

# 重庆缙云山降水 pH 值和化学组成特征分析

魏 虹<sup>1,3</sup>, 王建力<sup>2</sup>, 李建龙<sup>1</sup>

(1. 南京大学生命科学学院, 江苏 南京 210093; 2. 西南师范大学资源与环境科学学院, 重庆 400715; 3. 西南师范大学生命科学学院, 重庆 400715)

**摘 要:** 对重庆缙云山自然保护区 1998—1999 年 126 个降水水样的 pH 值和主要化学组成成分等特征进行了分析研究。结果表明, 缙云山降水 pH 值平均值为 5.23, 电导率为  $33.90\ \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 降水的酸化与污染程度低于重庆市市区和我国南方其它酸雨区域。缙云山降水中  $\text{SO}_4^{2-}$  占阴离子总量的 84.61%,  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  为主要的阳离子。 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的大量存在极大地中和了酸根离子对雨水的酸化作用, 降低了酸雨发生频率, 但酸化雨对森林生态系统仍具有潜在的威胁。缙云山降水 pH 值和各离子含量存在明显的季节变化特点, 总体表现为冬春季污染程度高于夏秋季, 这可能与降水量的季节变化有关。酸雨对森林生态系统的影响存在延迟性, 故需要对保护区酸沉降特征进行更仔细和综合的动态研究。

**关键词:** 缙云山; 酸雨; 酸化雨; pH 值; 离子成分; 大气污染

**中图分类号:** X517      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672 – 2043(2005)02 – 0344 – 05

## Analysis on pH and Chemical Composition of Rainfall in Jinyun Mountain, Chongqing, China

WEI Hong<sup>1,3</sup>, WANG Jian-li<sup>2</sup>, LI Jian-long<sup>1</sup>

(1. School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. School of Resource and Environment, Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China; 3. School of Life Science, Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The pH and chemical composition of 126 precipitation samples collected from April 1998 to November 1999 in Jinyun Mountain, Chongqing, China, were analyzed. The results showed that the average pH was 5.23 and the average conductivity was  $33.90\ \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , which implied that the pollution in Jinyun Mountain was better than that in the other acid rain region of southern China and Chongqing urban areas. The concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  accounted for 84.61% of total anions, and the concentration of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  accounted for 77.36% of total cations of rainfall in Jinyun Mountain. The high concentration of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  neutralized greatly the acidity of acid ions, resulted in relatively high pH and lower frequency of acid rain, but the acidifying rain might injure the forest ecosystem potentially. The seasonal variations in the rainfall pH and chemical composition were evident, which may be related to the seasonal variations in precipitation amount in Jinyun Mountain. The effects of acid rain on forest ecosystem had time lag, so it was necessary to study the dynamic characteristics of acid deposition more carefully and comprehensively.

**Keywords:** acid rain; acidifying rain; Jinyun Mountain; major ions; pH; air pollution

由于高硫煤燃烧释放出大量的  $\text{SO}_2$ , 导致重庆成为我国大气污染和酸雨发生最严重的区域之一<sup>[1~5]</sup>。近年来, 随着煤改气和限制  $\text{SO}_2$  排放等相关控制措施的采用, 重庆市主城区的大气污染状况有所改善, 酸雨出现频率和降雨酸度均明显下降。但从整体来看, 重庆的大气污染和酸雨情况仍然严重, 并已出现酸沉

降从城区向郊区和农村地区蔓延和扩散的趋势<sup>[6~8]</sup>。随着三峡工程的进行, 政府更加重视包括大气和水污染在内的整个三峡库区的生态环境问题。因此, 有必要对重庆市酸雨新动态特别是郊区的降水化学特征进行研究。

缙云山自然保护区地处重庆市市区以北 60 km 的北碚区, 该区植被条件好, 重型工业企业少, 大气污染相对较轻, 常常成为重庆市酸雨对照分析的本底<sup>[1]</sup>。但近年的观测发现, 该区域也出现了酸雨的危害。本文通过对该区酸雨特征的动态分析, 以期了解该区域

收稿日期: 2004 – 05 – 14

作者简介: 魏 虹 (1969—), 女, 四川人, 理学博士, 副教授, 从事生态学和环境科学的教学和研究工作。

E – mail: weihong@swnu.edu.cn

大气污染机制,更好地控制和减少大气污染对缙云山保护区的森林植被和生态系统带来的危害。

# 1 研究区概况与研究方法

## 1.1 研究区概况

缙云山国家级自然保护区(29°49'N,106°20'E)林地面积 1 400 hm<sup>2</sup>,海拔 350 ~ 952 m。保护区属于亚热带季风气候,年平均气温 18.2 ℃,全年无霜期 334 d,年平均降水量 1 143 mm,年平均相对湿度 80%,全年日照 1 288.1 h。土壤为酸性黄壤。

保护区内主要植被类型为常绿阔叶林,这是我国长江流域保存最好的典型的中亚热带常绿阔叶林区之一。除典型的常绿阔叶林外,保护区内还有处于各演替阶段的常绿针阔叶混交林和针叶林。区内植物种类丰富(超过 1 400 种),植被覆盖率大于 90%。近年的观察发现保护区内一些敏感物种已经受到酸雨的伤害。

## 1.2 取样与分析

1998 年 4 月—1999 年 11 月在缙云山缙云寺无林空旷处设立固定取样点,通过雨水采集器采集雨

样,逢雨必测,共采集雨样 126 个。采集的雨样经密闭处理后,带回实验室进行 pH 值、电导率和各种化学组成成分分析。其中,降水的 pH 值采用玻璃电极 pH 值测定仪测定,电导率使用电导仪测定,以 3 次测定值的算术平均值作为 pH 值和电导率的测值。金属阳离子(K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)用原子吸收光谱仪测定,阴离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>)用离子色谱仪分析, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 用比色法测定,上述各离子均值的计算采用离子浓度雨量加权法。利用方差分析(ANOVA)对雨样的 pH 值和电导率等指标的季节差异进行了分析,对各离子成分进行了主成分分析(PCA)和相关分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 pH 值和电导率

### 2.1.1 基本特征

对 126 个雨样的计算表明,缙云山降水 pH 值平均值为 5.23。和国内其它区域降水 pH 值相比,缙云山雨水的酸化程度高于我国北方地区,但显著低于重庆市其它区域和我国南方大部分区域,见表 1。

对缙云山降水 pH 值的分析表明,虽然其平均值

表 1 我国不同区域降水 pH 值的比较

Table 1 The average pH of precipitation in various regions of China

| 区域 | 中国北方 <sup>[9]</sup> | 中国南方 <sup>[9]</sup> | 重庆市市区 <sup>[10]</sup> | 重庆南山 <sup>[4]</sup> | 重庆缙云山 |
|----|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------|
| pH | 5.80                | 4.70                | 4.11                  | 4.60                | 5.23  |

远高于重庆市市区和其他区域,但波动很大。126 个雨样中 pH 值最小值为 3.80,最大值为 7.30,变幅达 3.50 个 pH 单位。经统计,126 个雨样中 pH 值小于 5.6 的雨样数为 77 个,占全部样点数的 61.1%,见图 1。其中,pH 小于 4 的强酸性降水出现 1 次,出现频率为 0.8%;pH 值在 4~5 的降水次数为 56 次,出现频率为 44.4%。降水 pH 值的频数分布呈现出非正态的分布特征(偏斜度为 -1.079)。

由于降水的 pH 值高低并不与降水的离子组分浓度直接相关,而是取决于降水中酸性阴离子和碱性

阳离子酸碱中和后的总效应,即单纯的降水酸度并不能完全反映降水污染的程度<sup>[6,8]</sup>。对缙云山降水电导率的计算表明,其平均值为 33.90 μS·cm<sup>-1</sup>(最大值为 131.0 μS·cm<sup>-1</sup>,最小值为 5.5 μS·cm<sup>-1</sup>),显著低于市区降水的平均电导率 73.5 μS·cm<sup>-1</sup>,说明缙云山大气和降水的污染程度确实低于市区。

### 2.1.2 季节变化特征

为了解缙云山降水 pH 值和电导率的季节变化特征,对所采集的 126 个雨样的相关观测值进行了 AVOVA 分析,结果见表 2。

从表 2 可以看出,缙云山降水 pH 值、电导率和酸雨发生频率都显示出一定的季节差异。pH 值在冬季极显著地低于其他季节,酸雨出现频率亦明显高于其他季节,这可能与降水量的季节变化有关。电导率在夏季最低,冬季最高,反映了缙云山大气和降水污染程度在冬季最为严重,而夏季则较轻。

## 2.2 离子成分与含量变化特征

### 2.2.1 阴离子

缙云山酸雨类型仍然为硫酸型。在所测定的阴离

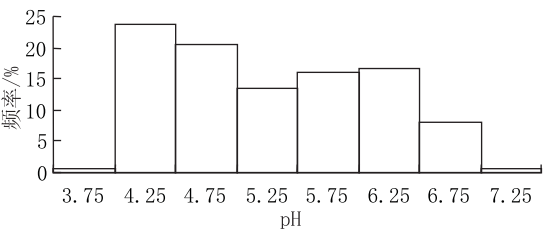


图 1 缙云山降水 pH 值频率分布图

Figure 1 The pH frequency distribution of precipitation in Jinyun Mountain

表 2  缙云山降水 pH 值和电导率的季节变化特征

Table 2  The seasonal change of precipitation pH and conductivity in Jinyun Mountain

| 季节 | pH              |      |      | 电导率                               | 酸雨频率  |
|----|-----------------|------|------|-----------------------------------|-------|
|    | 平均值             | 最小值  | 最大值  | $/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ | $/\%$ |
| 春季 | $5.37\pm0.83^a$ | 4.00 | 6.55 | $39.52^a$                         | 53.1  |
| 夏季 | $5.17\pm0.77^a$ | 4.10 | 7.30 | $21.69^b$                         | 65.1  |
| 秋季 | $5.36\pm0.82^a$ | 4.00 | 6.90 | $38.88^a$                         | 50.0  |
| 冬季 | $4.24\pm0.22^b$ | 3.80 | 4.50 | $56.81^a$                         | 100.0 |

注:同一列数据右上方相同字母表示没有显著差异,不同字母表示有显著差异 ( $P<0.01$ )

子中,  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量最高, 其平均值达到  $212.85\ \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ , 占全部阴离子含量的 84.61%。其次为  $\text{Cl}^-$ , 占全部阴离子含量的 9.82%;  $\text{NO}_3^-$  含量最低, 占 5.57%。全部阴离子的总和为  $251.57\ \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ , 远高于北美和中欧等典型酸雨地区<sup>[11~13]</sup>。但和重庆市其他区域相比, 缙云山降水中阴离子含量则显著低于市区和污染严重的南山, 见表 3。

表 3  重庆市不同区域降水离子成分平均值的比较 ( $\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ )

Table 3  The average ion composition of precipitation in various regions of Chongqing, China

| 离子成分                       | 重庆市市区 <sup>[10]</sup> | 重庆南山 <sup>[4]</sup> | 重庆缙云山  |
|----------------------------|-----------------------|---------------------|--------|
| $\text{K}^+$               | 17.0                  | 82.6                | 18.15  |
| $\text{Na}^+$              | 17.0                  | 23.9                | 28.34  |
| $\text{Ca}^{2+}$           | 125.0                 | 418.0               | 80.78  |
| $\text{Mg}^{2+}$           | 31.0                  | 40.3                | 18.82  |
| $\text{NH}_4^+$            | 123.0                 | 106.0               | 142.37 |
| $\text{SO}_4^{2-}$         | 299.0                 | 469.0               | 212.85 |
| $\text{NO}_3^-$            | 23.0                  | 45.0                | 14.02  |
| $\text{Cl}^-$              | 30.0                  | 27.6                | 24.70  |
| $\Sigma$ 阴离子               | 352.0                 | 541.6               | 251.57 |
| $\Sigma$ 阳离子               | 313.0                 | 670.8               | 288.45 |
| $\Sigma$ 阴离子/ $\Sigma$ 阳离子 | 1.12                  | 0.81                | 0.87   |

缙云山降水  $\text{NO}_3^-$  含量远低于  $\text{SO}_4^{2-}$  含量,  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  的比值仅为 0.07, 远低于欧美发达国家和日本、韩国等东亚国家的比值<sup>[11~15]</sup>, 说明在缙云山降水受当地燃煤释放的  $\text{SO}_2$  影响较大, 而来自于汽车尾气等排放的  $\text{NO}_x$  的影响则相对较小。但随着城市化进程的加快、汽车工业的发展和居民生活水平的提高,  $\text{NO}_x$  的增加可能成为今后空气污染的另一个重要来源。

2.2.2 阳离子

与欧美等国家不同, 我国酸雨中阳离子含量明显增多, 尤以  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的含量增加最为明显<sup>[5,19]</sup>。在所测定的缙云山降水阳离子中, 以  $\text{NH}_4^+$  含量最高, 占全部阳离子含量的 49.36%; 其次为  $\text{Ca}^{2+}$ , 占 28.00%;  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  合计占 22.64%。 $\text{NH}_4^+$  含量显著大于  $\text{Ca}^{2+}$  的含量, 这一特征明显不同于重庆市市区降水的化学组成特点。这一特点与缙云山所处小

环境有很大关系。缙云山森林覆盖率大于 90%, 北碚区的植被绿化状况较好(植被覆盖率大于 30%), 这大大减少了裸露地表产生的尘埃等物质, 从而使大气和降水中  $\text{Ca}^{2+}$  含量显著低于市区。同时, 保护区地处重庆市郊区, 周围为农田所环绕, 农田中各种化肥和农家肥的施用导致了空气中氨含量的急剧增加。

2.2.3 PCA 分析

为了更好地分析所测定的各离子间的关系, 对缙云山降水主要离子含量进行了主分量分析(PCA)和相关性分析, 结果分别见表 4 和表 5。

表 4  缙云山降水离子成分的 PCA 分析

Table 4  The PCA results for the precipitation of Jinyun Mountain

| 离子                 | 主分量   |        |        |
|--------------------|-------|--------|--------|
|                    | I     | II     | III    |
| $\text{K}^+$       | 0.879 | -0.207 | -0.044 |
| $\text{Na}^+$      | 0.726 | -0.345 | 0.145  |
| $\text{Ca}^{2+}$   | 0.852 | -0.251 | -0.190 |
| $\text{Mg}^{2+}$   | 0.762 | 0.420  | -0.067 |
| $\text{NH}_4^+$    | 0.846 | 0.298  | -0.080 |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | 0.856 | 0.007  | -0.377 |
| $\text{NO}_3^-$    | 0.459 | 0.738  | 0.429  |
| $\text{Cl}^-$      | 0.588 | -0.462 | 0.578  |
| 特征根                | 4.610 | 1.249  | 0.729  |
| 贡献率/ $\%$          | 57.6  | 15.7   | 9.1    |

对缙云山降水中各离子成分的 PCA 分析表明, 前 3 个主分量分别占总变差的 57.6%、15.6% 和 9.1%, 合计贡献率为 82.3%, 见表 4。第一主分量上各阳离子和  $\text{SO}_4^{2-}$  负荷比重较高; 第二主分量则以  $\text{NO}_3^-$  负荷最高。对离子间相关性的分析表明, 见表 5, 碱性阳离子与  $\text{SO}_4^{2-}$  具有较高的相关系数, 尤其是  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的相关系数均在 0.7 以上 ( $P<0.01$ ), 说明它们经常以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$  等形式存在, 即降水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  经常以中性形式出现, 从而降低了对雨水的酸化程度。 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Cl}^-$  与各碱性离子的相关性较低, 这与它们在降水阴离子成分中所占比重较小有关。

缙云山降水中  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等碱性离子的大量存

表 5 缙云山降水各离子间的相关系数

Table 5 The correlations among different ions of precipitation in Jinyun Mountain

|                               | Na <sup>+</sup>     | 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> | Cl <sup>-</sup>     |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------|
| K <sup>+</sup>                | 0.632 <sup>**</sup> | 0.775 <sup>**</sup> | 0.509 <sup>**</sup> | 0.690 <sup>**</sup>          | 0.738 <sup>**</sup>           | 0.262 <sup>*</sup>           | 0.558 <sup>**</sup> |
| Na <sup>+</sup>               |                     | 0.610 <sup>**</sup> | 0.450 <sup>**</sup> | 0.466 <sup>**</sup>          | 0.509 <sup>***</sup>          | 0.145                        | 0.521 <sup>**</sup> |
| Ca <sup>2+</sup>              |                     |                     | 0.540 <sup>**</sup> | 0.617 <sup>**</sup>          | 0.752 <sup>**</sup>           | 0.170                        | 0.506 <sup>**</sup> |
| Mg <sup>2+</sup>              |                     |                     |                     | 0.668 <sup>**</sup>          | 0.649 <sup>**</sup>           | 0.552 <sup>**</sup>          | 0.241 <sup>*</sup>  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  |                     |                     |                     |                              | 0.735 <sup>**</sup>           | 0.541 <sup>**</sup>          | 0.332 <sup>*</sup>  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |                     |                     |                     |                              |                               | 0.251 <sup>*</sup>           | 0.343 <sup>*</sup>  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  |                     |                     |                     |                              |                               |                              | 0.141               |

注: \*\* ,  $P < 0.01$ ; \* ,  $P < 0.05$ 。

在,明显减少降水中游离的酸根离子,从而大大提高了缙云山降水的 pH 值,降低了酸雨发生的频率,减少了酸雨对森林生态系统的直接危害。

2.2.4 季节变化

缙云山降水中各主要离子成分的季节变化见图 2。阴离子中,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量表现出明显的季节变化特征,冬春季节显著高于夏秋季,即冬春季 SO<sub>2</sub> 的排放对大气和降水污染较为严重,与 pH 值和电导率的季节变化特征基本一致。阳离子中,Ca<sup>2+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 表现出显著的季节变化,冬季含量最高,夏季含量最低,这与作物的播种、收获等农时的变化直接相关。

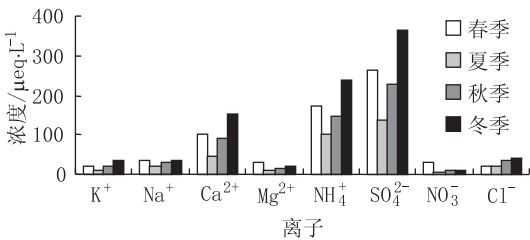


图 2 缙云山降水离子成分的季节变化  
Figure 2 Seasonal changes of main ion compositions of precipitation in Jinyun Mountain

3 讨论

通过对缙云山 126 个雨样的分析,降水 pH 值平均值为 5.23,平均电导率为 33.90  $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。与重庆市市区和我国南方城市相比<sup>[4,9,10]</sup>,降水的酸度较低,污染程度相对较轻。但从酸雨的发生频率看,缙云山降水 pH 值小于 5.6 的频率已超过 60%,特别是冬季已呈现出污染较为严重的特点(冬季降水 pH 值平均为 4.24,最低 pH 值仅为 3.8,雨水酸化严重)。缙云山自然保护区处于重庆市郊区,区域内重工业企业少,由于重庆市特殊的地形和大气环境<sup>[9]</sup>,降水主要受当地污染物的影响,大气污染相对较轻。但自 1997 年重庆改为直辖市后,随着经济的发展,区域内耗煤量有

所上升,污染物有所增加。同时,由于城区大气污染控制相关措施(如高烟囱排放等)的实施,促进了大气污染物特别是 SO<sub>2</sub> 在一定范围内的远距离传输,使大气污染从城区向郊区扩展、蔓延,郊区污染存在总体缓慢上升趋势<sup>[6,7]</sup>。因而,要降低缙云山降水酸度,避免大气污染物对自然保护区内森林生态系统的危害,除应降低区域内的 SO<sub>2</sub> 排放,更应从总体出发,控制全市(包括城区和郊区)的 SO<sub>2</sub> 排放总量。

从降水化学成分分析,缙云山降水仍属于典型的硫酸型酸雨类型,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量占全部阴离子含量的 80% 以上。阴离子含量特别是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量显著低于市区和南山等污染严重区域,但仍明显高于欧美及日本、韩国等东亚国家。Ca<sup>2+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 为缙云山降水阳离子的主要成分,占整个阳离子含量的 77.36%。与重庆市市区和我国北方地区相比,缙云山降水中 Ca<sup>2+</sup> 含量相对较少,而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 含量显著增加,这与缙云山所处小环境有很大关系。缙云山及所处北碚区植被绿化状况一直较好,植被覆盖率较高,大大减少了裸露地表产生的尘埃等,从而使降水中 Ca<sup>2+</sup> 含量显著低于市区。同时,保护区周围为农田所环绕,农田中各种化肥和农家肥的施用导致了空气中氨含量的急剧增加。各离子组分存在明显的季节分布特征,总体上仍然表现为冬春季污染重于夏秋季,这可能与缙云山降水量的季节分布特征等相关,但仍需作进一步的研究。

降水离子组分的 PCA 分析和相关分析表明,大气中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 的存在极大地中和了酸根离子对降水的酸化作用,大大提高了缙云山降水 pH 值,降低了酸雨的发生频率和由此对森林生态系统(尤其是植物冠层)的直接危害。但含有无酸性或弱酸性物质(如硫酸铵等)的降水进入土壤后,除铵被植物吸收或经土壤微生物的硝化作用后能使土壤酸化外,硫酸根的运动也可能加速土壤盐基离子的淋失,因此这种降

水虽本身不是酸雨,但同样能酸化土壤,称为酸化雨<sup>[7]</sup>。酸化雨可通过对土壤的长期影响而最终影响到植物群落的健康。同时,硫酸根与钙、镁、钾、钠等阳离子共存时虽然没有直接的负面影响,但仍存在潜在威胁。因此,为保证生态环境中酸碱平衡,降低大气污染物可能对生态系统带来的危害,应同步削减区域内的酸源与碱源(如除尘、调整化肥施用等),将“酸化硫酸根”控制在生态系统的临界负荷内。

在陆地生态系统中,森林植物拥有庞大的生物量,林冠在截获酸沉降中发挥了重要的作用,但往往也成为直接的受害者。同时,由于酸雨或酸化雨的长期影响,土壤质量下降,也会对植物造成相应的伤害。酸雨对森林生态系统的影响一直是一个研究重点和热点,但多集中在针叶林生态系统等方面<sup>[16-19]</sup>。缙云山主要植被类型为亚热带常绿阔叶林,一般认为,与针叶林相比,阔叶林具有更好的吸收酸根离子和抵抗酸雨伤害的能力<sup>[1]</sup>,但关于酸雨对阔叶林生态系统影响的详细研究并不多见。由于常绿阔叶林是我国亚热带地区的顶极植被,一旦被破坏,其恢复将更为困难。目前,缙云山保护区内部分敏感树种已经出现伤害症状,而酸雨对森林生态系统中植被与土壤的伤害可能具有一定的延迟性。因此,为更好地保护缙云山自然保护区内森林生态系统,避免对植被带来更严重的伤害,应重视缙云山及类似区域的酸雨问题,特别是酸化雨对森林生态系统的影响问题,并对此进行更深入的观察和研究。同时,应进一步加强区域间和区域内降水特征的综合研究,加强酸雨对森林生态系统和城市生态系统影响的综合研究。

#### 参考文献:

- [1] 冯宗炜,小仓纪雄. 重庆酸雨对陆地生态系统的影响和控制对策[J]. 环境科学进展,1998,6(5):1-8.
- [2] Zhao D W, Seip H M, Zhao D W, et al. Pattern and cause of acidic deposition in the Chongqing region, Sichuan Province, China[J]. *Water Air and Soil Pollut*, 1994, 77: 27-48.
- [3] Xue H B, Schnoor J L. Acid deposition and lake chemistry in Southwest China[J]. *Water Air & Soil Pollut*, 1994, 75: 61-78.
- [4] Zhang F Z, Zhang J Y, Zhang H R, et al. Chemical composition of precipitation in a forest area of Chongqing, Southwest China[J]. *Water Air and Soil Pollut*, 1996, 90: 407-417.
- [5] Gao S D, Sakamoto K, Zhao D W. Studies on atmospheric pollution, acid rain and emission control for their precursors in Chongqing, China[J]. *Water Air and Soil Pollut*, 2001, 130: 247-252.
- [6] 张卫东,张大元,陈 军,孟小军,赵 琦. 重庆地区降水污染分析[J]. 重庆环境科学,2003,25(8): 10-14.
- [7] 赵大为,张冬保,高世东. 酸雨控制区内的大气硫沉降总量控制[J]. 环境科学学报,2000,20(S1): 18-21.
- [8] 赵大为,张冬保,高世东. 重庆地区酸沉降及硫污染控制[J]. 重庆环境科学,1996,18(6): 18-23.
- [9] Wang W X, Wang T. On acid rain formation in China[J]. *Atmos Environ*, 1996, 30(23): 4091-4093.
- [10] Larssen T, Seip H M, Semb A, et al. Acid deposition and its effects in China: an overview[J]. *Environ Sci & Policy*, 1999, 2: 9-24.
- [11] Munger J W, Eisenreich S. Continental-scale variations in precipitation chemistry[J]. *Environ Sci and Tech*, 1983, 17: 32A-42A.
- [12] Hjellbrekke A G, Lovblad G, Sjöberg K, Schanug J, et al. Data report 1993. Part 1: Annual summaries. EMEP/CCC-Report 7/95, Norwegian Institute for Air Research, 1995, 4-18.
- [13] Moldan B, Kopacek J. Chemical composition of atmospheric precipitation in Czechoslovakia, 1978-1984-II. Event Samples[J]. *Atmos Environ*, 1988, 22: 1901-1908.
- [14] Lee B K, Hong S H, Lee D S. Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on the Korean peninsula[J]. *Atmos Environ*, 2000, 34: 563-575.
- [15] Seto S, Oohara M, Ikeda Y. Analysis of precipitation chemistry to a rural site in Hiroshima Prefecture, Japan[J]. *Atmos Environ*, 2000, 34: 4551-4555.
- [16] 吴 刚,章景阳,王 星. 酸沉降对重庆南岸马尾松针叶林年生物生产量的影响及其经济损失的估算[J]. 环境科学学报,1994, 14(4): 461-465.
- [17] 周国逸,小仓纪雄. 酸雨对重庆几种土壤中元素释放的影响[J]. 生态学报,1996,16(3): 251-257.
- [18] Zhao D W, Larssen T, Zhang D B, et al. Acid deposition and acidification of soil and water in the Tie Shan Ping area, Chongqing, China[J]. *Water Air and Soil Pollut*, 2001, 130: 1733-1738.
- [19] 姜文华,张 晟,陈刚才,熊好琴,丁 易,李旭光. 酸沉降对重庆南山森林生态系统土壤和植被的影响. 环境科学研究,2002, 15(6): 8-11.