DOI: 10.5846/stxb201801200158

任立宁,刘世荣,蔡春菊,王一,吴溪玭,郭明明.川南地区毛竹和林下植被芒箕细根分解特征.生态学报,2018,38(21): - . Ren L N, Liu S R, Cai C J, Wang Y, Wu Q P, Guo M M.Decomposition characteristics of the fine root of *Phyllostachys edulis* and *Dicranopteris pedata* in southern Sichuan.Acta Ecologica Sinica,2018,38(21): - .

川南地区毛竹和林下植被芒箕细根分解特征

任立宁,刘世荣*,蔡春菊,王一,吴溪玭,郭明明 国际竹藤中心,北京 100102

摘要:揭示竹林与其林下植被细根单独和混合分解特征,探讨竹林细根与其林下植被细根之间相互影响的潜在机制,为毛竹林 林下植被的合理经营管理提供理论参考。采用原位分解袋法研究了四川长宁毛竹(Phyllostachys edulis)与林下植被芒箕 (Dicranopteris pedata)细根分解和养分释放过程,试验周期为1年。结果表明(1)毛竹和芒箕细根初始化学组分有着明显差异, 碳(C)含量、碳氮比(C/N)和碳磷比(C/P)毛竹显著高于芒箕(P<0.05),而氮(N)含量、磷(P)含量和氮磷比(N/P)均芒箕高于 毛竹(P<0.05)。(2)毛竹和芒箕细根分解系数(k)分别为0.66±0.04和0.42±0.41,毛竹细根分解速率显著高于芒箕;土壤温度 与分解速率呈显著正相关,是影响细根分解速率的关键环境因子。(3)毛竹和芒箕细根碳(C)氮(N)、磷(P)养分释放均表现 为净释放,毛竹细根碳(C)释放速率高于芒箕,但细根氮(N)和磷(P)释放率均低于芒箕。(4)混合分解的实测值和期望值对 比结果表明毛竹和芒箕细根混合对分解速率和磷(P)元素的释放没有显著影响,但显著促进了碳(C)元素的释放,抑制了分解 初期氮(N)元素的释放。毛竹与林下植被芒箕单独细根分解和养分释放特征均表现不同;细根混合分解速率无显著混合效应, 但养分释放的混合效应表现出不同阶段性和不同方向(正或负),说明林下植被通过影响细根养分释放而影响竹林生态系统的 养分循环。

关键词:毛竹;芒箕;细根分解;养分释放;混合效应

Decomposition characteristics of the fine root of *Phyllostachys edulis* and *Dicranopteris pedata* in southern Sichuan

REN Lining, LIU Shirong^{*}, CAI Chuju, WANG Yi, WU Qipin, GUO Mingming International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

Abstract: This study revealed the single and mixed decomposition characteristics of fine roots in bamboo forest and its understory vegetation, explored the potential mechanisms of interaction and function between them, and provides a theoretical reference for the rational management of understory vegetation in Moso bamboo forest. The fine – root in situ decomposition and nutrient release processes of *Phyllostachys edulis* and understory vegetation (*Dicranopteris pedata*) in Changning, Sichuan, were investigated using a litter bag, and our test period is 1 year. Our results showed that (1) the initial chemical components of the fine roots of *P. edulis* and *D. pedata* were significantly different. The C content and C/N and C/P ratios of *P. edulis* were significantly higher than those of *D. pedata* (P < 0.05), while the N content, P content, and N/P ratio of *D. pedata* were all higher than those of *P. edulis* (P < 0.05). (2) The decomposition coefficients (k) of *P. edulis* and *D. pedata* were of fine-root decomposition of *P. edulis* was higher than that of *D. pedata*. The soil temperature was positively correlated with the decomposition rate, and it was the key environmental factor affecting the decomposition rate of fine roots. (3) The C, N, and P nutrients showed a net release, and the release rate of C in *P. edulis* was higher than that in *D. pedata*, while the release rates of N and P in *D. pedata* were

基金项目:国家林业局林业软科学研究项目(2017-R11);林业生态站等监测运行补助项目(2017-LYPT-DW-144)

收稿日期:2018-01-20; 网络出版日期:2018-00-00

^{*}通讯作者 Corresponding author.E-mail: liusr@icbr.ac.cn

higher than those in *P. edulis*. (4) The fine-root mixtures of *P. edulis* and *D. pedata* had no significant effect on the decomposition rate and release of P, but significantly promoted the release of C and inhibited the release of N at the initial stage of decomposition. The characteristics of single fine-root decomposition and nutrient release were different between *P. edulis* and *D. pedata*. No significant mixed effect of decomposition rate was observed, but the mixed effect of nutrient release showed different stages and directions (positive or negative). The understory vegetation affected the nutrient cycle of the bamboo forest ecosystem by affecting the release of nutrients from the fine roots.

Key Words: Phyllostachys edulis; Dicranopteris pedata; decomposition of fine root; nutrient release; mixing effects

森林生态系统中,凋落物分解对土壤养分周转、能量流动方面发挥着重要的作用^[1-2]。森林生态系统一 般都是多种植物的复合系统,凋落物主要以混合状态而非孤立的形式存在^[3]。这种混合状态可以改变凋落 物的分解环境^[4-5]、异质凋落物间的养分互补^[6-8],以及以凋落物为食物或栖息生境的土壤动物和微生物群落 等^[9-12],从而影响凋落物的分解和养分循环的快慢。近年来,混合凋落物的研究逐渐受到重视,然而混合凋落 物分解和养分释放产生的混合效应并无一致的结论,主要表现为正效应^[13-14]、负效应^[15-16]和加和效应^[17]。综 合 30 项研究结果发现,70%混合凋落物叶分解表现出非加合效应(正效应或负效应)^[18],即混合凋落物的实 际分解速率偏离于期望分解速率。混合凋落物的分解过程并非简单的物种丰富度问题,期间不仅和不同物种 的特异性性质有关,还受它们的物理和化学性质组分的差异的影响,甚至最终改变混合凋落物分解的结 果^[19]。因此,深入了解凋落物分解的混合效应对于认识同一生态系统中不同物种间的相互作用和关系具有 重要意义。细根是生态系统碳以及其他养分输入的主要途径^[20-21],然而关于凋落物分解的研究只有 2%集中 在根系上^[22],且大部分研究主要探讨单一物种间的分解特征^[23-28]。且与地上凋落物混合分解相比,细根混合 分解研究较少^[18,29]。

林草复合系统在物质生产、调节生态系统养分中的作用日益被重视^[30]。桤木(Alnus formosana)-黑麦草 (Lolium perenne)^[31]、光皮桦(Betula luminifera)-牛鞭草(Hemarthria compressa)^[32]等林草复合模式细根分解研 究表明,牧草促进了林木细根的分解和养分释放,有利于地力的维持和恢复。目前,竹林作为我国一种主要的 森林类型,具有分布广、面积大、生长快等特点,高效的固碳能力对调节大气 CO₂浓度具有重要作用^[33-34]。然 而竹林和灌草复合模式下细根分解和养分动态特征还不清楚,相关研究还有待加强。本研究以四川省长宁县 典型竹林——毛竹(Phyllostachys edulis)和林下植被优势种芒箕(Dicranopteris pedata)为研究对象,对比毛竹和 芒箕细根的化学特征,分析两种植被单独以及混合细根分解和养分动态的变化特征,探讨毛竹细根和芒箕细 根之间相互作用的潜在机制,旨在为毛竹林林下植被的合理经营管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于竹资源分布较为丰富的四川省长宁县蜀南竹海景区内(105°00'59''—105°01'07''E,28°27' 57''—28°28'07''N)。该区域属典型的中亚热带湿润性季风气候,温暖湿润,年均气温 18.3℃,年均降雨量 1114.2mm,年均空气相对湿度 83%,日照时数 1148h,无霜期达 350d 以上。主要土壤类型有山地黄壤、紫色 土。地貌以中低山地和丘陵为主,由于受地形地貌影响,区域气候垂直变化明显。植被覆盖率为 42%,主要 竹种有毛竹(Phyllostachys edulis)、苦竹(Pleioblastus amarus)、梁山慈竹(Dendrocalamus farinosus)和硬头黄竹 (Bambusa rigida Keng)等,林下优势植物有芒萁(Dicranopteris pedata)、蕨(Pteridium aquilinum var. latiusculum)、狗脊(Woodwardia japonica)、里白(Diplopterygium glaucum)等^[35-36]。

1.2 试验设计

选取林分条件(密度、年龄结构)和环境条件(海拔、坡向、坡位、坡度等)基本一致的毛竹林样地类型,设置6个20m×20m标准样地(表1)。

在样地外挖取 0—20cm 土层的毛竹和芒箕细根(<2mm),用流水冲洗干净后 65℃烘干至恒重,装进孔径 为 1mm 的凋落物分解袋,每袋装 2g 干样品。2016 年 6 月 1 日,每个样地内随机放置 36 个(12 个毛竹,12 个 芒箕,12 个毛竹 & 芒箕)细根分解袋,细根分解袋放置时,用铁锹沿与水平面成 45°角 20cm 深轻轻将细根分 解袋埋入土壤中,这有利于细根样品与土壤表明的充分接触。每 3 个月收回一次,共收集 4 次。

| | Table 1 | Stand characteristics of Phyllos | tacnys eaulis | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------------|--|--|
| 样地编号 Sample number | 密度 Density/ (株/hm ²) | 平均胸径 Mean DBH/(cm) | 坡度 Slope/(°) | 海拔 Altitude/m | | |
| 1 | 4850 | 9.98 | <5 | 889 | | |
| 2 | 5450 | 10.59 | <5 | 884 | | |
| 3 | 5900 | 9.36 | <5 | 901 | | |
| 4 | 5350 | 10.13 | <5 | 896 | | |
| 5 | 4525 | 9.90 | <5 | 893 | | |
| 6 | 4550 | 9.81 | <5 | 891 | | |

表1 毛竹林样地概况 Table 1 Stand characteristics of *Phyllostachys eduli*

1.3 取样方法及分析

分别于 2016 年 9 月 1 日、12 月 1 日和 2017 年 3 月 1 日、6 月 1 日,从每个样地内取回分解袋,将袋内其它物质(如新长的植物根,小动物等)检出,剩余细根用清水洗涤干净,然后 65℃烘干至恒重,得出分解后的剩余 干重。细根粉碎过 100 目筛后待用,全碳(C)含量采用重铬酸外加热氧化法测定,全氮(N)、全磷(P)的含量 采用 H₂SO₄/H₂O₂消煮法,用 Smartchem 300 全自动化学分析仪测定。用 LI8100 配备的水分和温度探头测定 细根分解袋附近的表层土壤温度和含水量,每半月记录一次数据,连续监测整个细根分解周期。

1.4 统计与分析

1.4.1 细根干重剩余率(%)

干重剩余率(
$$MR$$
)=(M_t/M_0)×100

式中, M_0 为初始凋落物干重(g), M_t 是 t 时凋落物分解剩余干重(g)。

1.4.2 细根分解速率(k)

调落物分解动态拟合采用 Olson 指数衰减模型^[37], 调落物分解系数(k):

$$\ln(M_{t}/M_{0}) = -k$$

式中,k为凋落物分解系数。凋落物分解的半衰期($t_{0.5}$)和分解 95%时所需要的时间($t_{0.95}$)分别为: $t_{0.5}=0.693/k$, $t_{0.95}=3/k$ 。

1.4.3 元素剩余率(%)^[38]

元素剩余率(NR)=100×($C_t \times M_t$)/($C_0 \times M_0$)

式中, C_0 为初始元素含量(g/kg), C_t 为t时凋落物元素含量(g/kg)。

1.4.4 混合细根期望干重剩余率和养分剩余率(%)^[39]

期望干重剩余率=100×(M_1 × MR_1 + M_2 × MR_2 +·····+ M_n × MR_n)/(M_1 + M_2 +·····+ M_n)

期望养分剩余率=100×(N_1 × NR_1 + N_2 × NR_2 +·····+ N_n × NR_n)/(N_1 + N_2 ·····+ N_n)

式中, *M* 和 *N* 表示各组分在混合物中的初始干重和养分含量, *MR* 和 *NR* 表示 *t* 时各组分单一细根的干重剩余 率和养分剩余率, 本研究中混合细根组分为 2 个, *n*=2。

1.4.5 数据处理与统计检验

利用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,采用 T-检验法检测毛竹和芒箕细根间干重剩余率、养分剩余率的差异,及混合细根干重剩余率和养分剩余率的实测值与期望值间的差异,采用 Pearson 法检测细根干重损失量与土壤含水量、土壤温度的相关性;利用 Sigmaplot 12.5 制图。

2 结果与分析

2.1 细根初始化学组成

毛竹和芒箕的细根初始化学组分存在显著差异(表2)。其中,毛竹细根全碳(C)含量显著高于芒箕,但 细根全氮(N)和磷(P)含量低于芒箕(P<0.05);毛竹细根碳氮比(C/N)和碳磷比(C/P)显著高于芒箕,而氮 磷比(N/P)则呈现出相反的趋势(P<0.05)。

细相的初始化学组出

| | | 4 | | - 纽风 | | | |
|--------------|------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------|--|
| | | Table 2 In | itial chemical compos | sition of fine root | | | |
| 类型 | 碳 C/ | 氮 N/ | 磷 P/ | 碳氮比 | 碳磷比 | 氮磷比 | |
| Types | (g/kg) | (g/kg) | (g/kg) | C/N | C/P | N/P | |
| 毛竹 P. edulis | 599.38±0.34a | $8.85{\pm}0.01{\rm b}$ | $0.118{\pm}0.001\mathrm{b}$ | 67.76±0.06a | 5095.70±47.30a | $75.20\pm0.71\mathrm{b}$ | |
| 芒箕 D. pedata | $412.07 \pm 0.09 \mathrm{b}$ | 22.81±0.06a | 0.223±0.001a | $18.06{\pm}0.05{\rm b}$ | $1845.44{\pm}9.14\mathrm{b}$ | 102.15±0.69a | |
| 数据为平均值± | 标准误差(n=6),同 | 列数据后标有的不 | 同字母表示两物种间 | 差异显著(P<0.05) | 1 | | |

2.2 单种细根分解速率和分解过程中的养分动态

随着分解时间的进程,毛竹和芒箕细根干重剩余率均呈逐渐下降的趋势,且细根分解总体表现为初始阶段分解最快,后期分解逐渐减慢。分解1年后,毛竹和芒箕细根干重剩余率分别为52.02%和65.33%(图1)。 分解常数 k 值的生态意义是值越大,凋落物分解速率越快,从表3可以看出毛竹细根年分解速率(0.66±0.04) 明显高于芒箕(0.42±0.41)(P<0.05),Olson的指数方程能够较好模拟两种植被细根的分解过程,毛竹和芒箕 相关系数(R²)分别为0.8967和0.9137(表3)。





Fig.1 Single fine root decomposition rates and nutrient dynamics duiring decomposition

*表示种间差异显著(P<0.05)

| 表 3 细根干重剩余率与时间的回归分析 | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------------|--|-------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| | Table 3 Regr | ession analysis between | dry weight residue of | fine root and time | | | | | |
| 类型 Type | 回归方程 Equation | 相关系数 R ² Correlation efficiency | 分解常数 Decomposition rate | 半衰期 Time of half decomposition/a | 分解 95%时间 Time of 95% decomposition/a | | | | |
| 毛竹 P. edulis | $y = 1.0524 e^{-0.154 t}$ | 0.8967 | $0.66 \pm 0.04 a$ | $1.07 \pm 0.06 \mathrm{b}$ | 4.64±0.28b | | | | |
| 芒箕 D. pedata | $y = 1.0412 e^{-0.101 t}$ | 0.9137 | $0.42 \pm 0.41 \mathrm{b}$ | 1.68±0.14a | 7.26±0.59a | | | | |

数据为平均值±标准误差(n=6),同列数据后标有的不同字母表示两物种间差异显著(P<0.05)

毛竹和芒箕细根碳(C)、氮(N)、磷(P)剩余率整体均呈下降趋势,说明细根碳(C)、氮(N)、磷(P)元素均 表现为释放状态。分解1年后,毛竹和芒箕细根中碳(C)剩余率分别为34.38%和54.26%,氮(N)剩余率分别 为70.08%和46.79%,磷(P)剩余率分别为42.44%和38.35%。毛竹细根碳(C)、释放速率显著高于芒箕(P< 0.05), 而氮(N)、磷(P)释放速率则表现出相反趋势(图1)。

2.3 细根混合对分解速率和分解过程中养分动态的影响

将混合细根的实测干重剩余率与细根单独分解得出的期望干重剩余率进行比较发现,毛竹和芒箕细根的 混合分解没有表现显著混合效应(正效应或负效应)(图2)。细根混合对分解过程中碳(C)、氮(N)、磷(P) 元素释放的影响不同(图 2)。在整个1年的分解过程中,实测碳(C)剩余率比期望值平均低 12%(P<0.05) (图 2);混合分解对氮(N)元素的释放影响在不同的分解阶段不同,在细根分解的前 3 个月,实测氮(N)剩余 率比期望值高约8%(P<0.05),后9个月分解阶段无显著差异(图2);混合分解对磷(P)元素的释放无显著影 响(图 2)。这些结果说明细根混合在整个分解阶段促进了碳(C)元素的释放,在分解阶段初期抑制了氮(N) 元素的释放,但整个分解阶段磷(P)元素的释放无混合效应。



Fig.2 Observed and expected mass and nutrient remaining in mixtures fine root

* 表示实测值与期望值差异显著(P<0.05)

http://www.ecologica.cn

2.4 环境因子对细根分解的影响

环境因子与细根干重损失之间的相关分析表明,毛竹和芒箕细根的干重损失与土壤温度呈极显著正相关(P<0.01),与土壤含水量无显著相关关系(表 4)。

| · · · · | Table 4 Relationship between ury mas | s 1055 01 mile 100t an | a son water content and temperatur | |
|--------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------|
| 米刑 | 土壤水分 Soil wat | er content | 土壤温度 Soil te | mperature |
| 天坐 Type | 相关系数 Correlation coefficient | Р | 相关系数 Correlation coefficient | Р |
| 毛竹 P. edulis | -0.300 | 0.155 | 0.681 ** | 0.000 |
| 芒箕 D. pedata | -0.169 | 0.430 | 0.603 ** | 0.002 |

| 表 4 细根干重损失量与土壤含水量、温度的关系 |
|-------------------------|
|-------------------------|

able 4 Relationship between dry mass loss of fine root and soil water content and temperatur

* * P<0.01

3 讨论

3.1 细根分解速率

根系分解受到环境因子和细根质量等的影响^[2,22,40]。环境因子中土壤含水量、温度通过影响土壤微生物 和酶活性来影响分解速率^[41]。本研究发现细根分解速率与土壤温度呈显著正相关关系(表4),这支持以往 研究中细根分解速率随温度升高而加快的结果^[42]。本研究发现细根分解速率与土壤含水量无显著相关关 系,这可能和本研究区相对稳定的土壤湿度有关。可见,在本研究区内,土壤温度对细根的分解速率比土壤含 水量的影响更突出。

细根质量对分解的影响体现在根的化学性质和形态学两方面^[22]。研究表明,具有较高的初始 N 含量和 较低的碳氮比(C/N)化学性质的凋落物,往往分解速率更快^[43-45]。然而,细根较低的碳质量(较少的可溶性 碳水化合物和较高的酸不溶性物质)^[46]或较小的直径、过高的氮(N)含量都可能抑制细根分解^[47]。这是因 为细根中氮(N)浓度越高,易形成 N-木质素络合物^[48],或者更细的根包被着外生菌根,极大地改变了细根的 物理结构和化学性质,形成抗分解保护机制,降低了分解速率^[49]。本研究中毛竹细根分解速率高于芒箕。这 个结果可能一方面是由于毛竹细根更低的初始氮(N)含量和更高的碳氮比(C/N)(表1),另一方面是由于毛 竹细根直径大于芒箕,有利于被分解。

本研究中,毛竹和芒箕细根分解前3个月较快,失重率分别达到29.17%和19.42%,后期分解速率逐渐放缓,失重率分别降低到4.08%和3.12%(图1)。本研究中根系分解的阶段性特征与以往研究结果一致^[42]。这可能是初期细根中碳水化合物的含量相对高,为微生物的分解提供了良好的条件^[50],而后期与难分解的木质素等的累积有关^[51]。

3.2 细根养分释放

环境因子、土壤养分状况、元素初始养分浓度、元素本身的特性和在根系中存在的形态都可能影响细根养 分释放^[52]。因为毛竹和芒箕细根的分解环境和土壤状况在本试验中都基本一致,所以元素的初始浓度差异 可能是影响养分释放速率不同的关键因子。本研究中,元素的初始浓度越高,养分的释放速率越快。如毛竹 细根的初始碳(C)含量显著高于芒箕细根(表1),结果表明毛竹细根的碳释放速率显著高于芒箕(图1),氮 (N)和磷(P)元素的释放速率与相应初始元素含量的关系表现出相同的规律。

养分元素在分解过程中一般表现为淋溶-富集-释放、富集-释放、和直接释放3中模式^[53]。在细根分解 过程中,养分释放受初始养分浓度的影响^[52]。凋落物初始氮(N)含量和碳氮比(C/N)是影响N的释放或富 集的关键因素^[54],有研究表明初始氮(N)含量范围在0.6%—2.8%范围时开始释放^[55],碳氮比(C/N)高于 5—15时发生富集,低于5—15时开始释放^[56]。本研究中,毛竹和芒箕细根初始氮(N)含量均在净释范围内, 碳氮比(C/N)均高于15,但N表现为直接释放(图2),这说明氮(N)释放是一个复杂的过程,并不单由初始氮 (N)含量和碳氮比(C/N)决定。同时,凋落物碳磷比(C/P)是影响P的释放或富集的关键因素^[57],凋落物磷 (P)释放的临界值为240^[58]。本研究中,毛竹和芒箕细根碳磷比(C/P)分别为5095和1845,显著大于临界值,所以磷(P)表现为直接释放。

3.3 细根混合对凋落物分解和养分释放的影响

在一些凋落物混合分解过程中,有些物种分泌的产物可以对其它物种产生有害或有益的影响^[59],不同物种组合因各物种的特异性导致其分解速率产生很大差异。本研究中,混合细根在1年的分解过程中,表现为加和效应(图2),这与前人的有关的研究相一致^[59-60]。这种加和效应的产生原因可能与混合效应的影响大小、物种特异性在凋落物混合整体水平上未能体现出来有关,忽略了各物种间的相互作用,不同物种的正、负效应相互作用彼此平衡,导致总体失重率差异不显著^[61]。此外,混合凋落物产生的混合效应(加和效应或非加和效应)在不同的分解阶段表现也会有所不同。如通过对红花槭(Acer rubrum)、北美乔松(Pinus strobus)和红云杉(Picea rubens)3种凋落物等比例混合研究表明,混合失重率在分解第1年表现为加和效应,在第2年表现为非加和的正效应^[62];还有研究表明落叶树凋落物等比例混合后分解前期的9个月表现为非加和的正效应,后期的10个月表现为非加和的负效应^[18]。本研究分解试验只进行了1年,研究结果只能表明短期内毛竹和芒箕细根混合对失重率没有显著影响,但混合分解在更长的时间周期内是否会产生非加和效应还有待进一步研究。

凋落物混合对分解过程中的养分释放的作用十分复杂,受不同物种组成、元素间的互相作用、分解阶段等 多方面影响^[29]。有研究表明,混合凋落物中高养分含量凋落物可向低养分含量凋落物提供养分,从而促进了 高质量凋落物的养分释放,减缓了低质量凋落物的养分释放。在一些分解过程中,碳(C)、氮(N)的释放有一 定联系^[63],如欧洲赤松和玉米叶混合凋落物研究,发现碳从欧洲赤松向玉米转移较多,而氮(N)是从玉米向 欧洲赤松转移,碳(C)释放在一定程度上受到氮(N)释放的限制^[8]。本研究中,混合凋落物碳(C)元素的释 放速率实测值显著快于期望值,这可能是碳(C)含量高的毛竹向含碳(C)量低的芒箕进行了转移,对毛竹的 碳(C)元素释放的促进作用强于对芒箕的碳(C)元素释放的减缓作用,导致结果整体表现出混合分解对碳 (C)释放的正效应。类似地,混合分解的养分释放也表现出不同的阶段性。有研究表明,混合凋落物对碳 (C)元素的释放在第1年表现为抑制,而在第2年则表现为促进作用^[64]。本研究中混合分解初期对毛竹氮 (N)元素释放的减缓作用强于对芒箕氮(N)元素释放的促进作用,从而混合分解氮(N)释放初期表现为负效 应;磷释放未表现出混合效应,这可能与细根混合对毛竹和芒箕磷(P)释放的作用(促进或减缓)相当有关,也 可能和细根分解周期长短有关,1年的分解时间还未表现出一定的混合效应。

4 结论

单独分解过程中,毛竹细根分解速率快于林下植被芒箕,养分释放特征均表现为直接释放。混合分解中 毛竹和芒箕细根混合对分解速率没有表现出显著的混合效应,但影响了细根分解中养分元素的释放过程其中 显著促进了碳(C)元素的释放,抑制了分解初期氮(N)元素的释放。林下植被芒箕可能通过影响分解过程中 的养分释放进而影响毛竹林生态系统的养分循环。在本研究区,土壤温度是影响毛竹和林下植被细根分解速 率的关键环境因子,细根初始养分浓度是影响养分释放模式和释放速率的关键因子。

参考文献(References):

- Wardle D A, Hörnberg G, Zackrisson O, Kalela-Brundin M, Coomes D A. Long-term effects of wildfire on ecosystem properties across an island area gradient. Science, 2003, 300(5621): 972-975.
- [2] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O, Gallet C. Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(6): 827-835.
- [3] 詹鸿振,刘传照,刘吉春,李兆全.小兴安岭阔叶红松林主要树种凋落物的分解研究.东北林业大学学报,1990,18(3):1-8.
- [4] Hättenschwiler S, Tiunov A V, Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2005, 36: 191-218.

| | | c |
|--|----|---|
| | | 1 |
| | ε. | |
| | | |
| | | |

| 5 | 林廾敏、 | 草志琴, | 邹双全, | 曹光球. | 杉木与院 | i叶树F | 十周洛物混合 | 计 分解X | 讨土壤性质的影 | 啊. | 土壤逋报。 | , 2006, | . 37(| (2) | : 258-262 |
|---|------|------|------|------|------|------|--------|--------------|---------|----|-------|---------|-------|-----|-----------|
|---|------|------|------|------|------|------|--------|--------------|---------|----|-------|---------|-------|-----|-----------|

- [6] Lummer D, Scheu S, Butenschoen O. Connecting litter quality, microbial community and nitrogen transfer mechanisms in decomposing litter mixtures. Oikos, 2012, 121(10): 1649-1655.
- [7] Schimel J P, Hättenschwiler S. Nitrogen transfer between decomposing leaves of different N status. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(7): 1428-1436.
- [8] Berglund S L, Ågren G I, Ekblad A. Carbon and nitrogen transfer in leaf litter mixtures. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 341-348.
- [9] 胡亚林,汪思龙,黄宇,于小军. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响. 生态学报, 2005, 25(10): 2662-2668.
- [10] Blair J M, Parmelee R W, Beare M H. Decay rates, nitrogen fluxes, and decomposer communities of single- and mixed-species foliar litter. Ecology, 1990, 71(5): 1976-1985.
- [11] Kubartová A, Ranger J, Berthelin J, Beguiristain T. Diversity and decomposing ability of saprophytic fungi from temperate forest litter. Microbial Ecology, 2009, 58(1): 98-107.
- [12] Malosso E, English L, Hopkins D W, O'Donnell A G. Use of ¹³C-labelled plant materials and ergosterol, PLFA and NLFA analyses to investigate organic matter decomposition in Antarctic soil. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(1): 165-175.
- [13] Salamanca E F, Kaneko N, Katagiri S. Effects of leaf litter mixtures on the decomposition of *Quercus serrata* and *Pinus densiflora* using field and laboratory microcosm methods. Ecological Engineering, 1998, 10(1): 53-73.
- [14] Liu P, Huang J H, Han X G, Sun O J. Litter decomposition in semiarid grassland of Inner Mongolia, China. Rangeland Ecology & Management, 2009, 62(4): 305-313.
- [15] Wardle D A, Bonner K I, Nicholson K S. Biodiversity and plant litter: experimental evidence which does not support the view that enhanced species richness improves ecosystem function. Oikos, 1997, 79(2): 247-258.
- [16] Nilsson M C, Wardle D, Dahlberg A. Effects of plant litter species composition and diversity on the boreal forest plant-soil system. Oikos, 1999, 86 (1): 16-26.
- [17] Tardif A, Shipley B. Using the biomass-ratio and idiosyncratic hypotheses to predict mixed-species litter decomposition. Annals of Botany, 2013, 111(1): 135-141.
- [18] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed species leaf litter. Oikos, 2004, 104(2): 230-246.
- [19] 林成芳, 郭剑芬, 陈光水, 杨玉盛. 森林细根分解研究进展. 生态学杂志, 2008, 27(6): 1029-1036.
- [20] Clemmensen K E, Bahr A, Ovaskainen O, Dahlberg A, Ekblad A, Wallander H, Stenlid J, Finlay R D, Wardle D A, Lindahl B D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. Science, 2013, 339(6127): 1615-1618.
- [21] Zhang D Q, Hui D F, Luo Y Q, Zhou G Y. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. Journal of Plant Ecology, 2008, 1(2): 85-93.
- [22] 范萍萍. 中国温带亚热带 8 个树种叶和细根的分解[D]. 北京: 北京大学, 2010.
- [23] 徐伟强. 尾叶桉人工林细根生长、分解及其养分动态研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2012.
- [24] 涂利华,陈刚,彭勇,胡红玲,胡庭兴,张健.华西雨屏区苦竹细根分解对模拟氮沉降的响应.应用生态学报,2014,25(8):2176-2182.
- [25] Shen Y F, Wang N, Cheng R M, Xiao X F, Yang S, Guo Y, Lei L, Zeng L X, Wang X R. Characteristics of fine roots of *Pinus massoniana* in the Three Gorges Reservoir Area, China. Forests, 2017, 8(6): 183.
- [26] 许玉庆. 亚热带 6 个树种细根底物质量与分解特征研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [27] 蔡飞. 杉木和木荷细根在江西大岗山天然常绿阔叶林中的分解动态研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.
- [28] De Graaff M A, Schadt C W, Rula K, Six J, Schweitze J A, Classen A T. Elevated CO₂ and plant species diversity interact to slow root decomposition. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(11): 2347-2354.
- [29] 李宜浓,周晓梅,张乃莉,马克平.陆地生态系统混合凋落物分解研究进展.生态学报,2016,36(16):4977-4987.
- [30] 李贤伟, 张健, 胡庭兴, 罗承德. 退耕还林理论基础及林草模式的实践应用. 北京: 科学出版社, 2009.
- [31] 王敬,李贤伟,张健,荣丽,潘燕.台湾桤木与黑麦草复合模式细根和草根的分解及养分动态.南京林业大学学报:自然科学版,2009, 33(4):67-71.
- [32] 荣丽,李贤伟,张健,朱天辉,范川,蒲德强.华西雨屏区不同退耕模式细根、草根分解及主要土壤微生物功能群动态.自然资源学报, 2009,24(6):1069-1079.
- [33] 江泽慧. 世界竹藤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [34] 周国模. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [35] 刘广路,范少辉,蔡春菊,张大鹏. 撑绿杂交竹和硬头黄竹克隆生长特性比较. 植物学报, 2013, 48(3): 288-294.
- [36] 张蕊, 申贵仓, 张旭东, 张雷, 高升华. 四川长宁毛竹林碳储量与碳汇能力估测. 生态学报, 2014, 34(13): 3592-3601.
- [37] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology, 1963, 44(2): 322-331.

- [38] 文海燕,傅华,郭丁.黄土高原典型草原优势植物凋落物分解及养分释放对氮添加的响应.生态学报,2017,37(6):2014-2022.
- [39] 陈瑾,李扬,黄建辉.内蒙古典型草原4种优势植物凋落物的混合分解研究.植物生态学报,2011,35(1):9-16.
- [40] Zanne A E, Oberle B, Dunham K M, Milo A M, Walton M L, Young D F. A deteriorating state of affairs: how endogenous and exogenous factors determine plant decay rates. Journal of Ecology, 2015, 103(6): 1421-1431.
- [41] 许玉庆, 项文化, 曾叶霖, 谢武. 中国森林生态系统细根分解格局及调控因子研究进展. 广西林业科学, 2015, 44(2): 149-155.
- [42] Berg B, McClaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [43] 王卫霞, 史作民, 罗达, 刘世荣. 南亚热带格木和红椎凋落叶及细根分解特征. 生态学报, 2016, 36(12): 3479-3487.
- [44] Birouste M, Kazakou E, Blanchard A, Roumet C. Plant traits and decomposition: are the relationships for roots comparable to those for leaves? Annals of Botany, 2012, 109(2): 463-472.
- [45] Roumet C, Birouste M, Picon-Cochard C, Ghestem M, Osman N, Vrignon-Brenas S, Cao K F, Stokes A. Root structure-function relationships in 74 species: evidence of a root economics spectrum related to carbon economy. New Phytologist, 2016, 210(3): 815-826.
- [46] 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.
- [47] McClaugherty C A, Aber J D, Melillo J M. Decomposition dynamics of fine roots in forested ecosystems. Oikos, 1984, 42(3): 378-386.
- [48] Camiré C, Côté B, Brulotte S. Decomposition of roots of black alder and hybrid poplar in short-rotation plantings: nitrogen and lignin control. Plant and Soil, 1991, 138(1): 123-132.
- [49] Langley J A, Hungate B A. Mycorrhizal controls on belowground litter quality. Ecology, 2003, 84(9): 2302-2312.
- [50] Lin C F, Yang Y S, Guo J F, Chen G S, Xie J S. Fine root decomposition of evergreen broadleaved and coniferous tree species in mid-subtropical China: dynamics of dry mass, nutrient and organic fractions. Plant and Soil, 2011, 338(1/2): 311-327.
- [51] 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 odorum* in mid-subtropics. Annals of Forest Science, 2004, 61(1): 65-72.
- [52] 林成芳. 中亚热带森林细根分解动态及影响因素[D]. 福建: 福建师范大学, 2008.
- [53] 杨万勤,邓仁菊,张健.森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应.应用生态学报,2007,18(12):2889-2895.
- [54] 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.
- [55] Berg B. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter. Ecological Bulletins, 1981, 33: 163-178.
- [56] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, Porporato A. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. Science, 2008, 321(5889): 684-686.
- [57] Moore T R, Trofymow J A, Siltanen M, Kozak L M. Litter decomposition and nitrogen and phosphorus dynamics in peatlands and uplands over 12 years in Central Canada. Oecologia, 2008, 157(2): 317-325.
- [58] Lousier J D, Parkinson D. Chemical element dynamics in decomposing leaf litter. Canadian Journal of Botany, 1978, 56(21): 2795-2812.
- [59] Einhellig F A, Rasmussen J A, Hejl A M, Souza I F. Effects of root exudate sorgoleone on photosynthesis. Journal of Chemical Ecology, 1993, 19 (2): 369-375.
- [60] Knops J M H, Wedin D, Tilman D. Biodiversity and decomposition in experimental grassland ecosystems. Oecologia, 2001, 126(3): 429-433.
- [61] Rustad L E, Cronan C S. Element loss and retention during litter decay in a red spruce stand in Maine. Canadian Journal of Forest Research, 1988, 18(7): 947-953.
- [62] Hansen R A, Coleman D C. Litter complexity and composition are determinants of the diversity and species composition of oribatid mites (Acari: Oribatida) in litterbags. Applied Soil Ecology, 1998, 9(1/3): 17-23.
- [63] Tlalka M, Bebber D P, Darrah P R, Watkinson S C, Fricker M D. Emergence of self-organised oscillatory domains in fungal mycelia. Fungal Genetics and Biology, 2007, 44(11): 1085-1095.
- [64] 蒋云峰. 长白山针阔混交林主要凋落物分解及土壤动物的作用[D]. 长春:东北师范大学, 2013.