

# 酸沉降与我国南方森林土壤的酸化

廖柏寒, 蒋 青

(湖南农业大学环境保护研究所, 湖南 长沙 410128)

**摘 要:**通过模拟酸沉降土壤连续浸泡试验,研究我国南方 5 种森林土壤的酸化过程,并讨论了影响土壤酸化的几个因素。结果表明,土壤对酸沉降  $H^+$  的中和能力,对酸沉降阴离子( $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$ ) 的吸附,土壤阳离子( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  等盐基离子以及  $Al^{3+}$ ) 的风化,土壤 pH 和 BS 的变化,都在土壤酸化过程中有着重要作用。同时,酸沉降的酸度(pH 值)是决定土壤酸化的主要因素,而酸沉降中高含量的盐基离子可能缓解土壤的酸化过程。结合土壤本身物理化学基本特性可以得知,福建土壤对酸沉降引起的酸化最为敏感;江西、湖南土壤次之;重庆土壤的酸化敏感性较弱;而贵州土壤对酸沉降不太敏感。

**关键词:**土壤酸化; 酸沉降; 森林土壤; 中国南方

**中图分类号:**X517      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000 – 0267(2002)02 –

## Acid Deposition and Acidification of Forest Soils in Southern China

LIAO Bo-han , JIANG Qing

(Institute of Agro – Environmental Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Acidification of soil due to acid deposition in five forest regions in southern China was studied through a batch experiment by using simulated acid deposition, and several factors influencing soil acidification were also evaluated in this paper. The results showed that soil ability to neutralize  $H^+$  ions from acid deposition, adsorption of anions ( $SO_4^{2-}$  and  $NO_3^-$ ), weathering of soil cations (such as  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , and  $Al^{3+}$ ), and changes in soil pH and base saturation, are closely related to the process of soil acidification. The acidity (or pH) of acid deposition, meanwhile, was a key factor to influence soil acidification, and high contents of base cations in acid deposition could alleviate this process. In combination of these factors and physicochemical characters of the soils, Fujian soil is the most sensitive to acid deposition, followed by Jiangxi soil, Hunan soil, and Chongqing soil, and Guizhou soil is not very sensitive to acid deposition.

**Keywords:** soil acidification; acid deposition; forest soil; Southern China

酸沉降是当今世界上最严重的环境问题之一,由于酸沉降所引起的森林土壤的酸化在我国南方已有所报道<sup>[1,2]</sup>。但是如何研究酸沉降导致的土壤酸化,如何评价森林土壤的酸化敏感性,目前国内外并没有统一的标准。因此,有必要对酸沉降与土壤酸化以及影响因素进行研究,并对我国南方森林土壤的酸化敏感性进行综合讨论。不同的研究表明,土壤对外来酸的中和<sup>[3]</sup>,对酸沉降阴离子的吸附<sup>[4]</sup>,土壤阳离子的风化<sup>[5]</sup>,土壤 pH 和 BS 的变化<sup>[6]</sup>,都直接或间接地影响和反映着土壤的酸化过程,而且酸沉降已经成为近几十年森林土壤酸化的主要原因<sup>[1,2]</sup>。本研究旨在通过对采自我国南方 5 个森林地区的供试土壤进行模拟

酸沉降连续浸泡试验,从上述几个方面来综合探讨酸沉降对土壤酸化的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

分别采自重庆、贵州、湖南、江西和福建森林地区的 5 种供试土壤,均在长江以南,受酸沉降影响。在不同的土壤剖面,按层次采集土样,自然风干,过 2 mm 筛。

### 1.2 试验方法

模拟酸沉降溶液用稀  $H_2SO_4$ 、稀  $HNO_3$ 、 $CaSO_4$ 、 $MgSO_4$ 、 $NH_4NO_3$  及去离子水配制,同时用去离子水作对照。模拟酸沉降溶液主要化学组成见表 1。

将 10 g 表土、15 g 心土、15 g 底土分别置入 3 个锥型瓶中(用 A 瓶、B 瓶、C 瓶代替)。先在 A 瓶中加入

收稿日期: 2001 – 03 – 12  
作者简介: 廖柏寒(1957—),男,湖南醴陵人。曾在挪威留学五年并获博士学位,现为湖南农业大学教授。

| 表 1 模拟酸沉降溶液主要化学组成(μmol·L <sup>-1</sup> )                                                        |       |                  |                  |                              |                               |                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Table1 Chemical compositions of the simulated acid deposition solutions (μmol·L <sup>-1</sup> ) |       |                  |                  |                              |                               |                              |
| 溶液                                                                                              | pH    | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
| 溶液 1                                                                                            | 5. 81 | 0. 00            | 0. 00            | 0. 00                        | 0. 00                         | 0. 00                        |
| 溶液 2                                                                                            | 3. 48 | 2. 10            | 0. 07            | 0. 00                        | 165. 56                       | 28. 34                       |
| 溶液 3                                                                                            | 4. 30 | 110. 87          | 20. 29           | 35. 28                       | 145. 70                       | 43. 78                       |
| 溶液 4                                                                                            | 3. 51 | 218. 58          | 38. 78           | 71. 32                       | 399. 06                       | 97. 12                       |

180 mL 模拟酸溶液,振摇 15 min,在随后的 36 h 内每隔 12 h 振摇一次 15 min,然后静置 12 h,移出 45 mL 土壤上清液到一个空瓶中待分析,其余土壤溶液小心地转移到 B 瓶中。按 A 瓶的方法处理 B 瓶,然后将 45 mL 土壤上清液移到另一个空瓶中,剩余土壤溶液转移到 C 瓶。同样处理 C 瓶,收集土壤溶液后,再在 A 瓶中加入 180 mL 新鲜模拟酸溶液,重复整个模拟酸溶液加入和土壤处理过程 15 次,不同模拟酸溶液对每组土壤样品都可得到 2 700 mL 土壤溶液。

1. 3 样品分析

用 0. 1 mol·L<sup>-1</sup> BaCl<sub>2</sub> 浸提土壤中交换态阳离子,求出阳离子交换量(CEC)和盐基饱和度(BS)<sup>[7]</sup>,用 75 mL 去离子水分 3 次浸提 5 g 土壤中水溶性SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子。土壤溶液及浸提液均过 0. 45 μm 微孔滤膜处理。溶液中阴离子由离子色谱法(Dionex DX 100)测定,金属阳离子由原子吸收分光光度计(Perkin Elmer 5 000)测定,pH 值由 pH 计(Orion 81 - 72BN)测定。供试土壤主要理化性质在表 2 中给出。

2 结果与分析

2. 1 土壤对酸沉降 H<sup>+</sup> 的中和

土壤本身是一个很强的缓冲系统,对外来 H<sup>+</sup> 离子有一定的中和能力,这种缓冲能力的大小与外来氢离子总量和土壤本身性质有关。试验表明,5 种供试土壤都具有较强的酸缓冲能力。用输入的 H<sup>+</sup> 总量与浸提液中 H<sup>+</sup> 总量的差值除以输入的 H<sup>+</sup> 总量,得到土壤对酸沉降 H<sup>+</sup> 离子的中和百分率,见表 3。用较强的模拟酸雨溶液 2 与溶液 4 作用,H<sup>+</sup> 总中和百分率在 78%—99%;若用较弱的模拟酸雨溶液 3 作用,总中和百分率较低,为 6. 1%—93. 2%。贵州土壤本身的 pH 值为 4. 06—4. 08,当 pH4. 3 的模拟酸雨加入时,表层土壤将释放出 H<sup>+</sup>,增加土壤溶液的酸度;只是由于心土和底土的缓冲作用,才使得部分外来 H<sup>+</sup> 得到中和(总中和百分率为 6. 1%)。比较不同层次土壤可以发现,表土在整个土壤的酸缓冲过程中起着关键的作用,中和了大部分外来的 H<sup>+</sup>。从表 3 还可得知,福建、湖南、江西 3 种土壤酸中和能力较强,而贵州、重庆土壤酸中和能力较弱,其原因主要是后两种土壤属黄壤,在长期严重的酸沉降作用下,土壤已严重酸化,pH 值很低(4. 06—4. 41),因而对酸沉降 H<sup>+</sup> 的中和能力减弱。

2. 2 土壤对酸沉降阴离子的吸附

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 是酸沉降中主要的阴离子。随着酸沉降进入土壤,土壤溶液中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度将同时上升。如果土壤不具有阴离子吸附能力,根据电中性原则,溶液中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 将携带等量的土壤阳离子经淋溶过程离开土壤,这将加速土壤的酸化过程。因此,土壤对酸沉降阴离子的吸附能力是判断土壤酸化敏感性的重要指标。从土壤溶液的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度中减去

| 表 2 供试土壤基本理化性质                                            |    |        |    |           |       |                                  |          |                                  |                                                            |                            |
|-----------------------------------------------------------|----|--------|----|-----------|-------|----------------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Table2 Physical - chemical properties of the tested soils |    |        |    |           |       |                                  |          |                                  |                                                            |                            |
| 采样地点                                                      | 类型 | 成土母质   | 土层 | 层次<br>/cm | pH    | CEC<br>/cmol(+)·kg <sup>-1</sup> | BS<br>/% | 交换态 Al<br>/mmol·kg <sup>-1</sup> | 水溶性SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>/mmol·kg <sup>-1</sup> | 总碳量<br>/g·kg <sup>-1</sup> |
| 重庆南山                                                      | 黄壤 | 砂岩风化物  | 表土 | A(12)     | 4. 14 | 3. 84                            | 20. 96   | 9. 00                            | 1. 70                                                      | 21. 8                      |
|                                                           |    |        | 心土 | B1(36)    | 4. 38 | 2. 85                            | 13. 81   | 7. 64                            | 1. 10                                                      | 4. 2                       |
|                                                           |    |        | 底土 | C(55)     | 4. 41 | 3. 61                            | 16. 39   | 9. 58                            | 2. 19                                                      | 3. 0                       |
| 贵阳六冲关                                                     | 黄壤 | 石灰岩风化物 | 表土 | A(3)      | 4. 06 | 13. 23                           | 35. 19   | 25. 50                           | 2. 15                                                      | 148. 9                     |
|                                                           |    |        | 心土 | AB(12)    | 4. 07 | 10. 72                           | 19. 01   | 26. 82                           | 1. 11                                                      | 19. 8                      |
|                                                           |    |        | 底土 | B2(35)    | 4. 08 | 7. 71                            | 9. 90    | 22. 62                           | 3. 68                                                      | 6. 8                       |
| 湖南会同县                                                     | 黄壤 | 板页岩风化物 | 表土 | A(17)     | 4. 70 | 3. 36                            | 56. 12   | 4. 42                            | 0. 88                                                      | 18. 1                      |
|                                                           |    |        | 心土 | B1(40)    | 4. 62 | 1. 95                            | 27. 87   | 4. 36                            | 1. 12                                                      | 6. 3                       |
|                                                           |    |        | 底土 | B2(120)   | 5. 07 | 1. 42                            | 39. 60   | 2. 64                            | 0. 77                                                      | 2. 6                       |
| 江西南昌                                                      | 红壤 | 第四纪红土  | 表土 | A(2)      | 4. 90 | 3. 74                            | 56. 88   | 5. 11                            | 0. 46                                                      | 17. 6                      |
|                                                           |    |        | 心土 | B1(5)     | 4. 44 | 2. 87                            | 11. 55   | 8. 15                            | 0. 62                                                      | 16. 0                      |
|                                                           |    |        | 底土 | B2(25)    | 4. 48 | 2. 69                            | 6. 79    | 8. 07                            | 0. 49                                                      | 8. 7                       |
| 福建戴云山                                                     | 红壤 | 凝灰岩风化物 | 表土 | AB(12)    | 4. 34 | 3. 45                            | 5. 55    | 10. 32                           | 0. 64                                                      | 16. 9                      |
|                                                           |    |        | 心土 | B2(30)    | 4. 84 | 2. 20                            | 3. 91    | 6. 83                            | 0. 02                                                      | 5. 4                       |
|                                                           |    |        | 底土 | BC(50)    | 5. 06 | 1. 78                            | 5. 62    | 5. 39                            | 0. 01                                                      | 2. 2                       |

表 3 土壤对酸沉降 H<sup>+</sup> 的中和百分率(%)

Table 3 Neutralization percentage of H<sup>+</sup> ions from simulated acid deposition by the tested soils

| 处理            | 土层     | 重庆   | 贵州    | 湖南   | 江西    | 福建   |
|---------------|--------|------|-------|------|-------|------|
| 溶液 2<br>pH3.5 | 表土     | 35.7 | 50.0  | 67.9 | 58.9  | 56.2 |
|               | 心土     | 26.7 | 23.4  | 23.3 | 27.0  | 33.4 |
|               | 底土     | 23.7 | 10.6  | 7.8  | 5.1   | 9.5  |
|               | 总中和百分率 | 86.1 | 84.0  | 99.0 | 91.0  | 99.1 |
| 溶液 3<br>pH4.3 | 表土     | 18.0 | -34.7 | 80.4 | 81.8  | 38.3 |
|               | 心土     | 19.8 | 11.4  | 1.4  | -10.7 | 39.9 |
|               | 底土     | 11.2 | 29.4  | 9.5  | -11.4 | 15.0 |
|               | 总中和百分率 | 49.0 | 6.1   | 91.3 | 59.7  | 93.2 |
| 溶液 4<br>pH3.5 | 表土     | 32.1 | 29.3  | 64.3 | 57.1  | 57.1 |
|               | 心土     | 26.0 | 25.3  | 23.3 | 28.3  | 31.5 |
|               | 底土     | 24.0 | 23.2  | 9.2  | 4.3   | 7.8  |
|               | 总中和百分率 | 82.1 | 77.8  | 96.8 | 89.7  | 96.4 |

模拟液浓度和溶液 1(去离子水) 处理后土壤的溶液浓度可计算出土壤对SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的吸附量,其结果给在表 4 中(负值表示吸附,正值表示释放)。

试验表明,5 种供试土壤都具有一定的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 吸附能力(0.7—6.1 mmol·kg<sup>-1</sup>),但比国外一些类似研究的结果要低<sup>[8]</sup>。贵州、重庆土壤的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 吸附能力较其他土壤低,甚至一些土层还出现SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的释放,主要是因为长期严重的酸沉降作用,大量外来SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的输入,使得这两种土壤SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 吸附能力被大量消耗,土壤中已积累了大量水溶性SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (表 2)。一般而言,土壤对酸沉降SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的吸附主要发生在表层,而整个土壤的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 吸附能力与该地区酸沉降组成以及土壤本身水溶性SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量相关。NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 是土壤中的活性阴离子,被一些研究者认为是难以吸附的<sup>[9]</sup>。从本试验结果可以看出,中国南方的森林土壤具有一定的NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 吸附能力,特别是在表层土壤中(0.0—5.7 mmol·kg<sup>-1</sup>),甚至可以达到相应SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 吸附量的 1/3—1/2。考虑到

试验中外来NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的输入量远低于SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的输入量,可以推知,这些土壤潜在的NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 吸附能力将是相当大的。

2.3 土壤阳离子的风化

酸沉降带来的大量 H<sup>+</sup> 将参与土壤的阳离子交换过程,也加剧土壤的风化过程,从而导致大量阳离子的淋溶释放,因此加速了土壤的酸化。本试验用土壤溶液中的阳离子释放量减去模拟酸雨阳离子输入量,再加上土壤中交换态阳离子的变化量,来估算酸沉降作用下土壤的风化量,见表 5。

结果表明,5 种供试土壤的盐基离子风化量(Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 总和)在试验条件下为 0.22—4.72 mmol·kg<sup>-1</sup>(加权平均值),其中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 的风化量占 70% 以上;同时,土壤 Al<sup>3+</sup> 的风化量为 0.05—5.78 mmol·kg<sup>-1</sup>(加权平均值),与盐基离子总风化量在同一数量级上。一般来说,表土的盐基离子风化量和 Al<sup>3+</sup> 风化量都远大于心土和底土,显然是因为表土首先接触酸沉降,消耗了大部分外来 H<sup>+</sup>,因而风化过程比心土和底土要更容易进行。比较不同地区供试土壤可以发现,盐基离子风化量以贵州土壤为最高(1.58—13.93 mmol·kg<sup>-1</sup>),重庆、湖南、江西土壤居中(0.55—7.57 mmol·kg<sup>-1</sup>),福建土壤最低(0.15—3.91 mmol·kg<sup>-1</sup>);而 Al<sup>3+</sup> 风化量仍以贵州土壤为最高(2.65—14.41 mmol·kg<sup>-1</sup>),福建与江西土壤居中(0.08—15.62 mmol·kg<sup>-1</sup>),重庆与湖南土壤较低(0.06—10.68 mmol·kg<sup>-1</sup>)。福建、江西土壤供 Al 能力强而供盐基离子能力弱,易受到酸沉降的影响。各地区土壤风化量的差异显然与土壤原有的阳离子交换量 CEC 和盐基饱和度 BS 直接相关(见表 2)。酸沉降对土壤阳离子风化的影响主要是其酸度,

表 4 土壤对酸沉降阴离子的吸附(负值表示吸附,正值表示释放)(mmol·kg<sup>-1</sup>)

Table4 Adsorption ( - ) or release ( + ) of anions from simulated acid deposition in the tested soils ( mmol·kg<sup>-1</sup>)

| 处理   | 土层    | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |       |       |        |        | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |       |       |       |       |
|------|-------|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|      |       | 重庆                            | 贵州    | 湖南    | 江西     | 福建     | 重庆                           | 贵州    | 湖南    | 江西    | 福建    |
| 溶液 2 | 表土    | -7.74                         | -5.98 | -7.47 | -19.06 | -10.54 | -3.17                        | -3.08 | -3.22 | -0.27 | -3.27 |
|      | 心土    | 0.19                          | -1.95 | -2.98 | -2.43  | -5.09  | -0.04                        | 1.52  | -0.46 | -0.28 | 0.01  |
|      | 底土    | -1.34                         | -1.18 | -1.15 | -2.65  | -2.52  | 0.01                         | 0.23  | -0.00 | 0.02  | 0.02  |
|      | 加权平均值 | -1.90                         | -2.24 | -2.81 | -5.31  | -4.71  | -0.54                        | 0.11  | -0.69 | -0.13 | -0.53 |
| 溶液 3 | 表土    | -5.49                         | 0.05  | -5.99 | -1.14  | -8.10  | -2.68                        | -1.19 | -3.99 | -0.97 | -2.93 |
|      | 心土    | -0.38                         | -1.28 | -2.45 | -1.49  | -4.52  | -0.23                        | -0.36 | -0.73 | -0.32 | -0.11 |
|      | 底土    | -1.28                         | -1.35 | -1.55 | -1.69  | -2.94  | 0.02                         | 0.50  | 0.21  | -0.00 | 0.08  |
|      | 加权平均值 | -1.68                         | -1.09 | -2.59 | -1.53  | -4.33  | -0.52                        | -0.07 | -0.71 | -0.27 | -0.49 |
| 溶液 4 | 表土    | 0.82                          | 4.37  | -0.38 | -12.19 | -7.69  | -0.00                        | -5.74 | -1.55 | -2.61 | -1.23 |
|      | 心土    | -2.91                         | -1.58 | -6.18 | -2.16  | -5.09  | -0.54                        | 1.87  | -0.76 | -0.36 | 1.13  |
|      | 底土    | 0.28                          | -3.66 | -1.45 | -2.97  | -6.27  | 0.53                         | 0.94  | 0.71  | -0.05 | -0.50 |
|      | 加权平均值 | -0.70                         | -1.63 | -2.85 | -4.23  | -6.12  | 0.09                         | 0.13  | -0.16 | -0.58 | -0.08 |

表 5 模拟酸沉降下土壤阳离子的风化量

Table5 Weathering amount of soil cations affected by simulated acid deposition

| 处理   | 土层    | 基盐离子 /mmol · kg <sup>-1</sup> |       |       |      |       | Al <sup>3+</sup> /mmol · kg <sup>-1</sup> |       |       |       |       |
|------|-------|-------------------------------|-------|-------|------|-------|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|      |       | 重庆                            | 贵州    | 湖南    | 江西   | 福建    | 重庆                                        | 贵州    | 湖南    | 江西    | 福建    |
| 溶液 2 | 表土    | 6.05                          | 4.82  | 7.57  | 2.76 | 3.91  | 4.36                                      | 14.41 | 10.51 | 15.62 | 11.31 |
|      | 心土    | 2.55                          | 2.25  | 0.55  | 1.81 | 0.15  | 1.96                                      | 3.30  | 2.83  | 4.06  | 4.95  |
|      | 底土    | 1.52                          | 3.99  | 1.64  | 0.78 | 0.93  | 1.89                                      | 2.65  | 0.32  | 0.08  | -1.00 |
|      | 加权平均值 | 2.62                          | 3.54  | 2.26  | 1.45 | 1.17  | 2.33                                      | 4.83  | 2.86  | 4.00  | 3.04  |
| 溶液 3 | 表土    | 1.30                          | 7.32  | 1.88  | 1.76 | 1.56  | 0.06                                      | 3.07  | 1.93  | 2.58  | 1.12  |
|      | 心土    | 2.51                          | 1.58  | -0.02 | 3.23 | -1.08 | -0.19                                     | -0.06 | -0.94 | -0.97 | 1.00  |
|      | 底土    | 1.19                          | 4.10  | 1.45  | 0.56 | 0.82  | 0.40                                      | 3.56  | 0.07  | -1.04 | -0.50 |
|      | 加权平均值 | 1.65                          | 3.80  | 1.03  | 1.56 | 0.31  | 0.15                                      | 2.27  | 0.05  | -0.41 | 0.27  |
| 溶液 4 | 表土    | 1.50                          | 13.93 | 6.79  | 5.66 | 0.77  | 5.41                                      | 12.82 | 10.68 | 15.62 | 12.70 |
|      | 心土    | 3.17                          | 1.61  | -0.36 | 1.58 | -0.48 | 3.04                                      | 4.21  | 2.41  | 3.79  | 4.48  |
|      | 底土    | 1.38                          | 3.73  | 1.52  | 1.93 | 0.50  | 1.86                                      | 4.48  | 0.53  | -0.31 | 0.90  |
|      | 加权平均值 | 1.99                          | 4.72  | 1.77  | 2.43 | 0.22  | 2.85                                      | 5.78  | 2.85  | 3.71  | 4.06  |

因此溶液 2 与溶液 4 作用的风化量大于溶液 3。对于溶液 4 比溶液 2 在 Al<sup>3+</sup> 风化量上的差异,可能是由于溶液 4 中部分盐基离子与土壤 Al 交换所引起的。

2.4 土壤 pH 和 BS 的变化

土壤 pH 值和 BS 值的下降是土壤酸化的直接标志,常被用于评价酸沉降下土壤酸化的敏感性<sup>[6]</sup>。试验结果表明,溶液 2(pH3.5,仅含少量盐基离子,阴离子含量 201 μmol · L<sup>-1</sup>)与溶液 4(pH3.5,盐基离子含量 265 μmol · L<sup>-1</sup>,阴离子含量 506 μmol · L<sup>-1</sup>)将降低土壤的 pH 值,而溶液 3(pH4.3,盐基离子含量 135 μmol · L<sup>-1</sup>,阴离子含量 197 μmol · L<sup>-1</sup>)作用将导致土壤 pH 值的上升。相对而言,贵州土壤 pH 值变化较小(-0.33—+0.22),湖南、江西土壤变化较大(-0.86—+0.46);主要的 pH 值下降大多发生在表层(-0.86—-0.16)。与土壤 pH 值变化相比,土壤 BS 值变化的情况非常复杂,这与酸沉降的酸度和盐基离

子含量以及土壤本身的 pH 值和 BS 值有关。一般来说,溶液 2 导致土壤 BS 值大幅度下降,因为该溶液酸度高,而盐基离子含量低,致使土壤盐基离子大量浸出流失;溶液 3 使土壤 BS 值有所上升,有利于土壤酸化的缓解,因为溶液 3 的 pH 值与土壤 pH 值相近,且盐基离子含量与阴离子含量也相近,土壤对部分阴离子的吸附同时导致了部分盐基离子的吸附;溶液 4 是强酸性沉降,且阴离子含量远高于盐基离子含量,应该导致土壤的酸化和 BS 值下降,如贵州、重庆、湖南、江西土壤。BS 值在福建、湖南、江西的底层土壤中有所上升,是因为表层的盐基离子经淋溶释放而转移在底层累积的缘故,见表 6。

3 讨论

评价土壤的酸化有很多方法,但在讨论酸沉降对森林土壤的作用时,应该综合考虑 4 个方面,也就是

表 6 模拟酸沉降浸泡试验前后土壤 pH 和 BS 的变化

Table 6 Changes in soil pH and BS before and after the batch experiment by using simulated acid deposition

| 处理 | 土层    | pH 变化 |       |       |       |       | BS 变化 /% |        |        |        |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------|--------|--------|-------|
|    |       | 重庆    | 贵州    | 湖南    | 江西    | 福建    | 重庆       | 贵州     | 湖南     | 江西     | 福建    |
| 表土 | 试验前原值 | 4.14  | 4.06  | 4.70  | 4.90  | 4.34  | 20.96    | 35.19  | 56.12  | 56.88  | 5.55  |
|    | 溶液 2  | -0.21 | -0.37 | -0.83 | -0.93 | -0.53 | -19.21   | -25.18 | -53.36 | -54.51 | -4.38 |
|    | 溶液 3  | 0.41  | 0.04  | 0.23  | 0.14  | 0.15  | 8.57     | 3.90   | -1.67  | -7.90  | 15.83 |
|    | 溶液 4  | -0.16 | -0.33 | -0.75 | -0.86 | -0.51 | -4.90    | -11.22 | -39.96 | -42.59 | 7.34  |
| 心土 | 试验前原值 | 4.38  | 4.07  | 4.62  | 4.44  | 4.84  | 13.81    | 19.01  | 27.87  | 11.55  | 3.91  |
|    | 溶液 2  | -0.31 | -0.06 | -0.53 | -0.22 | -0.51 | -11.73   | -9.52  | -25.01 | -9.33  | -2.94 |
|    | 溶液 3  | 0.29  | 0.14  | 0.36  | 0.46  | 0.03  | 4.55     | 0.98   | 24.23  | 16.89  | 27.78 |
|    | 溶液 4  | -0.30 | -0.10 | -0.42 | -0.13 | -0.48 | -5.12    | -4.35  | -11.25 | -3.85  | 7.09  |
| 底土 | 试验前原值 | 4.41  | 4.08  | 5.07  | 4.48  | 5.06  | 16.39    | 9.90   | 39.60  | 6.79   | 5.62  |
|    | 溶液 2  | -0.24 | 0.12  | 0.00  | -0.14 | 0.03  | -14.15   | -14.51 | 7.37   | -3.96  | -0.62 |
|    | 溶液 3  | 0.28  | 0.22  | 0.12  | 0.29  | 0.11  | 3.25     | -2.85  | 26.12  | 11.72  | 36.50 |
|    | 溶液 4  | -0.24 | 0.06  | -0.22 | -0.03 | -0.26 | -6.25    | -0.81  | 21.84  | 5.72   | 29.14 |

土壤对酸沉降  $H^+$  的中和、土壤对酸沉降阴离子的吸附、土壤阳离子的风化以及土壤 pH 和 BS 的变化。相对而言,土壤对外来酸的中和率越高,吸收的外来酸量就越大,土壤就越容易酸化;同理可知,土壤对酸沉降阴离子的吸附虽然暂时阻滞了土壤阳离子的释出,但酸性阴离子  $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  的积累将导致土壤内部的酸化。然而,土壤阳离子风化量的大小与土壤本身的 CEC 值和 BS 值以及土壤矿物直接有关,是土壤提供阳离子能力的标志;因此,盐基离子风化量越大,  $Al^{3+}$  离子风化量越小,该土壤应具有较强的抗酸化能力。土壤 pH 值和 BS 值的下降则更是土壤酸化的直接标志。根据这种讨论,可以将不同地区土壤在相同模拟酸沉降作用下,比较各土壤试验前后上述参数的相对变化值,因而评价各土壤的相对酸化敏感性。将这种方法用于本试验的中国南方 5 种森林土壤,可以得知福建土壤对酸沉降引起的酸化最为敏感,江西、湖南土壤次之,重庆土壤的酸化敏感性较弱,而贵州土壤对酸沉降不太敏感。

土壤的酸化过程既与土壤本身性质有关。更与酸沉降的作用有关。试验中使用了去离子水(溶液 1)和 3 种模拟酸沉降溶液(溶液 2、3、4)。溶液 1 主要用来作对照,对土壤的酸化基本上没有直接影响。溶液 2 是强酸性酸沉降, pH 值为 3.5,含有一定的酸性阴离子和少量盐基离子;溶液 3 的化学组成与近年贵阳市区酸雨湿沉降近似<sup>[10]</sup>, pH 值为 4.3,含有一定的酸性阴离子和一定量的盐基离子;溶液 4 是一种假设的严重酸雨,既考虑干沉降的贡献,又考虑未来酸雨的发展,其 pH 值为 3.5,酸性阴离子和盐基离子的含量都较高。试验结果表明,溶液 2 对土壤酸化的作用最强,溶液 4 次之,溶液 3 最弱,显然这说明两个问题:(1)酸沉降的酸度(pH 值)对土壤酸化起着主导作用,因而溶液 2 和溶液 4 的酸化作用比溶液 3 强;(2)酸沉降中高含量的盐基离子能缓解土壤的酸化过程,因而溶液 4 的酸化作用比溶液 2 弱。

从不同土壤层次考虑,表土是缓冲酸沉降的主体。由于直接接受酸沉降的淋溶,表土的酸度上升,BS 下降,  $Al^{3+}$  溶出,  $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  累积,这是最容易发生酸化的土层。正是因为表土对酸沉降的缓冲作用,心土和底土的酸化过程得到缓解。

## 4 结论

土壤对酸沉降  $H^+$  的中和能力,对酸沉降阴离子( $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$ )的吸附,土壤阳离子( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  等盐基离子,以及  $Al^{3+}$ )的风化,土壤 pH 和 BS 的变化,都是土壤酸化重要影响因素,在评价由于酸沉降导致的森林土壤酸化问题时应进行综合考虑。

本研究所用 3 种模拟酸沉降溶液对土壤的酸化过程有不同的结果。试验表明,酸沉降的酸度(pH 值)是决定土壤酸化的主要因素,而酸沉降中高含量的盐基离子可能缓解土壤的酸化过程。酸沉降导致的土壤酸化主要发生在表层,由于表土的缓冲作用,心土和底土的酸化过程得到缓解。

根据上述讨论并结合土壤本身物理化学基本特性,可以得知:福建土壤对酸沉降引起的酸化最为敏感;江西、湖南土壤次之;重庆土壤的酸化敏感性较弱;而贵州土壤对酸沉降不太敏感。

本研究在挪威奥斯陆大学化学系完成,曾受到 Seip, H. M. 教授的指导,谨致谢忱。

## 参考文献:

- [1] Dai Z, Liu Y, Wang X, Zhao D. Changes in pH, CEC and exchangeable acidity for some forest soils in southern China during the last 32 – 35 years[J]. *Water Air Soil Pollut*, 1998, 108: 377 – 390.
- [2] Pan G X. Acidification of soils in Mount Lushan over the last 35 years [J]. *Pedosphere*, 1992, 2: 179 – 182.
- [3] 廖柏寒,李长生. 土壤对酸沉降缓冲机制探讨[J],环境科学, 1989,10: 30 – 34.
- [4] Singh B R, Johnson D W. Sulfate content and adsorption in soils of two forest watersheds in southern Norway[J]. *Water Air Soil Pollut*, 1986, 31: 847 – 856.
- [5] 廖柏寒,戴昭华. 土壤对酸沉降的缓冲能力与土壤矿物的风化 [J],环境科学学报,1991,11: 425 – 431.
- [6] Reuss J O, Johnson D W. Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters[M]. New York: Springer – Verlag, 1986.
- [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] Curtin D, Syers J K. Mechanism of sulfate adsorption by two tropical soils[J]. *J Soil Sci*, 1990, 41: 295 – 304.
- [9] 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.
- [10] Liao B, Seip H M, Larssen T. Response of two Chinese forest soils to acidic inputs: leaching experiment[J]. *Geoderma*, 1997, 75: 53 – 73.