

中亚热带杉木人工林和米槠次生林树干茎流和 穿透雨磷的动态特征

赵泽敏¹, 吴福忠^{1,2}, 杨玉盛^{1,2}, 倪祥银^{1,2}, 胥超^{1,2},
熊德成^{1,2}, 廖姝^{1,2}, 袁吉¹, 谭思懿¹, 岳楷^{1,2}

(1.福建师范大学地理科学学院,湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,
福州 350007;2.福建三明森林生态系统与全球变化野外科学观测研究站,福州 350007)

摘要: 磷(P)伴随树干茎流和穿透雨输入到森林,成为补充亚热带森林生态系统 P 流失的一个重要途径,但在不同类型生态系统中的动态特征缺乏必要的关注。以中亚热带杉木人工林和米槠次生林为研究对象,通过测定 2015 年 6 月至 2018 年 8 月间树干茎流和穿透雨中 P 浓度,探讨了 2 个林分树干茎流和穿透雨 P 浓度的差异、季节变化特征及影响因素。结果表明,杉木人工林树干茎流和穿透雨 P 浓度变化范围分别为 0.002~0.026,0.003~0.024 mg/L,米槠次生林树干茎流和穿透雨 P 浓度变化范围分别为 0.003~0.024,0.003~0.031 mg/L,2 个林分树干茎流和穿透雨 P 浓度均在夏季表现出显著差异。2 个林分的树干茎流 P 浓度均为夏季高于冬季,杉木人工林穿透雨 P 浓度在季节上无显著差异,而米槠次生林夏秋季较高,冬春季偏低,树干茎流 P 浓度略微高于穿透雨。2 个林分的树干茎流量在 4 个季节均具有显著差异,米槠次生林均高于杉木人工林,而穿透雨量在季节上无差异。杉木人工林 P 浓度与树干茎流量和穿透雨量均呈负相关关系,而米槠次生林 P 浓度与树干茎流量和穿透雨量均呈正相关关系。表明不同林分林冠结构和形态学特征的差异能显著影响亚热带森林生态系统降水中 P 的再分配。研究结果为深入认识森林生态系统 P 随水文过程的动态特征提供基础数据。

关键词: 磷浓度; 树干茎流; 穿透雨; 杉木人工林; 米槠次生林

中图分类号: Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)04-0129-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.018

Dynamics of Phosphorus Along with Stemflow and Throughfall in Middle Subtropical *Cunninghamia lanceolata* Plantations and *Castanopsis carlesii* Secondary Forests

ZHAO Zemin¹, WU Fuzhong^{1,2}, YANG Yusheng^{1,2}, NI Xiangyin^{1,2}, XU Chao^{1,2},

XIONG Decheng^{1,2}, LIAO Shu^{1,2}, YUAN Ji¹, TAN Siyi¹, YUE Kai^{1,2}

(1.College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Cultivation Base of
State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007; 2.Sanming Forest
Ecosystem and Global Change Observation and Research Station of Fujian Province, Fuzhou 350007)

Abstract: The input of phosphorus (P) along with stemflow and throughfall is an important supplement for P loss in subtropical forest ecosystems, but the dynamics of these processes in different type of forests remain elusive. Here, based on field monitoring experiments in middle subtropical *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. Plantations and *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hay. Secondary forests from June 2015 to August 2018, we assessed P concentrations of stemflow and throughfall among different forest types and seasons, and the associated controlling factors. The results showed that P concentrations of stemflow and throughfall in *C. lanceolata* plantations varied from 0.002 to 0.026 and from 0.003 to 0.024 mg/L, respectively, and those in *C. carlesii* secondary forests varied from 0.003 to 0.024 and from 0.003 to 0.031 mg/L, respectively, P concentrations of stemflow and throughfall varied significantly between forest types in

收稿日期:2021-01-31

资助项目:国家自然科学基金项目(31800373,31922052,31800521,32022056)

第一作者:赵泽敏(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事森林生态研究。E-mail: zzemin2020@163.com

通信作者:岳楷(1987—),男,研究员,博士生导师,主要从事森林生态与全球变化生态研究。E-mail: kyleyuechina@163.com

summer. Stemflow P concentrations were higher in summer than that in winter, regardless of forest type. Throughfall P concentrations were higher during summer and autumn in *C. carlesii* secondary forests, but did not differ among seasons in *C. lanceolata* plantations. Rainfall amount of stemflow in both forest types significantly varied among different seasons, with an average of higher stemflow but similar throughfall in *C. carlesii* secondary forests compared with *C. lanceolata* plantations. P concentrations were negatively correlated with water amounts of both stemflow and throughfall in *C. lanceolata* plantations, but positive correlations were found in *C. carlesii* secondary forests. Our results suggested that forest type that was represented by canopy structure and phenology features was an important controlling factor affecting rainfall P distribution in subtropical forest ecosystems, which could provide useful basal data for better understanding the dynamics of P along with hydrology process in forest ecosystems.

Keywords: phosphorus concentration; stemflow; throughfall; *Cunninghamia lanceolata* plantations; *Castanopsis carlesii* secondary forests

磷(P)被认为是许多热带、亚热带森林的限制性营养元素,在这些森林生态系统中,植被的长期生产力依赖于大气 P 的输入^[1],P 元素水平对于其林分生长具有重要意义^[2]。由于土壤中的 P 主要来源于岩石风化,而岩石风化过程缓慢,因此土壤中 P 的来源相对固定,变化幅度不大^[3]。已有研究^[4]表明,通过大气降雨输入森林的 P 年通量为 0.07~1.0 kg/hm²,从生态系统的输入输出看,P 的输出大于输入,从元素循环的量也可以看出大气降水对于生态系统的重要意义,冠层淋溶在森林生态系统 P 循环中也发挥着重要作用。此外,大气降雨的养分是以无机离子的形态输入,能被植物直接吸收利用,可以直接补充森林生态系统中 P 的流失^[5]。树干茎流和穿透雨构成林内雨,大气降水通过树冠和树干时,淋洗出附在叶面和树干上的尘埃等物质,因植被类型、种类组成和冠层结构不同^[6-7],使得雨水中的 P 元素含量发生改变。由于大量砍伐,福建三明地区大面积天然常绿阔叶林转变为杉木人工林和以米楮为优势树种的次生林^[8]。不同的经营方式形成不同的森林类型,相较于人工纯林,人工促进天然更新林是一种近自然森林,既不是纯自然也不是纯人工的森林,被认为是一种具有多种生态功能、且抗拒极端气候能力更强的森林生态系统^[9-10]。林型转变导致降水中 P 再分配及其淋溶作用还不清楚,米楮次生林在应对区域性 P 湿沉降方面较杉木人工林是否具有更积极的水文效应还有待深入认识。因此,本文以福建省三明市的中亚热带杉木人工林和米楮次生林为研究对象,通过测定 2015 年 6 月至 2018 年 8 月树干茎流和穿透雨中 P 浓度,探讨不同林分的树干茎流、穿透雨 P 浓度的差异,分析 P 浓度季节变化特征及影响因素,进一步认识亚热带森林 P 随水文过程的迁移动态,以为森林生态系统 P 循环过程提供科学基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地选择在福建三明森林生态系统与全球变化研究站陈大镇观测点(26°19'N,117°36'E),该地区为中亚热带区域,年均气温 20.1℃,植被以常绿阔叶林为主,年均降水量 1 749 mm,且集中在 3—8 月,土壤类型为黑云母花岗岩发育成的沙质红壤。由于不同更新方式形成不同的森林类型,其中杉木人工林是 1976 年次生林皆伐后人工营造的纯林,其平均海拔 300 m,坡度 36°,林分密度 2 858 株/hm²,平均树高 18.2 m,平均胸径 15.6 cm,叶面积指数 3.1,郁闭度 89%。林下植被主要以芒萁(*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn.)、狗骨柴(*Diplospora dubia* (Lindl.) Masam.)、毛冬青(*Ilex pubescens* Hook.et Arn.)为主。米楮次生林是 1976 年天然林经过择伐后封山育林演替形成,其平均海拔 330 m,坡度 33°,林分密度 3 788 株/hm²,平均树高 16.2 m,平均胸径 13.0 cm,叶面积指数 4.0,郁闭度 93%。主要树种有米楮、闽粤栲(*Castanopsis fissa* Rehd.et Wils.)、黄丹木姜子(*Litsea elongata* (Wall.ex Nees) Benth.et Hook. f.)、新木姜子(*Neolitsea aurata* (Hayata) Koidz.)等^[8,11]。

1.2 试验设计与观测方法

1.2.1 野外试验设计 树干茎流收集是将样地的树木胸径分为 7 个径级(杉木 6 个径级),分别为 4~8, 8~12,12~16,16~20,20~24,24~28,28 cm 以上,每个径级选择 2~3 株标准木^[11]。在米楮次生林中其他树种根据重要性用平均标准木法选取 4 株标准木。在树干约 1.3 m 处用内径 2.5 cm、长约 150 cm 的聚氯乙烯胶管螺旋状环绕 1 周,管末端接密封口的容器。穿透雨收集是在样地内随机放置 12 个内径为 70 cm 的漏斗形装置,在漏斗下端接内径 30 cm、高 60 cm 的雨量收集装置。

1.2.2 观测方法 2015年6月至2018年8月,在降雨后,使用500 mL的聚乙烯瓶采集水样,采样前先用去离子水清洗干净瓶子,再用水样润洗2~3次后进行取样。水样取回后先存储于4℃的冰箱内,随后取出,过0.45 μm滤膜,用滤液润洗2~3次经去离子水润洗过的120 mL的聚乙烯杯,再将滤液装入,最后将水样放入冰箱储存。总磷采用钼锑抗比色法测定(LY/T 1232—1999)^[12]。

1.3 数据处理与分析方法

1.3.1 数据处理 树干茎流量(stemflow, SF, mm)的计算公式为^[13]:

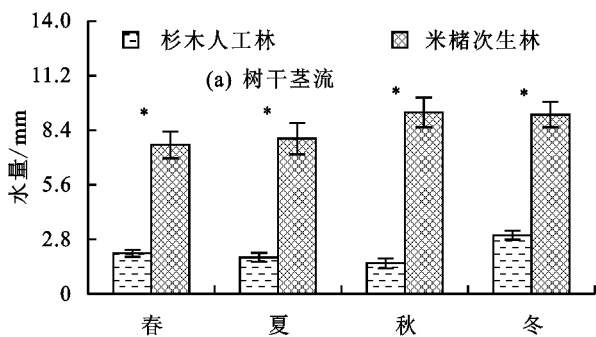
$$SF = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times M_i}{S_p \times 1000} \quad (1)$$

式中: n 为树干径级数; C_i 为观测的径级为 i 的树干茎流体积(mL); M_i 为径级为 i 的树木株数; S_p 为样地面积(400 m²)。

穿透雨量(throughfall, TF, mm)的计算公式为:

$$TF = \frac{V}{A} \quad (2)$$

式中: V 为穿透雨体积(L); A 为穿透雨收集器的接收面积(m²)。

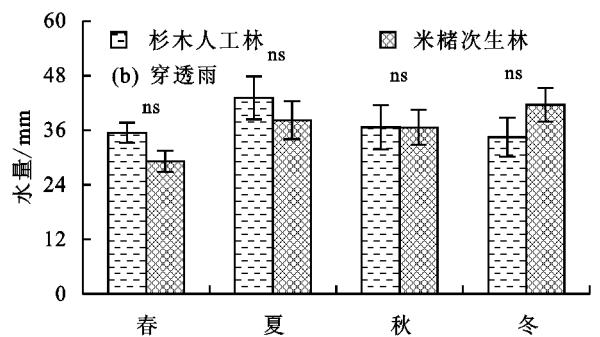


1.3.2 分析方法 采用独立样本 t 检验(independent-sample t test)比较不同林分树干茎流和穿透雨P浓度在不同年份和季节的差异显著性,以及不同林分树干茎流和穿透雨水量在季节上的差异显著性;采用非参数检验(nonparametric tests)比较同一林分在不同年份和季节的差异显著性;使用Pearson相关性系数检验P浓度与水量的相关性,统计检验的显著性水平设为 $p=0.05$ 。使用SPSS 20.0软件进行数据分析,Origin 9软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 杉木人工林和米楮次生林水量季节比较研究

2个林分的穿透雨水量均明显高于树干茎流量(图1),其中杉木人工林穿透雨水量是树干茎流量的18.5倍,米楮次生林穿透雨水量是树干茎流量的4.2倍。2个林分的树干茎流量在4个季节均具有显著性差异,米楮次生林均高于杉木人工林,在秋季差异最大,秋季米楮次生林树干茎流量平均值为9.31 mm,杉木人工林树干茎流量平均值为1.57 mm,相差5.93倍。但2个林分的穿透雨水量在季节上无差异,杉木人工林穿透雨水量平均值为37.42 mm,米楮次生林穿透雨水量平均值为36.40 mm。



注: *表示同一时间2个林分差异显著($p < 0.05$); ns表示同一时间2个林分差异不显著($p > 0.05$)。

图1 杉木人工林和米楮次生林在不同季节的树干茎流和穿透雨水量

2.2 杉木人工林和米楮次生林树干茎流磷浓度

在2015—2018年杉木人工林和米楮次生林的树干茎流P浓度的变化趋势基本一致,变化范围分别为0.002~0.026, 0.003~0.024 mg/L(图2和图3)。在年份上,2个林分平均浓度无差异;在月份上,个别月份具有显著性差异,在具有显著性差异的月份里,除2015年11月和2018年2月外,其他月份的杉木人工林的树干茎流P浓度均分别高于米楮次生林。此外,在夏季2个林分的树干茎流P浓度具有显著差异,杉木人工林的P浓度(0.020 mg/L)显著高于米楮次生林的P浓度(0.013 mg/L)。同一林分中,树干茎流P浓度在季节上具有显著差异,均呈现夏季高、冬季低的特点。杉木人工林P浓度夏季平均为0.020 mg/L,冬季平均为0.008 mg/L,相差2.5倍。

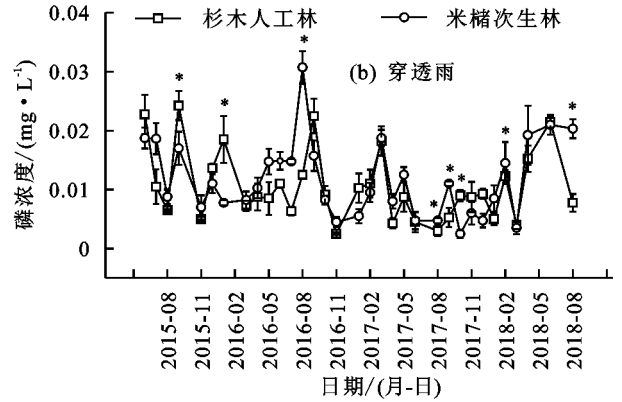
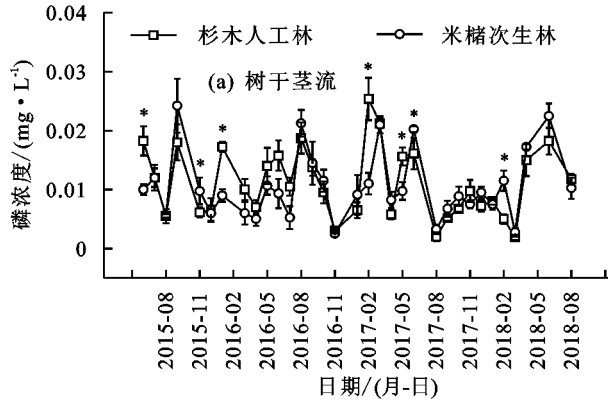
米楮次生林P浓度夏季平均为0.013 mg/L,冬季平均为0.008 mg/L,相差1.63倍。

2.3 杉木人工林和米楮次生林穿透雨磷浓度

在2015—2018年杉木人工林和米楮次生林林内穿透雨P浓度的变化趋势基本一致,变化范围分别为0.003~0.024, 0.003~0.031 mg/L(图2和图3)。在年份上,2个林分平均浓度无差异;在月份上,个别月份具有显著性差异,在具有显著性差异的月份里,除2016年2月和2017年10月外,其他月份的米楮次生林的穿透雨P浓度均高于杉木人工林。此外,在夏季2个林分的穿透雨P浓度具有显著差异,米楮次生林P浓度(0.015 mg/L)显著高于杉木人工林P浓度(0.012 mg/L),这与树干茎流相反。不同林分在林内季节上表现不同,杉木人工林穿透雨P浓度在季节上无显著性

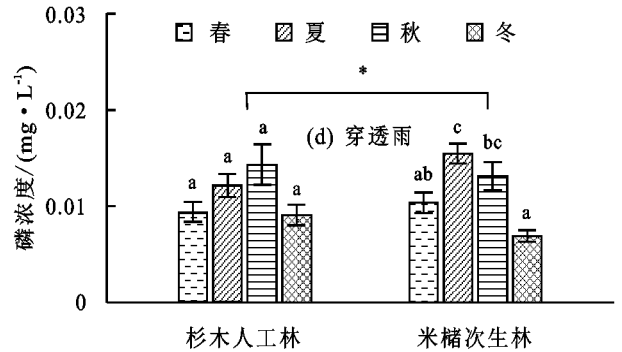
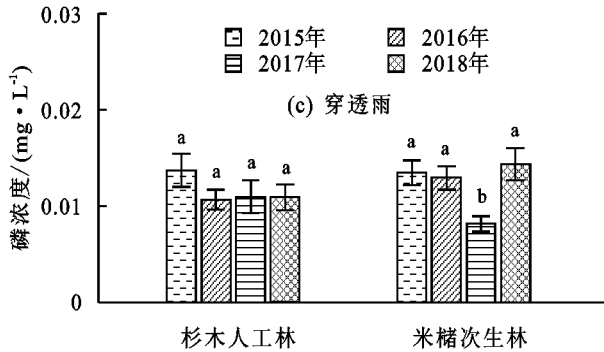
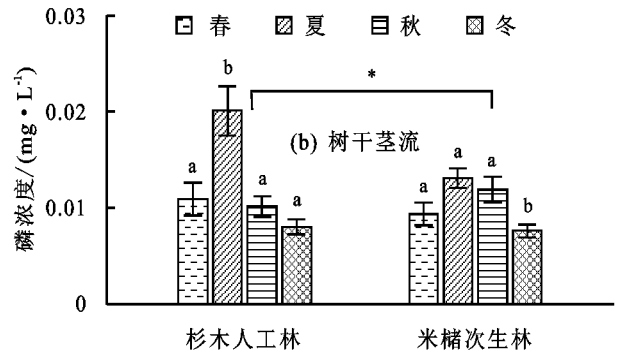
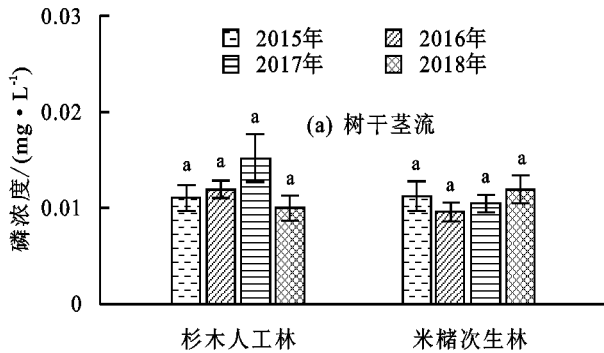
差异,平均为 0.011 mg/L;而米楮次生林穿透雨 P 浓度在季节上存在显著性差异,夏秋较高,平均为 0.014 mg/L,冬春偏低,平均为 0.008 mg/L。杉木人工林和米楮次生林的树干茎流中平均 P 浓度为 0.011

mg/L,穿透雨的平均浓度为 0.012 mg/L,P 浓度在 2 种林分的树干茎流和穿透雨间无显著性差异,且 2 种林分的树干茎流和穿透雨的变化趋势基本一致,都是在夏季 P 浓度较高,冬季 P 浓度偏低。



注: * 表示同一时间 2 个林分差异显著($p < 0.05$)。

图 2 2015—2018 年杉木人工林和米楮次生林树干茎流和穿透雨中磷浓度动态特征



注: * 表示同一时间不同林分差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一林分不同时间差异显著($p < 0.05$)。

图 3 杉木人工林和米楮次生林树干茎流和穿透雨在不同年份和季节的磷浓度

2.4 杉木人工林和米楮次生林磷浓度与对应水量的关系

对杉木人工林和米楮次生林 P 浓度与对应水量进行 Pearson 相关分析(表 1)表明,总体上水量与 P 浓度的相关性较小,杉木人工林 P 浓度与水量的相关性更强,不同林分对水量响应呈现差异性。杉木人工林 P 浓度与树干茎流水量和穿透雨水量均呈现负相关关系,随着树干茎流水量和穿透雨水量增加,P 浓度呈下降趋势。米楮次生林 P 浓度与树干茎流水量和穿透雨水量均呈现正相关关系,随着树干茎流水量和穿透雨水量增加,P 浓度呈上升趋势。

表 1 杉木人工林和米楮次生林树干茎流和穿透雨磷浓度与相应水量的相关性

林分类型	对应水量	相关系数	p
杉木人工林	树干茎流	-0.115	0.191
	穿透雨	-0.138	0.116
米楮次生林	树干茎流	0.024	0.783
	穿透雨	0.022	0.800

3 讨论

大气降雨经过林冠层形成树干茎流和穿透雨进入到森林,是生态水文的基本过程之一^[14]。林冠层对降雨再分配后会影响到树干茎流和穿透雨中物质的

浓度,而树干茎流养分浓度往往较穿透雨高,虽然量少,但是浓度高,且其溶于水可顺着树干流入根部,直接被植被吸收利用,对于植被生长具有重要意义^[15]。本研究中,米楮与杉木的树干茎流P浓度没有显著差异($p>0.05$),说明树种对林冠层的养分作用不明显,这与杨林等^[16]和闫文德等^[17]的研究结果一致。植被的冠层、树皮是接受大气沉降物的场所,雨水经过时将其表面吸附的粉尘、微粒等沉降物冲刷下来,树干茎流携带尘埃颗粒的多少决定其养分含量的相对高低;同时,由于林冠的截留作用使得林内降雨的养分浓度升高,当树干茎流量较少时出现浓缩的现象^[18-19]。树干茎流量受降雨量、林冠特征、树皮粗糙度、冠层高度和株密度等多种因素的影响^[20-21]。此外,米楮属于常绿阔叶林,顶部渐尖或渐狭长尖,基部有时一侧稍偏斜,叶椭圆或长圆形,叶柄长通常不到10 mm,这样的林冠特征有利于树枝上的积水向树干集中,同时叶片面积较大,其表面吸附的尘埃也较多,冲刷下来的物质较多。而杉木属于针叶林,树冠尖塔形或圆锥形,其叶在主枝上辐射伸展,侧枝之叶基部呈二列状,枝条与主干分枝角度较大,直接流入主干的水分较少,不利于树枝上的积水向树干集中,也不利于接受大气沉降物。本研究中,杉木的胸径(15.6 cm)较米楮(13.0 cm)大,且树皮较粗糙,吸收水能力较强,所以获得树干茎流需要更多的降水^[22],且其林分密度(2 858株/hm²)较米楮(3 788株/hm²)小,郁闭度(89%)也较米楮(93%)小,所以杉木截留量较小,米楮树干茎流量高于杉木;但是雨水冲刷米楮冠层溶解更多的含P物质,同时承接的水量也更多,因此,总体上其P浓度与杉木没有太大差异。降水穿过林冠空隙或经过冠层截留后形成穿透雨进入林内,当雨量较小时,因为林分林冠结构不同,林冠层的饱和截留量也不同,差异较大;而随着降雨增大,林冠层快速达到饱和,截留率减小,后续降水基本形成穿透雨进入林内。由于研究区降雨出现雨量较大的概率高^[23],因而林分间穿透雨量差异较小,而穿透雨的P主要是来自于大气,2个林分的地理环境和立地条件相似,所以通过降雨获得的P基本一样,变化趋势也较一致。

P浓度在季节上表现出差异性($p<0.05$)(图3),主要是因为降雨量和林冠截留的沉降物质存在季节性波动。研究地空气质量高,远离污染源,植被覆盖率高,空气中的P物质含量较低,但是在夏秋季,由于台风作用,空气的变动幅度大,大气远距离传输,带来许多尘埃和微颗粒物,以及风使土壤扬尘,使得大气及树体表面的尘埃颗粒富集,增加降雨洗脱的沉降物,最终导致

夏秋季林冠截留的沉降物质比冬季多。此外,树木生长旺盛期往往是在夏季,不同树木的枝叶分泌物和叶片生理活动也不相同^[22]。所以虽然夏季降雨较多,但其沉降物质也较多,总体上浓度较高。冬季降水比较少,截留较少,且经过夏季集中降雨的冲刷作用后,将大气及树体表面的尘埃颗粒洗脱,从而导致冬季雨水中P浓度较低。此外,米楮夏季P浓度显著高于杉木($p<0.05$)(图3),这是因为夏季米楮的树干茎流量是杉木的4.2倍,所以米楮夏季树干茎流P浓度显著低于杉木。而在穿透雨量没有显著差异下,夏季米楮林冠获得更多的沉降物质,溶解较多的物质,使得米楮夏季穿透雨P浓度高于杉木。

本研究发现,P浓度与对应水量没有明显的相关性($p>0.05$)(表1),这与其他研究^[24]一致。大气降水经过植被冠层、树皮等,改变雨水中P浓度,其中既有物理、化学过程,也有生物过程^[2],因此P浓度受降雨特征、植被状况、林冠特征、酸度、温度、生态系统的生物多样性、风向风速以及人类活动的影响^[25]。有研究^[26]表明,降雨量不同,化学调节作用的强度不同,导致树干茎流、穿透雨中元素含量不同。当降雨强度较小时,雨滴呈较细小液滴状,从而增大与大气接触的表面积,可以黏附、溶解更多尘埃颗粒,且一般降雨强度小时其降雨历时也较长,对大气的冲刷时间长,导致P浓度较高。如果长时间不降雨,导致大气中悬浮物质增多,冠层表面的尘埃和颗粒物质也增加,增加降雨洗脱的物质,使得降雨中P浓度较高。在靠近尘埃、气体、活性火山灰产生源,如工厂、地区性污染源、采掘场、海岸边等地方,林内雨养分含量也会受到影响。

4 结论

杉木人工林树干茎流和穿透雨P浓度变化范围分别为0.002~0.026,0.003~0.024 mg/L,米楮次生林树干茎流和穿透雨P浓度变化范围分别为0.003~0.024,0.003~0.031 mg/L,2个林分树干茎流和穿透雨P浓度均在夏季表现出显著差异。杉木人工林树干茎流P浓度夏季平均为0.020 mg/L,冬季平均为0.008 mg/L;米楮次生林树干茎流P浓度夏季平均为0.013 mg/L,冬季平均为0.008 mg/L。杉木人工林穿透雨P浓度在季节上无显著性差异,平均为0.011 mg/L;而米楮次生林穿透雨P浓度夏秋较高,平均为0.014 mg/L,冬春偏低,平均为0.008 mg/L。杉木人工林穿透雨水量是树干茎流水量的18.5倍;米楮次生林穿透雨水量是树干茎流水量的4.2倍。2个林分的树干茎流水量在4个季节均具有显著性差异,米楮次生林均高于杉木人工林,而穿透雨水量在季节上无

显著差异。总体上,P 浓度与对应水量相关性较小,其中杉木人工林 P 浓度与树干茎流量和穿透雨量均呈负相关关系,米楮次生林 P 浓度与树干茎流量和穿透雨量均呈正相关关系。表明在不同林分林冠结构和形态学特征的差异能显著影响亚热带森林生态系统降水中 P 的再分配,这为营造人工促进天然更新林和人工林提供森林水文数据,为合理经营利用森林资源、保护森林生态系统提供科学理论依据。

参考文献:

- [1] 孔令仑,黄志群,何宗明,等.不同林龄杉木人工林的水分利用效率与叶片养分浓度[J].应用生态学报,2017,28(4):1069-1076.
- [2] 陈美领,陈浩,毛庆功,等.氮沉降对森林土壤磷循环的影响[J].生态学报,2016,36(16):4965-4976.
- [3] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M].New York: Springer,2002.
- [4] 甘健民,薛敬意,赵恒康.云南哀牢山大气降雨过程中养分输入及输出变化的初步研究[J].自然资源学报,1995,10(1):43-50.
- [5] Vandecar K L, Runyan C W, D'Odorico P, et al. Phosphorus input through fog deposition in a dry tropical forest [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,2015,120(12):2493-2504.
- [6] Siegert C M, Levia D F, Hudson S A, et al. Small-scale topographic variability influences tree species distribution and canopy throughfall partitioning in a temperate deciduous forest [J]. Forest Ecology and Management, 2016,359:109-117.
- [7] Hofhansl F, Wanek W, Drage S, et al. Topography strongly affects atmospheric deposition and canopy exchange processes in different types of wet lowland rainforest, Southwest Costa Rica [J]. Biogeochemistry, 2011,106(3):371-396.
- [8] 江森华,吕茂奎,胥超,等.亚热带米楮次生林和杉木人工林林冠截留特征比较[J].水土保持学报,2017,31(1):116-121,126.
- [9] 卢德亮,朱教君,王高峰.树木萌蘖更新研究进展与展望[J].生态学杂志,2020,39(12):4178-4184.
- [10] 张会儒,雷相东,李凤日.中国森林经理学研究进展与展望[J].林业科学,2020,56(9):130-142.
- [11] 吕茂奎,谢锦升,江森华,等.米楮常绿阔叶次生林和杉木人工林穿透雨和树干径流可溶性有机质浓度和质量的比较[J].应用生态学报,2014,25(8):2201-2208.
- [12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [13] 何常清,薛建辉,吴永波,等.岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配[J].应用生态学报,2008,19(9):1871-1876.
- [14] 盛后财,蔡体久,俞正祥.大兴安岭北部兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 林下穿透雨空间分布特征[J].生态学报,2016,36(19):6266-6273.
- [15] 石磊,盛后财,满秀玲,等.兴安落叶松林降雨再分配及其穿透雨的空间异质性[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(2):90-96.
- [16] 杨林,王明,王传华.神农架地区次生林主要树种林冠雨的氮磷营养特征[J].生态学杂志,2018,37(4):1018-1025.
- [17] 闫文德,田大伦,陈书军,等.4 个树种茎流养分特征研究[J].林业科学,2005,41(6):53-59.
- [18] Laclau J P, Ranger J, Deleporte P, et al. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo [J]. Forest Ecology and Management, 2005,210(1/3):105-119.
- [19] Fan H B, Hong W. Estimation of dry deposition and canopy exchange in Chinese fir plantations [J]. Forest Ecology and Management, 2001,147(2):99-107.
- [20] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate [J]. Hydrological Processes, 2000,14(16/17):2903-2920.
- [21] Yan T, Wang Z H, Liao C G, et al. Effects of the morphological characteristics of plants on rainfall interception and kinetic energy [J/OL]. Journal of Hydrology, 2021, 592. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125807>.
- [22] 武秀娟,蔡体久,李华,等.凉水国家级自然保护区原始红松林和人工落叶松林降雨的水化学特征[J].中国水土保持科学,2008,6(6):37-42.
- [23] 吕茂奎,谢锦升,林廷武,等.降雨对米楮次生林和杉木人工林林冠可溶性有机碳迁移的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):134-138.
- [24] 于小军,汪思龙,邓仕坚,等.亚热带常绿阔叶林和杉木人工林茎流与穿透雨的养分特征[J].生态学杂志,2003,22(6):7-11.
- [25] Whelan M J, Sanger L J, Baker M, et al. Spatial patterns of throughfall and mineral ion deposition in a lowland Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale [J]. Atmospheric Environment, 1998,32(20):3493-3350.
- [26] 马雪华,杨茂瑞,胡星弼.亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J].林业科学,1993,29(3):199-206.