

DOI: 10.5846/stxb202205201428

朱玉, 赵蓉, 张红光, 顾伟平, 龙福强, 毛子军, 孙涛. 东北温带森林常见树种粗根分解过程及调控因子. 生态学报, 2023, 43(16): 6682-6690.

Zhu Y, Zhao R, Zhang H G, Gu W P, Long F Q, Mao Z J, Sun T. Coarse root decomposition and its control factors among 10 co-occurring common tree species in a temperate forest, Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6682-6690.

# 东北温带森林常见树种粗根分解过程及调控因子

朱 玉<sup>1</sup>, 赵 蓉<sup>1</sup>, 张红光<sup>2</sup>, 顾伟平<sup>1</sup>, 龙福强<sup>3</sup>, 毛子军<sup>1,\*</sup>, 孙 涛<sup>3</sup>

1 东北林业大学化学化工与资源利用学院, 哈尔滨 150040

2 东北林业大学帽儿山教学区, 尚志 150611

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

**摘要:**粗根是森林生态系统中重要的碳库和养分库, 对生态系统的碳和养分循环起着重要的作用。但目前人们对于影响粗根分解的主要因素以及粗根分解模式的研究较少。采用埋袋法对东北温带森林常见的 10 个树种(黄檗、胡桃楸、水曲柳、色木槭、红松、落叶松、白桦、春榆、紫椴、蒙古栎)的粗根(5—10 mm)进行了为期 1 年的分解实验研究, 来探索粗根分解和养分释放的动态变化规律。研究结果表明:黄檗、胡桃楸、水曲柳、色木槭、红松、落叶松、白桦、春榆、紫椴、蒙古栎粗根年分解系数分别为 0.826、0.897、0.477、0.341、0.358、0.264、0.244、0.593、0.458、0.227。由此可见, 胡桃楸分解速率最快, 蒙古栎分解速率最慢。在粗根分解过程中, 不同调控因子对根系分解的影响不同。研究结果表明, 粗根的分解速率与根系的初始 C/N 比例呈显著负相关( $P < 0.0001$ ), 与初始木质素含量呈负相关( $P < 0.0001$ ), 与初始非结构性碳水化合物(NSC)含量呈正相关( $P < 0.0001$ )。初始 C/N、木质素含量与非结构性碳水化合物含量分别可以解释所研究的 10 个树种粗根分解速率的 68%、20%与 65%。研究结论对于预测粗根参与的碳循环与养分释放具有重要意义。

**关键词:**粗根; 分解; 木质素; 非结构性碳水化合物; 碳氮比

## Coarse root decomposition and its control factors among 10 co-occurring common tree species in a temperate forest, Northeast China

ZHU Yu<sup>1</sup>, ZHAO Rong<sup>1</sup>, ZHANG Hongguang<sup>2</sup>, GU Weiping<sup>1</sup>, LONG Fuqiang<sup>3</sup>, MAO Zijun<sup>1,\*</sup>, SUN Tao<sup>3</sup>

1 Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Maoershan Teaching Area of Northeast Forestry University, Shangzhi 150611, China

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

**Abstract:** Coarse roots (>5 mm) are important functional organs of plants. Its main physiological function is to maintain the growth of fine roots while transporting and absorbing water and nutrients from the soil, while it also stores photosynthates, anchoring and supporting the above-ground parts of the plant. Coarse roots are conduits for nutrients and water, as well as storage sites for carbon and nutrients. In addition, the turnover of coarse roots slowly transports carbon and nutrients to the soil and soil organisms and affects the long-term ecosystem productivity and CO<sub>2</sub> emissions of forests. Root decomposition is the main way that carbon and nutrients are returned to the soil. On average, the amount of underground litter in the forest accounts for about 48% of the total annual. Therefore, root decomposition is an important basis for the circulation of nutrients, carbon and energy within and between ecosystems, the biosphere and the atmosphere. Coarse root is important carbon pool and stock of nutrients in forest ecosystems, which plays an important role in the carbon and nutrient cycling of ecosystems. However, there are few studies on the dominant factors and decomposition patterns affecting the coarse root at present. In this study, the coarse roots (5—10 mm) of 10 tree species (*Phellodendron amurense*, *Juglans mandshurica*,

**基金项目:**国家重点研发计划(2020YFA0608104); 国家自然科学基金(32022054, 32192432, 31901137)

**收稿日期:**2022-05-20; **网络出版日期:**2023-04-14

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

*Fraxinus mandshurica*, *Acer mono*, *Pinus koraiensis*, *Larix gmelinii*, *Betula platyphylla*, *Ulmus davidiana japonica*, *Tilia amurensis* and *Quercus mongolica*) commonly found in the temperate forests of the Northeast China were studied by burier-bag method in 2020—2021, to explore the dynamic variation rule of the coarse root decomposition and release of nutrients. The results show that the annual decomposition coefficients of the coarse roots of *Phellodendron amurense*, *Juglans mandshurica*, *Fraxinus mandshurica*, *Acer mono*, *Pinus koraiensis*, *Larix gmelinii*, *Betula platyphylla*, *Ulmus davidiana japonica*, *Tilia amurensis* and *Quercus mongolica* are 0.826, 0.897, 0.477, 0.341, 0.358, 0.264, 0.244, 0.593, 0.458 and 0.227, respectively. The *Juglans mandshurica* decomposition rate is the fastest, while *Quercus mongolica* is the slowest. In the process of coarse root decomposition, different regulatory factors have different effects. The results prove that the decomposition rate of the coarse roots is negatively correlated with the initial C/N ratio of roots ( $P < 0.0001$ ) and initial lignin content ( $P < 0.0001$ ), but positive correlation with the initial non-structural carbohydrate content ( $P < 0.0001$ ). The initial C/N, lignin and non-structural carbohydrate content can explain 68%, 20%, and 65% of the coarse root decomposition rates across the 10 tree species, respectively. The conclusion is significance for predicting the carbon cycle and release of nutrients of coarse roots.

**Key Words:** coarse roots; decomposition; lignin; non-structural carbohydrates; carbon-nitrogen ratio

粗根(>5 mm)是植物的重要功能器官。它的主要生理功能是为细根的生长搭建框架以及运输吸收来自土壤的水分和养分,储存光合产物,固定和支持植株的地上部分<sup>[1]</sup>。同时,粗根能通过呼吸作用和周期性凋亡过程,与根周围环境发生物质和能量交换,其作为森林生态系统的重要组成部分,在陆地生态系统物质循环和能量流动中扮演着重要的角色<sup>[2]</sup>。

林木根系处于不断生长、衰老、死亡和再生长的动态过程,该过程消耗陆地生态系统初级生产力的10%—75%<sup>[3-4]</sup>。粗根不仅是植物碳存储的重要器官,同时也在某种程度上参与碳周转的过程<sup>[5]</sup>。在全球变化过程中,二氧化碳及氮浓度的增加影响着森林碳存储的能力<sup>[6]</sup>。粗根充当营养物质和水的导管,是碳(C)和营养物质的储存场所。此外,粗根的周转使碳和养分缓慢地输送到土壤和土壤生物区系,并影响森林的长期生态系统生产力和二氧化碳排放<sup>[1]</sup>。

根系分解是碳和养分归还于土壤的主要途径<sup>[7]</sup>,森林中地下凋落量约平均占年总凋落量的48%<sup>[8]</sup>。所以,根系分解是养分、碳和能量在生态系统内和生态系统间、生物圈和大气间循环的重要基础<sup>[9]</sup>。根系分解是指在土壤物理、化学和生物综合作用下,不断地与土壤环境进行物质交换的复杂过程<sup>[10-13]</sup>。根系分解速率主要受根系环境和根系化学成分的影响<sup>[14-18]</sup>。在环境条件相对一致的情况下,根系化学成分是影响根系分解的主要因子<sup>[19-21]</sup>。树木种类、根系直径大小不同,其根系化学成分有所差别,可能导致不同直径根系的分解速率不同<sup>[22-24]</sup>。粗根分解更是探讨陆地生态系统碳格局和过程的重要研究内容。

与地上凋落物分解相比,根系分解的研究还很不足<sup>[25]</sup>。尽管细根(<2 mm)分解研究已有很多,但粗根分解动态研究仍然比较匮乏,且调控机制不清。较多根系分解的研究时间相对较短,不能够清晰反映根系分解的整个过程<sup>[26-28]</sup>。有证据表明粗根对土壤有机物质的贡献也不能忽略,但以往研究对粗根分解模式知之甚少。靳贝贝等的研究结果发现粗根分解的主要分解调控因素是N浓度<sup>[29]</sup>,而另一些研究结果表明,粗根分解的主要调控因素为木质素<sup>[8]</sup>。目前对于粗根分解的调控因素尚不清楚。

本实验以中国东北温带地区10个树种作为研究对象,比较这10个树种粗根分解速率的差异,并探讨调控我国东北温带森林树种粗根分解的主要影响因素,揭示我国温带森林树种粗根分解的动态变化规律。为深入理解粗根在森林碳循环和养分释放中的重要作用提供理论依据和参考。

## 1 研究地区与方法

### 1.1 实验地点

研究地点位于东北林业大学帽儿山老山实验林场人工林实验站。此实验站位于黑龙江省东南部、尚志市帽儿山镇境内,属长白山系张广才岭西北部余脉,地理坐标为127°34'E,45°20'N;平均海拔340 m。该地区为

温带湿润地区,属于大陆性季风气候,有典型的四季交替,年平均温度 2.7℃,1 月份平均温度-19.6℃,7 月份平均温度 20.9℃,年平均湿度为 70%,年降雨量 600—800 mm,年蒸发量 1093.9 mm,年日照时数 2471.3 h,无霜期约 120—140 d。

## 1.2 研究方法

以东北地区的 4 个内生菌根(AM)树种和 6 个外生菌根(EM)树种作为研究对象,比较这 10 个树种粗根分解速率的差异。本实验采用埋袋法研究粗根分解。在 2020 年,老山实验林场林地内选择 10 个目标树种挖取树根。实验样地设置在 63 年生次生林内,优势树种为蒙古栎。样地内蒙古栎的平均胸径、树高和冠幅分别为 23.4 cm,11.8 m,2.8 cm<sup>2</sup>。土壤类型为典型暗棕壤。根系的采集主要运用手工挖掘方法。收集根系后,清除死根(颜色发暗且无弹性)以及根表面土壤,运送到实验室内,清洗取回根系样品,找出符合要求根系直径,清洗完毕后,将所有粗根样品放置在 60℃ 恒温烘箱中烘干至恒质量。找出直径 5—10 mm 的粗根,将其剪成 5 cm 长的根段,称取粗根样品大约 10 g 放置于凋落物分解袋内(尼龙网,15 cm×15 cm,网眼大小为 2 mm 和 0.5 mm),封口。分解袋按照 10 个树种的粗根分类串联起来,每 10 袋为一串,每袋之间距离为 2 cm,总共需要粗根 120 袋。2020 年 10 月 16 日,在帽儿山老山实验林场林地内选取 4 个次生林样地。每个样地内选取 3 个样方。样方大小为 20 m×20 m,样方间距离为 200 m,每个样方内布置 10 个样品分解袋,每个样地布置 3 个重复,4 个样地一共 120 个样品分解袋,分 3 次取回。将分解袋样品平埋于 5 cm 深的土层内,表层覆盖上林地凋落物,尽量恢复原样,以减少对分解环境的影响。分别于 2021 年 5 月、7 月、10 月进行取样。每次取样时每个样方内取出一个重复样品即 10 袋,共 40 袋,小心将粗根样品从分解袋中取出,清洗,清洗后置于 60℃ 烘箱内烘干至恒质量并称量。将部分样品粉碎,进行化学成分分析。

## 1.3 化学成分分析

每种根系的化学成分分析包括全 C、全 N、全 P、全 K 以及 Ca、Mg、Mn、Cu、Fe 等微量元素,木质素,纤维素,半纤维素,非结构性碳水化合物。利用 MACRO cube 型元素分析仪测定全 C、全 N 含量;用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES 5100)测定植物样品的 P、K、Ca、Mg、Mn、Cu、Fe 等元素;用 ANKOM 2000i 全自动纤维分析仪(滤袋技术)测定木质素,纤维素,半纤维素的含量;用高温浓硫酸-蒽酮法测定非结构性碳水化合物(NSC)的浓度。

## 1.4 数据处理与分析

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。根系分解速率常数( $k$  值)负指数衰减模型来进行计算,公式为:

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

式中, $X$  为粗根质量残留率(%), $t$  为时间, $k$  为分解常数。

采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)检验不同树种间初始化学成分含量与分解速率的差异,采用皮尔斯分析计算不同初始化学成分之间的相关性,采用线性回归分析拟合粗根分解速率与初始基质质量的关系。所有统计分析均使用 SPSS 软件进行,绘图采用 Origin 软件。

## 2 结果

### 2.1 粗根的初始化学成分

由根系初始化学成分分析结果表明,不同树种粗根之间养分含量具有较大的差异( $P<0.0001$ )(表 1)。初始钙元素、锰元素、磷元素间有显著差异,而初始铝元素、铁元素、钾元素、镁元素间无显著差异。由表可知,10 个树种中,NSC 初始浓度含量最高的为胡桃楸,最低的为春榆。C/N 初始浓度含量最高的为蒙古栎,最低的为胡桃楸。木质素初始浓度含量最高的为落叶松,最低的为胡桃楸。由皮尔斯分析结果可得,正相关性很强的元素对包括铝-铁、铝-镁、铝-锰、钙-硫、钾-磷、镁-锰、C/N-木质素,负相关性较强的元素对包括硫-C/N、钙-木质素、硫-木质素、其余各元素之间无显著相关性(表 2)。

表 1 10 个温带树种的粗根分解袋实验的初始化学参数 (平均值±标准误差)  
Table 1 Initial chemical parameters of the coarse root litterbag experiment of the ten temperate tree species (mean±SE)

| 物种<br>Tree species    | 黄槿<br><i>Phellodendron<br/>amurense</i> | 胡桃楸<br><i>Juglans<br/>mandshurica</i> | 水曲柳<br><i>Fraxinus<br/>mandschurica</i> | 色木槭<br><i>Acer<br/>mono</i> | 红松<br><i>Pinus<br/>koraiensis</i> | 落叶松<br><i>Larix<br/>gmelinii</i> | 白桦<br><i>Betula<br/>platyphylla</i> | 春榆<br><i>Ulmus<br/>davidiana<br/>japonica</i> | 紫椴<br><i>Tilia<br/>amurensis</i> | 蒙古栎<br><i>Quercus<br/>mongolica</i> |
|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 菌根类型 Mycorrhizal type | AM                                      | AM                                    | AM                                      | AM                          | EM                                | EM                               | EM                                  | EM                                            | EM                               | EM                                  |
| Al/(mg/g)             | 909.70±45.4                             | 572.00±28.6                           | 696.50±34.8                             | 978.80±48.9                 | 732.50±36.6                       | 1037.20±51.8                     | 673.80±33.6                         | 707.80±35.3                                   | 1387.00±69.3                     | 645.00±32.2                         |
| Ca/(mg/g)             | 11753.90±587.7                          | 13672.90±683.6                        | 6501.90±325.1                           | 9082.20±454.1               | 2488.30±124.4                     | 4293.20±214.6                    | 10323.30±516.1                      | 9541.70±477.0                                 | 11131.50±556.5                   | 8081.40±404.0                       |
| Cu/(mg/g)             | 3.720±0.2                               | 5.35±0.3                              | 3.18±0.2                                | 4.140±0.2                   | 3.63±0.2                          | 4.07±0.2                         | 4.95±0.3                            | 4.89±0.2                                      | 4.27±0.2                         | 3.99±0.2                            |
| Fe/(mg/g)             | 798.90±39.9                             | 558.40±27.9                           | 579.70±28.9                             | 717.50±35.8                 | 711.40±35.5                       | 1043.40±52.1                     | 518.00±25.9                         | 516.70±25.8                                   | 1182.40±59.1                     | 512.40±25.6                         |
| K/(mg/g)              | 365.70±18.2                             | 572.50±28.6                           | 734.70±36.7                             | 449.50±22.4                 | 653.80±32.6                       | 252.80±12.6                      | 263.70±13.1                         | 685.00±34.2                                   | 560.60±28.0                      | 167.10±8.3                          |
| Mg/(mg/g)             | 844.70±42.2                             | 681.90±34.1                           | 792.90±39.6                             | 845.20±42.2                 | 794.60±39.7                       | 627.00±31.3                      | 893.70±44.6                         | 923.90±46.2                                   | 1647.40±82.3                     | 627.90±31.4                         |
| Mn/(mg/g)             | 34.50±1.7                               | 47.30±2.3                             | 60.70±3.0                               | 96.00±4.8                   | 64.50±3.2                         | 55.40±2.7                        | 63.90±3.2                           | 37.00±1.8                                     | 122.70±6.1                       | 68.90±3.4                           |
| Na/(mg/g)             | 572.50±28.6                             | 373.750±18.7                          | 393.75±19.7                             | 356.25±17.8                 | 336.25±16.8                       | 326.25±16.3                      | 466.25±23.3                         | 365.00±18.3                                   | 426.25±21.3                      | 437.50±21.9                         |
| P/(mg/g)              | 457.30±22.8                             | 952.90±47.6                           | 455.60±22.7                             | 573.10±28.6                 | 1069.10±53.4                      | 491.20±24.5                      | 487.40±24.3                         | 1535.80±76.7                                  | 756.30±37.8                      | 242.40±12.1                         |
| S/(mg/g)              | 81.00±4.1                               | 84.130±4.2                            | 64.690±3.2                              | 71.23±3.6                   | 70.240±3.5                        | 48.820±2.4                       | 64.830±3.2                          | 65.05±3.3                                     | 71.120±3.6                       | 63.68±3.2                           |
| Zn/(mg/g)             | 5.910±0.3                               | 20.910±1.1                            | 23.290±1.2                              | 14.93±0.8                   | 39.88±1.9                         | 17.01±0.9                        | 11.540±0.6                          | 27.000±1.4                                    | 35.050±1.8                       | 56.69±2.8                           |
| NSC/(mg/g)            | 69.30±0.1                               | 133.90±0.1                            | 83.70±1.6                               | 74.40±9.4                   | 102.80±0.5                        | 57.00±2.9                        | 68.90±0.5                           | 44.90±0.6                                     | 87.20±1.0                        | 64.10±0.3                           |
| C/N                   | 40.10±2.0                               | 28.80±1.4                             | 65.80±3.2                               | 44.50±2.2                   | 87.00±4.3                         | 110.50±5.5                       | 95.20±4.7                           | 35.60±1.7                                     | 58.20±2.9                        | 116.10±5.8                          |
| 木质素 Lignin/%          | 13.10±1.1                               | 12.10±0.6                             | 22.40±1.2                               | 19.70±0.6                   | 21.80±0.3                         | 31.90±0.2                        | 19.10±0.4                           | 18.50±0.6                                     | 22.70±0.5                        | 27.20±0.1                           |
| 纤维素 Cellulose/%       | 20.70±1.3                               | 12.30±1.4                             | 16.30±0.2                               | 14.90±0.1                   | 8.40±0.1                          | 6.20±0.7                         | 16.60±0.1                           | 34.80±2.5                                     | 19.10±1.7                        | 11.80±0.5                           |
| 半纤维素 Hemicellulose/%  | 28.70±0.9                               | 24.90±0.9                             | 29.60±0.6                               | 29.00±0.1                   | 25.40±0.1                         | 29.90±0.1                        | 32.10±0.2                           | 30.30±1.4                                     | 30.50±0.4                        | 26.20±0.1                           |

AM: 内生菌根, Arbuscular mycorrhiza; EM: 外生菌根, Ectomycorrhiza; NSC: 非结构性碳水化合物, Non-structural carbohydrate

表 2 各元素间皮尔斯相关系数分析  
Table 2 Analysis of pilsner correlation coefficients between elements

| 根系性状<br>Root traits | NSC     | Al      | Ca      | Cu     | Fe     | K      | Mg     | Mn     | Na     | P      | S        | Zn     | C:N     | 木质素<br>Lignin | 纤维素<br>Cellulose | 半纤维素<br>Hemicellulose |
|---------------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|---------|---------------|------------------|-----------------------|
| NSC                 | 1       |         |         |        |        |        |        |        |        |        |          |        |         |               |                  |                       |
| Al                  | -0.179  | 1       |         |        |        |        |        |        |        |        |          |        |         |               |                  |                       |
| Ca                  | 0.21    | 0.015   | 1       |        |        |        |        |        |        |        |          |        |         |               |                  |                       |
| Cu                  | 0.166   | -0.204  | 0.612   | 1      |        |        |        |        |        |        |          |        |         |               |                  |                       |
| Fe                  | -0.034  | 0.933** | -0.12   | -0.235 | 1      |        |        |        |        |        |          |        |         |               |                  |                       |
| K                   | 0.375   | -0.053  | -0.053  | -0.095 | -0.073 | 1      |        |        |        |        |          |        |         |               |                  |                       |
| Mg                  | 0.016   | 0.733*  | 0.309   | 0.063  | 0.574  | 0.289  | 1      |        |        |        |          |        |         |               |                  |                       |
| Mn                  | 0.121   | 0.679*  | -0.002  | -0.115 | 0.525  | -0.003 | 0.686* | 1      |        |        |          |        |         |               |                  |                       |
| Na                  | -0.156  | 0.044   | 0.538   | -0.089 | -0.039 | -0.355 | 0.184  | -0.159 | 1      |        |          |        |         |               |                  |                       |
| P                   | 0.113   | -0.12   | 0.034   | 0.431  | -0.125 | 0.676* | 0.195  | -0.213 | -0.424 | 1      |          |        |         |               |                  |                       |
| S                   | 0.639*  | -0.138  | 0.663*  | 0.226  | -0.18  | 0.313  | 0.176  | -0.057 | 0.421  | 0.191  | 1        |        |         |               |                  |                       |
| Zn                  | 0.06    | -0.097  | -0.323  | -0.169 | -0.091 | 0.011  | 0.06   | 0.297  | -0.259 | 0.058  | -0.168   | 1      |         |               |                  |                       |
| C:N                 | -0.306  | -0.042  | -0.631  | -0.296 | 0.069  | -0.606 | -0.276 | 0.117  | -0.122 | -0.513 | -0.730*  | 0.428  | 1       |               |                  |                       |
| 木质素                 | -0.441  | 0.294   | -0.708* | -0.392 | 0.362  | -0.354 | -0.081 | 0.309  | -0.428 | -0.337 | -0.897** | 0.443  | 0.812** | 1             |                  |                       |
| 纤维素                 | -0.423  | -0.003  | 0.454   | 0.278  | -0.226 | 0.378  | 0.38   | -0.197 | 0.275  | 0.54   | 0.195    | -0.158 | -0.586  | -0.433        | 1                |                       |
| 半纤维素                | -0.640* | 0.418   | 0.098   | 0.051  | 0.246  | -0.107 | 0.439  | 0.189  | 0.206  | -0.1   | -0.439   | -0.466 | 0.046   | 0.174         | 0.441            | 1                     |

\*\* 相关性在 0.01 层上显著 (双尾); \* 相关性在 0.05 层上显著 (双尾)

## 2.2 粗根的分解速率

10 个树种粗根分解的过程中,质量残留率随着时间的增长呈现下降趋势(图 1)。由图 1 中可以看出,胡桃楸分解速率最快,蒙古栎分解速率最慢。在分解 210 d 时,黄檗、胡桃楸、水曲柳、色木槭、红松、落叶松、白桦、春榆、紫椴、蒙古栎粗根分解质量损失率分别为 27%、35%、24%、17%、17%、12%、13%、27%、18%、10%。分解 270 d 时,其粗根分解质量损失率分别为 49%、48%、27%、19%、22%、17%、16%、32%、23%、15%。分解 360 d 时,其粗根分解质量损失率分别为 62%、64%、40%、32%、32%、25%、22%、49%、45%、22%。由单因素方差分析得出,4 个内生菌根(AM)树种和 6 个外生菌根(EM)树种分解速率间存在差异。内生菌根树种比外生菌根树种分解速率快,可能由于二者性状指标或调控机制不同所导致。

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)一致,胡桃楸粗根分解系数为 0.897,蒙古栎粗根分解系数为 0.227,10 个树种粗根间  $k$  值差异显著( $P<0.0001$ )(图 1;表 3)。

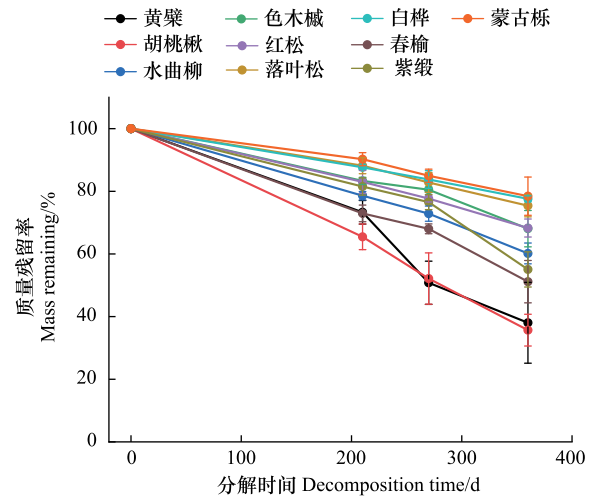


图 1 10 个树种不同分解时间的质量残留率(平均值±标准误差)

Fig.1 Mass remaining (%) of roots of different decomposition time of the ten tree species (mean±SE)

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

| 树种<br>Tree species | 黄檗<br><i>Phellodendron amurense</i> | 胡桃楸<br><i>Juglans mandshurica</i> | 水曲柳<br><i>Fraxinus mandshurica</i> | 色木槭<br><i>Acer mono</i> | 红松<br><i>Pinus koraiensis</i> | 落叶松<br><i>Larix gmelinii</i> | 白桦<br><i>Betula platyphylla</i> | 春榆<br><i>Ulmus davidiana japonica</i> | 紫椴<br><i>Tilia amurensis</i> | 蒙古栎<br><i>Quercus mongolica</i> |
|--------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| $k$                | 0.826                               | 0.897                             | 0.477                              | 0.341                   | 0.358                         | 0.264                        | 0.244                           | 0.593                                 | 0.458                        | 0.227                           |
| $R^2$              | 0.923                               | 0.974                             | 0.984                              | 0.956                   | 0.983                         | 0.971                        | 0.998                           | 0.970                                 | 0.869                        | 0.964                           |

## 2.3 粗根分解速率与初始化学成分的关系

10 个树种粗根  $k$  值与初始 C/N 浓度成显著负相关关系( $R^2=0.677, P<0.0001$ ,图 2)。表明 C/N 浓度越高, $k$  越小,即粗根分解速率越低。10 个树种粗根  $k$  值与初始 NSC 浓度成正相关关系( $R^2=0.199, P<0.0001$ ,图 2)。表明  $k$  值随非结构性碳水化合物(NSC)浓度的升高而增加,即粗根分解速率变大。10 个树种粗根  $k$  值与初始木质素浓度成负相关关系( $R^2=0.649, P<0.0001$ ,图 2)。表明木质素浓度越高, $k$  越小,即粗根分解速率越低。粗根  $k$  值与初始化学元素 Ca、S 间具有相关性,未观察到粗根  $k$  值与初始化学元素(Al、Cu、Fe、P 等)之间的显著相关性。数据表明,粗根初始化学成分 C/N 浓度、非结构性碳水化合物(NSC)浓度和木质素浓度是影响粗根根系分解的主要元素,其中 C/N 浓度和木质素浓度解释粗根分解速率差异的程度更高(图 2)。

## 3 讨论

粗根是森林生态系统重要的碳库,占总根系碳储量的大部分,在生态系统碳和养分循环中具有重要作用<sup>[30]</sup>,同时粗根分解也是生态研究的热点与难点。根系分解速率与根系的直径密切相关,不同直径的根系分解速率不同,导致养分归还速度存在较大差异<sup>[9]</sup>。目前根系方面的研究主要集中于对细根(<2 mm),而对粗根分解研究较弱,其调控因素不清,机制不明。

本研究 10 个树种粗根在分解初期分解速率较快,随着时间的增加,各树种分解速率逐渐下降(图 1)。原

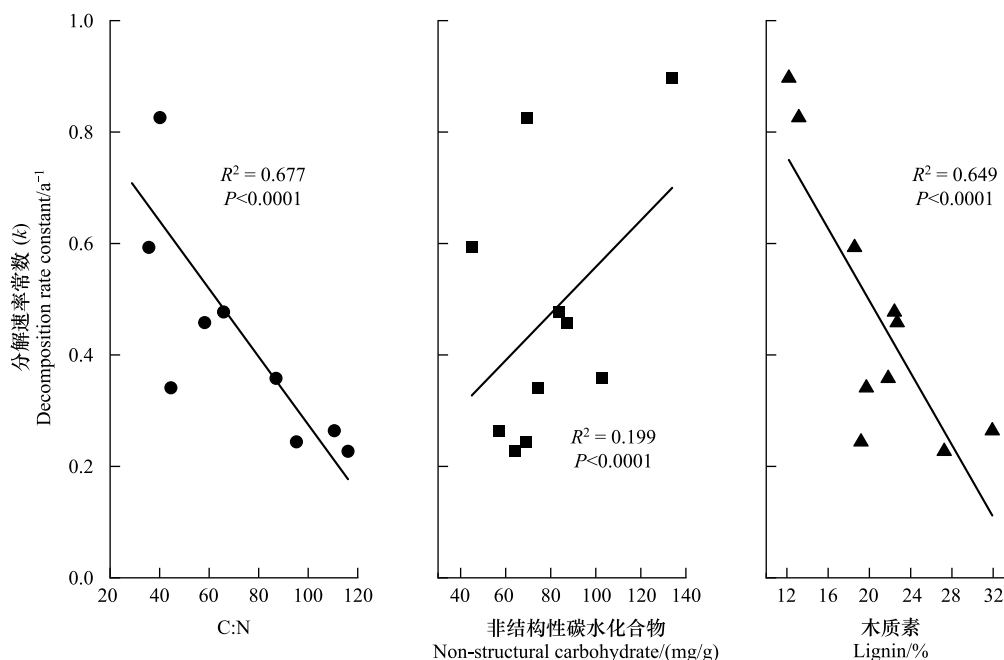


图2 所有树种根系分解常数( $k$ )与碳氮比(Carbon: Nitrogen ratio)、非结构性碳水化合物(Non-structural carbohydrate)和木质素(Lignin)之间的线性回归关系

Fig.2 Regression relation between root decay constants ( $k$ ) and root initial Carbon: Nitrogen ratio (C/N)、non-structural carbohydrate (NSC) and lignin concentrations across all species

因是在分解初期,粗根中的结构性碳水化合物含量相对较高,分解较快。而分解后期粗根的质量损失慢慢减少,原因可能是酸不溶性物质以及木质素等对粗根分解具有主导性作用,抑制了粗根分解<sup>[8]</sup>。Eriksson<sup>[26]</sup>等指出,在分解后期 N 浓度的增加可能会抑制木质素的分解,因此降低了粗根的分解速率。有研究表明,粗根中 N 浓度越高(即 C/N 低)的树种,一般具有更快的分解速率<sup>[29]</sup>。本研究 10 个树种粗根 C/N 浓度越高,分解速率越低的结果与此相一致(图 1,表 3)。同时,有研究表明,内生菌根(AM)树种与外生菌根(EM)树种分解速率间差异可能与树种间微生物数量或土壤化学性质根际效应有关,因此导致二者分解速率不同<sup>[31–33]</sup>。而初始化学元素 Ca、S 与粗根  $k$  值有相关性,可能原因为 Ca 是生物生长的重要元素,对土壤动物或微生物等具有一定的影响。而 S 元素是生物生长发育所必需的营养元素,对生物的生长代谢也具有一定的意义<sup>[34–39]</sup>。

非结构性碳水化合物(NSC)对粗根分解也具有一定的影响。非结构性碳水化合物(NSC)是树木体内的碳水化合物生产过多而累积出来的物质,植物中大多数非结构性碳水化合物(NSC)为淀粉以及可溶性糖,除此之外还包括了糖醇和一些微量脂类物质<sup>[31]</sup>。粗根中的淀粉以及非结构性碳水化合物(NSC)含量相对较高,主要原因为树木根部的生理以及代谢活动等相对活跃,植物需要消耗大部分能量来维持根生长和发挥其功能,使其成为树木中的非结构性碳水化合物(NSC)库<sup>[40]</sup>。Wang 和 Zhou 等研究认为作为易降解成分的非结构性碳水化合物(NSC),它的含量越高对根系分解越有益<sup>[41]</sup>。朱蔚娜等研究发现,在根系分解前期,其分解速率主要受到结构性碳水化合物含量的限制,而在根系分解后期,其分解速率的主要影响因素为非结构性碳水化合物,这一结果与 Cusack 等研究认识不同<sup>[32]</sup>。本研究结果表明,非结构性碳水化合物(NSC)浓度越高,粗根分解速率越快(图 2)。同时非结构性碳水化合物(NSC)与其他养分元素之间无显著相关性,说明非结构性碳水化合物(NSC)对粗根分解的调控不受其他养分元素的影响(表 3)。以前的研究忽视了非结构性碳水化合物(NSC)在调控粗根分解的重要影响。

粗根分解还受木质素浓度的影响。木质素作为微生物难分解的物质,较高的含量会对粗根的分解产生抑制作用<sup>[41]</sup>。在植物中木质素的生物学功能主要为提高了细胞壁的完整性以及抵抗了病原体的侵害<sup>[42]</sup>,一般

情况下被公认是阻碍有机物在生物过程中分解的难分解物质,在木质素保护下水溶性等易分解的组分是限制分解速率的主要影响因素,因此控制粗根分解<sup>[43]</sup>。朱蔚娜等研究发现,根系中木质素含量对根系分解的中期和后期有较大抑制性,但多元逐步回归分析显示根系分解中后期的主要影响因素是非结构性碳水化合物<sup>[41]</sup>。而潘君等研究认为,根系后期质量损失慢慢变少,说明木质素对粗根分解有较大的主导作用<sup>[8]</sup>。本研究得到的结论为木质素含量越高,粗根分解速率越慢(图 2)。

另外,由于本实验研究时间相对较短,因此并未对分解过程中各时期粗根的 C/N 浓度、非结构性碳水化合物(NSC)浓度以及木质素浓度进行测定,所以粗根内 C/N 浓度、非结构性碳水化合物(NSC)浓度以及木质素浓度是否保持在一个恒定状态以及对粗根后期分解速率的影响还有待今后进一步研究。同时粗根分解速率还可能受土壤温度、水分、养分限制和微生物群落的改变等因素影响,在今后的实验研究过程中,应加强此方面的研究。

#### 4 结论

本研究对东北温带森林 10 个树种的粗根进行了研究,在 365 天的分解实验中,通过埋袋法进一步验证了不同树种粗根分解速率的差异以及不同调控因子对粗根分解的影响。并发现粗根分解速率随初始 C/N 浓度的增加而降低,随初始 NSC 浓度的升高而增加,随初始木质素浓度的增加而减小。3 个调控因子对粗根分解均具有相关性。本研究所测定的其他化学指标如 Al、Cu、P、Fe 等,均和分解速率无显著相关性。本研究结果对于理解森林生态系统粗根分解与养分释放具有重要意义。

#### 参考文献(References):

- [1] Resh S C, Battaglia M, Worledge D, Ladiges S. Coarse root biomass for eucalypt plantations in Tasmania, Australia: sources of variation and methods for assessment. *Trees*, 2003, 17(5): 389-399.
- [2] 郭立, 范碧航, 吴渊, 李文涛, 崔喜红, 陈晋. 探地雷达应用于植物粗根探测的研究进展. *中国科技论文*, 2014, 9(4): 494-498.
- [3] 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(12): 234.
- [4] 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): 633-646.
- [5] 崔喜红, 陈晋, 沈金松, 曹鑫, 陈学泓, 朱孝林. 基于探地雷达的树木根径估算模型及根生物量估算新方法. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(2): 243-252.
- [6] 闫慧, 董心亮, 张守仁. 古田山亚热带常绿阔叶林粗根生物量分布特征. *科学通报*, 2014, 59(24): 2416-2425.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Steinberger Y, Degani R, Barnes 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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. *生态学报*, 2019, 39(13): 4865-4871.
- [15] Wei X, Zhang G Z. Progress and prospect in the main research realms of tree fine roots. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(5), 143-147.

- [16] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology*, 2000, 81(1): 275-280.
- [17] 张小全, 吴可红, Dieter Murach. 树木细根生产与周转研究方法评述. *生态学报*, 2000, 20(5): 875-883.
- [18] Han Z G. Decomposition dynamics of fine roots of *Cunninghamia lanceolata* in mid-subtropics. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2008, 3(1): 15-23.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 张立华, 叶功富, 林益明, 卢昌义, 侯杰. 木麻黄人工林细根分解过程中的养分释放及能量归还. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2007, 46(2): 268-273.
- [23] Silver W L, Miya R K. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, 2001, 129(3): 407-419.
- [24] 张秀娟, 梅莉, 王政权, 韩有志. 细根分解研究及其存在的问题. *植物学通报*, 2005, 40(2): 246-254.
- [25] 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.
- [26] Eriksson K E L, Blanchette R A, Ander P. *Microbial and Enzymatic Degradation of Wood and Wood Components*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990.
- [27] Stuart Chapin F III, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York, NY: Springer New York, 2002.
- [28] Persson H, Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. *Root systems of arboreal plants*. 3rd Ed. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [29] 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.
- [30] 王丹丹, 徐永明, 岳书平, 闫业超, 史学正, 于东升. 基于探地雷达的植物根系探测研究进展. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2016, 8(1): 46-55.
- [31] 蒋治岩, 邹青勤, 杨柳, 李汶倬, 张鹤东, 陈祥伟, 王秀伟. 典型黑土区不同菌根类型树种根系分泌速率及根际效应差异. *生态学杂志*, 2021, 40(9): 2709-2718.
- [32] 杨柳, 王秀伟, 蒋治岩, 高扬, 毛子军. 东北地区樟子松根系分泌物分泌速率纬度间的差异. *东北林业大学学报*, 2020, 48(10): 30-33, 40.
- [33] 田晓龙, 汪依妮, 柳鑫, 金宝成, 何胜江, 田思惠, 张乾, 陈超, 赵学春. 喀斯特地区不同石漠化程度草地根系分解与周转特征. *生态学报*, 2021, 41(10): 4203-4212.
- [34] Liu F, Wang X C, Wang C K, Zhang Q Z. Environmental and biotic controls on the interannual variations in CO<sub>2</sub> fluxes of a continental monsoon temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 296: 108232.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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(1): 284-295.
- [39] 陈吉, 蔡柏岩. 植物对硫素的吸收、转运及利用的研究进展. *中国农学通报*, 2021, 37(29): 42-46.
- [40] 邹青勤, 王奕淦, 蒋治岩, 陈祥伟, 王秀伟. 典型黑土区不同水土保持树种的非结构性碳水化合物特征及种间差异. *北京林业大学学报*, 2021, 43(10): 1-8.
- [41] 朱蔚娜, 张国龙, 张璞进, 张迁迁, 任瑾涛, 徐步云, 清华. 大针茅草原 6 种主要植物叶凋落物和根系分解特征与功能性状的关系. *植物生态学报*, 2021, 45(6): 606-616.
- [42] He M, Zhao R D, Tian Q X, Huang L, Wang X G, Liu F. Predominant effects of litter chemistry on lignin degradation in the early stage of leaf litter decomposition. *Plant and Soil*, 2019, 442(1): 453-469.
- [43] Ziegler F, Kögel I, Zech W. Alteration of gymnosperm and angiosperm lignin during decomposition in forest humus layers. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, 1986, 149(3): 323-331.