植物营养与肥料学报 2002,8(1):22～28
Plant Nutrition and Fertilizer Science

恒电荷土壤与可变电荷土壤对 Cl^- 和 NO_3^- 吸附的差异及其机理

徐明岗
(中国农业科学院土壤肥料研究所,北京 100081)

摘要:对 3 种可变电荷土壤和 4 种恒电荷土壤在不同 pH、不同浓度、不同相伴阴阳离子下混合体系中 Cl^- 和 NO_3^- 的吸附进行了测定。结果表明,在 Cl^- 和 NO_3^- 共存体系中,Cl^- 比例增大使可变电荷土壤 Na^+ 吸附量及 OH^- 释放量增加,而对恒电荷土壤影响不大。Cl^- 和 NO_3^- 吸附量随平衡 Cl^- 和 NO_3^- 浓度增加而增大,随 pH 升高而减少。但恒电荷土壤在上述各种条件下对 Cl^- 和 NO_3^- 吸附均相同,而可变电荷土壤对 Cl^- 吸附量大于 NO_3^- 的吸附量;NO_3^-、Cl^- 的选择系数为 0.51～0.78,Cl^- 和 NO_3^- 的相对吸附量分别为 56.9% 和 43.1%。在不同相伴阳离子下,可变电荷土壤平衡溶液 Cl^-/NO_3^- 比值均小于 1,且为 $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Fe^{3+}$;而恒电荷土壤 Cl^-/NO_3^- 比值为 1 左右,且不受阳离子类型的影响。由此认为,Cl^- 和 NO_3^- 在两类土壤中均以电性吸附为主,恒电荷土壤对 Cl^- 和 NO_3^- 的亲合力及吸附机理相同;而可变电荷土壤对 Cl^- 的亲合力 $> NO_3^-$,Cl^- 存在着专性吸附。

关键词:Cl^-;NO_3^-;竞争吸附;可变电荷土壤;恒电荷土壤
中图分类号:S153.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2002)01-0022-07

Competition adsorption of NO_3^- with Cl^- on constant charge soils and variable charge soils

XU Ming-gang
(*Soil and Fertilizer Institute, CAAS, Beijing 100081, China*)

Abstarct: Adsorption of chloride and nitrate ions by three typical variable charge soils and four typical constant charge soils of China was studied under different pH, concentration and coexisting cations and anions. When identical concentration of Cl^- or NO_3^- was added to soil, the adsorption of Cl^- by variable charge soils was higher than that of NO_3^-. The selective coefficient was from 0.51 to 0.78 although the adsorption both Cl^- and NO_3^- increased with decreasing pH and with increasing Cl^- or NO_3^- concentration. The concentration ratio Cl^-/NO_3^- in soil suspension was less than 1.0 under different pH and coexisting cations such as Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{3+}. These results indicated that the variable charge soils had a higher preference for chloride ions relative to nitrate ions, and this tendency could not be changed by factors such as the pH, the concentration of the anions, the accompanying cations and etc. Which suggested that this difference in affinity is caused by the difference in the nature of the interactions between these two ions and variable charge soils. However, the ratio Cl^-/NO_3^- in equilibrium soil suspension of constant charge soils was almost near 1.0 under various pH, concentrations and species of coexisting anions and cations, which indicated that the adsorption mechanism and affinity of Cl^- and NO_3^- by constant charges soils were not different significantly. Moreover, it was observed that a neg-

收稿日期:2000-09-18
基金项目:国家自然科学基金项目(49831005);中国博士后科学基金项目资助。
作者简介:徐明岗(1961—),男,陕西武功人,博士,研究员,主要从事红壤性质及改良利用研究。
本研究在中国科学院南京土壤研究所季国亮研究员和于天仁院士指导下完成,特此感谢。

ative adsorption of Cl^- and NO_3^- by constant charge soils in a mixed system containing equal amount of chloride and nitrate ions at low concentration. Which do a competitive adsorption of chloride and nitrate ions and repulsion of negative charge on the surface of soil particles for anion cause.

Key words: chloride ions; nitrate ions; competitive adsorption; variable charge soils; constant charge soils

有人认为，Cl^- 和 NO_3^- 是非专性吸附离子[1]；但也有人认为，Cl^- 和 NO_3^- 吸附也存在着专性吸附[2]。Bowden[3]和 Davis 等[4]指出在用理论模型计算吸附量时，必须假定 Cl^- 存在一定的专性吸附，才能使计算值与理论值更好地吻合。今井弘树等[5]的研究结果表明，以 $NaNO_3$、NaCl 或 Na_2SO_4 作支持电解质测得的 ZPC 依次增高。真空干燥处理的样品红外光谱显示 Cl^- 和 NO_3^- 在针铁矿上的吸附涉及到配位体交换反应[6]。Wang 等[2]研究表明，Cl^- 和 NO_3^- 在可变电荷土壤中虽以电性吸附为主，但对 Cl^- 还存在着专性吸附。他们在等浓度的 Cl^- 和 NO_3^- 介质中测得 Cl^- 吸附量大于 NO_3^-，这和 Kinjo 等[7]的报道一致。但也有试验表明，Cl^- 和 NO_3^- 的吸附量相近[8]，两者似乎无多大差异。这些研究大都以可变电荷土壤为材料，恒电荷土壤中的吸附还少见报道。

本文对可变电荷土壤和恒电荷土壤在不同相伴阴阳离子、不同 pH、不同浓度等介质条件下，Cl^- 和 NO_3^- 的吸附进行了研究，进一步揭示 Cl^- 和 NO_3^- 吸附的机理及其在 2 类土壤中相互作用的特性。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试土壤为砖红壤、红壤、赤红壤等可变电荷土壤与黄棕壤、棕壤、暗棕壤和黑土等恒电荷土壤的底层土壤。其基本性质见表 1。土样风干后研磨，过 0.25mm 筛。每种土壤各取 1000g，分别加适量水，用 1 mol/L 的 NaOH 调节 pH 至 8.5 左右，超声波处理 30 min，用 HCl 调 pH 至胶体絮凝，蒸馏水洗 3～4 次后，置于电渗析槽中电析。净化好的土样在红外灯 60℃ 下烘干，再研磨过 0.25mm 筛，储存备用。

表 1　供试土壤的主要化学性质

Table 1　Major chemical properties of the soils used

样号 No.	土壤 Soil	采样点 Locality	pH (H_2O)	阳离子交换量 CEC (cmol(+)/kg)	氧化铁 Fe_2O_3 (g/kg)	主要粘粒矿物 Dominate minerals
1	Lat	广东徐闻 Xuwen, GD	5.6	7.2	158.0	KL、SQ、HE
2	RS	江西进贤 Jinxian, JX	4.8	8.9	56.5	KL、IO、HM
3	LRS	广州石牌 Shipai, GZ	4.7	6.8	48.6	KL、HM、VM
4	YBE	江苏南京 Nanjing, JS	6.5	16.6	16.3	HM、VM、KL
5	BE	山东威海 Weihai, SD	6.4	14.4	18.6	HM、VM、KL
6	DBE	黑龙江带岭 Dailing, HLJ	5.2	15.8	6.9	Chl、VM、HM
7	BS	哈尔滨 Harbin, HLJ	6.9	25.0	8.6	HM、Chl、VM

注(Note)：Lat-砖红壤 latosol, RS-红壤 red soil, LRS-赤红壤 latosol red soil, YBE-黄棕壤 yellow brown earth, BE-棕壤 brown earth, DBE-暗棕壤 dark brown earth, BS-黑土 black soil; KL-高岭石 kaolinite, SQ-三水铝石 sesquiotide, HE-赤铁矿 hematite, IO-氧化铁 iron oxide, HM-水云母 hedromicas, VM-蛭石 vemiculite, Chl-绿泥石 chlorite, 下同 same as follows.

1.2　分析测定方法

1.2.1　基本操作　称取 2.50 g 电析土样于 50 mL 离心管中，加 Cl^- 和 NO_3^- 混合溶液 25 mL，振荡 2h，平衡 24h，离心分离，测定平衡溶液的 pH 及 Na^+、Cl^- 和 NO_3^- 浓度。由平衡前后浓度差，求得 Na^+、Cl^- 和 NO_3^- 的吸附量。

NO_3^- 浓度用自制的 PVC 膜 NO_3^- 电极测定，其线性范围为 10^{-4}～10^{-1} mol/L，斜率 55～57mV。Cl^- 浓度用江苏电分析仪器厂生产的 Cl^- 电极测定，其线性范围为 5×10^{-5}～10^{-1} mol/L，斜率 57～58 mV。Na^+ 浓度用火焰光度计测定。

pH 用玻璃电极测定。

1.2.2　初始 Cl^-/NO_3^- 比对吸附的影响　加入 Cl^- 和 NO_3^- 总浓度为 1 mmol/L，Cl^-/NO_3^- 比值分别为 5:0，4:1，3:2，2.5:2.5，2:3，1:4，0:5(以 0.2 mmol/L 为 1 个单位)的 NaCl/$NaNO_3$ 混合溶液。

1.2.3　pH 对混合体系 Cl^- 和 NO_3^- 吸附的影响　用 NaOH 调节至不同 pH，而 Cl^- 和 NO_3^- 浓度均为 1 mmol/L 的 HCl

和 HNO_3 混合溶液。

1.2.4 电解质浓度对 Cl^- 及 NO_3^- 吸附的影响 加 Cl^-/NO_3^- 浓度比为 1:1 的 NaCl 和 $NaNO_3$ 混合溶液，Cl^- 及 NO_3^- 浓度分别为 0.1、0.2、0.5、0.8、1.0、2.0、5.0 mmol/L。

1.2.5 不同相伴阳离子对 Cl^-/NO_3^- 平衡浓度比的影响 加入相伴阳离子分别为 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+} 的等浓度 Cl^- 和 NO_3^- 混合溶液(Cl^- 和 NO_3^- 浓度均为 0.5mmol/L)。

2 结果与讨论

2.1 Cl^-/NO_3^- 浓度比对 Cl^- 和 NO_3^- 吸附的影响

加入不同比例 NaCl/$NaNO_3$ 但总离子浓度一定的混合溶液时，4 种恒电荷土壤悬液的 pH 和 Na^+ 浓度基本相同，而 3 种可变电荷土壤随加入 Cl^-/NO_3^- 比的降低，平衡溶液 pH 逐渐降低，Na^+ 浓度逐渐升高(图 1)。由于体系中加入 Na^+ 浓度保持一致，故平衡液 Na^+ 浓度升高，即土壤表面吸附 Na^+ 减少。Na^+ 吸附主要是电性吸附[9]，Na^+ 吸附量的多少是土壤表面负电荷多少的反映。表明，可变电荷土壤在体系总离子浓度一定时，Cl^- 比例越大，平衡时释放的羟基离子越多，土壤吸附的 Na^+ 越多，Cl^- 使土壤表面电荷变得更负。因此，可以认为，在可变电荷土壤中，相对于 NO_3^- 来说，Cl^- 存在着某种程度的专性吸附。恒电荷土壤，对 Cl^- 和 NO_3^- 以电性吸附为主，吸附机理的无太大差异。这和 Hingston，Wang 等[1,2]的研究结果一致。

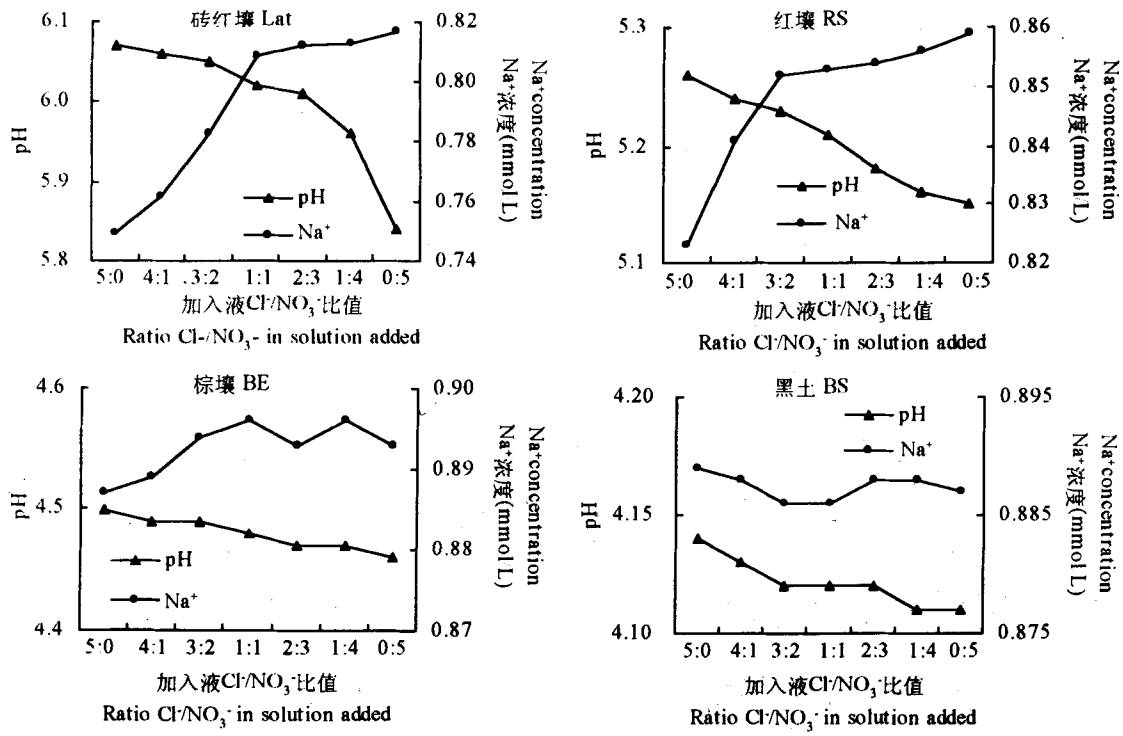

图 1 不同 Cl^-/NO_3^- 浓度比下土壤平衡液的 Na^+ 浓度(mmol/L)及 pH

Fig.1 pH and Na^+ concentration in equilibrium solution under different ratio $C_{Cl^-}/C_{NO_3^-}$ solution added

当 Cl^- 和 NO_3^- 比例变化时，可变电荷土壤对 Na^+ 的吸附量和平衡液 pH 变化均较小，Cl^-/NO_3^- 比在 0:5～5:0 的范围内时，砖红壤、红壤和赤红壤 Na^+ 吸附量分别为 1.9～2.5 mmol/kg、1.4～1.8 mmol/kg 和 0.45～1.04 mmol/kg；土壤的 pH 变化量依次为 0.21、0.11、0.12。说明可变电荷土壤对 Cl^- 吸附仍以电性吸附为主。这也为 Wang 等[2]所证实。

2.2 共存体系中 Cl^- 和 NO_3^- 浓度对其吸附的影响

Cl^- 和 NO_3^- 共存体系中，Cl^- 和 NO_3^- 的吸附量随离子浓度的增加而增加(表 2)，和单纯 Cl^- 或 NO_3^- 体系中的情况相类似。但是，单纯和共存体系中，Cl^- 和 NO_3^- 的吸附量不尽相同，且恒电荷土壤与可变电荷土壤有差异。

Cl^- 和 NO_3^- 共存体系中可变电荷土壤对 Cl^- 的吸附量比单纯体系中稍低，但变化不大；而对 NO_3^- 的吸附量比单纯体系中为低，且在浓度较低时对 NO_3^- 还出现负吸附。说明共存 NO_3^- 对 Cl^- 的吸附量影响较小，而共存 Cl^- 对土壤 NO_3^- 吸附有显著

的影响。由此认为，可变电荷土壤对 Cl^- 较 NO_3^- 具有较高的亲合力，故在相同条件下，土壤对 Cl^- 的吸附量大于 NO_3^- 的吸附量(表 2)。3 种可变电荷土壤对 Cl^- 的吸附量大致为 NO_3^- 吸附量的 1.1～1.4 倍，对 Cl^- 的相对吸附量为 53.7%～58.6%，NO_3^- 的相对吸附量仅为 41.4%～46.3%(表 3)。由此，求得土壤表面离子吸附的选择系数(KNO_3^-，Cl^-)：

$$(KNO_3^-, Cl^-) = [Q(NO_3^-) \cdot C(Cl^-)] / [Q(Cl^-) \cdot C(NO_3^-)]$$

(Q 为吸附量，C 为平衡浓度)

砖红壤、红壤和赤红壤中离子吸附的选择系数平均分别为 0.63、0.78 和 0.51，均小于 1.0；平衡溶液中 Cl^- 浓度与 NO_3^- 浓度比值(Cl^-/NO_3^-)小于 1(图 2)。表明可变电荷土壤对 Cl^- 的亲合力大于 NO_3^-。

恒电荷土壤与此则完全不同。对 Cl^- 和 NO_3^- 的吸附量很小，在浓度较低时还出现负吸附，共存体系与单纯体系相比，其 Cl^- 和 NO_3^- 吸附量均变化不大(表 2)。共存体系中 4 种恒电荷土壤 Cl^- 和 NO_3^- 的吸附量相对比例平均为 50.1% 和 49.9%(表 3)；平衡溶液中 Cl^- 和 NO_3^- 浓度比为 1.0 左右(0.985～1.012)(图 2)。说明恒电荷土壤对 Cl^- 和 NO_3^- 具有近乎完全一致的亲合力。

表 2　单纯与混合体系中土壤 Cl^-、NO_3^- 吸附量(mmol/kg)

Table 2　Amount of Cl^- and NO_3^- adsorption in single and 1:1 Cl^-/NO_3^- mixed system (mmol/kg)

Cl^-、NO_3^- 添加量 Added	砖红壤 Lat		红壤 RS		赤红壤 LRS		棕壤 BE		暗棕壤 DBE		黑土 BS	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
						Cl^-						
0.1	0.20	0.19	0.10	0.14	0.08	0.05	-.03	-0.02	-0.14	-0.02	-0.02	-0.05
0.2	0.65	0.44	0.22	0.25	0.13	0.20	0.07	0.01	-0.04	0.04	0.07	0.02
0.5	0.96	1.08	0.84	0.74	0.53	0.58	0.13	0.10	0.20	0.10	0.13	0.08
0.8	1.66	1.65	1.20	0.94	0.79	0.80	0.24	0.20	0.38	0.20	0.22	0.10
1.0	2.50	2.28	1.90	1.45	1.32	1.14	0.32	0.30	0.55	0.34	0.35	0.19
2.0	3.90	4.00	2.90	2.90	2.60	2.40	0.90	0.60	1.10	0.60	0.90	0.50
5.0	6.00	6.60	5.10	5.30	4.20	4.60	1.30	0.80	1.40	0.90	1.00	0.80
						NO_3^-						
0.1	0.26	0.09	0.12	0.08	0.03	-0.09	0.03	-0.03	0.06	-0.02	-0.04	-0.06
0.2	0.75	0.30	0.45	0.18	0.22	0.01	0.24	0.01	0.20	0.01	0.10	-0.01
0.5	1.65	0.73	1.16	0.59	0.68	0.28	0.44	0.08	0.38	0.06	0.24	0.03
0.8	2.24	1.13	1.70	0.80	0.84	0.34	0.58	0.12	0.64	0.11	0.29	0.07
1.0	2.90	1.65	2.04	1.10	1.35	0.68	0.72	0.30	0.75	0.31	0.44	0.20
2.0	4.60	2.90	3.20	2.60	2.20	1.60	0.80	0.50	1.00	0.60	0.70	0.35
5.0	6.30	4.90	5.70	4.60	3.50	3.10	1.00	0.80	1.10	0.80	0.80	0.60

注：Cl^-、NO_3^- 添加浓度单位为 mmol/L，混合体系中加入 Cl^-/NO_3^- 比值为 1；A 表示单纯体系，B 表示 1:1 混合体系。

Note: Unit of Cl^-, NO_3^- added was mmol/L, The ratio of Cl^-/NO_3^- = 1 in mixed system; A means single system, B means 1:1 Cl^-/NO_3^- system.

2.3　pH 对共存体系中 Cl^- 和 NO_3^- 吸附的影响

与单纯体系中相同，无论是可变电荷土壤还是恒电荷土壤，对 Cl^- 和 NO_3^- 的吸附量均随 pH 升高而减少；pH 较高时，还出现不同程度的负吸附，恒电荷土壤尤其明显。

虽然两类土壤中 pH 影响 Cl^- 和 NO_3^- 的吸附的趋势相同，但不同 pH 下 Cl^- 和 NO_3^- 吸附的相对数量不同。3 种可变电荷土壤，平衡液中 Cl^-/NO_3^- 浓度比为 0.85～0.98 小于 1 (图 3)，说明其对 Cl^- 的吸附量较大，对 Cl^- 具有较强的亲合力。由于试验使用等浓度的 Cl^- 和 NO_3^- 混合溶液，这种差异只能来自于这两种离子本身的差异，pH 的变化不能改变

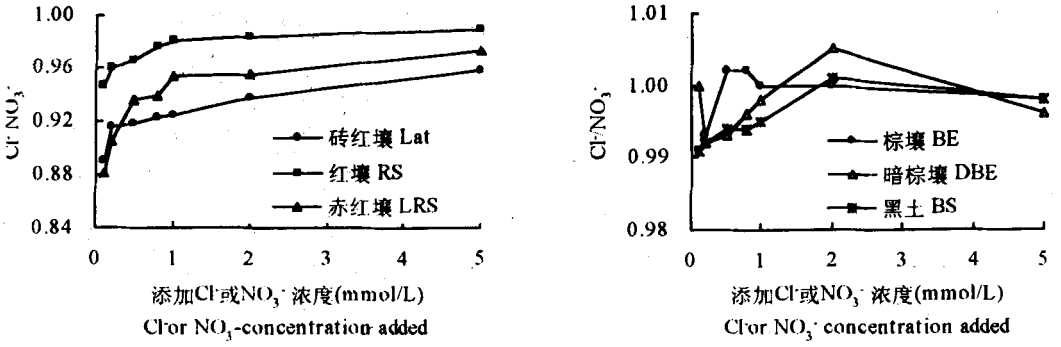

图2 不同添加浓度下土壤平衡液的 Cl^-/NO_3^- 浓度比

Fig. 2 Relationship between the Cl^-/NO_3^- ratio in suspension and concentration of anion added

表3 混合体系中 Cl^- 与 NO_3^- 吸附量相关方程

Table 3 The relative equation between Cl^- adsorption and NO_3^- adsorption by soil

土壤 Soil	方程参数及相关系数 Parameters of the relative equation			相对吸附量(%) Relative adsorption (%)	
	a	b	r	NO_3^-	Cl^-
砖红壤 Lat	-0.045	0.729	0.9999	41.6	56.9
红壤 RS	-0.043	0.883	0.9997	46.3	53.7
赤红壤 LRS	-0.183	0.769	0.9990	41.4	58.6
平均 Mean	-	-	-	43.1	56.9
黄棕壤 YBE	0.0186	1.040	0.9920	51.8	48.2
棕壤 BE	0.0036	0.958	0.9960	48.5	51.5
暗棕壤 DBE	-0.0045	0.946	0.9261	47.5	52.5
黑土 BL	-0.0113	1.075	0.9903	52.3	47.7
平均 Mean	-	-	-	50.1	49.9

注：$y=a+bx$；式中 y-NO_3^- 吸附量(mmol/kg)，x-Cl^- 吸附量(mmol/kg)；$n=7$，$r_{0.01}=0.874$。

Note: y-amount of NO_3^- adsorption(mmol/kg), x-amount of Cl^- adsorption (mmol/kg); $n=7$, $r_{0.01}=0.874$.

这种差异。恒电荷土壤，平衡液中 Cl^-/NO_3^- 浓度比为0.98～1.01，平均为1.0(图3)，说明它对 Cl^- 和 NO_3^- 的亲合力相同，对这两种离子吸附机理没有差异。

2.4 相伴阳离子对 Cl^- 和 NO_3^- 吸附的影响

其它条件保持不变时，相伴阳离子为 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+}，对恒电荷土壤 Cl^- 和 NO_3^- 的吸附影响不大，其平衡溶液 Cl^-/NO_3^- 浓度比为0.978～1.012平均为1.0；而对可变电荷土壤 Cl^- 和 NO_3^- 的吸附有较大的影响，其平衡液 Cl^-/NO_3^- 比均小于1，且在不同相伴阳离子下，Cl^-/NO_3^- 大小次序为 $Na^+>K^+>Ca^{2+}>Mg^{2+}>Fe^{3+}$(图4)，其影响程度为高价离子>低价离子和专性吸附离子>电性吸附离子。这说明相伴阳离子不同，不改变恒电荷土壤对 Cl^- 和 NO_3^- 亲合力相同而可变电荷土壤对 Cl^- 亲合力稍大于 NO_3^- 的差异；可变电荷土壤对 Cl^- 和 NO_3^- 吸附的相对强弱受相伴阳离子的影响，且影响程度与相伴离子的电荷量及其与土壤的亲合性有关。阳离子价数愈高、与土壤的亲合力或吸附性愈强，使土壤对 Cl^- 吸附较对 NO_3^- 吸附的愈多。这主要是因为阳离子价数越高时，与 Cl^- 形成离子对而被土壤吸附的可能性越大[11]；阳离子专性吸附越强，使土壤表面正电荷增加越多，因而伴随阳离子吸附的 Cl^- 越多[12]。

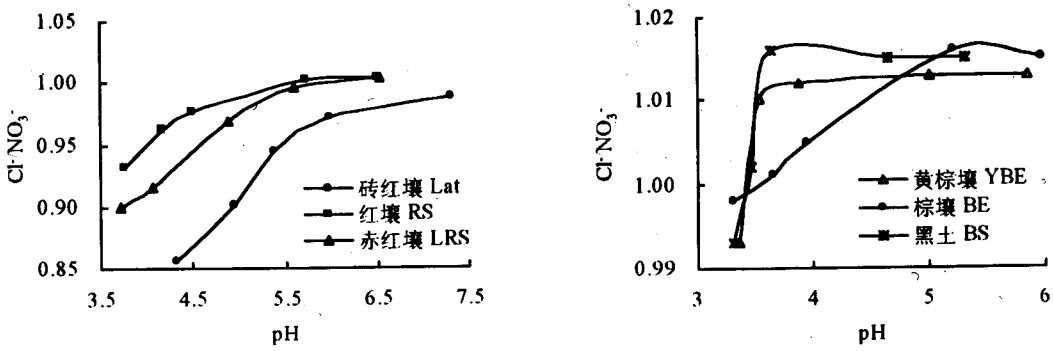

图 3　不同 pH 下土壤平衡液的 Cl^-/NO_3^- 浓度比

Fig.3　The Cl^-/NO_3^- ratio in suspension relation with pH of solution

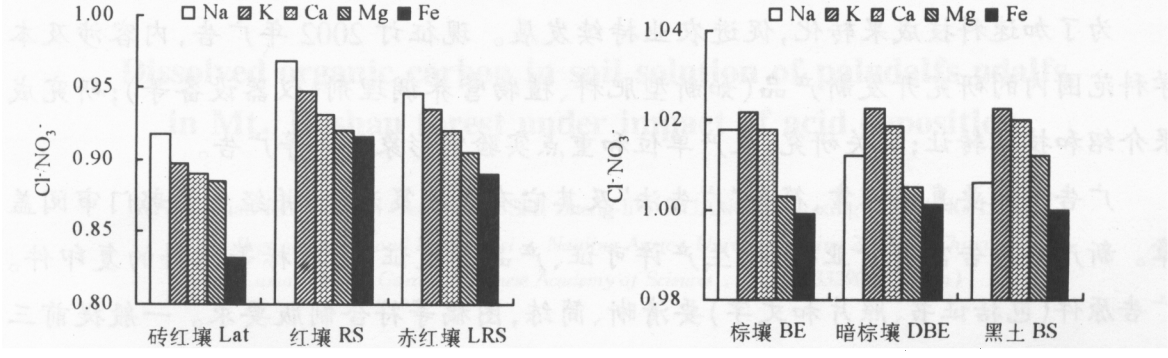

图 4　不同相伴阳离子下土壤平衡液中 Cl^-/NO_3^- 浓度比

Fig.4　Effect of accompanying cations on the Cl^-/NO_3^- ratio in suspension

3　小结

在 1:1 Cl^-/NO_3^- 混合体系中,可变电荷土壤在不同 pH、不同浓度、不同相伴阴阳离子下对 Cl^- 的吸附量大于 NO_3^- 的吸附量,平衡溶液 Cl^-/NO_3^- 比均小于 1,说明可变电荷土壤对 Cl^- 的亲和力大于 NO_3^-,Cl^- 存在着专性吸附。这种吸附差异性由土壤与离子间的相互作用决定,pH 和共存离子不能改变这种趋势。恒电荷土壤在同样条件下,对 Cl^- 和 NO_3^- 吸附量相同,平衡溶液 Cl^-/NO_3^- 比为 1.0 左右,且不随 pH 和相伴离子改变,其对 Cl^- 和 NO_3^- 的亲和力及吸附机理相同。

参 考 文 献:

[1] Hingston F J *et al* . Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes [J]. J. Soil Sci., 1972, 23: 177-192.

[2] Wang P G, Ji G L and Yu T R. Adsorption of chloride and nitrate by variable charge soils in relation to the electric charge of the soils [J]. Z. Pflanzenernahr Bodenk, 1987, 150: 17-23.

[3] Bowden J W *et al* . Ionic adsorption on variable charge mineral surfaces. Theoretical-charge development and titration curves [J]. Aust. J. Soil Res., 1977, 15: 121-136.

[4] Davis J E W *et al* . Nitrate ion selective electrodes based on poly (vinyl chloride) matrix membranes[J]. The Analyst., 1972, 97: 87-94.

[5] 今井弘树,等. 土壤养分保持性能的研究(第 3 报):NO_3的吸附 [J]. 日本土壤肥料学杂志, 1980, 51: 102-106.

[6] Parfitt R L and Russell J D. Adsorption on hydrous oxides. IV Mechanisms of adsorption of various ions on goethite[J]. J. Soil Sci., 1977, 28: 297-305.

[7] Kinjo F and Pratt P E. Nitrate adsorption. I. In some acid soils of Mexico and South America[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1971, 35: 722-725.

[8] Mekaru T and Uekara G. Anion adsorption in ferruginous tropical

soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1972, 36: 296-300.

[9] Li H Y and Ji G L. Adsorption of potassium and sodium ions by variable charge soils[J]. Pedosphere., 1992, 2(3): 245-254.

[10] Zhang G Y, Zhang X N and Yu T R. Adsorption of sulfate and fluoride by variable charge soils[J]. J. Soil Sci., 1987, 38: 29-38.

11] Nakahara O and Wada S I. Cl^- adsorption on Andisols from $CaCl_2$ and $MgCl_2$ solutions[J]. Soil Sci. Plant Nutr., 1993, 39(4): 645-652.

12] Wada S. Mechanism of apparent salt adsorption in ando soils. Soil Sci. Plant Nutr., 1984, 30(1): 77-83.