

DOI: 10.5846/stxb201601080054

周世兴, 肖永翔, 向元彬, 黄从德, 唐剑东, 韩博涵, 罗超. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶分解过程中基质质量的影响. 生态学报, 2016, 36(22): - .

Zhou S X, Xiao Y X, Xiang Y B, Huang C D, Tang J D, Han B H, Luo C. Effects of simulated nitrogen deposition on the substrate quality of foliar litter in natural evergreen broad-leaved forest in a rainy area in Western China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

## 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶分解过程中基质质量的影响

周世兴, 肖永翔, 向元彬, 黄从德\*, 唐剑东, 韩博涵, 罗超

四川农业大学林学院, 成都 611130

**摘要:**为理解氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落物分解过程的影响, 采用立地控制实验和凋落物分解袋法, 研究了低氮沉降(L, 50 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、中氮沉降(M, 150 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)和高氮沉降(H, 300 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶分解过程中基质质量的影响。结果表明: N 沉降抑制了凋落叶的分解, 并随着 N 沉降量的增加, 抑制作用增强。N 沉降遏制了凋落叶的 C、N 释放和纤维素降解, 促进了 P 释放。N 沉降提高了凋落叶的 C/P 比, 中氮和高氮处理提高了凋落叶 C/N 比。N 沉降显著增加了凋落叶 N、木质素和纤维素的含量, 分解 1 a 后, 各 N 沉降处理的木质素/N 和纤维素/N 均显著高于对照。N 沉降提高了质量残留率与 C/N、木质素/N 和纤维素/N 的相关性, 降低了与 C/P 的相关性。可见, 模拟 N 沉降显著影响了华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶分解过程中的基质质量, 进而影响了凋落叶的分解过程。

**关键词:**凋落物分解; N 沉降; 基质质量; 华西雨屏区; 天然常绿阔叶林

## Effects of simulated nitrogen deposition on the substrate quality of foliar litter in natural evergreen broad-leaved forest in a rainy area in Western China

ZHOU Shixing, XIAO Yongxiang, XIANG Yuanbin, HUANG Congde\*, TANG Jiandong, HAN Bohan, LUO Chao

College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

**Abstract:** Litter, an essential component of the forest ecosystem, plays an important role in maintaining site fertility, sequestering carbon, and nursing soil biodiversity. However, the substrate quality of decomposing litter is affected by increasing nitrogen deposition mainly because of fossil fuel combustion and chemical fertilizer production and use. Theoretically, decomposition of atmospheric nitrogen may have a strong impact on litter decomposition in three ways. The first approach is that nitrogen deposition may alter the chemical components of litter by direct nitrogen addition. The second approach is that nitrogen addition can change the growth of plants and carbon and nutrient allocations in plant tissues and indirectly lead to changes in litter substrate quality. The third approach is that nitrogen deposition may result in soil acidification, and, in turn, have strong effects on litter substrate quality indirectly. To date, there is limited information on the changes in litter substrate quality due to atmospheric nitrogen deposition in a rainy area in Western China. To understand the effects of increasing nitrogen deposition on the litter decomposition process in evergreen broadleaved forests in a rainy area in Western China, a field litter decomposition experiment was conducted in a natural evergreen broad-leaved forest in Ya'an City. Between November 2013 and November 2014, we conducted the field experiment by using the litterbag method.

**基金项目:**国家“十二五”科技支撑项目(2010BAC01A11); 四川省“十二五”农作物育种攻关项目“突破性经济林(竹)新品种选育”(2011NZ0098-10)

收稿日期: 2016-01-08; 修订日期: 2016-04-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyxq100@aliyun.com

Four levels of nitrogen deposition were set: control ( $0 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), low nitrogen ( $50 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), medium nitrogen ( $150 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), and high nitrogen ( $300 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). The results indicated that nitrogen deposition significantly influenced litter substrate quality, and concentrations of carbon, nitrogen, and cellulose in the leaf litter were found to increase significantly with nitrogen addition. Nitrogen deposition also affected C/P and C/N of the leaf litter; all nitrogen deposition treatments significantly increased C/P, whereas medium nitrogen and high nitrogen treatments significantly increased C/N. Since nitrogen deposition significantly increased the nitrogen concentration of the litter, exacerbating the accumulation of litter lignin and cellulose, after decomposing for 1 a, lignin/N and cellulose/N after each nitrogen deposition treatment were significantly higher than those in the control. The correlation coefficient of mass remaining of foliar litter with C/N, lignin/N, and cellulose/N was increased by nitrogen deposition, while C/P was reduced. Thus, simulated nitrogen deposition influenced the substrate quality of foliar litter in natural evergreen broad-leaved forest in a rainy area in Western China, and influenced the decomposition process of the litter.

**Key Words:** litter decomposition; N deposition; substrate quality; rainy area of West China; natural evergreen broad-leaved forest.

19 世纪后期以来,随着人类进入工业化社会,化学氮肥的生产和使用、矿物燃料的燃烧以及畜牧业的迅猛发展,导致  $\text{NH}_3$  和  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}+\text{NO}_2$ ) 大量排放,使大气中的  $\text{Nr}$  (活性氮, reactive nitrogen) 含量持续升高,人为干扰下的大气氮素沉降已成为影响全球氮素生物化学循环的重要原因之一<sup>[1-3]</sup>。

凋落物分解过程是森林生态系统碳和养分循环的关键过程,受到气候、凋落物质量、土壤生物群落等生物和非生物因素的综合影响<sup>[4-5]</sup>。其中,凋落物基质质量是本质因素<sup>[4,6]</sup>,是影响凋落物分解的决定性因子之一。常见的凋落物基质质量指标有 N 含量、P 含量、木质素与纤维素含量、C/N、木质素/N 和 C/P 等<sup>[5,7]</sup>。其中 C/N 和木质素/N 最能反映凋落物分解速率<sup>[4,8]</sup>。N 沉降改变了全球 N 循环,也影响着森林凋落物的分解<sup>[9]</sup>。因环境不同,凋落物本身性质差异,分解阶段不同等原因<sup>[10]</sup>,N 沉降影响凋落物分解的结果有:促进作用<sup>[11]</sup>、抑制作用<sup>[12-13]</sup> 和无显著影响<sup>[14]</sup>。但以往的研究主要集中在 N 沉降对凋落物分解的直接影响,有关 N 沉降对凋落物基质质量的影响的报道还相对较少<sup>[15]</sup>。

华西雨屏区是一个大尺度、复合性的生态过渡带,是我国西部地区以阴湿为主要特征的罕见气候地理单元,是我国西部生态保护与建设的一道绿色屏障<sup>[16]</sup>。该地区降雨丰富,其特殊的地形和气候使得来自成都平原携带有大量  $\text{NO}_x$  和  $\text{NH}_3$  的污染物随降雨沉降下来,增加了该区域的氮沉降。有研究表明,华西雨屏区全年总 N 沉降量为  $95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,N 沉降量较高并有逐年增加的趋势<sup>[17]</sup>。因此,本文以华西雨屏区天然常绿阔叶林为对象,采用立地控制实验和凋落物分解袋法,通过模拟大气 N 沉降,研究了大气 N 沉降对该区最为典型的常绿阔叶林生态系统凋落叶分解过程中基质质量的影响,有助于理解全球环境变化情景下,华西雨屏区生态系统分解过程可能发生的变化,为研究该区天然常绿阔叶林生态系统养分循环提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究区位于四川省雅安市雨城区碧峰峡风景区( $29^{\circ}40' \text{N}$ ,  $102^{\circ}90' \text{E}$ ),海拔  $977.62 \text{ m}$ 。气候温和湿润,属亚热带湿润季风型山地气候,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温  $5231^{\circ}\text{C}$ , 年均气温  $16.2^{\circ}\text{C}$ , 最冷月(1 月)平均气温  $6.1^{\circ}\text{C}$ , 最热月(7 月)平均气温  $25.4^{\circ}\text{C}$ , 日照长度  $1039.6 \text{ h}$ , 全年太阳辐射总量  $3640.13 \text{ MJ}/\text{cm}^2$ , 无霜期  $304 \text{ d}$ , 年平均降水量  $1772.2 \text{ mm}$ , 年蒸发量  $1011.2 \text{ mm}$ 。研究区内植物种类丰富,群落结构复杂。主要树种有木荷(*Schima superba*)、硬斗石栎(*Lithocarpus hancei*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、润楠(*Machilus pingii*)、总状山矾(*Symplocos botryantha*)、桉木(*Eurya nitida*)、青榨槭(*Acer davidii*)、大叶石栎(*L. megalophyllus*)、野漆(*Rhus succedanea*)、深裂中华槭(*A. sinense*)、利川润楠(*M. lichuanensis*)、肉桂(*Cinnamomum cassia*) 和山茶(*Camellia japonica*) 等。

土壤类型以黄壤为主,土壤厚度>60 cm,立地条件基本一致<sup>[18]</sup>。

## 1.2 试验设计

2013 年 10 月在四川省雅安市雨城区碧峰峡景区选择具有代表性的天然常绿阔叶林作为研究对象,在研究对象内建立 12 个 3 m×3 m 的小样方,每个样方间设>3 m 的缓冲带。华西雨屏区全年总 N 沉降量为 95 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,并有逐年上升的趋势<sup>[18]</sup>。据此本试验设置 4 个 N 沉降水平,即对照(CK, 0 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、低氮沉降(L, 50 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、中氮沉降(M, 150 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)和高氮沉降(H, 300 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),每个水平 3 个重复。将施氮量平均分成 24 等分,从 2013 年 11 月 10 日起,每 15 d 用 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 进行模拟氮沉降。施氮的方法是将每个样方所需 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 溶解在 2 L 水中,用手提式喷雾器在林地样方 50 cm 高度来回均匀喷洒,对照样方喷施 2 L 水以减少因外加水而造成对森林生物地球化学循环的影响。

2013 年 10 月前在阔叶林林地表面铺上尼龙网收集新近凋落的凋落叶(主要树种为木荷、硬斗石栎和海桐),带回实验室自然风干,在风干过程中将凋落叶充分混合,以保证分解袋中凋落叶组分和比例一致。称取 20.0 g 自然风干凋落叶装入准备好的尼龙网分解袋中(大小为 20 cm×20 cm,上下表面孔径均为 1 mm×0.5 mm)。随机取凋落袋 5 袋,于 65℃ 烘干至恒重,测定凋落叶样品的含水率和初始化学性质。阔叶林凋落叶初始全 C 含量为(430.73±8.71) g/kg、全 N 含量为(8.32±1.14) g/kg、全 P 含量为(0.42±0.04) g/kg、全 K 含量为(13.25±0.24) g/kg、全 Ca 含量为(2.45±0.06) g/kg、全 Mg 含量为(1.36±0.07) g/kg、木质素含量为(157.10±1.11) g/kg 和纤维素含量为(122.81±8.71) g/kg。2013 年 11 月,将事先准备好的凋落袋均匀地布置在 12 个样方土壤表面,相邻凋落叶分解袋间至少保持 2 cm 间距以免相互影响。

## 1.3 样品收集

从开始模拟氮沉降起,每隔 2 个月收集一次凋落叶,即 2014 年 1 月、3 月、5 月、7 月、9 月和 11 月中旬采集,共 6 次。每次随机从每个样方中采集凋落叶分解袋 3 袋(即每个水平取 9 袋)。凋落袋取回后,小心去除泥土杂物及新生根系,带回实验室 65℃ 烘干至恒重后,称量,计算凋落叶质量损失。每月下旬对样方进行处理前,使用土壤温度计和时域反射仪(miniTrase6050X3KI, CT, USA)测定不同处理 0—10 cm 土壤温度和体积含水量,2013 年 11 月—2014 年 11 月的土壤温度和含水量变化见图 1。

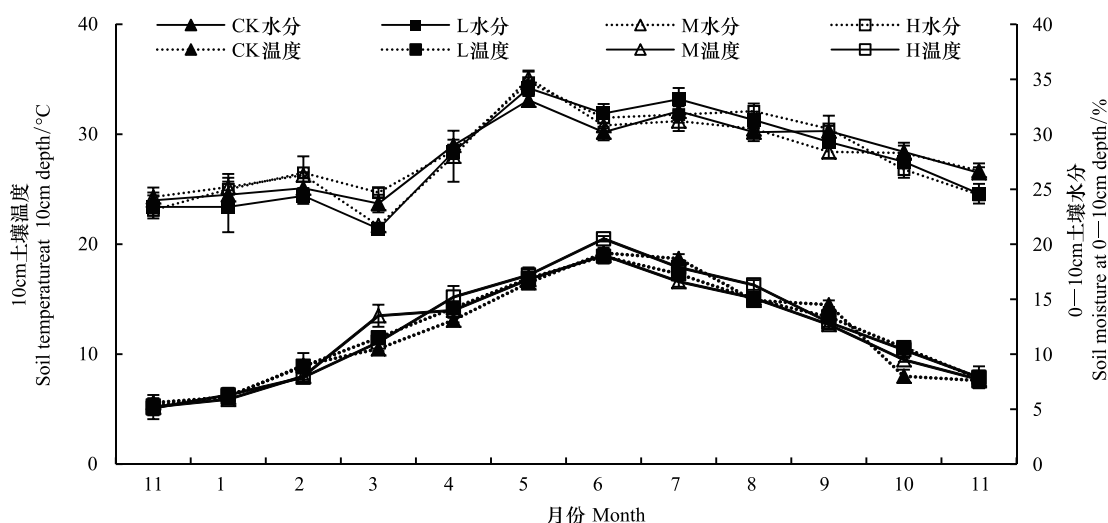


图 1 土壤温度和土壤水分的月变化

Fig.1 Monthly variation of soil temperature and soil moisture

## 1.4 指标测定方法

将取回的凋落叶烘干称重后,用植物粉碎机(高速万能粉碎机,FW-100,北京市永光明医疗仪器厂)将分解袋内一部分凋落叶粉碎并过 1 mm 筛,测定凋落叶中元素和木质素、纤维素含量。全碳用外加热重铬酸钾

氧化法测定 (LY/T1237-1999), 全氮用靛蓝比色法测定 (LY/T1271-1999), 全磷用钼锑抗比色法测定 (LY/T1271-1999), 木质素、纤维素含量用改进的酸性洗涤纤维法<sup>[19]</sup>测定。所有化学分析均作 3 个重复。

### 1.5 数据分析

质量残留率 ( $MR$ ) =  $(M_t/M_0) \times 100\%$ 。式中,  $M_t$  为凋落叶在  $t$  时刻的质量 (g),  $M_0$  为凋落叶初始干重 (g)<sup>[12,19]</sup>。

利用 Excel 2007 完成数据统计分析及图表生成, 利用 SPSS 20.0 对每次取样 C/N、C/P、木质素/N 和纤维素/N 值进行单因素方差分析法分析 (one-way ANOVA), 如果差异显著, 再进行最小显著差异法 (least significant difference,  $LSD$ ) 多重比较分析 ( $P=0.05$ )。用 Pearson 相关性分析检验质量残留率与 C/N、C/P、木质素/N 和纤维素/N 的关系, 显著性水平设定为  $P=0.05$ 。图表中数据均用平均值  $\pm$  标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟氮沉降对凋落叶分解的影响

由图 2 可知, 在模拟 N 沉降处理 4 个月时, M 和 H 处理的凋落叶质量残留率显著高于 CK 和 L 处理 ( $P<0.05$ ), 并一直持续到分解后期。经过 1 a 的分解, 各处理的质量残留率在 54.71%—63.52% 之间, L、M 和 H 处理的凋落叶质量残留率分别比 CK 高 4.18%、6.53% 和 8.81%。重复测量方差分析结果表明, N 沉降各处理均显著增加了凋落叶质量残留率 ( $P<0.05$ ), 抑制了凋落叶的分解。

### 2.2 模拟氮沉降对凋落叶 C、N、P、木质素和纤维素含量的影响

由图 3 可知, 试验期间各处理 C 含量变化较为平缓, 整体表现下降趋势。凋落叶分解 10 个月后, L、M 和 H 处理的 C 含量显著低于 CK ( $P<0.05$ ); 分解 1 a 后, L、M 和 H 处理的 C 含量分别比 CK 显著增加了 4.26%、7.36% 和 10.92% ( $P<0.05$ )。N 含量变化表现为先上升后下降, 分解前 4 个月, 各处理 N 含量逐渐增加, 而后逐渐减小; 分解 1 a 后, 各 N 沉降处理的 N 含量分别比 CK 增加了 0.96% (L)、1.92% (M) 和 4.26% (H)。P 含量变化趋势表现为稳步上升状态, 分解 1 a 后, L 和 H 处理分别比 CK 降低了 7.96% 和 0.88%, M 处理则比 CK 增加了 1.77%。木质素含量表现为先快速上升后缓慢下降, 分解 1 a 后, L、M 和 H 处理的木质素含量分别比 CK 增加了 10.68%、13.65% 和 17.65%。纤维素含量变化不明显, 基本表现为缓慢下降, 分解 1 a 后, 各 N 沉降处理的纤维素含量分别比 CK 增加了 11.31% (L)、16.64% (M) 和 21.87% (H)。

重复测量方差分析表明, 各 N 沉降处理的 C、N、纤维素含量均显著大于 CK, P 含量则显著小于 CK ( $P<0.05$ )。H 处理的木质素含量显著大于 CK ( $P<0.05$ ), L 和 M 处理与 CK 之间差异性不显著 ( $P>0.05$ )。表明, N 沉降显著抑制了凋落叶分解过程中 C、N 和纤维素含量的减少, 抑制了 P 含量的增加。

### 2.3 模拟氮沉降对凋落叶分解过程中 C/N 和 C/P 的影响

由图 4 可知, 试验期间, 各处理 C/N 变化不明显, C/N 在 46.40—58.46 之间变动; C/P 基本呈减小趋势, 在 332.76—1055.23 之间变动。经过 1 a 的分解, L、M 和 H 处理的 C/N 分别比 CK 增加了 3.33%、5.40% 和 6.38%, C/P 分别比 CK 增加了 13.66%、5.59% 和 11.92%。重复测量方差分析表明, M 和 H 处理的 C/N 显著高于 CK ( $P<0.05$ ), L 处理与 CK 差异不显著 ( $P>0.05$ ); 各 N 沉降处理的 C/P 均显著高于 CK ( $P<0.05$ )。

### 2.4 模拟氮沉降对凋落叶分解过程中木质素/N 和纤维素/N 的影响

由图 5 可知, 试验期间, 各处理木质素/N 基本随分解时间的延长呈增加状态, 凋落叶分解至 10 个月时, 各 N 沉降处理与 CK 之间差异显著 ( $P<0.05$ ); 分解 1 a 后, L、M 和 H 处理的木质素/N 分别比 CK 显著增加了

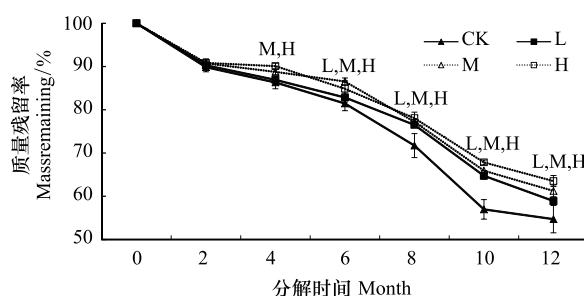


图 2 凋落叶分解过程中质量残留率的变化

Fig. 2 Dynamics of mass remaining rates of leaf litter in the decomposing process

各分解时间上的 L、M、和 H 表示该处理与对照 (CK) 差异达到显著水平 ( $P<0.05$ )



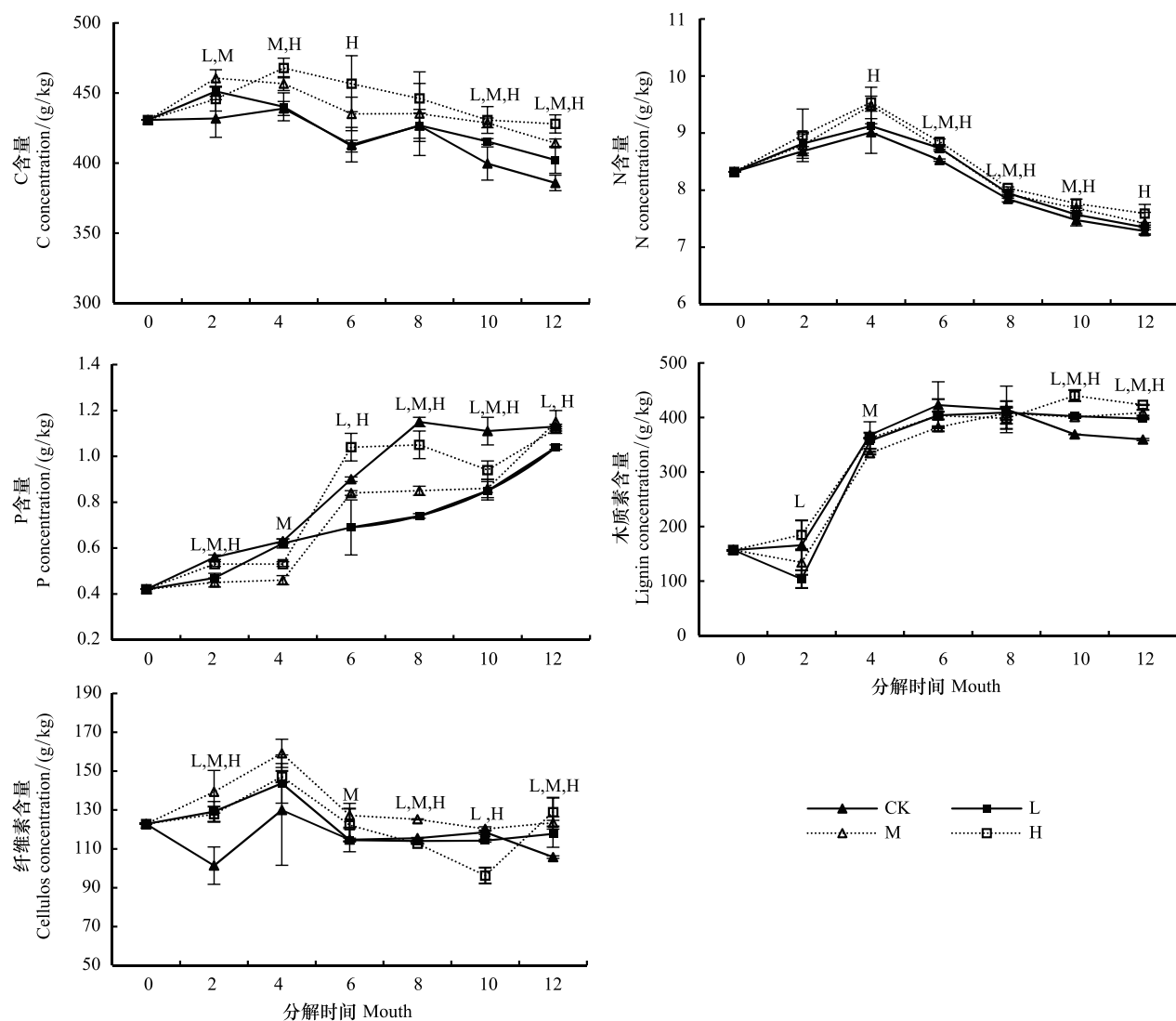


图3 各处理凋落叶分解过程中C、N、P、木质素和纤维素的含量变化

Fig.3 Variations of concentration of C, N, P, lignin and cellulose during decomposition

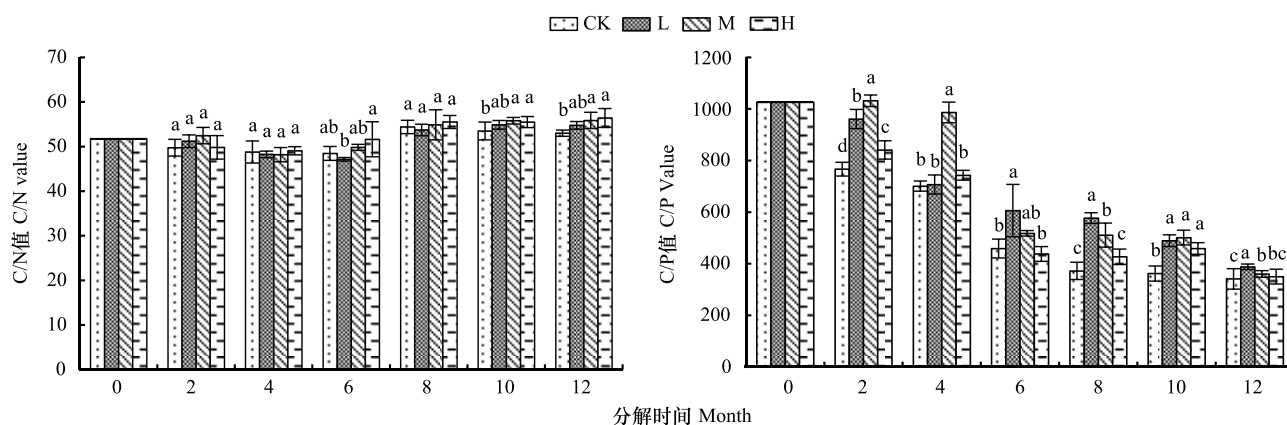


图4 各处理凋落叶分解过程中C/N和C/P变化

Fig.4 Changes of C/N and C/P value in the decomposition process

9.67%、11.54%和 12.88% ( $p<0.05$ )。而纤维素/N 在分解期间变化不明显,在 10.39—18.04 之间变动。重复测量方差分析表明,M 处理的木质素/N 显著低于 CK,纤维素/N 显著高于 CK ( $P<0.05$ );L、H 处理的木质素/N 和纤维素/N 与 CK 之间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

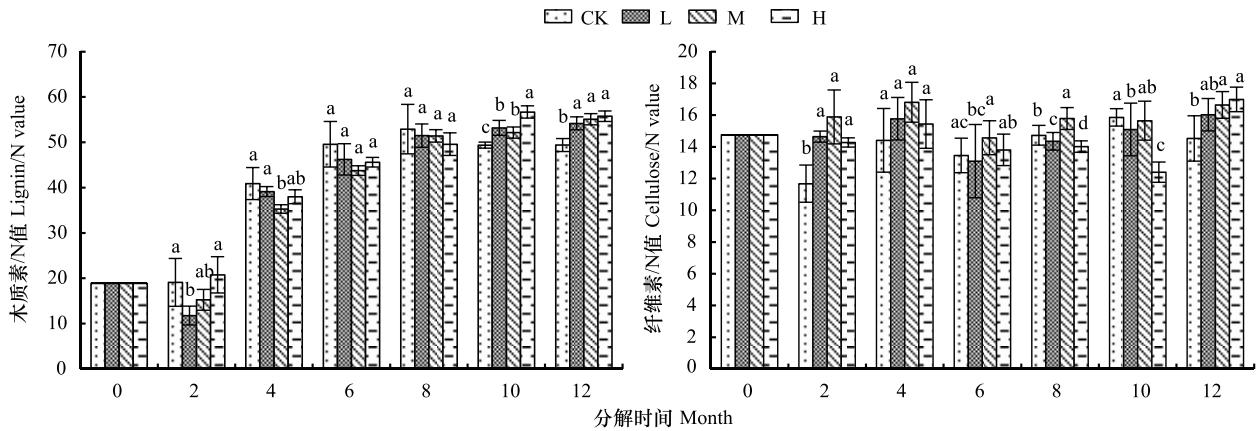


图 5 各处理凋落叶分解过程中木质素/N 和纤维素/N 变化

Fig.5 Changes of lignin/N and cellulose/N value in the decomposition process

2.5 凋落叶分解过程中质量残留率与 C/N、C/P、木质素/N 和纤维素/N 的相关关系

由表 1 可知,凋落叶在分解过程中,各处理质量残留率与 C/P 之间存在显著的正相关关系 ( $P<0.05$ ),与木质素/N 存在显著的负相关关系 ( $P<0.05$ ),与纤维素/N 相关性不显著 ( $P>0.05$ )。质量残留率与 C/N 在 H 处理下存在显著的相关关系 ( $P<0.05$ ),在 CK、L 和 M 处理下相关性不显著 ( $P>0.05$ )。

随着 N 沉降量的增加,质量残留率与 C/N 的相关系数逐渐增大,并在 H 处理下差异性显著 ( $P<0.05$ );与 C/P 的相关系数逐渐减小,从 CK 和 L 的差异性极显著到 M 和 H 处理的显著 ( $P<0.05$ );与木质素/N 的相关性逐渐增大,并在 H 处理下差异极显著 ( $P<0.01$ )。表明 N 沉降提高了质量残留率与 C/N、木质素/N 和纤维素/N 的相关性,降低了与 C/P 的相关性。

表 1 质量残留率与 C/N、C/P、木质素/N 和纤维素/N 的相关关系

Table 1 Pearson's correlations between mass remaining and C/N, C/P, lignin/N, cellulose/N in different treatments

|                | N 处理<br>N Treatment | C/N      | C/P      | 木质素/N<br>Lignin/N | 纤维素/N<br>Cellulose /N |
|----------------|---------------------|----------|----------|-------------------|-----------------------|
| 质量残留率          | CK                  | -0.589   | 0.903 ** | -0.775 *          | -0.480                |
| Mass remaining | L                   | -0.605   | 0.935 ** | -0.830 *          | -0.348                |
|                | M                   | -0.748   | 0.849 *  | -0.861 *          | -0.448                |
|                | H                   | -0.829 * | 0.872 *  | -0.907 **         | -0.054                |

\*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$

3 讨论

本研究发现,N 沉降显著抑制了华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶的分解 ( $P<0.05$ ),并随着 N 沉降量的增加,抑制作用增强。这与胡红玲<sup>[12]</sup>、Manning<sup>[13]</sup>等的研究结果相似。这是因为 N 的输入量如果超过一定的临界值,就会影响分解者的分解效率<sup>[20]</sup>,而华西雨屏区全年总 N 沉降量为 95 kg/hm<sup>2</sup>,N 沉降量较高,并有逐年上升的趋势<sup>[17]</sup>。外加 N 在凋落叶中富集后,可能已经超过这个临界值,N 沉降打破了原有的 N 平衡,影响了分解者的分解效率,从而使得凋落叶分解减慢

氮沉降可通过影响凋落物的 N 含量直接影响凋落物的分解,也可以通过影响森林地被物组成和凋落物化学成分间接影响凋落物的分解速<sup>[21]</sup>。本研究表明,各 N 沉降处理的 C、N 和纤维素含量均显著大于 CK ( $P<$

0.05), P 含量则显著小于 CK ( $P < 0.05$ )。这表明, N 沉降显著抑制了凋落叶分解过程中残留凋落叶 C、N 和纤维素含量的减少, 抑制了 P 含量的增加。在试验后期, 各 N 沉降处理的木质素和纤维素含量均显著高于 CK ( $P < 0.05$ ), 木质素含量较初始含量有所增加, 表明 N 沉降增加了凋落叶中木质素的含量。由于凋落叶中纤维素通常受木质素聚合体的保护<sup>[22]</sup>, N 沉降抑制木质素降解的同时也会抑制纤维素的降解, 而凋落叶中的 C 主要以纤维素、半纤维素、木质素等形式存在<sup>[23]</sup>。因此 N 沉降抑制木质素和纤维素降解的同时促进了凋落叶分解过程中“碳封存”状态<sup>[24]</sup>, 增加了凋落叶的 C 含量。本研究还发现, 模拟 N 沉降显著增加了凋落叶中的 N 含量 ( $P < 0.05$ ), 抑制了凋落叶分解过程中 N 含量的减少, 并随 N 沉降量的增加抑制作用加强。这与 Parton<sup>[25]</sup> 和樊后保<sup>[26]</sup> 等人的研究结果一致。这是因为外加 N 和木质素及其降解中间产物结合生成更难以分解的复合物, 导致凋落叶分解减慢, 并使得 N 元素在凋落叶中积累<sup>[12]</sup>, 从而增加了凋落叶中 N 的含量。P 含量变化趋势表现为稳步上升状态, N 沉降显著抑制了凋落叶分解过程中 P 含量的增加 ( $P < 0.05$ )。这与肖银龙等<sup>[15]</sup> 的研究结果不一致, 模拟 N 沉降使得苦竹细根生物量增加和代谢活动增强, 促进地下部分对养分元素的摄入, 因此增加了苦竹细根对地上部分养分元素的供应, 进而表现出凋落叶中 P 含量的增加。

植物体的 C/N 和 C/P 可以用来表征植物受 N 和 P 的限制格局<sup>[27]</sup>, 但当 N、P 含量达到一定水平后, 微生物的保护机制将多余的养分释放到环境中<sup>[28]</sup>。一般认为低 C/N 和 C/P 有利于分解者入侵和附生植物定植生长<sup>[29-30]</sup>, 从而加快凋落物分解。本研究发现, L、M 和 H 处理的 C/P 以及 M 和 H 处理的 C/N 均显著高于 CK ( $P < 0.05$ ), N 沉降延缓了凋落叶分解进程。生态化学计量学理论认为大多数情况下 C/P > 186 时微生物生长受限制<sup>[31]</sup>。本研究中 C/P 在 332.76—1055.23 之间变动, 凋落叶的整个分解过程均易受到 P 的限制, 而 N 沉降处理使凋落叶的 C/P 升高, 加剧了凋落叶分解过程中 P 的限制, 抑制了微生物的生长和活性, 进而抑制了凋落叶分解。由于 N 沉降显著增加了凋落叶中 N 含量、木质素和纤维素的含量, 因此分解 1 a 后, N 沉降处理的木质素/N 和纤维素/N 均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。

将质量残留率与 C/N、C/P、木质素/N 和纤维素/N 进行相关分析, 发现各处理质量残留率与 C/P 之间存在显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 与木质素/N 存在显著的负相关关系 ( $P < 0.05$ )。唐仕珊等<sup>[32]</sup> 整合分析国内森林凋落叶分解速率 ( $k$  值) 的控制因子发现, 凋落物分解速率与木质素/N 呈极显著负相关关系 ( $P < 0.001$ ), 而与 C/N 关系不显著 ( $P > 0.05$ ), 木质素/N 能解释  $k$  值变异的 16.4%, 而 C/N 仅能解释  $k$  值变异的 1.4%。这与本研究结果相似。在模拟 N 沉降条件下, N 沉降提高了质量残留率与 C/N、木质素/N 和纤维素/N 的相关性, 降低了与 C/P 的相关性, 相对于 C/N 和纤维素/N 来说, C/P 和木质素/N 是反映凋落叶分解的良好指标。

综上所述, 模拟 N 沉降显著抑制了华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶的分解, 增加了凋落叶基质 C、N 和纤维素含量, 并显著降低了 P 含量, 影响了凋落叶的 C/N、C/P、木质素/N 和纤维素/N, 加剧了凋落叶分解过程中 P 的限制, 抑制了微生物的生长和活性, 进而延缓了凋落叶分解过程。在模拟 N 沉降背景下, 相对于 C/N 和纤维素/N 来说, C/P 和木质素/N 是反映凋落叶分解的良好指标。由于大气 N 沉降的全球性和长期性, 其对森林生态系统的影响必然是一个长期、复杂的过程。因此, 在 N 沉降持续增加的背景下, 阔叶林凋落叶基质质量是如何变化的, 仍需进行长期的研究。

#### 参考文献 (References):

- [1] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737-750.
- [2] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [3] Matson P, Lohse K A, Hall S J. The globalization of nitrogen deposition: consequences for Terrestrial ecosystems. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 113-119.
- [4] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. *生态学报*, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [5] 葛晓改, 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 周本智. 三峡库区森林凋落叶化学计量学性状变化及与分解速率的关系. *生态学报*, 2015, 35(3): 779-787.

- [ 6 ] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 391-399.
- [ 7 ] 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 457-467.
- [ 8 ] Siegenthaler A, Buttler A, Bragazza L, van der Heijden E, Grosvernier P, Gobat J M, Mitchell E A D. Litter-and ecosystem-driven decomposition under elevated CO<sub>2</sub> and enhanced N deposition in a *Sphagnum* peatland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(6): 968-977.
- [ 9 ] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 森林凋落物分解研究进展. *林业科学*, 2006, 42(4): 93-100.
- [ 10 ] 方华, 莫江明. 氮沉降对森林凋落物分解的影响. *生态学报*, 2006, 26(9): 3127-3136.
- [ 11 ] 李仁洪, 胡庭兴, 涂利华, 雒守华, 向元彬, 戴洪忠, 黄立华. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林凋落物分解的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2588-2593.
- [ 12 ] 胡红玲, 张健, 刘洋, 涂利华, 向元彬. 模拟氮沉降对华西雨屏区巨桉林凋落叶分解的影响. *林业科学*, 2011, 47(8): 25-30.
- [ 13 ] Manning P, Saunders M, Bardgett R D, Bonkowski M, Bradford M A, Ellis R J, Kander E, Marhan S, Tschirko D. Direct and indirect effects of nitrogen deposition on litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3): 688-698.
- [ 14 ] Aerts R, van Logtestijn R S P, Karlsson P S. Nitrogen supply differentially affects litter decomposition rates and nitrogen dynamics of sub-arctic bog species. *Oecologia*, 2006, 146(4): 652-658.
- [ 15 ] 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 陈保军, 杨永贵, 张健, 李贤伟, 胡红玲. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物基质质量的影响. *生态学报*, 2013, 33(20): 6587-6594.
- [ 16 ] 庄平, 高贤明. 华西雨屏带及其对我国生物多样性保育的意义. *生物多样性*, 2002, 10(3): 339-344.
- [ 17 ] Tu L H, Hu T X, Zhang J, Huang L H, Xiao Y L, Chen G, Hu H L, Liu L, Zheng J K, Xu Z F, Chen L H. Nitrogen distribution and cycling through water flows in a subtropical bamboo forest under high level of atmospheric deposition. *PLoS One*, 2013, 8(10): e75862.
- [ 18 ] 周世兴, 黄从德, 向元彬, 韩博涵, 肖永翔, 唐剑东. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落物木质素和纤维素降解的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(5), doi: 10.13287/j.1001-9332.201605.004.
- [ 19 ] Rowland A P, Roberts J D. Lignin and cellulose fractionation in decomposition studies using acid-detergent fibre methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25(3/4): 269-277.
- [ 20 ] 陈翔, 周梅, 魏江生, 赵鹏武, 李攀, 乌云毕力格, 秦可珍. 模拟氮沉降对兴安落叶松林凋落物分解的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(9): 1496-1503.
- [ 21 ] 王相娥, 薛立, 谢腾芳. 凋落物分解研究综述. *土壤通报*, 2009, 40(6): 1473-1478.
- [ 22 ] Berg B, Laskowski R. *Litter Decomposition: A Guide to Carbon and Nutrient Turnover*. Burlington: Elsevier Academic Press, 2006.
- [ 23 ] 刘强, 彭少麟. *植物凋落物生态学*. 北京: 科学出版社, 2010: 56-56.
- [ 24 ] Hobbie S E. Nitrogen effects on decomposition: a five-year experiment in eight temperate sites. *Ecology*, 2008, 89(9): 2633-2644.
- [ 25 ] Parton W, Silver W L, Burke I C, Grassens L, Harmon M E, Currie W S, King J Y, Adair E C, Brandt L A, Hart S C, Fasth B. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 2007, 315(5810): 361-364.
- [ 26 ] 樊后保, 刘文飞, 徐雷, 李燕燕, 廖迎春, 王启其, 张子文. 氮沉降下杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林凋落叶分解过程中 C、N 元素动态变化. *生态学报*, 2008, 28(6): 2546-2553.
- [ 27 ] 卢广超, 邵怡若, 薛立. 氮沉降对凋落物分解的影响研究进展. *世界林业研究*, 2014, 27(1): 35-42.
- [ 28 ] 常晨晖, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 肖洒, 李俊, 苟小林. 高寒森林倒木在不同分解阶段的质量变化. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 14-22.
- [ 29 ] Benner J W, Vitousek P M. Development of a diverse epiphyte community in response to phosphorus fertilization. *Ecology Letters*, 2007, 10(7): 628-636.
- [ 30 ] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems. *Environmental Reviews*, 1997, 5(1): 1-25.
- [ 31 ] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Coenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment. *Nature*, 2009, 462(7274): 795-798.
- [ 32 ] 唐仕姗, 杨万勤, 殷睿, 熊莉, 王海鹏, 王滨, 张艳, 彭艳君, 陈青松, 徐振锋. 中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 529-539.