

DOI: 10.5846/stxb201401290208

易浩宇, 闫文德, 梁小翠, 欧阳硕龙, 欧阳泽怡, 郭津, 何丹. 酸雨胁迫下樟树林降水中无机阴离子变化特征. 生态学报, 2014, 34(22): 6528-6537.

Yi H Y, Yan W D, Liang X C, Ouyang S L, Ouyang Z Y, Guo J, He D. Variation of inorganic anions in precipitation in Cinnamomum cam forests. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6528-6537.

酸雨胁迫下樟树林降水中无机阴离子变化特征

易浩宇^{1,2}, 闫文德^{1,2,3,*}, 梁小翠^{1,2,3}, 欧阳硕龙⁴, 欧阳泽怡^{1,2}, 郭津^{1,2}, 何丹^{1,2}

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004;

3. 城市森林生态湖南省重点实验室, 长沙 410004; 4. 湖南省林业科学院, 长沙 410004)

摘要:对城市大气降水及城市樟树林穿透水、树干茎流、地表径流中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 F^- 、 Br^- 、 PO_4^{3-} 7 种水溶性无机阴离子进行了定位测定, Br^- 、 PO_4^{3-} 未检出; 主要的阴离子为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- , 二者占总阴离子含量比例最大, 占到 75.6%—89.0%, 且在水文学各分量中变异系数均值都很稳定, 变动幅度在 0.40—0.47; 在各分量中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 F^- 含量变化较大; 大气降水、树干茎流中均为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$, 穿透水为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_2^- > \text{F}^-$, 地表径流为 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$; 穿透水 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 、 NO_2^- 淋溶系数分别为 3.83、2.61、4.18、4.32、16.06, 树干茎流 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 、 NO_2^- 淋溶系数分别为 7.52、3.55、4.29、2.76、3.10, 地表径流 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 、 NO_2^- 淋溶系数分别为 2.60、4.74、5.00、3.01、3.56, 表明阴离子在樟树林水文学过程中均表现出不同程度的富集效应; 大气降水中 PH 均值为 4.77, $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 当量比值为 1.1, 属于硫酸-硝酸混合型酸雨; 大气降水 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 与穿透水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 对应呈显著性正相关 ($P < 0.01$), 大气降水 NO_3^- 与树干茎流 NO_3^- 呈显著性正相关 ($P < 0.01$), 地表径流中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 与穿透水、树干茎流中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 对应呈显著性正相关 ($P < 0.01$), 说明樟树林能够吸附大气中的酸性物, 让酸性养分于自身系统内部吸收、迁移、络合, 从而起到净化大气的效用; 穿透水 pH 与地表径流 NO_3^- 、 NO_2^- 呈显著性负相关 ($P < 0.01$), 与地表径流 SO_4^{2-} 呈显著性正相关 ($P < 0.05$), 表明 NO_3^- 、 NO_2^- 有助于促进地表水的酸化, 而 SO_4^{2-} 有利于缓解地表水的酸化; 穿透水 pH 均值 5.62, 对酸雨起到中和作用, 树干茎流 pH 均值 4.61, 有被酸化趋势, 地表径流 pH 均值 7.19, 接近中性。

关键词:樟树; 无机阴离子; 穿透水; 树干茎流; 地表径流

Variation of inorganic anions in precipitation in Cinnamomum cam forests

YI Haoyu^{1,2}, YAN Wende^{1,2,3,*}, LIANG Xiaocui^{1,2,3}, OUYANG Shuolong⁴, OUYANG Zeyi^{1,2}, GUO Jin^{1,2}, HE Dan^{1,2}

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China

3 Key Laboratory of Urban Forest Ecology of Hunan Province, Changsha 410004, China

4 Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China

Abstract: Changes in 7 water-soluble ions including SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 F^- 、 Br^- 、 PO_4^{3-} of rainwater were investigated in Camphor forest ecosystems in Changsha city, Hunan Province of China. Water samples were taken as rainfall above the forest canopy, throughfall, stemflow and surface runoff in the forests. The result showed that Br^- and PO_4^{3-} were not detected in all water samples. Both SO_4^{2-} and NO_3^- were the major inorganic anions in waters under Camphor forests, which accounted

基金项目:国家林业行业公益性科研专项(201404316);国家自然科学基金项目(31070410);湖南省自然科学基金创新群体项目(湘基金委字[2013]7号);城市森林生态湖南省重点实验室运行项目;国家林业局软科学项目(2013-R09);中南林业科技大学青年基金重点项目(QJ2010008A)资助

收稿日期:2014-01-29; 修订日期:2014-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csfuywd@hotmail.com

for 75.6—89.0% of the total anion contents in the forest ecosystems. The contents of anion decreased in an order: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$ in rainfall and stemflow; $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_2^- > \text{F}^-$ in throughfall and $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$ in surface runoff. The leaching coefficients were 3.8, 2.6, 4.2, 4.3 16.1; 7.5, 3.6, 4.3, 2.8 3.1; and 2.6, 4.7, 5.0, 3.0 3.6 for SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^- , NO_2^- in throughfall, stemflow and surface runoff, respectively. The pH value averaged 4.77 in rainwater and the ratio of $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$ was 1.1 in the study area, which indicated that the rainwater was a sulfuric-nitric mixed acid rain. A significant positive correlation was found between rainfall and throughfall for all anions, except for NO_2^- . The NO_3^- in rainfall was significantly and positively related to that in stemflow. There were a positive relationship of SO_4^{2-} and Cl^- between throughfall and stemflow and surface runoff. The pH was 5.62, 4.61 and 7.19 in throughfall, stemflow and surface runoff, respectively. Our results demonstrated that Camphor forest ecosystems had a relative high ability to purify acid rainfall through adsorbing, uptaking, leaching and neutralizing processes.

Key Words: camphor forest; inorganic anions; through-fall; stem-flow; surface runoff

近年来,世界已出现了第三大酸雨区,该地区包括我国长江以南广大地区、台湾岛、日本列岛、朝鲜半岛,其中中国地区的酸雨面积最大、酸性最强,酸雨地区占到中国国土面积的 30%。酸雨对陆地生态系统以及水生生态系统的影响已越来越严重,引起了国内外高度关注^[1-7]。酸雨对森林生态系统危害巨大,能加速森林衰退,对树高以及树木材积生长有抑制作用,还能引起土壤性质的一系列变化,使重金属活化,从而抑制土壤中微生物的活性,使其数量减少,导致土壤贫瘠化,如酸化的土壤能够使 Ca 大量流失,又使固态的 Al 溶解释放出来,当土壤溶液中 Al 含量上升和 Ca 含量减少到一定极限时,能够抑制植物的生长。酸雨可使湿地如河流、湖泊等酸化,促进底泥中重金属 Al 等溶解并进入水环境中毒害生物、污染饮用水源。不仅如此,酸雨还会损害文物古迹,腐蚀、侵蚀建筑物等。

酸雨中起到主要致酸作用的就是酸根离子,而绝大部分酸根离子都是阴离子,其中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 最为常见,也是酸雨中最主要组成成分,酸雨之所以有如此巨大的破坏力,究其根本原因就是这些酸根阴离子在起作用,如无机阴离子能与重金属离子络合,直接影响重金属在环境中的迁移以及作物吸收^[8],同时无机阴离子对铁的腐蚀、水解过程均有影响。目前我国有关大气、PM2.5、穿透水中水溶性无机离子的研究报道比较多^[9-13],对无机离子在森林降水的研究比较少,特别是树干茎流、地表径流等有关无机离子养分的研究更少。本文通过对亚热带地区大气降水、城市樟树林的穿透水、树干茎流、地表

径流中无机阴离子的特征研究,旨在了解该生态系统中无机阴离子输入输出的规律,为该林分在今后酸雨的科学研究、经营管理中提供必要的理论依据和基础数据。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

试验地设在中南林业科技大学内部的城市森林生态研究站,中南林业科技大学位于长沙市市内,地理位置为 $111^\circ 54' - 114^\circ 15' \text{E}$, $27^\circ 51' - 28^\circ 40' \text{N}$,海拔 50—200m,属典型的亚热带湿润气候,年均降水量 1361.6 mm,集中于 4—7 月,约占全年降水的 45%,年相对湿度为 80%,年平均气温 17.4°C ,本试验区地层古老,母岩以第四纪红壤为主,风化程度比较深,土壤为森林红壤,呈酸性。试验林分是 1984 年人工营造的以樟树(占林地树种面积的 85%)为优势种(与其它树种一起种植)的混合林,主要植物为常绿树种,生长有莽草(*Illicium lanceolautum*)、木莲(*Manglietia fordiana*)、凹叶冬青(*Ilex championii* Loes)、格药铃(*Eurya muricata* Dunn)、湿地松(*Slash pine*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、醉香含笑(*Michelia macclurei* Dandy)、桂花(*Osmanthus fragrans*)等乔木树种。造林前进行了平梯整地,造林后处于半自然状态,现郁闭度为 0.7—0.8。林下植物主要有女贞(*Ligustrum lucidum*)、小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)、凤尾蕨(*Pteris multifida* Poir)、菝葜(*Smilax china*)、山胡椒(*Lindera glauca*)、油茶(*Camellia oleifera* Abel)、木莓

(*Fructus Rubi*)、大叶黄杨 (*Buxus megistop* Hylla Levl)、南蛇藤 (*Celastrus orbiculatus* Thunb)、满树星 (*Ilex aculcolata* Nakai)、铁芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 林外降水测定

将标准雨量接收器放置于林内观测塔塔顶,接收林冠以上的大气降水。为避免污染物、昆虫等,于漏斗口处布置一层精制网状塑料纱布,进行过滤,并对纱布定时清洗。为防止藻类生长及保持雨量器清洁,每次水样收集完成后,用去离子水对雨量接收器进行冲洗。

1.2.2 林内穿透水的测定

根据林内林分的分布,选出林分分布均匀、林冠枝叶结构能够代表树冠平均的位置 3 处,每处选出 1 株与标准木相接近的樟树,樟树下方沿等高线选出 3 个具有代表性的采样点,采样点为树冠投影半径的 0.6—0.65 倍的位置,将雨量接收器放置于各采样点^[14]。

1.2.3 树干茎流的测定

根据试验林分树高、林木密度、冠型结构及树干分枝角度等综合状况对观测样树进行选择。并按林木径阶分级挑选出观测样树,每个径级选择 3 株,每株样树用直径为 2 cm 沿中缝剖开的 PVC 软管由胸径处从上往下螺旋状缠绕于树干上,用结构玻璃胶粘牢,基部放置玻璃集水器收集树干茎流^[14]。

1.2.4 地表径流的测定

林内设置有 20 m×5 m 的径流场 2 处,平均坡度为 25°,把径流场四周砌成 10 cm 高混凝土围墙,并在径流场出口处设置测流堰,分别测定收集地表径流^[15]。

1.2.5 采样时间及分析方法

根据降雨性质、天气情况及实验目的,分别于 2012 年 11、12 月、2013 年 1 月、2 月、3 月、4 月进行取样,共计取水 24 次,其中穿透水、树干茎流、地表径流一一对应的降水次数为 20 次。每次取样后,立即对水样进行 pH 测定,并对过滤处理后的样品通过离子色谱仪 ICS-900 进行数据采集,采用 SPSS、Excel 程序进行数据分析、计算。

2 结果与分析

2.1 林外降水中无机阴离子含量

由表 1 可知,大气降水 pH 均值为 4.77,除 4 月份降雨 pH 均值达到 5.38 以外,其他月份降水 pH 均值都小于 5.0,表明研究地区降雨为酸雨;5 种水溶性无机阴离子中,SO₄²⁻ 含量最高,其范围 17.77—120.35 μeq/L,平均含量达到 76.44 μeq/L;其次是 NO₃⁻ 含量,平均为 69.69 μeq/L;林外降水无机阴离子含量按大小排序为 SO₄²⁻ > NO₃⁻ > Cl⁻ > F⁻ > NO₂⁻;不同月份降水阴离子含量有差异,但总体来说,5 种离子变化规律具有一定相似性,Cl⁻、F⁻、NO₂⁻ 均在 11 月份出现最大值,SO₄²⁻、NO₃⁻ 在 12 月份出现最大值,5 种离子均在 4 月份达到最小值;此外,通过对 24 次林外降水研究分析:SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、F⁻ 之间均呈现出显著正相关 ($P < 0.01$),且相关系数均大于 0.58,其中 SO₄²⁻ 与 NO₃⁻ 相关系数更是达到了 0.95;SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、F⁻ 含量与降水量呈显著性负相关 ($P < 0.01$),且相关系数分别为 -0.53、-0.50、-0.51、-0.54,说明大气降水中阴离子受降雨量影响比较大,且表现为随降雨量减小而增大的趋势,值得注意的是,1 月份降雨量只有 28.47 mm,但各阴离子含量均比较低,那是

表 1 林外降水无机阴离子含量

Table 1 Concentrations of inorganic anions of precipitation outside forest

日期 Date	F ⁻ /(μeq/L)	Cl ⁻ /(μeq/L)	NO ₂ ⁻ /(μeq/L)	SO ₄ ²⁻ /(μeq/L)	NO ₃ ⁻ /(μeq/L)	pH	降雨量 Rainfall/mm
2012-11	10.31(0.79)	27.15(0.55)	7.15(0.35)	118.46(0.72)	112.47(0.73)	4.98	124.21
2012-12	6.95(0.35)	19.21(0.50)	3.98(0.53)	120.35(0.52)	113.73(0.47)	4.66	105.32
2013-01	6.79(0.33)	21.21(0.69)	1.09(0.57)	49.54(0.13)	30.44(0.39)	4.36	25.47
2013-02	5.16(0.92)	18.11(0.58)	3.37(0.10)	70.33(0.50)	71.32(0.43)	4.64	95.34
2013-03	5.89(0.32)	13.86(0.24)	4.17(-)	82.16(0.20)	80.31(0.26)	4.58	138.40
2013-04	2.84(0.49)	4.51(0.53)	0.26(1.17)	17.77(0.34)	9.85(0.37)	5.38	246.70
平均 Average	6.32(0.53)	17.34(0.51)	3.34(0.54)	76.44(0.40)	69.69(0.44)	4.77	122.57

括号内数值为变异系数

因为 1 月份 3.0 mm 以上降水事件只发生了 2 次,分别为 11.42 mm、17.05 mm,从单日降水量来看,算是雨量比较大的降水事件了。 NO_2^- 与其它 4 种阴离子相关性不显著;从变异系数分析发现, NO_2^- 的变异系数均值最大,为 0.54,其次是 F^- ,为 0.53;而 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 变异系数均值较小,虽然这两种离子含量很高,但各自内部的变化差异还是较小的。此外,11 月份各离子变异系数偏高, F^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 变异系数均达到最大值,说明这 3 种阴离子在 11 月份不仅含量特别高,而且变化差异也比较大,相比 3 月份, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 变异系数均达到最小值,表明 3 月份降水中阴离子含量变化是最稳定的。从表 1 中还可以得出, $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 当量比值在 0.99—1.80,2 月份最低,4 月份最高,平均当量比值为 1.1,而我们通常把 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 当量比值作为判断大气降水是硫酸型还是硝酸型的依据,很明显研究地区酸雨为硫硝酸混合型。

2.2 林冠层中穿透水无机阴离子含量

林冠层穿透水与降水的变化有密切关系。由表 2 可知,穿透水中 SO_4^{2-} 含量最高,平均 293.10 $\mu\text{eq/L}$;而 F^- 浓度最低,平均 27.32 $\mu\text{eq/L}$;穿透水中无机阴离子平均含量按大小排序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_2^- > \text{F}^-$;5 种阴离子均呈现出不同程度的富集现象,其中 NO_2^- 表现尤为明显,其浓度为林外雨的 16.1 倍, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 浓度分别为林外雨的 3.8 倍、

2.6 倍、4.2 倍、4.3 倍,这说明樟树林林冠层对含 S、 NO_x 、 Cl^- 、 F^- 等酸性物质有较强的吸附能力;通过对 24 次穿透水相关性分析发现:除 SO_4^{2-} 与 NO_2^- 之间是显著相关以外,其它情况均呈现显著正相关($P < 0.01$),尤其是 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 之间相关系数均大于 0.91,而 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 相关系数也达到了 0.86;从各离子变化情况来看,5 种阴离子含量在 1 月份均达到最大值,并且各阴离子含量与林外降水中的含量差距最大: NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 含量分别为同月份林外降水的 170.1 倍、9.6 倍、8.7 倍、6.3 倍、6.3 倍;值得注意的是,通过相关性分析发现,穿透水 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 F^- 与降雨量相关性不显著,说明降雨量对穿透水中无机阴离子含量影响不大;除 NO_2^- 在 12 月份变异系数达到最大的 1.58 以外, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 变异系数主要在 11 月份数值较大,到了 3 月份各离子变异系数明显下降;穿透水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 变异系数均值与林外降水的几乎没有差别,分别为 0.43、0.40,但相比穿透水其它离子变化差异就比较大了。穿透水 pH 均值 5.62,对比林外降水 pH 上升明显,说明樟树林对酸雨起到一定中和作用,这是因为樟树林林冠层能够与酸性降水发生强烈的相互作用,如 H^+ 与树叶内部阳离子发生交换,酸沉降对分泌物的淋洗等,使穿透水化学性质发生改变。

表 2 樟树林穿透水无机阴离子含量

Table 2 Concentrations of inorganic anions of precipitation inside forest

日期 Date	F^- / ($\mu\text{eq/L}$)	Cl^- / ($\mu\text{eq/L}$)	NO_2^- / ($\mu\text{eq/L}$)	SO_4^{2-} / ($\mu\text{eq/L}$)	NO_3^- / ($\mu\text{eq/L}$)	pH
2012-11	37.79(0.69)	90.23(0.78)	10.54(0.56)	368.04(0.80)	312.00(0.66)	6.13
2012-12	38.47(0.76)	120.11(0.66)	70.41(1.58)	313.98(0.54)	202.77(0.50)	6.00
2013-01	42.68(0.50)	134.48(0.42)	185.43(0.28)	477.31(0.39)	265.68(0.95)	5.28
2013-02	14.58(0.42)	41.8(0.55)	25.48(1.34)	246.07(0.53)	140.21(0.44)	5.19
2013-03	18.16(0.19)	31.89(0.08)	25.07(0.36)	202.81(0.08)	130.05(0.16)	5.43
2013-04	12.21(0.32)	16.20(0.05)	4.98(0.41)	150.40(0.69)	40.85(0.53)	5.71
平均 Average	27.32(0.24)	72.45(0.33)	53.65(0.32)	293.10(0.43)	181.93(0.40)	5.62

2.3 树干茎流中无机阴离子含量

由表 3 可知,树干茎流中 SO_4^{2-} 含量最高,最大值达到了 1141.51 $\mu\text{eq/L}$,平均浓度 574.59 $\mu\text{eq/L}$, NO_2^- 含量最小,平均 10.34 $\mu\text{eq/L}$,两者之间相差 55.6 倍;阴离子含量排序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$;树干茎流中各离子养分均出现不同水平富集

效应,相对于穿透水, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 富集效应更为明显,这可能与樟树树皮的性质特征有一定的联系;5 种阴离子变化趋势也比较一致,均在 1 月份出现最大值,4 月份均呈现出明显下降;通过对 20 次树干茎流分析发现: F^- 与其它 4 种离子相关性不显著, NO_3^- 与 NO_2^- 相关性也不显著,其它两两离子之间均呈现

显著正相关 ($P < 0.01$), 其中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 相关系数更是达到了 0.95; 需要注意的是, 树干茎流中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 F^- 含量与降雨量相关性不显著, 表明降雨量对树干茎流无机阴离子影响也不大; 从变化情况来看, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 变异系数均在 2 月份最大, F^- 变化差异性最小, 虽然 1 月份各阴离子含量均达到最大值, 但它们的变异系数普遍都较小, 说明樟树

树干在 1 月对阴离子的吸附能力最强, 4 月时降到最低; 另外, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 变异系数均值分别为 0.43、0.40, 对比林外降水、穿透水几乎没有变化。树干茎流平均 pH 值为 4.61, 有被酸化, 这可能与樟树皮有关系, 而 Nakanishi 等对日本的雪松研究发现, 茎流雨中 pH 值的降低主要是由于生物体内分泌有机酸造成的^[16]。

表 3 树干茎流无机阴离子含量

Table 3 Content of inorganic anions in stem-flow

日期 Date	F^- / ($\mu\text{eq/L}$)	Cl^- / ($\mu\text{eq/L}$)	NO_2^- / ($\mu\text{eq/L}$)	SO_4^{2-} / ($\mu\text{eq/L}$)	NO_3^- / ($\mu\text{eq/L}$)	pH
2012-11	15.79(0.26)	73.66(0.22)	9.30(0.17)	469.85(0.58)	207.18(0.55)	5.32
2012-12	10.42(0.31)	65.63(0.45)	4.87(0.62)	579.43(0.59)	268.65(0.57)	4.98
2013-01	26.26(0.23)	193.04(0.19)	38.91(0.35)	1141.51(0.23)	439.31(0.16)	4.15
2013-02	20.89(0.15)	72.06(0.63)	3.61(0.12)	752.79(0.70)	299.55(0.62)	4.35
2013-03	19.21(0.21)	26.37(0.30)	4.11(-)	269.91(0.20)	158.00(0.24)	4.27
2013-04	12.26(0.27)	15.69(0.18)	1.24(0.35)	234.02(0.26)	111.92(0.25)	4.58
平均 Average	17.47(0.24)	74.41(0.33)	10.34(0.32)	574.59(0.43)	247.44(0.40)	4.61

2.4 地表径流中无机阴离子含量

由表 4 可知, 地表径流中 NO_3^- 含量最高, 平均 330.40 $\mu\text{eq/L}$, NO_2^- 含量最低, 平均为 11.88 $\mu\text{eq/L}$; 5 种阴离子含量排序 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{NO}_2^-$; NO_3^- 在 2 月份含量最高, 达到 840.77 $\mu\text{eq/L}$, 11 月最低, 其它 4 种离子均在 12 月份达到最大值, 又都在 4 月份降到最低值; 对 21 次地表径流水样进行相关性分析: NO_3^- 与其它离子之间相关性不显著, 而 SO_4^{2-} 、

Cl^- 、 F^- 、 NO_2^- 之间均表现为显著正相关 ($P < 0.01$); 地表径流中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 、 NO_2^- 受降雨量影响不大, 它们与降雨量相关性不显著; 对比穿透水, 地表径流中 F^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_2^- 含量都呈现下降趋势, 而 Cl^- 、 NO_3^- 含量则表现为增加, 变化差异最大的是 NO_2^- , 平均变异系数为 0.52; SO_4^{2-} 、 NO_3^- 平均变异系数分别为 0.46、0.47, 相对林外降水、穿透水、树干茎流差别不是很大; 地表径流平均 pH 值为 7.19, 接近中性。

表 4 地表径流无机阴离子含量

Table 4 Content of inorganic anions in surface runoff

日期 Date	F^- / ($\mu\text{eq/L}$)	Cl^- / ($\mu\text{eq/L}$)	NO_2^- / ($\mu\text{eq/L}$)	SO_4^{2-} / ($\mu\text{eq/L}$)	NO_3^- / ($\mu\text{eq/L}$)	pH
2012-11	17.95(0.45)	57.24(0.53)	4.33(0.49)	246.29(0.72)	23.4(0.68)	7.77
2012-12	31.21(0.60)	260.08(0.54)	24.22(0.75)	339.64(0.54)	68.00(0.36)	7.70
2013-01	19.11(0.42)	92.82(0.35)	9.02(0.33)	243.27(0.38)	380.61(0.55)	6.80
2013-02	20.47(0.24)	61.13(0.33)	14.57(0.66)	174.22(0.45)	840.77(0.34)	6.97
2013-03	16.95(0.16)	35.49(0.18)	14.13(0.32)	135.74(0.13)	586.85(0.24)	6.97
2013-04	8.37(0.26)	13.58(0.22)	5.00(0.56)	51.70(0.57)	82.77(0.58)	6.92
平均 Average	19.01(0.36)	86.72(0.36)	11.88(0.52)	198.48(0.47)	330.40(0.46)	7.19

2.5 降水中淋溶系数

淋溶系数的计算公式为:

$$M = \frac{Q - Q_0}{Q_0}$$

式中, M 代表水文指标中的目标离子(如穿透水中 NO_3^- ,地表径流中的 SO_4^{2-})淋溶系数; Q 代表水文指标中目标离子含量; Q_0 为林外降水中目标离子含量。下表列出的淋溶系数的确定,是按照各水文指标目标离子所有月份平均含量值确定的,能够反映各水文指标中目标离子总的淋溶情况。由表5可知,5种阴离子淋溶系数均大于1,说明这5种阴离

子在本次樟树林水文学过程中没有出现负淋溶现象,表明植物体本身并没有吸收这5种离子;总体来看, Cl^- 在水文学过程中变化最小,淋溶系数变化最稳定;穿透水淋溶系数最大为 NO_2^- ,16.06,最小为 NO_3^- ,2.61;树干茎流中淋溶系数最大的是 SO_4^{2-} ,7.52,最小是 F^- ,2.76;地表径流中淋溶系数最大的是 Cl^- ,5.00, NO_3^- 也达到4.74,最小的是 SO_4^{2-} ,2.60。

表5 降雨净淋溶离子含量和淋溶系数

Table 5 Net leaching ion content and leaching coefficient

项目 Project	F^-	Cl^-	NO_2^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
穿透水净淋溶量 Net leaching of through-fall water/($\mu\text{eq/L}$)	21.00	55.11	50.31	216.66	112.24
树干茎流淋溶量 Net leaching of stem-flow/($\mu\text{eq/L}$)	11.15	57.07	7.00	498.15	177.75
地表径流淋溶量 Net leaching of surface runoff/($\mu\text{eq/L}$)	12.69	69.38	8.54	122.04	260.71
穿透水淋溶系数 Leaching coefficient of through-fall water	4.32	4.18	16.06	3.83	2.61
树干茎流淋溶系数 Leaching coefficient of stem-flow	2.76	4.29	3.10	7.52	3.55
地表径流淋溶系数 Leaching coefficient of surface runoff	3.01	5.00	3.56	2.60	4.74

3 结论与讨论

3.1 不同城市大气降水中化学性质特征

通过对我国不同城市地区大气降水的特征研究发现,大部分地区降水中阴离子主要以 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 为主,普遍表现为 SO_4^{2-} 浓度大于 NO_3^- 浓度,而 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 是降水致酸的首要因子。 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 当量比值不仅可以反映酸雨的特征,还可以用来估算 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 对酸雨的相对贡献。研究区域大气降水中, $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 为1.1,低于临安(2.36)^[17]、深圳(1.72)^[18]、宁波天童(1.90)^[19]、北京(3.1)^[20]、重庆(8.1)^[21],高于美国东部纽约市(0.8)^[22]。国内是以煤炭为主要的能源消费模式,所以 SO_4^{2-} 浓度大,而美国则主要以石油为主,所以 NO_3^- 浓度大;虽然1.1的比值并不能代表年均值,但从一定程度上说明长沙地区酸雨为硫酸-硝酸复合型,并且相对于其他地区来说 NO_3^- 对酸雨的贡献要大很多,出现这种情况,与长沙市与日俱增的机动车数量是不无关系的,加之实验区临近城市道路主干道,校园内部车流量大,人为影响大。对于上述情况,从有关报道中可以看出端倪:蒋益民等^[23]对长沙市1992—2001年大气降水化学性质作出了研究,结果得出 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 平均含量分别为186.83、23.86、13.43、7.89 $\mu\text{eq/L}$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 为7.97,降水pH为4.05;对比1992—2001年的长沙,本次研究地大气降水 SO_4^{2-} 下

降68.83%, NO_3^- 上升112.03%; Cl^- 变化较小,下降6.55%,且 F^- 下降也比较明显,为35.87%, $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 更是下降86.20%,pH上升也非常明显,出现这种情况,一方面长沙并非全国典型重工业区,加之长沙市政府出台了关于控制大气污染物的政策措施,自2000年以来对 SO_2 的排放作出了严格控制,从而降低了 SO_4^{2-} 含量,另一方面,长沙市机动车数量与日俱增,加大了 NO_x 的排放,致使 NO_3^- 对降水的贡献比例越来越大,使得 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 当量比下降明显就不足为奇了;大气环境中主要污染物 SO_2 、 NO_2 分别是大气降雨中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的主要前身因子,也是引起酸雨的主要因素。表6是2012年11月—2013年4月长沙市大气环境中 SO_2 、 NO_2 含量数据,从表中易知,大气环境中 SO_2 、 NO_2 含量均在1月出现最高值,分别为0.051、0.068 mg/m^3 ,又均在2月降到最低值,分别为0.023、0.033 mg/m^3 ;值得注意的是长沙地属亚热带典型季风气候,采样期间气象条件以西北风为主,试验地恰好又处在长沙市中心南部,而4月份长沙主风向并不是西北风,这便正是4月份大气环境中虽然 SO_2 、 NO_2 含量相对不低,但大气降水中各无机阴离子含量显著降低的原因。此外,从大气降水阴离子含量排列顺序来看, NO_3^- 含量大于 Cl^- 含量,我国内陆城市一般都满足这个规律。但由于受海洋因素的影响,大多数沿海城市 Cl^- 含量要大于 NO_3^- 含量, Cl^- 含量对沿海地区酸雨的贡献也是很大的,如

长江三角洲地区^[17]、深圳市^[18]等。通过对比我国各大城市 Cl^- 含量发现,离海岸线越远的地区 Cl^- 含量越小,有研究表明长沙市大气降水 Cl^- 海洋来源只占

5.3%^[23],其它可能原因如气候条件、化工厂和工业的排放、农药喷洒、垃圾处理等。

表 6 长沙市大气环境中 SO_2 、 NO_2 含量

Table 6 The contents of SO_2 、 NO_2 in Changsha city atmosphere environment

指标 Target	2012-11	2012-12	2013-01	2013-02	2013-03	2013-04	平均 Average
$\text{SO}_2/(\text{mg}/\text{m}^3)$	0.033	0.035	0.051	0.023	0.037	0.035	0.036
$\text{NO}_2/(\text{mg}/\text{m}^3)$	0.055	0.052	0.068	0.033	0.050	0.053	0.052

* 数据来源于长沙市环保局

3.2 穿透水、树干茎流养分特征及其与大气降水的联系

樟树林穿透水、树干茎流阴离子中 SO_4^{2-} 含量均是最大的,这与原始红松林^[24]、马尾松林、木荷林^[25]、落叶松林^[26]等研究结果一致,说明 SO_4^{2-} 是阴离子在森林降雨中最主要的组成成分。樟树林穿透雨和树干茎流中 NO_3^- 平均含量是要大于 Cl^- 的,这与以马尾松为主的铁山坪森林^[27]情况相似,而大兴安岭的落叶松林^[26]、贵州雷公山森林^[27]中 NO_3^- 平均含量是要小于 Cl^- 的。樟树林穿透雨中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 当量比值为 1.6,树干茎流中的当量比值为 2.3,这与马尾松林^[25]中穿透雨的 14.1、树干茎流的 15.3,木荷林^[25]中穿透雨的 11.8,树干茎流的 10.8 是相差比较大的,这可能与不同林分树叶、树皮、树枝等有关

系,也能从侧面反映樟树林对 NO_3^- 具有比较强的吸附能力,说明把樟树作为长沙市市树是有很大联系的。樟树林穿透雨对比林外降雨 pH 有明显提升,马尾松林穿透雨 pH 变化则有所下降或者变化不大^[27],这是因为针叶冠层主要反应为干沉降,而干沉降是酸性物质的重要来源,加之针叶植物分泌的酸性物质随雨水冲刷,从而增强了穿透水酸度。

从表 7 可以看出,大气降水对穿透水的影响大于对树干茎流的影响,大气降水 NO_2^- 与穿透水 NO_2^- 相关性不显著外,其它情况均呈极显著性相关,表明穿透水中阴离子含量受大气降水中阴离子含量影响很大,而树干茎流中除 NO_3^- 与大气降水 NO_3^- 相关性显著以外,其它情况相关性均不显著。

表 7 大气降水阴离子与穿透水、树干茎流同种阴离子相关关系

Table 7 Atmospheric precipitation anion and throughfall, stemflow anion correlation

项目 Project	无机阴离子 Anion				
	F^-	Cl^-	NO_2^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
穿透水与大气降水同种阴离子 The same anion between through-fall and rain fall	0.789 **	0.764 **	-0.209	0.695 **	0.917 **
树干茎流与大气降水同种阴离子 The same anion between stem-flow and rain fall	-0.153	0.392	-0.347	0.401	0.568 *

** 在 0.01 水平上显著相关; * 在 0.05 水平上显著相关

3.3 地表径流养分特征及其与穿透水、树干茎流的联系

研究地是以樟树为主的混交林,主要植物为常绿树种。樟树林地表径流 pH 值范围在 6.80—7.77 范围内变动,平均值为 7.19,接近中性,这是因为土壤中含钙和镁的碳酸盐,容易与 H^+ 发生反应,从而起到中和酸雨的作用;也可能与枯枝落叶层以及土壤的酸碱度有关系。樟树林地表径流以 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 为主要阴离子,这些与刘鸿雁^[28]、郭艳娜^[29]对缙云山常绿阔叶林地表径流研究结果一致。樟树林地

表径流中 NO_3^- 含量占到整个阴离子总量的 51.1%,大于 SO_4^{2-} 的含量值,而刘鸿雁^[28]、邱清燕^[30]对常绿阔叶林地表径流的研究显示, SO_4^{2-} 含量要大于 NO_3^- ,出现这种差异可能与地理位置、气候条件、植被种类等有很大关系。樟树林地表径流中 NO_3^- 浓度达到 330.40 $\mu\text{eq}/\text{L}$,不难发现樟树林地表径流中 NO_3^- 是易于流失的;有关裸露地、针阔混交林和常绿阔叶林,郭艳娜的研究发现,地表径流中 NO_3^- 浓度按大小排列顺序为裸露地>常绿阔叶林>针阔混交林,说明

常绿阔叶林比针阔混交林地表径流中的 NO_3^- 更容易流失;同时樟树林地表径流中 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 浓度都是比较高的,而郭艳娜研究中 NO_2^- 的浓度变化为常绿阔叶林>针阔混交林>裸露地, SO_4^{2-} 的浓度变化为常绿阔叶林>针阔混交林>裸露地,说明常绿阔叶林地表径流中 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 也都是很容易流失的。

此外,由表 8 看出,通过对樟树林穿透水与地表径流分析发现:穿透水的 pH 对地表径流中 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度有影响,其中穿透水 pH 在 4.75—6.31 范围内变化,地表径流 NO_3^- 浓度与穿透水 PH 呈现极显著性负相关($r=-0.638, N=24$),而 SO_4^{2-} 浓度与穿透水 pH 呈现显著性正相关($r=0.382, N=24$),这与丘清燕^[30]鼎湖山季风常绿阔叶林在酸沉降模拟条件下对地表径流化学性质影响结果一致,表明 NO_3^- 有助于促进地表水的酸化,而 SO_4^{2-} 有利于缓解地表水的酸化;穿透水 pH 也与 NO_2^- 呈极显著性负相关($r=-0.619, N=24$)。

从表 8 中还可以看到,穿透水、树干茎流中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 均与地表径流中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 呈极显著性正相关,

相关系数分别达到 0.609、0.625、0.644、0.771,这是因为树冠层、树干树皮中的含 Cl^- 、 SO_4^{2-} 沉降物质被雨水淋洗下来,也可能是大气降水与冠层发生相互作用,洗脱叶片内含 Cl^- 、 SO_4^{2-} 物质。表明地表径流中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度受穿透水、树干茎流的影响较大,而地表径流中 F^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 浓度则与穿透水、树干茎流相关性不显著,且 NO_2^- 、 NO_3^- 相关系数均为负,说明地表径流中 F^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 浓度受穿透水、树干茎流的影响不大,这可能是因为地表径流中的 F^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 主要来自于枯枝落叶层的分解、土壤表层的堆积或土壤岩石的风化等。

总之,在樟树林这个森林系统中,穿透水、树干茎流、地表径流中的无机阴离子都与外部环境有很大的联系,大气中的污染物质以水溶离子的形态进入樟树林内部被吸附,进而在森林内部迁移、转化。所以,樟树林对大气环境具有调节作用,能够减少大气环境中的酸性污染物质,进而起到净化大气、缓解酸雨的重大功效。

表 8 地表径流阴离子与穿透水、树干茎流同种阴离子、穿透水 pH 的相关关系

Table 8 Correlation between surface runoff anion and throughfall, stemflow anion, throughfall pH

项目 Project	无机阴离子 Anion				
	F^-	Cl^-	NO_2^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
穿透水 pH 与地表径流阴离子 Throughfall PH and surface runoff anion	0.085	-0.08	-0.619**	0.382*	-0.638**
穿透水与地表径流同种阴离子 The same anion between throughfall and surface runoff	0.421	0.609**	-0.064	0.625**	-0.135
树干茎流与地表径流同种阴离子 The same anion between stemflow and surface runoff	-0.028	0.644**	-0.021	0.771**	-0.171

** 在 0.01 水平上显著相关; * 在 0.05 水平上显著相关

References:

- [1] Menz F C, Seip H M. Acid rain in Europe and the United States: an update. *Environmental Science and Policy*, 2004, 7(4): 253-265.
- [2] Larssen T, Lydersen E, Tang D. Acid rain in China. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40: 418-425.
- [3] Zhang X M, Chai F H, Wang S L, Sun X Z, Han M. Research progress of acid precipitation in China. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(5):527-532.
- [4] Tomlinson G H. Acidic deposition, nutrient leaching and forest growth. *Biogeochemistry*, 2003, 65(1): 51-81.
- [5] Feng Z W. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China. *Engineering Science*, 2000, 2(9): 5-11, 28-28.
- [6] Tang J, Xu X B, Ba J, Wang S F. Trends of the precipitation acidity over China during 1992-2006. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(17): 1800-1807.
- [7] Liu P, Xia F, Pan J Y, Chen Y P, Peng H M, Chen S H. Discuss on present situation and countermeasures for acid rain prevention and control in China. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(12): 30-35, 84-84.
- [8] Chen S, Sun L N, Chao L, Sun T H. Effects of inorganic anions on the desorption character of cadmium, lead. *Ecology and Environment*, 2008, 17(1): 105-108.
- [9] Zhao Y N, Wang Y S, Wen T X, Dai G H. Observation and analysis of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} from mount Changbai. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(4): 812-815.

- [10] Zhou G Y, Tian D L, Qiu Z J, Deng X W, Wang X, Liu M. Crown effects on ion concentration in throughfall of a coniferous-broadleaved stand under acid deposition at Liuxihe, Gangzhou. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2009, 29(5): 32-38.
- [11] Wu Q, Yan W D, Tian D L, Liang X C, Wang G J. Hydrochemical characteristics of through-fall in different layers of *Cunninghamia lanceolata* plantations. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2011, 31(1): 59-64.
- [12] Ho K F, Lee S C, Chan C K, Yu J C, Chow J C, Yao X H. Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(1): 31-39.
- [13] Suzuki I, Hayashi K, Igarashi Y, Takahashi H, Sawa Y, Ogura N, Akagi T, Dokiya Y. Seasonal variation of water-soluble ion species in the atmospheric aerosols at the summit of Mt. Fuji. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(34): 8027-8035.
- [14] Huang L Y, Yan W D, Tian D L. Chemical properties of the precipitation in the urban forest of *Pinus ellotii* species in Changsha city. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2007, 27(2): 22-26.
- [15] Pan Y J. Studies of Accumulations and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Camphora Forest Plantations in Central Subtropical Region of China [D]. Changsha: Central South Forestry University, 2005: 14-16.
- [16] Andersson T. Influence of stemflow and throughfall from common oak (*Quercus robur*) on soil chemistry and vegetation patterns. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21(6): 917-924.
- [17] Niu Y W, Gu J Q, Yu X M, Jiang H R, Dai X. The chemical feature of precipitation in the Yangtze river delta background region. *Environmental Chemistry*, 2010, 29(3): 358-362.
- [18] Niu Y W, He L Y, Hu M. Chemical characteristics of atmospheric precipitation in Shenzhen. *Environmental Science*, 2008, 29(4): 1014-1019.
- [19] Ding H M, Yao F F, Chen J J, Wang X H, Yang S Y. Chemical characteristics of acidic precipitation in Tiantong, Zhejiang province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 32(9): 2245-2252.
- [20] Hu M, Zhang J, Wu Z J. Characteristics of precipitation chemistry and the removal effect of precipitation on the atmospheric particles in Beijing city. *Chinese Science (Series B: Chemistry)*, 2005, 35(2): 169-176.
- [21] Zhou Z Y, Chen D R, Yin J, Zhang W L. Analysis of chemical characteristics of precipitation in Chongqing city. *Chongqing Environmental Science*, 2003, 25(11): 112-114.
- [22] Ito M, Mitchell M J, Driscoll C T. Spatial patterns of precipitation quantity and chemistry and air temperature in the Adirondack region of New York. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(6): 1051-1062.
- [23] Jiang Y M, Zeng G M, Zhang G, Liu H L. Atmospheric acid deposition chemistry and the variation characteristics in Changsha city. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2003, 16(S1): 23-25.
- [24] Lang Y, Cai T J, Chai R S, Yang S. Effects of different types of original *Pinus Korainensis* forest on precipitation hydro-chemical characteristics. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 184-191.
- [25] Zhang W M, Wang X X. Reallocation and chemical characteristics of rainfall in *Pinus massoniana* and *Schima superb* forests in subtropical China. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2011, 31(9): 80-86.
- [26] Su R N. Study on Rainfall Hydrochemical Characteristics of *Larix gmelinii* Forest in Great Xingan Mountains of Inner Mongolia [D]. Hohhot: Mongolia Agricultural University, 2009: 10-14.
- [27] Xiang R J, Chai L Y, Zhang Q M, Xiao J S, Zhao D W. Ions distributional characteristics of wet precipitation in typical acid rain areas of China. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(1): 38-45.
- [28] Liu H Y, Huang J G, Guo Y N. Impacts of different vegetation types and soil properties on runoff chemical characteristics. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27(4): 655-660.
- [29] Guo Y N. Study on Water Quality of Surface Runoff and Underground Flow in Forest Ecosystems at Jinyun Mountain [D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2005: 16-22.
- [30] Qiu Q Y, Chen X M, Liang G H, Zhou G Y, Zhang D Q. Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4021-4030.

参考文献:

- [3] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 孙新章, 韩梅. 中国酸雨研究现状. *环境科学研究*, 2010, 23(5): 527-532.
- [5] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策. *中国工程科学*, 2000, 2(9): 5-11, 28-28.
- [6] 汤洁, 徐晓斌, 巴金, 王淑凤. 1992—2006年中国降水酸度的变化趋势. *科学通报*, 2010, 55(8): 705-712.
- [7] 刘萍, 夏菲, 潘家永, 陈益平, 彭花明, 陈少华. 中国酸雨概况及防治对策探讨. *环境科学与管理*, 2011, 36(12): 30-35, 84-84.
- [8] 陈苏, 孙丽娜, 晁雷, 孙铁珩. 无机阴离子对镉、铅解吸特性的影响. *生态环境*, 2008, 17(1): 105-108.
- [9] 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华. 长白山 PM_{2.5} 中水溶性无机离子观测研究. *环境化学*, 2011, 30(4): 812-815.
- [10] 周光益, 田大伦, 邱治军, 邓湘雯, 王旭, 刘敏. 广州流溪河针阔混交林冠层对穿透水离子浓度的影响. *中南林业科技大学学报*, 2009, 29(5): 32-38.
- [11] 伍倩, 闫文德, 田大伦, 梁小翠, 王光军. 杉木人工林不同层次植被穿透水的水化学特征. *中南林业科技大学学报*, 2011,

- 31(1): 59-64.
- [14] 黄乐艳, 闫文德, 田大伦. 长沙市城市森林中湿地松的降水化学性质. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(2): 22-26.
- [15] 潘勇军. 樟树人工林生态系统多环芳烃(PAHs)积累与分布特征研究[D]. 长沙: 中南林学院, 2005: 14-16.
- [17] 牛彧文, 顾骏强, 俞向明, 蒋和荣, 代鑫. 长三角区域背景地区降水化学特征. 环境化学, 2010, 29(3): 358-362.
- [18] 牛彧文, 何凌燕, 胡敏. 深圳大气降水的化学组成特征. 环境科学, 2008, 29(4): 1014-1019.
- [19] 丁慧明, 姚芳芳, 陈静静, 王希华, 杨颂宇. 浙江宁波天童地区酸性降水化学特征研究. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2245-2252.
- [20] 胡敏, 张静, 吴志军. 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用. 中国科学(B 辑 化学), 2005, 35(2): 169-176.
- [21] 周竹渝, 陈德容, 殷捷, 张晚凉. 重庆市降水化学特征分析. 重庆环境科学, 2003, 25(11): 112-114.
- [23] 蒋益民, 曾光明, 张龚, 刘鸿亮. 长沙市大气湿沉降化学及变化特征. 城市环境与城市生态, 2003, 16(S1): 23-25.
- [24] 郎燕, 蔡体久, 柴汝杉, 杨肃. 不同类型原始红松林对降雨水化学特征的影响. 水土保持学报, 2012, 26(2): 184-191.
- [25] 张文猛, 王兴祥. 亚热带马尾松和木荷人工林降雨再分配及其化学特征. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(9): 80-86.
- [26] 苏日娜. 内蒙古大兴安岭兴安落叶松林降水化学特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009: 10-14.
- [27] 向仁军, 柴立元, 张青梅, 肖劲松, 赵大为. 中国典型酸雨区大气湿沉降化学特性. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(1): 38-45.
- [28] 刘鸿雁, 黄建国, 郭艳娜. 不同植被类型及土壤对径流水化学特征的影响. 环境科学, 2006, 27(4): 655-660.
- [29] 郭艳娜. 缙云山森林生态系统中地表和地下径流水质的研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005: 16-22.
- [30] 丘清燕, 陈小梅, 梁国华, 周国逸, 张德强. 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地地表径流水化学特征的影响. 生态学报, 2013, 33(13): 4021-4030.