

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.05.004

北亚热带 3 种典型森林群落水文过程中 盐基离子年内动态变化特征

康希睿^{1,2}, 张涵丹¹, 王小明¹, 陈光才^{1*}

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 揭示大气沉降盐基离子在北亚热带典型森林群落中分配特征及其时空差异性, 评价典型森林群落对大气降水的净化能力。[方法] 于 2018 年 7 月至 2019 年 6 月, 在杭州富阳庙山坞林区毛竹、杉木和青冈林分样地采集大气降水、穿透雨、树干茎流、枯透水和地表径流, 对比生长季和非生长季森林群落不同层次各水文分量中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度和通量变化。[结果] 研究表明, 大气降水中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的年均浓度分别为 0.27、0.36、0.89 和 0.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且 K^+ 和 Ca^{2+} 在生长季浓度高于非生长季; 3 种森林群落的林冠层和枯落物层对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 均表现出强烈的淋溶作用, 并在一定程度上调升降水 pH 值。林冠层对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的淋溶率在生长季偏低, 而地表层对 4 种盐基离子的截留率在生长季与非生长季间无显著差异; 对比地表径流 (输出) 与大气降水 (输入) 通量, 3 种森林群落对 4 种盐基离子均表现为截留作用, 青冈阔叶林对其截留能力最强, 截留率超过 94.70%。[结论] 3 种北亚热带典型森林群落的林冠层和枯落物层是林内盐基离子的重要释放源, 并缓冲非生长季酸性降水的 pH; 地表层则在生长季和非生长季都能有效截留径流水中盐基离子的流失, 维持群落内养分循环, 并保证森林集水区出水水质安全。

关键词: 毛竹林; 杉木林; 青冈阔叶林; 生长季; 非生长季; 盐基离子;

中图分类号: S718.51

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)05-0028-10

大气降水是森林生态系统水分和养分的主要来源^[1], 也是生物地球化学循环在生态系统中的重要组成部分^[2]。降水携带的多种养分离子不需要经过矿化过程就能够直接被植物吸收利用^[3], 通过冠层作用 (淋溶/截留) 后, 降水的化学组成会发生显著变化^[4-5], 调节了森林生态系统的养分输入与输出^[6-7]。钠 (Na)、钾 (K)、钙 (Ca)、镁 (Mg) 等盐基离子是植物生长发育不可缺少的营养元素, 具有溶解度高、易于转移的特点, 如植物表层的 K^+ 在雨水作用下易被淋溶, 冠层淋失率高达 412%~681%^[8], Ca^{2+} 是森林冠层缓冲降水酸度的主要介质^[9] 等。有研究表明, 酸雨会导致森林土壤中盐基离子淋出, 且随着酸雨 pH 的降低, 盐基淋失量增加^[10-11],

从而影响森林群落对营养元素的吸收利用, 制约森林植物的健康生长。因此, 研究森林生态系统中降水盐基离子的分配及迁移特征, 不仅对揭示森林生态系统的养分循环、森林植物的生长具有重要作用^[12], 也为评价森林的水质净化效应提供重要依据。

钱江流域地处我国东南沿海经济发达地区, 大气沉降污染物和酸雨危害等环境问题日趋严重^[13], 降水引起森林养分离子淋失会影响整个森林生态系统的生长和养分循环, 进而影响生态系统结构和功能。目前, 关于森林群落对养分淋溶效应的研究多集中在生长季内, 而在酸雨高发^[14] 的秋冬季节研究较欠缺, 且现有研究表明, 流域出口的水质与大气降水差异明显且季节波动较大^[14-16]。酸雨易造成

收稿日期: 2020-01-10 修回日期: 2020-04-10

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目 (CAFYBB2017ZA002-2); 国家重点研发计划“典型脆弱生态修复与保护研究”重点专项项目 (2017YFC050550403); 国家自然科学基金项目 (41807151)

* 通讯作者: 陈光才. E-mail: guangcaichen@sohu.com

森林土壤矿质元素的流失^[10-11], 研究水文过程中盐基离子动态变化, 是评价森林群落缓冲酸雨能力及净化水质效益的重要依据。本研究选择北亚热带地区3种典型森林群落——毛竹 (*Phyllostachys edulis*(Carrière)J.Houz.)林、杉木 (*Cunninghamialanceolata* (Lamb.) Hook.)林和青冈 (*Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) Oersted)为主的阔叶林, 通过1a的定位监测, 研究随着大气降水输入发生的森林群落不同水文分量中Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺离子年度内生长季和非生长季浓度和通量的动态变化, 揭示森林群落各层次对养分的分配和迁移规律, 对比3种森林群落对盐基离子的截留/淋溶能力, 为森林环境效应评价以及提升森林生态功能提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于浙江省杭州市富阳区庙山坞林区 (119°56'~120°02' E, 30°03'~30°06' N), 属于国家林业和草原局钱江源森林生态系统定位观测研究站。该区属北亚热带季风气候区, 四季分明, 降水充沛。全年降水日数160 d左右, 年平均降水量1 441.9 mm^[15], 雨量季节分配不均。年平均气温16.1℃, 年平均日照时数1 995 h。依据植物生长特

性以及气温、降水等情况划分, 研究区森林群落的生长季为3—10月, 非生长季为11月至次年2月^[17]。研究区地质类型属志留系、泥盆系地质, 土壤类型是酸性红壤土^[15], 土层中含有较多石块。区内水系直接外流注入富春江, 属钱塘江水系富春江段。林区主要人工林有毛竹林、杉木林等, 天然林有针阔混交林和以青冈 (占比45%左右)、木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.) (占比25%左右)为主的天然常绿、落叶阔叶林等。

本研究选择毛竹人工林、杉木人工林和青冈为主的天然阔叶林 (青冈阔叶林) 3种北亚热带典型森林群落作为研究对象, 分别建立2个10 m×20 m (投影面积)的径流小区 (共计6个样地), 各样地基本特征见表1, 土壤理化性质见表2。

2 研究方法

2.1 监测设施布设与样品收集

大气降水: 在研究区林外空旷处布设1台QY-DGHYL雨量计 (上海精密仪器仪表有限公司), 记录降水过程, 并布设1台ISC-10型降水降尘自动采样器 (青岛埃仑通用科技有限公司) 和3个5 L玻璃烧杯, 用于收集大气降水。

表1 研究样地的基本特征

Table 1 The basic characteristics of sample plots

森林类型 Forest type	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	林分密度 Stand density / (株·hm ⁻²)	树木高度 Tree height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	郁闭度 Canopy density	叶面积指数 LAI
毛竹林 <i>P. edulis</i> forest	158	19	阳坡	5 150	13.4±2.2	10.4±1.5	0.96	4.56
		20	Sunny	5 050	11.6±2.0	10.1±1.7		
杉木林 <i>C. lanceolata</i> forest	222	27	阳坡	800	9.3±2.5	14.8±5.8	0.70	1.72
		30	Sunny	650	12.2±3.4	21.7±12.5		
青冈阔叶林 <i>C. glauca</i> broadleaf forest	130	28	阳坡	950	7.8±4.0	13.7±6.1	0.88	3.20
		27	Sunny	1 250	8.3±3.6	14.7±9.1		

表2 研究样地表层土壤的养分含量

Table 2 The phys-chemical properties of the surface soil of the sample plots

森林类型 Forest type	pH	Ca/(g·kg ⁻¹)	Mg/(g·kg ⁻¹)	Na/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)
毛竹林 <i>P. edulis</i> forest	4.75±0.09	1.07±0.08	3.54±0.01	2.40±0.04	7.55±0.36	57.37±5.61
杉木林 <i>C. lanceolata</i> forest	4.20±0.19	0.80±0.39	2.99±0.34	2.87±0.30	7.23±0.34	60.33±31.64
青冈阔叶林 <i>C. glauca</i> broadleaf forest	4.11±0.14	0.64±0.05	3.47±0.09	3.11±0.08	8.75±0.27	75.50±5.30

穿透雨：在3种森林群落样地区域内随机分散布置3个面积为 $0.5\text{ m}\times 0.4\text{ m}$ 的集水槽，距地面40 cm，与水平面保持约 $5\sim 10^\circ$ 的倾角，集水槽较低的一端底面角落打孔引流，用PVC塑料管连接至25 L塑料桶中，用于收集林内穿透雨。同时，在集水槽附近布置1台自记式雨量计用于记录穿透雨发生过程。

树干茎流：在3种森林群落样地内，通过每木检尺，选择3株标准木，将直径约2.0 cm的聚乙烯塑料软管沿中缝剖开，从树干1.5 m高处自上向下蛇形缠绕一周半后引流至50 L塑料桶中，用于测定树干茎流。单株和林分的树干茎流量依据林冠投影面积进行换算。

枯透水：在3种森林群落样地内随机选择3个样点，将 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 的地表枯落物按原状整体移放在纱布滤网上，放置在直径24.0 cm的聚乙烯桶上，每次降水后记录聚乙烯桶内的水量并取样。

地表径流：在各径流小区底部建立 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的集水池，用于收集地表径流，地表径流量按照径流小区水平投影面积换算。

研究期为2018年7月至2019年6月，每月采集降水量大于30 mm（10月除外）的一次连续降水：大气降水样品混匀后收集3份，对各样地的穿透雨、树干茎流、枯透水和地表径流分别采样，每个收集器内采集300 mL样品，记录体积后立即带回实验室进行水质分析。研究期内共测定12次降水事件，其中，生长季（3—10月）共8次降水，非生长季（11月至次年2月）共4次降水，获得432份样品。

2.2 水样分析

采集的水样用中速定性滤纸抽滤后，在 4°C 环境下保存，进行水质化学分析。利用FE28型pH计（METTLER TOLEDO, Switzerland）测定水样pH值；利用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-AES, Perkin Elmer Optima 8000, USA）测定样品中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度。

2.3 数据处理

各水文分量中盐基离子的年平均浓度（ C ， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ）是每个月单次降水后测定的相应水文分量降水量（ P_i ，mm）的加权计算值：

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

式中： C_i 为单场降水后测定的各盐基离子（ Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）浓度（ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ）， n 为测

定的降水次数。生长季降水中盐基离子的平均浓度为2018年7月至10月与2019年3月至6月共8次降水样品的水量加权浓度，非生长季降水中盐基离子的平均浓度为2018年11月至2019年2月共4次降水样品的水量加权浓度。

林下降水量=穿透雨量+树干茎流量，林下降水中各盐基离子的浓度平均值是单次测定的穿透雨与树干茎流水量的加权平均值^[18]。由于青冈阔叶林中树干茎流的收集桶（50 L）内水样多次装满/溢出，无法准确计算树干茎流的收集量，因此，假设每株青冈收集到的树干茎流总量最大值为50 L，而3株青冈标准木的平均林冠投影面积为 7.4 m^2 ，则青冈阔叶林树干茎流量统一按照 $P_i=3.7\text{ mm}$ 计算。

随大气降水通过森林群落各层次（林冠层、枯落物层和地表层）的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 总物质通量（ F ， $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）计算公式如下：

$$F = \sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i / 100 \quad (2)$$

大气降水在通过森林不同层次时不仅水量发生变化，也会因吸附、洗脱、交换等作用导致降水中的盐基离子（ Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）浓度发生变化，各层次对营养物质的截留量（ ΔF ）和截留率计算公式如下：

$$\Delta F = F_i - F_j \quad (3)$$

$$\text{截留率} = \frac{\Delta F}{F_i} \quad (4)$$

式中： i 是 j 的上一层次降水， F_i 和 F_j 是对应层次各盐基离子的通量， ΔF （截留量）反映 j 层次对相邻上层输入降水中盐基离子的截留能力，若为负说明 j 层次对该盐基离子呈淋溶作用。

数据分析利用Microsoft Excel 2016完成，并用Origin 9.0制图，运用数据处理系统DPS 7.05进行单因素方差分析（one-way ANOVA）和最小显著差异法（LSD）比较不同水文分量中盐基离子浓度的差异，采用Pearson法对因子间进行相关分析，显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 各层次降水中盐基离子浓度的时间变化特征

观测期内，大气降水总量达到2146 mm，降水量呈现“双峰型”分布趋势，2018年7—9月、2018年11月至2019年3、5、6月降水量较大，

2018 年 10 月和 2019 年 4 月降水量较小。每月采样的降水历时最少 1 d (8 月), 最长 11 d (12 月), 平均 4.7 d, 每月采样的降水量情况 (图 1) 与降水量全年的变化趋势规律一致。大气降水 pH 值整体呈现出“U 型”变化, 生长季内降水偏中性, 均值为 6.46; 非生长季降水酸性较强, pH 均值为 4.93 (图 1)。大气降水中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的年均浓度分别为 0.27、0.36、0.89 和 0.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 3), 且 K^+ 和 Ca^{2+} 在生长季的平均浓度

均大于非生长季 (图 2), 通过相关分析发现, 大气降水中 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 的浓度与降水量无显著相关性, 而降水中 Ca^{2+} 浓度与降水量显著负相关 ($r = -0.69$)。

大气降水经 3 种森林群落的冠层后, 穿透雨中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度均有提高, 增幅分别为 15%~37%、275%~553%、118%~139% 和 129%~229%, 且穿透雨的 pH 均有提高 (表 3)。此外, 穿透雨中 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度在降水呈酸性的非生长季均高于偏中性的生长季 (图 3), 且研究表明, 穿透雨中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 3 种离子的浓度与大气降水中对应离子的浓度显著正相关 (毛竹林: $r = 0.76$, $r = 0.80$, $r = 0.78$; 杉木林: $r = 0.72$, $r = 0.76$, $r = 0.79$; 青冈阔叶林: $r = 0.69$, $r = 0.77$, $r = 0.77$), 而 K^+ 浓度则无显著相关性。与大气降水相比, 3 种森林群落树干茎流中盐基离子的浓度均有提高, 在生长季和非生长季的离子浓度变化规律与穿透雨基本相同 (图 3), 树干茎流中 4 种盐基离子的浓度也与穿透雨中的离子浓度显著正相关 ($0.84 < r < 0.99$)。另外, 毛竹林和杉木林内穿透雨和树干茎流中盐基离子的浓度在季节间的波动幅度较大, 远大于青冈阔叶林内降水浓度的季节差异。

林下降水通过枯落物层后, 枯透水中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度分别是穿透雨中 3 种离子浓度的

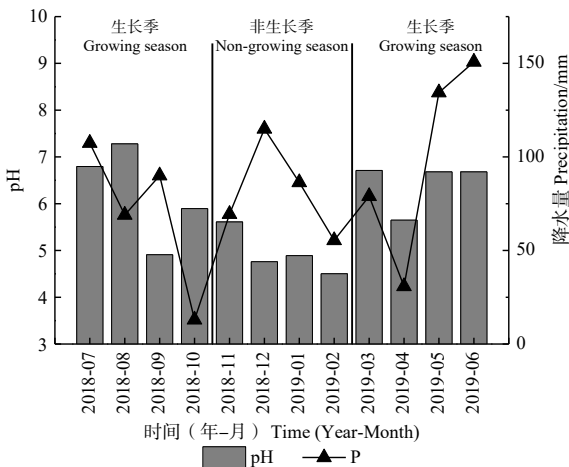


图 1 庙山坞林区 2018 年 7 月至 2019 年 6 月大气降水 pH 值与降水量动态

Fig. 1 Dynamics of pH and precipitation of Miaoshanwu from July 2018 to June 2019

表 3 3 种森林群落不同层次降水特征的平均值

Table 3 Average indicators of rainwater per rainfall at different levels of three forest communities

森林类型 Forest Type	水文分量 Water components	平均降水量 Average precipitation/mm	pH	不同水文分量中盐基阳离子的浓度 The concentrations of base cations of different hydrological components/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			
				Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
	大气降水 Precipitation	83.4	6.04	0.27	0.36	0.89	0.17
毛竹林 <i>P. edulis</i> forest	穿透雨 Throughfall	52.7	6.54	0.37	1.39	1.94	0.56
	树干茎流 Stemflow	1.5	5.15	0.28	1.35	1.83	0.40
	枯透水 Litterfall	54.7	6.44	0.31	2.21	2.59	0.81
	地表径流 Surface runoff	0.4	8.24	6.88	15.26	17.53	0.74
杉木林 <i>C. lanceolata</i> forest	穿透雨 Throughfall	60.7	6.59	0.31	1.35	2.11	0.39
	树干茎流 Stemflow	3.1	3.70	0.71	1.53	3.34	1.05
	枯透水 Litterfall	64.2	6.36	0.42	2.94	4.54	0.96
	地表径流 Surface runoff	0.4	8.37	8.18	24.58	12.48	0.72
青冈阔叶林 <i>C. glauca</i> broadleaf forest	穿透雨 Throughfall	51.7	6.73	0.33	2.35	2.13	0.48
	树干茎流 Stemflow	3.7	5.84	0.33	4.29	2.22	0.36
	枯透水 Litterfall	54.7	6.08	0.30	2.65	3.77	0.80
	地表径流 Surface runoff	0.1	8.15	3.82	12.75	25.54	0.86

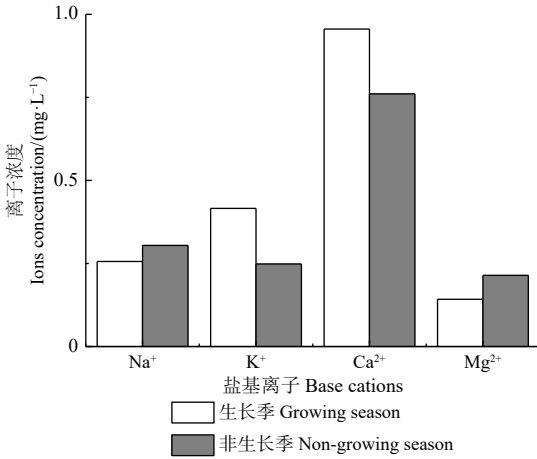


图2 生长季和非生长季大气降水4种盐基离子的浓度动态

Fig. 2 Concentration dynamics of four kind of base cations in atmospheric precipitation during growing season and non-growing season

1.13 ~ 2.18 倍、1.34 ~ 2.15 倍和 1.45 ~ 2.46 倍，而 Na⁺ 浓度略有减少。枯透水中 Na⁺ 和 Mg²⁺ 离子浓度的季节变化规律与穿透雨中相同 (图 3、4)，且枯透水中 4 种盐基离子浓度与穿透雨中的离子浓度均显著正相关 (0.81 < r < 1.00)。

森林群落的地表径流中 4 种盐基离子的浓度显著提高，远高于大气降水、林下降水和枯透水中离

子浓度。3 种森林群落地表径流中 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的浓度分别是大气降水中离子浓度的 14.15 ~ 30.30 倍、35.42 ~ 68.28 倍、14.02 ~ 28.70 倍和 4.24 ~ 5.06 倍。在降水呈酸性的非生长季，地表径流中 4 种盐基离子 (Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺) 的浓度分别比生长季高出 34.97% ~ 87.19%、1.45% ~ 29.81%、13.12% ~ 35.97% 和 188.46% ~ 577.03% (图 4)。经分析可知，林地地表径流中 Na⁺、K⁺ 的浓度与大气降水量显著负相关 (毛竹林: r = -0.62, r = -0.59; 杉木林: r = -0.64, r = -0.64; 青冈阔叶林: r = -0.64, r = -0.62)，而 Ca²⁺、Mg²⁺ 的浓度与大气降水量无显著相关性。

3.2 3 种森林群落对 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的截留特征

研究期内大气降水中 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的通量分别为 2.72、3.61、8.93、1.66 kg·hm⁻² (表 4)，且降水中 K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的输入量与大气降水量显著相关 (r = 0.61, r = 0.66, r = 0.88)。经分析可知，在整个观测期内，3 种森林群落的冠层对 Na⁺ 表现出截留作用，对 K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 均表现出强烈的淋溶作用，淋失的盐基离子中和酸性降水，提高穿透雨的 pH 值 (表 3)。同时，不同森林群落对各盐基离子的截留作用呈现明显的季节差异，

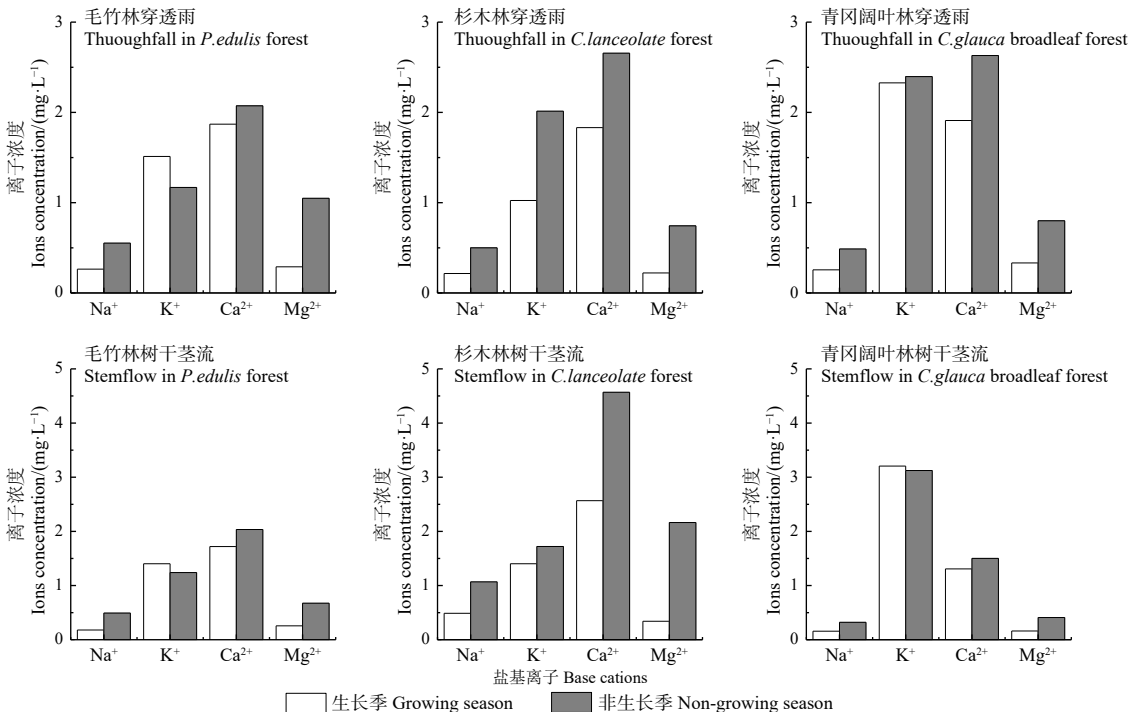


图3 毛竹林、杉木林和青冈阔叶林生长季与非生长季穿透雨和树干茎流中 4 种盐基离子的浓度动态

Fig. 3 Concentration dynamics of four kind of base cations in the throughfall and stemflow of *P. edulis* forest, *C. lanceolata* forest and *C. glauca* broadleaf forest during growing season and non-growing season

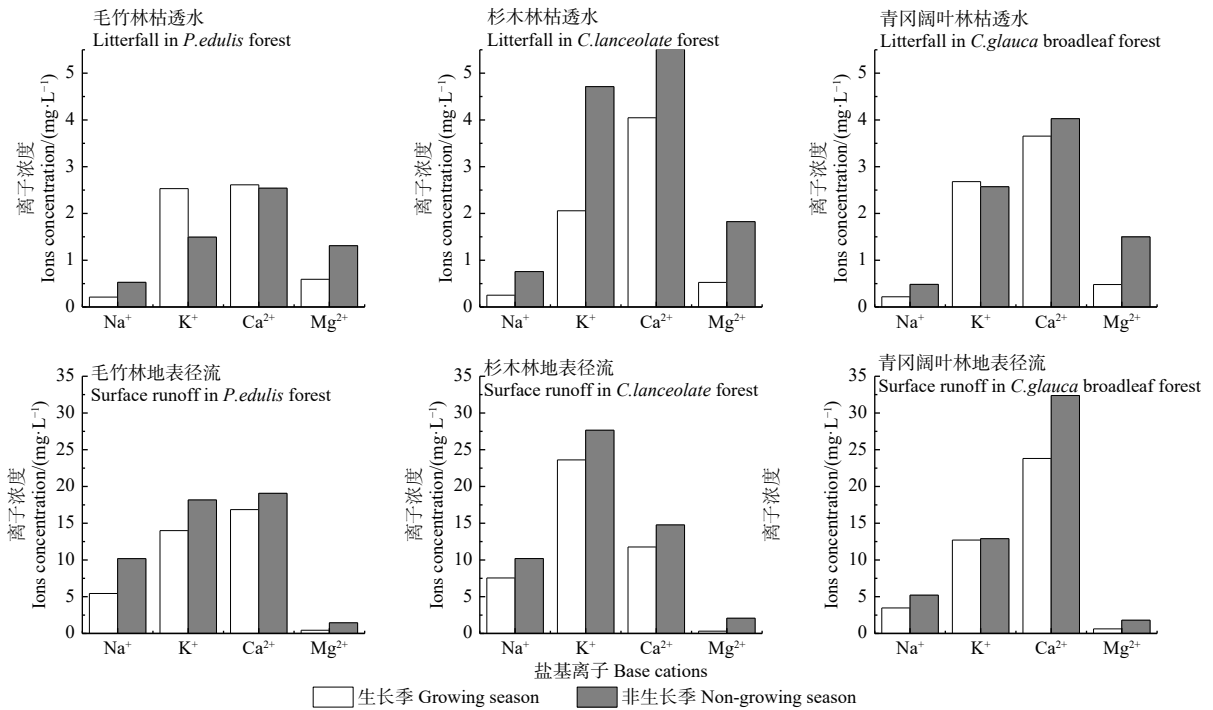


图4 毛竹林、杉木林和青冈阔叶林生长季和非生长季枯透水和地表径流中4种盐基离子的浓度动态

Fig. 4 Concentration dynamics of four kind of base cations in the litterfall and surface runoff of *P. edulis* forest, *C. lanceolata* forest and *C. glauca* broadleaf forest during growing season and non-growing season

如在非生长季, 林冠层对 Na^+ 表现出淋溶作用, 对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的淋溶强于生长季, 3 种森林群落的冠层对 Na^+ 的年总截留率分别为 12.86%、7.26% 和 19.90%; 而在生长季, 毛竹林和青冈阔叶林的冠层对 K^+ 的淋溶作用最强, 淋溶率分别为 125.28% 和 288.49%。冠层是林内养分 K^+ 循环的重要来源, 毛竹林、杉木林和青冈阔叶林冠层对 K^+ 的淋溶量与大气降水量显著正相关 ($r = 0.64$, $r = 0.81$, $r = 0.79$), 雨量越大, 林冠层淋溶的 K^+ 就越多。

林内降水与枯透水的通量差可以指示枯落物层对于输入林地内的营养元素的吸收和淋溶能力。毛竹林和青冈阔叶林枯落物层对 Na^+ 表现出截留的状态, 3 种森林群落林内降水与枯透水中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的通量差均为负值, 说明 3 种森林群落的枯落物层均对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 有淋溶或释放的作用, 且生长季枯落物层的 Ca^{2+} 淋溶率远超过非生长季 (表 4)。在 3 种森林群落中, 杉木林枯透水中 4 种盐基离子浓度最高, 其枯落物层对盐基离子的淋溶率最大, Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的淋溶率分别为 28.32%、117.09%、111.17% 和 125.82%。

地表径流中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 离子浓度均有显著提高, 但由于地表径流量仅占大气降水量的 0.12%~0.48%, 且非生长季地表径流量低于生长季, 因此

尽管非生长季地表径流中 4 种盐基离子浓度更高, 但只有 Mg^{2+} 的地表径流量在非生长季更大。3 种森林群落的地表层对 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 均表现为截留作用, 截留率超过 85%。地表层对 Na^+ 的截留率最低, 在生长季地表层对 Na^+ 的截留能力最弱, 对另外 3 种盐基离子的截留能力在生长季与非生长季间没有显著差异。

大气降水在流经 3 种森林群落后, 4 种盐基离子的浓度大幅增加, 这主要是林冠层、枯落物层对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的较强淋溶作用所致; 而地表层对 4 种盐基离子呈现截留作用, 其中, 森林群落对 Na^+ 和 Mg^{2+} 的截留率最低, 对 Ca^{2+} 和 K^+ 截留率较高, 超过 91.34%。对比 3 种森林群落的截留能力发现, 青冈阔叶林对盐基离子的截留能力最强, 截留率超过 94.70%。

4 讨论

大气降水是森林生态系统养分输入的主要形式之一^[5], 杭州富阳庙山坞林区大气降水中 K^+ 和 Ca^{2+} 的浓度在生长季高于非生长季, 这与刘一霖等^[19] 在四川华西雨屏区的研究规律类似。已有的研究表明, 大气沉降的盐基离子能够中和降水中 76% 的酸负荷^[11], Ca^{2+} 是主要的酸中和剂^[20], 在抵御森林

表4 3种森林群落各层次生长季和非生长季对4种盐基离子的截留

Table 4 Interception and interception rates of four kinds of base cations at different levels of three forest communities

森林降水层次 Levels of forest precipitation		毛竹林 <i>P. edulis</i> forest				杉木林 <i>C. lanceolata</i> forest				青冈阔叶林 <i>C. glauca</i> broadleaf forest			
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
大气降水通量 Bulk precipitation flux	生长季 Growing season/(kg·hm ⁻²)	1.73	2.80	6.45	0.96	1.73	2.80	6.45	0.96	1.73	2.80	6.45	0.96
	非生长季 Non-growing season/(kg·hm ⁻²)	0.99	0.81	2.48	0.70	0.99	0.81	2.48	0.70	0.99	0.81	2.48	0.70
林冠层 Canopy	生长季截留量 Interception in growing season/(kg·hm ⁻²)	0.63	-3.51	-1.36	-0.25	0.57	-2.50	-3.05	-0.20	0.59	-8.09	-2.11	-0.51
	生长季截留率 Interception rate in growing season/%	36.59	-125.28	-21.13	-26.07	32.85	-89.14	-47.36	-20.51	33.98	-288.49	-32.67	-53.06
	非生长季截留量 Interception in non-growing season/(kg·hm ⁻²)	-0.28	-1.90	-2.32	-1.71	-0.37	-4.31	-4.60	-1.41	0.01	-4.27	-2.81	-0.90
	非生长季截留率 Interception rate in non-growing season/%	-28.40	-234.68	-93.53	-244.44	-37.23	-531.77	-185.49	-201.59	0.69	-526.82	-113.26	-129.05
	总截留率 Total interception rate/%	12.86	-149.80	-41.25	-118.11	7.26	-188.37	-85.75	-96.83	19.90	-355.56	-59.28	-88.09
	生长季截留率 Interception rate in growing season/%	0.14	-5.18	-4.06	-1.48	-0.14	-5.30	-11.35	-1.56	0.16	-1.14	-7.85	-0.69
枯落物层 Litter	生长季截留率 Interception rate in growing season/%	12.35	-82.04	-52.03	-122.65	-12.39	-99.93	-119.50	-134.64	13.81	-10.45	-91.82	-45.71
	非生长季截留量 Interception in non-growing season/(kg·hm ⁻²)	0.21	-0.30	-0.32	-0.24	-0.57	-6.90	-7.08	-2.55	-0.02	-0.27	-3.08	-1.52
	非生长季截留率 Interception rate in non-growing season/%	16.6	-11.21	-6.74	-9.84	-41.87	-134.86	-100.01	-120.98	-1.80	-5.25	-58.19	-94.64
	总截留率 Total interception rate/%	14.63	-60.76	-34.79	-47.56	-28.32	-117.09	-111.17	-125.82	8.82	-5.54	-74.23	-68.97
	生长季截留量 Interception in growing season/(kg·hm ⁻²)	0.79	11.07	11.35	2.68	1.05	9.81	20.45	2.70	0.94	11.88	16.12	2.15
	生长季截留率 Interception rate in growing season/%	82.57	96.26	95.63	99.50	80.40	92.47	98.09	99.62	95.76	98.73	98.26	99.65
地表层 Surface layer	非生长季截留量 Interception in non-growing season/(kg·hm ⁻²)	0.93	2.77	4.87	2.62	1.83	11.73	14.01	4.64	0.99	5.31	8.27	3.11
	非生长季截留率 Interception rate in non-growing season/%	87.19	91.94	95.02	99.26	94.45	97.58	98.90	99.53	98.43	99.27	98.83	99.83
	总截留率 Total interception rate/%	85.00	95.36	95.45	99.39	88.79	95.18	98.42	99.56	97.11	98.90	98.45	99.75
	森林群落内总截留率 Total interception rate in forest communities/%	88.84	98.02	91.34	81.37	86.66	98.06	93.80	69.85	97.89	99.22	95.70	94.70

生态系统土壤酸化和阳离子流失方面起着重要作用，且降水中 Ca²⁺浓度与降水量显著负相关，K⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺的输入量与大气降水量显著正相关，降水量会影响降水中盐基离子的输入量^[19]，而降水中盐基离子的含量也与降水强度、降水间隔期、降水历时等降水特征密切相关^[8]。

大气降水经森林冠层后形成林内穿透雨和树干茎流，其盐基离子的浓度均有提高，冠层对 K⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺的淋溶率分别超过 149.80%、41.25%和 88.09%（表4），这与卢晓强等^[21]、安思危等^[6]对冠层截留盐基离子的研究规律相似，说明降水淋洗林冠层表面的尘埃、盐分等沉积物^[22]，成为林内

盐基离子的重要来源^[23]。Na⁺、K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺参与植物新陈代谢,在叶面或叶表面细胞内相对活跃,易被降水淋溶。研究表明,Mg元素溶解度较低^[6],林内雨淋溶出的Mg²⁺含量相对较少,林内各水文分量中Mg²⁺的浓度增幅较小;K⁺是易于转移的大量元素,植物表面的K⁺在雨水作用下易被淋溶^[24],因此,林内降水中K⁺质量浓度增长幅度最大,且淋溶量随降水量的增大而增大;Na对促进植物生长起着重要的作用,但从植物组织中浸出的效果不明显^[25],森林群落各层次对来自上一层次的Na⁺均起截留的作用,这与安思危等^[6]在四面山的研究情况一致。同时,林冠特征^[7]还会影响穿透雨中离子特征,通常郁闭程度和叶面积指数(LAI)越高,降水在冠层可以淋洗的物质越多,穿透雨中相应离子的浓度也越高。本研究中,毛竹林和青冈阔叶林的郁闭度和LAI远高于杉木林,其森林群落内穿透雨中盐基离子的浓度也高于杉木林;另一方面降水与冠层会发生养分交换和林冠吸收的作用^[25],3种森林群落穿透雨中Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺的浓度在植物生长活跃的生长季偏低,这与刘一霖等^[19]研究的结果相同,说明在生长季有更多的养分被林冠层吸收。

枯落物层在涵养水源、保持水土等森林水文过程中具有极为重要的作用^[26]。枯枝落叶的降解是导致各离子质量浓度在枯透水中增加的重要原因^[27],而林内降水输入、枯枝落叶的分解及矿化是森林养分从地上部转移到地被物及土壤层的重要内循环途径^[28],共同推动森林养分循环。枯枝落叶经过微生物分解,释放植物自身的K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺,使其随林内降水淋溶出来,导致枯透水中K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺含量有所增加。此外,相对于非生长季,生长季内的温度、湿度更适于微生物活动,枯落物层的分解也更为彻底^[29],其盐基离子淋溶率更高,更多的盐基离子返还到土壤当中,推动森林养分/物质循环。

Na⁺、K⁺是移动性很强的离子^[24],经常会以溶液的形式淋溶流失。研究表明,林内降水在流经土壤表层后Na⁺、K⁺和Ca²⁺离子浓度明显增加,超过穿透雨中相应离子浓度的5倍多,这与葛晓敏等^[22]的报道一致。此外,各盐基离子也呈现出明显的季节变化:非生长季的浓度远高于生长季,一方面试验研究区域非生长季地表径流量远小于生长季,随

地表径流溶出的离子浓度相对较大;另一方面,非生长季穿透雨和枯透水中Na⁺和Mg²⁺盐基离子的浓度均高于生长季,而地表径流中离子浓度与枯透水显著相关,非生长季枯透水离子浓度增加,地表径流中各离子浓度也相应提高。但整体而言,3种森林群落的地表层对Na⁺、K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺均表现为截留作用,其中,对Ca²⁺和Mg²⁺的截留率超过95.45%和99.39%,对Na⁺的截留率相对较低,最低仅为85.00%。

5 结论

通过对3种北亚热带地区典型森林群落毛竹人工林、杉木人工林和青冈阔叶林内不同层次各水文分量进行为期1a的定位观测,研究生长季与非生长季森林降水的浓度与通量变化规律发现:

(1)森林群落在改善水质、调节养分循环等方面具有重要作用,森林群落的不同层次对盐基离子的影响各异,其中,林冠层和枯落物层对K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺有强烈的淋溶作用,淋溶率为5.54%~355.56%,是林内盐基离子的重要释放源,杉木林枯落物层的离子淋溶作用最强;地表层对各盐基离子均表现为截留作用,截留率超过85%。

(2)经输入(降水)与输出(地表径流)的对比可知,各森林群落对Na⁺和Mg²⁺的截留率较低,对Ca²⁺和K⁺截留率较高,超过91.34%,其中,青冈阔叶林的截留能力最强,截留率超过94.7%,毛竹林和杉木林次之,截留率分别超过81.37%和69.85%。

(3)降水内各盐基离子浓度呈现明显的季节动态,主要表现为其在非生长季的浓度高于生长季,但地表层对离子的截留能力在不同生长季节差异不明显,即3种森林群落对不同季节降水中盐基离子的截留能力相近。总体而言,季节差异并未影响研究区3种森林群落对盐基离子的调控能力,各森林群落能够维持正常的养分循环,保证森林出水水质的稳定与安全。

参考文献:

- [1] Parker G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle[J]. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13(4): 57-133.
- [2] Rodrigo A, Àvila A, Rodà F. The chemistry of precipitation, throughfall and stemflow in two holm oak (*Quercus ilex* L.) forests under a

- contrasted pollution environment in NE Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 305(1-3): 195-205.
- [3] Scheer M B. Mineral nutrient fluxes in rainfall and throughfall in a lowland Atlantic rainforest in southern Brazil[J]. *Journal of Forest Research*, 2011, 16(1): 76-81.
- [4] 蒋益民, 曾光明, 张 龚, 等. 酸雨作用下的森林冠层盐基离子(Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)淋洗[J]. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(5): 425-430.
- [5] 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.
- [6] 安思危, 孙 涛, 马 明, 等. 中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征[J]. *环境科学*, 2015, 36(12): 4414-4419.
- [7] 郝 卓, 高 扬, 张进忠, 等. 红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制[J]. *环境科学*, 2015, 36(12): 4403-4413.
- [8] 胡 悦, 满秀玲, 魏 红. 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[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 307-314.
- [9] 周光益, 徐义刚, 吴仲民, 等. 广州市酸雨对不同森林冠层淋溶规律的研究[J]. *林业科学研究*, 2000, 13(6): 598-607.
- [10] 刘 莉, 李晓红, 周志明, 等. 模拟酸雨对三峡库区4种典型土壤酸化及盐基离子淋溶释放的影响[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2007, 30(8): 67-69.
- [11] Du E Z, Vries W D, McNulty S, *et al.* Bulk deposition of base cationic nutrients in China's forests: Annual rates and spatial characteristics[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 184: 121-128.
- [12] 张 龚. 中亚热带韶山森林水文特征与主要营养物的生物地球化学过程研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006: 117-124.
- [13] 王小明, 钟绍柱, 王 刚, 等. 中亚热带钱江流域天然次生林集水区溪流与降水水质比较[J]. *林业科学研究*, 2011, 24(2): 184-188.
- [14] 王小明, 王 刚, 周本智, 等. 中亚热带天然次生常绿阔叶林水文生态效应研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 10-14.
- [15] 孔维健. 庙山坞自然保护区典型森林类型水文生态效应研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010: 41-48.
- [16] 李 谦, 王小明, 周本智. 浙北低山丘陵区天然次生林和人工毛竹林降雨化学特征比较[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(3): 324-330.
- [17] 陈效速, 亓孝然, 阿 杉, 等. 我国东部北亚热带植物群落季相的时空变化[J]. *生态学报*, 2011, 31(13): 3559-3568.
- [18] 杨丽丽, 邢元军, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山4种典型森林伴随降水的无机氮通量变化特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2851-2861.
- [19] 刘一霖, 吴福忠, 蒋 龙, 等. 华西南屏区麻栎-喜树人工混交林林冠对降雨中钾和钠离子再分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 4-13.
- [20] Shen W J, Ren H L, Jenerette G D, *et al.* Atmospheric deposition and canopy exchange of anions and cations in two plantation forests under acid rain influence[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 64: 242-250.
- [21] 卢晓强, 杨万霞, 丁访军, 等. 茂兰喀斯特地区森林降水分配的水化学特征[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2115-2122.
- [22] 葛晓敏, 唐罗忠, 王瑞华, 等. 杨树人工林生态系统降水再分配及主要离子特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5120-5130.
- [23] 马 明, 孙 涛, 李定凯, 等. 缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5056-5062.
- [24] 张赞齐, 曾玲梅, 王陆军, 等. 安徽老山亚热带常绿阔叶林降雨中的养分动态[J]. *林业科学*, 2011, 47(12): 143-148.
- [25] González-Arias A, Amezaga I, Echeandía A, *et al.* Buffering capacity through cation leaching of *Pinus radiata* D. Don canopy[J]. *Plant Ecology*, 2000, 149(1): 23-42.
- [26] 李红云, 杨吉华, 鲍玉海, 等. 山东省石灰岩山区灌木林枯落物持水性能的研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 44-48.
- [27] 孙 涛, 马 明, 王定勇, 等. 中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化[J]. *环境科学*, 2014, 35(12): 4475-4481.
- [28] Whitmore T C. *An Introduction to tropical rain forests*[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1998.
- [29] 杨曾奖, 曾 杰, 徐大平, 等. 森林枯枝落叶分解及其影响因素[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 649-654.

Annual Dynamic Characteristics of Base Cations During Hydrological Processes of Three Forest Communities in Northern Subtropical Region of China

KANG Xi-rui^{1,2}, ZHANG Han-dan¹, WANG Xiao-ming¹, CHEN Guang-cai¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;

2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To monitor and analyze the precipitation of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} at various vertical levels of forest during the growing season and non-growing season so as to compare the retention ability of nutrients and evaluate the water purification capacity of the three typical forest communities in northern subtropics. [Method] Three typical forest communities, i.e., *Phyllostachys pubescens* plantation, *Cunninghamia lanceolata* plantation and broadleaved forest dominated by *Cyclobalanopsis glauca* were selected and the hydrological processes samples were sampled during July 2018 to June 2019. The concentrations and fluxes of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} in various hydrological components (i.e. precipitation, throughfall, stemflow, litterfall, and runoff) from July 2018 to June 2019 were determined and calculated. [Result] The annual average concentrations of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} in rainfall were 0.27, 0.36, 0.89 and 0.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and the cation concentrations of K^+ and Ca^{2+} were higher in the growing season than in non-growing season. The canopy and litter layers of the three forest communities leached K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} strongly and elevated the pH value of the rain. However, the leaching rate of the three kinds of cation by canopy layer was lower in the growing season, and the interception rate of the surface layer was insignificantly different between the growing season and the non-growing season. Comparing surface runoff (output) and atmospheric precipitation (input) fluxes, all the three forest communities showed a trapping effect on base cations, and the broadleaved forest dominated by *Cyclobalanopsis glauca* showed the strongest trapping capacity, with a trapping rate exceeding 94.70%. [Conclusion] The canopy and litter layers of the three forest communities are important sources of base cations which can buffer the acidic precipitation in non-growing season, while the surface layer effectively prevents the loss of base cations in both growing and non-growing seasons, maintains the nutrient cycling in the community and protects the safety of water quality in forest stream.

Keywords: *Phyllostachys pubescens*; *Cunninghamia lanceolata*; *Cyclobalanopsis glauca*; broadleaved forest; growing season; non-growing season; base cations

(责任编辑: 金立新)