

## 祁连山青海云杉林内穿透雨中微量元素变化特征

赵天雪<sup>1</sup>, 臧 飞<sup>2\*</sup>, 李 娜<sup>2</sup>, 杨建红<sup>2</sup>, 杨晓高<sup>2</sup>, 赵传燕<sup>2</sup>

(1. 甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心 寺大隆自然保护站, 甘肃 张掖 734000; 2. 兰州大学 草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

**摘 要:**大气沉降是微量元素进入陆地生态系统的主要途径,但森林生态系统穿透雨中微量元素的研究还很缺乏。以甘肃祁连山国家级自然保护区的天涝池流域为研究区,以2018年夏季13次降雨事件样品中微量元素为研究对象,分析了祁连山典型森林生态系统穿透雨中Cu和Cd的变化特征及其影响因素。结果表明,青海云杉林内穿透雨量(1.0~24.8 mm)大于林外降雨量(0.1~23.2 mm),林冠对降雨呈现负截留现象,雨水的pH整体呈中性或弱酸性。青海云杉林内穿透雨中Cu( $5.97\sim12.05\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )和Cd( $0.12\sim0.78\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )的浓度均高于林外降雨(Cu: $3.28\sim11.37\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , Cd: $0.05\sim1.03\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),且雨水中Cu浓度要远高于Cd浓度。雨水中Cu和Cd的浓度与降雨量呈负相关关系,说明Cu和Cd受降雨量影响显著,但还与其他因素有关,如风速、降雨强度等。本研究能够为该流域森林生态系统服务功能评估提供重要的借鉴。

**关键词:**祁连山区;湿沉降;铜;镉;青海云杉

**中图分类号:**S791.18

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2021)05-0036-06

### Distribution Characteristics of Trace Elements in Throughfall of *Picea crassifolia* Forest in the Qilian Mountains

ZHAO Tian-xue<sup>1</sup>, ZANG Fei<sup>2\*</sup>, LI Na<sup>2</sup>, YANG Jian-hong<sup>2</sup>, YANG Xiao-gao<sup>2</sup>, ZHAO Chuan-yan<sup>2</sup>

(1. Sidalong Nature Conservation Station of Gansu Qilian Mountains National Nature Reserve Protection Center, Zhangye 734000, Gansu, China; 2. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China)

**Abstract:** The atmospheric precipitation is the main way for trace elements entering the land ecosystem. Few studies have been reported on throughfall trace elements in the forest ecosystem. In this study, Tian-laochi Catchment of Gansu Qilian Mountains National Nature Reserve was set as the study area, the trace elements in rainfall samples collected from 13 rainfall events in the summer of 2018 were used as research objects to examine the variation characteristics and affecting factors of two trace elements, Cu and Cd in the throughfalls occurring in typical forest ecosystem in the Qilian Mountains. The results showed that the amount of throughfall (1.0–24.8 mm) within the *Picea crassifolia* forest was higher than the amount (0.1–23.2 mm) of rainfall outside the forest. The canopy had negative interception effect on the rainfall. The pH of rainfall was neutral or weak acid. The concentrations of Cu and Cd in the throughfall (Cu:  $5.97\sim12.05\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , Cd:  $0.12\sim0.78\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) of *P. crassifolia* forest were higher than those (Cu:  $3.28\sim11.37\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , Cd:  $0.05\sim1.03\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) of the rainfall outside the forest, and the concentrations of Cu in the throughfall and rainwater were much higher than Cd. The concentrations of Cu and Cd in rainwater had negative correlation with rainfall, indicating that Cu and Cd were significantly affected by rainfall, but also related to other factors, such as wind speed, rainfall intensity, etc.

收稿日期:2020-10-26 修回日期:2020-11-13

基金项目:国家自然科学基金(31901130);中国博士后科学基金(2020M673532);甘肃省自然科学基金(20JR5RA277, 20JR5RE645);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2021-sp13)。

作者简介:赵天雪。研究方向:森林生态学。E-mail:329394443@qq.com

\* 通信作者:臧 飞,博士,副教授。研究方向:微量元素生物地球化学。E-mail:zangf15@lzu.edu.cn

**Key words:** the Qilian Mountains; wet deposition; Cu; Cd; *Picea crassifolia*

森林是生态系统重要的组成部分,占地球陆地表面的1/3,提供重要的生态系统服务,维持着生态系统的平衡<sup>[1]</sup>。森林水循环过程影响森林植被结构、功能与分布格局,在生态系统物质与能量交换过程中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。干旱半干旱区的植被降水截留在土壤—植被—大气连续体的水循环中,是一个不容忽视的量<sup>[3-4]</sup>。植被对降水的调节作用首先表现为林冠对降水的截留过程。研究表明森林冠层的截流量占总降雨量的10%~40%<sup>[3-5]</sup>。目前,国内外有关林冠截留的研究主要集中在不同地区、不同树种、不同林型上,而且对林冠截留的研究主要在样方尺度上进行<sup>[6-7]</sup>。裴承敏等<sup>[8]</sup>研究了重庆缙云山毛竹林次降雨再分配特征及穿透雨的空间异质性,结果表明,18场典型降雨的合计林冠截留量、穿透雨量和树干茎流量分别为32.74、208.09和10.97 mm,分别占总降雨量的13.00%、82.64%和4.36%。X. Li *et al*<sup>[9]</sup>研究了5个模拟降雨强度下(10~150 mm·h<sup>-1</sup>)阔叶和针叶林的截留效应。祁连山分布着森林、草地等丰富的自然资源,在水源涵养、物种多样性方面发挥着重要的生态屏障作用。因此,研究祁连山森林生态系统降雨对流域的水循环和水平衡过程具有重要意义。

大气沉降是微量元素进入地表环境的一个重要输入途径,由人为活动释放出来的毒性元素会通过大气干湿沉降的方式进入陆地生态系统<sup>[10-11]</sup>。森林冠层作为不同大气污染物的受体,大气颗粒物中的大部分金属元素会沉降在叶上,或通过雨水冲刷和从叶上脱落进入土壤<sup>[12-13]</sup>。L. Tripathi *et al*<sup>[14]</sup>对尼泊尔喜马拉雅山脉4个地方的大气湿沉降总Hg的时空分布进行了研究,发现高的湿沉降通量归因于较高的降水量,降水量和Hg浓度对喜马拉雅中部地区Hg的沉降起着至关重要的作用。E. Cable *et al*<sup>[15]</sup>对雨雪样品中22种元素进行分析表明,元素含量在(0.03~1.8)×10<sup>3</sup> μg·kg<sup>-1</sup>的范围内。由于来源、迁移路径和在大气中的停留时间不同,微量元素的组分和浓度可能从一个地区到另一个地区变化很大。目前,大气沉降是国内外学者关注的热点问题之一,而有关大气沉降微量元素的研究主要集中在污染严重和人口密集的城市地区,对偏远地区森林生态系统的研究较少。关于祁连山森林优势种群内穿透雨中组分的研究还未见报道。

本研究以甘肃祁连山国家级自然保护区的天涝池流域为研究区,以森林优势种群(青海云杉)为对象,采用野外调查与室内分析相结合的方法,对青海

云杉林内穿透雨中Cu和Cd的分布特征进行研究,以期对祁连山森林生态系统服务评估提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃祁连山国家级自然保护区的天涝池流域(38°23'58"—38°26'56"N;99°53'50"—99°57'10"E)(图1),海拔2 600~4 450 m,流域面积为12.8 km<sup>2</sup>,森林覆盖率65%。年均温为0.6℃,年降水量326.4~539.7 mm,年均蒸发量为1 066.2 mm。属于高寒半干旱山地森林草原气候。流域内动植物种类丰富多样,生态系统典型而独特,典型的植被类型包括山地森林草原、山地草甸、青海云杉林、祁连圆柏林和山地灌丛等。从保护区功能区划看,包括核心区、缓冲区和试验区,在祁连山中段具有显著的代表性,是开展山地生态水文、生态服务功能、生态保护和环境演变的理想场所。此外,该流域是长期定位观测的生态监测站,监测设施齐全,具备自动气象站、自计雨量筒、降雨截留固定样地等。流域内主要植被类型有:优势种群青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*),草地优势物种有:垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、葛缕子(*Carum carvi*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)和珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等,灌丛主要有:金露梅(*Potentilla fruticosa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)和高山绣线菊(*Spiraea alpina*)等。青海云杉分布在海拔为2 600~3 540 m的阴坡,祁连圆柏分布在海拔为2 700~3 250 m的阳坡。流域内主要土壤类型有:寒漠土、高山草甸土、灰褐土、山地灰钙土、山地黑钙土和山地栗钙土等<sup>[16]</sup>。

### 1.2 样品采集与制备

采样点布设在青海云杉林分内和林外的空地。林外空地采样点四周无遮挡雨、雪、风的高大树木,考虑风向(顺风、背风)和地形等因素。选择青海云杉固定样地(30 m×30 m),在固定样地内部根据林冠不同盖度随机选择5个采样点位,每个采样点位上分别放置1个内径20 cm、高30 cm的聚乙烯塑料罐(采样缸),同时在林外空地上放置3个采样缸作为平行样,采样缸距离地面约1 m的高度。采样缸在使用前用10%(体积比)的硝酸浸泡24 h后,用去离子水清洗干净,密封携至采样点水平安装。野外回收样品时,用清洁的镊子将落入缸内的树叶、昆虫等异物取出,然后用刷子反复清洗缸壁,将所有雨

水转移至聚乙烯塑料桶中密封保存,并记录采样时间、地点、风向、风速、大气压降水量、降水起止时间,并及时将样品送至实验室妥善保存备用。取每次降水的全过程样(降水开始至结束)。若1 d中有几次降水过程,可合并为1个样品测定。若遇连续几天降雨,可收集08:00至次日08:00的降水,即24 h降水样品作为1个样品进行测定。样品带至实验室后首先测定雨水样品的pH值和电导率(EC),然后

用0.45  $\mu\text{m}$ 的水系滤膜过滤,滤液转移到洁净的聚乙烯瓶中,于4℃下冷藏保存,用于测定Cu和Cd的浓度。由于该流域年内降雨分配很不均匀,主要集中在5—9月,占全年降水的84.2%,夏季降水充沛,冬春季降水只占年降水量的10.8%,显得寒冷而干燥。2018年年降水量为470.6 mm,属于平水年,且降雨主要集中在7—9月。因此,本研究于2018年7—9月共收集13次降雨事件的样品。

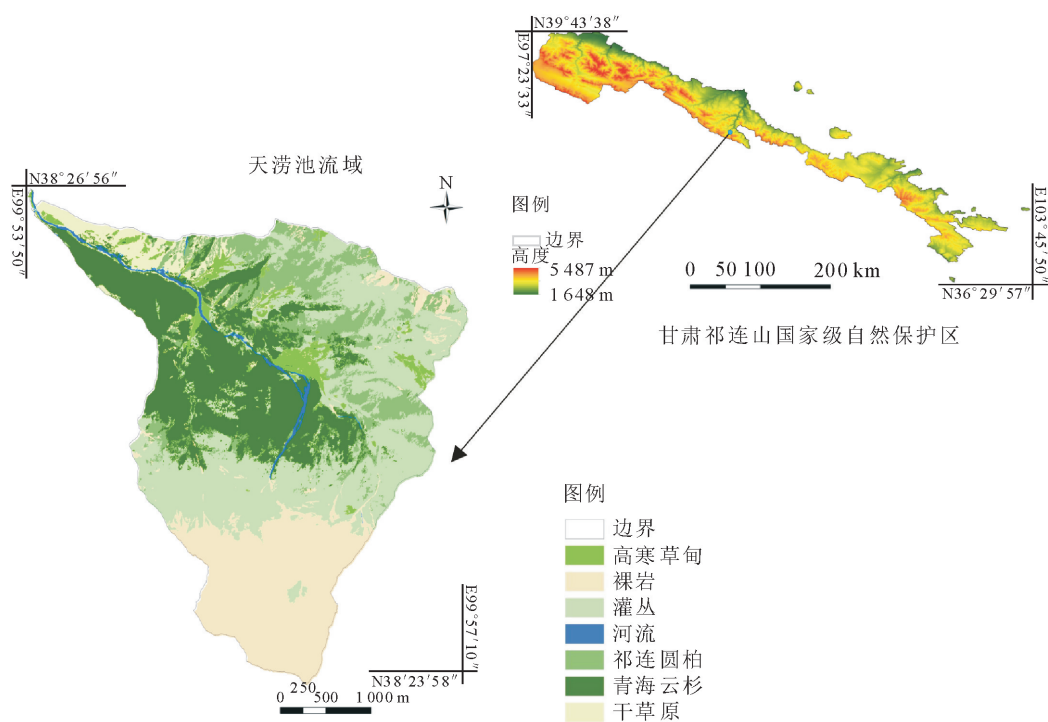


图1 研究区示意

Fig. 1 The map of study area

### 1.3 分析测定方法

雨水样品的pH值采用电极法测定(PHS-3C, 雷磁,上海仪电科学仪器股份有限公司),EC值采用电导率仪测定(DDS-11A,上海越平)。穿透雨量采用标准雨量筒进行测定。雨水样品中的Cu和Cd采用原子吸收分光光度计测定(ZEEnit700P,耶拿,德国)。

### 1.4 质量控制与保证

试验全过程进行质量控制,以保证数据的准确性和精确性。试验过程中采用20%的平行样和空白样,误差控制在5%以内。所用玻璃器皿及采样缸均用10%硝酸浸泡至少24 h,试验用水均为去离子水,试剂均为优级纯。

### 1.5 数据处理

采用Excel 2007和SPSS 17.0进行数据统计分析,采用Origin 9.0进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨量及pH和EC的变化

青海云杉林外降雨量和林内穿透雨量及pH和EC随降雨次数的变化见表1。林外降雨量比林内穿透雨量小,表明林冠出现负截留,即林冠周围树叶及枝条对降雨截留后通过重力作用全部进入收集器中,呈现明显的季节变化特征,7、8月降雨量较大。雨水样品pH值基本没有太大变化,林外和林内差别也不大,pH值均 $<7$ ,呈中性或弱酸性,这是空气中含有 $\text{CO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 的缘故。水体的电导率是水中含盐成分、含离子成分及含杂质成分的总称。林内雨水样品的电导率值比林外稍高,因为降雨在经过冠层时对吸附在树叶上的颗粒物进行冲刷,一些可溶性的离子进入穿透雨中。另外,树木冠层叶片的分泌物随穿透雨降落也是导致电导率值升高的原因。

2.2 穿透雨中 Cu 和 Cd 浓度分布特征

对森林生态系统而言,Cu 是一种植物生长所必需的元素,能够被植物叶片或根系吸收利用,而 Cd 在自然界中一般作为潜在毒性元素,浓度一旦超标,会对植物生长造成影响。有研究表明重金属元素在降雨中的生物有效性更高<sup>[17]</sup>。青海云杉林外降雨和林内穿透雨中 Cu 和 Cd 浓度见图 2。不同降雨次数下林内、林外降雨量中 Cu 和 Cd 的浓度变化没有明显的规律性。青海云杉林内穿透雨中 Cu 浓度整体上高于林外降雨,但在第 7、8 次降雨中林外高于林内。林外降雨中 Cu 浓度在 3.28~11.37  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,林内穿透雨中 Cu 浓度在 5.97~12.05  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这是因为林外相对高的降雨量对微量元素浓度有一定稀释作用<sup>[18]</sup>。另外,森林复杂的冠层结构吸附了大量的颗粒物<sup>[19]</sup>,这些颗粒物在雨水的冲刷下往下落,在此过程中颗粒物中可溶性的微量元素

进入雨水中,使得穿透雨中微量元素浓度高于林外降雨。S. C. Cizmecioglu *et al*<sup>[20]</sup>认为水溶态的微量元素是湿沉降的重要组成部分,占湿沉降总形态的 37%~100%。而湿沉降中一些溶解性的微量元素也是浮游植物和藻类必需的营养物质<sup>[21]</sup>。青海云杉林内穿透雨中 Cd 浓度整体上也高于林外降雨,在第 2、11 次降雨中林外 Cd 高于林内。林外降雨中 Cd 浓度在 0.05~1.03  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,林内穿透雨中 Cd 浓度在 0.12~0.78  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。有研究表明降雨量是控制湿沉降中微量元素浓度的决定性因素<sup>[22-23]</sup>。而由于降雨中微量元素来源的复杂性和降雨特征(降雨量、降雨持续时间、降雨强度等)的差异,不同降雨次数中 Cu 和 Cd 的浓度的变化各异。本研究选择 Cu 和 Cd 作为研究对象,主要是从营养和毒性的角度考虑。

表 1 青海云杉林降雨量及 pH 和 EC 随降雨次数的变化  
Table 1 Change of rainfall amount,pH and EC in the *P. crassifolia* forest

降雨次数	降雨量/mm		pH		电导率/( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	
	林外	林内	林外	林内	林外	林内
1	3.9±0.6	5.1±1.2	6.31±0.22	5.98±0.36	29.97±3.26	66.98±25.83
2	10.5±0.4	11.2±1.0	6.43±0.22	6.07±0.07	11.52±3.00	25.35±9.07
3	13.2±0.6	19.1±4.1	6.27±0.03	6.06±0.08	14.37±1.07	27.66±12.28
4	8.9±0.4	11.9±4.9	6.64±0.43	6.19±0.12	78.73±10.85	69.02±24.33
5	5.1±0.5	5.9±2.6	6.18±0.31	5.98±0.24	115.30±29.51	72.28±22.43
6	16.0±0.9	16.6±3.0	5.97±0.06	6.24±0.14	23.33±7.14	31.00±12.66
7	10.6±0.5	9.8±3.6	6.33±0.24	6.12±0.08	25.14±9.39	32.79±17.45
8	1.4±0.7	8.3±3.8	6.82±0.71	6.28±0.08	214.87±32.30	57.14±23.65
9	3.5±0.5	3.5±1.7	6.03±0.48	6.17±0.27	60.77±8.96	46.44±24.03
10	0.1±0.0	1.0±0.6	6.28±0.22	6.36±0.23	129.47±27.29	65.54±27.14
11	2.7±0.2	2.2±1.1	6.28±0.18	6.57±0.51	40.97±7.39	65.46±29.14
12	23.2±0.4	24.8±4.0	6.51±0.13	6.32±0.43	7.03±1.74	25.66±14.60
13	9.4±0.1	9.8±2.4	7.27±0.56	6.08±0.12	6.67±1.04	24.45±11.43

注:表中数据表示平均值±标准差。

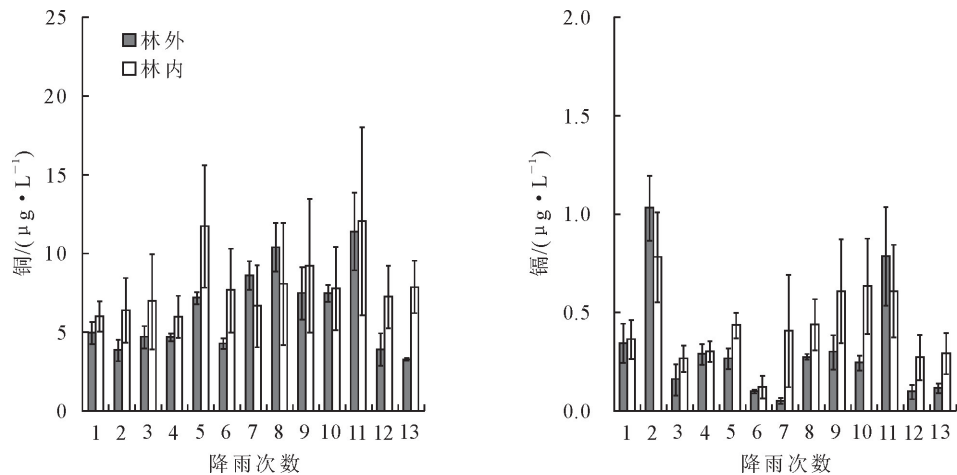


图 2 青海云杉林内外降雨中 Cu 和 Cd 的浓度变化  
Fig. 2 Changes of Cu and Cd concentration in rainwater of *P. crassifolia* forest



### 2.3 降雨量对穿透雨中 Cu 和 Cd 浓度的影响

影响降雨中微量元素浓度的因素有很多,比如空气中微量元素浓度、当地自然和人为来源、远距离传输、风速风向、降雨强度、降雨持续时间、相对湿度及降雨量等。J. Xing *et al*<sup>[18]</sup>通过对胶州湾大气湿沉降中溶解性微量元素的研究表明,污染物释放强度、降雨量和风速是影响微量元素季节变化的主要因素。风速也是湿沉降的控制因素,风速与湿沉降通量呈负相关,因为高的风速有助于大气污染物的扩散,这对大气微量元素浓度有稀释作用<sup>[24]</sup>。也有研究表明,降雨量是与灌丛降雨再分配关系最密切的气象因子,即随着降雨量的增加,穿透雨量也增加<sup>[25]</sup>。对祁连山深山区森林生态系统而言,由于海拔较高,夏季雨水较多,所以降雨量应该是影响微量元素浓度的主要因素之一。青海云杉林内、林外降雨量与降雨中 Cu 和 Cd 的相互关系见图 3。整体而言,青海云杉林外降雨和林内穿透雨中 Cu 和 Cd 的浓度随着降雨量的增加呈减小趋势。青海云杉林外降雨中 Cu 浓度与降雨量线性相关( $R^2=0.41$ ;  $N=13$ ;  $P<0.05$ );青海云杉林内穿透雨中 Cd 浓度与降

雨量也线性相关( $R^2=0.398$ ;  $N=13$ ;  $P<0.05$ ),表明降雨量越大 Cu 和 Cd 的浓度越低。青海云杉林内穿透雨中 Cu 和林外降雨中 Cd 也呈线性关系,但相关性不显著( $P>0.05$ )。Cu 和 Cd 浓度随降雨量的增加而减小,一方面,因为高的降雨量对空气中 Cu 和 Cd 浓度进行了稀释作用<sup>[18]</sup>;另一方面,本研究采样时间为夏季 7—9 月,祁连山降雨次数较多,对空气中 Cu 和 Cd 的净化和清除能力强,使得雨水中 Cu 和 Cd 的浓度较低。C. Stankwitz *et al*<sup>[26]</sup>认为高海拔地区森林能够接收较高的年降水量和云水,而湿沉降和云水中的污染物也在高海拔地区增加。本研究仅分析了降雨量对穿透雨中 Cu 和 Cd 浓度的影响,其他气象因子,如风速、温度、相对湿度、降雨强度、降雨持续时间等,对 Cu 和 Cd 浓度的影响如何还需进一步研究。另外,本研究采样仅限于夏季的 2 个月,且样地仅设置在一个海拔梯度上,而不同海拔梯度、不同季节的气象条件差异较大,因此,长期的流域尺度的观测试验将是下一步工作中重点关注的问题。

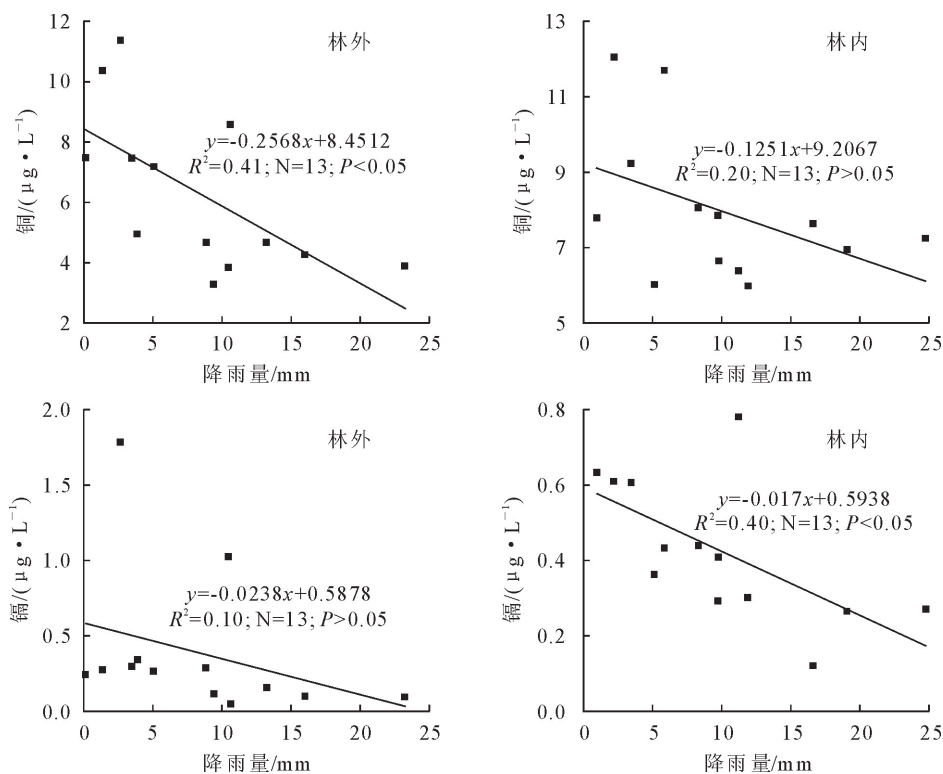


图 3 青海云杉林内外降雨量与 Cu 和 Cd 浓度的相互关系

Fig. 3 Relationship between rainfall amount and Cu and Cd concentrations

### 3 结论

祁连山青海云杉林内穿透雨量大于林外降雨量,表明冠层对降雨呈现负截留现象。13 次降雨事件中雨水的 pH 值均呈中性或弱酸性,EC 值林内略

高于林外。祁连山降雨中 Cu 的浓度高于 Cd 的浓度,且青海云杉林内穿透雨中 Cu 和 Cd 浓度整体上均高于林外降雨。林外降雨中 Cu 和 Cd 浓度分别在  $3.28 \sim 11.37 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.05 \sim 1.03 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,林内穿透雨中 Cu 和 Cd 浓度分别在  $5.97 \sim$

12.05  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和 0.12~0.78  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  之间。13次降雨中 Cu 和 Cd 的浓度随降雨量的增加而降低,表明高的降雨量对大气中的污染物有很强净化作用。下一步研究将围绕祁连山降雨中微量元素的月变化动态和年沉降通量,以及重点关注大气微量元素的远距离传输。

### 参考文献:

- [1] SCHWEDE D B, SIMPSON D, TAN J, *et al.* Spatial variation of modelled total, dry and wet nitrogen deposition to forests at global scale [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 1287-1301.
- [2] 程根伟, 余新晓, 赵玉涛. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] LLORENS P, DOMINGO F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(1/2): 37-54.
- [4] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘向东. 油松人工林林冠层的水文作用[J]. *中国水土保持*, 1993(2): 40-43.
- [5] HÖRMANN G, BRÄNDING A, CLEMEN T, *et al.* Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in northern Germany [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 79(3): 131-148.
- [6] 马育军, 高尚玉, 李小雁, 等. 高寒河谷灌丛冠层降雨再分配特征及影响因素[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(4): 963-971.
- [7] 徐先英, 严平, 郭树江, 等. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(1): 141-145.  
XU X Y, YAN P, GUO S J, *et al.* The interception loss of rainfall by three sand-fixing shrubs at the fringe of Minqin oasis [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(1): 141-145. (in Chinese)
- [8] 裴承敏, 王云琦, 张守红, 等. 重庆缙云山毛竹林次降雨再分配特征及穿透雨的空间异质性[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5), 202-207.  
PEI C M, WANG Y Q, ZHANG S H, *et al.* Rainfall redistribution and spatial variability of throughfall of a *phyllostachys edulis* stand in the Jinyun Mountain national nature reserve at Chongqing [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5), 202-207. (in Chinese)
- [9] LI X, XIAO Q, NIU J, *et al.* Process-based rainfall interception by small trees in northern China: the effect of rainfall traits and crown structure characteristics [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 218-219: 65-73.
- [10] LIU H L, ZHOU J, LI M, *et al.* Study of the bioavailability of heavy metals from atmospheric deposition on the soil-pakchoi (*Brassica chinensis* L.) system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 362: 9-16.
- [11] RIPPEY B, ROSE N, YANG H, *et al.* An assessment of toxicity in profundal lake sediment due to deposition of heavy metals and persistent organic pollutants from the atmosphere [J]. *Environment International*, 2008, 34(3): 345-356.
- [12] RICHARDSON J B, FRIEDLAND A J. Influence of coniferous and deciduous vegetation on major and trace metals in forests of northern New England, USA [J]. *Plant & Soil*, 2016, 402(1-2): 363-378.
- [13] ZHOU J, WANG Z, SUN T, *et al.* Mercury in terrestrial forested systems with highly elevated mercury deposition in southwestern China: the risk to insects and potential release from wildfires [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 212: 188-196.
- [14] TRIPATHEE L, GUO J, KANG S, *et al.* Spatial and temporal distribution of total mercury in atmospheric wet precipitation at four sites from the Nepal-Himalayas [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 1207-1217.
- [15] CABLE E, DENG Y. Trace elements in atmospheric wet precipitation in Detroit metropolitan area: levels and possible sources [J]. *Chemosphere*, 2018, 210: 1091-1098.
- [16] 柳逸月. 黑河上游典型小流域植被降雨截留特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [17] SHARMA R K, AGRAWAL M, MARSHALL F M. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) contamination of vegetables in urban India: a case study in Varanasi [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 154(2): 254-263.
- [18] XING J, SONG J, YUAN H, *et al.* Atmospheric wet deposition of dissolved trace elements to Jiaozhou Bay, north China: fluxes, sources and potential effects on aquatic environments [J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 428-436.
- [19] 武晓红, 张先平, 李晓迪, 等. 太原市森林公园林带对空气 PM<sub>2.5</sub> 的净化效率[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(2): 260-265.  
WU X H, ZHANG X P, LI X D, *et al.* Characteristics of the variation of PM<sub>2.5</sub> concentration in forest belt of Taiyuan forest park [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(2): 260-265. (in Chinese)
- [20] CIZMECIOGLU S C, MUEZZINOGLU A. Solubility of deposited airborne heavy metals [J]. *Atmospheric Research*, 2008, 89(4): 396-404.
- [21] ZHUANG G, YI Z, DUCE R A, *et al.* Link between iron and sulphur cycles suggested by detection of Fe(II) in remote marine aerosols [J]. *Nature*, 1992, 355: 537-539.
- [22] PAN Y, WANG Y. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 14(2): 951-972.
- [23] GUO J, KANG S, HUANG J, *et al.* Seasonal variations of trace elements in precipitation at the largest city in Tibet, Lhasa [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 153: 87-97.
- [24] 龚香宜, 祁士华, 吕春玲, 等. 福建省兴化湾大气重金属的干湿沉降[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(6): 31-34.
- [25] 熊壮, 叶文, 张树斌, 等. 元江稀树灌丛降雨再分配及其与气象因子的关系[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 47-53.  
XIONG Z, YE W, ZHANG S B, *et al.* Rainfall redistribution and its relationship with meteorological factors in Yunjiang valley-type savanna, southwest China [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 47-53. (in Chinese)
- [26] STANKWITZ C, KASTE J M, FRIEDLAND A J. Threshold increases in soil lead and mercury from tropospheric deposition across an elevational gradient [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8061-8068.