

郑欣颖, 余汉基, 薛立, 等. 外源性氮和磷对火力楠凋落叶分解的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(1): 98-104.

外源性氮和磷对火力楠凋落叶分解的影响

郑欣颖, 余汉基, 薛立, 蔡金桓

(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火力楠 *Michelia macclurei* 凋落叶分解速率以及分解过程中 N、P、K 含量变化的影响, 为科学合理经营火力楠人工林提供科学依据。【方法】在广东云勇林场的火力楠林地上建立 4 块 5 m×5 m 的小样地, 将凋落叶放入尼龙网袋, 并分别喷施 N、P 或 N+P, 每隔 3 个月取样测定凋落叶分解速率和 N、P、K 含量的变化。【结果】施 N、P 及 N+P 后凋落叶的分解速率有不同程度的加快, 分解 24 个月后, 对照及施 N、P 和 N+P 的凋落叶分别分解了 52%、66%、78% 和 73%; 对照及施 N、P 和 N+P 的凋落叶 N 含量分别增加了 23%、33%、23% 和 31%, 火力楠林地各处理的凋落叶 N 含量显著大于凋落叶的初始 N 含量, 其中施 N 和 N+P 的凋落叶 N 含量显著大于对照; 对照及施 N、P 和 N+P 的凋落叶 P 含量分别增加了 7%、18%、59% 和 46%, 且显著大于初始 P 含量, 其中施 P 和 N+P 的凋落叶 P 含量显著大于对照。各处理的凋落叶 K 含量变化无规律, 施 N 和 N+P 的凋落叶 K 含量显著小于对照, 而施 P 的显著大于对照。对照的凋落叶 N 和 K 残留量显著大于其他处理, 而施 N 处理的凋落叶 P 残留量显著小于对照。【结论】施 N、P 及 N+P 均可促进火力楠凋落叶的分解, 其中施用 P 肥效果最佳, 建议在火力楠林地可适当施用 P 肥, 促进火力楠林的养分循环。

关键词: 火力楠林; 凋落叶; 分解速率; 外源性 N 和 P

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2018)01-0098-07

Effects of N and P additions on leaf litter decomposition in *Michelia macclurei* woodland

ZHENG Xinying, SHE Hanji, XUE Li, CAI Jinhuan

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

Abstract: 【Objective】 The effects of external nitrogen and phosphorus on leaf litter decomposition rate and changes in N, P, K contents during the decomposition process were studied in a *Michelia macclurei* woodland to provide a basis for scientific and rational management of *M. macclurei* plantations. 【Method】 Four 5 m×5 m sample plots were set in a *M. macclurei* woodland of Yunyong forest farm, Guangdong Province. Leaf litters were placed in nylon bags and were sprayed with N, P or N+P respectively. The leaf litter decomposition rate and N, P and K contents were determined every three months. 【Result】 The decomposition rate of leaf litter was significantly accelerated by N, P and N+P additions. After 24 months of decomposition, the leaf litter decomposition rates of the control, N, P and N+P additions reached 52%, 66%, 78% and 73% respectively. N content of leaf litters of the control, N, P and N+P additions increased by 23%, 33%, 23% and 31% respectively, and was significantly higher than their initial N content, among which N contents of leaf litters treated with N and N+P additions were significantly greater than the control. P content of leaf litters of the

收稿日期: 2017-03-20 优先出版时间: 2017-12-29

优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20171229.1142.028.html>

作者简介: 郑欣颖 (1993—), 女, 硕士研究生, E-mail: 344085230@qq.com; 通信作者: 薛立 (1958—), 男, 教授, 博士, E-mail: forxue@scau.edu.cn

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目 (2015-GDTP-07)

control, N, P and N+P additions increased by 7%, 18%, 59% and 46% respectively, and was significantly higher than their initial P content, among which P content of leaf litters treated with P or N+P additions was significantly greater than the control. K content of leaf litters changed irregularly, and that treated with N or N+P additions was significantly smaller than the control, while that treated with P addition was significantly greater than the control. Remaining amounts of N and K of leaf litter in the control were significantly greater than the other treatments, and remaining amount of P treated with N addition was significantly less than the control. 【Conclusion】 N, P and N+P additions can accelerate leaf litter decomposition in *M. macclurei* woodland, P addition had the best effect. It is suggested that P fertilizer might be added appropriately in *M. macclurei* woodlands to promote nutrient cycling.

Key words: *Michelia macclurei*; leaf litter; decomposition rate; external N and P

森林凋落物是植物生态系统碳库和养分库的主要组成部分^[1], 凋落物的分解在森林生态系统物质循环和养分平衡中起着重要作用^[2], 可以不断地为土壤动物、微生物等提供物质及能量^[3], 改善土壤理化性质及提升林地生产力^[4]。凋落物分解速率的提高, 可促进土壤的营养循环, 改善土壤质量^[5]。

随着工业的发展, 我国的大气氮沉降呈现增加趋势^[6], 引起的环境问题日益严峻^[7-8], 导致森林土壤中 N 含量和 N/P 比例增加。另外, 亚热带的地带性土壤——红壤以酸性为主, 对 P 的吸附和固定作用强烈, 导致严重缺 P^[9], 限制了植物生长发育和林地生产力, 使林地处于 N 沉降与 P 缺乏的双重环境。许多学者对森林凋落叶分解及土壤特性进行了大量研究, 包括 N 沉降对凋落叶分解的影响^[10-13], N 沉降对凋落叶基质的影响^[14-15], 凋落叶分解过程中养分动态变化^[3, 16], 凋落叶分解与土壤微生物及动物间的相互影响作用^[17-21], 但是鲜有外源性 N、特别是外源性 P 对亚热带森林凋落叶影响的报道。火力楠 *Michelia macclurei* 为木兰科含笑属常绿乔木, 具有适应性强、生长快、用途广、耐寒性强、改土效果好的特性, 普遍种植于我国南方地区^[22]。本研究对火力楠凋落叶进行 N、P、N+P 施肥试验, 比较其分解速率及其分解过程中的 N、P、K 含量变化, 以期了解外源性 N 和 P 对凋落叶分解的影响, 为火力楠人工林的土壤管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地区位于广东省佛山市高明区云勇林场 (112°40'E, 22°53'N), 森林面积 1 928.73 hm²。试验地属于亚热带气候, 年平均气温、最高气温和最低气温分别为 22.0、34.5 和 3.5 °C, 无霜期长达 360 d, 年平均降雨量 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, 土地肥沃。火力楠试验地坡向 SW20°, 坡度 35°。火力楠平均胸径 23.1 cm, 平均树高 15.8 m, 冠幅 6 m, 郁闭度 0.85。主要林下植被包括山芝麻 *Helicteres angustifolia*、黑面神 *Breynia fruticosa*、山苍子 *Litsea cubeba*、粗叶榕 *Ficus hirta*、三叉苦 *Evodia lepta*、冬青 *Ilex chinensis*、海金沙 *Lygodium japonicum*、五指毛桃 *Ficus simplicissima*、玉叶金花 *Mussaenda pubescens*、梅叶冬青 *Ilex asprella*、漫山秀竹 *Microstegium vagans*、乌毛蕨 *Blechnum orientale*、羊角拗 *Strophanthus divaricatus* 和铁线蕨 *Adiantum capillus* 等。

1.2 试验材料与设计

2007 年 12 月开始在火力楠林下用凋落叶网收集新鲜凋落叶, 带回实验室烘干。凋落叶分解采用尼龙网袋法, 网袋规格 20 cm×20 cm, 网孔 2 mm×2 mm, 每个分解网袋装入烘干的凋落叶 10 g, 放置于林下。在火力楠林内设置 4 个 5 m×5 m 的样方 (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 ≥10 m 的缓冲带) 放置分解袋。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)。清除地被物和地表凋落物层后, 将凋落叶分解袋置于样方地表的土壤上, 每个处理放置 8 袋凋落叶。采用完全随机区组设计, 即 4 个处理在同一样方中完全随机排列。施用的 N 肥选用 NH₄Cl, P 肥选用 NaH₂PO₄·2H₂O, 3 个处理的施肥量分别为 N 肥 10 g·m⁻²、P 肥 5 g·m⁻²、N 肥 10 g·m⁻²+P 肥 5 g·m⁻²。

2008 年 4 月起, 每隔 3 个月取走 1 袋样地凋落叶。每次取走凋落叶样袋后, 即在 2008 年 4、7、10 月, 2009 年 1、4、7、10 月和 2010 年 1 月, 对样地进行外加 N、P 或 N+P 水溶液处理, 具体操作如下: 将各处理所需的肥料溶解至 1 L 的水中, 用喷雾器

均匀喷洒在网袋表面,对照(CK)则喷洒相同体积的清水。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),85℃条件下烘干后,取出称质量,计算凋落叶残留率和失质量率。将4袋相同处理的样品混合后粉碎,测定凋落叶中N、P、K的含量。

1.3 凋落叶化学性质测定

凋落叶在85℃条件下烘干24h后取出称质量,将凋落叶的干质量样品粉碎后进行养分分析。N含量用重铬酸钾-浓硫酸消煮后以凯氏定N法测定。样品用硫酸-双氧水消煮处理后,试液中P含量用钼蓝比色法、K含量用火焰光度法测定^[23]。每个样品做3次重复测定,取平均值。N、P、K残留量为凋落叶残质量与凋落叶相应养分含量的乘积。

1.4 数据处理

用Microsoft Excel 2003对凋落叶的质量和养分数据进行处理并作图,用SAS8.2对数据进行多重比较。

2 结果与分析

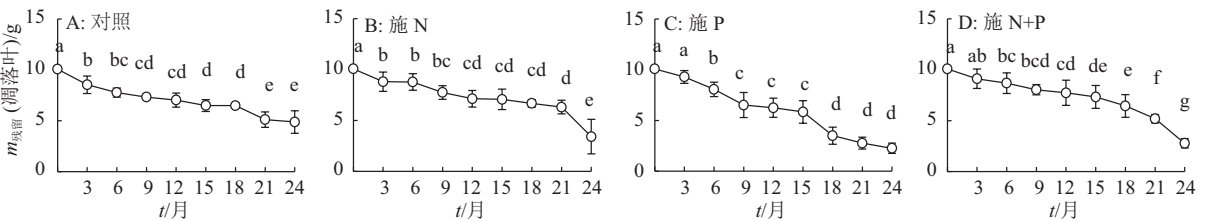
2.1 凋落叶的分解

在整个试验期,对照的火力楠纯凋落叶分解最慢,施P分解最快,施N与施N+P的分解速率中等且均在21~24个月间分解最快(图1)。第24个月时,对照及施N、P、N+P处理的凋落叶分别分解了52%、66%、78%和73%,其残留质量分别为4.89、3.41、2.25和2.77g。总体而言,施N、P和N+P处理均促进了火力楠纯凋落叶的分解。

2.2 凋落叶分解过程中N、P、K含量的变化

对照的火力楠凋落叶N含量小幅波动性上升后趋于平稳,施N、P和N+P的呈现小幅波动上升(图2)。24个月时,对照及施N、P和N+P的凋落叶N含量分别为12.10、13.93、12.07和13.46g·kg⁻¹,分别增加了23%、33%、23%和31%,均显著大于凋落叶的初始N含量(P<0.05),其中施N和N+P的凋落叶N含量显著大于对照(P<0.05,表1)。

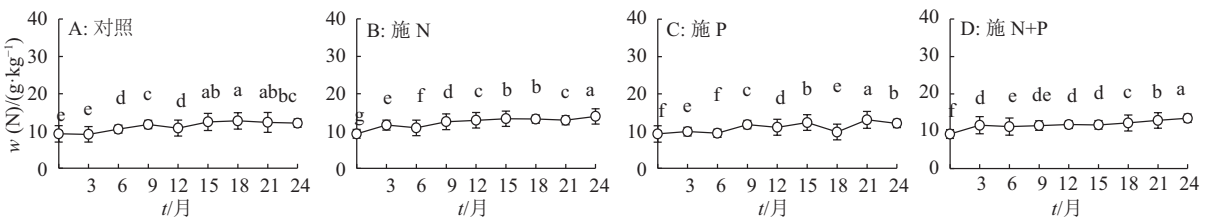
对照和施N的火力楠纯凋落叶P含量小幅波



各图曲线数据点上方凡是具有一个相同小写字母者,表示处理后不同时间差异不显著(P>0.05, Duncan's 法)

图1 火力楠林地凋落叶残留的质量

Fig. 1 The residue mass of leaf litter in the *Michelia macclurei* woodland



各图曲线数据点上方凡是具有一个相同小写字母者,表示处理后不同时间差异不显著(P>0.05, Duncan's 法)

图2 火力楠林地凋落叶中的N含量变化

Fig. 2 Change in N content of leaf litters in the *Michelia macclurei* woodland

表1 火力楠凋落叶分解24个月时的凋落叶养分含量和残留量¹⁾

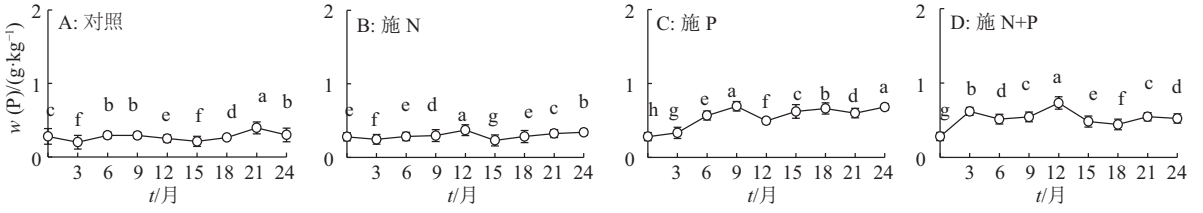
Tab. 1 Remaining mass of leaf litter and nutrient in the *Michelia macclurei* woodland after 24 months of decomposition

处理	$m_{\text{残留}}(\text{凋落叶})/\text{g}$	$w/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$			$m_{\text{残留}}/\text{mg}$		
		N	P	K	N	P	K
对照	4.89±1.10a	12.10±0.11c	0.30±0.00c	1.28±0.07b	59.12±0.13a	1.47±0.00a	6.24±0.07a
施N	3.40±1.69b	13.93±0.06a	0.34±0.00c	0.85±0.01c	47.52±0.09b	1.16±0.00b	2.90±0.02c
施P	2.25±0.50d	12.07±0.12c	0.68±0.01a	2.04±0.03a	27.15±0.06d	1.53±0.00a	4.59±0.01b
施N+P	2.77±0.47c	13.46±0.12b	0.52±0.00b	1.14±0.00c	37.29±0.05c	1.45±0.00a	3.15±0.00c

1)表中数据为平均值±标准差;同列数据后凡是具有一个相同字母者表示处理间差异不显著(P>0.05, Duncan's 法)

动, 施 P 的呈现上升后小幅波动, 施 N+P 的反复升降后趋于平稳 (图 3)。24 个月时, 对照及施 N、P 和 N+P 的凋落叶 P 含量分别为 0.30、0.34、0.68 和 0.52 g·kg⁻¹, 分别增加了 7%、18%、59% 和 46%, 施

P 处理的凋落叶 P 含量增加最多, 施 N+P 处理次之, 并且施 P 和 N+P 的凋落叶 P 含量显著大于对照 ($P < 0.05$, 表 1)。



各图曲线数据点上方凡是具有一个相同小写字母者, 表示处理后不同时间差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法)

图 3 火力楠林地凋落叶中的 P 含量变化

Fig. 3 Change in P content of leaf litters in the *Michelia macclurei* woodland

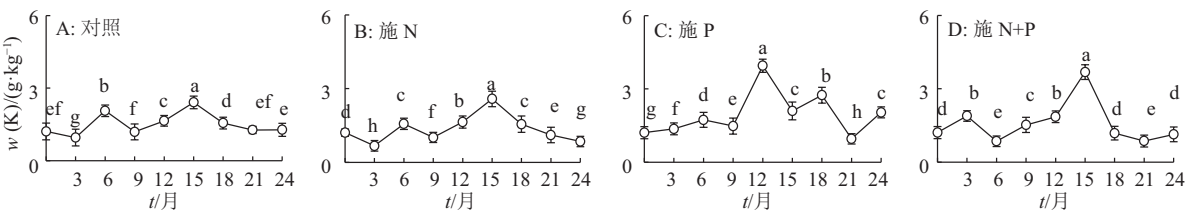
对照和施 N 的火力楠凋落叶 K 含量在前 3 个月小幅下降后波动性升降, 对照及施 N 和 N+P 的 K 含量在第 15 个月时最高, 施 P 的在第 12 个月时出现峰值 (图 4)。24 个月时, 施 P 处理的凋落叶 K 含量均显著大于初始凋落叶 K 含量, 也显著大于对照 ($P < 0.05$, 表 1), 施 N 处理的凋落叶 K 含量显著小于初始凋落叶 K 含量 ($P < 0.05$), 也显著小于对照 ($P < 0.05$, 表 1)。各处理的火力楠凋落叶 K 含量在整个分解过程中的变化较大。

降。24 个月时, 对照及施 N、P 和 N+P 的凋落叶 N 残留量分别为 59.12、47.52、27.15 和 37.29 mg, 分别为初始 N 质量的 63%、51%、29% 和 40% (图 5A), 并且对照显著大于其他处理 ($P < 0.05$, 表 1)。

2.3 凋落叶分解过程中 N、P、K 残留量的变化

对照及施 N 处理的凋落叶 P 残留量呈小幅波动性下降。施 P 及 N+P 处理的凋落叶 P 残留量呈大幅度波动后下降, 前者在 6~9 个月、后者在 3 和 12 个月时达到峰值。24 个月时, 对照及施 N、P 和 N+P 的凋落叶 P 残留量分别为 1.47、1.16、1.53 和 1.45 mg, 分别为初始 P 质量的 52%、41%、54% 和 51% (图 5B), 其中施 N 处理的显著小于对照 ($P < 0.05$, 表 1)。

4 种处理的凋落叶 N 残留量波动性下降, 施 P 处理的凋落叶在 15~18 个月时 N 残留量迅速下



各图曲线数据点上方凡是具有一个相同小写字母者, 表示处理后不同时间差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法)

图 4 火力楠林地凋落叶中的 K 含量变化

Fig. 4 Change in K content of leaf litters in the *Michelia macclurei* woodland

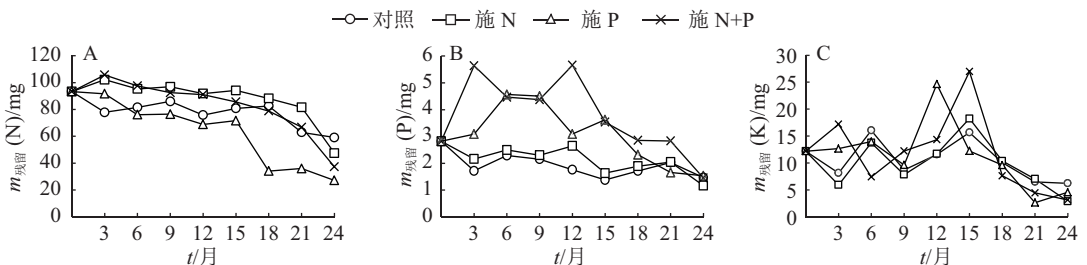


图 5 火力楠林地凋落叶的 N、P、K 残留量

Fig. 5 The amounts of remaining N, P and K in leaf litters in the *Michelia macclurei* woodland

火力楠凋落叶 K 残留量在整个分解过程中大幅升降, 24 个月时, 对照及施 N、P 和 N+P 的凋落叶 K 残留量分别为 6.24、2.90、4.59 和 3.15 mg, 分别为初始 K 质量的 51%、24%、38% 和 26% (图 5C), 并且对照显著大于其他处理 ($P < 0.05$, 表 1)。

3 讨论与结论

3.1 外源性 N、P 对凋落叶分解的影响

3.1.1 外源性 N 对凋落叶分解的影响 本研究中, 施加 N 肥促进了火力楠凋落叶的分解, 原因可能有: 1) 外源性 N 加快了可溶性有机物的淋失和易分解的碳水化合物的分解^[24]; 2) 外源性 N 提高了土壤酶的活性。N 沉降导致纤维素酶活性增强, 从而加速了易分解纤维素的分解^[25]; 3) 外源性 N 为土壤节肢动物创造了宜居空间, 增加了土壤动物个体数、类群数与功能群, 从而加速凋落物的分解^[26]; 4) 施 N 改变了凋落物周围土壤中微生物的群落组成^[27-28]并促进了微生物的活动; 5) N 沉降促进凋落叶分解的另一个可能原因是分解者群落组成向更加高效但对 N 有更高需求的方向转变^[29]; 6) 火力楠凋落叶 N 含量低、凋落叶基质 C/N 比高、耐分解化合物的含量多, 导致凋落叶分解缓慢^[30], 而向养分含量相对不足的火力楠凋落叶中添加 N, 可提高其初始化学质量^[31], 降低 C/N 比, 从而促进凋落叶分解, 这与李雪峰等^[32]发现凋落叶分解速率与凋落物起始 N 含量呈显著正相关的研究一致。

3.1.2 外源性 P 对凋落叶分解的影响 本研究中, 施 P 处理后, 火力楠林下纯凋落叶的分解速率显著加快, 原因可能是低 P 土壤比低 N 土壤对分解的限制作用更强^[33]。在缺乏土壤速效 P 的样地, 施 P 处理后水溶性 P 进入土壤, 经微生物的同化利用进入有机 P 库, 极显著地提高了火力楠林地土壤微生物的数量^[34], 促进凋落物分解。此外, Qualls 等^[35]发现, P 添加可以提高凋落物中的 P 含量, 加快 C 释放, 从而促进凋落物的分解。C/P 比及 P 含量已成为影响凋落物分解的重要指标^[36]。施 P 还显著提高了火力楠林地脲酶和磷酸酶活性^[34], 而土壤磷酸酶反过来又可矿化有机 P, 促进养分利用与循环。因此, 随着速生丰产人工林等的发展, 可在 P 缺乏的红壤林区施加 P 肥以促进火力楠人工林凋落物分解及养分循环。

3.1.3 外源性 N+P 对凋落叶分解的影响 N、P 养分的有效性是调节植物凋落物分解速率和生态系

统碳平衡的一个主要因素^[16]。本研究中, 施 N+P 处理后, 火力楠林下纯凋落叶的分解速率显著加快, 原因是外源性 N 和 P 的输入改变了凋落叶的化学成分, 提高 N、P 含量, 为分解者提供养分需要, 促进了微生物的繁殖, 从而加速凋落叶的分解^[37]。此外, 施 N+P 在一定程度上缓解了土地缺 P 状况, 使过量的无机 P 留在土壤中^[38], 还保持了植株 N/P 的平衡, 增加林木对 N 沉降的适应能力, 从而在低 P 和 N 沉降双重环境胁迫下获得较大生长增益^[39]。

3.2 分解过程中凋落物养分含量变化

凋落物质量、环境条件、分解者固定等因素影响着凋落物分解过程及养分释放动态^[40]。本研究中, 24 个月内在火力楠林地下各处理的凋落叶 N 含量通常显著大于其凋落叶初始 N 含量。可能由于在凋落物分解过程中, 凋落物中的 N 不能满足微生物的快速生长与大量繁殖, 微生物将固定一部分 N 至分解的凋落物中^[41], 且吸收率超过自身消耗率, 从而使 N 含量升高。此外, 长期使用 N 肥也可能导致土壤中 N 元素含量升高, 相应的也促进了植物对 N 元素吸收的增加, 从而导致凋落叶中 N 含量的增加。各处理的凋落叶 P 含量上升是由于凋落物质量的减少量小于 P 的流失量所致, 也和外源性 P 的输入有关。弓晓静等^[42]研究表明 P 肥的添加有利于提高 P 浓度, 降低 C/P 比, 并导致 P 的持续积累。P 含量的波动性升高主要是由于凋落物质量损失速度快于 P 释放速度。各处理的火力楠凋落叶 K 含量在整个分解过程中的变化较大。一部分凋落叶在处理 3 个月后 K 含量迅速下降, 可能是因为 K 容易从叶片组织中淋溶出来所致^[43], 其后的波动则可能是淋溶和微生物分解释放共同作用的结果。24 个月时, 对照的凋落叶 N 含量显著大于其他处理, 施 P 和 N+P 的凋落叶 P 含量明显大于对照, 施 P 的凋落叶 K 含量明显大于对照, 施 N 和 N+P 的显著小于对照, 反映了雨水淋溶和微生物作用的最终结果。

凋落叶的养分残留量受凋落叶残质量和凋落叶养分含量的影响。24 个月后 4 种处理的凋落叶 N、P 和 K 残留量均大幅下降, 说明凋落叶中的养分得到了不同程度的释放。施 P 和 N+P 处理的 P 残留量在 0~12 个月出现大幅波动现象, 原因是虽然凋落叶分解过程中释放 P, 凋落物中的微生物也可能固定周围环境中的 P, 凋落叶 P 的残留量呈现反复富集-释放的过程。施 P 和 N+P 处理的 K 残留量

的大幅波动是由凋落叶 K 含量的大幅波动引起的。李仁洪等^[44]研究慈竹 *Neosinocalamus affinis* 林凋落叶分解时也发现同样的规律。24 个月时 3 种施肥处理的凋落叶 N 及 K 养分残留量远远小于对照, 促进了凋落叶 N 和 K 的释放; 施 N 处理的凋落叶 P 残留量显著小于对照, 促进了凋落叶 P 的释放, 而其他 2 种施肥处理的凋落叶 P 残留量与对照相同, 说明其对凋落叶 P 的释放影响不大。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 仲米财, 王清奎, 高洪, 等. 中亚热带主要树种凋落叶在杉木人工林中分解及氮磷释放过程[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1653-1659.
- [4] 赵喆, 刘延文, 纪福利, 等. 华北落叶松-白桦凋落物混合分解研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(12): 74-78.
- [5] WANG G G, KLINKA K. White spruce foliar nutrient concentrations in relation to tree growth and soil nutrient amounts[J]. Forest Ecol Manag, 1997, 98(1): 89-99.
- [6] 遆超普, 颜晓元. 基于氮排放数据的中国大陆大气氮素湿沉降量估算[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1606-1611.
- [7] MATSON P, LOHSE K A, HALL S J. The globalization of nitrogen deposition: Consequences for terrestrial ecosystems[J]. AMBIO: A: J Human Environ, 2002, 31(2): 113-119.
- [8] 樊后保, 刘文飞, 徐雷, 等. 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[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2546-2553.
- [9] WISSUWA M. How do plants achieve tolerance to phosphorus deficiency? Small causes with big effects[J]. Plant Physiol, 2003, 133(4): 1947-1958.
- [10] 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[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 631-636.
- [11] 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.
- [12] 张毓涛, 李吉玫, 李翔, 等. 模拟氮沉降对天山云杉凋落叶分解及其养分释放的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(5): 966-973.
- [13] 毛宏蕊, 陈金玲, 金光泽. 氮添加对典型阔叶红松林凋落叶分解及养分释放的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, <http://xuebao.scau.edu.cn> 38(3): 21-31.
- [14] 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物基质质量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6587-6594.
- [15] 周世兴, 肖永翔, 向元彬, 等. 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[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7428-7435.
- [16] 葛晓改, 曾立雄, 肖文发, 等. 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[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 779-787.
- [17] 陈法霖, 郑华, 欧阳志云, 等. 土壤微生物群落结构对凋落物组成变化的响应[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 603-611.
- [18] 李艳红, 杨万勤, 罗承德, 等. 桉-栎不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 159-167.
- [19] 廖姝, 杨万勤, 彭艳, 等. 土壤动物对四川盆地四种树种凋落叶在不同物候时期可溶性碳和氮动态的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3172-3182.
- [20] 郝建, 莫慧华, 黄弼昌, 等. 西南桉和尾巨桉凋落叶分解及其与土壤性质的相关性[J]. 林业科学研究, 2016, 29(2): 202-208.
- [21] 金龙, 吴志祥, 杨川, 等. 不同环境下橡胶凋落叶分解的微生物研究[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(1): 73-79.
- [22] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3146-3154.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] BERG B, WESSÉN B, EKBOHM G. Nitrogen level and decomposition in Scots pine needle litter[J]. Oikos, 1982, 38(3): 291-296.
- [25] BOXMAN A W, BLANCK K, BRANDRUD T et al. Vegetation and soil biota response to experimentally-changed nitrogen inputs in coniferous forest ecosystems of the NITREX project[J]. Forest Ecol Manag, 1998, 101(1/2/3): 65-79.
- [26] 徐演鹏. 外源碳、氮对土壤节肢动物群落的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [27] VOŘÍŠKOVÁ J, DOBIÁŠOVÁ P, ŠNAJDR J, et al. Chemical composition of litter affects the growth and enzyme production by the saprotrophic basidiomycete *Hypopholoma fasciculare*[J]. Fungal Ecol, 2011, 4(6): 417-426.
- [28] AMEND A S, MATULICH K L, MARTNY J B H. Nitrogen addition, not initial phylogenetic diversity, increases litter decomposition by fungal communities[J]. Front Microbiol, 2015, 6: 109.

- [29] ÅGREN G I, BOSATTA E, MAGILL A H. Combining theory and experiment to understand effects of inorganic nitrogen on litter decomposition[J]. *Oecologia*, 2001, 128(1): 94-98.
- [30] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. *生态学报*, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [31] 陆晓辉, 丁贵杰, 陆德辉. 人工调控措施下马尾松凋落叶化学质量变化及与分解速率的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(7): 2325-2333.
- [32] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 245-251.
- [33] LI L J, ZENG D H, YU Z Y, et al. Impact of litter quality and soil nutrient availability on leaf decomposition rate in a semi-arid grassland of Northeast China[J]. *J Arid Environ*, 2011, 75(9): 787-792.
- [34] 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, 36(9): 104-108.
- [35] QUALLS R G, RICHARDSON C J. Phosphorus enrichment affects litter decomposition, immobilization, and soil microbial phosphorus in wetland mesocosms[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64(2): 799-808.
- [36] XU X N, HIRATA E. Decomposition patterns of leaf litter of seven common canopy species in a subtropical forest: N and P dynamics[J]. *Plant Soil*, 2005, 273(1/2): 279-289.
- [37] 朱仕明, 董喜光, 薛立, 等. 外源性氮和磷添加对藜蒴林土壤养分及生化特性的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2015, 42(3): 347-352.
- [38] 陈金林, 吴春林, 黄全能. 杉林红壤的供 P 缓冲性与 P 肥需要量研究[J]. *林业科学研究*, 2002, 15(5): 588-592.
- [39] 庞丽, 张一, 周志春, 等. 模拟氮沉降对低磷胁迫下马尾松生长和磷效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(5): 1275-1282.
- [40] WIEDER W R, CLEVELAND C C, TOWNSEND A R. Controls over leaf litter decomposition in wet tropical forests[J]. *Ecology*, 2009, 90(12): 3333-3341.
- [41] TU L H, HU H L, HU T X, et al. Decomposition of different litter fractions in a subtropical bamboo ecosystem as affected by experimental nitrogen deposition[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 685-695.
- [42] 弓晓静, 余明泉, 胡小飞, 等. 氮磷添加对红壤区域湿地松林凋落叶分解的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(12): 2327-2333.
- [43] PRESCOTT C E. Does nitrogen availability control rates of litter decomposition in forests? [J]. *Plant Soil*, 1995, 168(1): 83-88.
- [44] 李仁洪, 胡庭兴, 涂利华, 等. 华西雨屏区慈竹林凋落叶分解过程养分释放对模拟氮沉降的响应[J]. *林业科学*, 2010, 46(8): 8-14.

【责任编辑 李晓卉】