

# Effects of Nitrogen Deposition and Soil Animal Activities on Litter Decomposition in Mixed Broadleaved Korean Pine Forest in Lesser Khingan Mountains

Meng Xu, Qinggui Wang, Guoyong Yan, Yajuan Xing\*

College of Agricultural Resource and Environment, Heilongjiang University, Harbin Heilongjiang  
Email: \*xingyajuan@163.com

Received: Jan. 1<sup>st</sup>, 2019; accepted: Jan. 17<sup>th</sup>, 2019; published: Jan. 24<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

In this study, a simulated nitrogen deposition control experiment was carried out in the Fenglin National Nature Reserve of Wuying District, Yichun, Heilongjiang province. A total of four nitrogen addition gradients were set, which were low nitrogen (LN, 5 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>), medium nitrogen (MN, 10 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>), high nitrogen (HN, 15 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) and control (CK, 0 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>), using two different aperture mesh bags (150 mesh, 300 mesh) to exclude different types of soil animals, comparative study of nitrogen deposition and soil animal activities on the decomposition of needle, broad, mixed leaf litter. The purpose of this study was to investigate the decomposition dynamics of litter in the coniferous and broad-leaved mixed forest in Lesser Khingan Mountains under nitrogen deposition and its relationship with soil animal activities. The results showed that: 1) The decomposition rate of different types of litter was broadleaf litter > coniferous litter > mixed leaf litter, the difference was significant ( $P < 0.05$ ); in the 150 mesh hole bag under the action of soil animal activity The decomposition rate of litter was faster than the decomposition of 300 mesh bag under the action of soil animals, and the effect on coniferous litter reached a significant level ( $P < 0.05$ ). There was a significant negative correlation between soil animal activity and C loss rate ( $P < 0.05$ ), and the N and P loss rates were positively correlated, and the difference was significant ( $P < 0.05$ ). 2) Different nitrogen treatments inhibited the decomposition of coniferous litter, and LN treatment inhibited significantly ( $P < 0.05$ ); MN and HN treatment promoted the decomposition of broadleaf litter, LN treatment showed inhibition, and the effect was not significant; soil animals HN treatment with mixed activity significantly inhibited decomposition ( $P < 0.05$ ), LN and MN treatment significantly promoted decomposition ( $P < 0.05$ ); as far as possible, the effect of soil animals on the mixed leaves showed LN treatment inhibition decomposition, HN treatment significantly promoted decomposition ( $P < 0.05$ ). Under the nitrogen treatment, the nutrient release rate is consistent with the decomposition rate. The experimental study showed that soil animal activities accelerated the loss of litter quality and accelerated the release of N and P elements. Nitrogen deposition had different effects on different types of litter, and the interaction with mixed leaf litter had interaction with soil animal activities effect.

\*通讯作者。

## Keywords

Nitrogen Deposition, Soil Animal Activities, Litter Decomposition, Broad-Leaved Korean Pine Forest

# 氮沉降及土壤动物活动对阔叶红松林凋落物分解的影响

徐 萌, 王庆贵, 闫国永, 邢亚娟\*

黑龙江大学农业资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨  
Email: xingyajuan@163.com

收稿日期: 2019年1月1日; 录用日期: 2019年1月17日; 发布日期: 2019年1月24日

## 摘 要

本研究试验样地位于黑龙江省伊春市五营区丰林国家级自然保护区,于2010年5月开始氮沉降控制试验,共设置4个N添加梯度,分别为低N(LN 5 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、中N(MN 10 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、高N(15g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)和对照(CK 0 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),应用两种不同孔径网袋(150目, 300目)排除不同类型土壤动物的方法,对比研究N沉降及土壤动物活动对针叶、阔叶、混叶凋落物的分解作用,旨在探讨小兴安岭针阔混交林凋落物在N沉降下的分解动态及其与土壤动物活动的关系。结果表明: 1) 不同类型凋落叶分解速率表现为阔叶凋落物 > 针叶凋落物 > 混叶凋落物,差异显著(P < 0.05);在有土壤动物活动作用下的150目孔袋内的凋落叶分解速度快于基本排除土壤动物作用条件下的300目孔袋的分解样品,对针叶凋落物作用达到显著水平(P < 0.05);土壤动物活动与C的损失率呈显著负相关关系(P < 0.05),与N、P损失率呈正相关,差异显著(P < 0.05)。2) 不同N处理均抑制了针叶凋落物的分解, LN处理抑制明显(P < 0.05); MN、HN处理促进了阔叶凋落物的分解, LN处理呈现抑制,作用不显著;有土壤动物参与下的混叶HN处理显著抑制分解(P < 0.05)、LN和MN处理显著促进分解(P < 0.05);基本排除土壤动物作用下混叶表现为LN处理抑制分解、HN处理显著促进分解(P < 0.05)。在施N处理下,养分释放率与分解速率一致。本试验研究表明:土壤动物活动加速了凋落叶质量的损失,加速了N、P元素的释放;N沉降处理对不同类型凋落叶影响不同,对混叶凋落物的影响与土壤动物的活动存在交互作用。

## 关键词

氮沉降, 土壤动物活动, 凋落物分解, 针阔混交林

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

受化石燃料的燃烧、化肥的生产使用以及畜牧业发展的影响,近几十年来大气氮沉降量不断增加[1],

造成氮富集[2]。氮富集会加速土壤酸化, 减少生物多样性、影响生态系统结构和功能, 造成一系列生态问题。研究表明, 中欧及北美地区的森林大气氮输入量目前已经大大超过了森林的年需要量[3] [4], 出现水域氮富集和陆地生态系统氮过饱和。同样我国是全球三大氮沉降集中区之一[5], 也出现了较严重的氮沉降问题[6], 形势严峻引起了社会的关注和研究[7], 但所研究地区较零散, 尚未建立全国性氮沉降网络, 很大程度制约着我国氮沉降的研究。

氮沉降增加通过改变森林群落的组成和凋落物的化学成分等, 将会影响森林生态系统凋落物分解速率。从已有的研究结果来看, 氮沉降对凋落物分解的影响包括促进凋落物分解[8]、延缓凋落物分解[9]、以及对凋落物分解无影响[10] 3种情况。我国莫江明、樊后保等在中国南部氮沉降较显著的热带森林地区也做过一些研究[11] [12], 关于温带森林地区的研究却相对较少, 且氮添加对森林凋落物的分解速率的影响并没有得出一致的结论, 亟待进一步研究。

土壤动物活动亦是影响凋落物分解的重要因子, 其在凋落物分解、碳氮等养分元素释放中起到重要作用[13]。涉及这方面的研究国内外都有一些报道。国外关于研究土壤动物对凋落物分解过程的作用与机制中[14] [15], 得出土壤动物活动对凋落物分解的影响在热带地区最为明显, 其快于温带地区分解速率的原因归结于土壤动物物种多样性[16]。国内也有关于特定地区的此类研究, 如张雪萍在温带小兴安岭地区和马树才在热带鼎湖山地区进行了土壤动物活动对凋落物分解贡献的研究[17] [18]。此类研究仅限于对单一类型叶片凋落物, 不同类型的叶片组成物质不同, 土壤动物活动对其影响程度也不相同, 关于土壤动物活动对不同凋落叶片类型的分解规律有待研究。而且关于在大气氮沉降的协同处理下土壤动物活动与凋落物分解动态关系鲜有报道。

综上所述, 本研究分析了温带小兴安岭地区针阔混交林内不同类型叶片凋落物在不同施氮处理及土壤动物活动下对凋落物分解影响的变化, 旨在进一步探讨氮沉降下调落物的分解动态及与土壤动物活动的关系, 为未来大气氮沉降持续增加背景下小兴安岭乃至北方温带森林凋落物的对分解机制提供数据参考。

## 2. 研究区概况

试验样地位于黑龙江省伊春市五营区丰林国家级自然保护区内(48°02'~48°12'N, 128°58'~129°15'E), 海拔 500~800 米, 地处北半球气候变化敏感区域, 属温带大陆性季风气候, 春季干旱多风, 夏季湿润多雨, 降雨集中在 7~8 月份, 年平均气温和降水量分别为-0.5℃和 638 mm。土壤类型为暗红森林土, 土壤 pH 为 5.5。样地植被为温带针阔叶混交林, 主要针叶树种以红松(*Pinus koraiensis*)为主、还生长着云杉(*Picea asperata*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)等。阔叶树种有“三大硬阔”水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄菠萝(*Phellodendron amurense*), 伴有山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、椴树(*Tiliatuan*)、榆树(*Ulmus pumila*)等树种。

## 3. 研究方法

### 3.1. 样地设置

选取小兴安岭林区林龄、密度、林型和立地条件相近的阔叶红松林, 设置 12 块植被地形相对均一的 20 m × 20 m 的试验样地。样方间设置 10 m 缓冲带, 并用 PVC 板隔断, 以避免地表径流或壤中流造成样地间的氮连通。参考同类试验的处理方法[19]设置 4 个氮添加梯度, 分别为低氮处理(LN 5 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、中氮处理(MN 10 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、高氮处理(HN 15 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)和对照处理(CK 0 g N m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>), 每个处理水平重复 3 次(即 3 块样地), 以 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 为外施氮源, 分别模拟未来大气氮沉降浓度的 2、4、6 倍情况下(当地大气氮沉降浓度为 2.5 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)凋落物的响应[20] [21]。样地于 2010 年 5 月开始模拟氮沉降试验, 此后每

年施氮从 5 月开始到 9 月结束, 分 5 个月份平均喷施。为排除水分的差异, 对照地喷施等量的纯净水。

### 3.2. 实验处理

试验在施氮前在各样地设置的纱网里收集未接触地表的凋落物并带回使其自然干燥, 选用了 2 种不同孔径的尼龙网袋(150 目, 300 目), 150 目允许土壤动物的作用, 300 目则尽可能排除土壤动物的作用[17]。网袋大小为 10 cm × 10 cm。每袋装入自然风干混叶 5 g (针叶 2.5 g, 阔叶 2.5 g), 针叶, 阔叶则经过人工分拣后称取 5 g 放在凋落物袋里, 并放置于控制试验样地凋落物层之上。

### 3.3. 凋落物收集及分析方法

2016 年 9 月末在每块实验样地放置三种不同种类凋落叶 72 袋, 共放置 216 袋, 于 2017 年 5 月末开始, 每块实验样地采集针、阔、混凋落物袋 24 袋, 分三次进行采集(5 月、7 月、9 月末), 用手去除尼龙网袋外附着杂质并带回实验室, 于 2017 年 9 月末取完。

取回的凋落叶放在实验室自然风干后用电子天平称重, 后用粉碎机粉碎、过筛, 用 TOC/TN 分析仪 (Multi N/C 3100, Analytikjene AG, Germany) 灼烧测得样品全 C 含量。采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 法[22], 用 TOC/TN 分析仪 (Multi N/C 3100, Analytikjene AG, Germany) 测得样品全 N 含量。使用钼锑抗比色法测定样品全 P 含量[23]。

### 3.4. 数据处理

用 Excel 2013 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) 进行数据整理。用 SPSS20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 进行数据统计分析。用单因素方差(One-way ANOVA)和显著差异法(LSD)分析不同施氮处理和土壤动物活动对不同类型凋落叶的影响, 显著性水平设为  $P = 0.05$ 。应用 SigmaPlot13.0 (Systat software, Inc., San Jose, CA, USA) 绘图。

图表中数据为平均值 ± 标准偏差。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 土壤动物活动下凋落叶分解动态及养分释放速率变化

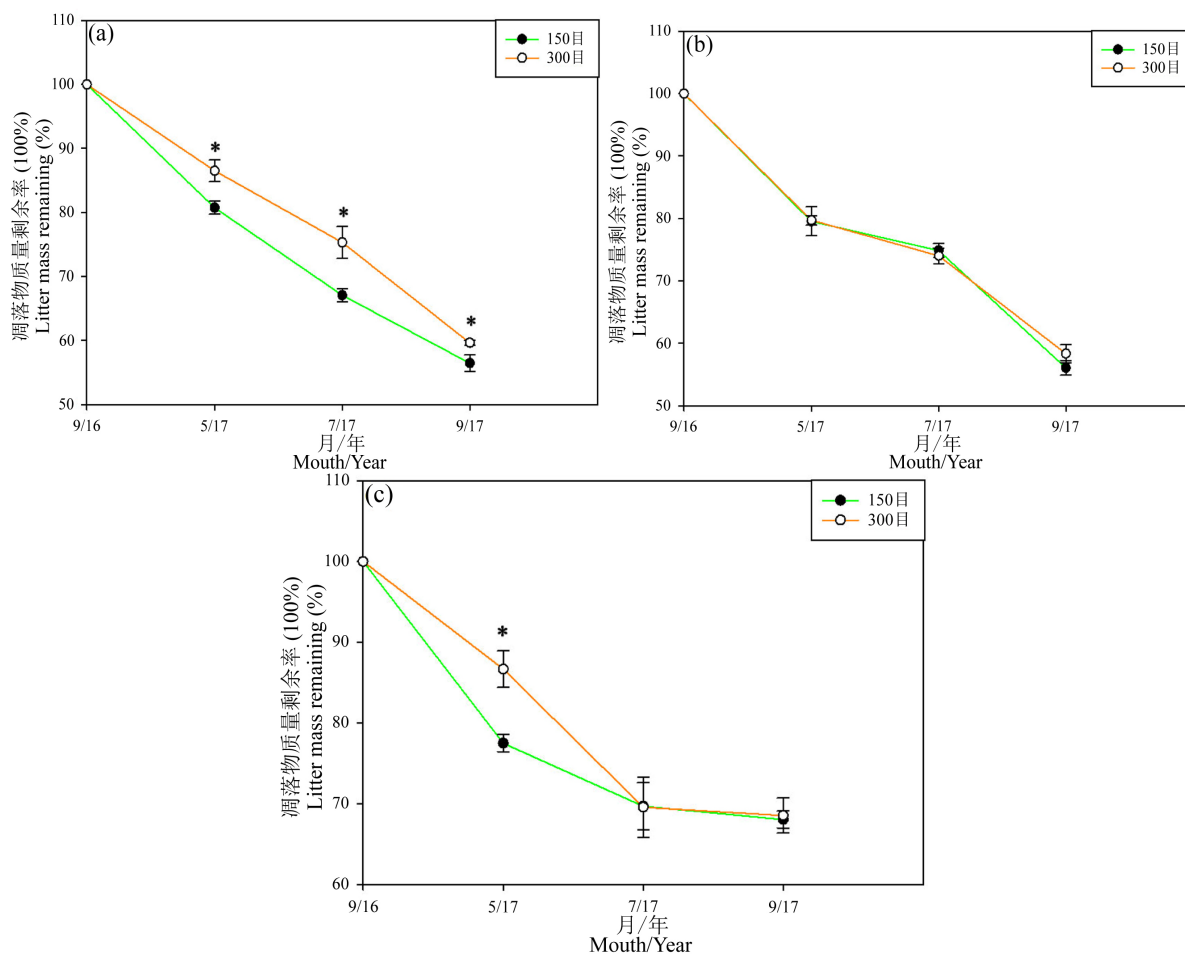
由表 1 可知, 在自然状态下, 因凋落叶类型不同, 重量损失率亦不同, 两种孔袋(150 目, 300 目)凋落叶分解趋势均表现为: 阔叶(43.9%, 41.6%) > 针叶(43.5%, 40.3%) > 混叶(31.9%, 31.4%)。经方差分析可知各类型凋落叶剩余质量之间差异显著( $P < 0.05$ ), 混合凋落叶剩余质量显著大于针叶和阔叶剩余质量( $P < 0.05$ )。

**Table 1.** Different types of litter in two types of mesh (150 mesh, 300 mesh) initial mass and the remaining mass after 1 year  
**表 1.** 两种网孔(150 目, 300 目)不同类型凋落叶自然状态下初始质量及 1 年后剩余质量

凋落叶类型 Litter leaf species	网孔大小 Mesh size	初始质量 Initial mass	1 年剩余质量 Final mass
针叶 Needle leaves	150 目	5.000 ± 0.000A	2.824 ± 0.065B
	300 目	5.000 ± 0.000A	2.982 ± 0.019B
阔叶 Broad leaves	150 目	5.000 ± 0.000A	2.805 ± 0.058C
	300 目	5.000 ± 0.000A	2.918 ± 0.072C
混叶 Mixed leaves	150 目	5.000 ± 0.000A	3.402 ± 0.053A
	300 目	5.000 ± 0.000A	3.426 ± 0.109A

注: 不同大写字母表示不同类型凋落叶间剩余质量差异显著( $P < 0.05$ )。

不同孔径凋落袋中凋落叶的分解速率见图 1, 150 目孔袋针叶经过分解剩余凋落物量为初始凋落物量 56.4%, 分解率为 43.5%。300 目孔袋针叶剩余凋落物量为初始凋落物量 59.6%, 分解率为 40.4%。150 目孔袋针叶凋落物分解速率比 300 目分解率高 3.1%, 差异显著( $P < 0.05$ )。150 目孔袋阔叶凋落物由 79.5% 下降到 56.1%, 净分解率为 23.4%; 300 目孔袋由 79.7% 下降到 58.3%, 净分解率为 21.4%。150 目孔袋混叶凋落物剩余率为 68.1%, 分解率为 31.9%, 300 目孔袋为 68.5%, 分解率为 31.8%。没有显著差异( $P > 0.05$ )。在不同类型凋落叶间, 凋落叶分解率格局都为 150 目孔袋 > 300 目孔袋。即土壤动物加速着叶片的重量损失。



注: (a): 针叶; (b): 阔叶; (c): 混叶。

**Figure 1.** Different types of litter in two types of mesh (150 mesh, 300 mesh) percentage of mass remaining \* Indicates that the residual rate difference between the two kinds of cell treatments is significant ( $P < 0.05$ )

**图 1.** 两种网孔(150 目, 300 目)不同类型凋落叶质量剩余百分率(%), \*表示凋落叶两种网孔处理间剩余率差异显著( $P < 0.05$ )

见表 2, 150 目孔袋内凋落叶失重率均 > 300 目孔袋内凋落叶失重率, 且针叶差异显著( $P < 0.05$ ), 减幅为 7.3%; 土壤动物的活动与 C 的损失率呈反比, N、P 损失率呈正比; 对于不同类型凋落叶, 150 目孔袋内 C 元素释放率均 < 300 目孔袋内凋落叶; 150 目孔袋 N、P 元素释放率均 > 300 目孔袋内凋落叶; 元素释放率在不同网孔处理之间的差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。土壤动物活动加速了 N、P 元素的释放。有土壤动物活动情况下, 凋落物失重率和 N、P 元素释放率的影响一致, 均表现为阔叶 > 针叶 > 混叶。



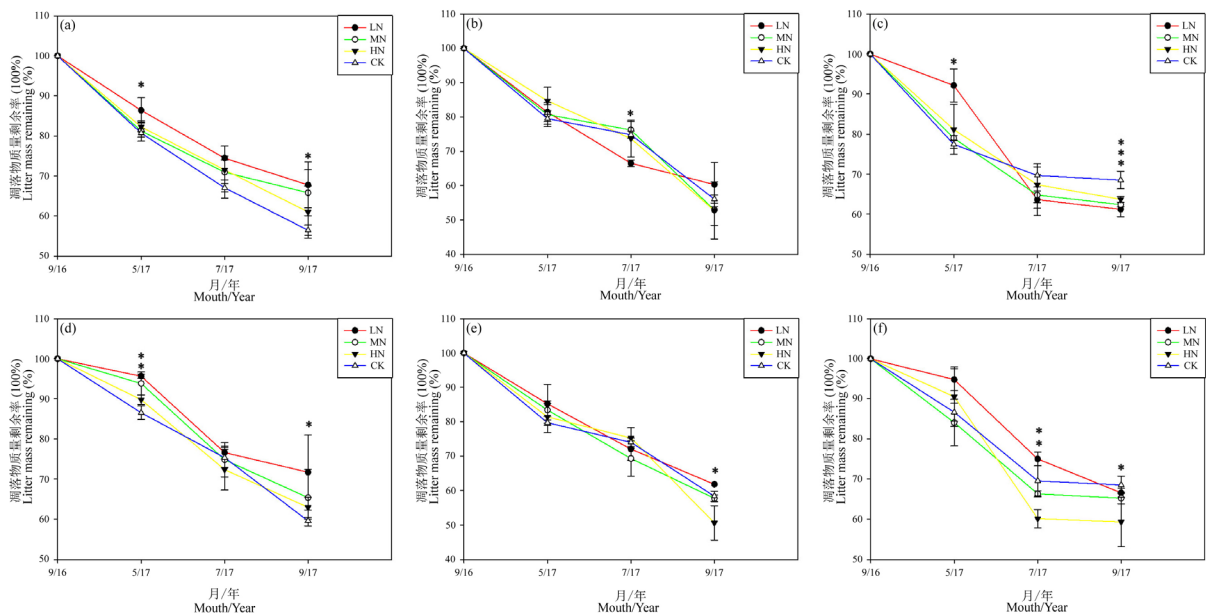
**Table 2.** Different types of litter in two types of mesh (150 mesh, 300 mesh) weight loss rate and nutrient element release rate  
**表 2.** 两种网孔(150 目, 300 目)不同类型凋落叶失重率和养分元素释放率(%)

养分元素 Nutrient element	针叶 Needle leaves			阔叶 Broad leaves			混叶 Mixed leaves		
	150 目	300 目	减幅	150 目	300 目	减幅	150 目	300 目	减幅
C	36.1 ± 1.6B	42.7 ± 2.7A	-18.2	34.3 ± 2.7B	45.5 ± 0.1A	-32.6	26.1 ± 5.7B	44.6 ± 6.9A	-70.8
N	37.9 ± 4.6A	27.9 ± 1.9B	26.3	38.6 ± 3.5A	-8.1 ± 6.4B	120	27.6 ± 9.5A	4.1 ± 2.8B	85.1
P	52.7 ± 2.7A	45.4 ± 4.3A	13.8	62.6 ± 1.3A	50.5 ± 1.1B	19.3	48.1 ± 1.5A	45.2 ± 2.7A	6.1
失重率	43.5 ± 1.3A	40.3 ± 3.7B	7.3	43.9 ± 1.1A	41.6 ± 1.4A	5.2	31.9 ± 1.1A	31.4 ± 2.1A	1.6

注: 不同字母代表在  $P < 0.05$  水平上的差异显著。

#### 4.2. 不同施氮水平下凋落叶分解动态及养分释放速率变化

由图 2 可以看出, 不同施氮情况下, 150 目孔径针叶凋落叶的残留率分别为 LN (67%) > MH (65%) > HN (61%) > CK (57%), 300 目孔径针叶凋落叶的残留率分别为 LN (71%) > MN (65%) > HN (63%) > CK (59%), 与 CK 相比, 氮处理均抑制了针叶凋落叶质量损失, LN 处理抑制最为明显( $P < 0.05$ ); 不同施氮处理对阔叶分解呈现出不一样的趋势, 150 目孔径阔叶凋落叶的残留率表现为 LN (0.60) > CK (0.57) > MN (0.53) > HN (0.52), 高氮促进分解低氮抑制分解, 300 目孔径阔叶凋落叶的残留率为 LN (0.61) > CK (0.58) > MN (0.57) > HN (0.52), 与 150 目孔径趋势一致; 150 目孔径混叶的残留率为 HN (0.64) > CK (0.63) > MN (0.62) > LN (0.61), 表现为 HN 显著抑制分解、LN 和 MN 显著促进分解, 300 目孔径混叶的残留率为 LN (0.67) > CK (0.66) > MN (0.65) > HN (0.59), 与 150 目孔径相反表现为 LN 抑制分解、HN 显著促进分解。

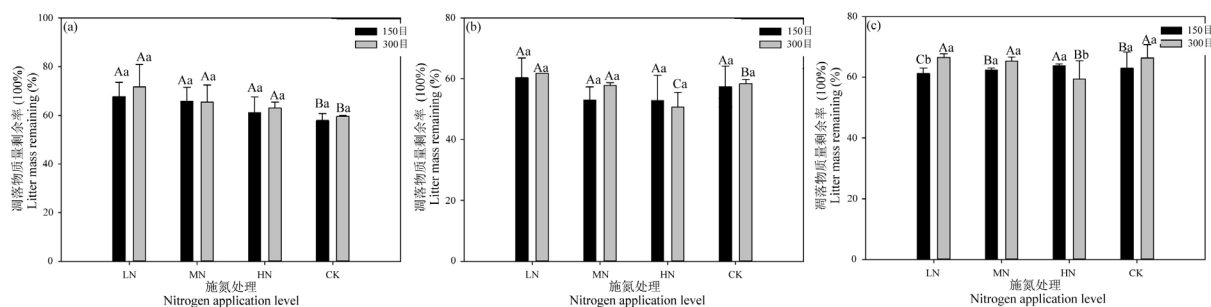


注: (a): 150 目孔径内针叶; (b): 150 目孔径内阔叶; (c): 150 目孔径内混叶; (d): 300 目孔径内针叶; (e): 300 目孔径内阔叶; (f): 300 目孔径内混叶。

**Figure 2.** Percentage of litter quality of different nitrogen application rates \* indicates that there is a significant difference between the nitrogen treatment and the control treatment ( $P < 0.05$ ), \*\* indicates that there are significant differences between the two groups in the nitrogen treatment ( $P < 0.05$ ), and \*\*\* indicates the nitrogen treatment. Significant difference from control treatment ( $P < 0.05$ )

**图 2.** 不同施氮浓度凋落叶质量剩余百分率(%), \*表示施氮处理中有一组与对照处理差异显著( $P < 0.05$ ), \*\*表示施氮处理中有两组与对照处理差异显著( $P < 0.05$ ), \*\*\*表示各施氮处理与对照处理差异均显著( $P < 0.05$ )

土壤动物的活动在施氮处理的协同作用下,对针叶和阔叶凋落物无显著影响(图 3);在混叶凋落物中, LN 显著加速了土壤动物的活动( $P < 0.05$ ),但 HN 显著抑制了土壤动物的活动( $P < 0.05$ )。



注: (a): 针叶; (b): 阔叶; (c): 混叶。

**Figure 3.** Percentage of litter quality of two kinds of meshes (150 mesh, 300 mesh) with different nitrogen application rates different uppercase letters indicate significant differences between different nitrogen treatments ( $P < 0.05$ ); different lowercase letters indicate significant differences in leaf litter under different N treatments ( $P < 0.05$ ). The same with below

**图 3.** 不同施氮浓度对两种网孔(150 目, 300 目)凋落叶质量剩余百分率(%)不同大写字母表示在不同施氮处理间差异显著( $P < 0.05$ ); 不同小写字母表示施 N 处理下不同网孔凋落叶差异显著( $P < 0.05$ )。下同

在施氮处理下(表 3), 针阔混凋落叶的 C 释放率皆表现为 300 目孔袋快于 150 目孔袋, 300 目孔袋混叶在不同氮处理下的 C 释放率均显著快于 150 目( $P < 0.05$ ); 不同孔径三种凋落叶 N、P 释放率 150 目  $>$  300 目; N 达到了显著性水平( $P < 0.05$ )。

**Table 3.** Different types of litter in two types of mesh (150 mesh, 300 mesh) weight loss rate and nutrient element release rate  
**表 3.** 两种网孔(150 目, 300 目)不同施氮浓度下凋落叶养分元素释放率(%)

养分元素 Nutrient element	施氮处理 Nitrogen application	针叶 Needle leaves		阔叶 Broad leaves		混叶 Mixed leaves	
		150 目	300 目	150 目	300 目	150 目	300 目
C	LN	22.8 ± 7.1Aa	33.4 ± 14.3Aa	31.1 ± 7.9Ba	38.7 ± 0.1Aba	29.3 ± 2.4Ab	40.6 ± 5.4Aa
	MN	25.8 ± 9.2Aa	36.2 ± 7.2Aa	46.3 ± 0.9Aa	46.4 ± 3.1Aa	17.9 ± 1.3Abb	35.5 ± 0.1Aba
	HN	30.1 ± 8.1Aa	42.2 ± 6.1Aa	38.5 ± 11.6Bb	52.7 ± 4.4Aa	25.8 ± 2.9Ab	45.9 ± 5.4Aa
	CK	36.1 ± 1.5Aa	42.7 ± 2.7Aa	34.3 ± 2.7Ba	45.5 ± 0.1Aa	26.1 ± 5.7Ab	44.6 ± 6.9Aa
N	LN	29.6 ± 10.4Aa	7.7 ± 10.7Bb	25.2 ± 3.2Aa	-10.5 ± 3.7Bb	30.5 ± 6.4Aa	-2.1 ± 5.1Ab
	MN	20.9 ± 9.1Aba	4.2 ± 7.6Bb	41.2 ± 9.9Aa	11.9 ± 8.1Ab	15.5 ± 3.5Ba	-14.7 ± 0.1Abb
	HN	34.8 ± 11.8Aa	7.4 ± 7.6Bb	43.7 ± 10.1Aa	17.2 ± 12.2Ab	24.4 ± 10.4Aa	4.3 ± 7.9Ab
	CK	37.9 ± 4.6Aa	27.9 ± 1.9Aa	38.6 ± 3.5Aa	-8.1 ± 6.4Bb	27.6 ± 9.5Aa	4.1 ± 2.8Ab
P	LN	43.4 ± 9.9Aa	35.2 ± 4.2Aa	61.8 ± 6.1Aa	59.4 ± 7.9Aa	58.3 ± 10.2Aa	44.6 ± 1.6Aa
	MN	41.8 ± 8.2Aa	39.6 ± 6.6Aa	64.1 ± 3.5Aa	61.1 ± 0.8Aa	50.9 ± 8.3Aa	44.3 ± 0.1Aba
	HN	46.7 ± 5.6Aa	44.1 ± 2.2Aa	60.7 ± 1.7Aa	60.6 ± 5.8Aa	48.8 ± 5.4Aa	56.3 ± 9.2Aa
	CK	52.7 ± 2.7Aa	45.4 ± 4.3Aa	62.6 ± 1.3Aa	50.5 ± 1.1Bb	48.1 ± 1.5Aa	45.2 ± 2.7Aba

各施氮处理(LN, MN, HN)下的两种孔径针叶凋落物相较 CK 来说, C、N、P 元素释放率均减缓; LN 处理下的阔叶凋落物 C、N、P 释放率小于 CK 处理, MN, HN 的处理促进了阔叶凋落物的元素释放, 差异不显著; 不同孔径的混叶凋落物元素在施氮处理下呈现出相反的释放趋势, LN 处理加快了 150 目孔袋混叶凋落物的元素释放, 对 300 目孔袋混叶凋落物表现出抑制作用。不同凋落叶在施氮处理下养分元素损失率与凋落叶质量损失率表现一致。

## 5. 讨论

### 5.1. 凋落物的分解与凋落物类型关系

凋落物的分解速率与凋落叶类型有关, 本研究中针阔混 3 种类型凋落叶分解速率有显著差异, 表现为阔叶凋落物显著快于混叶凋落物和针叶凋落物(表 1), 其原因可能是针叶凋落物质地紧实, 而阔叶质地疏松, 角质化程度、硬度比针叶小, 颗粒大小比针叶大, 利于微生物菌丝穿过, 同样也利于土壤动物对凋落叶的取食, 使阔叶分解速度更快。张琴[24]在对东北吉林蛟河的天然红松阔叶林中红松、蒙古栎和色木槭 3 种类型凋落物的研究中得出相同结论。在对混合凋落叶在分解和养分释放的综述中, 60%的混合效应表现为正效应[25]。本实验结果与之相反, 混叶凋落物的剩余质量显著高于针叶和阔叶凋落物, 表现为负效应。可能是混合种类凋落物增加了资源的异质性, 改变了分解者有机体的丰富度, 发生了抑制分解的养分传递, 出现元素拮抗抑制分解。Hansen 和 Coleman [26]的研究采用 3 种等比例混合叶凋落物经过 10 个月的分解后表现为负效应。这与 Wardle [27]和 Nilsson [28]等人对岩高兰和赤茎藓混合的分解速率与计算值相比产生了负效应结果相似。表明混合凋落叶质量损失并非简单的加和作用, 彼此化学性质的改变及相互之间复杂的联系, 产生了更为复杂的分解过程, 其物理和化学组分的差异都可能影响甚至改变分解的结果。

### 5.2. 土壤动物活动对凋落物分解的影响

本实验得出土壤动物活动对不同类型凋落叶重量损失表现一致, 均加速了叶片的重量损失, 促进了凋落物的分解(图 1)。杨效东[29]在西双版纳对不同植被结构与土壤动物群落结构的研究中叶表示土壤动物对不同凋落叶物质损失率所表现出的贡献相似。反映出土壤动物通过不同方式的活动对生境中的凋落物分解产生相近程度的作用。据推算, 土壤动物的活动对凋落叶物质损失率的影响为年均值 46%左右[30], 加速着凋落物分解。这与温带其它地区研究结果相同[31] [32] [33]。本试验发现土壤动物加速了凋落物的分解速率, 这种影响在不同凋落叶种类之间存在差异, 土壤动物活动对针叶凋落物的影响显著(图 1(a)), 可能是针叶凋落物相对较高的 C/N 抑制了微生物活性, 使土壤动物发挥相对较大的作用。这与刘瑞龙[34]研究结果一致。土壤动物活动加速凋落物分解率, 同时对养分含量也产生影响[35] [36] [37]。Carcamo 等[38]采用室内缩微试验和野外网袋法 2 种试验结果均表明土壤动物促进了森林凋落物的分解和氮素的释放。本研究也得出相似结果, 土壤动物活动加速了凋落物 N、P 的释放, 同时土壤动物活动抑制了 C 的释放(表 2), Yang 和 Chen [39]在热带森林中的研究也曾得出相似结论。可以看出, 土壤动物活动对凋落物不同养分元素释放的影响不同。试验中土壤动物活动对不同类型凋落叶失重率和 N、P 元素释放率的影响一致(表 2), 不同类型凋落叶导致的化学组成差异对凋落物分解的影响是决定性的, 在决定凋落物元素释放作用上, 凋落叶种类有一定影响。但这些实验都是通过人为的包裹凋落物通过改变微气候而影响凋落物的分解速率, 对于不同网孔尺寸操控动物群落与凋落物的分解速率的实验来证明土壤动物的活动与凋落物分解的关系, 也许未来更为科学的处理机制下研究土壤动物活动对凋落物分解的影响会产生不同的结果。

### 5.3. 氮沉降对凋落物分解的影响

本研究结果证明, 氮沉降增加对凋落物的分解存在影响, 且与凋落叶类型之间存在一定的交互作用。从凋落物的降解速率上看, 氮沉降处理(LN, MN, HN)对针叶凋落物分解与 CK 相比均表现出了一定的抑制作用(图 2(a), 图 2(d)), 其原因可能是氮施加促进了针叶凋落物中大量难分解的化合物积累[11], 使这类物质发生聚合反应, 形成了难降解物质, 降低了针叶凋落物分解速率[40] [41]。氮沉降对阔叶凋落物表现为 LN 抑制 MN、HN 促进(图 2(b), 图 2(e)), 外氮沉降的额外增加必然改变系统中的营养元素平衡,



从而抑制参与凋落物分解的微生物和动物活动,对凋落物分解产生负面影响,但较高的氮处理可能正好满足了生态系统对氮素的需求,改善了生态系统养分状况,促进了凋落物分解速率。这与周璋[42]研究结果类似。氮沉降与土壤动物的活动也存在交互作用。本研究中混叶凋落物在有土壤动物参与和尽量排除土壤动物的情况分解有不同结果。在排除土壤动物的情况下,混叶凋落物表现为LN抑制分解HN促进分解(图2(f)),没有土壤动物参与下凋落物分解速率与微生物关系更紧密,施氮可能改变了微生物的群落结构,使微生物多样性增加,产生竞争机制,降低了凋落物的分解,当氮含量充足时,植物生物量、叶片氮含量以及微生物生物量均得到提高[43][44],从而促进了凋落物的分解。在施氮处理下,有土壤动物参与的混叶凋落物分解有相反情况,呈现出为HN抑制分解LN促进分解的趋势(图2(c)),其原因可能是施加的氮在一定程度上增加了凋落物可利用的氮素,促进凋落物的分解速度,但继续加氮分解者群落组成向低效率转变[45],氮处理会抑制凋落物袋内土壤动物活动(图3),减缓了其分解。徐国良[46]也曾表明氮处理下凋落物袋土壤动物受到了明显的抑制。在低氮处理下,土壤动物密度上升[11],促进了混叶凋落物的分解。而施氮超过一定程度,将抑制土壤动物活动,降低混叶分解率,甚至造成生态系统失衡及其它一系列负面影响。莫江明[11]也得出氮沉降对凋落物分解的影响随着森林演替进展从正作用向负作用转移的结论。氮沉降的继续升高对凋落物及整个生态系统所带来的影响还有待长期研究。

## 6. 结论

本试验通过研究氮沉降和土壤动物活动对小兴安岭自然保护区试验样地内重要树种的针阔混叶凋落物分解速率和养分释放速率的影响情况,得出结论如下:土壤动物的活动对凋落物分解有显著促进作用。不同氮处理抑制了针叶凋落物分解。低氮抑制阔叶凋落物分解,高氮表现为促进。氮沉降和土壤动物对混叶作用产生交互,HN处理下抑制土壤动物活动从而抑制了凋落物的分解。未来氮沉降将继续增加,氮浓度持续升高对森林系统所带来的后果将逐步向负面转移,还需长期定位研究,提出更好的利用策略。

## 致 谢

历时一年,从论文选题到实验处理分析,写初稿到反复修改,期间经历了喜悦、聒噪、痛苦和彷徨,在写作论文的过程中心情是如此复杂。如今,伴随着这篇论文的最终成稿,复杂的心情烟消云散,自己甚至还有一点成就感。论文得以完成,要感谢的人实在太多了,衷心感谢我的导师王庆贵教授在我的论文撰写中给予的悉心指导和鼓励,正是他悉心的指导、严谨的治学风格和孜孜不倦的教诲,给了我无穷的启发和指引。还有我们实验组的各位和许多朋友的陪伴与帮忙,才度过了这段难熬却充实的时光。感谢国家自然科学基金资助项目的支持与资助。深深感谢研究此类项目的工作者,他们的思想观点、研究结论、文献支持都给了我写作的来源和参考。再次,致以十二份诚挚的谢意。

## 基金项目

国家自然科学基金(41773075, 41575137, 31370494, 31170421), 科技部基础性工作专项 A 类项目(2014FY110600)。

## 参考文献

- [1] Bai, Y., Jianguo, W.U., Clark, C.M., Naeem, S., Pan, Q., Huang, J., *et al.* (2010) Tradeoffs and Thresholds in the Effects of Nitrogen Addition on Biodiversity and Ecosystem Functioning: Evidence from Inner Mongolia Grasslands. *Global Change Biology*, **16**, 358-372. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01950.x>
- [2] Parker, G.G. (1983) Throughfall and Stemflow in the Forest Nutrient Cycle. *Advance Ecological Research*, **13**, 57-133. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60108-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60108-7)
- [3] Aber, J., McDowell, W., Nadelhoffer, K., Magill, A., Berntson, G., Kamakea, M., *et al.* (1998) Nitrogen Saturation in

- Temperate Forest Ecosystems Hypotheses Revisited. *Bioscience*, **48**, 921-934. <https://doi.org/10.2307/1313296>
- [4] Magill, A.H., Aber, J.D., Hendricks, J.J., Bowden, R.D., Meillo, J.M. and Steudler, P.A. (1997) Biogeochemical Response of Forest Ecosystems to Simulated Chronic Nitrogen Deposition. *Ecological Applications*, **7**, 402. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0402:BROFET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0402:BROFET]2.0.CO;2)
- [5] Hall, S.J. and Matson, P.A. (1999) Nitrogen Oxide Emissions after Nitrogen Additions in Tropical Forests. *Nature*, **400**, 152-155. <https://doi.org/10.1038/22094>
- [6] Ren, R., Fengjie, M. and Naibin, B. (2000) A Chemometrics Analysis on the Data of Precipitation Chemistry of China. *Journal of Beijing Polytechnic University*, **2**, 90-95.
- [7] 杨金艳, 赵惠勋, 王传宽. 森林对氮饱和的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(4): 507-511.
- [8] Hobbie, S.E. and Gough, L. (2004) Litter Decomposition in Moist Acidic and Non-Acidic Tundra with Different Glacial Histories. *Oecologia*, **140**, 113-124. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1556-9>
- [9] Hobbie, S.E. and Vitousek, P.M. (2000) Nutrient Limitation of Decomposition in Hawaiian Forests. *Ecology*, **81**, 1867-1877. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[1867:NLODIH\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[1867:NLODIH]2.0.CO;2)
- [10] Prescott, C. and Blevins, L. (2000) Decomposition of Broadleaf and Needle Litter in Forests of British Columbia: Influences of Litter Type, Forest Type, and Litter Mixtures. *Canadian Journal of Forest Research*, **30**, 1742-1750. <https://doi.org/10.1139/x00-097>
- [11] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [12] Fan, H.B., Yuan, Y.H., Wang, Q., et al. (2007) Effects of Increased Nitrogen Deposition on Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Beneath Chinese fir Plantations. *Journal of Fujian College of Forestry*, **27**, 1226.
- [13] Frouz, J., Elhottová, D., Kuráž, V. and Šourková, M. (2006) Effects of Soil Macrofauna on Other Soil Biota and Soil Formation in Reclaimed and Unreclaimed Post Mining Sites: Results of a Field Microcosm Experiment. *Applied Soil Ecology*, **33**, 308-320. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.11.001>
- [14] Edwards, C.A., Reichle, D.E. and Crossley Jr., D.A. (1973) The Role of Soil Invertebrates in Turnover of Organic Matter and Nutrients. In: *Analysis of Temperate Forest Ecosystems*, 1, 147-172. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-85587-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-85587-0_12)
- [15] Singh, J.S. (1977) Plant Decomposition and Soil Respiration in Terrestrial Ecosystems. *Botanical Review*, **43**, 449-528. <https://doi.org/10.1007/BF02860844>
- [16] Heneghan, L., Coleman, D.C., Zou, X., Crossley, D.A. and Haines, B.L. (1998) Soil Microarthropod Community Structure and Litter Decomposition Dynamics: A Study of Tropical and Temperate Sites. *Applied Soil Ecology*, **9**, 33-38. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00050-X](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00050-X)
- [17] 张雪萍, 张毅, 侯威岭, 等. 小兴安岭针叶凋落物的分解与土壤动物的作用[J]. 地理科学, 2000, 20(6): 552-556.
- [18] 马树才, 杨明亮, 张荣祖. 凋落物分解模型与土壤动物的作用[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 1994(4): 80-84.
- [19] Matson, H.P.A. (2003) Nutrient Status of Tropical Rain Forests Influences Soil n Dynamics after n Additions. *Ecological Monographs*, **73**, 107-129. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2003\)073\[0107:NSOTRF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2003)073[0107:NSOTRF]2.0.CO;2)
- [20] Zhang, W., Mo, J., Zhou, G., Gundersen, P., Fang, Y., Lu, X., et al. (2008) Methane Uptake Responses to Nitrogen Deposition in Three Tropical Forests in Southern China. *Journal of Geophysical Research*, **113**, D11116. <https://doi.org/10.1029/2007JD009195>
- [21] Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., et al. (2004) Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, **70**, 153-226. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>
- [22] 李朝英, 郑路, 卢立华, 等. 测定植物全氮的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮法改进[J]. 中国农学通报, 2014, 30(6).
- [23] 卢超. 两种测定湿地植物总磷方法的比较研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(8): 142-144.
- [24] 张琴, 林天喜, 王贵春, 等. 红松、蒙古栎和色木槭凋落物混合分解研究[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(6): 106-111.
- [25] 李宜浓, 周晓梅, 张乃莉, 等. 陆地生态系统混合凋落物分解研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(16).
- [26] Hansen, R.A. and Coleman, D.C. (1998) Litter Complexity and Composition Are Determinants of the Diversity and Species Composition of Oribatid Mites (Acari: Oribatida) in Litterbags. *Applied Soil Ecology*, **9**, 17-23. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00048-1)
- [27] Wardle, D.A., Bonner, K.I. and Nicholson, K.S. (1997) Biodiversity and Plant Litter: Experimental Evidence Which Does Not Support the View That Enhanced Species Richness Improves Ecosystem Function. *Oikos*, **79**, 247-258. <https://doi.org/10.2307/3546010>

- [28] Nilsson, M.C. and Dahlberg, W.A. (1999) Effects of Plant Litter Species Composition and Diversity on the Boreal Forest Plant-Soil System. *Oikos*, **86**, 16-26. <https://doi.org/10.2307/3546566>
- [29] Yang, X. (2004) Dynamics and Community Structure of Soil Meso-Microarthropods during Leaf Litter Decomposition in Tropical Seasonal Rain Forests of Xishuangbanna, Yunnan. *Chinese Biodiversity*, **12**, 252-261.
- [30] Gonzalez, G. and Seastedt, T.R. (2001) Soil Fauna and Plant Litter Decomposition in Tropical and Subalpine Forests. *Ecology*, **82**, 955-964. <https://doi.org/10.2307/2679895>
- [31] Yoshida, T. and Hijii, N. (2011) Microarthropod Colonization of Litter in Arboreal and Soil Environments of a Japanese Cedar (*Cryptomeria Japonica*) Plantation. *Journal of Forest Research*, **16**, 46-54. <https://doi.org/10.1007/s10310-010-0205-x>
- [32] Neher, D.A., Weicht, T.R. and Barbercheck, M.E. (2012) Linking Invertebrate Communities to Decomposition Rate and Nitrogen Availability in Pine Forest Soils. *Applied Soil Ecology*, **54**, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.12.001>
- [33] Yin, X., Song, B., Dong, W., Xin, W. and Wang, Y. (2010) A Review on the Eco-Geography of Soil Fauna in China. *Journal of Geographical Sciences*, **20**, 333-346. <https://doi.org/10.1007/s11442-010-0333-4>
- [34] 刘瑞龙. 土壤动物对川西亚高山和高山森林凋落物分解的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
- [35] García-Palacios, P., Maestre, F.T., Kattge, J. and Wall, D.H. (2013) Climate and Litter Quality Differently Modulate the Effects of Soil fauna on Litter Decomposition across Biomes. *Ecology Letters*, **16**, 1045-1053. <https://doi.org/10.1111/ele.12137>
- [36] Dong, W. and Yin, X. (2007) Transformation of Carbon and Nitrogen by Earthworms in the Decomposition Processes of Broad-Leaved Litters. *Chinese Geographical Science*, **17**, 166-172. <https://doi.org/10.1007/s11769-007-0166-y>
- [37] Das, S. and Joy, V.C. (2009) Chemical Quality Impacts of Tropical Forest Tree Leaf Litters on the Growth and Fecundity of Soil Collembola. *European Journal of Soil Biology*, **45**, 448-454.
- [38] Cárcamo, H.A., Prescott, C.E., Chanway, C.P. and Abe, T.A. (2001) Do Soil Fauna Increase Rates of Litter Breakdown and Nitrogen Release in Forests of British Columbia, Canada? *Canadian Journal of Forest Research*, **31**, 1195-1204. <https://doi.org/10.1139/x01-054>
- [39] Yang, X. and Chen, J. (2009) Plant Litter Quality Influences the Contribution of Soil Fauna to Litter Decomposition in Humid Tropical Forests, Southwestern China. *Soil Biology & Biochemistry*, **41**, 910-918. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.12.028>
- [40] Kondo, R., Iimori, T., Imamura, H. and Nishida, T. (1990) Polymerization of Dhp and Depolymerization of Dhp-Glucoside by Lignin Oxidizing Enzymes. *Journal of Biotechnology*, **13**, 181-188. [https://doi.org/10.1016/0168-1656\(90\)90103-1](https://doi.org/10.1016/0168-1656(90)90103-1)
- [41] 董雄德, 邢亚娟, 闫国永. 不同生态系统凋落物分解对氮沉降的响应综述[J]. 中国农学通报, 2016, 32(22): 140-150.
- [42] 周璋. 氮磷添加对海南热带山地雨林碳循环的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京大学, 2013.
- [43] Jr., W.J.M. (1980) Herbivory in Relation to Plant Nitrogen Content. *Annual Review of Ecology & Systematics*, **11**, 119-161. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.11.110180.001003>
- [44] Sui, X., Zhang, R.T., Yang, L.B., Xu, N., Chai, C.R., Wang, J.F., *et al.* (2016) Effect of Simulation Nitrogen Depositions on Bacterial Diversity of Deyeuxiaangustifoliain Wetland of Sanjiang Plain. *Pratacultural Science*.
- [45] Micks, P., Downs, M.R., Magill, A.H., Nadelhoffer, K.J. and Aber, J.D. (2004) Decomposing Litter as a Sink for <sup>15</sup>N-Enriched Additions to an Oak Forest and a Red Pine Plantation. *Forest Ecology and Management*, **196**, 87. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.013>
- [46] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 等. 氮沉降下鼎湖山森林凋落物分解及与土壤动物的关系[J]. 生态环境学报, 2005, 14(6): 901-907.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2324-7967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ije@hanspub.org](mailto:ije@hanspub.org)