

秦岭火地塘 3 种主要林型林冠层对 不同 pH 值降雨水质的影响

高晓晓^{1,3}, 张胜利^{2,3}, 邱志斌^{1,3}, 潘泰臣⁴, 于金鑫⁵

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 陕西 杨凌 712100; 4.广西壮族自治区 环境应急与事故调查中心 广西 南宁 530028; 5.中国电建集团 中南勘测设计研究院有限公司 湖南 长沙 410014)

摘要: [目的] 研究秦岭火地塘林区 3 种主要林型林冠层对不同 pH 值降雨水质的影响过程, 为研究酸沉降对森林生态系统的影响提供基础。[方法] 以林区油松林、华山松林、锐齿栎林为研究对象, 自制人工降雨器模拟降雨, 分析各林分林冠穿透雨水化学物质浓度随降雨时间及降雨酸度的变化规律。[结果] ①模拟降雨 10 min 或 20 min 3 种林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb , Zn , Cd 浓度达到峰值, 降雨 20~30 min 后浓度降低并趋于稳定, 随降雨时间延长总体上呈先升高后降低并趋于稳定的规律。②针叶林、阔叶林不同的叶组织特性影响林冠中化学物质淋洗量。相同 pH 值降雨淋洗, 油松、华山松林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb , Zn , Cd 浓度多表现为大于锐齿栎。③酸雨能促进林冠中化学物质淋失。对于同一树种, 不同 pH 值降雨淋洗, 林冠穿透雨中 NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb , Cd 浓度值及浓度变化幅度大小大体表现为: $\text{pH}_{4.0} > \text{pH}_{5.0} > \text{pH}_{7.0}$ 。[结论] 根据林冠穿透雨水化学物质浓度随降雨时间动态变化规律, 将林冠对穿透雨水水质影响过程划分为降雨淋洗(降雨开始至降雨 10 min 或 20 min)和降雨淋溶(降雨约 20~30 min 以后)两个阶段。降雨淋洗阶段, 林冠层对水质变化影响大。

关键词: 油松林; 华山松林; 锐齿栎林; 林冠层; 降雨水质; pH 值

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-0103-07

中图分类号: S715.3

文献参数: 高晓晓, 张胜利, 邱志斌, 等. 秦岭火地塘 3 种主要林型林冠层对不同 pH 值降雨水质的影响 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 103-109. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.015; Gao Xiaoxiao, Zhang Shengli, Qiu Zhibin, et al. Effects of canopy of three main forest types on rainfall water quality with different pH values in Huoditang forest area of Qinling Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 103-109.

Effects of Canopy of Three Main Forest Types on Rainfall Water Quality With Different pH Values in Huoditang Forest Area of Qinling Mountains

Gao Xiaoxiao^{1,3}, Zhang Shengli^{2,3}, Qiu Zhibin^{1,3}, Pan Taichen⁴, Yu Jinxin⁵

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Qinling Forest Ecosystem National Field Research Station, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Guangxi Environmental Emergency and Accident Investigation Center, Nanning, Guangxi 530028, China; 5. Power China Zhongnan Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha, Hu'nan 410014, China)

Abstract: [Objective] The effects of forest canopy type on water quality of rainfall with different pH values were studied in order to provide a basis for studying the effects of acid rainfall on forest ecosystems in the Huoditang forest area of the Qinling Mountains. [Methods] A self-made artificial rainfall device was used to

收稿日期: 2021-01-17

修回日期: 2021-03-02

资助项目: 中华人民共和国科学技术部“华山松优质建筑用材林高效培育技术研究”(2017YFD0600504-2); 西北农林科技大学森林生态系统服务功能科研成果培育(Z102021809)

第一作者: 高晓晓(1995—), 女(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持工程与森林水文。Email: xiaoxiaogao0816@163.com。
通讯作者: 张胜利(1965—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持工程与森林水文研究。Email: victory6515@sina.com。

simulate rainfall on three main forest types (*Pinus tabulaeformis*, *Pinus armandii*, and *Quercus aliena* var. *acuteserrata*). Changes in the concentration of rainwater chemicals in the canopy of each forest were analyzed by rainfall time and rainfall acidity. [Results] ① The concentrations of NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb, Zn, and Cd in the throughfall of the three forests canopies reached peak values after 10—20 minutes, and the concentration decreased and stabilized after 20—30 min of rainfall. The concentrations generally increased first, and then decreased and tended to be stable with the extension of rainfall time. ② The different leaf tissue characteristics of the conifer forest and the broadleaved forest affected the leaching amount of chemicals in forest canopies. With the same pH value, the concentrations of NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb, Zn, and Cd in the throughfall were higher in *P. tabulaeformis* and *P. armandii* than in *Q. acuminata*. ③ Acid rain can promote the loss of chemicals in forest canopies. For the same tree species, with different pH values of leaching rain, the concentrations of NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb, and Cd in canopy throughfall and the variation range of their concentrations generally followed the order of $\text{pH}_{4.0} > \text{pH}_{5.0} > \text{pH}_{7.0}$. [Conclusion] According to the dynamic change process of chemical substance concentration of canopy throughfall with rainfall time, the impact process of canopy on throughfall water quality can be divided into two stages: rainfall washing (rainfall of about 10—20 minutes) and rainfall leaching (rain starts to 10 or 20 minutes later). In the rainfall washing stage, the canopy has a great influence on the water quality.

Keywords: *Pinus tabulaeformis* forest; *Pinus armandii* forest; *Quercus acuteserrata* forest; canopy; rainfall water quality; pH value

近些年来,受全球气候异常的影响,水旱频繁,水土流失严重,又因环境污染,造成水质恶化,水质型缺水^[1]日益严重。为保护水资源,森林对水质的改善作用越来越受到人们重视,森林与水质研究成为热点。

森林生态系统是陆地生态系统的主体,大气降水是陆地生态系统化学物质的主要来源之一,为森林生态系统养分循环及平衡提供基础。从大气降雨进入森林生态系统,到径流形成的整个过程中,森林林冠层、枯枝落叶层、森林土壤层等各层次均对水质产生影响,林冠层是大气降雨进入森林生态系统的第一个作用面,林冠层在净化水质方面起关键作用^[2]。关于森林林冠层对水质影响方面的研究较多,多数研究只是通过简单差减法^[3-7]或离子交换树脂法^[8]对森林林冠层水质效应进行分析,如张胜利等^[3]研究了秦岭林区天然林冠层的水质效应,均说明了林冠层具有调节和稳定大气降雨水质作用^[3-5],但缺少研究林冠层影响水质的过程。研究林冠层对降雨水质的影响过程,将有助于进一步了解大气降雨进入森林生态系统后水质发生变化的机理。

秦岭南坡中山地带是秦巴山区水源涵养林的集中分布区^[10],又是南水北调中线工程的重要水源区^[11],其森林水质的好坏,直接影响受水区域的饮用水质量。近年来,秦岭周边河南、陕西、湖北酸雨明显增加,秦岭林区雨水有酸化趋势^[12]。酸雨能促进林冠中物质的淋失^[13],不同酸碱度下,离子的可移动性差别很大^[14]。为研究不同 pH 值降雨透过林冠穿

透雨水质变化过程,本试验在地处秦岭南坡中山地带中部的火地塘林区选择 3 种典型林分:油松林、华山松林和锐齿栎林,模拟不同 pH 值降雨淋洗林冠,就其林冠层对降雨水质影响过程进行分析,旨在为研究森林冠层对水质的影响提供理论依据,同时为研究酸沉降对森林生态系统的影响提供基础。

1 材料与方 法

1.1 研究地概况

火地塘林区(108°25′—108°30′E, 33°25′—33°29′N)地处秦岭南坡中山地带中部,位于陕西省宁陕县境内,面积 22.25 km²,海拔 1 470~2 473 m。林区气候为暖温带湿润山地气候,年均气温 8~12 °C,降雨主要集中在 5—10 月,雨季为 7—9 月,多年平均降水量 1 130 mm,降雪从 10 月末到次年 4 月初。林区地形陡峻,坡度一般为 30°~35°。林区土壤主要为山地棕壤,主要成林树种有锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、华山松(*Pinus armandii*)、红桦(*Betula albosinensis*)、光皮桦(*B. luminiifera*)、青杆(*Picea wilsonii*)、巴山冷杉(*Abies fargesii*)和山杨(*Populus davidiana*)等^[9]。

1.2 模拟酸雨制备

酸雨是指 pH 值在 5.60 以下的降雨、降雪以及通过其他的形式产生的大气降雨^[15]。近年来,秦岭周边地区的重庆、河南、湖北等地酸雨日趋严重且主

要为硫酸型^[12]。硫酸型污染物远距离输入,秦岭林区雨水有酸化的趋势,且雨季雨水酸化趋势较为明显,如 2010 年雨水平均 pH 值为 5.1,林区存在酸雨现象^[12]。

为最大程度模拟林区雨季自然降雨,本研究于 2020 年 7 月 11 日接取林外天然雨水为模拟试验用水原液,测得雨水平均 pH 值为 7.0。以天然雨水为原液加硫酸,借助酸度计测定,配制成 pH 值为 4.0, 5.0 的 2 个梯度的酸雨。模拟降雨设置 3 个水平,分别为 pH 值 7.0(天然雨水),4.0,5.0。

1.3 试验树种及树冠模型制作

选择火地塘林区有代表性的 3 种林型(油松林、华山松林、锐齿栎林)作为研究对象,在研究区内选取代表性地段,设置油松、华山松、锐齿栎 20 m×20 m 的样地各 1 个。每样地选取能够代表平均长势的 3 株样树,实测油松、华山松、锐齿栎平均叶面积指数分别为 4.13,3.79,2.61。按树高将林冠近似等分为上、中、下 3 个层次,用高枝剪采集其冠层 4 个方位 3 个层次的树枝,将枝样混合。

参照高柳威等^[16]制作的模拟林冠模型,将叶面积指数作为林冠模型构建的控制性参数,使模拟树冠接近天然样地叶面积指数,分别制作油松、华山松、锐齿栎林冠模型各 1 个。林冠模型主干采用长 1.5 m,直径 110 mm 的空心硬质 PE 管,结合野外试验条件,在主干 PE 管上每间隔 300 mm 错位钻孔,孔口向上倾斜,每层根据树枝大小钻孔 3~4 个,共设 5 层,将树枝插入孔中固定以模拟枝干。

1.4 模拟降雨试验设计

自制模拟降雨装置,采用单喷头、下喷式可调喷头模拟降雨,喷洒直径约 2 m,为使雨滴终点速度接近天然降雨,喷头固定在树冠模型正上方 2 m^[17-18],利用自吸泵,将水箱中的水通过输水管送到喷头出口。

根据实测降雨数据^[19],并结合模拟试验要求,由于设备限制,较小强度的模拟降雨均匀度达不到试验要求^[20],试验模拟降雨强度选定为 10 mm/h。试验开始之前,在林冠四周放置 4 个直径为 23 cm 塑料桶进行雨强率定。模拟降雨历时 60 min,从开始降雨 0 时刻计,每间隔 10 min 采集一次水样,将 4 个塑料桶中的水样混合,量取 100 ml 水样装瓶,冷冻保存待测。

1.5 测定项目及方法

根据研究的需要以及地表水环境质量标准(GB3838-2002),选取以下指标进行测定: NO_3^- ,

NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb , Zn , Cd 。为确保数据的准确性,水样测定需做 3 次重复,如果重复间差异过大时,则相应增加测样次数,剔除明显不合理的数据后取均值。水样测定方法见表 1。

表 1 水质指标测定方法

序号	测定指标	测定方法
1	NO_3^- , NH_4^+	AA3 型连续流动化学分析仪
2	K^+	火焰光度计
3	Ca^{2+} , Mg^{2+}	原子吸收分光光度计
4	Pb , Zn , Cd	电感耦合等离子质谱仪

1.6 数据统计分析

利用 Microsoft Excel 和 SPSS 进行数据分析与制图。将测定的水质数据求取均值,图中 0 时刻水质数据为模拟试验用水化学物质浓度。采用 Person 法分析穿透雨中水化学物质浓度与降水 pH 值的相关性($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- 浓度动态变化过程

模拟降雨表明(图 1),降雨 pH 值为 7.0 时,降雨 10 min 3 种林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- 浓度均达到峰值,随后降低,降雨 30 min 后林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- 浓度值变化趋于稳定。降雨 pH 值为 4.0, 5.0 时,降雨 10 min, 3 种林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- 浓度均达到峰值,降雨 20 min 后林冠穿透雨中 NH_4^+ 浓度值变化趋于稳定,而 NO_3^- 浓度在降雨 30 min 后变化趋于稳定。3 种林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- 浓度整体上表现为随降雨时间延长呈先升高后降低并趋于稳定的规律。

降雨中 NH_4^+ , NO_3^- 浓度分别为 0.495 mg/L, 0.236 mg/L。相同 pH 值降雨淋洗,降雨 10 min 时 3 种林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- 浓度增加均达到峰值,但增加幅度不同,浓度增加幅度整体上表现为油松、华山松大于锐齿栎,说明针叶林、阔叶林不同的叶组织特性影响林冠中 NH_4^+ , NO_3^- 淋洗量。

对于同一树种,不同 pH 值降雨淋洗,林冠作用效果不同。由图 1 可知,降雨 pH 值为 5.0 时,华山松林冠穿透雨中 NH_4^+ 浓度变化幅度大于 pH 值为 7.0 和 4.0 时的降雨,Person 相关分析表明林冠穿透雨中 NH_4^+ 浓度与降雨 pH 值极相关($p = 0.004 < 0.05$)。但各林分林冠穿透雨中 NO_3^- 浓度基本不受降雨 pH 值影响。

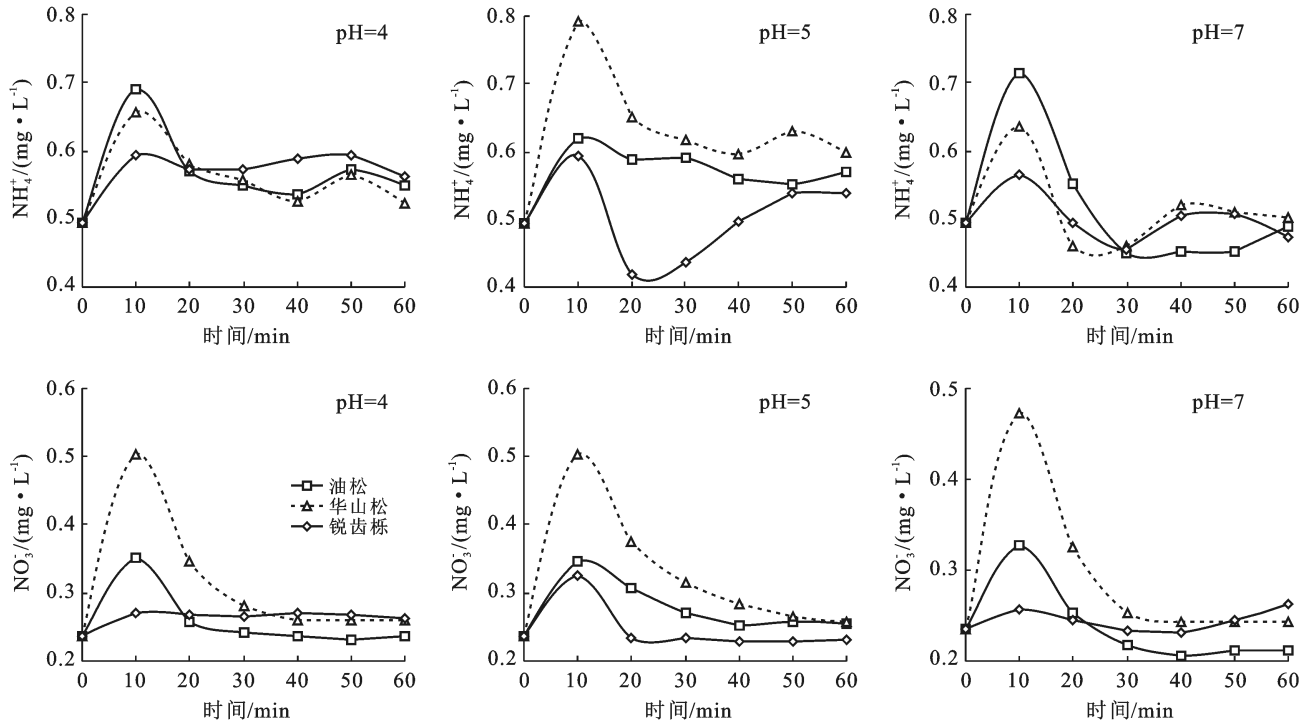


图 1 火地塘林区 3 种主要林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- 浓度

2.2 林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度动态变化过程

林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度动态变化过程如图 2 所示。降雨 pH 值为 7.0 时,降雨 10 min 时 3 种林分林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度均达到峰值,随后降低,降雨 20 min 后浓度值变化趋于稳定。降雨 pH 值为 5.0 时,降雨 10 min 时 3 种林分林冠穿透雨中 Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度均达到峰值,随后降低,降雨 20 min 后浓度值变化趋于稳定。华山松、锐齿栎林冠穿透雨中 K^+ 浓度变化过程表现相似,但油松林冠穿透雨中 K^+ 浓度在降雨 10 min 达到峰值后随降雨时间延长降低,在降雨 50 min 后趋于稳定。降雨 pH 值为 4.0 时,降雨 10 min 油松林冠穿透雨中 K^+ , Mg^{2+} 浓度达到峰值,降雨 20 min 时 Ca^{2+} 浓度达到峰值;华山松林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度在降雨 10 min 时浓度达到峰值,随后降低,降雨 30 min 浓度趋于稳定;锐齿栎林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度在降雨 20 min 时浓度达到峰值,降雨 30 min 浓度趋于稳定。整体上看,除 pH 值 4.0 降雨淋洗油松林冠,其他模拟降雨试验下穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度均表现为随降雨时间延长总体上呈先升高后降低并趋于稳定的规律。降雨 pH 值为 4.0 时,油松林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度值变化幅度较大,可能是因为油松林冠本身 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度高,降雨淋洗量很大程度上和林冠本身含量相关,又因为酸雨促进了林冠中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 淋失。酸雨淋洗,细胞膜受损,促使细胞质中 K^+ ,

Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度发生变化以缓冲酸雨的伤害,从而使得 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 淋失量增大。在生理学上 Ca^{2+} 有防止细胞膜损伤和渗漏、稳定膜结构和维持膜的完整性等作用^[21],许多关于森林林冠矿质离子淋洗量的研究结果都表明 Ca^{2+} 的淋失量最大^[22]。

降雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度分别为 0.3 mg/L, 3.752 mg/L, 0.295 mg/L。相同 pH 值的降雨淋洗,相较于华山松、锐齿栎,油松林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度值变化幅度大,华山松、锐齿栎林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度值范围接近,说明油松林冠中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 淋失量较大,降雨淋洗对华山松、锐齿栎林冠中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 作用效果相当。

对于同一树种,不同 pH 值降雨淋洗,林冠作用效果不同,油松最为明显。Person 相关分析表明林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度与降雨 pH 值相关($p_1 = 0.020$, $p_2 = 0.000$, $p_3 = 0.000 < 0.05$)。由图 2 知,降雨 pH 值为 4.0 时,油松林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度值及其浓度变化幅度明显大于 pH 为 5.0 和 7.0 的降雨淋洗,油松林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度值及其浓度变化幅度大小表现为 $\text{pH}_{4.0} > \text{pH}_{5.0} > \text{pH}_{7.0}$ 。说明不同 pH 值淋洗液影响林冠中物质的淋洗效果,酸雨有促进作用。

2.3 林冠穿透雨中 Pb, Zn, Cd 浓度动态变化过程

由图 3 可知,降雨 pH 值为 7.0 时,3 种林分林冠穿透雨中 Pb, Zn, Cd 浓度在整个模拟降雨过程中随降雨时间延长无明显变化,与供水水样中 Pb, Zn, Cd

浓度大小基本一致,说明此时降雨淋洗,林冠对穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度几乎不产生影响。降雨 pH 值为 4.0,5.0 时,降雨 10 min 时 3 种林分林冠穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度均达到均值,随后降低,降雨 30 min

林冠穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度变化趋于稳定。整体上看,3 种林分林冠穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度整体上随降雨时间延长总体上呈先升高后降低并趋于稳定的规律。

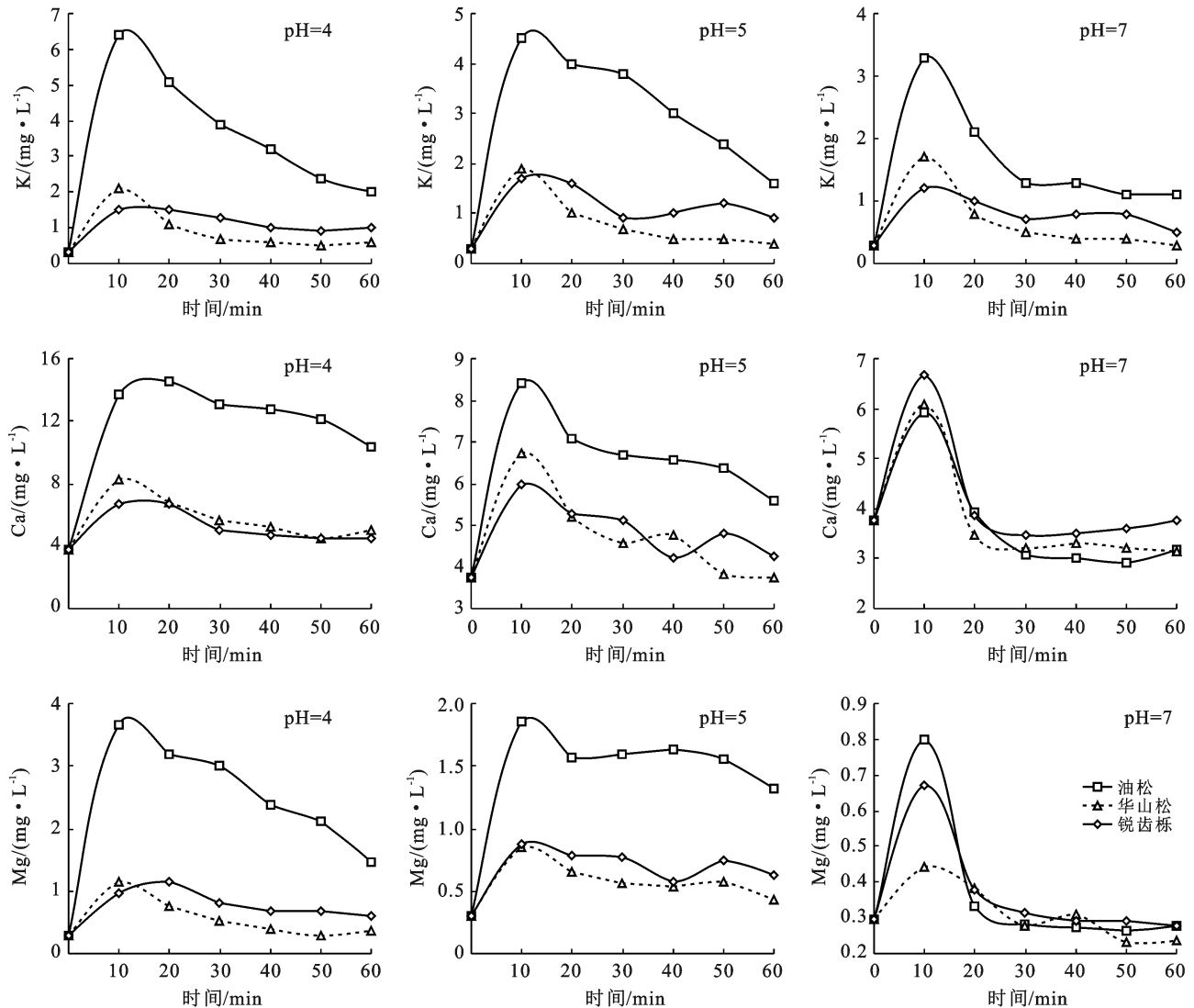


图 2 火地塘林区 3 种主要林分林冠穿透雨中 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 浓度

降雨中 Pb,Zn,Cd 浓度分别为 2.635, 72.579, 0.148 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。降雨 pH 值为 7.0 时,3 种林分林冠穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度值接近,与供水水样中 Pb,Zn,Cd 浓度大小基本一致,说明 pH 值为 7.0 降雨对 3 种林分林冠几乎无淋洗作用。降雨 pH 值为 4.0,5.0 时,华山松、油松林冠穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度变化幅度均大于锐齿栎,表现为针叶林林冠穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度大于阔叶林,说明林冠穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度受针叶林、阔叶林不同的叶组织特性影响。

对于同一树种,不同 pH 值降雨淋洗,林冠穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度值及浓度变化幅度大小大体表现为 $\text{pH}_{4.0} > \text{pH}_{5.0} > \text{pH}_{7.0}$,说明降雨 pH 影响林冠 Pb,Zn,Cd 淋失,且随降雨 pH 值减少,林冠 Pb,Zn,

Cd 淋失量增加。Person 相关分析表明林冠穿透雨中 Pb,Cd 浓度与降雨 pH 值相关($p < 0.05$),但 Zn 浓度与降雨 pH 值相关性不显著($p = 0.149, > 0.05$)。

3 讨论

3.1 林分类型对林冠穿透雨水质的影响

试验观察到,降雨 pH 值为 7.0 时,3 种林分林冠穿透雨中 Pb,Zn,Cd 浓度值接近,且与降雨中 Pb,Zn,Cd 浓度大小基本一致。除此以外,相同 pH 值降雨淋洗,3 种林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb,Zn,Cd 浓度及浓度增加幅度整体上表现为油松、华山松大于锐齿栎,表现为针叶林大于阔叶林。

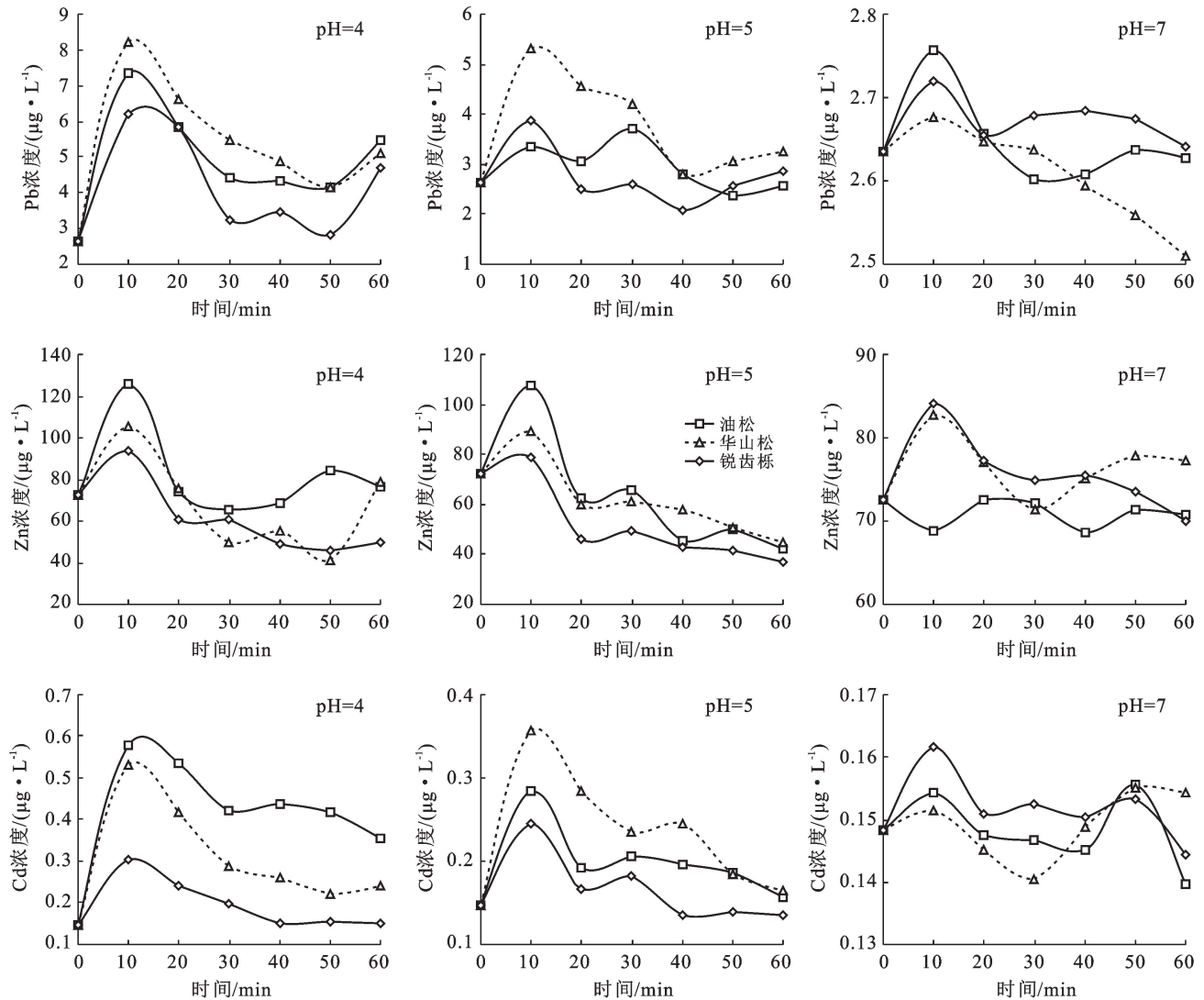


图 3 火地塘林区 3 种主要林分林冠穿透雨中 Pb, Zn, Cd 浓度

这可能是由于针叶林、阔叶林不同的叶组织特性影响穿透雨水化学物质浓度。针叶树种由于其叶片具有较厚的蜡质层、较大的叶表面积等结构特征较阔叶树种叶片有更强的滞留颗粒物能力^[23], 并且常绿针叶树种能够在全年持续吸附空气中的颗粒物, 降雨淋洗林冠, 针叶林林冠穿透雨中溶解较多颗粒物, 所以针叶林林冠穿透雨中化学物质浓度较高。

3.2 降雨 pH 值对林冠穿透雨水质的影响

Person 相关分析表明林冠穿透雨中 NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb, Cd 浓度与降雨 pH 值相关 ($p < 0.05$), NO_3^- , Zn 浓度与降雨 pH 值相关性不显著 ($p > 0.05$), 说明对于同一树种, 不同 pH 值降雨淋洗, 林冠作用效果不同, 降雨淋洗林冠中物质的效果也不同。

对于同一树种, 不同 pH 值降雨淋洗, 林冠穿透雨中 NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb, Cd 浓度值及浓度变化幅度大小大体表现为 $\text{pH}_{4.0} > \text{pH}_{5.0} > \text{pH}_{7.0}$ 。说明酸雨能促进林冠淋洗。已有研究也指出, 酸雨能加速

物质从林冠中淋失, 加速森林生态系统养分损失^[13], 但不同树种对酸雨耐受程度不同^[24]。各林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- 浓度基本不受降雨 pH 值影响, 这可能是由于不同于其他碱性离子, 林冠 NH_4^+ , NO_3^- 受降雨淋洗作用小^[25]。

3.3 林冠层对降雨水质的影响过程

除降雨 pH 值为 7.0 时, 3 种林分林冠穿透雨中 Pb, Zn, Cd 浓度随降雨时间延长无明显变化之外, 不同 pH 值降雨淋洗, 降雨 10~20 min 3 种林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb, Zn, Cd 浓度均到峰值, 降雨 20~30 min 后浓度变化趋于稳定, 浓度随降雨时间延长总体上呈先升高后降低并趋于稳定的规律。

这可能是因为在降雨初期, 降雨淋洗林冠表面颗粒物, 所以穿透雨中化学物质浓度升高。多个研究也证实了, 降雨淋洗, 大多数植物叶表面滞留的颗粒物在降雨初期受到的影响大, 在降雨开始的 10 min

内洗脱率增加的速率较大,在 30 min 以后逐渐趋于平稳^[20,26-27]。随降雨时间延长,林冠表面物质被淋洗干净之后,一方面降水淋溶吸附于枝叶表面或枝叶组织中的各种物质,另一方面,林冠发生生理吸收、物理吸附以及与降雨发生化学反应^[28],所以在降雨后期穿透雨中化学物质浓度变化幅度较小,基本趋于稳定。

根据林冠穿透雨水化学物质浓度动态变化过程,将该过程划分为降雨淋洗和降雨淋溶两个阶段。降雨初期(降雨开始至降雨 10 min 或 20 min)划分为降雨淋洗阶段,该阶段特点是降雨迅速淋洗林冠表面颗粒物,林冠穿透雨水化学物质浓度升高达到峰值。降雨后期(约 20~30 min 以后)划分为降雨淋溶阶段,该阶段特点是林冠穿透雨水化学物质浓度变化幅度小而稳定。实际上,在整个降雨过程中,降雨经过林冠层,降雨淋洗、淋溶、林冠的吸收、吸附等现象在一定程度上是同时发生的,穿透雨中化学物质浓度取决于降雨中化学物质向林冠的输入、降雨对雨前林冠上滞留物的冲洗、降雨对植物组织分泌物的淋溶、林冠截流蒸散发、林冠对降雨中化学物质的输入量、固体颗粒或气体的吸附吸收等^[29]。这些过程相互联系,本文将林冠对穿透雨水水质影响过程划分为降雨淋洗和降雨淋溶两个阶段,只是为了简化分析,并不意味着一次降雨事件中林冠对降水水质的影响过程可以截然分为降雨淋洗、降雨淋溶两个阶段。

4 结论

(1) 针叶林、阔叶林不同的叶组织特性影响林冠中化学物质淋洗量。相同 pH 值降雨淋洗,油松、华山松针叶林林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb , Zn , Cd 浓度多表现为大于锐齿栎阔叶林。

(2) 酸雨能促进林冠中化学物质淋失。林冠穿透雨中 NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb , Cd 浓度与降雨 pH 值相关($p < 0.05$), NO_3^- , Zn 浓度与降雨 pH 值相关性不显著($p > 0.05$)。对于同一树种,不同 pH 值降雨淋洗,林冠穿透雨中 NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb , Cd 浓度值及浓度变化幅度大小大体表现为 $\text{pH}_{4.0} > \text{pH}_{5.0} > \text{pH}_{7.0}$ 。

(3) 模拟降雨表明,降雨 10~20 min 3 种林分林冠穿透雨中 NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb , Zn , Cd 浓度达到峰值,降雨 20~30 min 后浓度降低并趋于稳定,随降雨时间延长总体上呈先升高后降低并趋于稳定的规律。根据林冠穿透雨水化学物质浓度随降雨时间变化规律,将林冠对穿透雨水水质影响过程划分为降雨淋洗(降雨开始至降雨 10 min 或 20 min)和降雨淋溶(降雨约 20~30 min 以后)两个阶段,在降雨淋洗阶段,林冠层对水质变化影响大。

[参 考 文 献]

- [1] 施立新,余新晓.国内外森林与水质研究综述[J].生态学杂志,2000,19(3):52-56.
- [2] 张胜利,李光录.秦岭火地塘森林生态系统不同层次的水质效应[J].生态学报,2007,27(5):1838-1844.
- [3] 张胜利,李靖.天然林冠层的水质效应[J].水土保持学报,2006,20(3):56-60.
- [4] 张淑芬,马明.中亚热带典型林分不同层次降水的水质变化特征[J].中国农学通报,2017,33(22):47-52.
- [5] Wu Jianping, Su Yongxian, Chen Xiuzhi, et al. Redistribution characteristics of atmospheric precipitation in different spatial levels of Guangzhou urban typical forests in Southern China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019,10(5):1404-1411.
- [6] Staelens J, De Schrijver A, Oyarzún C, et al. Comparison of dry deposition and canopy exchange of base cations in temperate hardwood forests in Flanders and Chile [J]. Gayana Botánica, 2003,60(1):9-16.
- [7] Chiwa M, Crossley A, Sheppard L J, et al. Throughfall chemistry and canopy interactions in a Sitka spruce plantation sprayed with six different simulated polluted mist treatments [J]. Environmental Pollution, 2004,127(1):57-64.
- [8] Fenn M E, Poth M A. Monitoring nitrogen deposition in throughfall using ion exchange resin columns: A field test in the San Bernardino Mountains [J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33(6):2007-2014.
- [9] 梁翠萍,张胜利.秦岭锐齿栎林和油松林林冠层对大气降水水质的影响[J].东北林业大学学报,2011,39(2):53-56.
- [10] 赵晓静,张胜利,马国栋.间伐强度对秦岭锐齿栎林冠层和枯落物层水化学效应的影响[J].生态学报,2015,35(24):8155-8164.
- [11] 陆斌,张胜利,李侃,等.秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响[J].生态学报,2014,34(6):1512-1519.
- [12] 张胜利,梁翠萍,晋建霞,等.秦岭林区径流水化学对雨水酸化的响应[J].林业科学,2012,48(4):1-7.
- [13] 曾梅.酸沉降影响下韶山森林硫与氮的动态过程及临界负荷研究[D].湖南长沙:湖南大学,2006.
- [14] 吉春容.降雨对玉米冠层氮素淋洗的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [15] 邓玉姣.模拟酸雨对三种彩叶桂的生长和生理影响[D].湖南长沙:中南林业科技大学,2017.
- [16] 高柳威,冀晓东,韩朝,等.人工模拟林冠降雨截留试验[J].中国水土保持科学,2020,18(1):68-78.
- [17] 陈文亮,唐克丽.SR 型野外人工模拟降雨装置[J].水土保持研究,2000,7(4):106-110.

- [22] 刘军会,高吉喜,马苏,等.中国生态环境敏感区评价[J].自然资源学报,2015,30(10):1607-1616.
- [23] 张恩伟,彭双云,冯华梅.基于GIS和RUSLE的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J].水土保持学报,2020,34(2):115-122.
- [24] 熊平生,袁道先,谢世友.我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J].中国岩溶,2010,29(4):355-362.
- [25] 肖荣波,欧阳志云,王效科,等.中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析[J].生态学杂志,2005,24(5):551-554.
- [26] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):471-484.
- [27] 官宝红,李君,曾爱斌,等.杭州市城市土地利用对河流水质的影响[J].资源科学,2008,30(6):857-863.
- [28] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5):868-879.
- [29] 王升堂,孙贤斌,夏韦,等.生态系统水源涵养功能的重
要性评价:以皖西大别山森林为例[J].资源开发与市场,2019,35(10):1252-1257.
- [30] 张梦迪,张芬,李雄.基于InVEST模型的生境质量评价:以北京市通州区为例[J].风景园林,2020,27(6):95-99.
- [31] 孙兴齐.基于InVEST模型的香格里拉市生态系统服务功能评估[D].云南昆明:云南师范大学,2017.
- [32] 杜腾飞,齐伟,朱西存,等.基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法[J].自然资源学报,2020,35(5):1190-1200.
- [33] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J].自然资源学报,2019,34(4):771-784.
- [34] 刘佳,尹海伟,孔繁花,等.基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化[J].生态学报,2018,38(12):4363-4372.
- [35] 陈影,哈凯,贺文龙,等.冀西北间山盆地景观格局变化及优化研究:以河北省怀来县为例[J].自然资源学报,2016,31(4):556-569.

(上接第109页)

- [18] 倪际梁,何进,李洪文,等.便携式人工模拟降雨装置的设计与率定[J].农业工程学报,2012,28(24):78-84.
- [19] 陈书军,陈存根,曹田健,等.降雨量级和强度对秦岭油松林林冠截留的影响[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(1):41-55.
- [20] 马文梅,武亚楠,张振明.降雨对植物叶表面颗粒物的淋洗作用[J].北京林业大学学报,2018,40(8):50-55.
- [21] 周青,黄晓华.钙对酸雨胁迫下甜瓜幼苗质膜透性的影响[J].环境科学,1997,18(3):60-61.
- [22] Zhang Jiaen, Ouyang Ying, Ling Dajiong. Impacts of simulated acid rain on cation leaching from the Latosol in South China [J]. Chemosphere, 2007,67(11):2131-2137.
- [23] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution [J]. Environmental Pollution, 1998,99(3):347-360.
- [24] 王丽梅.作物冠层氮素淋溶及影响因素研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [25] 徐虹.环境空气颗粒物对降水酸度的影响研究[D].天津:南开大学,2011.
- [26] 郭若妍,王会霞,石辉.模拟降雨对常绿植物叶表面滞留颗粒物的影响[J].生态学杂志,2019,38(7):1991-1999.
- [27] 徐晓梧,余新晓,宝乐,等.模拟降雨对常绿植物叶表面滞尘的影响[J].生态学报,2017,37(20):6785-6791.
- [28] 鲍文,包维楷,丁德蓉,等.森林植被对降水水化学的影响[J].生态环境,2004,13(1):112-115.
- [29] 李凌浩,林鹏,何建源,等.森林降水化学研究综述[J].水土保持学报,1994,8(1):84-96.