

亚热带常绿阔叶林降雨中可溶性碳氮动态 及其对模拟氮沉降的响应

张萌新^{1,2}, 朱琳琳^{1,2}, 杨佳^{1,2}, 赵阳¹, 徐小牛^{1,2*}

(1. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036; 2. 大别山区农林特色产业协同创新中心, 合肥 230036)

摘要:通过模拟大气氮沉降,对安徽祁门查湾自然保护区亚热带常绿阔叶林大气降雨及穿透雨进行持续监测,探讨森林降雨中可溶性有机碳、氮动态对大气氮沉降的响应。本试验设置了2个处理即高氮处理和无添加对照。结果表明,降雨中水溶性有机碳(TOC)年平均含量为 $3.204 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $0.243 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 $0.408 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 可溶性有机氮(DON)为 $0.754 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经过森林林冠淋洗后,穿透雨中 TOC 年平均浓度达 $5.623 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对照林分($5.923 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 高氮处理($5.322 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 年平均浓度为 $0.285 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对照($0.273 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) < 高氮处理($0.297 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 年平均浓度为 $0.509 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对照($0.523 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 高氮处理($0.494 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); DON 年平均浓度为 $0.691 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对照($0.665 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) < 高氮处理($0.716 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。降雨经过林冠层后, TOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均有明显提高,但 DON 的含量有所下降;短期的模拟氮沉降对穿透雨可溶性碳和氮没有显著影响。大气降雨中 TOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DON 含量的季节变化明显,主要受控于降雨强度、降雨量,穿透雨的变化可能和树木的生理需求程度有关。

关键词: 大气降雨; 穿透雨; 可溶性有机碳; 氮; 亚热带森林

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2014)04-0624-05

Dynamics of dissolved carbon and nitrogen in rainfalls and its response to simulated nitrogen deposition in a subtropical evergreen broad-leaved forest

ZHANG Mengxin^{1,2}, ZHU Linlin^{1,2}, YANG Jia^{1,2}, ZHAO Yang¹, XU Xiaoniu^{1,2}

(1. School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Collaborative Innovation Center of Agro-forestry Industry in Dabieshan Area, Hefei 230036)

Abstract: An experiment including a high-nitrogen (N) treatment ($100 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) and a nitrogen-free control was conducted to investigate the seasonal dynamic patterns of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) in a subtropical evergreen broad-leaved forest for one and a half years in Zhawan Natural Reserve, Anhui Province. The results showed that an average concentration of DOC, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ or DON in annual precipitation was 3.204, 0.243, 0.408, and $0.754 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. After passing through the forest canopy, the concentrations of aforementioned components in annual rainfalls were significantly changed. The concentration of DOC in rainfalls increased to $5.623 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which was greater than that in the high-nitrogen treatment ($5.322 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (the nitrogen-free control was $5.923 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). In annual rainfalls that passed through the forest canopy, other compounds were also changed. For examples, annual average concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ increased to $0.285 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which was higher than that of the control ($0.273 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), but lower than that of the high-nitrogen treatment ($0.297 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). The concentration of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ increased to $0.509 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which was lower than the control ($0.523 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and higher than in the high-nitrogen treatment ($0.494 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). However, the concentration of DON decreased to $0.691 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, while DON concentrations in the high-nitrogen treatment and the nitrogen-free control were $0.716 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.665 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The results demonstrated that short-term simulated N deposition had no significant effect on DOC and DON in the rainfalls that were passing through the

收稿日期: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370626和30771719)和“973”计划(2010CB950602)共同资助。

作者简介: 张萌新, 硕士研究生。E-mail: 764662722@qq.com

* 通信作者: 徐小牛, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: xnxu2007@ahau.edu.cn

forest canopy at the experimental site. The seasonal changes of chemical components in rainfalls were mainly controlled by the amount and intensity of rainfalls; however, such changes in the passing-through rainfalls were likely related to physiological nutrient acquisition of trees.

Key words: rainfall; throughfall; dissolved organic carbon; nitrogen; subtropical forest

近年来, 全球气候变化日益加剧, 改变了全球降水分配格局, 这是引起世界范围内淡水资源危机的重要原因之一^[1]。森林是陆地生态系统的主体, 森林与水的关系研究, 一直以来都是森林水文学的核心议题^[2]。降雨通过森林植被系统, 其雨水化学组成及其浓度会发生很大变化, 这种变化是生态系统养分循环的重要组成部分^[3]。同时, 森林是陆地生态系统中最大的碳库, 目前碳循环研究主要集中在森林土壤和植被, 很少涉及系统内部以水为媒介的碳循环研究^[4]。森林生态系统降雨过程中的碳动态变化是其系统功能的重要表现, 对此研究可更好地了解碳及其他元素在系统内部以水为介质的分配和迁移规律^[4]。降雨中所含碳大多是水溶性碳——碳素中最活跃的组成部分, 可分为溶解性有机碳(TOC)和无机碳(IC)。其中 TOC 与一些重金属元素的沉积迁移有关^[5-6], 在碳循环和生物地球化学循环中占有重要地位。因此, TOC 在森林生物地球化学循环中起着重要作用。

长期以来, 氮素被认为是森林初级生产力的限制性养分因子。但随着工农业生产和能源利用过程中氮化合物排放量的增多, 使大气氮沉降量显著增加。有些地区氮沉降量超过了森林的需求, 导致土壤酸化, 系统养分平衡失调^[7-8]。而且, 过高的大气氮沉降会增加土壤氮素矿化作用特别是硝化作用和集水区氮素的输出, 以致改变树木的生理状态及种间竞争动态, 进而导致地力衰退, 削弱树木对环境胁迫的抗性, 破坏森林生态系统的结构和功能, 对森林生态系统构成严重威胁^[9]。大气沉降氮从林冠层输入生态系统, 直接与冠层发生作用。在生长季, 森林冠层能有效地吸收一部分氮。但是, 当大气氮沉降超过森林对氮的需求时, 冠层氮素吸收状况、森林水文化学过程便发生变化。近年来对森林水文过程中氮动态及林区大气降雨和穿透雨养分含量的研究愈来愈受到广泛重视^[10-12]。目前针对我国亚热带北部大气氮沉降及常绿阔叶林水文化学特点的研究甚少^[13]。为此, 本研究就安徽祁门查湾自然保护区亚热带常绿阔叶林的降水化学特点及其对模拟氮沉降的响应进行了监测和分析, 以探讨森林水文过程中碳、氮的迁移规律和循环特点, 为生态功能评价和森林科学经营提供依据。

1 研究区概况和方法

1.1 研究地概况

安徽祁门查湾自然保护区位于皖南山区最南端, 与江西省景德镇的金竹山、瑶里两乡接壤, 地处东经 117°33', 北纬 29°35', 全区面积 1600 hm², 保护区属黄山余脉的南向延伸, 低山山麓为主要地貌, 海拔 120~670 m。森林植被是主要以甜槠(*Castanopsis eyrei*) 为优势种的常绿阔叶混交林。由于受太平洋东南季风的影响, 雨量充沛, 空气湿度高, 年平均气温 16.6℃, 极端高温 39℃, 极端低温 -7℃, 年平均降水量为 1790 mm, 平均相对湿度达 85%。调查区土壤类型高海拔坡地为山地黄壤, 低海拔为红黄壤, 均呈酸性。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 试验设置 2 个处理类型, 分别为高氮添加处理、无添加对照。选择林相整齐、近 20 年来无人经营干扰的成熟林, 考虑到立地条件和林分结构的一致性, 设置 4 个面积为 40 m×30 m 的样地, 每个样地又区划为 2 个 20 m×30 m 的大样方, 使得每个处理 4 次重复。相邻样地间留有 10 m 的缓冲带, 以防止相互干扰。高氮添加处理选用 NH₄NO₃, 在生长季节内分 3 次(5 月、7 月、9 月)施用, 总添加剂量为 100 kg·hm⁻²·a⁻¹。先将 NH₄NO₃ 溶于 40 L 水混合均匀, 用背式喷雾器均匀喷洒到对应样方地表, 对照样地喷洒等量的溪水。在林外空旷、无人干扰处设置 2 个大气降雨采集点。

各样地分别随机设置 2 个雨水收集器, 于 2012 年 1 月开始定期(通常情况下每月 2 次, 雨季期间多次)收取雨水样品。雨水收集器是将一个圆形漏斗(直径为 30 cm)下接一个聚乙烯塑料桶(10 L), 漏斗内放置过滤纱网, 漏斗和塑料桶连接处用塑料薄膜包裹, 以防雨水、树叶和昆虫等进入。每次雨水收集后, 清洗收集器, 以防污染。

1.2.2 化学分析 所采集的水样带回实验室后, 分取部分样品, 利用 METTLER TOLEDO 型 pH 计测定其 pH 值, 用 HORIBAB-173 型电导仪测其电导率。其余的样品经 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤后, 置于 4℃低温贮藏柜中保存, 供化学分析。NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量采用 FIASStar 5000 型自动流动注射

分析仪测定, TOC 及溶解性氮 (DON) 采用 Multi N/C-3100 型 TOC 分析仪测定。运用 Excel 处理数据, Spss17.0 做差异性分析。

2 结果与分析

2.1 降雨量变化

观测期间, 大气降雨量 2012 年 8 月最高, 月降雨量达 323.7 mm (图 1), 秋、冬季降雨少, 10 和 12 月无明显降雨。全年大气降雨总量为 1875.9 mm, 其中 5~8 月降雨量占年降雨量的 60%。两林分穿透雨量的变化与大气降雨量基本一致, 5~8 月穿透雨量占全年穿透雨总量的 63%。由于林冠的截留作用^[14], 穿透雨量明显小于大气降雨量, 其中高氮和对照林分的穿透雨量分别为 1463.1 mm 和 1598.4 mm, 占年降雨量的 78.0%和 85.2%。两林分与大气降雨量均有显著性差异。

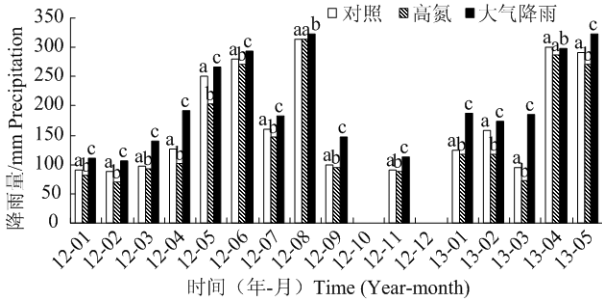


图 1 安徽查湾自然保护区常绿阔叶林大气降雨和穿透雨的季节变化

Figure 1 Seasonal variation of precipitation and throughfall in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Zhawan Nature Reserve, Anhui Province

2.2 pH 值的动态变化

大气降雨 pH 值的高低, 对森林生态系统有着直接或间接的影响。降雨透过林冠层时, 与枝叶会产生物理、化学等作用, 导致穿透雨的 pH 值及其化学成分发生不同程度的变化。

观测期间, 大气降雨 pH 值的年平均值为 6.68 (图 2), 2013 年 1 月最大 (7.21), 2012 年 3 月最小 (5.94)。由于雨水对植物体表面渗出物和表面粉尘、微粒等固体沉降物的淋洗以及枝叶对雨水中相关离子的吸收, 使得 pH 值较大气降雨有所下降。高氮和对照林分穿透雨 pH 值分别为 6.53 (5.92~7.14) 和 6.54 (5.97~7.20)。可见, 该地区大气降雨呈中性, 无酸雨现象, 降雨经过冠层后 pH 值略有下降, 这与鲍文等的研究结果一致^[15]。

2.3 降雨中 C、N 动态变化

降雨经过林冠层后, TOC、DON、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量都有一定程度的变化 (表 1)。大气降

雨的 TOC 平均浓度为 3.204 mg·L⁻¹, 与对照及高氮处理差异均显著, 降雨通过林冠层后, 高氮处理与对照林分的穿透雨中 TOC 浓度分别比大气降雨增加了 1.66 和 1.85 倍; NH₄⁺-N 含量分别增加 1.12、1.22 倍, NO₃⁻-N 含量分别增加 1.21、1.28 倍, 这可能与叶片受到雨水淋溶有关。然而, 穿透雨的 DON 含量则分别为大气降雨的 95%和 88%, 这可能与土壤氮有效性较低, 雨水经过林冠后, 其中水溶性氮部分被植物吸收利用有关。

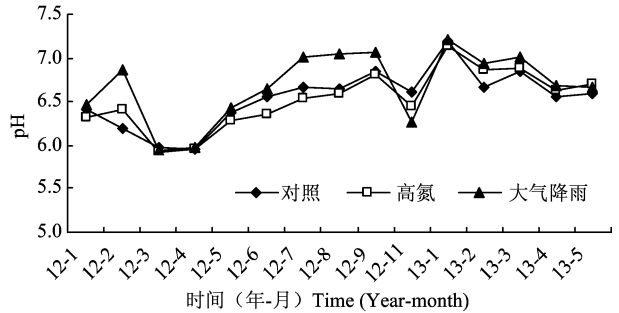


图 2 安徽查湾自然保护区常绿阔叶林的大气降雨, 穿透雨 pH 值的季节动态

Figure 2 Seasonal dynamics of pH of precipitation and throughfall in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Zhawan Nature Reserve, Anhui Province

2.3.1 大气降雨与穿透雨 TOC 的动态变化 大气降雨与穿透雨 TOC 含量季节动态明显。大气降雨的 TOC 含量相对稳定, 低于同期穿透雨 TOC 含量, 其年均值为 3.204 mg·L⁻¹, 最高值出现在 2013 年 2 月 (4.29 mg·L⁻¹), 最低值出现于 2013 年 3 月 (0.31 mg·L⁻¹)。对照林分穿透雨 TOC 含量平均值为 5.923 mg·L⁻¹, 较高氮处理林分 (5.322 mg·L⁻¹) 略高。高氮处理与对照林分 TOC 的季节动态一致, 且两者各月份之间差异不显著, 两林分与大气降雨 TOC 含量普遍有显著性差异 (图 3)。

2.3.2 大气降雨与穿透雨中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、DON 的动态变化 观测期间森林降雨的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、DON 含量的动态变化如图 4。从图 4 可以看出, 大气降雨 NH₄⁺-N 含量在 2012 年 1 月最小 (0.081 mg·L⁻¹), 4 月最大 (0.469 mg·L⁻¹)。穿透雨 NH₄⁺-N 年际变化呈现一定的波动, 夏季最低, 春季最高。对照林分 NH₄⁺-N 含量最大值出现在 2012 年 4 月 (0.562 mg·L⁻¹), 最低值出现在 2012 年 8 月 (0.051 mg·L⁻¹); 高氮处理林分 NH₄⁺-N 含量的最大值与最小值出现期与对照林分一致, 分别为 0.535 mg·L⁻¹ 和 0.020 mg·L⁻¹, 均低于对照林分。两林分与大气降雨 NH₄⁺-N 含量在 2012 年 1 月、2 月和 4 月呈显著性差异, 其他月份均无差异性。

表 1 大气降雨和穿透雨的碳、氮含量均值

Table 1 Mean concentrations of dissolved carbon and nitrogen of precipitation and throughfall mg · L⁻¹

	TOC	DON	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
对照 Control	5.923±0.789 ^a	0.665±0.364 ^a	0.273±0.030 ^a	0.523±0.019 ^a
高氮处理 Treated with high nitrogen	5.322±1.03 ^a	0.716±0.251 ^a	0.297±0.052 ^a	0.494±0.036 ^a
大气降雨 Precipitation	3.204±0.387 ^b	0.754±0.186 ^a	0.243±0.045 ^a	0.408±0.090 ^{ab}

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different small letters represent significant difference at the 0.05 level.

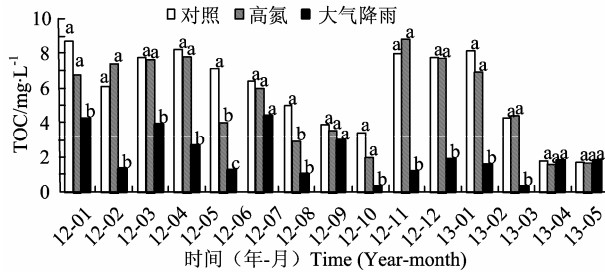


图 3 安徽查湾保护区常绿阔叶林大气降雨、穿透雨 TOC 含量的动态变化

Figure 3 Changes of TOC concentrations in precipitation and throughfall in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Zhawan Nature Reserve, Anhui Province

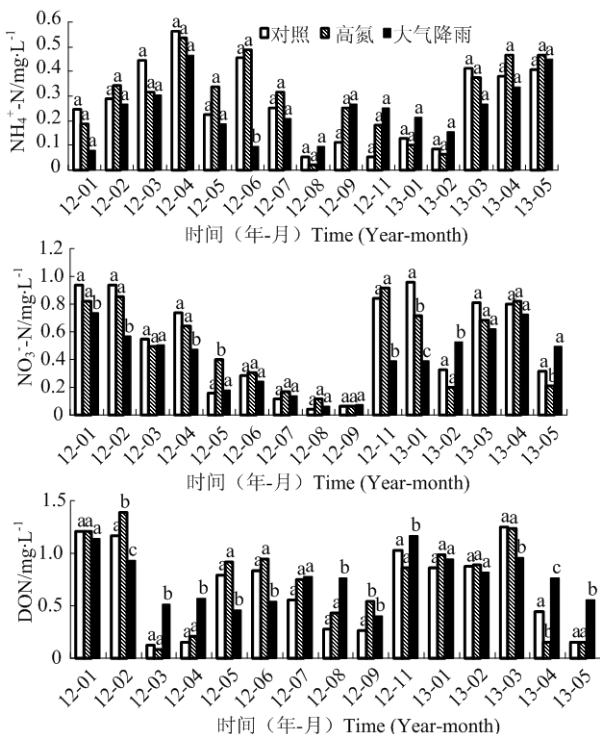


图 4 查湾保护区常绿阔叶林大气降雨和穿透雨的 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, DON 含量动态变化

Figure 4 Changes of NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, and DON concentrations in precipitation and throughfall in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Zhawan Nature Reserve, Anhui Province

大气降雨 NO₃⁻-N 含量的动态变化规律与 NH₄⁺-N 基本一致, 最大值出现在 2012 年 1 月 (0.737

mg·L⁻¹), 6~9 月明显下降, 8 月最低 (0.065 mg·L⁻¹), 随后逐渐回升。穿透雨 NO₃⁻-N 含量与 NH₄⁺-N 含量变化也表现一致, 2013 年 2 月达到最大值 (1.056 mg·L⁻¹), 2012 年 8 月出现最低值 (0.067 mg·L⁻¹), 随后因降雨量减少而逐渐升高。对照林分穿透雨 NO₃⁻-N 含量变化表现为夏季低于其他季节, 2013 年 1 月出现高峰值 (0.955 mg·L⁻¹), 8 月最低, 为 0.038 mg·L⁻¹。高氮处理林分 NO₃⁻-N 含量在 2012 年 11 月达到最大值 (0.912 mg·L⁻¹), 2012 年 9 月出现最低值 (0.066 mg·L⁻¹)。对照林分穿透雨 NO₃⁻-N 含量年均值 (0.523 mg·L⁻¹) 略高于高氮处理林分 (0.494 mg·L⁻¹)。2012 年 5 月和 2013 年 5 月高氮与对照林分之间有显著差异, 其他月份均无差异性, 2012 年 1、2、4 和 11 月及 2013 年 2 月, 两林分与大气降雨之间呈现显著差异性。

大气降雨 DON 含量与穿透雨 DON 含量的变化差异较大。大气降雨在 2012 年 11 月出现最高值 (1.160 mg·L⁻¹), 9 月份出现最低值 (0.398 mg·L⁻¹)。对照与高氮处理林分 DON 变化基本一致, 但对照林分的年均值较高氮处理林分略低。2012 年 2 月、9 月及 2013 年 4 月, 高氮与对照林分之间呈现显著性差异, 两林分与大气降雨间普遍呈显著性差异。

3 小结与讨论

大气降雨的 TOC 含量因纬度、降雨量和降雨强度等不同而有着较大差异。尹光彩等^[4]研究显示, 随着大气降雨频率和降雨量的增加, 空气中漂浮的各种颗粒有机碳含量逐渐减少, 从而使大气降雨中 TOC 的浓度降低, 这与本实验的结果一致。降雨会淋洗粘附在植物体表面的颗粒有机碳, 同时也会淋洗由于植物体和附着在植物体上微生物分泌的部分有机碳。因此, 穿透雨的 TOC 含量要大于大气降雨。

对照林分穿透雨 TOC 含量总体大于高氮处理林分, 这可能与有机碳和氮沉降之间呈负相关关系有关^[4]。整体上来看, 模拟氮沉降增加对森林穿透雨碳、氮动态影响不明显, 也许是试验时间短的缘故, 还有待继续监测。

森林降雨中氮含量随降雨量月变化规律明显,

通常夏季降雨多而频繁,出现低值,雨量少的季节,含量偏高,明显受降雨量的支配^[11]。本研究地区中大气降雨和穿透雨 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量变化与 DON 含量基本保持一致,均在夏季出现低值。这与樊后保等^[9]对福建南平地区杉木林研究结论一致。

降雨格局的变化对穿透雨中氮素的影响大于对碳素的影响,雨量大的月份穿透雨氮含量低,而 TOC 含量并未表现出类似的相关性,这与张赞齐等^[17]对安徽老山亚热带常绿阔叶林降雨的研究结果一致。穿透雨中碳、氮含量变化与林外大气降雨相比有较大差异,这种差异可能是由于受雨季或旱季的长短、风等物理因素的影响和林冠层枝叶对穿透雨养分变化的调控作用^[18]。

降雨中的养分多是水溶性的,易于被植物直接吸收利用,因此在森林生态系统养分输入、循环、利用中占有重要地位。然而,由于大气降雨的随机性,降雨量和降雨强度的时空变异性,从而造成降雨水化学特征的时空差异性很大^[19]。此外,影响穿透雨的化学因素众多,情况也较复杂,本研究探讨了模拟氮沉降的影响,结果显示较短的氮沉降并没有显著影响穿透雨的溶解性碳和氮含量,有待进一步深入;也说明短期内对森林水文过程的水化学规律研究有一定的局限性^[19]。因此,森林降雨养分变化需要长期观测。

参考文献:

- [1] 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[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1838-1844.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 尹光彩,周国逸,张德强,等. 鼎湖山针阔混交林水文学过程中总有机碳动态[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1655-1660.
- [5] Driscoll C T, Blette V, Yan C, et al. The role of mercury in remote Adirondack lakes [J]. Water Air Soil Pollut, 1995, 80: 499-508.
- [6] Kolka R K, Nater E A, Grigal D F, et al. Atmospheric inputs of mercury and organic carbon into a forested upland/bog watershed [J]. Water Air Soil Pollut, 1999, 113: 273-294.
- [7] Stuanes A O, Huse M. Effects of weekly nitrogen additions on N cycling in a coniferous forest catchment, Gardsjon, Sweden [J]. For Ecol Manage, 1998, 101(1/3): 227-249.
- [8] Emmett B A, Reynolds B, Silgram M, et al. The consequences of chronic nitrogen addition on N cycling and soilwater chemistry in a Sitka spruce stand, North Wales [J]. For Ecol Manage, 1998, 101(1/3): 165-175.
- [9] 樊后保,苏兵强,林德喜,等. 杉木人工林生态系统的生物地球化学循环 II: 氮素沉降动态[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 6(2): 133-137.
- [10] Phoenix G K, Hicks W K, Cinderby S, et al. Atmospheric nitrogen deposition in world biodiversity hotspots: the need for a greater global perspective in assessing N deposition impacts [J]. Glob Change Biol, 2006, 12: 470-476.
- [11] Bobbink R K, Hicks T K, Galloway J N, et al. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity, a synthesis [J]. Ecol Appl, 2010, 20: 30-59.
- [12] Liu X J, Duan L, Mo J M, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview [J]. Environ Pollut, 2011, 159: 2251-2264.
- [13] 张赞齐,王陆军,丁正亮,等. 安徽老山亚热带常绿阔叶林降雨中氮和可溶性有机碳的动态变化[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 146-149.
- [14] 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(4): 79-83.
- [15] 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.
- [16] 樊后保,袁颖红,王强,等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳和全氮的影响[J]. 福建林学院学报, 2007, 27(1): 1-6.
- [17] 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.
- [18] 张德强,余清发,孔国辉,等. 鼎湖山常绿阔叶林的森林枯落物的化学性质[J]. 生态学报, 1998, 18(1): 96-100.
- [19] 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.