



郑欣颖, 蔡金桓, 薛立, 等. 外源性氮和磷对火力楠和马尾松混合凋落叶分解的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(6): 97-104.

外源性氮和磷对火力楠和马尾松混合凋落叶分解的影响

郑欣颖, 蔡金桓, 薛立, 余汉基
(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 N 和 P 对火力楠 *Michelia macclurei* 和马尾松 *Pinus massoniana* 凋落叶分解速率的影响, 以及分解过程中的 N、P、K 含量变化, 了解混合凋落叶分解对外源性 N 和 P 的响应机制, 为森林资源管理提供参考。【方法】将火力楠和马尾松混合凋落叶置于火力楠林地及马尾松林地, 分别设立 4 块 5 m×5 m 的小样方, 喷施 N、P 和 N+P, 比较其分解速率及分解过程中的 N、P、K 含量变化。【结果】在 2 种林地的不同处理下, 24 个月后, 火力楠林地混合凋落叶残留量为施 N(4.99 g)>对照 (4.14 g)>施 N+P(2.17 g)>施 P(1.16 g), 马尾松林地混合凋落叶残留量为施 N(2.72 g)>对照 (1.21 g)>施 N+P(0.36 g)>施 P(0.16 g), 施 N 对火力楠和马尾松林下的混合凋落叶的分解有抑制作用; 施 P 后两者的混合凋落叶的分解速率均不同程度地有所加快; 施 N+P 后两者的混合凋落叶的分解速率也均加快, 但慢于施 P 处理。马尾松林下混合凋落叶残留量均小于火力楠林下混合凋落叶残留量。分解 24 个月后, 火力楠林地施 N、P 和 N+P 的混合凋落叶 N 质量分数分别为 13.72、12.34 和 13.70 g·kg⁻¹, 而马尾松林地分别为 12.63、13.46 和 14.54 g·kg⁻¹, 均显著大于其凋落叶的初始 N 质量分数 (9.90 g·kg⁻¹); 施 P 和 N+P 处理的火力楠林地混合凋落叶 P 质量分数由初始的 0.38 g·kg⁻¹ 分别增至 0.86 和 0.74 g·kg⁻¹, 而马尾松林地混合凋落叶 P 质量分数由初始的 0.38 g·kg⁻¹ 分别增至 1.37 和 1.05 g·kg⁻¹。凋落叶 K 含量的变化无规律。【结论】火力楠和马尾松混交可促进火力楠凋落叶分解, 提高混合凋落叶的分解速率。

关键词: 火力楠; 马尾松; 混合凋落叶; 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(2017)06-0097-08

Effects of external N and P on decomposition of mixed leaf litters of *Michelia macclurei* and *Pinus massoniana* woodlands

ZHENG Xinying, CAI Jinhuan, XUE Li, SHE Hanji
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To investigate the effects of external nitrogen(N) and phosphorus(P) on decomposition rate of mixed leaf litters of *Michelia macclurei* and *Pinus massoniana* woodlands, and analyze changes in N,P and potassium(K) contents during deposition process, in order to understand the response mechanism of leaf litter decomposition to external N and P, and provide reference for forest resource management. 【Method】Mixed leaf litters of *M. macclurei* and *P. massoniana* were placed in woodlands of *M. macclurei* and *P. massoniana*. Four 5 m×5 m plots were set in each wood land and were sprayed with N, P or N+P. The decomposition rates and changes in N, P, K contents of leaf litters were compared. 【Result】Twenty-four months after treatments,

收稿日期: 2016-12-23 优先出版时间: 2017-11-06
优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20171106.1412.032.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-GDTK-07)

the amounts of leaf litter residue were N addition (4.99 g) > control (4.14 g) > N+P addition (2.17 g) > P addition (1.16 g) in *M. macclurei* woodland, and N addition (2.72 g) > control (1.21 g) > N+P addition (0.36 g) > P addition (0.16 g) in *P. massoniana* woodland. N addition inhibited decomposition of mixed leaf litters under *M. macclurei* and *P. massoniana* woodlands, whereas P and N+P additions both accelerated decomposition of mixed leaf litters with a faster decomposition rate compared to N+P addition. The amounts of leaf litter residue in *P. massoniana* woodland were less than those in *M. macclurei* woodland. Twenty-four months after treatments, N contents of mixed leaf litters treated with N, P and N+P additions were 13.72, 12.34 and 13.70 g·kg⁻¹ respectively in *M. macclurei* woodland, and 12.63, 13.46, and 14.54 g·kg⁻¹ respectively in *P. massoniana* woodland, Which were greater than the initial N content of mixed leaf litters (9.90 g·kg⁻¹). The P content of mixed leaf litters treated with P and N+P additions increased from the initial value of 0.38 to 0.86 and 0.74 g·kg⁻¹ respectively in *M. macclurei* woodland, and increased from 0.38 to 1.37 and 1.05 g·kg⁻¹ respectively in *P. massoniana* woodland. K contents of mixed leaf litters changed irregularly. 【Conclusion】 Decomposition of *M. macclurei* leaf litter can be accelerated and decomposition rate of mixed leaf litters can be enhanced by mixed-planting *M. macclurei* and *P. massoniana*.

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

森林凋落物是生态系统养分循环中的重要过程,对营养循环和森林生产力至关重要^[1]。凋落物分解具有调节土壤有机物组成的作用^[2],能促进森林生态系统的物质循环^[3-4],是释放矿质养分供植物生长的重要生态系统过程^[5]。早期的凋落物分解研究主要集中在纯林的凋落物分解方面。随着人们对森林生态效益的重视,大量的纯林被改造成混交林,地表的单一凋落物转变为混合凋落物。混合凋落物不仅会通过改变分解环境影响分解过程及异质凋落物间养分的互补,还会影响以凋落物为食物或栖息生境的土壤动物和微生物群落,最终影响到凋落物的分解速率和养分循环速率^[6]。

近几十年来,由于矿物燃料燃烧、氮肥使用、人口增长和畜牧业发展等原因,造成大气氮沉降^[7],影响土壤微生物和动物数量和种类^[8],进而对凋落物分解造成影响。尽管研究氮沉降对生态系统的影响已被广泛报道,但这些研究主要集中在温带地区,而在亚热带地区,磷是植物生长的限制因素,因此氮沉降对亚热带生态系统凋落物分解的影响可能不同于温带地区。在中国南方,酸性土壤严重缺磷,磷肥料通常应用于农业和林业生产,引起生态系统土壤 P 的富集。目前,许多学者对混合凋落物分解状况进行了研究^[6,9],但是少见外源性 N 对亚热带森林混合凋落物分解的报道^[10-11],鲜见外源性 P 及 N+P 对亚热带森林混合凋落物分解影响的报道。火力楠 *Michelia macclurei* 具有耐旱耐瘠、生长迅速、材质优良等特性,在园林绿化、家具制造等方面有

广泛应用,是高效的生态公益林树种^[12]。马尾松 *Pinus massoniana* 是我国南方著名的速生树种^[13],也是面积及蓄积量最大的针叶树种^[14-15],具有适应性强、耐干旱与瘠薄的特点,广泛用于荒山绿化。本试验将火力楠和马尾松混合凋落叶分别置于火力楠林及马尾松林下,进行 N、P、N+P 施肥试验,比较其分解速率及分解过程中的 N、P、K 含量变化,以期了解混合凋落物分解对外源性 N 和 P 的响应机制,为森林资源管理提供参考。

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°43'N),森林面积 1 928.73 hm²。试验地属于亚热带气候,年平均气温 22℃,无霜期 360 d。年降雨量平均 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,土地肥沃。

1.2 研究方法

1.2.1 试验材料及设计 2007 年 12 月开始在 14 年生的火力楠及马尾松林下用凋落物网分别收集新鲜凋落叶。试验林概况见表 1。凋落叶分解采用尼龙网袋(Litter bag)法,网袋规格为 20 cm×20 cm,网孔为 2 mm×2 mm。将火力楠和马尾松凋落叶各 5 g 放入尼龙网袋,分别放置在火力楠和马尾松林下。在以上 2 种林分分别设 4 个 5 m×5 m 的样方,每个小样方内分 4 个处理:不施肥的混合凋落叶(对照)、施 N 肥的混合凋落叶(施 N)、施 P 肥的混合凋落叶

表 1 试验林概况

Tab. 1 General characteristics of experimental stands

林分	坡向/ (°)	坡度/ (°)	平均 胸径/cm	郁闭度	平均 树高/m	冠幅/m	主要林下植被 ¹⁾
火力楠	SW20	35	13.1	0.85	10.8	6	山芝麻、黑面神、山苍子、粗叶榕、三叉苦、冬青、海金沙、五指毛桃、玉叶金花、梅叶冬青、漫山秀竹、乌毛蕨、羊角拗、铁线蕨
马尾松	SW25	23	12.4	0.80	8.4	4	半边旗、梅叶冬青、悬钩子、淡竹叶、乌毛蕨、鸭脚木、漫山秀竹、金毛狗、白花酸果藤、五指毛桃、铁线蕨、红椎、鬼灯笼

1) 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*、铁线蕨 *Adiantum capillum*、半边旗 *Pteris semipinnata*、悬钩子 *Rubus palmatus*、淡竹叶 *Lophatherum gracile*、鸭脚木 *Schefflera octophylla*、金毛狗 *Cibotium barometz*、白花酸果藤 *Embelia ribes*、红椎 *Castanopsis hystrix*、鬼灯笼 *Clerodendrum fortuneatum*。

(施 P) 以及施 N+P 肥的混合凋落叶 (施 N+P)。清除地被和地表凋落物层后, 将混合凋落叶分解袋置于样方地表的土壤上, 每处理中放置 8 个混合凋落叶分解袋。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。施用的 N 肥选用氯化铵 (NH_4Cl), P 肥选用二水合磷酸二氢钠 ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 每次施肥量: 施 N 为 NH_4Cl $10\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 施 P 为 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $5\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 施 N+P 为 NH_4Cl $10\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ + $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $5\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2008 年 4 月起, 每隔 3 个月取走一袋样地凋落叶, 取样后对样地分别进行施 N、施 P 和施 N+P 水溶液处理, 对照样方喷施等量的水, 以减少因外加的水对凋落叶造成的影响。网袋带回实验室, $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干 (约 24 h) 至恒质量, 计算凋落叶残留量。再把 4 袋相同的样品混合、粉碎, 用于测定凋落叶的 N、P、K 含量。

1.2.2 凋落叶化学性质测定 烘干的凋落叶样品经粉碎后, N 用重铬酸钾-浓硫酸消煮后以凯氏定 N 法测定。凋落叶样品用硫酸-双氧水消煮处理后, 其中的 P 用钼兰比色法、K 用火焰光度法^[16]测定。每个样品做 3 次重复测定, 取平均值。

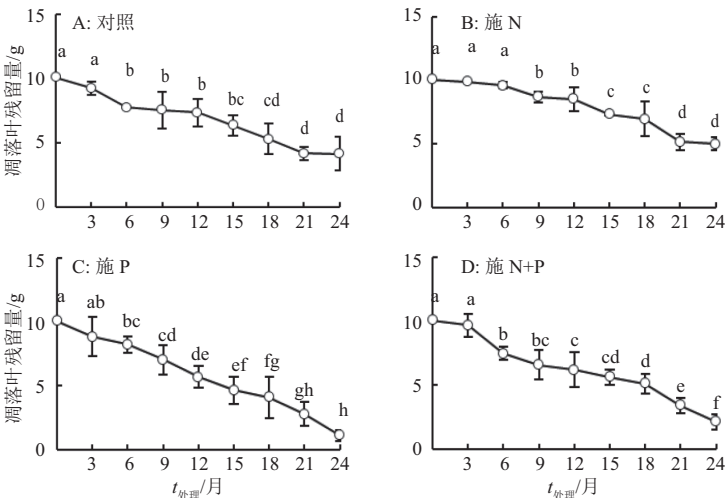
1.3 数据处理

用 Microsoft excel 2003 对凋落叶的残留量和养分变化作图表, 用 SAS8.2 对数据进行多重比较检验, 检验的显著性水平为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 各林地凋落叶的分解

2.1.1 火力楠林地凋落叶的分解 在火力楠林下, 不同处理的混合凋落叶的分解规律差异较大 (图 1)。在整个试验期, 对照的混合凋落叶分解较慢, 施



同一曲线数据点上方凡具有一个相同小写字母者, 表示不同处理时间之间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 1 火力楠林地凋落叶的残留量

Fig. 1 Amount of leaf litter residue in *Michelia macclurei* woodland

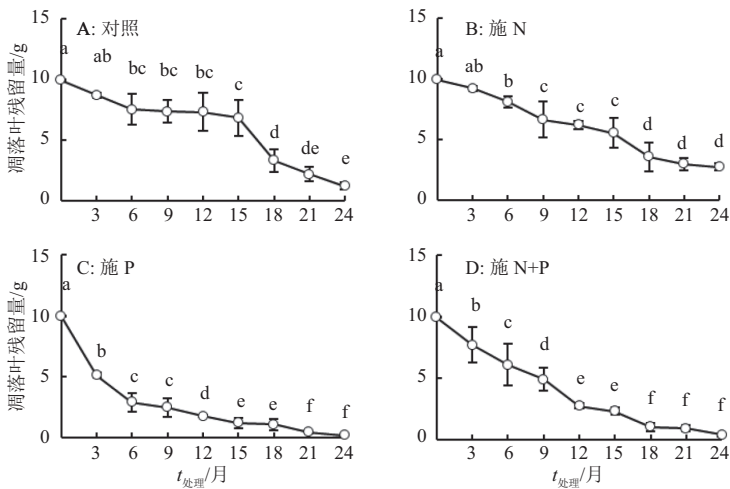
N 的混合凋落叶在 0~6 个月分解缓慢,施 P 的混合凋落叶分解迅速,施 N+P 的混合凋落叶在 3~9 个月和 18~24 个月期间分解较快,24 个月时对照、施 N、施 P 和施 N+P 的混合凋落叶分别分解了 56%、50%、89% 和 73%,凋落叶残留量为施 N(4.99 g)>对照 (4.14 g)>施 N+P(2.17 g)>施 P(1.16 g)。可见,施 N 阻碍了混合凋落叶的分解;施 P 和施 N+P 促进了混合凋落叶的分解。

2.1.2 马尾松林地凋落叶的分解 在马尾松林下,不同处理的分解高峰各异(图 2)。对照的混合凋落叶在 15~24 个月分解了 56%,施 N 的混合凋落叶无明显分解高峰,施 P 的混合凋落叶在 0~6 个月分解了 71%,施 N+P 的混合凋落叶在 0~12 个月分解了 73%。24 个月后,凋落叶残留量为施 N(2.95 g)>对

照 (1.21 g)>施 N+P(0.36 g)>施 P(0.16 g)。可见,施 N 阻碍了马尾松林下混合凋落叶的分解,施 P 和 N+P 促进了马尾松林下混合凋落叶的分解。

2.1.3 不同林地相同处理混合凋落叶分解的比较

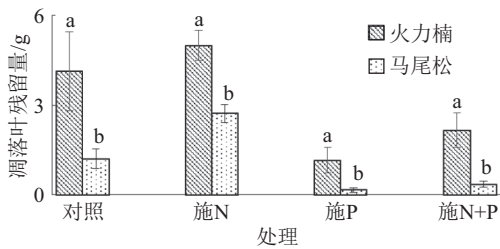
24 个月后,2 种林地同一处理间混合凋落叶的残留量见图 3。火力楠和马尾松林地的对照混合凋落叶残留量分别为 4.14 和 1.21 g,施 N 的混合凋落叶残留量分别为 4.99 和 2.72 g,施 P 的混合凋落叶残留量分别为 1.16 和 0.16 g,施 N+P 处理的混合凋落叶残留量分别为 2.17 和 0.36 g。可见,火力楠林下的混合凋落叶残留量均显著大于马尾松林下同一处理的混合凋落叶残留量 ($P<0.05$)。总体而言,火力楠林下的凋落叶分解较慢,马尾松林下的凋落叶分解较快。



同一曲线数据点上方凡具有一个相同小写字母者,表示不同处理时间之间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 2 马尾松林地凋落叶的残留质量

Fig. 2 Amount of leaf litter residue in *Pinus massoniana* woodland



同一处理的柱子上方凡具有一个相同字母者,表示林分间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 3 2 种林地各处理的混合凋落叶残留量比较

Fig. 3 Comparison of amounts of mixed leaf litter residues in two woodlands with different treatments

2.2 混合凋落叶分解过程中 N、P、K 含量的变化

2.2.1 火力楠、马尾松林地混合凋落叶中 N 含量变化

由表 2 可知,在火力楠林地,对照、施 N 和施 N+P 的火力楠+马尾松混合凋落叶 N 含量小幅波动,施 P 的呈现升-降-升变化,24 个月后对照、施

N、施 P 和施 N+P 处理的凋落叶 N 质量分数分别为 12.08、13.72、12.34 和 13.70 $g \cdot kg^{-1}$,均显著大于凋落叶 N 质量分数的初始值 (9.90 $g \cdot kg^{-1}$, $P<0.05$)。

由表 2 可知,在马尾松林地,对照、施 N 的混合凋落叶 N 含量小幅波动,施 P 和施 N+P 的呈现反复升降变化。24 个月后对照、施 N、施 P 和施 N+P 处理的凋落叶 N 质量分数分别为 11.68、12.63、13.46 和 14.54 $g \cdot kg^{-1}$,均显著大于凋落叶 N 质量分数的初始值 (9.90 $g \cdot kg^{-1}$, $P<0.05$)。

2.2.2 火力楠、马尾松林地混合凋落叶中 P 含量变化

由表 2 可知,在火力楠林地,对照和施 N 的混合凋落叶 P 含量小幅波动,施 P 和施 N+P 的混合凋落叶 P 含量呈波动性上升,24 个月后,对照、施 N、施 P 和施 N+P 处理的凋落叶 P 质量分数分别为 0.39、0.40、0.86 和 0.74 $g \cdot kg^{-1}$,除对照外,其余均比试验开始时 (0.38 $g \cdot kg^{-1}$) 显著增加 ($P<0.05$)。

表 2 火力楠与马尾松林地凋落叶中的 N、P、K 含量变化¹⁾
Tab. 2 Changes in N, P and K contents of mixed leaf litters in *Michelia macclurei* and *Pinus massoniana* woodlands

凋落叶 养分	林地	处理	0个月	3个月	6个月	9个月	12个月	15个月	18个月	21个月	24个月
N	火力楠	对照	9.90±0.00e	12.72±0.14a	11.21±0.14d	12.54±0.19a	11.82±0.09c	11.23±0.13d	12.76±0.19a	2.76±0.06a	12.08±0.05b
		施N	9.90±0.00f	12.36±0.09cd	12.16±0.14d	12.56±0.28c	13.14±0.19b	12.43±0.12c	11.69±0.02e	13.21±0.02b	13.72±0.13a
		施P	9.90±0.00g	11.23±0.08d	12.51±0.06c	13.88±0.06a	10.21±0.34f	10.62±0.28e	12.41±0.20c	13.25±0.07b	12.34±0.08c
	马尾松	施N+P	9.90±0.00d	12.03±0.09d	11.07±0.16e	13.04±0.07b	13.26±0.07b	12.47±0.25c	12.67±0.25c	12.55±0.18c	13.70±0.18a
		对照	9.90±0.00g	10.60±0.16f	11.97±0.10b	9.80±0.05g	11.34±0.04d	10.56±0.15f	12.78±0.03a	11.14±0.06e	11.68±0.07c
		施N	9.90±0.00h	12.45±0.25cd	10.75±0.20g	12.35±0.13d	12.08±0.16e	14.33±0.16a	11.75±0.03f	12.72±0.08b	12.63±0.06bc
P	火力楠	施P	9.90±0.00e	8.80±0.04f	7.73±0.03g	11.70±0.07c	10.78±0.21d	10.98±0.14d	13.47±0.19b	14.28±0.13a	13.46±0.07b
		施N+P	9.90±0.00g	10.66±0.25e	9.02±0.02h	10.27±0.14f	11.38±0.04d	9.11±0.08h	13.30±0.05c	13.56±0.16b	14.54±0.16a
		对照	0.38±0.00c	0.38±0.01c	0.39±0.01c	0.38±0.00c	0.32±0.01d	0.38±0.00c	0.40±0.00b	0.42±0.01a	0.39±0.01c
	马尾松	施N	0.38±0.00b	0.36±0.01c	0.38±0.00b	0.38±0.01b	0.36±0.01c	0.33±0.01d	0.37±0.00b	0.38±0.00b	0.40±0.00a
		施P	0.38±0.00h	0.56±0.02e	0.49±0.01g	0.66±0.00c	0.54±0.01f	0.60±0.01d	0.66±0.01c	0.74±0.01b	0.86±0.01a
		施N+P	0.38±0.00g	0.54±0.00e	0.46±0.00f	0.64±0.01b	0.75±0.00a	0.62±0.01c	0.47±0.00f	0.58±0.01d	0.74±0.01a
K	火力楠	对照	0.38±0.00d	0.36±0.01e	0.46±0.01b	0.42±0.01c	0.42±0.00c	0.38±0.00d	0.47±0.01b	0.41±0.01c	0.58±0.00a
		施N	0.38±0.00e	0.40±0.01d	0.40±0.00d	0.44±0.00b	0.42±0.00c	0.45±0.01a	0.43±0.01bc	0.42±0.00c	0.43±0.01bc
		施P	0.38±0.00i	0.42±0.01h	0.64±0.01f	0.90±0.00c	0.70±0.01e	0.61±0.01g	0.77±0.00d	1.08±0.03b	1.37±0.02a
	马尾松	施N+P	0.38±0.00g	0.51±0.01f	0.68±0.00e	0.69±0.01e	0.76±0.00d	0.86±0.00c	0.99±0.00b	0.86±0.02c	1.05±0.02a
		对照	1.02±0.00g	0.76±0.02h	1.66±0.03b	1.50±0.01c	3.42±0.05a	1.31±0.01d	1.71±0.07b	1.16±0.04f	1.23±0.02e
		施N	1.02±0.00de	0.67±0.03g	1.41±0.01c	2.57±0.12a	1.33±0.05c	1.05±0.06d	1.64±0.03b	0.86±0.02f	0.94±0.02ef
	火力楠	施P	1.02±0.00g	1.26±0.02f	1.88±0.01d	1.35±0.01e	4.50±0.02a	2.43±0.08b	2.04±0.03c	1.26±0.02f	1.92±0.02d
		施N+P	1.02±0.00g	1.44±0.04f	3.55±0.09a	1.53±0.02e	1.71±0.02d	1.91±0.02b	1.81±0.06c	1.90±0.03b	1.88±0.04b
	马尾松	对照	1.02±0.00g	1.06±0.02g	2.04±0.01e	3.01±0.09b	1.90±0.03f	4.18±0.05a	2.80±0.08c	2.00±0.02e	2.46±0.03d
		施N	1.02±0.00g	1.16±0.03f	2.49±0.04b	2.07±0.08d	4.76±0.10a	2.06±0.03d	2.57±0.02b	1.68±0.02e	2.22±0.04c
		施P	1.02±0.00g	1.95±0.02d	3.42±0.02b	2.42±0.08c	5.65±0.09a	1.68±0.02e	2.39±0.05c	1.60±0.02f	1.74±0.01e
		施N+P	1.02±0.00h	1.34±0.02g	3.18±0.02c	6.27±0.09a	2.29±0.02e	4.35±0.14b	1.57±0.01f	2.68±0.02d	1.50±0.02f

1)表中数据为平均值±标准差;同行数据后凡有一个相同小写字母者,表示处理时间之间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)。

由表 2 可知,在马尾松林地,对照的混合凋落叶 P 含量在小幅波动中上升,施 N 的混合凋落叶 P 含量小幅变化,施 P 和 N+P 的混合凋落叶 P 含量在大幅波动中上升,24 个月后对照、施 N、施 P 和施 N+P 处理的 P 质量分数分别为 0.58、0.43、1.37 和 1.05 g·kg⁻¹,均比试验开始时 (0.38 g·kg⁻¹) 显著增加 ($P<0.05$)。

2.2.3 火力楠、马尾松林地混合凋落叶中 K 含量变化 由表 2 可知,在火力楠林地,4 种处理的混合凋落叶 K 含量波动较大,对照和施 P 处理的混合凋落叶 K 含量在第 12 个月达到高峰,而施 N 和施 N+P 处理的混合凋落叶 K 含量分别在第 9 和第 6 个月达到高峰,24 个月后对照、施 N、施 P 和施 N+P 处理的混合凋落叶 K 质量分数分别为 1.23、0.94、1.92 和 1.88 g·kg⁻¹,均显著大于初始值 (1.02 g·kg⁻¹, $P<0.05$)。

由表 2 可知,在马尾松林地,对照、施 N、施 P 和施 N+P 处理的混合凋落叶 K 含量呈波动性升降,24 个月后混合凋落叶 K 质量分数分别为 2.46、2.22、1.74 和 1.50 g·kg⁻¹,均显著大于初始值 (1.02 g·kg⁻¹, $P<0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 外源 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 对 2 种林地的混合凋落叶施 N 处理后,火力楠及马尾松林下的混合凋落叶分解量均小于对照,总体来看,外源性 N 阻碍了凋落叶的分解。这些凋落物分解受抑制的机理可能包括增加的 N 与酚类物质形成复合物使凋落叶分解迟缓。施 N 后的 N 化合物被结合进入醌类等的共价键中,形成一些高度聚合的化合物^[17],变成难分解的腐殖化合物。另外,外源性 N 可以抑制微生物群的活性^[18-19]。凋落物早期分解中,C 源损失过快,减少了微生物活动 C 的有效性,而残留的木质素降解慢。这也与 Allison 等^[20]的研究结果一致。

3.1.2 外源性 P 对凋落叶分解的影响 施 P 处理后,2 种林地各处理的混合凋落叶的分解均显著加快,可能与这 2 种林地土壤微生物和酶活性显著大于对照有关^[21-22]。施 P 处理凋落叶分解最快的原因可能是样地的土壤速效 P 含量低,P 的缺乏制约了微生物和酶的活性,细菌生长非常缓慢^[23]。P 的添加显著增加了微生物数量,从而促进了凋落叶的分

解,Liu 等^[18]在鼎湖山森林 3 年的施 P 试验表明,施 P 增加了亚热带老龄森林中土壤微生物 (细菌和真菌) 的量,并增加了土壤的真菌与细菌的比。Rier 等^[24]的研究表明,P 添加显著提高河流生态系统中酚氧化酶含量,Qualls 等^[25]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。因此,在 N 沉降加剧亚热带成熟林土壤 P 限制的背景下,可以考虑施加 P 肥作为森林管理的一种方式缓解这种限制作用^[26],通过 P 添加改变微生物生物量与组成,增加土壤有机质和凋落物分解^[27]。

3.1.3 外源性 N+P 对凋落叶分解的影响 2 种林地的混合凋落叶施 N+P 后,凋落叶的分解速度均加快,加快的效果介于施 P 和施 N 之间,凋落叶分解速度在施 N 处理后减慢,施 P 处理后加快,说明施 N+P 处理后,P 元素起主导作用。Jacobson 等^[28]研究巴西热带草原时发现,无论单独或混合添加 P 都促进了凋落物分解,而 N 添加只增加初始凋落物 N 浓度,与 P 一起添加时才提高分解率,土壤 N/P 比会影响植物生产力与组成,同时会影响土壤微生物的组成与活性^[29-30]。因此,根据凋落叶分解变化,可考虑在这些地区施用适当的 P 肥以维持土壤 N/P 平衡,促进凋落叶分解。

3.1.4 不同林分的凋落叶分解速率 24 个月后,4 种处理的混合凋落叶残留量均为火力楠林>马尾松林,马尾松林下混合凋落叶的分解速率大于火力楠林,表明火力楠林下难分解的火力楠凋落层阻碍了混合凋落叶的分解。火力楠的厚革质叶片具有较好的抗物理损伤能力,叶片表皮细胞还有一层角质层^[31],对真菌菌丝的入侵也起到一定的阻滞作用^[32],导致其林下混合凋落叶分解速率缓慢。马尾松林下,各处理的混合凋落叶分解较快,马尾松凋落叶为非革质,分解速率比火力楠凋落叶快^[21],所以马尾松林下调落层的混合凋落叶分解较快。

3.2 分解过程中凋落叶养分含量变化

24 个月后,在火力楠林地和马尾松林地施 N 处理的混合凋落叶 N 含量通常显著大于其凋落叶初始 N 含量,微生物生物量可能是这些凋落叶 N 含量上升的主要原因。施 P 和施 N+P 处理的凋落叶 P 含量通常显著大于凋落叶初始 P 含量,且 2 种林下的混合凋落叶的 P 含量在分解过程中总体呈现上升的趋势。凋落叶 P 含量增加,一方面是由于凋落物质量的减少所致,另一方面可能是外源性

P 的输入所致。各处理的 K 含量也显著大于初始凋落叶 K 含量。一部分凋落叶在处理 3 个月后 K 含量迅速下降, 这可能是因为 K 从叶片组织中淋溶所致^[33], 与 K 的本身性质有关, 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。

总体而言, 在全球大环境下应重视通过科学育林措施, 改善土壤 P 养分状况, 重视氮排放量, 利用针阔混交林代替针叶纯林, 原因是针阔混交林在保持土壤养分、增加土壤肥力方面的作用高于纯林, 可进一步促进凋落物分解和养分归还效率。这不仅缓解 P 匮乏对林木生长的限制, 还将利于保持植株 N/P 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^[34]。

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] JIANG Y F, YIN X Q, WANG F B. The influence of litter mixing on decomposition and soil fauna assemblages in a *Pinus koraiensis* mixed broadleaved forest of the Changbai Mountains, China[J]. Eur J Soil Biol, 2013, 55(1): 28-39.

[3] XU X N, HIRATA E, ENOKI T, et al. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical forest after typhoon disturbance[J]. Plant Ecol, 2004, 173(2): 161-170.

[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 Ecol Manag, 2008, 255(3/4): 1210-1218.

[5] SCHLESINGER W H, BERNHARDT E S. Biogeochemistry: An analysis of global change: Vol.54 [M]. New York: Academic Press, 1991: 353-423.

[6] 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): 4977-4987.

[7] LIMPENS J, BERENDSE F. How litter quality affects mass loss and N loss from decomposing sphagnum[J]. Oikos, 2003, 103(3): 537-547.

[8] 徐国良, 莫江明, SANDRA B, 等. 土壤动物对模拟 N 沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2245-2251.

[9] 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, 24(1): 35-42.

[10] 王家骏, 程煜, 杨玉盛, 等. 米楮叶凋落物分解及养分释放对模拟 N 沉降的响应[J]. 福建林学院学报, 2014, 34(2): 113-119.

[11] 张驰, 张林, 李鹏, 等. 亚热带常绿阔叶林凋落物生产及季节动态对模拟氮沉降增加的响应[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1205-1210.

[12] 滕秋梅, 何斌, 梁添富, 等. 桂东南火力楠人工林生态系统碳储量及其分布格局[J]. 农业研究与应用, 2016(4): 7-11.

[13] XUE L, HAGIHARA A. Growth analysis on the competition-density effect in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) and Masson pine (*Pinus massoniana*) stands[J]. Forest Ecol Manag, 2001, 150(3): 331-337.

[14] XUE L, LI Q J, CHEN H Y. Effects of a wildfire on selected physical, chemical and biochemical soil properties in a *Pinus massoniana* forest in South China[J]. Forests, 2014, 5(12): 2947-2966.

[15] XUE L, LIE G W, LU G C, et al. Allometric scaling among tree components in *Pinus massoniana* stands with different sites[J]. Ecol Res, 2013, 28(2): 327-333.

[16] 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.

[17] AXELSSON G, BERG B. Fixation of ammonia (15N) to *Pinus silvestris* needle litter in different stages of decomposition[J]. Scand J Forest Res, 1988, 3(1/2/3/4): 273-279.

[18] 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 Biol Biochem, 2012, 44(1): 31-38.

[19] LI J, LI Z A, WANG F M, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community in a secondary tropical forest of China[J]. Biol Fert Soils, 2015, 51(2): 207-215.

[20] ALLISON S D, HANSON C A, TRESEDER K K. Nitrogen fertilization reduces diversity and alters community structure of active fungi in boreal ecosystems[J]. Soil Biol Biochem, 2007, 39(8): 1878-1887.

[21] 曾锋. 外源性氮和磷对 6 种人工林凋落叶分解及土壤特性的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2011.

[22] 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.

[23] GILLOOLY J F, ALLEN A P, WEST G B, et al. The rate

of DNA evolution: Effects of body size and temperature on the molecular clock[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2005, 102(1): 140-145.

[24] RIER S T, SHIRVINSKI J M, KINEK K C. *In situ* light and phosphorus manipulations reveal potential role of biofilm algae in enhancing enzyme-mediated decomposition of organic matter in streams[J]. Freshwater Biol, 2014, 59(5): 1039-1051.

[25] 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.

[26] 郑棉海, 黄娟, 陈浩, 等. 氮、磷添加对不同林型土壤磷酸酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6703-6710.

[27] ZHAO Y J, LIU B, ZHANG W G, et al. Effects of plant and influent C : N : P ratio on microbial diversity in pilot-scale constructed wetlands[J]. Ecol Eng, 2010, 36(4): 441-449.

[28] JACOBSON T K, BUSTAMANTE M M , 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]. Environ Pollut, 2011, 159(10): 2236-2242.

[29] MULDER C, ELSER J J. Soil acidity, ecological stoichiometry and allometric scaling in grassland food webs[J]. Global Change Biol, 2009, 15(11): 2730-2738.

[30] 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 Biol Biochem, 2010, 42(3): 445-450.

[31] 包淑云, 周守标, 喻永红. 含笑属叶片的比较解剖学研究[J]. 广西植物, 2002, 22(2): 140-144.

[32] GALLARDO A, MERINO J. Leaf decomposition in two Mediterranean ecosystems of Southwest Spain: Influence of substrate quality[J]. Ecology, 1993, 74(1): 152-161.

[33] PRESCOTT C E, KABZEMS R, ZABEK L M. Effects of fertilization on decomposition rate of *Populus tremuloides* foliar litter in a boreal forest[J]. Can J Forest Res, 1999, 29(3): 393-397.

[34] 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.

【责任编辑 李晓卉】