

# 模拟外源性氮磷对马占相思凋落叶分解及土壤生化特性的影响

余汉基, 蔡金桓, 薛立\*, 郑欣颖

(华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642)

**摘要:** [目的] 研究外源性氮和磷对马占相思凋落叶的分解速率、分解过程中 N、P、K 含量和土壤生化特性的影响, 以便为森林土壤养分管理提供参考。 [方法] 以广东省云勇林场马占相思林下凋落叶为试验材料, 采用尼龙网袋分解法, 设置对照 (CK)、施 N ( $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )、施 P ( $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )、施 N+P ( $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} + 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 4 种处理, 每隔 3 个月取样 1 次, 并测定凋落叶残留量和 N、P、K 含量。 [结果] 表明: 施 N、P 和 N+P 处理对马占相思凋落叶的分解均为促进作用。各处理马占相思凋落叶的 N 含量在分解过程中大致保持稳定, 施 P 和 N+P 处理的凋落叶 P 含量在分解过程中总体呈波动性上升, 而各处理的凋落叶 K 含量变化规律不明显。施 N、P 和 N+P 处理提高了马占相思林土壤的有机质和全 N 含量, 促进脲酶、磷酸酶及过氧化氢酶的活性。 [结论] 施 N、P 和 N+P 处理促进了马占相思凋落叶的分解, 有利于马占相思林的养分循环。

**关键词:** 马占相思; 凋落叶; 分解速率; 外源性 N 和 P; 养分含量; 土壤生化特性

中图分类号: S791

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)02-0107-07

## Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Leaf Litter Decomposition and Soil Biochemical Characteristics in an *Acacia mangium* Plantation

SHE Han-ji, CAI Jin-huan, XUE Li, ZHENG Xin-ying

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

**Abstract:** [Objective] To study the effects of nitrogen and phosphorus additions on leaf litter decomposition, nutrient dynamics and soil biochemical characteristics during the decomposition process in a *Acacia mangium* plantation in order to understand the mechanism of influence of nitrogen and phosphorus on leaf litter decomposition of *A. mangium* and forest soil nutrient management. [Method] Leaf litter decomposition of the *A. mangium* plantation in Yunyong Forest Farm was investigated using litter bag method. N and P additions were designed in four treatments: the control, N addition ( $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), P addition ( $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), and N+P addition ( $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} + 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ). It was sampled in a three-month interval and then the remaining leaf litter and N, P, K contents were analyzed. [Result] The N, P and N+P additions improved leaf litter decomposition. The N content of leaf litter with the four treatments remained stable. The P content of leaf litter with P and N+P additions tended to increase and were greater than their initial value during litter decomposition process. The K content of leaf litter with the four treatments changed irregularly. The N, P and N+P additions significantly increased soil organic matter and total N contents and improved activities of soil urease, acid phosphatase and catalase. [Conclusion] N, P and N+P additions accelerated leaf litter decomposition of the *A. mangium*, which improved the nutrient cycling of *A. mangium* planta-

收稿日期: 2016-12-25

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目“广东省生态公益林培育技术推广”(2015-GDTK-07)

作者简介: 余汉基(1993-), 男, 广东广州人, 硕士研究生, 主要从事林学研究. E-mail: shehanji@163.com

\* 通讯作者: 薛立, 教授, 博士, 博导. E-mail: forxue@scau.edu.cn

tion.

**Keywords:** *Acacia mangium*; leaf litter; decomposition rate; N and P additions; nutrient content; soil biochemical characteristics

森林凋落物是森林生态系统内由植物组分产生并归还到林地表面,作为分解者的物质和能量来源以维持森林生态系统土壤养分的有机物质的总称<sup>[1-2]</sup>,是森林土壤养分的主要补给者。凋落物分解是释放矿质元素供植物营养的重要生态过程<sup>[3]</sup>,是陆地生态系统中光合产物转换和矿质养分循环的重要环节<sup>[4-5]</sup>,一直是森林生态和环境的研究热点。

近几十年来,由于经济发展和人口膨胀,使矿物燃料燃烧、农业氮肥生产和使用等含氮化合物的排放日益增加,大气N沉降量增加已成为全球性的生态环境问题<sup>[6]</sup>。过量的N沉降可造成森林群落组成、凋落物化学成分、土壤微生物生物量以及酶活性发生变化等一系列生态问题,影响了凋落物的分解过程<sup>[7]</sup>。目前,国内外众多模拟N沉降的试验发现,外源性N添加对凋落物的影响出现为促进<sup>[8]</sup>、抑制<sup>[9]</sup>和无影响<sup>[10]</sup>3种结果,如陈翔等<sup>[11]</sup>对大兴安岭兴安落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)林的凋落物施N肥及汪金松等<sup>[12]</sup>对暖温带油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)林的凋落物施N肥,提高了凋落物的分解速率;涂利华等<sup>[13]</sup>发现,模拟N沉降显著抑制了华西雨屏区亮叶桦(*Betula luminifera* H. Winkl.)凋落叶的分解;Mo等<sup>[14]</sup>发现,在凋落叶分解初期,N添加对鼎湖山木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)林凋落物的分解速率影响不大。

有研究表明,生态系统中N沉降增加会加速土壤磷循环并导致P限制<sup>[15]</sup>,并随着N沉降量的持续增加,P限制性逐渐增强<sup>[16]</sup>。随着人工速生丰产林的发展,在P缺乏的南方红壤森林中普遍使用含磷化肥<sup>[17]</sup>,有利于微生物的繁衍,从而促进了土壤有机质和凋落物的分解<sup>[18-19]</sup>。Qualls等<sup>[20]</sup>和Liu等<sup>[21]</sup>研究发现,P添加可以提高凋落物中的P含量,增加土壤微生物生物量,促进凋落物的分解。DeBusk等<sup>[22]</sup>在大克拉莎(*Cladium jamaicense* Crantz)和宽叶香蒲(*Typha latifolia* Linn.)的凋落物分梯度施P肥的试验中发现,凋落物分解速率与施加的P肥浓度成正相关。弓晓静等<sup>[17]</sup>发现,N、P单独添加和复合添加均促进了湿地松(*Pinus elliotii*)凋落叶前期的分解速率,抑制中、后期的分解速率。Kozovits等<sup>[23]</sup>对巴西中部5个树种的研究中发现,

单独添加P肥对凋落物的分解速率影响不大,而施N、P复合肥后,凋落物质量比对照减少了42%。因此,笔者推测N沉降和P富集的共同作用可能会影响森林生态系统中凋落物的分解动态,其内在影响机制有待继续深入研究。

马占相思(*Acacia mangium* Will.)是豆科速生常绿乔木树种,有较多的枯枝落叶养分回归土壤,是我国南方山地绿化的主要树种之一。前人已对马占相思凋落物动态<sup>[24]</sup>和水源涵养功能<sup>[25]</sup>进行了研究,而外源性N和P对马占相思凋落物分解的影响尚未见报道。本研究以广东省云勇林场马占相思林凋落叶为试验材料,采用尼龙网袋分解法,通过2a的模拟外源性N和P添加试验,探索外源性N和P对凋落叶分解的影响过程与机制,以期对马占相思的土壤养分管理提供参考。

## 1 研究区概况

云勇林场(112°40' E, 22°53' N)位于广东省佛山市高明区内,是佛山市唯一的国有林场,森林面积1 928.73 hm<sup>2</sup>。试验地属于亚热带季风气候,气候温和,年平均气温、最高气温和最低气温分别为22、34.5、3.5℃,无霜期长达360 d。试验地雨量充沛,年降水量平均2 000 mm,集中在4—8月,年平均相对湿度80%。地势属丘陵地带,土壤为花岗岩发育的酸性赤红壤(pH < 5),土层深厚而肥沃。试验地概况见表1。

## 2 试验设计及试验方法

### 2.1 试验设计

2007年12月开始,在马占相思林下用凋落物网分别收集新鲜凋落叶。凋落叶分解采用尼龙网袋法,网袋大小20 cm × 20 cm,网孔2 mm × 2 mm,每袋装入烘干的10 g凋落叶。2008年4月,在14年生马占相思林内随机设置4个5 m × 5 m的小样方,各样方具有相同的土壤类型、类似的海拔高度和坡度,样方间设置≥10 m的缓冲带。每个小样方内分4个处理:不施肥的凋落叶(对照)、施N肥的凋落叶(施N)、施P肥的凋落叶(施P)、施N+P肥的凋落叶(施N+P)。清除地表凋落物层后,将凋落物分解

表1 马占相思林概况

Table1 General characteristics of the experimental stand

林分 Stand	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	平均胸径 Mean diameter in breast height/cm	平均树高 Mean tree height /m	冠幅 Crown diameter/m	郁闭度 Canopy density	主要林下植被 Main undergrowth
马占相思 <i>Acacia mangium</i>	30° SW	35	12.8	13.6	3	0.85	九节、鸭脚木、梅叶冬青、漫山秀竹、山芝麻、鬼灯笼、海金沙、黑面神、野牡丹、菝葜、白花酸果藤、芒萁、乌毛蕨、铁线蕨

注:九节 *Psychotria rubra* (Lour.) Poir.、鸭脚木 *Schefflera octophylla* (Lour.) Harms、梅叶冬青 *Ilex asprella* (Hook. et Arn.) Champ. ex Benth.、漫山秀竹 *Microstegium vagans* (Nees ex Steud.) A. Camus、山芝麻 *Helicteres angustifolia* Linn.、鬼灯笼 *Clerodendrum fortunatum* L.、海金沙 *Lygodium japonicum* (Thunb.) Sw.、黑面神 *Breynia fruticosa* (Linn.) Hook. f.、野牡丹 *Melastoma candidum* D. Don、菝葜 *Smilax china* L.、白花酸果藤 *Embelia ribes* Burm. f.、芒萁 *Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn.、乌毛蕨 *Blechnum orientale* L.、铁线蕨 *Adiantum capillus-veneris* L.。

袋置于样方地表的土壤上。采用完全随机区组设计,即4个处理在同一区组中完全随机排列。每个处理放置8袋装有凋落叶的尼龙网袋,随机分布于小样方内,放置面积为0.32 m<sup>2</sup>,各处理间设约3 m的缓冲带。N肥选用氯化铵(NH<sub>4</sub>Cl),P肥选用二水合磷酸二氢钠(NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O),施N、P和N+P处理的施肥量分别为N 10 g·m<sup>-2</sup>、P 5 g·m<sup>-2</sup>、N 10 g·m<sup>-2</sup> + P 5 g·m<sup>-2</sup>。

## 2.2 试验方法

2008年4月起,每个样方各处理隔3个月取走1袋样地凋落叶。每次取样后,对样地进行外加N、P、N+P水溶液处理,具体操作为:将各处理所需的肥料溶解至1 L水中,用喷雾器均匀喷洒在凋落叶网袋表面,对照(CK)则喷洒相同体积的水<sup>[17]</sup>,即4个处理水平以沉降量分别为0、400 kg N、200 kg P、400 kg N+200 kg P (hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)。网袋取回实验室后,挑去植物细根、泥土及小动物等杂物(后期含泥沙较多的分解袋用清水快速漂洗),凋落叶放烘箱中85℃烘24 h后取出称质量,将相同处理的凋落叶混合取样后粉碎,进行养分分析。N用重铬酸钾-浓硫酸消煮后以凯氏定N法测定。测定P、K的样品用硫酸-双氧水消煮处理后,试液中的P用钼蓝比色法测定,K用火焰光度法测定<sup>[26]</sup>。每个样品3次重复,结果取重复测定的算数平均值。

试验结束时,采用5点取样法取凋落叶下0~20 cm土层的土样约0.5 kg,用于土壤养分和酶活性的测定。有机质用重铬酸钾容量法测定;全N用半微量凯氏法测定;测定P、K的土壤样品用氢氧化钠碱熔法熔融后提取待测液,用钼蓝比色法测全P,火焰光度计测全K;有效N用碱解扩散法测定;测定有效P的土壤样品用0.025 mol·L<sup>-1</sup>HCl-0.03 mol·L<sup>-1</sup>NH<sub>4</sub>F提取后,有效P用钼蓝比色法测定;测定有效K的土壤样品用1 mol·L<sup>-1</sup>的中性醋酸钠提取

后,用火焰光度计测有效K。脲酶采用比色法测定,酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,过氧化氢酶活性采用0.1 mol·L<sup>-1</sup>高锰酸钾滴定法测定,所有样品重复3次。

## 2.3 数据处理

用Microsoft Excel 2003对凋落叶的质量变化、养分指标进行处理并作图,用SAS 8.2对数据进行多重比较。

## 3 结果与分析

### 3.1 外源性N、P对凋落叶分解的影响

图1表明:不同处理的马占相思凋落叶残留量在前6个月迅速下降后平稳减少;处理6个月时,对照、施N、P和N+P的凋落叶分别分解了40%、65%、74%和61%;处理24个月后,凋落叶残留量的顺序为对照(0.90 g) > 施N(0.82 g) > 施N+P(0.52 g) > 施P(0.08 g)。总体来看,施N、P和N+P处理对马占相思凋落叶分解均有一定的促进作用。

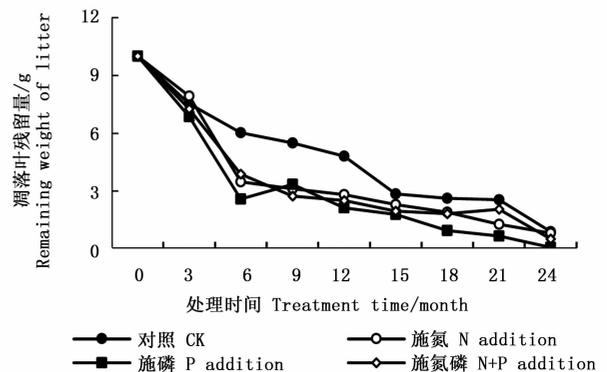


图1 马占相思林地凋落叶的残留量变化

Fig. 1 Change of remaining weight during leaf litter decomposition in the *A. mangium* woodland

### 3.2 外源性 N、P 对凋落叶分解过程中 N、P、K 含量的影响

图2表明,马占相思林地对照的凋落叶 N 含量整体呈小幅波动,施 P 的呈降-升后呈小幅波动,施 N 和 N + P 的呈升-降后呈小幅波动;处理 24 个月时,凋落叶 N 含量表现为施 N(24.54 g · kg<sup>-1</sup>) > 对照(22.73 g · kg<sup>-1</sup>) > 施 N + P(22.31 g · kg<sup>-1</sup>) > 施 P(21.48 g · kg<sup>-1</sup>)。试验末期,对照、施 N 和施 N + P 处理的凋落叶 N 含量均大于凋落叶初始的 N 含量(P < 0.05)。

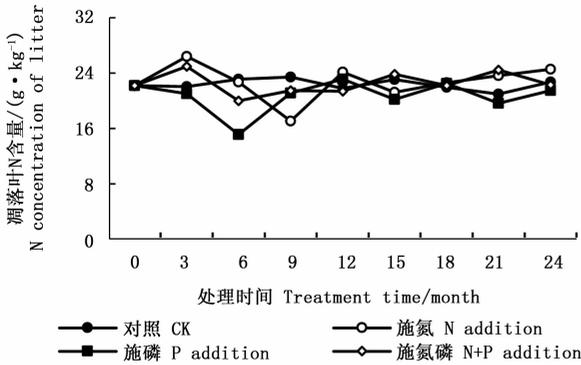


图2 马占相思林地凋落叶中的 N 含量变化

Fig. 2 Change of N concentration during leaf litter decomposition in the *A. mangium* woodland

图3表明,马占相思林地对照和施 N 的凋落叶 P 含量呈小幅波动,施 P 的小幅波动后大幅上升,施 N + P 的呈波动性上升;处理 24 个月时,凋落叶的 P 含量表现为施 P(1.47 g · kg<sup>-1</sup>) > 施 N + P(1.05 g · kg<sup>-1</sup>) > 施 N(0.51 g · kg<sup>-1</sup>) > 对照(0.47 g · kg<sup>-1</sup>)。试验末期,对照和施 N 处理的凋落叶 P 含量显著小于其初始的 P 含量,施 P 和施 N + P 处理的凋落叶 P 含量显著大于对照和施 N 处理(P < 0.05)。

图4表明:马占相思林地 4 种处理的凋落叶的 K 含量均大幅波动;对照、施 N、施 P 和 N + P 处理的凋落叶 K 含量分别在分解第 12 个月、第 9 个月、第 15 个月和第 6 个月时达到最大值;处理 24 个月时,

凋落叶的 K 含量表现为对照(3.22 g · kg<sup>-1</sup>) > 施 P(2.63 g · kg<sup>-1</sup>) > 施 N + P(2.22 g · kg<sup>-1</sup>) > 施 N(1.95 g · kg<sup>-1</sup>)。试验末期,各处理凋落叶的 K 含量均大于凋落叶初始的 K 含量(P < 0.05)。

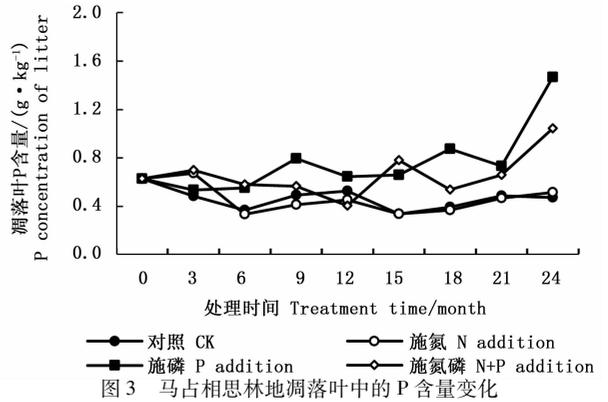


Fig. 3 Change of P concentration during leaf litter decomposition in the *A. mangium* woodland

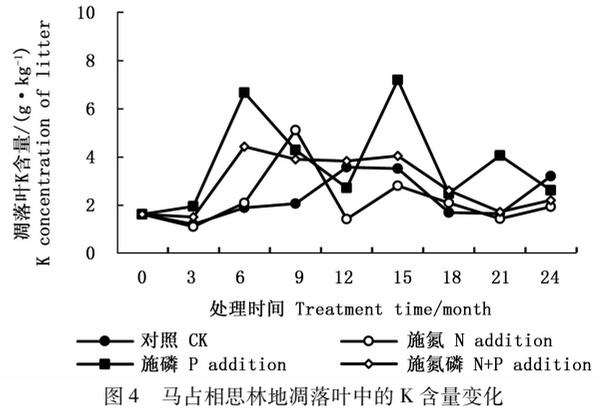


Fig. 4 Change of K concentration during leaf litter decomposition in the *A. mangium* woodland

### 3.3 外源性 N、P 对土壤特性的影响

表2表明,施 N、P 和 N + P 处理的马占相思林地土壤的有机质、全 N、有效 P 含量均显著大于对照(P < 0.05),施 N 和 N + P 处理的林地土壤有效 N 含量显著大于对照(P < 0.05),而施 N 处理的却减少了土壤中的全 P、全 K 和有效 K 含量。表3表明,施 N、P 和 N + P 处理均显著提高了马占相思林地土壤的酶活性。

表2 马占相思林地土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties of *A. mangium* woodland

处理 Treatment	有机质 Organic matter/(g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/(g · kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus/(g · kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total potassium/(g · kg <sup>-1</sup> )	有效氮 Available nitrogen/(mg · kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus/(mg · kg <sup>-1</sup> )	有效钾 Available potassium/(mg · kg <sup>-1</sup> )
CK	15.17 ± 0.28c	0.80 ± 0.02c	0.17 ± 0.01ab	34.45 ± 0.64a	77.83 ± 0.89b	0.59 ± 0.05d	67.34 ± 0.58c
施 N N treatment	18.19 ± 0.25b	0.87 ± 0.01b	0.15 ± 0.00b	33.85 ± 0.30a	114.81 ± 3.39a	0.70 ± 0.03c	63.78 ± 0.36d
施 P P treatment	19.59 ± 0.36a	0.88 ± 0.01b	0.19 ± 0.01a	34.08 ± 0.33a	109.14 ± 0.90ab	2.34 ± 0.05b	77.49 ± 0.44b
施 N + P N + P treatment	19.99 ± 0.16a	1.06 ± 0.04a	0.18 ± 0.01a	33.29 ± 0.08a	119.28 ± 1.36a	2.67 ± 0.02a	84.19 ± 0.78a

表3 马占相思林地土壤酶活性

Table 3 Soil enzyme activities of *A. mangium* woodland

处理 Treatment	脲酶 Urease $\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	磷酸酶 Acid phosphatase $\text{P}_5\text{O}_2/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	过氧化氢酶 Catalase $\text{KMnO}_4/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$
对照 CK	156.03 ± 3.35c	261.97 ± 1.58d	1.08 ± 0.02c
施 N N treatment	183.93 ± 2.25b	273.33 ± 2.62c	1.29 ± 0.02b
施 P N treatment	208.87 ± 1.72a	292.90 ± 1.58b	1.32 ± 0.01b
施 N + P N + P treatment	179.63 ± 2.25b	308.80 ± 1.57a	1.53 ± 0.02a

## 4 讨论

### 4.1 外源性 N、P 对凋落叶分解的影响

施 N、P 和 N + P 处理的马占相思凋落叶的分解速率明显比对照的快,所以,外源性 N 促进凋落叶的分解。目前,一般认为外源性 N 促进凋落叶分解的原因有以下几个方面:一是外源 N 提高了凋落物及土壤中的可利用 N,解除了 N 对微生物活动的限制,同时土壤微生物能够吸收和同化外源 N 以增强活性,从而加快凋落物分解<sup>[7,27]</sup>;二是外源性 N 增加了 N 含量与凋落物结构性物质的含量的比值,纤维素、半纤维素、木质素等难分解物质越少,凋落物分解的速率也越快<sup>[28]</sup>;三是外源性 N 降低了凋落物中 C:N,提高了凋落物底物质量,加速了植物群落组成的物种变化,分解者组成向更加高效但对氮有更高需求的方向转变,有利于生产能迅速分解的凋落物<sup>[29]</sup>;四是外源性 N 会提高受 N 限制的纤维素酶和淀粉酶及其他糖苷酶的活性<sup>[25]</sup>。

施 P 后,马占相思林下凋落叶的分解速率提高,表现为促进作用,这与 Liu 等<sup>[18]</sup>和蔡金桓等<sup>[19]</sup>的结论一致。本研究中,施 P 处理显著改善了马占相思林地土壤的化学性质,提高了酶的活性。研究表明,外源 P 还可以促进凋落叶对可利用 P 的吸收,加快 C 释放,同时促进土壤微生物群落的发展,增加土壤的真菌与细菌比,从而促进凋落物的分解<sup>[30-31]</sup>。云勇林场处于典型的磷限制亚热带阔叶林区,施 P 可能增强了土壤微生物对硝酸盐和磷酸盐的吸收,通过促进土壤微生物生长繁衍而加快凋落叶的分解。因此,在红壤地区适当的增加和保持土壤的速效 P,可以增加土壤 pH 值和微生物对 P 的吸收,有利于凋落物的分解<sup>[32]</sup>。

施 N + P 后,马占相思林下凋落叶的分解速率提高,也表现为促进作用,效果介于施 N 和施 P 之间。这与陈昊<sup>[33]</sup>、李文亚<sup>[34]</sup>的研究结论一致。施肥能提高土壤中微生物的代谢活性与物种丰富度,促进微生物 C 利用能力,提高凋落叶的分解速率;而

土壤 N:P 的平衡影响土壤养分供给及微生物群落的多样性,从而影响凋落叶的分解<sup>[35]</sup>。Jacobson 等<sup>[36]</sup>研究巴西热带草原时发现,无论单独或混合添加 P 都促进了凋落物的分解,而添加 N 只增加初始凋落物的 N 浓度,与 P 一起添加时才提高其分解率,表明该生态系统受 P 限制。此外,吕妍等<sup>[37]</sup>研究表明,随着 N、P 施肥时间的延长,该森林生态系统原有的 N、P 限制状况可能发生改变,森林以降低叶片的 N、P 回流或转移率来维持其养分平衡。

### 4.2 分解过程中凋落叶养分含量的变化

4.2.1 分解过程中凋落叶 N 含量的变化 在处理 3 个月时,施 N 和 N + P 处理增加了马占相思林凋落叶的 N 含量,这与廖利平等<sup>[38]</sup>在杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) 林凋落叶的分解试验结论相同,其原因可能是外源性 N 被固定在马占相思凋落叶以供微生物的生长发育,同时 N 肥中的  $\text{NH}_4^+$  能与凋落物表面的阳离子交换而固定在凋落物表面。处理 24 个月后,施 N 处理的凋落叶 N 含量明显大于其初始 N 含量,这与涂利华等<sup>[13]</sup>在亮叶桦凋落叶的分解试验结论相同,可能是因为外源 N 与木质素分解过程中产生的中间产物发生反应并被固定至凋落物中。

4.2.2 分解过程中凋落叶 P 含量的变化 处理 24 个月后,对照和施 N 处理的马占相思林凋落叶的 P 含量均小于其初始值,其原因可能是对照和施 N 的凋落叶的 P 释放速度快于凋落叶 C 的分解。施 P 和 N + P 处理的凋落叶 P 含量显著大于其初始 P 含量,主要是由于凋落物质量损失速度快于 P 释放速度,凋落物中的微生物会在分解过程中固定外源性 P,从而累积 P 含量。

4.2.3 分解过程中凋落叶 K 含量的变化 马占相思林各处理凋落叶的 K 含量在分解过程中波动性上升。K 具有强可溶性并以离子形式存在于叶片中<sup>[39]</sup>,而且不能与叶片组织中的有机物或元素形成难分解物质,因而,在分解初期很快被淋溶释放<sup>[40]</sup>,其后的波动则可能主要是淋溶和微生物的吸收和分

解释共同作用的结果。

### 4.3 外源性 N、P 对土壤生化特性的影响

Berg 等<sup>[41]</sup>发现,外源 N 可以直接增加土壤有效 N 的含量,使微生物群落的生长和结构发生改变,增加土壤有机质的含量。此外, $\text{NH}_4\text{Cl}$  水解后与  $\text{H}^+$  结合,促进土壤酸化,增强磷酸酶活性,从而提高有效 P 含量,与本试验结果一致。外源性 P 增加土壤微生物含量和增强酶的活性,使凋落物的分解和养分的释放速率得到提升,提高土壤有机质和养分的含量<sup>[42]</sup>,外源性 P 还可以减弱酸性土壤对 P 的吸附力,能保存土壤中剩余的无机磷<sup>[43]</sup>。

## 5 结论

(1)施 N、P 和 N + P 处理均促进了马占相思林下调落物的分解速率,其中,施 P 处理的效果最佳。

(2)凋落物的 N 含量在分解过程中大致保持稳定,施 P 和 N + P 处理的凋落物 P 含量在分解过程中总体呈现波动上升,而各处理的凋落物 K 含量变化并无明显规律。

(3)施 N 和 P 显著增加了土壤有机质和碱解 N 含量;施 N + P 显著增加了土壤有机质、全氮、有效氮、有效磷和有效钾含量。

(4)施 N、施 P 和施 N + P 三种处理均显著增加了土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性。

### 参考文献:

- [1] 王相娥,薛立,谢腾芳. 凋落物分解研究综述[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1473 - 1478.
- [2] Maisto G, De M A, Meola A, et al. Nutrient dynamics in litter mixtures of four Mediterranean maquis species decomposing in situ[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(3): 520 - 530.
- [3] 陆耀东,薛立,曹鹤,等. 去除地面枯落物对加勒比松林土壤特性的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3205 - 3211.
- [4] Wang Q K, Wang S L, Huang Y. Comparisons of litterfall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and a mixed stand in southern China[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(3-4): 1210 - 1218.
- [5] Xu X N, Hirata E, Enoki T, et al. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical forest after typhoon disturbance[J]. Plant Ecology, 2004, 173(2): 161 - 170.
- [6] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, et al. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from Inner Mongolia Grasslands[J]. Global Change Biology, 2010, 16(1): 358 - 372.
- [7] 卢广超,邵怡若,薛立. 氮沉降对凋落物分解的影响研究进展[J]. 世界林业研究, 2014, 27(1): 35 - 42.
- [8] Luca B, Alexandre B, Jonathan H, et al. High nitrogen deposition alters the decomposition of bog plant litter and reduces carbon accumulation[J]. Global Change Biology, 2012, 18(3): 1163 - 1172.
- [9] 郭春兰,方向民,李佩擎,等. 毛竹原状和粉状叶片分解特征对施氮和温度的响应[J]. 林业科学研究, 2016, 29(5): 719 - 725.
- [10] Knops J H, Naem S, Reich P M. The impact of elevated  $\text{CO}_2$ , increased nitrogen availability and biodiversity on plant tissue quality and decomposition[J]. Global Change Biology, 2007, 13(9): 1960 - 1971.
- [11] 陈翔,周梅,魏江生,等. 模拟氮沉降对兴安落叶松林凋落物分解的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1496 - 1503.
- [12] 汪金松,王晨,赵秀海,等. 模拟氮沉降对油松林单一及混合叶凋落物分解的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(10): 14 - 21.
- [13] 涂利华,胡红玲,胡庭兴,等. 华西雨屏区亮叶桦凋落叶分解对模拟氮沉降的响应[J]. 植物生态学报, 2012, 36(2): 99 - 108.
- [14] Mo J M, Brown S, Xue J H, et al. Response of Litter Decomposition to Simulated N Deposition in Disturbed, Rehabilitated and Mature Forests in Subtropical China[J]. Plant and Soil, 2006, 282(1-2): 135 - 151.
- [15] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems[J]. New Phytologist, 2012, 193(3): 696 - 704.
- [16] Peuelas J, Sardans J, Rivas-ubach A, et al. The human-induced imbalance between C, N and P in Earth's life system[J]. Global Change Biology, 2012, 18(1): 3 - 6.
- [17] 弓晓静,余明泉,胡小飞,等. 氮磷添加对红壤区域郊湿地松林凋落叶分解的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2327 - 2333.
- [18] Liu Z F, Fu B J, Zheng X X, et al. Plant biomass, soil water content and soil N:P ratio regulating soil microbial functional diversity in a temperate steppe: A regional scale study[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(3): 445 - 450.
- [19] 蔡金桓,王卓敏,薛立,等. 外源性氮和磷对藜蒺林凋落叶分解的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 36(7): 105 - 111.
- [20] Qualls R G, Richardson C J. Phosphorus enrichment affects litter decomposition, immobilization, and soil microbial phosphorus in wetland mesocosms[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 799 - 808.
- [21] Liu L, Gundersen P, Zhang T, et al. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 44(1): 31 - 38.
- [22] DeBusk W F, Reddy K R. Turnover of detrital organic carbon in a nutrient impacted Everglades marsh[J]. Soil Science Society of America, 1998, 62(5): 1460 - 1468.
- [23] Kozovits A R, Bustamante M M C, Garfalo C R, et al. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a

- Neotropical Savanna[J]. *Functional Ecology*, 2007, 21(6): 1034 - 1043.
- [24] 邹碧,李志安,丁永祯,等. 南亚热带4种人工林凋落物动态特征[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 715 - 721.
- [25] 薛立;何跃君;屈明,等. 华南典型人工林凋落物的持水特性[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 415 - 421.
- [26] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [27] 刘彩霞,焦如珍,董玉红,等. 杉木林土壤微生物区系对短期模拟氮沉降的响应[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(2): 271 - 276.
- [28] 李英滨,李琪,杨俊杰,等. 模拟氮沉降对温带草原凋落物质量的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2732 - 2737.
- [29] Knorr M, Frey S D, Curtis P S. Nitrogen additions and litter decomposition: a meta-analysis[J]. *Ecology*, 2005, 86(12): 3252 - 3257.
- [30] Liu L, Gundersen P, Zhang T, *et al.* Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44(1): 31 - 38.
- [31] Chen Y, Fan J B, Du L, *et al.* The application of phosphate solubilizing endophyte *Pantoea dispersa* triggers the microbial community in red acidic soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 84: 235 - 244.
- [32] Chen Y, Sun T T, Qian H Y, *et al.* Nitrogen mineralization as a result of phosphorus supplementation in long-term phosphate deficient soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 106: 24 - 32.
- [33] 陈昊. 氮磷添加对亚热带北部常绿阔叶林落叶分解及其养分释放的影响[D]. 合肥:安徽农业大学, 2013.
- [34] 李文亚. 贝加尔针茅草原凋落物分解对氮磷添加的响应[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2016.
- [35] 李茂,徐俊,田地,等. 氮磷添加对苦楮次生林凋落物量及其养分动态的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(19): 7 - 13.
- [36] Jacobson T K B, Bustamante M M C, Kozovits A R. Diversity of shrub tree layer, leaf litter decomposition and N release in a Brazilian Cerrado under N, P and N plus P additions[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2236 - 2242.
- [37] 吕妍,郑泽梅,美丽班·马木提,等. 增施氮磷肥对木荷林凋落物生产量及其养分的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3027 - 3034.
- [38] 廖利平,高洪,汪思龙,等. 外加氮源对杉木叶凋落物分解及土壤养分淋失的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 34 - 39.
- [39] 李淑兰,陈永亮. 不同落叶林林下凋落物的分解与养分归还[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2004, 28(5): 59 - 62.
- [40] Prescott C E, Kabzems R, Zabek L M. Effects of fertilization on decomposition rate of *Populus tremuloides* foliar litter in a boreal forest[J]. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1999, 29(3): 393 - 397.
- [41] Berg B and Ekbohm G. Litter mass-loss rates and decomposition patterns in some needle and leaf litter types. Long-term decomposition in a Scotspine forest[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1991, 69(7): 1449 - 1456.
- [42] 董喜光,张越,薛立,等. 火力楠林的土壤特性对外源性N和P的响应[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 35(9): 104 - 108, 113.
- [43] Yang J X, Zhang T, Wu D X. Study on effect of phosphorus nutrition on drought resistance of plants[J]. *Trace Elem Sci*, 2003, 10(12): 13 - 19.

(责任编辑:徐玉秀)