

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.020; CSTR:32311.14.rswc.2025.03.020.

丁咏, 蒋丹丹, 彭翔, 等. 酸雨对亚热带典型人工林细根分解和元素损失动态的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3):72-80, 90.

Ding Yong, Jiang Dandan, Peng Xiang, et al. Effects of acid rain on fine root decomposition and element loss in typical subtropical plantation forests [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3):72-80, 90.

酸雨对亚热带典型人工林细根分解和 元素损失动态的影响

丁咏^{1,2}, 蒋丹丹², 彭翔¹, 李征浩³, 陈悦¹, 薛仁贵¹, 张金池¹, 刘鑫¹

(1. 南京林业大学 林草学院 水土保持学院 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037;

2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 南京 210029;

3. 江苏盐城国家级珍禽自然保护区管理处, 江苏 盐城 224000)

摘要: [目的] 探究酸雨对亚热带麻栎和杉木人工林细根分解和元素损失动态的影响, 为人工林经营管理提供理论依据, 促进单一人工林可持续发展。[方法] 以江苏南京铜山林场长势一致的两种不同树种(麻栎和杉木)为对象, 每个树种共设置 4 种处理: S₁(pH4.5)、S₂(pH3.5)和 S₃(pH2.5)和对照 CK(pH6.6), 比较分析酸雨对两种不同人工林树种细根分解和元素损失动态的影响。[结果] (1) 酸雨处理显著影响土壤微生物群落, 尤其是显著增加了麻栎和杉木人工林土壤微生物群落的差异。(2) 酸雨明显降低了细根的分解率, 其中, 强酸性酸雨(pH2.5)分别显著降低麻栎和杉木人工林分解率 15.15% 和 8.75%, 并且, 无论是强酸性酸雨还是弱酸性酸雨处理, 均对麻栎人工林细根分解的抑制作用强于杉木人工林($p < 0.05$)。(3) 麻栎人工林细根分解对土壤微生物群落的敏感性高于杉木人工林。(4) 酸雨对细根质量损失的显著抑制作用仅出现在麻栎人工林中($p < 0.05$)酸雨明显降低了解过程中 C, N, K, Ca 和 Mg 的损失, 而麻栎和杉木人工林中细根的残留量与残留的 C 和 K 密切相关。[结论] 酸雨会对土壤微生物群落和细根的分解产生深远影响, 其影响取决于人工林的类型。其中, 酸雨对麻栎人工林细根分解的抑制作用强于杉木人工林, 麻栎人工林细根分解对土壤微生物的敏感性高于杉木人工林。

关键词: 酸雨; 土壤微生物群落; 细根分解; 人工林

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0072-09

Effects of acid rain on fine root decomposition and element loss in typical subtropical plantation forests

Ding Yong^{1,2}, Jiang Dandan², Peng Xiang¹, Li Zhenghao³, Chen Yue¹, Xue Rengui¹, Zhang Jinchi¹, Liu Xin¹

(1. Nanjing Forestry University, College of Forestry and Grass, College of Soil and Water

Conservation, Southern Modern Forestry Collaborative Innovation Center, Nanjing 210037, China;

2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029, China;

3. Jiangsu Yancheng National Rare Bird Nature Reserve Management Office, Yancheng, Jiangsu 224000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of acid rain on fine root decomposition and element loss dynamics in subtropical *Quercus acutissima* and *Cunninghamia lanceolata* plantations, providing theoretical support for the plantation management and promoting the sustainable development of single plantation forests. [Methods] Two different tree species (*Q. acutissima* and *C. lanceolata*) with consistent growth were selected from the Tongshan Forest Farm in Nanjing, Jiangsu Province. Four treatments were set for each species: S₁ (pH 4.5), S₂ (pH 3.5) and S₃ (pH 2.5), and a control CK (pH 6.6). The effects of acid rain on fine root

收稿日期: 2024-03-01

修回日期: 2024-07-25

接受日期: 2024-08-03

资助项目: 百山祖国家公园科学基金项目(2021ZDL01); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20200785); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

第一作者: 丁咏(1998—), 女, 贵州毕节人, 硕士研究生, 研究方向: 林业生态工程。E-mail: 3127994175@qq.com

通信作者: 刘鑫(1988—), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 水土保持与生态修复。E-mail: liuxin@njfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

decomposition and element loss dynamics in the two plantations were compared and analyzed. [Results] (1) Acid rain treatment significantly influenced soil microbial communities, especially increasing the differences between the *Q. acutissima* and *C. lanceolata* plantations. (2) Acid rain significantly decreased the decomposition rate of fine roots. Strong acid rain (pH 2.5) significantly reduced the decomposition rates in the *Q. acutissima* and *C. lanceolata* plantations by 15.15% and 8.75%, respectively. Moreover, both strong and weak acid rain treatments suppressed fine root decomposition in the *Q. acutissima* plantation more than in the *C. lanceolata* plantation ($p < 0.05$). (3) Fine-root decomposition in the *Q. acutissima* plantation was more sensitive to soil microbial communities than in the *C. lanceolata* plantation. (4) Significant suppression of fine root mass loss due to acid rain was only observed in the *Q. acutissima* plantation ($p < 0.05$). Acid rain significantly reduced the loss of C, N, K, Ca, and Mg during decomposition, and the residual mass of fine roots in both *Q. acutissima* and *C. lanceolata* plantations was closely associated with residual C and K. [Conclusions] Acid rain has a profound impact on soil microbial communities and fine root decomposition. The extent of its effects depends on the types of plantation forests. Acid rain has a stronger suppressive effect on fine root decomposition in the *Q. acutissima* plantation than in the *C. lanceolata* plantation, and fine root decomposition in the *Q. acutissima* plantation is more sensitive to soil microbial changes than in the *C. lanceolata* plantation.

Keywords: acid rain; soil microbial community; fine root decomposition; plantation forests

细根分解和土壤微生物在养分循环和森林生态系统功能中发挥着至关重要的作用^[1],但它们对土壤环境条件非常敏感^[2]。在森林生态系统中,森林类型是土壤环境条件的主要决定因素,可导致根系生长产生差异^[3]。植树造林等人类活动严重改变了森林类型,从而影响了森林生态系统的结构和功能^[4]。随着人口和经济的快速增长,中国在20世纪下半叶以惊人的速度砍伐森林,以满足粮食生产和木材需求^[5]。大部分天然林被快速生长的单一人工林取代,占中国森林总面积的40%^[6]。经过几十年的人工林管理,森林土壤的性质发生了显著变化。因此,林地产量下降和土地退化变得十分严重^[7]。近几十年来,随着工业化进程的迅速发展,这些单一的人工林日益受到严重环境污染的威胁,如酸雨,这可能会极大地改变森林生态系统的结构和功能^[8]。

最近的评估表明,在过去几十年中,中国已成为继美国东北部和欧洲中部之后世界上第三大酸雨集中沉降区^[9]。据统计,中国约有40%的国土面积被酸雨覆盖^[10]。酸雨会对森林生态系统造成重大威胁,之前的许多研究表明,酸雨可以直接或间接抑制微生物的活动,微生物生物量与土壤pH值呈正相关^[8]。此外,土壤微生物在有机物分解过程中发挥着重要作用^[11]。早期以枯枝落叶分解为重点的研究表明,酸雨抑制枯枝落叶分解可能是由于酶活性受到抑制^[12]。然而,关于酸雨对单一人工林细根分解的影响,尤其是酸雨胁迫对细根养分释放的影响,目前仍缺乏相关研究。因此,本研究将有助于优化森林结构,促进单一人工林的可持续发展。

铜山林场成立于20世纪60年代,由天然林发展而来。本研究选择铜山林场中种植面积和木材蓄积量最重要的两种人工林类型:麻栎(*Quercus acutissima*,阔叶林)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*,针叶林)人工林。为了探索森林类型和酸雨对细根分解的影响,我们在麻栎和杉木人工林中进行了模拟试验,通过测定不同类型树种细根质量损失、元素损失动态等,结合土壤化学性质和微生物群落特征,探究酸雨对亚热带典型人工林细根分解和元素损失动态的影响,旨在更准确地评价酸雨对麻栎和杉木人工林生态系统的影响,以期对现在及未来酸雨严重区域森林生态系统可持续经营管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域

研究地点位于中国南京铜山林场(31°37'N, 118°51'E)。铜山林场海拔在38~388 m。目前,该林场以单一人工林为主,包括3个主要树种:麻栎(*Quercus acutissima*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和毛竹(*Phyllostachys edulis*)。该地区属亚热带季风气候,年平均气温为15.1℃,年累计日照时数为2 199.5 h,年降水量为1 117.29 mm(2002—2013年)。雨季主要在6—8月。

试验地块位于麻栎(阔叶树)和杉木(针叶树)人工林中。研究区两种类型树种基本情况如表1所示,其平均树高分别为13.8 m和10.8 m,树龄约为48 a;林分密度分别为425株/hm²和850株/hm²;平均胸径分别为25.8 cm和20.6 cm。用LAI-2200树冠分析系

统(LI-COR, Lincoln, USA)估算的叶面积指数(LAI)分别为0.1~3.87和2.4~4.27;麻栎和杉木人工林的现有枯落物密度分别为18.04 t/hm²和9.39 t/hm²。麻栎和杉木人工林的土壤pH值分别为

4.11±0.08和4.22±0.14。并且麻栎和杉木人工林多年平均降水pH值为4.87±0.28^[13],年均酸雨频率为(57.12±18.67)% (pH≤5.6的酸雨事件占降雨事件总数的比例)^[14]。

表1 麻栎和杉木人工林基本概况

Table 1 Overview of *Q. acutissima* and *C. lanceolata* plantations

树种	平均树高/m	林分密度/株hm ²	平均胸径/cm	叶面积指数LAI	枯落物密度/(t·hm ⁻²)	土壤pH
麻栎	13.8	425	25.8	0.1~3.87	18.04	4.11±0.08
杉木	10.8	850	20.6	2.4~4.27	9.39	4.22±0.14

1.2 试验处理

在麻栎和杉木人工林中分别建立了48个离散区域(0.6 m×2.0 m),每个区域之间相隔约5 m。采用完全随机设计,三次重复,4种模拟酸雨(SAR)处理,分别为对照(CK, pH6.6, 添加当地溪水为对照)、S₁(pH4.5)、S₂(pH3.5)和S₃(pH2.5)。酸雨储备液由0.5 mol/L H₂SO₄和0.5 mol/L HNO₃按摩尔比5:1混合配制而成,该摩尔比符合南京市降雨的一般阴离子组成^[15]。在一年的酸雨添加期,每个区域每月使用洒水车喷洒两次酸雨溶液。模拟酸雨总量为62.07 mm(根据南京市月平均降水量确定)。该总量占研究区域年平均降水量的5.55%。春、夏、秋、冬四季的降水量分别为12.79 mm(占总降水量的20.62%),32.35 mm(占总降水量的52.11%),9.35 mm(占总降水量的15.08%)和7.57 mm(占总降水量的12.19%)。施用S₁、S₂和S₃处理后,麻栎和杉木人工林的土壤pH值分别为4.00±0.12, 3.91±0.12, 3.81±0.13和

4.13±0.11, 4.03±0.12, 3.93±0.13。

本文采用标准分解袋技术^[14]描述了细根的分解情况。酸雨添加前,从研究样地收集新鲜细根。用去离子水洗去附着在细根表面的泥土。试验前,将每个树种的所有细根在60℃下烘干,以测定烘干样品中的水、碳(C)、氮(N)、钾(K)、钙(Ca)和镁(Mg)含量(表2)。在网眼尺寸为0.1 mm的聚乙烯分解袋(10 cm×10 cm)中加入3 g细根^[16]。用锄头将细根分解放入每个区域10 cm深的土壤中(与土壤表面成约45°)。

在每季末的酸雨过后,采集每个地块区域的细根和土壤样本。土壤样本用2 mm筛子筛去树叶、植物根系、砾石和石块,然后保存在-20℃的冰箱中,以便进一步进行磷脂脂肪酸(PLFA)分析。仔细去除附着在细根样本上的土壤,然后用蒸馏水人工冲洗根部。将所有细根样本在60℃下烘干24 h至恒重,以测定细根质量损失。

表2 麻栎和杉木人工林细根的初始化学成分

Table 2 Initial chemical composition of the fine roots in *Q. acutissima* and *C. lanceolata* plantations

元素名称	C	N	K	Ca	Mg
麻栎	475.83±2.47	9.37±0.26	2.13±0.01	2.41±0.27	1.21±0.06
杉木	443.63±7.13	9.51±0.17	2.15±0.02	1.66±0.19	1.13±0.02

1.3 化学分析

细根在60℃下烘干至恒重,然后用0.5 mm筛分机进行细磨。用浓硝酸和浓高氯酸(5:1)萃取0.25 g样本。用原子吸收光谱仪(AA900 T, Perkin Elmer, MA, USA)定量分析消化液中的K, Ca, Mg离子^[17]。细根碳(C)和氮(N)用元素分析仪(Vario EL III, Elementar, Germany)测定^[14]。

1.4 磷脂脂肪酸(PLFA)分析

利用磷脂脂肪酸(PLFA)分析法估算了总生物量和特定微生物群的生物量,该方法由Guo等^[18]描述。从3 g新鲜土壤中加入15.2 ml Bligh-Dyer溶剂(氯仿、甲醇、柠檬酸缓冲液(0.15 M, pH 4.0); 1:2:0.8, v/v/v)提取磷脂脂肪酸。经过土壤脂质提取、硅胶层析和壬癸酸甲酯(19:0)甲基化极性脂质的过程后,使用氮气蒸发器蒸发脂质。分离出的脂肪酸用

配有MIDI峰识别系统的气相色谱仪(Agilent 6890 N, USA)进行识别。总PLFAs(tPLFAs)浓度(每g土壤中PLFAs的纳摩尔数)被用作微生物总生物量的指标。革兰氏阳性菌(G⁺)、革兰氏阴性菌(G⁻)、放线菌(Act)、真菌(Fun)和丛枝菌根真菌(Amf)所特有的PLFAs总和被用作广义分类微生物组别^[19]。Liu等^[20]对包含特定生物标志物的各微生物群和指标进行了描述(表3)。

1.5 统计分析

每个样本中剩余的细根质量用初始细根干重的百分比表示。我们采用一阶指数衰减模型 $X_t/X_0 = e^{-kt}$ 来拟合分解数据^[21]。X_t是t时剩余的烘干净重;X₀是初始烘干重量(3 g);k是年分解率常数(a⁻¹)。细根分解释放的元素量以初始元素含量的百分比表示,计算公式如下: $E = [(M_t \times C_t) / (M_0 \times C_0)] \times 100$,

其中 E 为元素释放量(%); M_t 为 t 时的烘干质量; C_t 为 t 时的养分浓度(mg/g); M_0 为初始烘干质量(g); C_0 为初始元素浓度(mg/g)。 $E > 100$ 表示元素固定; $E < 100$ 表示元素释放^[21]。

表3 生物标志物的定义
Table 3 Biomarker definitions

组别	标志物
G+	il5:0, a15:0, il6:0, il7:0, a17:0
G-	cy17:0, cy19:0, 16:1ω7, 16:1ω9, 18:1ω7, 17:1ω8, 17:1ω9
Act	10 Me16:0, 10 Me17:0, 10 Me18:0
Fun	18:2 ω6 and 18:1ω9
Amf	16:1ω5

注:革兰氏阳性菌(G+),革兰氏阴性菌(G-),放线菌(Act)、真菌(Fun)和丛枝菌根真菌(Amf)。

为了检验不同人工林的土壤微生物总生物量(tPLFAs)、特定微生物群(G+, G-, Act, Fun 和 Amf)的生物量以及细根年分解率是否随酸雨强度而变化,我们使用 SPSS 19.0 进行了单因素方差分析(ANOVA, Duncan 检验);我们使用 Canoco 5.0 (Microcomputer Power, Ithaca, NY, USA)进行了冗余判别分析(RDA),以描述细根分解与土壤微生物之间的关系。

2 结果与分析

2.1 磷脂脂肪酸(PLFAs)分析

图1显示了每季末不同试验模拟处理下0—10 cm 土层的微生物生物量值。在麻栎人工林中,酸雨对麻栎的总磷脂(tPLFAs)有负面影响;在春季和夏季,弱酸雨(pH=4.5)对 tPLFAs 的抑制作用比强酸雨(pH=3.5 和 2.5)更明显;并且,与CK相比,弱酸雨分别在春季和夏季显著降低麻栎人工林 tPLFAs 45.40% 和 37.97%。在秋季和冬季,抑制作用随着酸雨 pH 值的降低而增强。在杉木人工林中,除夏季外,弱酸雨在所有季节都对 tPLFAs 都有正向影响。在夏季和秋季,较强的酸雨(pH=2.5)对降低土壤 tPLFAs 有显著影响($p < 0.05$),其降幅分别为 35.44% 和 22.94%。麻栎和杉木人工林 CK 处理的 PLFAs 在 4 个季节内均无显著差异($p > 0.05$)。然而,在夏季,杉木人工林在较强酸雨作用下的 tPLFAs 显著低于麻栎人工林($p < 0.05$)。酸雨对 G+, G-, Act, Fun 和 Amf 的影响相似,均表现为与 CK 相比,春季较弱的酸雨对麻栎人工林中 G+, Act, Fun 和 Amf 的影响并不显著($p > 0.05$);此外,与 CK 相比,夏季较强的酸雨(pH=3.5)对杉木人工林的 G+ 的抑制作用并不显著。在冬季,较弱的酸雨对杉木林 Act 有显著的正向影响($p < 0.05$)。

SIMPER 分析确定了在酸雨胁迫下,区分麻栎

和杉木人工林差异的生物标志物的贡献。对 CK 处理影响最大的前 5 个生物标志物是 cy19:0, 18:1ω9, il5:0, 10 Me16:0 和 16:0。并且,酸雨降低了 il5:0, il6:0, 18:1ω9 的贡献率,增加了 cy19:0 的贡献率。此外,较弱的酸雨(pH=4.5, 3.5)降低了 10 Me16:0 的贡献率,而较强的酸雨(pH=2.5)增加了 10 Me16:0 的贡献率(表4)。

2.2 细根的质量损失和根系分解的 k 值

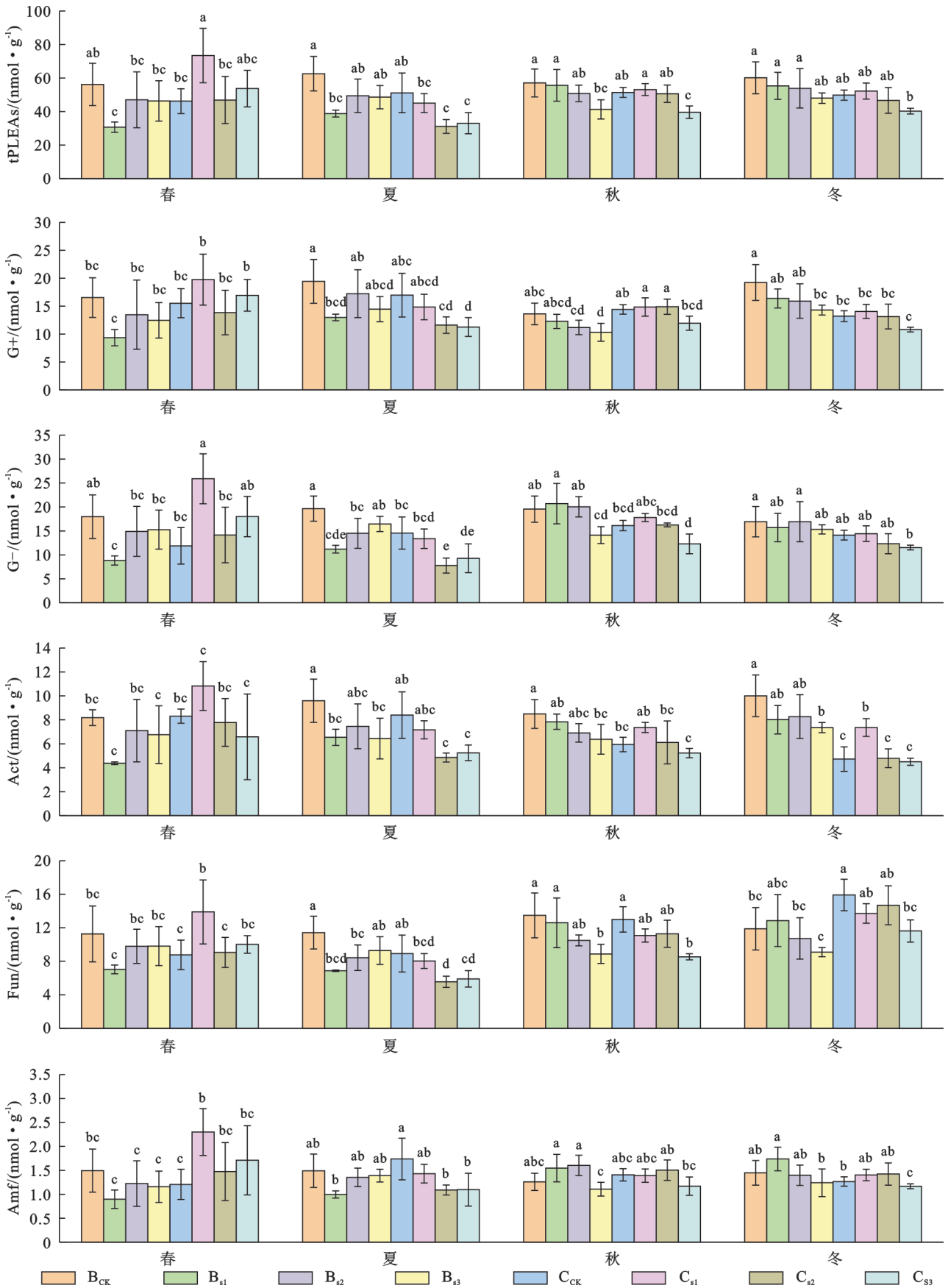
经过为期一年的试验,麻栎和杉木人工林细根质量损失范围为 41.34%~55.33%(图2)。前 3 个月弱酸处理(S_1 和 S_2)的质量损失高于 CK 处理。在 S_3 处理中,麻栎和杉木的细根在分解一年后的质量损失最小,分别比 CK 处理少 5.05% 和 4.55%;此外,酸雨 pH 值对细根质量损失的显著抑制作用仅出现在麻栎人工林中($p < 0.05$)。

本研究评估的 2 种元素(C, N)都随着分解时间的增加而有所减少。其中,所有酸雨处理的麻栎和杉木人工林残余 C 都随着时间的推移而减少,酸雨 pH 显著抑制了麻栎人工林细根枯落物 C 的释放。然而, S_1 和 S_2 处理的麻栎人工林的残余 N 在分解后 3 个月有所增加,杉木人工林的残余 N 与前 3 个月保持相同变化趋势。不同酸雨 pH 值对细根残余氮的影响无显著差异。此外,在麻栎人工林中,酸雨 pH 值和分解时间对残余 N 的影响在统计学上有显著的交互作用。

细根的年分解率随酸雨 pH 值的降低而降低。麻栎(S_2 和 S_3)和杉木(S_3)人工林酸雨较强时的 k 值显著低于 CK 处理($p < 0.05$),并且,无论是强酸型酸雨还是弱酸型酸雨,麻栎人工林的 k 值均显著低于杉木人工林($p < 0.05$)(表5)。

2.3 细根分解过程中的元素损失动态

与 C 和 N 相比,细根中的 K 表现出一种独特的模式,即开始时其浓度迅速下降,分解 3 个月后又缓慢下降(下降)。双因素方差分析表明,酸雨的 pH 值和分解时间对细根 K 的释放具有显著的单独影响和交互影响,但在杉木人工林中的交互影响除外。在分解的前 3 个月,酸雨加速了细根中 Ca 的释放,尤其是强酸型酸雨(pH=2.5)。在分解的后 3 个月,CK 处理的 Ca 残留量迅速减少。此外,我们还发现,在 S_3 和 S_1 处理的影响下,麻栎和杉木人工林一年分解后的 Ca 残留量分别有所增加。在杉木人工林中,CK 处理的 Ca 和 Mg 在分解的前 3 个月被固定下来。酸雨 pH 值和分解时间对细根中 Mg 的释放有显著影响。与 CK 处理相比,酸雨处理增加了麻栎人工林中 Mg 残留量,却降低了杉木人工林的 Mg 残留量(图3)。



注: 不同字母表示不同处理之间差异显著 ($p < 0.05$); 处理包括: 麻栎(B)和杉木(C)的对照处理(B_{CK}和C_{CK})、B_{S1}和C_{S1}(pH 4.5)、B_{S2}和C_{S2}(pH 3.5)、B_{S3}和C_{S3}(pH 2.5)。

图 1 酸雨胁迫对微生物生物量的影响

Fig. 1 Effect of acid rain stress on microbial biomass

表4 麻栎和杉木人工林微生物群落结构差异的贡献

Table 4 Contribution to differences in microbial community structure between *Q. acutissima* and *C. lanceolata* plantations %

组别	生物标志物	CK	S ₁	S ₂	S ₃
G+	i15:0	11.27	8.12 ↓	11.05 ↓	10.21 ↓
	a15:0	3.48	3.34 ↓	5.22 ↑	3.93 ↑
	i16:0	7.58	5.92 ↓	7.02 ↓	7.11 ↓
	i17:0	2.69	3.08 ↑	2.49 ↓	2.73 ↑
	a17:0	2.69	2.22 ↓	2.66 ↓	2.48 ↓
	16:1ω9	3.61	2.57 ↓	1.66 ↓	3.53 ↓
	16:1ω7	4.90	4.94 ↑	4.73 ↓	2.55 ↓
G-	17:1ω8	2.07	1.74 ↓	1.79 ↓	2.55 ↑
	cy17:0	2.48	2.24 ↓	2.67 ↑	2.88 ↑
	18:1ω7	6.19	10.43 ↑	8.65 ↑	6.28 ↑
	cy19:0	16.80	17.45 ↑	17.20 ↑	16.88 ↑
Act	10 Me16:0	9.83	7.81 ↓	8.82 ↓	10.59 ↑
	10 Me17:0	2.30	1.69 ↓	1.96 ↓	2.47 ↑
	10 Me18:0	3.16	3.68 ↑	2.52 ↓	2.55 ↓
Fun	18:2ω6	5.49	8.30 ↑	5.74 ↑	5.52 ↑
	18:1ω9	14.13	13.66 ↓	13.87 ↓	11.47 ↓
Amf	16:1ω5	1.74	2.81 ↑	1.96 ↑	2.21 ↑

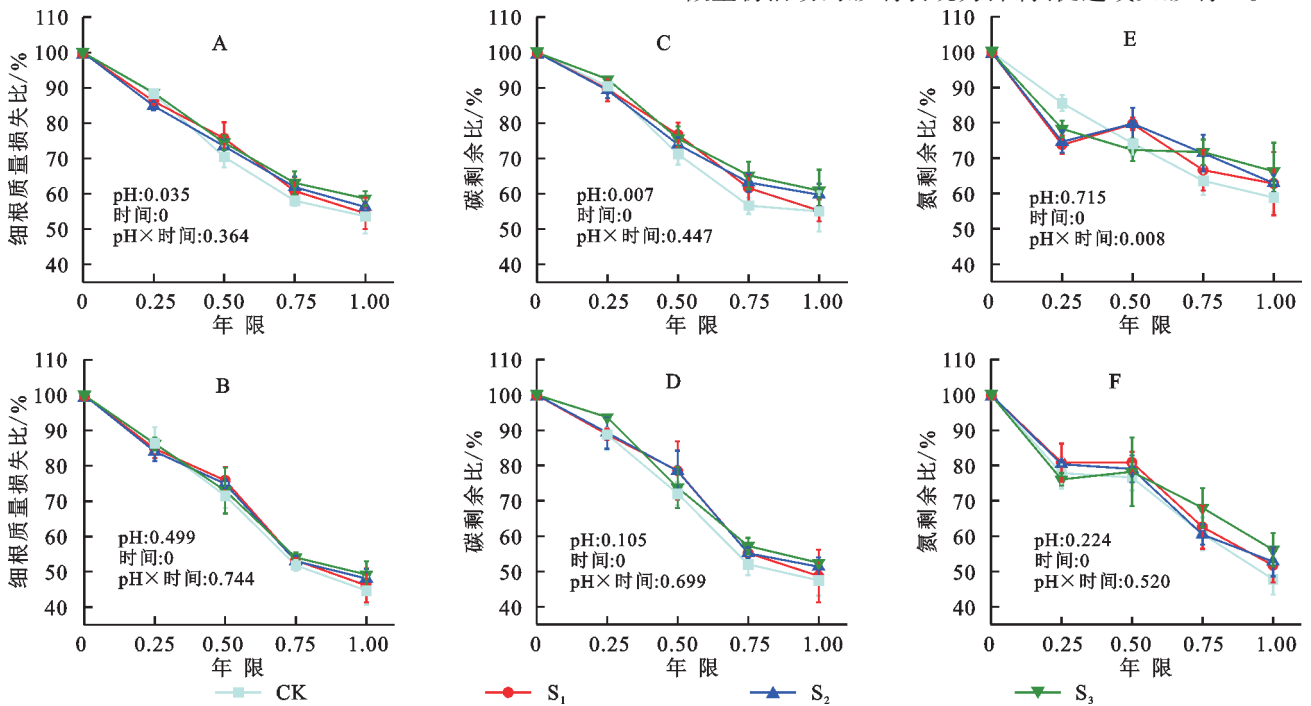
注:粗体数字代表微生物群落差异的前五位贡献百分比。↑和↓分别表示与CK处理相比,生物标志物贡献的增加和减少趋势。

2.4 土壤微生物对细根分解的影响

在以土壤微生物生物标志物为解释变量的细根分解RDA中,轴1分别占麻栎和杉木人工林数据集变量的60.26%和83.31%,轴2占变量的6.35%和8.30%(图4)。在麻栎和杉木人工林中,残留细根量高且残留元素高的情况出现在排列图的右端,并且与较低的土壤Fun(18:1ω9和18:2ω6)有关。另外,我们还发现大多数微生物生物标志物与麻栎人工林的细根分解呈负相关,如G-(16:1ω9,16:1ω7,18:1ω7),Act(10 Me16:0,10 Me18:0)G+(a17:0)和Amf(16:1ω5)。然而,只有Fun,G+(a15:0和a17:0)和G-(17:1ω8)与杉木人工林的残留质量,C,N和K有明显的负相关关系,大多数微生物生物标志物与细根分解的残留质量沿X轴呈正相关。

3 讨论

土壤微生物在自然界的养分循环中扮演着重要角色,对生态系统的功能起着重要作用。Zhang等^[22]通过荟萃分析发现,植物种类对土壤微生物生物量的影响并不重要,但以前的土地利用类型是土壤微生物生物量的主要控制因素。在我们的研究中,我们发现杉木人工林的土壤微生物生物量低于麻栎人工林,但差异并不显著。此外,之前的研究表明,酸雨对土壤微生物活动的影响表现为抑制、促进或无影响^[22]。



注:A,C,E为麻栎人工林细根分解后的质量、碳和氮剩余百分比;B,D,F为杉木人工林细根分解后的质量、碳和氮剩余百分比。

图2 不同处理麻栎和杉木细根分解后质量、碳和氮剩余百分比

Fig. 2 Percentage of residual mass, carbon, and nitrogen after decomposition of fine roots of *Quercus acutissima* and Chinese fir under different treatments

在本研究中,与CK相比,用PLFA模式技术估算的土壤微生物总生物量和特定微生物群的生物量

都随着酸雨的胁迫而减少。cy19:0,18:1ω9,i15:0,10 Me16:0和i16:0是区分没有酸雨输入的两种人工

林类型的前 5 个生物标志物。然而,与 CK 相比,较弱的酸雨(pH=4.5)显著降低了 i15:0, i16:0, 16:1 ω 9, 10 Me16:0 和 10 Me17:0 的贡献率,增加了 16:1 ω 5, 18:2 ω 6 和 18:1 ω 7 的贡献率。较强的酸雨(pH=2.5)只显著降低了 16:1 ω 7 的贡献率,而增加了 17:1 ω 8 和 16:1 ω 5 的贡献率。这主要是因为较强的酸雨对麻栎和杉木人工林的土壤微生物都有显著的负面影响。然而,较弱的酸雨会抑制、刺激或不影响微生物生物标志物^[10]。这表明弱酸增加了麻栎和杉木人工林土壤微生物的差异。

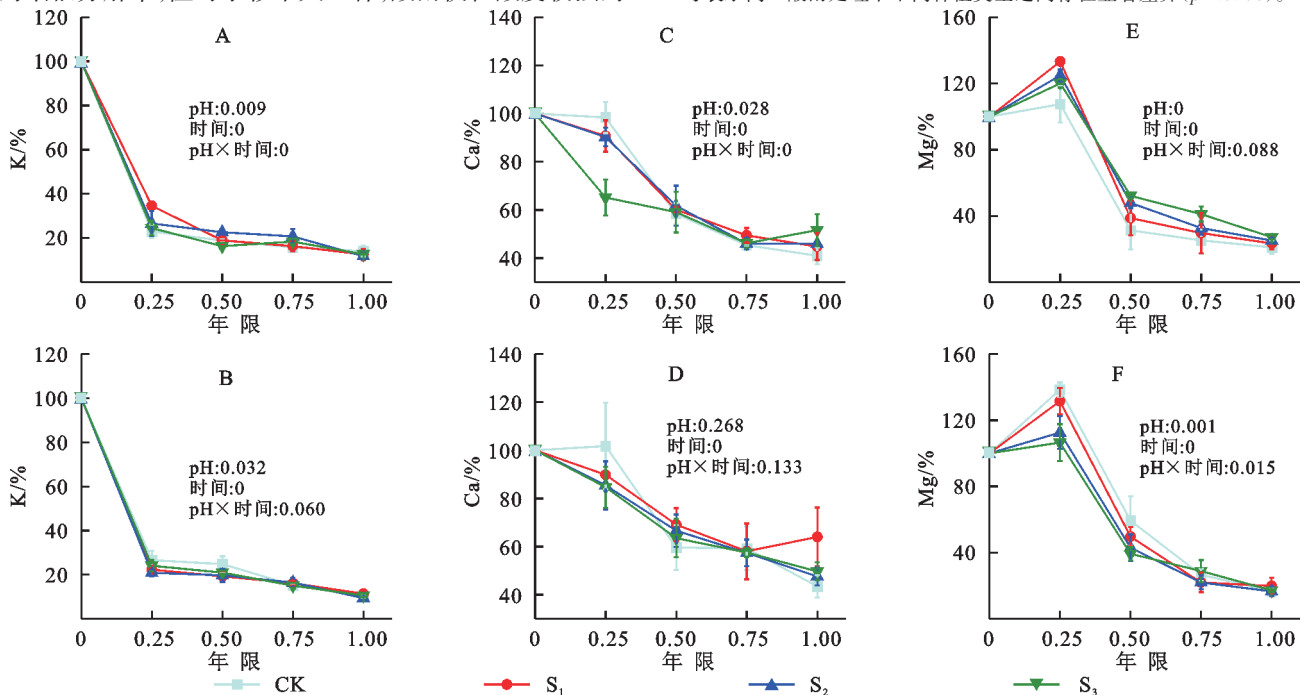
先前的研究表明,阔叶落叶的分解率高于针叶落叶^[23]。然而,细根所处的分解环境与落叶不同,与落叶相比,细根中的木质素含量更高^[24]。在我们的研究中,杉木人工林的细根很快就会分解,而麻栎细根的分解相对较慢。观察到的植物分解率差异可能是由于植物形态的种间差异以及植物营养质量的种间差异造成的^[25]。较高的 TN 和 TP 初始含量会导致分解加快^[26],这与我们的研究一致。在本研究中,我们发现酸雨胁迫后,细根的质量损失受到抑制。这可能是因为酸雨胁迫后分解者群落的功能受到抑制。此外, S₂ 和 S₃ 处理显著降低了麻栎人工林的细根分解率,但对于杉木人工林,酸雨仅在酸度较强的

酸雨(S₃)中显著降低了细根分解率。这表明酸雨对麻栎人工林细根分解的抑制作用高于对杉木细根分解的抑制作用。两种细根对酸雨的分解反应不同,部分原因可能是两种人工林土壤中微生物群落的代谢活动不同。RDA 分析表明,麻栎细根的残留质量与大多数微生物生物标志物呈负相关,而在杉木人工林中,细根的残留质量较高,但 18:2 ω 6, 18:1 ω 9, 17:1 ω 8, a15:0 和 a17:0 却较低。这表明,在酸雨胁迫下,麻栎人工林的细根分解对土壤微生物群落的敏感性要高于杉木人工林。

表 5 麻栎和杉木人工林细根的年分解率(k 值)和相关系数
Table 5 Annual decomposition rate (k -value) and correlation coefficient of fine roots in *Q. acutissima* and *C. lanceolata* plantations

处理	麻栎		杉木	
	k -value	R^2	k -value	R^2
CK	0.66±0.05Ba	0.91	0.80±0.05Aa	0.93
S ₁	0.62±0.04Bab	0.91	0.76±0.03Aab	0.91
S ₂	0.60±0.04Bbc	0.96	0.75±0.05Aab	0.93
S ₃	0.56±0.02Bc	0.94	0.73±0.02Ab	0.92

注:数值以平均值±SE表示。根据 Duncan 检验,同一列中不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异($p<0.05$)。同一行中不同大写字母表示同一酸雨处理下不同种植类型之间存在显著差异($p<0.05$)。



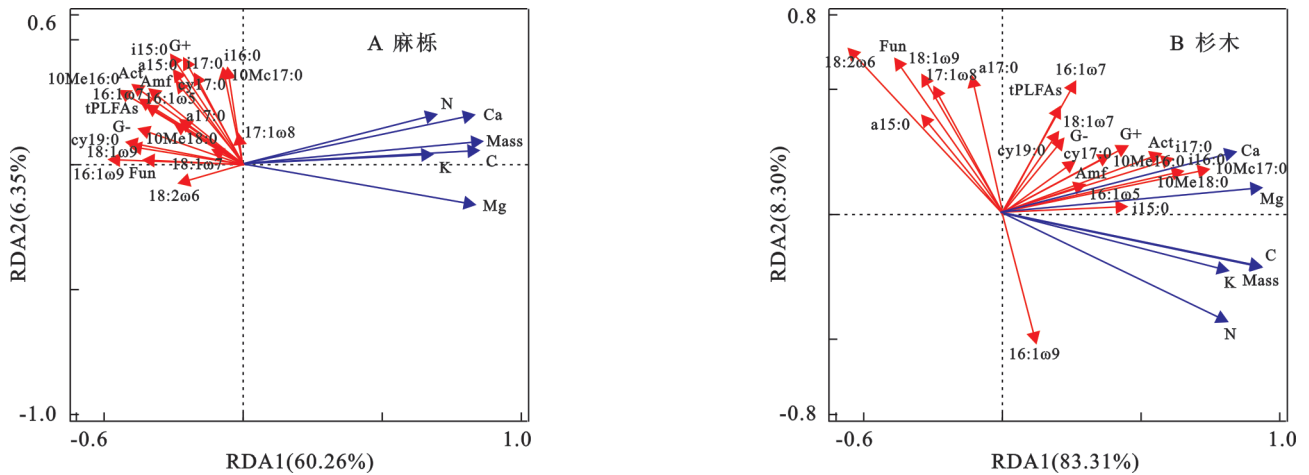
注:A, C, E为麻栎人工林细根分解后的钾、钙和镁剩余百分比;B, D, F为杉木人工林细根分解后的钾、钙和镁剩余百分比。

图 3 不同处理麻栎和杉木细根分解后钾、钙和镁剩余百分比

Fig. 3 Residual percentages of potassium, calcium, and magnesium after decomposition of fine roots of *Q. acutissima* and *C. lanceolata* plantations under different treatments

因此,这也解释了酸雨对麻栎细根分解的抑制作用高于杉木细根分解的原因。酸雨对不同类型树种的细根分解抑制作用不一致,这可能是由于酸雨对不同树种根茎的生长和周转抑制作用不一致,并且,麻栎作为阔叶树种,杉木作为针叶树种,其对土壤中营

养元素的转化利用不一致;先前的研究表明,酸雨胁迫会直接影响林木吸收利用土壤中营养元素,进而导致地上部分生长发育产生差异。综上,本研究可以在一定程度上为亚热带受酸雨胁迫严重地区阔叶林和针叶林可持续经营管理提供理论依据和技术支撑。



注:细根分解指数(蓝线);细根残留质量(Mass)、残余碳(C)、残余氮(N)、残余钾(K)、残余钙(Ca)和残余镁(Mg);土壤微生物群落(红线):PLFAs总量(tPLFAs)、革兰氏阳性菌(G⁺)、革兰氏阴性菌(G⁻)、放线菌(Act)、真菌(Fun)和丛枝菌根真菌(Amf)。

图4 不同处理麻栎和杉木人工林细根分解指数和土壤微生物群落的冗余分析(RDA)

Fig. 4 Redundancy analysis (RDA) of fine root decomposition indices and soil microbial communities in *Q. acutissima* and *C. lanceolata* plantations under different treatments

植物细根和落叶是输入森林土壤的主要残留物^[21]。细根分解过程中的元素损失动态主要取决于细根枯落物基质质量和微生物分解者的化学计量要求^[27]。在麻栎和杉木人工林中,细根的残余质量与残余C含量密切相关,这表明细根C含量是决定细根质量损失的关键性因素。例如,Chen等^[28]发现,当初始N含量高于0.4%时,细根会释放N。其他研究表明,当分解的枯落物C/N值低于5~15的临界值时,会出现净N损失^[21]。在我们的研究中,麻栎和杉木人工林的初始N含量分别为0.94%和0.95%。因此,在试验的前3个月,分解的细根释放了N。但在后3个月中,残余N的质量变化不大,尤其是在酸雨较弱(S₁)情况下,麻栎人工林中的残余N有所增加,猜想原因可能是此时细根中C流失较快,C/N升高,从而抑制N流失。此外,麻栎人工林细根残留量中的C和N低于杉木人工林,这与细根质量损失结果一致。在我们的研究中,残留K、Ca和Mg与细根残留质量也有密切关系。K对维持渗透势和激活酶以支持呼吸作用和光合作用至关重要^[29]。以前的研究表明,K从细根中释放的速度比其他元素快,这与我们对细根分解的研究结果一致(图3)。这是因为K的溶解度很高,能够从分解的细根中快速渗出^[30]。此外,残余Ca和Mg的变化趋势表现为最初缓慢减少或增加,然后在后3个月迅速减少。总之,我们的研究表明,酸雨通过对细根元素动态的影响降低了细根的分解率。

4 结论

经过四季中观试验我们发现,酸雨胁迫导致了我国长江三角洲地区麻栎和杉木人工生态系统细根

分解的变化。无论是强酸型酸雨还是弱酸型酸雨处理,杉木人工林的细根分解率显著高于麻栎人工林;并且,酸雨均降低了麻栎和杉木人工林土壤微生物生物量和细根分解率。其中,酸雨胁迫下,麻栎人工林的细根分解对土壤微生物群落的敏感性高于杉木。酸雨对麻栎人工林细根质量损失的抑制作用高于杉木人工林。并且,酸雨胁迫减少了细根分解过程中C、N、K、Ca和Mg的质量损失。综上,我们认为酸雨会严重影响麻栎和杉木人工林的土壤微生物生物量和细根分解。这些抑制作用可能会严重改变生态系统的碳通量平衡和养分循环。

参考文献 (References):

- [1] Xu S, Silveira M L, Inglett K S, et al. Soil microbial community responses to long-term land use intensification in subtropical grazing lands [J]. *Geoderma*, 2017, 293:73-81.
- [2] Fahey T J, Heinz A K, Battles J J, et al. Fine root biomass declined in response to restoration of soil calcium in a northern hardwood forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, 46(5):738-744.
- [3] Ren C J, Chen J, Deng J, et al. Response of microbial diversity to C:N:P stoichiometry in fine root and microbial biomass following afforestation [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(4):457-468.
- [4] Qi S X, Bang Z B, Qin C Z. Spatial-temporal characteristics of land use and soil organic matter in Yulin under sandy land remediation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(24):207-217.
- [5] 代林利,周丽丽,伍丽华,等.不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征 [J]. *生态学报*, 2022, 42(2):710-719.

- Dai L L, Zhou L L, Wu L H, et al. Carbon density and vertical spatial distribution characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem with different stand density [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (2): 710-719.
- [6] 赵泽尧,张雪,陈桐,等.马尾松幼苗根系和光合碳供应对土壤性质变化和温室气体排放的驱动作用[J].生态学报,2022,42(15):6345-6355.
- Zhao Z Y, Zhang X, Chen T, et al. Root input and photosynthetic carbon supply effect on soil properties and greenhouse gases release of *Pinus massoniana* seedling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(15):6345-6355.
- [7] 赵威,李亚鸽,元琳,等.豫西丘陵坡地弃耕农田植被演替对土壤碳、氮库的影响[J].生态学报,2018,38(19):7016-7025.
- Zhao W, Li Y G, Qi L, et al. Effects of vegetation succession on soil carbon and nitrogen storage in abandoned hilly farmlands of the Western Henan Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(19):7016-7025.
- [8] Shu X, Zhang K R, Zhang Q F, et al. Ecophysiological responses of *Jatropha curcas* L. seedlings to simulated acid rain under different soil types [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019,185:109705.
- [9] Liang G H, Hui D F, Wu X Y, et al. Effects of simulated acid rain on soil respiration and its components in a subtropical mixed conifer and broadleaf forest in Southern China [J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2016,18(2):246-255.
- [10] 房焕英,肖胜生,余小芳,等.湿地松人工林土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的响应[J].林业科学,2021,57(7):20-31.
- Fang H Y, Xiao S S, Yu X F, et al. Responses of soil respiration and its components to simulated acid rain in *Pinus elliottii* plantation [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021,57(7):20-31.
- [11] 张雪,王冬梅,温文杰,等.青海高寒区4种人工林细根生物量及其养分储量变化特征[J].林业科学,2022,58(6):13-22.
- Zhang X, Wang D M, Wen W J, et al. Seasonal patterns in fine root biomass and nutrient storage of four plantations in the alpine region of Qinghai Province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022,58(6):13-22.
- [12] 韩玮,孙晨曦,苏敬.模拟增温和酸雨对水稻土酶活性及温度敏感性的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(12):1117-1124.
- Han W, Sun C X, Su J. Effects of elevated temperature and simulated acid rain on enzyme activity and temperature sensitivity of paddy soil [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017,33(12):1117-1124.
- [13] 李沁宇,刘鑫,张金池.长三角区域酸雨类型转变趋势研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2021,45(1):168-174.
- Li Q Y, Liu X, Zhang J C. Changing trends of acid rain types in the Yangtze River Delta region [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2021,45(1):168-174.
- [14] 丁咏,刘鑫,张金池,等.酸雨类型转变对杉木林地土壤和细根生长的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2024,48(3):90-98.
- Ding Y, Liu X, Zhang J C, et al. Effects of acid rain-based transformation on *Cunninghamia lanceolata* fine root growth and soil nutrient content [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2024,48(3):90-98.
- [15] Wang T J, Jiang F, Li S, et al. Trends in air pollution during 1996-2003 and cross-border transport in city clusters over the Yangtze River Delta region of China [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2007,18(5):995.
- [16] Xu W Q, Liu J X, Liu X Z, et al. Fine root production, turnover, and decomposition in a fast-growth *Eucalyptus urophylla* plantation in Southern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013,13(7):1150-1160.
- [17] Liu X, Li C, Meng M J, et al. Comparative effects of the recovery from sulfuric and nitric acid rain on the soil enzyme activities and metabolic functions of soil microbial communities [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,714:136788.
- [18] Guo X P, Chen H Y H, Meng M J, et al. Effects of land use change on the composition of soil microbial communities in a managed subtropical forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016,373:93-99.
- [19] Moore-Kucera J, Dick R P. PLFA profiling of microbial community structure and seasonal shifts in soils of a Douglas-fir chronosequence [J]. *Microbial Ecology*, 2008,55(3):500-511.
- [20] Liu X, Zhao W R, Meng M J, et al. Comparative effects of simulated acid rain of different ratios of SO_4^{2-} to NO_3^- on fine root in subtropical plantation of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,618:336-346.
- [21] Song X Z, Li Q, Gu H H. Effect of nitrogen deposition and management practices on fine root decomposition in Moso bamboo plantations [J]. *Plant and Soil*, 2017,410(1):207-215.
- [22] Zhang Y, Li J H, Tan J Y, et al. An overview of the direct and indirect effects of acid rain on plants: relationships among acid rain, soil, microorganisms, and plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,873:162388.

- region of northwest Sichuan[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [22] 王洋, 刘景双, 王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7):1269-1274.
Wang Y, Liu J S, Wang Q Y. The Effects of freeze-thaw processes on soil aggregates and organic carbon [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7):1269-1274.
- [23] 丁慧慧. 气候变化下季节性冻融对土壤理化性质的影响[D]. 西藏林芝: 西藏农牧学院, 2023.
Ding H H. Effects of seasonal freezing and thawing on soil physical and chemical properties under climate change [D]. Linzhi, Xizang: Xizang Agriculture and Animal Husbandry College, 2023.
- [24] 肖盛杨, 张蓝月, 陈敬忠, 等. 梵净山不同海拔土壤团聚体稳定性及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 160-168.
Xiao S Y, Zhang L Y, Chen J Z, et al. Stability of soil aggregates and its influencing factors at different elevations in fanjing mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3):160-168.
- [25] 吴婷婷. 梵净山牛尾河流域不同海拔下土壤 pH 及 C、N、P 化学计量特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
Wu T T. Study on soil pH and stoichiometric characteristics of C, N and P at different altitudes in Niuwei River Basin of Fanjing Mountain [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [26] 张健, 郭倩, 孙一铭, 等. 武夷山不同海拔毛竹林土壤碳氮磷的生态化学计量特征[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2022, 51(3):367-373.
Zhang J, Guo Q, Sun Y M, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in moso bamboo forests at different altitudes in Wuyi Mountain [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2022, 51(3):367-373.
- [27] 马和平, 李江荣, 卢杰, 等. 西藏色季拉山不同海拔梯度土壤有效氮和土壤微生物量氮的变化[J]. 高原农业, 2017, 1(1):27-32.
Ma H P, Li J R, Lu J, et al. Change of soil effective nitrogen and SMBN along the different elevation gradient in segila mountains of Tibet, China [J]. Journal of Plateau Agriculture, 2017, 1(1):27-32.
- [28] 赵恒策, 魏霞, 贺燕, 等. 冻融对土壤团聚体特征以及可蚀性 K 值的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 1-6, 13.
Zhao H C, Wei X, He Y, et al. Effects of freeze-thaw on soil aggregate characteristics and erodibility factor K [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5):1-6, 13.
- [29] 刘鸿宇. 泡桐人工林土壤团聚体稳定性及其影响因素研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
Liu H Y. Study on the stability of soil aggregates in *Paulownia* plantation and its influencing factors [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2020.
- (上接第 80 页)
- [23] 周思婕, 王平, 张敏, 等. 大气酸沉降对马尾松幼苗根系生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44(4):111-118.
Zhou S J, Wang P, Zhang M, et al. Effects of atmospheric acid deposition on root physiological characteristics of *Pinus massoniana* seedlings [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2020, 44(4):111-118.
- [24] 刘仁, 张宇飞, 金志芳, 等. 温度调控外源氮添加对毛竹细根分解及其养分释放的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12):3617-3625.
Liu R, Zhang Y F, Jin Z F, et al. Incubation temperature modulates the effects of exogenous nitrogen addition on decomposition and nutrient release of *Phyllostachys edulis* fine roots [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(12):3617-3625.
- [25] Moore T R, Trofymow J A, Prescott C E, et al. Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests [J]. Ecosystems, 2006, 9(1):46-62.
- [26] Xiao L W, Zhu B, Nsenga Kumwimba M, et al. Plant soaking decomposition as well as nitrogen and phosphorous release in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2017, 592:527-534.
- [27] Rawat M, Jägerbrand A K, Bai Y, et al. Litter decomposition above the treeline in alpine regions: a mini review [J]. Acta Oecologica, 2021, 113:103775.
- [28] Chen H, Harmon M E, Sexton J, et al. Fine-root decomposition and N dynamics in coniferous forests of the Pacific Northwest, U. S. A [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32(2):320-331.
- [29] Yan G Y, Dong X D, Huang B B, et al. Effects of nitrogen deposition on litter decomposition and nutrient release mediated by litter types and seasonal change in a temperate forest [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2020, 100(1):11-25.
- [30] Cao C, Liu S Q, Ma Z B, et al. Dynamics of multiple elements in fast decomposing vegetable residues [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616-617.