

有机物料对酸性红壤铝毒的缓解效应

吕焕哲^{1,3}, 王凯荣^{1,2*}, 谢小立¹, 王开峰¹

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所桃源农田生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南长沙 410125;

2 青岛农业大学农业生态与环境健康研究所, 青岛 266109, 3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用盆栽试验研究了施用不等量稻草对酸性红壤旱耕地铝毒的缓解效应。结果表明, 添加不等量的秸秆碳(C)后, 土壤 pH 值显著提高, 土壤交换性铝和吸附态羟基铝的含量则明显降低, 土壤有机络合态铝的含量也呈增加趋势。添加铝盐并不影响秸秆碳对降低土壤交换性铝和吸附态羟基铝含量的作用。在本研究中, 土壤 pH 值与土壤交换性铝和土壤吸附态羟基铝均呈显著负相关, 方程分别为 $y = -2193.9x + 11545, R^2 = 0.9798^{**}$, $y = -655.34x + 9748, R^2 = 0.7837^{**}$ 。土壤交换性铝和吸附态羟基铝与玉米主根长, 地上部磷、钾含量均呈显著负相关, 是抑制玉米吸收养分的主要限制因素, 土壤吸附态羟基铝是次于交换性铝的又一活性较大的铝化合物。

关键词: 酸性红壤; 有机物料; 交换性铝; 吸附态羟基铝; 有机络合态铝

中图分类号: S158.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X (2007)04-0637-05

Alleviation of organic manure on aluminum toxicity in acid red soil

LÜ Huan-zhe^{1,3}, WANG Kai-rong^{1,2*}, XIE Xiao-li¹, WANG Kai-feng¹

(1 National Observation Station of Taoyuan Agro-ecology System, Institute of Subtropical Agriculture, CAS, Changsha 410125, China;

2 Institute of Agriculture Ecological and Environmental Health, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

3 The Graduate School of CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: Aluminum is the most abundant metal that makes up 7% of the earth's crust and occurs in a number of different forms in the soil. If the soil pH < 5 or even 5.5, as is now the case accounted for 40% of the arable lands in the world, the harmless oxides and aluminosilicates could be solubilized into toxic forms, generally referred to Al^{3+} , which is a primary factor limiting plant growth. A possible alternative to ameliorate Al toxicity is the application of organic manure such as rice straw. A pot experiment was conducted to investigate the alleviation of straw on aluminum toxicity in acid red soil. The result revealed that adding 0.5%, 1% and 1.5% organic straw carbon significantly increased soil pH value and active exchangeable aluminum; while decreased adsorbent hydroxy aluminum. Soil pH negatively correlated with soil exchangeable aluminum and adsorbent hydroxyl aluminum. with the correlation equations being $y = 2193.9x + 11545, R^2 = 0.9798^{**}$ and $y = -655.34x + 9748, R^2 = 0.7837^{**}$ respectively. Soil exchangeable aluminum and adsorbent hydroxyl aluminum were significantly negative correlated to root length and P and K content in the ground parts. It is the main limiting factor controlling nutrients uptake.

Key words: acid red soil; organic material; exchangeable aluminum; adsorbent hydroxy aluminum; organically complexed aluminum

我国酸性土壤遍及 14 个省区, 约占全国耕地面积的 21%。土壤酸化已成为热带、亚热带土壤的主要问题, 同时也越来越成为温带土壤的潜在问题。

我国广泛分布着红黄壤等酸性土壤, 酸害和铝毒是该地区农业生产和生态环境建设的主要障碍因素之一^[1]。在土壤铝毒的矫正中, 研究者大多侧重于利

收稿日期: 2006-03-08

修改稿收到日期: 2006-05-17

基金项目: 中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-441); CERN 野外台站研究基金项目资助。

作者简介: 吕焕哲(1978—), 女, 河北保定人, 博士研究生, 主要从事农业环境与生态系统管理方面研究。

Tel: 0731-4615223, E-mail: lvhuanzhe@163.com. * 通讯作者 Tel: 0731-4615230, E-mail: krwang@isa.ac.cn

用碱性无机物,如添加石灰或磷矿粉^[2-3],通过提高土壤 pH 值降低铝的活性,达到缓解铝毒的目的。但是施用碱性无机物会引起某些重金属的迁移转化^[4]及增强硝化作用^[5]和硝酸盐的淋失^[6],降低氮肥利用效益。关于有机肥改良红壤铝毒害多集中在有机酸和猪厩肥的影响方面^[7-8]。我国双季稻区水稻秸秆资源丰富,而水稻秸秆全量还田对稻田整理带来诸多不便,导致大量秸秆被就地焚烧,造成环境污染和资源浪费。本研究旨在探讨利用水稻秸秆作为土壤改良剂,消除酸性红壤铝毒的可行性,为水稻秸秆资源的高效利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验方法

供试土壤采自中国科学院桃源农业生态实验站旱耕地 0—20 cm,母质为第四纪红土。其有机质含量为 21.5 g/kg,全 N 16.6 g/kg,速效 P 6.7 mg/kg,速效 K 101.7 mg/kg,交换性 Al 1865 mg/kg,吸附态羟基 Al 1370 mg/kg,有机络合态 Al 44481 mg/kg, pH 4.93。供试玉米品种为掖单 13。

试验设: 1) 对照, 2) 0.5% 秸秆 C (稻草,下同), 3) 1% 秸秆 C, 4) 1.5% 秸秆 C, 5) 对照 + 30 mg/kg Al, 6) 0.5% 秸秆 C + 30 mg/kg Al, 7) 1% 秸秆 C + 30 mg/kg Al, 8) 1.5% 秸秆 C + 30 mg/kg Al 8 个处理,每个处理 4 次重复。供试稻草为成熟期杂交晚稻地上部分的茎叶混合料,养分含量为: N 6.82、P 0.86、K 33.09 g/kg。

土样风干后过 2 mm 筛,秸秆粉碎过 1 mm 筛,每盆装土 7 kg,施用常量基肥: N (尿素) 0.12g/kg, P₂O₅ (K₂HPO₄) 0.1g/kg, K₂O (KCl) 0.1 g/kg,所用铝盐为 Al₂(SO₄)₃·18H₂O。土壤预培养 10d, 2005 年 8 月 3 日,玉米种子催芽后,挑选露白一致的种子播于盆中,每盆 3 粒。试验期间按常规管理,9 月 30 日结束试验,取植株和土壤样品。

1.2 测定项目与方法

玉米生长期间,记录植株的生长状况。取样以后,测定土壤 pH、交换性铝、吸附态羟基铝和有机络合态铝。

土壤活性铝含量的测定: 采用邵宗臣^[9]改进的连续分级提取,比色法测定。称 1 g 土壤先用 20 mL 1mol/L KCl 溶液提取 0.5 h,离心分离后倾出上清液,用去离子水洗涤残渣,之后再用 20 mL 0.2mol/L HCl 溶液提取 0.5 h,离心分离后倾出上清液,用去离子水洗涤残渣,剩余土壤最后用 40 mL 0.1 mol/L

Na₂P₂O₇ 溶液提取 2 h。KCl 提取的铝主要代表交换性铝(包括水溶性铝),HCl 提取的铝主要代表吸附态羟基铝,Na₂P₂O₇ 提取的铝主要代表有机络合态铝。

pH 测定: 水土比为 2.5:1,酸度计测定。

所有数据处理均采用 Excel 2000 和统计分析软件 SAS 9.0 作图和方差分析。

2 结果与讨论

2.1 施加不等量秸秆对土壤 pH 的影响

pH 值是土壤的基本性质,也是影响活性铝形态变化最重要的因素。在 8 个处理中,土壤 pH 值的差异达显著水平 ($P < 0.05$) (表 1)。对照处理的土壤 pH 值为 4.28,在无外源铝的条件下,添加 0.5%、1% 和 1.5% 的秸秆 C 后,土壤 pH 值分别比对照提高了 5%、13% 和 16%,增幅显著。土壤 pH 值的变化与秸秆的分解密切相关。在秸秆分解前期,有机氮分解脱去 -NH₂,脱去的 -NH₂ 在土壤中进一步形成 NH₃ 和 NH₄⁺,消耗了土壤中的 H⁺,并且能使局部土壤的 Eh 降低,引起 Fe、Mn 等氧化物还原,产生 OH⁻^[10-13],提高土壤 pH。有研究表明,添加铝盐会降低土壤的 pH 值^[14]。但在本研究中,添加铝盐后 pH 略有下降但差异不显著,这主要是因为所添加的铝量为当地平均酸溶铝量,不足以使土壤 pH 值下降至差异水平。

2.2 施用不等量秸秆对土壤活性铝形态的影响

2.2.1 对土壤交换性铝的影响 土壤交换性铝(包括水溶性铝)主要是指静电引力吸附于土壤固相表面的交换性铝离子,是酸性土壤中常见的交换性阳离子,也是土壤各类形态铝转化的重要环节。其包含有可使作物中毒的大量高活性单体铝离子,常用来反映土壤中是否存在铝毒^[15]。

施用不等量的水稻秸秆,土壤交换性铝的含量差异达显著水平 ($P < 0.05$) (表 1)。在不添加铝盐的处理中,施用 0.5%、1%、1.5% 的水稻秸秆,土壤交换性铝的含量分别比对照降低了 17.6%、51.9% 和 72.5%,这和土壤 pH 值的变化是相关的。本试验中,土壤交换性铝与土壤 pH 呈极显著负相关: $y = -2193.9x + 11545$, $R^2 = 0.9798^{**}$ 。土壤 pH 值升高后,溶解度降低,使得 Al³⁺ 发生沉淀。有资料表明,当土壤 pH 值大于 4.5 时,Al³⁺ 急剧下降,至 5.5 时 Al³⁺ 含量基本为零;当 pH 值超过 6.5 时 Al³⁺ 又急速增加。另一方面,添加秸秆会增加土壤中水溶性有机质和有机小分子化合物的含量^[16],促

表 1 施加不等量秸秆对土壤 pH 值、交换性铝、吸附态羟基铝、有机络合态铝的影响

Table 1 Effect of straw on soil pH value, exchangeable Al, adsorbent hydroxy Al, organically complexed Al

加入的秸秆碳量 Added C of straw (%)	pH	Exchangeable Al	Adsorbent hydroxy Al	Organically complexed Al	
		交换性铝	吸附态羟基铝	有机络合态铝	
		(mg/kg)			
- Al	CK	4.28 ± 0.02 d	2087.25 ± 8.98 a	6817.96 ± 106.81 ab	32936 ± 151.4 c
	0.5%	4.65 ± 0.05 c	1718.80 ± 5.11 b	6749.90 ± 109.09 ab	35727 ± 150 bc
	1.0%	4.86 ± 0.03 ab	1003.36 ± 14.34 c	6476.81 ± 41.61 c	35895 ± 272 bc
	1.5%	4.95 ± 0.05 a	575.62 ± 6.58 d	6449.00 ± 102.07 c	38108 ± 152.7 ab
+ Al	CK	4.26 ± 0.02 d	2142.53 ± 4.16 a	7041.85 ± 49.71 a	40356 ± 124.7 a
	0.5%	4.57 ± 0.07 c	1641.67 ± 14.67 b	6900.70 ± 60.00 ab	38407 ± 63.6 ab
	1.0%	4.80 ± 0.04 b	1054.86 ± 17.84 c	6603.19 ± 53.00 bc	36191 ± 130 bc
	1.5%	4.93 ± 0.03 a	600.71 ± 7.71 d	6588.92 ± 81.00 bc	35759 ± 179 bc

注(Notes): 同一列两组处理中不同字母表示 5% 的差异显著性(LSR_{0.05}), 下同。Different letters in same column of two group treatments mean significant at 5% level, and the same symbol was used for table 2.

进铝—有机物复合物的形成,减少交换性铝含量,降低铝对植物的毒性^[17]。同样添加铝盐并未明显增加土壤交换性铝的含量,但不影响秸秆 C 对降低吸附态羟基铝含量的作用。

2.2.2 对土壤吸附态羟基铝的影响 吸附态羟基铝主要是指以无机胶膜吸附于矿物表面和边缘的羟基铝和氢氧化铝,通常由交换态铝聚合或矿物中铝在氢离子作用下转化而来,是铝形态转化的产物。

表 1 表明,施用不等量秸秆后,土壤吸附态羟基铝的含量差异达显著水平($P < 0.05$)。添加 0.5% 的秸秆 C 后,土壤吸附态羟基铝含量无明显差异,但当所添加的秸秆 C 增加到 1% 时,其含量显著降低,当所添加的秸秆继续增加时,土壤吸附态羟基铝不再降低。由于秸秆分解所产生水溶性有机物质和有机小分子化合物随秸秆量的增加而增加^[16],故土壤吸附态羟基铝向铝—有机物复合物的方向转化的量也增加,从而降低土壤吸附态羟基铝的含量。本研究中,土壤吸附态羟基铝与土壤 pH 之间呈极显著负相关: $y = -655.34x + 9748, R^2 = 0.7837^{**}$,可见 pH 值是影响吸附态羟基铝的重要因素。添加铝盐具有提高土壤吸附态羟基铝含量的效应,但不影响秸秆 C 对降低吸附态羟基铝含量的作用。

在本研究条件下,土壤吸附态羟基铝与土壤 pH 值呈极显著负相关(-0.849^{**}),这与王维君^[18]认为两者无相关性的结论不同。其原因主要是本研究选用的只有一种红壤,通过添加不等量秸秆调节吸附态羟基铝,而王维君选用了几种不同母质发育的土壤。众所周知,铝的含量与母质存在密切关系^[19-20]。如将王维君所选的土壤进行归类,将发育于同一母质的砖红壤和赤红壤分为一类,土壤 pH

值与吸附态羟基铝呈显著负相关(-0.989^{*}),故两种结论并不矛盾。可见,吸附态羟基铝是次于交换性铝的又一活性较大的铝化合物。

2.2.3 对土壤有机络合态铝的影响 土壤有机络合态铝是由土壤交换性铝或无机吸附态羟基铝与有机配体结合形成的^[5],它的形成既阻碍了铝的老化结晶,保留了它的活性表面而影响某些营养元素、污染物质的循环和周转,又使铝离子和羟基单体铝等对生物有毒性的形态转化为无(少)毒的形态^[21]。

添加不等量秸秆后,土壤有机络合态铝含量差异达显著水平($P < 0.05$)(表 1)。在不添加铝盐的处理中,添加秸秆后土壤水溶性有机质和有机小分子化合物含量提高^[16],促使土壤交换性铝和吸附态羟基铝向有机络合态铝转化,提高土壤有机络合态铝的含量。随秸秆量的增加,增幅逐渐减小。本试验中,土壤有机络合态铝与添加的秸秆量呈极显著正相关(0.955^{**})。在添加铝盐的处理中,土壤有机络合态铝与添加的秸秆量呈极显著负相关(-0.971^{**}),但仍高于不添加铝盐的对照处理,这可能与秸秆作用的时间较短有关。有机络合态铝不稳定,也可能与试验条件和管理措施等有关,有待于进一步深入研究。

2.3 施用秸秆对玉米生长的影响

试验结果表明,无秸秆对照和无秸秆加铝盐处理的玉米生长最差,在拔节初期,出现植株叶片短小,叶尖发黄,黄化部位逐渐向叶基推进的铝毒症状;而添加秸秆的处理,玉米生长良好,以 1.0% 秸秆 C 的处理最好。玉米生长 10 d 后,不同处理间株高出现显著差异,秸秆添加量超过 1% 秸秆 C,株高不再增加;添加铝盐的处理株高要低于相应的无铝

处理。

根系是植物吸收养分的主要器官,铝毒土壤上植物根的生长受到限制,施用有机肥可以降低活性铝的含量^[2, 22-23],促进根的生长。图1看出,添加不等量秸秆后,主根随秸秆添加量的增加而伸长,添加铝盐处理的伸长量(43.3%)低于相应的无铝处理(52.9%)。在本试验中,交换性铝和吸附态羟基铝的含量与玉米根长之间均呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.903^{**} 和 -0.887^{**} ,表明土壤交换性

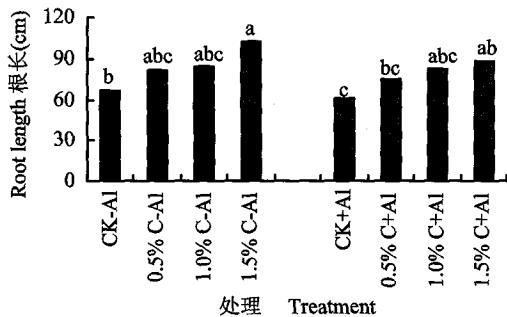


图1 施用秸秆对玉米根长的影响

Fig.1 Effect of applying straw on root length of maize

铝和吸附态羟基铝是影响玉米根系生长的一个重要因素。

2.4 地上部养分的含量特征

从植株养分含量(表2)可以看出,植株P、K含量随添加秸秆量的增加而提高,而植株N则随秸秆量的增加而降低,差异达显著水平。K含量增加的原因有两个,一是因为秸秆本身含有大量K,能溶于水促进作物的吸收,二是添加秸秆降低了土壤中的铝毒,使根系增长,作物吸收养分的能力增强。添加铝盐后,K的增幅减小,说明铝的存在降低了作物对K的吸收能力;同样P含量增加也是因为添加秸秆后铝毒减弱,提高了作物对P的吸收能力。添加秸秆后,部分秸秆N会被微生物和粘土矿物固持,使植株N在短期内含量降低。

植株养分与铝形态的关系的相关分析(表3)表明,土壤交换性铝、土壤吸附态羟基铝与玉米根长、植株P和植株K呈显著负相关,是限制根伸长,影响作物对养分吸收的重要因素。故降低土壤交换性铝和吸附态羟基铝的含量是缓解酸性红壤铝毒的关键因素。

表2 玉米地上部养分含量

Table 2 The content of nutrients in the shoot of the maize

养分 Nutrition (g/kg)	秸秆碳量 Straw C (%)							
	- Al				+ Al			
	0	0.5	1.0	1.5	0	0.5	1.0	1.5
P	2.57 d	2.95 bed	3.20 bc	3.70 a	2.80 cd	2.81 cd	3.18 bc	3.28 bc
K	36.10 d	39.70 bed	40.70 bc	47.70 a	38.10 cd	39.50 bed	42.80 b	47.10 a
N	26.87 a	25.19 a	23.68 ab	20.10 b	27.39 a	19.52 b	18.80 b	18.70 b

表3 土壤交换性铝、吸附态羟基铝与玉米植株养分的相关关系

Table 3 Correlation among exchangeable Al, adsorbent hydroxyl Al and plant nutrients

项目 Items	交换性铝 Exch. Al	吸附态羟基铝 Hy Al	根长 Root length	植株P P in plant	植株K K in plant	植株N N in plant
交换性铝 Exch. Al	1.000	0.887*	-0.903*	-0.917*	-0.935*	0.78*
吸附态羟基铝 Hy Al		1.000	-0.887*	-0.829*	-0.726*	0.527
根长 Root length			1.000	0.929*	0.874*	-0.652
植株P P in plant				1.000	0.924*	-0.618
植株K K in plant					1.000	-0.759*
植株N N in plant						1.000

3 结论

施用秸秆可以提高酸性红壤的pH值,显著降

低高活性的交换性铝和吸附态羟基铝的含量,明显提高土壤有机络合态铝的比例,但由于秸秆作用时间较短,有机络合态铝不稳定。铝毒降低后,玉米主

根长伸长,吸收养分的能力增强。

参考文献:

- [1] 李平,王兴祥. 几种低分子量有机酸淋溶对土壤 pH 和交换性铝的影响[J]. 土壤, 2005, 37(6): 669-673.
Li P, Wang X X. Effects of leaching with low molecular weight organic acid on soil pH and exchangeable aluminum [J]. Soil, 2005, 37(6): 669-673.
- [2] 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 CaCO₃ 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 soil: II. Effect of organic matter and CaCO₃ on the exchangeable aluminum in red soils [J]. Soil Environ. Sci., 1999, 8(2): 127-129.
- [3] 胡红青,黄巧云,李学垣. 磷矿粉缓解酸性土壤铝毒的研究[J]. 中国农业科学, 1995, 28(2): 51-57.
Hu H Q, Huang Q Y, Li X Y. The diminishing effect of phosphate rock application on aluminum toxicity in acid soil [J]. Sci. Agric. Sin., 1995, 28(2): 51-57.
- [4] Schierl R, Kreutzer K. Einfluß von saurer Beregnung und Kalkung auf die Schwermetallodynamik im Högwald experiment [J]. Forstwiss. Forsch., 1991, 39:204-211.
- [5] Wenzel B, Ulrich B. Kompensationskalkung-Risiken und ihre Minimierung[J]. Forst Holz., 1988, 43:12-16.
- [6] Arnold G, van Beusichem M L, van Diest A. Nitrogen mineralization and H⁺ transfer in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forest soil as affected by liming[J]. Plant Soil, 1994, 161: 209-218.
- [7] 秦瑞君,陈福兴. 低分子有机酸离子对降低土壤铝毒的作用[J]. 土壤肥料, 1996(5): 12-14.
Qin R J, Chen F X. Alleviation of small molecular organic acid on aluminum toxicity in acid red soil [J]. Soils Fert., 1996(5): 12-14.
- [8] 李德华,黄升谋,贺立源. 植物根系有机酸的分泌和解铝毒作用[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(4): 505-510.
Li D H, Huang S M, He L Y. The organic acid exudation of plant and its role in aluminum toxicity elimination mechanism from plant roots [J]. Plant Physiol. Commun., 2004, 40(4): 505-510.
- [9] 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 Pedol. Sin., 1998, 35(1): 38-48.
- [10] Hue N V, Craddock G R, Adams F. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoil [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50: 28-34.
- [11] Bessho T, Bell L C. Soil solid and solution phase changes and mung bean response during amelioration of aluminum toxicity with organic matter [J]. Plant soil, 1992, 140: 183-196.
- [12] 曾清如,廖柏寒,蒋朝辉,等. 施用尿素引起红壤 pH 及铝活化的短期变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 249-252.
Zeng Q R, Liao B H, Jiang C H *et al.* Short term changes of pH value and Al activity in acid soils after urea fertilization[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(2): 249-252.
- [13] 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 Ecol. Sin., 2004, 24(5): 984-990.
- [14] 夏文娟,张丽霞,向勤程. 添加硫酸铝对茶园土壤部分化学性质的影响[J]. 茶叶通讯, 2005, 32(3): 8-11.
Xia W J, Zhang L X, Xiang Q C. Effects of adding aluminum sulfate on some chemical properties of soil in tea garden[J]. Tea Commun., 2005, 32(3): 8-11.
- [15] 秦瑞君,陈福兴. 长期种植牧草和绿肥对降低土壤铝毒的作用[J]. 土壤肥料, 1997(5): 37-39.
Qin R J, Chen F X. Alleviation of pasture and green manure on soil aluminum toxicity [J]. Soils Fert., 1997(5): 37-39.
- [16] Xu J M, Tang C, Chen Z L. Chemical composition controls residue decomposition in soils differing in initial pH [J]. Soil Biol. Biochem., 2006, 38: 544-552.
- [17] 陈梅,陈亚华,沈振国. 猪粪对红壤铝毒的缓解效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 173-176.
Chen M, Chen Y H, Shen Q R. Amelioration of aluminum toxicity on wheat plants grown in acid red soil by pig manure [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(2): 173-176.
- [18] 王维君. 我国南方一些酸性土壤铝存在形态的初步研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(1): 1-8.
Wang W J. Study on aluminum forms in some acid soils in south China [J]. Trop. Subtrop. Soil Sci., 1995, 4(1): 1-8.
- [19] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1999. 10-14.
Mou B L. Element geochemistry [M]. Beijing: Beijing University Publishing House, 1999. 10-14.
- [20] Sierra J, Noel C, Dufour L *et al.* Mineral nutrition and growth of tropical maize as affected by soil acidity[J]. Plant Soil, 2003, 252: 215-226.
- [21] 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]. Chin. J. Appl. Ecol., 2000, 11(5): 735-740.
- [22] Pypers P, Verstraete S, Cong P T, Merckx R. Changes in mineral nitrogen, phosphorus availability and salt-extractable aluminum following the application of green manure residues in two weathered soils of South Vietnam[J]. Soil Biol. Biochem., 2005, 37(1): 163-172.
- [23] 宗良纲,马建锋,徐晓炎. 红壤施用不同有机酸解铝毒效果的比较[J]. 农业环境保护, 2002, 21(4): 306-308.
Zong L G, Ma J F, Xu X Y. Role of enveloped organic acids in detoxification of aluminum in red soil [J]. Agro-Environ. Prot., 2002, 21(4): 306-308.