

森林对污染物湿沉降过滤作用的研究

陶豫萍, 吴 宁, 罗 鹏, 易绍良, 刘 兵, 张桥英, 廖银章

(中国科学院成都生物研究所, 四川 成都 610041)

摘要 :研究了四川乐山市沙湾区德胜钢铁公司附近的马尾松林、香樟林这两种森林生态系统的大气降水、穿透雨和树干径流以及土壤渗透水的污染物离子浓度并和裸地相对比,以期了解这 3 种生态系统对酸沉降的过滤作用。研究结果如下:①大气降水的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 和 F^- 浓度分别为 30.36 mg/L, 3.56 mg/L, 1.41 mg/L, 0.75 mg/L, 表明 SO_2 是该区的最主要酸性污染物质。②马尾松、香樟林群落的穿透雨和树干径流中污染物质含量显著高于大气降水,表明森林对大气污染物具有显著的截留作用。马尾松林的穿透雨和树干径流的污染物离子的总量高于香樟林,表明马尾松林对酸性污染物质的截留作用高于香樟林。③两种林型的土壤渗透水的污染物质含量比起树干径流有明显下降,这表明土壤对酸性污染物具有明显的截持和吸附作用。④对输入和输出不同生态系统的污染物各离子含量比较,并与裸地相对照发现,森林生态系统均对污染物起到了明显的拦截和积蓄作用。综上,森林生态系统对酸沉降具有明显的过滤作用。

关键词 :森林;大气污染物;湿沉降;过滤

中图分类号 S718.5 X51 文献标识码 A 文章编号 1004-693X(2006)03-0016-04

Study on the function of forest in filtering wet deposition of pollutants

TAO Yu-ping, WU Ning, LUO Peng, YI Shao-liang, LIU Bin, ZHANG Qiao-ying, LIAO Yin-zhang

(Chengdu Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract :This paper examines the ionic concentrations of pollutants in the precipitation, throughfall, stem flow and underflow of two forest ecosystems in Shawan of Sichuan in contrast to bare field. The results indicate that: (1) the concentrations of SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- and F^- were 30.36 mg/L, 3.56 mg/L, 1.41 mg/L, and 0.75 mg/L respectively, suggesting a higher contribution of SO_2 to acid deposition; (2) the ionic concentrations of the throughfall and stem flows of forest communities are significantly higher than those in the precipitation; (3) in both types of forests, the pollutant concentrations in the underflows are significantly lower than those in stem flows; (4) by comparing the input and output system of the ionic concentrations of pollutants, we found that the forests play a significant role in intercepting and accumulating wet deposition of air pollutants. These observations support the supposition that "forests are filters of acid deposition pollutants".

Key words :forest; atmospheric pollutant; wet deposition; filter

大气污染物以干沉降和湿沉降的形式进入各种生态系统,以大气降水形式(湿沉降)进入生态系统的污染物,不但会造成环境污染,还会对人类健康和生命造成严重威胁^[1]。 SO_2 、 NO_x 是湿沉降的主要污

染物,它们在生态系统中的循环转化是环境科学研究的热点问题之一。森林生态系统通过自身独特的功能以及系统各个部分的相互作用,对大气和水体中的各种污染物进行着过滤,使污染物的种类和数

基金项目:中国科学院重大资助项目(KSCX1-07),重要方向资助项目(KSCX2-01-09),国家“十五”攻关资助项目(2001BA606A-05)和四川省青年科技基金资助项目(03ZQ026-043)。

作者简介:陶豫萍(1979—),女,重庆人,硕士研究生,研究方向为生物生态学。E-mail: taoyup@cib.ac.cn

量逐渐减少,被认为是清洁水源的保障体系,是污染物的高效“活过滤器”^[2]。开展森林及水源净化关系的研究,对于正确评估森林过滤效应^[3],具有十分重要的意义。沙湾区是四川省乐山市的主要工业区之一,污染源较多。本文通过对该区牛顶山香樟林和马尾松森林生态系统的大气降水、穿透雨、树干径流和土壤渗透水中污染物变化特征的分析,了解和评估森林生态系统对污染物的过滤器机制,并为维持当地生态环境安全提供理论支持。

1 材料和研究方法

1.1 研究区域

乐山市沙湾区地处四川盆地西南边缘(103°32′~103°54′E,29°23′~29°39′N),为亚热带湿润季风气候区,年均温17.3℃。年平均降雨量1949 mm,按季节分配不均,6~8月份降水占全年降水的59%,降水最少的是冬季12~次年2月份,仅占全年降水的4%~5%。当地常年主导风向为北风,频率17.4%。多年平均风速为1.3 m/s,最大风速16.7 m/s,全年大风1.9 d。由于风速小,不利于大气污染物扩散。

该区大气污染源来自海天公司水泥厂、德胜钢铁公司、沐江煤矿、明珠纸业公司。这4家企业占评价区总污染负荷的80.3%。主要大气污染物为烟粉尘、SO₂、NO_x。据乐山气象台对沙湾区的污染气象观测发现,在德胜钢厂偏南处受大气污染的程度最大,因而是研究森林对大气污染湿沉降的过滤器作用的良好实验场所。因此,本项研究以沙湾区德胜钢厂偏南处的牛顶山(距离污染源不到1 km,海拔300~400 m)的裸地、马尾松和香樟林森林生态系统为研究对象,研究森林对污染物过滤器效应,以期能为通过营林技术缓解污染湿沉降的危害提供科学依据。

1.2 样地特征

沙湾区牛顶山主要植被类型是以樟树林和马尾松林为主的人工林,造林时间为20 a。

香樟林海拔420 m,坡度34°,坡向东偏北54°。该群落大致可以分为乔灌木3层,乔木层的郁闭度为0.45,以香樟(*Cinnamomum camphora*)占优势,还有一些零星的女贞(*Ligustrum lucidum*)。乔木层的平均树高为3.5 m,平均胸径为7.5 cm。第二层主要是一些灌木,如接骨木(*Sambucus williamsii*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)等,以及一些幼苗,如合欢(*Albizia julibrissin*)、漆树(*Anacardiaceae*)等。第三层主要是草本层,以荇草(*Arthraxon hispidus*(Thunb.))占优势,其他的如接骨草(*Sambucus chinensis*)和各种蕨类等也比较多。香樟林的土壤母质为残坡积碎屑岩黄色风

化物,土壤为黄壤,土层较深厚。

马尾松林下的土壤为黄壤,土层很深厚。海拔460 m,坡度为32°,坡向为东偏南42°。该群落也可以分为乔灌木3层,乔木层的郁闭度为0.45,乔木层主要以马尾松(*Pinus massoniana*)为主,乔木层的平均树高为3.2 m,平均胸径为4.5 cm;灌木层主要以悬钩子(*Rubus Linn.*)、野蔷薇(*Rosa multiflora*)为主;草本层还是以荇草(*Arthraxon hispidus*(Thunb.))占优势,主要的还有苋(*Amaranthus tricolor*)、野蒿(*Artemisia campestris*)、肾叶天胡荽(*Hydrocotyle wilfordii*)、毛桐(*Mallotus barbatus*)、石海椒(*Reinwardtia indica*)、牛膝(*Achyranthes bidentata*)、小果野葡萄(*Vitis balanseana*)等。

裸地的土壤为紫色土,海拔400 m,坡度38°,坡向为东偏南39°。

1.3 研究方法

本试验所有样点均按照《森林生态系统定位研究方法》中的有关标准和要求进行布置^[4]。森林大气降水、穿透水、树干径流均按照森林水文学过程研究方法的要求布置装置^[5];采用小集水区径流场法选择和建立径流场,并收集土壤渗透液^[5];根据环境污染分析方法的要求采集水样^[6];收集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,供分析。

每次降雨后,立即收集水样,并进行污染物含量的分析。水样在降水后立即用S-25型pH计测定pH值;水样中的F⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻、Cl⁻含量用离子色谱法(瑞士万通离子色谱761)测定。利用Excel和SPSS11.5统计软件对获取数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 大气降水的污染物质含量

由表1可见,大气降水中S的输入量最多,平均质量浓度达到30.36 mg/L,其次为NO₂,平均质量浓度为3.56 mg/L,P的输入最少,几乎为0,大气降水中污染物浓度的大小顺序为:SO₄²⁻ > NO₃⁻ > Cl⁻ > F⁻ > PO₄³⁻。表明SO₂是该区的最主要酸性污染物质,在大气降水中SO₄²⁻占污染物离子浓度的84%;其次为NO₂,NO₃⁻占大气降水污染物离子浓度的10%。沙湾检测点大气降水离子浓度百分比见图1(H⁺除外)。

2.2 林冠和树干对大气污染物降水的影响分析

从表2可以看出,NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻等离子被大量的从林冠层冲洗下来。林内穿透雨和树干径流的离子浓度发生了显著的变化,马尾松、香樟林林内穿透雨和树干径流的离子含量相对于大气降水均显著

表 1 雨样离子浓度的变化

样地	降雨	$\rho(\text{F}^-)(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{Cl}^-)(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{NO}_3^-)(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{PO}_4^{3-})(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{SO}_4^{2-})(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		pH 值	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
裸地	大气降水	0.75	0.81	1.41	0.28	3.56	4.17	0.00	0.00	30.36	17.08	6.14	2.53
	土壤渗透液	0.98	0.07	8.61	1.64	158.91	121.93	0.00	0.00	141.18	36.79	6.22	0.18
香樟林	穿透雨	1.43	0.32	4.80	1.96	5.30	4.67	0.77	0.62	84.11	20.12	6.46	0.07
	树干径流	2.53	1.05	8.22	4.15	45.65	14.62	1.48	1.95	189.80	95.74	6.33	0.18
	土壤渗透液	1.43	0.15	17.97	5.61	0.27	0.45	1.40	0.35	180.63	16.58	6.49	0.75
马尾松林	穿透雨	3.71	1.48	7.53	2.38	13.11	4.58	0.00	0.00	174.16	58.76	6.37	0.07
	树干径流	3.42	0.84	12.86	5.54	54.86	16.34	0.00	0.00	385.49	222.92	5.89	0.09
	土壤渗透液	2.20	1.61	9.61	2.20	33.68	21.19	0.67	0.61	293.8	97.56	6.06	0.10

注 2004 年 5~9 月份共 15 次取样所得的数据。

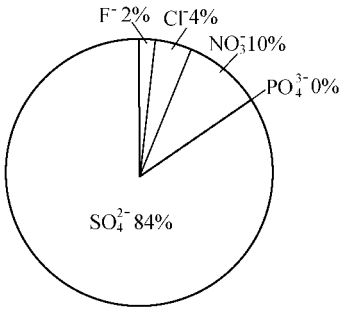


图 1 大气降水离子浓度百分比构成

增加(差异显著性水平 $P > 0.01$), SO_4^{2-} 、 NO_3^- 呈倍数增加,各离子浓度均表现出与大气降水一致的离子变化,离子浓度大小的排列顺序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$,可见两种林型的林冠均对污染物离子进行了有效的吸附。

树干径流对污染物的富集作用也是很大的。马尾松林、香樟林树干径流中 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 离子含量均显著高于穿透雨中离子含量,尤其是马尾松林树干径流中 SO_4^{2-} 离子的质量浓度,达到 385.49mg/L ,是大气降水的 10 倍多,是马尾松林穿透雨的 2 倍($P < 0.01$,差异极显著)。不管是香樟林和马尾松林,降水中磷对其的输入量是所有元素中最低的,但是在不同林型的穿透水和树干径流中,磷的输入量却有很大的差异($P < 0.01$,差异极显著),但在同一林型穿透水和树干径流的浓度变化并不显著($P > 0.05$)。

两种林冠和树干均对污染物湿沉降进行了缓冲。相对裸地的大气降雨,香樟林的树干径流和穿透雨分别上升了 0.19 和 0.32 个 pH 单位,说明香樟林的树冠和树干对污染物酸沉降有缓冲作用,中和了部分 H^+ ,但是林冠的缓冲作用更大,而马尾松林

林冠也对污染物进行了缓冲,穿透雨上升 0.23;但树干径流却下降了 0.25 酸化现象明显。

2.3 土壤对大气污染物降水的影响分析

两种林型的土壤均对污染物进行了拦截和吸附。这表现在马尾松林和香樟林的土壤渗滤液的污染物多数离子浓度比起大气降水都有明显的增加,马尾松林的土壤渗滤液 SO_4^{2-} 的浓度增加尤为明显($P = 0.001 < 0.01$,差异极显著)。而且香樟林和马尾松林土壤渗滤液都比起裸地的土壤渗透液的 SO_4^{2-} 高很多($P < 0.05$)。但两种林型土壤渗滤液污染物浓度比起树干径流相应的污染物浓度均有所下降($P < 0.05$)。

不同林型的土壤对污染物酸沉降进行了缓冲。相对于大气降水,香樟林和裸地的土壤渗滤液 pH 值分别上升 0.35 和 0.08 个 pH 单位,而马尾松林土壤渗滤水,较之大气降水下降了 0.08 个 pH 单位($P > 0.05$,差异不显著)。但是 2 种林型土壤渗滤液污染物 pH 值比起树干径流 pH 值都有所上升($P < 0.05$)。

2.4 大气污染物通过生态系统的变化

将随大气降水输入生态系统的污染物含量视为系统的输入,随土壤渗透液流出生态系统的污染物含量视为系统的输出,不同系统的输入和输出与裸地的比较见表 2。

从表 2 可以看出,香樟林生态系统除 Cl^- 其他污染物的输出均小于输入的浓度,而马尾松林生态系统除 PO_4^{3-} 外,其他污染物的输出均小于输入浓度,因而这些污染物在生态系统中呈积累和吸附趋势,因而这些污染物在生态系统中得到了有效的净

表 2 污染物通过生态系统的变化

样地	$\rho(\text{F}^-)$			$\rho(\text{Cl}^-)$			$\rho(\text{NO}_3^-)$			$\rho(\text{PO}_4^{3-})$			$\rho(\text{SO}_4^{2-})$		
	输入	输出	差值	输入	输出	差值	输入	输出	差值	输入	输出	差值	输入	输出	差值
裸地	0.75	0.98	-0.23	1.41	8.61	-7.2	3.56	158.91	-155.35	0.00	0.00	0.00	30.36	141.18	-110.82
香樟林	3.96	1.43	2.53	13.02	17.97	-4.95	50.96	0.27	50.69	2.25	1.40	0.85	295.89	180.63	115.26
马尾松林	7.13	2.20	4.93	20.39	9.61	10.78	67.97	33.68	34.29	0.00	0.67	-0.67	634.23	293.80	340.43

化,对最主要的污染物离子 SO_4^{2-} ,香樟林输出的离子浓度小于马尾松林的浓度,因而香樟林的净化效果要比马尾松林好。但是裸地所有的污染物的浓度均是输出大于输入,净化效果较差。

3 讨 论

3.1 大气降水的污染物质含量特征分析

大气降水中的 SO_4^{2-} 直接反应当地的湿沉降情况,间接反映当地受空气污染的状况。沙湾地区大气的监测数据表明大气的主要污染物质来自于钢厂排放的 SO_2 气体,大气降水中污染物浓度也显示 S 的输入是最高的,且大气降水中污染物含量遵循 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{PO}_4^{3-}$ 的规律, S 的大量输入会使大气降水的 pH 值普遍较低,引发的酸雨会导致一系列的生态环境破坏问题。

3.2 生态系统对污染物过滤效应分析

森林的过滤效应是指森林对污染物所具有的净化缓冲作用,这是森林生态系统所具有的重要生态服务功能之一。研究结果表明:不同森林生态系统对污染物湿沉降的截持、缓冲和吸附净化作用显著。香樟林和马尾松的穿透雨和树干径流均对污染物 SO_4^{2-} 进行了有效的富集、吸附和对酸沉降地缓冲,这表现在大气降水通过不同林型的森林截留以后,穿透雨和树干径流中污染物浓度的升高和 pH 值的变化。

在研究样地内,大气降水经过森林林冠时,大量的 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等离子被冲洗下来。马尾松林穿透雨的污染物各离子浓度均比香樟林高,这主要因为马尾松林与污染物反应主要是干沉降的缘故^[7]。而且马尾松林针叶比表面积大,因而马尾松林比香樟林吸附的硫酸或 SO_2 会更多。两种森林的树干径流对污染物的吸附、富集作用均比林冠强。在针叶和香樟林中,树干径流中离子(NO_3^-)增加倍数,最高分别为大气降水中 NO_3^- 的 14 倍和 18 倍($P < 0.01$, 差异极显著)。马尾松林树干径流中 SO_4^{2-} 达到 385.49 mg/L,是大气降水的 10 倍多,是马尾松林穿透雨的 2 倍($P < 0.01$, 差异极显著)。树干径流对污染物离子富集、吸附量高于穿透雨中的离子富集量,这与文献[8-9]所得的干流水 SO_4^{2-} 浓度高于透冠水 3~4 倍的结果相类似。

两种林型的穿透雨都没有明显的酸化,香樟林和马尾松林的穿透雨 pH 值分别比降雨升高 0.32, 0.23。这些结果与文献[10-11]的研究结果类似,表明不同林型的林冠对污染物均有很强的吸附、富集作用,及对污染酸沉降的缓冲作用。但是马尾松林树干径流出现了污染物富集而酸度下降的现象。这可能是由于树干径流量通常较少,只有降水量的

1%~5%,从而出现污染物的浓缩现象^[12]。

两种森林生态系统的土壤渗透液中 SO_4^{2-} 浓度较大气降水 SO_4^{2-} 浓度高,同文献[9]所得结果基本一致。这表明土壤对酸性污染物具有明显的截持作用。而且香樟林和马尾松林土壤渗滤液中的 SO_4^{2-} 都比裸地的土壤渗透液高很多,说明两种森林生态系统的土壤对污染湿沉降中的最主要污染物离子 SO_4^{2-} 截持吸附作用比裸地强。

香樟林和裸地的土壤渗透液 pH 值相对大气降水分别上升了 0.35 和 0.08 个 pH 单位,这表明了香樟林和裸地的土壤均对污染物产生的酸沉降进行了缓冲。而马尾松林的土壤渗透液较之大气降水下降了 0.08 个 pH 单位,这与以往对森林相同林型的水化学研究结果是相反^[13]。这是因为马尾松林的 pH 值降低除了自身的有机质分解产生的有机酸,更主要是因为大气湿沉降的 pH 值较低,而且马尾松林生态系统输入的 SO_4^{2-} 含量是三个样地中最高的,当降落到土壤时,很容易导致土壤的酸化。但是马尾松林的土壤渗滤液污染物 pH 值比起树干径流 pH 值都有所上升($P < 0.05$),这说明土壤对污染物的缓冲作用还是很强的。

4 结 论

当大气降水进入林地后,首先通过林冠的淋溶、吸附、截持,然后通过凋落物和表土层上部的淋溶、截持、吸附以及林木根系吸收等的净化和化学调节,然后以地下水的形式流出林地,是森林生态系统物质输出的主要渠道^[14]。由于森林具有过滤功能,因而森林生态系统能对从系统外进入或从系统内流出的物质有一定的过滤功效。这一功能的突出表现是森林生态系统所具有的净化水源、减少污染、提高水质与空气质量的作用^[3]。

通过对香樟林(阔叶林)、马尾松林(针叶林)和裸地的森林过滤效应的研究可以发现:不同的森林生态系统,由于地上部分的林冠、树干和地被对污染物进行了吸附、富集和缓冲作用,因此比直接降落到裸地缓解了污染物酸沉降对环境的压力。再次,不同的森林生态系统内土壤的物理化学转化能力都比裸地强,有森林的地区比裸地的过滤性能要强。但是香樟林流出的污染物浓度比马尾松低,因而在一定程度上说明阔叶林比针叶林净化能力强,但是还要进行相关的生态机理方面的研究。

承蒙四川乐山沙湾环保局各位领导和成都生物所环境室的各位老师的协作和大力帮忙,谨致感谢!

(下转第 23 页)

水资源的开发利用 ,必须持有综合的观点 ,强调多种功能互补互利的原则 ,综合利用湖泊水资源。针对湖泊水资源的状况 ,实行湖泊水域的生态开发 ,开展湖心水产养殖 ,湖滨、湖岸发展水生经济植物 ,湖沼地水产精养 ,湖滩外放牧。

3.4 运用法律和经济手段 ,保护湖泊资源和环境
制定管理、保护和开发利用湖泊资源的法规或条例 ,依法打击破坏湖泊生态环境的行为。按照‘谁开发谁保护、谁利用谁补偿 ,谁破坏谁恢复’的原则 ,制定和完善有利于和改善湖泊资源利用的环境经济政策 ,推行有偿使用湖泊资源 ,使开发利用者的经济利益与湖泊环境保护相一致。开发与保护相结合 ,实现湖泊资源的持续利用和湖区社会经济的可持续发展。

参考文献：

[1] 黄漪平 .太湖水环境及其污染控制[M]. 北京 :科学出版社 2001 :1-4 ,19-23.
[2] 沈芳 ,匡定波 .青海最近 25 年变化的遥感调查与研究

[J]. 湖泊科学 2003 ,15(4) 289-296.

[3] 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊室 .江苏湖泊志 [M]. 南京 :江苏科学技术出版社 ,1982 :30-36.
[4] 窦鸿身 ,姜加虎 .中国五大淡水湖[M]. 合肥 :中国科学技术出版社 2003 :74-79 ,179-183.
[5] 窦鸿身 ,马武华 ,张圣照 ,等 .太湖流域围湖利用的动态变化及其对环境的影响[J]. 环境科学学报 ,1998 ,8(1) :1-5.
[6] 吴庆龙 ,胡耀辉 ,李文朝 ,等 .东太湖沼泽化发展趋势及驱动因素分析[J]. 环境科学学报 2000 ,20(3) 275-279.
[7] 陈家长 ,胡庚东 ,瞿建宏 ,等 .太湖流域池塘河蟹养殖向太湖排放氮磷的研究[J]. 农村生态环境 ,2005 ,21(1) :21-23.
[8] 王苏民 ,窦鸿身 .中国湖泊志[M]. 北京 :科学出版社 ,1998 :169-171 ,173-175.
[9] 秦伯强 ,罗漱葱 .太湖生态环境演化及其原因分析[J]. 第四纪研究 2004 ,24(5) 561-567.
[10] 殷立琼 ,江南 ,杨英宝 .基于遥感技术的太湖近 15 年面积动态变化[J]. 湖泊科学 2005 ,17(2) :139-142.

(收稿日期 2005-05-24 编辑 舒 建)

(上接第 19 页)

参考文献：

[1] ANAND M , MA K , OKONSKI A , et al. Characterising biocomplexity and soil microbial dynamics along a smelter-damaged landscape gradient[J]. The Science of the Total Environment 2003 ,311 :247-259.
[2] HU Yue-hua , KANG Zi-zhen. Description of T F bacteria bacteriology ,hydrometallurgy[J]. 湿法冶金 ,1996 ,60(4) 36-40.
[3] 潘开文 ,吴宁 ,潘开忠 ,等 .关于建设长江上游生态屏障的若干问题的讨论[J]. 生态学报 2004 ,24(3) 617-623.
[4] 林业部科技司 .森林生态系统定位研究方法[M]. 北京 :中国科学技术出版社 ,1994 :143-168.
[5] 田大伦 .杉木林生态系统定位研究方法[M]. 北京 :中国科学技术出版社 ,1994 :320-332.
[6] 尚久方 .环境污染分析法[M]. 北京 :中国科学技术出版社 ,1989.
[7] MAO You-fa , CHOU Rong-liang , WEN Zhi-liang. Factors influencing buffering ability of land-ecosystem[J]. 土壤与环境 ,1999 ,8(2) :141-143.
[8] ZHANG Fu-zhu , ZHANG Jing-yang , ZHANG Hong-rui , et al. Chemical composition of precipitation in a forest area of chongqing ,southwest China[J]. 空气、土壤污染 ,1996 ,90 :

407-415.

[9] MASANORI O , XU G , SUN Z. Effects of acidic deposition on soil ecosystems under forest in the Chongqing region of China [J]. Soil Science & Plant Nutrition ,1998 ,44(2) :187-196.
[10] FAN Wei , DING Ming-mao , LÜ Dong-Mei. Water and nutrient movement in an acacia mangium plantation of lower subtropical ,China[J]. 生态学报 ,1995 ,15(增刊) A 辑 :115-123.
[11] LIU Ju-xiu , ZHANG De-gang , ZHOU Guo-yi , et al. A preliminary study on the chemical properties of precipitation , throughfall ,stemflow and surface run off in major forest types at Dinghushan under acid deposition[J]. 应用生态学报 ,2003 ,14(8) :1243-1249.
[12] WILTING R. Acidification phenomena in beech (Fagus sylvatica) forest of Europe[J]. Water ,Air and Soil Pollution ,1986 ,31 :317-323.
[13] POTTS M J. The pattern of deposition of air borne salt of marine origin under a forest canopy[J]. Plant and Soil ,1978 ,50 :233-236.
[14] LIU Ju-xiu , WEN Da-zhi , ZHOU Guo-yi. Chemical properties of the rainfall in the coniferous and broad-leaved forests in acid rain area of Heshan ,Guangdong[J]. 中国环境科学 ,2000 ,20(3) :198-202.

(收稿日期 2005-04-04 编辑 舒 建)