

重庆酸雨区缙云山典型林分冠层酸雨淋洗特征

唐晓芬, 王云琦*, 王玉杰, 张会兰, 郭平, 胡波

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:选取重庆缙云山的针阔混交林、常绿阔叶林、毛竹林、灌木林4种典型林分,观测酸性降水过程中林外雨、穿透雨及干流等林内水分转换分量中的主要离子含量变化,分析林分冠层对雨水化学组成的影响,结果表明:(1)降雨中的离子当量浓度大小依次是 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^-$; (2)降雨经过林冠层后pH值降低,干流的酸化程度增加最大; (3)降雨经林冠层后离子浓度明显增加(除灌木林),穿透雨中通量增加最大的阴离子和阳离子分别为 SO_4^{2-} ($2.19 \times 10^3 \sim 6.47 \times 10^3 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$)和 Ca^{2+} ($1.41 \times 10^3 \sim 3.39 \times 10^3 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$),离子来源主要为大气沉降和植物分泌物或淋出; (4)同一离子在不同林分的干流和穿透雨中的通量变化不同,反映出不同林分冠层的离子交换性差异。在针阔混交林中,林下降雨净淋溶量大小顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$;常绿阔叶林为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$;毛竹林为 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$;灌木林为 $\text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-}$ 。

关键字:酸雨淋溶;穿透雨;树干茎流;养分含量;缙云山

中图分类号:S715

文献标识码:A

Canopy Leaching Characteristics of Typical Forests during Acid Rain at Jinyun Mountains, Chongqing

TANG Xiao-fen, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, ZHANG Hui-lan, GUO Ping, HU Bo

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on continuous monitoring of precipitation and throughfall in the canopy layer of four typical forests, i. e. mixed coniferous forest, evergreen broad-leaved forest, bamboo forest and shrubbery, at Jinyun mountains in Chongqing Municipality, the change of major ion content in precipitation, throughfall and stemflow was detected, and the characteristics of redistribution and leaching effects of the canopy layer on acid rain were analyzed. The results are as follows. (1) The equivalent concentration of major ions were in the ordered of $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^-$. (2) The pH value decreased after rainfall passed through the forest canopy, and the stemflow was more acidic compared to throughfall. (3) The maximum concentration of anion and cation are SO_4^{2-} ($2.19 \times 10^3 \sim 6.47 \times 10^3 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$) and Ca^{2+} ($1.41 \times 10^3 \sim 3.39 \times 10^3 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$) in throughfall. The atmospheric precipitation and plant secretion were the primary ion resources within the study area. (4) The concentration variation of one certain ion varied in different stands, demonstrating the divergence property of canopy exchange within different tree species stands. The crown leaching array of major ions from high to low in mixed coniferous forest is $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$, that in evergreen broad-leaved forest is $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$, in bamboo forest is $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+$

收稿日期:2012-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(31100515);高等学校博士学科点专项科研基金(20110014120001)资助

作者简介:唐晓芬(1988—),女,硕士,主要从事森林生态系统和酸雨影响研究,E-mail:tangxiaofen1988@126.com.

* 通讯作者:E-mail:wangyunqi@bjfu.edu.cn.

$> \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$, and in shrubbery is $\text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-}$.

Key words: acid rain leaching; throughfall; stemflow; nutrient content; Jinyun mountains

降雨输入的养分是森林生态系统养分的主要来源之一,对森林生长十分重要。大气降雨经森林冠层后形成的穿透雨及干流是林内水循环的重要组成部分^[1-3],其含有养分元素有些可被植物直接吸收利用,对森林土壤层养分输入具有重要意义^[4]。近些年来,酸沉降对森林健康的影响受到广泛关注^[5-7]。酸性降水改变了森林养分循环,加速了植物叶片和森林土壤的养分淋溶,改变了土壤矿化速率。但不同地区及森林类型的养分循环模式及受酸雨的影响是有所不同的^[8-9]。

缙云山地处重庆市,属我国最早的酸雨区,该地森林长期受到酸雨危害。该地的相关研究主要集中在土壤酸缓冲及模拟酸雨实验方面,针对降水过程中林冠层酸雨淋溶的研究较少^[10-11]。本文选取重庆缙云山的4种代表性林分:针阔混交林、常绿阔叶林、毛竹林、灌木林,测定降水元素输入及其林内转化中的浓度变化,探讨元素或离子经林冠作用前后的变化及不同林分的差别,以为该地酸沉降的森林生态系统影响评估奠定基础。

1 研究地概况

缙云山自然保护区位于重庆北碚区的嘉陵江小三峡之温塘峡西岸,地理位置 $106^{\circ}21'E$ 、 $29^{\circ}45'N$,海拔 $351 \sim 951.5 \text{ m}$ 。该地属亚热带季风湿润性气候,年均气温 $13.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年均日照 $1\,293.9 \text{ h}$,年均相对湿度 87% ,年均降水量 $1\,611.8 \text{ mm}$,年均蒸发量 777.1 mm 。土壤为三叠纪须家河组厚层石英砂岩、灰质页岩和泥质页岩风化而成的酸性黄壤。实验林总面积约 33.5 hm^2 ,主要树种为四川大头茶 (*Gordonia acuminata* Chang)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、四川山矾 (*Symplocos setchuensis* Brand)、四川杨桐 (*Adinandra bockiana* Pritz.)、广东山胡椒 (*Lindera kwangtungensis* (Liou) Allen)、毛竹 (*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)、细齿叶柃 (*Eurya nitida* Korthals)、白毛新木姜子 (*Neolitsea aurata* (Hay.) Koidz.) 等。本地所在的重庆市为我国最早的酸雨区,受特殊地形及燃煤硫含量较高 ($2\% \sim 5\%$) 等影响,酸雨强度大、频率高,降水 pH 值可达 4.0 左右。由于长期受酸雨影响,土壤酸化

和森林受害严重^[12]。

2 降水样品采集及分析方法

在4组实验样地附近的空旷地放置自记雨量计,收集大气降雨。在每个样地(面积为 $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$)内随机布置4个1L的塑料瓶,收集林内穿透雨。为防止树木枝叶和昆虫的干扰,每个收集器上覆盖孔径 3 mm 的塑料筛网,并塞上漏斗(直径 10 cm)。在每个样地按林分径阶分别选择4~5株标准木,将直径 1.5 cm 聚乙烯塑料管沿中缝剪开一段,用大头针把塑料管开口处固定在树干上,然后螺旋缠绕至树干基部,下端用塑料瓶收集树干茎流。

选取典型降雨事件,收集大气降雨、冠层穿透雨和干流的样品 500 mL ,并用剩余雨水清洗收集器,避免人为干扰。样本收集后2小时内用 PHS-3C 型 pH 计测量 pH 值。雨水样品在 $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保存,之后进行离子浓度的实验室测定。样品经 $0.45 \text{ }\mu\text{m}$ 的微孔滤膜过滤后,用原子吸收光谱仪测定金属阳离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 的浓度,用离子色谱仪测定主要阴离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^-) 的浓度,用比色分光光度法测定 NH_4^+ 的浓度。

选取 2011 年 6 月—2012 年 5 月期间 19 次降雨,按照雨量加权平均方法,计算 pH 值(先转化为 H^+ 浓度加权平均,再求 pH 值)及各离子的当量浓度 ($\text{ueq} \cdot \text{L}^{-1}$)。根据公式 $F = \frac{C_i \cdot V_i}{100}$ 计算降水离子通量,式中 F 为离子通量 ($\text{eq} \cdot \text{hm}^{-2}$), C_i 为离子当量浓度 ($\text{ueq} \cdot \text{L}^{-1}$), V_i 为降雨量 (mm), i 为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 。离子的淋溶量可由公式 $\text{NTF} = (\text{TF} + \text{SF}) - \text{RF}$ 得到,其中 NTF 表示离子的淋溶量 ($\text{eq} \cdot \text{hm}^{-2}$), TF 表示穿透雨中离子通量, SF 表示干流中离子通量, RF 表示在林外雨中离子通量^[13]。分析比较林冠淋洗作用下离子变化情况。

3 结果与分析

降雨穿过林冠层时,一部分被截持蒸发或被叶片吸收,一部分形成穿透雨,还有一部分形成干流,并同步发生雨水化学性质的变化,其中枝叶和树皮的元素淋溶或淋洗是很重要过程,这些水溶性养分

多可被植物吸收利用,对植物生长很重要^[14-15]。

3.1 林冠层对雨水化学组成的影响

由表1可以看出,该地区的大气降水 pH 值在 5.6 以下,属酸雨; SO_4^{2-} 含量远大于 NO_3^- 的含量,故属硫酸型酸雨。大气降水中, SO_4^{2-} 的含量最大占阴离子总量的 90.70%; Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 为降水阳离子的主要成分,分别占阳离子总量的 39.2%,

28.6%,12%;而 Na^+ 、 K^+ 含量较低。各离子的当量浓度大小依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^-$ 。穿透降雨的化学组成发生很大变化。相对于林外降雨,4 类林分样地的穿透雨中多数离子浓度均不同程度地增加。干流的离子浓度一般都高于穿透雨,这是由于干流经过了冠层淋溶的积累和树皮的淋洗。

表1 各林分内雨水转化中化学组成变化

林分	项目	pH 值	离子/($\mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$)						
			SO_4^{2-}	NO_3^-	K^+	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	NH_4^+
	大气降水	4.87	251.58	25.81	33.02	122.45	30.14	37.51	89.58
针阔混交林	穿透雨	4.12	826.36	127.37	127.60	433.50	45.38	66.10	179.17
	干流	3.32	1 635.81	116.88	204.99	322.83	38.71	77.37	180.48
常绿阔叶林	穿透雨	4.22	591.12	84.74	93.99	269.33	30.66	63.89	152.40
	干流	3.54	1 008.10	99.87	198.93	287.49	42.56	73.09	166.81
毛竹林	穿透雨	4.69	427.05	53.82	118.52	275.34	29.64	36.10	108.54
	干流	4.09	343.25	62.99	111.01	170.39	42.48	34.76	44.87
灌木林	穿透雨	4.48	319.67	53.52	52.27	206.40	29.28	26.78	85.12

3.2 林冠层对雨水 pH 值的作用

经过林冠层后的雨水 pH 值均降低,但是其变化程度对于不同森林是不同的(图1)。其中针阔混交林降幅最大,达 0.75 个 pH 值单位,这可能是由于针叶树的冠层比表面积较大,承接和吸附的干沉降较多,同时还可能会分泌酸性物质。常绿阔叶林的 pH 值降低了约 0.65 个单位,灌木林降低了 0.39 个单位,毛竹林降低幅度最小,为 0.18 个单位。

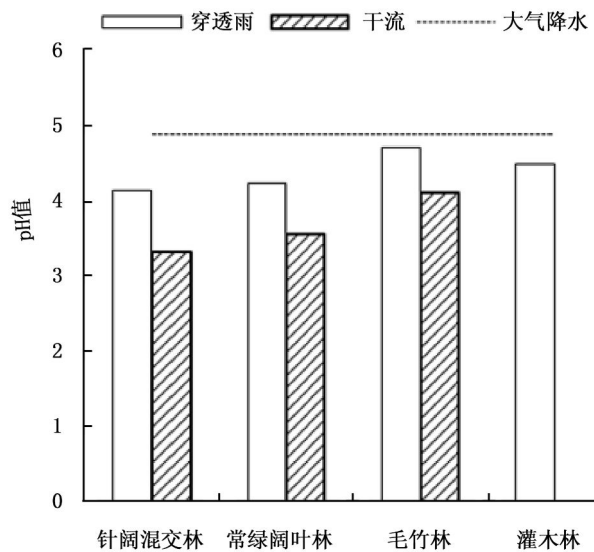


图1 穿透雨及干流的 pH 值变化

不同林分干流的 pH 值与林外降雨相比都降低了,而且比穿透雨的降幅更大,其中针阔混交林、常绿阔叶林和毛竹林分别降低了 1.55、1.33 和 0.78 个 pH 值单位,可能是由于树皮吸附了较多酸沉降物质或能淋出较多酸性物质。

3.3 不同林分林冠对雨水输入离子通量的影响

3.3.1 对不同林分穿透雨的影响 图2给出了不同林分穿透雨和干流离子浓度相对于大气降水的变化系数,在针阔混交林、常绿阔叶林中 NO_3^- 的浓度增幅最大,分别增加了 4.93、3.28 倍,而在毛竹林中 K^+ 最大为 3.59 倍, Na^+ 变化最小。相比其他林分,在针阔混交林中各离子浓度增加最大,灌木林中最小。灌木林穿透雨离子浓度增加小于其他林分,可能是由于灌木林林冠层距接收穿透雨的容器的距离较近,在穿透雨降落到地面的过程中,水分的蒸发要较小造成的。在灌木林中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 浓度都降低了,分别为大气降水的 97%、71%、95%。说明灌木林对这些离子有较强的吸收作用。在穿透雨阳离子中, K^+ 、 Ca^{2+} 的浓度显著增加,分别增加了 1.58~3.86 倍和 1.69~3.54 倍,说明若森林长期处在酸雨环境下,这些离子的流失量会愈来愈大,造成森林营养亏损,影响森林健康^[6,16]。

与林外降雨携带的离子输入量相比,雨水经穿透雨、干流后的离子浓度增加,即形成了离子的淋

溶,各个林分样地的不同离子淋溶量见表 2。不同林分的穿透雨中 SO_4^{2-} 通量均最大,增加了 $0.91 \times 10^3 \sim 3.95 \times 10^3 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其次为 Ca^{2+} 为 $0.19 \times 10^3 \sim 2.17 \times 10^3 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这可能是由于降水经过林冠时冲刷了叶片上的干沉降或叶片淋溶的作用。在各林分中,针阔混交林的 SO_4^{2-} 的淋溶量明显高于其他林分,这有可能与针叶树的比表面积较大从而能吸附更多大气沉降有关。而 Mg^{2+} 、 Na^+ 在各个林分中的淋溶量很小,可能由于其主要来源于大气中的尘埃及有机物,供应量相对有限,或者树木的释放速度较慢,溶脱程度较低。

3.3.2 对不同林分干流的影响 干流能将元素输送到树木根部,尽管通量较小,但是在土壤养分平衡

方面具有重要意义。从图 2 中可以看出,除了 Na^+ 外,离子浓度变化系数表现为针阔混交林 > 常绿阔叶林 > 毛竹林。针阔混交林和常绿阔叶林树干茎流中离子浓度都明显增加。而在毛竹林中,与大气降水相比 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 的浓度分别降低了 17% 和 50%。从表 2 中可以看出,树干茎流中 SO_4^{2-} 的通量最大,其中毛竹林 ($43.84 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 针阔混交林 ($27.75 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 常绿阔叶林 ($19.11 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$)。可能是由于树干吸附的大气沉降较多造成的。 Ca^{2+} 的通量也比较大,毛竹林 ($21.76 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 针阔混交林 ($5.48 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 常绿阔叶林 ($5.45 \text{ eq} \cdot \text{hm}^{-2}$),其主要来源于树冠及树干营养物质的洗脱。

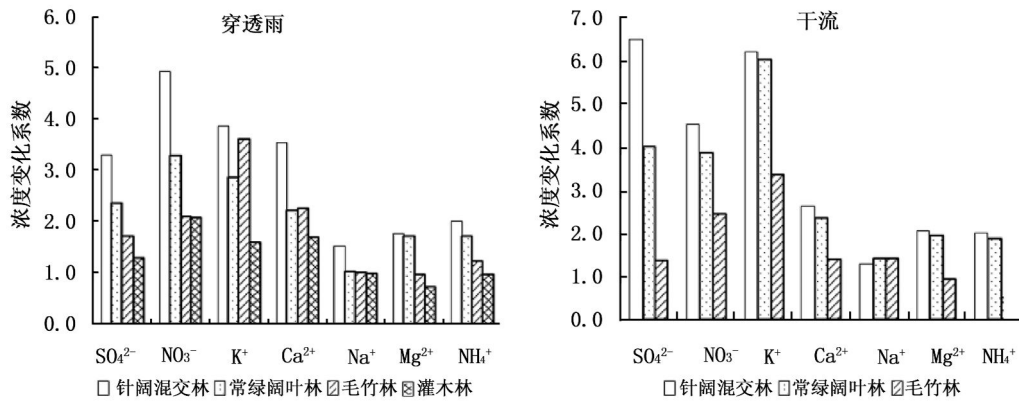


图 2 穿透雨及干流中离子浓度变化

表 2 不同林分穿透雨和干流中各离子通量及淋溶量

项目	离子/($\text{eq} \cdot \text{hm}^{-2}$)							
	SO_4^{2-}	NO_3^-	K^+	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	NH_4^+	
林外雨输入量	2 510.52	257.56	329.51	1 221.93	300.77	374.31	893.92	
针阔混交林	穿透雨	6 465.06	996.48	998.28	3 391.50	355.03	517.14	1 401.74
	干流	27.75	1.98	3.48	5.48	0.66	1.31	3.06
	淋溶量	3 982.29	740.91	672.25	2 175.05	54.92	144.14	510.89
常绿阔叶林	穿透雨	4 506.67	646.05	716.58	2 053.36	233.75	487.09	1161.89
	干流	19.11	1.89	3.77	5.45	0.81	1.39	3.16
	淋溶量	2 015.27	390.39	390.84	836.88	-66.21	114.17	271.13
毛竹林	穿透雨	3 422.01	431.27	949.72	2 206.34	237.51	289.27	869.75
	干流	43.84	8.05	14.18	21.76	5.43	4.44	5.73
	淋溶量	955.34	181.75	634.39	1 006.17	-57.83	-80.60	-18.44
灌木林	穿透雨	2 188.33	366.38	357.82	1 412.93	200.44	183.33	582.70
	淋溶量	-322.19	108.82	28.31	191.00	-100.33	-190.99	-311.22

3.3.3 不同林分的淋溶量 除了灌木林外,林下降雨(穿透雨和干流)中离子淋溶量均增加。灌木林中 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 的净淋溶量分别为

-322.19、-100.33、-190.99、-311.22 $\text{eq} \cdot \text{hm}^{-2}$,发生了负淋溶。各离子的淋溶量大小,针阔混交林中表现为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ >$

$\text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$; 常绿阔叶林中为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$; 毛竹林中表现为 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$; 灌木林中为 $\text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-}$ 。总的离子淋溶量在针阔混交林中最高,各林分的大小次序是针阔混交林 > 常绿阔叶林 > 毛竹林 > 灌木林。

林冠对降水化学元素作用的研究表明,降水经过冠层时对化学元素的淋溶呈增值效应。同时在穿透雨及树干茎流中,元素淋溶量的大小顺序因林分类型的不同而不同。这也反映出不同树种组成的林分的不同冠层淋溶规律^[17-19]。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 缙云山地区的降雨为酸性(pH 值 5.6), 穿过林冠后发生了一定的变化。针阔混交林的穿透雨 pH 值比大气降水降低了 0.75 个 pH 值单位, 而常绿阔叶林、毛竹林和灌木林分别降低了 0.65、0.18 和 0.39。各林分的干流 pH 值(3.32 ~ 4.09) < 穿透雨 pH 值(4.12 ~ 4.69) < 林外降雨 pH 值(4.87)。

(2) 缙云山地区大气降水中 SO_4^{2-} 的含量最高, 占阴离子含量的 90.69% 以上, 说明该地区的酸沉降主要以硫沉降为主。降雨穿过林冠后, 其化学特征发生了明显的变化, 离子浓度明显增加。干流相对于大气降水浓度也明显增大了。除毛竹林中干流中离子浓度要低于穿透雨浓度, 常绿阔叶林中离子浓度表现为干流 > 穿透雨 > 林外雨, 针阔混交林中除个别离子外, 与常绿阔叶林具有相同的变化规律。

(3) 在所有淋溶离子中 SO_4^{2-} 的淋溶量最大, 其次是 Ca^{2+} 、 K^+ 。微量元素 Na^{2+} 、 Mg^{2+} 等淋溶量较小, 甚至出现了负淋溶。这可能是由于林木对不同元素的吸收和吸附能力不同造成的。离子淋溶量大小在针阔混交林中表现为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$; 常绿阔叶林中为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$; 灌木林中为 $\text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-}$ 。

4.2 讨论

在本研究中, 缙云山降雨的 NO_3^- 含量远低于 SO_4^{2-} 含量, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值仅为 0.1。该地区内

SO_2 主要来源于当地燃煤释放, NO_x 则主要来自汽车尾气释放。由此推断, 燃煤对缙云山酸雨化学组成的影响更大。然而随着城市化进程加快和汽车工业发展, NO_x 在未来空气污染中的作用可能会继续增大, 危害森林健康。

针阔混交林穿透雨的 pH 值降低, 这与张西林, 蒋益民, 张娜^[15-16] 等的结论相反, 这可能与不同区域内的降水特征及植物种类差异有关。灌木林和毛竹林的穿透雨 pH 值也都降低了, 有加重酸化的趋势^[19-20]。不同雨水的酸度为: 树干茎流 > 穿透雨 > 大气降水, 这与干流中的降雨冲刷叶片吸附和树干本身分泌酸性物质的积累有关^[21], 干流中的离子浓度明显增加, 这与巩合德, 张娜等人的研究结果一致^[13, 21-22]。不同地区降水的元素浓度、植物种类差异可能导致元素淋溶量次序的不同, 比如在广州白云常绿阔叶林^[21] 中淋溶量表现为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^-$, 马尾松林中表现为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+$ 。

降水通过林冠层后, 大部分离子的浓度都呈增加趋势, 发生一定程度淋溶损失。不同林分类型中的变化幅度不同, 同一林分中不同元素的变化也有很大差别。目前的研究中, 森林植被不同层次与降水化学改变之间的关系并不明确。但可以看出, 森林植被各层次显著地影响了降水化学特征。研究中大多数以月或年为时间段进行观测, 时间短容易出现一些偶然结果, 只能得出一些推断性的结论, 因而还缺乏代表性。另外, 影响穿透雨及干流化学特性的因素很多, 短期研究结果会存在局限性。为能更好的探讨森林对降水化学特征的影响, 需要长期观测, 积累充足数据^[22, 24-27]。

参考文献:

- [1] Balestrini R, Arisci S, Brizzio M C, et al. Dry deposition of particles and canopy exchange: comparison of wet, bulk and throughfall deposition at five forest sites in Italy[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 745-756
- [2] Balestrini R, Tagliaferri A. Atmospheric deposition and canopy exchange processes in alpine forest ecosystems (northern Italy)[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 6421-6433
- [3] Cappellato R, Peters N E. Dry deposition and canopy leaching rates in deciduous and coniferous forests of the Georgia Piedmont: an assessment of a regression model[J]. J Hydrol, 1995, 169: 131-150
- [4] 宋文龙, 杨胜天, 温志群, 等. 贵州典型森林群落植被冠层的酸雨淋溶特征及缓冲作用[J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 15

-23

- [5] 李佳,李巍. 贵州地区酸雨作用下典型森林植被林冠淋溶规律研究[J]. 中国环境科学,2010,30(10):1297-1302
- [6] DeHayes D H, Schaberg P G, Hawley G J, et al. Acid rain impacts on calcium nutrition and forest health[J]. Bioscience, 1999, 49: 789-800
- [7] 邓仕坚,陈楚莹. 树冠及叶凋落物对模拟酸雨缓冲能力的初探[J]. 环境科学,1992,13(3):10-17
- [8] 张娜,乔玉娜. 鼎湖山季风常绿阔叶林大气降雨、穿透雨和树干流的养分特征[J]. 热带亚热带植物学报,2010,18(5):502-510
- [9] Haworth K, Mepherston G R. Effects of *Quercus emoryi* trees on precipitation distribution and microclimate in a semiarid savanna[J]. J Arid Environ, 1995,31:153-170
- [10] 李志勇,陈建军,王彦辉,等. 重庆酸雨区人工木荷林对土壤化学性质的影响[J]. 植物生态学报,2008,32(3):632-638
- [11] 李静,魏世强,杨学春,等. 酸雨对缙云山林地黄壤汞溶出的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(9):1681-1683
- [12] 李志勇,王彦辉,于澎涛,等. 重庆酸雨区马尾松香樟混交林的土壤化学性质和林木生长特征[J]. 植物生态学报,2010,34(4):387-395
- [13] 巩合德,王开运,杨万勤,等. 川西亚高山3种森林群落穿透雨和茎流养分特征研究[J]. 林业科学,2005,41(5):14-20
- [14] Teng-Chiu Lin, Steven P H. Base cation leaching from the canopy of a subtropical rainforest in northeastern Taiwan [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001,31:1156-1163
- [15] Dezzee N, Chacón N. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela[J]. Forest Ecology and Management, 2006,234: 218-226
- [16] 樊后保. 森林截留降水酸度及其对林下土坡的影响[J]. 福建林学院学报,1995,15(1):1-6
- [17] 张西林,蒋益民,张龚,等. 酸雨区亚热带针阔混交林的冠层淋溶特征[J]. 林业科学,2007,43(7):1-4
- [18] 蒋益民,曾光明,曾巩,等. 酸雨作用下的森林冠层盐基离子(K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})淋洗[J]. 热带亚热带植物学报,2004,12(5):425-430
- [19] Fang W, Ding M M. Hydrological dynamics and nutrient migration with precipitation of artificial *Acacia mangium* forest in low subtropical downland[J]. Acta Ecol Sin, 1995,15(suppl.):115-123
- [20] 刘菊秀,张德强,周国逸,等. 鼎湖山酸沉降背景下主要森林类型水化学特征初步研究[J]. 应用生态学报,2003,14(8):1223-1228
- [21] 张娜,刘兴诏,李坤,等. 南亚热带三种主要森林降雨及其再分配过程中的养分差异规律[J]. 生态学杂志,2011,30(2):193-200
- [22] 张伟,杨新兵,李军,等. 冀北山地华北落叶松林生态系统水化学特征[J]. 水土保持学报,2011,25(4):217-220
- [23] 周光益,徐义刚,吴仲民,等. 广州市酸雨对不同森林冠层淋溶规律的研究[J]. 林业科学研究,2000,13(6):598-607
- [24] 盛后财,蔡体久,朱道光,等. 人工落叶松林降雨截留再分配及其水化学特征[J]. 水土保持学报,2009,23(2):79-83,89
- [25] Langusch J J, Borken W, Armbruster M, et al. Canopy leaching of cations in Central European forest ecosystems—a regional assessment[J]. Z Pflanzenernähr Bodenk, 2003,166: 168-174
- [26] 刘菊秀,温达志,周国逸. 广东鹤山酸雨地区针叶林与阔叶林降水化学特征[J]. 中国环境科学,2000,20(3):198-202
- [27] Frederic A, Mathieu J, Quentin P. Effects of biological and meteorological factors on stemflow chemistry within a temperate mixed oak beech stand [J]. Sei Total Environ,2008,393(1):72-83