

小兴安岭白桦林降水转化过程元素特征分析

盛后财 蔡体久 琚存勇

(东北林业大学林学院)

摘要:为了探究小兴安岭白桦林生态系统在降水转化过程中养分循环及养分平衡的变化特征,采用生态系统野外长期定位观测和采样的方法,并利用 ICP 发射光谱分析仪对小兴安岭白桦林穿透雨、树干径流以及林外雨中的 K、Ca、Si、Mg 和 Mn 共 5 种养分元素进行了测定,结合白桦林对大气降雨的截留再分配比例,计算了白桦林内各元素的输入量,结果表明:1) 大气降雨中各养分元素年均质量浓度 Ca 为最高(10.807 mg/L),Mn 最低(0.069 mg/L),其排序为 $Ca > K > Si > Mg > Mn$;大气降雨中养分输入量排序与养分年均质量浓度有相同排序规律;2) 穿透雨与树干径流中的各元素年均质量浓度规律一致,均为 $Ca > K > Mg > Si > Mn$;与大气降雨相比,穿透雨和树干径流中养分元素的年均浓度均有不同幅度的增长;3) 大气降雨中除 Ca 元素外,其他元素的变异系数均大于 1,其中 K 的变异系数最大(1.514),Ca 的变异系数最小(0.827);白桦林穿透雨、树干径流中 Mg 元素变异系数均为最大,分别为 0.989 和 0.827,最小变异系数分别为 Si(0.46)和 Mn(0.459);与大气降雨相比,穿透雨和树干径流中各养分元素的变异系数均小于降雨中该元素的变异系数;4) 白桦林各元素年净输入量为 $K > Mg > Si > Mn > Ca$,且 Ca 元素的年净输入量为负值。

关键词:大气降雨;白桦林;穿透雨;树干径流;元素特征;养分输入

中图分类号:S715.2 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2015)02-0059-08

SHENG Hou-cai; CAI Ti-jiu; JU Cun-yong. **Element characteristics in the precipitation conversion process in *Betula platyphlla* forest of Xiaoxing'an Mountains, northeastern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015) **37**(2) 59-66 [Ch, 22 ref.] School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China.

Birch forest as secondary forest after the original natural forest was disturbed plays an important role in northeastern China since it occupies about 20% of the total forest area. To explore the variations of nutrient cycling and nutrient balance in precipitation conversion process in birch forest ecosystem of Xiaoxing'an Mountains, net input of each nutrient element was calculated. The calculation was based on the implementation of long-term fixed-location observation and sampling in the field. We measured the contents of five nutrient elements (K, Ca, Si, Mg and Mn) in precipitation, throughfall, and stemflow using the analyzer of ICP color spectrum, combining the allotment of rainfall water. The results revealed that: 1) in precipitation, the average concentration of each nutrient was significantly different. The concentration of Ca was the highest with 10.807 mg/L and that of Mn only 0.069 mg/L as the lowest. The contents of nutrients in precipitation were in the order as $Ca > K > Si > Mg > Mn$, the same order as for the input of nutrients in precipitation. 2) The yearly average concentration of each element in throughfall and stemflow had the same pattern of $Ca > K > Mg > Si > Mn$. The contents of nutrients in throughfall and stemflow had increases with different amplitudes if compared to precipitation. 3) All coefficients of variation (CV) in precipitation were higher than 1 except that for Ca, and the greatest CV in precipitation was 1.514 for K and the smallest 0.827 for Ca. The greatest CV for K was 0.989 in

收稿日期:2014-04-08 修回日期:2014-06-06

基金项目:林业公益性行业科研专项(201404303)、东北林业大学学术名师支持计划项目(PFT-1213-21)。

第一作者:盛后财,博士生,助理研究员。主要研究方向:生态学、森林水文学。Email:shenghoucai@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:蔡体久,教授,博士生导师。主要研究方向:森林水文学及恢复生态学。Email:caitj@263.net 地址:同上。

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

throughfall and 0.827 in stemflow. In throughfall, the smallest CV was 0.46 for Si and in stemflow 0.459 for Mn. The CVs in throughfall and stemflow were all smaller than those in precipitation. 4) The pattern for the net input amounts of each element in the birch forest was as follows: $K > Mg > Si > Mn > Ca$. Furthermore the net input amount of Ca in birch forest was negative.

Key words precipitation; birch forest; throughfall; stemflow; element characteristics; nutrient input

在水循环过程中,大气降雨携带各种养分元素进入森林生态系统的同时,随着其与植被层的接触,还会发生水量与水化学特征的明显改变^[1-3],这种变化构成了生态系统水分和养分循环的重要部分。研究表明^[4],大气降水是森林生态系统养分输入的主要形式,甚至是养分缺乏地区养分输入的唯一形式,是生物地球化学循环的重要组成部分。因此,分析森林水环境的化学变化对了解森林生态系统养分循环及养分平衡、森林净化水源的作用机制具有重要意义^[4]。

森林和水之间的关系是林学、水文学和生态学领域研究的核心热点问题^[5-6]。目前,关于森林水文过程中大气降雨、穿透雨和树干径流等各分量的养分动态和输入受到了国内外学者的普遍关注,并针对不同地区、不同森林类型展开观测,例如寒温带的兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林^[7],中温带的原始红松(*Pinus koraiensis*)林^[2]、人工兴安落叶松林^[4,8],暖温带的人工油松(*Pinus tabulaeformis*)林^[3,9]、板栗(*Castanea mollissima*)林^[10]、亚热带的马尾松(*Pinus massoniana*)-四川大头茶(*Gordonia acuminata*)混交林、四川大头茶-四川山矾(*Symplocos setchuensis*)混交林^[11]、樟树(*Cinnamomum camphora*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)^[12],季风常绿阔叶林、针阔叶混交林、马尾松林^[13-14],热带的半落叶季雨林、山地雨林^[15],并取得了一系列研究成果。

小兴安岭林区是我国东北重要林区之一,曾为新中国建设做出了巨大贡献。建国初始,为了获取木材支援国家基础建设,小兴安岭林区原生植被红松阔叶混交林被掠夺式采伐,形成大面积天然次生林,据不完全统计,小兴安岭林区现有白桦(*Betula platyphylla*)林面积98万 hm^2 ,约占次生林总面积的45%^[16]。白桦林具有萌蘖能力强、生长迅速、传播广等特点,是我国东北地区分布最广泛的阔叶林,约占东北森林总面积的20%左右,地位重要。蔡体久等^[17]研究了白桦林水文过程中的降雨截流再分配特征,李文影等^[18]曾详细研究了不同龄组白桦林各水文分量化学元素的浓度变化规律及其原因,但对白桦林中以水为载体的生态系统养分循环方面的研

究还较少,基本未见报道。本研究采用固定样地观测法,选择小兴安岭地区凉水国家级自然保护区内的白桦林为研究对象,通过大气降雨、穿透雨和树干径流的观测和采样分析,旨在了解伴随降水输入转化过程中发生的养分输入和循环的规律,以便能为该区域及类似地区水循环中发生的物质流动、养分平衡等相关过程的理解和定量评价提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

凉水国家级自然保护区位于小兴安岭中心的伊春市境内,素有“小兴安岭缩影”的美誉。保护区总面积1.2万 hm^2 ,其中次生林面积约占35%,主要为天然次生白桦林和少量杨桦混交林。保护区森林覆被率为98%,平均海拔400 m,地理坐标为 $128^{\circ}48'08'' \sim 128^{\circ}55'46''\text{E}$, $47^{\circ}07'15'' \sim 47^{\circ}14'38''\text{N}$ 。处于欧亚大陆的东缘,具有明显的温带大陆性气候特征。冬季严寒干燥,夏季多雨,气温较高。年平均气温 -0.3°C ,相对湿度78%,无霜期100~120 d, $>10^{\circ}\text{C}$ 的积温为1702 $^{\circ}\text{C}$ 。多年平均降水量676 mm,且多集中在7月份。主要土壤类型为森林暗棕壤。

本区主要森林类型为红松阔叶混交林,次生白桦林是红松阔叶混交林经过采伐(1953年)后演替形成的一种次生群落,组成以白桦为主,构成单层林,有许多红松、红皮云杉(*Picea koraiensis*)和臭冷杉(*Abies nephrolepis*)等针叶树幼苗、幼树更新,且生长良好。林下灌木较少,主要种类有稠李(*Padus asiatica*)、柳叶绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、刺五加(*Acanthopanax senticosus*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、龙牙葱木(*Aralia mandshurica*)和毛榛子(*Corylus mandshurica*)等。

1.2 研究方法

基于小兴安岭林区白桦林概况及其成因,在保护区内1953年采伐(红松阔叶混交林)后自然恢复形成的白桦林区域内设置40 m \times 50 m的实验标准样地并安放实验仪器。标准样地远离道路和人为干扰,乔木以白桦为优势树种且分布均匀,主要林分特征为:乔木平均胸径为18.50 cm,平均树高为16.54 m,密度为490株/ hm^2 ,主林层郁闭度为0.65,灌木

盖度为15%~25%,草本盖度为50%~80%。每月利用标准地内设置的穿透雨和树干径流收集装置采集样品,并迅速送回实验室储存,于当在学校仪器分析室进行水化学分析。

1.2.1 样品收集方法

大气降雨。在凉水国家级自然保护区气象场(距白桦样地约100 m)内安放经3%盐酸浸泡并用蒸馏水洗净的聚乙烯容器进行大气降雨样品的采集。收集每场降雨,于月底取足量的混合样品放置冰箱冷藏保存,以备实验室进行化学分析(穿透雨和树干径流的采集同此)。

穿透雨。在样地内选择非林隙、林木通直且分布均匀,郁闭度为0.65的位置(与标准样地一致)3处,共计放置3个面积为0.36 m²的PVC集水槽,保证集水槽距离地面高于50 cm,避免灌木和草本对样品化学性质的影响,用聚乙烯管连接集水槽较低端与带盖聚乙烯容器收集穿透雨样品。

树干径流。根据样地内林木胸径分布特征,以4 cm划分为1个径阶(*d*),共分为*d*≤10 cm、10 < *d*≤14 cm、14 < *d*≤18 cm、18 < *d*≤22 cm、*d* > 22 cm 合计5个径阶,依次选取了胸径为6.5、12.0、16.5、20.2和25.0 cm的树干通直、树冠形状居中(非被压木和优势木),能够代表其所属径阶所有乔木平均生长状况的5株白桦作为标准木,用标准木测得树干径流来代表其所属径阶乔木树干径流的平均情况。将直径6 cm聚乙烯塑料管沿中缝剪开,成螺旋状环绕并固定于树干上,用玻璃胶密封以确保树干径流入聚乙烯管连接的带盖聚乙烯树干径流收集容器。

1.2.2 样品分析方法

采用美国利曼-徕伯斯公司生产的profile系列ICP发射光谱分析仪测量K、Ca、Mg、Mn、和Si共5种养分元素的浓度,该装置的检出限质量浓度分别为:K=0.003 mg/L, Ca=0.005 mg/L, Mg=0.003 mg/L, Mn=0.009 mg/L, Si=0.009 mg/L。

2 结果与分析

2.1 大气降雨养分特征

大气降雨的化学特征受降雨条件、环境因素、人为活动的综合影响,因此具有很强的随机性和多变性。根据本实验的研究结果(表1),大气降雨中各元素浓度差异较大,降雨中各养分元素年平均质量浓度排列顺序为Ca > K > Si > Mg > Mn,这与李文影^[18]等在相同地区针对不同林龄白桦林的研究结果(Ca²⁺ > Cl⁻ > K⁺ > NO⁻³-N > Mg²⁺ > Na⁺)基本一致;按照同一元素不同月份最大与最小浓度相差倍数排序:K(156.16倍) > Mg(76.7倍) > Ca(47.31倍) > Mn(25.33倍) > Si(21.30倍);在相同月份里,K和Ca浓度明显较高(6月K最高,其他月Ca最大);Mn和Si的浓度则明显偏低(4月Mg最低,其他月Mn最小)。这可能是由于大气降雨中各元素的来源不同而导致的。本区降雨中各元素主要源于对空气飘尘的淋溶,少量源于物质燃烧释放物和可溶性气体的溶解,而飘尘的主要成分是碳酸钙,在微酸环境下易溶解释放Ca²⁺,而K元素形成的物质本身就易形成K⁺,所以K和Ca元素浓度相对较高;其他元素需要在酸性较强的情况下才能形成相应的可溶解的离子,因此相对稳定且含量较少。

表1 大气降雨中5种元素质量浓度

Tab. 1 Concentration of five elements in precipitation

mg·L⁻¹

测定元素 Element	水文过程分量 Hydrological component	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	年平均(算数平均) Yearly average (arithmetic mean)
K	大气降雨 Precipitation	0.050	1.605	1.600	7.808	0.286	0.341	1.948
	穿透雨 Throughfall	0.050	9.730	24.710	7.808	9.193	2.924	9.069
	树干径流 Stemflow	12.310	17.580	6.931	6.643	9.399	2.883	9.291
Ca	大气降雨 Precipitation	2.784	7.948	0.520	24.600	15.900	13.090	10.807
	穿透雨 Throughfall	2.784	10.290	4.636	24.600	18.260	8.896	11.578
	树干径流 Stemflow	14.070	45.290	9.619	11.300	43.680	12.060	22.670
Si	大气降雨 Precipitation	0.513	1.001	0.111	0.787	0.047	0.057	0.410
	穿透雨 Throughfall	0.513	0.748	1.119	0.787	0.410	0.305	0.647
	树干径流 Stemflow	0.976	2.599	1.418	1.682	0.640	0.512	1.305
Mg	大气降雨 Precipitation	0.010	0.243	0.010	0.767	0.328	0.252	0.268
	穿透雨 Throughfall	0.010	1.727	2.222	0.767	0.262	0.383	0.895
	树干径流 Stemflow	2.639	3.505	1.296	1.221	0.502	0.149	1.552
Mn	大气降雨 Precipitation	0.079	0.061	0.009	0.228	0.016	0.023	0.069
	穿透雨 Throughfall	0.079	0.508	0.254	0.228	0.144	0.133	0.224
	树干径流 Stemflow	0.922	0.680	0.566	0.533	0.250	0.298	0.541

2.2 白桦林穿透雨和树干径流养分特征

2.2.1 穿透雨养分特征

大气降雨淋洗枝叶并穿过林冠层和直接穿过林隙落到林地形成穿透雨,其水化学性质发生很大改变。根据本研究的测定结果(表1),穿透雨中各元素浓度差异较大,其中Ca元素年平均浓度最高(11.578 mg/L),Mn元素年平均浓度最低(0.224 mg/L),二者间相差51.69倍。穿透雨中各养分元素年平均含量排列顺序为Ca > K > Mg > Si > Mn,这与盛后财等^[2]2008年在相同区域内对原始红松林穿透雨水化学特征的研究结果(Ca > K > Mg > Mn > Fe)基本一致。在相同区域不同森林类型生态系统中,元素的含量等级(大量或微量元素)是影响其在穿透雨中浓度排序的首要因素;在属同等级元素条件时,不同元素在穿透雨中的浓度变化则主要与植物组织分泌物质、林冠层枝、叶及树干对吸附大气降尘量的多少,大气降雨对不同元素形成的不同性质产物(粉末、颗粒等)的淋洗能力的差异有关。大量元素中的活泼元素易发生化学反应,形成新物质,惰性元素恰好相反;而微量元素则一般比较稳定。本文中Ca、Mg和K为大量元素中的活泼元素,Si和Mn为相对稳定的微量元素,因此得到文中穿透雨中平均含量排列规律。

对于相同月份穿透雨中的5种元素,Ca均有最高浓度,除4月Mg浓度最小外,其他月份均为Mn浓度最低;同一元素不同月份穿透雨中化学元素含量各不同,且差异较大,尤以K和Mg显著,其最大浓度值分别是最小浓度值的494.2和222.2倍,即使Si的浓度变化相对较小,其最大浓度(1.119 mg/L)仍然是最小浓度(0.305 mg/L)的3.67倍。按照同一元素最大与最小浓度相差倍数排序:K(494.2倍) > Mg(222.2倍) > Ca(8.84倍) > Mn(6.43倍) > Si(3.67倍)。这与不同月份间穿透雨量的差异有直接关系。降雨量和降雨历时不同,降雨能够从林冠层淋溶出来元素的含量也有差异。长时间、充分的淋洗能够增加穿透雨中可溶性物质的浓度,反之穿透雨中元素浓度则变化不大。本文中K、Mg和Ca元素均为大量元素,Mn和Si为微量元素,且K发生化学反应后易形成可溶物质,而Mg和Ca则易形成难溶或不溶物质,因此得到以上的结果。

与大气降雨中各元素浓度相比,除4月和7月二者浓度相等、5月Si元素和8月Mg元素浓度降低外,穿透雨中各元素浓度均有所增加,但增加的幅度有所不同。其中大量元素Ca的浓度最高,而K元素浓度增加量最大。这是由于雨水穿过白桦林的冠层,树木枝叶上吸附的大气干沉降被淋洗,进入到

穿透雨而导致各元素浓度的增加;而由于4月白桦还没有生长叶片,并经过了一整个冬季的降雪洗刷,其穿透雨中各元素浓度与大气降雨一致,7月份的穿透雨量为全年最大,形成穿透雨时叶片被多次充分淋洗,因此穿透雨中各元素浓度与大气降雨相等。

2.2.2 树干径流养分特征

大气降雨由枝叶转移到树干,并沿树干流到林地而形成树干径流。由于枝、叶和树皮能够大量吸附空气飘尘,且树皮是植物的非光合器官,很难直接从水体中吸收营养元素,相反更易于被雨水淋洗树干上的附着物,因此树干径流的水质特征有较大变化。虽然白桦林的径流量较小,但其能够把植物生长所必需的养分元素沿长长的树干直接输入到物质转化的活跃区域——根际区域,对土壤化学养分平衡、植物养分利用和循环等方面有重要意义^[10]。影响树干径流的因素较多且作用复杂,在其综合影响下树干径流各元素浓度差异较大。在本研究中(表1),Ca元素年平均浓度最高(22.670 mg/L),Mn元素年平均浓度最低(0.541 mg/L),二者间相差41.90倍。树干径流各养分元素年均含量变化规律与穿透雨相同,即:Ca > K > Mg > Si > Mn,与盛后财等^[2]的研究结果(Ca > K > Mg > Mn > Fe)一致。这与Ca、Mg和K为大量元素,Si和Mn为微量元素的事实相符合,且与树木树皮粗糙程度和产生树干径流量多少也有很大关系。白桦树皮比较光滑,其能滞留的空气降尘能力要远小于树皮粗糙的红松等树种,但其树干径流量却为红松的5倍左右,形成的树干径流能够对树干表面进行更大面积和更加充分的淋洗,因此2种森林类型能得到相同的规律。同时白桦林和原始红松林穿透雨和树干径流各元素年均浓度排序均具有相同规律,这也说明2种森林生态系统的作用相近,但具体生态功能孰强孰弱则需要通过各生态系统中养分元素的净输入量来进行判断。

相同月份树干径流5种元素中,Ca均为最高浓度,而Mn元素浓度最低;在不同月份,各养分元素浓度具有明显的月动态,且元素间浓度相比大气降雨和穿透雨差异不大。其中不同月间Mg浓度差异最大,其最高浓度(3.505 mg/L)是最低浓度(0.149 mg/L)的23.52倍;而不同月间Mn含量变化最小,其最高浓度(0.922 mg/L)是最低浓度(0.250 mg/L)的3.69倍。按照同一元素最大与最小浓度相差倍数排序:Mg(23.52倍) > K(6.10倍) > Si(5.08倍) > Ca(4.71倍) > Mn(3.69倍),与穿透雨的规律不同。这是因为降雨量、降雨强度和降雨频度都能够对树干径流中各元素浓度产生影响。当降雨量小、降雨强度低、林冠层和树干对各元素及物质的吸

附力大于冲刷力,树干径流不仅不能起到淋洗作用,部分元素还会被吸附到树皮表面或树干上,表现为元素浓度降低;反之,树干径流中元素浓度将会升高。

与大气降雨相比较,树干径流中各元素浓度均有增加,其中元素含量增加最多的是 Ca 元素,其含量高出大气降雨 11.863 mg/L,但两者仅相差 2.1 倍,其次是 K 元素,其含量高出大气降雨 7.343 mg/L,两者相差 4.77 倍;元素含量增加倍数最大的是 Mn 元素,其含量高出大气降水仅 0.472 mg/L,但两者相差 7.84 倍,其次是 Mg 元素,其含量高出大气降水 1.284 mg/L,两者相差 5.79 倍。大气降雨、穿透雨和树干径流中各元素浓度相比,树干径流中各元素对应浓度均为最高。

2.3 大气降雨、穿透雨和树干径流养分含量变化

由于受到气象条件、环境状况、工业类型、植物生理特性等内外因素的综合影响,养分元素浓度变化也各不相同。由表 2 可知,大气降雨中除 Ca 元素外,其他元素的变异系数均大于 1。各养分元素中 K 的变动系数最大(1.514);Ca 元素的变动系数最小(0.827)。白桦林穿透雨、树干径流中 Mg 元素最为活跃,变动系数均为最大,分别为 0.989 和 0.827,这说明在大气降雨的迁移过程中,白桦的枝、叶和树皮对这些元素的吸收、吸附和淋溶作用较强;穿透雨中的 Si 元素和树干径流中的 Mn 元素相对稳定,其最小变动系数分别为 0.460 和 0.459,这说明白桦林对这些元素的吸收、吸附和淋溶作用较弱,采集到的样品中该元素浓度波动较小。与大气降雨相比,穿透雨和树干径流中各养分元素的变动系数均小于降雨中该元素的变动系数,且有大气降雨中仅 Ca 元素年均浓度标准差均小于其年均浓度,而穿透雨和树干径流中各元素年均浓度标准差均小于其年

均浓度,说明白桦林穿透雨和树干径流较大气降雨中各元素相对稳定,根据变异系数比较,白桦林各养分元素稳定度排序均有树干径流 > 穿透雨 > 大气降雨。这与闫文德等^[12]、陈书军等^[19]、盛后财等^[4]的研究结果略有不同,这是由于不同区域环境状况、不同年际气象差异、不同降雨特征、不同树种生理特性等因素的综合作用而导致的研究结果不同。

表 2 大气降雨、白桦次生林穿透雨和树干径流中 5 种元素的年均质量浓度及其标准差和变动系数

Tab.2 Concentration, coefficient of variation and standard deviation of five elements in precipitation, throughfall and stemflow

水文过程分量 Hydrological component	测定元素 Element					
	K	Ca	Si	Mg	Mn	
大气降水 Precipitation	\bar{X}	1.948	10.807	0.410	0.268	0.069
	S	2.950	8.942	0.412	0.278	0.083
	C_v	1.514	0.827	1.005	1.036	1.206
穿透雨 Throughfall	\bar{X}	9.069	11.578	0.647	0.895	0.224
	S	8.553	8.350	0.298	0.885	0.153
	C_v	0.943	0.721	0.460	0.989	0.683
树干径流 Stemflow	\bar{X}	9.291	22.670	1.305	1.552	0.541
	S	5.128	16.966	0.776	1.284	0.249
	C_v	0.552	0.748	0.594	0.827	0.459

注: \bar{X} 、S 和 C_v 分别表示元素的年均质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、标准差和变动系数。Notes: \bar{X} 、S、 C_v are element yearly average concentration, standard deviation and coefficient of variation, respectively.

根据穿透雨、树干径流的净淋溶量与淋溶系数(某元素净淋溶为该元素在穿透雨或树干径流中浓度与大气降雨中浓度的差值,淋溶系数为二者的比值)比较结果(表 3),本论文中所观测的 5 种元素的浓度均有所增加;且根据淋溶系数的比较可知,树干径流对元素的富集作用强于穿透雨。

表 3 降雨净淋溶的 5 种元素质量浓度及其淋溶系数

Tab.3 Concentration of five elements by rainfall leaching and leaching coefficient

项目 Item	K	Ca	Si	Mg	Mn
穿透雨净淋溶量 Net leaching amount of throughfall/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	7.121	0.771	0.237	0.627	0.155
树干径流净淋溶量 Net leaching amount of stemflow/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	7.343	11.863	0.895	1.284	0.472
穿透雨淋溶系数 Leaching coefficient of throughfall	4.656	1.071	1.578	3.340	3.246
树干径流淋溶系数 Leaching coefficient of stemflow	4.770	2.098	3.183	5.791	7.841

2.4 白桦林养分输入特征

不同地区由于年降水量、大气降雨水化学特性和植被生理特性的不同,林地内的各养分元素输入量也不相同。根据蔡体久等^[17]2006 年在相同地区的研究结果,白桦林穿透雨和树干径流分别占同期降雨量的 83.12% 和 1.89%,按照巩合德等^[1]2005 年计算净输入的方法:净输入 = (穿透雨 + 树干径流) - 大气降雨,计算整理得到表 4 信息可知,大气

降雨中 Ca 元素的年输入量最高为 82.072 kg/hm^2 , Mn 元素的年输入量最低为 0.582 kg/hm^2 ,二者相差 141.02 倍;大气降雨养分元素输入林地量的排序为 $\text{Ca} > \text{K} > \text{Si} > \text{Mg} > \text{Mn}$;白桦林各元素年净输入量为 $\text{K} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{Si} > \text{Ca}$,尤其 Ca 和 Si 元素的年净输入量为负值。这是由于大气降雨通过白桦林冠层时,一部分 Ca 和 Si 元素被林冠层吸附截留或直接吸收利用,输入量减少,而其他元素则被大气降雨由

林冠层淋洗出来,输入量增加;并且白桦的树皮对Ca和Si元素有较强的吸附性,易形成难溶物质停滞于树皮表面,这就进一步加剧了其年净输入为负值。由表3可知,由于白桦这一树种能够产生的树干径流量较少(占大气降雨1.89%),各养分元素的输入量也仅占白桦林内该元素(穿透雨+树干径

流)养分输入量的2.50%~5.69%,甚至可以忽略不计,而穿透雨养分输入量则占94.31%~97.50%,且除年净输入为负值的Ca和Si元素外,其他元素仅穿透雨养分输入量已经大于大气降雨养分输入量,即年净输入量为正值,因此白桦林养分年净输入量的正负主要决定于穿透雨中养分的输入量。

表4 大气降雨、白桦次生林穿透雨和树干径流中5种元素年输入量及净输入量

Tab.4 Input of five elements in precipitation, throughfall and stemflow

kg·hm⁻²

水文过程分量 Hydrological component	测定元素 Element					
	K	Ca	Si	Mg	Mn	Σ
大气降雨 Precipitation	16.986	82.072	4.809	2.155	0.582	106.604
穿透雨 Throughfall	38.606	69.694	3.163	3.720	1.045	116.228
树干径流 Stemflow	0.991	2.356	0.147	0.164	0.061	3.719
净输入量 Net input	22.611	-10.022	-1.499	1.729	0.524	13.343

3 讨论与结论

在小兴安岭地区,大气降雨中各养分元素的浓

度(0.069~10.807 mg/L)明显高于东北其他地区的报道值(表5),如哈尔滨帽儿山林场红松人工林(0.008~3.070 mg/L)、樟子松人工林(0.008~

表5 东北其他地区森林生态系统降水转化中的元素浓度

Tab.5 Concentration of element in forest ecosystem water cycle in other regions of northeastern China

mg·L⁻¹

试验地点 Test site	森林类型 Forest type	水文过程分量 Hydrological component	K	Ca	Si	Mg	Mn	参考文献 Reference
黑龙江省东部山地(哈尔滨帽儿山林场) Eastern mountainous region in Heilongjiang Province(Maoershan Forest Farm in Harbin)	红松人工林 <i>Pinus koraiensis</i> plantation	大气降雨 Precipitation	0.896	3.070		0.158	0.008	[20]
		穿透雨 Throughfall	7.408	5.442		1.077	0.095	
		树干流 Stemflow	9.365	11.996		3.309	0.312	
	樟子松人工林 <i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> plantation	大气降雨 Precipitation	0.873	3.153		0.146	0.008	[21]
		穿透雨 Throughfall	5.284	5.121		0.989	0.055	
		树干流 Stemflow	7.390	13.548		2.913	0.236	
	落叶松人工林 Larch plantation	大气降雨 Precipitation	0.915	2.809		0.137	0.016	[22]
		穿透雨 Throughfall	6.758	2.523		0.636	0.021	
		树干流 Stemflow	15.381	8.722		2.088	0.280	
小兴安岭凉水国家级自然保护区 Liangshui National Nature Reserve in Xiaoxing'an Mountains	原始红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	大气降雨 Precipitation	1.948	10.807	0.410	0.268	0.069	[2]
		穿透雨 Throughfall	7.952	16.665	0.851	1.000	0.185	
		树干流 Stemflow	8.398	26.633	1.433	1.278	0.156	
大兴安岭根河林业局潮查林场 Chaocha Forest Farm of Genhe Forestry Bureau in Daxing'an Mountains	兴安落叶松林 <i>Larix melinii</i> forest	大气降雨 Precipitation	0.460	4.670		0.230	0.015	[7]
		穿透雨 Throughfall	0.980	8.170		0.330	0.027	
		树干流 Stemflow	5.490	22.110		1.800	1.198	

注:表中数据为引用文献中的原始数据经计算算术平均值得到。Notes: the data in table are arithmetic mean of original data cited from the above references.

3. 153 mg/L)、落叶松人工林(0.016 ~ 2.809 mg/L),大兴安岭根河的兴安落叶松林(0.015 ~ 4.670 mg/L),这与不同区域内降雨的形成特点及各元素的来源不同有直接关系。

降水在森林生态系统内循环的过程中,由于降雨对树体表面具有冲刷和淋洗作用,在林外降雨转化为穿透雨和树干径流过程中,各元素的浓度发生了改变,并最终伴随水分循环进入到生态系统内,并参加森林生态系统的养分循环。本文对小兴安岭白桦林各水文分量中5种元素浓度的测定显示,均有树干径流中达到最高值,其变化在0.541 ~ 22.670 mg/L之间,略高于其他地区树干径流的测定值范围(0.236 ~ 22.110 mg/L)^[7,20-22],但在相同地区红松林树干径流测定值范围(0.156 ~ 26.633 mg/L)之内^[2,8]。小兴安岭白桦林穿透雨中各元素浓度变化在0.224 ~ 11.578 mg/L,稍高于黑龙江省东部山地(0.210 ~ 7.408 mg/L),高于大兴安岭(0.027 ~ 8.170 mg/L),但在小兴安岭地区其他森林类型的变化范围(0.185 ~ 16.665 mg/L)之内。这些差别的产生既与区域降水特征(小兴安岭地区降雨中养分元素浓度高)有关,也与森林的起源树、林分特征、种形态特征、树叶分泌物成分及其吸附降尘能力等因素有关。在本文中,同处于小兴安岭地区原始红

松林和白桦林,区域降雨特征相同,且Ca²⁺、Mg²⁺和K⁺均为陆源型离子,其树干径流和穿透雨中各元素浓度差异来自于树木自身的特点。与红松相比较,白桦林郁闭度低,叶片稀疏,形成穿透雨时能够淋洗的叶片数较红松或其他树种少,因此白桦林穿透雨中养分元素浓度低;并且白桦的树皮表面较光滑,不易吸附滞留大气中的尘埃,因此其树干径流中养分元素浓度也略低。

比较小兴安岭地区3种主要森林类型5种元素的年净输入量(表6),红松原始林中K和Ca元素输入量较大,这与张娜等^[14]在鼎湖山季风常绿阔叶林中的研究结果一致,但该地区的白桦次生林及落叶松人工林则仅为K元素输入量较大,Ca元素为负输入,这说明冠层及树干对Ca元素的吸收、吸附作用强烈。Ca元素形成的Ca²⁺对植物具有重要作用,其能够缓解或中和Al对植物的伤害,保护生态系统不受伤害。白桦次生林和落叶松人工林中Ca元素的负输入说明了这2种森林类型与原始红松林相比,其生态功能还不够强大,也从另一个角度解释了小兴安岭地区顶级群落阔叶红松林的稳定性,同时也说明白桦次生林和落叶松人工林在不受人为干扰的情况下,最终将在自然演替的驱动力下形成该地区的顶级群落阔叶红松林。

表6 小兴安岭地区3种主要森林类型元素年净输入量

Tab. 6 Net input of elements in three main forest types on Xiaoxing'an Mountains

kg·hm⁻²

森林类型 Forest types	测定元素 Element					总和 Total
	K	Ca	Si	Mg	Mn	
原始红松林 Virgin <i>P. koraiensis</i> forest	28.655	7.775	-0.907	2.805	0.138	38.446
白桦次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	22.611	-10.022	-1.499	1.729	0.524	13.343
落叶松人工林 Larch plantation	22.339	-1.280	-2.478	2.920	0.856	22.357

综合来看,林外降雨为森林生态系统输入了大量的养分物质,林内不同水文学过程中各养分元素浓度和通量的变化不仅能够反映森林内部伴随降水转化发生的养分物质传递、累积的过程,且由于穿透雨和树干径流的养分输入比凋落物分解迅速,并以植物能直接利用的无机态输入森林生态系统,直接参与养分循环,对森林生态系统存在和发育具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 盛后财,蔡体久,朱道光,等.原始红松林穿透雨和树干茎流养分特征研究[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 stemflow in virgin forest of *Pinus koraiensis*[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5):47-51.
- [3] 刘世海,余新晓,余志民.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,2001,12(5):697-700.
LIU S H, YU X X, YU Z M. Chemical property of precipitation in *Pinus tabulaeformis* water resource protection forest in Miyun Reservoir Watershed[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5):697-700.
- [4] 盛后财,蔡体久,朱道光,等.人工落叶松林降雨截留再分配及其水化学特征[J].水土保持学报,2009,23(2):79-83,89.
SHENG H C, CAI T J, ZHU D G, et al. Rainfall redistribution and hydrochemical characteristics in the larch plantation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2):79-83, 89.
- [5] 鲍文,包维楷,丁德蓉,等.森林植被对降水水化学的影响[J].生态环境,2004,13(1):112-115.

- BAO W, BAO W K, DING D R, et al. Effects of forest vegetation on water chemistry of precipitation[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(1):112-115.
- [6] 高甲荣,肖斌,张东升,等. 国外森林水文研究进展述评[J]. 水土保持学报,2001,15(5):60-64.
- GAO J R, XIAO B, ZHANG D S, et al. Review on forest hydrology study in world [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(5):60-64.
- [7] 苏日娜. 内蒙古大兴安岭兴安落叶松林降水化学特征研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- SU R N. Study on rainfall hydrochemical characteristics of *Larix gmelinii* forest in Great Xing'an Mountains of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [8] 武秀娟,蔡体久,李华,等. 凉水国家级自然保护区原始红松林和人工落叶松林降水水化学特征研究[J]. 中国水土保持科学,2008,6(6):37-42.
- WU X J, CAI T J, LI H, et al. Precipitation hydrochemical characteristic in virgin *Pinus koraiensis* forest and artificial *Larix gmelinii* forest in Liangshui National Nature Reserve[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(6):37-42.
- [9] 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(增刊2):125-128.
- TIAN P, MA Q Y, LIU S H, et al. Chemical properties of precipitation in *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(Suppl. 2):125-128.
- [10] 刘世海,余新晓,余志民. 北京密云水库集水区板栗林水化学元素性质研究[J]. 北京林业大学学报,2001,23(2):12-15.
- LIU S H, YU X X, YU Z M. Properties of water chemical elements of *Castanea mollissima* forest in Miyun Reservoir Watershed[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(2):12-15.
- [11] 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,2013,21(2):236-248.
- LIU N, WANG Y J, WANG Y Q, et al. Hydrochemical effects of typical forest stands at different spatial levels in Jinyun Mountain, subtropical region[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(2):236-248.
- [12] 闫文德,田大伦,陈书军,等. 4个树种茎流养分特征研究[J]. 林业科学,2005,41(6):50-56.
- YAN W D, TIAN D L, CHEN S J, et al. Nutrient characteristics of stem-flow in four tree species [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(6):50-56.
- [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] 张娜,乔玉娜,刘兴诏,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林大气降雨、穿透雨和树干流的养分特征[J]. 热带亚热带植物学报,2010, 18(5):502-510.
- ZHANG N, QIAO Y N, LIU X Z, et al. Nutrient characteristics in incident rainfall, throughfall, and stemflow in monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2010,18(5):502-510.
- [15] 卢俊培. 海南岛尖峰岭热带林生态系统的水化学特征[J]. 林业科学研究,1991,4(3):231-237.
- LU J P. Hydrochemical characteristic on tropical forest ecosystems in Jianfengling, Hainan Island, China [J]. Forest Research, 1991, 4(3):231-237.
- [16] 邢凌云. 小兴安岭地区白桦林的经营建议[J]. 黑龙江科技信息,2011(32):265.
- XING L Y. Management proposals for *Betula platyphlla* forest on Xiaoxing'an Mountains[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(32):265.
- [17] 蔡体久,朱道光,盛后财. 原始红松林和次生白桦林降雨截流再分配效应研究[J]. 中国水土保持科学,2006,4(6):61-65.
- CAI T J, ZHU D G, SHENG H C. Rainfall redistribution in virgin *Pinus koaiensis* forest and secondary *Betula platyphylla* forest in Northeast China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(6):61-65.
- [18] 李文影,满秀玲,张阳武. 不同林龄白桦次生林降雨水化学特征研究[J]. 水土保持学报,2009,23(5):123-127.
- LI W Y, MAN X L, ZHANG Y W. Study on precipitation hydrochemical characteristic of different stages of *Betula platyphylla* secondary forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5):123-127.
- [19] 陈书军,闫文德,项文化,等. 中亚热带地区几个树种树干茎流的养分特征研究[J]. 林业科学研究,2007,20(3):408-414.
- CHEN S J, YAN W D, XIANG W H, et al. Nutrient characteristics of stem-flow in different tree species in middle subtropics[J]. Forest Research, 2007, 20(3):408-414.
- [20] 赵雨森,辛颖,孟琳. 黑龙江省东部山地红松人工林生态系统水化学特征[J]. 中国生态农业学报,2007,15(3):1-4.
- ZHAO Y S, XIN Y, MENG L. Chemical properties of water in artificial *Pinus koraiensis* ecosystems in the eastern mountainous region of Heilongjiang Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(3):1-4.
- [21] 赵雨森,辛颖,增凡锁. 黑龙江省东部山地樟子松人工林生态系统水化学特征[J]. 水土保持学报,2006,20(4):175-178.
- ZHAO Y S, XIN Y, ZENG F S. Chemical properties of water in *Pinus koraiensis* var. *mongolica* at eastern mountainous region in Heilongjiang Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4):175-178.
- [22] 赵雨森,辛颖,增凡锁. 阿什河源头水源涵养林在水分传输过程中对水质的影响[J]. 林业科学,2008,44(6):5-9.
- ZHAO Y S, XIN Y, ZENG F S. Influence of the water conservation forest in the headstream of Ashi River on water quality [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(6):5-9.

(责任编辑 李 斐
责任编委 蔡强国)