

DOI: 10.5846/stxb201806251392

温璐宁, 张红光, 孙涛, 张子嘉, 咎鹏, 顾伟平, 马鹏宇, 曹凤艳, 毛子军. 不同土壤深度落叶松细根分解及 N 动态变化研究. 生态学报, 2019, 39 (13): - .

Wen L N, Zhang H G, Sun T, Zhang Z J, Zan P, Gu W P, Ma P Y, Cao F Y, Mao Z J. Fine root decomposition and N dynamics of *Larix gmelinii* at different soil depths. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (13): - .

不同土壤深度落叶松细根分解及 N 动态变化研究

温璐宁¹, 张红光², 孙涛³, 张子嘉³, 咎鹏¹, 顾伟平¹, 马鹏宇¹, 曹凤艳⁴, 毛子军^{1,*}

1 森林植物生态学教育部重点实验室, 东北林业大学, 哈尔滨 150040

2 东北林业帽儿山实验林场, 尚志市 150611

3 中国科学院森林生态与管理重点实验室(沈阳应用生态研究所), 沈阳 110016

4 密山市第一中学, 鸡西市 158300

摘要: 细根分解受根序和土壤深度的潜在影响。使用根序法分根, 将落叶松 *Larix gmelini* 根系分为两类: 一级根、二级根为一类 (1+2 级根), 即低级根; 三级根和四级根为另一类 (3+4 级根), 即高级根。采用埋袋法对落叶松低级根和高级根在不同土壤深度 (0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm) 进行了为期 862 d 的分解实验, 探讨不同根序细根分解规律, 养分释放及其影响。结果表明: 1+2 级根的分解速率比 3+4 级分解速率慢, 这种规律同时存在于不同深度的土壤中。在空间上, 低级根和高级根的分解速率均随土壤深度的增加而降低, 高级根的降低趋势更明显。随着分解时间的进行, 各个土层之间的分解率在低级根之间差异更大。细根分解过程中, 落叶松不同根序养分的释放特征不同。N 释放速率总体上随细根根序增加而增大, 随土壤深度的增加而降低。

关键词: 分解; 根序; 土壤深度; 养分释放; 落叶松; 中国东北地区

Fine root decomposition and N dynamics of *Larix gmelinii* at different soil depths

WEN Luning¹, ZHANG Hongguang², SUN Tao³, ZHANG Zijia³, ZAN Peng¹, GU Weiping¹, MA Pengyu¹, CAO Fengyan⁴, MAO Zijun^{1,*}

1 Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China

2 Maoershan Experimental Forest Farm of Northeast Forestry University, Shangzhi, 150611, China

3 Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China

4 The First Middle School of Mishan City, jixi, 158300, China

Abstract: Fine root decomposition can be affected by root order and soil depth. Using a branch-order classification, we separated the fine root systems of *Larix gmelinii* into two classes: first- and second-order roots were combined into one lower order (1+2 order); third- and fourth-order roots were combined into another higher order (3+4 order). Using the litterbag method, we conducted an 862-day decomposition experiment of lower-order and higher-order roots at different depths (0—10, 10—20, and 20—30 cm) to study decomposition and the nutrient dynamics of fine roots among different root branching orders. Our results showed that the decomposition rate of the 1+2 order was slower than that of the 3+4 order, and this pattern also held true at different soil depths. Spatially, the decomposition rate of both lower and higher roots decreased with increasing soil depth, and the decreasing trend in the higher roots was more obvious. With the process of decomposition,

基金项目: 国家自然科学基金 (41312304, 31500361, 31700397, 31270494); 博士研究生自主创新基金 (2572017AA21)

收稿日期: 2018-06-25; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zijunm@nefu.edu.cn

there were larger differences in the decomposition rates of each soil layer among the lower-order roots. The patterns of root nutrient release also varied depending on different stages of decomposition. In conclusion, the N release rate generally increased with root order, and decreased with increasing soil depth.

Key Words: decomposition; root order; soil depth; nutrient release; *Larix gmelinii*; northeastern China

植物根系是森林生态系统中重要的碳库和养分库,对生态系统物质循环、养分平衡和能量流动等起着重要作用^[1-2]。细根分解后能够产生大量的有机质和养分进入土壤,与地上部分凋落物相比,细根一年四季都向土壤中输入养分,每年对土壤有机碳库的贡献率高达 25%—80%^[2],这对养分受限的土壤尤为重要。因此,为了更深入的了解森林生态系统的养分动态,在对地上部分凋落物分解研究的同时,亦不能忽略对细根分解的研究^[3]。

根系分解速率主要受根系化学成分和根系环境的影响^[4]。近半个世纪以来,大部分根系研究都把细根当成一个均质系统,即认为所有小于 2 mm 的根在结构和生理上基本相同。然而最近研究表明,用单一直径级定义细根的方法忽视了细根系统内部结构和功能上的异质性^[5]。根系是由不同的分枝等级(即根序, Root order)构成的^[5-6],不同根序的细根在生理功能上存在显著差异。这些根系间功能的差异会影响到其组织化学成分,包括 C:N 比、非结构性碳水化合物、Ca、酚类化合物、木栓素和木质素的浓度等^[5-7]。因此,不同根序间化学成分的差异可能会影响到其分解速率的变化。目前国内外有关细根分解开展了不少研究,但大多都是采用直径法进行分根。少有的几篇研究根序与分解率之间的关系的文章都发现低级根比高级根的分解速率更慢^[6,8-11]。低级根分解缓慢的机制尚未确定,多数学者认为与高级根相比,低级根具有较高浓度难分解的酸不溶性物质^[6,10,12-13],可能是低级根比高级根的缓慢分解的原因之一。因此,需要更多的实验研究来验证。

细根分解不仅与自身特性(树种、直径和根序)密切相关,还受分解环境(温度、湿度和养分)的影响^[14]。细根具有明显的垂直分布,大多数研究者用埋袋法研究细根分解时,只是将分解袋埋置在土壤某一个固定深度(如 5 cm 或 10 cm),而对不同土壤深度细根分解速率了解甚少。本文通过对我国东北地区分布最广泛的落叶松不同等级的根序在不同土壤深度进行了为期 862 d 的分解实验,比较低级根和高级根在根系分解速率上的差异,揭示不同土层细根分解的差异,及其分解过程中 N 释放规律,目的是进一步确认不同根序等级细根的分解特性及其可能的机理,为进一步认识和丰富细根分解理论,深入研究森林地下生态过程提供基础数据。

1 研究地区与方法

1.1 实验地点

本研究的地点设在东北林业大学帽儿山实验林场老山人工林实验站。该实验站位于黑龙江省东南部、尚志市帽儿山镇境内,属于长白山系张广才岭西北部小岭的余脉,地理坐标为 127°34'E, 45°20'N; 平均海拔 340 m。该地区属于大陆性季风气候,有典型的四季交替,该地区年平均气温 2.8℃, 1 月平均温度 -19.6℃, 7 月平均气温 20.9℃, 年均湿度 70%, 年均降水量 723.8 mm, 年蒸发量 1093.9 mm, 年日照时数 2471.3 h, 无霜期 120—140 d。研究地带土壤为典型暗棕壤,有机物质含量高, N 含量高; 土壤深度在 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 的有机物质含量分别为 13.71%±0.82%、8.96%±0.73%、4.64%±0.61%; 土壤 pH 值分别为 6.15±0.04、5.87±0.04、5.58±0.05; 土壤质地分别为壤土、砂壤土、黏壤土(根据国际质土壤划分标准)。试验样地设在树龄 40 年的落叶松人工林内, 3 块样地, 每块样地面积 8 m×8 m。根取样树种的胸径平均在 (18.7±0.93) cm, 一级根到四级根的平均直径分别为 (0.26±0.02) mm、(0.28±0.01) mm、(0.46±0.05) mm、(0.85±0.09) mm (平均值±标准误差)。

1.2 研究方法

本实验采用埋袋法研究根序分解。于 2014 年 4 月 17、18 日, 在 30 cm 以上土壤剖面挖取落叶松根系, 然

后小心的将根从土壤中分离,确保所有级别的根都保存完整。按照 Pregitzer 等^[5]提供的方法,首先确定 1 到 4 级根的顺序,然后把根上粘着的土壤颗粒用镊子小心移除,一级根和二级根合并成一类,即低级根;三级根和四级根组成另一类,即高级根。65℃烘箱烘干,称取各级别的根系 1.0 g 分别放入 10 cm×10 cm 尼龙分解袋中(120 目)。每个级别根系 24 袋,2 个级别共 48 袋,3 种深度共 144 袋,3 块样地共 434 袋。在 2014 年 5 月埋入样地,各级别的根每个样地每个土壤深度各 24 袋。在 2014 年 8 月和 10 月,2015 年 5 月和 10 月,2016 年 5 月和 10 月收取。每个样地每个土壤深度每级根收取 3 袋,共 54 袋。收取后,小心将样品从分解袋取出,干燥(65℃)称重。Sun^[15]进行了实验前期部分研究了落叶松细根的短期分解,本实在 Sun 等(2015)^[15]研究基础之上,验继续进行落叶松细根的长期分解及养分释放的研究。

1.3 化学成分分析

每个根类中抽取一部分用于化学分析。分析项目包括全 C、N、K、P。总 C 使用元素分析仪测定。K 通过 noAA350 原子吸收光谱仪分析。全 N 采用凯氏定氮法。总 P 通过磷钒钼黄比色法测定。初始根 C—组分分析遵循 Ryan et al^[16]。

1.4 数据处理与分析

$$\text{重量保持率} = W_t / W_0$$

$$\text{养分保持率} = C_t W_t / C_0 W_0$$

式中, W_0 为根系初始干重(g), W_t 为根系分解 t 时间后的干重(g), C_0 为根系初始养分浓度, C_t 为根系分解 t 时间后的养分浓度。

根系分解速率常数(k 值)负指数衰减模型来进行计算,公式为:

$$X = 1 - kt$$

式中, X 为质量的残留率(%), t 为时间, k 为分解常数。

采用双因素方差分析法(two-way ANOVA)检验各根序和土壤深度对根分解质量的影响。所有统计分析使用 SPSS 软件进行。

2 结果与分析

2.1 落叶松细根的分解速率

2.1.1 根序对分解的影响

落叶松细根分解过程中,细根在不同根序和不同土壤深度中的质量残留率随分解时间的推移呈下降趋势。低级根相对于高级根分解率更低($P < 0.0001$),这个规律亦适合在 10、20、30 cm 深土壤中的根系。如分解 862 d 时,在 0—10 cm 土层中,高级根的质量残留率为 64%,低级根的质量残留率为 73%。其次,在 0—10 cm 土层,低级根和高级根的分解常数为 0.109,0.137(图 1、表 1)。同时 3 个不同土壤深度的落叶松细根分解过程中出现了前快后慢明显不同的阶段。如在 0—10 cm 土层中 1+2 级根和 3+4 级根,0—82 d 时分解较多,质量损失率分别为 5%,9%;82—155 d 分解最少,质量损失率为 0.5%,2%;155—862 d 分解较多,质量损失率为 21.5%,25%。虽然 10—20、20—30 cm 土层细根分解速率明显低于 0—10 cm 土层,但也出现了类似特征(图 1)。

2.1.2 土壤深度对分解的影响

在为期 862 d 的分解时间内,低级根和高级根的分解速率均随着土壤深度的增加而降低。其中低级根随着时间的增加,各个土层之间的分解率差异增大($P < 0.05$)(图 1)。例如,在分解 862 d 时,低级根在 0—10 cm 土层质量残留率为 73%,10—20 cm 土层质量残留率为 79%,20—30 cm 土层质量残留率为 83%(图 1)。低级根在 0—10 cm 深土壤中分解常数 k 比在在 20—30 cm 深土壤中分解常数 k 显著增高。在 0—10 cm 深的土壤中分解常数 k 为 0.109,在 30 cm 深的土壤中分解常数 k 为 0.063(表 1)。在分解 862 d 时,高级根在土壤深度 0—10 cm 质量残留率为 64%,土壤深度 10—20 cm 质量残留率为 69%,土壤深度 20—30 cm 质量残留率为

72%(图1)。高级根在0—10、10—20、20—30 cm 深的土壤中分解常数依次为0.137、0.121、0.1049(表1)。

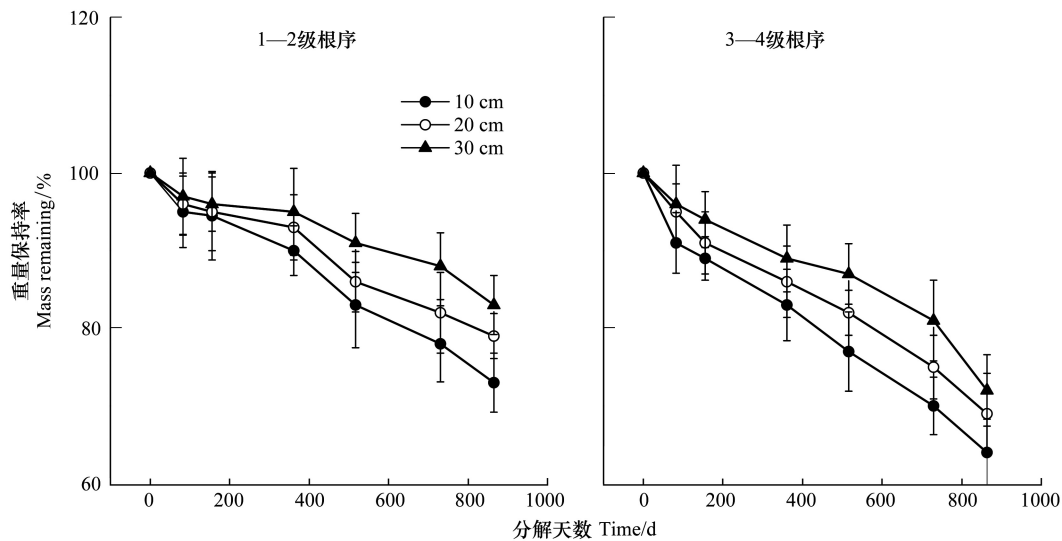


图1 不同根序和土壤深度对落叶松根重量保持率的影响

Fig.1 Effects of root order and soil depth on mass remaining (% initial) of *Larix gmelinii* during 29 months of exposure in field. Error bars represent $\pm$ SE ($n = 3$)

表1 落叶松根序在不同土壤深度的分解常数(k)和相关性(R^2)

Table 1 Decomposition constants (k , year⁻¹) and the associated r^2 -values obtained by fitting single-exponential model to data of *Larix gmelinii* roots at three soil depths after two years of field exposure

土壤深度 Soil depth	根序级别 Root class	分解系数 Decomposition constant(k)	相关系数 R^2
10 cm	Order 1—2	0.109	0.985
	Order 3—4	0.137	0.973
20 cm	Order 1—2	0.085	0.971
	Order 3—4	0.121	0.982
30 cm	Order 1—2	0.063	0.948
	Order 3—4	0.104	0.954

2.2 落叶松根系分解过程中养分保持率的动态变化

2.2.1 落叶松根系的初始化学成分

根系初始化学成分分析结果表明,落叶松不同根序之间养分含量有差别较大,最初营养物浓度低级根普遍高于高级根(表2)。初始N浓度低级根几乎是高级根的两倍($P < 0.0001$)。相反,C:N比高级根几乎是低级根的两倍($P < 0.0001$)(表2)。根酸不溶性物质低级根比高级根高($P < 0.0001$)。酸可溶物和非结构性碳水化合物高级根高于低级根($P < 0.0001$)(表2)。

2.2.2 落叶松分解过程中N保持率的动态变化

根系分解的不同时期均表现为N释放(图2)。分解的前82 d,落叶松各径级根系均表现为N释放,其中高级根N急剧释放,在0—10、10—20、20—30 cm 深的土壤中N释放率达38%、31%、29%。在82—155 d,除了低级根在20—30 cm 土层中表现为N释放,落叶松各径级根系在各个土层中均表现为N富集(图2)。分解862 d时,在0—10、20—30 cm 土层低级根的氮保持率为分别70.27%、80.96%,高级根的氮保持率分别为54.43%、67.37%。在0—862 d的细根分解观测期,整体上看落叶松细根的N养分含量始终处于净释放状态,低级根的N释放率低。高级根的N释放率高,随着土层深度的增加N释放率降低(图2)。

表 2 落叶松根在分级实验前的初始化学参数(标准误差)

Table 2 Initial root chemistry parameters (means with SE) at the start of the litterbag experiment of *Larix gmelinii*

根序 Root order	根系初始营养物/(mg/g) Initial root nutrients			初始 C-组分/(mg/g) Initial C-fraction			非结构性 碳水化合物 TNC/(mg/g)	C:N
	N	P	K	萃取物 Extractives	酸可溶性物质 AHF	酸不溶性质 AUF		
1+2	26.1 (2.0)	2.9 (0.2)	6.1 (0.2)	184.3 (15.1)	280.6 (25.6)	536.2 (45.1)	106.8 (10.5)	22.8 (4.5)
3+4	14.5 (1.6)	1.2 (0.2)	5.3 (0.4)	215.9 (12.3)	375.0 (23.2)	409.7 (30.9)	146.1 (16.8)	42.1 (2.1)

数值是平均数(括号里是标准误差),在这项研究中 1+2 级根合并成一类(低级根序),3+4 级根合并成另一类(高级根序),初始 C-组分是在每克无灰干物质基础上表示的;缩写词:AHF, acid-hydrolyzable fraction, 酸可溶物质;AUF, acid-unhydrolyzable fraction, 酸不溶物质;TNC, total non-structural carbohydrate, 非结构性碳水化合物。详细参数见 Sun 等 (2015) [15]

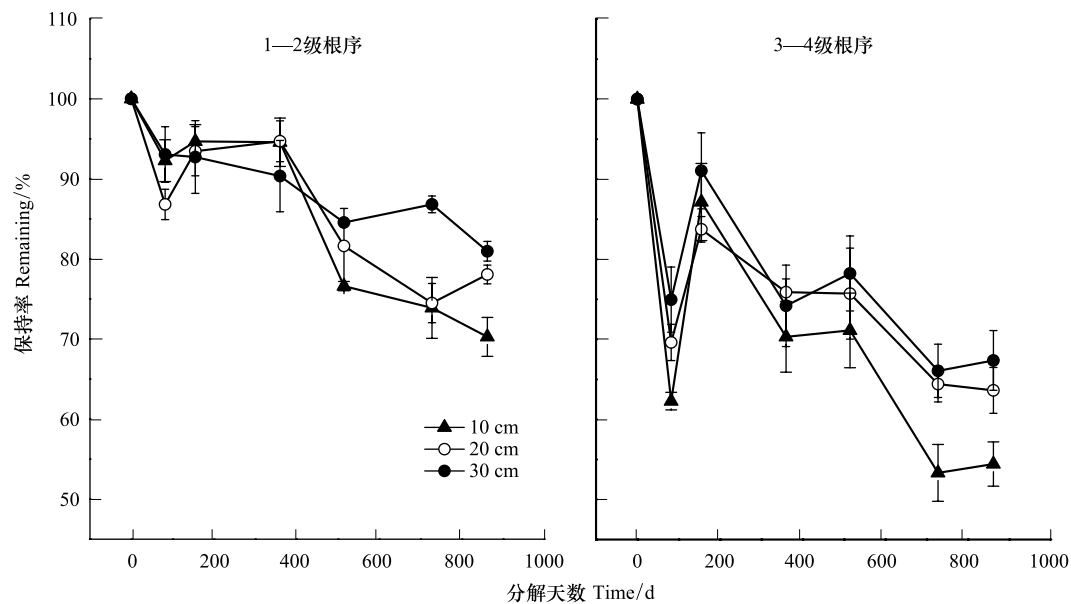


图 2 分解过程中落叶松细根 N 养分保持率变化

Fig.2 Percentage of nutrients remaining over time in the decomposition of *Larix gmelinii* Error bars represent $\pm$ SE ($n=3$)

3 讨论

3.1 根序等级对根系分解的影响

有研究表明,不同根序的根序在生理功能上存在显著差异,如高级根(三级根、四级根和更高级别的根)主要起到运输、储存和结构支持等功能,而低级根(一级根、二级根)主要用于获取养分和吸收水分 [11,17]。这些根系间功能的差异会影响到其组织化学成分,从而影响其分解速率。低级根未木质化且营养丰富,特别是根尖,因此与高级根相比,具有较高浓度的酸不溶性物质 [6,8-10],酸不溶性物质主要由木质素、软木脂、角素、丹宁蛋白络合物等难分解的化合物组成 [10],它们对酶有抵制作用且能对其他化学组分形成物理保护机制 [18],因此认为是低级根比高级根的缓慢分解的原因之一。这与本实验低级根初始酸不溶性物质浓度比高级根的更高(表 2),其分解速率比高级根更慢这一结果一致(图 1)。另外 Goebel [7] 等研究 4 个温带树种 36 个月细根分解,也发现高级根比低级根分解更快。这些实验都证明了低级根的分级速率比高级根更加缓慢 [6,8-11]。另一种解释是,高级根中含有更多的非结构性碳水化合物,这些易被微生物分解的、高能量的碳水化合物,为分解更复杂碳水化合物的酶类提供了所需能量,促进了许多复杂的 C 化合物在高级根中的降解 [19]。因此认为是高级根分解更快的原因之一。这与本实验高级根初始非结构性碳水化合物含量要比低级根更高(表 2)其分解速率比低级根更快这一结果一致(图 1)。Fan 和 Guo [8] 研究发现,在三级和四级根中,非结构性

碳水化合物总的相对浓度比一级和二级根高约 10%—30%,具体取决于物种。在分解约两个月内,TNC 浓度下降超过 50%—80%,这些易于降解的碳源使得分解群落快速分解,导致高级根分解的更快。513 d 后发现低级根质量损失率为 19%,高级根质量损失率为 22%。本研究支持低级根比高级根分解慢这一结论,其原因是低级根比高级根含有较多难分解酸不溶性物质和较少易分解的非结构性碳水化合物。

3.2 不同土壤深度对细根分解的影响

细根分解除了根序和直径等生物因素之外,还受非生物因素的影响(如温度、湿度、养分等)^[13]。细根具有垂直分布性。Gill 和 Burke^[20]研究矮草草原上格兰马草(*Bouteloua gracilis*)细根的分解,发现细根分解速率从 10 cm 土层到 100 cm 土层下降了近 50%。我们的研究也发现同样规律,上层细根分解快,下层分解慢。随着土壤深度增加细根分解更慢的原因可能是温度、水分和土壤有效性等限制了深层次土壤中微生物的活动,从而对细根分解产生影响^[21]。李灵等^[22]研究表明,随着土壤深度增加,微生物活性和生物量显著降低。以往对帽儿山地区的实验表明在本研究地中,表层土壤温度、养分和水分含量、微生物种类(细菌、放线菌和真菌)和数量均明显高于下层^[23-25]。Silver 和 Miya^[26]总结的全球细根分解数据也发现,年平均温度与根系的分解速率呈线性正相关。Steinberger 等^[27]研究表明,细根分解速率与土壤有效水分关系密切。当土壤有效水分升高时分解速率随之加快,但当土壤水分含量达到相对湿度为 100%—150%或更高时则会导致氧气的供应不足,限制微生物活动,细根分解速率下降^[28]。另外,Gil 和 Burke^[20]研究表明,与表层土壤相比,深层土壤干燥低温的环境使得细菌和真菌只能降解简单的分子,而剩下复杂的碳水化合物和蛋白质与木质素形成复杂难分解的衍生物。正如本研究结果表现出来的那样,由于深层土壤中根系分解缓慢,使得大量死亡根系得以储存。因此,深层土壤对陆地生态系统的 C 和养分循环至关重要^[20]。

3.3 根系分解过程中 N 释放

本实验研究结果表明,落叶松细根在 862 d 野外分解后,在 3 个土层中低级根平均 N 的释放率仅为 23.6%,高级根 N 的释放率为 31.7%。细根 N 的释放率表现为高级根高于低级根。这个结果与 Xiong 的研究相似^[9],Xiong^[9]使用根序法研究中国 8 种温带和亚热带树木的氮释放表明其中有 4 种树的氮释放表现为低级根 N 的释放率大于高级根。以往许多使用直径法进行氮释放研究的结果总是粗根 N 的释放率高于细根,如张秀娟^[29]研究水曲柳和落叶松根细根分解,根系分解 2 年后两树种粗根和中根 N 的释放在 50%左右波动,两树种细根 N 释放均达到 60%。这些使用直径法定义细根研究并且不考虑根的分支结构,这种方法上的差异可能是造成 N 释放差异的原因。根系 N 释放过程比较复杂,细根分解过程中养分释放受凋落物质量和环境控制^[30]。本研究中,低级根氮释放较少的原因可能是:在分解早期不稳定的氮释放后,剩余的大部分氮可能是顽固的氮化合物并且不容易释放;在微生物代谢过程中,根系中的 N 可能已经转化为顽固形式。大多数凋落物 N 的顽固性是因为与根系 C 质量(酸不溶性物质含量高)和根系 N 质量中酸不溶性物质占总 N 量的比例高,且可能与酸不溶性物质强烈结合^[14]。Parton 等人^[13]的研究表明,在凋落物分解过程中,最高的氮释放速率发生在分解的最后阶段,此时凋落物中最顽固的部分被分解。因此,大部分根中的 N 可能与顽固 C 组分相结合,并且只有当分解者利用难分解 C 组分时,才会释放顽固 N。此外,年平均温度和降水、林地的养分有效性、林地土壤微生物等因素也会影响养分释放^[31]。如热带森林比温带森林根系分解快,养分归还迅速^[23]。这也能很好的解释了本研究中随土层深度增加温度降低^[26],N 释放率也随之降低。

4 结论

(1)在 862 d 的分解实验中,落叶松的低级根与高级根相比分解速率更慢,这个规律也存在于三个不同深度的土壤剖面(0—10、10—20、20—30 cm)。我们认为低级根分解更慢的主要原因之一是它们的碳组分中有更高浓度的酸不溶性物质和更少的非结构性碳水化合物。

(2)我们的结果还表明低级根和高级根的分解率随着土壤深度的增加而降低。原因可能受土壤温度、水分、养分限制和微生物群落的改变等因素的影响。

(3) 在 0—862 d 的细根分解观测期,整体上看落叶松细根的 N 养分含量始终处于净释放状态,氮释放量有限,低根 N 释放率低,高级根释放率高,随着土层深度的增加 N 释放率降低。

参考文献 (References):

- [1] Finér L, Ohashi M, Noguchi K, Hirano Y. Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(2): 265-277.
- [2] Usman S, Singh S P, Rawat Y S, Bargali S S. Fine root decomposition and nitrogen mineralisation patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Himalaya. *Forest Ecology and Management*, 2000, 131(1-3): 191-199.
- [3] Yang Y S, Chen G S, Guo J F, Lin P. Decomposition dynamic of fine roots in a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odoratum* in mid-subtropics. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(1): 65-72.
- [4] 黄志群, 廖利平, 高洪, 汪思龙, 于小军. 杉木根桩分解过程及几种主要营养元素的变化. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 40-42.
- [5] Pregitzer K S, Deforest J L, Burton A J, Allen M F, Ruess R W, Hendrick R L. Fine root architecture of nine north American trees. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309.
- [6] Guo D L, Mitchell R J, Hendricks J J. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest. *Oecologia*, 2004, 140(3): 450-457.
- [7] Kelly R H, Burke I C, Lauenroth W K. Soil organic matter and nutrient availability responses to reduced plant inputs in shortgrass steppe. *Ecology*, 1996, 77(8): 2516-2527.
- [8] Fan P P, Guo D L. Slow decomposition of lower order roots: a key mechanism of root carbon and nutrient retention in the soil. *Oecologia*, 2010, 163(2): 509-515.
- [9] Xiong Y M, Fan P P, Fu S L, Zeng H, Guo D L. Slow decomposition and limited nitrogen release by lower order roots in eight Chinese temperate and subtropical trees. *Plant and Soil*, 2013, 363(1/2): 19-31.
- [10] Hendricks J J, Aber J D, Nadelhoffer K J, Hallett R D. Nitrogen controls on fine root substrate quality in temperate forest ecosystems. *Ecosystems*, 2000, 3(1): 57-69.
- [11] Guo D L, Xia M X, Wei X, Chang W J, Liu Y, Wang Z Q. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species. *New Phytologist*, 2008, 180(3): 673-683.
- [12] Seastedt T R, Murray P J. Root herbivory in grassland ecosystems//Johnson S N, Murray P J, eds. *Root Feeders: An Ecosystem Perspective*. Trowbridge: Cromwell Press, 2008: 54-67.
- [13] Parton W, Silver W L, Burke I C, Grassens L, Harmon M E, Currie W S, King J Y, Adair E C, Brandt L A, Hart S C, Fasth B. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 2007, 315(5810): 361-364.
- [14] 罗永清, 赵学勇, 王涛, 李玉强, 左小安, 丁杰萍. 植物根系分解及其对生物和非生物因素的响应机理研究进展. *草业学报*, 2017, 26(2): 197-207.
- [15] Sun T, Dong L L, Zhang L L, Wu Z J, Wang Q K, Li Y Y, Zhang H G, Wang Z W. Early stage fine-root decomposition and its relationship with root order and soil depth in a *Larix gmelinii* plantation. *Forests*, 2016, 7(10): 234.
- [16] Ryan M G, Melillo J M, Ricca A. A comparison of methods for determining proximate carbon fractions of forest litter. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20(2): 166-171.
- [17] Goebel M, Hobbie S E, Bulaj B, Zadworny M, Archibald D D, Oleksyn J, Reich P B, Eissenstat D M. Decomposition of the finest root branching orders: linking belowground dynamics to fine-root function and structure. *Ecological Monographs*, 2011, 81(1): 89-102.
- [18] Berg B. Decomposition of root litter and some factors regulating the process: long-term root litter decomposition in a scots pine forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 1984, 16(6): 609-617.
- [19] Hättenschwiler S, Gasser P. Soil animals alter plant litter diversity effects on decomposition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(5): 1519-1524.
- [20] Gill R A, Burke I C. Influence of soil depth on the decomposition of *Bouteloua gracilis* roots in the shortgrass steppe. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 233-242.
- [21] Berg B, McLaugherty C. *Plant Litter—Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- [22] 李灵, 张玉, 王利宝, 王丽梅. 不同林地土壤微生物生物量垂直分布及相关性分析. *中南林业科技大学学报*, 2007, 27(2): 52-56, 60-60.
- [23] 于水强, 王政权, 史建伟, 全先奎, 梅莉, 孙玥, 贾淑霞, 于立忠. 水曲柳和落叶松细根寿命的估计. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 102-109.
- [24] 王向荣, 王政权, 韩有志, 谷加存, 郭大立, 梅莉. 水曲柳和落叶松不同根序之间细根直径的变异研究. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 871-877.
- [25] 贾淑霞, 赵妍丽, 孙玥, 陈利, 王政权. 施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤微生物生物量碳和氮季节变化的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2063-2071.
- [26] Silver W L, Miya R K. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, 2001, 129(3): 407-419.
- [27] Steinberger Y, Degani R, Barness G. Decomposition of root litter and related microbial population dynamics of a Negev Desert shrub, *Zygophyllum dumosum*. *Journal of Arid Environments*, 1995, 31(4): 383-399.
- [28] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer, 2011: 369-397.
- [29] 张秀娟, 吴楚, 梅莉, 韩有志, 王政权. 水曲柳和落叶松人工林根系分解与养分释放. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1370-1376.
- [30] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer, 2002: 151-175.
- [31] Chen H, Harmon M E, Sexton J, Fasth B. Fine-root decomposition and N dynamics in coniferous forests of the Pacific Northwest, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(2): 320-331.