

## 北京西山地区油松林水文过程中营养元素迁移特征

王登芝<sup>1,3</sup>, 聂立水<sup>1,3</sup>, 李吉跃<sup>2,3</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 2. 北京林业大学资源与环境学院, 3. 北京林业大学森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**对北京西山地区 31a 油松林降水化学进行定位监测与分析。结果表明:(1)大气降水流经油松林过程中,其营养元素(除  $\text{Na}^+$  外)的浓度出现梯度变化:树干茎流高于穿透雨高于大气降水,并且有明显的月际变化,表明从林冠、树干淋洗大量的营养元素,林冠和树干中养分元素迁移是森林生态系统养分循环重要的组成部分。(2)营养元素变化中,浓度差异变化较大的元素是  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ -N 在穿透雨和树干茎流的浓度分别是大气降水的 4.4 倍、9.9 倍,它们中的  $\text{K}^+$  浓度分别为大气降水的 4.1 倍和 8.1 倍。(3)降水经过油松林,养分淋溶总量为  $54.12 \text{ kg hm}^{-2}$ ,淋溶量较多的元素是 Ca 和 K,淋溶强度最大的元素是  $\text{K}^+$ 。(4)北京西山地区大气降水输入林地的养分  $66.38 \text{ kg hm}^{-2}$ ,较多的元素是 Ca、N。降水经过油松林输入林地养分总量为  $120.50 \text{ kg hm}^{-2}$ ,Ca 元素最高,为  $61.22 \text{ kg hm}^{-2}$ ,其次是 N 元素( $\text{NH}_4^+$ -N +  $\text{NO}_3^-$ -N),为  $31.34 \text{ kg hm}^{-2}$ ,K 元素为  $16.49 \text{ kg hm}^{-2}$ ,Mg 元素为  $8.11 \text{ kg hm}^{-2}$ ,Na 元素最少,为  $3.34 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

**关键词:**油松林; 营养元素; 迁移; 淋溶; 穿透雨; 树干茎流

文章编号:1000-0933(2006)07-2101-07 中图分类号:S715 文献标识码:A

## Transfer characteristics of nutrient elements through hydrological process of *Pinus tabulaeformis* stand in Beijing Xishan area

WANG Deng-Zhi<sup>1,3</sup>, NIE Li-Shui<sup>1,3</sup>, LI Ji-Yue<sup>2,3</sup> (1. College of Soil and Water Conservation, Beijing, 100083; 2. College of Resources and Environment, Beijing 100083; 3. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Education, Beijing 100083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2101 ~ 2107.

**Abstract:** Forest precipitation chemistry is a key issue for forest hydrology and forest ecology. Chemical content in precipitation changed significantly when different kinds of external chemical materials were added, removed, translocated and transformed to or in the forest ecosystem along with precipitation. The chemistry of precipitation was monitored and analyzed at a 31a *Pinus tabulaeformis* forest in Beijing Xishan area. Movement patterns of nutrient elements in hydrological processes could be uncovered by studying the monitored data. Moreover, the information is useful in diagnosing the function of ecosystem and evaluating the impact of environment on the ecosystem.

Samples of rainfall, throughfall and stemflow were collected on the site. In the lab,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  were analyzed by flame atomic absorption and  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  by flame emission.  $\text{NH}_4^+$ -N was analyzed by indophenol blue colorimetry, and  $\text{NO}_3^-$ -N was analyzed by phenoldisulfonic acid colorimetry. The results showed: (1) The concentration gradient of nutrient elements clearly changed except for  $\text{Na}^+$ : The nutrients in stemflow were significantly higher than those of the throughfall and rainfall as the precipitation pass through the *P. tabulaeformis* forest. The monthly patterns were distinctly different. It is indicated that a large amount of nutrients were leached from canopy, which was a critical function of intraecosystem nutrient cycling to improve the efficiency of nutrient use. (2) the concentrations of  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{K}^+$  were changed greater than that of other nutrient elements. The

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(30070637);北京林业大学振兴计划人才培养专项课题资助项目

**收稿日期:**2005-07-11; **修订日期:**2006-05-20

**作者简介:**王登芝(1973-),女,北京人,硕士,主要从事森林生态学研究. E-mail: wangdengzhi-2002@sina.com

**通讯作者** Corresponding author. E-mail: ljyymy@vip.sina.com

**Foundation item:** The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30070637)

**Received date:** 2005-07-11; **Accepted date:** 2006-05-20

**Biography:** WANG Deng-Zhi, Master, mainly engaged in forest ecology. E-mail: wangdengzhi-2002@sina.com

concentrations of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  in throughfall and stemflow were 4.4 times and 9.9 times higher than those in rainfall, respectively. The concentrations of  $\text{K}^+$  in throughfall and stemflow were 4.1 times and 8.1 times higher than those in rainfall, respectively. (3) The leaching of nutrient elements from stand was an important aspect of nutrient return in the *P. tabulaeformis* forest, which returned a total nutrient of  $54.1 \text{ kg hm}^{-2}$ , with  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{K}^+$  being much greater than other elements. In addition,  $\text{K}^+$  was the greatest in leaching intensity. (4) Nutrient input through precipitation was a main source in Beijing Xishan area and nutrient contents of  $66.4 \text{ kg hm}^{-2}$  were added, of which  $\text{Ca}^{2+}$  and N were much more than other nutrient elements. When precipitation passed through the *P. tabulaeformis* forest, there were  $121 \text{ kg hm}^{-2}$  nutrient added to the forest floor.  $\text{Ca}^{2+}$  recorded the greatest nutrient increase, with  $61.2 \text{ kg hm}^{-2}$ , followed by N ( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  &  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ),  $\text{K}^+$  and  $\text{Mg}^{2+}$ , with 31.3, 16.5, and  $8.11 \text{ kg hm}^{-2}$ , respectively and the least was  $\text{Na}^+$ ,  $3.34 \text{ kg hm}^{-2}$ .

**Key words:** *Pinus tabulaeformis*; nutrient elements; movement; leaching; throughfall; stemflow

生态系统的水分和养分循环以及能量流动,是维持系统中有机物生产的基本功能过程。了解一个系统由于外界环境中各种化学物质随降雨的输入、内部迁移及转化和输出的生物地球化学过程的定性、定量变化规律,对于生态系统生产力的持续发展是非常必要的。森林冠层为大气沉降和落尘提供界面,起到了过滤器的作用<sup>[1,2]</sup>。当大气降水经过森林冠层后,由于林冠截留、吸收和淋溶,降水中的化学成分发生了明显改变<sup>[2,3]</sup>。这种变化主要取决于降水类型、降水化学和森林结构、森林生理机能<sup>[4]</sup>。这种变化对分析森林生态系统的功能状况及其受外界的影响提供了信息。

北京西山国家森林公园是距京城最近、集生态、旅游为一体的森林公园。森林生态系统的健康直接影响人们的生活。油松是华北植物区系有代表性的建群树种。目前,暖温带对油松林的降水化学研究有:李海涛<sup>[5]</sup>等对北京东灵山人工林的研究,刘世海<sup>[6]</sup>等对北京密云水库水源涵养林的研究。而本文对北京西山地区油松林的降水化学研究,可以反映出伴随森林水文过程中一些营养元素的迁移规律、养分循环特性,为分析北京西山森林生态系统的功能状况提供理论依据,从而更为持续、有效地促进北京鹫峰森林公园的旅游业。而且为系统、详尽地了解暖温带山地森林生态系统提供理论支持。

## 1 研究地概况

北京西山位于北京西北郊,属于太行山山系,它位于太行山北部并与燕山山系相会,境内山峦绵延,高差大,地形复杂。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1~1.5以上。春季干旱多风,夏季炎热多雨,冬季干旱寒冷。年均温  $11.7^\circ\text{C}$ ,最高气温  $39.7^\circ\text{C}$ ,最低气温  $-19.6^\circ\text{C}$ ,多年平均降雨量近645mm,多集中在7~9月份。

试验地选在鹫峰国家森林公园范围,海拔465m的雁儿岭。山地母质为花岗岩、凝灰岩、石灰岩等岩石风化的残积、坡积物。土壤为淋溶褐土。土壤 pH6.4~8.4。植被主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等。以阴坡油松纯林为研究对象,林分的林龄为31a。油松纯林平均树高为8.7m,平均胸径为14.7cm,密度为  $1625 \text{ 株 hm}^{-2}$ 。灌木有蚂蚱腿子(*Myrica dioica* Bunge)、绒毛绣线菊(*Spiraea dasyantha* Bunge)、莎草(*Cyperus* sp.)等覆盖度较高。枯落物层厚3~5cm,呈L-F结构。

## 2 研究方法

### 2.1 采样方法

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。林内在林冠郁闭较好的下方布设3个雨量槽(200cm×20cm×20cm)收集穿透雨。取部分水样收集塑料瓶内。在林内的中间部位选择标准木(平均木)5棵作为试验的样株,样株的胸径、高度在平均值附近。把剖开直径4cm聚乙烯胶管,在距地面1m的树干上,沿树干螺旋缠绕在树干上,下部用塑料桶承接树干茎流,取样时把部分水样收集塑料瓶内。采样前塑料瓶用1:5的硝酸浸泡3d,然后用蒸馏水清洗。取样时,再用水样清洗。各类水样每星期采集1~2次,共收集27次降水,记81个水样。

## 2.2 分析方法

收集的水样带回实验室,立即过滤。一部分滤液用来测  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (应在采样当天测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )。另一部分用滤液高纯硝酸调 pH 值 1~2,用来测  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  用靛酚蓝比色法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$  用酚二磺酸比色法;用原子吸收分光光度法测定  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ;用火焰原子吸收分光光度法测定  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 油松林内雨营养元素迁移的浓度变化

大气降水经过油松林的林冠、树干形成林内雨(穿透雨+树干茎流),其降水中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的浓度发生改变。

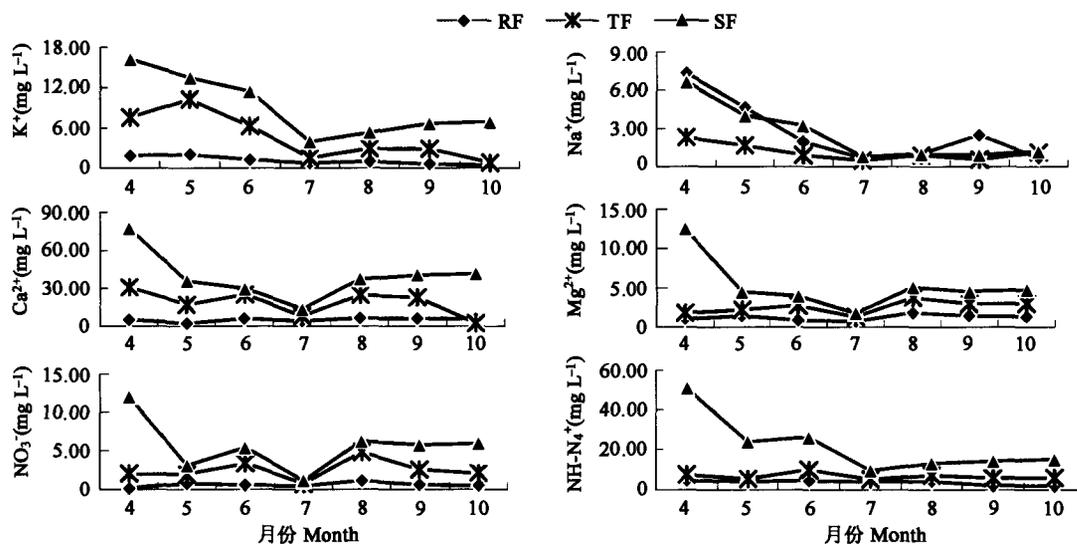


图1 油松林内雨主要离子浓度的月际变化

Fig.1 Monthly variations of elemental concentration of throughfall and stemflow in *Pinus tabulaeformis*

RF:林外降水 Rainfall;TF:穿透雨 Throughfall;SF:树干茎流 Stemflow

由图1可以看出:各个元素(除  $\text{Na}^+$ )从大气降水-穿透雨-到树干茎流,浓度出现了梯度变化,依次为树干茎流 > 穿透雨 > 大气降水。穿透雨和树干茎流中养分有明显的季节变化趋势,并且它们的月际变化趋于一致,在降水初期(4月份)养分浓度较高,随着降水量和降水次数增加,7月份浓度达到最小值。这与北京东灵山油松林的降水化学变化一致<sup>[7]</sup>,与降水量多、降水季节分配较均匀的热带和亚热带地区的森林水化学相比,养分的季节变化更为明显<sup>[8,9]</sup>。各个元素的浓度又有其不同的变化规律。

**$\text{K}^+$  浓度** 大气降水中,4月份  $\text{K}^+$  月均浓度为  $1.86 \text{ mg L}^{-1}$ ,在7月份达到最小值,月均浓度仅为  $0.77 \text{ mg L}^{-1}$ ,降水后期  $\text{K}^+$  浓度稍稍上升。穿透雨和树干茎流中有相似的月际动态变化规律,4月份穿透雨和树干茎流的  $\text{K}^+$  浓度分别为  $7.58 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $16.21 \text{ mg L}^{-1}$ ,约为大气降水的4倍和8倍;而在7月份穿透雨和树干茎流的  $\text{K}^+$  浓度分别为  $1.55 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $3.99 \text{ mg L}^{-1}$ ,仅为大气降水中  $\text{K}^+$  浓度的2倍。4~10月份大气降水、穿透雨和树干茎流中的  $\text{K}^+$  经方差分析  $F$  检验证明差异极显著( $p < 0.001$ )( $n = 27$ ),经多重比较,大气降水与树干茎流、穿透雨与树干茎流之间差异显著( $p < 0.05$ )( $n = 27$ )。说明  $\text{K}^+$  是一种溶解度高的营养元素,在植物体内转移快,淋洗显著。

**$\text{Na}^+$  浓度**  $\text{Na}^+$  与  $\text{K}^+$  相同,均以离子形态存在于植物体中,转移速度快。 $\text{Na}^+$  在大气降水中月均浓度(除6月份)高于穿透雨和树干茎流的浓度,这一点不同于其它离子。6月份  $\text{Na}^+$  在树干茎流的浓度高于大气降水,可能是从树干中淋溶较多的  $\text{Na}^+$ 。大气降水的  $\text{Na}^+$  月均浓度在4月份较高,为  $7.35 \text{ mg L}^{-1}$ ,7月份迅速达到最小值,仅为  $0.67 \text{ mg L}^{-1}$ 。 $\text{Na}^+$  在穿透雨和树干茎流中4月份月均浓度较高,分别为  $2.33 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $6.67 \text{ mg L}^{-1}$ ,在7月份和降水后期, $\text{Na}^+$  月均浓度与大气降水近乎一致。从大气降水到穿透雨到树干茎流  $\text{Na}^+$  浓

度变化不显著。

$\text{Ca}^{2+}$  浓度 大气降水中 Ca 主要来源大气中的尘埃及有机物。降水中  $\text{Ca}^{2+}$  月均浓度在 4~10 月份变化平缓,平均浓度为  $4.97 \text{ mg L}^{-1}$ 。穿透雨和树干茎流的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度有明显的月际动态变化,降水初期  $\text{Ca}^{2+}$  月均浓度较高,4 月份穿透雨和树干茎流分别为  $30.64 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $77.28 \text{ mg L}^{-1}$ ,分别是大气降水中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的 6 倍、16 倍。在 7 月份二者均达到最小值,分别为  $7.83 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $13.47 \text{ mg L}^{-1}$ ,分别是大气降水中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的 1.6 倍和 2.7 倍,降水后期  $\text{Ca}^{2+}$  浓度又升高,但低于降水初期的浓度。大气降水、穿透雨和树干茎流中的  $\text{Ca}^{2+}$  经方差分析 F 检验证明有极显著差异 ( $p < 0.001$ ) ( $n = 27$ ),经多重比较,大气降水和树干茎流、穿透雨和树干茎流之间差异显著 ( $p < 0.05$ ) ( $n = 27$ )。植物体内的 Ca 以果胶酸钙的形态存在于细胞的胞间壁内,溶解度低,转移速度缓慢,且多积累在树干里,其生物循环不如 K、Na 强烈<sup>[10]</sup>。

$\text{Mg}^{2+}$  浓度 Mg 也是较难溶解和淋洗的营养元素。在西山大气降水和树干茎流中,  $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  变化相似。大气降水中  $\text{Mg}^{2+}$  平均浓度较低,仅为  $1.22 \text{ mg L}^{-1}$ 。而在树干茎流中 4 月份  $\text{Mg}^{2+}$  月均浓度明显高于其它月份,浓度为  $12.56 \text{ mg L}^{-1}$ ,其它各月的  $\text{Mg}^{2+}$  月均浓度变化较为缓和。 $\text{Mg}^{2+}$  在穿透雨中的变化,降水初期(4 月份)月均浓度低于降水中(除 7 月份)、后期,其它各月的  $\text{Mg}^{2+}$  变化相差较小。 $\text{Mg}^{2+}$  在大气降水、穿透雨和树干茎流中经方差分析 F 检验证明有极显著差异 ( $p < 0.004$ ) ( $n = 27$ ),通过多重比较,大气降水和树干茎流、穿透雨和树干茎流两者之间差异显著 ( $p < 0.05$ ) ( $n = 27$ )。

$\text{NO}_3^-$ -N 浓度  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度与其它营养元素相比,在大气降水中浓度更低,4~10 月份平均为  $0.57 \text{ mg L}^{-1}$ ,8 月份略高为  $1.12 \text{ mg L}^{-1}$ 。穿透雨和树干茎流中  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度在 7 月份达到最低,分别为  $0.74 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $1.13 \text{ mg L}^{-1}$ ,在树干茎流中浓度最为突出的是 4 月份,月均浓度为  $12.03 \text{ mg L}^{-1}$ ,比 4 月份穿透雨中  $\text{NO}_3^-$ -N 的月均浓度( $2.06 \text{ mg L}^{-1}$ )高 6 倍。 $\text{NO}_3^-$ -N 在三者内差异极显著 ( $p < 0.001$ ) ( $n = 27$ ),经多重比较证明大气降水和树干茎流、穿透雨和树干茎流之间差异显著 ( $p < 0.05$ ) ( $n = 27$ )。

$\text{NH}_4^+$ -N 浓度  $\text{NH}_4^+$ -N 同  $\text{NO}_3^-$ -N,在大气降水、穿透雨和树干茎流中有相似的月际动态变化,但  $\text{NH}_4^+$ -N 的月均浓度是  $3.44 \text{ mg L}^{-1}$ ,约是  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度的 6 倍。穿透雨中  $\text{NH}_4^+$ -N 月际变化比  $\text{NO}_3^-$ -N 平缓,4~10 月份的浓度变化在 5.03~9.70 之间。树干茎流中  $\text{NH}_4^+$ -N 的浓度变化幅度较大,尤其是 4 月份树干茎流  $\text{NH}_4^+$ -N 的浓度,高达  $50.78 \text{ mg L}^{-1}$ ,约是大气降水的 13 倍。通过统计分析,大气降水、穿透雨和树干茎流中  $\text{NH}_4^+$ -N 的浓度存在极显著差异 ( $p < 0.001$ ) ( $n = 27$ ),并且大气降水和树干茎流、穿透雨和树干茎流之间差异显著 ( $p < 0.05$ ) ( $n = 27$ )。樊后宝<sup>[11]</sup>研究杉木林对降水化学的影响,姜文华<sup>[12]</sup>在 2003 年研究四面山常绿阔叶林中, $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 在林内降水中浓度不升高反而降低,不同于本文的研究结论。这可能是由于常绿阔叶林处于发育年龄阶段,对  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 的需要。

表 1 油松林中穿透雨、树干茎流与大气降水养分含量比

Table 1 Ratio of nutrient concentration of throughfall, stemflow to precipitation in *Pinus tabulaeformis* ( $\text{mg L}^{-1}$ )

营养元素 Nutrient elements	大气降水浓度 Concentration of precipitation	穿透雨 Throughfall		树干茎流 Stemflow	
		浓度 Concentration	浓度比 TF/RF	浓度 Concentration	浓度比 SF/RF
K	1.13(0.28)	4.60(1.12)	4.07	9.15(1.17)	8.10
Na	2.70(0.81)	1.15(0.59)	0.43	2.56(0.40)	0.95
Ca	4.97(0.98)	18.5(3.74)	3.72	39.32(5.45)	7.91
Mg	1.22(0.22)	2.52(0.43)	2.07	5.30(0.83)	4.34
$\text{NO}_3^-$ -N	0.57(0.14)	2.52(0.58)	4.42	5.67(0.89)	9.95
$\text{NH}_4^+$ -N	3.44(0.57)	6.56(1.12)	1.91	21.79(2.93)	6.33

括号中的数字为标准误差 Standard errors in parenthesis

各个营养元素浓度的比较 大气降水经过林冠层,又从林冠层流经树干后,浓度差异变化最大的元素都是  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N 在穿透雨和树干茎流的浓度分别是大气降水的 4.4 倍、9.9 倍,其次是  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ,在穿透雨和树干茎流  $\text{K}^+$  浓度分别为大气降水的 4.1 倍和 8.1 倍,它们中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度是大气降水的 3.7 倍和 7.9 倍,  $\text{Na}^+$  变

化最小,仅仅是大气降水的 0.4 倍和 0.9 倍(表 1)。不同营养元素在大气降水、穿透雨和树干茎流中,经方差分析 F 检验证明都有极差异显著( $p < 0.000$ )( $n = 27$ )。说明油松林生态系统对林内雨的营养元素有一定的影响力。刘世海<sup>[13,14]</sup>研究密云水库油松林、板栗林化学元素变化,在穿透雨和树干茎流中变化较大的均是 N、K,与本文的研究结论一致。这说明大气降水经过油松林冠层和树干后,营养元素出现程度不同的迁移,产生了养分富集。针叶林中离子富集为其主要的研究内容<sup>[15-17]</sup>。养分富集是由于降水淋溶冠层和树干截留的干沉降以及它们分泌的一些物质,同时林冠层、树干对降水中化学元素的吸收、吸附等化学调节作用,导致林内雨养分浓度增加。

### 3.2 降水对油松林冠层的淋溶效应

大气降水经过林冠、树干后,对其中的营养元素进行淋溶,淋溶出来的养分是可溶性的,有利于林木直接吸收。淋溶量是穿透雨和树干茎流的养分总输入量扣除大气降水养分输入量而得。淋溶强度可以用净淋溶沉积比( $D_R$ )<sup>[5]</sup>来反映:

$$\text{净淋溶沉积比}(D_R) = \text{大气降水净淋溶量} / \text{大气降水养分输入量}$$

大气降水流经油松林冠和树干后,养分淋溶量为  $54.12 \text{ kg hm}^{-2}$ ,养分元素淋溶量最高的是  $\text{Ca}^{2+}$ ,为  $37.26 \text{ kg hm}^{-2}$ ,其次是  $\text{K}^+$ ,为  $10.98 \text{ kg hm}^{-2}$ , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  相差不多,分别为  $5.27 \text{ kg hm}^{-2}$ 和  $4.57 \text{ kg hm}^{-2}$ , $\text{Mg}^{2+}$  元素较少,为  $2.70 \text{ kg hm}^{-2}$ , $\text{Na}^+$  元素淋溶量为负值( $-6.66 \text{ kg hm}^{-2}$ ),可能是植物对  $\text{Na}^+$  的吸附(表 2)。一般来说  $\text{K}^+$  的溶解度高,在植物体内转移迅速,容易从植物中溶脱,因此  $\text{K}^+$  的淋溶量高于  $\text{Ca}^{2+}$ ,而  $\text{Ca}^{2+}$  释放速度缓慢,溶脱程度不如钾,所以淋溶量低。但在本研究中  $\text{Ca}^{2+}$  大于  $\text{K}^+$ ,这可能与降尘和林地是石灰岩、凝灰岩有关。

从淋溶强度看,由表 2 可以看出, $\text{K}^+$  的净淋溶沉积比最高,约为 2,淋溶强度最大, $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  相近,分别是 1.56 和 1.41,最小的是  $\text{Na}^+$ ,净淋溶沉积比为负值。

降水对植被的淋溶能加速营养元素的循环和生物作用,促进植物生长,但是过度的淋溶会造成营养物质的析出量超过最初叶片的含有量,从而对森林冠层造成负面影响<sup>[18,19]</sup>。森林长期处于酸性降水环境,会使营养元素流失严重<sup>[20]</sup>,造成森林营养亏缺,影响森林生产力。目前,北京西山地区的降水不是酸性<sup>[21]</sup>。为防止酸雨的影响,应长期对北京西山森林生态系统定位研究站进行监测。

表 2 油松林地降水养分输入量

Table 2 Nutrien input by precipitation of *Pinus tabulaeformis* ( $\text{kg hm}^{-2}$ )

营养元素 Nutrient elements	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	合计 Total
大气降水输入量 Input of precipitation	5.51	10.00	23.96	5.41	3.23	18.27	66.38
穿透雨输入量 Input of throughfall	15.40	3.09	55.66	7.47	7.00	20.89	109.51
树干茎流输入量 Input of stemflow	1.09	0.25	5.56	0.64	0.80	2.65	10.99
净淋溶量 Net input of eluviation	10.98	-6.66	37.26	2.70	4.57	5.27	54.12
净淋溶沉积比 Net D.	1.99	-0.67	1.56	0.50	1.41	0.29	0.82
输入总量 Total input	16.49	3.34	61.22	8.11	7.80	23.54	120.50

### 3.3 降水及森林水文过程中营养元素的输入量

大气降水流经油松林时不仅使其化学元素浓度发生改变,而且对于林地养分元素的输入量,也发生了改变。对于林地,土壤中的养分主要来源于枯枝落叶和降水输入,由于油松针叶的难分解性,使得降水输入的养分在森林生态系统中具有特殊意义。因此养分元素的输入量除了大气降水输入外,还包括穿透雨、树干茎流输入。

从表 2 可知,通过大气降水输入林地养分为  $66.38 \text{ kg hm}^{-2}$ ,其中输入最多的元素是  $\text{Ca}^{2+}$ ,为  $23.96 \text{ kg hm}^{-2}$ ,其次是  $\text{N}(\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})$ ,为  $21.50 \text{ kg hm}^{-2}$ , $\text{Na}^+$  位居第 3 位,为  $10.00 \text{ kg hm}^{-2}$ , $\text{K}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  相近,分别是  $5.51 \text{ kg hm}^{-2}$ 和  $5.41 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

油松林中穿透雨输入林地的养分是  $109.51 \text{ kg hm}^{-2}$ , 输入量占优势的元素是  $\text{Ca}^{2+}$ , 为  $55.66 \text{ kg hm}^{-2}$ , 占穿透雨输入量的 50%, N 是 27.89, 占穿透雨输入量的 25%, 其中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  约为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的 3 倍,  $\text{K}^+$  为  $15.4 \text{ kg hm}^{-2}$ , 占 14%,  $\text{Na}^+$  最小仅为  $3.09 \text{ kg hm}^{-2}$  (表 2)。树干茎流输入林地的养分是  $10.99 \text{ kg hm}^{-2}$  (表 2), 营养元素输入量大小顺序和占树干茎流输入量的比例与穿透雨相同。穿透雨输入林地的养分量大约为树干茎流的 10 倍。可见, 穿透雨对林地的贡献远远大于树干茎流的贡献量。尽管如此, 树干茎流的养分能直接流入树干根部附近, 有利于林木吸收, 在干旱的季节, 更能显示出树干茎流养分的重要性。

降水流经油松林输入林地的养分量  $120.50 \text{ kg hm}^{-2}$ , 其中  $\text{Ca}^{2+}$  元素最高, 为  $61.22 \text{ kg hm}^{-2}$ , 其次是 N 元素 ( $\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$ ), 为  $31.34 \text{ kg hm}^{-2}$ , 其中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  约是  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的 3 倍, N 元素的输入量相当于为林地施入  $68.13 \text{ kg hm}^{-2}$  的尿素。  $\text{K}^+$  元素为  $16.49 \text{ kg hm}^{-2}$ , Mg 元素为  $8.11 \text{ kg hm}^{-2}$ ,  $\text{Na}^+$  元素最少, 为  $3.34 \text{ kg hm}^{-2}$ 。它们分别占总养分输入量的 50.80%、26.01%、13.68%、6.73%、2.77%。

#### 4 结论与讨论

(1) 大气降水经油松林后, 其营养元素  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的浓度发生改变。除  $\text{Na}^+$  外, 其它营养元素的浓度迁移出现了梯度变化, 依次为树干茎流 > 穿透雨 > 大气降水。穿透雨和树干茎流中养分有明显的月际变化, 并且它们有相同的变化趋势。同一营养元素及不同营养元素 (除  $\text{Na}^+$ ) 在大气降水、穿透雨和树干茎流中都有极显著差异。

(2) 营养元素中浓度差异变化最大的元素是  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 在穿透雨和树干茎流的浓度分别是大气降水的 4.4 倍、9.9 倍, 其次是  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ , 在穿透雨和树干茎流  $\text{K}^+$  浓度分别为大气降水的 4.1 倍和 8.1 倍, 它们中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度是大气降水的 3.7 倍和 7.9 倍,  $\text{Na}^+$  变化最小。从元素移动性看, 认为浓度差异变化最大的元素是 K, 但研究的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  变化最大, 可能是油松林中淋溶的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  多于吸收。大气降水经过油松林冠层和树干后, 出现养分富集。

(3) 降水经过油松林, 养分淋溶总量为  $54.12 \text{ kg hm}^{-2}$ , 元素淋溶量大小依次为  $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ - \text{N} > \text{NO}_3^- - \text{N} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ 。从淋溶强度看,  $\text{K}^+$  的净淋溶沉积比最高,  $\text{Na}^+$  净淋溶沉积比为负值, 有可能是植物对  $\text{Na}^+$  的吸收。

(4) 大气输入林地养分包括湿沉降和干沉降, 降水是这里湿沉降最主要的形式。通过大气降水输入林地养分为  $66.38 \text{ kg hm}^{-2}$ , 输入最多的元素是  $\text{Ca}^{2+}$ , 为  $23.96 \text{ kg hm}^{-2}$ , 其次是 N ( $\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$ ), 为  $21.50 \text{ kg hm}^{-2}$ ,  $\text{Na}^+$  位居第 3 位, 为  $10.00 \text{ kg hm}^{-2}$ ,  $\text{K}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  相近, 分别是  $5.51 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $5.41 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

(5) 降水经过油松林输入林地的养分包括穿透雨和树干茎流两部分, 输入养分总量为  $120.50 \text{ kg hm}^{-2}$ , 通过穿透雨输入林地的养分量相当于树干茎流的 10 倍。这两部分中物质元素来源于干沉降、湿沉降和植物叶面、树皮的淋洗。  $\text{Ca}^{2+}$  元素最高, 为  $61.22 \text{ kg hm}^{-2}$ , 其次是 N 元素 ( $\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$ ), 为  $31.34 \text{ kg hm}^{-2}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  约是  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的 3 倍, N 元素的输入量相当于为林地施入  $68.13 \text{ kg hm}^{-2}$  的尿素。  $\text{K}^+$  元素为  $16.49 \text{ kg hm}^{-2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  元素为  $8.11 \text{ kg hm}^{-2}$ ,  $\text{Na}^+$  元素最少, 为  $3.34 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

实验点在 1999 年以来, 降水量普遍偏少, 2002 年的降水量为 512.8mm, 2003 年的降水量为 417.6mm。相对前几年, 2004 年的降水量较高, 为 585.5mm, 但仅有一次地表径流, 不能说明降水流经林地后的营养元素的变化规律及输出林地的养分量。使研究工作局限在大气降水和林冠层透过水的分析。

#### References:

- [1] Radzi Abas, M, Ahmad-Shah, A & Nor Awang M. Fluxes of ions in precipitation, throughfall and stemflow in an urban forest in Kuala Lumpur, Malaysia. *Environment. Pollut.* 1992, 75:209 ~ 213.
- [2] Ander Gonzalez-Arias, Ibone Amezaga, Arsenio Echeandia, et al. Buffering capacity through cation leaching of *Pinus radiata* D. Don canopy. *Plant Ecology*, 2000, 149:23 ~ 42.
- [3] Xu Y G, Zhou G Y, Wu Z M, et al. Chemical composition of precipitation, throughfall and soil solutions at two forested sites in Guangzhou, South China.

- Water, Air and Soil Pollution, 2001, 130: 1079 ~ 1084.
- [ 4 ] 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. *Biogeochemistry*, 1991, 14: 31 ~ 55.
- [ 5 ] Li H T. Study on hydrology of mountain forest ecosystem in warm temperate zone. Beijing: National library, 1998.
- [ 6 ] Liu S H. Studies on Aquatic Chemistry and Biochemistry Cycle of Water Resources Protection Forest in Miyun Reservoir Beijing, 2001.
- [ 7 ] Huang J H, Li H T, Han X G, *et al.* Nutrient characteristics of stemflow and throughfall in two coniferous forest ecosystem. *Acta Phytocologia Sinica*, 2000, 24(2): 248 ~ 251.
- [ 8 ] Li L H, Lin P. Throughfall and stemflow nutrient depositions to soil in a subtropical evergreen broad-leaved forest in the Wuyi Mountains. *Journal of Environmental Sciences*, 1998, 10(4): 426 ~ 432.
- [ 9 ] Chen B F, Zeng Q B, Huang Q, *et al.* Hydro-ecological effect of tropical mountain rain forest ecosystem — Canopy leaching, hydrochemical storage. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18, (4): 364 ~ 370.
- [ 10 ] Zhou G Y, Yan J H. The influence of regional atmospheric precipitation characteristic and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2002 ~ 2012.
- [ 11 ] Fan H B. Effect of canopy interception by chinese fir forests on precipitation chemistry. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(4): 2 ~ 8.
- [ 12 ] Jiang W H. Chemical properties of acid rain in evergreen broad-leaved forest in Simianshan Mountain and the effect of acid rain on soil and vegetation. 2003.
- [ 13 ] Liu S H, Yu X X, Yu Z M. Chemical properties of precipitation in *Pinus tabulaeformis* water resource protection forest in Miyun reservoir watershed. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2001, 12, (5): 697 ~ 700.
- [ 14 ] Liu S H, Yu X X, Yu Z M. Properties of water chemical elements of *Castanea mollissima* forest in Miyun reservoir watershed. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23, (2): 12 ~ 15.
- [ 15 ] Lawrence G B and Fernandez I J. Biogeochemical interactions between acidic deposition and a low-elevation spruce-fir stand in Howland, Maine. *Can. J. For. Res.* 1991, 21, 867.
- [ 16 ] Neary A J and Gizyn W I. Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. *Can. J. For. Res.*, 1994, 24, 1089.
- [ 17 ] Marks, Castro, Raymond P. Morgan. Input-output budgets of major ions for a forested watershed in Western Maryland. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2000, 119: 121 ~ 137.
- [ 18 ] Cronan C S, Reiner W A. Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hard-wood forests in New England. *Oecologia*, 1983, 59: 216 ~ 223.
- [ 19 ] Cronan C S, Grigal D F. Use of calcium aluminum ratios as indicators of stress in forest ecosystems, *J. Environm. Qual.* 1995, 24: 209 ~ 226.
- [ 20 ] Liu J X, Wen D Z, Zhou G Y. Chemical properties of rainfall in the coniferous and broad-leaved forests in acid rain area of Heshan, Guangdong, China. *Environmental Science*, 2000, 20(3): 198 ~ 202.
- [ 21 ] Wang D Z, Nie L S, Li J Y. Effects of forest on chemical properties of precipitation and total suspended particulates of stemflow in Jiufeng National Forest Park. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(1): 89 ~ 91.

#### 参考文献:

- [ 5 ] 李海涛. 暖温带山地森林生态系统水分问题研究. 北京: 国家图书馆, 1998.
- [ 6 ] 刘世海. 密云水库北京集水区水源保护林生物地球化学循环及水化学性质研究. 北京林业大学博士论文. 2001.
- [ 7 ] 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. *植物生态学报*, 2000, 24(2248 ~ 251).
- [ 9 ] 陈步峰, 曾庆波, 黄全, 等. 热带山地雨林生态系统的水分生态效应——冠层淋溶、水化学贮滞. *生态学报*, 1998, 18, (4): 364 ~ 370.
- [ 10 ] 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响. *生态学报*, 2001, 12, 21(12): 2002 ~ 2012.
- [ 11 ] 樊后宝. 杉木林截留对降水化学的影响. *林业科学*, 2000, 36(4): 2 ~ 8.
- [ 12 ] 姜文华. 四面山常绿阔叶林酸性降水的化学特征及其对土壤和植物影响现状的研究. 北京林业大学硕士论文. 2003.
- [ 13 ] 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. *应用生态学报*, 2001, 12, (5): 697 ~ 700.
- [ 14 ] 刘世海, 余新晓, 于志民. 北京密云水库集水区板栗林化学元素性质研究. *北京林业大学学报*, 2001, 23, (2): 12 ~ 15.
- [ 20 ] 刘菊绣, 温达志, 周国逸. 广东鹤山酸雨地区针叶林与阔叶林降水化学特征. *中国环境科学*, 2000, 20(3): 198 ~ 202.
- [ 21 ] 王登芝, 聂立水, 李吉跃. 森林对鹫峰国家森林公园降水化学及树干茎流悬浮物影响的研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(1): 89 ~ 91.