

DOI: 10.5846/stxb201910302279

康希睿, 张涵丹, 王小明, 陈光才. 北亚热带 3 种典型森林群落对降水中氮、磷、硫的截留及分配特征. 生态学报, 2020, 40(19): 6958-6968.

Kang X R, Zhang H D, Wang X M, Chen G C. Interception characteristics of nitrogen, phosphorus and sulfur in precipitation by three forest communities in northern subtropical region of China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6958-6968.

# 北亚热带 3 种典型森林群落对降水中氮、磷、硫的截留及分配特征

康希睿, 张涵丹, 王小明, 陈光才\*

中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400

**摘要:** 森林群落在净化空气、截留沉降污染物、改善地表水质等方面具有重要作用。本研究以北亚热带地区 3 种典型森林群落(毛竹林、杉木林、青冈阔叶林)为研究对象, 通过分析沉降污染物( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$ ) 在大气降水、林内穿透雨、树干茎流、枯透水和地表径流中的浓度和通量变化特征, 探讨不同森林群落对氮、磷、硫的截留净化作用和分配特征。结果表明, 该区域大气降水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$  年均浓度分别为 1.06、0.61、0.04、0.07、1.84 mg/L, 其年均 pH 为 5.88; 各森林群落林冠层能够调升降雨的 pH 且全年稳定, 对 TP 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  均有吸附作用, 截留率分别为 79.09%—84.68% 和 30.88%—69.36%; 而枯落物层则是林下氮、磷、硫的主要释放源, 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$  均具有淋溶作用; 此外, 由地表径流(输出)与大气降水(输入)的对比分析可知, 各林地对沉降污染物中氮、磷、硫的截留率均超过 98%; 3 种森林群落对沉降污染物中氮、磷、硫的截留能力依次为: 青冈阔叶林>毛竹林>杉木林, 阔叶林对沉降污染物的净化能力要高于毛竹林及针叶的杉木林。

**关键词:** 毛竹林; 杉木林; 青冈阔叶林; 沉降; 截留

## Interception characteristics of nitrogen, phosphorus and sulfur in precipitation by three forest communities in northern subtropical region of China

KANG Xirui, ZHANG Handan, WANG Xiaoming, CHEN Guangcai\*

Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China

**Abstract:** In the present study, *Phyllostachys pubescens* plantation, *Cunninghamia lanceolata* plantation, and *Cyclobalanopsis glauca* broadleaf forest, three typical forest types in northern subtropical China, were selected to investigate the fate and transport processes of inorganic nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ), TP, and  $\text{SO}_4^{2-}$  in various hydrological components (i.e. precipitation, throughfall, stemflow, litterfall, and surface runoff). Results showed that the average concentrations of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ , TP, and  $\text{SO}_4^{2-}$  in rainfall were 1.06, 0.61, 0.04, 0.07 and 1.84 mg/L, respectively, with an average pH of 5.88. The canopies of the three forest communities increased the pH of precipitation and kept stable throughout the year. The canopies absorbed TP and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  accounting for 79.09%—84.68% and 30.88%—69.36%, respectively in *P. pubescens*, *C. lanceolata* and *C. glauca* forests. The litter layer was the major releasing sources of nitrogen, phosphorus, and sulfur under the forests. Compared with atmospheric precipitation, the mass flux of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ , TP, and  $\text{SO}_4^{2-}$  in surface runoff decreased significantly, with a minimum of 98% being trapped. According to the total interception rates of three forest communities, the *C. glauca* broadleaf forest most effectively trapped nitrogen,

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC050550403); 中央级公益性科研院所基金重点项目(CAFYBB2017ZA002-2); 国家自然科学基金项目(41807151)

收稿日期: 2019-10-30; 网络出版日期: 2020-07-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guangcaichen@sohu.com

phosphorus, and sulfur in atmospheric precipitation, followed by *P. pubescens* plantation and *C. lanceolata* plantation.

**Key Words:** *Phyllostachys pubescens*; *Cunninghamia lanceolata*; *Cyclobalanopsis glauca* broadleaf forest; deposition; interception

工业化及交通运输快速发展导致大量有害物质随烟气排放进入到大气中,大部分污染物质通过大气运动,以干沉降或湿沉降的方式返回到陆地。大气降水携带的氮、磷、硫等营养物质,是陆地生态系统尤其是森林生态系统的主要养分来源之一<sup>[1]</sup>。这些营养物质可以直接被植物吸收利用<sup>[2-4]</sup>,促进植物生长和养分循环,为森林生态服务功能的发挥提供营养补充<sup>[5-6]</sup>。另一方面,大气中过量的游离态物质、气溶胶、粉尘等污染物进入地表,成为河流<sup>[7]</sup>、湖泊<sup>[8]</sup>、农田<sup>[9]</sup>污染的重要来源,导致水体富营养化、土壤酸化和生物多样性降低等一系列生态环境问题<sup>[8,10-11]</sup>。

森林生态系统具有调节、稳定、净化水质的作用<sup>[5]</sup>。研究表明,在森林生态系统中,林冠层截留的氮含量可高达大气中氮总沉降量的 70%<sup>[12]</sup>、截留的硫和磷含量可达湿沉降总量的 28% 和 38%<sup>[13-14]</sup>,部分被植物叶片吸收利用,可显著减少进入地表径流的沉降污染物数量,降低对地表水的有害影响。另一些未被吸收利用的污染物质和叶片分泌物等则在降雨的淋洗作用下进入地表。林冠层是拦截沉降污染物进入地表的第一重防护,林下枯枝落叶层则是改善地表环境的第二重防护,也是极其重要的一层屏障。研究表明,在林地表枯枝落叶层的吸滞作用下,径流泥沙的滞留量可达 45%,当林地面积占到一定比例,可以完全净化地表径流中的磷<sup>[15]</sup>。张捷<sup>[13]</sup>、马明<sup>[14]</sup>、杨丽丽<sup>[16]</sup>等研究指出,森林类型、林龄、区域气候特点、大气污染状况等都会影响森林对于降水的截留能力及其对不同沉降污染物的截留净化作用。如宁夏六盘山的华北落叶松林和华山松林冠层对无机氮的截留率超过 37.76%,但这两种森林群落对无机氮的总淋出率却超过 123.53%<sup>[16]</sup>,而重庆缙云山常绿阔叶林对无机氮的总截留率超过 87%,对磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ )和硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )的总截留率达到了 78.78% 和 84.92%<sup>[14]</sup>。

华东地区是我国氮、磷、硫沉降的热点地区<sup>[17-18]</sup>,大气沉降携带的污染物对区域生态系统的威胁不容忽视。目前对于森林水文生态的研究较为透彻<sup>[19-20]</sup>,但对森林群落的大气降水污染物截留能力及分配特征认识不足。本研究在浙江省杭州市富阳区庙山坞试验林场选择 3 种北亚热带地区典型的森林群落(毛竹林、杉木林和青冈阔叶林),通过一年的定位监测,研究随着大气降水输入发生的森林群落不同层次无机氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ )、总磷(TP)和硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )质量浓度和通量的动态变化,对比 3 种森林群落对氮、磷、硫的截留能力,揭示沉降污染物在不同森林群落各层次的分配和迁移规律,为亚热带地区森林生态系统结构改造和生态服务功能提升提供试验依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江省杭州市富阳区庙山坞试验林场(119°56'E—120°02'E、30°03'N—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的一部分。该区属北亚热带季风气候区,四季分明,降水充沛。年平均降水量 1441.9 mm,全年降水日数为 160 d 左右,雨量季节分配不均。年平均气温 16.1℃,极端最高气温 40.2℃,极端最低气温-14.4℃。年平均日照时数 1995 h,年平均日照百分率 44%。地质类型属志留系、泥盆系地质,土壤类型是酸性红壤土<sup>[19]</sup>,土层中石块较多。区内水系直接外流注入富春江,属钱塘江水系富春江段。林区主要的人工林有毛竹林(*Phyllostachys pubescens*)、杉木林(*Cunninghamia lanceolata*)等,天然林有针阔混交林和以青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)(占比 45%左右)、木荷(*Schima superba*)(占比 25%左右)为主的天然常绿、落叶次生林等。

本研究选择毛竹人工林、杉木人工林和青冈栎为主的天然阔叶次生林(青冈阔叶林)等 3 种典型森林群

落作为研究对象,分别建立 2 个水平投影面积 10 m×20 m 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。

表 1 研究样地的基本特征

Table 1 The basic characteristics of sample plots

| 林分类型<br>Forest type  | 海拔<br>Altitude/m | 坡度<br>Slope/(°) | 坡向<br>Aspect/(°) | 林分密度<br>Stand density<br>/(株/hm <sup>2</sup> ) | 树木高度<br>Tree<br>height/m | 胸径<br>Diameter<br>at breast<br>height/cm | 郁闭度<br>Canopy<br>density |
|----------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|--------------------------|
| 毛竹林                  | 158              | 19              | 183              | 5150                                           | 13.4±2.2                 | 10.4±1.5                                 | 0.96                     |
| <i>P. pubescens</i>  |                  | 20              | 187              | 5050                                           | 11.6±2.0                 | 10.1±1.7                                 |                          |
| 杉木林                  | 222              | 27              | 151              | 800                                            | 9.3±2.4                  | 14.8±5.6                                 | 0.70                     |
| <i>C. lanceolata</i> |                  | 30              | 218              | 650                                            | 12.5±3.2                 | 22.4±12.3                                |                          |
| 青冈阔叶林                | 130              | 28              | 182              | 950                                            | 7.8±4.0                  | 13.7±6.1                                 | 0.88                     |
| <i>C. glauca</i>     |                  | 27              | 182              | 1250                                           | 8.3±3.6                  | 14.7±9.1                                 |                          |

表 2 研究样地表层土壤的理化性质

Table 2 The physicochemical properties of the surface soil of the sample plots

| 林分类型<br>Forest type      | 土壤容重<br>Bulk density/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 有机碳<br>Organic C/<br>(g/kg) | 全氮<br>Total N /<br>(g/kg) | 水解性氮<br>Hydrolyzable N/<br>(mg/kg) | 全磷<br>Total P /<br>(g/kg) | 有效磷<br>Available P /<br>(mg/kg) |
|--------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 毛竹林 <i>P. pubescens</i>  | 1.09±0.04                                     | 24.40±2.04                  | 2.25±0.14                 | 226.33±9.71                        | 0.32±0.02                 | 3.38±0.24                       |
| 杉木林 <i>C. lanceolata</i> | 1.26±0.15                                     | 31.87±19.06                 | 2.38±1.10                 | 153.73±72.43                       | 0.37±0.07                 | 4.14±2.04                       |
| 青冈阔叶林 <i>C. glauca</i>   | 1.23±0.11                                     | 57.53±5.71                  | 3.75±0.57                 | 197.33±29.14                       | 0.55±0.06                 | 5.18±0.56                       |

1.2 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(中国,上海精密)记录降水过程,并在周边配备 1 台 ISC-10 型降水降尘自动采样器(中国,青岛埃仑)和 3 个 5 L 玻璃烧杯用于收集大气降水。

穿透雨:在 3 种森林群落样地内随机布置 3 个面积为 0.5 m×0.4 m 的集水槽,距地面 40 cm,与地面保持约 5°的倾角,集水槽较低的一端底部开口,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,用于收集树干茎流。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 m×0.2 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,每次降雨后记录聚乙烯桶内的水量并取样。

地表径流:在径流小区下端建立 1 m×1 m×1 m 的集水池,地表径流量按照径流小区投影面积换算。

研究期为 2018 年 6 月—2019 年 5 月,于雨后采集水样:大气降水样品混匀后收集 3 份,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。研究期内每月收集一次典型降水,共测定 12 次降水事件,获得 432 份样品。

1.3 水样分析

采集的水样用中速定性滤纸抽滤后,在 4℃ 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,采用水杨酸分光光度法(HJ 536—2009)测定样品中的氨氮浓度,采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)测定样品中总磷浓度,采用 MIC-5 型离子色谱仪(Metrohm, Herisau, Switzerland)测定样品中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度。

1.4 数据处理

水样中各化学指标的年均浓度(  $C$  ,mg/L)是每月单次降雨后测定的相应水量(  $P_i$  ,mm) 的加权计算值:

$$C = \sum_1^n C_i \times P_i / \sum_1^n P_i$$

式中,  $C_i$  为单场降雨后测定的各物质的浓度(mg/L),  $n$  为测定的降雨次数<sup>[16]</sup>。

林下降水量=穿透雨量+树干茎流量,其各类氮(N)、磷(P)、硫(S)的浓度平均值是单次测定的穿透雨与干流水量的加权平均值<sup>[16]</sup>。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<sup>2</sup>,则青冈阔叶林平均树干茎流量统一按照  $P_i=3.7$  mm 计算。

随着降雨过程通过森林群落各个层次(林冠层、枯落物层和地表层)的 N、S 和 P 的总物质通量(  $F$  ,kg/hm<sup>2</sup>) 计算公式如下:

$$F = \sum_1^n C_i \times P_i / 100$$

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营养盐(N、S、P)浓度发生变化,各层次对营养物质的截留量和截留率计算公式如下:

$$\Delta F = F_i - F_j$$
$$\text{截留率} = \frac{\Delta F}{F_i}$$

式中,  $i$  是  $j$  的上一层次降水,  $\Delta F$  截留量是  $F_j$  层次对相邻上层输入通量的影响。

数据分析用 Microsoft Excel 2016 完成,用 Origin 9 制图,运用数据处理系统 DPS 7.05 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同层次降水 pH 值的变化

从表 3 和图 1 可以得知,研究区全年大气降水 pH 在 4.50 至 7.28 之间变化,年均 pH 是 5.88,其中,秋冬季节(9 月—次年 2 月)大气降水酸性较强,pH 值平均为 4.96,酸性最强的降水出现在 2 月,pH 达到 4.50;春夏季节(6—8 月、3—5 月)降水偏中性,平均 pH 为 6.74,最大值在 8 月,为 7.28。

表 3 3 种森林群落不同层次降水次均结果

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

| 水文分量<br>Water components |      | 次均降水量<br>Average<br>precipitation/mm | pH   | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/<br>(mg/L) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/<br>(mg/L) | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/<br>(mg/L) | TP/<br>(mg/L) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /<br>(mg/L) |
|--------------------------|------|--------------------------------------|------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------|
| 大气降水 Precipitation       |      | 78.6                                 | 6.04 | 1.06                                       | 0.61                                       | 0.04                                       | 0.07          | 1.84                                      |
| 毛竹林                      | 穿透雨  | 49.8                                 | 6.64 | 0.82                                       | 0.80                                       | 0.06                                       | 0.02          | 2.96                                      |
| <i>P. pubescens</i>      | 树干茎流 | 1.6                                  | 5.18 | 1.32                                       | 1.24                                       | 0.03                                       | 0.01          | 2.94                                      |
|                          | 枯透水  | 51.4                                 | 6.52 | 1.23                                       | 0.97                                       | 0.04                                       | 0.02          | 3.22                                      |
|                          | 地表径流 | 0.3                                  | 8.27 | 0.38                                       | 2.06                                       | 0.12                                       | 0.09          | 7.17                                      |
| 杉木林                      | 穿透雨  | 59.9                                 | 6.66 | 0.87                                       | 1.25                                       | 0.06                                       | 0.01          | 2.94                                      |
| <i>C. lanceolata</i>     | 树干茎流 | 2.8                                  | 3.67 | 1.87                                       | 3.78                                       | 0.02                                       | 0.03          | 9.12                                      |
|                          | 枯透水  | 59.1                                 | 6.38 | 1.08                                       | 2.28                                       | 0.05                                       | 0.02          | 3.95                                      |
|                          | 地表径流 | 0.4                                  | 8.63 | 0.34                                       | 1.72                                       | 0.11                                       | 0.13          | 4.15                                      |
| 青冈阔叶林                    | 穿透雨  | 46.3                                 | 6.73 | 0.47                                       | 0.94                                       | 0.09                                       | 0.02          | 2.83                                      |
| <i>C. glauca</i>         | 树干茎流 | 3.7                                  | 5.85 | 0.98                                       | 1.76                                       | 0.08                                       | 0.01          | 3.74                                      |
|                          | 枯透水  | 49.2                                 | 6.17 | 0.94                                       | 1.90                                       | 0.04                                       | 0.04          | 2.85                                      |
|                          | 地表径流 | 0.2                                  | 8.15 | 0.28                                       | 3.28                                       | 0.07                                       | 0.13          | 13.94                                     |



3 种森林群落穿透雨的 pH 值在 6.64—6.73 之间,穿透雨的 pH 值在群落之间无明显差异,并且不随大气降水 pH 的改变而变化,秋冬两季酸性降水经过林冠层后 pH 明显提高,升高幅度达到 1.68—1.97,而春夏两季森林内穿透雨 pH 未有显著变化。降水沿枝叶汇集到树干形成树干茎流,与穿透降雨相比,3 种群落的树干茎流 pH 值均降低,毛竹林、杉木林、青冈阔叶林的树干茎流 pH 值分别减少 1.46、2.99、0.88,其中杉木林中穿透雨和树干茎流的 pH 差异达显著性水平 ( $P < 0.05$ )。与穿透雨相比,林内枯透水的 pH 值小幅降低,毛竹林、杉木林、青冈阔叶林分别减少 0.12、0.28、0.58。

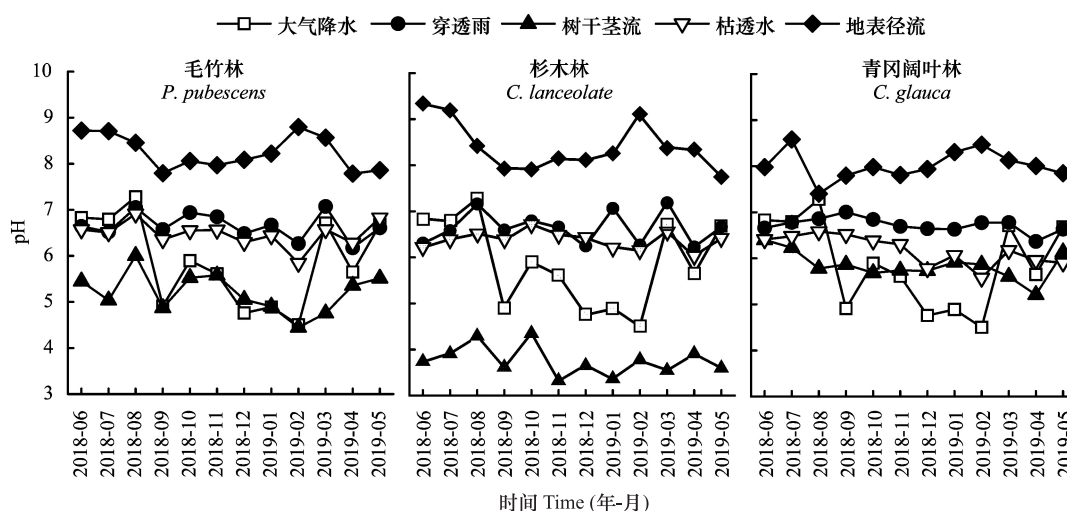


图 1 3 种森林群落不同层次降水 pH 的动态变化

Fig.1 Dynamic changes of the rainwater pH at different levels of three forest communities

## 2.2 不同层次降水无机 N 的浓度变化

大气降水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的年均浓度分别为 1.06、0.61、0.04 mg/L (表 3),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在春季达到最大浓度,平均为 1.82 mg/L,夏季浓度最低,平均为 0.82 mg/L,而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  在春季和秋冬季节浓度较高,平均为 0.79 mg/L 和 0.04 mg/L,夏季浓度最低,平均为 0.36 和 0.03 mg/L (图 2)。降雨穿过 3 种森林群落的冠层后,穿透雨中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度均降低,达到了 0.47—0.87 mg/L,而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度均有提高,说明 3 种森林群落的林冠对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  具有一定的吸附作用。相较于大气降水,毛竹林和杉木林的树干茎流中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度大幅提高,分别达到大气降水中浓度的 1.25、2.03 倍和 1.77、6.17 倍,而青冈阔叶林树干茎流中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度略有降低, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度大幅提高,达到大气降水中浓度的 2.87、2.16 倍。

林内降水通过 3 种森林群落的枯落物层后, $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度仍有升高,达到 0.97—2.28 mg/L,是穿透雨的 1.22—2.03 倍, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度升高至 0.94—1.23 mg/L,是穿透雨的 1.23—1.99 倍, $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度略有降低,变化幅度不大,说明林内降水经枯落物层后,溶解了枯落物分解的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,其中以青冈阔叶林最为明显,其枯透水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的浓度分别是穿透雨的 1.99 倍和 2.03 倍。

与枯透水相比,3 种森林群落的地表径流中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度明显降低,仅为 0.28—0.38 mg/L, $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度大幅提高,达到 0.07—0.12 mg/L,除杉木林外,毛竹林和青冈阔叶林的地表径流中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度均高于枯透水,说明地表层对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  吸附作用明显,同时还溶出  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。

## 2.3 不同层次降水的 TP 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度变化

大气降水中 TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$  的年均浓度分别为 0.07、1.84 mg/L (表 3),TP 浓度在春夏季节较高,平均为 0.12 mg/L,秋冬季节偏低,平均为 0.02 mg/L,而  $\text{SO}_4^{2-}$  也在春季和秋冬季节浓度较高,平均为 2.26 mg/L,夏季浓度最低,平均为 1.32 mg/L (图 3)。大气中的 TP 随降水进入森林群落后被林冠层吸收,3 种森林群落的穿透雨

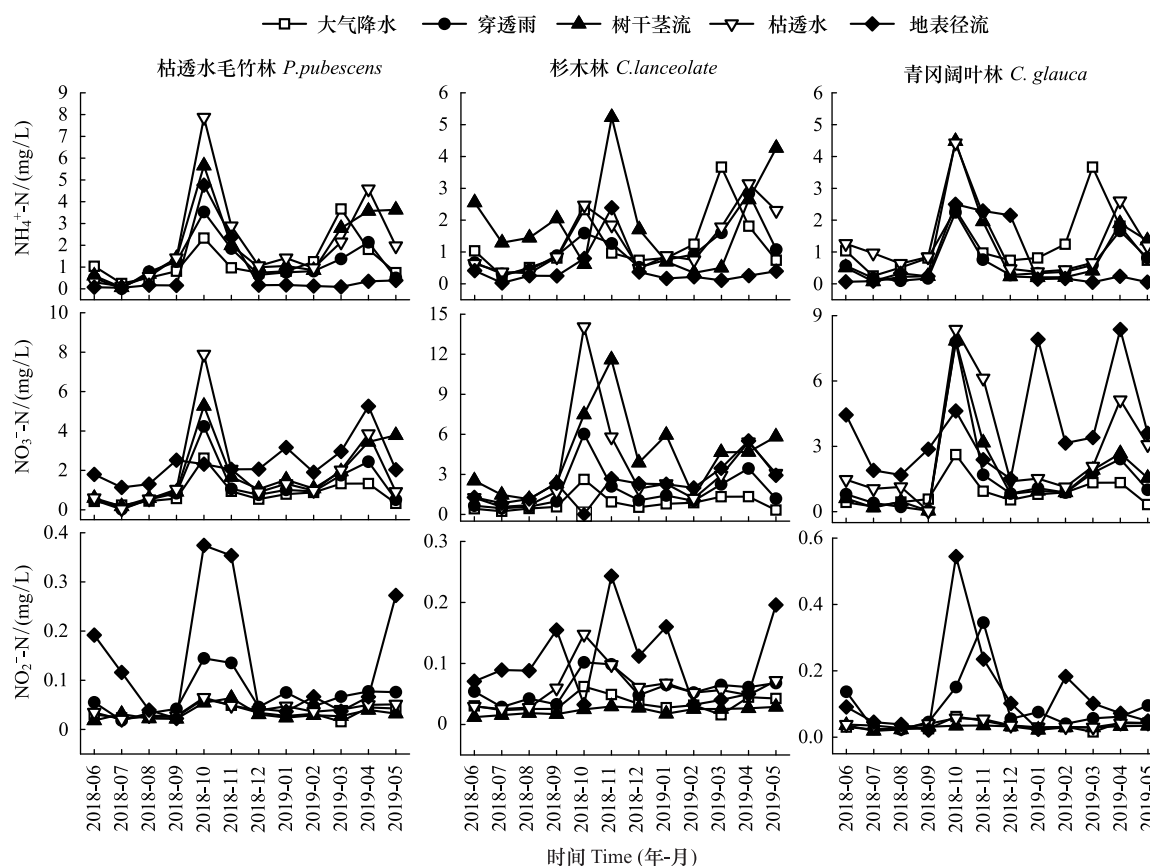


图2 毛竹林、杉木林、青冈阔叶林不同层次降水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  质量浓度动态变化

Fig.2 Dynamic changes of rainwater  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  concentrations at different levels of *P. pubescens* plantation, *C. lanceolata* plantation, and Broadleaf forest of *C. glauca*

中 TP 浓度降低至 0.01—0.02 mg/L, 树干茎流的浓度在 0.01—0.03 mg/L 之间, 但 TP 浓度在 3 种森林群落的穿透雨和树干茎流间无显著性差异。各群落内穿透雨和树干茎流中的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度均显著升高, 分别为 2.83—2.96 mg/L 和 2.94—9.12 mg/L, 说明降水流经森林冠层和树干后溶解了大量的  $\text{SO}_4^{2-}$ 。

林内降水经各地表枯落物层后, TP 浓度升高至 0.02—0.04 mg/L, 是穿透雨中的 1.08—2.43 倍, 其中杉木林和青冈阔叶林枯透水中 TP 浓度分别是穿透雨的 2.08 倍和 2.43 倍;  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度略有升高, 在 2.83—3.95 mg/L 之间, 但其浓度在 3 种森林群落内枯透水间无显著性差异。

3 种森林群落地表径流中 TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度显著提高 (图 3), 远高于其在大气降水和林内降雨中的浓度, 达到 0.09—0.13 mg/L 和 4.15—13.94 mg/L, 说明降水流经森林地表层后溶解了大量的 TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$ , 使地表径流中 TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度升高。

## 2.4 3 种森林群落对 N、P 和 S 的截留特征

从表 4 可知, 研究期内大气降水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$  的通量分别为 9.98、5.78、0.35、0.62、17.33 kg/hm<sup>2</sup>。3 种森林群落的冠层对 TP 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  均表现出截留作用, 对  $\text{SO}_4^{2-}$  出现淋溶作用, 毛竹林、杉木林和青冈阔叶林对 TP 的截留率分别为 79.09%、84.68% 和 82.76%,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  截留率分别为 48.34%、30.88% 和 69.36%,  $\text{SO}_4^{2-}$  的淋溶率分别为 5.12%、39.33% 和 0.10%。毛竹林冠层对  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  表现出截留作用, 而杉木林和青冈阔叶林冠层对于  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  均表现出淋溶的状态, 并且杉木林冠层的淋溶作用最强, 淋溶率分别为 77.63% 和 14.80%。

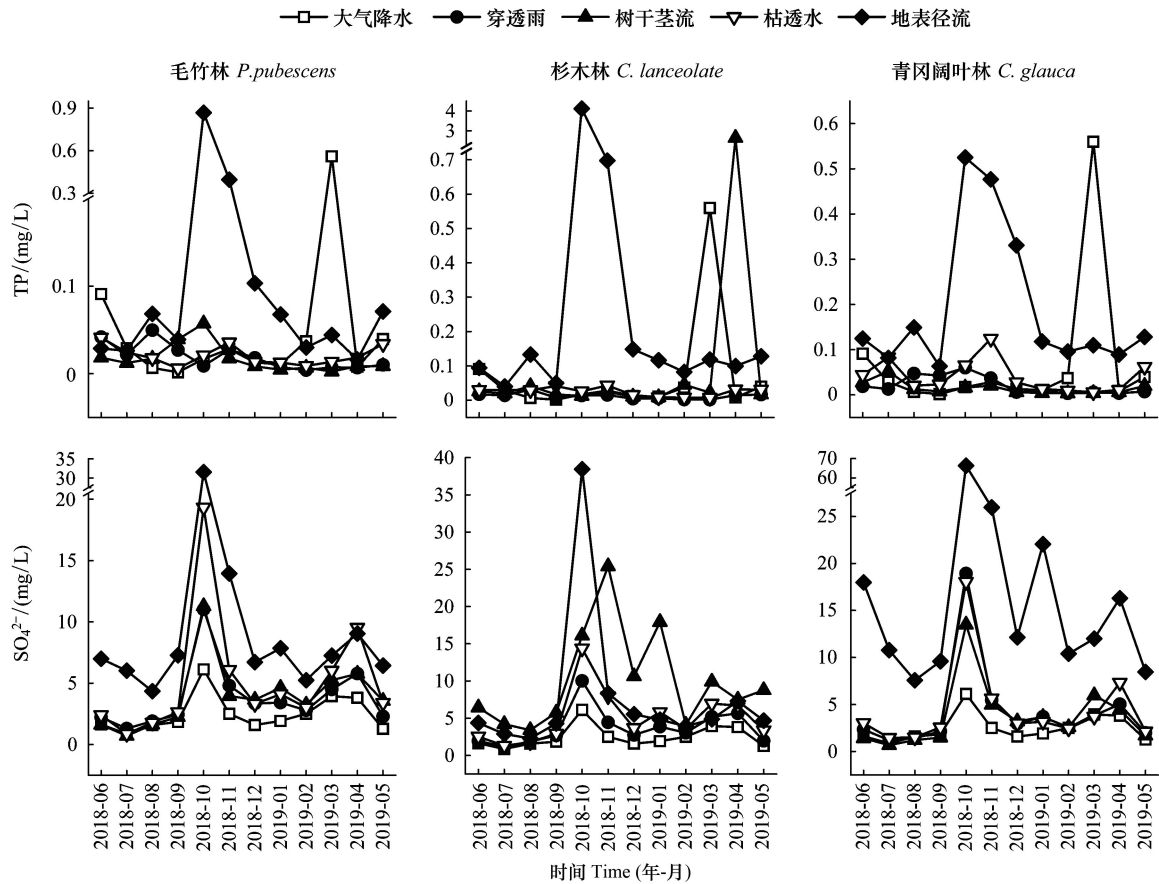


图3 毛竹林、杉木林、青冈阔叶林不同层次降水中 TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度动态变化

Fig.3 Dynamic changes of rainwater TP and  $\text{SO}_4^{2-}$  concentrations at different levels of *P. pubescens* plantation, *C. lanceolata* plantation, and Broadleaf forest of *C. glauca*

表 4 3 种森林群落各层次对氮硫磷的截留

Table 4 Interception and interception rates of nitrogen, phosphorus and sulfur at different levels of three forest communities

| 林分类型<br>Forest type         | 项目<br>Item               | 大气降水沉降量<br>Bulk precipitation<br>settlement/<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 林冠层 Canopy                    |        | 枯落物层 Litter                   |         | 地表层 Surface layer             |       | 总截留率<br>Total<br>interception<br>rate/% |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|---------|-------------------------------|-------|-----------------------------------------|
|                             |                          |                                                                       | 截留量/<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 截留率/%  | 截留量/<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 截留率/%   | 截留量/<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 截留率/% |                                         |
| 毛竹林<br><i>P. pubescens</i>  | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | 9.98                                                                  | 4.82                          | 48.34  | -2.45                         | -47.55  | 7.59                          | 99.80 | 99.85                                   |
|                             | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ | 5.78                                                                  | 0.80                          | 13.77  | -1.00                         | -20.11  | 5.91                          | 98.64 | 98.60                                   |
|                             | $\text{NO}_2^-\text{-N}$ | 0.35                                                                  | 0.00                          | 0.21   | 0.13                          | 35.84   | 0.22                          | 97.90 | 98.66                                   |
|                             | TP                       | 0.62                                                                  | 0.49                          | 79.09  | -0.01                         | -8.82   | 0.14                          | 97.60 | 99.45                                   |
|                             | $\text{SO}_4^{2-}$       | 17.33                                                                 | -0.89                         | -5.12  | -1.63                         | -8.93   | 19.56                         | 98.58 | 98.37                                   |
| 杉木林<br><i>C. lanceolata</i> | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | 9.98                                                                  | 3.08                          | 30.88  | -0.74                         | -10.71  | 7.62                          | 99.78 | 99.83                                   |
|                             | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ | 5.78                                                                  | -4.49                         | -77.63 | -5.87                         | -57.19  | 16.06                         | 99.48 | 98.54                                   |
|                             | $\text{NO}_2^-\text{-N}$ | 0.35                                                                  | -0.05                         | -14.80 | 0.02                          | 4.66    | 0.38                          | 98.63 | 98.50                                   |
|                             | TP                       | 0.62                                                                  | 0.52                          | 84.68  | -0.08                         | -84.51  | 0.17                          | 96.32 | 98.96                                   |
|                             | $\text{SO}_4^{2-}$       | 17.33                                                                 | -6.82                         | -39.33 | -3.91                         | -16.19  | 27.85                         | 99.28 | 98.83                                   |
| 青冈阔叶林<br><i>C. glauca</i>   | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | 9.98                                                                  | 6.92                          | 69.36  | -2.50                         | -81.79  | 5.55                          | 99.91 | 99.95                                   |
|                             | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ | 5.78                                                                  | -0.19                         | -3.24  | -5.26                         | -88.18  | 11.17                         | 99.47 | 98.96                                   |
|                             | $\text{NO}_2^-\text{-N}$ | 0.35                                                                  | -0.16                         | -45.97 | 0.30                          | 59.03   | 0.21                          | 99.36 | 99.62                                   |
|                             | TP                       | 0.62                                                                  | 0.51                          | 82.76  | -0.15                         | -142.29 | 0.26                          | 99.09 | 99.62                                   |
|                             | $\text{SO}_4^{2-}$       | 17.33                                                                 | -0.02                         | -0.10  | 0.55                          | 3.15    | 16.55                         | 98.48 | 98.53                                   |

枯落物层与林内降水各物质的通量差可以指示枯落物层对于输入林地的各物质的吸收和淋溶作用,3 种林地枯落物层只对  $\text{NO}_2^-$ -N 表现出截留的状态,其他各物质的通量差均为负值,说明 3 种林地的枯落物层均对  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、TP 和  $\text{SO}_4^{2-}$  有淋溶或释放的作用,其中青冈阔叶林的枯落物层淋溶率最大, $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、TP 的淋溶率分别为 81.79%、88.18% 和 142.29%。

森林地表层对于枯落物层渗透的降水中各物质浓度有明显的改变,但由于在本研究中地表径流量仅占大气降水量的 0.19%—0.52% (表 3),因此地表径流中各物质通量较低,3 种群落的地表层对氮、磷、硫均表现为截留作用,其中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的截留率最大,TP 的截留率最小,青冈阔叶林对各物质的截留率最高,说明青冈阔叶林地表层对研究物质均表现出很强的截留作用。

3 种森林群落对大气降水中对无机氮、磷和硫呈现出截留作用,截留率超过 98%,其中对  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TP 的截留率最大,达 99.83% 和 99.45%, $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{SO}_4^{2-}$  截留率较低。对比 3 种森林群落的截留能力,青冈阔叶林>毛竹林>杉木林。

### 3 讨论

#### 3.1 大气降水特征

庙山坞试验林场位于北亚热带季风区,秋季干燥少雨,9 月—11 月降雨量仅占全年降雨量的 15%,在相同人为活动影响下,大气中各物质积累量较高,因而形成的降雨中  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等浓度较高(图 2、图 3),导致秋季降水中 pH 值较夏季低,这与葛晓敏<sup>[21]</sup>等研究结果一致。大气降水的  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度之比为 1.74:1,存在  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度过高、 $\text{NO}_3^-$ -N 浓度偏低的情况,分析其原因可能是庙山坞试验林场毗邻从事农业耕作的村庄,农业施肥造成大气中氨浓度提高<sup>[22]</sup>,从而引起降水中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度过高,与盛文萍<sup>[23]</sup>、徐冯迪<sup>[24]</sup>在千烟洲的研究结果一致。大气磷沉降不仅与当地气象因素有关,与农业生产和交通排放等环境条件也密切相关<sup>[25]</sup>,磷沉降以干沉降形式为主,湿沉降占总沉降量比例较低,研究区大气降水中 TP 的浓度平均为 0.07 mg/L,与王江飞<sup>[26]</sup>在杭嘉湖地区的研究结果一致;大气硫沉降水平深受当地能源结构影响,由于地区能源消费结构不同,重庆市主要能源结构为高硫煤<sup>[14]</sup>,而浙江省油气替代煤炭、非化石能源替代化石能源的比例逐渐提高<sup>[25]</sup>,研究区降水中  $\text{SO}_4^{2-}$  的年均浓度(1.84 mg/L)远低于重庆四面山<sup>[2]</sup>和缙云山<sup>[14]</sup>大气降水中的浓度(7.46 mg/L)。

#### 3.2 森林冠层的截留分配作用

大气降水是森林群落养分输入的主要途径之一,降水进入森林后经过冠层的截留、吸收与淋溶,实现了营养元素的补充和流动<sup>[21]</sup>。当雨水穿过毛竹林、杉木林和青冈阔叶林的林冠层后,pH 值稳定在 6.64—6.73 范围内,秋冬两季酸性降水经过林冠层后 pH 明显提高,春夏两季森林内穿透雨 pH 略有提高,说明森林冠层能够稳定调升降雨的 pH,这与在秦岭火地塘森林<sup>[5]</sup>和重庆四面山森林<sup>[2]</sup>等处的研究结果基本一致。林内穿透雨 pH 值增加的原因一方面是大气降水中的  $\text{H}^+$  离子与冠层植物组织的细胞壁和角质层中的盐基阳离子发生离子交换<sup>[27-28]</sup>,另一方面是降雨和林冠层的相互作用,包括降雨对附着在冠层上的大气干沉降颗粒物的淋洗<sup>[29]</sup>和冠层交换(植物养分浸出和林冠吸收)<sup>[30]</sup>。降水通过林冠层后,森林群落内穿透雨的  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度均有降低,研究表明森林作为  $\text{NH}_4^+$ -N 源或汇的作用取决于大气中的浓度,当附近存在农业源富集时,林冠层会吸收沉降的  $\text{NH}_4^+$ -N<sup>[31]</sup>,使穿透降雨中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度降低。冠层吸收了降水中的 TP,补充了冠层养分,使穿透雨和树干茎流中 TP 浓度和通量下降,这与在天目山的落叶阔叶林<sup>[32]</sup>和川西亚高山<sup>[33]</sup>的紫果云杉林、岷江冷杉林和白桦林研究结果不同,这可能与大气中的磷含量、植被类型与植被生长状况有关。穿透雨中  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度均有提高,这与杨林<sup>[3]</sup>、巩合德<sup>[33]</sup>在湖北神农架地区次生林、川西亚高山 3 种森林群落穿透雨中无机氮浓度升高的研究结果相同,与孙涛<sup>[2]</sup>、赵海蓉<sup>[34]</sup>在重庆四面山常绿阔叶林、四川华西雨屏区典型人工林研究得出冠层吸收无机氮的结论不同,这可能是地理区域、物种和局部生境共同作用的结果。林冠的淋溶或吸附作用取决于降水对叶片附着干沉降颗粒物的淋洗<sup>[29]</sup>与雨水离子( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$ )和叶片



交换的平衡关系<sup>[30]</sup>,杭州市大气颗粒物中水溶性离子  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$  占比超过 86.0%<sup>[35]</sup>,并且  $\text{SO}_4^{2-}$ <sup>[36]</sup> 和含氮污染物<sup>[35]</sup> 是杭州市大气颗粒物中最重要的污染物,因此携带高浓度  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的大气颗粒物在植被表面附着,伴随降水淋溶形成高浓度的穿透雨,远超过冠层对  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸收能力。

相较于穿透降水,3 种群落内树干茎流的 pH 值均有减小,其中杉木林树干茎流的 pH 仅为 3.67,这与于小军<sup>[37]</sup> 在会同森林生态实验站的研究结果类似。树干茎流在流动过程中会溶解树体分泌的有机酸或无机酸等,进而降低树干流 pH 值<sup>[29]</sup>,而杉木树皮松软、有裂隙,更容易截获降水,产生的茎流与树皮表层作用时间较长、溶解更充分,导致其茎流中  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度提高,这也是导致其茎流高度酸化重要原因之一<sup>[37]</sup>。

### 3.3 森林群落内枯落物层的淋溶作用

枯落物层是林下最有活力的部分,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<sup>[2]</sup>,而林内降水输入和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<sup>[38]</sup>,共同推动了森林养分循环。3 种森林群落地表枯枝落叶的矿化作用和硝化作用释放出大量  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$ <sup>[39]</sup>,并且阴离子浓度相较于穿透雨大幅增加,导致枯透水的 pH 值相较于穿透雨略有下降。森林生态系统内枯枝落叶的分解速率随温度、降水的增加而增加<sup>[40]</sup>,亚热带地区降水充沛,均温较高,3 种森林群落枯透水中  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度远超过宁夏六盘山华山松等四种群落枯透水中无机氮的浓度<sup>[16]</sup>,与重庆缙云山常绿阔叶林枯透水中无机氮浓度<sup>[14]</sup> 类似。同时本研究中青冈阔叶林枯落物层的氮、磷、硫淋溶率高于杉木林,这可能是由阔叶林的枯落物分解较快,而针叶林凋落物因表皮富含角质层分解较慢<sup>[40]</sup> 导致的。

### 3.4 森林群落地表层截留净化作用

森林土壤是指长期在森林植被环境下发育形成的土壤类型,由于群落内特殊的气候和物质传导过程,导致土层中有机物质累积丰富,腐殖化作用相对强烈,森林土壤表层对于枯落物层渗透降水中各物质浓度有明显的改变<sup>[41]</sup>。枯透水中的  $\text{NH}_4^+$ -N 在经过地表土壤层的过程中其质量浓度明显降低,这与葛晓敏<sup>[21]</sup> 在南京杨树人工林的研究结果一致,这主要是由于土壤胶体对  $\text{NH}_4^+$  有较强的吸附作用<sup>[42]</sup>,以及地表层植物根系对土壤中  $\text{NH}_4^+$  的吸收<sup>[43]</sup>,导致地表径流中  $\text{NH}_4^+$  浓度降低,而地表径流中  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度有所提高则可能是由于林地土壤中反硝化细菌的群落在土壤表层含量最高<sup>[39]</sup>,厌氧微生物在湿润且低氧的土壤中发生反硝化作用,将部分  $\text{NO}_3^-$  转化为  $\text{NO}_2^-$  导致的。土壤中 TP 主要来源于凋落物分解归还<sup>[29]</sup>,因此森林土壤中 P 的来源相对稳定,而地表径流淋溶表层土壤中有效磷,使得地表径流中 TP 浓度升高,同时凋落物的分解也会向土壤释放  $\text{SO}_4^{2-}$ <sup>[44]</sup>,当降水流经森林各层次  $\text{SO}_4^{2-}$  被淋溶下来,浓度一直增加。但由于地表径流的通量较小,因此土壤表层表现出对各物质的截留效果,其中青冈阔叶林地表土壤层对研究物质固定作用最强,土壤中总氮和总磷浓度高于毛竹林和杉木林(表 2)。

整体来看,在以地表径流作为森林群落降水的输出途径,3 种森林群落对大气沉降的氮、磷、硫各物质均表现出截留作用(表 4),截留率均超过 98%,其中  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TP 的截留率最大,达 99.83% 和 99.45%,其被森林群落吸收利用,有助于植物生长,促进养分循环,同时削减了进入小流域的氮、磷、硫的量,有利于改善小流域水环境的水质。

## 4 结论

大气降水通过对冠层上的干沉降颗粒物的淋洗以及与冠层交换反应后调升了降雨的 pH,吸收了沉降的氨氮和 TP,使穿透降雨中  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度均有提高。枯落物层则是林下氮、磷、硫的主要释放源,地表枯枝落叶的矿化作用和硝化作用会释放出大量  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$ 。森林地表土壤层接受凋落物分解归还的  $\text{SO}_4^{2-}$ 、TP 和  $\text{NO}_3^-$ ,同时还吸附进入地表的氨氮,由地表径流(输出)与大气降水(输入)的对比分析可知,各林地对沉降污染物中氮、磷、硫的截留率均超过 98%。对比 3 种森林群落对大气沉降的氮、磷、硫的截留能力,可以发现青冈阔叶林强于毛竹林和杉木林,这与森林林分结构、冠层结构、枯落物生产与分解特征以及

立地条件等因子有关,而不同森林群落截留大气沉降污染的决定性机制还有待深入探讨。总之,该结果在一定程度上说明,在生态林营建及管理,应适度发展阔叶林,或者对现有的针叶林进行阔叶化改造,可以进一步提升现有森林群落的生态服务能力尤其是森林的净水能力。

#### 参考文献 (References):

- [1] Parker G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13: 57-133.
- [2] 孙涛, 马明, 王定勇, 黄礼昕. 中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化. *环境科学*, 2014, 35(12): 4475-4481.
- [3] 杨林, 王明, 王传华. 神农架地区次生林主要树种林冠雨的氮磷营养特征. *生态学报*, 2018, 37(4): 1018-1025.
- [4] Scheer M B. Mineral nutrient fluxes in rainfall and throughfall in a lowland Atlantic rainforest in southern Brazil. *Journal of Forest Research*, 2011, 16(1): 76-81.
- [5] 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. *生态学报*, 2007, 27(5): 1838-1844.
- [6] 马雪华. *森林水文学*. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [7] Yan W J, Zhang S, Sun P, Seitzinger S P. How do nitrogen inputs to the Changjiang basin impact the Changjiang River nitrate: a temporal analysis for 1968-1997. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1091.
- [8] 余辉, 张璐璐, 燕妹雯, 李焕利, 徐军. 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率. *环境科学研究*, 2011, 24(11): 1210-1219.
- [9] 张颖, 刘学军, 张福锁, 巨晓棠, 邹国元, 胡克林. 华北平原大气氮素沉降的时空变异. *生态学报*, 2006, 26(6): 1633-1639.
- [10] 黄锦锐, 程煜, 杨红玉, 郑凯舟, 王家骏. 模拟 N 沉降下 3 种林分土壤营养动态分析. *生态学报*, 2017, 37(1): 63-73.
- [11] 鲁显楷, 莫江明, 董少峰. 氮沉降对森林生物多样性的影响. *生态学报*, 2008, 28(11): 5532-5548.
- [12] Gaige E, Dail D B, Hollinger D Y, Davidson E A, Fernandez I J, Sievering H, White A, Halteman W. Changes in canopy processes following whole-forest canopy nitrogen fertilization of a mature spruce-hemlock forest. *Ecosystems*, 2007, 10(7): 1133-1147.
- [13] 张捷, 刘洋, 张健, 欧江, 崔宁洁. 马尾松人工林林冠层对氮、磷、硫的截留效应. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 37-43.
- [14] 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇. 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. *环境科学*, 2017, 38(12): 5056-5062.
- [15] 肖洋. 北京山区森林植被对非点源污染的生态调控机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [16] 杨丽丽, 邢元军, 王彦辉, 文仕知, 李振华. 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. *生态学报*, 2019, 39(8): 2851-2861.
- [17] Zhu J X, Wang Q F, He N P, Smith M D, Elser J J, Du J Q, Yuan G F, Yu G R, Yu Q. Imbalanced atmospheric nitrogen and phosphorus depositions in China: implications for nutrient limitation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(6): 1605-1616.
- [18] Yu H L, He N P, Wang Q F, Zhu J X, Xu L, Zhu Z L, Yu G R. Wet acid deposition in Chinese natural and agricultural ecosystems: evidence from national-scale monitoring. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(18): 10995-11005.
- [19] 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.
- [20] 王小明, 王刚, 周本智, 钟绍柱, 孔维健, 徐升华. 中亚热带天然次生常绿阔叶林水文生态效应研究. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 11-15.
- [21] 葛晓敏, 唐罗忠, 王瑞华, 李勇, 朱玲, 贾志远, 丁晖. 杨树人工林生态系统降水再分配及主要离子特征. *生态学报*, 2018, 38(14): 5120-5131.
- [22] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展. *中国农业大学学报*, 2019, 24(1): 149-162.
- [23] 盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 刘允芬, 胡中民. 离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例. *生态学报*, 2010, 30(24): 6872-6880.
- [24] 徐冯迪, 高扬, 董文渊, 郝卓, 徐亚娟. 我国南方红壤区氮磷湿沉降对森林流域氮磷输出及水质的影响. *生态学报*, 2016, 36(20): 6409-6419.
- [25] 王飞. 基于碳排放约束的浙江省能源消费结构优化研究[D]. 杭州: 浙江财经大学, 2018.
- [26] 王江飞, 周柯锦, 汪小泉, 邓靖, 吴柳芳, 马晓雁, 钟晓, 蒲凤莲, 施丽莉, 陈江, 蒋彩萍. 杭嘉湖地区大气氮、磷沉降特征研究. *中国环境科学*, 2015, 35(9): 2754-2763.
- [27] Hamdan K, Schmidt M. The influence of bigleaf maple on chemical properties of throughfall, stemflow, and forest floor in coniferous forest in the Pacific Northwest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, 42(5): 868-878.
- [28] 冯宗炜, 陈楚莹, 王开平, 张家武, 曾士余, 赵吉录, 邓仕坚. 亚热带杉木纯林生态系统中营养元素的积累、分配和循环的研究. *植物生态学报*, 1985, 9(4): 245-256.
- [29] 张娜, 乔玉娜, 刘兴诏, 褚国伟, 张德强, 闫俊华. 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. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(5): 502-510.

- [30] González-Arias A, Amezaga I, Echeandía A, Onaindia M. Buffering capacity through cation leaching of *Pinus radiata* D. don canopy. *Plant Ecology*, 2000, 149(1): 23-42.
- [31] Langford A O, Fehsenfeld F C. Natural vegetation as a source or sink for atmospheric ammonia; a case study. *Science*, 1992, 255(5044): 581-583.
- [32] 邵小倩. 不同气候带四种典型森林中大气氮磷沉降的时空特异性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [33] 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. *林业科学*, 2005, 41(5): 14-20.
- [34] 赵海蓉, 帅伟, 李静, 杨万勤, 吴福忠, 谭波. 华西雨屏区典型人工林对降雨过程中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的过滤作用. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3710-3718.
- [35] 林昕, 曹芳, 翟晓瑶, 鲍孟盈, 俞绍才, 王京鹏, 章炎麟. 中国典型城市冬季大气细颗粒物水溶性离子特征及来源分析. *生态环境学报*, 2019, 28(2): 307-315.
- [36] 祁国伟, 曹军骥, 卓里欣, 余波, 王志伟. 杭州市空气中  $\text{PM}_{10}$  的化学组成特征. *环境化学*, 2005, 24(5): 603-608.
- [37] 于小军, 汪思龙, 邓仕坚, 张秀永. 亚热带常绿阔叶林和杉木人工林茎流与穿透雨的养分特征. *生态学杂志*, 2003, 22(6): 7-11.
- [38] Whitmore T C. *An Introduction to Tropical Rain Forests*. Oxford UK: Oxford University Press, 1998.
- [39] Mergel A, Kloos K, Bothe H. Seasonal fluctuations in the population of denitrifying and  $\text{N}_2$ -fixing bacteria in an acid soil of a Norway spruce forest. *Plant and Soil*, 2001, 230(1): 145-160.
- [40] 刘霞, 周涛, 吴昊, 徐培培, 罗惠, 曹乐瑶. 中国森林凋落物分解速率的空间格局及主控因子: 基于最优线性混合模型. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 54(4): 553-560.
- [41] 张春娜, 延晓冬, 杨剑虹. 中国森林土壤氮储量估算. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2004, 26(5): 572-575, 579-579.
- [42] 王少平, 俞立中, 许世远, 程声通. 上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(6): 554-558.
- [43] 潘忠成. 不同类型绿地对雨水径流中 COD 和氮的削减效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [44] Maitat O, Boudot J P, Merlet D, Rouiller J. Aluminium chemistry in two contrasted acid forest soils and headwater streams impacted by acid deposition, Vosges mountains, N.E. France. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 117(1/4): 217-243.