

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

顾伟平¹ 刘瑞鹏¹ 李兴欢¹ 孙涛² 张子嘉² 咎鹏¹ 温璐宁¹ 马鹏宇¹
毛子军^{1*}

¹东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨 150040; ²中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

摘要 细根分解是森林生态系统土壤碳和养分的主要输入途径, 但目前人们对于影响细根分解的主要因素和细根分解模式的了解仍然很少。该研究采用根序划分等级方法, 将红松(*Pinus koraiensis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)和白桦(*Betula platyphylla*)细根组分前四级根划分为两个等级: 一级和二级根混合为低级根, 三级和四级根混合为高级根。利用埋袋法对东北地区4个树种不同根序细根进行连续4年的分解实验, 并对其分解速率以及影响因素进行研究。结果显示, 红松低级根和高级根分解系数分别为0.342和0.461, 落叶松依次分别为0.304和0.436, 水曲柳分别为0.450和0.555, 白桦为0.441和0.579。4个树种均显示低级根分解速率较慢, 而高级根分解速率较快。实验表明, 根系分解系数与酸不溶性物质(AUF)和非结构性碳水化合物(TNC)均具有显著相关性。出现上述结果的主要原因是低级根含有较多的AUF, 很难被分解, 以及含有较少的TNC, 为分解者提供能量较少。

关键词 细根分解; 根序; 酸不溶性物质; 非结构性碳水化合物; 温带树种

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 (2018). 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, 42, 955–962. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0080

Decomposition of different root branch orders and its dominant controlling factors in four temperate tree species

GU Wei-Ping¹, LIU Rui-Peng¹, LI Xing-Huan¹, SUN Tao², ZHANG Zi-Jia², ZAN Peng¹, WEN Lu-Ning¹, MA Peng-Yu¹, and MAO Zi-Jun^{1*}

¹Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; and ²Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract

Aims Fine root decomposition is the major pathway of carbon and nutrient input to the soil in forest ecosystems. However, the patterns and controlling factors of the decomposition of these roots, especially the finest roots, are poorly understood.

Methods Using a root branch-order classification, we separated the first four orders of fine root systems of *Pinus koraiensis*, *Larix gmelinii*, *Fraxinus mandschurica* and *Betula platyphylla* into two classes: first- and second-order roots combined into lower-order; third- and fourth-order roots combined into higher-order. We conducted a four-year field litterbag study on decomposition of these four root orders of four temperate tree species in northeast China.

Important findings The results showed that the lower-order and higher-order roots had a decomposition rate constant of 0.342 and 0.461 for *Pinus koraiensis*, 0.304 and 0.436 for *Larix gmelinii*, 0.450 and 0.555 for *Fraxinus mandschurica*, and 0.441 and 0.579 for *Betula platyphylla*, respectively. We observed slower decay rates in lower-order than in higher-order roots in all four studied tree species. The root decay constants (k) was significantly correlated with both acid-unhydrolyzable fraction (AUF) and total non-structural carbohydrate (TNC). We concluded that slow decomposition of lower-order roots was mainly driven by their high AUF and low TNC concentrations.

收稿日期Received: 2018-04-10 接受日期Accepted: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(41312304、31500361和31700397)和中央高校基本科研业务费专项资金(2572017AA21)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41312304, 31500361 and 31700397), and the Special Funds for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Colleges and Universities (2572017AA21).

* 通信作者Corresponding author (zijunm@nefu.edu.cn)

Key words fine-root decomposition; root order; acid-unhydrolyzable fraction; non-structural carbohydrate; temperate tree species

Gu WP, Liu RP, Li XH, Sun T, Zhang ZJ, Zan P, Wen LN, Ma PY, Mao ZJ (2018). Decomposition of different root branch orders and its dominant controlling factors in four temperate tree species. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 955–962. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0080

在全球范围内, 超过50%的净初级生产量是通过植物组织分解(即凋落物的分解)的形式输送给土壤的(Wardle *et al.*, 2004)。因此, 明确凋落物分解的一般机制对准确预测未来全球变化与陆地碳循环之间的相互作用具有重要意义(Aerts, 2006; Cornwell *et al.*, 2008)。目前, 国内外对地上凋落物分解已进行了较为广泛的研究, 而有关地下凋落物的研究却很少, 如对细根分解的研究。通过细根分解输送给土壤的碳(C)是地上凋落物分解的4–5倍(宋森等, 2008), 细根分解释放的氮(N)也比地上部分高18%–45% (Vogt *et al.*, 1986)。可见, 细根分解是C和养分归还土壤的主要途径(Dornbush *et al.*, 2002)。已发表的文章表明, 细根分解的机理与以往研究有较大差异, Silver和Miya (2001)研究发现细根中的化学物质是与细根分解速率最密切相关的因子。其他研究表明, 根系初始N浓度、Ca浓度以及C:N对细根分解速率没有影响(Hobbie *et al.*, 2010; Goebel *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2013a, 2013b)。可见, 对于细根分解的机理及其影响因子尚缺乏足够的认识。

近半个世纪以来, 大部分研究都把细根定义为一个均质系统, 即认为 ≤ 2 mm的根在结构和功能上基本相同。然而, 近年来越来越多的证据表明, 以这种单一径级定义细根的方法忽略了细根形态、化学以及生理方面的差异(Pregitzer *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2008a, 2008b; 刘莹等, 2010; McCormack *et al.*, 2015; Xia *et al.*, 2015)。专家研究发现, 树木根系具有复杂的分枝系统(即根序), 不同根序等级的个体根在形态结构、解剖构造和生理功能等方面存在显著差异(Pregitzer *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2008b)。根序等级的划分为: 根尖为1级根, 其母根为2级根, 以此类推(Pregitzer *et al.*, 2002; 谷加存等, 2016)。因此, 不同根序等级的组织化学成分(如C:N、N、木质素、纤维素和酚类化合物的浓度)可能存在很大的差异。

现有文献资料表明, 迄今为止仅有少量已发表的文章量化了根序和分解速率之间的关系。有研究发现, 尽管低级根具有较小的直径, 高级根具有较大的直径并且木质化程度较高, 但低级根仍然比高

级根分解速率低(Fan & Guo, 2010; Goebel *et al.*, 2011; Xiong *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2016)。有研究表明, 非木质的、营养丰富的低级根, 尤其是根尖, 具有较高的酸不溶性化合物含量, 而高级根则相反。这种难分解的酸不溶性化合物是导致低级根分解速率变慢的主要因素(Guo *et al.*, 2004; Fan & Guo, 2010; Xiong *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2015, 2016)。为了解释这些现象的共性, 显然需要更多的实验研究来探索低级根分解缓慢的潜在机制。

为了探讨上述研究结果及其结论是否具有普遍意义, 本研究利用根序法划分细根等级(根尖为1级根, 其母根为2级根, 以此类推), 将1级根和2级根混合为低级根, 3级根和4级根混合为高级根。本研究采用分解袋方法, 对中国东北温带森林中4个常见的树种(红松(*Pinus koraiensis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)和白桦(*Betula platyphylla*))进行连续4年的细根分解实验, 探索4个树种的不同根序分解速率的规律, 以及根系当中初始化学成分对细根分解的影响。我们假设低级根分解慢, 而高级根分解快, 其主要原因是低级根含有较多难分解的酸不溶性物质。本研究旨在了解不同根序分解速率及其影响因素, 为探讨根序对森林生态系统C和养分循环提供理论依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

分解实验样地设在黑龙江省东北林业大学帽儿山实验林场老山森林实验站(127.50°–127.57° E, 45.33°–45.42° N) 4个典型的温带森林群落中。当地气候条件受大陆性季风气候的影响, 季风性强, 春天风大, 夏天高温潮湿, 冬天干燥寒冷。年降水量730 mm, 主要集中在7、8月份。年平均气温2.8 °C, 月平均最高气温20.9 °C, 月平均最低气温–19.6 °C。林下土壤为暗棕色森林土壤。在杨-桦林(优势种为山杨(*Populus davidiana*)和白桦)、落叶阔叶林(优势种为水曲柳、胡桃楸(*Juglans mandshurica*))、红松人工林(优势种为红松)以及落叶松人工林(优势种为

落叶松) 4种温带森林内分别对白桦、水曲柳、落叶松、红松的细根分解进行了定量评估。本研究的4个森林类型的特征见表1。

1.2 实验设计

本实验采用分解袋法研究细根分解。于2009年, 在林地里选择5–8株目标树种挖取树根。在目标树种的树干基部找到主根, 然后顺着主根向外2 m左右范围内用铲子挖取枯枝落叶层和15 cm土壤深度之间的土块, 顺主根上的侧根寻找根序分支, 确保细根为目标树种的细根。然后小心地把根系从土块中分离出来, 尽量保持根系完整性, 确保根系末端最小的根尖完整并且着生在它的母根上。根系采集主要采用手工挖掘。清除死根(颜色发暗且无弹性)以及根表面土壤后, 尽快运回实验室, 清洗后低温储存, 以便后期处理。采用与Pregitzer等(2002)相同的根序划分方法, 识别并分离出前四级根。本实验将一级和二级细根混合为低级根, 三级和四级细根混合为高级根。并将每个等级的根序额外分出100根左右, 分别测量一级至四级根的平均直径(表2)。

将所有细根样品置于65 °C恒温烘箱中烘干至恒质量。称取每个根序等级的样品大约260 mg置于凋落物分解袋内(尼龙网, 10 cm × 10 cm, 网眼大小120 μm)。每个根序等级的细根装15袋, 2个等级(高级根和低级根)共装30袋, 4个树种总共120袋。在许

多野外的凋落物分解实验中, 分解袋的网眼大小非常重要(Hobbie *et al.*, 2006)。本实验选择的分解袋网眼大小能够阻止蚯蚓以及一些其他微小无脊椎动物的进入, 以使我们的研究主要针对微生物对细根分解的作用。

于2010年5月, 选取红松林、落叶松林、水曲柳林和白桦林样地。在每个样地内设置5个3 m × 3 m的样方, 每个样方内大概有5–8株目标树种, 样方距离15–20 m。每个样方内埋2个根序等级的根各3袋, 平埋于10 cm深的土层中, 表层覆盖林地凋落物, 尽量恢复原样, 以减少对分解环境的影响。做好标记, 以便取样。

1.3 数据采集及样品测定

本实验分别于2010年7月和10月、2011–2013年10月连续4年进行取样, 总共取5次样品, 分别在分解实验开始后的第69天、154天、513天、870天以及第1228天。每次取样的时候每个根序等级样品各取3袋, 小心去除附着的泥土杂物。在收集分解袋的过程中, 没有发现目标树种的根系生长到分解袋内部, 但偶尔会发现草根生长到了分解袋内部。基于它们明显的形态、结构以及颜色的不同, 利用镊子很容易将其去除。然后将根系样品置于65 °C烘箱内烘干至恒质量并称量。

在根系分解实验开始的时候, 将剩余的烘干初

表1 4种森林类型的林分特征

Table 1 Stand characteristics of the four forest types

林型 Forest type	T_{10} (°C)	W_{10} (g·g ⁻¹)	林龄 Age (a)	密度 Density (trees·hm ⁻²)	DBH (cm)	主要树种 Dominant tree species
落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation	11.6	0.396	40	1 682	18.7	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>
红松人工林 <i>Pinus koraiensis</i> plantation	10.8	0.458	46	2 904	16.1	红松 <i>Pinus koraiensis</i>
杨-桦林 Aspen-birch forest	12.9	0.552	58	2 381	12.9	山杨、白桦 <i>Populus davidiana</i> , <i>Betula platyphylla</i>
阔叶林 Hardwood forest	12.3	0.579	49	2 017	15.6	水曲柳、胡桃楸 <i>Fraxinus mandschurica</i> , <i>Juglans mandshurica</i>

T_{10} 和 W_{10} 代表在2011年和2013年生长季期间, 土层深10 cm处的平均温度和含水量; DBH代表胸径。

T_{10} and W_{10} stand for the average soil temperature and gravimetric water content at 10 cm depth measured during the growing seasons of 2011 and 2013. DBH stands for mean tree diameter at breast height.

表2 4个温带树种一级至四级根平均直径(平均值±标准误差)

Table 2 Mean root diameter from first-order to fourth-order roots of the four temperate tree species (mean ± SE)

树种 Tree species	根直径 Root diameter (mm)			
	一级 First-order	二级 Second-order	三级 Third-order	四级 Fourth-order
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	0.29 ± 0.01	0.29 ± 0.02	0.53 ± 0.03	1.59 ± 0.12
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	0.26 ± 0.02	0.28 ± 0.01	0.46 ± 0.05	0.85 ± 0.09
水曲柳 <i>Fraxinus mandschurica</i>	0.34 ± 0.01	0.45 ± 0.01	0.55 ± 0.02	0.89 ± 0.07
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	0.21 ± 0.01	0.26 ± 0.03	0.27 ± 0.06	0.43 ± 0.09

始样品磨碎并测定其初始化学物质。利用浓硫酸-重铬酸钾氧化法测定全C含量; 利用半微量凯氏定氮法测定全N含量; 用钼锑抗比色法测定全P含量; 采用火焰光度计法测定全K含量; 用有机质近似C组分分析法(Hendricks *et al.*, 2002)测定酸不溶性物质(AUF)含量; 根据Seifter等(1950)的技术分析了根系样品的总非结构性碳水化合物(TNC)的浓度。

1.4 数据处理

采用根系的质量残留率来表征根系分解, 即各阶段的根系干质量占初始干质量的比例。根系分解率常数(k)采用负指数衰减模型(温达志等, 1998)来进行计算, 公式为:

$$X = e^{-kt}$$

式中: X 为分解时间 t (单位: a)时的质量残留率(%), k 为年分解速率常数($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)。

采用Origin Pro 8.0软件对 k 和初始化学成分含量进行线性回归分析。利用Origin Pro 8.0软件画图。

2 结果和分析

2.1 细根分解速率

本研究的4个典型温带树种中, 根系分解质量

残留率随时间的延长总体呈现低级根高于高级根的趋势(图1)。每个树种细根分解到513天的时候, 红松和落叶松低级根分解了接近36%, 而高级根则分解了45%左右; 水曲柳和白桦低级根分解了45%左右, 而高级根则分解了近54%, 每个树种的高级根均比低级根多分解9%左右。分解1228天后, 水曲柳和白桦低级根分解量相似, 分解了近76%, 高级根分解了82%左右, 两树种高级根均比低级根多分解6%; 红松低级根分解了64%, 比高级根少分解20%; 落叶松低级根分解了60%, 比高级根少分解13%。

采用负指数衰减模型计算的结果(表3)与实际分解结果(图1)相一致, 所有树种的低级根 k 值普遍小于高级根, 细根 k 值在根序间差异显著($p < 0.01$)。说明4个树种低级根的分解率均低于高级根(图1; 表3)。

2.2 根系初始化学成分

根系中初始化学成分浓度常常被用来分析根系分解速率。本研究中4个温带树种根系的初始化学成分浓度在不同根序之间存在较大差异(表4)。从表中可以看出, 4个树种[1+2]级根中N、P、K初始浓度普遍高于[3+4]级根。例如[1+2]级根中初始N浓度几乎

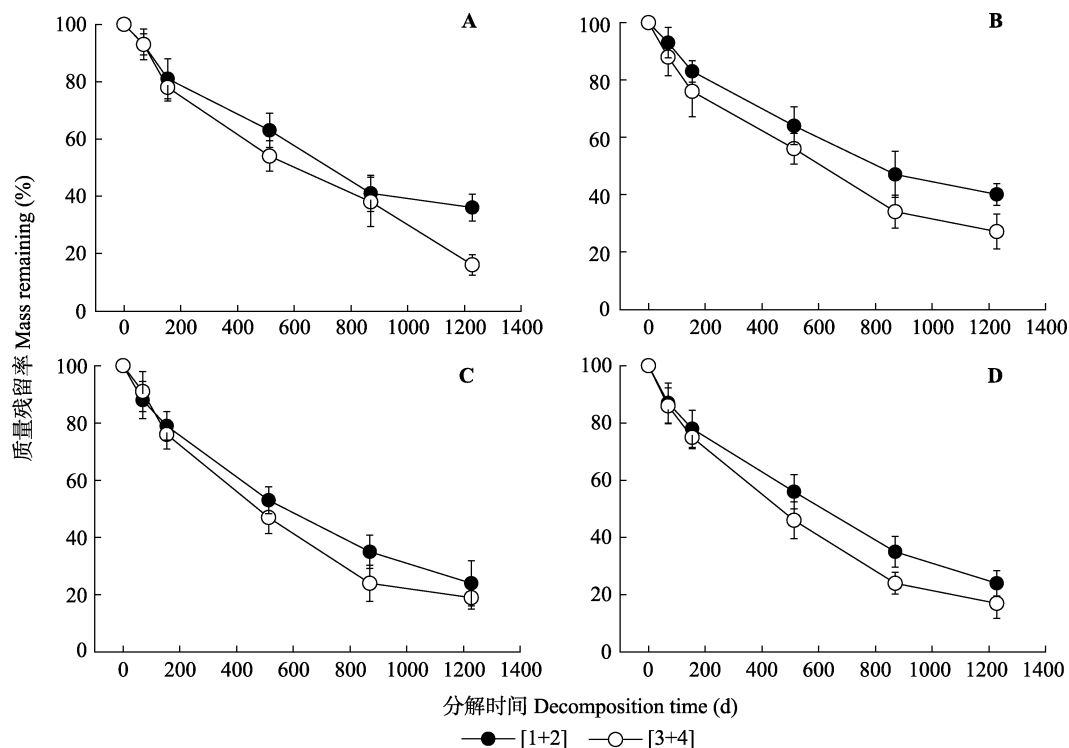


图1 4个树种不同根序不同分解时间的质量残留率(平均值±标准误差)。[1+2]是指1–2级根的合并, [3+4]是指3–4级根的合并。A, 红松。B, 落叶松。C, 水曲柳。D, 白桦。

Fig. 1 Mass remaining (%) of roots of different branch orders of the four tree species (mean ± SE). [1+2] refers to root orders 1 to 2, [3+4] refers to root orders 3 to 4. A, *Pinus koraiensis*. B, *Larix gmelinii*. C, *Fraxinus mandshurica*. D, *Betula platyphylla*.

表3 每个树种根系的分解常数(k)和相关系数(R^2)

Table 3 Decay constants (k) and the correlation coefficient (R^2) of root decomposition for each species

根序 Root order	红松 <i>Pinus koraiensis</i>		落叶松 <i>Larix gmelinii</i>		水曲柳 <i>Fraxinus mandschurica</i>		白桦 <i>Betula platyphylla</i>	
	k	R^2	k	R^2	k	R^2	k	R^2
[1+2]	0.342	0.983	0.304	0.985	0.450	0.993	0.441	0.987
[3+4]	0.461	0.987	0.436	0.980	0.555	0.995	0.579	0.994

[1+2]是指1–2级根的合并, [3+4]是指3–4级根的合并。配对 t 检验显示所有树种高级根比低级根有更高的 k 值($p < 0.01$)。

[1+2] refers to root orders 1 to 2, [3+4] refers to root orders 3 to 4. Paired-sample t test showed that higher-order roots had higher k values than lower-order roots ($p < 0.01$) across species.

表4 四个温带树种的细根分解袋实验的初始化学参数(平均值 \pm 标准误差)

Table 4 Initial root chemistry parameters at the start of the litterbag experiment in the four temperate tree species (mean \pm SE)

树种 Tree Species	红松 <i>Pinus koraiensis</i>		落叶松 <i>Larix gmelinii</i>		水曲柳 <i>Fraxinus mandschurica</i>		白桦 <i>Betula platyphylla</i>	
	[1+2]	[3+4]	[1+2]	[3+4]	[1+2]	[3+4]	[1+2]	[3+4]
N ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	21.6 \pm 0.9	12.3 \pm 0.5	25.5 \pm 2.3	13.9 \pm 1.2	31.9 \pm 1.8	18.3 \pm 1.3	28.1 \pm 1.6	16.7 \pm 1.1
P ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	1.9 \pm 0.4	1.4 \pm 0.4	2.8 \pm 0.2	1.9 \pm 0.2	2.5 \pm 0.1	1.7 \pm 0.2	2.2 \pm 0.1	1.4 \pm 0.2
K ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	4.4 \pm 0.5	2.9 \pm 0.1	5.8 \pm 0.2	4.5 \pm 0.3	4.0 \pm 0.1	4.9 \pm 0.3	5.3 \pm 0.6	3.7 \pm 0.3
AUF ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	528.5 \pm 40.1	398.6 \pm 32.9	513.4 \pm 38.7	435.8 \pm 37.5	401.7 \pm 29.6	289.3 \pm 26.4	397.5 \pm 34.1	302.1 \pm 28.2
TNC ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	101.7 \pm 10.9	150.2 \pm 18.4	98.3 \pm 9.6	138.0 \pm 14.1	195.8 \pm 20.6	279.1 \pm 23.5	164.9 \pm 18.3	214.6 \pm 21.4
C:N	29.6 \pm 1.4	48.2 \pm 1.9	23.6 \pm 1.8	45.2 \pm 3.1	14.4 \pm 2.1	23.7 \pm 2.4	18.7 \pm 2.0	34.8 \pm 3.1

[1+2]是指1–2级根的合并, [3+4]是指3–4级根的合并。AUF, 酸不溶物质; TNC, 全非结构性碳水化合物。

[1+2] refers to root orders 1 to 2, [3+4] refers to root orders 3 to 4. AUF, acid-unhydrolyzable fraction; TNC, total non-structural carbohydrate.

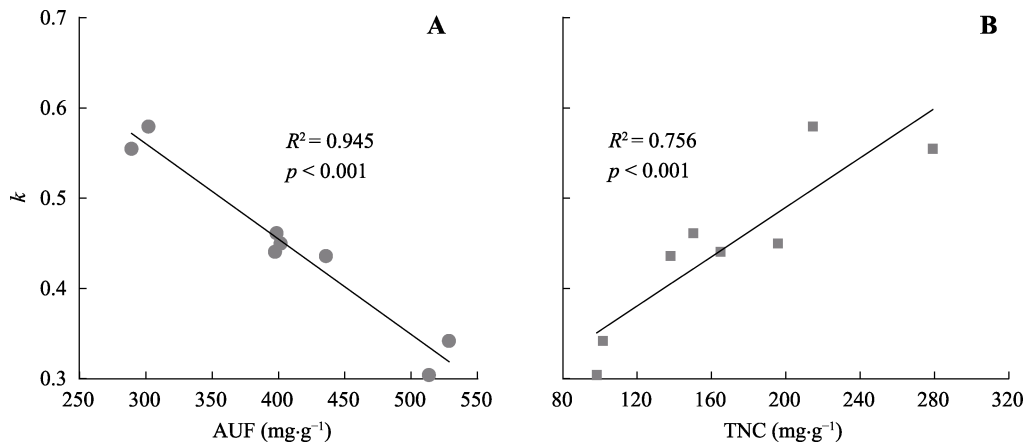


图2 所有树种根系分解常数(k)与酸不溶物质(AUF)(A)和非结构性碳水化合物(TNC)(B)之间的线性回归关系。

Fig. 2 Regression relation between root decay constants (k) and root initial acid-unhydrolyzable fraction (AUF)(A) and total non-structural carbohydrate (TNC)(B) concentrations across all species.

是[3+4]级根的两倍;而C:N则呈现出相反的趋势;然而,值得注意的是4个树种的[1+2]级根中AUF的浓度始终高于[3+4]级根;此外, [1+2]级根中的TNC的浓度普遍低于[3+4]级根。

2.3 根系分解速率与初始化学成分的关系

4个树种[1+2]和[3+4]级根的 k 与所有树种的根系初始AUF浓度呈显著负相关关系($R^2 = 0.945$, $p < 0.001$, 图2)。表明AUF浓度越高, k 越小, 即分解速率越低。 k 与初始TNC浓度呈正相关关系($R^2 = 0.756$, $p < 0.001$), 表明 k 随TNC浓度的增高而变大, 即分解速率变高。然而, 每个树种中[1+2]级根系初始

AUF浓度普遍高于[3+4]级根(表4), 而TNC浓度呈相反的趋势。未观察到根系 k 值与N、P、K、C:N之间显著的相关性(数据未展示)。数据表明, 根系初始化学成分AUF浓度和TNC浓度是影响根系分解的主要因素, 其中AUF浓度具有更显著的相关性(图2)。

3 讨论

在细根(≤ 2 mm)组分中, 树木的前2级根普遍非木质化, 具有吸收功能和较快的周转速率。而三四级根则部分已经木质化, 负责运输和贮藏等功能 (Guo *et al.*, 2008b; Xia *et al.*, 2010; McCormack *et al.*,

2015)。由于低级根和高级根功能上的不同,导致根系化学成分产生差异,并可能对细根分解速率产生影响(McCormack *et al.*, 2015)。有研究表明,非木质的、营养丰富的低级根,尤其是根尖,具有较多难分解的AUF。因此,认为低级根分解较慢,高级根分解较快(Guo *et al.*, 2004; Fan & Guo, 2010; Xiong *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2015, 2016)。本研究的4个树种细根AUF浓度越高分解速率越低的结果与此相一致(图1;表3)。其中Fan和Guo (2010)研究了水曲柳和落叶松不同根序的细根分解,17个月后他们发现:两个树种的一二级根的质量损失率普遍低于三四级根。而Goebel等(2011)对4个树种进行了36个月的研究发现,三级和四级根的质量损失率为20%–40%,而一级和二级根的质量损失率则不超过20%。Sun等(2016)对落叶松的实验研究显示,三四级细根质量损失率比一二级细根高6%。可见不同根序的细根分解过程中,普遍表现为低级根分解慢,高级根分解快这一分解趋势。进一步分析表明,直径越小的低级根根皮(皮层)组织所占比例越大,根皮细胞壁中单宁等次生防御物质的含量越高(Chen *et al.*, 2001; 张秀娟等, 2006)。AUF是难分解的有机高分子结构体(李晗等, 2015),包括木质素、缩合单宁、角质、蜡质等物质。本研究结果表明导致低级根分解慢,而高级根分解快的机制之一是低级根含有较多难分解的AUF。此外,以直径划分等级的研究也发现,直径越小,分解速率越慢。谷利茶等(2017)研究油松细根分解发现,分解到300天的时候,直径为0–0.4、0.4–1、1–2 mm的细根各分解了19.8%、23.5%、30.5%。因此,根序等级越低分解越慢似乎是目前细根分解研究的常见结论。

另外,根系分解受到微生物调控的影响(Magill & John, 1998)。在分解过程中,微生物会利用根系中的能量物质,例如还原糖、蔗糖和淀粉等TNC。Fan和Guo (2010)发现,三级和四级根中的TNC浓度比一级和二级根高10%–30%,分解两个月后,TNC浓度下降了50%–80%,每一级根的TNC浓度基本相同。可能是因为这些容易降解的TNC已经为分解者提供了丰富的能量,导致高级根持续更快的分解。本研究结果显示低级根[1+2]含有较低浓度的TNC,而高级根[3+4]中含量较高(表4),并且发现 k 与TNC浓度密切相关($p < 0.001$, 图2)。因此,含有较低TNC浓度的低级根[1+2]分解较慢,相反高级根[3+4]分

解较快。此外,初始细根中N浓度和C:N均不是影响细根分解速率的因素。Xiong等(2012)研究表明,细根的N浓度和C:N并没有影响细根分解速率,本研究结果与之一致。他们的结果显示,AUF和N浓度呈负相关关系,因此并不能检验AUF和N浓度是如何独立调节根系分解速率的。值得指出的是,由于样品量较小,本实验并未对分解过程中各时期根系内的AUF进行测定。因此细根内的AUF和TNC是否是一个恒定状态及其对根系分解速率的影响尚未可知,有待于今后进一步深入研究。另外,通过分析,P、K与 k 均不相关。气候因子也是影响根系分解的重要因素。在今后的研究中,还应进一步进行气候因子的相关研究。

4 结论

本研究对4个典型温带树种的细根进行了研究,通过不同根序法的实验进一步验证了低级根[1+2]分解慢,而高级根[3+4]分解快这一普遍规律。并发现其主要原因是低级根[1+2]含有较多的AUF和较少的TNC,即低级根[1+2]中含有较多难分解的高分子结构以及提供给分解者的能量物质较少。本实验测定的其他化学指标如N、P、K、C:N均和分解速率不相关。

致谢 感谢东北林业大学的王秀伟、程春香、任丹,中国科学院沈阳应用生态研究所的董利利在文章撰写过程中提供的帮助。

参考文献

- Aerts R (2006). The freezer defrosting: Global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 94, 713–724.
- Chen H, Harmon ME, Griffiths RP (2001). Decomposition and nitrogen release from decomposition woody roots in coniferous forests of the Pacific Northwest. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 246–260.
- Cornwell WK, Cornelissen JHC, Amatangelo K, Dorrepaal E, Eviner VT, Godoy O, Hobbie SE, Hoorens B, Kurokawa H, Pérez-Harguindeguy N (2008). Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. *Ecology Letters*, 11, 1065–1071.
- Dornbush ME, Isenhardt TM, Raich JW (2002). Quantifying fine root decomposition: An alternative to buried litterbags. *Ecology*, 83, 2985–2990.
- Fan P, Guo D (2010). Slow decomposition of lower order roots: A key mechanism of root carbon and nutrient retention in

- the soil. *Oecologia*, 163, 509–515.
- Goebel M, Hobbie SE, Bulaj B, Zadworny M, Archibald DD, Oleksyn J, Reich PB, Eissenstat DM (2011). Decomposition of the finest root branching orders linking below-ground dynamics to fine-root function and structure. *Ecological Monographs*, 81, 89–102.
- Gu JC, Wang DN, Xia XX, Wang SZ (2016). Applications of functional classification methods for tree fine root biomass estimation: Advancements and synthesis. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1344–1351. [谷加存, 王东男, 夏秀雪, 王韶仲 (2016). 功能划分方法在树木细根生物量研究中的应用: 进展与评述. 植物生态学报, 40, 1344–1351.]
- Gu LC, Wang GL, Jing H, Yao X (2017). Response of decomposition and nutrient release in different diameter fine roots of *Pinus tabulaeformis* plantation to N addition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 2771–2777. [谷利茶, 王国梁, 景航, 姚旭 (2017). 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, 28, 2771–2777.]
- Guo D, Mitchell RJ, Withington JM, Fan PP, Hendricks JJ (2008a). Endogenous and exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: Root branch order predominates. *Journal of Ecology*, 96, 737–745.
- Guo D, Xia M, Wei X, Chang W, Liu Y, Wang Z (2008b). Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species. *New Phytologist*, 180, 673–683.
- Guo DL, Mitchell RJ, Hendricks JJ (2004). Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest. *Oecologia*, 140, 450–457.
- Hendricks JJ, Wilson CA, Boring LR (2002). Foliar litter position and decomposition in a fire-maintained longleaf pine-wiregrass ecosystem. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 928–941.
- Hobbie SE, Oleksyn J, Eissenstat DM, Reich PB (2010). Fine root decomposition rates do not mirror those of leaf litter among temperate tree species. *Oecologia*, 162, 505–513.
- Hobbie SE, Reich PB, Ogdahl M, Ogdahl M, Zytowski R, Hale C, Karolewski P (2006). Tree species on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 87, 2288–2297.
- Li H, Wu FZ, Yang WQ, Xu LY, Ni XY, He J, Chang CH (2015). Effects of snow cover on acid-soluble extractive and acid-insoluble residue during foliar litter decomposition in the alpine forest. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 4687–4698. [李晗, 吴福忠, 杨万勤, 徐李亚, 倪祥银, 何洁, 常晨晖 (2015). 不同厚度雪被对高山森林6种凋落物分解过程中酸溶性和酸不溶性组分的影响. 生态学报, 35, 4687–4698.]
- Liu Y, Wang GL, Liu GB, Qu QL, Yuan ZC (2010). Difference and inherent linkage of root characteristics in different root classification of *Pinus tabulaeformis* seedlings. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 1386–1393. [刘莹, 王国梁, 刘国彬, 曲秋玲, 袁子成 (2010). 不同分类系统下油松幼苗根系特征的差异与联系. 植物生态学报, 34, 1386–1393.]
- Magill AH, John DA (1998). Long-term effects of experimental nitrogen additions on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems. *Plant and Soil*, 203, 301–311.
- McCormack ML, Dickie IA, Eissenstat DM, Fahey TJ, Fernandez CW, Guo D, Helmisaari HS, Hobbie EA, Iversen CM, Jackson RB, Leppälampi-Kujansuu J, Norby RJ, Phillips RP, Pregitzer KS, Pritchard SG, Rewald B, Zadworny M (2015). Redefining fine roots improves understanding of belowground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*, 207, 505–518.
- Pregitzer KS, de Forest JL, Burton AJ, Allen MF, Ruess RW, Hendrick RL (2002). Fine root architecture of nine North American trees. *Ecological Monographs*, 72, 293–309.
- Seifter S, Dayton S, Novic B (1950). The estimation of glycogen with the anthrone reagent. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 25, 191–200.
- Silver WL, Miya RK (2001). Global patterns in root decomposition: Comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, 129, 407–419.
- Song S, Gu JC, Quan XK, Guo DL, Wang ZQ (2008). Fine-root decomposition of *Fraxinus mandschurica* and *Larix gmelinii* plantations. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 1227–1237. [宋森, 谷加存, 全先奎, 郭大立, 王政权 (2008). 水曲柳和兴安落叶松人工林细根分解研究. 植物生态学报, 32, 1227–1237.]
- Sun T, Dong L, Mao Z (2015). Simulated atmospheric nitrogen deposition alters decomposition of ephemeral roots. *Ecosystems*, 18, 1240–1252.
- Sun T, Dong LL, Zhang LL, Wu ZJ, Wang QK, Li YY, Zhang HG, Wang ZW (2016). Early stage fine-root decomposition and its relationship with root order and soil depth in a *Larix gmelinii* plantation. *Forests*, 7, 234. DOI: 10.3390/f7100234.
- Sun T, Mao ZZ, Dong LL, Hou LL, Song Y, Wang XW (2013a). Further evidence for slow decomposition of very fine roots using two methods: Litterbags and intact cores. *Plant and Soil*, 366, 633–646.
- Sun T, Mao ZZ, Han YY (2013b). Slow decomposition of very fine roots and some factors controlling the process: A 4-year experiment in four temperate tree species. *Plant and Soil*, 372, 445–458.
- Vogt KA, Grier CC, Vogt DJ (1986). Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research*, 15,

303–377.

Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Setälä H, van der Putten WH, Wall WH (2004). Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 304, 1629–1633.

Wen DZ, Wei P, Zhang YC, Kong GH (1998). Dry mass loss and chemical changes of the decomposed fine roots in three China south subtropical forests at Dinghushan. *Chinese Journal of Ecology*, 17, 1–6. [温达志, 魏平, 张佑昌, 孔国辉 (1998). 鼎湖山南亚热带森林细根分解干物质损失和元素动态. 生态学杂志, 17, 1–6.]

Xia M, Guo D, Pregitzer KS (2010). Ephemeral root modules in *Fraxinus mandschurica*. *New Phytologist*, 188, 1065–1074.

Xia M, Talhelm AF, Pregitzer KS (2015). Fine roots are the dominant source of recalcitrant plant litter in sugar maple-

dominated northern hardwood forests. *New Phytologist*, 208, 715–726.

Xiong Y, Fan P, Fu S, Zeng H, Guo D (2012). Slow decomposition and limited nitrogen release by lower order roots in eight Chinese temperate and subtropical trees. *Plant and Soil*, 363, 19–31.

Zhang XJ, Wu C, Mei L, Han YZ, Wang ZQ (2006). Root decomposition and nutrient release of *Fraxinus manshurica* and *Larix gmelinii* plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 1370–1376. [张秀娟, 吴楚, 梅莉, 韩有志, 王政权 (2006). 水曲柳和落叶松人工林细根分解与养分释放. 应用生态学报, 17, 1370–1376.]

责任编辑: 王政权 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答