

北京西山不同人工林枯落物层的水化学性质*

王登芝^{1*} 向星政² 聂立水¹⁽¹⁾北京林业大学水土保持学院,北京 100083; ⁽²⁾北京金都园林绿化有限责任公司,北京 100032)

摘要 通过采集降雨经枯落物后的水样,初步研究了北京西山地区油松林和栓皮栎林林下枯落物层的水化学性质.结果表明:大气降水经过林冠进入枯落物层后,油松林和栓皮栎林林下不同元素的浓度发生明显变化.枯落物水中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的浓度随时间的变化趋势基本一致.穿透雨经过枯落物层后,水中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的平均浓度增加,而 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的平均浓度减小.其中,栓皮栎林和油松林中 Ca^{2+} 浓度分别增加了 7.54 和 5.27 $mg \cdot L^{-1}$.栓皮栎林下枯落物层中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的平均浓度高于油松林,而 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的平均浓度则低于油松林.经降水淋溶作用后,栓皮栎林和油松林林下枯落物归还林地的养分分别为 41.59 和 58.12 $kg \cdot hm^{-2}$,其中归还林地较多的是 Ca^{2+} ,其次是 K^+ .

关键词 人工林 枯落物 穿透雨 化学元素

文章编号 1001-9332(2007)11-2637-05 中图分类号 S715 文献标识码 A

Hydro-chemical properties of litter layer in two kinds of plantations in Beijing Xishan Mountain. WANG Deng-zhi¹, XIANG Xing-zheng², NIE Li-shui¹(¹College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ²Beijing Jindu Landscaping & Afforesting Co. Ltd., Beijing 100032, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2007, 18(11): 2637-2641.

Abstract: The study on the hydro-chemical properties of litter layer in *Pinus tabulaeformis* and *Quercus variabilis* plantations in Beijing Xishan Mountain showed that after the precipitation passed through the plantations and penetrated into litter layer, the element concentrations in precipitation changed greatly. The concentrations of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+-N and NO_3^--N in litter water had similar changing trends as those in throughfall. The average concentrations of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in litter water were higher than those in throughfall, but NH_4^+-N and NO_3^--N were in adverse. Ca^{2+} increased most, with the increment of 7.54 $mg \cdot L^{-1}$ in *Q. variabilis* plantation and 5.27 $mg \cdot L^{-1}$ in *P. tabulaeformis* plantation. The concentrations of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} in litter water were higher in *Q. variabilis* than in *P. tabulaeformis* plantation, but NH_4^+-N and NO_3^--N concentrations were lower in *Q. variabilis* than in *P. tabulaeformis*. After leaching by precipitation, the nutrients return into woodland was 41.59 $kg \cdot hm^{-2}$ in *Q. variabilis* and 58.12 $kg \cdot hm^{-2}$ in *P. tabulaeformis*, among which, Ca^{2+} returned more, followed by K^+ .

Key words: plantation; litter; throughfall; chemical element.

1 引言

水作为养分循环和能量流动的载体,影响着整个生物地球化学循环过程.降水在通过森林植被系统被重新分配的同时,其化学元素浓度也发生改变^[15].这种变化主要取决于降水类型、降水化学、森林结构和森林生理机能^[4].

林地的枯落物层是大气降水进入森林生态系统的第3个作用面,与林冠层类似,对随水分携带穿过其间的各种物质进行着淋溶和吸附两种相反的过程.目前,有关植被对降水中化学成分的影响研究较多^[6,11,16],主要集中在乔木层的穿透雨和树干茎流.枯落物层的研究工作主要集中在枯落物归还林地的量^[14,17]、枯落物的分解速率^[9,13,15]、枯落物层的结构、功能及生态学作用^[5]、枯落物的养分特征及动态^[10]和枯落物对重金属元素的影响^[12]等方面,而枯落物层对穿透雨中化学元素影响的研究甚少.为

* 国家自然科学基金资助项目(30070637).

* 通讯作者. E-mail: wangdengzhi_2002@sina.com.

2006-12-08 收稿, 2007-08-03 接受.

此,本文研究了北京西山地区栓皮栎林和油松林林下枯落物层对穿透雨中化学元素的影响,分析林地枯落物层的水化学性质,以及淋溶枯落物养分归还林地的速度,旨在为系统地评价森林生态系统对降水化学的综合影响提供理论依据。

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

北京西山位于北京西北郊太行山北部,燕山东端(39°54'N,116°28'E),最高海拔1153 m,属于华北暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区,年干燥度在1.0~1.5之间。春季干旱多风,夏季炎热多雨,冬季寒冷干旱。年均气温11.7℃,最高气温39.7℃,最低气温-19.6℃,年均降水量在645 mm,多集中在7—9月。

试验区选在鹫峰国家森林公园的雁儿岭处。山地母质为花岗岩、凝灰岩和石灰岩等岩石风化的残积、坡积物。土壤为淋溶褐土。土壤pH 6.4~8.4。主要树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等。

2.2 研究方法

2.2.1 样地设置 在海拔465 m的雁儿岭处,选择阴坡油松纯林和阳坡栓皮栎纯林为研究对象,林龄均为31年生。栓皮栎林平均树高为10.5 m,平均胸径为13.4 cm,密度为1335株·hm⁻²,灌木主要有酸枣(*Zizyphus jujuba* var. *inermis*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)、菅草(*Arthraxon hispidus*)、白羊草(*Eriophorum vaginatum*)等,覆盖度低,枯落物层厚4 cm,主要由栓皮栎以及酸枣、小叶鼠李、菅草、白羊草的枯落叶和少量的枯枝组成;油松林平均树高为8.7 m,平均胸径为14.7 cm,密度为1625株·hm⁻²,灌木有蚂蚱腿子(*Myriopholis dioica*)、绒毛绣线菊(*Spiraea dasyantha*)和莎草(*Cyperus* sp.)等,覆盖度较高,枯落物层厚3 cm,主要由油松以及蚂蚱腿子、绒毛绣线菊、莎草的枯落叶和少量的枯枝组成。

两块试验地的枯落物层均呈未分解层-半分解层结构。

2.2.2 采样 1)大气降水:以北京鹫峰森林生态系统定位研究站长期监测资料为基础,于2004年4—10月在林外空旷地布设2个雨量桶收集大气降水;2)穿透雨:林冠郁闭较好处布设6个雨量槽(200 cm×20 cm×20 cm)收集穿透雨,取样时把6个槽的水样混合均匀,取部分收集于塑料瓶内;3)枯落

物水:与6个雨量槽并列放置6个塑料盆,盆内铺有用尼龙纱布包裹的林地原枯落物,用来收集穿透雨流经枯落物后的水样,混合均匀后取样。各类水样每周采集1~2次,共收集25次降水,共计50个水样。

2.2.3 样品分析 水样处理和分析参照文献^[18]方法。水样收集后,立即用0.45 μm滤膜过滤。滤液一部分用来测定NH₄⁺-N、NO₃⁻-N浓度(在24 h检测),另一部分用高纯硝酸调至pH值<2,测定Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺和Na⁺浓度。NH₄⁺-N用靛酚蓝比色法;NO₃⁻-N用酚二磺酸比色法;Ca²⁺、Mg²⁺用原子吸收分光光度法;K⁺、Na⁺用火焰原子吸收分光光度法测定。

2.3 统计分析

采用SPSS软件进行数据处理,数据为各处理的平均值±SE。

3 结果与分析

3.1 不同人工林枯落物层的水化学性质

3.1.1 油松林 由图1可以看出,穿透雨流经枯落物层后,水中各元素浓度发生了明显变化。枯落物水中K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N浓度变化与穿透雨相一致,而且K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的浓度普遍高于穿透雨,但NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的浓度低于穿透雨。

降水初期(4—6月)枯落物水中的K⁺、Na⁺浓度较高,K⁺分别是18.18、17.72和13.67 mg·L⁻¹,Na⁺分别是3.52、2.11和1.36 mg·L⁻¹。这主要是由于枝条、枯落物表面经过冬天接受了大量的飘尘、降雪所携带的物质,以及春季微生物分解释放的物质。这些养分在很大程度上影响着降水初期的元素浓度。降水中期(7月中旬—8月下旬)枯落物水中K⁺、Na⁺浓度与穿透雨近乎相同,表现出淋溶速度急剧下降的特征,而降水后期(9月中旬),穿透雨中两者浓度略高于枯落物水。这说明枯落物中K⁺、Na⁺随降水被逐渐淋溶到土壤中,呈递减趋势。整个降水期间枯落物水中K⁺的平均浓度为9.70 mg·L⁻¹,约是穿透雨的1.9倍,而Na⁺在穿透雨和枯落物水中的浓度相差较小。经统计分析检验,枯落物水和穿透雨中的K⁺浓度差异显著(P<0.05);Na⁺浓度差异不显著(P>0.05)。

在降水初期和后期,Ca²⁺和Mg²⁺的浓度相对较高;而在中期,浓度较低,变化幅度缓慢,说明Ca²⁺、Mg²⁺淋溶速度较慢。K⁺、Na⁺是一种溶解度高的营养元素,在植物体内转移快,淋洗显著。而Ca²⁺

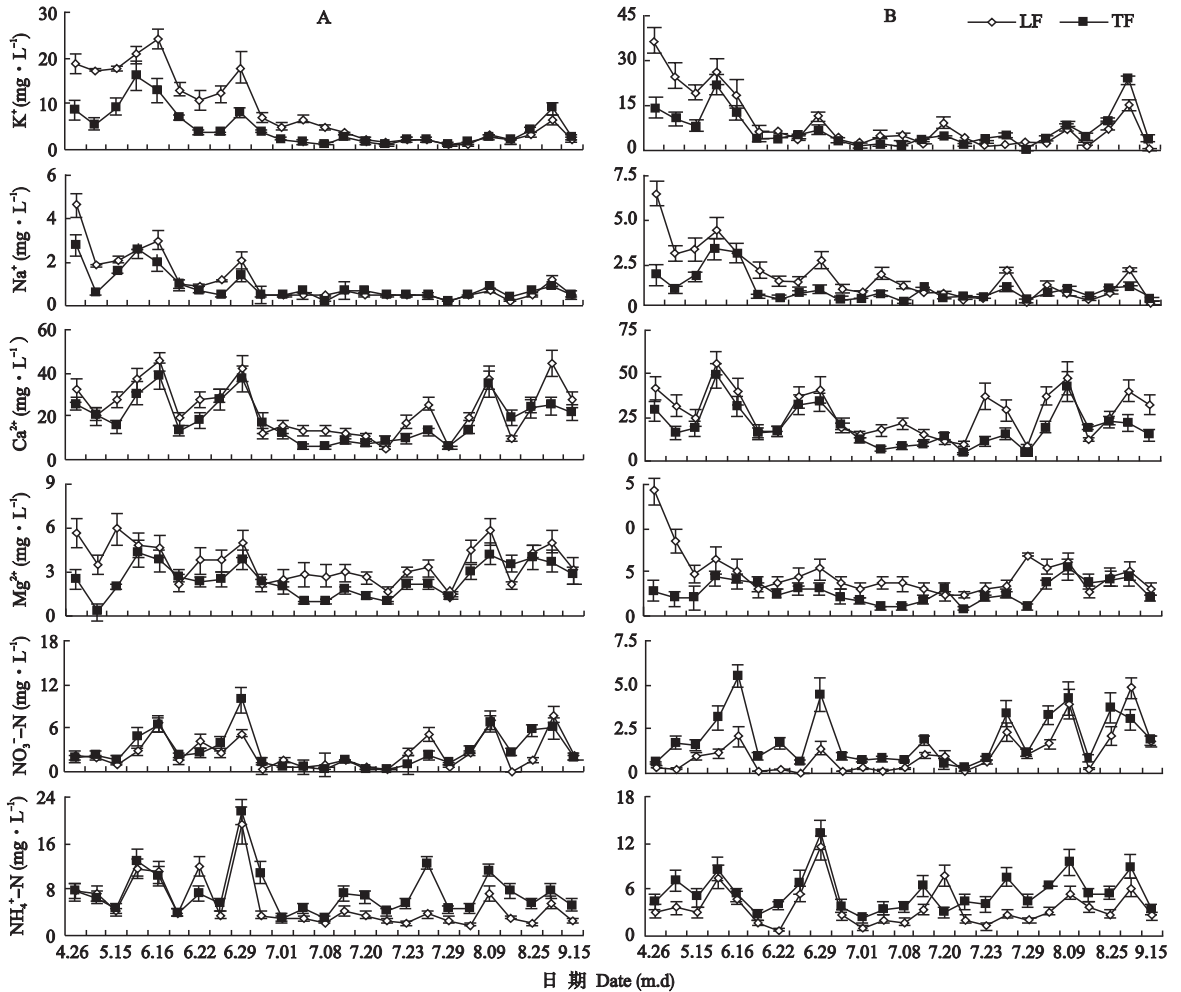


图 1 油松林 (A) 和栓皮栎林 (B) 穿透雨流经枯落物层后的化学元素变化

Fig. 1 Elemental variations of throughfall through litter layer of *P. tabulaeformis* (A) and *Q. variabilis* (B) ($n = 25$).

I : 枯落物水 Litter-fall ; II : 穿透雨 Through-fall. 下同 The same below.

多积累在树干中,其生物循环不如 K^+ 、 Na^+ 强烈^[20]; Mg^{2+} 也不及 K^+ 、 Na^+ 转移快. 枯落物水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在降水期间的平均浓度分别为 24.55 和 $4.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 的浓度高于 K^+ , 与其他学者的研究不同^[31]. 这主要是与干沉降的背景值有关. Mg^{2+} 浓度约是穿透雨中的 1.6 倍. 枯落物水和穿透雨中的 Ca^{2+} 浓度差异不显著; Mg^{2+} 浓度差异显著 ($P < 0.05$).

$NO_3^- - N$ 在枯落物水和穿透雨中的浓度没有表现出规律性变化,但枯落物水中浓度 ($2.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 低于穿透雨 ($2.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 这可能是枯落物对 $NH_4^+ - N$ 截留、吸附所致. 枯落物水和穿透雨中的 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 浓度差异均不显著.

降水流经油松林的枯落物层后,枯落物中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等养分被淋溶到土壤里. 其中,通过淋溶归还林地的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 养分量分别

为 17.29 、 1.50 、 17.52 和 $5.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 其归还林地的总养分量为 $41.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 从枯落物中被淋溶出来的 $NH_4^+ - N$ 、 $NO_3^- - N$ 为负值,可能是枯落物对二者的截留和吸附所致. 这种作用是暂时的,二者随枯落物分解最终淋溶到土壤中.

3.1.2 栓皮栎林 由图 1 可以看出,穿透雨流经枯落物层后,枯落物水中各元素浓度的变化与其在穿透雨的变化趋于一致. 除 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 外,枯落物水的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度普遍高于穿透雨的浓度.

淋溶初期 (4—6 月) 枯落物水中 K^+ 、 Na^+ 浓度较高, K^+ 分别为 30.97 、 19.85 和 $8.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Na^+ 分别为 4.76 、 3.32 和 $1.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 淋溶中期 (7 月中旬—8 月下旬) K^+ 和 Na^+ 平均浓度分别为 4.87 和 $0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 后期 (9 月中旬) K^+ 和 Na^+ 的平均浓度分别为 3.30 和 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这说明

表1 不同人工林枯落物层的水化学性质

Tab. 1 Chemical contents of precipitation in different plantations ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

项目 Items	油松林 <i>P. tabulaeformis</i>			栓皮栎 <i>Q. variabilis</i>		
	穿透雨 Throughfall	枯落物水 Litterfall	差值 Difference	穿透雨 Throughfall	枯落物水 Litterfall	差值 Difference
K^+	5.25 ± 0.79	9.70 ± 1.44	4.45	7.75 ± 1.17	11.9 ± 1.85	4.15
Na^+	1.15 ± 0.14	1.41 ± 0.21	0.26	1.10 ± 0.15	1.99 ± 0.30	0.89
Ca^{2+}	19.28 ± 1.99	24.55 ± 2.38	5.27	20.45 ± 2.26	27.99 ± 2.62	7.54
Mg^{2+}	2.45 ± 0.23	4.04 ± 0.26	1.59	2.65 ± 0.24	5.30 ± 0.50	2.65
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	2.59 ± 0.49	2.40 ± 0.45	-0.19	1.86 ± 0.29	1.23 ± 0.24	-0.63
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	6.70 ± 0.81	4.91 ± 0.83	-1.79	5.15 ± 0.51	3.33 ± 0.49	-1.82

枯落物中 K^+ 、 Na^+ 随降水被逐渐淋溶到土壤中, 淋溶速度呈递减趋势. 经统计分析检验, 枯落物水和穿透雨中的 K^+ 浓度差异不显著; Na^+ 浓度差异显著 ($P < 0.05$).

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度在淋溶初期和淋溶后期较高, 淋溶中期浓度较低, 但 Mg^{2+} 在整个降雨过程中的变化幅度不如 Ca^{2+} 明显. 枯落物水和穿透雨中 Ca^{2+} 平均浓度分别是 27.99 和 $20.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Mg^{2+} 平均浓度分别是 5.30 和 $2.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 枯落物水中 Mg^{2+} 浓度约是穿透雨的 2 倍. 枯落物水和穿透雨中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度差异显著 ($P < 0.05$).

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度普遍低于穿透雨的浓度, 可能是枯落物对二者的截留、吸附. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在枯落物水和穿透雨中的平均浓度分别是 3.33 和 $5.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均浓度分别是 1.23 和 $1.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 穿透雨的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度约是枯落物水中的 1.5 倍. 经统计分析检验, 枯落物水和穿透雨中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度差异显著 ($P < 0.05$).

由于枯落物组成和分解阶段不同, 其养分含量有所差异. 降水经过栓皮栎林的枯落物层后, 枯落物中的养分被淋溶出来, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 分别为 13.48 、 3.51 、 31.62 和 $9.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 其归还林地的总养分为 $58.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与油松林相似, 均为负值.

3.2 不同人工林枯落物层中水化学性质比较

3.2.1 枯落物层中营养元素的淋溶过程 由图 1 可知, 两种林分中的 K^+ 和 Na^+ 可分成两个时期: 降水初期淋溶速度快, K^+ 、 Na^+ 浓度较高, 降水中期(7—8月)淋溶速度陡然下降, K^+ 、 Na^+ 浓度迅速降低至近于穿透雨. Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在两个林分中的变化趋势相似, 可以分成 3 个时期: 降水初期(4—6月)淋溶的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度较高, 降水中期(7月)淋溶的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度最低, 降水后期(8—9月)其浓度又回升, 呈现“U”形变化. 淋溶初期, 栓皮栎林枯落

物水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度高于油松林. 在枯落物分解初期, 阔叶树枯落物微量元素的变化幅度大于针叶树, 可能与针叶树分解较慢密切相关^[19], 说明在淋溶初期和枯落物分解初期元素浓度有相似的变化规律. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在两种林分中有相似的变化趋势, 但它们在淋溶过程中变化不明显. 森林枯落物分解过程中的元素迁移有淋溶-富集-释放、富集-释放和直接释放 3 种模式, 期间淋溶、富集、释放 3 种情形也可交替发生^[1-2, 7].

3.2.2 枯落物层中营养元素的浓度变化 由表 1 可以看出, 栓皮栎林枯落物水中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的平均浓度高于油松林; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均浓度则低于油松林. 这主要与枯落物化学组分和元素活性等有关^[8]. 穿透雨经过枯落物层后, 2 种林分中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度呈增加趋势, 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度呈减小趋势. 其差值反映了不同枯落物层中淋溶养分的程度, 并且进一步影响归还林地的养分总量.

两种林分中, 浓度差值较大的元素是 Ca^{2+} , 在栓皮栎林中的浓度差值 ($7.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 略高油松林 ($5.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 其次是 K^+ , 说明 2 种林分枯落物层的 K^+ 淋溶程度相接近; Na^+ 的浓度差值变化最小. $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在两林分的枯落物水和穿透雨的浓度差值为负值, 说明二者在枯落物层中没有被淋溶, 而是被吸附. 吸附的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 多于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$. 各元素浓度差值变化最终体现在归还林地养分总量的差异上. 油松林和栓皮栎林中枯落物层归还林地的养分分别为 41.59 和 $58.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 后者比前者多归还 $16.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

4 结 论

1) 穿透雨流经枯落物层后, 两种林分枯落物水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度增加, 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度减少, 可能是枯落物对水中化学元素的吸收、吸附等化学调节作用所致.

2) 栓皮栎林中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 比油松林容易淋溶, 而且 K^+ 、 Na^+ 淋溶速度快于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 。 Ca^{2+} 的浓度高于 K^+ , 干沉降的附着也可能造成元素浓度的增加。但究竟是其干沉降的背景值大, 还是淋溶出的元素浓度多, 还有待进一步分析。

3) 淋溶初期, 栓皮栎林枯落物水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度高于油松林。 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的平均浓度低于油松林。降水淋溶枯落物时油松林归还林地的养分为 $41.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 栓皮栎林为 $58.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参考文献

- [1] Berg B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, **133**: 13–22
- [2] Blair JM. 1988. Nitrogen, sulfur and phosphorus dynamics in decomposing deciduous leaf litter in the southern Appalachians. *Soil Biology and Biochemistry*, **20**: 693–701
- [3] Chen Y-D(陈耀德), Ye Q-F(叶青峯), Liu M-J(刘美娟), et al. 2006. The investigation of nutrients and hydrological cycling in the Yuanyang Lake montane cloud forest in Taiwan. *Resources Science(资源科学)*, **28**(3): 171–177 (in Chinese)
- [4] Friedland AJ, Miller EK, Battles JJ, et al. 1991. Nitrogen deposition, distribution and cycling in a subalpine spruce-fir forest in the Adirondacks, New York, USA. *Biogeochemistry*, **14**: 31–55
- [5] Jiang Y-X(蒋有绪). 1981. Phytocenological role of forest in subalpine forest in western Sichuan Province. *Acta Phytocologia et Geobotanica Sinica(植物生态学与地植物学丛刊)*, **5**(2): 89–98 (in Chinese)
- [6] Li H-T(李海涛), Han X-G(韩兴国), Chen L-Z(陈灵芝). 1997. A study on the stemflow of the deciduous broad-leaved mixed forest in the warm temperate zone of northern China. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, **17**(4): 371–376 (in Chinese)
- [7] Li H-T(李海涛), Yu G-R(于贵瑞), Li J-Y(李家永), et al. 2007. Dynamics of litter decomposition and phosphorus and potassium release in Jinggang Mountain region of Jiangxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报)*, **18**(2): 233–240 (in Chinese)
- [8] Lin B(林波), Liu Q(刘庆), Wu Y(吴彦). 2004. Advances in the studies of forest litter. *Chinese Journal of Ecology(生态学杂志)*, **23**(1): 60–64 (in Chinese)
- [9] Lin P(林鹏), Lu C-Y(卢昌义), Wang G-L(王恭礼), et al. 1990. Study on dynamics of litterfall of *Bruguiera sexangula* mangrove in Hainan Island, China. *Acta Phytocologia et Geobotanica Sinica(植物生态学与地植物学丛刊)*, **14**(1): 69–74 (in Chinese)
- [10] Lin R-Y(林瑞余), Chen Y-X(陈银秀), Huang R-Z(黄荣臻), et al. 2002. Nutrient dynamics of litterfall in a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Journal of Northeast Forestry University(东北林业大学学报)*, **30**(1): 17–23 (in Chinese)
- [11] Liu S-H(刘世海), Yu X-X(余新晓), Yu Z-M(于志民). 2001. Properties of water chemical elements of *Castanea mollissima* forest in Miyun reservoir watershed. *Journal of Beijing Forestry University(北京林业大学学报)*, **23**(2): 12–15 (in Chinese)
- [12] Liu X-Z(刘焯章), Tian D-L(田大伦), Zhou Z-H(周志华). 1995. Studies on the function for purifying water of Chinese fir plantation ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae(林业科学)*, **31**(3): 193–199 (in Chinese)
- [13] Liu Z-W(刘增文). 2002. Research method of litter decay rate in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, **22**(6): 954–956 (in Chinese)
- [14] Mo J-M(莫江明), Kong G-H(孔国辉), Brown S, et al. 2001. Litterfall response to human impacts in Dinghushan *Pinus massoniana* forest. *Acta Phytocologia Sinica(植物生态学报)*, **25**(6): 656–664 (in Chinese)
- [15] Puckett LJ. 1990. Estimates of ion sources in deciduous and coniferous throughfall. *Atmospheric Environment*, **24**: 545–556
- [16] Tian D-L(田大伦), Xiang W-H(项文化), Kang W-X(康文星). 2001. Hydrologic process and nutrient dynamics of young second rotation Chinese fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae(林业科学)*, **37**(13): 64–71 (in Chinese)
- [17] Tian D-L(田大伦), Ning X-B(宁晓波). 1995. Studies of the amount of litter and nutrient restitution in different age classes of *Pinus massoniana* plantation. *Journal of Central-South Forestry University(中南林业学院学报)*, **15**(2): 163–169 (in Chinese)
- [18] Wei F-S(魏复盛). 1989. Method of Water and Waste Water Monitor. 3rd Ed. Beijing: China Environmental Science Press. (in Chinese)
- [19] Yin X-Q(殷秀琴), Li J-X(李金霞), Dong F-H(董炜华). 2007. Microelement contents of litter, soil fauna and soil in *Pinus koraiensis* and broad-leaved mixed forest. *Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报)*, **18**(2): 277–282 (in Chinese)
- [20] Zhou G-Y(周国逸), Yan J-H(闫俊华). 2001. The influence of regional atmospheric precipitation characteristic and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, **21**(12): 2002–2012 (in Chinese)

作者简介 王登芝,女,1973年生,硕士,讲师。主要从事森林生态学研究。E-mail: wangdengzhi_2002@sina.com

责任编辑 李凤琴