

两种典型湖南森林土壤SO₄²⁻ NO₃⁻ 吸附及解吸的研究

廖柏寒，瞿忠心

(湖南农业大学资源环境学院，湖南 长沙 410128)

摘要:采用现场采集土样及室内处理和分析方法，研究了 2 种典型湖南森林土壤对SO₄²⁻、NO₃⁻ 的吸附及解吸规律。结果表明，红壤和黄红壤都具有相当强的SO₄²⁻ 和NO₃⁻ 吸附能力，但其NO₃⁻ 最大吸附量约为SO₄²⁻ 吸附量的 39% ~ 62%；表土SO₄²⁻ 解吸率远高于底土SO₄²⁻ 解吸率，且NO₃⁻ 解吸率明显低于SO₄²⁻ 解吸率；土壤SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的解吸率随着解吸液 pH 值的下降而下降；由于SO₄²⁻ 与NO₃⁻ 的竞争，共同吸附试验中土壤对SO₄²⁻ 或NO₃⁻ 的吸附量都小于单独吸附试验中的吸附量，共同解吸试验中解吸液明显增加了对SO₄²⁻ 的解吸率而降低了对NO₃⁻ 的解吸率。

关键词: SO₄²⁻；NO₃⁻；吸附；解吸；森林土壤

中图分类号: S153.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 – 2043(2004)02 – 0313 – 05

Adsorption and Desorption of SO₄²⁻ and NO₃⁻ in Two Hunan Forest Soils

LIAO Bo-han, QU Zhong-xin

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

Abstract: Adsorption and desorption of sulfate and nitrate in two Hunan forest soils were studied through field sampling and laboratory analysis of soil. The results showed that the red soil and yellow – red soil had a quite strong ability to absorb SO₄²⁻ and NO₃⁻, and the maximum amount of NO₃⁻ adsorption was about 39% ~ 62% of that of SO₄²⁻ adsorption. Desorption ratios of SO₄²⁻ from the top soils were much greater than those from the bottom soils, and NO₃⁻ desorption rate was obviously lower than that of SO₄²⁻. With decreasing pH values of extraction solutions, desorption ratios of SO₄²⁻ and NO₃⁻ decreased. Due to the competition of SO₄²⁻ and NO₃⁻ in the co – adsorption experiment, the adsorption amount of SO₄²⁻ or NO₃⁻ was less than that in the seprate adsorption experiments, while the extraction solutions increased desorption ratios of SO₄²⁻ but decreased those of NO₃⁻ in the co – desorption process apparently.

Keywords: SO₄²⁻；NO₃⁻；adsorption；desorption；forest soil

酸雨对陆地生态系统最直接的危害是土壤酸化。根据电中性原理，酸雨中大量酸性阴离子SO₄²⁻ 和NO₃⁻ 将携带等量土壤阳离子由于淋溶而离开土壤，造成土壤 pH 值和盐基饱和度下降。大多数土壤都具有一定的SO₄²⁻ 和NO₃⁻ 吸附能力，能够减少阳离子的淋失，在某种程度上延缓土壤酸化过程，因此土壤对

酸雨中阴离子的吸附是衡量土壤酸化的重要因素之一^[1]。20 世纪 90 年代以来，以长沙、株洲、南昌等城市为中心的华中酸雨区已成为全国酸雨污染最严重的区域。近 10 年来降水监测资料表明，湖南省长沙、株洲、洪江等 6 城市降水 pH 值平均为 3.78 ~ 4.90，酸雨频率为 53% ~ 93%，降水中SO₄²⁻ /NO₃⁻ 的比例为 3.68 ~ 10.22，属典型的硫酸型酸雨^[2]。同时湖南省土壤大多数属于酸性较强的富铁富铝土壤，对酸雨非常敏感，容易受酸雨危害^[3]。研究湖南森林土壤对SO₄²⁻ 和NO₃⁻ 的吸附及解吸行为，对于评价湖南森林土壤对酸雨的缓冲能力和认识酸雨对森林生态环境的影响，具有重要的理论意义。一些作者认为土壤对

收稿日期: 2003 – 07 – 18

基金项目: 教育部《高等学校骨干教师资助计划》项目
([2000]165 – HN005)

作者简介: 廖柏寒(1957—)，男，湖南农业大学资源环境学院教授，主要从事环境污染化学和环境毒理学研究。

E – mail: liao. bh@ 163. net

NO_3^- 的吸附能力较弱^[4], 因此以往有关土壤阴离子吸附的研究主要围绕 SO_4^{2-} 来进行^[5, 6]; 另外大多数作者研究不同土层 SO_4^{2-} 吸附时往往配制 SO_4^{2-} 系列溶液进行直接吸附, 而很少考虑上层土壤吸附后溶液 SO_4^{2-} 浓度的变化。本试验选用两种典型的湖南森林土壤(红壤和黄红壤)作为受试土壤, 采用上层溶液向下转移方式, 研究土壤对 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的吸附-解吸行为。

1 材料与方法

1.1 土壤样品

红壤和黄红壤分别采自长沙朗梨镇和郴州苏仙区林区, 分 3 层(分别称为表土、心土、底土, 每层 20 cm)进行采集, 土样自然风干后过 2 mm 筛。

1.2 吸附试验

在 6 个 500 mL 锥形瓶中分别加入 30 g 表土, 6 个锥形瓶中加入 20 g 心土, 6 个锥形瓶中加入 10 g 底土。先向表土分别加入 300 mL $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液(SO_4^{2-} 浓度为 $0.5 \sim 15.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), 振荡 15 min, 在随后的 36 h 内每隔 12 h 振荡 1 次 15 min, 然后静置 12 h, 离心分离, 移出 200 mL 吸附平衡液分别转移到 6 个对应的心土中, 其余溶液进行 SO_4^{2-} 分析。按表土处理方法处理心土, 将 100 mL 吸附平衡液转移到对应的底土中, 剩余溶液待分析。同样处理底土。加入液 SO_4^{2-} 浓度加土壤水溶性 SO_4^{2-} 含量(以蒸馏水提取), 扣除吸附平衡液 SO_4^{2-} 浓度后, 可算出土壤 SO_4^{2-} 吸附量($\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)。用相同方法进行 NO_3^- 吸附试验, NH_4NO_3 作为 NO_3^- 来源。共同吸附试验与上面方法

相同, 但使用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - \text{NH}_4\text{NO}_3$ 混合溶液, 考虑到酸雨中两种阴离子的浓度差异 SO_4^{2-} 浓度分别为 $0.5 \sim 4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_3^- 浓度分别为 $0.25 \sim 2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 解吸试验

吸附处理后的土样, 湿土、干土各称重 1 次, 算出土壤中的 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 吸附残液量。分别称取 3 g 风干后土样, 各加入用稀 HCl 调 pH 值分别为 5.6, 5.0 和 4.0 的蒸馏水的解吸液 30 mL, 振荡 2.5 h, 离心分离, 测定解吸液中 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 含量, 扣除吸附残液中 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 量后, 可得 3 种解吸液的 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 解吸量($\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)和解吸率(%)。

1.4 样品分析

用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ BaCl_2 溶液 30 mL 浸提 4.5 g 土壤中交换性阳离子, 浸出液中阳离子用原子吸收分光光度法测定, 求出阳离子交换量(CEC)和盐基饱和度(BS)^[7]。用 90 mL 蒸馏水分 3 次浸提 3 g 土样中水溶性 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 。称取土样 5 g 置入 50 mL 的烧杯中, 加 25 mL 蒸馏水, 用玻璃棒搅动 2 min, 静置 30 min, 然后用 pH 计测定土壤 pH 值^[8]。土壤有机质含量用重铬酸钾外热法测定^[8]。溶液中高浓度 SO_4^{2-} 用铬酸钡分光光度法测定, 低浓度 SO_4^{2-} 用硫酸钡比浊法测定^[8]。溶液中 NO_3^- 含量采用紫外分光光度法测定^[8]。

供试土壤主要理化性质见表 1。显然, 2 种供试土壤都属于弱酸性, 表土含有一定量的有机质, 阳离子交换量 CEC 较低, 铝饱和度 AIS 较高, 并含有一定量水溶性 SO_4^{2-} 和 NO_3^- , 属于对酸雨比较敏感的土壤。

表 1 供试土壤主要理化性质
Table 1 Physical-chemical properties of the tested soils

土壤类型	采样点	成土母质	层次 /cm	pH _水	有机质含量 /g · kg ⁻¹	CEC /cmol · kg ⁻¹	BS /%	AIS /%	水溶性 SO_4^{2-} /mmol · kg ⁻¹	水溶性 NO_3^- /mmol · kg ⁻¹
红壤	长沙 朗梨镇	第四纪 红土	表土(20)	4.42	23.1	11.52	24.1	70.2	2.55	1.18
			心土(40)	4.53	12.1	10.96	16.5	80.5	2.20	1.96
			底土(60)	5.12	2.6	11.51	9.9	85.7	1.27	2.64
黄红壤	郴州 苏仙区	板页岩 风化物	表土(20)	4.53	21.6	9.49	32.8	63.4	2.74	0.86
			心土(40)	4.62	15.6	9.16	24.4	71.6	2.13	1.58
			底土(60)	5.01	8.9	8.31	16.8	78.1	1.38	1.06

2 结果与讨论

2.1 SO_4^{2-} 吸附及解吸

表 2 表明, 土壤对 SO_4^{2-} 的吸附量随着表土加入液 SO_4^{2-} 浓度增加而增大, 并且在本试验条件下, 两种土壤各土层的最大吸附量为 $5.8 \sim 14.7 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,

都没有达到饱和吸附, 说明这些土壤具有相当强的 SO_4^{2-} 吸附能力。在表土加入液 SO_4^{2-} 浓度较低($0.5 \sim 4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 由于表土和心土中含有较高的水溶性 SO_4^{2-} , 因此出现吸附平衡液 SO_4^{2-} 浓度稍高于或等于加入液 SO_4^{2-} 浓度的现象, 这时 SO_4^{2-} 吸附量随着土壤深度而增加, 底土表现出最大的 SO_4^{2-} 吸附量。不

同土层对 SO_4^{2-} 的吸附导致加入液 SO_4^{2-} 浓度从表土到底土逐步下降。由 2 种土壤的比较可以发现,表土中黄红壤 SO_4^{2-} 吸附量高于红壤,在底土中红壤 SO_4^{2-} 吸

附量则高于黄红壤,但 3 层平均吸附量的整体比较表明红壤 SO_4^{2-} 吸附能力略大于黄红壤。

图 1 表明, SO_4^{2-} 的解吸率随着表土加入液

表 2 供试土壤各层溶液 SO_4^{2-} 浓度及各土层 SO_4^{2-} 吸附量

Table 2 Concentrations and adsorbed amounts of SO_4^{2-} in various layers of the tested soils								
土壤	表土		心土		底土		底土平衡液浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	三层平均吸附量 / $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
	加入液浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	吸附量 / $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	加入液浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	吸附量 / $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	加入液浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	吸附量 / $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$		
红壤	0.5	1.9	0.6	2.4	0.6	5.6	0.1	3.3
	1.0	2.5	1.0	3.4	0.9	6.5	0.4	4.1
	2.0	2.8	2.0	4.0	1.8	8.0	1.1	4.9
	4.0	3.6	3.9	5.1	3.6	10.1	2.7	6.3
	7.5	4.6	7.3	6.4	6.9	11.4	5.9	7.5
	15.0	5.8	14.7	7.9	14.1	14.7	12.8	9.5
黄红壤	0.5	2.8	0.5	2.7	0.4	3.8	0.2	3.1
	1.0	3.2	1.0	3.9	0.8	4.4	0.5	3.8
	2.0	4.4	1.8	5.0	1.6	6.4	1.1	5.3
	4.0	5.3	3.7	5.5	3.4	7.0	2.9	5.9
	7.5	7.0	7.1	6.1	6.7	7.9	6.1	7.0
	15.0	8.9	14.4	7.2	13.9	11.4	12.9	9.2

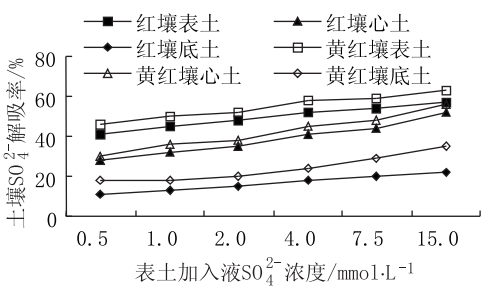


图 1 pH4 溶液对土壤 SO_4^{2-} 的解吸

Figure 1 SO_4^{2-} desorption from the tested soils treated with a solution of pH4. 0

SO_4^{2-} 浓度的增加而逐渐增大,即 SO_4^{2-} 吸附量越大解吸率也越高。在同一个土壤剖面上,这种解吸率随着土层深度的增加而明显降低,即表土吸附的 SO_4^{2-} 解吸率较高(41% ~ 63%),而底土吸附的 SO_4^{2-} 解吸率较低(11% ~ 35%)。由于红壤 SO_4^{2-} 吸附能力略大于黄红壤,因此黄红壤 SO_4^{2-} 的解吸率大于红壤。试验还表明,随着解吸液 pH 值的下降,土壤 SO_4^{2-} 的解吸率呈现明显下降趋势,即对同一土层的 SO_4^{2-} 解吸率有 $\text{pH}5.6 > \text{pH}5.0 > \text{pH}4.0$ 。

2.2 NO_3^- 吸附及解吸

与土壤 SO_4^{2-} 吸附相似,土壤对 NO_3^- 的吸附量随表土加入液 NO_3^- 浓度增加而增大,但也没有达到饱和和吸附;在表土加入液 NO_3^- 浓度为 $15.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下,各土层的最大 NO_3^- 吸附量为 $3.6 \sim 5.8 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,约为土壤 SO_4^{2-} 吸附量的 39% ~ 62%。红

壤对 NO_3^- 的吸附随着土壤深度而下降,与 SO_4^{2-} 吸附正好相反;而黄红壤对 NO_3^- 的吸附仍然是底土> 表土> 心土,与 SO_4^{2-} 吸附相一致。相对而言,黄红壤对 NO_3^- 的吸附能力略大于红壤,这与土壤 SO_4^{2-} 吸附相反。显然土壤 NO_3^- 吸附与 SO_4^{2-} 吸附有着不同的规律,见表 3。

整体而言,土壤 NO_3^- 的解吸率随 NO_3^- 吸附量的增加而增加,相同条件下黄红壤吸附的 NO_3^- 比红壤吸附的 NO_3^- 容易解吸,见图 2。在同一解吸液处理下,如 pH4.0 的解吸液,表土 NO_3^- 解吸率(4% ~ 25%)明显低于 SO_4^{2-} 解吸率(41% ~ 63%),这与供试土壤对 NO_3^- 的吸附低于对 SO_4^{2-} 的吸附有关。然而随着解吸液 pH 值的下降,土壤 NO_3^- 解吸率呈现明显下降趋势。其机理是可能随 pH 值降低,溶液中 H^+ 浓度增大,土壤表面铁、铝氧化物的羟基将被质子化,增大可变电电荷量,从而增强土壤对 NO_3^- 的吸附能力(SO_4^{2-} 解吸率也有完全相同的趋势)。有研究表明,溶液 pH 值降低将增加红壤对 SO_4^{2-} 吸附量^[9],反过来推知溶液 pH 值降低应减少 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 的解吸,与本试验结果相符。如果考虑同一剖面的不同层次,2 种供试土壤没有表现出明显的规律。

2.3 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的共同吸附及解吸

结果表明,在共同吸附试验中土壤对 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的吸附分别与土壤 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 单独吸附试验中的规律基本相似,见表 4。但是比较在这 2 个试验中

表 3 供试土壤各层溶液 NO_3^- 浓度及各土层 NO_3^- 吸附量

Table 3 Concentrations and adsorbed amounts of NO_3^- in various layers of the tested soils								
土壤	表土		心土		底土		底土平衡液浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	三层平均吸附量 / $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
	加入液浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	吸附量 / $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	加入液浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	吸附量 / $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	加入液浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	吸附量 / $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$		
红壤	0.5	0.8	0.6	0.5	0.8	0.4	1.0	0.6
	1.0	1.0	1.0	0.9	1.2	0.7	1.4	1.0
	2.0	2.5	1.9	1.6	2.0	1.2	2.2	1.8
	4.0	3.2	3.8	2.5	3.8	1.9	3.9	2.5
	8.0	4.0	7.7	3.2	7.6	2.8	7.6	3.3
	15.0	4.8	14.6	4.2	14.4	3.6	14.3	4.2
黄红壤	0.5	1.2	0.5	0.6	0.6	1.4	0.5	1.1
	1.0	1.6	0.9	1.0	1.0	2.0	0.9	1.5
	2.0	2.2	1.8	1.5	1.8	2.7	1.6	2.1
	4.0	2.7	3.8	2.2	3.7	3.6	3.6	2.8
	8.0	3.5	7.7	3.0	7.5	4.6	7.2	3.7
	15.0	4.4	14.6	3.9	14.3	5.8	13.8	4.7

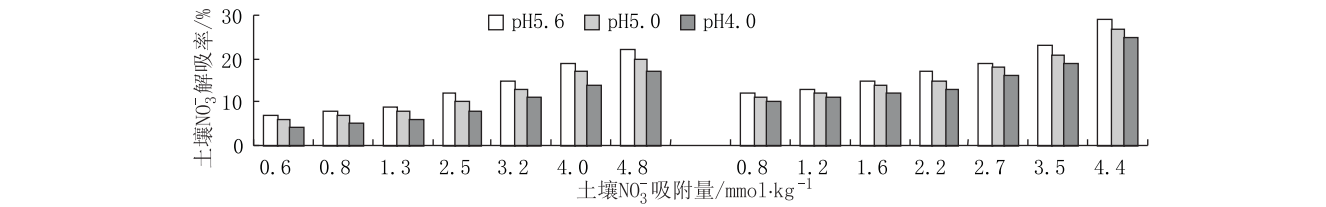


图 2 不同 pH 值溶液对应的红壤(左)、黄红壤(右)表土的 NO_3^- 解吸率

Figure 2 Desorption ratios of NO_3^- from the top soils of red soil (left) and yellow – red soil (right) treated with various pH solutions

的 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 吸附量可以发现, 在表土加入液 SO_4^{2-} 浓度相同的条件下, 例如 SO_4^{2-} 浓度都为 $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 共同吸附试验中土壤对 SO_4^{2-} 的吸附量 ($3.0 \sim 9.1 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$) 小于单独吸附试验中的 SO_4^{2-} 吸附量 ($3.6 \sim 10.1 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$); 对 NO_3^- 的吸附也是如此, 在表土加入液 NO_3^- 浓度都为 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 共同吸附中土壤 NO_3^- 吸附量为 $1.0 \sim 2.4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而在单独吸附中为 $1.2 \sim 2.7 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这说明, 在 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的共同吸附中存在着 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的竞争, 降低了土壤对这 2 种阴离子各自的吸附量。

从图 3 可以看出, 在 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 共同解吸试验中, 不同解吸液对土壤吸附的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的解吸率也有着与土壤 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 单独解吸试验中基本相似的规律。两个解吸试验的不同结果在于, 当表土加入液 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度相同时, 共同解吸试验中解吸液明显增加了对 SO_4^{2-} 的解吸率而降低了对 NO_3^- 的解吸率。例如, 当加入液 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度在两个试验中都分别为 $4.0, 2.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, pH4.0 的解吸液在共同解吸试验中对红壤和黄红壤 SO_4^{2-} 的解吸率分别为 29%

表 4 共同吸附试验中土壤 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的吸附量 ($\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 4 Adsorbed amounts of SO_4^{2-} and NO_3^- by the tested soils in the co – adsorption experiment ($\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土壤	表土加入液 SO_4^{2-} 、 NO_3^-		表土		心土		底土	
	浓度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$		SO_4^{2-}	NO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
红壤	0.5	0.25	1.6	0.4	2.0	0.2	5.0	0.1
	1.0	0.5	2.1	0.6	2.8	0.4	5.8	0.3
	2.0	1.0	2.4	1.0	3.5	0.7	7.2	0.5
	4.0	2.0	3.0	2.2	4.2	1.6	9.1	1.0
	8.0	4.0	4.0	3.0	5.0	2.4	10.1	1.8
黄红壤	0.5	0.25	2.2	0.6	2.3	0.2	3.4	0.8
	1.0	0.5	2.8	1.0	3.4	0.5	4.2	1.2
	2.0	1.0	3.6	1.4	4.2	0.8	5.6	1.7
	4.0	2.0	4.5	2.0	5.0	1.3	6.4	2.4
	8.0	4.0	5.0	3.0	6.0	2.0	7.0	3.0

和 51%、对 NO_3^- 的解吸率分别为 18% 和 20%, 而在单独解吸试验中对红壤和黄红壤 SO_4^{2-} 的解吸率则分别只有 18% 和 24%, 对 NO_3^- 的解吸率分别为 19% 和 23%。这里可能存在一个 SO_4^{2-} 的优先解吸, 特别是在酸性条件下外来阴离子主要是 Cl^- 时; 在解吸过程中, 部分 SO_4^{2-} 解吸出来后留下的吸附位点又被解吸出来的 NO_3^- 所占据。

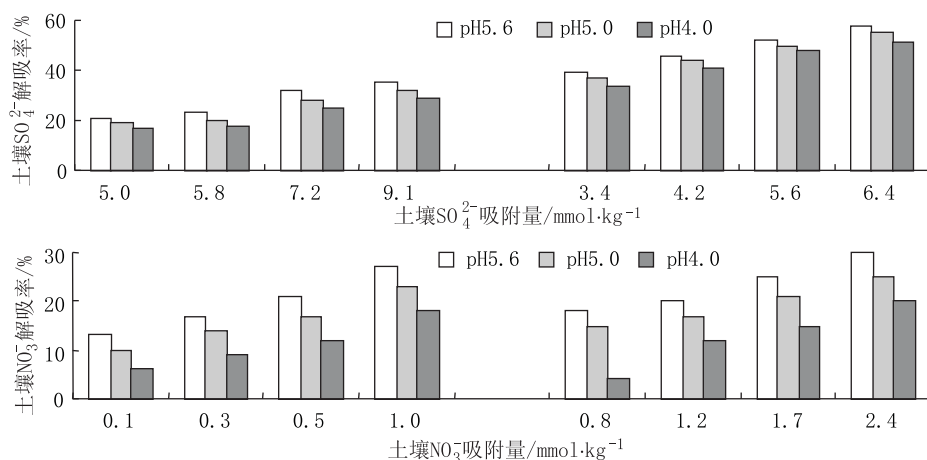


图 3 共同解吸中不同 pH 值溶液对红壤(左)、黄红壤(右)底土 SO_4^{2-} (上)和 NO_3^- (下)的解吸率

Figure 3 Desorption ratios of SO_4^{2-} (above) and NO_3^- (below) from the bottom soils of red soil (left) and yellow - red soil (right) treated with various pH solutions in the co - desorption experiment

3 结论

本试验采用的两种典型湖南森林土壤红壤和黄红壤都具有相当强的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 吸附能力,但土壤对 SO_4^{2-} 的吸附和对 NO_3^- 的吸附表现出明显不同的规律。在表土加入液 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度相同时,各土层 NO_3^- 最大吸附量约为 SO_4^{2-} 吸附量的39%~62%。

虽然红壤 SO_4^{2-} 吸附能力大于黄红壤,而黄红壤 NO_3^- 吸附能力大于红壤,但是黄红壤吸附的 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 都比红壤吸附的 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 容易解吸。

解吸液相同时,表土 SO_4^{2-} 解吸率远高于底土 SO_4^{2-} 的解吸率,而且土壤的 NO_3^- 解吸率明显低于 SO_4^{2-} 解吸率。但是,随着解吸液 pH 值的下降,土壤 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的解吸率出现明显下降。

由于 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的竞争,共同吸附试验中土壤对 SO_4^{2-} 或 NO_3^- 的吸附量都小于单独吸附试验中的吸附量,但 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 吸附量的比值与单独吸附时基本相同。然而,共同解吸试验中解吸液明显增加了对 SO_4^{2-} 的解吸率而降低了对 NO_3^- 的解吸率, SO_4^{2-} 的解吸优先于 NO_3^- 。

参考文献:

- [1] 廖柏寒,蒋青. 酸沉降与我国南方森林土壤的酸化[J]. 农业环境保护,2002,21(2):110-114.
- [2] 吴甫成,吴君维,王晓燕,等. 湖南酸雨污染特征[J]. 环境科学学报,2000,20(6):807-809.
- [3] 陶福禄,冯宗炜. 中国南方土壤对酸沉降的敏感性[J]. 环境科学学报,2000,20(1):126-128.
- [4] Huete A R, McColl J G. Soil cation leaching by acid rain with varying nitrate - to - sulfate ratios[J]. *J Environ Qual*, 1984, 13: 366-371.
- [5] Harrison R B, Johnson D W, Todd D E. Sulfate adsorption and desorption reversibility in a variety of forest soils [J]. *J Environ Qual*, 1989, 18: 419-426.
- [6] 吴杰民. 土壤对 SO_4^{2-} 的吸附-解吸特征[J]. 环境化学,1992,11(5):39-46.
- [7] Hendershot W H, Duquette M. A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1986, 50: 605-608.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
- [9] 林玉锁,蓝叶青,薛家骅. 溶液中金属离子和 pH 值对红壤吸附 SO_4^{2-} 的影响[J]. 环境化学,1992,11(1):39-42.