Ah-Bt-C	482	E114°3'17", N28°25'29"	毛竹、香樟、杉木	花岗岩风化物	普通铝质湿润淋溶土
LY09	浏阳市	Ah-Bw1-Bt-Bw2-C	1 414	E114°7'10", N28°25'20"	竹林、灌木	花岗岩风化物	腐殖筒育常湿淋溶土
LY08	浏阳市	Ah-Bw1-Bw2-BC-C	1 498	E114°8'7", N28°25'23"	杜鹃花、五节芦草	花岗岩风化物	普通铝质常湿锥形土
LY23	浏阳市	Ah-AC-C	1 560	E114°6'0", N28°24'53"	杜鹃花	花岗岩风化物	普通湿润正常新成土

1.2 样品采集与分析

参照《湖南土壤》<sup>[10]</sup>和《湖南土种志》<sup>[16]</sup>,结合湖南省母质图、土地利用现状图、高程图等,确定 12 个野外采样点。严格按《野外土壤描述与采样手册》<sup>[17]</sup>的要求,结合实际情况,挖掘宽 1.2 m、深 1.2~2.0 m 的土壤剖面。按照发生层进行样品采集。土壤样品晾干,研磨制细,分别过 1.700、0.212、0.125 mm 孔径筛,按测定指标要求,选择不同粒径的样品。

依据《土壤调查实验室分析方法》<sup>[18]</sup>测定土壤机械组成、pH、CEC、ECEC、交换性酸含量、有机质、游离铁、活性铁和全铝(Alt)质量分数;根据《中国土壤系统分类检索》(第三版)<sup>[19]</sup>的方案,检索出供试剖面的诊断层与诊断特性及其在系统分类中的归属。依据铝形态的结合机理,使用改进的连续提取法提取 6 种化学结合形态铝<sup>[2]</sup>:用 1 mol/L KCl 提取 Ex-Al;用 0.2 mol/L HCl 提取 Hy-Al;用 0.1 mol/L Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 溶液(pH 8.5)提取 Or-Al;用 DCB

法提取 DCB-Al;用 0.33 mol/L Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>(pH 7.3)提取 In-Al;用 0.5 mol/L NaOH 提取 Nc-Al。Min-Al 质量分数为 Alt 质量分数减去以上连续提取铝的总和所得差值。

1.3 数据统计与分析

使用 Excel 2007、SPSS 25、Origin 2018 进行数据统计、分析和制图。

2 结果与分析

2.1 供试土壤的基本理化性质

由表 2 可知,采用水提法测得的供试土壤 pH 值为 4.1~6.8;采用盐提法测得的供试土壤 pH 值为 3.5~6.7。pH 值均小于 7,供试土壤均为酸性或弱酸性土壤。交换性酸含量、ECEC、CEC 分别为 0.06~9.98、1.4~21.2、4.90~33.28 cmol/kg;游离铁、有机质、黏粒质量分数分别为 6.5~70.7、1.98~84.93、52~758 g/kg。

表 2 不同剖面土壤的基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil in different profiles									
剖面 编号	深度/cm	pH 值		交换性酸/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	ECEC/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	CEC/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	游离铁/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	黏粒(<0.002 mm)/(g·kg <sup>-1</sup> )
		H <sub>2</sub> O	KCl						
CS01	0~37	4.7	3.5	4.68	8.8	15.46	32.9	11.72	514
	>37~100	4.6	3.5	5.29	9.0	15.60	37.3	6.68	545
	>100~121	4.7	3.6	6.30	9.9	11.38	39.0	5.07	505
	>121~145	5.1	3.6	6.73	8.4	13.16	39.7	4.07	492
ZZ02	0~7	4.3	3.5	8.24	8.7	14.94	23.1	40.34	396

表 2(续)

剖面 编号	深度/cm	pH 值		交换性酸/ ( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	ECEC/ ( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	CEC/ ( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	游离铁/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	黏粒(<0.002 mm)/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
		H <sub>2</sub> O	KCl						
XT06	>7~40	4.3	3.6	8.15	8.9	13.67	27.9	8.42	487
	>40~65	4.6	3.7	7.57	8.3	13.71	27.7	6.84	479
	>65~120	5.0	3.8	7.16	8.0	13.61	28.2	5.10	430
	>120~150	5.2	3.8	6.72	7.0	11.40	29.6	4.09	418
	0~22	5.5	3.9	1.25	16.9	30.01	15.3	17.37	270
	>22~65	5.4	3.5	9.98	21.2	33.28	20.2	7.50	359
	>65~130	6.6	4.9	0.19	15.5	25.17	13.3	3.19	132
CD04	0~15	5.4	4.0	2.37	6.9	16.75	29.5	16.32	428
	>15~60	5.1	3.8	5.88	9.6	17.10	39.9	7.66	487
	>60~105	5.3	3.8	4.15	8.3	17.78	38.2	5.59	473
	>105~200	6.2	4.1	1.42	5.6	14.58	46.1	2.29	313
YZ05	0~40	5.2	3.9	3.30	8.1	21.10	56.4	31.95	613
	>40~60	5.4	4.3	0.80	8.7	23.15	57.0	22.21	706
	>60~100	5.9	5.7	0.11	9.5	16.37	70.7	12.64	751
	>100~150	6.3	5.9	0.09	8.4	15.61	63.5	9.57	758
	150~200	6.2	6.0	0.08	8.7	16.42	68.8	6.04	729
ZJJ01	0~25	6.7	6.7	0.09	13.7	30.11	35.1	23.76	318
	>25~70	6.6	6.6	0.06	12.9	26.17	31.8	13.82	301
	>70~130	6.5	4.9	0.08	10.1	29.14	33.7	6.59	287
	>130~170	6.3	4.9	0.07	11.5	32.45	38.9	7.81	323
XX08	0~10	6.7	5.6	0.11	17.8	25.94	16.7	84.93	307
	>10~30	6.8	5.7	0.13	12.1	17.06	17.2	28.92	279
LY03	0~20	4.1	3.5	9.07	10.4	15.51	26.9	51.20	427
	>20~60	4.5	3.7	7.49	8.2	11.08	32.2	9.81	476
	>60~120	4.9	3.8	6.51	7.2	11.39	34.4	6.55	468
	>120~174	5.1	3.9	4.99	5.6	9.25	27.3	4.14	413
	>174~200	4.9	3.9	5.52	6.2	9.75	29.3	4.34	420
LY04	0~49	4.3	3.7	5.45	6.7	15.05	19.4	41.89	76
	>49~107	4.6	3.9	3.98	5.0	11.33	21.3	8.40	220
	>107~200	5.5	3.9	2.50	3.5	7.05	20.0	2.76	52
LY09	0~7	4.7	4.1	4.13	5.9	14.11	14.9	58.55	270
	>7~38	5.6	5.0	1.89	3.8	10.88	13.7	19.00	169
	>38~160	5.8	4.3	1.90	2.8	9.67	16.5	9.62	214
	>160~200	6.2	4.3	1.28	2.0	4.90	6.5	3.24	164
LY08	0~12	4.6	4.1	4.85	5.9	13.84	14.1	28.20	222
	>12~40	4.5	4.1	5.41	6.3	16.54	15.5	16.88	184
	>40~63	5.0	4.1	3.50	4.3	13.25	15.5	8.96	180
	>63~90	4.9	4.2	2.12	2.9	11.53	14.2	6.98	204
	>90~150	4.8	4.5	0.76	1.4	9.21	11.1	1.98	72
LY23	0~17	4.6	3.7	5.52	6.2	24.17	15.8	81.89	185
	>17~50	4.7	4.0	3.87	4.2	18.30	17.5	31.26	195
	>50~79	5.1	4.1	7.48	7.9	15.78	17.1	9.93	204

2.2 供试土壤的铝水平

从表 3 可知，表层土壤中的铝形态 Min-Al、

表 3 不同土层土壤形态铝的质量分数及其在全铝中的占比

Table 3 The mass fraction of aluminum in different soil layers and its proportion in total aluminum

土层	铝形态	铝质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )		在全铝中的占比/%
		范围	平均值	
表土层	Ex-Al	0.03 ~ 0.85	0.31±0.24	0.19
	Hy-Al	0.85 ~ 3.81	1.57±0.80	0.97
	Or-Al	1.66 ~ 19.80	7.24±4.77	4.46
	DCB-Al	0.52 ~ 6.90	2.47±1.72	1.52
	In-Al	1.34 ~ 9.22	5.10±2.85	3.14
	Nc-Al	9.33 ~ 35.98	18.91±7.91	11.64
	Min-Al	91.66 ~ 162.51	126.78±18.49	78.08
	Alt	119.56 ~ 221.07	162.37±24.86	100.00
表下层	Ex-Al	0.03 ~ 0.56	0.26±0.18	0.16
	Hy-Al	0.45 ~ 3.44	1.24±0.89	0.77
	Or-Al	0.51 ~ 10.29	4.17±3.09	2.59
	DCB-Al	0.43 ~ 10.17	3.24±2.69	2.01
	In-Al	1.62 ~ 10.46	6.09±2.97	3.78
	Nc-Al	4.60 ~ 41.44	23.81±10.68	14.80
	Min-Al	91.61 ~ 177.72	122.13±40.12	75.90
	Alt	122.63 ~ 240.04	160.91±51.39	100.00
母质层	Ex-Al	0.02 ~ 0.46	0.16±0.16	0.09
	Hy-Al	0.38 ~ 3.84	1.09±0.92	0.64
	Or-Al	0.66 ~ 8.10	2.93±2.46	1.71
	DCB-Al	0.33 ~ 10.03	2.61±2.67	1.52
	In-Al	1.16 ~ 10.17	5.49±3.12	3.20
	Nc-Al	11.80 ~ 41.76	21.81±9.94	12.71
	Min-Al	91.23 ~ 197.55	137.44±27.01	80.13
	Alt	121.82 ~ 244.81	171.53±32.79	100.00

Nc-Al、Or-Al、In-Al、DCB-Al、Hy-Al、Ex-Al 的质量分数依次减小；表下层和母质层土壤中 Min-Al、Nc-Al、In-Al、Or-Al、DCB-Al、Hy-Al、Ex-Al 的质量分数依次减小。Ex-Al 对土壤理化性质影响较大，其质量分数占全铝的比例最低；Hy-Al 质量分数占比仅高于 Ex-Al 的，且随土层深度的加深逐渐减小；Nc-Al 质量分数占比随土层深度的加深先增加后减小，表下层土壤中的最高，为 14.80%。

2.3 不同母质发育的土壤中化学结合形态铝的剖面分布特征

如图 1 所示，4 类不同母质的供试土壤中，在剖面上，Ex-Al、Hy-Al 和 Or-Al 质量分数从上往下逐渐减小，DCB-Al、In-Al 和 Nc-Al 质量分数从上往下先增后减。土壤化学结合形态铝分布受成土母质的影响，在不同母质发育形成的土壤中，表土层、表下层和母质层中化学结合形态铝质量分数的分布有明显差异。在 4 类母质中，Ex-Al 质量分数在第四纪红土发育的表土层中最高，而在花岗岩风化物发育的表下层和母质层中最高，石灰岩风化物 and 紫色页岩风化物发育的土壤中 Ex-Al 质量分数明显低于前 2 种成土母质的；Hy-Al 和 In-Al 质量分数在花岗岩风化物发育的各土层中均最高；Or-Al 和 DCB-Al 质量分数在石灰岩风化物发育的各土层中均最高；Nc-Al 质量分数在石灰岩风化物发育的表土层和表下层中均最高，在花岗岩风化物发育的母质层中最高。

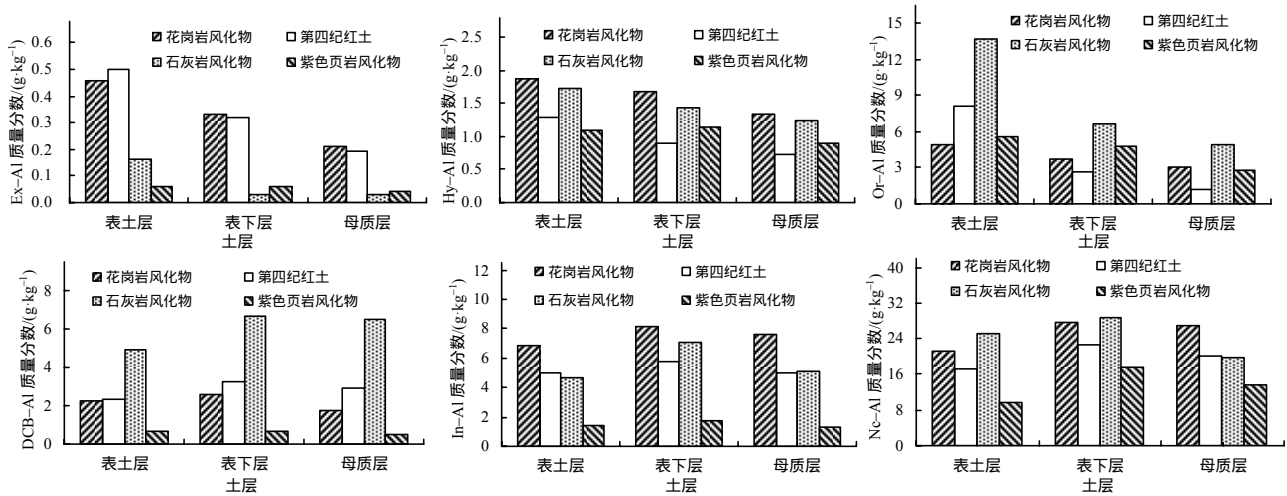


图 1 不同母质土壤中化学结合形态铝的剖面分布

Fig.1 Profile distribution of chemically bound aluminum in different parent soils

## 2.4 不同特征土层土壤中化学结合形态铝的分布特征

在 12 个供试剖面中检索出腐殖质表层、雏形层、黏化层、低活性富铁层、聚铁网纹层 5 种诊断土层和母质层。由图 2 可知,不同特征土层间,6 种化学结合形态铝质量分数均有明显差异。低活性富铁层、聚铁网纹层、腐殖质表层、黏化层、雏形层、母质层中 Ex-Al 质量分数依次减小;腐殖质表层、雏形层、黏化层、低活性富铁层、母质层、聚铁网纹层中 Hy-Al 质量分数依次减小;腐殖质表层、雏形层、黏化层、母质层、低活性富铁层、聚铁网纹层中 Or-Al 质量分数依次减小;低活性富铁层、黏化层、聚铁网纹层、腐殖质表层、雏形层、母质层中 DCB-Al 质量分数依次减小;低活性富铁层、黏化层、雏形层、聚铁网纹层、母质层、腐殖质表层中 In-Al 质量分数依次减小;低活性富铁层、黏化层、聚铁网纹层、雏形层、腐殖质表层、母质层中 Nc-Al 质量分数依次减小。

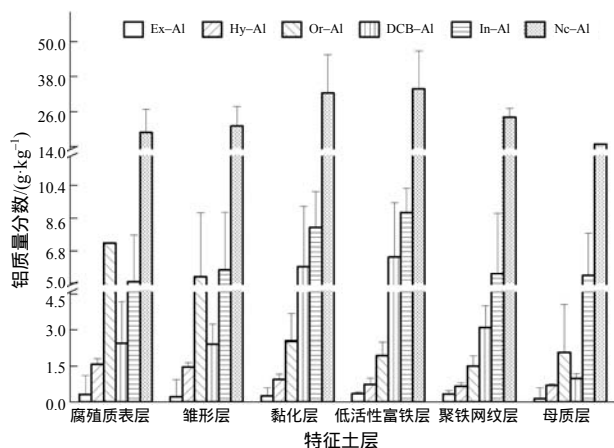


图 2 不同诊断土层和母质层土壤中化学结合形态铝的分布

Fig.2 Distribution of chemically bound aluminum in different diagnostic soil layers and parent material layers

表 4 土壤化学结合形态铝质量分数与土壤理化指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil chemical binding forms of aluminum content and soil physical and chemical indexes									
铝形态	相关系数								
	Al <sub>t</sub>	pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	交换性酸	有机质	黏粒	ECEC	CEC	游离铁
Ex-Al		-0.814**	-0.657**	0.732**	0.324*			-0.363*	
Hy-Al					0.363*	-0.342*			-0.324*
Or-Al			0.296*		0.442**		0.320*	0.643**	
DCB-Al	0.656**					0.836**			0.891**
In-Al	0.458**	-0.396**					-0.605**	-0.584**	
Nc-Al	0.551**					0.409**	-0.304*	-0.320*	0.391**

“\*”“\*\*”“\*\*\*”分别示  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 。

## 2.5 不同土纲土壤中化学结合形态铝的分布特征

12 个供试剖面土壤被划分为新成土、雏形土、淋溶土和富铁土 4 个不同类型的土纲(表 1)。由图 3 可知,不同土纲铝的化学结合形态分布各不相同。富铁土、淋溶土、雏形土、新成土中 Ex-Al、DCB-Al 和 In-Al 质量分数依次减小;新成土、雏形土、淋溶土、富铁土中 Hy-Al 的质量分数依次减小;新成土、雏形土、富铁土、淋溶土中 Or-Al 质量分数依次减小;富铁土、淋溶土、新成土、雏形土中 Nc-Al 质量分数依次减小。

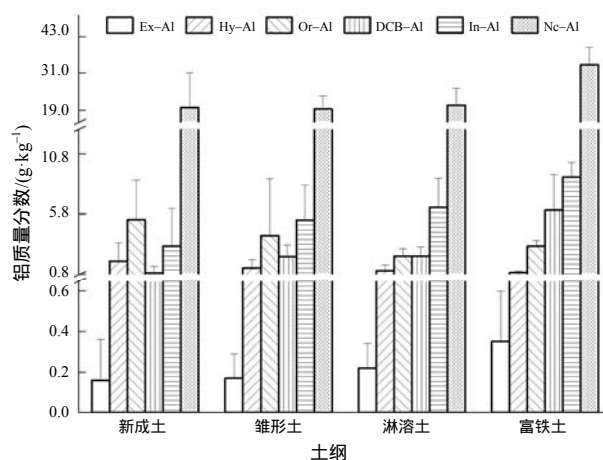


图 3 不同类型土壤中化学结合形态铝的分布

Fig.3 Distribution of chemically bound aluminum in different types of soils

## 2.6 供试土壤铝的化学结合形态与土壤性质的关系

### 2.6.1 铝形态与土壤理化性质的相关性

从表 4 可知,供试土壤中铝的化学结合形态受土壤基本理化性质影响。Ex-Al 与交换性酸呈极显著的正相关,与盐提法和水提法测得的 pH 值呈极显著负相关,与 CEC 呈显著负相关,与有机质呈显著正相关;Hy-Al 与游离铁和黏粒呈显著负相关,

与有机质呈显著正相关;Or-Al 与有机质和 CEC 呈极显著正相关,与 ECEC 和 pH(KCl)呈显著正相关;DCB-Al 与游离铁、黏粒和 Alt 呈极显著正相关;In-Al 与 ECEC、CEC 和 pH(H<sub>2</sub>O)均呈极显著负相关,与 Alt 呈极显著正相关;Nc-Al 与黏粒、游离铁和 Alt 呈极显著正相关,与 CEC 和 ECEC 呈显著负相关。

## 2.6.2 铝形态与土壤理化性质的回归方程

如表 5 所示,多元回归分析结果表明,Ex-Al 质量分数变化的 73%可用盐提和水提 pH、交换性酸、有机质质量分数及 ECEC 的变化来解释,其中 pH 对 Ex-Al 的影响远高于其他理化指标的;Hy-Al 质量分数变化的 22%可由有机质和黏粒质量分数的变化来解释,有机质的变化对 Hy-Al 的影响大于

黏粒的;Or-Al 质量分数变化的 54%可用盐提 pH、有机质质量分数、CEC 和 ECEC 的变化来解释,相同条件下 CEC 的变化对 Or-Al 的影响程度最大;DCB-Al 质量分数变化的 91%可用全铝、黏粒和游离铁质量分数的变化来解释,同等条件下游离铁质量分数的变化对 DCB-Al 的影响高于全铝和黏粒质量分数的;In-Al 质量分数变化的 61%可用全铝质量分数、水提 pH、CEC 和 ECEC 的变化来解释,相同条件下全铝质量分数的变化对 In-Al 质量分数影响最大;Nc-Al 质量分数变化的 48%可以使用 CEC、ECEC、全铝、黏粒和游离铁质量分数的变化来解释,相同的条件下黏粒质量分数的变化对 Nc-Al 的质量分数的影响最大。

表 5 土壤铝形态与理化性质之间的多元回归方程

铝形态	回归方程	复相关系数	决定性系数	P
Ex-Al	$y_1=0.708 - 4.340B + 0.064C + 0.450D + 0.159E - 0.125H$	0.857	0.73	$8.06 \times 10^{-11}$
Hy-Al	$y_2=1.561 + 0.318E - 0.294F$	0.464	0.22	$5.00 \times 10^{-3}$
Or-Al	$y_3= - 1.785 + 0.025C - 2.770 \times 10^{-4}E + 1.003G - 0.409H$	0.735	0.54	$1.00 \times 10^{-6}$
DCB-Al	$y_4= - 5.536 + 0.350A + 0.313F + 0.465I$	0.952	0.91	$4.17 \times 10^{-22}$
In-Al	$y_5=6.895 + 0.447A - 0.224B - 0.250G - 0.278H$	0.779	0.61	$4.13 \times 10^{-8}$
Nc-Al	$y_6=0.950 + 0.430A + 0.450F - 0.247G - 0.122H - 0.135I$	0.694	0.48	$3.80 \times 10^{-5}$

$y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$ 、 $y_5$ 、 $y_6$  分别示 Ex-Al、Hy-Al、Or-Al、DCB-Al、In-Al、Nc-Al 质量分数;A、E、F、I 分别示全铝、有机质、黏粒、游离铁质量分数;B、C 分别示土壤 pH(H<sub>2</sub>O)、pH(KCl);D、G、H 分别示交换性酸含量、CEC、ECEC。

## 3 结论与讨论

本研究中,供试土壤中的化学结合形态铝质量分数与土层有关。在表层土壤中,Min-Al、Nc-Al、Or-Al、In-Al、DCB-Al、Hy-Al、Ex-Al 的质量分数依次减小,在表下层和母质层中,Min-Al、Nc-Al、In-Al、Or-Al、DCB-Al、Hy-Al、Ex-Al 的质量分数依次减小。Ex-Al 占 Alt 比例最小。pH 值是影响 Ex-Al 分布的重要因素<sup>[20-21]</sup>。本研究中,表层土壤 pH 值较低,这使土壤中铝的溶出量增加,致使表层土壤中 Ex-Al 质量分数较大;母质层的风化程度低,土壤中铝活性较弱,影响了 Ex-Al 的形成,Ex-Al 质量分数明显小于其他土层。Hy-Al 在一定条件下可与 Ex-Al 相互转化,是 Ex-Al 的重要来源<sup>[2,22]</sup>,其质量分数占 Alt 比例仅高于 Ex-Al。本研究中,Or-Al 质量分数明显高于 DCB-Al 的,这可能是由于供试土壤剖面属于自然剖面,表层的腐殖质物质矿化速

率较弱,在受到淋溶作用的影响时,表层土壤中的腐殖质物质向表下层土壤中迁移,从而利于剖面上 Or-Al 的累积,这与王建武等<sup>[23]</sup>、田君等<sup>[24]</sup>的研究结果有所不同。DCB-Al、In-Al、Nc-Al 随土层加深呈先增加后减小的分布特征,这可能是由于土体受到淋溶作用的影响,上部土层中的黏粒向表下层迁移,在表下层中质量分数较大,与此同时土体中矿物分解和盐基淋失,导致脱硅和铁铝氧化物富集,这为 DCB-Al、In-Al 和 Nc-Al 的形成提供了条件<sup>[25]</sup>;而土层继续加深,富铝化作用加强,使得黏粒的活性降低,黏粒继续向下部土层移动淀积的可能性也逐步减弱<sup>[23,26]</sup>,母质层 DCB-Al、In-Al 和 Nc-Al 质量分数比表下层的又有所减少。除去可提取的结合形态铝以外,剩余铝均以铝硅酸盐矿物的形式存在,占全铝的 75.90%~80.13%,表下层中物质组成复杂多样,促使了矿物态铝向其他形态的转化,这是表下层中 Min-Al 质量分数占比少于表

土层和母质层的重要原因。

成土母质影响着化学结合形态铝的分布。本研究中,花岗岩风化物的各土层中 Hy-Al 和 In-Al 质量分数均高于其他 3 种母质的,这可能是由于花岗岩风化物发育的土壤一般呈酸性,土体内矿物极易发生粒状崩解,为铝的活化及 Hy-Al 和 In-Al 的富集提供了形成环境。石灰岩风化物的各土层中 Or-Al 和 DCB-Al 质量分数均高于其他 3 种母质的,这可能是由于石灰岩风化物中 pH 值较高,使得有机质的矿化速率下降<sup>[27-29]</sup>,有利于 Or-Al 的富集;而研究区的石灰岩风化物有地质年代形成久远且易于风化的特点,土壤的风化发育较为成熟,铁的游离富集程度高,也有利于 DCB-Al 的形成。石灰岩风化物的表土层和表下层中 Nc-Al 质量分数高于其他 3 种母质的,这可能是由于石灰岩风化物质地黏重、透水性能差,表土层和表下层矿质元素含量丰富,这有利于 Nc-Al 的形成<sup>[25]</sup>。

基于土壤系统分类研究划分的特征土层之间,化学结合形态铝的分布也有明显差异。本研究中,低活性富铁层中 Ex-Al、DCB-Al、In-Al 和 Nc-Al 质量分数最大。这是由于低活性富铁层成土时间长,土壤主要受到中度富铁铝化作用的影响,土体内富含游离铁铝,且黏土矿物以短序和结构简单的 1:1 型高岭石为主,便于 DCB-Al 和 Nc-Al 的形成,而盐基的淋溶流失使土壤 pH 值有所下降,使得土壤中铝的活性增大,羟基化程度减弱,Ex-Al 质量分数升高,Hy-Al 质量分数减小<sup>[30]</sup>;而母质层保留了大部分母质特性,铝的活性低,Ex-Al 质量分数远低于其他土层;腐殖质表层中 Hy-Al 和 Or-Al 质量分数最高,这是由于供试土壤均采集于自然旱地土壤剖面,研究区内水热条件较好,植物生长茂盛,大量的枯枝落叶回归到土壤中,在土壤表层出现有机质大量累积,这为 Or-Al 的累积提供了条件。另外,有机质自身含有大量的羟基和酚羟基,这也有利于 Hy-Al 的形成<sup>[31]</sup>。雏形层中 Or-Al 和 Hy-Al 质量分数仅低于腐殖质表层,这可能是由于土壤中含有羟基和酚羟基的有机质含量下降所导致。黏化层的发育程度弱于低活性富铁层的,土层中铁铝氧化物及 1:1 型黏土矿物含量也少于低活性富铁层,因此,黏化层中的 DCB-Al、In-Al 和 Nc-Al 质量分数也仅低于低活性富铁层的,但远

高于其他特征土层的。

土壤类型的不同也影响结合形态铝的分布。本研究中,富铁土中的 Ex-Al 质量分数最大,发育程度较低的新成土和雏形土中 Ex-Al 质量分数明显小于发育程度较高的淋溶土和富铁土。这是由于富铁土成土时间长,土壤中盐基离子在受到强烈淋失的影响下,质量分数减小,pH 值下降,铝的活性增大,Ex-Al 质量分数升高;pH 值的下降使得交换性铝羟基化程度减弱,富铁土中 Hy-Al 质量分数则最低,这与 KUNITO 等<sup>[3]</sup>的研究结果一致。Or-Al 质量分数随土壤发育程度增加有所降低,在发育程度较高、成土时间长的富铁土和淋溶土中低于发育程度低、成土时间短的雏形土和新成土。这可能是由于土壤发育程度增加,有机质矿化速率有所加快,Or-Al 分解成为 Ex-Al 或 Hy-Al 与有机配体,从而使 Or-Al 质量分数下降。DCB-Al、In-Al 质量分数随土壤发育程度加深而增加,DCB-Al、In-Al 和 Nc-Al 质量分数在富铁土中均最大。这是由于富铁土发育程度高、成土时间长,中度富铁铝化作用强,土体矿物经分解释放出大部分铁,铁、铝氧化物的质量分数也相对增加,土壤中 CEC 减少<sup>[24]</sup>,此时土壤中的黏土矿物主要以高岭石和三水铝矿为主,这也为 Nc-Al 的富集提供了条件<sup>[27]</sup>。

有研究<sup>[23-24]</sup>结果表明,铝的化学结合形态及其质量分数受土壤理化性质的影响。本研究的分析结果表明,Ex-Al 的主要影响因素为 pH。这是由于 Ex-Al 决定土壤交换性酸度,而交换性酸度又是影响土壤 pH 值的主要因素,这使得在 pH 值低的土壤中铝的溶出量增加,Ex-Al 增多。这与人<sup>[32-33]</sup>的研究结果一致。在有机质含量较低的土壤中,Ex-Al 质量分数下降。这是由于有机质含量的降低会使 pH 呈一定程度的升高,促使 Ex-Al 向非交换态铝转化,从而促使交换态铝降低<sup>[31]</sup>。Hy-Al 的主要影响因素为有机质。有机质含量较高的土壤中,Hy-Al 质量分数也有所增加。而 Or-Al 的主要影响因素为 CEC,一定条件下 Or-Al 质量分数的变化可用 CEC 的变化来表示,这与其他研究<sup>[23]</sup>有所区别。DCB-Al 的主要影响因素为游离铁,一定条件下 DCB-Al 质量分数的变化可用游离铁的变化来表示。In-Al 的主要影响因素为全铝,一定条件下 In-Al 质量分数的变化可用全铝的变化趋势来表示。



Nc-Al 的主要影响因素为黏粒,一定条件下 Nc-Al 质量分数的变化可用黏粒的变化趋势来表示。

#### 参考文献:

- [1] 熊毅,陈家坊,文启孝,等.土壤胶体:第一册 土壤胶体的物质基础[M].北京:科学出版社,1983.  
XIONG Y, CHEN J F, WEN Q X, et al. Soil Colloids: Volume 1 The Material Basis of Soil Colloids[M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [2] 邵宗臣,何群,王维君.红壤中铝的形态[J].土壤学报,1998,35(1):38-48.  
SHAO Z C, HE Q, WANG W J. Forms of aluminum in red soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 38-48.
- [3] KUNITO T, ISOMURA I, SUMI H, et al. Aluminum and acidity suppress microbial activity and biomass in acidic forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 97: 23-30.
- [4] BLASER P, WALTHER L, GRAF PANNATIER E. The sensitivity of Swiss forest soils to acidification and the risk of aluminum toxicity[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(4): 605-612.
- [5] TOLPESHTA I I, SOKOLOVA T A. Aluminum compounds in calcium chloride extracts from podzolic soil and their possible sources[J]. Eurasian Soil Science, 2008, 41(6): 595-607.
- [6] 陈福兴,秦瑞君.湘南丘陵红壤利用方式对交换性铝分布的影响[J].土壤,1996,28(6):295-297.  
CHEN F X, QIN R J. Influence of the use of red soil in the hilly areas of southern Hunan on the distribution of exchangeable aluminum[J]. Soils, 1996, 28(6): 295-297.
- [7] 郭荣发,杨杰文.成土母质和种植制度对土壤 pH 和交换性铝的影响[J].生态学报,2004,24(5):984-990.  
GUO R F, YANG J W. pH and the exchangeable aluminum content in acid soils as affected by parent materials and cropping systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 984-990.
- [8] 徐仁扣,季国亮.pH 对酸性土壤中铝的溶出和铝离子形态分布的影响[J].土壤学报,1998,35(2):162-171.  
XU R K, JI G L. Influence of pH on dissolution of aluminum in acid soils and the distribution of aluminum ion species[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(2): 162-171.
- [9] PALLEIRO L, PATINHA C, RODRÍGUEZ-BLANCOM L, et al. Aluminum forms in solid phase of soils developed over schists as a function of land use[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47(Suppl1): 90-96.
- [10] 湖南省农业厅.湖南土壤[M].北京:中国农业出版社,1989.  
Department of Agriculture of Hunan Province. Hunan Soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1989.
- [11] 欧阳宁相.湘东地区丘岗旱地土壤的发生特性及其在中国土壤系统分类中的归属[D].长沙:湖南农业大学,2017.  
OUYANG N X. On the characteristics of hilly upland soils in eastern Hunan and their attributions in Chinese soil taxonomy[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.
- [12] 欧阳宁相,张杨珠,盛浩,等.湘东地区紫色土在中国土壤系统分类中的归属[J].土壤通报,2017,48(6):1281-1287.  
OUYANG N X, ZHANG Y Z, SHENG H, et al. Attribution of purple soils of eastern Hunan in Chinese soil taxonomy[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(6): 1281-1287.
- [13] 罗卓.湘北地区典型旱地土壤的发生特性及其在中国土壤系统分类中的归属[D].长沙:湖南农业大学,2018.  
LUO Z. On the genetic characteristic of upland soil in northern Hunan and their attribution in Chinese soil taxonomy[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.
- [14] 于康.湘南地区典型旱地土壤的发生特性及其在中国土壤系统分类中的归属[D].长沙:湖南农业大学,2019.  
YU K. On the genetic characteristics of upland soils in southern Hunan and their attributions in Chinese soil taxonomy[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019.
- [15] 罗卓,欧阳宁相,张杨珠,等.大围山花岗岩母质发育土壤在中国土壤系统分类中的归属[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(3):301-308.  
LUO Z, OUYANG N X, ZHANG Y Z, et al. Attribution of the soils developed from the weathered granites in Dawei mountain area in Chinese soil taxonomy[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2018, 44(3): 301-308.
- [16] 湖南省农业厅.湖南土种志[M].长沙:湖南省农业厅,1987.  
Department of Agriculture of Hunan Province. Hunan Natives[M]. Changsha: Department of Agriculture of Hunan Province, 1987.
- [17] 张甘霖,李德成.野外土壤描述与采样手册[M].北京:科学出版社,2016.  
ZHANG G L, LI D C. Manual of Soil Description and Sampling[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [18] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012.  
ZHANG G L, GONG Z T. Soil Survey Laboratory Methods[M]. Beijing: Science Press, 2012.

- [19] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. Soil System Classification Research Group Nanjing Institute of Soil Science Chinese Academy of Sciences, Chinese Soil System Classification Project Research Cooperative Group. Chinese Soil System Classification Retrieval[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001.
- [20] 余健, 俞元春, 房莉, 等. 有机酸对森林土壤 pH 及铝形态变化的影响[J]. 福建林学院学报, 2005, 25(3): 243–246. YU J, YU Y C, FANG L, et al. Effects of low molecular weight organic acids on the pH and the form of aluminum of forest soils[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2005, 25(3): 243–246.
- [21] 刘国群, 庄舜尧, 李国栋, 等. 不同种植年限下雷竹林土壤中铝的形态变化[J]. 土壤, 2008, 40(6): 1013–1016. LIU G Q, ZHUANG S Y, LI G D, et al. Changes of aluminum form in *Phyllostachy spraeox*. *Preveynalis* soils with planting time[J]. Soils, 2008, 40(6): 1013–1016.
- [22] 吕焕哲, 王凯荣, 谢小立. 土地利用方式与坡位土壤活性铝形态特征分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 172–175. LYU H Z, WANG K R, XIE X L. Character of soil aluminum forms under different land use and slope position[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(1): 172–175.
- [23] 王建武, 骆世明, 冯远娇. 酸性硫酸盐土中铝的形态[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 735–740. WANG J W, LUO S M, FENG Y J. Aluminum forms in Acid Sulfate Soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(5): 735–740.
- [24] 田君, 池汝安, 朱国才, 等. 我国南方某类稀土矿中铝的赋存状态[J]. 有色金属, 2000, 52(3): 58–60. TIAN J, CHI R A, ZHU G C, et al. Existing state of aluminum in rare earth ore in southern China[J]. Nonferrous Metals, 2000, 52(3): 58–60.
- [25] 陈庆强, 沈承德, 孙彦敏, 等. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 1–8. CHEN Q Q, SHEN C D, SUN Y M, et al. Mechanism of distribution of soil organic matter with depth due to evolution of soil profiles at the Dinghushan biosphere reserve[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 1–8.
- [26] 龚子同, 张甘霖, 陈忠诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007. GONG Z T, ZHANG G L, CHEN Z C, et al. Pedogenesis and soil Taxonomy[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [27] 郑洁, 张继宗, 翟丽梅, 等. 洱海流域农田土壤氮素的矿化及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2010, 30(S1): 35–40. ZHENG J, ZHANG J Z, ZHAI L M, et al. Nitrogen mineralization and its influence factors in the farmland soils of Erhai Lake Basin[J]. China Environmental Science, 2010, 30(S1): 35–40.
- [28] 孙晓, 庄舜尧, 桂仁意, 等. 连续浸提法测定集约经营下雷竹林土壤铝的形态及变化[J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1118–1122. SUN X, ZHUANG S Y, GUI R Y, et al. Al distribution in soils planted Lei bamboo(*Phyllostachy spraeox*. *Preveynalis*) under intensive management with a continuous extraction method[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(5): 1118–1122.
- [29] HSU P H. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides[M]// DIXON J B, WEED S B. Minerals in Soil Environments. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989: 331–378.
- [30] 李洁, 谭珊珊, 罗兰芳, 等. 不同施肥结构对红菜园土有机质、酸性和交换性能的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 258–262. LI J, TAN S S, LUO L F, et al. Effects of different fertilization structure on soil organic matter, acidity and exchange capacity in acid red garden soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 258–262.
- [31] 赵美芝, 罗质超, 高建平. 红壤中交换性铝调控条件的研究 II. 有机质和  $\text{CaCO}_3$  对交换性铝的影响[J]. 土壤与环境, 1999, 8(2): 127–129. ZHAO M Z, LUO Z C, GAO J P. Study on the control conditions for exchangeable aluminum in red soils: II. Effect of organic matter and  $\text{CaCO}_3$  on the exchangeable aluminum in red soils[J]. Soil and Environmental Sciences, 1999, 8(2): 127–129.
- [32] 苏有健, 廖万有, 王烨军, 等. 皖南茶园土壤活性铝形态分布与土壤 pH 和植茶年限的关系[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 721–728. SU Y J, LIAO W Y, WANG Y J, et al. Influences of soil pH and cultivation years on active aluminum species distribution from tea soils in southern Anhui, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(4): 721–728.
- [33] 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 Y C, DING A F. Effects of simulated acid rain on dissolution and transformation of aluminum in acid soil of south China[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(2): 87–90.

责任编辑: 邹慧玲  
英文编辑: 柳 正