

三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入 对土壤理化性质的影响*

葛晓改^{1,2} 黄志霖¹ 程瑞梅¹ 曾立雄¹ 肖文发^{1**} 谭本旺³

(¹中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所/国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; ²中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400; ³湖北省秭归县林业局, 湖北宜昌 443631)

摘 要 从凋落物和根系生物量角度对三峡库区不同年龄马尾松人工林土壤理化性质进行测定. 结果表明: 马尾松成熟林凋落物的年产量分别比近熟林、中龄林高 19.4% 和 65.7%, 凋落物现存量大小为成熟林>中龄林>近熟林, 周转系数为近熟林(0.51)>成熟林(0.40)>中龄林(0.36); 根系总生物量、活根及死根生物量均为中龄林最高、近熟林最低; 中龄林土壤总孔隙度最大, 容重最小; 土壤有机质和总氮含量均是成熟林>中龄林>近熟林; 近熟林土壤中硝态氮含量比重较大, 中龄林和成熟林铵态氮含量比重较大. 近熟林凋落物产量适中、周转系数最大, 土壤养分最低; 中龄林根系生物量和总孔隙度最大, 土壤容重最小; 成熟林土壤养分含量最高, 根系生物量较低. 根系生物量增加可以改善土壤的物理性质.

关键词 三峡库区 马尾松人工林 根系 凋落物 土壤理化性质

文章编号 1001-9332(2012)12-3301-08 **中图分类号** S152.7, S512.1 **文献标识码** A

Effects of litterfall and root input on soil physical and chemical properties in *Pinus massoniana* plantations in Three Gorges Reservoir Area, China. GE Xiao-gai^{1,2}, HUANG Zhi-lin¹, CHENG Rui-mei¹, ZENG Li-xiong¹, XIAO Wen-fa¹, TAN Ben-wang² (¹State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; ²Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China; ³Zigui Bureau of Forestry, Yichang 443651, Hubei, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(12): 3301-3308.

Abstract: An investigation was made on the soil physical and chemical properties in different-aged *Pinus massoniana* plantations in Three Gorges Reservoir Area under effects of litterfall and roots. The annual litter production in mature stand was 19.4% and 65.7% higher than that in nearly mature and middle-aged stands, respectively. The litter standing amount was in the sequence of mature stand > middle-aged stand > nearly mature stand, while the litter turnover coefficient was in the order of nearly mature stand (0.51) > mature stand (0.40) > middle-aged stand (0.36). The total root biomass, live root biomass, and dead root biomass were the highest in middle-aged stand, and the lowest in nearly mature stand. In middle-aged stand, soil total porosity was the highest, and soil bulk density was the lowest. Soil organic matter and total nitrogen contents were in the order of mature stand > middle-aged stand > nearly mature stand, soil nitrate nitrogen occupied a larger proportion of soil mineral N in nearly mature stand, while ammonium nitrogen accounted more in middle-aged and mature stands. In nearly mature stand, litter production was moderate but turnover coefficient was the highest, and soil nutrient contents were the lowest. In middle-aged stand, root biomass and soil total porosity were the highest, and soil bulk density were the lowest. In mature stand, root biomass was lower while soil nutrient contents were the highest. The increase of root biomass could improve soil physical properties.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; *Pinus massoniana* plantation; root; litterfall; soil physical and chemical properties.

* “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD38B04)和林业公益性行业科研专项(201104008)资助.

** 通讯作者. E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

2012-04-16 收稿, 2012-10-10 接受.

土壤为植被提供必要的物质基础,而植被类型和生长间接影响土壤的形成^[1]. 土壤质地直接影响着土壤的理化性质、肥力状况、土壤水分、养分的转化及土壤结构类型,研究土壤养分变化对了解土壤肥力和营养元素循环机制有着重要的意义^[2]. 土壤化学性质是影响各类物质在土壤中的转换、迁移、分解和富集、土壤质量的重要因素^[3]. 森林凋落物和根系是土壤有机质和养分的主要来源,在维持和提高森林土壤质量方面起着极其重要的作用^[4]. 根系(直径 $\leq 10\text{ mm}$)是植物吸收养分和水分的主要器官,且生长和周转迅速,其中森林生态系统中树木的细根(直径 $\leq 2\text{ mm}$)周转较快,一年内根死亡40%~90%,对土壤碳库的贡献率在25%~80%,提供的N为29~255 kg \cdot hm⁻²,在某些生态系统中甚至超过地上部分的18%~45%;根系腐烂后还能提供与根系体积等量的土壤空隙^[5].

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国亚热带地区主要的针叶树种,主要分布在南方15个省(区),面积达220万hm²^[6]. 因其适应性强、耐干旱与瘠薄,被广泛用于荒山绿化,是亚热带地区主要的造林树种^[7-8],也是三峡库区典型造林树种之一. 本文以三峡库区不同年龄马尾松人工林为研究对象,分析其凋落物、根系生物量和土壤物理化学特征,旨在为不同发育阶段马尾松人工林土壤质量评价和亚热带地区森林可持续经营提供参考依据,并为森林生态系统的恢复及安全保障提供对策.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于湖北省秭归县(30°38'14"—31°11'31" N, 110°00'14"—111°18'41" E),海拔40~2057 m. 该地区属于亚热带大陆性季风气候,年均气温16.9℃,极端最高温44℃,极端最低温-2.5℃,无霜期300~340 d^[9]. 年降水量1000~1250 mm,降雨集中在4—9月,空气相对湿度可达60%~80%^[10].

秭归县海拔500 m以下以茶园、板栗、柑橘和农田为主,海拔500 m以上主要为灌木、马尾松、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和松-栎混交林等^[11]. 秭归县马尾松人工林总面积536233 hm²,总蓄积量266.04万m³,占全县林地面积的48.8%、活立木总蓄积量的64.2%. 本文研究的马尾松中龄林、近熟林、成熟林林下灌木多为油茶(*Camellia oleifera*)和檵木(*Loropetalum chinense*)、毛黄栌(*Cotinus coggygia*)等,草本多为稗草(*Echinochloa crusgalli*)、腹水草(*Veronicastrum axillare*)等,样地基本概况见表1.

1.2 实验设计及取样

1.2.1 凋落物生物量(产量和现存量) 2010年6月底,在不同年龄马尾松人工林中分别随机放置孔径为1 mm、大小为1 m \times 1 m的尼龙网收集器各10个,固定在林下离地面50 cm高处的支架上. 2010年7月—2011年6月每月底收集一次,将收集到的凋落物按叶、枝、皮、花果和杂物分类,70℃下烘干后称量.

2010年8月,在不同年龄马尾松人工林下分别随机选取具有代表性的1 m \times 1 m、近似“Z”字形分布的小样方各9个,每个小样方四角及中心测量凋落物厚度,取其平均值. 然后收集样方内所有凋落物,在自然条件下风干,每个样方分别取15 g具有代表性的凋落物在70℃下烘干后称量,并计算凋落物烘干和风干质量的转化系数.

1.2.2 根系生物量 根系采样方法和样品处理参照程瑞梅等^[12]方法,即于2010年7月底分别在不同年龄马尾松人工林中各设立3块20 m \times 20 m标准地,每木检尺. 用内径10 cm、筒长18 cm的根钻取样,每块样地选择5株标准木,分别在距离样木0.5、1.0、1.5和2.0 m处,随机选择3个方向作为取样点,每点按0~10、10~20、20~30、30~40和40~60 cm 5个层次采样. 近熟林因土层较薄,植株较密,在距离样木0.5、1.0及1.5 m处分4个垂直层次取样,放入编号的土壤袋中,带回实验室充分混

表 1 研究样地概况
Table 1 General situation of sampling sites

| 林分 Stand | 海拔 Elevation (m) | 年龄 Age (a) | 密度 Density (trees \cdot hm ⁻²) | 胸径 DBH (cm) | 坡度 Slope (°) | 坡向 Aspect | 郁闭度 Canopy density | 凋落物产量 Litterfall (t \cdot hm ⁻² \cdot a ⁻¹) | 凋落物 现存量 Litter standing (t \cdot hm ⁻²) | 凋落层厚度 Litter layer depth (cm) |
|-------------|------------------------|------------------|--|-------------------|--------------------|--------------|--------------------------|---|---|--|
| I | 964 | 20 | 800 | 16.1 | 20 | S | 0.60 | 3.38 \pm 0.72 | 9.35 \pm 5.14 | 4.03 \pm 1.59 |
| II | 357 | 30 | 725 | 25.3 | 25 | Ss | 0.95 | 4.69 \pm 0.20 | 9.26 \pm 2.97 | 5.77 \pm 0.85 |
| III | 987 | 46 | 575 | 33.1 | 15 | S | 0.85 | 5.60 \pm 0.23 | 14.05 \pm 6.40 | 6.34 \pm 1.99 |

I:中龄林 Middle-aged stand; II:近熟林 Nearly mature stand; III:成熟林 Mature stand. 下同 The same below. S:阳坡 Sunny; Ss:半阴坡 Semi-shady.

匀后,进行样品的处理与分析.

1.2.3 土壤 土壤采集小样方与凋落物现存量样方相同. 于2010年8月在不同林分的9个小样方中分别用直径为5 cm的土钻,沿对角线采0~5、5~10、10~20、20~30、30~40和40~60 cm深度的土壤各取5钻,将任意3个样方的同层土壤分别合并,每土样重复3次. 土壤容重采用容积为100 cm³的环刀测定. 将每个土壤样品分成2份:一份样品去掉石砾、动植物残体、根系后,混匀,过2 mm筛,剩余部分装入保鲜袋后保存在4℃冰箱中,待测土壤铵态氮和硝态氮;另一份样品风干、粉碎后,过1 mm和0.25 mm筛,装入保鲜袋待测土壤养分.

1.3 测定方法

土壤物理性质分析方法^[13]:利用环刀法测定容重、土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和通气度;土壤颗粒组成采用吸管法测定.

土壤养分指标采用中华人民共和国林业行业标准方法进行测定^[14]:用重铬酸钾外加热法测定有机质;用重铬酸钾-硫酸消化法测定全氮;用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定速效磷;用酸度计法测定pH值. 铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)采用意大利生产的SmartChem 140型化学间断分析仪测定. 同时,称取20 g新鲜的土壤于105℃烘箱中放置12 h,测定土壤含水量.

1.4 数据处理

利用SigmaPlot 11.0和SPSS 16.0软件对数据进行统计分析和作图. 各变量间的显著性检验采用单因子方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD),显著性水平设定为α=0.05. 图表中数据均用平均值±标准差表示.

2 结果与分析

2.1 不同年龄马尾松人工林凋落物和根系生物量

特征

2.1.1 凋落物生物量 马尾松成熟林凋落物年产量5.60 t·hm⁻²·a⁻¹,比近熟林和中龄林分别高19.4%和65.7%. 凋落物总量的月动态变化均为单峰模式,即11月最高,2月最低(图1). 其中,中龄林、近熟林和成熟林11月和2月的凋落物量分别占年凋落量的39.2%、1.5%、45.6%、0.6%、27.8%、1.5%.

2010年8月采集的马尾松成熟林凋落物现存量与中龄林、近熟林差异显著,其大小顺序为成熟林(14.05 t·hm⁻²)>中龄林(9.35 t·hm⁻²)>近熟林(9.26 t·hm⁻²)(图1). 周转系数(凋落物量/现存量)大小顺序为近熟林(0.51)>成熟林(0.40)>中龄林(0.36).

2.1.2 根系生物量 不同年龄马尾松人工林2010年7月根系总生物量、活根及死根生物量均为中龄林最高,近熟林最低(表2). 近熟林根系总生物量分别是中龄林、成熟林的51.1%和82.0%;3种林分的活根生物量差异较小,死根生物量差异较大. 马尾松人工林活根、死根占根系总生物量的比重差异显著,近熟林活根比重最高,为87.1%,中龄林最低,为62.9%.

不同年龄马尾松人工林各径级根系生物量及占总根系的比重明显不同(表2). 0~10 mm根系生物量依次为:中龄林>成熟林>近熟林,0~2 mm为中龄林>近成熟林>成熟林. 中龄林中0~1 mm细根生物量最低,近熟林及成熟林内1~2 mm细根生物量最低.

2.2 不同年龄马尾松人工林的土壤理化性质

2.2.1 土壤物理性质 由表3可以看出,不同年龄马尾松人工林土壤质地比重不同. 3种林分均是沙粒含量最高;中龄林和成熟林中粘粒含量最低,近熟林则是粉粒含量最低. 随着土层深度的增加,近熟林沙粒含量比重增加,成熟林则降低.

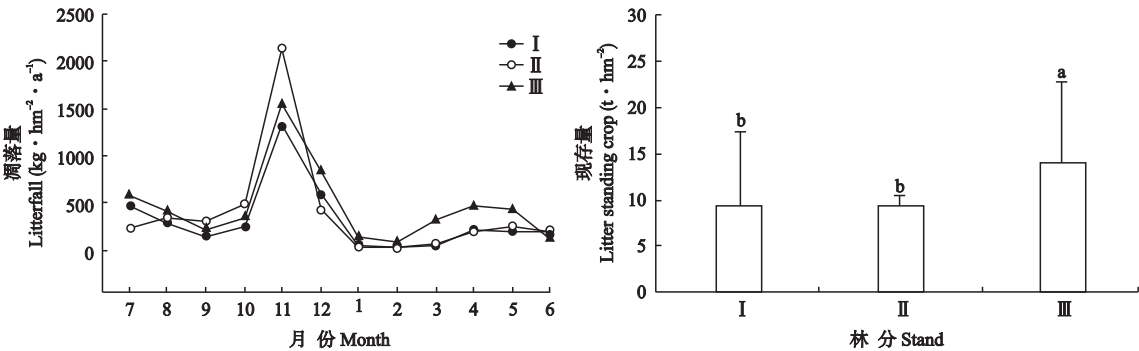


图1 不同年龄马尾松人工林凋落物月产量和现存量
Fig.1 Monthly litter dynamics and litter standing in different-aged *Pinus massoniana* plantations.
I:中龄林 Middle-aged stand; II:近熟林 Nearly mature stand; III:成熟林 Mature stand. 下同 The same below.

表 2 不同年龄马尾松人工林根系生物量^[12]
Table 2 Root biomass in different-aged *Pinus massoniana* plantations^[12]

| 林分类型 Stand type | 直径 Diameter (mm) | 生物量 Biomass (t · hm ⁻²) | | |
|--------------------|---------------------|-------------------------------------|------------------|---------------|
| | | 活根 Living roots | 死根 Dead roots | 总量 Total |
| I | 0~1 | 0.24 (5.08) cA | 0.09 (1.91) cA | 0.33 (6.99) |
| | 1~2 | 0.25 (5.30) cA | 0.10 (2.12) cA | 0.35 (7.42) |
| | 2~5 | 0.73 (15.47) bA | 0.34 (7.20) bA | 1.07 (22.67) |
| | 5~10 | 1.75 (37.08) aA | 1.22 (25.85) aA | 2.97 (62.92) |
| | 总计 Total | 2.96 (62.92) | 1.75 (37.08) | 4.72 (100.00) |
| II | 0~1 | 0.34 (14.11) bA | 0.06 (2.49) bA | 0.40 (16.60) |
| | 1~2 | 0.18 (7.47) bA | 0.01 (0.41) bA | 0.19 (7.88) |
| | 2~5 | 0.40 (16.60) bA | 0.04 (1.66) bC | 0.44 (18.26) |
| | 5~10 | 1.18 (48.96) aC | 0.20 (8.30) aB | 1.38 (57.26) |
| | 总计 Total | 2.10 (87.14) | 0.30 (12.86) | 2.41 (100.00) |
| III | 0~1 | 0.20 (6.62) bA | 0.09 (3.08) bA | 0.29 (9.70) |
| | 1~2 | 0.17 (5.66) bA | 0.06 (1.97) bA | 0.23 (7.63) |
| | 2~5 | 0.35 (11.74) bA | 0.13 (4.48) bB | 0.48 (16.22) |
| | 5~10 | 1.51 (51.39) aAB | 0.44 (15.06) aB | 1.96 (66.44) |
| | 总计 Total | 2.22 (75.40) | 0.72 (24.60) | 2.94 (100.00) |

不同小写字母表示同一林分不同径级间差异显著,不同大写字母表示不同林分同一径级间差异显著($P<0.05$) Different lowercase letters in the same column meant significant difference among different stem classes in the same stand, while different capital letters meant significant difference among different stands at the same stem class at 0.05 level. 下同 The same below.

不同年龄马尾松人工林土壤各层土壤孔隙度、容重变化不同。马尾松人工林土壤总孔隙度均随土层深度的增加而降低,每层均是中龄林最高,近熟林最低;土壤容重则随着土层深度的增加而增加,各层均是中龄林最小,近熟林最大,与土壤总孔隙度变化规律相反,即土壤容重越小,土壤总空隙越大。马尾松人工林土壤非毛管孔隙度在 8.7%~15.0% 之间。

2.2.2 土壤化学性质 不同年龄马尾松人工林各层

土壤的有机质、总氮含量均是成熟林>中龄林>近熟林(图 2),且随着土壤深度的增加,其影响力逐渐减弱。其中,0~5 cm 土壤铵态氮含量大小是中龄林>成熟林>近熟林,硝态氮含量则是近熟林>中龄林>成熟林。中龄林和成熟林的铵态氮含量比重较大,近熟林则是硝态氮含量比重较大(图 3)。随着年龄及土层深度的增加,20~30 cm 层总磷含量均先增加后降低,每层各年龄之间差异不大;有效磷含量的变化均不规律。各层土壤 pH 值均是近熟林最高,成熟林最低,呈微酸性,不同年龄马尾松人工林土壤垂直方向变化规律不一致。

2.2.3 土壤理化性质相关性 不同年龄马尾松人工林土壤理化性质关系紧密(表 4)。其中,土壤有机质含量与粉粒呈极显著正相关,与沙粒呈显著负相关;总氮含量与沙粒呈显著负相关;铵态氮与土壤容重、通气度呈极显著负相关,与粉粒呈正相关。pH 值与土壤物理性质关系最紧密,与粉粒、非毛管孔隙度呈极显著负相关,与沙粒、毛管孔隙度呈极显著正相关。

土壤物理性质间相互关系显著。土壤容重与通气度呈正相关;粉粒与非毛管孔隙度呈正相关;与粘粒、沙粒呈负相关,毛管孔隙度与总孔隙度呈极显著正相关,与非毛管孔隙度呈极显著负相关。

土壤化学性质间相关关系显著。土壤有机质与土壤总氮、铵态氮、总磷、有效磷含量呈极显著正相关;总氮与铵态氮、总磷、有效磷含量呈显著正相关;硝态氮与总磷呈极显著正相关;pH 与土壤有机质、铵态氮、总磷和有效磷均呈极显著负相关,与土壤总氮呈极显著正相关。

表 3 不同年龄马尾松人工林 0~20 cm 土壤的物理性质
Table 3 Physical properties of 0~20 cm soil in different-aged *Pinus massoniana* plantations

| 林分 Stand | 土层 Soil layer (cm) | 粉粒 Silt (%) | 粘粒 Clay (%) | 沙粒 Sand (%) | 非毛管 孔隙度 No capillary porosity (%) | 毛管 孔隙度 Capillary porosity (%) | 总孔隙度 Total porosity (%) | 土壤 通气度 Soil permeability (%) | 容重 Bulk density (g · m ⁻³) |
|-------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|---|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---|
| I | 0~5 | 23.67±7.72b | 19.00±2.36ab | 57.34±8.83a | 9.70±2.17b | 39.21±4.75a | 48.91±5.44a | 19.38±7.43b | 1.04±0.03a |
| | 5~10 | 31.18±4.72a | 17.64±2.33b | 53.90±6.28b | 13.60±1.46a | 33.28±1.32b | 46.88±1.90ab | 22.29±4.39a | 1.25±0.03a |
| | 10~20 | 20.39±7.03c | 20.39±4.00a | 59.22±8.01a | 10.00±2.85b | 33.98±3.26b | 43.98±0.51c | 16.73±4.62c | 1.26±0.01a |
| II | 0~5 | 19.82±6.69b | 22.32±9.31a | 57.86±4.55b | 8.71±2.68a | 34.58±2.41a | 43.29±2.65a | 30.00±3.37ab | 1.43±0.11c |
| | 5~10 | 16.99±5.19c | 18.24±3.62b | 64.76±2.41a | 8.53±0.31a | 34.36±3.57a | 42.89±3.42a | 28.93±5.52b | 1.48±0.13b |
| | 10~20 | 22.84±2.04a | 16.18±3.40b | 60.98±2.40a | 9.39±3.92a | 32.08±3.13a | 41.47±4.7a | 32.68±3.25a | 1.51±0.16a |
| III | 0~5 | 34.72±2.13ab | 14.96±4.81c | 50.32±5.57a | 11.66±0.18b | 44.16±5.61a | 45.82±5.76a | 24.69±6.90c | 1.31±0.09c |
| | 5~10 | 31.25±2.09c | 19.02±2.20a | 49.74±4.3ab | 14.97±7.60a | 28.31±10.85b | 43.27±5.19a | 30.85±3.80b | 1.39±0.14ab |
| | 10~20 | 36.48±7.02a | 16.21±4.03ab | 47.31±4.01b | 14.71±2.95a | 26.89±9.61b | 42.60±9.32a | 35.62±7.17a | 1.46±0.06a |

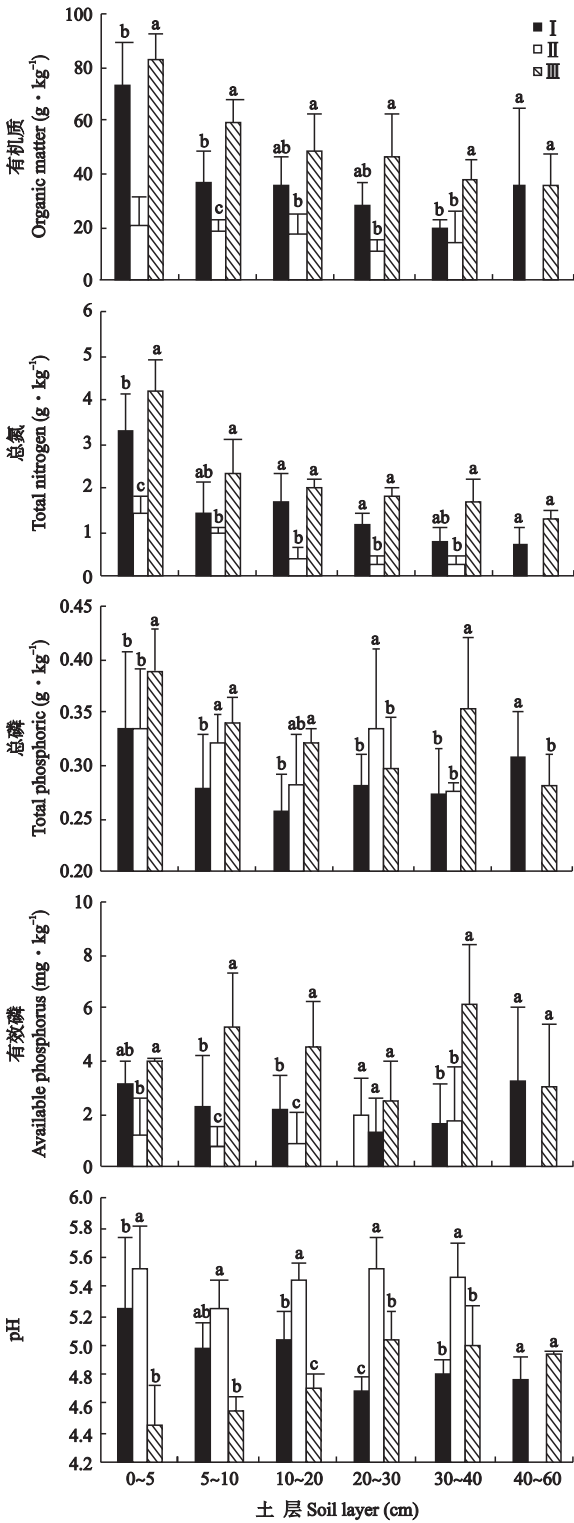


图2 不同年龄马尾松人工林0~60 cm土壤有机质、总氮、总磷和有效磷含量及pH值

Fig. 2 Organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus contents and pH value in 0–60 cm soil layer on different-aged *Pinus massoniana* plantations.

3 讨 论

3.1 不同年龄马尾松人工林凋落物、根系生物量

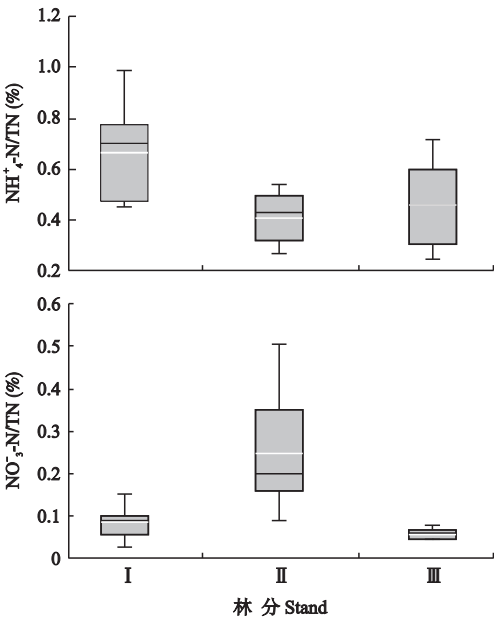


图3 不同年龄马尾松人工林0~20 cm土壤铵态氮、硝态氮与总氮的关系

Fig. 3 Relationship between ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen in 0–20 cm soil layer in different-aged *Pinus massoniana* plantations.

马尾松人工林凋落物产量随着林龄的增加而增加,主要与林分结构(如林分年龄、密度等)有关。本研究中,中龄林生长迅速,林分密度较大,但郁闭度和林下灌丛较小,导致凋落物量较低;近熟林处于干材迅速发育阶段,林内竞争激烈,总凋落物量较高;成熟林密度较小,但林下灌丛丰富,凋落物量较高。这与 Tang 等^[15]的研究结论一致。凋落物量及月变化主要依赖于树木的发育阶段和年龄^[16]。马尾松人工林凋落物量具有明显的季节动态,各凋落物组分所占比重有较大差异^[7-8],凋落物叶是最丰富的组织器官,本研究中凋落物叶比重是 17.7%~68.4%,比 Descheemaeker 等^[17]认为凋落物叶通常占总凋落物产量的 70%~85% 略低。Trap 等^[18]研究显示,凋落物产量与树木结构没有任何关系,成熟林分较高的叶生物量弥补了随年龄增加其密度的降低,使凋落物产量基本稳定。

有研究表明,在良好的立地上,随着树龄增加,根系生物量迅速增加,并在郁闭后调整到较低水平;而贫瘠立地上根系生物量的增幅要缓慢得多,并在郁闭后维持较高的水平^[19]。本研究中,马尾松人工林根系总生物量、活根及死根生物量均为中龄林最高,近熟林最低,可能因为本研究中没有选取幼龄林,而近熟林和成熟林郁闭度较高,根系总生物量维持在较低水平且差异不显著。不同年龄马尾松人工

表 4 不同年龄马尾松人工林 0 ~ 20 cm 土壤主要理化性质的相关系数
Table 4 Correlation coefficient between physical and chemical properties in 0–20 cm soil in different-aged *Pinus massoniana* plantations

| 指标 Index | 容重 Bulk density | 粉粒 Silt | 粘粒 Clay | 沙粒 Sand | 毛管孔 隙度 Capillary porosity | 非毛管 孔隙度 No capillary porosity | 总孔隙度 Total porosity | 通气度 Permeability | 有机质 Organic matter | 总氮 Total N | 铵态氮 Ammonium N | 硝态氮 Nitrate N | 总磷 Total P | 有效磷 Available P | pH |
|---------------------------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------------------------------|--|---------------------------|---------------------|--------------------------|------------------|----------------------|---------------------|------------------|-----------------------|----|
| 容重 Bulk density | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 粉粒 Silt | -0.290 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 粘粒 Clay | 0.087 | -0.471 * | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 沙粒 Sand | 0.209 | -0.839 ** | -0.046 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 毛管孔隙度 Capillary porosity | 0.111 | -0.238 | 0.129 | 0.195 | 1 | | | | | | | | | | |
| 非毛管孔隙度 No capillary porosity | -0.135 | 0.460 * | -0.271 | -0.354 | -0.538 ** | 1 | | | | | | | | | |
| 总孔隙度 Total porosity | 0.036 | 0.042 | -0.038 | -0.017 | 0.805 ** | 0.068 | 1 | | | | | | | | |
| 通气度 Permeability | 0.477 * | 0.223 | -0.026 | -0.292 | 0.028 | 0.348 | 0.278 | 1 | | | | | | | |
| 有机质 Organic matter | -0.303 | 0.597 ** | -0.206 | -0.589 ** | -0.171 | 0.212 | 0.053 | -0.099 | 1 | | | | | | |
| 总氮 Total N | -0.187 | 0.418 | -0.079 | -0.474 * | -0.283 | 0.196 | -0.197 | -0.116 | 0.904 ** | 1 | | | | | |
| 铵态氮 Ammonium N | -0.598 ** | 0.430 * | -0.071 | -0.418 * | -0.107 | 0.290 | 0.077 | -0.476 * | 0.725 ** | 0.652 ** | 1 | | | | |
| 硝态氮 Nitrate N | 0.316 | -0.065 | -0.070 | 0.091 | 0.044 | -0.131 | -0.040 | -0.048 | 0.085 | 0.255 | 0.091 | 1 | | | |
| 总磷 Total P | 0.232 | 0.332 | -0.184 | -0.345 | -0.424 * | 0.184 | -0.373 | 0.236 | 0.521 ** | 0.672 ** | 0.186 | 0.522 ** | 1 | | |
| 有效磷 Available P | -0.416 * | 0.380 | -0.006 | -0.457 * | -0.291 | 0.149 | -0.242 | 0.014 | 0.577 ** | 0.457 ** | 0.428 * | -0.207 | 0.207 | 1 | |
| pH | 0.367 | -0.584 ** | 0.213 | 0.550 ** | 0.521 ** | -0.528 ** | 0.245 | -0.153 | -0.620 ** | 0.624 ** | -0.498 ** | 0.103 | -0.494 ** | -0.622 ** | 1 |

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

林细根垂直分布表层化,且随土层的加深,其生物量明显减少;47.5% ~ 71.7% 的活细根主要分布在 0 ~ 20 cm 土壤,而 2 ~ 10 mm 根系生物量则主要分布于 20 ~ 60 cm 土壤,这与周玮和周运超^[20]对贵州马尾松林的研究结果基本一致.程云环等^[21]研究表明,落叶松(*Larix gmelini*)细根 83% 分布在土壤表层(0 ~ 20 cm),仅有 17% 分布在 20 ~ 30 cm 土壤.活细根表层化(如针叶林分),30% ~ 80% 的细根发生在土壤表层 10 cm 中,这是因为表层土壤水分变化较大,接收雨水的机会较多,经历极端干旱的可能性也较大,必然影响细根的生产和周转^[22].此外,也可能与细根的发生和死亡分解密切相关.

3.2 不同年龄马尾松人工林土壤理化性质

森林土壤的物理性质主要反映在土壤的固相、液相、气相等方面,三者之间相互协调、比例适当时,土壤才表现出林木生长所需的最好的物理性质^[23].不同颗粒等级土壤中的微生物差异很大,其中黏粒部分土壤微生物的多样性较高,细菌数量多,主要通过减少被土壤动物捕食的机会,增加土壤环境的多

样性^[3].这与本研究中近熟林沙粒含量、容重较高,总孔隙度较低的结果相一致.有研究表明,在马尾松天然林从幼龄林到成熟林的演替过程中,土壤容重变小^[24],与本研究中龄林到成熟林容重变大不一致.可能因为土壤有机质含量高,结构性好的土壤容重较小,土壤有机质(尤其是腐殖质)可以促进团粒结构的形成,故富含有机质的土壤,其孔隙度均较高^[3].这与本研究中马尾松人工林土壤有机质变化规律一致.

土壤肥力的基础是养分元素含量的高低.近熟林凋落物产量适中,而周转系数最大(0.51),土壤主要养分较低,可能因为近熟林密度大于成熟林,养分利用率较高^[25];坡度比中龄林大,夏季炎热多雨,凋落物周转比中龄林快,归还的养分流失严重,不利于养分积累.良好的土壤物理结构、通气性,有利于土壤养分的贮存和土壤肥力的增强.

3.3 不同年龄马尾松人工林凋落物、根系生物量对土壤理化性质的影响

不同年龄马尾松人工林凋落物和根系对土壤物

理性质的影响显著. 郑思俊等^[26]对上海外环线人工林土壤物理性质的研究表明, 凋落物年凋落量与绿地群落 0 ~ 10 cm 土壤毛管孔隙度呈显著负相关, 与土壤容重呈显著负相关; 这与本研究中成熟林凋落物量比中龄林高, 土壤容重比中龄林低的结果相一致. 张庆费等^[27]研究表明, 森林群落演替过程中土壤容重的变化与凋落物量、凋落物组成有关. 根系的根长密度与比根长较大, 根系腐烂后能提供与根系体积等量的土壤空隙, 对土壤理化性质的改良比地上部分的凋落物更具有意义^[5]. 本研究中, 中龄林土壤容重小、孔隙度较大, 成熟林次之, 近熟林最低, 这与马尾松人工林根系生物量变化一致, 也与黄琳琳等^[28]在黄土地陵人工油松林的研究结果一致. 因此, 土壤根系生物量增加可以改善土壤的容重和土壤孔隙度.

不同年龄马尾松人工林凋落物和根系对土壤化学性质影响显著. Aerts 等^[29]研究表明, 土壤养分供应和养分循环的正反馈作用通过凋落物产量的增加而加强. 凋落物是森林生态系统土壤养分的重要来源^[30-31]. 本研究中凋落物产量、现存量与土壤养分含量变化不一致, 说明凋落物对土壤养分的影响主要取决于凋落物周转率, 与林分土壤母质、坡度、年龄、林下植被等有关. 因此, 凋落物对土壤养分的作用仍需长期跟踪研究. 马尾松人工林根系生物量对土壤化学性质影响明显. 研究发现, 细根年净生产量为 $20 \sim 1317 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占林分总净初级生产量的 3% ~ 84%^[19]; 许多树种的细根死亡后对土壤 C 库的贡献高达 25% ~ 80%, 提供的 N 为 $29 \sim 255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在某些生态系统中, 甚至超过地上部分的 18% ~ 45%^[5]. 本研究中马尾松中龄林根系生物量最高, 近熟林最低, 与土壤养分含量变化趋势相同, 说明根系生物量的变化与土壤养分的变化一致. 有研究表明, 温带森林细根周转进入土壤的有机物占总输入量的 14% ~ 86.8%^[19]. 因此, 土壤根系生物量的输入与土壤养分含量基本保持一致.

总之, 马尾松人工林凋落物和根系生物量与土壤理化性质相互影响, 受土壤养分的调节. 葛晓改等^[32]研究表明, 土壤养分含量调节凋落物基质质量, 土壤养分含量高, 凋落物基质质量高; 土壤养分通过影响根系活力和碳水化合物的分配, 进而影响根系/细根的生产和周转, 且在土壤养分比较贫瘠的立地上表现尤其明显; 土壤养分有效性通过植物组织化学性质的改变间接影响根的分解速率^[33]. 根系生物量的垂直分布随着土层的加深而减少, 且多集

中分布在土壤表层, 主要是受到土壤理化性质和温度、水分含量的影响. 马尾松中龄林土壤养分含量比近熟林高, 与中龄林根系生物量比近熟林高一致; 马尾松人工林根系生物量、根长密度及比根长与土壤有效性养分也存在显著正相关关系.

参考文献

- [1] Huang C-Y (黄昌勇). Pedology. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [2] Chang C (常超), Xie Z-Q (谢宗强), Xiong G-M (熊高明), et al. Characteristics of soil nutrients of different vegetation types in the Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29** (11): 5978-5985 (in Chinese)
- [3] Wang G (王果). Pedology. Beijing: Higher Education Press, 2009 (in Chinese)
- [4] Wang S-L (汪思龙), Chen C-Y (陈楚莹). Ecology on Forest Litterfall. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)
- [5] Zhang X-J (张秀娟), Mei L (梅莉), Wang Z-Q (王政权), et al. Advances in studying fine root decomposition in forests. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 2005, **22**(2): 246-254 (in Chinese)
- [6] Zhou Z-X (周正贤). Chinese Pine. Beijing: China Forestry Press, 2000 (in Chinese)
- [7] Yang H-X (杨会侠), Wang S-L (汪思龙), Fan B (范冰), et al. Dynamics of annual litter mass and nutrient return of different age Masson pine plantations. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2010, **29** (12): 2334-2340 (in Chinese)
- [8] Tian D-L (田大伦), Ning X-B (宁晓波). Studies of the amount of litter and nutrient restitution in different age of classes *Pinus massoniana* plantation. *Journal of Central-South Forestry University* (中南林业学院学报), 1995, **15**(2): 163-169 (in Chinese)
- [9] Jiang H-H (姜欢欢), Li J-H (李继红), Fan W-Y (范文义), et al. Landscape pattern change and its simulation forecast in Zigui County of Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(2): 474-479 (in Chinese)
- [10] Lei J-P (雷静品), Xiao W-F (肖文发), Huang Z-L (黄志霖), et al. Responses of ring width of *Pinus massoniana* to the climate change at different elevations in Zigui County, Three-Gorge Reservoir Area. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2009, **45**(2): 33-39 (in Chinese)
- [11] Zeng L-X (曾立雄), Xiao W-F (肖文发), Huang Z-L (黄志霖), et al. Soil infiltration capacity of conversion of cropland to forest in Lanlingxi small watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24**(3): 199-202 (in Chinese)
- [12] Cheng R-M (程瑞梅), Wang R-L (王瑞丽), Xiao W-F (肖文发), et al. Spatial distribution of root biomass of *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reser-

- voir area, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(2): 823–832 (in Chinese)
- [13] Lu R-K (鲁如坤). Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [14] State Forestry Administration (国家林业局). Standard Analysis Method of Forest Soil. Beijing: China Standards Press, 2000 (in Chinese)
- [15] Tang JW, Cao M, Zhang JH, *et al.* Litterfall production, decomposition and nutrient use efficiency varies with tropical forest types in Xishuangbanna, SW China: A 10-year study. *Plant and Soil*, 2010, **335**: 271–288
- [16] Yao R-L (姚瑞玲), Ding G-J (丁贵杰), Wang Y (王胤). The annual variation feature of litter and nutrient restitution in different density *Pinus massoniana* plantation. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences) (南京林业大学学报·自然科学版), 2006, **30**(5): 83–86 (in Chinese)
- [17] Descheemaeker K, Muys B, Nyssen J, *et al.* Litter production and organic matter accumulation in exclosures of the Tigray highlands, Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 2006, **233**: 21–35
- [18] Trap J, Bureau F, Brethes A, *et al.* Does moder development along a pure beech (*Fagus sylvatica* L.) chronosequence result from changes in litter production or in decomposition rates? *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 1490–1497
- [19] Zhang X-Q (张小全). Fine-root biomass, production and turnover of trees in relations to environmental conditions. *Forest Research* (林业科学研究), 2001, **14**(5): 566–573 (in Chinese)
- [20] Zhou W (周玮), Zhou Y-C (周运超). Study on fine root of *Pinus massoniana* and soil nutrient contents. *Journal of Zhejiang Forestry Science & Technology* (浙江林业科技), 2009, **29**(6): 6–10 (in Chinese)
- [21] Cheng Y-H (程云环), Han Y-Z (韩有志), Wang Q-C (王庆成), *et al.* Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length and soil resource availability in a *Larix gmelini* plantation. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29**(3): 403–410 (in Chinese)
- [22] Jiang J, Xu LF. The research progress of fine root trees. *China's Foreign Trade*, 2011, **4**: 369
- [23] Lin D-Y (林大仪). Guide on Soil Test. Beijing: China Forestry Press, 2004 (in Chinese)
- [24] You X-H (游秀花). Dynamics of soil physical and chemical properties in different succession stages of *Pinus massoniana* natural forests. *Journal of Fujian College of Forestry* (福建林学院学报), 2005, **25**(2): 121–124 (in Chinese)
- [25] Ge X-G (葛晓改), Xiao W-F (肖文发), Zeng L-X (曾立雄), *et al.* Relationships between soil nutrient contents and soil enzyme activities in *Pinus massoniana* stands with different ages in Three Gorges Reservoir Area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(2): 445–451 (in Chinese)
- [26] Zheng S-J (郑思俊), Zhang Q-F (张庆费), Wu H-P (吴海萍), *et al.* Effects of greenbelt plant communities' litterfall in Shanghai Outer Ring on soil water physical properties. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(7): 1122–1126 (in Chinese)
- [27] Zhang Q-F (张庆费), You W-H (由文辉), Song Y-C (宋永昌). Influence of plant community succession on soil physical properties in Tiantong Forest Park, Zhejiang Province. *Journal of Plant Resources and Environment* (植物资源与环境), 1997, **6**(2): 36–40 (in Chinese)
- [28] Huang L-L (黄琳琳), Chen Y-M (陈云明), Zhang S (张升), *et al.* Distribution characteristics of fine root and soil properties in artificial *Pinus tabulaeformis* forest in Loess hilly region. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2011, **31**(4): 37–41 (in Chinese)
- [29] Aerts R, Caluwe HD. Nutritional and plant-mediated controls on leaf litter decomposition of *Carex* species. *Ecology*, 1997, **78**: 244–260
- [30] Pan K-W (潘开文), He J (何静), Wu N (吴宁). Effect of forest litter on microenvironment conditions of forestland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(1): 153–158 (in Chinese)
- [31] Maisto G, Marco AD, Meola A, *et al.* Nutrient dynamics in litter mixtures of four Mediterranean maquis species decomposing in situ. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 520–530
- [32] Ge X-G (葛晓改), Xiao W-F (肖文发), Zeng L-X (曾立雄), *et al.* Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged *Pinus massoniana* stands. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(3): 852–862 (in Chinese)
- [33] Prescott CE. Do rates of litter decomposition tell us anything we really need to know? *Forest Ecology and Management*, 2005, **220**: 66–74

作者简介 葛晓改,女,1982年生,博士研究生。主要从事森林生态、土壤碳循环方面的研究。E-mail: gexiaogai2006@163.com

责任编辑 李凤琴