

125-130

S153.61

土壤氯研究的进展

涂书新 郭智芬

孙锦荷

(湖北省农科院原子能所 武汉 430064) (浙江农业大学核农所)

摘 要 综述了近年来土壤氯研究在氯离子行为动态及外源氯对土壤性质影响两方面的研究成果,提出了今后土壤氯研究应注意的几个方面的问题。

关键词 土壤氯;含氯肥料;行为;土壤性质

氯是植物必需的营养元素。在植株中氯的含量水平随物种和取样地点而变动,一般在0.03~1.5%之间。但也有含量达10%的(如烟草叶)。尽管如此,实验证明植物对氯的需要却出乎意料的少,一般0.1%即可满足需要。因此,在植物营养上又称氯为微量元素。

本世纪60年代以来,随着我国联碱工业的迅速发展,其副产品氯化铵大量用于农田施肥,70年代以来氯化钾也得到迅速推广应用。据报道,1993年我国施用氯化铵50.7万吨^[1],施钾肥(K₂O)212.3万吨,按90%折成氯化钾318万吨^[2]。两种肥料带入农田的氯就达185.4万吨。加上人类尿中的氯,估计进入农田的氯每年至少在200万吨以上。农田生态系统中氯的大量增加造成了土壤和植物营养上一系列的理论和实际问题。1980年毛知耘等首先提出开展含氯肥料合理施用的研究^[3]。10多年来,经过许多研究工作者努力,基本弄清了含氯肥料在许多作物,如水稻、小麦、玉米、棉花、蔬菜、果树等上的效应,肯定了含氯化肥的增产效果,提出了含氯化肥的合理施用技术。这方面的研究成果已有较好的综述和总结^[4,5]。另外,国内外学者还对氯在土壤中的行为,如土壤氯素的土壤化学、土壤生物化学、及土壤地球化学行为进行了探讨,取得了一定的进展。由于对土壤氯方面的研究还缺乏系统的总结,本文拟就这方面的研究内容作一综述,并对今后土壤氯的研究进行展望。

1 土壤中氯的行为

1.1 含量

氯在地壳中的含量只有0.05%。土壤平均含氯100mg/kg左右。氯在土壤中很易变化(仅次于NO₃),其含量与降水量、地势及是否盐渍化有密切关系。一般,降水量高、地势高、土壤淋溶性能好的非盐渍化土壤,氯的含量低。反之,则高。在土壤溶液中,氯的含量为2.5~56.8mg/L。盐污染土壤溶液中氯的含量要高得多。据测定0~15cm和15~30cm土层分别可达1029.5和248.9mg/L^[6]。

1.2 残留与分布

施用含氯肥料使土壤含氯量增加,但是,其增加量与施氯量、降雨量及土壤的透水性有密切关系。在盆栽条件下,施入的氯除被植株吸收的以外,绝大部分残留在土壤中。田间条件下,由于受到雨水的淋洗,土壤中Cl⁻量增加并不多。朱元洪等报导^[7],施含氯化肥可导致土壤

Cl^- 积累,但残留率随土壤的渗水性和土质而异,变幅 0—30%。上海农科院土肥所报道^[8],大麦每季施 Cl^- 5.65kg/亩,两年后土壤氯无变化;而每季施 Cl^- 28. kg/亩,两年后土壤 Cl^- 残留 8.8%。阎相奎^[9]报导甘肃土壤 0—200cm 土层剖面 Cl^- 的残留量与施氯量显著相关,施氯主要积累在 80cm 左右的土层。黄云等^[10]采用渗漏液测定法研究 Cl^- 在四川三种紫色土中的迁移及动态分布。结果表明,旱地土壤渗漏液中的 Cl^- 随作物生育进程而逐渐增加。 Cl^- 主要积累在 20—80cm 的土层中。国外一些学者也探讨了 Cl^- 在土柱和大田中的淋溶分布情况,结果都表明 Cl^- 为强淋溶元素,施入土壤中的 Cl^- 75% 以上都会随水流渗透到 30cm 以上的土层中^[11-13]。

陈祖义等^[14]用模拟的水田生态系统结合 ^{36}Cl 示踪技术探讨了水田施用 $\text{NH}_4^{36}\text{Cl}$ 的去向。在 21 天内,水稻吸收的 ^{36}Cl 占 26.02%,随土壤渗漏水淋脱占 51.61%,土壤中残留 27.02%。黄云等^[10]的研究则表明,施入水田的氯能大量淋洗到 40—60cm 的土层中,水稻收获时土壤残留 Cl^- 量为 5.80—30.60%。这些结果表明在水田施氯似乎不会导致氯害。

1.3 扩散

氯在土壤中有显著的横向移动,有人用 ^{36}Cl 标记草甸土,一个生长期 ^{36}Cl 移动了 20cm^[15]。表 1 是 Cl^- 在一些土壤中的扩散系数^[16]。

表 1 Cl^- 在土壤中的扩散系数 *

土壤	砖红壤 (广东)	砖红壤 (巴西)	砖红壤 (夏威夷)	赤红壤 (广东)	红壤 (江西)	暗红色铁铝土 (澳大利亚)	氧化土 (巴西)	黄棕壤 (江苏)
$D \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$	3.4	1.5	2.9	2.6	2.5	3.1	3.6	6.0

* 土壤经电渗析, $Q_{\text{Cl}^-} = 1.1 \text{ mmol/cm}^2$

影响 Cl^- 在土壤中扩散的因素很多。首先,土壤含水量和 pF 是控制 Cl^- 扩散和迁移的主要因子^[17]。Sinha & Siagh^[18]曾报导当土壤水分从 28.8% 降到 10.5% 时,用 ^{36}Cl 测定的扩散系数从 5.48×10^{-6} 降到 $0.486 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。徐明岗^[19]的研究也指出,在一定温度下,氯的扩散系数随水分增加而增加,其关系以 $D = as^{-b}$ (D 为扩散系数, s 为水分含量, a, b 为常数) 拟和最好;另外,土壤水分还强烈影响 Cl^- 在植物近根区的分布, Cl^- 在 25 巴土壤水吸力下根际亏缺强度大,但范围小;6.5 巴时,根际亏缺强度小,范围有所扩大;而小于 0.05 巴时则根际出现氯的积累。其次,施用农家肥,尤其是猪粪,以及土壤添加石膏和压滤泥浆 (pressmud) 都能显著提高 Cl^- 的扩散系数,增加氯在土壤中迁移距离^[20,21]。第三,土壤温度、土壤容重和土壤类型及其阴离子负吸附量对氯的扩散都有影响。第四, pH 对 Cl^- 扩散的影响主要是通过影响土壤的表面电荷性质而实现。 Cl^- 的扩散系数随 pH 升高而增大,但在主要带负电荷的黄棕壤中 Cl^- 所受的影响较小。

1.4 吸附

土壤对 Cl^- 的吸附主要发生在可变电荷土壤中。可变电荷土壤对阴离子 Cl^- 的电性吸附是由于其表面带有正电荷引起的。这种吸附作用完全由土壤吸附表面与离子之间的静电作用力所控制。因此,凡是能够影响这种静电作用力的因素都可以影响可变电荷土壤对 Cl^- 的电性吸附。这些因素主要是土壤表面性质 (氧化物含量) 和溶剂条件 (土壤悬液 pH、电解质浓度和

溶剂介电常数)^[22-24]。如:①氧化铁铝是导致土壤带正电荷的主要因素。Wang等^[24]的研究表明,在红壤、赤红壤和砖红壤等三种典型的可变电荷土壤中, Cl^- 的吸附量与氧化铁的数量成正比。土壤中无定型的氧化铁和结晶态的氧化铁与 Cl^- 吸附量有很好的相关性。②由于pH是影响土壤表面电荷性质的决定性因素,因此,pH也极显著地影响土壤对 Cl^- 吸附。 Cl^- 的吸附量随土壤pH值的增加而显著下降。③土壤悬液中溶剂的介电常数明显影响土壤对 Cl^- 的吸附能力。研究表明,与纯水比较,当溶剂中含有20%乙醇时, Cl^- 吸附量明显增加,增加7.75-19.77%。这是由于加入乙醇后降低了溶剂的介电常数,增加了 Cl^- 与土壤胶体表面之间的静电吸力,从而使 Cl^- 吸附量增大。

此外,土壤还会对 Cl^- 产生负吸附。这主要发生在高pH值的土壤中或主要含负电荷的土壤中。

2 施用氯化物对土壤性状的影响

目前,直接施用于农田的含氯化物肥料主要是氯化铵、氯化钾、人粪尿及城市垃圾、城市污水等。当这些含氯肥料(水)进入农田后,作物只吸收了一小部分,大部分的氯残留在土体或经过淋溶进入地下水。由于氯离子独特的土壤化学行为及强淋溶特性,土壤中大量的氯离子必然对土壤物理、化学、生物学乃至地球化学的性质产生影响。这主要表现在如下几个方面:

2.1 土壤物理性质

在一定条件下,大量的和长期施用含氯肥料会给土壤的物理性质产生一定的影响。陈健财报道^[25],大量的阴离子(如 Cl^-)进入农田造成土壤通气性和透水性下降。土壤盐基的淋失又有可能伴随土壤粘粒下移而改变土壤质地^[26]。但,崔玉珍等^[27]于1984-1989年连续6年采集耕层土样测定土壤容重和土壤孔隙度,发现施氯的各处理间差异不明显。而1986-1989年对土壤微团聚体含量测定的结果表明,施用氯化铵的处理和氯化铵、尿素各半的处理, $<0.005\text{mm}$ 的微团聚体含量明显增加。土壤微团聚体含量的变化是土壤肥力和土壤物理性质出现变化的标志^[28]。不过,含氯肥料对土壤物理性质的影响还需系统的研究证实。

2.2 土壤pH

许多研究者注意到施用含氯肥料可使土壤酸化。崔玉珍报导^[27],北方的草甸土年施氯化铵16-32kg/亩,土壤pH降低了0.19-0.25。施氯年限越长,pH值下降越多。甘燕^[29]用冷砂黄土、钙质潮土及灰棕紫泥制成土柱发现施用氯化钠后,若无淋洗,在1周内土壤pH下降了0.2-0.7;而有淋洗则pH可恢复。在田间条件下,若无淋洗,大量施用氯化钠和人粪尿,在1周内,2mm的表层土壤pH值可下降0.4-0.5。吴金贵^[30]报道,水稻土连续施用含氯化肥会加速中性潜育性水稻土的酸化。广西土肥站^[31]的研究表明,在石灰性水稻土上施用氯化铵,24小时后稻田水pH比对照下降了0.8。稻田水pH值下降对减少 NH_3 挥发有一定意义。

2.3 土壤生物学性质

人们注意到,配施一定量的含氯化肥可提高作物对某些病害,如小麦条锈病、马铃薯空心病和褐心病的抗性^[32]。许多研究者都报导了 Cl^- 能抑制土壤硝化作用,使土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 下降^[33,34]。Christensen^[35]曾注意到在美国俄勒冈州西部的偏酸性(pH 5.5)土壤上,施用 Cl^- 能减缓硝化作用,限制土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 产生。由于土壤 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 比适宜,作物的抗病性大大提高。在适于硝化作用的土壤(pH 7.5-8.0)中,施用氯化铵的硝化速率比其他氯肥要慢20-30%^[36]。不过,也有认为 Cl^- 对硝化作用抑制不显著的报导^[37]。

马国瑞等^[34]在土培条件下研究了 Cl^- 对土壤微生物的影响。研究表明, Cl^- 对土壤细菌、放线菌、真菌的总量无明显影响, 但明显减少亚硝酸细菌数量。

使用含氯肥料可引起土壤一些酶的活性下降, 程国华^[36]的试验表明, 在棕壤上长期使用双氯化肥(氯化铵和氯化钾)土壤过氧化氢酶、转化酶、尿酶的活性降低。然而, Cl^- 对不同土壤的影响可能不同。有报导表明, Cl^- 显著提高滨海盐土中磷酸酶, 尿酶及潮土中磷酸酶的活性, 但在低丘红壤上, 施用 Cl^- 导致各种酶的活性下降。 Cl^- 对土壤酶活性的影响可能与施入 Cl^- 的量有关。

2.4 土壤离子吸附和迁移行为

大量的 Cl^- 进入土壤对土壤离子行为产生了深刻影响。这主要表现在:

(1) Cl^- 对土壤 CEC 的影响。这种影响可能与土壤的淋溶特性有关。当土壤缺乏足够的淋溶时, 外源 Cl^- 可导致土壤 CEC 提高^[27]。当土壤淋溶条件较好时, 外源氯又有可能降低土壤 CEC。这主要表现在 Cl^- 使土壤交换性 Ca^{2+} 下降^[33, 39]。

(2) 由于 Cl^- 带负电荷, 大量的氯离子使土壤其它阴离子(SO_4^{2-} , NO_3^-) 的吸附量下降。 Cl^- 是影响 SO_4^{2-} 吸附能力最强的阴离子之一^[23, 43, 41], 但这种影响与许多因子有关。Curtin & Syers^[42]报导了不同表面性质的土壤上, 氯化物(KCl)对 SO_4^{2-} 的吸附与解吸行为的影响。在净负电荷的土壤中, 加入 $0.05 - 0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{ Cl}^-$ 时, SO_4^{2-} 的吸附增加; 但高浓度的 Cl^- 却使 SO_4^{2-} 的吸附下降。结果说明, 土壤施用适量的含氯化肥可能还有利于减少 SO_4^{2-} 的淋失, 而 Cl^- 施用过多则不然。

Cl^- 对 NO_3^- 的影响主要降低 NO_3^- 的淋溶^[29, 43], 据报道, 在酸性冷砂黄壤和钙质潮土中加入 Cl^- , NO_3^- 淋失分别减少 30% 和 10 - 20%。

(3) 制约土壤阳离子的行为。 Cl^- 对阳离子行为的影响比较复杂。一方面, 一定量的氯增进土壤对阳离子的吸附和吸持, 如土壤从 ZnCl_2 溶液中吸附的 Zn^{2+} 比从 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 溶液吸附的 Zn^{2+} 高 0.77 - 1.66 倍^{[44], [45]}。同 NO_3^- 相比, Cl^- 提高红壤和黄棕壤对 Cu^{2+} 的饱和吸持量分别是 38.6% 和 38.2%^[46]。在 pH 6 - 9 时高浓度的 Cl^- 提高腐植质对 Cu^{2+} 的吸附^[47]。另一方面, 根据溶液电荷保持中性的原则, 大量的 Cl^- 进入土壤后, 由于 Cl^- 的非滞留性和强淋溶特性, 势必造成阳离子(Mg^{2+} 和 Ca^{2+}) 的大量淋失^[39]。此外, Cl^- 对土壤阳离子之间的相互作用也产生深刻影响。Karmarkar^[48]研究了氯化物和高氯化物对竞争性阳离子 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 对 K^+ 交换的影响。结果表明, Cl^- 提高 Ca^{2+} 对 K^+ 的交换量。Sposito^[49]则报导了 Cl^- 对钠-钙和钠-镁在蒙脱石上交换的影响, 提出了 Cl^- 对这两个反应影响的理论模型及实验结果。研究指出, 在 Cl^- 介质中, MgCl^+ 和 CaCl^+ 都可参与对 Na^+ 都可参与对 Na^+ 的交换反应。受 Cl^- 的影响, Ca^{2+} 比 Mg^{2+} 更能将 Na^+ 从蒙脱石上代换下来。粘粒悬液的制备方法、表面电荷的平衡条件以及阴离子的负吸附特性是影响 Cl^- 作用的主要因素。

(4) 外源氯对土壤重金属离子行为的影响。Barrow 和 Cox^[50]研究了土壤在不同 pH 和 Cl^- 浓度下针铁矿对 Hg 吸附的影响。研究表明, 当有 Cl^- 存在时, pH < 4 和 pH > 6 的土壤对 Hg 的吸附下降, 而 pH 4 - 6 时, 土壤对 Hg 的吸附量增加。

由于 Cl^- 易与二价重金属如 Cd^{2+} 形成可溶性的络合物 $[\text{CdCl}_n]^{(n-2)-}$ ^[51, 52], 使得土壤中带负电的吸附表面(大部分的层状铝硅酸盐矿物和有机胶体)对重金属离子的吸附强度下降, 甚至还可能产生负吸附。但对土壤带正电荷的吸附表面(铁铝体系)则相反^[52]。在土壤溶液

中,高浓度的 Cl^- 还可能导致吸附态镉的解吸,从而使溶液中的 Cd^{2+} 浓度升高^[51,53,54]。由于络合物的产生, Cd^{2+} 在土壤中的移动性也大大提高,同时,还增加了镉的生物有效性,使植物对镉的吸收量增加^[55]。

3 土壤氯研究的展望

氯是最晚发现的一个植物必须的微量营养元素。由于在自然界氯的含量较为丰富,植物一般很少发生缺氯症状。70-80年代以来开始大量推广使用含氯肥料(氯化铵和氯化钾),在探讨含氯肥料的效果及在土壤中的残留方面做了一些研究(主要在我国)。但是,评价含氯肥料对土壤影响的研究无论是从广度还是从深度来看,都还做得远远不够。生产实践和理论上仍然存在着大量未开垦的领域和急待解决的问题。因此,今后土壤氯的研究还有许多有待开展的工作:

(1) 继续研究土壤氯的残留积累动态,尤其是对氯去向的定量估计,为实施含氯肥料区划、合理施用含氯肥料及制定环保措施提供理论依据。

(2) 进一步明确含氯化肥对土壤物理性质的影响及其机制。

(3) 研究施用含氯肥料对土壤 pH 影响的规律及机制。研究不同类型的土壤上,施用含氯肥料与土壤 CEC、阳离子吸附解吸行为及其与土壤肥力关系的机制。

(4) 研究含氯肥料对土壤影响的地球化学特征及后果。这包括其一,氯的生物地球化学循环及对土壤生物的影响;其二,探讨氯迁移行为及其与其他离子,如养分阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 以及重金属元素 Cd、Hg、Pb 的迁移淋溶特性、生物有效性以及与地下水污染的关系。评价施用含氯肥料的短期和长期的环境效应。

参 考 文 献

- 1 曾先坤.中国化肥工业现状和展望.土壤学报,1995,32(2):117-125
- 2 国家统计局编.中国统计年鉴.中国统计出版社,1994,810
- 3 毛知耘.试论氯化铵肥的发展前景.土壤肥料,1980,(5):23-26
- 4 沈金雄.我国含氯肥料的研究与应用.湖北农业科学,1991,(11):39-封三
- 5 王人潮主编.含氯化肥使用新技术.浙江科学技术出版社,1994,105
- 6 邹帮基.土壤与植物中的卤族元素(Ⅱ)氯.土壤学进展,1984,(6):1-7
- 7 朱元洪,陈仁飞.浙江省主要土壤含氯背景值和施用含氯化肥对土壤氯积累的影响.浙江农业大学学报,1994,6(4):234-237
- 8 上海农科院土肥所.氯化铵在水稻、大麦上的施用.上海农业科技,1990,(6):15-17,37.
- 9 阎相奎.含氯化肥对灌溉土地地区的甜菜质量和土壤性质的影响.土壤通报,1993,24(5):228-230
- 10 黄云,饶小平,廖钱军.氯在土壤和植物中的分配动态研究.西南农业大学学报,1993,17(3):259-263
- 11 Johnson G D., J L Sims, J H Grove. Tobacco International, 1989, 191(7):39-43
- 12 Ferreira P A. Revista Ceres. 1990,37(210):152-166
- 13 Hamid A. Pakistan J. of Scientific and Industrial Research, 1988,31(2):97-101.
- 14 陈祖义,米春云,黄世乐. ^{36}Cl -氯化铵在模拟陆地-水域生态系统中的迁移与分配.南京农业大学学报,1992,15(1):103-108
- 15 刘保军,潘家荣,郑兴耘.利用 ^{36}Cl 研究 Cl^- 在旱作土壤中的移动.核农学通报,1993,14(4):179-180
- 16 Wang E.J. and Yu T.R., Soil Sci., 1989,147:91-96

- 17 So H B and P H Nye. *J. Soil Sci.*, 1989, 40(4): 734 - 749
- 18 Sinha B K and N T Singh. *J. of Indian Soc. of Soil Sci.*, 1977, 25(1): 74 - 76
- 19 徐明岗, 张一平, 刘渭宁. 土壤水分和温度与 Cl^- 扩散系数的关系. *核农学报*, 1996, 10(1): 47 - 53
- 20 Sharma K N, D L Deb. *J. of Nuclear Agri. and Bio.*, 1988, 17(3): 151 - 155
- 21 Sharma K N. *J. of Indian Soc. of Soil Sci.*, 1989, 37 (40): 650 - 654
- 22 于天仁, 季国亮, 丁昌璞等著. 可变电荷土壤的电化学. 科学出版社, 1996
- 23 Ji G L, Kong X L. *Pedosphere*, 1992, 2(4): 317 - 326
- 24 Wang E J, Yu T R. *Z. Pflanzenernahr Bodenk.*, 1987, 150: 17 - 23
- 25 陈健财. 猪粪尿之污染. *台湾农政*, 1990, 23(6): 23 - 24
- 26 刘友北, 丁瑞兴. 关于淀积粘化作用. *土壤学进展*, 1993, (4): 18 - 23
- 27 崔玉珍. 氯化铵的增产效果及其对土壤性质影响的研究. *土壤通报*, 1991, 22(1): 38 - 40
- 28 陈恩凤编著. 土壤肥力的物质基础及其调控. 科学出版社, 1990, 379
- 29 甘燕, 蒋富永. 氯化钠对土壤酸化的影响. *重庆环境科学*, 1992, 14(增刊): 50 - 52
- 30 吴金贵. 对含氯化肥农田应用效果的评价. *土壤学报*, 1995, 32(3): 321 - 326
- 31 广西土肥站. 氯化铵在石灰性土壤施用效果的研究. *土壤农化通报*, 1991, 6(1, 2): 127 - 131
- 32 Schneider R W. *Phytopathology*, 1985, 75(1): 40 - 48
- 33 陶其骧. 氯化铵肥效及施用技术研究. *化肥工业*, 1990, 17(5): 6 - 12
- 34 马国瑞, 陈美慈, 李春云. 氯离子对土壤中氮肥的行为及微生物数量和酶活性的影响. *浙江农业大学学报*, 1993, 19(4): 437 - 440
- 35 Christensen N W. *Agronomy J.*, 1985, 77(1): 157 - 163
- 36 中国农科院土肥所主编. 中国肥料. 上海科技出版社, 1994, 767
- 37 阎相奎, 王复和. 灌溉土施用含氯化肥对植物产量质量的影响. *土壤肥料*, 1992, (6): 1 - 5
- 38 程国华. 长期施用含氯化肥对土壤酶活性的影响. *沈阳农业大学学报*, 1994, 25(4): 360 - 365
- 39 Davis J G, B. Burgos. *Soil Sci.*, 1995, 160(4): 256 - 264
- 40 Zhang G Y, G Y Brummer, Zhang X N. *Pedosphere*, 1996, (3): 235 - 244
- 41 Black A S, S A Waring. *Aust. J. Soil Res.*, 1979, 17: 271 - 282
- 42 Curtin D, J K Syers. *J. Soil Sci.*, 1990, 41(3): 433 - 442
- 43 陈铭, 孙富臣, 刘更另. 含硫和含氯化肥对湖南水稻土壤酸度和养分有效性的影响. *热带亚热带土壤科学*, 1993, 2(4): 189 - 194
- 44 虞琐富. 有机质和陪伴阴离子对土壤吸附锌的影响. *土壤*, 1990, 22(3): 118 - 122
- 45 傅绍清. 土壤锌的吸附特性研究Ⅲ阴离子对土壤吸附锌的影响. *土壤通报*, 1984, 6(4): 15 - 18
- 46 高善民, 薛家骅. 陪伴阴离子对土壤专性吸附铜的影响. *环境化学*, 1993, 12(4): 258 - 262
- 47 Spark K M, J D Well, B B Johnson. *Aust. J. Soil Res.*, 1997, 35: 89 - 101
- 48 Karmarkar S V. *Soil Sci. Soc. Ameri. Jour.*, 1991, 55(5): 1286 - 1274
- 49 Sposito G. *Soil Sci. Soc. Ameri. Jour.*, 1991, 55(4): 965 - 967
- 50 Barrow N J, V J Cox. *J. Soil Sci.*, 1992, 43(2): 295 - 304
- 51 Doner H E. *Soil Sci. Soc. Ameri. Jour.*, 1978, 42: 882 - 885
- 52 王果. 络合作用对重金属离子吸附的影响. *土壤学进展*, 1994, 22(4): 6 - 13
- 53 Sakurai K, Pan M H. *Soil Sci Plant Nutr.*, 1996, 42(3): 475 - 481
- 54 Siebe C, W R Fisher. *J. Plant Nutrition and Soil Sci.*, 1996, 159(4): 357 - 364
- 55 Smolders E, M J McLaughlin. *Soil Sci. Soc. Ameri. Jour.*, 1996, 60: 1443 - 1447