

DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3142. 2013. 05. 007

马芬, 马红亮, 魏春兰, 等. 模拟氮沉降对中亚热带森林土壤 Ni、Cu、Zn 含量的影响 [J]. 广西植物, 2013, 33 (5): 620—626

Ma F, Ma HL, Wei CL, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on Ni, Cu and Zn in subtropical forest soils [J]. *Guihaia*, 2013, 33 (5): 620—626

模拟氮沉降对中亚热带森林土壤 Ni、Cu、Zn 含量的影响

马芬^{1,2}, 马红亮^{1,2*}, 魏春兰^{1,2}, 高人^{1,2}, 邱泓^{1,2}, 尹云锋^{1,2}

(1. 湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 通过野外模拟实验, 研究 3 个氮沉降水平, CK (对照, $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、LN (低氮, $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 和 HN (高氮, $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 处理对亚热带针叶 (杉木) 和阔叶 (罗浮栲、浙江桂) 森林土壤中微量元素 Ni、Cu、Zn 含量的影响。结果表明: 就不同的林分来看, 3 种微量元素的含量大致呈杉木林 > 罗浮栲林 > 浙江桂林, 施氮 3 d 后, 浙江桂林和罗浮栲林土壤中 3 种微量元素在各处理之间差异不显著, 仅发现杉木林土壤中的 Ni 含量在 CK 处理与 LN 及 HN 处理之间和无凋落物土壤中 Cu 含量在 HN 与 CK 及 LN 之间的差异显著; 3 片林分中土壤表面有无凋落物处理总体对 3 种微量元素含量的影响不大。与施氮前相比, 3 片林分土壤中的 Ni、Cu、Zn 含量均有所下降, 且浙江桂林在 LN 处理的降幅最大。

关键词: 氮沉降; Ni; Cu; Zn; 森林土壤

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142 (2013) 05-0620-07

Effects of simulated nitrogen deposition on Ni, Cu and Zn in subtropical forest soils

MA Fen^{1,2}, MA Hong-Liang^{1,2*}, WEI Chun-Lan^{1,2},
GAO Ren^{1,2}, QIU Hong^{1,2}, YIN Yun-Feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process of Ministry of Education Co-established by Fujian Province and the Ministry, Fuzhou 350007, China; 2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A field-simulated nitrogen deposition experiment was conducted to investigate the effects of added nitrogen on soil the microelements Ni, Cu and Zn in two adjacent natural broad-leaved forests (*Castanopsis fabric*, CAF and *Cinnamomum chekiangense*, CIC) and a coniferous plantation (*Cunninghamia lanceolata*, CUL). Three treatments were set as the control (CK) of $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, low nitrogen (LN) treatment of $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and high nitrogen (HN) treatment of $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The results showed that the orders of three kinds of microelements content were roughly CUL > CAF > CIC. After three days of nitrogen addition, significant effects were only found between CK and LN or HN for Ni content in the CUL forest soil and between HN and CK or LN for Cu content under litter removed, and there were no significant differences among all treatments in CIC and CAF forest soil. On the whole, the impact of litter for three kinds of forest soils on microelements content was not found. Compared with the data before nitrogen addition, Ni, Cu and Zn contents in the three forest soils all decreased, with the most decreasing amplitude for CIC forest soil at the LN treatment.

Key words: nitrogen deposition; Ni; Cu; Zn; forest soil

收稿日期: 2013-01-23 修回日期: 2013-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (40901115, 31070548, 31070549, 31170578); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目 (JA12058); 福建师范大学优秀青年骨干教师培养基金 (fjsdjk2012069); 福建省大学生创新性实验计划项目 (Sjuly-2012014)

作者简介: 马芬 (1990-), 女, 福建龙岩人, 研究方向为生态环境, (E-mail) fenma8487@163.com。

* 通讯作者: 马红亮, 博士, 副教授, 从事陆地生态系统碳氮循环研究, (E-mail) mhl936@163.com。

随着矿物燃料燃烧、化学氮肥的生产和使用以及畜牧业的迅猛发展等人类活动向大气中排放的活性氮化合物激增，氮沉降已成为全球氮循环的一个重要组成部分。据估计，全球每年沉降到陆地生态系统的活性氮达 43.47 Tg，并有逐年增加的趋向（薛璟花等，2007）。从 1950 年到 1980 年的 30 a 间，欧洲大部分国家的大气氮沉降量增加了 1 倍，如欧洲中部到达土壤的大气氮沉降量为 15~50 kg·hm⁻²·a⁻¹，已远远超过了自然界天然固氮的量（方华等，2006）。近年来，我国一些森林出现较高的氮沉降量，如广东鼎湖山自然保护区降雨氮沉降量达 38.4 kg·hm⁻²·a⁻¹（Zhoug & Yan, 2001）；江西分宜县大冈山林场杉木林和马尾松林降雨氮沉降量分别高达 60.6 和 57 kg·hm⁻²·a⁻¹（马雪华，1989）；福建南部的漳州市区域氮沉降平均水平达 53 kg·hm⁻²·a⁻¹（肖健，2005）。大气氮沉降的显著增加对森林生态系统的结构和功能构成了严重威胁。过量的大气氮沉降引发诸如土壤酸化、土壤营养元素储存失衡和水体富营养化等一系列生态问题（Galloway *et al.*, 2004; Dalton *et al.*, 2003; Xiao, 2001; Galloway *et al.*, 2003），引起国际社会的广泛关注。长期野外观测发现，大气氮沉降对土壤酸化的贡献明显，氮沉降（NO₃⁻ 或 NH₄⁺）的增加，将导致 NO₃ 淋溶和阳离子淋溶增加以及土壤酸度的提高（Gunderesn *et al.*, 2004; Huber *et al.*, 1998），一百年间大气氮沉降导致林地和草地土壤 pH 从 7 下降到 4；Al 和重金属离子活性增加（Blake *et al.*, 2002）。土壤酸化导致养分元素的活化，可促进植物吸收、移出、减少土壤中的养分与盐基离子的含量，特别是在高温多雨的红壤地区可能会加速盐基离子的淋失，从而加剧酸性土壤的酸化（Li *et al.*, 2005）。

微量元素是植物生长代谢正常进行所必不可少的元素（李德军等，2004），如 Zn 与生长素的合成、光合作用以及干物质的积累有关，Cu 是多种酶的组成成分，参与碳素同化、氮素代谢、呼吸作用以及氧化还原过程（马扶林等，2009）。一般而言，植物所需的微量元素主要由土壤供应。土壤中微量元素主要来源于成土母质、大气中的各种沉降物、火山烟尘、施肥也向土壤输入了一定量的微量元素（谢佰承等，2007）。我国土壤微量元素含量的变幅很大，不同土类和不同区域土壤之间的差异明显，即使是同一土壤类型，也可能由于成土母质、成土过程的各个环节和人类生产活动影响的不同而使微量元素含量有很大差

异（马扶林等，2009）。评价森林生态系统土壤微量元素状况是深入研究森林养分循环所不可缺少的（李德军等，2004）。野外长期定位模拟氮输入的试验在世界上多个地方展开，施加氮的形式有 NH₄NO₃、NaNO₃、(NH₄)₂SO₄ 和尿素等，但以 NH₄NO₃ 为主（Huber *et al.*, 2004; Aber *et al.*, 1998）。本研究通过施加 NH₄NO₃ 的野外模拟试验，探讨氮沉降背景下亚热带针阔森林土壤中 Ni、Cu、Zn 微量元素的含量，并分析氮沉降增加对土壤中微量元素的影响，以便从微量元素角度进一步了解氮沉降的生态学问题。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省北部建瓯万木林自然保护区，其经纬度是 27°3' N，118°9' E，地处武夷山脉东南、鹞峰山脉西北，海拔高度 230~556 m。本地属中亚热带季风气候，年均气温 19.4 °C，年均降水量 1731.4 mm，年均蒸发量 1466 mm，相对湿度 81%，全年无霜期达 277 d；土壤为花岗岩发育的红壤。该地区植被为亚热带暖湿地区的常绿双子叶植物阔叶树种，主要以樟科、木兰科、壳斗科、杜英科、山茶科、冬青科、山矾科和金缕梅科等为主。

研究选择在罗浮栲林、杉木林和浙江桂林中设样地。样地概况：浙江桂林，坡向 330°，坡度 20°，海拔 390 m，郁闭度为 0.8，乔木层中浙江桂占绝对优势，假蚊母树次之，灌木层较稀疏，草本层不发达。罗浮栲林，位于中上坡，坡向 270°，坡度 35°，海拔 350 m，群落以壳斗科栲属占优势地位，主要有罗浮栲、丝栗栲、拉氏栲、南岭栲等，灌木层物种比较丰富。杉木林，坡向 300°，坡度 21°，海拔 350 m，为 1969 年杉木幼苗造林形成的人工林，树种单一，林分结构简单，灌木层以杜茎山、狗骨柴为主，草本有狗脊蕨、草珊瑚等。

1.2 试验设计

样地设置采用二因素三重非平衡析因设计，即在浙江桂林、罗浮栲林和杉木林样地分别设置 18 个处理，每个处理 2 m×2 m，各处理的间隔在 10 m 以上，以防止互相干扰。外加氮处理设置 3 个氮沉降水平：CK（对照，0）、LN（低氮，30 kg·hm⁻²·a⁻¹）和 HN（高氮，100 kg·hm⁻²·a⁻¹）处理。根据当地年降水量水平和年内分布，按表 1 分别对 3 片林分的试验样地进行分次施氮处理。方法是根据氮处理水平，将各处理每次所需要

喷施的 NH_4NO_3 溶解在 2 L 蒸馏水中, 用喷壶均匀喷洒, 而 CK 处理则喷洒同样量的水, 以减少因外加水所造成的影响。

表 1 试验样地施肥时间与施肥量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 1 Fertilizing time and amount in experiment plots

氮沉降水平 Levels of nitrogen deposition	时间 (年/月)				Time (Year/Month)					
	2009		2010		2011		2012			
	9	12	8	11	2	6	9	12	5	8
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LN	7.5	10.12	57.5	10.12	57.5	10.12	57.5	10.12	57.5	10.12
HN	25.32	542.5	25.32	542.5	25.32	542.5	25.32	542.5	25.32	542.5

1.3 样品采集与处理

样品于 2012 年 8 月 8 日进行采集, 在每个样地的取样点取 3 个土样, 取土深度为 0~15 cm, 取完土样后继续施氮, 并在 3 d 后 (2012 年 8 月 11 日), 用同样的方法进行再次取样。将样品带回实验室, 去掉土样中可见的根系和碎石, 磨碎过筛 (孔径 2 mm), 装瓶供分析。

1.4 微量元素测定方法

Mehlich 3 (简称 M3) 浸提剂是 1982 年美国北卡罗莱那州立大学 Mehlich 根据美国的具体实际提出的一种适合于中性和酸性土壤的联合提取剂 (喻华等, 2007)。该浸提剂具有性质稳定, 便于配制和贮存, 能同时浸提多种有效元素的特点 (Pittman *et al.*, 2005)。王晓丽等 (2010) 对 ICP-AES 法测定土壤浸出液中养分的最佳条件研究、席家军等 (2007) 对土壤有效磷钾锰铜锌铁的联合测定都采用了 M3 法。M3 浸提剂的成分为 $0.015 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{F}$, $0.001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{EDTA}$, $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{NO}_3$, $0.20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CH}_3\text{COOH}$, $0.013 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HNO}_3$, $\text{pH} = 2.5$ 。本试验用 M3 浸提剂 50 mL 浸提新鲜土样 5 g (过 2 mm 尼龙筛), 在 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下振荡 40 min, 过滤, 滤液经再过滤后用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 测定土样中的微量元素。土壤含水量采用烘干法测定, 用铝盒装取 10 g 左右已处理过的土样于烘箱中, 在 105°C 下烘 24 h, 元素含量计算统一参照烘干土重。

1.5 数据处理

采用 SPSS17.0 和 Excel 软件对数据进行分析, 采用单因素方差分析 (ANOVA) 和多重比较 (LSD 法) 分析氮沉降处理和不同林分之间土壤中微量元素 Ni、Cu 及 Zn 含量的差异显著性 ($P < 0.05$), 所有

数据均为 3 个重复的平均值和标准偏差。

2 结果与分析

2.1 氮沉降对森林土壤中 Ni 含量的影响

由图 1 可见, 杉木林土壤中的 Ni 含量最高, 与浙江桂林与罗浮栲林之间相差较大, 而浙江桂林与罗浮栲林之间相差不大且差异不显著。施氮前, 杉木林土壤中 Ni 含量为 $1.64 \sim 3.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 浙江桂林为 $0.27 \sim 0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 罗浮栲林为 $0.17 \sim 0.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。施氮 3 d 后, 杉木林土壤中 Ni 含量为 $1.44 \sim 3.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 浙江桂林为 $0.12 \sim 0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 罗浮栲林为 $0.22 \sim 0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤表面是否保留凋落物处理对浙江桂林和罗浮栲林土壤中的 Ni 含量影响不明显, 而在杉木林中表现为无凋落物土壤中的 Ni 含量高于保留凋落物土壤中的。与 CK 比较, 模拟氮沉降主要降低了杉木林土壤 Ni 含量。与施氮前相比, 施氮 3 d 后, CK 处理下浙江桂林、罗浮栲林、杉木林土壤中的 Ni 含量平均分别降低了 55.9%、1.4% 和 6.3%, 在 LN 处理分别降低了 59.5%、32.8% 和 1.7%, 在 HN 处理分别降低了 44.9%、增加了 28.1% 和降低了 4.8%, 可见杉木林中的变化幅度最小, 浙江桂林的最大。

2.2 氮沉降对森林土壤中 Cu 含量的影响

由图 2 可见, 杉木林土壤中的 Cu 含量最高, 其次是罗浮栲林, 浙江桂林土壤中的 Cu 含量略低于罗浮栲林, 但两者之间差异不显著。施氮前, 杉木林土壤中 Cu 含量为 $4.57 \sim 6.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 罗浮栲林为 $1.08 \sim 1.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 浙江桂林为 $1.91 \sim 2.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。施氮 3 d 后, 杉木林土壤中 Cu 含量为 $4.58 \sim 6.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 罗浮栲林为 $0.82 \sim 1.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 浙江桂林为 $1.79 \sim 2.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤表面是否保留凋落物处理对 3 片林分土壤中的 Ni 含量影响不明显。与 CK 比较, 模拟氮沉降主要降低了浙江桂林土壤 Cu 含量。与施氮前相比, 施氮 3 d 后, 不同处理下土壤中的 Cu 含量均较施氮前有所变化, CK 处理下浙江桂林、罗浮栲林和杉木林土壤中的 Cu 含量平均分别降低了 13.9%、增加了 2.3% 和降低了 6.3%, 在 LN 处理分别降低了 40.8%、15.0% 和 10.0%, 在 HN 处理分别降低了 20.1%、增加了 0.8% 和降低了 9.1%, 可见罗浮栲林中的变幅最小, 浙江桂林的最大。

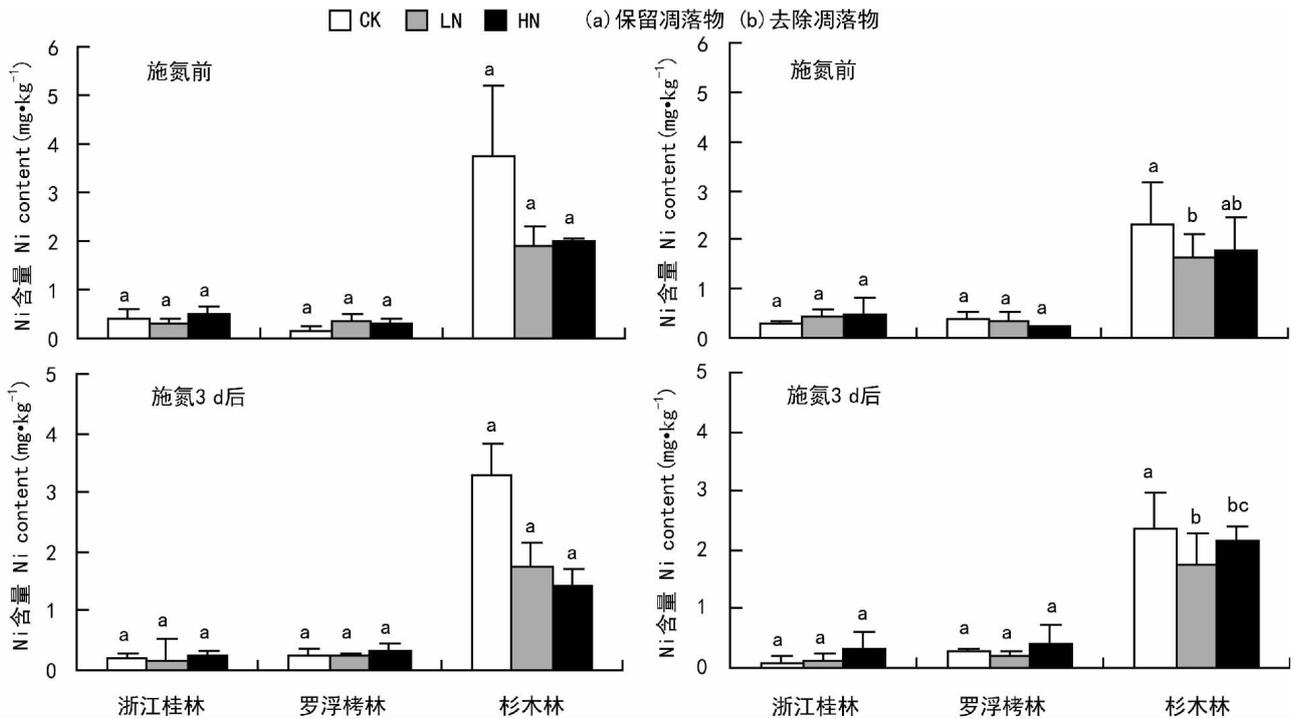


图 1 不同氮沉降水平下森林土壤中的 Ni 含量 不同小写字母表示不同氮水平间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Fig. 1 Contents of Ni in forest soils under different N deposition levels Different small letters mean significant differences under different N deposition levels. The same below.

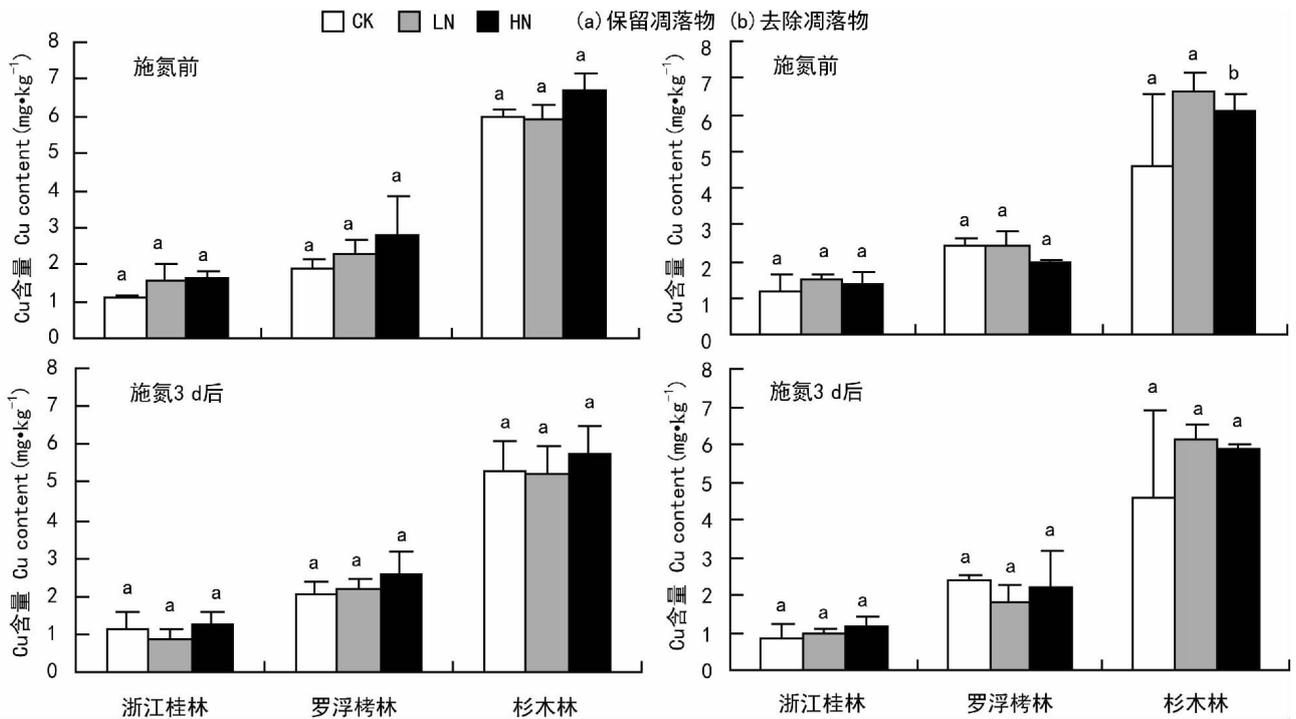


图 2 不同氮沉降水平下森林土壤中的 Cu 含量

Fig. 2 Contents of Cu in forest soils under different N deposition levels

2. 3 氮沉降对森林土壤中 Zn 含量的影响

由图 3 可见, 杉木林土壤中 Zn 含量最高。施氮前, 杉木林为 7.19~14.19 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 罗浮栲

林 1.67~2.82 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 浙江桂林土壤中的 Zn 含量为 1.12~1.65 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。施氮 3 d 后, 杉木林为 5.96~10.11 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 罗浮栲林为 1.

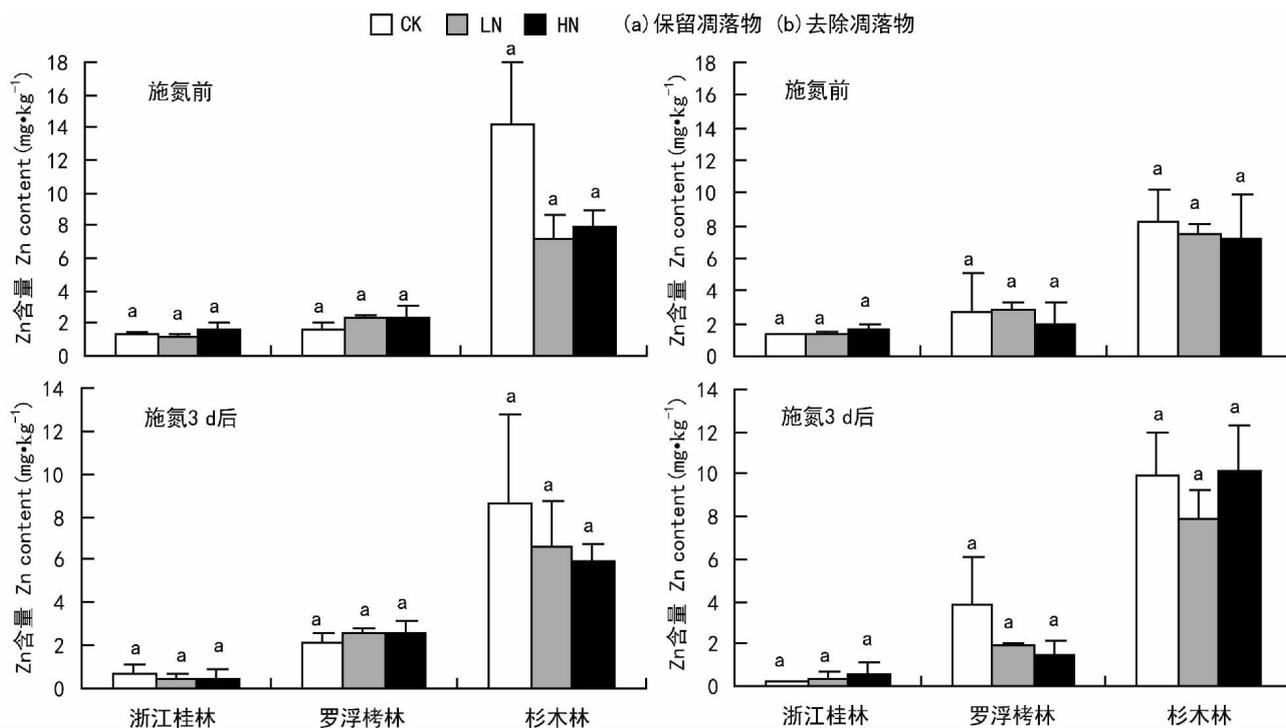


图 3 不同氮沉降水平下森林土壤中的 Zn 含量
Fig. 3 Contents of Zn in forest soils under different N deposition levels

45~3.82 mg·kg⁻¹, 浙江桂林土壤中 Zn 含量为 0.17~0.64 mg·kg⁻¹。施氮前, 土壤表面是否保留凋落物处理对 3 片林分土壤中的 Zn 含量影响不明显。施氮 3 d 后, 浙江桂林和罗浮栲林中表现为无凋落物土壤中的 Zn 含量高于保留凋落物土壤中的, 而杉木林中则相反。与 CK 比较, 模拟氮沉降主要降低了浙江桂林土壤 Zn 含量。与施氮前相比, 施氮 3 d 后, CK 处理下浙江桂林、罗浮栲林、杉木林土壤中的 Zn 含量平均分别降低了 69.2%、增加了 27.0%、降低了 17.7%, 在 LN 处理降低了 63.6%、11.7%和 1.1%, 在 HN 处理降低了 68.1%、5.2%、增加了 6.0%, 可见杉木林的变化幅度最小, 浙江桂林的最大。

3 结论与讨论

3.1 氮沉降的影响

与施氮前相比, 施氮 3 d 后土壤中 Ni、Cu、Zn 含量总体都较施氮前有所降低, CK 处理与施氮前相比较, 浙江桂林和杉木林下降较大幅度, 而罗浮栲林整体呈增加, 这可能与土壤微量元素全量、坡度及坡向等有关。从 3 种氮沉降处理土壤中 Ni、Cu、Zn 含量的变化可知, 不同氮沉降水平土壤中 Ni 含量从高到低的顺序为 CK>HN>LN,

这表明在氮沉降条件下, 更高水平的氮沉降导致土壤对元素 Ni 的截留作用强。不同氮沉降水平土壤中 Cu 含量从高到低的顺序为 HN>LN>CK, 土壤中 Cu 含量随着氮沉降量的增加而增加。不同氮沉降水平土壤中 Zn 含量从高到低的顺序为 CK>HN>LN, 说明土壤中 Zn 含量对 LN 氮沉降水平反应更为敏感。Bowman (2000) 的研究表明, 氮沉降增加引起的土壤酸化在酸性的针叶林和阔叶林中最为重要。由于氮沉降水平与土壤酸碱度密切相关, 而土壤酸碱度直接影响着土壤中各种元素的存在形态、有效性及迁移转化 (蔡晓明等, 1995; 曾如坤, 1998; 蒋定安等, 1997)。土壤酸碱度是土壤重要的基本性质, 是与微量元素有关的最重要因子, 这是由于过酸或过碱都会使许多种微量元素形成难溶的氢氧化物沉淀, 严重影响了微量元素的移动能力, 从而降低了微量元素的有效性 (刘丽萍等, 2005), 而土壤 pH 值随着氮沉降量的增加而降低 (马扶林等, 2009), 这是由于随着氮沉降的输入, 土壤的铵水平增加, 铵过量积累会引发硝化作用的发生 (袁颖红等, 2011), 产生的 H⁺ 越多, H⁺ 与土壤胶体表面吸附的盐基离子发生离子交换反应, H⁺ 被吸附在土壤表层, 当表层 H⁺ 聚集较多时, 土壤 pH 值降低, 导致土壤酸化 (Throop *et al.*, 2004)。另外, 氮沉降可能与土壤水溶解态

有机物质有关, 而土壤水溶解态有机物质与 Ni、Cu、Zn 元素的络合作用有密切的联系, 影响其在土壤中的形态、迁移、有效性等, 在较低 pH 范围内, 形成的强络合物官能团质子化而增加金属离子的有效性, 且因金属离子的电子层分布不同, 在其他条件相同的情况下, Zn 离子的络合物稳定性高于 Ni 与 Cu (蒋疆等, 2001)。

在不同氮水平下, 植物对养分的吸收不一致。高氮沉降下使土壤中的 NO_3^- 浓度增加, 它的淋失引起了土壤中与其电荷平衡的钙镁钾等离子的淋失, 土壤库中的盐基离子量减少, 导致植物对这些离子的吸收不足和营养失衡; 另一方面, 氮沉降增加, 植物通过根系和树冠对过量的氮进行大量吸收从而引起氮在体内的积累 (刘文飞等, 2008)。铵离子的存在会抑制植物对钾钙镁的吸收 (Bobbink *et al.*, 2010)。此外, 还会引起土壤中铝离子的溶出增加, 而铝离子的存在会抑制植物对其他阳离子及磷的吸收, 再加上氮沉降引起细根生长下降和菌根侵染减少, 也造成植物对营养元素的吸收减少。鉴于本文的研究, 氮沉降对微量元素的活化率即有效态与全量的比值, 以及降雨对元素短期的影响, 涉及元素迁移和转化, 将为下一步工作奠定基础。

3. 2 不同林型的影响

土壤中微量元素的供给水平还受土壤中的有机质含量、林分类型、土壤质地、氧化还原电位、矿化速率等有关。就不同的林型来看, 针叶 (杉木) 森林土壤中的 Ni、Cu 和 Zn 含量都是最高的, 明显大于其他两种林分, 而阔叶 (浙江桂、罗浮栲) 森林之间相差不大, 这可能与凋落物的性质有关, 因为凋落物中的多酚、单宁等物质可加快矿化速率, 从而加速有机物的分解和养分的释放, 且阔叶中多酚和单宁的含量是针叶的近 2 倍 (马红亮等, 2011)。但由于试验地中杉木林靠近道路, 机动车辆燃料燃烧后废气扩散、轮胎磨损、以及机械摩擦后重金属通过扩散, 再经沉降加入土壤, 从而影响土壤中的 Ni、Cu 和 Zn 含量, 且该影响比凋落物分解作用大。林分不同的林下植被, 其土壤对营养元素的富集能力不同, 以杉木林中的草本植物狗脊蕨较高 (Sun *et al.*, 2006)。与针叶林相比较, 常绿阔叶林的凋落物量较大, 凋落物中营养元素的含量较高, 且阔叶林凋落物的年失重率大于针叶林 (余济云等, 2009)。不同的凋落物影响土壤有机质, 而土壤中的有机质含量高, 有助于提高微量元素的有效性, 这是因为有机质中富含多种有机酸,

可以溶解相当一部分微量元素, 同时, 有机质的存在也有助于减少微量元素与土壤颗粒的接触, 减少被固定的可能性, 随着有机酸在土壤中的流动, 也有助于微量元素在土壤中向根部的迁移, 从而提高其有效性 (马扶林等, 2009)。但在本试验中, 土壤表面是否保留凋落物处理对 3 片林分土壤中的 Ni、Cu 和 Zn 含量影响不明显, 这可能与长期以来凋落物已造成的影响有关, 需要一定的时间才能观测到凋落物的影响, 所以这需要做进一步的长期试验来研究在氮沉降背景下凋落物对森林土壤中 Ni、Cu 和 Zn 含量的影响。

参考文献:

- Aber J, McDowell W, Nadehoffer K, *et al.* 1998. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems, hypotheses revisited [J]. *Bioscience*, **48**: 951-934
- Blake L, Goulding K. 2002. Effects of atmospheric deposition, soil pH and acidification on heavy metal contents in soils and vegetation of seminatural ecosystem at Rothamsted Experimental Station, UK [J]. *Plant & Soil*, **240**: 235-251
- Bobbink R, Hicks K, Galloway J, *et al.* 2010. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis [J]. *Ecol Soc Am*, **20** (1): 30-59
- Bowman. 2000. Biotic controls over ecosystem response to environmental change in alpine tundra of the Rocky Mountains [J]. *Ambio: J Human Environ*, **29** (7): 396-400
- Dalton H, Brand-Hardy R. 2003. Nitrogen: the essential public enemy [J]. *J Appl Ecol*, **40**: 771-781
- Fang H (方华), Mo JM (莫江明). 2006. Effects of nitrogen deposition on forest litter decomposition (氮沉降对森林凋落物分解的影响) [J]. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **26** (9): 3 127-3 136
- Galloway JN, Aber JD, Erisman JW, *et al.* 2003. The nitrogen cascade [J]. *BioScience*, **53** (4): 341-356
- Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG, *et al.* 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future [J]. *Biogeochemistry*, **70**: 153-226
- Gunderesn P, Emmett BA, Kjonass OJ, *et al.* 1998. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: a synthesis of Nitrex data [J]. *For Ecol Manag*, **101**: 37-55
- Huber C, Weis W, Baumgarten M, *et al.* 2004. Spatial and temporal variation of seepage water chemistry after felling and small scale clear-cutting in a N-saturated Norway spruce stand [J]. *Plant Soil*, **267**: 23-40
- Jiang J (蒋疆), Wang G (王果), Fang L (方玲). 2001. Complexation between soil water-soluble organic matter and heavy metal (土壤水溶解态有机物质与重金属的络合作用) [J]. *Soil Environ Sci (土壤与环境)*, **10** (1): 67-71
- Li DJ (李德军), Mo JM (莫江明), Fang YT (方运霆). 2004. Study on availability of micronutrients in soils under three different forests of Dinghushan Nature Reserve (鼎湖山自然保护区不同演替阶段森林土壤中有效微量元素状况研究) [J]. *Guihaia (广西植物)*, **24** (6): 529-534
- Li P, Wang XX. 2005. Effects of leaching with low molecular

- weight organic acids on soil pH and exchangeable aluminum [J]. *Soils*, **37** (6): 669-673
- Liu WF (刘文飞), Feng HB (樊后保), Zhang ZW (张子文), *et al.* 2008. Foliar nutrient contents of chinese fir in response to simulated nitrogen deposition (杉木人工林针叶养分含量对模拟氮沉降增加的响应) [J]. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), **14** (3): 319-323
- Ma FL (马扶林), Song LM (宋理明), Wang JM (王建民). 2009. The research overview of trace elements in the soil (土壤微量元素的研究概述) [J]. *Qinghai Technol* (青海科技), **16** (3): 32-36
- Ma HL (马红亮), Liu WL (刘维丽), Gao R (高人), *et al.* 2011. Effects of litters and tannin on forest soil norganic nitrogen (凋落物与单宁酸对森林土壤无机氮的影响) [J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **22** (1): 54-59
- Ma XH (马雪华). 1989. Effects of rainfall on the nutrient cycling in man-made forests of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* (在杉木林和马尾松林中雨水的养分淋溶作用) [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **9** (1): 15-20
- Pittman JJ, Zhang H, Schroder JL. 2005. Differences of phosphorus in mehlich 3 extracts determined by colorimetric and spectroscopic methods [J]. *Commun Soil Sci Plant Analy.* **36**: 1 641-1 659
- She JY (余济云), Tian M (田蜜). 2009. Enrichment of nutrients in soil of four plantation forests by undergrowth vegetation in changsha suburb (人工林林下植被对土壤中营养元素的富集能力) [J]. *J Centr S Univ For & Technol: Nat Sci Edit* (中南林业科技大学学报·自然科学版), **29** (6): 34-39
- Sun BH, Hu ZY, Lü JL, Zhou LN, *et al.* 2006. Nutrient leaching and acidification of southern China coniferous forest red soil under stimulated N deposition [J]. *ChinJ Appl Ecol*, **17** (10): 1 820-1 826
- Throop HL, Holland EA, Parton WL, *et al.* 2004. Effect of nitrogen deposition and insect herbivory on patterns of ecosystem level carbon and nitrogen dynamics: Results from the Century model [J]. *Global Change Biol*, **10**: 1 092 - 1 105
- Wright F, Rasmussen L. 1998. Introduction to the Nitrex and Exman projects [J]. *For Ecol Manag*, **101**: 1-7
- Xiao CY, Huang QC, Ruan HH. 2002. Characteristics of decomposition of litter from pine, oak and pine-oak mixed forests [J]. *Acta Pedol Sin*, **39** (5): 763-767
- Xiao J (肖健). 2005. The abnormal formation and harm of nitrogen wet deposition in Zhangzhou City (漳州市氮湿沉降量异常的形成及危害) [J]. *Energy Environ* (能源与环境), **2**: 59-61
- Xiao HL. 2001. Effects of Atmospheric nitrogen deposition on forest soil acidification [J]. *Sci Silv Sin*, **37** (4): 111-116
- Xie BC (谢佰承), Zhang CX (张春霞), Xue XZ (薛绪掌). 2007. Characteristics of environmental chemistry for trace elements in soil (土壤中微量元素的环境化学特性) [J]. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学学报), **26**: 132-135
- Xue JH (薛璟花), Mo JM (莫江明), Li J (李炯), *et al.* 2007. The short term response of soil microorganism number to simulated nitrogen deposition (土壤微生物数量对模拟氮沉降增加的早期响应) [J]. *Guihaia* (广西植物), **27** (2): 174-179
- Yuan YH (袁颖红), Fan HB (樊后保), Wang Q (王强), *et al.* 2007. Available nutrients with increased N deposition in soils of *Cunninghamia lanceolata* plantations (模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响) [J]. *J Zhejiang For Coll* (浙江林学院学报), **24** (4): 437-444
- Yuan YH (袁颖红), Feng HB (樊后保), Li YY (李燕燕), *et al.* 2011. Effects of Simulated N deposition on soil acidification and content of base cations (模拟氮沉降对土壤酸化和土壤盐基离子含量的影响) [J]. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), **17** (4): 461-466
- Yu H (喻华), Feng YH (冯艳红), Yang JH (杨剑虹). 2007. Comparative study of methods for extracting available microelements in soil (土壤微量元素有效含量的提取测定方法比较研究) [J]. *J Southwest Agric Univ: Nat Sci Edit* (西南农业大学学报·自然科学版), **29** (9): 125-128
- Zhou GY, Yan JH. 2001. The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems [J]. *Acta Ecol Sin*, **21** (12): 2 002-2 012

(上接第 722 页 Continue from page 722)

- Schwartz MD. 1998. Green-wave phenology [J]. *Nature*, **394**: 839-840
- Shen MG, Tang YH, Chen J, *et al.* 2011. Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Agric For Meteorol*, **151** (12): 1 711-1 722
- Thomas CD, Lennon JJ. 1999. Birds extend their range northwards [J]. *Nature*, **399**: 213
- Wu YF (武永峰), Li MS (李茂松), Song JQ (宋吉青). 2008. Advance in vegetation phenology monitoring based on remote sensing (植物物候遥感监测研究进展) [J]. *J Meteorol Environ* (气象与环境学报), **22** (3): 51-58
- Xing Y (邢颖), Kong HM (孔红梅), Liu TX (刘天星). 2010. A bibliometrical analysis of status on ecology research in China based on SCI database (基于SCI发文的生态学研究态势文献计量分析) [J]. *Ecol Environ Sci* (生态环境学报), **19** (2): 447-452
- Zhang GH (张国海). 2011. Development law of the visual information retrieval (信息检索可视化研究发展规律探析) [J]. *Libr Inf Serv* (图书情报工作), **14**: 42-45, 83
- Zhang X, Friedl MA, Schaaf CB, *et al.* 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS [J]. *Remote Sense Environ*, **84**: 471-475