

DOI: 10.5846/stxb201607231501

黄锦钹, 程煜, 杨红玉, 郑凯舟, 王家骏. 模拟 N 沉降下三种林分土壤营养动态分析. 生态学报, 2017, 37(1): - .

Huang J N, Cheng Y, Yang H Y, Zheng K Z. Analysis of the dynamic soil nutrients of a *Castanopsis carlesii*, Chinese Chestnut & Sightseeing Wood natural forest under simulated nitrogen deposition. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): - .

模拟 N 沉降下三种林分土壤营养动态分析

黄锦钹, 程煜*, 杨红玉, 郑凯舟, 王家骏

福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

摘要:通过模拟 N 沉降实验, 设置对照 (CK, $0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$); 低氮 (LN, $5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$); 中氮 (MN, $10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$); 高氮 (HN, $15 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 4 种 N 处理, 以 NH_4NO_3 为外源 N 来研究福建省三明格氏栲自然保护区内板栗人工林、观光木人工林及米槠天然林 0–10 cm 土层养分变化动态。结果表明: N 沉降会使板栗人工林土壤显著酸化, P 含量降低, 在一些时间段内, 中高水平的 N 沉降会显著降低有机 C、全 N 和速效 N 含量, 中或低水平 N 沉降会显著降低土壤全 P 和速效 P 含量, 而从第 6 个月起只有 LN 处理会显著降低土壤 K 含量。N 沉降总体上会不同程度地提高观光木人工林土壤 pH 值、有机 C、全 N 和速效 N 含量, 有时影响会达显著或极显著水平; 比较而言, LN 和 HN 处理更会造成土壤全 P 的富集, 而 MN 处理对速效 P 的影响更显著; LN 和 HN 处理也会显著增加 K 含量, 且以 LN 处理的效果更稳定。总体上 N 沉降量越大米槠天然林土壤酸化越显著; N 沉降会使其有机 C 和速效 P 量显著波动; 实验期间, HN 处理会显著降低土壤全 N 和速效 N 量, 而 LN 与 MN 处理则会使速效 N 和 K 含量增加; 在 4 种处理下全 P 含量会呈相同趋势波动, 差异不显著。

关键词:氮沉降; 土壤养分; 板栗人工林; 观光木人工林; 米槠天然林

Analysis of the dynamic soil nutrients of a *Castanopsis carlesii*, Chinese Chestnut & Sightseeing Wood natural forest under simulated nitrogen deposition

HUANG Jinni, CHENG Yu*, YANG Hongyu, ZHENG Kaizhou

College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: In this study, four treatments were installed in *Castanopsis carlesii* natural forests, a Chinese chestnut plantation and a Sightseeing wood plantation at Sanming City, Fujian Province, China, for a simulated nitrogen deposition experiment: control (CK, $0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), low nitrogen (LN, $5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), medium nitrogen (MN, $10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), and high nitrogen (HN, $15 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). A solution of NH_4NO_3 was applied as the nitrogen source. The results show that under the experimental conditions, N significantly acidified the soil in the Chinese chestnut plantation, decreasing the mass fraction of P. Over some period, HN treatment can significantly reduce the mass fraction of organic C, total N, and available N; low levels of N deposition can significantly reduce the mass fraction of soil total P and available P; and from six months, only the LN treatment significantly reduced the content of soil K. N settlement generally improved soil pH, organic C, total N, and the available N mass fraction in the Sightseeing wood plantation, and sometimes the impact was significant or extremely significant. In comparison, the LN and HN treatments caused enrichment of the soil total P mass fraction, and the effect of the MN treatment on available P was significant; the LN and HN treatments also significantly increased the mass fraction of K, and the effects of the LN treatment were more stable. With N settlement rose, the acidification of the soil was more significant in the *Castanopsis carlesii* natural forest; the N settlement of organic C and available P fluctuated significantly.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31000298); 福建省自然科学基金资助项目(2015J01122); 福建师范大学优秀青年骨干教师培养基金资助项目(fjsdj2012075)

收稿日期: 2016-07-23; 修订日期: 2016-11-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengyu76@163.com

During the experiment, HN treatment significantly reduced the soil total N and available N; LN and MN treatment increased the mass fractions of available N and K. The mass fraction of P showed the same trend of fluctuations in all 4 treatments, and the difference was not significant.

Key Words: N deposition; soil nutrients; *Chinese chestnut* plantation; *Sightseeing wood* plantation; *Castanopsis carlesii* natural forest

大气中的氮气(N_2)主要通过固 N 菌、蓝藻及闪电等方式转化为硝酸盐,进而被植物吸收利用。而人类活动如化石燃料的燃烧、肥料的使用以及固 N 植物的种植,加速了 N_2 向硝酸盐的转化,并促进新的含氮化合物的生成及沉降^[1]。当沉降量超过生态系统的需求时,N 沉降将对生态系统造成严重的威胁^[2];造成水生生态系统氮饱和,导致水体富营养化、土壤 NO_3^- 淋溶增加、土壤酸度的提高和等价盐基离子淋失,增加植物遭受冷、冻害损伤的几率等^[3]。

N 沉降对生态系统输入的重要具体对象之一是土壤。N 沉降下,土壤酸碱度及养分发生变化^[4-8],在一定程度上增加土壤有效 N,相当于农业上的施加 N 肥的作用。N 沉降对不同地区土壤及其养分的影响不同,研究表明^[9],因温带森林生态系统通常受 N 限制,N 输入能增加森林生态系统生产力;亚热带可能不受 N 限制,因而 N 输入会加剧土壤酸化,增加 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等碱性阳离子的流失和 N_2O 的大量排放,从而降低生态系统生产力并减少碳贮量。

我国南方以亚热带区域为主,相较于全球同纬度地带的荒漠、半荒漠,我国亚热带分布着世界上面积最大、最具代表性的常绿阔叶林^[10],同时,它也是继欧洲、北美之后全球的第三大 N 沉降区^[11],因此,作为 N 沉降的主要受体——我国南方森林一直被学者极大关注。当前,对本区森林凋落物的分解与群落特征等方面的研究较多^[12-18],而对于模拟 N 沉降的研究近年来多关注于温室气体的排放^[19-21],而对土壤养分影响的研究较少。

本研究组在福建省三明格氏栲自然保护区“省部共建湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室”的野外定点观测站内选取了板栗人工林(低 N 土壤)、观光木人工林(中 N 土壤)和米槠天然林(高 N 土壤)构成土壤 N 有效性梯度样地序列,设置模拟 N 沉降野外实验,配合凋落物分解实验,对林地 0—10 cm 土层土壤中的氮(N)、磷(P)、钾(K)等主要营养成分及土壤有机 C 的动态变化进行分析,以期揭示日益加剧的大气 N 沉降对湿润亚热带地区几种林分土壤养分的动态影响。

1 试验地概况

福建省三明市格氏栲自然保护区地理坐标为北纬 26.13°,东经 117.36°。区内的米槠天然林样地海拔 315 m,北偏东 25°,坡度 35°,约 200 a 较少人为干扰,乔木、灌木、草本群落分层明显。区内林分密度为 1955 株/hm²,郁闭度为 0.89,平均树高 11.9m,平均胸径 20cm。建群种为米槠,乔木层主要树种还有木荷(*Schima superba*)、格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)、桂北木姜子(*Litsea subcoriace*)、杜英(*Elaeocarpus decipiens*)等,其中米槠占绝对优势;灌木层(树高小于 3 m)植物种类较丰富,主要有更新的幼苗:米槠、黄丹木姜子(*Litsea elongata*)、赤楠(*Syzygium buxifolium*)、冬青(*Ilex pubescens*)等;草本层植物分布连续,由草珊瑚(*Sarcandra glabra*)、山姜(*Alpinia japonica*)、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)等组成。林下地被层较厚,散布有枯立木、倒木和死树枝杆等,枯枝落叶厚度 5—8 cm^[23-24]。

观光木(*Sightseeing wood*)人工林和板栗人工林均为天然林采伐迹地上栽植的纯林,乔木层植物组成简单。观光木林以观光木占绝对优势,杂生着千年桐(*Vernicia montana*)、东南野桐(*Mallotus lianus*)和红楠(*Machilus thunbergii*)等;板栗人工林灌木层主要由杜茎山(*Maesa japonica*)、红楠、狗骨柴(*Tricalysia dubia*)、虎皮楠(*Daphniphyllum oldhamii*)、鼠刺(*Itea chinensis*)、藤黄檀(*Dalbergia hancei*)等植物组成;草本层由金毛狗

(*Cibotium barometz*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、黑莎草(*Gahnia tristis*)、山姜(*Alpinia japonica*)等组成。

2 材料与方法

2.1 样地布设

分别在米槠天然林、板栗人工林及观光木人工林内各选取 4 个 3 m×3 m 的样方(各样方土壤类型相同、海拔高度和坡度相似,且样方间设置至少 5 m 的缓冲带)作为模拟 N 沉降样地。根据本区的 N 沉降情况,N 处理的强度和频度参考同类研究方法^[22],4 个样方分别设置高氮(HN)、中氮(MN)、低氮(LN)和对照(CK)4 个实验处理,分别喷洒 N 含量浓度为 15、10、5、0 g m⁻² a⁻¹的 NH₄NO₃溶液。将相应质量的 NH₄NO₃溶于 1L 水中,每 3 个月喷洒一次,每年共 4 次,实验从 2011 年 8 月开始,实验为期两年。

2.2 土壤样品的收集与前处理

土壤样品的采集方法为:在喷洒含 N 溶液前,在各个观测点用直径 2 cm,深 10 cm 的取土钻取 5 个以上重复土壤,混合均匀,装袋,挑去细根和砂砾,过 2 mm 的筛,装入自封袋备用,取样时间为 0、3、6、9、12、18、24 个月进行取样。

2.3 化学分析

研磨过筛后的样品用德国 ELEMENTAR 公司产 Vario EL III 元素分析仪测定土壤有机 C 和全 N 含量;电极法测定土壤 pH 值;碱解-扩散法测速效 N;钼锑抗比色法测 P;化学测速法测土壤速效 P;火焰分光光度计法测 K。

2.4 统计分析

利用 EXCELL 和 SPSS17.0 软件分析,用 LSD 多重检验法检测土壤各肥力指标在不同 N 沉降处理间差异的显著性。

3 结果

3.1 模拟 N 沉降下三种林分土壤 pH 值变化动态

从图 1 中可看出,在监测的 24 个月内,无论有无施加外源 N,三明格氏栲自然保护区内三种林地土壤 pH 值的变化趋势均基本相同,板栗人工林与观光木人工林土壤 pH 值均呈升—略降—升—降—升的趋势变化,米槠天然林的则呈升—降—略升变化,且都在监测的第 9 或 12 个月时达到最高值,在第 18 个月时最低。其中,模拟 N 沉降都会使板栗人工林土壤显著酸化($P<0.05$);而米槠天然林,除第 12 个月时的 MN 处理以及第 18 个月时三种加 N 处理均会使土壤 pH 值升高外,N 沉降也会使其土壤酸化,尤其在第 3—12 个月期间土壤酸化显著($P<0.05$),总体上随着 N 沉降量的加大,两林分土壤酸化越显著。与之相反,在整个监测期间,与 CK 相比,除了 HN 处理在第 12 月时会降低观光木人工林土壤 pH 值外,N 沉降会明显提高观光木人工林土壤 pH 值,其中 LN、MN 处理会显著缓解林地土壤酸化($P<0.05$),且以 MN 处理的效果最好,HN 处理次之。

3.2 模拟 N 沉降下三种林分土壤有机 C 含量变化动态

三种林分土壤有机 C 初始含量为:板栗人工林<观光木人工林<米槠天然林的(见图 2)。板栗人工林中,中高水平的 N 沉降会显著降低板栗人工林土壤有机 C 含量($P<0.05$),且以 MN 处理的效果最明显;LN 处理虽然也会使板栗人工林土壤有机 C 含量降低,但作用效果变化较大,与 CK 相比,在 6—9 个月时甚至会使土壤有机 C 含量增加。除第 18 个月时的 LN 处理外,向观光木人工林地添加外源 N 后,会不同程度地提高土壤有机 C 含量。在 0—6 个月,以 MN 处理效果最明显;而其后,则随着 N 沉降量的增大,观光木人工林土壤有机 C 含量越高,在 9—24 个月期间 HN 处理的影响达到了显著水平($P<0.05$)。而土壤有机 C 含量最高的米槠天然林(初始含量达 24.51 g/kg)在不同的实验时期,对不同水平的施 N 水平呈不同响应:在实验初期(0—6 个月期间),模拟 N 沉降会不同程度地增加米槠天然林土壤有机 C 含量,且以 MN 处理效果最佳;在 6—9 个月

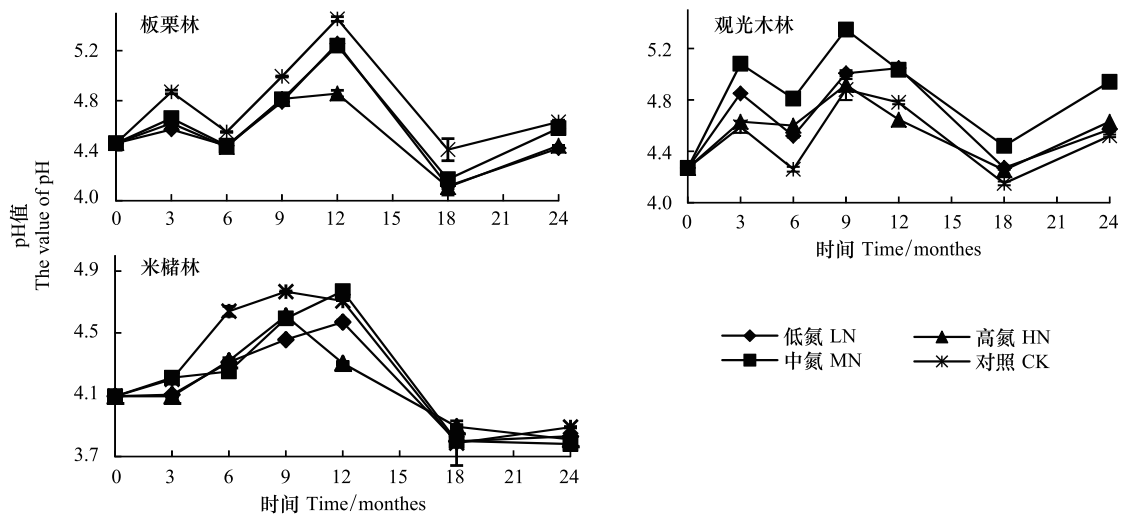


图1 模拟 N 沉降下三种林分土壤 pH 值变化动态

Fig.1 Variations of soil pH in three forests during N deposition

时, LN 处理样地土壤有机 C 会显著上升 ($P < 0.05$), 在 12—24 个月期间又显著下降 ($P < 0.05$), MN 处理则是仅在第 9 个月时会使土壤有机 C 显著下降 ($P < 0.05$), 此外均为不同程度的上升, 但都未达显著水平; 而 HN 处理的影响结果波动较大, 在第 6、18 个月时使样地有机 C 呈显著下降 ($P < 0.05$), 并在第 9、12、24 个月时使其显著上升 ($P < 0.05$)。

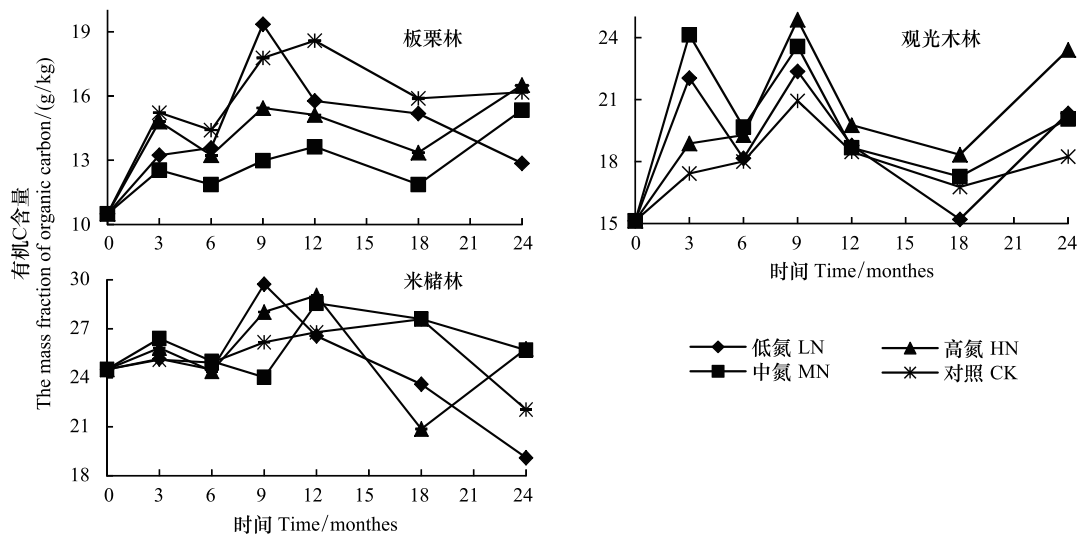


图2 模拟 N 沉降下三种林分土壤有机 C 含量变化动态

Fig.2 Variations of soil organic carbon mass fraction in three forests during N deposition

3.3 模拟 N 沉降下三种林分土壤全 N 和速效 N 含量变化动态

米槠天然林土壤全 N 初始含量为板栗人工林的 1.70 倍、观光木人工林的 1.25 倍 (如图 3)。模拟 N 沉降后可看到: 自然状态下板栗人工林土壤全 N 含量呈升—降—升变化, 施加外源 N 后, 仅在 9—18 个月期间改变了土壤中全 N 的变化趋势, 除了第 24 个月时的 LN 处理外, 都会造成样地土壤全 N 含量明显下降。其中, 中高水平的 N 沉降 (尤其是 MN 处理) 会使板栗林土壤中全 N 含量显著降低 ($P < 0.05$), 在第 18 个月时, MN 处理会使样地土壤全 N 含量最大降低 34.1%。施加外源 N 基本上不会改变观光木人工林土壤全 N 含量的变化趋势, 除在 18 个月时 LN 与 MN 处理会降低土壤全 N 含量外, N 沉降会不同程度的增加观光木林土壤中的

N 含量,且在 0—6 个月时 MN 处理的作用达显著水平($P<0.05$),此后,则以 HN 处理的提升效果最明显。模拟 N 沉降也不改变米槠天然林土壤全 N 的变化趋势,但与观光木人工林地不同,在第 1、3、5 次取样时,添加外源 N 会不同程度的降低米槠天然林土壤中全 N 的含量;在第 3、18 个月时,三种加 N 处理、尤其是 HN 处理会显著降低米槠天然林土壤全 N 含量($P<0.05$,第 3 个月时使土壤 N 含量降低了 30.0%,第 18 个月时降低 25.6%);在其它取样时间点上,与 CK 相比,则作用效果不一,土壤 N 含量有升有降。

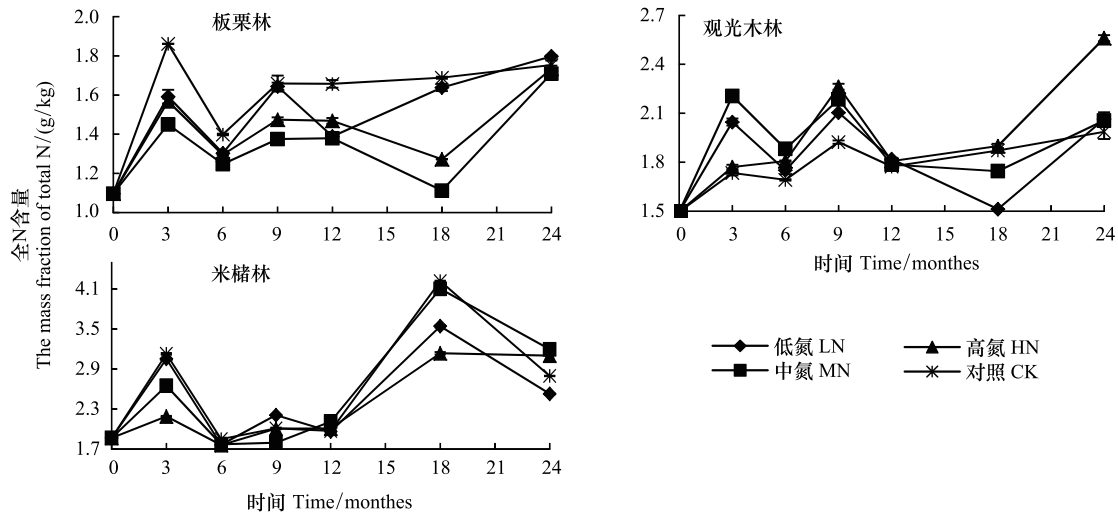


图3 模拟 N 沉降下三种林分全 N 含量变化动态

Fig.3 Variations of soil total nitrogen mass fraction in three forests during N deposition

从图 4 可见,在第 3、18 个月时,添加外源 N 均会显著降低板栗人工林土壤速效 N 含量($P<0.05$),且 MN、HN 处理的影响达极显著水平($P<0.01$)。但是,在第 3 个月时是随着 N 沉降量越高,土壤速效 N 量降低的越少;而在第 18 个月时则随着 N 沉降量越大土壤速效 N 量流失的越多。与之相反,在第 24 个月时则随着 N 沉降量越高板栗林土壤速效 N 富集量越多。与其全 N 含量变化相似,0—9 个月时,N 沉降会使观光木人工林土壤速效 N 含量上升,与 CK 相比,在 0—6 个月期间以 MN 处理效果最显著($P<0.01$),第 3 个月时使其增加了 46.6%,第 6 个月时增加了 15.4%;第 9 个月时则以 LN 处理效果最显著($P<0.05$)。其后,与土壤全 N 含量经历波动后明显上升(其中 HN 处理会显著增加全 N 含量)不同,N 沉降、尤其是中低水平的 N 沉降会使观光木林土壤速效 N 含量降低。在实验初期(0—6 个月),N 沉降使米槠天然林土壤速效 N 含量发生不同程度的降低,但影响均未达到显著水平;其后,在 6—18 个月内,HN 处理会显著降低米槠天然林土壤速效 N 含量($P<0.05$),且降幅随时间在逐渐增大(三次取样结果分别下降了 7.69%;12.8%;40.5%),但到第 24 个月时其作用效果则与等量蒸馏水的效果基本相同。而 LN 处理在第 9—12 个月时、MN 处理在第 6、12—24 个月时均会使米槠林土壤速效 N 含量增加。

3.4 模拟 N 沉降下三种林分土壤全 P 和速效 P 含量变化动态

虽然三种林地土壤的 pH 值、有机 C、全 N、速效 N 含量均为板栗人工林<观光木人工林<米槠天然林的,但土壤全 P 含量却为米槠天然林的<观光木人工林<板栗人工林;以板栗林土壤 P 贮量最为丰富。从图 5 可看出,模拟 N 沉降基本上没有改变板栗人工林土壤全 P 含量的变化趋势,但都会使其 P 含量降低。其中,0—6 个月、12—18 个月时 MN 处理会显著降低板栗人工林土壤全 P 含量($P<0.05$);6—12 个月及 18—24 个月时则以 LN 处理效果最显著($P<0.05$)。在实验前期(0—6 个月),N 沉降会造成观光木人工林土壤全 P 量发生较大的波动,随后 4 种处理土壤 P 含量均呈一至趋势变化。在整个监测期间,与 CK 相比,LN 处理均会造成土壤 P 含量显著上升($P<0.05$),即低水平的 N 沉降有利于观光木人工林土壤 P 的富集;MN 处理则仅在第 6 个月时使土壤全 P 显著增加($P<0.05$),此外均会使其下降;而 HN 处理除在第 3、18 个月时会使土壤全 P 略

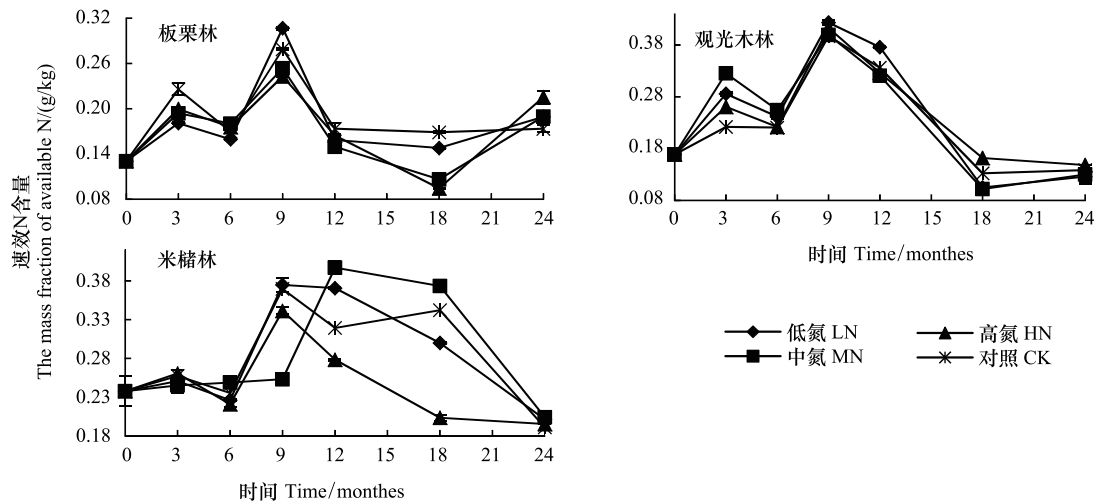


图 4 模拟 N 沉降下三种林分速效 N 含量变化动态

Fig.4 Variations of soil available nitrogen mass fraction in three forests during N deposition

有降低外,其它时间内均会使 P 富集,且在第 6 个月时达到显著水平 ($P < 0.05$),高水平的 N 沉降总体上也利于观光木林土壤 P 的富集。在 2 a 的实验期间,模拟 N 沉降的 4 种处理下米槠天然林土壤全 P 的变化动态相似,均呈降—升—降变化。在 0—12 个月期间, LN 与 HN 处理会使米槠林土壤全 P 含量增加,18、24 个月则会使其小幅降低;而 MN 处理的作用效果在实验期间呈先略降—增—降—略增—降的不显著变化。

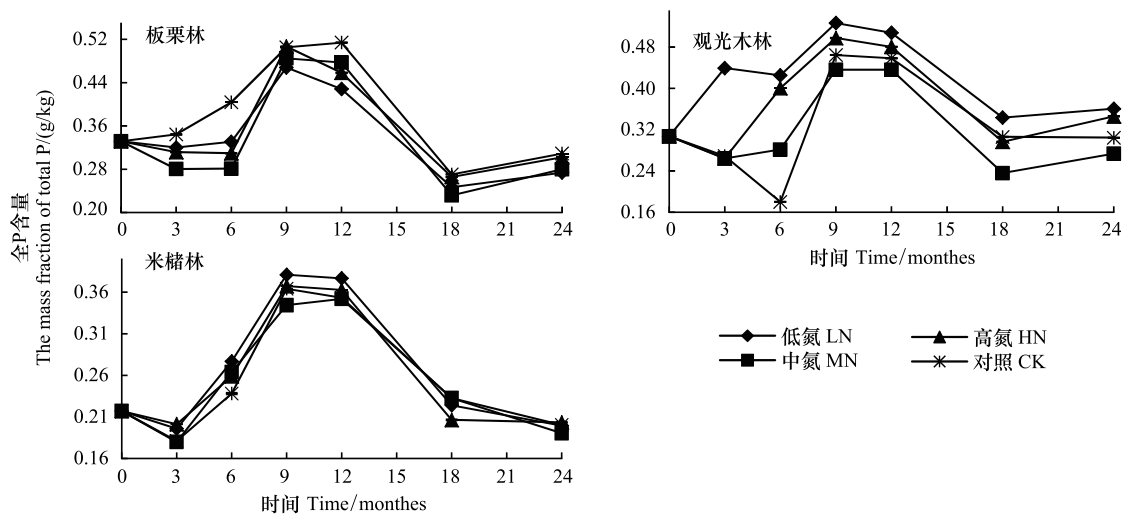


图 5 模拟 N 沉降下三种林分土壤全 P 含量变化动态

Fig.5 Variations of soil total phosphorus mass fraction in three forests during N deposition

如图 6 所示,自然状态下,板栗人工林土壤速效 P 含量呈降—升—降—升变化。模拟 N 沉降后,在 0—18 个月期间,虽然不会改变土壤速效 P 变化趋势,但造成了土壤速效 P 含量的波动。除 18 个月时的 LN 处理外,在 9—24 个月期间(其中 MN 处理是在 6—24 个月期间),N 沉降均造成板栗林土壤速效 P 含量显著下降 ($P < 0.05$),使板栗人工林土壤 P 的贮量和供应能力都降低。在实验期间,N 沉降整体上也未改变观光木人工林土壤速效 P 含量的变化趋势,但在 0—9 个月时,外源 N 均造成土壤速效 P 含量富集,其中 MN 处理在 3—6 个月时的作用效果达到了显著水平 ($P < 0.05$),最高时(第 6 个月)可使土壤速效 P 含量增加到 1.86 倍;随后,三种加 N 处理只造成观光木林土壤速效 P 含量小幅的波动,其影响均不显著。在 0—6 个月期间,施加外源 N 与等量的水对米槠天然林土壤速效 P 含量的影响差别不大;但随后,模拟 N 沉降会造成土壤速效 P 大幅波

动,第 9 个月时,以 MN 处理效果最明显,使米槠林土壤速效 P 含量显著降低了 60.6 % ($P<0.05$),其次为 LN 处理,降低了 50.0 %,也达显著水平 ($P<0.05$);而 HN 处理也在第 12—18 个月时显著降低了米槠林土壤 P 肥供应能力 ($P<0.05$),但在第 24 个月时又造成了速效 P 显著富集 ($P<0.05$)。

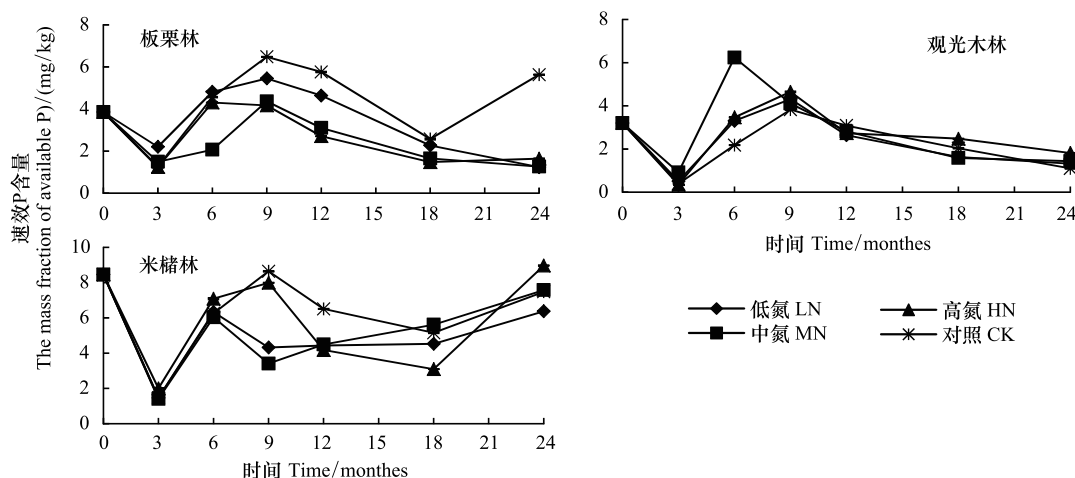


图 6 模拟 N 沉降下三种林分速效 P 含量变化动态

Fig.6 Variations of soil available phosphorus mass fraction in three forests during N deposition

3.5 模拟 N 沉降下三种林分土壤全 K 含量变化动态

三种林分土壤全 K 初始含量为米槠天然林<观光木人工林<板栗人工林,以米槠林土壤 K 肥供应能力最差。第一次取样后,无论添加外源 N 与否,三林分土壤 K 含量均呈略升—略降—升—降相同趋势变化(如图 7)。模拟 N 沉降后,在实验初期(0—3 个月)会造成板栗人工林土壤 K 含量小副下降,且随着 N 沉降量的增大而降低量增多;其后,林地 K 含量即与另外两种林分的呈相同趋势变化,且从第 6 个月起, LN 处理会使板栗林土壤 K 含量显著下降 ($P<0.05$);但除了 MN 处理在第 24 个月时会显著降低土壤 K 含量外,中高水平的 N 沉降虽然会造成板栗林土壤 K 或富集或淋失,但影响都未达显著水平。除第 9 个月外,与板栗人工林情况不同, LN 处理会使观光木人工林土壤 K 含量显著上升 ($P<0.05$),且在后期(18—24 个月)其影响逐渐增强;而 HN 处理也在第 6、12—24 个月时显著增加观光木林土壤 K 含量 ($P<0.05$);相比较而言,在实验期间, MN 处理对林地 K 含量的影响效果与等量水的相似;低或高水平的 N 沉降量会显著增加三明格氏栲自然保护区内观光木人工林土壤 K 含量,且以低水平 N 沉降的作用效果更稳定。 LN 处理也会使米槠天然林土壤 K 含量显著上升 ($P<0.05$),与观光木林的相似,在后期(18—24 个月)其影响增大;在 0—18 个月期间, MN 处理也会不同程度地提高土壤 K 含量,但影响力逐渐降低,到第 24 个月时甚至会降低土壤 K 含量;而在同期间, HN 处理对米槠天然林土壤 K 含量的影响效果也与等量水的差别不大;低水平的 N 沉降能更好的提高米槠天然林土壤 K 含量。

4 讨论

4.1 模拟 N 沉降下三种林分土壤 pH 值变化

土壤 pH 值的变化直接影响着土壤中营养元素的状态和有效性,从而影响植物的生长发育及土壤中微生物的活性^[25]。土壤中的 H^+ 主要来源于酸沉降、微生物分解有机质产生、 NH_4^+ 硝化作用^[26]。长期且较高水平的 N 沉降会导致土壤酸化^[27-30]。N 添加会导致土壤中大量的 NH_4^+ 富集^[27],提高硝化和反硝化速率^[27,31],使 pH 下降。本研究中,板栗人工林和米槠天然林的研究结果基本上符合这一观点,但观光木人工林的响应却与此相悖。Gunderson 和 Rasmussen 等^[32]认为,从对 N 沉降的响应角度可以将土壤分为四种类型,其中非硝化作用类型可能受土壤本身过多 NH_4^+ 的影响,能抵抗明显的 N 沉降输入而不出现硝化反应的变化。本研究中

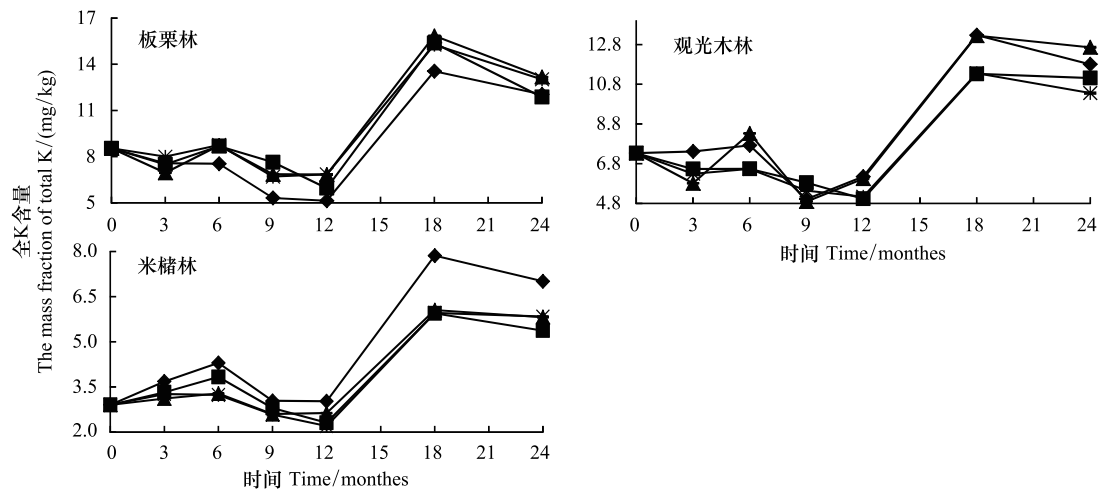


图7 模拟 N 沉降下三种林分土壤 K 含量变化动态

Fig.7 Variations of soil total potassium mass fraction in three forests during N deposition

外加的 N 源为 NH_4NO_3 , 其中 NO_3^- 易从土壤中流失, 这导致可能为非硝化作用类型的观光木人工林在 N 沉降后土壤中发生 NH_4^+ 富集, 土壤 pH 值上升。

4.2 模拟 N 沉降下三种林分土壤有机 C 含量值变化

土壤有机 C 是全球 C 循环中的重要碳库, 土壤有机 C 库约为大气碳库的 3 倍、植被碳库的 2.5—3 倍^[4]。土壤有机 C 的矿化直接影响着土壤养分的释放和供给、土壤质量的维持、温室气体的形成以及土壤微生物的活动等^[33]。N 沉降的增加会降低土壤有机 C 矿化量, 使土壤总有机 C 含量增加^[4, 34]; 提高土壤有机 C 的固持能力^[35]; 增加土壤有机 C 中较稳定部分的含量及土壤可溶性有机 C 含量^[36-37]。本研究中观光木人工林的研究结果基本上符合他们的结论, N 添加增加了土壤有机 C 含量。而段雷等^[38]研究发现土壤 N 饱和状况下会使土壤有机 C 含量下降。N 沉降会使板栗人工林土壤有机 C 含量降低, 部分的 N 沉降处理使米楮天然林土壤有机 C 含量降低, 可能是受土壤 N 饱和的影响。

4.3 模拟 N 沉降下三种林分土壤全 N 和速效 N 含量值变化

N 素的内循环主要有矿化、硝化、微生物固持、植物吸收和凋落物释放^[31], 而反硝化作用将 NO_3^- 转化为气态 N_2 和 N_2O ^[31], 使系统内的 N 素流失。方运霆等^[9, 31]研究发现: 添加 NH_4NO_3 会直接导致土壤中 NH_4^+ 及 NO_3^- 浓度上升, 使硝化和反硝化速率增加, N_2O 的大量排放; Gunderson 等^[32]发现硝化类型的土壤在受 N 沉降影响后, 硝化速率和 NO_3^- 流失速率增加, 短期内会使土壤酸化; 沈芳芳等^[4]发现长期而持续的高 N 输入将提高土壤矿化速率, 导致亚热带森林土壤酸化; 板栗人工林 N 沉降可能促进了土壤中硝化和反硝化反应, 使土壤 pH 值降低, 加之 NO_3^- 的流失、 N_2O 的排放以及植物的吸收利用, 土壤 N 素汇增加。观光木人工林在添加外源 N 后发生 NH_4^+ 富集, pH 值上升, 虽然全 N 含量上升, 但增加的 N 素会被土壤有机质吸收, 减小了土壤 C/N 比, 增加土壤含 N 有机物分解过程中 N 素的释放速率(矿化)^[31, 39], 但矿化速率在达到高峰后下降, 反应为土壤速效 N 含量降低直至接近对照甚至更低^[40]。米楮天然林土壤速效 N 含量与全 N 含量的受模拟 N 沉降实验的影响情况不甚相同, 可能是中低水平的 N 沉降增加了 N 素的释放速率(矿化)^[39, 41], 且矿化速率比反硝化及 NO_3^- 流失速率大, 而高水平的 N 沉降使硝化和反硝化反应及 NO_3^- 流失速率大于所提升的矿化速率, 矿化速率相对下降^[40], 土壤 N 素以有机 N 等非速效形式存在。

4.4 模拟 N 沉降下三种林分土壤全 P 和速效 P 含量值变化

研究表明, 在热带和亚热带森林生态系统中, P 是生物生长和重要生态过程中的主要的限制元素^[41-43]。N 沉降能促使生物产生更多的胞外磷酸酶, 而加速了土壤磷循环^[44-46]。速效 P 是指土壤中能直接被植物直接吸

收利用的磷组分,是土壤 P 养分供应水平高低的指标^[47]。

本研究中,板栗人工林土壤全 P 含量下降,这可能是 N 沉降能促使生物产生更多的胞外磷酸酶,导致土壤有机质释放出更多的磷酸盐^[45],磷酸盐易被植物利用,因此加速了 P 素的汇;而观光木人工林中全 P 含量上升,可能是 N 沉降促使生物产生更多的胞外磷酸酶,加速了凋落物、动物残体等有机质中 P 素的分解^[46],且分解的速率大于植物利用的速率;米楮天然林则可能是因为亚热带森林受 P 限制^[41-43],释放 P 素速率与被生物利用的速率相近,因而土壤中全 P 含量的变化较小。

李银等^[48]认为:N 沉降增加能缓解鼎湖山土壤 P 限制;但当 N 含量超过生态系统需求时,会导致土壤有效 P 含量下降。模拟 N 沉降整体上使板栗人工林与米楮天然林土壤速效 P 含量下降,可能是因为林中植物的吸收速率大于有机质分解释放有效 P 的速率,也可能是因 N 含量超过了森林生态系统的需求所致;相较于初始状态,观光木人工林在实验前期(3-9 个月)土壤中速效 P 大量富集,但随后速效 P 逐渐减少流失,可能即是前期在外源 N 的影响下土壤酶活性的提高,加速了土壤中有有机质及凋落物中 P 素的分解,增加了土壤速效 P 含量,但随着植物对 P 吸收速率的提高及整个系统中 N 量过饱和的影响,无论是否添加外源 N,土壤中有效 P 含量均逐渐减少。

4.5 模拟 N 沉降下三种林分土壤全 K 含量值变化

K 是植物生长所必需大量营养元素之一^[49],在植物的生长代谢过程中举足轻重^[50]。占丽平等^[51]发现土壤中 K^+ 受 H^+ 与 Al^{3+} 浓度影响,与其竞争吸附位点,pH 值升高,能提高土壤固 K 能力。N 沉降,特别是高水平的 N 沉降会显著使板栗人工林土壤酸化,以 LN 处理更符合这一研究结果,显著降低了板栗人工林土壤 pH 值和土壤固 K 能力;在观光木人工林地内,LN 处理显著提高了观光木人工林土壤的 pH 值和土壤固 K 能力,而最显著提高土壤 pH 值的 MN 处理对林地固 K 能力的影响与水的作用相当;在第 0—12 与第 24 个月期间,LN 处理虽然使林地土壤显著酸化($P < 0.05$),pH 值降低,但其却会显著提高米楮天然林土壤固 K 能力,同时,显著影响土壤 pH 值的 HN 处理对林地固 K 能力的影响与水的作用相当,与占丽平等观点有较大不同。除了地域不同、林分类型与监测时间的差异会影响到实验结果,造成本研究结论与前人的研究有较大出入外,具体造成研究差异的原因,还有待于在进一步的实验分析中去探寻。

5 结论

在福建省三明格氏栲自然保护区内,N 沉降使板栗人工林土壤显著酸化,P 含量降低,中高水平的 N 沉降(尤其是 MN 处理)显著降低有机 C 和全 N 含量,在第 3、18 个月时添加 N 均显著(MN、HN 处理极显著)降低速效 N 含量,中或低水平 N 沉降显著降低土壤全 P 含量,在 9—24 个月(MN 处理是在 6—24 个月)期间,N 沉降均显著降低土壤速效 P 含量;而从第 6 个月起只有 LN 处理会显著降低土壤 K 含量。N 沉降总体上会不同程度地提高观光木人工林土壤 pH 值、有机 C 和全 N 含量,中低水平 N 沉降(尤其是 MN 处理)会显著缓解土壤酸化;在 0—6 个月期间 MN 处理能显著提高全 N 含量并极显著提高速效 N 量,9 个月后,N 沉降、尤其是中低水平的 N 沉降会降低土壤速效 N 量;在实验前期(0—6 个月),LN 处理显著利于土壤全 P 的富集,HN 处理则仅在第 6 个月时会显著增加 P 含量;除 MN 处理在 3—6 个月时使土壤速效 P 显著富集外,其它时间内速效 P 含量的波动均不显著;低或高水平 N 沉降会显著增加土壤 K 含量,且以低水平 N 沉降的效果更稳定。在第一年内,总体上随 N 沉降量加大,米楮天然林土壤酸化越显著;N 沉降会使土壤有机 C 含量波动较大,造成有机 C 量显著上升或显著下降;在第 3、18 个月时,N 沉降(尤其是 HN 处理)会显著降低土壤全 N 含量,其它时间段内则作用效果不一;在实验期间,HN 处理会使土壤速效 N 量显著降低,而 LN 与 MN 处理则会使速效 N 含量增加;4 种处理下土壤全 P 含量会呈相同趋势波动,但差异均不显著;第 9 个月时,中低水平 N 沉降显著降低了土壤速效 P 含量,而 HN 处理也造成了速效 P 量显著减少后又显著富集;低水平的 N 沉降能更好的提高米楮林土壤 K 含量,会使土壤 K 含量显著上升。

不同的土壤 pH 值、土壤有机 C 含量及土壤养分含量本底值不同,微生物分布状况不同,凋落物分解速率

及降水淋溶等存在差异,导致其对 N 沉降的响应不同,且响应后土壤肥力各指标发生变化,相互影响,因而湿润亚热带常绿阔叶林土壤养分对 N 沉降的响应机制仍需进一步的研究。

参考文献 (References):

- [1] Keeler B L, Hobbie S E, Kellogg L E. Effects of long-term nitrogen addition on microbial enzyme activity in eight forested and grassland sites: implications for litter and soil organic matter decomposition. *Ecosystems*, 2009, 12(1): 1-15.
- [2] 樊后保, 廖迎春, 刘文飞, 袁颖红, 李燕燕, 黄荣珍. 模拟氮沉降对杉木幼苗养分平衡的影响. *生态学报*, 2011, 31(12): 3277-3284.
- [3] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [4] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 刘苑秋. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 517-527.
- [5] Bowman W D, Zheng X. Biotic controls over ecosystem response to environmental change in alpine tundra of the Rocky Mountains. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2000, 29(7): 396-400.
- [6] 樊后保, 黄玉梓, 袁颖红, 李燕燕, 黄荣珍, 樊海燕. 森林生态系统碳循环对全球氮沉降的响应. *生态学报*, 2007, 27(7): 2997-3009.
- [7] 樊后保, 刘飞文, 李燕燕, 廖迎春, 袁颖红, 徐雷. 亚热带杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生长与土壤养分对氮沉降的响应. *生态学报*, 2007, 27(11): 4630-4642.
- [8] 方运霆, 莫江明, 周国逸, Gundersen P, 李德军, 江远清. 南亚热带森林土壤有效氮含量及其对模拟氮沉降增加的初期响应. *生态学报*, 2004, 24(11): 2353-2359.
- [9] 方运霆, 莫江明, 周国逸, 薛璟花. 鼎湖山主要森林类型植物胸径生长对氮沉降增加的初期响应. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13(3): 198-204.
- [10] 杨玉盛, 郭剑芬, 王健, 盛浩, 李熙波, 林成芳, 王维奇, 谢锦升, 陈光水. 我国南方植物生态学研究述评. *地理学报*, 2009, 64(9): 1048-1057.
- [11] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 64-71.
- [12] 林开敏, 章志琴, 曹光球, 何宗明, 马祥庆. 杉木与楠木叶凋落物混合分解及其养分动态. *生态学报*, 2006, 26(8): 2732-2738.
- [13] 李晓杰, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 林廷武, 施友文, 谢锦升, 杨玉盛. 中亚热带杉木人工林和米槠次生林凋落物添加与去除对土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(5): 447-457.
- [14] 刘飞文, 樊后保, 高春芬, 黄荣珍, 苏兵强. 连续年龄序列桉树人工林凋落物量及养分通量. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 1928-1934.
- [15] 余再鹏, 万晓华, 胡振宏, 王民煌, 刘瑞强, 郑璐嘉, 何宗明, 黄志群. 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应. *生态学报*, 2014, 34(10): 2529-2538.
- [16] 王邵军, 阮宏华, 汪家社, 徐自坤, 吴焰玉. 武夷山典型植被类型土壤动物群落的结构特征. *生态学报*, 2010, 30(19): 5174-5184.
- [17] 丁晖, 方炎明, 杨青, 陈晓, 袁发银, 徐辉, 何立恒, 严靖, 陈婷婷, 余朝健, 徐海根. 武夷山中亚热带常绿阔叶林样地的群落特征. *生物多样性*, 2015, 23(4): 479-492.
- [18] 叶万辉, 曹洪麟, 黄忠良, 练璐瑜, 王志高, 李林, 魏识广, 王章明. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林 20 公顷样地群落特征研究. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 274-286.
- [19] 张伟, 莫江明, 方运霆, 鲁显楷, 王晖. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响. *生态学报*, 2008, 28(5): 2309-2319.
- [20] 莫江明, 方运霆, 林而达, 李玉娥. 鼎湖山主要森林土壤 N_2O 排放及其对模拟 N 沉降的响应. *植物生态学报*, 2006, 30(6): 901-910.
- [21] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 李德军, 薛璟花. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收对模拟 N 沉降的短期响应. *生态学报*, 2005, 25(4): 682-690.
- [22] Gundersen P, Emmett B A, Kj  naas O J, Koopmans C J, Tietema A. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: a synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1-3): 37-55.
- [23] 王家骏, 程煜, 杨玉盛, 林成芳, 林伟盛, 彭建勤. 米槠叶凋落物分解及养分释放对模拟 N 沉降的响应. *福建林学院学报*, 2014, 34(2): 113-119.
- [24] 林伟盛, 杨智杰, 郭剑芬, 黄咏梅, 王家骏, 吴波波, 刘小飞, 吕理兴, 陈光水. 米槠天然林转变成杉木人工林后土壤可溶性有机碳的变化. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(1): 41-47.
- [25] 高富, 沙丽清, 许建初. 西庄河流域土地利用方式对土壤肥力影响的研究. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 223-226.
- [26] 袁颖红, 樊后保, 李燕燕, 刘文飞, 廖迎春, 沈芳芳, 黄荣珍. 模拟氮沉降对土壤酸化和土壤盐基离子含量的影响. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(4): 461-466.

- [27] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响. 林业科学, 2011, 37(4): 111-116.
- [28] 陈高起, 傅瓦利, 罗亚晨, 高文龙, 李胜功, 杨浩. 氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响. 环境科学, 2014, 35(12): 4686-4694.
- [29] 孙本华, 胡正义, 吕家珑, 周丽娜, 徐成凯. 模拟氮沉降下南方针叶林红壤的养分淋溶和酸化. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1820-1826.
- [30] Liu K H, Fang Y T, Yu F M, Liu F R, Peng S L. Soil Acidification in response to acid deposition in three subtropical forests of subtropical China. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 399-408.
- [31] 方运霆, 莫江明, Gundersen P, 周国逸, 李德军. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [32] Gundersen P, Rasmussen L. Nitrification in forest soils: effects from nitrogen deposition on soil acidification and aluminum release // Ware G W, ed. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. New York: Springer-Verlag, 1990, 113: 1-45.
- [33] 苏丹, 张凯, 陈法霖, 李睿达, 郑华. 施氮对不同有机碳水平桉树林土壤微生物群落碳代谢的影响. 生态学报, 2015, 35(18): 5940-5947.
- [34] 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 张子文, 孟庆银, 胡锋, 李辉信. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤可溶性有机碳和微生物量碳的影响. 水土保持学报, 2012, 26(12): 138-143.
- [35] 王晖, 莫江明, 鲁显楷, 薛璟花, 李炯, 方运霆. 南亚热带森林土壤微生物量碳对氮沉降的响应. 生态学报, 2008, 28(2): 470-478.
- [36] 龙凤玲, 李义勇, 方熊, 黄文娟, 刘双娥, 刘菊秀. 大气 CO₂ 浓度上升和氮添加对南亚热带模拟森林生态系统土壤碳稳定性的影响. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1053-1063.
- [37] 许凯, 徐钰, 张梦珊, 曹国华, 葛之蕙, 阮宏华. 氮添加对苏北沿海杨树人工林土壤活性有机碳库的影响. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1480-1486.
- [38] 段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全. 模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响. 环境科学, 2013, 34(6): 2422-2427.
- [39] 项文化, 黄志宏, 闫文德, 田大伦, 雷丕峰. 森林生态系统碳循环功能耦合研究综述. 生态学报, 2006, 26(7): 2365-2372.
- [40] Aber J D, McDowell W, Nadelhoffer K J, Magill A, Berntson G, Kamakea M, McNulty S, Currie W, Rustad L, Fernandez I. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems. *Bioscience*, 1998, 48(11): 921-934.
- [41] 赵阳, 张弛, 赵玢菲, 徐小牛. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤氮素矿化的影响. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1690-1697.
- [42] Chapin F S III, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York, USA: Springer-Verlag, 2002: 198-200.
- [43] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. 植物生态学报, 2010, 43(1): 64-71.
- [44] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2012, 193(3): 696-704.
- [45] Treseder K K, Vitousek P M. Effects of soil nutrient availability on investment in acquisition of N and P in Hawaiian rain forests. *Ecology*, 2001, 82(4): 946-954.
- [46] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 王绍强, 王辉民. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制. 生态学报, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [47] 王永壮, 陈欢, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. 应用生态学报, 2013, 24(1): 260-268.
- [48] 李银, 曾曙才, 黄文娟. 模拟氮沉降对鼎湖山森林土壤酸性磷酸单酯酶活性和有效磷含量的影响. 应用生态学报, 2011, 22(3): 631-636.
- [49] Singh B, Singh Y, Imas P, Chang X J. Potassium nutrition of the rice-wheat cropping system. *Advances in Agronomy*, 2004, 81: 203-259.
- [50] Ashley M K, Grant M, Grabov A. Plant responses to potassium deficiencies: A role for potassium transport proteins. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(2): 425-436.
- [51] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 王瑾, 廖志文. 土壤钾素运移的影响因素研究进展. 土壤, 2012, 44(4): 548-553.