

林下层植物在退化马尾松林恢复初期养分循环中的作用

莫江明¹, Sandra Brown², 彭少麟¹, 孔国辉¹, 张德强¹, 张佑昌¹

(1. 中国科学院华南植物研究所, 广东肇庆鼎湖 526070; 2. Winrock International, 1621 N. Kent St., Suite 1200, Arlington, VA 22209, USA)

摘要:以鼎湖山退化马尾松(*Pinus massoniana*)林恢复过程中林下层植物凋落物、分解和养分动态为对象,研究了林下层植物在退化马尾松林恢复初期养分循环中的作用。结果表明,林下层年凋落物量除在第 5 年有所下降外均随时间逐年上升,但其增加速率随年份不同而异,总平均年增长速率为 38%。第 4 年凋落物量为 $0.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,第 11 年为 $1.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。凋落物养分元素平均浓度为(%): N 0.95, P 0.04, K 0.57, Ca 0.13 和 Mg 0.08,基本上以夏季和秋季最高冬春交替月份最低。第 11 年凋落物各元素养分归还量为($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$): N 11.10, P 0.47, K 6.65, Ca 1.48 和 Mg 0.91。凋落物在分解过程中失重率呈直线模型变化,第 1 年的分解速率为 31%,至试验结束时凋落物的残存量占起始量的 66%。在凋落物分解过程中,N 和 P 浓度随时间逐渐上升,但 N 增加的速度较 P 快,其余元素浓度均下降,但 K 下降的速度最快。在凋落物分解过程中,N 是唯一一表现残留量呈先上升然后下降变化的元素,P 的残留量变化与凋落物的失重率变化几乎一致。各元素在分解试验结束时残留量占起始量的百分比分别为: N 90%, P 67%, K 9%, Ca 30% 和 Mg 14%。可见,林下层凋落物在退化马尾松林恢复初期碳及其它营养元素循环方面起着极其重要的作用。

关键词:林下层植物;马尾松;退化;恢复;鼎湖山;凋落物;养分动态

Role of Understory Plants on Nutrient Cycling of a Restoring Degraded Pine Forests in a MAB Reserve of Subtropical China

MO Jiang-Ming¹, Sandra Brown², PENG Shao-Lin¹, KONG Gou-Hui¹, ZHANG De-Qiang¹, ZHANG You-Chang¹ (1. South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Dinghu, Zhaoqing, Guangdong 526070, China; 2. Winrock International, 1621 N. Kent St., Suite 1200, Arlington, VA 22209, USA). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1407~1413.

Abstract: The role of understory plants on nutrient cycling of a restoring degraded pine forest in Dinghushan Biosphere Reserve of subtropical China was studied, by quantifying litterfall, decomposition and nutrient dynamics of understory plants in the ecosystem during an eleven year period. During that period of restoration, litterfall of understory plants increased at a mean rate of 38 percent with years except for the fifth year. By the fourth year of the experiment, annual litterfall was $0.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and by the eleventh year it was $1.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Nutrient concentrations of litterfall were (%): N 0.95, P 0.04, K 0.57, Ca 0.13 and Mg 0.08, with generally highest concentrations in summer and fall, and lowest in winter and spring. The annual nutrient contents of litterfall at the eleventh year of the experiment were: N 11.10, P 0.47, K 6.65, Ca 1.48 and Mg 0.91 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Rate of mass loss in

基金项目:国家自然科学基金重大资助项目(39899370);中国科学院知识创新资助项目(KZCX2-407);中国科学院资环局和 USA MAB 资助项目(1753-900555)

余清发、莫定升、魏平和郁梦德等同志参加部分野外工作。

收稿日期:2001-09-15;修订日期:2002-04-20

作者简介:莫江明(1964~),男,广东省肇庆市人,硕士,研究员。主要从事生态系统生态学与自然保护区管理。E-mail: mojm@scib.ac.cn

decomposing litter was linear with a decomposition rate (k) of 0.31/year during the first year. Nitrogen and P concentrations increased in decomposing litter, but N increased faster than P did. Concentrations of other elements declined in decomposing litter throughout the total period of the experiment. Nitrogen was the only element whose content increased during decomposition for the first 207 days, followed by a slight decline over the next 224 day period to 90 percent of the original content. Contents of P declined, following the linear rate of mass loss during the total period of the experiment to 67 percent of the initial content. Calcium and Mg all decreased in a similar pattern during the whole course of the experiment to 30 percent for Ca and 14 percent for Mg. The highly mobile element K showed the greatest change with an approximate 80 percent loss over the first 95 days, followed by an additional 11 percent over the next 336 days. Generally, losses in the contents of all nutrients from the decomposing litter were in the order: $K > Mg > Ca > P > N$. Based on the results of this study, we suggest that litter from understory plants is important in returning carbon and nutrients to the soil during early stage of restoration of degraded pine forest.

Key words: understory plants; *Pinus massoniana*; degradation; restoration; Dinghushan; litterfall; nutrient dynamics

文章编号:1000-0933(2002)09-1407-07 中图分类号:S718.5 文献标识码:A

用于农业的森林开发是全球热带森林的最大威胁。据估计,目前热带森林毁林速率已达每年 1000hm^2 ^[1]。然而,受到全球同样程度关注的是热带森林退化,包括生物量降低、森林片断化以及生物多样性损失^[2]。因此,退化生态系统的恢复研究已成为当前全球生态研究的热点内容。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国松属树种中分布最广的一种,也是我国亚热带东部湿润地区典型的针叶乡土树种。分布于广东、广西、云南、福建、湖南、湖北、安徽、四川、贵州、河南、陕西、江苏、浙江、江西等 14 省(区)。目前,马尾松林的面积占全国针叶林的首位,是我国南方最具代表性的森林类型之一^[3]。由于马尾松是森林演替中的先锋树种,它常出现在土壤营养较贫瘠的地方。而且在这些马尾松林分布地区,人类干扰活动诸如农业生产、放牧、收获凋落物和林下层等经常发生。例如,广东鼎湖山生物圈保护区就是一个例子,为了满足当地居民燃料的需求,该保护区允许当地居民收割分布于过渡区的马尾松林凋落物和林下层。这些收割活动每年常发生多次^[4]。从不同角度的系列研究结果表明,正是由于长期以来的人为干扰原因,这些马尾松林生态系统出现严重的退化,并且这种退化已成为我国南方马尾松林的普遍现象^[3~11]。

为了探索退化马尾松林的恢复途径使其发挥更大的生态和社会效益,在研究其退化原因和机理的同时,从 1990 年开始也对退化马尾松林恢复及其机理进行了系统的研究。本文报道退化马尾松林在自然恢复(停止人为干扰)第 3 年后林下层植物凋落物、分解和养分动态,从而探讨林下层植物在退化马尾松林恢复初期养分循环中的作用。凋落物常被认为是森林生态系统营养循环的一个重要物质库。植物从土壤中吸收的大部分营养,最终主要通过凋落物形式回归到土壤,是土壤营养的重要来源。凋落物研究还有助于了解森林生产力、有机质分解、树木的物候及生态系统营养循环速率等。过去有关这方面的研究均主要集中在乔木层凋落物,对于森林尤其是退化森林恢复过程中林下层凋落物的专门研究报道很少。假设在恢复初期(停止人为干扰后),随着林下层植物的生长其凋落物在养分循环中起着特别重要的作用。本研究对于我国南方实施“我国 21 世纪林业政策”也具有一定的实践和理论意义^[12]。

1 材料与方法

1.1 样地概况

本研究在广东鼎湖山生物圈保护区进行。保护区位于广东省中部,东经 $112^{\circ}33'$,北纬 $23^{\circ}10'$,属亚热带季风性气候型。年平均降雨量为 1927 mm,其中 75% 分布在 3 月份到 8 月份,而 12 月份到 2 月份仅占 6%。年平均降雨量为 80%。年平均温度为 21.4°C ,最冷月(1 月份)和最热月(7 月份)的平均温度分别为 12.6°C 和 28.0°C ^[13]。

研究样地位于保护区东南角过渡区人工种植的马尾松林。海拔高度在 50~200 m 之间。样地的母岩为沙岩。土壤为砖红壤性红壤, pH 值在 4.5~5.0 之间。土层较浅, 一般不超过 30 cm。森林以马尾松为主, 还有 3 棵桉树 (*Eucalyptus robusta*), 林龄约为 66a。因长期受人为干扰(收割凋落物和林下层, 每年 2~3 次), 该马尾松林退化较严重, 林分结构简单, 乔木仅一层且林冠稀疏, 但林下层植物(乔木层林冠以下除马尾松和桉树外的灌木、草本以及蕨类植物)较稠密。林下层树种主要以桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*)、芒萁 (*Dicranopteris linearis*)、毛稔 (*Melastoma sanguineum*)、岗松 (*Baeckea frutescens*) 等为主^[4, 7]。

1.2 实验设计

本研究为退化马尾松恢复研究项目的一部分, 该项目采用对比样方 (paired-plot) 设计, 共有 20 对样方。每对由处理(允许收割凋落物和林下层活动)样地和保护(不进行任何收割活动)样地各一个组成。每个样方的面积为 $10 \times 10 \text{ m}^2$, 周围有 10 m 宽的缓冲带。同一对的两个样方在土壤、坡度、外貌、和海拔高度等均相类似。样地坡度的平均值为 30° , 最小和最大分别为 26.5° 和 34.5° 。自试验之日(1990 年 5 月)开始, 当地居民在处理样地根据他们的习惯继续进行收割凋落物和林下层活动(每年 2~3 次), 在保护样地则禁止任何人为活动^[4, 7]。本文报道保护样地林下层凋落物的情况。

1.3 样品采集和处理

在 1991 年 10 月 21 日, 把准备好的凋落物分解袋(共 60 个, 孔径为 3 mm 的尼龙网袋, 面积 $25 \times 25 \text{ cm}^2$, 每袋装入约 10 g 风干的林下层凋落物)均匀地安置在随机选择的 5 个样方中。在试验开始后约第 4、8、16、32 周于每个样方采集 3 个凋落物分解袋(共 15 个/次)。于 1993 年 11 月 25 日, 把准备好的凋落物收集网(面积 $1 \times 1 \text{ m}^2$, 孔径为 1 mm)随机安置在 10 个样方中(1 个/样方)。收集网离地面约 10 cm。在每月的第 25 日收集凋落物。另外, 因为第 1 至第 3 年(1991~1993)林下层凋落物极少, 故未有收集。

所有材料(其中林下层凋落物在实验室用肉眼分检开马尾松及桉树的凋落物)收集后, 立即在 40°C 下恒温箱烘至恒重。然后, 每个样品分开两部分, 其中一部分在 105°C 烘至恒重, 用来计算重量换算率 ($40/105^\circ\text{C}$); 另一部分磨碎、过 0.15 mm 孔径的网筛和装瓶, 以供化学分析^[14]。所有样品的分析在美国伊莉诺大学完成。氮的分析用开氏法消煮后, 用维氏卡分析仪定氮^[15]。样品磷的浓度用比色法, 其它营养元素浓度则用离子吸收光谱法分析^[16]。所有结果以 105°C 恒重为基准。

2 结果

2.1 凋落物及其养分回归

在退化马尾松林恢复初期, 林下层年凋落物量除在第 5 年有所下降外均随时间逐年上升, 但其增加速率随年份不同而异, 总平均年增长速率为 38%(图 1, 表 1)。例如, 第 6 年的年凋落物量为 $0.36 \pm 0.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 第 7 年为 $0.52 \pm 0.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 后者较前者约增加 44%; 第 10 年为 $1.02 \pm 0.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 第 11 年则为 $1.17 \pm 0.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 后者较前者约增加 11%, 它们分别为第 4 年凋落物量的 7.3 和 8.4 倍(表 1)。在试验期间同一月份比较, 下一年月凋落物量一般大于上一年的月凋落物量(图 1)。例如, 3 月份在第 5 年和第 7 年之间月凋落物量的大小变化顺序为 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mo}^{-1}$): 第 7 年 (29.11 ± 6.22) > 第 6 年 (23.70 ± 9.12) > 第 5 年 (4.08 ± 2.22)。

凋落物量具有明显的季节性变化特点(图 1)。月凋落物高峰期分布在夏季或秋季, 低峰期则主要出现于冬春交替期(2 或 3 月份)。凋落物月际变化悬殊, 最大值与最小值相差 4~33 倍, 但其程度因年份不同而异。各年凋落物量月变化程度的大小顺序为: 第 8 年(最大与最小比值: 33.3) > 第 9 年(29.4) > 第 4 年(23.7) > 第 7 年(11.6) > 第 6 年(11.4) > 第 5 年(5.4) > 第 11 年(5.0) > 第 10 年(3.5)。

凋落物养分元素平均浓度为: N 0.95%, P 0.04%, K 0.57%, Ca 0.13% 和 Mg 0.08%, 同样具有明显的季节变化特点(表 2)。除 Ca 元素浓度在秋季最高外其余元素均以春季最高。然而, 所有元素浓度除 K 外最低均在冬季, K 元素则在秋季。5 个元素在凋落物中的浓度大小变化顺序为: $\text{N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P}$ 。与凋落物量年际变化相类似, 各元素通过凋落物回归到林地土壤的养分量除第 5 年外均以同样的速率(38%)随时间逐年上升(表 1)。至第 11 年各元素养分年归还量分别为 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$): N 11.10 ± 2.77 , P 0.47 ± 0.12 , K 6.65 ± 1.66 , Ca 1.48 ± 0.37 , Mg 0.91 ± 0.23 。

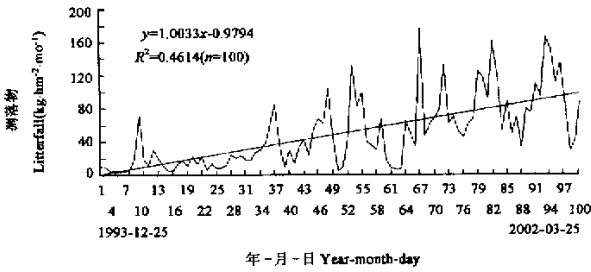


图 1 林下层植物凋落物在鼎湖山退化马尾松林恢复过程中的动态

Fig. 1 Dynamics of litterfall of understory plants in a restoring degraded pine forest of Dinghushan

1, 4, 7, ..., 100 分别代表 1993 年 12 月 25 日, 1994 年 3 月 25 日, 1994 年 6 月 25 日……以及 2002 年 3 月 25 日
 Represent 25 Dec. ,1993, 25 Mar. ,1994, 25 Jun. ,1994, and so on and 25 Mar. ,2002, respectively

表 1 鼎湖山退化马尾松林恢复过程中林下层植物凋落物及其主要营养元素养分含量(括号内为标准误)

Table 1 Litterfall and its nutrient contents of understory plants in a restoring degraded pine forest of Dinghushan(SE in parentheses)

年 Year	凋落物 Litterfall (t · hm ⁻² · a ⁻¹)	N (kg · hm ⁻² · a ⁻¹)	P (kg · hm ⁻² · a ⁻¹)	K (kg · hm ⁻² · a ⁻¹)	Ca (kg · hm ⁻² · a ⁻¹)	Mg (kg · hm ⁻² · a ⁻¹)
1990~1993*	—	—	—	—	—	—
1994	0.19(0.06)	1.85(0.61)	0.08(0.03)	1.11(0.37)	0.25(0.08)	0.15(0.05)
1995	0.14(0.04)	1.32(0.38)	0.06(0.02)	0.79(0.23)	0.18(0.05)	0.11(0.03)
1996	0.36(0.17)	3.39(1.63)	0.14(0.07)	2.03(0.98)	0.45(0.22)	0.28(0.13)
1997	0.52(0.15)	4.89(1.39)	0.21(0.06)	2.93(0.84)	0.65(0.19)	0.40(0.11)
1998	0.57(0.14)	5.37(1.29)	0.23(0.05)	3.22(0.77)	0.71(0.17)	0.44(0.11)
1999	0.79(0.14)	7.46(1.36)	0.32(0.06)	4.47(0.81)	0.99(0.81)	0.62(0.11)
2000	1.06(0.32)	10.03(3.04)	0.42(0.13)	6.01(1.82)	1.34(0.40)	0.83(0.25)
2001	1.17(0.29)	11.10(2.77)	0.47(0.12)	6.65(1.66)	1.48(0.37)	0.91(0.23)

* 因量少无观测 Data is not available

表 2 鼎湖山退化马尾松林恢复过程中林下层凋落物主要营养元素浓度(括号内标准误)

Table 2 Nutrient concentrations of litterfall of understory plants in a restoring degraded pine forest of Dinghushan(SE in parentheses)

季节 Seasons	N(%)	P(%)	K(%)	Ca(%)	Mg(%)
春 Spring	1.213(0.050)	0.059(0.002)	0.865(0.042)	0.046(0.040)	0.115(0.004)
夏 Summer	1.160(0.040)	0.058(0.002)	0.743(0.036)	0.042(0.035)	0.103(0.005)
秋 Fall	0.720(0.004)	0.025(0.001)	0.245(0.012)	0.279(0.015)	0.043(0.004)
冬 Winter	0.692(0.019)	0.016(0.001)	0.416(0.013)	0.137(0.009)	0.049(0.004)
平均 Mean	0.946(0.028)	0.040(0.002)	0.567(0.026)	0.126(0.025)	0.078(0.004)

2.2 凋落物分解及其养分释放

凋落物的失重率在分解过程中呈显著的直线下降 ($p < 0.01$, 图 2), 第 1 年分解速率为 31% (从分解线性模型方程式中换算得到)。分解试验结束时(第 431 天)凋落物的残存量占起始量的 66%。养分元素浓度在凋落物分解过程中的变化根据元素不同而异(图 3)。N 和 P 两种元素在凋落物分解过程中其浓度的变化相类似, 均随时间呈上升趋势, 但 N 上升的速率较 P 快。其余 3 种元素的浓度在分解过程中随时间呈下降变化, 但 Ca 利用数据模型相类似, 均较 K 的下降速率慢(图 3)。

分解物残存量与其元素浓度相结合, 得出如图 2(N, Ca, P, Mg, 和 K)所示的凋落物元素养分残存量

变化模型。在 5 个元素中, 仅 N 元素呈现先固存然后矿化的变化。N 残存量在试验的第 207 天前上升, 之后下降。试验结束时 N 残存量仍为起始量的 90%。P 残存量下降的速度与凋落物的失重率几乎一致(至试验结束时 P 的残存量占起始量 67%)。Ca 和 Mg 残存量的变化模型相类似, 均在试验第 207 天前以较快的速率下降, 然后下降缓慢。两元素比较, Mg 残存量下降的速率较 Ca 快, 至试验结束时这两个元素残存量占起始量的百分比分别为 14% 和 30%。K 是 5 个元素中流动性最强的元素, 在试验第 95 天前其残存量急剧下降, 然后以较慢速率稳定下降, 至结束时仅占起始量的 9%(图 2)。可见, 在凋落物分解过程中 5 个元素养释放速率大小顺序为: $K > Mg > Ca > P > N$ 。

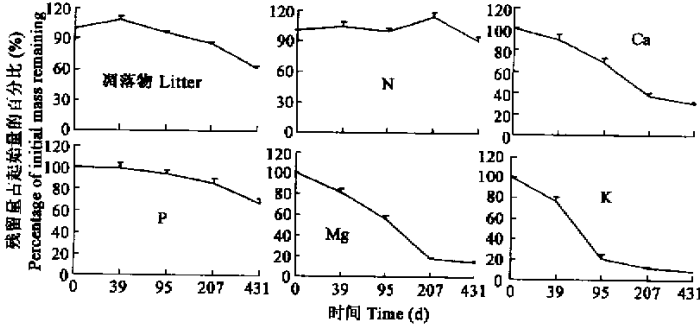


图 2 残存量在林下层植物凋落物分解过程中随时间的变化模型

Fig. 2 Patterns of mass remaining in decomposing litter of understory plants

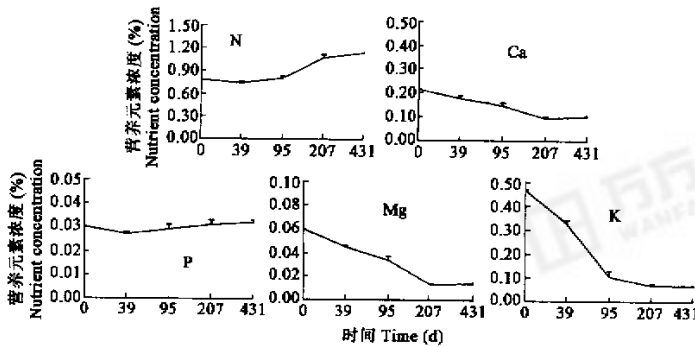


图 3 营养元素浓度在林下层植物凋落物分解过程中的变化模型

Fig. 3 Patterns of nutrient concentrations in decomposing litter of understory plants

3 讨论

3.1 在退化生态系统恢复初期物质循环中的作用

林下层凋落物研究一直为生态学者们所忽视, 这显然与林下层生物量在森林生物量中所占的比例普遍较低的原因有关。在退化马尾松林恢复初期, 林下层年凋落物量除在第 5 年有所下降外均随时间逐年上升, 但其增加速率随年份不同而异, 总平均年增长速率为 38%。至试验的第 11 年林下层年凋落物量与该林分乔木层针叶年凋落物量相当(第 11 年林下层年凋落物量和乔木层针叶年平均凋落物量分别为: $1.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $1.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[4], 且占乔木层年总凋落物量的 52%(乔木层凋落物年平均总量为: $2.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[4]。与其它热带亚热带非退化松林乔木层总凋落物量比较, 本研究第 11 年林下层年凋落物

量也相当于它们的 22%~27%^[17, 18]。

由于林下层凋落物营养元素浓度比较高,所以增加了养分通过凋落物回归到林地土壤的营养量。例如,林下层凋落物 N 元素浓度为 0.95%(表 2),大于乔木层凋落物针叶的 N 浓度(0.60%)^[4]。试验第 11 年通过林下层凋落物回归到土壤的养分(kg·hm⁻²·a⁻¹)为:N 11.10, P 0.47, K 6.65, Ca 1.48 和 Mg 0.91(表 1),除 Ca 元素外所有元素均超过该林分乔木层针叶养分年平均归还量(为针叶的 1.05~3.17 倍)以及分别为总凋落物养分年平均归还量的 0.77, 0.81, 2.46, 0.26 和 0.97 倍(马尾松林乔木层针叶和总凋落物年平均养分归还量(kg·hm⁻²·a⁻¹)分别为:N 10.06, P 0.30, K 2.10, Ca 4.41, Mg 0.73 和 N 14.42, P 0.58, K 2.70, Ca 5.62, Mg 0.94)^[4]。

同时,与该松林乔木层凋落物的分解速率比较,林下层凋落物年分解速率为 31%,略低于乔木层凋落物针叶和混合凋落物(针叶和林下层凋落物各一半)的分解速率。针叶和混合凋落物的年分解速率分别为 44%和 37%^[8]。养分在林下层凋落物分解过程中的释放模型和速率也与乔木层凋落物的针叶和混合凋落物的模型和速率相类似^[8]。可见,在生态系统养分循环方面,林下层凋落物在本研究退化马尾松林恢复过程中起着极其重要的作用。

此外,与其它一些热带和亚热带阔叶林和松林分解速率(100%~175%)^[4, 7]比较,松针包括林下层凋落物和混合凋落物的分解速率均较低。其原因除了林下层凋落物可能含有较难分解的植物种类外,主要是由于本研究林地长期以来受人为活动干扰而造成林地退化和土壤肥力低的原因造成^[4~11]。前期研究结果表明,松针及混合凋落物在分解初期 N 素残存量逐渐上升,N 素不但不能释放而且还从土壤中吸收固存^[8]。本研究 N 素浓度和残存量在凋落物分解过程中的表现与前期的研究结果一致(图 2,3)。以上现象说明了,凋落物中 N 的含量不能满足参与分解的微生物生长和维持需要^[19]。据报道,自然或人工施加 N 素显著增加森林凋落物的分解速率^[19~23]。因此土壤 N 素供应力可能是本研究马尾松林凋落物分解的限制因素。尤如前面所述,大量的养分通过林下层凋落物回归到林地,对于改善土壤肥力、加速凋落物分解以及促进退化林地恢复具有重要的现实意义。

3.2 林下层凋落物的变化趋势

前面已论述了,本研究松林林下层凋落物产量较高。其原因可能与停止人为干扰后林下层植物生长竞争有关。由于长期受人为活动干扰(收割林下层和凋落物)本研究马尾松林林冠稀疏^[4, 7],给林下层植物提供了优越的光照环境。收割林下层和凋落物活动显著提高土壤有效 N 含量^[9],此种干扰活动对林下层植物种类多样性产生负面影响较少,反而有利于阳性植物种类多样性维持^[24]。在本研究松林样地林下层植物种类共有 44 种。因此停止人为干扰后,这些种类同时在林地中生长,这样 3a 后(也就是本研究开始观测时间)势必增加这些植物种间和种内生存空间以及营养的竞争,造成较高的林下层凋落物量。随着停止人为干扰后退化马尾松林的恢复以及林地条件的改善,可以预见在一段时期后以上因素的影响将会逐渐减小,林下层凋落物量的增长速率也将会逐渐变小,或有可能趋于稳定。

参考文献

- [1] FAO. Global forest resources assessment 2000 (FRA 2000), Results as of April 10, 2001. Available from www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp, 2001.
- [2] FAO. Forest resources assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO Forestry Paper 130, Rome, Italy, 1996.
- [3] Xiao X X (肖祥希). Studies on the nutrient characteristics of *Pinus masoniana* ecosystem. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology* (in Chinese) (福建林业科技), 2000, 27(4):14~18.
- [4] Mo J M, Brown S, Lenart M, et al. Nutrient dynamics of a human impacted pine forest in a MAB Reserve of subtropical China. *Biotropica*, 1995, 27:290~304.
- [5] Ehleringer R J, Field C B, Lin Z F (林植芳), et al. Physiological responses in subtropical plants subject to different CO₂ levels. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*(in Chinese) (热带亚热带森林生态系统研究), 1986, 4:23~34.

- [6] Peng S L (彭少麟), Li M G (李鸣光), Lu Y (陆阳). A primary study on the biomass and productivity of *Pinus massoniana* population in Dinghu Shan Biosphere Reserve. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem* (in Chinese) (热带亚热带森林生态系统研究), 1989, **5**:75~82.
- [7] Brown S, Lenart M, Mo J M, *et al.* Structure and organic matter dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB Reserve of subtropical China. *Biotropica*, 1995, **27**:276~289.
- [8] Mo J M (莫江明), Brown S, Kong G H (孔国辉), *et al.* Litter decomposition and its nutrient dynamics of a pine forest in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Phytoecologica Sinica* (in Chinese) (植物生态学报), 1996, **20**(6): 534~542.
- [9] Mo J M (莫江明), Kong G H (孔国辉), Brown S, *et al.* Effects of litter and understory removal on soil N availability in a subtropical forest of China. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese) (生态学报), 1997, **17**(1):109~112.
- [10] Mo J M (莫江明), Kong G H (孔国辉), Brown S, *et al.* The primary study on the fine root biomass and its relationship with light organic matter in a pine forest in Dinghushan Biosphere Reserve. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem* (in Chinese) (热带亚热带森林生态系统研究), 1998, **8**:163~171.
- [11] Mo J M (莫江明), Brown S., Kong G H (孔国辉), *et al.* Nutrient distribution and cycling of a Masson's pine planted forest in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese) (生态学报), 1999, **19**(5):635~640.
- [12] Zhang P C, Shao G F, Zhao G, *et al.* China's Forest Policy for the 21st Century. *Science*, 2000, **288**:2135~2136.
- [13] Huang Z F (黄展帆), Fan Z G (范征广). The climate of Ding Hu Shan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem* (in Chinese) (热带亚热带森林生态系统研究), 1982, **1**:11~13.
- [14] Anderson J M and Ingram J S. *Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods*. Wallingford, Oxford, England: CAB International, 1989.
- [15] Scott T J, Mitchell M J, Santos A, *et al.* Comparison of two methods for measuring ammonium in solution samples. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1989, **20**:1131~1144.
- [16] Luh Huang C Y and Schulte E E. Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1985, **16**:943~958.
- [17] Deng C Z (邓纯章), Li S C (李寿昌), Hou J P (侯建萍). Researches on litterfall distributed in seven forests at varied altitudes, on Ailao Mountain, Yunan. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica* (in Chinese) (植物生态学与地植物学学报), 1993, **17**(4):364~370.
- [18] Liang H W (梁宏温), Huang C B (黄承标), Hu C B (胡承彪). A study on the litterfall and soil fertility of the different planted forests in Guangxi. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese) (生态学报), 1993, **13**(3):235~242.
- [19] Hobbie S E and Vitousek P M. Nutrient limitation of decomposition in Hawaiian forests. *Ecology*, 2000, **81**(7): 1867~1877.
- [20] Coulson J C and Butterfield J. An investigation of the biotic factors determining the rates of plant decomposition on blanket bog. *J. Ecol.*, 1978, **66**:631~650.
- [21] Hunt H W, Ingham E R, Coleman D C, *et al.* Nitrogen limitation of production and decomposition in prairie mountain meadow, and pine forest. *Ecology*, 1988, **69**:1009~1016.
- [22] Tian G B, Kang T and Brussaard L. Biological effects of plant residues with contrasting chemical composition under humid tropical conditions-decomposition and nutrient release. *Soil Biol. Biochem.*, 1992, **24**:1051~1060.
- [23] Sundarapandian S M and Swamy P S. Litter production and leaf-litter decomposition of selected tree species in tropical forests at Kodayar in the Western Ghats, India. *For. Ecol. Manage.*, 1999, **123**:231~244.
- [24] Kong G H (孔国辉), Mo J M (莫江明). Plant population dynamics of a human-impacted Masson pine plantation in Dinghushan. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*(in Chinese) (热带亚热带植物学报), 2002, **10**(3):193~200.