

降雨特征对兴安落叶松林降雨再分配过程中钾元素影响分析

胡悦, 满秀玲*, 魏红

(东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: [目的] 以大兴安岭地区兴安落叶松林为研究对象, 分析降雨特征对兴安落叶松林降雨再分配过程中 K^+ 的影响。[方法] 对林外降雨、穿透雨、灌木穿透雨、树干径流和枯透水进行了野外观测、取样和室内实验测定。[结果] 结果表明: (1) 研究期间兴安落叶松林林外降雨总量为 266.0 mm, 平均次降雨强度 $0.074 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; 降雨再分配过程中 K^+ 含量平均值排序为枯透水 > 树干径流 > 灌木穿透雨 > 穿透雨 > 林外降雨, 其中林外降雨中 K^+ 含量在 $0.227 \sim 2.631 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 变化幅度较大, 穿透雨中 K^+ 含量波动在 $2.198 \sim 3.053 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 枯透水中 K^+ 含量波动较小, 稳定在 $3.077 \sim 3.281 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。(2) 降雨量和降雨历时对降雨再分配过程中 K^+ 含量均表现为正相关, 随降雨量和降雨历时的增加 K^+ 含量的增加幅度呈上升趋势; 而降雨强度和降雨间隔期对 K^+ 含量增加幅度的影响则反之, 但当降雨强度大于 $0.041 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, K^+ 含量的增加幅度开始出现转折, 呈上升趋势; 当降雨间隔期增大至 233.28 h 时, K^+ 含量的增加幅度趋于稳定。(3) 影响林外降雨中 K^+ 含量的主导因子是降雨间隔期, 影响穿透雨、灌木穿透雨和树干径流中 K^+ 含量的主导因子均为林外降雨量, 而对枯透水中 K^+ 含量起主导作用的则为降雨强度。[结论] 降雨量、降雨历时、降雨强度以及降雨间隔期均会对降雨再分配过程中各个层次的 K^+ 含量产生不同程度的影响。降雨再分配过程中 K^+ 含量平均值大小排序为枯透水 > 树干径流 > 灌木穿透雨 > 穿透雨 > 林外降雨, 其中大气降雨中 K^+ 含量在 5 月和 9 月较高, 穿透雨中 K^+ 含量在 5—10 月呈波动式变化, 灌木穿透雨中 K^+ 含量变化幅度较大, 而树干径流和枯透水中 K^+ 含量较稳定。降雨量和降雨历时对降雨再分配过程中 K^+ 含量的影响均表现为正相关。对林外降雨中 K^+ 含量影响程度由大到小排序依次为降雨间隔期 > 降雨强度 > 降雨历时 > 降雨量, 穿透雨中 K^+ 含量与各影响因素的灰关联度大小顺序依次为降雨量 > 降雨历时 > 降雨强度 > 降雨间隔期, 灌木穿透雨和树干径流中 K^+ 含量与各影响因素的灰关联度排序和穿透雨一致, 影响的主导因子均为降雨量, 枯透水中 K^+ 含量与各影响因素的灰关联度大小顺序依次为降雨强度 > 降雨间隔期 > 降雨历时 > 降雨量。

关键词: 兴安落叶松林; 降雨量; 降雨强度; 降雨间隔期; 钾元素; 灰关联度

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)02-0307-08

Analysis on the Effects of Rainfall Characteristics on Potassium Content in *Larix gmelinii* Forest during Rainfall Redistribution

HU Yue, MAN Xiu-ling, WEI Hong

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] Selecting *Larix gmelinii* forest in Great Xing'anling Mountains as a research object, to analyze the effects of rainfall characteristics on potassium content in *L. gmelinii* forest during the process of rainfall redistribution. [Method] The precipitation, throughfall, shrub throughfall, stem flow and litter water were observed,

收稿日期: 2016-06-12

基金项目: 林业公益性行业专项(201404303-2)。

作者简介: 胡悦(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 森林水文学。E-mail: huluhuyue@163.com.

* 通讯作者: 满秀玲, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 水土保持与森林水文学。E-mail: mannefu@163.com

sampled and measured. [Result] The results showed that: (1) During the observation period, the rainfall outside of stands was 266.0 mm, the average rainfall intensity was $0.074 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; the order of the average content of K^+ during the rainfall redistribution was litter water > stem flow > shrub throughfall > throughfall > precipitation, the content of K^+ during precipitation changed greatly, the value fluctuated between $0.227 \sim 2.631 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the stem flow fluctuated between $2.198 \sim 3.053 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the content of K^+ in litter water was the most stable, fluctuated between $3.077 \sim 3.281 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. (2) It was found that the content of K^+ increased with the increase of rainfall and rainfall duration. However the rainfall intensity and inter-events interval were just the opposite unless the rainfall intensity was higher than $0.041 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. When the rainfall interval increases to 233.28 h, the increase of the content of K^+ became stable. (3) The leading factor influencing the K^+ content in rainfall outside stand was the rainfall interval. The key factor influencing the K^+ content in throughfall, shrub throughfall and stem flow was the precipitation. The rainfall intensity was the key factor influencing the K^+ content of litter water. [Conclusion] The Precipitation, rainfall duration, rainfall intensity and rainfall interval would influence the K^+ content during the process of rainfall redistribution in varying degrees.

Keywords: *Larix gmelinii* forest; rainfall; rainfall intensity; inter-events interval; potassium; grey correlation degree

大气降雨通过森林生态系统,在降雨再分配过程中,其水化学特征也会受到交换、过滤、吸附和淋洗等影响而发生显著变化^[1-2],而这种化学成分的改变主要取决于降雨类型、森林类型、森林结构、生长过程等^[3-4]。目前,关于植被对降雨水化学影响的研究较多,如唐晓芬等^[5]研究发现降雨经过林冠层后总的离子淋溶量表现为针阔混交林 > 常绿阔叶林 > 毛竹林 > 灌木林;刘茜^[6]等通过对大兴安岭北部白桦次生林降雨水化学特征研究发现 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Fe 等元素发生正淋溶,而 Na^+ 和 Cu^{2+} 则为负淋溶。但关于降雨特征对水化学影响的研究较少,且主要集中在南方地区,如周光益^[7]研究发现热带丛林生态系统在暴雨期间 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等含量随降雨强度的增强而增大,而 K^+ 含量则减小;王静^[8]在天童常绿阔叶林的研究中发现硝态氮的浓度受降雨量的影响,且呈显著负相关。

大兴安岭地处我国寒温带地区,地带性植被是以兴安落叶松为主的明亮针叶林,它不仅是大兴安岭地区最具代表性的森林生态系统,而且也是松嫩平原和呼伦贝尔草原的天然屏障,维护着东北地区的生态平衡。而 K 作为植物生长的必需元素,具有较高的活性^[9],且植物中的 K 元素主要来自土壤中的可溶性 K,土壤在某种程度上就像一个调节库,在水循环的过程中储存营养元素 K,然后供植物生长使用^[10]。因此本文选择大兴安岭北部兴安落叶松林为研究对象,分析降雨特征对降雨再分配过程中 K^+ 含量的影响,以期为该地区森林生态水文效应研

究提供理论依据。

1 研究区概况

本研究于 2015 年在大兴安岭北部黑龙江漠河森林生态系统定位研究站进行,地理坐标为 $122^{\circ}06' \sim 122^{\circ}27' \text{ E}$, $53^{\circ}17' \sim 53^{\circ}30' \text{ N}$,该地区属寒温带大陆性季风气候,具有明显的山地气候特点,冬季漫长寒冷,夏季短暂温热。年平均气温 -4.9°C ,极端最低气温达到 -52.3°C ,年平均降水量 430 mm 左右,多集中于 7~8 月份,初霜在 9 月初,终霜在 5 月中下旬,全年平均无霜期为 89 d,冰封期为 180~200 d。多年平均相对湿度 70%,积雪深度多在 50 cm 以上,最大风速 20 m/s。森林植被系欧亚大陆寒温带明亮针叶林,主要树种是兴安落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), 另外还有樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)、山杨 (*Populus davidiana* Dode.) 等,灌木有兴安杜鹃 (*Rhododendron dauricum* L.)、杜香 (*Ledum palustre* L.)、越桔 (*Vaccinium vitis-idaea* L.) 等。土壤以棕色针叶林土为主,局部地带分布有草甸土和沼泽土等,并有永冻层存在。

2 研究方法

2.1 样地设置

本研究选择的兴安落叶松样地于 2012 年设置,是生态站的固定样地,样地面积为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,样地内除兴安落叶松外,还有少量的山杨和白桦。

按照国家林业行业标准在样地内设置降雨收集装置,于2015年4月~2015年10月连续观测和收集林外降雨、林内穿透雨、灌木穿透雨、树干茎流和枯落物穿透雨。根据样地每木检尺数据可知,兴安落叶松平均胸径为12.31 cm,平均树高为11.39 m,林分郁闭度为0.7。

2.2 采样方法

2.2.1 林外降雨的采集 在林外开旷地放置美国ONSET公司生产的HOBORG3-M翻斗式雨量自记仪,距离地面1 m高,测定大气降雨。

2.2.2 穿透雨的采集 在样地内随机布设5个由PVC材料制作的直径20 cm、长100 cm的降雨槽收集穿透雨,降雨槽距离地面1.3 m高,以避免林下灌木和草本对穿透雨量的影响,同时降雨槽应与地面保持约5°的倾角,降雨槽较低的一端开口,与HOBORG3-M翻斗式雨量自记仪相连,记录穿透雨量和过程,雨量自记仪下方接一自制的雨量筒以收集穿透雨。

2.2.3 灌木穿透雨采集 标准地内的灌木主要是兴安杜鹃,在兴安杜鹃下方随机布设5个灌木穿透雨收集桶,直径为32 cm,高6 cm,收集桶上方铺设纱网,以避免落叶和昆虫进入,每次降雨后收集灌木层穿透雨水样。

2.2.4 树干径流采集 在每木检尺的基础上,选择不同径阶的样木安装径流装置,共选择7株样木,测定树干径流。将高密度不透水泡沫板内壁用刀修成斜面,斜面最低处挖一个导水小槽,小槽的最低端与聚乙烯塑料管相接将树干径流导入HOBORG3-M型雨量自记仪,将泡沫板环绕于树干上,用勒死扣勒紧,并且用玻璃胶封严各接缝处,确保树干径流全部流入聚乙烯塑料管下的自计雨量仪中,雨量仪下方接一自制的雨量筒以收集树干径流。

2.2.5 枯透水采集 在标准地内选择5个有代表性的样点,将原状枯落物原移到直径20 cm的圆筛中,圆筛下接一已经处理过的小塑料桶,并将小塑料桶埋入土壤中,以避免温度对水质的影响,每次降雨后立即逐一取样。

2.3 水样测定

每次降雨后,用干净的500 mL塑料瓶收取各类水样,并放入4℃冰箱冷藏。

水样在测定前均用直径为25 mm、孔径0.45 μm的水溶性微孔滤膜过滤,采用德国耶拿公司的novAA400P火焰原子吸收光谱仪测定K⁺浓度,测定

的样品需加入硝酸酸化。

2.4 数据分析

运用Excel 2010和灰色关联分析法对数据进行图表绘制及分析^[11-13]。

3 结果分析

3.1 研究区降雨特征

整个生长季内共观测到36场降雨,林外降雨总量为266.0 mm,降雨量最小值为0.4 mm,最大值为24.2 mm。降雨主要以小雨($P \leq 10$ mm)为主,多达25场,占降雨总次数的69.44%,占降雨总量的36.08%;中雨($10 \text{ mm} < P < 25$ mm)共11场,占降雨总次数的30.56%,占降雨总量的63.92%。其中,4月份降雨量最小,为7.75 mm,8月份的降雨量最大,为79 mm,次降雨强度介于0.001~0.058 mm·min⁻¹之间,平均降雨强度为0.074 mm·min⁻¹。次降雨历时最短持续0.02 h,最长持续27.33 h,平均降雨历时为5.67 h。详见图1。

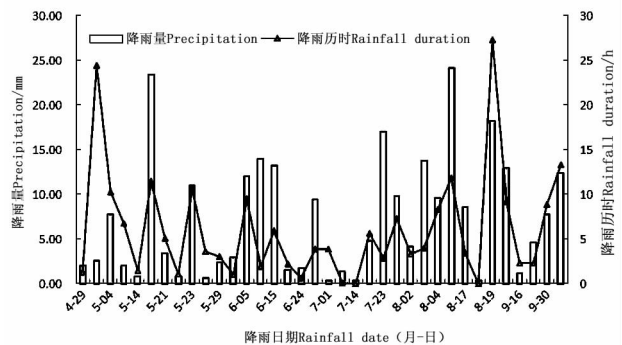


图1 研究期间降雨特征

Fig. 1 Characteristics of rainfall during the research time

3.2 降雨再分配过程中K⁺含量变化特征

由图2可知,林外降雨中K⁺含量从5月至10月呈波动式变化,波动幅度在0.227~2.631 mg·L⁻¹之间,其中5月和9月含量较高,月平均含量分别为2.631 mg·L⁻¹和2.068 mg·L⁻¹,其他月波动在0.227 mg·L⁻¹~0.681 mg·L⁻¹之间。穿透雨中K⁺含量从5月至8月呈波动式减少趋势,降低幅度达8.83%。9月后,K⁺含量增加至最高值3.053 mg·L⁻¹,这种大幅增加可能是落叶松在生长后期细胞内K⁺含量升高或植物细胞老化,从而K⁺析出量增高所致。穿透雨中K⁺含量除5月低于林外降雨外,其余月份均高于林外降雨。一方面是由于降雨对植物组织中K⁺的淋溶,另一方面是降雨洗脱附着在树叶、树枝和树干表面的颗粒物所致^[14]。灌木穿透

雨中 K^+ 含量在 5—8 月呈下降趋势,由 $2.833 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $1.977 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,降低了 43.30%,达极显著水平 ($P < 0.01$);8—10 月 K^+ 含量呈上升趋势,增加至最大值 $3.233 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。树干径流和枯透水中的 K^+ 含量从 5 月到 10 月变化幅度很小,差异不显著 ($P > 0.05$)。树干径流中 K^+ 含量波动在 $3.021 \sim 3.261 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,而枯透水中 K^+ 含量在波动在

$3.077 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 3.281 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。由图 2 还可以看出, K^+ 含量平均值大小排序为枯透水 > 树干径流 > 灌木穿透雨 > 穿透雨 > 林外降雨。通过差异显著性分析发现,林外降雨与枯透水中的 K^+ 含量差异达到极显著水平 ($P < 0.01$),而与穿透雨及树干径流之间差异显著 ($P < 0.05$),说明枯落物中 K^+ 输入量最大,而林冠层对 K^+ 的输入量最小。

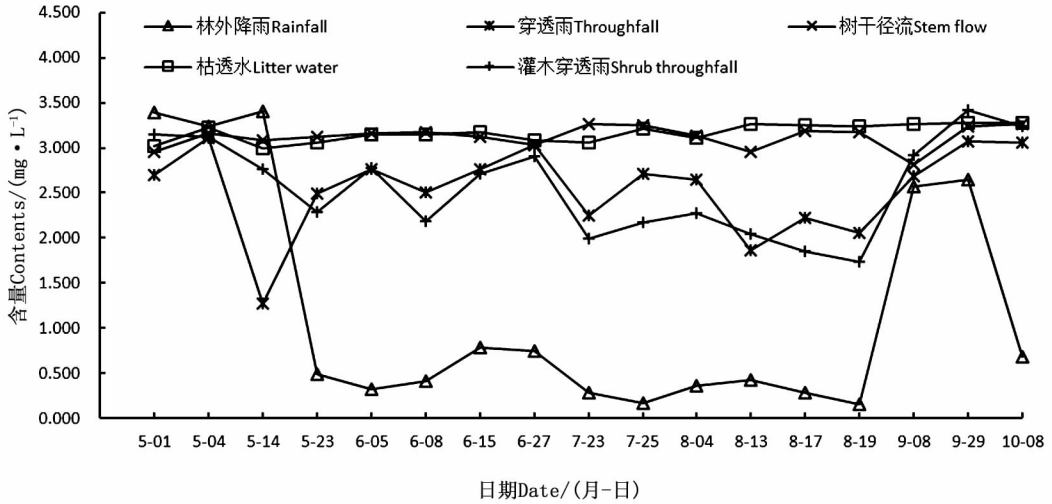


图 2 兴安落叶松林对大气降雨再分配过程中 K^+ 含量变化

Fig. 2 The content change of K^+ on *Larix gmelinii* during the rainfall redistribution

3.2.1 降雨量对 K^+ 含量的影响 为了更加准确地研究降雨量对 K^+ 含量的影响,我们选择了 5 场不同量级的降雨,见表 1,其中 4 月 29 日降雨量最小,仅有 2.00 mm,降雨经过林冠后穿透雨中 K^+ 含量由 $2.061 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $2.713 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,仅增加了 32%;5 月 23 日降雨量为 11.0 mm,穿透雨中 K^+ 含量由 $0.486 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $2.489 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,增加了 4.12 倍,增加幅度是 4 月 29 日的 12.88 倍;这主要是由于 5 月 23 日降雨量是 4 月 29 日的 5.5 倍,降雨量大可使降雨对林冠的淋洗更为彻底;6 月 8 日和 7 月 23 日降雨量分别达到 14.0 mm 和 17.0 mm 时,其穿透雨中 K^+ 含量的增加幅度是 5.02 倍和

6.81 倍,这说明穿透雨中 K^+ 含量受降雨量影响较大,且随降雨量的增加 K^+ 含量呈上升趋势。同样地,这三场降雨的灌木穿透雨中 K^+ 含量的增加幅度分别为 0.59 倍、3.72 倍及 4.26 倍,也表现出随着降雨量的增加, K^+ 含量的增加幅度呈上升趋势,与穿透雨中表现一致。由表 1 我们还可以看出,5 月 23 日与 8 月 4 日这两场降雨,降雨量和降雨强度相近,5 月 23 日穿透雨中 K^+ 含量增加了 4.12 倍,灌木穿透雨中 K^+ 含量增加了 3.72 倍,而 8 月 4 日穿透雨和灌木穿透雨中 K^+ 含量分别增加了 6.37 倍和 5.34 倍,增加幅度分别是 5 月 23 日的 1.55 倍和 1.44 倍。

表 1 不同降雨量 K^+ 含量比较

Table 1 The comparison of content of K^+ in different precipitation

日期 Date	林外降雨特征 Characteristics of rainfall			K^+ 含量/The content of K^+ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)				
	降雨量/mm Precipitation	降雨强度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) Rainfall intensity	降雨间隔期/h Inter-events interval	林外降雨 Rainfall	穿透雨 Throughfall	灌木穿透雨 Shrub throughfall	树干径流 Stem flow	枯透水 Litterwater
4 月 29 日	2.0	0.025	84.40	2.061	2.713	3.287	2.987	3.415
5 月 23 日	11.0	0.020	28.05	0.486	2.489	2.293	3.127	3.057
6 月 8 日	14.0	0.117	21.53	0.416	2.508	2.189	3.175	3.153
7 月 23 日	17.0	0.100	58.50	0.287	2.244	1.997	3.259	3.054
8 月 4 日	9.6	0.019 2	6.12	0.360	2.648	2.280	3.138	3.107

树干径流中 K^+ 含量变化趋势与穿透雨相同,随着降雨量的增加,4月29日、6月8日和7月23日这三场降雨树干径流中 K^+ 含量分别增加了0.45倍、6.63倍和10.34倍,呈上升趋势。虽然 K^+ 在树干表面含量很少,但是由于树皮给大气沉降提供了良好的接受场所,并且是植物的非光合器官,它很难直接从水体中吸收营养元素,相反雨水易于淋洗树干附着物,使得树干径流中的化学元素含量呈增加趋势^[15-16]。枯透水中 K^+ 含量增加幅度变化较小,相差不大。除4月29日外,其它4场降雨的枯透水中 K^+ 含量增加幅度呈上升趋势,分别增加了17.33%、22.82%、25.72%和36.10%,而4月29日 K^+ 含量增加了25.88%,与6月8日几乎相同,主要是由于此时林分颗粒物积累较长,使得降雨淋洗的干沉降物较多,同时降雨量仅为2.0 mm,反而发生了浓缩现象^[17],使得 K^+ 含量较高。

3.2.2 降雨历时和降雨强度对 K^+ 含量的影响 为了更好地说明降雨历时和降雨强度对 K^+ 含量的影响,我们选择10 mm左右和18 mm左右的2个降雨量级进行对比分析,见表2。其中7月23日和8月19日降雨量分别为17.0 mm和18.2 mm,属于同一雨量级,7月23日的降雨经过林冠后穿透雨中 K^+ 含量较大气降雨增加了6.81倍,而8月19日增加了11.92倍,增加的幅度是7月23日的1.75倍。这是由于8月19日降雨历时达27.33 h,而7月23日仅为2.83 h,降雨历时长可使降雨对林冠的淋洗更为彻底。由表2还可以看出,7月23日这场降雨的降雨间隔期为58.5 h,而8月19日为28.12 h,两者相差不到一天,即降雨量和降雨间隔期相差较小的情况下,降雨历时越长,穿透雨中 K^+ 含量越高。同样地,6月27日与8月4日这两场降雨,降雨量与降雨间隔期比较接近,而6月27日降雨历时为3.85 h,8月4日降雨历时为8.35 h,比6月27日高出4.50

h,使得8月4日穿透雨中 K^+ 增加幅度为6.37倍,而6月27日仅为3.03倍。这说明穿透雨中 K^+ 含量受降雨历时的影响较大,且与降雨历时呈正相关关系,与降雨强度呈负相关关系。

灌木穿透雨中,6月27日和8月4日的2场降雨,其降雨量与降雨间隔期相近,但降雨历时和降雨强度相差很大,6月27日 K^+ 含量由 $0.751 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $2.905 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,增加了2.87倍,8月4日 K^+ 含量增加幅度为5.34倍,较6月27日 K^+ 含量增加幅度高出86.06%;同样地,在7月23日和8月19日的两场降雨也表现出相同的规律,这说明降雨历时对灌木穿透雨中 K^+ 含量的变化幅度表现出正相关关系。树干径流与枯透水中 K^+ 含量变化幅度与穿透雨的相同,都是随着降雨历时的增加, K^+ 含量增加幅度呈上升趋势。如8月4日树干径流中 K^+ 含量增加了7.73倍,而8月19日则增加了11.92倍;当8月4日降雨的枯透水中 K^+ 含量增加17.33%时,8月19日降雨的枯透水中 K^+ 含量增加了57.81%。由此可以看出,降雨历时对穿透雨、灌木穿透雨、树干径流及枯透水中 K^+ 含量的变化幅度影响较大。

由表2还可以得知, K^+ 含量的增加幅度随着降雨强度的增加而呈降低趋势,但当降雨强度增加至 $0.041 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,穿透雨中 K^+ 含量增加幅度降至最低,为3.03倍,灌木穿透雨、树干径流及枯透水中 K^+ 含量增加幅度也降至最低,分别为2.87倍、3.03倍和0.02倍,而后随着降雨强度由 $0.041 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加至 $0.100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,降雨各层次中 K^+ 含量增加幅度反而呈上升趋势,分别为6.81倍、5.95倍、10.34倍和0.36倍,因此得出, K^+ 含量的增加幅度随着降雨强度的增加呈现出先降低后上升的趋势,当降雨强度增加至 $0.041 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, K^+ 含量增加幅度降至最低,而后开始呈上升趋势。

表2 不同降雨强度和降雨历时 K^+ 含量比较

Table 2 The comparison of content of K^+ in different rainfall duration and rainfall intensity

日期 Date	林外降雨特征 Characteristics of rainfall				K^+ 含量 The content of K^+ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)				
	降雨量/mm Precipitation	降雨历时/h Rainfall duration	降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$ rainfall intensity	降雨间隔期/h Inter-events interval	林外降雨 Rainfall	穿透雨 Throughfall	灌木穿透雨 Shrub throughfall	树干径流 Stem flow	枯透水 Litter water
6月27日	9.4	3.85	0.041	64.42	0.751	3.028	2.905	3.027	0.079
7月23日	17.0	2.83	0.100	58.5	0.287	2.244	1.997	3.259	3.054
8月4日	9.6	8.35	0.019	6.12	0.360	2.648	2.280	3.138	3.107
8月19日	18.2	27.33	0.001	28.12	0.159	2.055	1.740	3.169	3.243

3.2.3 降雨间隔期对 K^+ 含量的影响 由表3可知,6月5日、6月15日和9月8日这3场降雨,降

雨量接近,但降雨间隔期相差很大,分别为16.13 h、162.92 h和440.43 h。6月5日降雨经过林冠后穿

透雨中 K^+ 含量由 $0.320 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $2.762 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 增加了 7.64 倍, 6 月 15 日降雨的穿透雨中 K^+ 含量增加了 2.53 倍; 2 场降雨 K^+ 含量增加均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。而 9 月 8 日穿透雨中 K^+ 含量由 $2.564 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $2.684 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仅增加了 0.05 倍, 没有达到显著水平 ($P > 0.05$)。灌木穿透雨中, 6 月 5 日和 6 月 15 日这两场降雨中 K^+ 含量的增加幅度分别为 7.69 倍和 2.47 倍, 而 9 月 8 日的增加幅度仅 0.14 倍, 与穿透雨中 K^+ 的变化幅度表现出相同的规律; 同样地, 树干径流中 K^+ 含量增加幅度最大的是 6 月 5 日的降雨, 增加了 8.90 倍, 其次是 6 月 15 日的降雨, 增加了 2.99 倍, 而 9 月 8 日 K^+ 含量增加幅度最小, 仅为 0.05 倍。在 8 月 4 日和 9 月 30 日的两场降雨中我们也发现了同样的规律, 8 月 4 日和 9 月 30 日这两场降雨的降雨量和降雨历时相差很小, 但 9 月 30 日的降雨间隔期为 233.28 h, 而 8 月 4 日的降雨间隔期仅为 6.12 h, 两者相差高达 227.16 h, 使得 8 月 4 日降雨的穿透

雨、灌木穿透雨及树干径流中 K^+ 含量分别增加了 6.37 倍、5.34 倍、7.73 倍, 较 9 月 30 日的穿透雨、灌木穿透雨及树干径流中 K^+ 含量增加幅度高出很多。同时我们发现, K^+ 含量的增加幅度并不是无限制的减小, 当降雨间隔期由 16.13 h 增加至 162.92 h 时, 穿透雨中 K^+ 含量增加幅度由 7.64 倍降至 2.53 倍, 降低幅度较大; 而当降雨间隔期由 233.28 h 增加至 440.43 h 时, 穿透雨中 K^+ 含量增加幅度由 16% 仅降至 5%, 增加幅度逐渐变缓。同样地, 灌木穿透雨和树干径流中 K^+ 含量的增加幅度变化也出现了相同的规律, 由此得出穿透雨、灌木穿透雨和树干径流中 K^+ 含量增加幅度随着降雨间隔期的延长而逐渐减小, 但并不是无限制减小, 当降雨间隔期增加至 233.28 h 后, K^+ 含量的增加幅度逐渐趋于平缓。而枯透水中 K^+ 含量增加幅度, 6 月 5 日枯透水中 K^+ 含量增加了 13.83%, 而随着降雨间隔期的增长, 6 月 15 日和 9 月 8 日枯透水中 K^+ 含量增加幅度分别为 14.74% 和 21.80%。

表 3 不同降雨间隔期 K^+ 含量比较

Table 3 The comparison of content of K^+ in different inter - events interval

日期 Date	林外降雨特征 Characteristics of rainfall			K^+ 含量 The content of K^+ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)				
	降雨量/mm Precipitation	降雨强度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) Rainfall intensity	降雨间隔期/h Inter - events interval	林外降雨 Rainfall	穿透雨 Throughfall	灌木穿透雨 Shrub throughfall	树干径流 Stem flow	枯透水 Litter water
6 月 5 日	12.0	0.027	16.13	0.320	2.762	2.780	3.166	3.144
6 月 15 日	13.2	0.037	162.92	0.782	2.762	2.711	3.124	3.169
8 月 4 日	9.6	0.019	6.12	0.360	2.648	2.280	3.138	3.107
9 月 8 日	13.0	0.024	440.43	2.564	2.684	2.919	2.809	3.269
9 月 30 日	7.8	0.014 2	233.28	2.652	3.067	3.419	3.233	3.281

3.3 影响 K^+ 含量的降雨特征因子及其重要性

影响 K^+ 含量的因素有很多, 并且这些影响因子之间存在一定的相互影响, 因此, 本文采用灰色关联分析方法来确定各因素对 K^+ 含量影响的重要性。灰关联度越大, 说明各因素对 K^+ 含量的影响就越大^[18]。

从表 4 可知, 林外降雨中 K^+ 含量与各影响因素的灰关联度大小顺序依次为降雨间隔期 > 降雨强度 > 降雨历时 > 降雨量, 这说明对林外降雨中 K^+ 含量起主要影响的是降雨间隔期, 降雨间隔期越长, 大气中所积累的颗粒物越多, 降雨时 K^+ 含量增大; 穿透雨中 K^+ 含量与各影响因素的灰关联度大小顺序依次为降雨量 > 降雨历时 > 降雨强度 > 降雨间隔期, 这说明对穿透雨中 K^+ 含量起主要影响的是降雨量。

灌木穿透雨中 K^+ 含量与各影响因素的灰关联度大小顺序与穿透雨相同, 林外降雨量对灌木穿透雨中 K^+ 含量起主要影响作用。树干径流中 K^+ 含量影响因素的灰关联度大小顺序依次为降雨量 > 降雨历时 > 降雨强度 > 降雨间隔期, 即林外降雨量对树干径流中 K^+ 含量影响较大。而在枯透水中, 对枯透水 K^+ 含量影响较大的则是降雨强度, 最小的为降雨量。并且, 本研究中所涉及的影响因子中, 与各层次的 K^+ 含量的灰色关联度都超过了 0.4, 说明林外降雨量、降雨历时、降雨强度及降雨间隔期均会对降雨再分配过程中 K^+ 含量变化产生一定的影响, 不可忽略, 只是不同的降雨特征值对降雨再分配各组分 K^+ 含量的影响程度有所不同。

表4 K⁺含量与其影响因素的灰关联度Table 4 Grey correlation degree between the content of K⁺ and influencing factors

	降雨量 Precipitation	降雨历时 Rainfall duration	降雨强度 Rainfall intensity	降雨间隔期 Inter-events interval
林外降雨	0.681 9	0.696 2	0.906 3	0.939 5
穿透雨	0.705 6	0.687 1	0.674 9	0.635 9
灌木穿透雨	0.774 5	0.712 0	0.689 9	0.608 5
树干径流	0.749 5	0.729 8	0.712 8	0.675 3
枯透水	0.670 8	0.692 9	0.908 0	0.892 3

4 讨论

在整个生长季内共观测到36场降雨,通过对采集的降雨进行分析,K⁺含量平均值排序为枯透水>树干径流>灌木穿透雨>穿透雨>林外降雨,这与刘世海^[16]、张娜^[19]等人的研究结果相一致,这说明降雨在经过林分的再分配过程中,对K⁺的淋溶呈增值效应,使得K⁺含量增加。而降雨量、降雨历时、降雨强度及降雨间隔期等降雨特征对K⁺含量产生一定的影响,这与甘建民^[20]、刘世海^[21]等人的研究结果相一致。

降雨历时对林冠穿透雨、灌木穿透雨、树干径流和枯透水中K⁺含量增加幅度的影响表现为随降雨历时的增长,K⁺含量增加幅度呈上升趋势,而降雨强度却相反,当降雨强度较低时,随降雨强度的增加K⁺含量的增加幅度表现为下降趋势,这与张伟^[22]等的研究结果一致,当降雨量小,降雨强度低,树木林冠层的吸收和吸附能力较强,元素所受吸附力大于冲刷力,表现为浓度值负增长。但本研究同时发现这种下降趋势并不是无限的,当降雨强度增加至0.041 mm·min⁻¹时,即降雨历时为3.85 h,K⁺含量的增加幅度反而开始呈上升趋势;同样地,降雨间隔期对穿透雨、灌木穿透雨和树干径流中的K⁺含量增加幅度影响也较大,随着降雨间隔期的增长,K⁺含量增加幅度却呈下降趋势,这可能是由于雨前干燥期越长,会导致枝叶、树皮更加干燥。降雨初期,落叶松的枝叶、树干吸收和吸附能力较强,会吸收大量的水分,吸收水分的同时,降雨淋洗的K⁺会被枝叶、树干大量吸收。而降雨后期,落叶松自身吸附达到饱和后,多余K⁺就会被淋洗出来;因此,降雨间隔期增长,落叶松自身吸收的水分和养分会升高,使得K⁺含量增加幅度降低。但当降雨间隔期增大至233.28 h时,K⁺含量的增加幅度开始出现拐点,不再随着降雨间隔期的延长而无限降低,反而是趋于

平缓。这说明此时树皮、枝叶已经达到了饱和,不会随间隔期的延长而发生变化。而枯透水中的K⁺含量的增加幅度受降雨间隔期的影响较小。同样,分析发现在降雨量、降雨强度和降雨间隔期都相差很小的情况下,K⁺含量的变化与植物生长季有很大的关系,如5月23日与8月4日这两场降雨,5月23日穿透雨和灌木穿透雨中K⁺含量分别增加了4.12倍和3.72倍,而8月4日穿透雨中K⁺含量增加了6.37倍,灌木穿透雨中K⁺含量增加了5.34倍,导致这种情况的原因可能是由于K⁺在植物活跃的生长区,特别是芽、嫩叶和根尖部位含量很多,并且在化学上移动性极强,水中极易溶解,极易从叶、枝、花、果上溶脱^[23];而落叶松及林内灌木8月达到生长顶峰,林冠枝叶繁茂,含有大量的K⁺,而5月落叶松及兴安杜鹃等灌木刚展叶,使得5月淋洗出的K⁺含量较少。这说明K⁺含量同时与植物生长季有很大的关系。

5 结论

(1)研究期间兴安落叶松林林外降雨总量为266.0 mm,平均次降雨强度达0.074 mm·min⁻¹;降雨再分配过程中K⁺含量平均值大小排序为枯透水>树干径流>灌木穿透雨>穿透雨>林外降雨,其中大气降雨中K⁺含量在5月和9月较高,分别为2.631 mg·L⁻¹和2.068 mg·L⁻¹,穿透雨中K⁺含量在5—10月呈波动式变化,其值波动在2.198~3.053 mg·L⁻¹之间,灌木穿透雨中K⁺含量波动在1.977~3.233 mg·L⁻¹之间,变化幅度较大,而树干径流和枯透水中K⁺含量较稳定,分别波动在3.021~3.261 mg·L⁻¹和3.077~3.281 mg·L⁻¹之间。

(2)降雨量和降雨历时对降雨再分配过程中K⁺含量的影响均表现为正相关,随降雨量和降雨历时的增加K⁺含量增加幅度呈上升趋势;而降雨强度和降雨间隔期对K⁺含量增加幅度的影响则反之,当降雨强度大于0.041 mm·min⁻¹时,K⁺含量的增加幅度开始出现转折,呈上升趋势,当降雨间隔期增大至233.28 h时,K⁺含量的增加幅度趋于稳定。

(3)通过灰色关联分析确定了各影响因子对K⁺含量影响的重要性,并且进行排序,对林外降雨中K⁺含量影响程度由大到小排序依次为降雨间隔期>降雨强度>降雨历时>降雨量,穿透雨中K⁺含量与各影响因素的灰关联度大小顺序依次为降雨量

>降雨历时>降雨强度>降雨间隔期,灌木穿透雨和树干径流中 K^+ 含量与各影响因素的灰关联度排序和穿透雨一致,影响的主导因子均为降雨量,枯透水中 K^+ 含量与各影响因素的灰关联度大小顺序依次为降雨强度>降雨间隔期>降雨历时>降雨量。

参考文献:

- [1] Lindberg S E, Lovett G M, Richter D D, *et al.* Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest[J]. *Science*, 1986, 231(4734):141-5.
- [2] Puckett L J. Estimates of ion sources in deciduous and coniferous throughfall[J]. *Atmospheric Environment. part A. general Topics*, 1990, 24(3):545-555.
- [3] Friedland A J, Miller E K, Battles J J, *et al.* Nitrogen deposition, distribution and cycling in a subalpine spruce-fir forest in the Adirondacks, New York, USA[J]. *Biogeochemistry*, 1990, 14(1):31-55.
- [4] Fang W, Ding M M. Hydrological dynamics and nutrient migration with precipitation of artificial *Acacia mangium* forest in low subtropical downland[J]. *Acta Ecol Sin*, 1995, 15(suppl.):115-123.
- [5] 唐晓芬,王云琦,王玉杰,等. 重庆酸雨区缙云山典型林分冠层酸雨淋洗特征[J]. *林业科学研究*, 2013, 05:548-553.
- [6] 刘茜,满秀玲,田野宏,等. 大兴安岭北部白桦次生林降雨再分配金属元素季节动态研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 05:119-123+133.
- [7] 周光益. 台风暴雨对热带林生态系统地球化学循环的影响[J]. *北京林业大学学报*, 1998, 06:40-44.
- [8] 王静, YOU Wen-hui, 石珺,等. 天童常绿阔叶林树干径流中硝酸盐特征[J]. *内蒙古大学学报:自然科学版*, 2008, 39(4):440-445.
- [9] 刘楠,王玉杰,王云琦,等. 亚热带缙云山典型林分不同层次水化学效应[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 02:236-248.
- [10] 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.
- [11] 赖坤容,周维博. 灰色关联分析在延安市宝塔区延河段水质评价中的应用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 05:570-573.
- [12] 王乃江,刘增文,徐钊,等. 黄土高原主要森林类型自然性的灰色关联度分析[J]. *生态学报*, 2011, 02:316-325.
- [13] 郑松发,郑德璋,廖宝文,等. 红树植物半人工小群落的生态学研究——直接引进的乔木种群对原灌木群落及其种群的扰动效应[J]. *林业科学研究*, 1996, 9(3):246-254.
- [14] 黄建辉,李海涛,韩兴国,等. 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*, 2000, 02:248-251.
- [15] 巩合德,王开运,杨万勤. 川西亚高山3种森林群落穿透雨和茎流养分特征研究[J]. *林业科学*, 2005, 05:14-20.
- [16] 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, 05:697-700.
- [17] Hou B F, Wei H. Estimation of dry deposition and canopy exchange in Chinese fir plantations[J]. *Forest Ecology & Management*, 2001, 147(2-3):99-107.
- [18] 段旭,王彦辉,于澎涛,等. 六盘山分水岭沟典型森林植被对大气降雨的再分配规律及其影响因子[J]. *水土保持学报*, 2010, 05:120-125.
- [19] 张娜,刘兴诏,李坤,等. 南亚热带三种主要森林降雨及其再分配过程中的养分差异规律[J]. *生态学杂志*, 2011, 02:193-200.
- [20] 甘健民,薛敬意,谢寿昌. 云南中山湿性常绿阔叶林中降雨对养分淋溶的影响[J]. *植物生态学报*, 1996(3):279-284.
- [21] 刘世海,余新晓. 密云水库集水区刺槐水源保护林水化学性质研究[J]. *水土保持通报*, 2000, 05:13-15.
- [22] 张伟,杨新兵,李军. 冀北山地华北落叶松林生态系统水化学特征[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4):217-220.
- [23] 陈步峰,周光益,曾庆波,等. 热带山地次生雨林的化学特征及其与降雨量关系的研究[J]. *林业科学研究*, 1993, 02:117-123.

(责任编辑:崔 贝)