

# 广东鹤山主要森林生态系统酸沉降影响现状研究

刘菊秀, 周国逸, 温达志

(中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510650)

**摘要** 通过野外现场采样及室内分析方法, 对广东鹤山主要森林生态系统酸沉降影响现状进行了研究。结果表明, 鹤山森林生态系统林内降水、地表水和土壤酸化比较严重。林内降水 pH 值较低 (<4.8)。通过降水析出的阳离子总量大于阴离子总量, 林冠层负电荷相对较多, 易吸附  $H^+$ 。地表水较之大气降水 pH 值有所升高, 然而阳离子含量高, 大量的营养离子流往林外。不管是针叶林还是阔叶林 0~10 cm 层土壤都表现出很强的酸化现状, 盐提 pH 值在 4.0 以下, 土壤交换性酸含量高, 而盐基饱和度却较低。酸沉降对鹤山森林生态系统影响较严重。

**关键词**: 广东鹤山; 森林生态系统; 酸沉降; 影响; 研究

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2003)04-0430-04

## Status and Effects of Acid Deposition on Major Forest Ecosystems at Heshan, Guangdong Province

LIU Ju-xiu, ZHOU Guo-yi, WEN Da-zhi

(South China Institute of Botany, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** This paper studied the effects of acid deposition on major forest ecosystems at Heshan, Guangdong province. It indicted that the canopy through fall, stem flow, runoff and soil had been seriously acidified at Heshan. The canopy through fall and stem flow had the low pH value, under 4.8. The amount of cations was more than that of anion in both canopy through fall and stem flow, which suggested that the canopies had more negative charge and could easily adsorb  $H^+$ . Compared with the atmospheric rainfall, the runoff had higher pH value, but it had a lot of exchangeable ions leaching out of forests. The soil in 0~10 cm layer was also seriously acidified, with the pH value under 4.0 when the soil was extracted by  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  KCl. The content of exchangeable acid was high in soil, but the base cation saturation (BS) was low. The results above suggested that the effects of acid deposition on major forest ecosystems at Heshan were serious.

**Keywords:** Guangdong Heshan; forest ecosystems; acid deposition; effect; study

随着工业的发展, 大气酸沉降问题也随之出现, 并对全球生态系统产生重大的影响, 它已成为影响全球环境的十大问题之一。地处南亚热带广东省是全国经济极具活力, 工业化速度最快的地区之一, 酸沉降的影响非常严重, 近十年大气降水 pH 平均值都在 5.0 以下, 酸雨频率 50% 以上<sup>[1]</sup>。一些研究表明, 酸沉降是影响森林消亡的主要因素之一<sup>[2~4]</sup>, 那么在广东酸沉降对森林的影响状况如何呢? 通过在广东鹤山丘陵综合实验站的取样分析, 我们研究了酸沉降对当地森林生态系统影响现状。

## 1 研究地概况

鹤山位于广东省中部 (112°54'E, 22°41'N), 属南

亚热带季风气候, 年均气温 21.7℃, 年均降雨量和蒸发量分别为 1700 和 1600 mm。丘陵地土壤为砖红壤或红壤。试验站共有 8 个集水区, 是热带亚热带退化生态系统进行植被恢复构建的人工林生态系统和林地自然演替的次生林生态系统<sup>[5]</sup>。

## 2 样品采集和分析方法

### 2.1 水样品采集和分析方法

#### 2.1.1 样品采集

1996 年 6—8 月分别收集马尾松 (*Pinus massoniana*)、荷木 (*Schima superba*)、马占相思 (*Acacia mangium*) 冠层穿透雨, 树干径流, 同时在鹤山气象观测站同步收集大气降水, 共收集、记录雨水 8 次。大气降水和穿透雨的收集器系用直径 15 cm 的聚乙烯漏斗做成。冠层穿透雨收集器分别置于各林型冠层的下方, 3 种林型加气象站共放置 12 个。树干径流水样的收集是选标准木, 在离地面 1.2 m 处用聚氯

收稿日期: 2002-11-01

基金项目: 广东省环保局(2000-09) 国家自然科学基金(39928007); 广东省自然科学基金(010567)

作者简介: 刘菊秀(1975—), 女, 博士, 主要从事植物环境生态学研究工作。E-mail: ljxiu@scib.ac.cn

乙烯胶管蛇形环绕树干,蛇形管末端接树干径流养分元素分析收集器。收集到的大气降水和林内降水样品经过滤后,分别置入 50 mL 的聚乙烯塑料瓶内保存,供化学分析。

### 2.1.2 分析方法

水样在降水后立即测定 pH 值,用 S-2 型 pH 计测定。水样当天送往实验室,用原子吸收法(GBC932AA 型,澳大利亚产)分析  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 。水样中的  $F^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $PO_4^{3-}$ 、 $Cl^-$ 、 $NH_4^+$  用离子色谱法(Dionx 公司 2120 I 型离子色谱仪)测定。

### 2.2 土壤样品采集和分析方法

#### 2.2.1 土样采集及制备

土样采集:1999 年 1 月在马尾松林、荷木林、马占相思林和大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)林进行土样采集。在选定区域的样方中,按机械方法布点,随着样方坡度分上、中、下 3 个层次,每一层分左、中、右 3 个样点进行采样。采样深度统一为 0~3 cm(上层)和 3~10 cm(下层)两个层次。

土样用塑料袋密封带回实验室。土样预处理:将土样置于洁净瓷盘中,剔除石粒、草根等杂物,自然风干,再用滚轴磨成粒径为 1~2 mm 的粉末,装瓶待用。

#### 2.2.2 实验分析方法

土壤用水提和 KCl 盐提后,用 pH 计(S-2 型)测定 pH 值。土壤交换性酸用氯化钾交换-中和滴定法测定。盐基离子用原子吸收光谱法(GBC932AA 型,澳大利亚产)分析。

## 3 结果分析

### 3.1 针叶林内降水、地表径流和土壤的酸化现状

#### 3.1.1 针叶林内降水的酸化现状

从表 1 可以看出,相对于大气降水,马尾松林内降水穿透雨和树干径流的离子含量都大大增加,增加倍数有的甚至达 20 多倍,  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $NH_4^+$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $PO_4^{3-}$  等营养离子被大量地从林冠层冲洗下来。林内降水中离子浓度升高的原因是因为通常林冠层拦截了大量的干沉降以及林冠分泌的一些代谢产物,当下雨时这些物质随着大气降水一起被冲洗下来。针叶林穿透雨中  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $PO_4^{3-}$  含量高于树干径流中相应的离子含量,阴阳离子总量穿透雨也高于树干径流。一般资料表明<sup>[6-8]</sup>,树干径流的离子富集量高于穿透雨中的离子富集量,是因为树干有机酸和无机酸的淋洗和洗脱以及树干径流雨量小。这里情况相反可能是因为林冠郁闭度非常大,叶面积指数非常高,且马尾松林针叶冠层的主要反应是干沉降,拦截了大量的干沉降,因而相对而言导致了

表 1 针叶林与阔叶林大气降水、穿透雨、树干径流和地表径流化学特征 (mmol · L<sup>-1</sup>)

Table 1 Chemical properties of the atmospheric rainfall, canopy throughfall, stem flow and runoff in both coniferous and broad-leaved forests

| 林型           | Na <sup>+</sup>  | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | K <sup>+</sup>   | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | F <sup>-</sup>   | Cl <sup>-</sup>  | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | pH              | Σ阳    | Σ阴    | Σ阳 - Σ阴 | Σ阳/Σ阴 |
|--------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------|-------|---------|-------|
| 大气降水         | 0.013<br>(0.011) | 0.034<br>(0.021)             | 0.012<br>(0.008) | 0.007<br>(0.004) | 0.016<br>(0.010) | 0.001<br>(0.002) | 0.012<br>(0.009) | 0.005<br>(0.005)             | 0.009<br>(0.007)              | 0.0001<br>(0.0000)            | 4.54<br>(0.571) | 0.083 | 0.028 | 0.055   | 2.99  |
| 荷木林<br>穿透雨   | 0.018<br>(0.017) | 0.086<br>(0.092)             | 0.104<br>(0.102) | 0.011<br>(0.004) | 0.020<br>(0.013) | 0.003<br>(0.002) | 0.027<br>(0.017) | 0.004<br>(0.004)             | 0.020<br>(0.008)              | 0.0002<br>(0.0001)            | 4.68<br>(0.453) | 0.240 | 0.053 | 0.187   | 4.51  |
| 马占相思<br>林穿透雨 | 0.128<br>(0.105) | 0.078<br>(0.102)             | 0.091<br>(0.083) | 0.019<br>(0.006) | 0.034<br>(0.010) | 0.005<br>(0.005) | 0.096<br>(0.051) | 0.002<br>(0.002)             | 0.028<br>(0.011)              | 0.0002<br>(0.0001)            | 4.73<br>(0.447) | 0.350 | 0.132 | 0.218   | 2.65  |
| 马尾松林<br>穿透雨  | 0.223<br>(0.426) | 0.073<br>(0.068)             | 0.159<br>(0.145) | 0.024<br>(0.012) | 0.047<br>(0.034) | 0.048<br>(0.089) | 0.167<br>(0.364) | 0.007<br>(0.003)             | 0.035<br>(0.017)              | 0.0028<br>(0.0075)            | 4.41<br>(0.364) | 0.526 | 0.260 | 0.267   | 2.03  |
| 荷木林<br>树干流   | 0.022<br>(0.043) | 0.057<br>(0.050)             | 0.128<br>(0.112) | 0.013<br>(0.013) | 0.024<br>(0.019) | 0.006<br>(0.006) | 0.040<br>(0.059) | 0.005<br>(0.007)             | 0.030<br>(0.029)              | 0.0007<br>(0.0015)            | 4.26<br>(0.261) | 0.244 | 0.081 | 0.162   | 3.00  |
| 马占相思<br>林树干流 | 0.057<br>(0.018) | 0.160<br>(0.059)             | 0.067<br>(0.038) | 0.023<br>(0.015) | 0.081<br>(0.069) | 0.004<br>(0.004) | 0.099<br>(0.035) | 0.008<br>(0.005)             | 0.054<br>(0.018)              | 0.0002<br>(0.0002)            | 4.44<br>(0.928) | 0.389 | 0.165 | 0.224   | 2.36  |
| 马尾松林<br>树干流  | 0.050<br>(0.048) | 0.061<br>(0.028)             | 0.157<br>(0.133) | 0.044<br>(0.031) | 0.082<br>(0.073) | 0.004<br>(0.006) | 0.064<br>(0.076) | 0.003<br>(0.003)             | 0.061<br>(0.038)              | 0.0008<br>(0.0019)            | 3.88<br>(0.250) | 0.394 | 0.133 | 0.261   | 2.96  |
| 荷木林<br>地表流   | 0.008<br>(0.009) | 0.056<br>(0.056)             | 0.200<br>(0.071) | 0.021<br>(0.010) | 0.024<br>(0.013) | 0.008<br>(0.002) | 0.051<br>(0.027) | 0.021<br>(0.029)             | 0.033<br>(0.014)              | 0.000<br>(0.000)              | 4.75<br>(0.191) | 0.309 | 0.114 | 0.195   | 2.70  |
| 马占相思<br>林地表流 | 0.142<br>(0.076) | 0.045<br>(0.031)             | 0.236<br>(0.122) | 0.037<br>(0.013) | 0.363<br>(0.133) | 0.011<br>(0.003) | 0.142<br>(0.082) | 0.007<br>(0.005)             | 0.036<br>(0.014)              | 0.001<br>(0.000)              | 6.74<br>(0.250) | 0.824 | 0.197 | 0.627   | 4.19  |
| 马尾松林<br>地表流  | 0.046<br>(0.032) | 0.042<br>(0.012)             | 0.041<br>(0.003) | 0.024<br>(0.009) | 0.032<br>(0.006) | 0.007<br>(0.000) | 0.031<br>(0.010) | 0.004<br>(0.003)             | 0.015<br>(0.001)              | 0.001<br>(0.000)              | 4.55<br>(0.071) | 0.185 | 0.059 | 0.127   | 3.16  |

注: 括号内为标准差 Σ阴 = Σ阴离子 = 总阴离子 Σ阳 = Σ阳离子 = 总阳离子。

树干径流离子富集量小于穿透雨离子富集量。林内降水中不管是穿透雨还是树干径流,阳离子总量都大于阴离子总量,表明林冠层留有较多的负电荷,更易吸附  $H^+$  林冠容易酸化。在马尾松针叶林中林内降水有进一步酸化的趋势,树干径流和穿透雨 pH 值分别下降了 0.66 和 0.13 个单位。

### 3.1.2 针叶林地表水的酸化现状

相对于大气降水,地表径流 pH 值上升了 0.01 个单位。地表径流 pH 值高于穿透雨和树干径流,表明土壤对酸缓冲能力远大于植物体。地表径流中离子含量较之大气降水大大增加,尤其是阳离子含量,通过湿沉降输入到林内的营养离子量小于输出的营养离子量(见表 1),表明大量的盐基离子通过地表径流将流往林外,长此下去,将会导致土壤贫瘠。比之林内降水穿透雨和树干径流,地表径流中阴、阳离子含量则相对较少,表明土壤束缚了一定的林内降水中的离子,减少了营养离子的流失。

### 3.1.3 针叶林土壤酸化现状

从表 2 中可看出,马尾松针叶林土壤 0~10 cm 层表现为强酸性,盐提 pH 值在 4.0 以下,0~3 cm 层 pH 值低于 3~10 cm 层,交换性酸含量比较高。森林表层土壤直接接受来自枯枝落叶层和土壤有机层分解而来的各种养分离离子,养分离离子含量应该较高,然而我们的采样发现,马尾松林即使在表层土壤盐基离子含量也相对较低,盐基饱和度都在 20% 以下。土壤作为森林植物生长的主要养分来源,土壤养分的缺乏

将对森林的维持产生巨大的影响。

## 3.2 阔叶林林内降水、地表水和土壤的酸化现状

### 3.2.1 阔叶林林内降水的酸化现状

对于大气降水,阔叶林荷木和马占相思林林内降水除  $NO_3^-$  外其他离子的含量都有所增加,从林冠层淋洗掉了平常积累的大量的阴阳离子。荷木和马占相思林中穿透雨的离子含量都低于树干径流,与一般研究结果相同。 $NO_3^-$  在林内降水中浓度不升高反而降低,分析认为是两种阔叶林型的森林都处于发育年龄,根对  $NH_4^+$  的需要量特别大,因而转化为  $NO_3^-$  的量非常少,而反硝化作用强烈。当  $NH_4^+$  氧化成  $NO_3^-$  后则可能引起土壤和水的酸化。两种阔叶林都吸收由干湿沉降所获得的  $NO_3^-$ ,而  $NO_3^-$  含量不高,从这个角度也说明了广东亚热带地区氮氧化物对酸沉降的贡献不大。在两种阔叶林中  $SO_4^{2-}$  的含量都较高,表明  $SO_2$  对酸沉降的贡献很大。两种林内降水中阳离子总量都大于阴离子总量,树干径流都有进一步酸化的趋势,分别下降了 0.28 和 0.10 个 pH 单位,然而穿透雨的 pH 值分别上升了 0.14 和 0.19 个 pH 单位,表明两种阔叶林都有一定的缓冲能力。

### 3.2.2 阔叶林地表水的酸化现状

从表 1 可看出,较之大气降水,阔叶林荷木林地地表径流 pH 值上升了 0.21 个单位,而马占相思林 pH 值则上升了 2.06 个单位,表现出了较强的酸缓冲能力。然而通过湿沉降中,马占相思林输出了更多的营养离子于林外,比荷木林多  $0.615 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。两种林

表 2 鹤山主要森林类型表层土壤特征

Table 2 Properties of surface soil in selected forests of Heshan

| 地点     | 层次/cm | pH 值           |                | 交换性酸/ $\text{mmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ |                  | 盐基离子/ $\text{mmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ |                |                 |                  | CEC <sub>E</sub><br>/ $\text{mmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ | BS<br>/% |
|--------|-------|----------------|----------------|--|------------------|--|----------------|-----------------|------------------|--|----------|
|        |       | 盐提             | 水提             | $Al^{3+}$                                  | $H^+$            | $K^+$                                      | $Na^+$         | $1/2Mg^{2+}$    | $1/2Ca^{2+}$     |  |          |
| 马占相思林  | 0~3   | 3.17<br>(0.04) | 3.95<br>(0.04) | 68.91<br>(8.51)                            | 17.71<br>(3.66)  | 5.04<br>(0.32)                             | 7.81<br>(1.91) | 1.819<br>(0.95) | 3.885<br>(7.03)  | 105.17   | 17.6     |
|        | 3~10  | 3.38<br>(0.06) | 4.21<br>(0.04) | 70.00<br>(25.72)                           | 12.24<br>(10.11) | 4.26<br>(1.02)                             | 7.69<br>(2.07) | 0.815<br>(1.09) | 2.354<br>(15.92) | 97.361   | 15.5     |
| 大叶相思林  | 0~3   | 3.11<br>(0.15) | 3.88<br>(0.07) | 47.54<br>(9.38)                            | 8.46<br>(3.16)   | 8.42<br>(0.85)                             | 6.81<br>(1.25) | 2.77<br>(1.10)  | 6.28<br>(7.88)   | 80.29  | 30.3     |
|        | 3~10  | 3.55<br>(0.03) | 4.17<br>(0.02) | 48.53<br>(2.36)                            | 5.91<br>(0.00)   | 5.92<br>(1.02)                             | 6.98<br>(0.98) | 1.306<br>(0.88) | 3.29<br>(5.96)   | 71.94  | 24.3     |
| 乡土树种林  | 0~3   | 3.34<br>(0.10) | 4.03<br>(0.12) | 59.48<br>(25.35)                           | 17.03<br>(4.58)  | 6.23<br>(0.65)                             | 6.5<br>(0.95)  | 1.63<br>(0.99)  | 4.23<br>(8.22)   | 95.10  | 19.5     |
|        | 3~10  | 3.62<br>(0.07) | 4.29<br>(0.09) | 35.43<br>(11.18)                           | 18.39<br>(5.77)  | 4.94<br>(0.26)                             | 4.31<br>(2.93) | 0.76<br>(0.44)  | 2.18<br>(0.32)   | 66.014   | 18.5     |
| 马尾松针叶林 | 0~3   | 3.53<br>(0.13) | 4.20<br>(0.18) | 56.35<br>(13.28)                           | 13.01<br>(4.98)  | 5.80<br>(0.40)                             | 2.46<br>(0.37) | 1.47<br>(0.60)  | 5.05<br>(4.10)   | 84.13  | 17.6     |
|        | 3~10  | 3.70<br>(0.09) | 4.32<br>(0.13) | 41.8<br>(8.47)                             | 7.09<br>(5.95)   | 4.78<br>(0.19)                             | 2.28<br>(0.15) | 0.90<br>(2.40)  | 2.78<br>(2.31)   | 59.63  | 18.0     |

型通过湿沉降输出的营养离子量都大大超出输入的离子量,酸沉降影响较为严重。

### 3.2.3 阔叶林土壤酸化现状

鹤山的主要阔叶林为马占相思林、大叶相思林、荷木林。从表 2 中可看出,3 种林土壤 0~10 cm 层都表现为强酸性,盐提 pH 值都在 4.0 以下,0~3 cm 层 pH 值低于 3~10 cm 层。交换性酸含量比较高。盐基离子呈  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+}$  或  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$  下降趋势,盐基饱和度即使在表层土壤含量也不是很高,表现出了相对较弱的缓冲性能。

### 3.3 针、阔叶林生态系统酸沉降影响现状比较

#### 3.3.1 针、阔叶林林内降水酸化现状比较

从表 1 中可以看出,马尾松针叶林林内降水对离子的富集程度大于两种阔叶林型的林内降水,阴阳离子总量及阴阳离子之差都高于阔叶林,不管是树干径流还是穿透雨都有进一步酸化的趋势,而两种阔叶林型的穿透雨的 pH 值都有所升高,表现了对酸性降水一定的缓冲能力。主要原因一是降水中  $\text{H}^{+}$  被叶片吸收,与叶子中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  等阳离子进行离子交换,二是冠层叶片中淋失的弱碱与雨水中强酸结合,形成了弱酸和硫酸盐或硝酸盐<sup>[9]</sup>,这过程导致降水溶液中  $\text{H}^{+}$  的净消耗。针叶林林内降水有酸化趋势的原因是针叶冠层的主要反应是干沉降,而不像阔叶树以叶分泌作用为主,而干沉降是酸性物质的重要来源,且针叶植物分泌了的酸性物质随着雨水流下。两种阔叶林树干径流 pH 值降低是因为雨水下流过程中溶入了树干分泌的有机酸。

#### 3.3.2 针、阔叶林地表水酸化现状比较

从表 1、2 中可看出,阔叶林马占相思林地表水 pH 值较高,达到 6.74,荷木林为 4.75,马尾松林最低 4.55,从中可看出阔叶林土壤比针叶林对酸的缓冲能力更强。然而从表 3 中看出,通过湿沉降从马占相思林输出的营养离子量最高,为中和  $\text{H}^{+}$  马占相思林贡献了更多的阳离子。不管针叶林还是阔叶林,长期酸沉降的影响都会导致土壤贫瘠。

#### 3.3.3 针、阔叶林土壤酸化现状比较

表 3 鹤山主要森林类型湿沉降营养离子总输入与总输出之比较 ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Table 3 Comparison of total input and total output of nutrient ions in precipitation in primary forest in Heshan ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )

| 林型    | 总输入   | 总输出   |
|-------|-------|-------|
| 荷木林   | 0.083 | 0.309 |
| 马占相思林 | 0.083 | 0.824 |
| 马尾松林  | 0.083 | 0.185 |

鹤山 4 种林中,阔叶林土壤盐基饱和度比针叶林高,表现出相对较强的酸缓冲能力。马尾松针叶林土壤 pH 值在 BS 比其他林低的情况下保持相对较高值,分析原因是因为 8 月份在马尾松林内进行了大量的木材砍伐,导致土壤大量流失,表层较酸化的土壤流失后,留下 pH 值相对较高的土壤。马占相思和大叶相思都是原产于澳大利亚的固氮树种,具有在贫瘠山丘生长迅速的特点<sup>[10、11]</sup>,但相对于马占相思林,大叶相思林  $\text{CEC}_E$  较低,但交换性酸总量较低,BS 则大大高于马占相思林,表现出很强的酸缓冲性能。从抗酸能力上来说,种植阔叶树比针叶树好,阔叶树中种植大叶相思比马占相思好。

## 4 结论

鹤山主要森林生态系统林内降水酸化都很严重,pH 值较低,小于 4.8。通过降水析出的阳离子总量大于阴离子总量,林冠层负电荷相对较多,易吸附  $\text{H}^{+}$ ,森林冠层容易酸化。通过湿沉降输出的阳离子量大于输入的阳离子量。不管是针叶林还是阔叶林,0~10 cm 层都表现出很强的酸化现状,盐提 pH 值在 4.0 以下,交换性酸含量高,土壤缓冲能力仍较低。阔叶林比针叶林抗酸能力强。

### 参考文献:

- [1] Aamlid D, Venn K and Staunes A O. Forest decline in Norway: Monitoring results, international links and hypotheses[J]. *Nor J Agric Sci*, 1990, Suppl. 4: 1-27.
- [2] Auclair A N D, Martin H C and Walker S L. A case study of forest decline in western Canada and the adjacent United States[J]. *Water Air and Soil Pollut*, 1990, 53: 13-31.
- [3] Neuvonen S, Suomela J. The effect of simulated acid rain on pine needle and birch leaf litter decomposition[J]. *J Appl Ecol*, 1990, 27, 857-872.
- [4] 黄清风, 陈煜辉. 广州地区近十年酸雨污染的变化[J]. *广州环境科学*, 1999, 14(2): 19-22.
- [5] 余作岳, 彭少麟. 热带亚热带退化生态系统的植被恢复及其效应[J]. *生态学报*, 1995, 15(增刊 A 辑): 1-17.
- [6] 程伯容, 许广山, 高世东. 森林林冠对酸性降水化学组成的影响[J]. *中国环境科学*, 1989, 9(2): 155-157.
- [7] 曹洪法, 王 玮, 高映新, 等. 森林冠层对酸雨的反应及其影响[J]. *中国环境科学*, 1989, 9(2): 81-85.
- [8] 高映新, 刘连贵, 舒俭民, 等. 酸沉降—森林冠层反应模型[J]. *环境科学学报*, 1992, 12(3): 316-323.
- [9] 曹洪法, 王 玮, 等. 酸雨与农业[M]. 北京: 中国林业出版社, 1988. 146-150.
- [10] 余作岳, 彭少麟, 张文其. 广东鹤山亚热带丘陵人工林群落分析 II 大叶相思林[A]. 热带亚热带森林生态系统研究(第七集)[C]. 1990, 163-168.
- [11] 余作岳, 彭少麟, 张文其. 鹤山亚热带丘陵人工林群落分析 I 马占相思林生物量和生长量[C]. 热带亚热带森林生态系统研究(第六集)[C]. 1990, 145-151.