

DOI: 10.5846/stxb202103310836

潘君,王传宽,王兴昌.3个温带阔叶树种根系长期分解速率研究.生态学报,2021,41(13):5166-5174.

Pan J, Wang C K, Wang X C. Seven-year decomposition rates of roots with different diameters for three temperate broadleaf tree species. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5166-5174.

3 个温带阔叶树种根系长期分解速率研究

潘 君^{1,2}, 王传宽^{1,2}, 王兴昌^{1,2,*}

1 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040

2 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

摘要:根系分解对土壤碳固持和养分长期有效性具有重要意义,但目前对根系的长期分解模式仍知之甚少。比较 3 个温带阔叶树种不同直径根系 7 a 分解动态,可为生态过程模型提供数据支撑。在帽儿山生态站采用分解袋法对白桦(*Betula platyphylla*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)的 5 个直径等级(< 1 mm)、(1—2 mm)、(2—5 mm)、(5—10 mm)、(10—20 mm)根系进行了 7 a 野外分解实验。重复测量方差分析表明:时间、树种、直径与树种交互作用、树种与时间交互作用显著影响根系质量保持率。根系质量保持率随时间呈指数下降趋势,7 a 间根系经历早期快速分解和后期慢速分解两个阶段,实验结束时根系仍剩余相当部分的初始质量(24%—56%)。利用 Olson 指数衰减模型估计各树种根系分解系数发现:白桦根系分解系数与根直径间具有显著的线性正相关关系,水曲柳具有显著对数正相关关系,春榆的关系不显著。3 个树种短期分解系数均高估根系分解速率,而且不能完全代表长期分解系数的种内、种间差异。研究结果对理解根系长期分解速率随直径变化模式提供了数据支撑。

关键词:根系分解;根直径;白桦;春榆;水曲柳

Seven-year decomposition rates of roots with different diameters for three temperate broadleaf tree species

PAN Jun^{1,2}, WANG Chuankuan^{1,2}, WANG Xingchang^{1,2,*}

1 Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Root decomposition is of great significance for carbon sequestration and long-term soil nutrients availability, but the long-term decomposition patterns of different root diameters were poorly understood. In this paper, we compared the seven-year decomposition processes of different root diameters for three temperate broadleaf tree species to provide data supporting for ecological process model. We conducted a seven-year field decomposition experiment for five root diameter classes (< 1 mm, 1—2 mm, 2—5 mm, 5—10 mm, and 10—20 mm) of *Betula platyphylla* (BP), *Ulmus davidiana* var. *japonica* (UJ), and *Fraxinus mandshurica* (FM) with a litter-bag method at the Maoershan site. Repeated measures analysis of variance showed that time, tree species, the interaction of diameter and tree species, and the interaction of tree species and time significantly affected the root mass remaining. The root mass remaining exponentially declined with time; During the seven years, the roots experienced two periods, i.e., a rapid loss in the early stage and a slow loss in the later stage; At the end of the experiment, the roots remained a considerable proportion of its initial quality (24%—56%). The decomposition constant of roots with different diameters for each tree species was estimated with the Olson exponential decay model. There was a significant linear positive correlation between the decomposition constant and root diameter for BP,

基金项目:“十二五”科技支撑项目(2011BAD37B01);长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1054)

收稿日期:2021-03-31; 修订日期:2021-06-30

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

while a significant positive logarithmic correlation for FM, and no significant relationship for UJ. The short-term decomposition constants of the three tree species overestimated root decomposition rate, and they could not fully represent the intra-species and inter-species differences in the long-term decomposition constants. The results provide data support for understanding the varying pattern of long-term root decomposition rate with root diameter.

Key Words: root decomposition; root diameter; *Betula platyphylla*; *Ulmus davidiana* var. *japonica*; *Fraxinus mandshurica*

根系是森林生态系统中重要的碳库和养分库,对生态系统碳和养分循环起着重要作用^[1-3]。与季节性集中凋落的落叶相比,温带森林的根一年四季都有可能发生死亡并逐渐分解^[4]。植物凋落物向土壤输入的物质,很大一部分来自根系,但根系凋落物在生态系统有机物循环中的作用近年来才逐渐受到重视^[5]。根系分解是碳和养分归还土壤的主要途径^[6],森林中地下凋落量平均约占年总凋落量的 48%^[5, 7]。因此,根系分解是养分、碳和能量在生态系统内和生态系统之间、生物圈和大气之间循环的重要基础^[8-9]。

与地上凋落物分解相比,根系分解研究还很不足。尽管细根(< 2 mm)^[5, 7, 10]分解研究已有很多,但粗根分解动态研究仍非常匮乏,绝大多数根系分解的研究持续时间短,不足以反映根系分解的整个过程。凋落物分解过程分为早期的快速分解阶段和后期的慢速分解阶段^[1-2, 8, 11-12]。相对于地上凋落物,根系分解缓慢^[13],因此短期研究只能反映早期快速分解阶段情况而高估分解速率。而 Moore 等^[14]对温带、寒带和亚北极生态系统中分解袋法研究时间的调查显示,大多数(69%)的分解袋法研究时间为 1—2 a,84%的分解袋法研究时间为 3 a 或更短,只有 5%的分解袋法研究时间超过 5 a。此外,很多研究表明细根是根系凋落物库的最大贡献者,细根对土壤养分有效性具有重要作用^[5, 7]。然而,有证据表明粗根对土壤有机物质的贡献也不能忽略^[5, 10, 15],但以往研究对粗根分解模式知之甚少。而且根系长期分解研究仅局限在细根上^[8, 13, 16-17],我国温带森林仍缺乏不同直径根系长期分解研究。

本文通过我国东北地区 3 个温带树种不同径级根系 7 a 53 d 的分解实验,比较长期和短期根系分解及其随根直径、树种的变化模式。研究结果可为探究地下部分的根系凋落物分解以及物质循环和能量流动提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区域在黑龙江省东北林业大学帽儿山森林生态站(45°25'N, 127°38'E)。该地区属于长白山山系支脉,张广才岭西北部的余脉。温带大陆性季风气候,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥。2008—2018 平均年降雨量为 676 mm,年平均气温为 2.0℃^[18]。其主要土壤类型为暗棕壤。

1.2 野外取样与处理

试验地点位于通量塔周围天然次生林,平均海拔 400 m,平均坡度为 9°。选择主要树种白桦(*Betula platyphylla*, BP)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*, UJ)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*, FM)^[18],研究其不同直径的根系分解速率变化规律。每个树种随机选择 3—5 株样木,于 5 月 26 日春季根系死亡高峰后^[19],在 0—20 cm 土层挖取足够的根混合带回实验室。将取回的根用自来水将其表面附着的泥土清洗干净,明显的死根剪掉,然后将根系分为 5 个直径等级:< 1 mm、1—2 mm、2—5 mm、5—10 mm、10—20 mm,自然风干。实验采用分解袋法^[20],分解袋的网眼大小非常重要^[21],本实验选择网眼 0.1 mm 的分解袋能够防止活根进入,也可避免分解后期根系碎屑掉出分解袋。测量根系风干质量与 70℃烘干质量的比值,用于计算根系的初始干质量。对每个树种每个直径等级的根系,称取 2—5 g 的风干根,放入网眼为 0.1 mm 的分解袋中并用记号笔记录初始风干质量(精确到 0.001 g)。根直径< 1 mm、1—2 mm 和 2—5 mm 各 60 袋,3 个树种共 540 袋;根直径 5—10 mm 和 10—20 mm 各 30 袋,3 个树种共 180 袋。于 2012 年 6 月 3 日将每个树种根系分解袋埋入

各自树种树冠下土壤(10 cm 深),把计划同时取样的网袋穿在一条塑料绳上以便后期取回分解袋,每个树种重复 5 株样木。为减少因分解环境改变而产生的差异,布设分解袋后表层覆盖林地凋落物,尽量恢复原样。按照分解前期取回分解袋的间隔时间较短,分解后期取回分解袋的间隔时间较长,在分解的第 1 年进行 5 次取样,取样时间分别为 2012 年 6 月 30 日、7 月 31 日、9 月 1 日、10 月 1 日、11 月 2 日;第 2 年进行 3 次取样,取样时间分别为 2013 年 5 月 9 日、7 月 20 日、9 月 22 日;第 3、5、8 年分别只进行 1 次取样,分别在 2014 年 09 月 15 日、2016 年 6 月 25 日、2019 年 7 月 26 日进行取样,历时 7 年 53 天(即 7.15 a)。样品取回后先清洗分解袋,70℃ 烘干,再称取干质量(精确到 0.001 g)。

1.3 数据处理

质量保持率是分解剩余干质量占初始干质量的百分比,其值越大分解越慢;分解率为 100% 减去质量保持率。3 个树种根系质量保持率时间动态球形检验(Mauchly's Test of Sphericity) $P < 0.05$,说明根系质量保持率之间存在时间自相关性,因此采用树种和直径及其交互作用的双因素重复测量方差分析,通过组内和组间变异计算时间、直径、树种以及它们间的交互作用。根据同一树种不同直径质量保持率随时间的变化差异,将根系分解过程分为快速分解阶段和慢速分解阶段。采用 Olson 指数衰减模型 $M_t/M_0 = e^{-kt}$ [22] 拟合质量保持率平均值随时间的变化过程, M_t 代表 t 时刻(a) 剩余干质量, M_0 代表初始干质量, M_t/M_0 为分解 t 时刻根系质量保持率(%),即根系在 t 时刻剩余干质量占初始干质量的比例, t 为分解时间, k 为根系分解系数。该模型设置初始质量保持率为 1,避免了初始质量估计偏差导致的 k 偏差[23]。 k 直接反映年分解速率, k 值越大表明根系分解越快[3]。除了分解系数,还用最终平均分解率/7.15 a 直接计算了根系年分解速率。采用单因素方差分析和 Duncan 多重比较判断直径、树种间分解系数和年分解速率以及快慢速阶段分解百分数的差异显著性。采用非线性回归分析 3 个树种分解系数、年分解速率随直径的变化规律。利用 SigmaPlot 14.0 绘图,用 SPSS 22 软件进行统计分析。

2 结果

2.1 树种和根直径对根系质量损失的影响

重复测量方差分析表明,时间、树种、直径(仅 < 1 mm、1—2 mm、2—5 mm)与树种交互作用、树种与时间交互作用显著影响根系质量保持率,但直径、直径与时间交互作用以及直径、树种与时间三者交互作用均不显著(表 1)。

表 1 三个树种根系分解的重复测量方差分析结果

Table 1 Repeated measurements analysis of variance for of the three tree species

统计量 Statistical parameter	时间 Time (T)	直径 Diameter (D)	树种 Species (S)	直径×树种 D×S	直径×时间 D×T	树种×时间 S×T	直径×树种×时间 D×S×T
<i>F</i>	180.350	1.714	74.982	12.898	0.846	2.509	0.990
<i>P</i>	< 0.001	0.201	< 0.001	< 0.001	0.593	0.007	0.480

7 a53 d 分解过程中,3 个树种根系质量保持率随时间增加呈下降趋势,且生长季根系质量保持率下降速率明显快于非生长季。在快速分解阶段(0—1.30 a),根系质量损失 26%—47%;之后慢速分解阶段(1.30—7.15 a)继续损失 12%—33%(图 1;表 2)。在快速分解阶段,白桦、春榆直径间质量损失差异不显著;但直径影响水曲柳根系质量损失,直径 5—10 mm 根系质量损失(47%)显著高于直径 < 1 mm 根系(29%)。在慢速分解阶段,水曲柳根系直径间质量损失差异不显著;白桦根系质量损失为直径 5—10 mm、10—20 mm 均高于直径 < 1 mm、1—2 mm、2—5 mm;春榆根系质量损失则为直径 1—2 mm 显著低于直径 2—5 mm、5—10 mm、10—20 mm。即使慢速分解阶段分解时间远长于快速分解阶段,但春榆各径级根系慢速分解阶段的质量损失均显著低于快速分解阶段(表 2)。根系分解 7 a53 d 后仍未完全分解,直径 1—2 mm 的春榆根质量剩余达 56%,分解最快的水曲柳直径 10—20 mm 根系仍剩余 24%(图 1)。

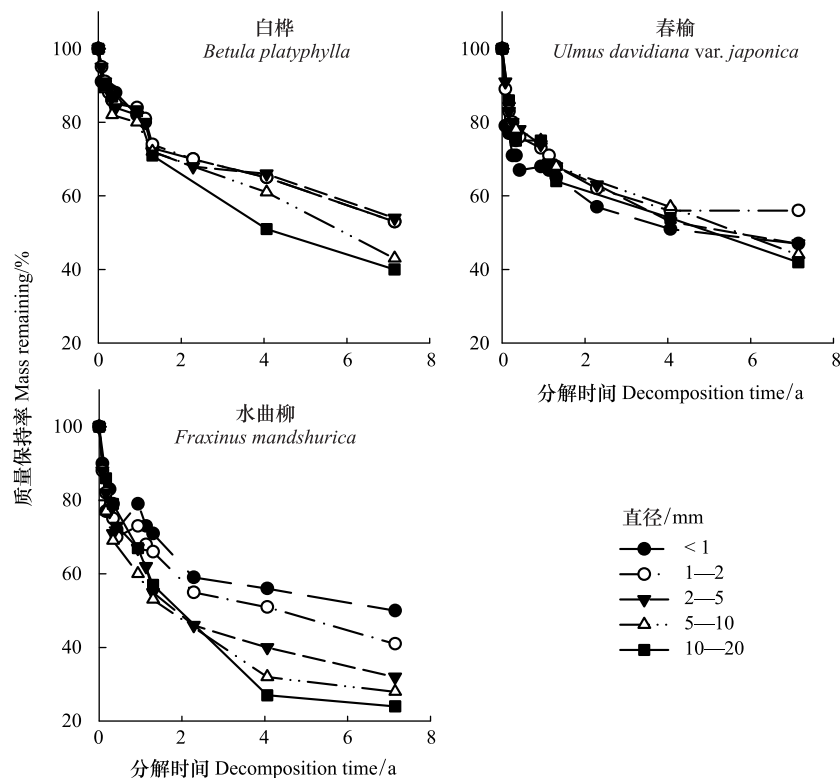


图 1 三个树种不同直径根系 7 a 分解过程中的初始质量保持率比较

Fig.1 Initial mass remaining in different root diameter classes of three species during the seven years' decomposition

表 2 三个树种根系快速分解阶段(0—1.30 a)和慢速分解阶段(1.30—7.15 a)的分解百分数

Table 2 Decomposition percentages of roots of the three tree species in the period of rapid loss (0—1.30 a) and slow loss (1.30—7.15 a)

树种 Species	阶段 Period/a	直径 Diameter/mm				
		< 1	1—2	2—5	5—10	10—20
白桦 BP	0—1.30	27±0.048aA	26±0.043aA	28±0.056aA	28±0.043aA	29±0.107aA
	1.30—7.15	20±0.086bcA	21±0.053bcA	18±0.061cB	29±0.032abA	31±0.107aA
春榆 UJ	0—1.30	35±0.076aA	32±0.016aA	32±0.020aA	32±0.046aA	36±0.021aA
	1.30—7.15	18±0.076abB	12±0.083bB	21±0.023aB	24±0.038aB	22±0.074aB
水曲柳 FM	0—1.30	29±0.072bA	34±0.035abA	45±0.092aA	47±0.061aA	43±0.176abA
	1.30—7.15	21±0.058aA	25±0.023aB	23±0.100aB	25±0.058aB	33±0.145aA

分解百分数为均值±标准差;不同小写字母代表同一树种的根直径间差异显著;不同大写字母代表同一树种和直径分解阶段间差异显著 ($P<0.05$), $n=5$; BP—*Betula platyphylla*, UJ—*Ulmus davidiana* var. *japonica*, FM—*Fraxinus mandshurica*

2.2 根系分解系数

方差分析和 Duncan 多重比较表明根系分解系数随树种和根直径而变(表 3)。不同树种同一直径的根系分解系数不同,根直径< 1 mm 的 3 个树种的分解系数中春榆和水曲柳显著大于白桦;而其它根直径则均为白桦最小、春榆次之、水曲柳最大,差异显著性因直径而异,总体上水曲柳根系分解系数显著大于白桦和春榆(图 2;表 3)。同一树种不同直径之间相比,白桦直径 10—20 mm 根系分解系数显著大于直径< 1 mm、1—2 mm、2—5 mm、5—10 mm 根系;春榆直径< 1 mm 根系分解系数显著大于直径 1—2 mm、2—5 mm、5—10 mm、10—20 mm 根系;水曲柳直径< 1 mm 与 2—5 mm、5—10 mm、10—20 mm 以及直径 1—2 mm 与 5—10 mm、10—20 mm 根系间差异显著(表 3)。3 个树种各直径根系拟合得到的分解系数置信区间较大;白桦和水曲柳方程拟合度均较好,而春榆直径< 1 mm、1—2 mm 根系决定系数较小,拟合度较低(表 3)。

表 3 三个树种不同直径根系年分解速率、Olson 指数衰减模型得到的分解系数(k)及其 95%的置信区间与决定系数

Table 3 Annual decomposition rate, decomposition constant (k) and its 95% Confidence Interval obtained by Olson exponential decay model and the coefficient of determination for roots with various diameter of the three tree species

树种 Species	直径 Diameter /mm	年分解率 Annual decomposition rate/a ⁻¹	分解系数 k/a ⁻¹	95%置信区间 95% Confidence Interval		决定系数 R ²
				Lower bound	Upper bound	
白桦 BP	< 1	0.066±0.009bA	0.123bC	0.083	0.164	0.903
	1—2	0.066±0.003bB	0.122bC	0.083	0.161	0.903
	2—5	0.064±0.002bC	0.123bC	0.081	0.166	0.857
	5—10	0.080±0.003aB	0.138bB	0.079	0.197	0.940
	10—20	0.084±0.008aB	0.161aB	0.110	0.212	0.953
春榆 UJ	< 1	0.074±0.000aA	0.228aA	0.096	0.361	0.699
	1—2	0.062±0.012bB	0.164bB	0.079	0.250	0.653
	2—5	0.074±0.004aB	0.187bB	0.105	0.268	0.825
	5—10	0.078±0.009aB	0.152bB	0.069	0.236	0.887
	10—20	0.081±0.010aB	0.169bB	0.070	0.268	0.860
水曲柳 FM	< 1	0.070±0.006dA	0.172cB	0.090	0.253	0.757
	1—2	0.083±0.002cA	0.228bcA	0.125	0.331	0.834
	2—5	0.095±0.007bA	0.350abA	0.212	0.488	0.840
	5—10	0.101±0.005abA	0.396aA	0.131	0.662	0.835
	10—20	0.106±0.013aA	0.355abA	0.214	0.496	0.884

年分解率为均值±标准差;不同小写字母代表直径间差异显著;不同大写字母代表同一直径树种间差异显著(P<0.05),n=5

3 个树种根系 7 a 分解系数随直径变化趋势迥异(图 2)。白桦根系分解系数与直径(各直径区间的中间值)呈显著线性正相关关系($R^2=0.967, P=0.003$);春榆各直径根系分解系数与根系直径间的关系不显著($P=0.390$);水曲柳根系分解系数与直径呈显著对数正相关关系($R^2=0.829, P=0.032$)。而短期分解系数则完全不同,白桦、春榆、水曲柳与直径关系均不显著(图 2)。7 a 平均看,白桦、春榆、水曲柳根系年分解速率随直径的变化(图 3)与长期分解系数随直径的变化形式(图 2)类似。

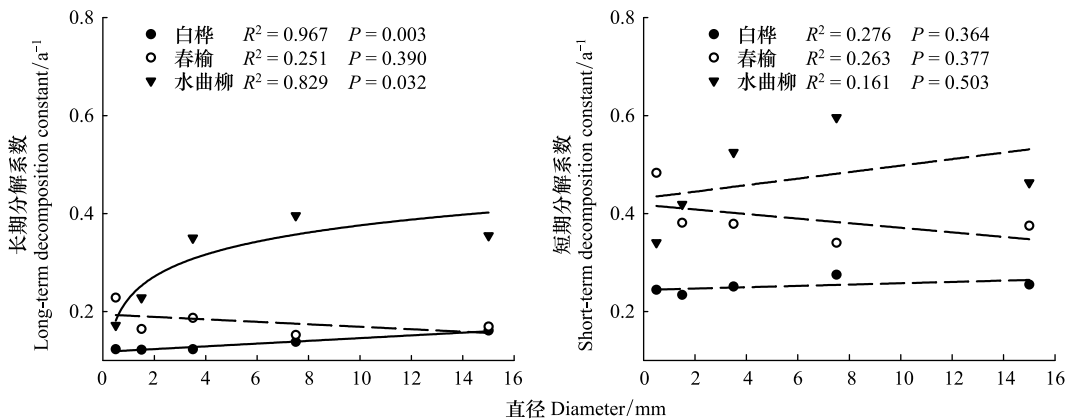


图 2 三个树种根系长期分解系数和短期分解系数随根直径的变化

Fig.2 Change of the long-term and short-term decomposition constants with root diameter for the three tree species

实线代表显著,虚线代表不显著

3 讨论

3.1 根系分解质量损失过程

本研究 3 个树种不同直径根系在分解初期阶段(0—1.30 a)质量保持率快速降低,之后趋于平缓,这与之前的研究结论相一致^[1-2, 11-12]。根系质量损失快慢主要与根系分解在不同阶段养分释放的速率和组分差异有

关^[2, 8, 15-16, 24],快速分解阶段主要由凋落物中可溶性和相对不稳定的化合物的损失主导,包括初始总非结构性碳水化合物;后期质量损失逐渐减少,酸不溶性物质、木质素对分解有很强的主导作用。生长季气候温暖湿润,淋溶作用增强,微生物酶的活性提高,根系质量保持率快速降低,因而生长季根系质量保持率减少快于非生长季^[5, 11, 24-26];底物质量差异也会影响微生物活性,进而影响根系质量损失速率。

即使经过 7 a53 d 分解,根系仍剩余相当部分初始质量(24%—56%)。目前长期研究仍然不多^[14],为了比较本文 3 个树种根系分解速率差异,收集文献发表数据作进一步比较。从这些数据可以看出,绝大多数白桦、春榆、水曲柳根系分解研究为短期研究。而短期研究^[2, 12, 16, 27]普遍发现根系分解实验结束时仍剩余大部分初始质量。黑龙江省丰林自然保护区 35 种木本植物的一级根系 6 a 研究结果^[13]与此类似。国外研究表明,10 a 分解后根系仍剩余初始质量的 0.3%—79.7%^[8],寒冷地区 12 a 分解后仍剩余其初始质量的 50% 以上^[14]。本研究前 2 个生长季的根系分解系数明显大于整个分解阶段的分解系数,进一步证明了根系短期分解系数会高估根系分解速率,10 a 以上的研究结果^[8, 14]均表明用短期分解系数估计的凋落物全球储量将被低估至少三分之一。这些研究均表明根系分解是一个长期过程,今后应加强根系分解长期研究(表 4)。

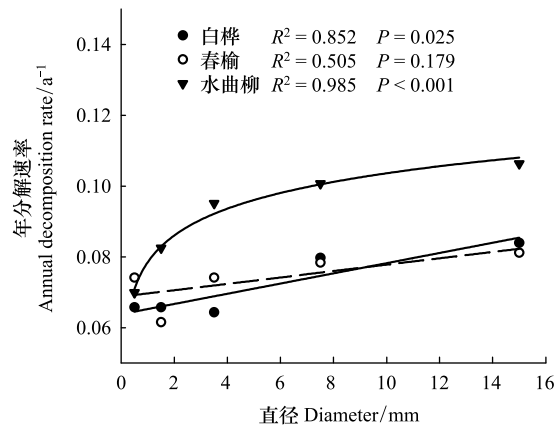


图 3 三个树种根系年分解速率与根直径的关系
Fig.3 Relationships of the annual decomposition rate with root diameter for the three tree species

实线代表显著,虚线代表不显著;年分解速率由分解率/分解时间(a)得到

表 4 白桦、春榆和水曲柳根系分解相关文献

树种 Species	文献 Reference	直径 Diameter	分解时间 Time	网袋孔径 Mesh size / μm	研究地点 Site	分解系数 Decomposition constant (k)
白桦 BP	Sun 等 ^[16]	< 0.5 mm, 0.5—2.0 mm	4 a	120	丰林	0.31, 0.35
	靳贝贝等 ^[28]	< 2 mm, 2—5 mm, 5—10 mm, > 10 mm	1 a	178	帽儿山	0.44, 0.37, 0.33, 0.22
	Sun 等 ^[13]	一级根	6 a	50	丰林	0.15
	顾伟平等 ^[17]	低级根(一、二级根), 高级根(三、四级根)	4 a	120	帽儿山	0.44, 0.58
	本研究	< 1 mm, 1—2 mm, 2—5 mm, 5—10 mm, 10—20 mm	7 a	100	帽儿山	0.12, 0.12, 0.12, 0.14, 0.16
春榆 UJ	Sun 等 ^[13]	一级根	6 a	50	丰林	0.1
	本研究	< 1 mm, 1—2 mm, 2—5 mm, 5—10 mm, 10—20 mm	7 a	100	帽儿山	0.23, 0.16, 0.19, 0.15, 0.17
水曲柳 FM	张秀娟等 ^[29]	< 2 mm, 2—5 mm, 5—10 mm	2 a	178	帽儿山	0.27, 0.44, 0.36
	宋森等 ^[30]	$\leq$ 0.3 mm, 0.3—0.6 mm, > 0.6 mm	3 a	—	帽儿山	高级根大
	Fan 等 ^[2]	1—2, 3—4, 5—6 级根	513 d	500	帽儿山	高级根大
	Sun 等 ^[13]	一级根	6 a	50	丰林	0.22
	顾伟平等 ^[17]	低级根(一、二级根), 高级根(三、四级根)	4 a	120	帽儿山	0.45, 0.56
	本研究	< 1 mm, 1—2 mm, 2—5 mm, 5—10 mm, 10—20 mm	7 a	100	帽儿山	0.17, 0.23, 0.35, 0.40, 0.36

3.2 根系分解系数种内种间变异

本文和许多文献都表明根系分解速率种间差异很大^[11-12, 31]。同一地点不同树种和直径的根系分解研究中,环境因子变异对根系分解的影响较小,而底物质量差异是影响其分解的主要因素^[26, 29]。早期研究发现阔

叶树根系分解系数大于针叶树^[12],如欧洲一项研究发现欧洲桤木(*Alnus glutinosa*)大于欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)和东方云杉(*Picea orientalis*)^[6],我国东北地区的研究也表明水曲柳细根分解系数大于落叶松(*Larix gmelinii*)^[2],枫桦(*Betula costata*)也明显大于红松(*Pinus koraiensis*)^[1]。这归因于阔叶树的根具有较高浓度的易于分解的水溶性物质,而难分解的木质素浓度较低^[12],树种间底物质量不同,从而影响根系分解。最近研究发现根系分解速率还受菌根类型影响,内生菌根树种根系分解速率大于外生菌根树种^[2, 13]。本文白桦和春榆为外生菌根,水曲柳为内生菌根^[13, 32],同样发现水曲柳分解快于白桦、春榆。此外,菌根类型之间相比,粗根分解也得到了类似规律,但需要更多树种加以验证。

根系分解系数随直径变化因树种而异。白桦和水曲柳根系直径越大,根系分解越快,这与前人对白桦和水曲柳进行研究的结果相一致(表4);而春榆根直径间分解系数没有一致的规律。种间差异可能与 Olson 指数衰减模型拟合度有关。白桦和水曲柳拟合较好,其分解系数与根系直径具有显著正相关关系;春榆拟合较差,分解系数与根系直径无显著关系。进一步计算根系年分解速率,发现春榆直径间仍没有显著的正相关关系(图3),这基本排除了 Olson 模型拟合度的影响,春榆根系分解系数与根系直径无显著关系很可能是该树种的固有特性。然而,本文重复之间的差异和 Olson 模型拟合的不确定性(表3)表明,增加重复数量以及研究局域尺度的根系分解变异对于正确解释凋落物分解机制至关重要^[9]。

以往绝大多数细根分解研究也发现根直径越大根系分解系数越大^[1, 15, 24, 33-35],但粗根和细根的分解速率大小仍存在争议^[36],且粗根、细根分解的影响因子不同^[10, 37]。同一地点,根系分解速率主要取决于底物质量(可溶性碳、N和木质素)差异,N和木质素浓度随直径增加而减小,而N和木质素对根系分解速率有抑制作用^[2, 6, 10, 15, 33, 35, 38],因此径级影响底物质量进而影响根系分解速率。也有研究表明分解开始时间与直径存在交互作用^[39]。本文不仅为本地区的物质循环提供基础数据,而且粗根分解总体快于细根这一结果对增加根系分解速率的整体认知有重要意义。此外,本文结果也证明粗根分解对生态系统养分循环的贡献不能被忽略。例如,伐根分解可能是采伐初期土壤微生物和植物养分的重要来源^[40]。

本研究根系长期分解系数总体小于以往白桦、春榆、水曲柳根系短期分解实验结果(表4)。可能有2个方面原因,一方面可能是因为以往研究时间普遍较短而高估分解系数;另一方面可能与本研究分解袋网眼小有关。网眼大会导致破碎的根系残体在清洗过程中损失,从而高估分解速率,这在后期阶段更加明显;网眼小则会消除这一问题,但可能因为阻止土壤动物的进入而低估分解速率。因此本文的结果可以认为是根系分解速率的下限,而以往大网眼分解袋的短期实验结果可以认为是根系分解速率的上限。而帽儿山春榆直径<1 mm的细根分解系数大于Sun等^[13]的分解系数,这可能与后者研究地点丰林自然保护区的温度低且分解袋网眼直径更小有关(表4)。此外,短期分解系数也不一定能代表长期分解系数的种内、种间差异。短期分解系数和长期分解系数的种内排序存在一定差异,短期分解系数随直径变化趋势与长期分解系数不同。因此,短期研究并不能充分认识整个根系分解过程,这与Moore等^[14]研究结果一致,研究表明分解1 a和以后年份的质量损失之间的关系强度随分解时间的延长而减小,说明短期分解系数不能准确的代表长期分解系数。

4 结论

7 a 53 d 分解过程中,白桦、春榆、水曲柳根系经历快速分解和慢速分解两个阶段。白桦和水曲柳根系分解系数总体随直径增大而逐渐增大,而春榆的分解系数在不同直径间没有显著的变化趋势,总体上细根分解速率低于粗根;不同树种的根系分解速率也存在差异,根直径<1 mm的分解速率大小排序依次为春榆>水曲柳>白桦,而其它根直径则均按白桦>春榆>水曲柳的种间排序。在分解实验结束后,根系仍剩余相当部分的初始质量(24%—56%),短期根系分解系数明显大于长期根系分解系数,且短期分解系数也不能完全代表长期分解系数的种内、种间差异。本研究7 a 分解实验为东北温带森林不同树种根系分解速率随直径的长期变化模式提供了重要数据。

参考文献 (References):

- [1] Sun T, Mao Z J, Dong L L, Hou L L, Song Y, Wang X W. Further evidence for slow decomposition of very fine roots using two methods: litterbags and intact cores. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 633-646.
- [2] 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.
- [3] 温达志, 魏平, 张佑昌, 孔国辉. 鼎湖山亚热带森林细根分解干物质损失和元素动态. *生态学杂志*, 1998, 17(2): 1-6.
- [4] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, 125(3): 389-399.
- [5] Freschet G T, Cornwell W K, Wardle D A, Elumeeva T G, Liu W D, Jackson B G, Onipchenko V G, Soudzilovskaia N A, Tao J P, Cornelissen J H C. Linking litter decomposition of above- and below-ground organs to plant-soil feedbacks worldwide. *Journal of Ecology*, 2013, 101(4): 943-952.
- [6] Sariyildiz T. Effects of tree species and topography on fine and small root decomposition rates of three common tree species (*Alnus glutinosa*, *Picea orientalis* and *Pinus sylvestris*) in Turkey. *Forest Ecology and Management*, 2015, 335: 71-86.
- [7] See C R, McCormack M L, Hobbie S E, Flores-Moreno H, Silver W L, Kennedy P G. Global patterns in fine root decomposition: climate, chemistry, mycorrhizal association and woodiness. *Ecology Letters*, 2019, 22(6): 946-953.
- [8] Harmon M E, Silver W L, Fasth B, Chen H, Burke I C, Parton W J, Hart S C, Currie W S. Long-term patterns of mass loss during the decomposition of leaf and fine root litter: an intersite comparison. *Global Change Biology*, 2009, 15(5): 1320-1338.
- [9] Bradford M A, Berg B, Maynard D S, Wieder W R, Wood S A. Understanding the dominant controls on litter decomposition. *Journal of Ecology*, 2016, 104(1): 229-238.
- [10] Zhang X Y, Wang W. The decomposition of fine and coarse roots: their global patterns and controlling factors. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9940.
- [11] 杨轩, 李娅芸, 安韶山, 曾全超. 宁南山区典型植物根系分解特征及其对土壤养分的影响. *生态学报*, 2019, 39(8): 2741-2751.
- [12] 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.
- [13] Sun T, Hobbie S E, Berg B, Zhang H G, Wang Q K, Wang Z W, Hättenschwiler S. Contrasting dynamics and trait controls in first-order root compared with leaf litter decomposition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(41): 10392-10397.
- [14] Moore T R, Trofymow J A, Prescott C E, Titus B D, the CIDET Working Group. Can short-term litter-bag measurements predict long-term decomposition in northern forests? *Plant and Soil*, 2017, 416(1/2): 419-426.
- [15] Wang P, Liu X X, Mou P, Guo J, Li S. Root order and initial moisture status influenced root decomposition in a subtropical tree species *Liquidambar formosana*. *Plant and Soil*, 2019, 443(1/2): 539-548.
- [16] Sun T, Mao Z J, Han Y Y. Slow decomposition of very fine roots and some factors controlling the process: a 4-year experiment in four temperate tree species. *Plant and Soil*, 2013, 372(1/2): 445-458.
- [17] 顾伟平, 刘瑞鹏, 李兴欢, 孙涛, 张子嘉, 咎鹏, 温璐宁, 马鹏宇, 毛子军. 四个典型温带树种不同根序细根分解速率及其主要影响因素. *植物生态学报*, 2018, 42(9): 955-962.
- [18] Liu F, Wang X C, Wang C K, Zhang Q Z. Environmental and biotic controls on the interannual variations in CO₂ fluxes of a continental monsoon temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 296: 108232.
- [19] 焦振, 王传宽, 王兴昌. 温带落叶阔叶林冠层 CO₂ 浓度的时空变异. *植物生态学报*, 2011, 35(5): 512-522.
- [20] Olajuyigbe S, Tobin B, Hawkins M, Nieuwenhuis M. The measurement of woody root decomposition using two methodologies in a Sitka spruce forest ecosystem. *Plant and Soil*, 2012, 360(1/2): 77-91.
- [21] Hobbie S E, Reich P B, Oleksyn J, Ogdahl M, Zytowski R, Hale C, Karolewski P. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 2006, 87(9): 2288-2297.
- [22] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331.
- [23] Adair E C, Hobbie S E, Hobbie R K. Single-pool exponential decomposition models: potential pitfalls in their use in ecological studies. *Ecology*, 2010, 91(4): 1225-1236.
- [24] Fahey T J, Hughes J W, Pu M, Arthur M A. Root decomposition and nutrient flux following whole-tree harvest of northern hardwood forest. *Forest Science*, 1988, 34(3): 744-768.
- [25] 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.
- [26] Canessa R, van den Brink L, Saldaña A, Rios R S, Hättenschwiler S, Mueller C W, Prater I, Tielbörger K, Bader M Y. Relative effects of climate and litter traits on decomposition change with time, climate and trait variability. *Journal of Ecology*, 2021, 109(1): 447-458.
- [27] Freschet G T, Aerts R, Cornelissen J H C. A plant economics spectrum of litter decomposability. *Functional Ecology*, 2012, 26(1): 56-65.
- [28] 靳贝贝, 国庆喜. 蒙古栎、白桦根系分解及养分动态. *生态学报*, 2013, 33(8): 2416-2424.
- [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] 宋森, 谷加存, 全先奎, 郭大立, 王政权. 水曲柳和兴安落叶松人工林细根分解研究. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1227-1237.
- [31] Zhuang L Y, Yang W Q, Wu F Z, Tan B, Zhang L, Yang K J, He R Y, Li Z J, Xu Z F. Diameter-related variations in root decomposition of three common subalpine tree species in southwestern China. *Geoderma*, 2018, 311: 1-8.
- [32] 师伟, 王政权, 刘金梁, 谷加存, 郭大立. 帽儿山天然次生林 20 个阔叶树种细根形态. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1217-1226.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Jiang L, Wang H M, Li S G, Fu X L, Dai X Q, Yan H, Kou L. Mycorrhizal and environmental controls over root trait-decomposition linkage of woody trees. *New Phytologist*, 2021, 229: 284-295.
- [36] 贾丙瑞. 凋落物分解及其影响机制. *植物生态学报*, 2019, 43(8): 648-657.
- [37] Huang C J, Wu C S, Gong H D, You G Y, Sha L Q, Lu H Z. Decomposition of roots of different diameters in response to different drought periods in a subtropical evergreen broad-leaf forest in Ailao Mountain. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e01236.
- [38] Hobbie S E. Plant species effects on nutrient cycling: revisiting litter feedbacks. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(6): 357-363.
- [39] Luo Y Q, Ding J P, Zhao X Y, Li Y Q, Lian J, Wang T. Grazing exclusion altered the effect of plant root diameter on decomposition rates in a semiarid grassland ecosystem, northeastern China. *Ecological Research*, 2020, 35(2): 405-415.
- [40] Zhou T, Wang C K, Zhou Z H. Impacts of forest thinning on soil microbial community structure and extracellular enzyme activities: a global meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 149: 107915.