

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150031

白桦次生林降雨水化学及养分输入特征

刘茜 满秀玲 田野宏

(东北林业大学林学院)

摘要:通过对大兴安岭北部白桦次生林林外降雨、穿透雨、树干径流和枯透水进行野外观测、取样及室内水化学测定,研究了白桦次生林降雨养分输入特征。结果表明:大兴安岭漠河地区大气降雨呈中性,pH为7.0,TDS值为19 mg/L。在白桦林降雨再分配过程中,pH与TDS均表现为先降低后升高的趋势,最低值都出现在树干径流中,分别为5.3、15 mg/L。而pH和TDS的最高值分别出现在大气降雨和枯透水中。阴离子中, F^- 及 SO_4^{2-} 最高值均出现在树干径流中,其他阴离子浓度则在枯透水中最高,且其中 NO_3^- 变化最大,最高、最低相差100.4倍。金属元素中, Na^+ 、 Zn^{2+} 及Mn元素最高值均出现在树干径流中,其他元素浓度则在枯透水中最高。而最低值几乎均出现于大气降雨(除 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 外)中。大气降雨养分输入量为95.414 kg/hm²,降雨穿过林冠层后, F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、Fe元素及 Cu^{2+} 含量均有不同程度降低,其余元素则有所增加,使林内雨养分总量降为93.557 kg/hm²。林内雨穿过枯落物层后,除 Na^+ 含量较林内雨降低外,其他元素含量均升高,养分总输入量升高了72.149 kg/hm²。与大气降雨输入量相比,枯透水输入量则增加了70.296 kg/hm²,其中 Cl^- 、 Na^+ 和 Cu^{2+} 含量低于大气降雨,其他元素则有不同程度增加。最终大气降雨通过白桦次生林后输入土壤养分总量为165.711 kg/hm²,其中阴离子输入量为37.823 kg/hm²,金属元素输入量为127.888 kg/hm²。

关键词:大兴安岭北部;白桦次生林;降雨再分配;水化学;养分输入

中图分类号:S715.2 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2015)08-0083-07

LIU Xi; MAN Xiu-ling; TIAN Ye-hong. **Hydro-chemical and nutrient importing characteristics of precipitation in secondary *Betula platyphylla* forests in northern Great Xing' an Mountains, northeastern China.** *Journal of Beijing Forestry University*(2015)37(8) 83-89[Ch, 22 ref.] School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China.

We observed and sampled the precipitation, throughfall, stem flow and litter water in secondary *Betula platyphylla* forests in northern Great Xing' an Mountains and measured their hydro-chemical properties, in order to study the nutrient importing characteristics of precipitation. The results showed that: the precipitation in Mohe area was neutral with pH value of 7.0 and TDS of 19 mg/L. The pH and TDS showed a tendency of increasing first and then declining, with the minimum values of pH and TDS both in the stem flow, 5.3 and 15 mg/L, respectively, while the maximum value of pH was in the rainfall and that of TDS in litter water. The highest concentrations of F^- and SO_4^{2-} were found in the stem flow, and those of other anions in the litter water. Among the anions, the concentration of NO_3^- had the greatest variation, with the maximum 101.4 times as high as the minimum. As for the metallic elements, the highest concentrations of Na^+ , Zn^{2+} and Mn occurred in the stem flow, and those of the others in the litter water, while the lowest concentrations of them were almost all in rainfall (except for Ca^{2+} and Cu^{2+}). The overall nutrient input of precipitation was 95.414 kg/ha. After the rain falls through forest canopy, the concentrations of F^- , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Fe and Cu^{2+} decreased to different degrees whereas the others increased, and the total nutrient content of throughfall was reduced to 93.557 kg/ha.

收稿日期:2015-01-29 修回日期:2015-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目(31170420)。

第一作者:刘茜。主要研究方向:森林水文。Email:lx830111318@163.com 地址:150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路26号东北林业大学林学院。

责任作者:满秀玲,教授,博士生导师。主要研究方向:水土保持与土地荒漠化防治。Email:mannefu@163.com 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

After passing through the litter layer, except for Na^+ , the contents of other elements increased to varying degrees, and the total amount of nutrient input was increased by 72.149 kg/ha. Compared with the rainfall input, litter water input was increased by 70.296 kg/ha, in which Cl^- , Na^+ and Cu^{2+} contents were lower than those in the rainfall, while other elements had increased to different degrees. Eventually the total amount of nutrient input that the rainfall brought to the soil after passing through the secondary forests was 165.711 kg/ha, the amount of anions input was 37.823 kg/ha, and the metallic element input was 127.888 kg/ha.

Key words northern Great Xing'an Mountains; *Betula platyphylla* secondary forest; rainfall redistribution; hydro-chemistry; nutrient import

森林生态系统的养分输入途径包括枯枝落叶分解及养分释放、土壤养分输入、大气降水养分输入等,而大气降水过程中的营养物质输入是森林生态系统养分输入的一个重要途径,对森林生态系统的生态平衡起着重要作用。降水通过森林生态系统,在降雨量得到分配的过程中,其化学元素浓度也发生了很大的变化,这种变化构成了生态系统的养分循环的重要部分。降水便成了森林生态系统化学物质的主要来源之一,也是森林生态系统养分循环及养分平衡的基础^[1]。

大兴安岭林区北部处在我国寒温带针叶林地带,其纬度高,气温低,林分组成相对单调,而且生长季短,造成林地内枯枝落叶分解及养分释放缓慢。同时林地土层较薄,土壤养分输入能力较弱^[2],所以大兴安岭地区森林养分循环及林木生长对降雨养分输入依赖性较强。而处于不同演替阶段的森林生态系统,由于其结构和组成的不同,其生态系统养分循环也会有所差异。众所周知,白桦(*Betula platyphylla*)作为大兴安岭林区主要阔叶树种,其天然更新良好,所以在火烧迹地和采伐迹地上常常形成大面积白桦次生林^[3],故白桦次生林刚好处于大兴安岭地区一个典型的演替阶段。所以研究大兴安岭北部白桦次生林的降雨养分输入特征对于研究大兴安岭乃至全国森林生态系统养分循环具有重要意义。另外,巩合德等^[4]、李文影等^[5]虽分别在川西亚高山及小兴安岭地区对于白桦次生林降雨水化学及养分输入特征进行过研究,但他们的研究重点分别在于干沉降和林冠淋溶对于林内雨养分含量的影响及不同林龄白桦次生林降雨水化学特征差异上,都未对白桦次生林降雨再分配过程中养分输入特征进行深入研究,同时由于地区差异,研究结果也可能会有所不同。因此,本文对大兴安岭北部白桦次生林降雨再分配进行野外取样及水化学特征测定,以期科学评价大兴安岭地区森林生态系统的养分循环及生态水文效应提供依据。

1 研究区概况

本研究于2013年5月至9月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 $122^{\circ}06' \sim 122^{\circ}27'E$ 、 $53^{\circ}17' \sim 53^{\circ}30'N$ 。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,夏季短暂湿热。年平均气温 -4.9°C ,年平均降水量431.2 mm,且多集中于7—8月份,全年平均无霜期为89 d,初霜在9月初,终霜在5月中下旬。森林植被系欧亚大陆寒温带针叶林,主要乔木树种有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)等。主要灌木树种有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)、越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)等。土壤以棕色针叶林土为主,局部地带有草甸土和沼泽土,并有永冻层存在^[6]。

2 研究方法

2.1 样地概况及水样采集

黑龙江漠河森林生态系统定位研究站白桦次生林固定样地于2009年设置,样地面积 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 。树种组成为9白1山。白桦平均胸径为11.75 cm,平均树高为13.41 m,平均冠幅1.44 m。林分郁闭度为0.9。降雨再分配雨量收集装置完全按照林业行业标准进行设置。在距样地150 m开旷地放置雨量自记仪,实时观测大气降雨,同时放置一自制的直径为20 cm的PVC降雨筒以收集大气降雨。在样地内随机布设3个集水面积为 $20\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ 的集水槽,使其距离地面高度1.3 m,并保持约 5° 的倾角,较低一端底部开口,连接雨量自记仪,记录每场降雨的穿透雨量。根据样地内林木径阶分布选择不同胸径标准木4株,将高密度不透水泡沫板内壁用刀修成斜面,将其环绕于树干上,用尼龙扎带勒紧,且在最低处挖一个导水小槽,用塑料管将树干径流导入雨量自记仪。样地内所有雨量自计仪正下方均

放一自制的降雨筒以收集穿透雨、树干径流水样。另在样地内随机放置5个自制降雨筒,取原状枯落物置于降雨筒上方的纱网筐中,保证降水通过枯落物后全部流入降雨筒内,以收取枯透水^[7]。

观测时间为2013年5月15日至2013年10月1日,共140 d。共收取28场大气降雨,降雨量为439.4 mm。每次降雨后,用清洁的500 mL塑料瓶收取各类水样,放入冰箱中保存。其中,收集大气降雨、穿透雨水样各28个,树干径流水样112个,枯透水水样为混合样,数量为26个。

2.2 水样测定及数据处理

pH及TDS值(溶解性固体总量)分别用pH计和TDS笔进行原样测定。水样在测定前均用直径为25 mm、孔径为0.45 μm的水溶性微孔滤膜过滤,阴离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-})用瑞士万通离子色谱测定。金属元素(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mn 、 Fe 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+})含量用德国耶拿公司的novAA400P火焰法测定,测定前样品需加硝酸酸化。若其含量超出仪器检出上限,稀释10倍以后测定。

数据处理采用加权平均法,以次降雨的降雨量占降雨总量的比为权重,计算单位面积降雨各养分元素的年输入量。

3 结果与分析

3.1 pH与TDS分析

由图1可看出,大气降雨经过白桦次生林各层次后,pH及TDS均是在穿透雨及树干径流中先有不同程度的降低,而后在枯透水中又上升。其中,大气降雨pH值为7.0,属中性,表明该地区空气质量较好,无酸性污染物质。穿透雨、树干径流及枯透水pH值分别为6.4、5.3、6.5,说明雨水经过白桦次生林后有酸化的趋势。树干径流降低最多,酸化最为明显,其次为穿透雨,枯透水降低最少。表明可能有生物酸进入穿透雨和树干径流中,使雨水pH降低。而枯落物层有碱性物质溶出,对林内降水的酸度起到缓冲作用^[8],这与杜敏等^[9]研究结果一致。关于TDS值,大气降雨中仅为19 mg/L,最大值在枯透水中为52 mg/L,是最低值树干径流的3.4倍,表明枯落物层淋出溶解性固体总量最多。而穿透雨、树干径流TDS值略低于大气降雨,这可能与离子交换或物质淋出与吸附有关。以上与杨丽丽^[10]在六盘山桦树林的研究结果不同,可能与两者所处的温度带不同有一定关联。经上述分析可知,漠河地区大气降雨呈中性,在降雨再分配过程中pH与TDS变化趋势一致,均为先降低后在枯透水中升高,最低值都出现在树干径流中,而pH和TDS的最高值分别出

现在大气降雨和枯透水中(图1)。

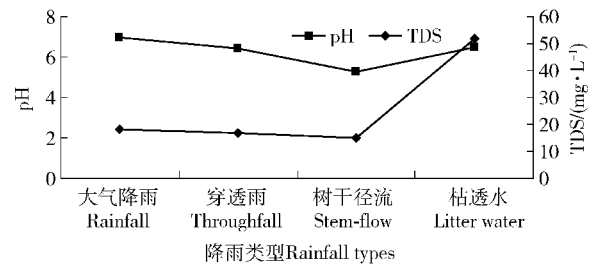


图1 pH与TDS值变化特征

Fig. 1 Changes in pH and TDS

3.2 阴离子变化特征分析

由表1可知,大气降雨经过白桦次生林进行降雨再分配,形成穿透雨、树干径流和枯透水后,阴离子浓度均发生改变,且不同阴离子变化也不相同。大气降雨、穿透雨及树干径流中均是 SO_4^{2-} 浓度最大。

表1 阴离子变化特征

阴离子 Anions	大气降雨 Rainfall	穿透雨 Throughfall	树干径流 Stem flow	枯透水 Litter water
F^-	0.127	0.096	0.582	0.274
Cl^-	0.636	0.443	0.406	0.721
NO_3^-	0.247	0.145	0.074	7.504
SO_4^{2-}	0.843	1.112	3.678	1.728
PO_4^{3-}	0.000	0.431	0.310	1.521

其中大气降雨中浓度最小的是 PO_4^{3-} ,为0,排序为: $SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > F^- > PO_4^{3-}$;穿透雨中各阴离子浓度由大到小依次为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 、 F^- ;与穿透雨相比,树干径流中 F^- 位置发生了较大变化,其浓度仅次于 SO_4^{2-} ,排序为 $SO_4^{2-} > F^- > Cl^- > PO_4^{3-} > NO_3^-$ 。而枯透水中浓度最大的是 NO_3^- , SO_4^{2-} 次之, PO_4^{3-} 浓度大于 Cl^- , F^- 浓度最小。 NO_3^- 及 Cl^- 浓度均表现为枯透水>大气降雨>穿透雨>树干径流,说明大气降雨经过林冠层后,桦树枝叶、树皮对于 Cl^- 、 NO_3^- 有吸附作用^[11-12],但经过枯落物层又大量淋出 NO_3^- 及 Cl^- 。枯透水中 NO_3^- 、 Cl^- 浓度分别为7.504、0.721 mg/L,其中 NO_3^- 浓度为树干径流的101.4倍,变化最大。 F^- 及 SO_4^{2-} 浓度则表现为树干径流最大,分别为0.582、3.678 mg/L,枯透水次之,其中 SO_4^{2-} 浓度大气降雨(0.843 mg/L)小于穿透雨(1.112 mg/L),而 F^- 则刚好相反,穿透雨中浓度低于大气降雨,分别为0.096、0.127 mg/L,表现为林冠层对 F^- 的吸收作用。观测期间,大气降雨中未检出 PO_4^{3-} ,但经过白桦次生林后,浓度有不同程度增加,树干径流中 PO_4^{3-} 含量低于穿透雨

和枯透水,浓度由低到高依次为 0.310、0.431、1.521 mg/L,说明雨水对于林冠层、树干及枯落物层的 PO_4^{3-} 有一定淋溶作用。综上所述,降雨再分配过程中阴离子水化学特征发生很大变化,其中变化最大的为 NO_3^- ,最高、最低相差 100.4 倍。除 NO_3^- 、 Cl^- 外不同阴离子变化不同。各阴离子在枯透水中浓度都较高,其中 NO_3^- 、 Cl^- 及 PO_4^{3-} 最高值出现在枯透水中, F^- 及 SO_4^{2-} 的最高值则出现在树干径流中。而最低值不同离子结果略有不同。

3.3 金属元素变化特征分析

由表 2 可知,从大气降雨到最终的枯透水各金属元素含量均有不同程度的升高。大气降雨中各金属元素含量从大到小依次为 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Fe 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mn 、 Pb^{2+} ;经过林冠层变为穿透雨、树干径流后,顺序变为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$;最后经过枯落物层,各元素浓度发生较大变化,由高到低依次为 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Fe 、 Mn 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 。其中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe 、 Cu^{2+} 及 Pb^{2+} 浓度均表现为在枯透水中最高,其他元素则为树干径流中浓度最大。由于 K^+ 极易溶解迁移^[13],故 K^+ 表现为从大气降雨中的 0.538 mg/L 逐渐上升到枯透水的 4.904 mg/L,升高了 8.1 倍。与 K^+ 相似, Na^+ 也是极易溶解迁移的,故其浓度经过林冠后由 1.992 mg/L 上升到穿透雨及树干径流中的 2.365、3.065 mg/L,但经过枯落物层后浓度降为 2.058 mg/L,说明枯落物层吸附 Na^+ 。 Zn^{2+} 与 Na^+ 变化趋势一致,但枯透水中 Zn^{2+} 浓度高于穿透雨。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 移动性较差,较难淋溶^[14-15],故在大气降雨变为穿透雨后其浓度仅微弱增加,分别增加了 0.094、0.133 mg/L,变为树干径流后 Ca^{2+} 浓度降低,而 Mg^{2+} 浓度一直上升。

Fe 元素浓度由大气降雨经林冠层、枯落物层后逐层升高,浓度由 0.019 mg/L 升高到 0.293 mg/L,穿透雨较大气降雨仅微弱增加,而树干径流、枯透水增加较多,尤其是枯透水,其浓度是大气降雨的 15.4 倍。 Mn 在大气降雨中含量很低,仅有 0.004 mg/L,但经过林分后穿透雨、树干径流、枯透水中其浓度分别升高了 7.3、51.8、16.5 倍,表现为雨水对于林冠、树皮及枯落物中 Mn 元素的淋溶作用。 Cu^{2+} 浓度各类降雨间相差不大,最高、最低仅相差 0.4 倍,穿透雨中 Cu^{2+} 浓度微弱降低,树干径流与枯透水中则微弱增加,可能与离子交换及水量减少浓缩作用有关。仅在枯透水中检测出 Pb^{2+} ,浓度为 0.058 mg/L,说明枯落物层含有 Pb^{2+} 且在降雨过程中被林内雨水淋出或置换了出来。

经上述分析,对于金属元素而言,大气降雨中

Ca^{2+} 含量最高, Pb^{2+} 最低为 0。降雨经过林冠层、枯落物层的再分配后,金属元素浓度均有不同程度的升高。其中 Na^+ 、 Zn^{2+} 及 Mn 元素均在树干径流中浓度最高,而其他元素则在枯透水中最高。而最低值几乎均出现在大气降雨(除 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 外)。

表 2 各层次降雨金属元素特征

Tab. 2 Changes of metallic elements $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

金属元素 Metallic element	大气降雨 Rainfall	穿透雨 Throughfall	树干径流 Stem flow	枯透水 Litter water
K^+	0.538	2.166	3.040	4.904
Na^+	1.992	2.365	3.065	2.058
Ca^{2+}	16.784	16.878	10.946	29.297
Mg^{2+}	0.504	0.637	0.729	3.005
Fe	0.019	0.020	0.041	0.293
Mn	0.004	0.033	0.211	0.070
Zn^{2+}	0.012	0.015	0.030	0.024
Cu^{2+}	0.010	0.009	0.011	0.013
Pb^{2+}	0	0	0	0.058

3.4 降雨再分配后白桦次生林养分输入特征

3.4.1 阴离子输入特征

由表 3 可知,由大气降雨到林内雨,直至枯透水的整个过程中,阴离子的总输入量是依次升高的。大气降雨中阴离子总输入量为 8.139 kg/hm²,其中 SO_4^{2-} 输入量最高,为 3.703 kg/hm²,占总输入量的 45.5%,其次为 Cl^- 、 NO_3^- 和 F^- , PO_4^{3-} 输入量最低为 0。经过白桦次生林的林冠层后,总输入量略有增加,增加了 0.778 kg/hm²,变为 8.918 kg/hm²。其中,与大气降雨相同,林内雨中输入量最高的仍是 SO_4^{2-} ,为 4.594 kg/hm²,其后依次为 Cl^- 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 和 F^- 。而相较于大气降雨输入量而言,只有 SO_4^{2-} 及 PO_4^{3-} 含量增加,分别增加了 0.890、1.643 kg/hm²,而 F^- 、 Cl^- 及 NO_3^- 输入量分别降低了 0.127、1.091、0.537 kg/hm²。说明林冠及树皮吸收了 F^- 、 Cl^- 及 NO_3^- ,而雨水从林冠及树皮中淋出了 SO_4^{2-} 及 PO_4^{3-} 。各阴离子输入量的增加量排序为 $\text{PO}_4^{3-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{F}^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 。林内雨经过枯落物层后,总输入量进一步上升,增加了 28.904 kg/hm²,变为 37.823 kg/hm²,整体升高了 3.2 倍,各阴离子输入量排序为: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{PO}_4^{3-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$,且与林内雨相比,所有阴离子含量均增加,增加量由高到低依次为 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- ,分别增加了 23.609、3.253、0.970、0.620、0.452 kg/hm²,其中 NO_3^- 增加效果最为显著,增加了 42.9 倍。而枯透水中各阴离子输入量与大气降雨相比,除 Cl^- 输入

量较大气降雨输入量减少了 0.471 kg/hm²外,其余阴离子输入量均高于大气降雨输入量,增加量由高到低分别为 NO₃⁻、PO₄³⁻、SO₄²⁻、F⁻,总输入量较大气

降雨的输入量增加了 29.683 kg/hm²。经以上分析可看出,对于阴离子来说,枯落物层养分输入作用强于林冠层。

表3 阴离子各层次降雨输入量

Tab.3 Rainfall input amount of anions

kg·hm⁻²

降雨输入量 Rainfall input	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	总量 Total
大气降雨 Rainfall	0.557	2.792	1.087	3.703	0	8.139
林内雨 Throughfall + Stem flow	0.430	1.701	0.550	4.594	1.643	8.918
枯透水 Litter water	0.882	2.321	24.159	5.564	4.897	37.823
林内雨-大气降雨 Throughfall + Stem flow-Rainfall	-0.127	-1.091	-0.537	0.890	1.643	0.778
枯透水-林内雨 Litter water-Throughfall-Stem flow	0.452	0.620	23.609	0.970	3.253	28.904
枯透水-大气降雨 Litter water-Rainfall	0.325	-0.471	23.072	1.860	4.897	29.683

3.4.2 金属元素输入特征

由表4可知,大气降雨经过林冠层、枯落物层后金属元素输入量先略有降低后又大幅升高。大气降雨中各金属元素总输入量明显高于阴离子,是阴离子输入总量的10.7倍,为87.275 kg/hm²。其中,输入量最大的是Ca²⁺,为73.748 kg/hm²,最小的是Pb²⁺,为0。输入量由高到低依次为Ca²⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Fe、Zn²⁺、Cu²⁺、Mn、Pb²⁺、K⁺、Mg²⁺输入量分别为2.365、2.213 kg/hm²,普遍低于黄忠良等^[16]在亚热带季风林的研究结果,而Ca²⁺则高于其研究结果,这可能与所处温度带及地区不同有关。大气降雨经过林冠层后,总输入量略有降低,降低了3.0%,降为84.639 kg/hm²。其中Ca²⁺、Fe及Cu²⁺含量较大气降雨低,分别降低了9.522、0.001、0.009 kg/hm²,Pb²⁺输入量不变,仍为0,而其他元素含量升高,这与盛后财等^[17]研究结果略有不同。大气降雨经林冠层后各金属元素输入量的增加量排序

为:K⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > Mn > Zn²⁺ > Pb²⁺ > Fe > Cu²⁺ > Ca²⁺。林内雨经过枯落物层后,输入土壤层的金属元素总量升高,总输入量为127.888 kg/hm²,较林内雨增加了43.245 kg/hm²,是林内雨的1.5倍。其中Na⁺输入量较林内雨中Na⁺输入量低,而其他金属元素输入量均高于林内雨,说明除Na⁺外,林内雨对枯落物层中各金属元素均是淋出作用,淋出量由小到大依次为Cu²⁺、Zn²⁺、Mn、Pb²⁺、Fe、Mg²⁺、K⁺、Ca²⁺,而枯落物层对Na⁺为吸附作用,吸附量为2.562 kg/hm²。与大气降雨金属元素输入量相比较,枯透水输入量则增加了40.613 kg/hm²。其中Na⁺和Cu²⁺输入量低于大气降雨中的输入量,分别降低了2.126、0.003 kg/hm²,其余元素输入量均有不同程度增加,其中Ca²⁺增加量最多,为20.578 kg/hm²。其后依次为K⁺、Mg²⁺、Fe、Mn、Pb²⁺、Zn²⁺。经以上分析可看出,对于金属元素而言,枯落物层养分输入作用强于林冠层。

表4 金属元素各层次降雨输入量

Tab.4 Rainfall input amount of metallic elements

kg·hm⁻²

降雨输入量 Rainfall input	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe	Mn	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Pb ²⁺	总量 Total
大气降雨 Rainfall	2.365	8.751	73.748	2.213	0.081	0.019	0.054	0.044	0	87.275
林内雨 Throughfall + Stem flow	8.442	9.186	64.225	2.463	0.080	0.147	0.060	0.036	0	84.639
枯透水 Litter water	15.788	6.625	94.326	9.675	0.942	0.225	0.078	0.042	0.187	127.888
林内雨-大气降雨 Throughfall + Stem flow - Rainfall	6.076	0.436	-9.522	0.250	-0.001	0.129	0.006	-0.009	0	-2.635
枯透水-林内雨 Litter water - Throughfall - Stem flow	7.346	-2.562	30.100	7.211	0.862	0.077	0.018	0.006	0.187	43.245
枯透水-大气降雨 Litter water - Rainfall	13.423	-2.126	20.578	7.462	0.861	0.206	0.025	-0.003	0.187	40.613

4 结论与讨论

大兴安岭漠河地区大气降雨呈中性,pH为7.0,TDS值为19 mg/L,表明当地空气质量良好,酸

性污染物较少,这也是造成阴离子含量普遍低于其他研究结果的一个重要原因。在降雨再分配过程中,pH与TDS变化趋势一致,均为先降低后在枯透水中升高,最低值都出现在树干径流中,而最高值分

别出现在大气降雨和枯透水中。阴离子中除 NO_3^- 外,其他阴离子变化与郎燕等^[18] 研究结果普遍相同。而 NO_3^- 变化较大,最高、最低相差 100.4 倍。除 NO_3^- 、 Cl^- 外不同阴离子变化不同,枯透水中各阴离子浓度都较高,其中 NO_3^- 、 Cl^- 及 PO_4^{3-} 最高值均出现在枯透水中,而 F^- 及 SO_4^{2-} 最高值则出现在树干径流中。对于最低值,不同阴离子结果略有不同。而金属元素浓度均有不同程度的升高。其中 Na^+ 、 Zn^{2+} 及 Mn 最高值均出现在树干径流中,其他元素浓度则在枯透水中最高,而最低值几乎均出现于大气降雨(除 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 外)中。与其他研究结果^[19] 相比,金属元素中 Ca^{2+} 表现较为异常,其在树干径流中浓度低于大气降雨中浓度,这可能是由于白桦的树皮光滑,不易承接干沉降,同时, Ca^{2+} 移动性较差,也不易被淋洗出来,最终造成这一异常的结果。

大气降雨养分输入量为 $95.414 \text{ kg}/\text{hm}^2$,通过白桦次生林再分配后,输入土壤层养分总量为 $165.711 \text{ kg}/\text{hm}^2$,其中阴离子输入量为 $37.823 \text{ kg}/\text{hm}^2$,金属元素输入量为 $127.888 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。降雨穿过林冠层后,由于 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Fe 及 Cu^{2+} 输入量的降低幅度高于其他元素的升高幅度,致使总输入量略有降低,降低了 $1.857 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。而后经过枯落物层,输入量则增加了 $72.149 \text{ kg}/\text{hm}^2$,其中除 Na^+ 输入量降低外,其他元素输入量均有不同程度的升高。故对于白桦次生林降雨养分输入来说,枯落物层养分输入作用强于林冠层。造成这一结果的其中之一原因可能是由于林内雨养分的输入有一部分是来自于降雨洗脱附在枝叶、树皮表面的颗粒物^[20]以及干沉降,而由于白桦的树皮光滑,且展叶较晚而落叶较早,积累颗粒物及干沉降的能力也就较为有限,同时上述分析已发现,大兴安岭漠河地区空气质量良好,空气中飘浮的颗粒较少,所以能积累于白桦树皮、枝叶表面的颗粒物也就很少,最终导致大气降雨经过白桦次生林林冠层后的养分输入作用弱于枯落物层养分输入作用。 NO_3^- 输入量在枯落物层迅速增加,这与张胜利等^[21] 研究结果相似。这是因为枯枝落叶经分解后,其中的蛋白质、核酸、氨基酸中的氮逐渐变成无机氮^[22],而林内雨经过枯落物层时,无机氮随着雨水被淋洗、溶解,从而使枯透水中 NO_3^- 含量剧增。众所周知,引起水体富营养化这一水质问题的重要原因是水体中氮元素的大量富集,所有淋入土壤中的氮能否被林木和土壤层所吸收,如果未被吸收或只吸收了一部分,那么未被吸收的氮元素流入江河中,其含量是否会对水体产生影响等问题急需进一步研究。另外, Pb 作为重金属元素,在大气降雨及林内雨中的含量均为零,但是却

在枯透水中检测出来,且含量相对较高,因为其最终淋入土壤,会对土壤造成危害,所以需引起重视。

参 考 文 献

- [1] 刘阳,杨新兵,陈波,等.冀北山地山杨桦木林生态系统水化学特征研究[J].生态环境学报,2011,20(11):1665-1669.
LIU Y, YANG X B, CHEN B, et al. Study on precipitation hydro-chemical characteristic of mixed forest of poplar and birch of north mountain of Hebei Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011,20(11):1665-1669.
- [2] 周梅,余新晓.兴安落叶松原始林区降水化学输入的特征研究[J].中国生态农业学报,2003,11(2):119-121.
ZHOU M, YU X X. Study of rainfall hydrochemical import characteristics in *Larix gmelini* virgin forest[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003,11(2):119-121.
- [3] 张志祥.树木学(北方本)[M].北京:中国林业出版社,2008:5,195.
ZHANG Z X. Dendrology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008:5,195.
- [4] 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,2005,41(5):14-20.
GONG H D, WANG K Y, YANG W Q. Nutrient characteristics of throughfall and stemflow in three forests at the subalpine of Western Sichuan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005,41(5):14-20.
- [5] 李文影,满秀玲,张阳武.不同林龄白桦次生林降水水化学特征研究[J].水土保持学报,2009,23(5):123-127.
LI W Y, MAN X L, ZHANG Y W. Study on precipitation hydro-chemical characteristic of different stage of *Betula platyphylla* secondary forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(5):123-127.
- [6] 田野宏,满秀玲,刘茜,等.大兴安岭北部白桦次生林降雨再分配特征研究[J].水土保持学报,2014,28(3):109-113.
TIAN Y H, MAN X L, LIU X, et al. Research on rainfall redistribution of *Betula platyphylla* secondary forests in North of Greater Xing'an Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(3):109-113.
- [7] 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,2014,28(5):119-123.
LIU X, MAN X L, TIAN Y H, et al. Study on seasonal dynamics of rainfall redistribution metal elements of *Betula platyphylla* secondary forests in North of Greater Xing'an Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(5):119-123.
- [8] 闫文德,田大伦.会同第二代杉木林集水区水质生态效应[J].中南林学院学报,2003,23(2):6-10.
YAN W D, TIAN D L. Ecological effect of the water quality in the second-generation Chinese fir plantation at Huitong Watersheds [J]. Journal of Central South Forestry University, 2003,23(2):6-10.
- [9] 杜敏,文仕知,杨丽丽,等.六盘山华北落叶松林降水转化中的阳离子通量变化特征[J].林业科学研究,2013,26(2):133-139.
DU M, WEN S Z, YANG L L, et al. Variation of cation flux with rain water in a *Larix principis-rupprechtii* plantation on Liupan

- Mountains [J]. *Forest Research*, 2013, 26(2): 133-139.
- [10] 杨丽丽. 六盘山四种典型森林植被的水文过程与主要元素通量[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- YANG L L. The hydrological process and element fluxes of main nutritions in four typical forest vegetation communities of Liupan Mountains of NW China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [11] POLKOWSKA Z, ASTEL A, WALNA B, et al. Chemometric analysis of rainwater and throughfall at several sites in Poland[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 39(5): 837-855.
- [12] 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*, 2003, 127(1): 57-64.
- [13] 刘菊秀, 张德强, 周国逸, 等. 鼎湖山酸沉降背景下主要森林类型水化学特征初步研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1223-1228.
- LIU J X, ZHANG D Q, ZHOU G Y, et al. A preliminary study on the chemical properties of precipitation, throughfall, stemflow and surface run-off in major forest types at Dinghushan under acid deposition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1223-1228.
- [14] 田大伦, 项文化, 杨晚华. 第二代杉木幼林生态系统水化学特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(6): 859-865.
- TIAN D L, XIANG W H, YANG W H. Nutrient characteristics of hydrological process in young second rotation Chinese fir plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 859-865.
- [15] WARDLE D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: a global-scale synthesis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(13): 1627-1637.
- [16] 黄忠良, 孔国辉, 余清发, 等. 亚热带季风常绿阔叶林水文功能及其养分动态的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(2): 157-161.
- HUANG Z L, KONG G H, YU Q F, et al. Hydrological function and nutrient dynamics in lower subtropical monsoon evergreen broadleaved forest [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 157-161.
- [17] 盛后财, 蔡体久, 朱道光, 等. 原始红松林穿透雨和树干径流养分特征研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 47-51.
- SHENG H C, CAI T J, ZHU D G, et al. Nutrient characteristics of throughfall and stem-flow in virgin forest of *Pinus koraiensis* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 47-51.
- [18] 郎燕, 蔡体久, 柴汝杉, 等. 不同类型原始红松林对降雨水化学特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 184-191.
- LANG Y, CAI T J, CHAI R S, et al. Effects of different types of original *Pinus koraiensis* forest on precipitation hydro-chemical characteristics [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 184-191.
- [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, 30(2): 193-200.
- ZHANG N, LIU X Z, LI K, et al. Differential patterns of nutrient elements in rainfall and its redistribution in three typical subtropical forests in south China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(2): 193-200.
- [20] 黄健辉, 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营养特征研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(2): 248-251.
- HUANG J H, LI H T, HAN X G, et al. Nutrient characteristics of stemflow and throughfall in two coniferous forest ecosystems [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 248-251.
- [21] 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.
- ZHANG S L, LI G L. The effects of different components of the forest ecosystem on water quality in the Huoditang Forest Region, Qinling Mountain range [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1838-1844.
- [22] 方运霆, 莫江明, Per Gundersen, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2004, 24(7): 1523-1531.
- FANG Y T, MO J M, GUNDERSEN P, et al. Nitrogen transformations in forest soils and its responses to atmospheric nitrogen deposition: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1523-1531.

(责任编辑 李 契
责任编辑委 臧润国)