

北京密云油松人工林对降水及其营养元素含量的影响

肖洋, 陈丽华, 余新晓, 杨新兵, 孙庆艳

(北京林业大学 水土保持学院, 北京林业大学教育部水土保持重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 对北京密云水库西油松人工林的林冠截留、穿透降水和树干茎流的观测和分析结果表明, 单次降雨过程中的林冠截留量与林外降水量呈幂函数关系, 而穿透雨量和树干茎流量跟林外降水量皆呈线性相关关系, 它们占林外降水的比例分别为 7.23%~87.39%, 12.56%~91.58% 和 0.007%~1.77%。环境状况、气象条件和降水特性的不同是造成同一地区大气降水化学性质差异的主要原因; 降水透过油松林冠层后, 穿透降水和树干茎流中元素含量都有不同程度的增加。穿透降水中各元素含量变化均与降水时间间隔呈正相关, 而与降雨强度和降水量呈负相关; 除 N 外, 树干茎流中 P, K 元素含量与降水特性的关系与穿透降水的相同。

关键词: 油松; 林冠截留; 穿透降水; 树干茎流

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)05-0022-06

中图分类号: S715.7

Influence of *Pinus Tabulaeformis* Forest on Precipitation and Its Nutrient Content in Miyun Reservoir of Beijing City

XIAO Yang, CHEN Li-hua, YU Xin-xiao, YANG Xin-bing, SUN Qing-yang

(College of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and

Combating Desertification of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: A *Pinus tabulaeformis* plantation in western Miyun Reservoir of Beijing city was observed and analyzed to study canopy interception, throughfall, and stemflow. Results showed that the relationship between the amounts of canopy interception and precipitation was the power function, but the relationship among throughfall, stemflow and precipitation displayed a linear correlation. Contributions of canopy interception, throughfall, and stemflow to total flux of rainfall were 7.23%~87.39%, 12.56%~91.58% and 0.007%~1.77%, respectively. The differences of environmental aspect, meteorological condition, and characteristics of rainfall were a major factor which caused the discrepancy of atmospheric precipitation chemistry in the same area. When the precipitation passed through the canopy, the content of chemical elements in throughfall and stemflow increased in comparison with that of the precipitation. There was a positive correlation between the individual element content in throughfall and the interval of precipitation, but a negative correlation with rainfall intensity and its amount. The correlation between the phosphorus and potassium contents in stemflow and characteristics of precipitation was the same as throughfall except for nitrogen element.

Keywords: *Pinus tabulaeformis*; canopy interception; throughfall; stemflow

降水是森林生态系统营养元素来源的重要因子之一, 通过降水的运输作用使大气中化学物质进入了森林生态系统。因此, 降水不仅对水循环本身, 而且对生物地球化学循环也有特别重要的意义。油松是北京密云地区主要造林树种, 关于油松的森林生态水

文特征和降水化学性质, 已有学者作过研究^[1-3], 但关于油松人工林降水再分配过程及特性对降水化学性质影响的研究极少。本文通过 2004—2006 年对密云水库地区油松人工林中大气降水、穿透降水和树干茎流进行了 3 a 的定位观测和化学取样分析, 定量地

收稿日期: 2007-01-23 修回日期: 2007-05-18

基金项目: 北京市科委重大项目“北京山区森林健康经营关键技术研究与示范 (D0706001000091)”; “十一五”国家科技支撑计划课题 (2006BAD03A02)

作者简介: 肖洋 (1978—), 男 (汉族), 黑龙江省虎林市人, 博士, 主要从事林业生态工程和森林水文研究。E-mail: xiaoyangnba2005@yahoo.com.cn.

通讯作者: 陈丽华 (1957—), 女 (汉族), 北京市人, 教授, 博士生导师, 主要从事流域治理、城镇规划及森林水文等方面的研究。E-mail: lh-chen2004@163.com.

描述了油松纯林对降水及水化学性质的影响,阐述了油松人工林生态系统的水文功能和水化学特性,为进一步研究油松人工林的水文生态特征和生物化学循环提供了基础数据和科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

密云水库位于北京市的东北方约 90 km 处,北纬 $40^{\circ}23'$,东经 $116^{\circ}50'$ 。1958 年 9 月动工兴建,1960 年 9 月基本建成。平均海拔 75 m,设计总库容 $4.38 \times 10^{11} \text{ m}^3$,相应水面面积 188 km^2 ,最大水深 43.5 m,控制流域面积 $15\,788 \text{ km}^2$ 。气候类型属于暖温带半湿润季风型气候,年平均温度 $10^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$,平均最低温 -18°C ,平均最高温 38°C ,无霜期 176 d,多年平均降水量 669 mm,主要集中在 6—8 月份,雨热同期。地带性植被为暖温带落叶阔叶林,现有植被以灌木丛为主。主要人工植被为油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林和刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林。土壤为褐土和潮土。

1.2 试验布设和研究方法

研究区位于密云县境内的密云水库库西水源保护试验站,该区油松人工林林龄为 39 a,林相整齐,郁闭度 0.8~0.9,密度 $2\,500 \text{ 株}/\text{hm}^2$,平均胸径为 16.5 cm,平均树林高为 10 m。在油松林内设置试验地,并分别观测其林外降雨量、穿透雨量和树干茎流量,同时测定大气降水、穿透降水和树干茎流中的全氮、全磷和钾的含量。

全自动气象站固定在距油松样地 100 m 处,大气降水、空气温湿度、太阳辐射和风速、风向均由气象站上的探测器测量,数据每隔 30 min 自动采集,以 30 min 内平均值记录。在面积为 $30 \text{ m}^2 \times 30 \text{ m}^2$ 的

油松林标准地内,沿等高线方向和垂直等高线方向,按网格状布设 40 个雨量筒,由于实验所需雨量筒较多,因此采用口径为 20 cm 的塑料桶作为集水器来代替标准雨量筒,高出地面 50 cm 放置。为了消除灌木及草本层穿透雨量的影响,将雨量筒上方的灌木割除。在样地内选则不同胸径和树高的标准木 9 株,用直径为 1 cm 的聚乙烯塑料管剖开后沿树干螺旋 2 周固定在树干,下部用容器承接树干茎流。

在已知大气降水、穿透降水、树干茎流条件下,利用水量平衡余项法求得林冠截留,即 $I(\text{林冠截留量}) = P(\text{降水量}) - T(\text{穿透降水量}) - S(\text{树干茎流量})$ 。N 用凯氏定氮法测定,P 采用紫外分光光度法测定,K 用原子吸收分光光度法测定。

2 结果分析

2.1 林冠截留量、穿透雨量和树干茎流量与林外降水量的关系

经 61 场单次降水分析表明,单次降雨过程中的林冠截留量、穿透雨量和树干茎流量占林外降水的比例分别为 7.23%~87.39%,12.56%~91.58%和 0.007%~1.77%;林冠截留量与林外降水量呈幂函数关系($R=0.77$),穿透雨量和树干茎流量跟林外降水量皆呈线性相关关系,相关系数分别为 0.99** 和 0.93**;表 1 对 61 场单次降水进行了分级并列出了不同雨量级的降水各分量情况。从表 1 可见,在低雨量级时,随着降水量的增大,穿透雨量(率)和林冠截留量都快速增大,林冠截留率却明显降低,而树干茎流量(率)很低,增加幅度较小;在高雨量级时,随着降水量的增大,降水各分量增大或减小的幅度都渐缓,最终可能都趋于各自的极限值(最大或最小值);在雨量级为 1.1~5.0 mm 时,树干茎流量趋近于 0。

表 1 不同雨量级的降水各分量情况

| 雨量级/mm | 次数 | 降水量/ mm | 林内穿透降雨 | | 树干茎流 | | 林冠截留雨 | |
|------------|----|------------|--------|-------|-------|------|--------|-------|
| | | | 雨量/mm | 比例/% | 流量/mm | 比例/% | 截留量/mm | 截留率/% |
| 1.1~5.0 | 5 | 3.03 | 0.93 | 34.27 | 0.00 | 0.09 | 2.10 | 58.25 |
| 5.1~10.0 | 17 | 7.89 | 4.94 | 61.89 | 0.03 | 0.33 | 2.93 | 37.78 |
| 10.1~20.0 | 17 | 14.22 | 10.86 | 74.75 | 0.10 | 0.70 | 3.26 | 24.55 |
| 20.1~50.0 | 16 | 34.30 | 25.36 | 73.16 | 0.34 | 0.95 | 8.60 | 25.88 |
| 50.1~100.0 | 5 | 76.67 | 61.26 | 79.28 | 1.00 | 1.32 | 14.41 | 19.40 |
| >100.0 | 1 | 102.9 | 79.55 | 77.31 | 1.32 | 1.28 | 22.03 | 21.41 |

2.2 降水分配月动态变化

降水量和叶表面的湿润状况是影响降水分配的

主要因素。图 1—2 是 5—9 月份主要生长季油松人工林水量分配的月动态。由图 1 可见,穿透雨量、林

冠截留量和树干茎流量与大气降水量的变化基本一致,即随着大气降水量增加,穿透雨量、林冠截留量和树干茎流量也增大。8月是降水量最大的月份,其相应穿透雨量、林冠截留量和树干茎流量也最大。

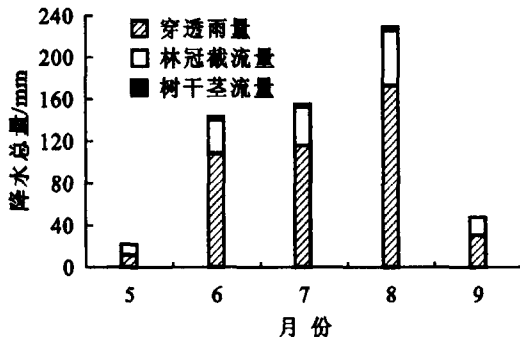


图 1 穿透雨量、林冠截留量和树干茎流量的月动态变化

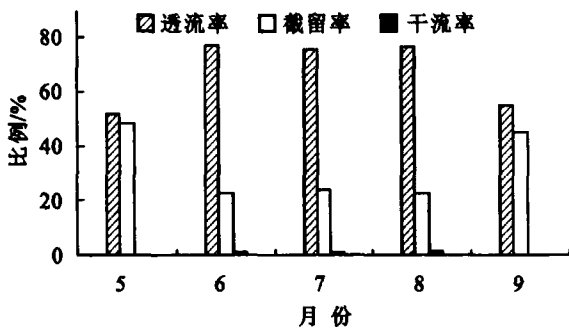


图 2 透流率、截留率和干流率的月动态变化

从图 2 可以看出,8月份和6月份的干流率要较其它月份的要高,透流率在主要降水季节6—8月份变化不大,而在降水量较少的5月份和9月份相对较低,截留率与透流率的变化正好相反;5月份和9月份是降水量较少、降雨强度较小和树冠表面较干燥的季节,枝叶表面更具吸附力,因此其透流率和干流率相对较低,截留率相对较高。进入主要降水季节6—8月份以后,降水量和降雨强度明显增大,降水频繁,且冠层湿润度高,枝叶表面吸附力减小,其透流率和干流率相对较高,而截留率相对降低。

2.3 大气降水化学性质

根据 Jordan 和 Likens 的研究,降水中的化学成分以 H^+ 为主,占总阳离子的 70%,剩余的 30% 依次为 NH_4^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 和 K^+ ,阴离子以 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 为主^[4]。Parker 根据世界各地降水化学资料对全球范围内降水中化学元素浓度平均值的大小排列顺序为: $S > Na > Cl > N > Ca > K > P$ ^[5]。世界各地降水中 N 含量变化较大,多数地区每年约为 2.25 ~ 11.2 kg/($hm^2 \cdot a$)^[6]。降水对 P 素的输入量是所有元素中最低的,这可能是由于降水中的 P 主要来源于大气尘埃的溶解^[7]。由于 K 的溶解和移动性很强,通常其淋溶量相对较高,但在降水中含量并不高。

大气降水中的阳离子和阴离子主要来源于海洋雾、陆地灰尘、气态污染物和火山喷发物^[8],而降水量及降水类型(雨、雪、冰雹或雾)、云层高度、距离海面的远近、风的活动和火灾及扬尘发生频率等因素影响着大气降水中化学元素的浓度^[9-12]。

由表 2 可见,本文研究区域(试验地 II,密云水库库西水源站)大气降水中的 N 是测区元素中浓度相对较高的,其加权平均值为 5.36 mg/L,其次为 K,其加权平均值为 4.14 mg/L,P 的浓度较低,其加权平均值为 0.31 mg/L。各元素浓度高低的顺序为 $N > K > P$,它们分别是试验地 I-1(密云水库库东北庄试验站)N,P,K 元素含量的 1.44 倍,2.27 倍和 4.00 倍^[2];与试验地 I-2(密云水库库东北庄试验站)N,P,K 元素浓度相比^[3],分别增加了 0.91 倍,1.06 倍和 1.64 倍。由此可以看出,降水是该区域森林生态系统营养元素的主要来源之一。尽管试验地 II 与试验地 I 同属于密云地区,并分别位于密云水库东西两端,且远离海面,森林火灾发生的频率很低,但距离人类活动释放的污染物源要比试验地 I 的近,这使得其大气降水中养分元素含量相对较高;而降水特性和气象条件(风向、风速)的不同也可能是造成同一地区大气降水中化学元素含量不同的原因。

表 2 不同试验地大气降水元素含量比较

| 试验地区 | N 含量/ ($mg \cdot L^{-1}$) | P 含量/ ($mg \cdot L^{-1}$) | K 含量/ ($mg \cdot L^{-1}$) |
|---------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 试验地 I-1 | 3.716 | 0.163 | 1.037 |
| 试验地 I-2 | 2.801 | 0.180 | 1.569 |
| 试验地 II | 5.360 | 0.370 | 4.144 |

2.4 油松人工林降水化学性质

在森林生态系统中,大气降水并不是直接到达森林地表,它必须首先透过林冠层。因此降水到达林冠表面产生第一次降水分配,同时也伴随着其中化学元素的冠层交换过程。通过冠层交换,雨水对树体内部器官组织分泌物的溶解和冲洗,枝叶对降水中离子的吸收以及雨水对枝叶表面粉尘、微粒等大气悬浮沉降物的淋洗,使雨水中的化学元素浓度强烈地改变。这一改变不仅对森林水分循环和养分循环有重要影响,而且对土壤风化过程和成土过程也有重要意义。

由于林冠层的交换作用及吸附在枝、叶和树干表面的大气悬浮物和气态污染物的溶解、淋洗作用,使得穿透降水中的元素含量不同于大气降水,其中部分元素含量将显著增加,而另一些元素的含量则有所降低,其含量的增减取决于冠层交换过程中雨水淋溶和

枝叶吸收的数量对比,并且与植被类型、树种及营养元素种类的不同有关。林内穿透降水的物理化学特性受诸如树种、树龄和树木的健康状态等许多因素的制约^[9]。

据研究,在松类森林生态系统中,树干茎流仅占到达森林地表的降水总量的 3%左右,而穿透降水大约可以占降水总量的 83%。因此当估测到达森林地表的沉降物总量时,明确穿透降水中的化学成分及含量是非常重要的^[13]。由于树干茎流在总降雨中所占比例较小,因而其向林地地表输入的营养物质要比穿透雨的化学元素输入量少得多,通常只占林内输入总量的 1%~20%,平均为 12%,且因森林类型和不同元素而异^[5]。但其中的养分浓度很高且集中在根系吸收的有效范围之内,因而对于树木养分供应和循环具有重要意义^[14]。

本文取观测期 2006 年 7 月 9 日至 9 月 3 日的 8 次典型的降水水样进行分析。由图 3—5 可见,经过冠层交换后的穿透降水与大气降水相比,元素都有明显的增加。其中,以 K 元素浓度增加幅度最大,其含量高出大气降水的含量 6.76 mg/L,平均为原来浓度的 2.88 倍;其次为 N,高出大气降水的 5.90 mg/L,浓度为原来浓度的 2.06 倍;P 的浓度较低,增加了约 0.17 mg/L,元素浓度的增加量为 45.3%;穿透降水中各化学元素含量排列顺序为: N>K>P,与大气降水各元素排列顺序一致。上述结果说明人工油松林冠层对 N,K,P 有较强的离释作用。

同大气降水相比,树干茎流中元素含量也均有不同程度的增加,增幅最大的是 K,其含量高出大气降水的含量 8.59 mg/L,两者相差约 3.39 倍;N 其次,高出大气降水的 6.91 mg/L,相差约 2.24 倍;P 增加幅度较小,为 0.13 mg/L。元素浓度的增加量为 34.1%。与穿透降水相比,K 和 N 含量分别高出 1.84 mg/L 和 1.01 mg/L,但 P 含量却稍低于穿透降水,减少了约 0.04 mg/L。树干茎流中各化学元素含量排列顺序为: N>K>P,与大气降水和穿透降水的化学性质变化趋势一致。树干茎流中的化学元素含量不仅有来自于雨水与冠层之间淋溶的,还包括雨水对树干的淋洗部分,且树皮属于非光合器官,一般来说很难直接从雨水中吸收营养元素,所以通常树干茎流中元素浓度相对较高。

通过对不同时间的大气降水、穿透降水和树干茎流中元素平均浓度值的比较可知,在油松人工林中, N 和 K 的平均浓度大小顺序为:树干茎流>穿透降水>大气降水;P 的平均浓度大小顺序为:穿透降水>树干茎流>大气降水。

从上述结果中可见,K 在穿透降水和树干茎流中的增幅均为最大,这主要是因为 K 的移动性强,且在树叶中的含量丰富^[15-16];N 在穿透降水和树干茎流中的含量均为最高,这表明 N 易淋溶;尽管 P 在穿透降水和树干茎流中的含量有所提高,但增幅较小,说明 P 的可淋溶性低,这大概是因为 P 不仅在土壤库中,而且在植物器官组织中可利用性低的缘故^[17-18]。

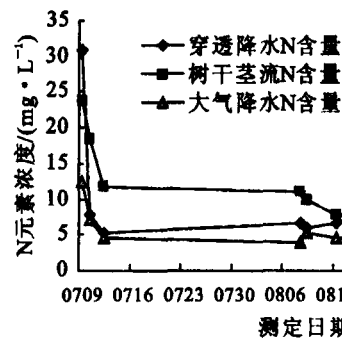


图 3 穿透降水、树干茎流与大气降水中 N 元素含量比较

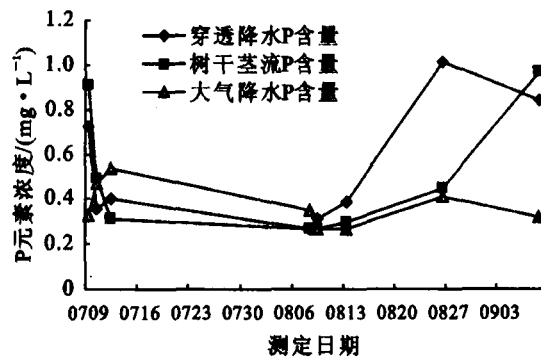


图 4 穿透降水、树干茎流与大气降水中 P 元素含量比较

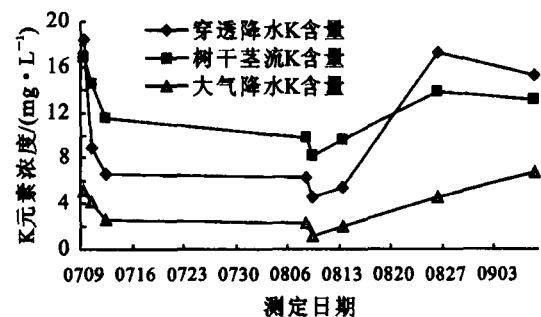


图 5 穿透降水、树干茎流与大气降水中 K 元素含量比较

2.5 穿透降水和树干茎流化学性质与降水特性关系

由于观测时间正处于该区域雨季,具有降水量大,降雨频繁,降雨强度大和大风暴雨等特征。因此从降水特性的角度出发,将降水历时、两次降水的时间间隔、平均降雨强度(I_{ave})、30 min 最大降雨强度(I_{30})、前 24 h 降水量(P_{24})、穿透降水量和树干茎流量作为化学物质输入油松人工林生态系统的影响因素(详见表 3),通过统计分析来反映两者之间的相互关系。

2.5.1 穿透降水元素含量和降水特性的关系 由表 4 可以看出,穿透降水中的各元素含量变化与降水特性密切相关。穿透降水中 P 受两次降水时间间隔的影响显著,K 受两次降水时间间隔和 30 min 最大降雨强度的影响显著,显著水平均达到了 $\alpha < 0.01$, 0.05 的水平;各元素含量变化均与两次降水时间间隔呈正相关,而与平均降雨强度、30 min 最大降雨强度、前 24 h 降水量和穿透降水量呈负相关;这表明随着两次降水时间间隔的增加,林冠俘获的沉降物越多,因而透过冠层的穿透降水中的元素含量越高。平均降雨强度、30 min 最大降雨强度、前 24 h 降水量和穿透降水量这些影响因子对于冠层元素的积累及淋

溶和离子交换呈现出负效应,降雨强度和降水量越大,元素在单位体积穿透降水中的含量越低,这说明少量和低强度的降水能够更为有效的从林冠中淋洗出养分元素。

2.5.2 树干茎流元素含量和降水特性的关系 经树冠淋溶的降水经侧枝汇聚于根区周围的同时对树干表面的沉降物也进行了淋洗,因而树干茎流中元素含量与降水特性之间的关系比穿透降水更为复杂。从表 5 可见,除 N 外,P,K 元素含量与降水特性的关系与穿透降水的相同,即与两次降水时间间隔呈正相关,而与平均降雨强度、30 min 最大降雨强度、前 24 h 降水量和穿透降水量呈负相关。

表 3 2006 年 7—10 月降水特性

| 日期 | 降雨历时/ h | 间隔/ h | $I_{ave}/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) | $I_{30}/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) | $P_{24}/$ mm | 穿透降水量/ mm | 干流量/ mm |
|----------|------------|----------|---|--|-----------------|--------------|------------|
| 20060709 | 5.5 | 198.0 | 1.55 | 3.6 | 0.20 | 6.17 | 0.010 |
| 20060710 | 2.0 | 20.0 | 5.95 | 10.8 | 0.80 | 8.88 | 0.110 |
| 20060712 | 1.5 | 38.0 | 12.11 | 26.8 | 0.00 | 15.19 | 0.160 |
| 20060808 | 5.5 | 81.0 | 3.47 | 18.2 | 0.00 | 17.14 | 0.180 |
| 20060809 | 6.5 | 15.5 | 15.2 | 32.8 | 19.07 | 88.02 | 1.250 |
| 20060813 | 4.5 | 1.5 | 1.94 | 5.2 | 10.60 | 7.93 | 0.080 |
| 20060826 | 5.5 | 289.5 | 1.27 | 3.2 | 0.00 | 3.39 | 0.003 |
| 20060908 | 4.5 | 100.0 | 1.18 | 2.4 | 0.00 | 2.34 | 0.002 |

表 4 穿透降水元素含量与降水特性的相关分析

| 穿透降水元素 | 分析方法 | 降水历时 | 间隔 | I_{ave} | I_{30} | P_{24} | 穿透降水量 |
|--------|--------------|-------|-------|-----------|----------|----------|--------|
| N 含量 | Pearson 相关系数 | 0.288 | 0.590 | -0.514 | -0.581 | -0.358 | -0.347 |
| | 双尾 t 检验 | 0.489 | 0.123 | 0.192 | 0.131 | 0.384 | 0.400 |
| P 含量 | Pearson 相关系数 | 0.227 | 0.851 | -0.581 | -0.688 | -0.430 | -0.468 |
| | 双尾 t 检验 | 0.589 | 0.007 | 0.131 | 0.059 | 0.288 | 0.243 |
| K 含量 | Pearson 相关系数 | 0.208 | 0.863 | -0.639 | -0.727 | -0.561 | -0.526 |
| | 双尾 t 检验 | 0.622 | 0.006 | 0.088 | 0.041 | 0.148 | 0.181 |

注:表中各项样本数皆为 8,下同。

表 5 树干茎流元素含量与降水特性的相关分析

| 元素 | 分析项目 | 降水历时 | 间隔 | I_{ave} | I_{30} | P_{24} | 干流量 |
|------|--------------|--------|-------|-----------|----------|----------|--------|
| N 含量 | Pearson 相关系数 | -0.191 | 0.091 | -0.090 | -0.155 | -0.326 | -0.198 |
| | 双尾 t 检验 | 0.651 | 0.830 | 0.833 | 0.714 | 0.430 | 0.639 |
| P 含量 | Pearson 相关系数 | 0.074 | 0.424 | -0.529 | -0.641 | -0.440 | -0.433 |
| | 双尾 t 检验 | 0.862 | 0.295 | 0.178 | 0.087 | 0.275 | 0.284 |
| K 含量 | Pearson 相关系数 | -0.226 | 0.605 | -0.520 | -0.647 | -0.695 | -0.637 |
| | 双尾 t 检验 | 0.591 | 0.112 | 0.186 | 0.083 | 0.056 | 0.089 |

3 结论

单次降雨过程中的林冠截留量、穿透雨量和树干茎流量跟林外降水量皆呈线性相关关系,随着降水量

的增大,穿透雨量(率)、树干茎流量(率)和林冠截留量均不同程度相应增大,而林冠截留率明显减小。在 6—8 月的主要降水季节,透流率和干流率相对较高,而截留率相对降低;在较为干旱的 5 月和 9 月,其变

化规律正好相反。环境状况、气象条件和降水特性的不同是造成同一地区大气降水化学性质差异的主要原因。大气降水透过油松林冠层后,穿透降水和树干茎流中元素含量都有不同程度的增加,增幅最大的是K,N其次,P的含量相对较低,增加幅度也最小;N和K在树干茎流中的平均浓度最大,其次为穿透降水,大气降水中的最小;P的平均浓度大小顺序为:穿透降水>树干茎流>大气降水。

穿透降水中各元素含量变化均与两次降水时间间隔呈正相关,而与平均降雨强度、30 min最大降雨强度、前24 h降水量和穿透降水量呈负相关,即随着两次降水时间间隔的增加,穿透降水中的元素含量越高,而降雨强度和降水量越大,元素在穿透降水中的含量越低;除N外,树干茎流中P,K元素含量与降水特性的关系与穿透降水的相同。

[参 考 文 献]

- [1] 董世仁,郭景唐,满荣洲. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留. 北京林业大学学报, 1987, 9(1): 58—68.
- [2] 刘世海,余新晓,于志民. 密云水库集水区人工油松水源保护林降水化学性质研究[J]. 应用生态学报, 2001, 5(12): 697—700.
- [3] 田平,马钦彦,刘世海,等. 北京密云油松人工林降水化学性质研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 125—129.
- [4] Jordan M J, Likens G E. An organic carbon budget for an oligotrophic lake in New Hampshire, USA [J]. Verh. Int. Verein. Limnol, 1975, 19: 994—1003.
- [5] Parker G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle[J]. Adv. Ecol. Res, 1983, (13): 57—133.
- [6] 马雪华. 降雨在杉木和马尾松人工林养分循环中的作用[J]. 林业科学研究, 1988, 1(2): 123—131.
- [7] 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 (1): 84—96.
- [8] Likens G E, Bormann E H, Pierce R W, et al. Biogeochemistry of a forested Ecosystem[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977.
- [9] Zaneta Polkowska, Aleksander Astel, Barbara Walna, et al. Chemometric analysis of rainwater and throughfall at several sites in Poland [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 837—855.
- [10] Strigel G, Ruhayat D, Prayitno D, et al. Nutrient input by rainfall into secondary forests in east Kalimantan, Indonesia [J]. J. Trop. Ecol, 1994, 10: 285—288.
- [11] Cavalier J, Jaramillo M, Solis D, et al. Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama [J]. J. Hydrol, 1997, 193: 83—96.
- [12] Chuyong G B, Newbery D M, Songwe N C. Rainfall input, throughfall and stemflow of nutrients in a central African rain forests dominated by ectomycorrhizal trees [J]. Biogeochemistry, 2004, 67: 73—91.
- [13] Chiwa M, Kim D H, Sakugawa H. Rainfall, stemflow, and throughfall chemistry at urban and mountain-facing sites at MT. Gokurakuj, Hiroshima, Western Japan [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, 146: 93—109.
- [14] Potter C S. Stemflow nutrient inputs to soil in a successional hardwood forest [J]. Plant and Soil, 1992, 140: 249—254.
- [15] Tukey H B. The leaching of substances from plants. Annu. Rev [J]. Plant Physiol, 1970, 21: 305—324.
- [16] Tobón C, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning in throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four ecosystems in western Amazonia [J]. J. Hydrol, 2000, 237: 40—57.
- [17] Dezzee N, Chaon N, Sanoja E, et al. Changes in soil properties and vegetation characteristics along a forest-Savanna gradient in southern Venezuela [J]. For. Ecol. Manage, 2004, 200: 183—193.
- [18] Chacón N, Dezzee N. Soil and organic layer P fractions and sorption processes following a forest-Savanna gradient in the Gran Sabana, South Venezuela [J]. Biol. Fertil. Soils, 2004, 40: 14—19.