

文章编号: 1001-1498(2007)03-0408-07

中亚热带地区几个树种树干茎流的养分特征研究

陈书军^{1,2}, 闫文德^{2*}, 项文化², 雷丕峰²

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中南林业科技大学生态研究室, 湖南 长沙 410004)

摘要:对湖南株洲 22~25 年生的樟树、火炬松、榿栎、醉香含笑 4 个树种树干茎流及林外大气降水中 N、P、SO₂、K、Ca、Mg、Cu、Zn 和 Mn 9 种养分元素含量进行了为期一年的测定。结果表明:不同月份大气降水养分元素含量不同,各元素各月平均含量按大小排序为 Ca>NH₄-N>SO₂>Zn>K>NO₃-N>Mg>Fe>Mn>P>Cu;大气降水经过林冠层后,树干茎流中各养分元素含量变化基本一致,均表现季节动态变化,相对于大气降水,大多数元素含量增加;不同树种间树干茎流养分特征表现不同,按总含量值排序依次为火炬松、榿栎、樟树、醉香含笑;不同养分元素之间的相对含量也表现出较大的差别,NH₄-N、Ca、K、SO₂含量最高,Mg、NO₃-N、Zn、Mn 含量居中,P、Fe、Cu 含量最低。与大气降水相比,4 个树种茎流共同表现为,Cu 的含量变化较小,其它元素含量均有较大的变化,其中樟树茎流中 Zn、SO₂、Fe、Cu;火炬松、榿栎茎流中 Zn、Fe;醉香含笑茎流中 Zn 为负淋洗,4 个树种对 Zn 的负淋洗表现的尤为显著。

关键词:降水;树干茎流;养分含量;亚热带

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

Nutrient Characteristics of Stem-Flow in Different Tree Species in Middle Subtropics

CHEN Shu-jun^{1,2}, YAN Wen-de², XIANG Wen-hua², LEI Pi-feng²

(1. College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Research Section of Ecology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: The concentrations of 9 nutrient elements (N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn, SO₂) in stem-flow, and rainfall were measured in 22~25 years old *Cinnamomum camphora*, *Pinus taeda*, *Quercus aliena*, *Michelia macclurei* from April of 2003 to July of 2004 at Zhuzhou. The results showed: the concentrations of the nutrients in rainfall varied according to the month; The concentration sequence of the nutrient elements in precipitation were follows: Ca>NH₄-N>SO₂>Zn>K>NO₃-N>Mg>Fe>Mn>P>Cu; The concentrations of the nutrients in stem-flow also varied in the same way and changed seasonally. Compared with that in precipitation, most of them increased; The nutrient characteristics of stem-flow for different tree species differed significantly and the concentration sequence of the total nutrient elements in stem-flow were follows: *Pinus taeda*, *Quercus aliena*, *Cinnamomum camphora*, *Michelia macclurei*; Proportion of nutrient in stem-flow of different nutrient elements also differed significantly among all nutrients analysed. It was found that the highest concentration was for NH₄-N, Ca, K, SO₂, middle for Mg, NO₃-N, Zn, Mn, and the lowest for P, Fe, Cu; Compared with atmospheric precipitation, the stem-flow of four tree species together performance were, the concentration of Cu nearly did not change, other element content had a bigger change, *Cinna-*

收稿日期: 2006-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(编号 30571487)、省自然科学基金(05JJ40127)、省科技厅重点项目(06FJ3083、05NK3026)、省教育厅项目(05C331)、省青年骨干教师培养对象项目、校高层次引进人才项目资助

作者简介: 陈书军(1977—),男,陕西杨凌人,主要从事森林生态学研究。E-mail: csfuchen@yahoo.com.cn

*通讯作者。

manum camphora stem-flow Zn, SiO_2 , Fe, Cu; *Pinus taeda*, *Quercus aliena* stem-flow Zn, Fe; *Michelia macclurei* stem-flow Zn were lower than those in precipitation, significant variation was especially noted for Zn in the four tree species

Key words: precipitation; stem-flow; nutrient concentration; sub-tropic zone

养分水循环是生态系统生物地球化学循环的一个重要组成部分,大气降水在通过林冠时,由于植物-大气相互作用的结果,其化学成分会发生显著的改变^[1]。穿透水和树干茎流构成林内雨,作为森林生态系统养分平衡的一个重要组成部分,林内雨的养分分配,是由穿透水和树干茎流两部分决定的^[2]。与穿透水相比,树干茎流量及其所含的养分总量虽少,但茎流中养分浓度却比穿透水和大气降水高,茎流雨水及其所含养分的入渗分布范围小,仅限于树干基部四周^[3],并沿着根的生长方向直接进入土壤^[4]。且这部分养分是水溶性的,无需经过复杂的分解过程,可被植物直接吸收,具有加速植物生长和促进养分循环的重要作用^[5]。目前,有关降水对林冠淋洗作用的研究已有较多报道,涉及不同森林类型及树种,如寒温带有红松(*Pinus koraiensis* Sieb et Zucc)、云杉(*Picea asperata* Mast)、冷杉(*Abies fabri* (Mast) Craib)、暖温带有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr)、亚热带有杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook)、刨花楠(*Machilus pauhoi* Kaneh)、红栲(*Castanopsis hystrix* A. DC)等树种,以及热带半落叶季雨林和山地雨林等。针对我国亚热带地带性植被常见树种樟树(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl)、火炬松(*Pinus taeda* L.)、槲栎(*Quercus aliena* B1)、醉香含笑(*Michelia macclurei* Dandy)等树种茎流养分特征的研究却鲜有报道,因此,从生态学角度研究大气降水在通过森林冠层后的不同树种的树干茎流养分特征,对于了解其养分归还和输入规律、物质元素补给量及物质迁移特征将具有重要意义,同时可为该区域森林生态系统的经营和管理提供必要的理论依据和基础数据。

1 研究地概况

试验地设在中南林业科技大学树木标本园,地理位置 112°54' E, 27°50' N, 海拔 50~200 m, 相对高度 150 m, 属湘中丘陵区, 气候系典型的亚热带湿润气候, 年降水量 1 185.8~1 912.2 mm, 集中于 4—6 月; 年平均相对湿度 80%, 年平均气温 17.4。

本区地层古老, 母岩以变质板页岩为主, 风化程度较深, 土壤为红壤, 呈酸性。地带性植物为常绿阔叶林, 试验林分是 1984 年人工营造的樟树林, 园内还生长有枫香(*Liquidambar formosana* Hance)、杜仲(*Eucammia ulmoides* Oliv.)、桂花(*Osmanthus fragrans* Lour.) 等乔木树种。在造林前进行了平梯整地, 造林后处于半自然状态, 郁闭度为 0.7~0.8, 林下植物主要有女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)、小叶女贞(*Ligustrum quihoui* Carr.)、菝葜(*Smilax china* L.)、山胡椒(*Lindera glauca* (Sieb et Zucc.) B1)、木莓(*Rubus swinhoi* Hance.)、油茶(*Camellia oleifera* Abel.)、大叶黄杨(*Buxus megistophylla* L. et L.)、满树星(*Ilex aculeolata* Nakai.)、南蛇藤(*Celastrus orbiculatus* Thunb.)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis* (Burm.) Underw.) 等。

2 研究方法

2.1 样品的收集

将标准雨量筒安置于离林缘距离约为树高 1.5 倍处, 收集林外降水, 为防止污染, 将精制网状塑料纱布置于漏斗口上进行过滤, 并定期对纱布进行清洗。为了避免藻类生长, 每次样品收集完后对雨量筒用蒸馏水冲洗以保持清洁。在树木园内选择分布均匀, 林冠枝叶结构能代表平均林冠的樟树、火炬松、槲栎、醉香含笑样木各 3 株, 每株用直径 2 cm 聚乙烯塑料管沿中缝剖开, 从 1.5 m 处由上往下蛇形缠绕于树干上, 用沥青粘牢, 基部放置集水器收集树干茎流^[6]。

2.2 取样时间及分析方法

根据降水的性质、天气状况及试验目的, 分别于 2003 年 4 月 4 日、5 月 11 日、6 月 23 日、7 月 14 日、8 月 5 日、10 月 13 日, 2004 年 2 月 18 日、3 月 23 日、4 月 17 日、5 月 15 日、6 月 21 日、7 月 16 日取水样, 并及时进行养分含量分析。其中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 用纳氏试剂比色法测定; $\text{NO}_3\text{-N}$ 用酚二磺酸比色法测定; P 用磷钼蓝比色法测定; SiO_2 用硅钼蓝比色法测定; K、Ca、Mg、Cu、Zn、Mn 用 HP3510 型原子吸收分光光度计测定^[7]。

3 结果与分析

3.1 大气降水(林外降水)的养分特征

受降水、环境、气象条件及人类活动的综合影响,同一地区不同时间大气降水中各元素含量变化具有较大随机性,各月输入量不同且年变幅较大。由表 1 可知,大气降水中 Ca 元素含量的平均值最高,为 $64.504 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, Cu 元素含量最低,仅为 $0.299 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,相差 215.7 倍。无机态 N ($\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$) 则以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为主,比 $\text{NO}_3\text{-N}$ 高 8 倍多,降

水中各养分元素平均含量排列顺序为: $\text{Ca} > \text{NH}_4\text{-N} > \text{SiO}_2 > \text{Zn} > \text{K} > \text{NO}_3\text{-N} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Cu}$ 。不同月份大气降水养分元素含量不同,除 Cu、 SiO_2 、Mn 的含量变化较小外,其它各元素含量的变化较大,尤以 Mg 明显,2003 年 10 月份降水中 Mg 含量最高,达 $30.200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,2003 年 5 月份的含量最低,只有 $0.453 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,相差达 66.7 倍,而降水中 Cu 含量最高的 2004 年 4 月为 $0.662 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,最低的 2003 年 8 月份为 $0.142 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,相差仅 4.7 倍。

表 1 林外降水的主要养分元素含量

| 时间 | $\text{NO}_3\text{-N}$ | $\text{NH}_4\text{-N}$ | P | K | Ca | Mg | Cu | SiO_2 | Fe | Zn | Mn |
|------------|------------------------|------------------------|-------|---------|---------|--------|-------|----------------|-------|--------|-------|
| 2003-04-04 | 2.226 | 9.369 | 0.839 | 17.980 | 26.324 | 1.481 | - | 41.908 | - | 11.573 | - |
| 2003-05-11 | 1.081 | 114.422 | 0.420 | 18.364 | 4.242 | 0.453 | - | 24.033 | - | 35.729 | - |
| 2003-06-23 | 15.418 | 35.369 | 3.325 | 144.814 | 16.243 | 2.222 | - | 7.473 | - | 45.437 | - |
| 2003-07-14 | 20.127 | 277.240 | 0.904 | 39.209 | 101.752 | 8.311 | - | 51.161 | - | 16.817 | - |
| 2003-08-05 | 5.354 | 79.774 | 1.065 | 30.513 | 86.132 | 3.785 | 0.142 | 42.990 | - | 0.902 | 0.382 |
| 2003-10-13 | 8.080 | 53.829 | 1.291 | 45.143 | 155.347 | 30.200 | 0.346 | 41.325 | 0.233 | 45.407 | 0.928 |
| 2004-02-18 | 30.627 | 189.262 | 0.323 | 12.226 | 196.592 | 22.547 | 0.252 | 48.016 | - | 50.253 | 1.784 |
| 2004-03-23 | 9.322 | 14.913 | 1.388 | 35.896 | 4.986 | 2.808 | 0.181 | 64.143 | 6.066 | 31.381 | - |
| 2004-04-17 | 8.168 | 158.096 | 0.625 | 26.225 | 53.931 | 6.850 | 0.662 | 23.861 | 5.601 | 37.844 | 2.939 |
| 2004-05-15 | 5.709 | 23.517 | 0.170 | 22.153 | 57.637 | 8.165 | 0.362 | 61.287 | 2.169 | 30.465 | - |
| 2004-06-21 | 8.911 | 12.072 | 0.589 | 4.064 | 83.362 | 1.606 | - | 75.830 | 1.759 | 32.549 | 0.251 |
| 2004-07-16 | 4.889 | 58.366 | 2.899 | 9.154 | 79.635 | 1.354 | - | 9.037 | - | 40.547 | - |
| (截尾平均) | 7.591 | 60.879 | 0.886 | 25.188 | 64.504 | 4.239 | 0.299 | 41.572 | 3.176 | 34.753 | 1.031 |

注: - 表示未检出。

3.2 树干茎流的养分特征

3.2.1 树干茎流中养分元素含量的季节变化 总的来说,养分元素含量的季节变化较大且与降水季节大致关联,但不同元素的关联程度和变幅又各异。通过分析表 2 的数据可知,4 个树种(樟树、火炬松、榿栎、醉香含笑)各养分元素的含量虽然上下起伏,但规律比较明显,表现为雨季含量低,旱季含量高。试验地从 7—10 月份期间就处于温度高、辐射强、空气湿度小、林冠干燥、环境蒸散大的状态,降水量相对较低,而 11—3 月冬春季期间,同样是干旱少雨,致使树体表面颗粒物积累时间较长,大气悬浮物质较多,降水洗脱的干沉降物较多,故 10 月和 2 月(2004 年)两次取样的养分元素含量明显高于其它各月,而 4—6 月的春夏季期间,正值试验地的雨季,降水集中、雨量较大,大气或树木表面颗粒物被大量淋失或稀释,故茎流中养分元素含量较低,各月养分元素含量差异不大。这一现象与其它地区的其它树种表现相类似,如湖南会同地区常绿阔叶林主要树种,刨花楠、红栲、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*

(Thunb.) Oerst) 等,针叶树种杉木人工林^[8];寒温带长白山地区红松云冷杉林^[9]等。

相关研究国内外均有报道,如雷电明显增加降水中养分的含量,特别是林冠上层的低空放电使降水中 N 的含量增加 3~5 倍。人类活动和工业污染正在改变大气养分输入的数量,在工业发达和城市近郊区域大气氮素的沉降量显著高于不受人为活动干扰情况下的输入量^[10,11],统计数字显示,我国南方地区大气氮素混合沉降量在 $6.6 \sim 23.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,北方地区(华北、东北、西北地区)在 $5.1 \sim 25.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,而在不受人为活动干扰的情况下,大气氮素的沉降量仅为 $1.8 \sim 3.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,德国西部的 Solling 试验点 N 的降水输入高达 $23 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[12],牧场和泥土公路附近 Ca 的输入较高^[13]。

3.2.2 不同树种间树干茎流养分元素含量的变化 为了避免受到极端值的影响,4 个树种树干茎流养分元素平均含量采用截尾平均数,即将 2003 年 4 月至 2004 年 7 月共 12 个月实验数据由小到大排

表 2 4个树种树干茎流养分元素含量

 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

| 树种 | 时间 | $\text{NO}_3\text{-N}$ | $\text{NH}_4\text{-N}$ | P | K | Ca | Mg | Cu | SiO_2 | Fe | Zn | Mn |
|------------|------------|------------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| 樟树 | 2003-04-04 | 3.086 | 41.060 | 0.936 | 58.775 | 24.419 | 49.235 | - | 9.820 | - | 1.376 | 1.711 |
| | 2003-05-11 | 2.123 | 103.076 | 0.538 | 61.912 | 15.969 | 3.113 | - | 15.145 | - | 2.467 | 0.534 |
| | 2003-06-23 | 19.329 | 122.848 | 4.956 | 116.706 | 39.747 | 14.709 | - | 20.971 | - | 4.388 | 1.074 |
| | 2003-07-14 | 12.330 | 243.562 | 0.872 | 191.287 | 205.948 | 33.265 | 0.252 | 70.742 | 0.358 | 1.483 | 1.438 |
| | 2003-08-05 | 9.725 | 586.800 | 3.455 | 149.367 | 62.678 | 20.942 | 0.205 | 28.959 | 0.358 | 0.550 | 1.875 |
| | 2003-10-13 | 28.353 | 247.360 | 1.856 | 239.908 | 375.268 | 117.939 | 0.299 | 63.369 | 0.403 | 4.632 | 4.660 |
| | 2004-02-18 | 69.003 | 444.217 | 3.535 | 182.783 | 512.775 | 99.650 | 0.252 | 58.734 | 2.050 | 14.142 | 12.660 |
| | 2004-03-23 | 7.448 | 40.402 | 1.763 | 47.501 | 37.383 | 5.997 | 0.470 | 22.851 | 5.137 | 5.613 | - |
| | 2004-04-17 | 13.867 | 195.793 | 1.246 | 152.331 | 165.805 | 29.250 | 1.503 | 27.954 | 7.924 | 1.884 | - |
| | 2004-05-15 | 6.487 | 36.498 | 0.858 | 51.632 | 19.795 | 9.445 | 0.135 | 45.138 | 2.446 | - | - |
| | 2004-06-21 | 2.494 | 47.036 | 1.433 | 132.796 | 64.757 | 25.263 | - | 47.576 | 0.211 | - | - |
| 2004-07-16 | 3.865 | 234.318 | 2.918 | 114.170 | 247.729 | 14.496 | 0.382 | 30.121 | - | 4.370 | 3.137 | |
| 火炬松 | 2003-04-04 | 5.935 | 123.126 | 0.323 | 33.889 | 28.794 | 2.510 | - | 106.367 | - | 11.849 | - |
| | 2003-05-11 | 6.516 | 227.403 | 0.710 | 185.149 | 39.423 | 4.238 | - | 29.259 | - | 1.758 | - |
| | 2003-06-23 | 5.435 | 398.869 | 0.743 | 162.309 | 99.905 | 34.273 | 0.142 | 31.656 | - | 5.764 | 5.260 |
| | 2003-07-14 | 5.225 | 197.577 | 0.517 | 147.091 | 81.466 | 26.867 | - | 20.554 | - | - | - |
| | 2003-08-05 | 12.564 | 528.148 | 3.455 | 111.821 | 40.271 | 8.064 | 0.252 | 29.442 | 0.555 | 10.855 | 1.201 |
| | 2003-10-13 | 24.853 | 774.067 | 6.651 | 131.310 | 441.464 | 83.028 | 0.535 | 115.321 | 0.233 | 12.047 | 15.636 |
| | 2004-02-18 | 52.496 | 641.151 | 10.170 | 152.283 | 507.910 | 190.125 | 1.983 | 89.141 | 3.635 | 13.209 | 13.870 |
| | 2004-03-23 | 14.434 | 352.136 | 6.554 | 98.495 | 223.190 | 33.532 | 1.341 | 92.287 | 2.417 | 3.868 | 4.605 |
| | 2004-04-17 | 7.870 | 152.341 | 1.743 | 46.063 | 139.004 | 24.810 | 2.833 | 75.028 | 4.674 | 0.275 | - |
| | 2004-05-15 | 6.870 | 86.925 | 2.938 | 32.047 | 16.393 | 5.801 | 0.142 | 73.014 | 1.826 | - | - |
| | 2004-06-21 | 17.466 | 228.234 | 0.517 | 57.598 | 75.752 | 19.872 | - | 53.858 | 1.415 | 2.890 | 2.821 |
| 2004-07-16 | 21.998 | 805.499 | 10.590 | 128.420 | 145.591 | 6.789 | - | 25.031 | - | 3.486 | 1.438 | |
| 榿栎 | 2003-04-04 | 6.516 | 108.158 | 1.162 | 54.708 | 18.140 | 1.029 | - | 19.855 | - | 0.535 | - |
| | 2003-05-11 | 2.226 | 122.294 | 0.839 | 47.240 | 26.324 | 5.719 | - | 80.038 | - | 15.365 | 1.675 |
| | 2003-06-23 | 26.175 | 235.385 | 4.423 | 108.163 | 63.252 | 17.898 | - | 24.399 | - | 0.443 | 1.383 |
| | 2003-07-14 | 2.838 | 744.408 | 1.195 | 104.250 | 232.272 | 36.124 | 0.283 | 288.245 | 0.519 | 1.697 | 3.640 |
| | 2003-08-05 | 16.273 | 191.923 | 4.940 | 82.484 | 79.345 | 10.862 | 0.205 | 8.788 | 1.486 | 0.963 | 1.438 |
| | 2003-10-13 | 24.901 | 327.743 | 1.195 | 205.533 | 638.056 | 118.988 | 0.441 | 75.361 | 2.238 | 8.332 | 14.635 |
| | 2004-02-18 | 20.595 | 259.833 | 3.067 | 144.022 | 358.701 | 64.925 | 0.330 | 42.074 | 1.128 | 4.648 | 8.045 |
| | 2004-03-23 | 2.193 | 49.893 | 1.937 | 67.957 | 69.664 | 9.751 | 1.558 | 42.191 | 4.906 | 2.553 | - |
| | 2004-04-17 | 21.111 | 345.040 | 4.617 | 120.900 | 159.389 | 19.296 | 2.707 | 41.775 | 5.838 | 1.865 | - |
| | 2004-05-15 | 10.967 | 70.516 | 0.613 | 42.611 | 25.550 | 8.270 | 0.142 | 55.023 | 1.826 | - | - |
| | 2004-06-21 | 11.048 | 118.136 | 0.904 | 100.286 | 187.335 | 16.869 | - | 67.988 | 1.415 | 5.336 | 4.460 |
| 2004-07-16 | 12.789 | 420.101 | 3.390 | 193.768 | 348.770 | 10.039 | 0.220 | 35.933 | - | 1.468 | 3.677 | |
| 醉香含笑 | 2003-04-04 | 2.790 | 79.219 | 0.613 | 25.832 | 4.242 | 0.535 | - | 14.213 | - | 0.657 | - |
| | 2003-05-11 | 5.096 | 95.961 | 0.549 | 29.157 | 10.779 | 0.741 | - | 51.827 | - | 3.318 | - |
| | 2003-06-23 | 10.531 | 79.109 | 3.519 | 64.197 | 20.610 | 4.608 | - | 36.981 | - | 3.792 | 0.255 |
| | 2003-07-14 | 7.016 | 197.356 | 0.743 | 127.243 | 174.160 | 24.892 | 0.563 | 45.370 | 0.358 | 3.715 | 2.403 |
| | 2003-08-05 | 8.193 | 282.673 | 2.518 | 62.100 | 16.817 | 23.082 | 0.205 | 62.063 | 0.281 | 1.376 | - |
| | 2003-10-13 | 26.014 | 180.946 | 0.904 | 87.497 | 172.688 | 32.709 | 0.157 | 71.366 | 17.029 | 2.859 | 2.239 |
| | 2004-02-18 | 93.896 | 437.564 | 4.488 | 261.981 | 316.732 | 114.174 | 0.834 | 94.451 | 26.967 | 15.579 | 11.577 |
| | 2004-03-23 | 37.916 | 236.439 | 6.941 | 109.033 | 140.252 | 17.363 | 0.614 | 59.283 | 6.966 | 10.794 | 3.932 |
| | 2004-04-17 | 14.855 | 162.349 | 0.299 | 22.153 | 67.915 | 6.176 | 1.984 | 44.326 | 5.137 | 10.411 | 3.531 |
| | 2004-05-15 | 3.375 | 29.949 | 0.339 | 19.604 | 100.429 | 1.251 | 0.135 | 34.799 | 0.783 | 7.507 | - |
| | 2004-06-21 | 5.061 | 22.747 | 0.773 | 59.296 | 89.902 | 16.269 | 0.063 | 60.133 | 0.727 | 7.790 | 2.120 |
| 2004-07-16 | 8.398 | 288.479 | 1.585 | 127.007 | 230.970 | 4.242 | - | 14.853 | - | 1.474 | - | |

注: -表示未检出。

列,排名第 1/4 的值为 Q_1 ,称为第 1 个四分位数,排名第 2/4 的值为 Q_2 ,称为第 2 个四分位数,排名第

3/4的值为 Q_3 ,称为第 3 个四分位数。将 Q_1 以下的数值和 Q_3 以上的数值排除,剩下的数值取其平均,就截尾平均数。由表 3可知,在降水相同的条件下,树种不同,树干茎流中各养分元素的含量明显不同,种间差异显著。其中 4 个树种树干茎流养分元素平均含量的排列顺序分别为樟树 $NH_4-N > K > Ca > SO_2 > Mg > NO_3-N > Zn > Mn > P > Fe > Cu$;火炬松 $NH_4-N > K > Ca > SO_2 > Mg > NO_3-N > Zn > Mn > P > Fe > Cu$;榲栌 $NH_4-N > Ca > K > SO_2 > Mg > NO_3-N$

$>Mn > Zn > P > Fe > Cu$;醉香含笑 $NH_4-N > Ca > K > SO_2 > Mg > NO_3-N > Zn > Fe > Mn > P > Cu$ 。按总含量值排序依次为火炬松、榲栌、樟树、醉香含笑。出现这种情况主要原因是树种不同,叶片构造、表面质地不同对尘埃颗粒的吸附和持水时间长短的不同,其次是不同树种的各项生理活动也不同,导致叶片细胞组分、分泌物,叶片衰老、凋落时期等的不同。与刘世海等^[14]的研究结果相似。

表 3 不同树种树干茎流中养分元素平均含量

 $\mu mol \cdot L^{-1}$

| 树种 | NO_3-N | NH_4-N | P | K | Ca | Mg | Cu | SO_2 | Fe | Zn | Mn | 总含量 |
|------|----------|----------|-------|---------|---------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|
| 樟树 | 8.954 | 157.772 | 1.692 | 121.214 | 96.053 | 22.987 | 0.296 | 33.767 | 1.123 | 3.277 | 2.040 | 449.175 |
| 火炬松 | 10.953 | 322.061 | 2.690 | 112.456 | 96.998 | 19.989 | 0.709 | 58.690 | 1.886 | 5.993 | 4.229 | 636.655 |
| 榲栌 | 13.031 | 209.219 | 1.991 | 97.340 | 131.876 | 14.119 | 0.319 | 47.497 | 1.741 | 2.446 | 3.363 | 522.943 |
| 醉香含笑 | 9.015 | 158.712 | 1.189 | 68.547 | 98.633 | 11.957 | 0.385 | 49.653 | 3.403 | 4.830 | 2.724 | 409.048 |

3.2.3 树干茎流中不同养分元素含量的变化 由表 4可知,4 个树种茎流中不同养分元素的相对含量也表现出较大的差别,不同树种树干茎流总养分含量中, NO_3-N 占 1.720% ~ 2.492%, NH_4-N 占 38.800% ~ 50.586%,P占 0.291% ~ 0.423%,K占 16.758% ~ 26.986%,Ca占 15.236% ~ 25.218%,Mg占 2.700% ~ 5.118%,Cu占 0.066% ~ 0.111%, SO_2 占 7.517% ~ 12.139%,Fe占 0.250% ~ 0.832%,Zn占 0.468% ~ 1.181%,Mn占 0.454% ~ 0.666%。虽然各养分元

素含量变化很大,但总的分布趋势是一致的,即 NH_4-N 、Ca、K、 SO_2 含量高,Mg、 NO_3-N 、Zn、Mn含量居中,P、Fe、Cu含量最低。无机态 N以 NH_4-N 为主, NH_4-N 的含量约为 NO_3-N 的 19.6倍。大量元素中, NH_4-N 含量最高,P最低;微量元素中,Zn含量最高,Cu最低。值得注意的是 P,它是植物生长所必需的营养要素,但含量却相当低。这与亚热带杉木幼林^[15]、锐齿栎林^[16]、亚热带常绿阔叶林和杉木人工林^[8]茎流的研究结果相似。

表 4 不同树种树干茎流养分元素的相对含量

%

| 树种 | NO_3-N | NH_4-N | P | K | Ca | Mg | Cu | SO_2 | Fe | Zn | Mn |
|------|----------|----------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 樟树 | 1.993 | 35.125 | 0.377 | 26.986 | 21.384 | 5.118 | 0.066 | 7.517 | 0.250 | 0.730 | 0.454 |
| 火炬松 | 1.720 | 50.586 | 0.423 | 17.664 | 15.236 | 3.140 | 0.111 | 9.218 | 0.296 | 0.941 | 0.664 |
| 榲栌 | 2.492 | 40.008 | 0.381 | 18.614 | 25.218 | 2.700 | 0.061 | 9.083 | 0.333 | 0.468 | 0.643 |
| 醉香含笑 | 2.204 | 38.800 | 0.291 | 16.758 | 24.113 | 2.923 | 0.094 | 12.139 | 0.832 | 1.181 | 0.666 |

3.3 降水中养分含量及淋洗量

受降水的强度、季节、降水水量、持续时间、降水间隔、环境条件、气象条件、植物体生理活动,叶片表面、树皮表面以及降水中离子、固体颗粒或气体的吸附或吸收等因素的影响,大气降水、树干茎流中各养分元素的含量产生较大变化^[17,18]。由表 5可知,大气降水中养分元素变动系数最大的是 Mg;在这 4 个树种的茎流中变动系数最大的元素分别是,樟树为

Fe;火炬松为 Mg;榲栌为 Cu;醉香含笑为 Fe。变动系数最小的元素分别是,樟树、火炬松、榲栌为 K;醉香含笑为 SO_2 ,这表明樟树、火炬松、榲栌对 K;醉香含笑对 SO_2 的吸附、吸收、淋洗处于一个相对平衡稳定的过程。与大气降水相比,4 个树种树干茎流中除 NH_4-N 、K的变动系数都小于大气降水,Ca、Cu、Fe、Zn、Mn的变动系数都大于大气降水。

表 5 大气降水、树干茎流中养分元素含量

| 项目 | | NO ₃ -N | NH ₄ -N | P | K | Ca | Mg | Cu | SiO ₂ | Fe | Zn | Mn |
|------|----|--------------------|--------------------|-------|---------|---------|--------|-------|------------------|-------|--------|-------|
| 大气降水 | X | 7.591 | 60.879 | 0.886 | 25.188 | 64.504 | 4.239 | 0.299 | 41.572 | 3.176 | 34.753 | 1.031 |
| | S | 8.378 | 84.172 | 0.991 | 37.094 | 59.200 | 9.368 | 0.187 | 21.416 | 2.545 | 14.864 | 1.117 |
| | Cv | 1.104 | 1.383 | 1.119 | 1.473 | 0.918 | 2.210 | 0.626 | 0.515 | 0.801 | 0.428 | 1.083 |
| 樟树 | X | 8.954 | 157.772 | 1.692 | 121.214 | 96.053 | 22.987 | 0.296 | 33.767 | 1.123 | 3.277 | 2.040 |
| | S | 18.749 | 173.345 | 1.377 | 61.996 | 161.143 | 36.844 | 0.443 | 19.889 | 2.809 | 3.916 | 3.965 |
| | Cv | 2.094 | 1.099 | 0.814 | 0.511 | 1.678 | 1.603 | 1.496 | 0.589 | 2.501 | 1.195 | 1.943 |
| 火炬松 | X | 10.953 | 322.061 | 2.690 | 112.456 | 96.998 | 19.989 | 0.709 | 58.690 | 1.886 | 5.993 | 4.229 |
| | S | 13.559 | 254.193 | 3.814 | 53.160 | 161.793 | 53.185 | 1.055 | 34.324 | 1.607 | 4.877 | 5.917 |
| | Cv | 1.238 | 0.789 | 1.417 | 0.473 | 1.668 | 2.661 | 1.488 | 0.585 | 0.852 | 0.814 | 1.399 |
| 槲栎 | X | 13.031 | 209.219 | 1.991 | 97.340 | 131.876 | 14.119 | 0.319 | 47.497 | 1.741 | 2.446 | 3.363 |
| | S | 8.714 | 194.983 | 1.634 | 53.445 | 186.564 | 33.778 | 0.919 | 73.581 | 1.905 | 4.498 | 4.515 |
| | Cv | 0.669 | 0.932 | 0.821 | 0.549 | 1.415 | 2.392 | 2.885 | 1.549 | 1.094 | 1.839 | 1.343 |
| 醉香含笑 | X | 9.015 | 158.712 | 1.189 | 68.547 | 98.633 | 11.957 | 0.385 | 49.653 | 3.403 | 4.830 | 2.724 |
| | S | 25.886 | 123.109 | 2.073 | 68.667 | 98.280 | 31.420 | 0.635 | 22.826 | 9.779 | 4.638 | 3.658 |
| | Cv | 2.871 | 0.776 | 1.743 | 1.002 | 0.996 | 2.628 | 1.650 | 0.460 | 2.873 | 0.960 | 1.343 |

注: X、S 和 Cv 分别表示截尾平均值、标准差和变动系数

大气降水在形成茎流的过程中与林冠层的枝叶、树皮的直接接触,不仅淋洗了林冠层和树皮表面吸附的尘埃颗粒,而且淋洗了叶片上的分泌物,致使茎流中养分元素的含量发生较大变化^[19]。表 6 列出了 4 个树种树干茎流与大气降水的比较结果,其中,净淋洗为树干茎流与大气降水养分浓度的差值,淋洗系数为树干茎流的养分浓度除以大气降水养分浓度。表 6 的结果表明,4 个树种茎流共同表现为,Cu 的含量变化较小,其它元素含量均有较大的变化,其中樟树茎流中 Zn, SiO₂, Fe, Cu; 火炬松、

槲栎茎流中 Zn, Fe; 醉香含笑茎流中 Zn 为负淋洗,对 Zn 的负淋洗表现的尤为显著。表明植物体对这些元素进行了吸收,而其它元素的含量均有所增加,这与樊后保^[20]、刘世海^[21]、陶豫萍等^[22]的研究结果相似。4 个树种茎流中淋洗量大的元素均为 NH₄-N、K、Ca。主要是因为 K 的溶解度高,大气降水在经过林冠层和树干时容易被淋洗的缘故;NH₄-N 的含量高与试验地春夏季节雷雨天(放电)较多有关;Ca 的含量高与林分对尘埃等固体颗粒及有机物的大量吸附有关。

表 6 树干茎流净淋洗的养分含量(μmol·L⁻¹)和淋洗系数

| 项目 | NO ₃ -N | NH ₄ -N | P | K | Ca | Mg | Cu | SiO ₂ | Fe | Zn | Mn | |
|------|--------------------|--------------------|---------|-------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|---------|-------|
| 樟树 | 树干茎流净淋洗量 | 1.363 | 96.893 | 0.806 | 96.025 | 31.549 | 18.748 | -0.003 | -7.805 | -2.053 | -31.476 | 1.009 |
| | 树干茎流淋洗系数 | 1.180 | 2.592 | 1.910 | 4.812 | 1.489 | 5.422 | 0.991 | 0.812 | 0.354 | 0.094 | 2.084 |
| 火炬松 | 树干茎流净淋洗量 | 3.363 | 261.182 | 1.805 | 87.267 | 32.495 | 15.750 | 0.410 | 17.118 | -1.290 | -28.760 | 3.198 |
| | 树干茎流淋洗系数 | 1.443 | 5.290 | 3.038 | 4.465 | 1.504 | 4.715 | 2.372 | 1.412 | 0.594 | 0.172 | 4.100 |
| 槲栎 | 树干茎流净淋洗量 | 5.441 | 148.340 | 1.105 | 72.152 | 67.373 | 9.880 | 0.020 | 5.925 | -1.435 | -32.307 | 2.331 |
| | 树干茎流淋洗系数 | 1.717 | 3.437 | 2.248 | 3.864 | 2.044 | 3.331 | 1.066 | 1.143 | 0.548 | 0.070 | 3.260 |
| 醉香含笑 | 树干茎流净淋洗量 | 1.424 | 97.832 | 0.304 | 43.358 | 34.129 | 7.717 | 0.086 | 8.081 | 0.227 | -29.923 | 1.693 |
| | 树干茎流淋洗系数 | 1.188 | 2.607 | 1.343 | 2.721 | 1.529 | 2.820 | 1.287 | 1.194 | 1.071 | 0.139 | 2.641 |

大气降水透过树木冠层形成树干茎流后,雨水中的营养元素的含量与淋洗量取决于以下几个相互联系的理化过程:降水期间雨水中营养元素向林冠的输入;截留雨水的蒸散;植物组织渗出物的淋洗;雨水对未降水期间林冠上沉积物的冲洗;枝叶、体表对溶液中离子、固体颗粒或气体的吸附或吸收^[23]。当淋洗作用大于吸收、吸附作用,则林内雨中养分元素含量增高,出现养分富集,净淋洗量为

正;当吸收、吸附大于洗脱、淋洗作用,则净淋洗量为负。淋洗系数的大小排列序列分别为,樟树 Mg > K > NH₄-N > Mn > P > Ca > NO₃-N > Cu > SiO₂ > Fe > Zn; 火炬松 NH₄-N > Mg > K > Mn > P > Cu > Ca > NO₃-N > SiO₂ > Fe > Zn; 槲栎 K > NH₄-N > Mg > Mn > P > Ca > NO₃-N > SiO₂ > Cu > Fe > Zn; 醉香含笑 Mg > K > Mn > NH₄-N > Ca > P > Cu > SiO₂ > NO₃-N > Fe > Zn。

4 小结

(1) 大气降水中 Ca 元素含量的平均值最高, 为 $64.504 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, Cu 元素含量最低, 仅为 $0.299 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 最高与最低相差 215.7 倍。降水中各养分元素平均含量排列顺序为: $\text{Ca} > \text{NH}_4\text{-N} > \text{SiO}_2 > \text{Zn} > \text{K} > \text{NO}_3\text{-N} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Cu}$ 。不同月份大气降水养分元素含量不同, 除 Cu、 SiO_2 、Mn 的含量变化较小外, 其它各元素含量的变化较大, 尤以 Mg 明显。

(2) 4 个树种茎流中各养分元素的含量虽然上下起伏, 但规律比较明显, 表现为雨季含量低, 旱季含量高。大多数元素含量随降水季节不仅表现出明显的季节动态变化, 而且年际差异显著, 在两个实验年度中, 樟树变幅最大的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 相差达 7.74 倍; 火炬松变幅最大的 Zn 相差达 43.06 倍; 榲栌变幅最大的 Mg 相差达 18.76 倍; 醉香含笑变幅最大的 Ca 相差达 16.01 倍。在降水相同的条件下, 树种不同, 树干茎流中各养分元素的含量明显不同, 种间差异显著, 各树种茎流中 P、Fe、Cu 次序变化不大, 其它元素均有较大的变动。树种茎流之间不同养分元素的相对含量也表现出较大的差别, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Ca、K、 SiO_2 含量较高, Mg、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、Zn、Mn 含量居中, P、Fe、Cu 含量较低。养分中无机态 N 以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为主, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的含量约为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的 19.6 倍。大量元素中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量最高, P 最低; 微量元素中, Zn 含量最高, Cu 最低。值得注意的是 P, 它是植物生长所必需的营养要素, 但含量却相当低。

(3) 大气降水中养分元素变动系数最大的元素是 Mg, 4 个树种茎流中变动系数最大的元素分别是, 樟树为 Fe; 火炬松为 Mg; 榲栌为 Cu; 醉香含笑为 Fe; 变动系数最小的元素分别是, 樟树、火炬松、榲栌为 K; 醉香含笑为 SiO_2 。与大气降水相比, 4 个树种树干茎流中除 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、K 的变动系数都分别小于大气降水外, 一般均比大气降水大。大气降水在形成茎流的过程中, 4 个树种茎流共同表现为, Cu 的含量变化较小, 其它元素含量均有较大的变化, 其中樟树茎流中 Zn、 SiO_2 、Fe、Cu; 火炬松、榲栌茎流中 Zn、Fe; 醉香含笑茎流中 Zn 为负淋洗, 4 个树种对 Zn 的负淋洗表现的尤为显著。

参考文献:

- [1] Lindberg S E, Lovett G M, Richter D D, *et al* Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest[J]. Science, 1986, 231: 141 ~ 145
- [2] 李凌浩. 武夷山甜槠林生态系统的养分平衡研究[J]. 植物生态学报, 1998, 22(3): 193 ~ 201
- [3] Park G G Through-fall and Stem-flow in the forest nutrient cycle [J]. Adv Ecol Res, 1983, 13: 57 ~ 134
- [4] Martinez Meza E, Whitford W G Stem-flow, through-fall and channelization of Stem-flow by roots in three Chihuahuan desert shrubs [J]. J Arid Environ, 1996, 32: 271 ~ 281
- [5] 马雪华. 在杉木林和马尾松林中雨水的养分淋溶作用[J]. 生态学报, 1989, 9(1): 15 ~ 20
- [6] 马雪华. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1994: 187 ~ 190
- [7] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学与技术出版社, 1978: 388 ~ 411
- [8] 于小军, 汪思龙, 邓仕坚, 等. 亚热带常绿阔叶林和杉木人工林茎流和穿透雨的养分特征[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 7 ~ 11
- [9] 程伯容, 许广山, 耿晓源, 等. 长白山红松冷杉林生态系统中穿透雨的养分输入[J]. 应用生态学报, 1993, 4(4): 447 ~ 449
- [10] Holland E A, Dentener F J, Raswell B H, *et al* Contemporary and per-industrial global reactive nitrogen budgets[J]. Biogeochemistry, 1999, 46: 7 ~ 43
- [11] 张颖, 刘学军, 张福锁, 等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1633 ~ 1639
- [12] Schroth G M, Elias K, Uguen R, *et al* Nutrient fluxes in rain-fall, through-fall and stem-flow in tree-based land use systems and spontaneous tree vegetation of central Amazonia[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 87: 37 ~ 49
- [13] Bames B V, Zak D R, Denton S R, *et al* Forest Ecology(4th edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998: 488 ~ 489
- [14] 刘世海, 余新晓. 北京密云水库库区水源涵养林冠层水文特征研究[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 194 ~ 197
- [15] 田大伦, 项文化, 杨晚华. 第二代杉木幼林生态系统水化学特征[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 859 ~ 865
- [16] 雷瑞德, 吕喻良. 锐齿栎林生态系统对水质的影响及评价[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(4): 1 ~ 4
- [17] Jesus R A, Jimenez M S, Domingo M, *et al* Net below canopy fluxes in *Canarian laurel* forest canopies[J]. Journal of Hydrology, 2002, 264: 201 ~ 212
- [18] Hou B F, Wei H. Estimation of dry deposition and canopy exchange in Chinese fir plantation[J]. Forest Ecol Manag, 2001, 147: 99 ~ 107
- [19] Draaijers G P J, Erisman J W, Van Leeuwen N F M, *et al* The impact of canopy exchange on differences observed between atmospheric deposition and throughfall fluxes[J]. Atmos Environ, 1997, 31(3): 387 ~ 397
- [20] 樊后保. 杉木林截留对降水化学的影响[J]. 林业科学, 2000, 36(4): 2 ~ 8
- [21] 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水化学元素性质研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 697 ~ 700
- [22] 陶豫萍, 吴宁, 罗鹏, 等. 森林对污染物湿沉降过滤作用的研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(3): 16 ~ 23
- [23] 刘世荣, 王兵, 周光益, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 236 ~ 245