

林静,张健,杨万勤,等. 2013. 岷江下游小型集水区 3 种人工林对降雨重金属含量的影响[J]. 环境科学学报,33(10):2871-2878
Lin J, Zhang J, Yang W Q, et al. 2013. Effect of *Metasequoia glyptostroboides*, *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus grandis* plantations on heavy metal contents in the precipitation of a small catchment at the downstream of Minjiang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,33(10):2871-2878

岷江下游小型集水区 3 种人工林对降雨重金属含量的影响

林静,张健*,杨万勤,简毅

四川农业大学生态林业研究所,温江 611130

收稿日期:2013-01-07 修回日期:2013-01-22 录用日期:2013-01-22

摘要:为了解人工林对大气污染物质的过滤作用,分析研究了 2011 年 11 月 10 日到 2012 年 3 月 4 日期间 7 次降雨中,岷江下游(五通桥段)一个小型集水区中水杉人工林、杉木人工林和巨桉人工林穿透水和树干茎流中的 4 种重金属(Cd、Cu、Pb、Zn)含量特征。结果表明,3 种人工林大气降雨、穿透水和树干茎流重金属含量呈现一致的规律,按平均值大小排列为:Zn > Pb > Cu > Cd。3 种人工林穿透水重金属含量差异不显著,水杉人工林与杉木人工林树干茎流中重金属 Cd、Cu 和 Pb 含量存在显著差异。巨桉和水杉人工林对重金属 Cd 和 Zn 有较强的过滤作用,杉木林和巨桉林对重金属 Cu 和 Pb 的过滤作用较强。Pb 在 3 种人工林中的含量均超过国家《生活饮用水卫生标准》。3 种人工林穿透水和树干茎流 Cd、Pb 和 Zn 的淋溶系数小于 1,为负淋溶,杉木树干茎流 Cu 的淋溶系数大于 1,为正淋溶。大气降雨重金属含量与降雨量之间存在显著的负相关关系,水杉人工林穿透水 Cu 含量、杉木人工林穿透水 Cd 和 Cu 含量、巨桉人工林穿透水和树干茎流 Cd 和 Cu 含量与降雨量之间存在显著的负相关关系。

关键词:集水区;人工林;重金属含量;穿透水;树干茎流;淋溶系数

文章编号:0253-2468(2013)10-2871-08 中图分类号:X171 文献标识码:A

Effect of *Metasequoia glyptostroboides*, *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus grandis* plantations on heavy metal contents in the precipitation of a small catchment at the downstream of Minjiang River

LIN Jing, ZHANG Jian*, YANG Wanqin, JIAN Yi

Institute of Ecological & Forestry, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130

Received 7 January 2013; received in revised form 22 January 2013; accepted 22 January 2013

Abstract: In order to understand the filtering effects of plantation on atmospheric pollutants, the concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn in rainfall, throughfall and stemflow in *Metasequoia glyptostroboides*, *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus grandis* plantations were measured in a small catchment at the downstream (Wutongqiao section) of Minjiang River from November 10, 2011 to March 4, 2012. The order of metal contents in precipitation, throughfall and stemflow was similar, i. e., Zn > Pb > Cu > Cd, in all types of plantations. There was no significant difference in Zn of throughfall between plantations, while significant differences in Cd, Cu and Pb between *M. glyptostroboides* and *C. lanceolata* existed. The plantation of *E. grandis* and *M. glyptostroboides* had better filtration effects on Cd and Zn, whereas *E. grandis* and *C. lanceolata* showed a significant filtration effects on Cu and Pb. Pb content in all plantations exceeded national drinking water standard. All leaching coefficients of Cd, Pb and Zn in throughfall and stemflow of three plantations were less than 1, except for Cu in stemflow of *C. lanceolata*. There was a significant negative relationship between precipitation and heavy metal contents. In addition, Cu contents in throughfall of *M. glyptostroboides*, Cd and Cu contents in throughfall of *C. lanceolata*, and in throughfall and stemflow of *E. grandis* had significant negative relationship with rainfall.

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(No. 2011BAC09B05);四川省教育厅科技创新团队项目(No. 11TD006);四川省应用基础项目(No. 2012JY047);四川省科技支撑计划(No. 12ZC0017)

Supported by the National Key Technology R&D Program (No. 2011BAC09B05), the Department of Education Science and Technology Innovation Team Program of Sichuan Province (No. 11TD006), the Application Foundation Program of Sichuan Province (No. 2012JY047) and the Key Technology Support Program of Sichuan Province (No. 12ZC0017)

作者简介: 林静(1983—),女,博士研究生, E-mail: linjing121004@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: Sicanzhangjian@163.com

Biography: LIN Jing(1983—), female, Ph. D. candidate, E-mail: linjing121004@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: Sicanzhangjian@163.com

Keywords: catchment; forest plantation; heavy metal contents; throughfall; stemflow; leaching coefficient

1 引言 (Introduction)

近年来,由于重金属污染物的非生物降解性和污染持续性 (Ke *et al.*, 2010; Adriano 2001; Huang *et al.*, 2005), 其所造成的污染日益加剧, 已成为人类所面临的重要环境问题之一. 而重金属随降雨的迁移是影响重金属输移的最主要方式, 也是造成生态系统重金属污染的根本原因之一. 森林通过能量转换、吸收同化、物质循环等功能对大气、水体、土壤环境等产生显著的影响, 穿透雨和树干茎流构成林内雨, 是森林生态系统平衡的一个重要组成部分 (陈书军等, 2006), 同时对降雨过程中的重金属污染物有显著的淋滤作用 (Huston *et al.*, 2009; Cheng *et al.*, 2011; 陶宝先等, 2011). 国外研究大多关注集水区森林生态系统中重金属的迁移、积累规律 (Malandrino *et al.*, 2011; Abollino *et al.*, 2011), 就其对生态系统结构和功能的影响也进行了比较深入的探讨 (Smical *et al.*, 2008). 在国内, 一些学者对集水区中的重金属来源、迁移、分布规律也进行了研究 (姬艳芳等, 2008; 黄益宗等, 2004; 李永华等, 2007). 水杉、巨桉、杉木人工林在我国的栽培历史悠久, 但就其对降雨过程中重金属含量变化的研究较少.

岷江下游不仅是人口稠密区, 而且具有长期的人工林栽培历史, 有关岷江下游小型集水区人工林对降雨中重金属过滤作用的研究鲜少见报. 岷江下游小型集水区分布较广, 人工林类型多样, 研究该区典型集水区中不同人工林对降雨中重金属的过

滤作用具有重要意义. 因此, 本研究利用方差分析法, 基于 7 次野外降雨 (降雨量 > 10 mm) 采样收集, 分析岷江下游 (五通桥段) 3 种典型人工林降雨对重金属含量的影响, 以期为深入开展岷江流域主要农区面源污染控制和污染土壤的生态修复试验示范研究提供基础依据. 同时, 考虑到本研究旨在对比人工林类型对重金属非点源污染的影响, 因此, 讨论中忽略了坡度和植被覆盖度等因素.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区概况

岷江是中国长江上游支流, 全流域均在四川境内, 发源于岷山弓杠岭和郎架岭, 全长 735 km, 流域面积 14 万 km²; 全河落差 3560 m, 水力资源 1300 多万 kW. 岷江干流流经 1062 km, 有大小支流 90 余条, 沿途汇入黑水河、杂谷脑河、大渡河、马边河等重要支流, 在宜宾汇入长江. 岷江流经的四川盆地西部是中国多雨地区, 水量丰富, 年径流量 900 多亿 m³, 为黄河的两倍多, 水力资源蕴藏量占长江水系的 1/5.

研究区位于岷江下游 (五通桥段) 一个小型集水区中 (103°44'329" ~ 103°44'481"E, 29°24'291" ~ 29°24'566"N), 该区地处川西南平原丘陵结合部, 位于长江上游和四川盆地西部, 总面积 4.31 hm², 海拔 358 ~ 395 m, 平均坡度 35°. 集水区中主要植被类型有人工纯林、天然次生林, 土壤类型以黄壤、紫色土和少量的山地黄壤为主 (表 1).

表 1 研究样地概况

Table 1 Description of study plots in Wutongqiao County

人工林类型	面积/m ²	土壤类型	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	563.177	黄壤	8	13	15
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	616.290	黄壤	12	15	17
巨桉 <i>Eucalyptus grandis</i>	985.367	紫土	3	2.5	5

2.2 样品采集

实验布设在共同村小型集水区中, 选取 3 种人工林地势较为平坦的 3 块 10 m × 10 m 的样地, 采集的水样分别为大气降水、林内穿透水、树干茎流. 每个样地内布设 3 个开口面积为 2 m × 0.20 m 的 PVC 管道收集穿透水; 按径级选择 10 株树作为目标树来测定树干茎流, 其中每个径级选择 2 ~ 3 棵样木进

行测定. 每株样本用透明硬塑料片围绕紧贴树干做成漏斗形状, 用沥青粘牢漏斗下端, 再在漏斗下端接直径 1.0 cm 的聚乙烯塑料管, 基部放置集水器以收集树干茎流; 林外用 3 个塑料桶收集大气降水. 将收集的水样测定体积后, 选用干净的塑料瓶装 1000 mL 带回实验室测定, 如不能及时测定, 需放入 4 °C 的冰柜中保存.

2.3 样品测定

水样中的重金属(Cd、Cu、Pb、Zn)含量均采用电感耦合等离子体质谱 ICP-MS 测定. 水样无需消解,用 0.45 μm 滤膜过滤后直接测定. 用 3% 硝酸溶液配制混合标准溶液,浓度分别为 0、0.5、1、2、5、10、20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 重金属 Cd、Cu、Pb、Zn 检出限依次为 0.0029、0.0038、0.0071、0.0107 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,加标回收率依次为 90.2% ~ 96.6%、92.4% ~ 96.2%、101.3% ~ 105.8%、99.5% ~ 107.1%.

2.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2003 对试验研究的相关数据进行整理和统计分析的基础上,结合 SPSS16.0 软件对数据进行误差分析和显著性检验.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 人工林降雨中重金属含量

重金属污染不仅影响环境质量,而且水体的重金属污染物进入土壤后直接影响到土壤性质、水质状况、作物生长、农业产量、农产品品质等,并通过食物链对人体健康造成危害(王艳等,2007). 重金属元素进入森林生态系统有 3 个主要途径:一是湿

沉降,即通过大气降水中吸收和捕捉的颗粒物进入;二是干沉降,重金属颗粒被气溶胶附着而沉积在植物、土壤表面;三是土壤、植物直接吸收,而大气降雨在湿沉降中占主导地位(肖以华等,2010).

从表 2 可看出,大气降雨中 4 种重金属均能检出,其中,Zn 含量最高,平均值为 1316.03 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Cd 含量最低,平均为 5.52 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Cd 含量最高值出现在巨桉人工林树干茎流,为 3.52 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Cu 含量最高值出现在杉木人工林树干茎流,为 7.40 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Pb 含量最高值出现在水杉人工林穿透水,为 5.07 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Zn 含量最高值出现在杉木人工林树干茎流,为 617.61 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;Cd 和 Cu 含量最低值均出现在水杉人工林树干茎流,分别为 0.31 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2.33 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Pb 含量最低值出现在杉木树干茎流,为 15.52 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Zn 含量最低值出现在巨桉人工林穿透水,为 490.83 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 3 种人工林大气降雨、穿透水和树干茎流中各重金属含量均呈现一致的规律,按平均值大小排列为:Zn > Pb > Cu > Cd.

表 2 人工林降雨分配过程中重金属含量

人工林类型	项目	Cd		Cu		Pb		Zn	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
水杉林	穿透水	0.67	0.38	5.07	2.82	51.01	22.04	504.08	275.19
	树干茎流	0.31	0.29	2.33	1.56	39.60	18.11	594.71	273.37
杉木林	穿透水	1.01	0.71	5.20	4.09	44.71	24.72	497.60	302.33
	树干茎流	3.30	2.16	7.40	4.05	15.52	10.02	617.61	313.73
巨桉林	穿透水	1.04	1.07	6.44	3.52	44.61	16.81	490.83	303.12
	树干茎流	3.52	2.77	4.11	2.71	32.22	12.23	557.42	306.51
大气降雨		5.52	1.54	6.62	4.61	54.33	53.42	1316.03	815.11

大气降雨中的重金属经林冠层和树干后含量减少,表明该类植被类型对大气降雨中的重金属具有吸收或吸附作用,含量减少越多,则吸收或吸附作用越强(陈书军等,2006). 水杉人工林 Cd 含量的顺序为:大气降雨 > 穿透水 > 树干茎流;水杉和巨桉人工林 Cu 含量的顺序为:大气降雨 > 穿透水 > 树干茎流;3 种人工林 Pb 含量顺序均为:大气降雨 > 穿透水 > 树干茎流;Zn 含量排列顺序为:大气降雨 > 树干茎流 > 穿透水. 以上结果表明,水杉人工林对降雨中 4 种重金属都具有一定的吸附作用,巨桉人工林对降雨中重金属 Cu、Pb 和 Zn 具有一定的

吸附作用,杉木人工林对降雨中重金属 Pb 和 Zn 具有一定的吸附作用. 3 种人工林穿透水中重金属含量最高的为水杉人工林,含量最低的为巨桉人工林,树干茎流中重金属含量最高的为杉木人工林,最低的为巨桉人工林. 由此可见,巨桉人工林林内雨重金属检测到的浓度最低,表明其对降雨中的重金属有很好的吸附效应,截滤效应最好,这可能与巨桉叶片面和生理生化特性有关. 这与樟树林(陈书军等,2006)和杉木林(黄建辉等,2000)降水再分配过程中 Cu、Fe、Zn、Mn 的含量变化相类似.

3.2 3种人工林不同月份重金属含量变化

根据2011年11月10日到2012年3月4日的降水数据分析得知,不同人工林重金属含量存在差异,不同重金属含量之间也存在差异.由图1可知,在7次降雨中水杉、杉木和巨桉人工林穿透水Cd含量分别为0~1.21、0.32~1.93、0.64~3.22 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,树干茎流Cd含量分别为0~0.60、0.40~6.91、0.79~5.23 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,最大值均出现在2012年1月19日的降雨中.3种人工林穿透水和树干茎流Cd含量之和大小依次为:杉木林>巨桉林>水杉林.水杉林、杉木林和巨桉林穿透水Cd含量两两之间不存在显著差异($p>0.05$),表明降雨经过这3种人工林冠层后,重金属Cd含量变化小,这可能是

由于巨桉和水杉均为落叶乔木,采样时间集中在冬季,为落叶期,而杉木本身叶面积相对较小,这就造成了3种人工林冠层对降雨中重金属的吸收和吸附作用较小,故穿透水中重金属Cd含量差异也较小.水杉林与杉木林树干茎流Cd含量之间存在极显著差异($p=0.002<0.01$),水杉林与巨桉林树干茎流Cd含量树干茎流之间存在显著差异($p=0.017<0.05$),而杉木林与巨桉林之间不存在显著差异($p=0.323>0.05$),表明降雨经过水杉人工林枝叶和树干后,重金属Cd含量的变化明显大于杉木林和巨桉林,这可能是由于水杉人工林不同的生理生化特性对Cd吸收或吸附作用也不同.

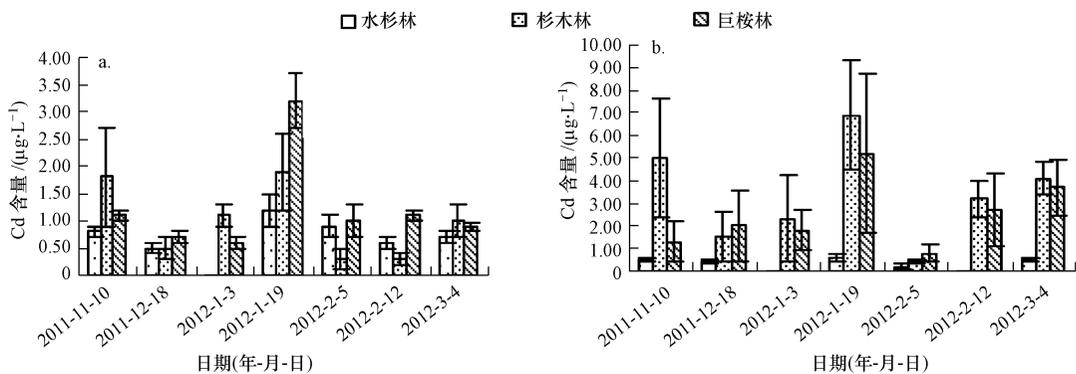


图1 水杉、杉木和巨桉人工林穿透水(a)和树干茎流(b)Cd含量的月变化

Fig. 1 Monthly variations of Cd concentrations in (a) throughfall and (b) stemflow of *Metasequoia glyptostroboides*, *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus grandis* plantations

由图2可知,水杉、杉木和巨桉人工林穿透水Cu含量分别为2.41~9.42、1.24~13.73、2.49~11.07 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,树干茎流Cu含量分别为1.09~4.91、3.51~15.70、1.62~7.48 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.3种人工林穿透水和树干茎流Cu含量最大值均出现在2012年

1月19日,最小值出现在2011年12月18日.3种人工林穿透水和树干茎流Cu含量之和大小依次为:水杉林>巨桉林>杉木林.水杉林、杉木林和巨桉林穿透水Cu含量两两之间不存在显著差异($p>0.05$),表明降雨经过这3种人工林冠层后,重金属

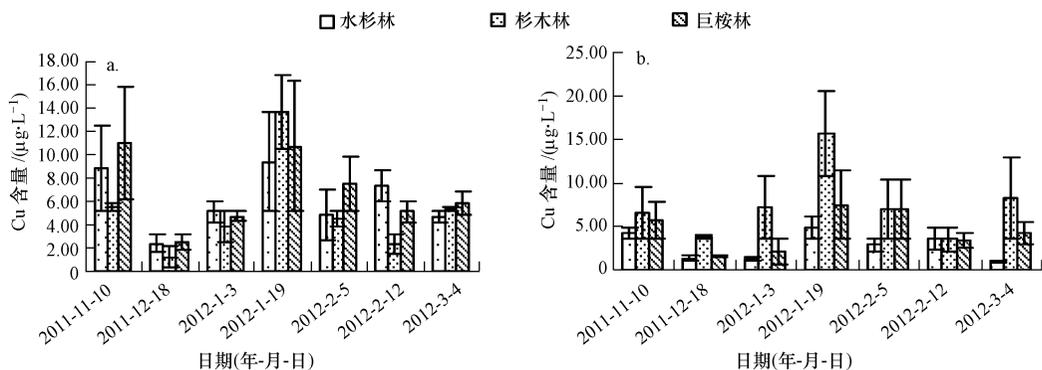


图2 水杉、杉木和巨桉人工林穿透水(a)和树干茎流(b)Cu含量的月变化

Fig. 2 Monthly variations of Cu concentrations in (a) throughfall and (b) stemflow of *Metasequoia glyptostroboides*, *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus grandis* plantations

Cu 含量变化小,这可能是由于采样时间造成的 3 种人工林冠层对降雨中重金属的吸收和吸附作用较小,故穿透水中重金属 Cu 含量差异也较小.水杉林与杉木林树干茎流 Cu 含量之间存在极显著差异($p=0.006 < 0.01$),水杉林与巨桉林树干茎流 Cu 含量之间不存在显著差异($p=0.259 > 0.05$),而杉木林与巨桉林树干茎流 Cu 含量之间不存在显著差异($p=0.070 > 0.05$),表明降雨经过水杉人工林枝叶和树干后,重金属 Cu 含量的变化明显大于杉木林,这可能是由于水杉人工林不同的生理生化特性对 Cu 吸收或吸附产生的影响.

由图 3 可知,水杉、杉木和巨桉人工林穿透水 Pb 含量分别为 27.54 ~ 87.03、19.62 ~ 90.47、15.11 ~ 65.64 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,最大值均出现在 2012 年 1 月 19 日降雨中;树干茎流 Pb 含量分别为 17.42 ~ 64.13、6.51 ~ 32.22、18.58 ~ 50.20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.3 种人

工林穿透水和树干茎流 Pb 含量之和大小依次为:水杉林 > 巨桉林 > 杉木林.水杉林、杉木林和巨桉林穿透水 Pb 含量两两之间不存在显著差异($p > 0.05$),表明降雨经过这 3 种人工林冠层后,重金属 Pb 含量变化小,这可能是由于采样时间造成的 3 种人工林冠层对降雨中重金属的吸收和吸附作用较小,故穿透水中重金属 Pb 含量差异也较小.水杉林与杉木林树干茎流 Pb 含量之间存在极显著差异($p=0.005 < 0.01$),水杉林与巨桉林树干茎流 Pb 含量之间不存在显著差异($p=0.324 > 0.05$),而杉木林与巨桉林 Pb 含量之间存在显著差异($p=0.043 < 0.05$),表明降雨经过水杉人工林枝叶和树干后,重金属 Cd 含量的变化明显大于杉木林,这可能是由于水杉人工林不同的生理生化特性对 Pb 吸收或吸附产生的影响.

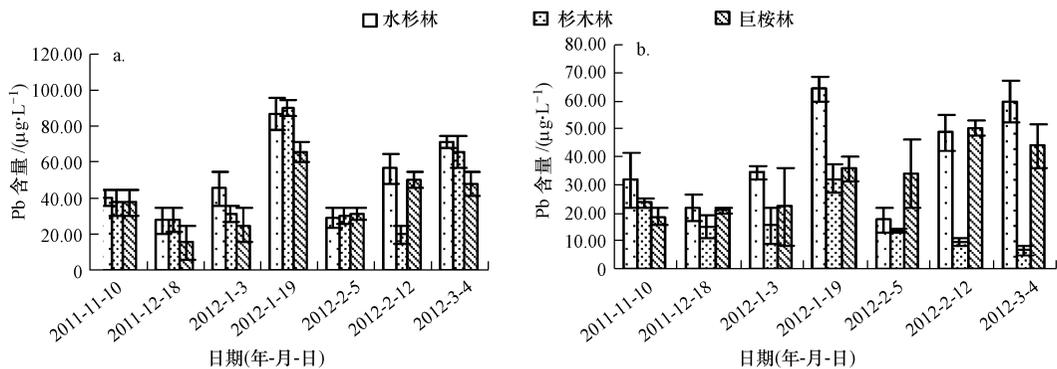


图 3 水杉、杉木和巨桉人工林穿透水 (a) 和树干茎流 (b) Pb 含量的月变化

Fig. 3 Monthly variations of Pb concentrations in (a) throughfall and (b) stemflow of *Metasequoia glyptostroboides*, *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus grandis* plantations

由图 4 可知,水杉、杉木和巨桉人工林穿透水 Zn 含量分别为 137.04 ~ 941.11、115.48 ~ 974.23、228.22 ~ 991.23 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,树干茎流 Zn 含量分别为

247.43 ~ 1009.01、216.33 ~ 1065.02、275.19 ~ 1042.55 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.3 种人工林穿透水和树干茎流 Zn 含量最大值均出现在 2011 年 11 月 10 日,水杉和杉

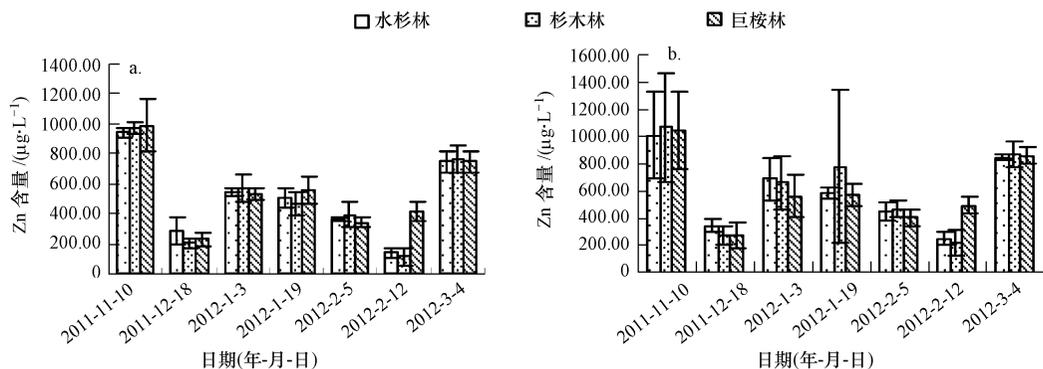


图 4 水杉、杉木和巨桉人工林穿透水 (a) 与树干茎流 (b) Zn 含量的月变化

Fig. 4 Monthly variations of Zn concentrations in (a) throughfall and (b) stemflow of *Metasequoia glyptostroboides*, *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus grandis* plantations

木人工林穿透水和树干茎流 Zn 含量最小值出现在 2012 年 2 月 12 日,巨桉人工林穿透水和树干茎流 Zn 含量最小值出现在 2011 年 12 月 18 日.3 种人工林穿透水和树干茎流 Zn 含量之和大小依次为:杉木林 > 巨桉林 > 水杉林.水杉林、杉木林和巨桉林穿透水和树干茎流 Zn 含量两两之间均不存在显著差异($p > 0.05$),表明降雨经过这 3 种人工林冠层和树干后,重金属 Zn 含量变化小,这可能是由于采样时间和人工林生理生化特性造成的 3 种人工林冠层对降雨中重金属的吸收和吸附作用较小,故 3 种人工林重金属 Zn 含量差异也较小.

杉木人工林穿透水和树干茎流 Cd 和 Zn 含量高于巨桉林和水杉林,表明其对重金属 Cd 和 Zn 的吸收或吸附量较小,对重金属 Cd 和 Zn 的过滤作用最弱,反之,巨桉和水杉人工林对重金属 Cd 和 Zn 有较强的过滤作用.水杉人工林穿透水和树干茎流 Cu 和 Pb 含量高于杉木林和巨桉林,表明其对重金属 Cu 和 Pb 的过滤作用最弱,反之,杉木林和巨桉林对重金属 Cu 和 Pb 的过滤作用较强.

我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定 Cd 含量不得超过 $5.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Cu 含量不得超

过 $1000.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Pb 含量不得超过 $10.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Zn 含量不得超过 $1000.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.从图 1~4 的结果可知,水杉人工林 Cd 含量均在我国生活饮用水标准内,杉木和巨桉人工林除 2012 年 1 月 19 日的树干茎流 Cd 含量高于国家生活饮用水标准,其余都在安全范围之内.3 种人工林 Cu 含量均在安全范围以内,但 Pb 含量远远高于国家饮用水安全标准.3 种人工林除 2011 年 11 月 10 日树干茎流 Zn 含量高于国家饮用水标注,其余均在安全范围之内.这就意味着在这一区域,Pb 污染状况较为严重.

3.3 降雨对人工林的淋溶作用

淋溶系数是穿透水或树干茎流中的元素含量与林外大气降水养分含量的比值(文仕知等,2009).由表 3 中的淋溶系数可知,重金属 Cd、Pb 和 Zn 在 3 种人工林穿透水和树干茎流中的淋溶系数均小于 1,表明降雨经过 3 种人工林的林冠和树干后 Cd、Pb 和 Zn 含量降低,出现明显的负淋溶现象;水杉和巨桉人工林穿透水和树干茎流中 Cu 的淋溶系数小于 1,出现负淋溶作用,而杉木人工林树干茎流 Cu 的淋溶系数大于 1,出现正淋溶作用,这与田大伦等(2002)和陈书军等(2007)的研究结论相似.

表 3 降雨淋溶系数

Table 3 Leaching coefficient

人工林类型	穿透水淋溶系数				树干茎流淋溶系数			
	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn
水杉人工林	0.13	0.88	0.94	0.38	0.05	0.35	0.73	0.45
杉木人工林	0.18	0.79	0.82	0.38	0.60	1.12	0.29	0.47
巨桉人工林	0.18	0.97	0.82	0.37	0.64	0.62	0.60	0.42

降雨中重金属元素 Cd、Cu、Pb、Zn 主要来源于大气颗粒物,大气颗粒物中的重金属污染元素包括自然源(火山灰、沙土扬尘等)和人为源(工业生产、机动车尾气排放及汽车轮胎与地面摩擦产生的大量含重金属离子的有害气体和尘土等).除上述一次颗粒物外,在大气中经过一系列气固相反应衍变而成的二次颗粒物也是大气重金属的重要来源(李德成等,2001).降雨通过林冠层和树干后其化学特性发生改变有两个方面的原因:一方面大气降雨淋洗大气中和枝叶表面粉尘、微粒、尘埃等固体沉降物,淋溶叶片的分泌物的一系列物理化学变化,致使穿透林冠层进入林内的雨水中化学成分含量发生变化(樊后保,2000;梁涛等,2003);另一方面枝叶对雨水中离子的吸收和对降雨过程中的养分吸附(肖以华等,2010;张胜利,2009),导致林内雨水

和树干茎流中化学成分含量发生变化.在 3 种人工林林内检测到的 Cd、Pb 和 Zn 含量小于大气降雨,说明这 3 种人工林对 Cd、Pb 和 Zn 具有吸附能力.水杉和巨桉人工林在穿透水和树干茎流中检测到的 Cu 含量小于大气降雨,这说明水杉和巨桉人工林对 Cu 具有较强的吸附能力.

3.4 降雨强度与重金属含量的相关关系

本研究按降水量的大小将降水强度分成 3 个等级:10~20 mm、20~25 mm 和 25 mm 以上(>25 mm).分别对各个等级的林外降水、穿透水和树干茎流中的重金属含量及淋溶程度进行统计分析,结果见表 4.相关分析结果表明,大气降雨中重金属含量与降雨量之间存在显著的负相关关系($p < 0.01$),随着降雨量的增加,重金属含量明显减小,这与枫香人工林的研究结果一致(文仕知等,

2009). 水杉人工林穿透水 Cu 含量与降雨量之间存在显著的负相关关系 ($p < 0.05$), 其余重金属含量与降雨量的相关关系不显著. 杉木人工林穿透水 Cd 和 Cu 含量与降雨量之间存在显著的负相关关系 ($p < 0.05$), 其余重金属含量与降雨量的相关关系

不显著. 巨桉人工林穿透水和树干茎流 Cd 和 Cu 含量与降雨量之间存在显著的负相关关系 ($p < 0.05$), 穿透水 Pb 含量与降雨量之间存在显著的负相关关系 ($p < 0.05$), 其余的重金属含量与降雨量的相关关系不显著.

表 4 不同降雨强度下人工林重金属含量

Table 4 Heavy metal content in plantation forest under different rainfall intensities

 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

人工林类型	降雨量 /mm	Cd			Cu			Pb			Zn		
		大气降雨	穿透水	树干茎流	大气降雨	穿透水	树干茎流	大气降雨	穿透水	树干茎流	大气降雨	穿透水	树干茎流
水杉	10~20	5.92	0.86	0.32	7.05	8.85	4.25	61.24	57.03	44.84	1665.0	941.11	1009.01
	20~25	5.31	0.59	0.25	6.62	6.46	3.01	53.92	54.86	38.03	1353.7	552.63	659.13
	>25	5.02	0.36	0.12	6.37	4.87	1.73	47.53	40.55	31.64	1162.0	309.91	392.22
	<i>r</i>	-1.000**	-0.982	-0.963	-0.991*	-0.997*	-0.977	-0.988*	-0.984	-0.985	-0.999*	-0.948	-0.964
杉木	10~20	5.92	1.93	5.07	7.05	5.77	7.75	61.24	46.13	23.52	1665.0	974.23	1065.02
	20~25	5.31	1.14	3.93	6.62	4.54	7.02	53.92	42.43	17.9	1353.7	575.32	566.31
	>25	5.02	0.82	2.38	6.37	3.57	6.66	47.53	37.56	11.8	1162.0	261.12	422.81
	<i>r</i>	-1.000**	-0.990*	-0.956	-0.991*	-0.991*	-0.999*	-0.988	-0.964	-0.977	-0.999*	-0.967	-0.945
巨桉	10~20	5.92	1.76	3.32	7.05	9.93	5.71	61.24	50.43	35.6	1665.0	991.23	1042.55
	20~25	5.31	1.13	2.12	6.62	6.06	4.55	53.92	41.27	30.4	1353.7	540.20	607.12
	>25	5.02	0.86	1.34	6.37	4.55	4.03	47.53	37.63	18.6	1162.0	401.41	446.13
	<i>r</i>	-1.000**	-1.000**	-0.997*	-0.991*	-0.999*	-0.999*	-0.988	-0.999*	-0.917	-0.999*	-0.884	-0.901

注: ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

4 结论 (Conclusions)

1) 3 种人工林穿透水和树干茎流中各重金属含量均呈现一致的规律, 按平均值大小排列为: Zn > Pb > Cu > Cd. 3 种人工林穿透水重金属含量的排列顺序为: 水杉林 > 杉木林 > 巨桉林, 树干茎流重金属含量的排列顺序为: 杉木林 > 水杉林 > 巨桉林.

2) 3 种人工林穿透水重金属含量差异不显著, 水杉人工林与杉木人工林树干茎流中重金属 Cd、Cu 和 Pb 含量存在显著差异. 巨桉和水杉人工林对重金属 Cd 和 Zn 有较强的过滤作用, 杉木林和巨桉林对重金属 Cu 和 Pb 的过滤作用较强. Pb 在 3 种人工林中的含量超过国家《生活饮用水卫生标准》.

3) 3 种人工林穿透水和树干茎流 Cd、Pb 和 Zn 的淋溶系数小于 1, 为负淋溶作用, 表明在 3 种人工林冠层对 Cd、Pb 和 Zn 具有吸收或吸附能力. 水杉和巨桉人工林穿透水和树干茎流 Cu 的淋溶系数小于 1, 为负淋溶作用, 表明水杉和巨桉人工林对 Cu 具有较强的吸收或吸附能力.

4) 大气降雨中重金属含量与降雨量之间存在显著的负相关关系. 水杉人工林穿透水 Cu 含量与降雨量之间存在显著的负相关关系, 杉木人工林穿

透水 Cd 和 Cu 含量与降雨量之间存在显著的负相关关系, 巨桉人工林穿透水和树干茎流 Cd 和 Cu 含量与降雨量之间存在显著的负相关关系, 穿透水 Pb 含量与降雨量之间存在显著的负相关关系.

责任作者简介: 张建, 教授, 博士生导师, 长期从事森林生态、森林培育和水土保持的教学和科研工作. 在国内外核心期刊学术上发表论文 100 篇, 其中 SCI 收录 10 篇.

参考文献 (References):

- Abollino O, Giacomino A, Malandrino M, *et al.* 2006. Assessment of metal mobility in a contaminated soil by sequential extraction [J]. *Water, Air, & Soil Pollut*, 137: 315-338
- Adriano D C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals [M]. New York: Springer
- 陈书军, 田大伦, 闫文德, 等. 2006. 樟树人工林生态系统不同层次穿透水水化学特征 [J]. *生态学杂志*, 25 (7): 747-752
- 陈书军, 闫文德, 项文化, 等. 2007. 中亚热带地区几个树种树干茎流的养分特征研究 [J]. *林业科学研究*, 20(3): 408-414
- Cheng M C, You C F, Lin F J, *et al.* 2011. Sources of Cu, Zn, Cd and Pb in rainwater at a subtropical islet offshore northern Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 45: 1919-1928
- 樊后保. 2000. 杉木林截留对降水化学的影响 [J]. *林业科学*, 36 (4): 2-8

- 黄建辉,李海涛,韩兴国,等. 2000. 暖温带两种针叶林生态系统中茎流和穿透雨的养分特征研究[J]. 植物生态学报, 24(2): 248-251
- Huang P M, Gobran G R. 2005. Biogeochemistry of Trace Elements in the Rhizosphere[M]. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier
- 黄益宗,朱永官. 2004. 森林生态系统镉污染研究进展[J]. 生态学报, 24(1): 101-108
- Huston R, Chana, Y C, Gardner T, *et al.* 2009. Characterisation of atmospheric deposition as a source of contaminants in urban rainwater tanks [J]. *Water Research*, 43: 1630-1640
- 姬艳芳,李永华,孙宏飞,等. 2008. 凤凰铅锌矿区土壤-水稻系统中重金属的行为特征分析[J]. 农业环境科学学报, 27(6): 2143-2150
- 梁涛,王浩,张秀梅,等. 2003. 不同土地类型下重金属随暴雨径流迁移过程及速率对比[J]. 应用生态学报, 14(10): 1756-1760
- 李德成,王东红,彭安. 2001. 北京西北郊降尘和降雨中稀土元素的浓度分布和来源的初步分析[J]. 环境科学学报, 21(5): 640-643
- 李永华,姬艳芳,杨林生,等. 2007. 采选矿活动对铅锌矿区水体中重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 26(1): 103-107
- Malandrino M, Abollino O, Buoso S, *et al.* 2011. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite [J]. *Chemosphere*, 82(2): 169-178
- Smical A I, Hotea V, Oros V, *et al.* 2008. Studies on transfer and bioaccumulation of heavy metals from soil into lettuce [J]. *Environ Eng Manage*, 7: 609-615
- 陶宝先,张金池,俞元春. 2011. 南京近郊主要森林类型对土壤重金属的吸收与累积规律[J]. 环境化学, 30(2): 447-453
- 田大伦,项文化,杨晚华. 2002. 第2代杉木幼林生态系统水化学特征[J]. 生态学报, 22(6): 859-865
- 文仕知,文娟,罗佳,等. 2009. 枫香人工林内外降水重金属含量变化[J]. 中南林业科技大学学报(自然科学版), 29(2): 45-50
- 王艳,刘晓环,金玲仁,等. 2007. 泰山地区湿沉降中重金属的空间分布[J]. 环境科学, 28(11): 2562-2568
- 肖以华,陈步峰,潘勇军,等. 2010. 广州帽峰山常绿阔叶林森林生态系统水文环境效应[J]. 东北林业大学学报, 38(3): 78-83
- 张胜利. 2009. 秦岭火地塘林区森林生态系统对降水中重金属的作用[J]. 林业科学, 45(11): 55-65
- Zhao K L, Liu X M, Xu J M, *et al.* 2010. Heavy metal contaminations in a soil-rice system: Identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 181: 778-787