

氮添加对油松不同径级细根分解及其养分释放的影响

谷利茶¹ 王国梁^{1,2*} 景航² 姚旭²

(¹中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 采用4个梯度的林地氮处理(N_0 、 N_3 、 N_6 和 N_9 依次为0、3、6和9 g N·m⁻²·a⁻¹)利用分解袋试验,研究了N添加对油松不同径级细根分解及养分释放过程的影响。结果表明:细根分解过程分为快速分解(0~60 d)和慢速分解(60~300 d)两个阶段。0~0.4、0.4~1和1~2 mm细根分解的质量百分数在第60天分别为7.6%、10.4%和11.4%,在第300天分别为19.8%、23.5%和30.5%,说明较细的根系分解较慢。N添加显著降低了0~0.4 mm细根的分解速率,但对0.4~1和1~2 mm细根分解速率无显著影响。与对照(N_0)相比, N_3 、 N_6 和 N_9 处理试验期间分解速率分别降低2.1%、4.5%和5.8%。N添加显著增加了0~0.4和0.4~1 mm细根C和N残留率,但对1~2 mm细根C和N残留率无显著影响,且对3个径级细根P残留率无显著影响。与对照相比, N_3 、 N_6 和 N_9 处理分别增加了0~0.4 mm细根中8.1%、9.4%和4.5%的C残留率和5.3%、16.3%和16.7%的N残留率;同时增加了0.4~1 mm细根中2.5%、2.5%和0.9%的C残留率和0.9%、2.3%和3.9%的N残留率。0~0.4、0.4~1 mm细根C、N、P迁移模式总体表现为直接释放,而1~2 mm细根N为富集-释放模式。氮沉降可能主要通过影响0~0.4 mm细根(主要为1和2级细根)的分解过程,从而降低细根的分解速率。

关键词 N沉降; 细根分解; 养分释放; 根径

Response of decomposition and nutrient release in different diameter fine roots of *Pinus tabulaeformis* plantation to N addition. GU Li-cha¹, WANG Guo-liang^{1,2*}, JING Hang², YAO Xu² (¹Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: We examined the effects of four nitrogen (N) addition treatments, i.e., N_0 (0 g N·m⁻²·a⁻¹), N_3 (3 g N·m⁻²·a⁻¹), N_6 (6 g N·m⁻²·a⁻¹) and N_9 (9 g N·m⁻²·a⁻¹) on the decomposition and nutrient release processes of fine roots with different diameters in *Pinus tabulaeformis* plantation using litterbag method. The results showed that the decomposition process of fine roots could be divided into rapid (0–60 d) and slow (60–300 d) decomposition stages. The decomposition mass percentages of fine roots with 0–0.4 mm, 0.4–1 mm and 1–2 mm were 7.6%, 10.4% and 11.4% on the 60th day and 19.8%, 23.5% and 30.5% on the 300th day, respectively, indicating that finer root had lower decomposition rates. N addition reduced significantly the decomposition rates of fine roots with 0–0.4 mm diameter, but had no significant influence on those of root with 0.4–1 mm and 1–2 mm diameters. Compared with the control, N_3 , N_6 and N_9 treatments reduced the decomposition rates by 2.1%, 4.5% and 5.8%, respectively. N addition increased both the C and N remaining percentages of fine roots with 0–0.4 mm and 0.4–1 mm diameters, but had no significant influence on those with 1–2 mm diameters. Additionally, P remaining percentages of fine roots had no response to the N addition. Compared with the control, N_3 , N_6 and N_9 treatments increased the root C remaining percentages by 8.1%, 9.4% and 4.5% in 0–0.4 mm diameter roots, and 2.5%,

本文由国家自然科学基金项目(41371508)和中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306-2)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41371508) and the Key Projects of Chinese Academy of Sciences (KFZD-SW-306-2).

2016-12-30 Received, 2017-05-26 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: glwang@nwsuaf.edu.cn

2.5% and 0.9% in 0.4–1 mm diameter roots, respectively. Similarly, N_3 , N_6 and N_9 treatments also increased the root N remaining percentages by 5.3%, 16.3% and 16.7% in 0–0.4 mm diameter roots and 0.9%, 2.3% and 3.9% in 0.4–1 mm diameter roots, respectively. The transfer models for C, N and P in 0–0.4 mm and 0.4–1 mm diameters were direct releasing, and the transfer models for N showed an enriching-releasing model. N deposition may decrease the fine root decomposition rates mainly by affecting the decomposition process of fine roots with 0–0.4 mm diameters (mainly the first two order roots).

Key words: nitrogen deposition; fine root decomposition; nutrient release; root diameter.

细根是吸收水分和养分的重要器官,并且在全球物质循环和能量流动中起重要作用.细根分解是森林生态系统养分和能量循环的重要环节^[1],细根分解过程中释放的氮、磷等养分影响着植物生长和土壤生物活动,通过细根分解进入土壤的有机物占总输入量的 14%~86.8%^[2-3],细根归还给土壤的碳是地上凋落物的 4~5 倍^[4-5].因此,细根分解是地下养分和有机质输入的主要来源^[6],在地下生态系统过程中发挥着不可替代的作用.近年来,细根分解研究已成为全球 C、N 等养分循环,尤其是全球碳平衡的核心环节^[7-8].但细根位于地下,研究难度较大,因此目前对细根分解的研究远低于凋落叶分解研究^[9],并且对细根的研究主要集中在细根分解过程、影响细根分解因子等方面^[10-12].

有研究表明,细根具有显著层级结构,直径<2 mm 的根是一个复杂的异质性细根系统,不同根序和径级的细根在形态、解剖、化学组成、生理功能和分解速率上具有显著差异^[13-16].低级根一般寿命短、周转快,执行水分和养分吸收功能;高级根寿命较长、周转慢,执行水分及养分运输和贮存功能.其中,养分含量、化学组成、解剖结构等会导致其在分解和养分释放等方面产生差异,并且不同径级和根序细根分解速率存在显著差异^[17-19].

在影响细根分解的环境因素中,土壤有效氮的影响逐渐引起生态学家的关注^[20].因为在全球范围内大气氮沉降持续增加的情况下,土壤有效氮可通过影响细根分解和养分释放过程改变生态系统碳在土壤、植物等主要碳库的分配格局,进而影响全球生态系统的碳平衡和养分循环过程^[7-8, 21],因此了解 N 是如何影响细根分解,对于预计大气氮沉降增加对生态系统的影响至关重要.不同径级和根序细根在养分含量或化学组成、解剖结构上具有差异.有研究发现,不同径级和根序细根的上述特征对 N 添加的响应不同^[22-23],但是关于土壤有效氮对不同径级和根序细根分解影响的过程和机理尚不清楚,氮沉降对细根分解及其养分释放的影响研究还存在着很大

的局限性.在持续氮沉降背景下,凋落物分解过程以及养分释放是如何变化的,对于研究土壤碳贮存具有重要意义.

因此,本文以黄土高原中龄人工油松林为对象,采用 4 个梯度的林地氮处理(N_0 、 N_3 、 N_6 和 N_9 依次为 0、3、6 和 9 g N · m⁻² · a⁻¹)通过分解袋试验,研究了林地 N 添加对油松不同径级细根分解及其养分释放的影响,以期了解全球氮沉降可能通过影响哪些径级细根的分解过程来影响细根的分解速率,为理解大气氮沉降对油松细根分解的潜在影响,以及人工油松林生态系统管理提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省宜川县铁龙湾林场,地处黄龙山林区东缘(35°39' N, 110°6' E).本区具有明显的大陆性季风气候特征,四季分明,年均温 9.7 °C,年降水量 584.4 mm,但降水分布不均,多集中在 7—9 月,占年降水量的 60% 以上.地貌为黄土梁状丘陵,海拔 860~1200 m,坡度 20°~25°,土壤为原生(山坡)或次生(沟谷)黄土.林下枯枝落叶层厚 3~5 cm.地带性植被是暖温带落叶阔叶林,松栎林为顶极群落.试验地油松林于 1966 年营造,面积为 600 hm².林下灌木主要有:胡颓子(*Elaeagnus umbellata*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、忍冬(*Lonicera japonica*)等;草本植物主要为大披针苔草(*Carex lanceolata*).

1.2 试验设计

2010 年中国平均氮沉降量为 0.1~7.43 g N · m⁻² · a⁻¹,部分地区每年增加 0.034 g N · m⁻² · a⁻¹^[24].本试验设置 4 个处理:对照(N_0)、低氮沉降量(N_3)、中氮沉降量(N_6)、高氮沉降量(N_9),年施氮量分别为 0、3、6、9 g N · m⁻² · a⁻¹,肥料选用尿素.由于氮沉降主要以湿沉降为主,冬季氮沉降相对较低,因此选择每年 4、6、8、10 月 4 次等量喷施尿素.2014 年 3 月在林区选取 16 块相似的油松林小区,

整个样地分为 4 个施氮区域, 每个区域用铁丝围封。每一个施氮区域内设置 4 个样地, 样地面积为 10 m×10 m, 样地间隔为 5 m。自 2014 年 4 月开始, 采用喷雾器对试验田土壤直接喷施以模拟氮沉降, 对照样方喷洒等量的水。每次施肥于雨前一天喷施, 以尽量减少尿素挥发。

2015 年 10 月, 选取 5 年生不施任何肥料的油松幼苗为细根材料(位于氮沉降处理样方外), 进行现场挖掘油松幼苗根系, 挖取发育相对完整的根系, 编号后放入塑料袋内, 并用 100 目筛网在流水中冲洗, 将所有根系用蒸馏水清洗干净后置于阴凉处风干, 按根系直径分为 3 级(<0.4、0.4~1、1~2 mm), 将所有同一径级细根混合均匀, 并称取 7.5 g 样品, 装入长宽均为 10 cm 的 80 目分解袋内, 使细根平整均匀分布。不同径级分解材料各选取 4 袋在 80 °C 下烘干至恒量, 粉碎后过 2 mm 筛, 标记为“初始样品”, 分析不同径级细根初始养分含量。2015 年 11 月将分解袋随机平埋入各施 N 处理的 10 cm 深的样地土层中, 表层覆盖林地凋落物。每样方随机放置 30 袋, 共计 492 袋。

1.3 数据采集及样品测定

2015 年 11 月—2016 年 9 月, 样品每 2 个月收集一次, 分 5 次(2016 年 1、3、5、7、9 月) 将各分解袋取回, 每次每个样地每种分解材料随机取 2 袋, 共计 96 袋。取回后风干, 去掉分解袋外面粘附的泥沙和杂物等, 剪开分解袋取袋内分解材料, 去除新长入的根, 装入纸样品袋并编号。在 65 °C 下烘干至恒量, 称其质量, 用于计算细根在分解过程中的质量损失率。并取出部分烘干样品, 粉碎过 1 mm 筛, 供化学分析用。全碳采用浓硫酸-重铬酸钾氧化法, 全氮采用微量凯氏法, 全磷采用钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理

各阶段细根质量残留率(MR) 计算式为:

$$MR = (X_1 / X_0) \times 100\%$$

式中: X_1 为该阶段干质量(g); X_0 为初始细根干质量(g)。利用 SPSS 18.0 软件对细根的质量残留率进行 Olson 负指数衰减模型拟合:

$$y = ae^{-kt}$$

式中: y 为质量残留率(%); a 为拟合参数; k 为年分解系数($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$); t 为时间(a) [25]。

采用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。利用一般线性模型对各处理各径级细根分解过程中质量残留率和元素残留率进行重复测量方差分析。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA) 和 LSD 法对每次取样质量残留率和元素残留率进行方差分析和多重比较($\alpha = 0.05$)。用 Pearson 法对油松不同径级细根分解速率与养分释放速率进行相关分析。利用 Excel 2013 软件作图。

2 结果与分析

2.1 N 添加对油松不同径级细根干质量残留率的影响

由图 1 可以看出, 对照和 N 处理下, 油松不同径级细根的分解过程都可分成 2 个阶段: 0~60 d, 快速分解阶段; 60~300 d, 慢速分解阶段。0~0.4、0.4~1、1~2 mm 细根在第 60 天分解的百分数分别为 7.6%、10.4%、11.4%, 第 300 天分解的百分数分别为 19.8%、23.5%、30.5%, 其中较细的根系分解较慢。

与对照(N_0) 相比, 施氮显著抑制了 0~0.4 mm 细根分解, 各处理细根分解系数均小于对照。在整个研究阶段(0~300 d), 与 N_0 相比, N_3 、 N_6 、 N_9 处理下, 分解速率降低了 2.0%、4.5%、5.8%, 快速分解过程

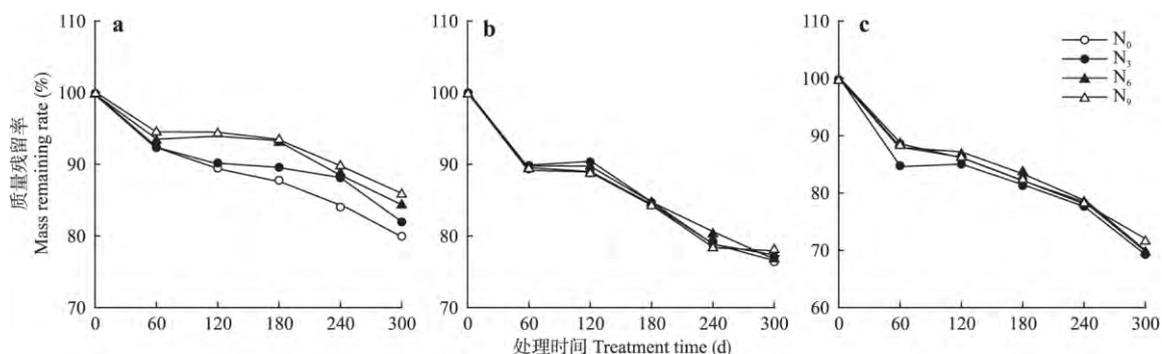


图 1 不同施氮处理下油松不同径级细根质量残留率

Fig.1 Mass remaining rate of different diameter fine roots of *Pinus tabuliformis* in different treatments.

a) 0~0.4 mm; b) 0.4~1 mm; c) 1~2 mm. N_0 : 对照 Control; N_3 : $3 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; N_6 : $6 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; N_9 : $9 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 下同 The same below.

中, N_3 、 N_6 、 N_9 处理分解速率分别降低 0.8%、4.7%、5.1%。慢速分解过程中, 分解速率分别降低 1.2%、0.1%、0.7%。N 添加对 0.4~1 mm 和 1~2 mm 细根的分解速率无显著影响, 与 N_0 相比, N_3 、 N_6 、 N_9 处理 0.4~1 mm 细根在整个过程中分解速率分别降低 0.7%、0.3%、1.8%; 而 N_3 处理 1~2 mm 细根分解速率增加了 0.4%。 N_6 、 N_9 处理细根降低了 0.2%、2.3%。

根据 Olson 模型计算得出 0~0.4 mm 细根分解系数(k)为 0.15~0.21, 0.4~1 mm 细根 k 值为 0.24~0.26, 1~2 mm 细根 k 值为 0.30~0.35。说明 0~0.4 mm 细根分解最快, 1~2 mm 细根分解最慢, 而年分解系数均表现出施 N 处理下低于 N_0 (表 1), 说明 N 添加对油松细根分解起到了一定的抑制作用。

2.2 N 添加对油松不同径级细根养分残留率的影响

2.2.1 对 C 残留率的影响 在整个研究阶段(0~300 d) 不同径级细根 C 均表现出释放模式, 并且所有径级细根 C 残留率都呈现波动式下降趋势(图 2)。

与 N_0 相比, 施 N 对 0~0.4 mm 细根 C 残留率有

表 1 油松不同径级细根质量残留率与时间的关系
Table 1 Relationships between mass residual rate of different diameter class fine roots of *Pinus tabulaeformis* and time

径级 Diameter class (mm)	处理 Treat- ment	回归方程 Regression equation	校正 决定系数 Adj R^2	分解系数 Decomposition constant ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)
0~0.4	N_0	$y = 96.93e^{-0.21x}$	0.82	$0.20 \pm 0.02 \text{Ac}$
	N_3	$y = 95.29e^{-0.16x}$	0.72	$0.15 \pm 0.02 \text{Ac}$
	N_6	$y = 99.89e^{-0.16x}$	0.74	$0.15 \pm 0.01 \text{Ac}$
	N_9	$y = 99.87e^{-0.15x}$	0.71	$0.14 \pm 0.02 \text{Ab}$
0.4~1	N_0	$y = 95.39e^{-0.26x}$	0.92	$0.26 \pm 0.01 \text{Ab}$
	N_3	$y = 95.58e^{-0.26x}$	0.86	$0.25 \pm 0.02 \text{Aab}$
	N_6	$y = 95.48e^{-0.25x}$	0.89	$0.25 \pm 0.02 \text{Ab}$
	N_9	$y = 94.34e^{-0.24x}$	0.85	$0.23 \pm 0.02 \text{Aab}$
1~2	N_0	$y = 96.15e^{-0.35x}$	0.88	$0.35 \pm 0.03 \text{Aa}$
	N_3	$y = 89.12e^{-0.31x}$	0.71	$0.31 \pm 0.03 \text{Aa}$
	N_6	$y = 96.25e^{-0.34x}$	0.84	$0.34 \pm 0.02 \text{Aa}$
	N_9	$y = 93.13e^{-0.30x}$	0.81	$0.30 \pm 0.03 \text{Aa}$

不同小写字母表示同一处理不同径级间差异显著, 不同大写字母表示同一径级不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different small letters meant significant difference among different diameter classes in the same treatment, and different capital letters meant significant difference among different treatments in the same diameter class at 0.05 level.

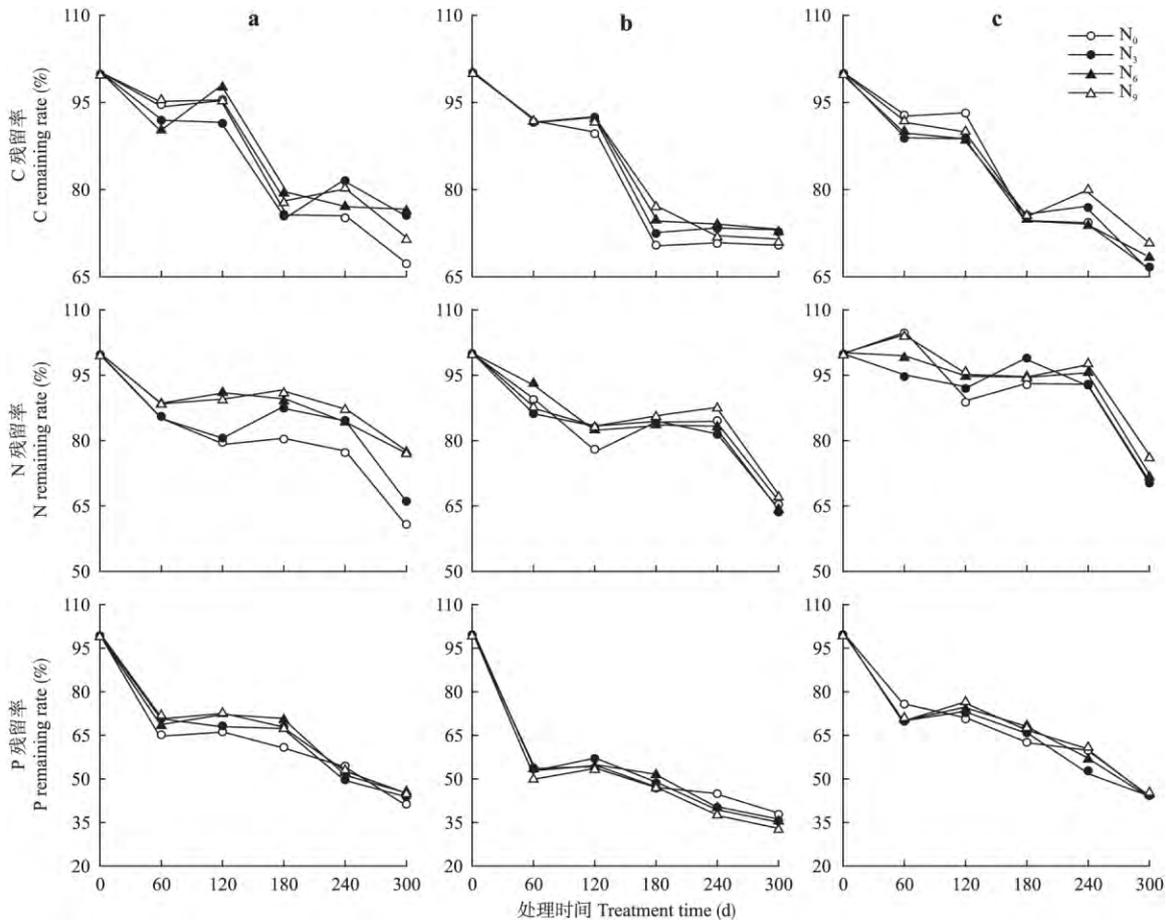


图 2 不同施氮处理下油松不同径级细根 C、N、P 残留率动态变化

Fig.2 Dynamics of C, N, P remaining of different diameter fine roots of *Pinus tabulaeformis* in different N treatments.

显著影响.在整个研究阶段,与 N_0 相比, N_3 、 N_6 、 N_9 处理 C 残留率分别增加 8.1%、9.4%、4.5%.N 添加对 0.4~1 mm 细根 C 残留率具有显著影响,与 N_0 相比, N_3 、 N_6 、 N_9 处理 0.4~1 mm 细根 C 残留率分别增加 2.5%、2.5%、0.9%,而施 N 对 1~2 mm 细根内 C 残留率无显著影响.

2.2.2 对 N 残留率的影响 在整个分解期间,0~0.4、0.4~1 mm 细根 N 均表现为释放,而 1~2 mm 细根在前 60 天有一定的富集,总体表现为富集-释放模式.最细两级根 N 释放速率快于 1~2 mm 细根,并且所有径级细根 N 残留率均呈现波动下降趋势(图 2).

与 N_0 相比,施 N 对 0~0.4 mm N 残留率具有显著影响.在整个分解期间,与 N_0 相比, N_3 、 N_6 、 N_9 处理 N 残留率分别增加 5.3%、16.3%、16.7%.N 添加对 0.4~1 mm 细根 N 残留率也有显著影响,与 N_0 相比, N_3 、 N_6 、 N_9 处理 0.4~1 mm N 残留率分别增加 1.0%、2.3%、3.9%,而施 N 对 1~2 mm 细根中 N 残留率无显著影响.

2.2.3 对 P 残留率的影响 在整个分解期间,不同径级细根 P 均表现出释放模式,并且所有径级细根 P 残留率均呈现波动下降趋势(图 2).

与 N_0 相比,施 N 对不同径级细根 P 残留率均无显著影响.在整个研究阶段,与 N_0 相比, N_3 、 N_6 、 N_9 处理 0~0.4 mm 细根的 P 残留率分别增加 2.1%、4.1%、3.2%;而施 N 促进了 0.4~1、1~2 mm 细根 P 释放,0.4~1 mm 细根 P 残留率分别降低 2.8%、1.7%、5.5%,1~2 mm 细根 P 残留率均降低 0.1%.

2.3 油松不同径级细根分解速率与养分释放速率的相关关系

表 2 表明,3 个径级细根的分解速率与 C、N 的释放速率呈显著正相关.但是,0.4~1、1~2 mm 细根的分解速率都与 P 的释放速率相关不显著.

表 2 油松不同径级细根分解速率与养分释放速率的相关关系

Table 2 Correlations between mass decomposition rate and nutrient release rate of the fine roots of *Pinus tabulaeformis* with different diameter classes

径级 Diameter class (mm)	碳释放率 C releasing rate	氮释放率 N releasing rate	磷释放率 P releasing rate
0~0.4	0.603*	0.656*	0.579*
0.4~1	0.598*	0.688*	0.071
1~2	0.870**	0.834**	0.375

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

3 讨 论

Berg 等^[26]指出,凋落物分解过程中出现明显的阶段性,一般前期分解较快而后期分解较慢.本研究发现,不同径级细根分解大致出现快、慢 2 个阶段,前 60 天干物质残留率曲线陡峭、分解速率较快,后 240 天干物质残留率曲线较为平稳、分解速率曲线较为缓慢.这与许多研究结果一致^[17-18, 27],可能是因为前期细根分解过程中参与代谢的可溶性物质、非结构性碳水化合物及易分解的结构纤维成分,不仅容易被雨水淋溶,还易被微生物利用,因此细根残留量迅速下降;而后期主要与难分解的含碳化合物有关,如木质素含量增多,导致细根分解缓慢^[28].不同径级细根由于其化学属性、形态结构等存在显著差异,造成不同径级细根分解速率可能存在差异.本研究表明,随着径级变小,细根分解速率逐渐降低,0~0.4 mm 细根分解速率最慢.这与近年来许多研究结果一致^[11, 17-19].Langley 等^[29]用菌根假说对细根中较细的根系比相对较粗的细根分解更慢这一现象进行了解释,认为较细的根更容易被 EM 菌根菌侵染,菌根鞘中含有丰富的几丁质,可能降低了较细根系的分解;有研究认为,碳质量较低的凋落物,微生物在分解过程中得到的能量较少,因而导致凋落物的分解速率较慢^[17];细根系统中直径较小的细根过高的氮含量可能也是造成 0~0.4 mm 细根比其他径级细根分解缓慢的一个原因^[30].

N 添加对不同径级细根分解率的影响不一致,分解系数越大,表明细根分解越快.从指数方程中的分解常数可以看出,不同径级均表现出 N_3 、 N_6 、 N_9 处理下年分解系数均低于对照(N_0),说明 N 添加对油松细根分解起到了一定的抑制作用.其中,施 N 处理显著抑制了 0~0.4 mm 细根分解,而对 0.4~1、1~2 mm 细根分解并没有产生显著影响.这与 Kou 等^[8]对湿地松(*Pinus elliottii*)的研究结果一致.可能是因为 0~0.4 mm 细根中较高的 N 浓度抑制了木质素酶的活性^[31],并且酸不溶性物质结合无机 N 离子增加,导致其分解速率降低. N 添加对不同径级细根分解的影响不同可以解释为各分解材料基质质量及所处的微环境差异导致的结果.

直径 < 2 mm 的根是一个复杂的异质性细根系统.低级根一般寿命较短、周转快,执行水分和养分的吸收功能;高级根寿命较长、周转慢,执行水分及养分运输和贮存功能.因此,细根系统中不同径级细根的养分释放,影响着细根对土壤养分的贡献.本研

究中, 细根分解过程中不同径级细根 C、P 的迁移模式均表现为直接释放, 0~0.4、0.4~1 mm 细根 N 也表现为直接释放, 而 1~2 mm 细根在分解初期(前 60 d) N 迁移模式表现为富集; 并且 N、P 养分释放总体表现为最细两级根(0~0.4、0.4~1 mm) 养分释放快于 1~2 mm 细根。Goebel 等^[32] 研究表明, 与高级根相比, 低级根虽然质量损失较慢, 但其 N 释放较快。Wang 等^[18] 研究也表明, 直径<0.5 mm 的根分解时表现为 N 释放, 而直径在 0.5~2.0 mm 的细根分解时存在 N 富集的阶段。细根元素含量的变化对氮沉降的响应因树种、分解阶段和外加氮水平的不同而有所差异。本研究中, N 添加显著增加了 0~0.4、0.4~1 mm 细根 C、N 的残留率, 而对 1~2 mm 细根没有显著影响。不同施氮处理分解过程中元素的迁移模式没有因为外源 N 的输入而打破。这可能是由于施 N 显著增加了 0~0.4 mm 细根中 C、N 含量, 而外源 N 与木质素分解过程中产生的中间产物(如多酚等) 发生反应并被固定至凋落物中^[33], 致使凋落物中抗分解物质增加, 导致更多的 C、N 累积于凋落物中。

参考文献

- [1] Gholz HL, Wedin DA, Smitherman SM, et al. Long-term dynamics of pine and hardwood litter in contrasting environments: Toward a global model of decomposition. *Global Change Biology*, 2000, **6**: 751-765
- [2] Vogt KA, Vogt DJ, Palmiotto PA, et al. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil*, 1995, **187**: 159-219
- [3] Parton W, Silver WL, Burke IC, et al. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 2007, **315**: 361-364
- [4] Fahey TJ, Arthur MA. Further studies of root decomposition following harvest of a northern hardwoods forest. *Forest Science*, 1994, **40**: 618-629
- [5] Song S (宋 森), Gu J-C (谷加存), Quan X-K (全先奎), et al. Fine root decomposition of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelini* plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2008, **32**(6): 1227-1237 (in Chinese)
- [6] Steinaker DF, Wilson SD. Belowground litter contributions to nitrogen cycling at a northern grassland-forest boundary. *Ecology*, 2005, **86**: 2825-2833
- [7] Ostertag R, Hobbie SE. Early stages of root and leaf decomposition in Hawaiian forests: Effects of nutrient availability. *Oecologia*, 1999, **121**: 564-573
- [8] Kou L, Chen W, Zhang X, et al. Differential responses of needle and branch order-based root decay to nitrogen addition: Dominant effects of acid-unhydrolyzable residue and microbial enzymes. *Plant and Soil*, 2015, **394**: 315-327
- [9] Silver WL, Miya RK. Global patterns in root decomposition: Comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, 2001, **129**: 407-419
- [10] Hendricks JJ, Hendrick RL, Wilson CA, et al. Assessing the patterns and controls of fine root dynamics: An empirical test and methodological review. *Journal of Ecology*, 2006, **94**: 40-57
- [11] Huang Z, Clinton PW, Baisden WT, et al. Long-term nitrogen additions increased surface soil carbon concentration in a forest plantation despite elevated decomposition. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, **43**: 302-307
- [12] Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG, et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, **70**: 153-226
- [13] Liu Y (刘 莹), Wang G-L (王国梁), Liu G-B (刘国彬), et al. Difference and inherent linkage of root characteristics in different root classification of *Pinus tabulaeformis* seedlings. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2010, **34**(12): 1386-1393 (in Chinese)
- [14] Jia S-X (贾淑霞), Zhao Y-L (赵妍丽), Ding G-Q (丁国泉), et al. Different fine root order respiration and relationship between fine root morphology and tissue nitrogen in *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantations. *Chinese Bulletin of Botany (植物学报)*, 2010, **45**(2): 174-181 (in Chinese)
- [15] Wei X (卫 星), Liu Y (刘 颖), Chen H-B (陈海波). Anatomical and functional heterogeneity among different root orders of *Pehllodendron amurense*. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2008, **32**(6): 1238-1247 (in Chinese)
- [16] Guo D, Robertj M, Jennifer W, et al. Endogenous and exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: Root branch order predominates. *Journal of Ecology*, 2008, **96**: 737-745
- [17] Fan P, Guo D. Slow decomposition of lower order roots: A key mechanism of root carbon and nutrient retention in the soil. *Oecologia*, 2010, **163**: 509-515
- [18] Wang W, Zeng H. Effects of litter types, microsite and root diameters on litter decomposition in *Pinus sylvestris* plantations of northern China. *Plant and Soil*, 2014, **374**: 677-688
- [19] Lohmus K, Ivask M. Decomposition and nitrogen dynamics of fine roots of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) at different sites. *Plant and Soil*, 1995, **165**: 89-94
- [20] Xu Y-Q (许玉庆), Xiang W-H (项文化), Zeng Y-L (曾叶霖), et al. Fine root decomposition pattern of forest ecosystem in China and research progress of controlling factors. *Guangxi Forestry Science (广西林业科学)*, 2015, **44**(2): 149-155 (in Chinese)
- [21] Valverde BOJ, Raich JW, Russell AE. Fine-root mass, growth and nitrogen content for six tropical tree species. *Plant and Soil*, 2007, **290**: 357-370
- [22] Yu L-Z (于立志), Ding G-Q (丁国泉), Zhu J-J (朱

- 教君), *et al.* Effects of fertilization on nutrient concentrations of different root orders fine roots in *Larix laemperi* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(4): 747-753 (in Chinese)
- [23] Chen H-B (陈海波), Wei X (卫星), Wang J (王婧), *et al.* Morphological and anatomical responses of *Fraxinus mandshurica* seedlings roots to different nitrogen concentrations. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2010, **46**(2): 61-66 (in Chinese)
- [24] Li CQ, Tian H. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, **112**: 229-238
- [25] Olson JS. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, **44**: 322-331
- [26] Berg B, McLaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. Berlin: Springer, 2008
- [27] Yang YS, Chen GS, Guo JF, *et al.* Decomposition dynamic of fine roots in a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum* in mid-subtropics. *Annals of Forest Science*, 2004, **61**: 65-72
- [28] Magill AH, Aber JD. Long-term effects of experimental nitrogen additions on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems. *Plant and Soil*, 1998, **203**: 301-311
- [29] Langley JA, Hungate BA. Mycorrhizal controls on belowground litter quality. *Ecology*, 2008, **84**: 2302-2312
- [30] McLaugherty CA, Melillo JM. Decomposition dynamics of fine roots in forested ecosystems. *Oikos*, 1984, **42**: 378-386
- [31] Markp W, Donaldr Z. Response of oxidative enzyme activities to nitrogen deposition affects soil concentrations of dissolved organic carbon. *Ecosystems*, 2006, **9**: 921-933
- [32] Goebel M, Eissenstat DM. Decomposition of the finest root branching orders: Linking belowground dynamics to fine-root function and structure. *Ecological Monographs*, 2011, **81**: 89-102
- [33] Li J-M (李吉玫), Zhang Y-T (张毓涛), Li J-G (李建贵), *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on the fine root and related nutrient release of *Picea schrenkiana* var. *tianshanica*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia* (西北植物学报), 2015, **35**(1): 182-188 (in Chinese)

作者简介 谷利茶,女,1990年生,硕士研究生.主要从事植被修复研究. E-mail: 779315802@qq.com

责任编辑 孙菊

谷利茶,王国梁,景航,等. 氮添加对油松不同径级细根分解及其养分释放的影响. 应用生态学报, 2017, **28**(9): 2771-2777
Gu L-C, Wang G-L, Jing H, *et al.* Response of decomposition and nutrient release in different diameter fine roots of *Pinus tabulaeformis* plantation to N addition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(9): 2771-2777 (in Chinese)