

外源性氮和磷对尾叶桉凋落叶分解的影响

余汉基, 郑欣颖, 薛立*, 蔡金桓

(华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642)

摘要: 通过研究外源性氮和磷对尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*) 凋落叶分解速率、分解过程中 N、P 含量变化的影响, 为森林养分管理提供科学依据。采用尼龙网袋分解法, 在广东的尾叶桉林内建立 4 块 5 m × 5 m 的小样地, 放置凋落叶样品, 测定其分解速率和 N、P 含量变化。结果表明, 外源性 N 在试验前期分解速率有促进作用, 后期阻碍了凋落叶分解。24 个月时对照、施 N、P 和 N+P 的凋落叶残留量分别为初始重量的 0.23%、1.59%、0.19% 和 0.49%。凋落叶分解 24 个月时尾叶桉林地各处理的凋落叶 N、P 含量均大于初始值, 对照、施 N、P 和 N+P 的凋落叶 N 的残留量分别为初始 N 重量的 0.54%、2.41%、0.35% 和 0.81%, 凋落叶 P 的残留量分别为初始 P 重量的 0.48%、1.74%、0.56% 和 1.52%, 表明 4 种处理的凋落叶 N 和 P 均为释放模式。施 N 抑制尾叶桉凋落叶的分解, 而施 P 及 N+P 促进其凋落物的分解, 表明施用 P 肥可以促进尾叶桉凋落叶的分解和养分循环。

关键词: 尾叶桉; 分解; 凋落叶; 外源性 N 和 P; 养分释放

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)03-0409-06

Effects of N and P additions on decomposition of leaf litter in a *Eucalyptus urophylla* stand

SHE Hanji, ZHENG Xinying, XUE Li, CAI Jinhuan

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

Abstract: The effects of external nitrogen and phosphorus on leaf litter decomposition in a *Eucalyptus urophylla* woodland were studied for providing a scientific basis for *E. urophylla* nutrient management. The study was conducted over 2 years using the litterbag technique in Yongyun Forest Farm, Guangdong Province, China. Four small sample plots (5 m × 5 m) were established in the investigated stand. Within each of the sample plots, leaf litters were placed and their decomposition rates and N, P and K contents were analyzed. The results showed that addition of N improved litter decomposition in the early stage and impeded litter decomposition in the late stage of the experiment. After twenty-four months of decomposition, the remaining weight of leaf litter was 0.23%, 1.59%, 0.19% and 0.49% of the initial weight of leaf litter in CK, N addition, P addition and N+P addition treatments, respectively. After twenty-four months of decomposition, the N and P contents in leaf litter were greater than their initial values, and the remaining N weight of leaf litter was 0.54%, 2.41%, 0.35% and 0.81% of the initial N weight in four treatments, respectively. The remaining P weight of leaf litter was 0.48%, 1.74%, 0.56% and 1.52% of the initial P weight in CK, N addition, P addition and N+P addition treatments, respectively, indicating that N and P release patterns exist in decomposing leaf litter. In a word, N addition delays decomposition of leaf litter, whereas addition of P or N+P accelerates its decomposition; therefore application of P fertilization can improve litter decomposition and nutrient cycling.

Key words: *Eucalyptus urophylla*; decomposition; leaf litter; N and P additions; nutrient release

森林是陆地生态系统的主体, 在全球碳循环中起着极其重要的作用。凋落物是森林生态系统内维持土壤养分的重要物质来源^[1], 凋落物分解具有调

节土壤有机物组成的作用^[2], 是森林土壤有机质、速效氮和磷的主要补给者, 释放矿质养分供植物生长的重要生态过程^[3], 体现了森林生态系统内部的

收稿日期: 2016-12-07

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)资助。

作者简介: 余汉基, 硕士研究生。E-mail: shehanji@163.com

* 通信作者: 薛立, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: forxue@scau.edu.cn

物质循环和能量转化的过程^[4-5],直接影响着陆地碳储量和大气二氧化碳浓度^[6]。

20世纪中叶以来,由于矿物燃料燃烧、含氮肥料的大量生产和使用以及畜牧业发展等原因,大气氮沉降迅速增加^[7-8]。据预测,全球氮沉降速率到2050年将加倍,并有相当一部分地区超过 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[9]。目前我国已经成为欧洲、北美之后的第3大氮沉降区,由此引起土壤酸化、土壤微环境和土壤养分有效性改变等一系列生态问题^[10],也影响着凋落物的分解过程^[11-12]。

磷通常控制着陆地生态系统的关键生态过程,是植物生长的重要限制因子^[13]。然而,外源性P影响凋落物分解的研究非常薄弱。伴随城市化的进程,动物粪便、汽车尾气、大气沉降和垃圾固体废物等不断地把P输入到城市及其郊区的森林中,导致城市及其周边地区森林土壤P含量的积累^[14]。大多数森林生态系统外源P的输入有限,在P缺乏的红壤林区随着在人工速生丰产林中广泛使用P肥,引起生态系统的土壤P富集^[15-17]。通常温带森林易受N的限制,而热带与亚热带森林易受P的限制^[16]。随着氮沉降的持续增加,磷限制性会逐渐增强。

国内外学者进行了大量N沉降影响凋落物研究后,认为N沉降有促进、延缓^[18]和不影响凋落物分解^[19]3种情况。Vivanco和Austin^[20]施N肥于假山毛榉属(*Nothofagus*)凋落物及Jacobson等^[21]添加氮肥于热带草原凋落物后,提高了分解速率,而Hobbie^[22]发现,N添加降低了草原、针叶林和橡树林凋落物分解率。Mo等^[23]发现添加N后的鼎湖山季风常绿阔叶林的凋落物分解速率变化不大。磷沉降影响凋落物分解研究非常罕见^[24]。有学者发现外源性P和同时添加N和P肥^[25]促进了凋落物分解。

尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)具有速生、丰产和用途广等优点,是我国华南地区广泛种植的主要速生造林树种之一,大量用于短轮伐期人工林生产纸浆材。以往有学者研究了尾叶桉凋落物分解^[26],但尚未见到关于外源性氮和磷对尾叶桉凋落物分解影响的报道。本研究以广东省云勇林场尾叶桉林下的凋落物为试验材料,采用尼龙网袋分解法,模拟氮和磷沉降对其分解的影响,对于准确地评估尾叶桉林生态系统的碳平衡和氮磷管理具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云勇林场(22°43'N, 112°40'E)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 $1\,928.73 \text{ hm}^2$ 。试验地属于亚热带气候,气候温和,年平均气温、最高气温和最低气温分别为 22°C 、 34.5°C 和 3.5°C ,无霜期长达360 d,受季风影响。雨量充沛,年降雨量平均 $2\,000 \text{ mm}$,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($\text{pH} < 5$),土层深厚而肥沃。尾叶桉林郁闭度为0.75,林下主要植物有阴香(*Cinnamomum burmannii*)、格木(*Erythrophloeum fordii*)、九节(*Psychotria rubra*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)、车轮梅(*Raphiolepis indica*)、五指毛桃(*Ficus simplicissima*)、梅叶冬青(*Ilex asprella*)、银柴(*Aporosa chinensis*)、蔓生莠竹(*Microstegium vagans*)、山芝麻(*Heliicteres angustifolia*)、蒲桃(*Syzygium jambos*)、鬼灯笼(*Ierodrndrum fortunatum*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、潺槁树(*Litsea glutinosa*)、玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)、黑面神(*Breynia fruticosa*)、悬钩子(*Rubus palmatus*)、三叉苦(*Evodia leptota*)、火炭母(*Polygonum chinense*)、海金沙(*Lygodium japonicum*)、铁线蕨(*Adiantum capillus*)和半边旗(*Pteris semipinnata*)。

1.2 试验设计

2007年12月开始在尾叶桉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(litter bag)法,网袋大小为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,网孔 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,每袋装入烘干的 10 g 凋落叶。在2008年4月在14年生尾叶桉林设4个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的样方(4个重复),每个小样方内分4个处理:不施肥的纯凋落叶(纯对)、施N肥的纯凋落叶(纯N)、施P肥的纯凋落叶(纯P)、施N+P肥的纯凋落叶(纯N+P),清除地表凋落物层后,每处理中放置8个含有尾叶桉凋落叶的网袋于样方地表。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($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),施肥量为 $\text{N } 10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, $\text{P } 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, $\text{N } 10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} + \text{P } 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[26]。具体操作如下:将各处理所需的肥料溶解至1 L的水,用喷雾器均匀喷洒在网袋表面,CK则喷洒相同体积的水。

1.3 样品分析

2008年4月起,每个样方隔3个月取走一袋样地凋落叶,取样后用N和P水溶液喷洒样地。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),将凋落叶放在烘箱中以 75°C 的状态下烘24 h后取出称

重^[4-5], 将相同处理的凋落叶混合取样后粉碎, 并进行养分分析。N 用重铬酸钾-浓硫酸消煮后以凯氏定 N 法测定。样品用硫酸-双氧水消煮处理后, 试液中 P 用钼兰比色法、K 用火焰光度法^[27]。每个样品进行 3 次重复测定, 结果取重复测定的算数平均值。

1.4 数据处理

用微软公司的 Microsoft Excel 2003 对凋落叶的重量变化、养分指标进行处理并作图, 用 SAS 8.2 对数据进行多重比较。

2 结果与分析

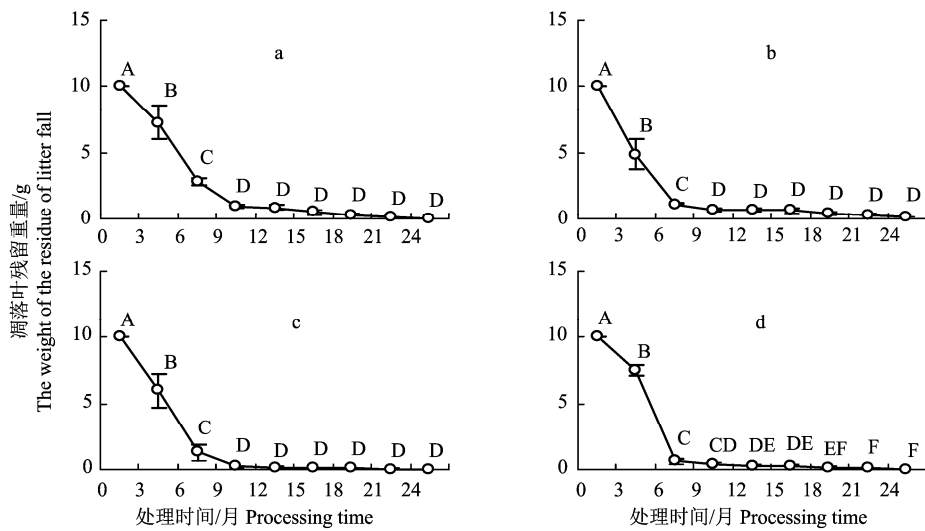
2.1 凋落叶的分解

不同处理的尾叶桉凋落叶分解过程具有明显的阶段性, 凋落叶残留量在前 6 个月迅速减少后缓慢

下降。分解 6 个月后, 对照、施 N、施 P 和施 N+P 的凋落叶分别分解了 72%、89%、87%和 93%, 24 个月后残留量 (g) 的顺序为施 N (0.16) > 施 N+P (0.05) > 对照 (0.02)、施 P (0.02) (图 1)。试验早期, 分解较为迅速, 施 N、P 和 N+P 处理促进了凋落叶的分解。后期因为凋落物残重减少, 分解速率下降, 施 N 处理后效果与对照差异不大, 施 P 和 N+P 处理促进了凋落叶的分解。

2.2 凋落叶分解过程中 N、P 含量的变化

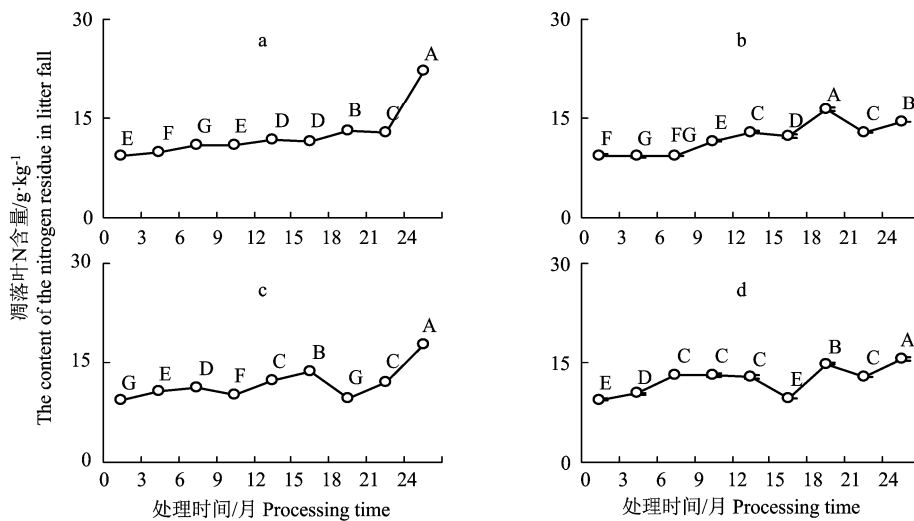
在凋落叶分解过程中, 尾叶桉林地对照的凋落叶 N 含量随分解时间持续上升, 并在 21~24 个月急剧增加 (图 2)。施 N 的 N 含量前 6 个月呈现相对稳定后逐渐上升, 并在 18 个月达到最大值后下降再上升。施 P 的 N 含量随分解时间呈现波动上升,



a. 对照, Control group; b. 施 N, N addition; c. 施 P, P addition; d. 施 N+P, N+P addition

图 1 尾叶桉林地凋落叶的残重

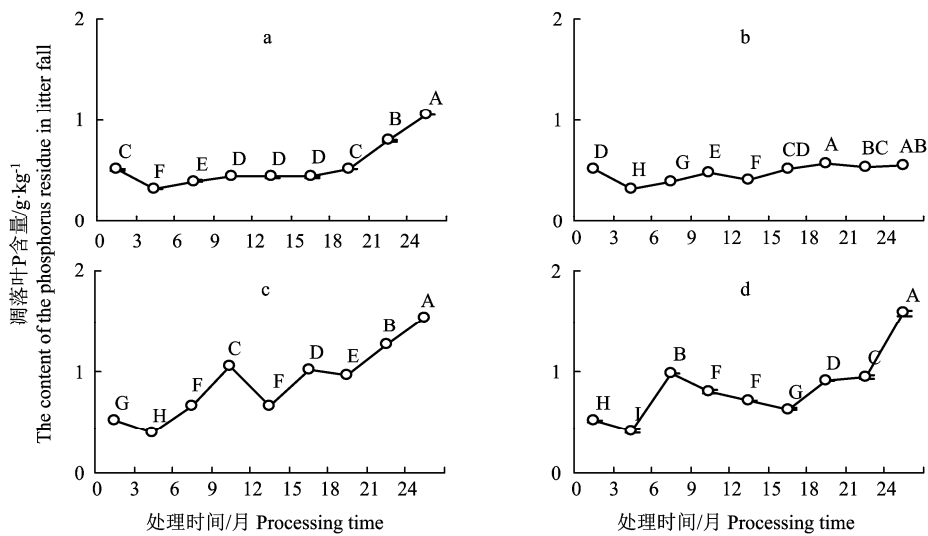
Figure 1 Changes of remaining weights during leaf litter decomposition in the *E. urophylla* woodland



a. 对照, Control group; b. 施 N, N addition; c. 施 P, P addition; d. 施 N+P, N+P addition

图 2 尾叶桉林地凋落叶中的 N 含量变化

Figure 2 Changes of N concentrations during leaf litter decomposition in the *E. urophylla* woodland



a. 对照, Control group; b. 施 N, N addition; c. 施 P, P addition; d. 施 N+P, N+P addition

图 3 尾叶桉林地凋落叶中的 P 含量变化

Figure 3 Changes of P concentrations during leaf litter decomposition in the *E. urophylla* woodland

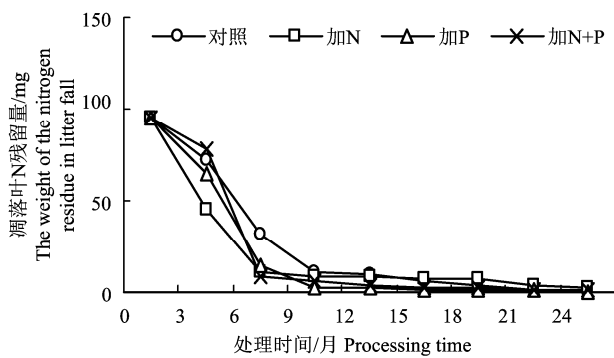


图 4 尾叶桉林地凋落叶的 N 残留量

Figure 4 Remaining N weight during leaf litter decomposition in the *E. urophylla* woodland

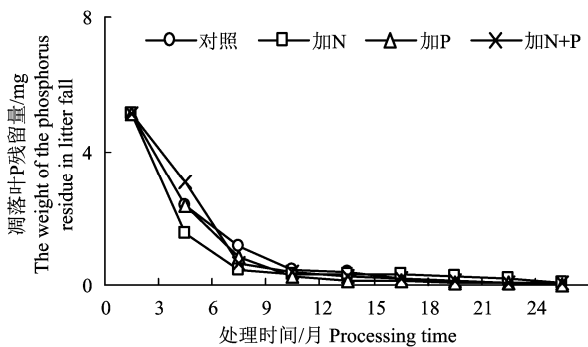


图 5 尾叶桉林地凋落叶的 P 残留量

Figure 5 Remaining P weight during leaf litter decomposition in the *E. urophylla* woodland

并在 15 个月下降达最小值再上升。施 N+P 的 N 含量在前 6 个月逐渐上升后保持相对稳定, 并在 12 个月后呈现降-升-降-升的变化。至 24 月时, 凋落叶 N 含量表现为施 N < 施 N+P < 施 P < 对照, 总体上各处理的尾叶桉凋落叶 N 含量趋向增加。

在凋落叶分解过程中, 尾叶桉林地对照的凋落叶 P 含量在前 3 个月下降后缓慢上升, 并在 18 个月快速上升(图 3)。施 N 的 P 含量在前 3 个月下降后呈现小幅升-降-升-平稳的变化。施 P 的 P 含量在前 3 个月下降后呈现大幅升-降-升-降变化, 并在 18 月后直线上升至最大值。施 N+P 的 P 含量在前 3 个月下降后呈现升降变化, 并在 15 月后逐渐上升至最大值。至 24 月时, 凋落叶 P 含量表现为施 N < 对照 < 施 P < 施 N+P, 总体上各处理的尾叶桉凋落叶 P 含量趋向增加。

2.3 凋落叶分解过程中 N 和 P 残留量的变化

4 种处理的凋落叶的 N 残留量在试验 0~6 个月期间急剧下降, 此后缓慢下降, 24 个月时对照、施 N、P 和 N+P 的凋落叶 N 残留量分别为初始 N 重量的 0.54%、2.41%、0.35%和 0.81% (图 4)。

4 种处理的凋落叶的 P 残留量的下降趋势与 N 残留量相似, 24 个月时对照、施 N、P 和 N+P 的凋落叶 P 残留量分别为初始 P 重量的 0.48%、1.74%、0.56%和 1.52% (图 5)。

3 讨论与结论

3.1 凋落叶分解机理分析

从本研究的结果来看, 马尾松凋落叶在分解过程中有快速分解和缓慢分解 2 个阶段, 分解初期(0~6 月)为快速分解阶段, 接下来为缓慢分解阶段, 许多凋落物的分解过程均有这一现象^[15]。凋落物分解初期易于分解的可溶性成分如糖类和氨基酸等迅速流失, 因而分解速率较快; 分解后期的凋落物中难

分解的木质素等的相对含量增加, 造成凋落物分解速率减缓, 甚至停滞^[6]。从全球尺度上来说, 气候和凋落物基质对凋落物分解速率有决定性影响^[29]。在氮素添加背景下, 凋落物分解受到时间、分解底物类型及氮素输入水平的共同影响^[30]。生物和非生物因素共同影响凋落物的分解过程, 当地的降雨和气温影响凋落物前期分解中的易分解成分含量^[31], 而后期分解主要受控于微生物和酶活性对难分解成分如木质素的分解过程^[32]。

土壤微生物、动物和酶综合影响凋落物的分解速率, 还有元素的释放过程^[33]。本研究中 4—10 月是尾叶桉凋落叶分解较快的时期, 这段时间试验地雨量充沛, 对凋落物淋溶强烈, 加之温度较高, 土壤动物和微生物活跃, 加速了凋落物分解。

本研究表明, 在分解前 12 个月, 外源性 N 表现为促进效应, 而随后的 12~24 个月, 表现为无明显影响。施 P 和 N+P 处理的表现为促进作用。外源性 N 和 P 的输入, 提高了凋落叶的 N 和 P 含量, 满足了微生物生长的需要, 因此凋落叶的分解加速。亦有研究表明, 氮沉降降低了混合凋落物中纤维素、半纤维素和木质素等主要结构性物质含量, 增加了凋落物 N、P 元素含量, 同时降低了 C/N 和 C/P 的比值, 从而有利于提高凋落物的分解速率^[34]。然而, 以往的试验表明, 并非全部 N、P 添加都加快凋落物的分解^[35]。因为 N 沉降也能抑制木质素和纤维素分解, 木质素分解的中间产物与无机 N 结合生成抗分解物质, 减弱胞外酶活性, 抑制相关的微生物和动物活动^[36], 从而对凋落叶分解产生抑制作用。

外源性 P 促进了凋落叶分解, 其原因是 P 添加可以促进凋落叶对可利用 P 的吸收, 加快 C 释放, 提高微生物的数量和酶活性, 从而促进凋落物的分解^[15]。而凋落叶经外源性 N+P 处理后, N、P 平衡 (如凋落物 N/P) 有利于微生物的活性, 从而促进凋落物的分解^[24]。由于施 N 处理后分解速度多为减慢, 说明施 N+P 处理后, P 元素起主导作用。Jacobson 等^[21]也发现, 无论添加 P 或添加 N+P 都促进了巴西热带草原凋落物分解, 表明该生态系统受 P 限制^[15]。总体来看, 在华南地区外源性 N 对凋落物分解多为抑制作用, 外源性 P 能起到加快凋落叶分解的作用, 外源性 N+P 的效果介于施 P 和 N 之间。因此, 根据凋落物分解变化, 可考虑在这些地区施用适当的 P 肥, 以促进凋落物的分解、营养元素的回归, 从而达到增加土壤肥力, 促进林分生长的目的。

3.2 凋落叶分解养分含量和残留量的变化

3.2.1 分解过程中凋落叶 N 含量变化 施 N、P 和

N+P 后, 凋落叶的 N 含量在分解过程中总体呈现波动上升的趋势, 24 个月后, 凋落叶 N 含量显著大于其初始 N 含量 ($P < 0.05$), 微生物生物量增加可能是这些凋落叶 N 含量上升的主要原因。施 N、P 和 N+P 的凋落叶分解 24 个月后, 其 N 含量显著大于对照。在凋落物分解过程中, 凋落物中的微生物增加, 微生物需要吸收土壤中的 N, 当吸收率超过自身消耗率时, 凋落叶中的 N 含量增加^[37]。

3.2.2 分解过程中凋落叶 P 含量变化 4 种处理的凋落叶 P 含量在分解过程中总体呈现波动上升, 主要是由于凋落物的分解速度超过 P 的释放速度, 微生物还会在分解过程中吸收土壤中的 P。24 个月后, 凋落叶 P 含量显著大于其初始 P 含量 ($P < 0.05$), 主要是外源性 P 在凋落物分解过程中累积的结果。在针叶和阔叶凋落叶分解的研究中, P 含量的增加是十分普遍的, 尤其是在分解的初始阶段^[38], 这是由于凋落物重量的减少及外源性 P 的输入所致。与对照相比, 施 N 的凋落叶 P 含量下降, 与其经历了雨水淋溶有关, 因为凋落物中的 P 可被雨水淋洗出来^[39-40]。施 P 和 N+P 后上升, 可能是分解初期凋落物中 P 含量较低, 凋落物中的微生物为了生存和繁殖, 吸收了土壤中的 P。

3.2.3 分解过程中凋落叶中 N 和 P 残留量的变化 24 个月后 4 种处理的凋落叶的 N 和 P 的残留量均大幅下降, 说明凋落叶中的养分得到了不同程度的释放, 凋落叶 N 和 P 均呈现释放模式。凋落叶 N 的释放速率为施 P > 对照 > 施 N+P > 施 N, 凋落叶 P 的释放速率为对照 > 施 P > 施 N+P > 施 N, 表明施 N 阻碍了凋落叶养分的释放。

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 broad-leaved forest of the Changbai Mountains, China[J]. Eur J Soil Biol, 2013, 55: 28-39.
- [3] 陆耀东, 薛立, 曹鹤, 等. 去除地面枯落物对加勒比松 (*Pinus caribaea*) 林土壤特性的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3205-3211.
- [4] XU X, 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.
- [5] WANG QK, WANG SL, 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): 1210-1218.
- [6] 方华, 莫江明. 氮沉降对森林凋落物分解的影响[J]. 生

- 态学报, 2006, 26(9): 3127-3136.
- [7] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [8] GRUBER N, GALLOWAY J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 293-296.
- [9] GALLOWAY J N, DENTENER F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [10] 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.
- [11] RABALAIS N N. Nitrogen in aquatic ecosystems[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 102-112.
- [12] MATSON P, LOHSE K A, HALL S J. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 113-119.
- [13] WALBRIDGE M R. Phosphorus biogeochemistry[J]. *Ecology*, 2000, 81(5): 1474-1475.
- [14] CHEN F S, LI X, NAGLE G, et al. Topsoil phosphorus signature in five forest types along an urban-suburban-rural gradient in Nanchang, southern China[J]. *J Forestry Res*, 2010, 21(1): 39-44.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] HOBBI E S. Contrasting effects of substrate and fertilizer nitrogen on the early stages of litter decomposition[J]. *Ecosystems*, 2005, 8(6): 644-656.
- [19] XIE Y, YU D, REN B. Effects of nitrogen and phosphorus availability on the decomposition of aquatic plants[J]. *Aquat Bot*, 2004, 80(1): 29-37.
- [20] VIVANCO L, AUSTIN A T. Nitrogen addition stimulates forest litter decomposition and disrupts species interactions in Patagonia, Argentina[J]. *Global Change Biol*, 2011, 17(5): 1963-1974.
- [21] JACOBSON T K B, DA CUNHA 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.
- [22] HOBBI E S. Nitrogen effects on decomposition: A five-year experiment in eight temperate sites[J]. *Ecology*, 2008, 89(9): 2633-2644.
- [23] 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 Soil*, 2006, 282(1): 135-151.
- [24] 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.
- [25] KOZOVITS A R, BUSTAMANTE M M C, GAROFALO C R, et al. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna[J]. *Funct Ecol*, 2007, 21(6): 1034-1043.
- [26] AERTS R, VAN LOGTESTIJN R, KARLSSON P S. Nitrogen supply differentially affects litter decomposition rates and nitrogen dynamics of sub-arctic bog species[J]. *Oecologia*, 2006, 146(4): 652-658.
- [27] 刘姝媛, 胡浪云, 储双双, 等. 3 种林木凋落物分解特征及其对赤红壤酸度及养分含量的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2013, 22(3): 11-17.
- [28] 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.
- [29] WARDLE D A, BARDGETT R D, WALKER L R, et al. Among-and within-species variation in plant litter decomposition in contrasting long-term chronosequences[J]. *Funct Ecol*, 2009, 23(2): 442-453.
- [30] 于雯超, 宋晓龙, 修伟明, 等. 氮素添加对贝加尔针茅草原凋落物分解的影响[J]. *草业学报*, 2014, 23(5): 49-60.
- [31] BERG B, MEENTEMEYER V. Litter quality in a north European transect versus carbon storage potential[J]. *Plant Soil*, 2002, 242(1): 83-92.
- [32] SINSABAUGH R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2010, 42(3): 391-404.
- [33] 屠梦照, 姚文华, 翁轰, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物的特征[J]. *土壤学报*, 1993, 30(1): 34-41.
- [34] 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.
- [35] MICKS P, DOWNS M R, MAGILL A H, et al. Decomposing litter as a sink for ¹⁵N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation[J]. *Forest Ecol Manag*, 2004, 196(1): 71-87.
- [36] 胡红玲, 张健, 刘洋, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区巨桉林凋落叶分解的影响[J]. *林业科学*, 2011, 47(8): 25-30.
- [37] MILLER R M, MILLER S P, JASTROW J D, et al. Mycorrhizal mediated feedbacks influence net carbon gain and nutrient uptake in *Andropogon gerardii*[J]. *New Phytol*, 2002, 155(1): 149-162.
- [38] HARRIS M M, SAFFORD L O. Effects of season and four tree species on soluble carbon content in fresh and decomposing litter of temperate forest S1[J]. *Soil Science*, 1996, 161(2): 130-135.
- [39] XUE L. Nutrient cycling in a Chinese-fir (*Cunninghamia lanceolata*) stand on a poor site in Yishan, Guangxi[J]. *Forest Ecol Manag*, 1996, 89(1): 115-123.
- [40] 薛立, 史小玲, 冯慧芳, 等. 加勒比松林凋落物对地表径流和氮、磷流失的影响[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 878-884.