

模拟酸雨胁迫与柳杉凋落物对土壤养分及微生物的影响

王 丹¹, 马元丹¹, 郭慧媛², 高 岩¹, 张汝民¹, 侯 平¹

(1. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 2. 国家林业局竹子研究开发中心, 浙江 杭州 310012)

摘要: 采用不同酸碱度(pH 5.6, pH 4.0, pH 3.0)模拟酸雨、不同质量(400, 500, 600 g·m⁻²)柳杉 *Cryptomeria fortunei* 凋落物以及模拟酸雨与凋落物复合处理盆栽柳杉幼苗, 研究酸雨和凋落物对根际土壤养分含量和微生物数量的影响。结果表明: 酸雨胁迫对土壤养分含量和微生物数量具有显著的影响, 酸雨处理降低了土壤养分含量和细菌、放线菌数量, 增加了真菌数量, 影响程度均为 pH 3.0 > pH 4.0 > pH 5.6。随着添加凋落物质量的增加, 土壤中氮、磷和钾质量分数以及微生物数量均呈上升趋势, 上升程度为 600 g·m⁻² > 500 g·m⁻² > 400 g·m⁻²。不同 pH 值酸雨与凋落物复合处理中, pH 5.6 + 500 g·m⁻² 凋落物和 pH 4.0 + 500 g·m⁻² 凋落物处理对土壤氮、磷和全钾质量分数影响均不显著, 速效钾质量分数分别比对照增加了 43.1%和 24.0% ($P < 0.01$); pH 3.0 + 500 g·m⁻² 凋落物处理土壤全氮、碱解氮、全磷和全钾质量分数等分别比对照下降了 14.0%, 34.3%, 30.0%和 23.6% ($P < 0.01$), 有效磷质量分数下降了 20.3% ($P < 0.05$); pH 5.6 + 500 g·m⁻² 凋落物处理细菌和放线菌数量分别比对照增加了 15.3% 和 16.7% ($P < 0.05$), pH 3.0 + 500 g·m⁻² 凋落物处理细菌和放线菌数量分别比对照减少了 20.9%和 19.4% ($P < 0.01$); pH 4.0 + 500 g·m⁻² 凋落物和 pH 3.0 + 500 g·m⁻² 凋落物处理真菌数量比对照增加了 100.91%和 119.18% ($P < 0.01$)。凋落物能够缓解酸雨对土壤养分质量分数和微生物数量的影响。图 6 参 45

关键词: 森林生态学; 柳杉; 酸雨; 凋落物; 土壤养分; 土壤微生物

中图分类号: S718.51

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2015)02-0195-09

Soil nutrients and microorganisms with simulated acid rain stress and *Cryptomeria fortunei* litter

WANG Dan¹, MA Yuandan¹, GUO Huiyuan², GAO Yan¹, ZHANG Rumin¹, HOU Ping¹

(1. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. China National Research Center of Bamboo, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: To clearly show the effects of acid rain stress and litter on soil nutrient content and soil microorganism numbers, rhizosphere soil of *Cryptomeria fortunei* seedlings was tested with combinations of simulated acid rain (pH 3.0, 4.0, and 5.6) and litter (L₁-400 g·m⁻², L₂-500 g·m⁻², and L₃-600 g·m⁻²). Results showed that soil nutrient content and the quantity of bacteria and actinomycetes decreased for the acid rain treatment; whereas, fungi increased with pH 3.0 > pH 4.0 > pH 5.6. Also, soil N, P, K, and quantity of microorganisms increased as litter increased (L₃ > L₂ > L₁). For pH 5.6 + L₂ and pH 4.0 + L₂ treatments no significant differences in soil N, P, and total K were found, but available K significantly increased ($P < 0.01$). With the pH 3.0 + L₂ treatment, total N, available N, total P, and total K significantly decreased ($P < 0.01$) as did available P ($P < 0.05$). For the pH 5.6 + L₂ treatment, soil bacteria and actinomycetes significantly increased ($P < 0.05$). With the pH 3.0 + L₂ treatment, soil bacteria and actinomycetes significantly decreased ($P < 0.01$). Also, for

收稿日期: 2014-04-08; 修回日期: 2014-05-28

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y3100361, Y305235); 浙江农林大学科研发展基金资助项目(2010FR058)

作者简介: 王丹, 从事植物生理生态研究。E-mail: xiaolijun15@163.com。通信作者: 侯平, 教授, 博士, 从事森林生态学研究。E-mail: houpingg@263.net

pH 4.0 + L₂ and pH 3.0 + L₂ treatments fungi significantly increased ($P < 0.01$). Thus, litter could alleviate the influence of acid rain on soil nutrient content and microbe quantity. [Ch, 6 fig, 45 ref.]

Key words: forest ecology; *Cryptomeria fortunei*; acid rain; litter; soil nutrient; soil microorganisms

随着工业迅速发展,酸沉降日益严重,给地球生态环境和人类社会经济都带来严重的影响和破坏^[1]。欧洲、北美东部、东南亚,以及中国南方地区是世界上受酸沉降危害最为严重的地区,而且酸沉降区域还在不断扩大^[2]。酸雨对树木的危害首先反映在叶片上,通常会出现叶片失绿、坏死斑和过早脱落,甚至造成森林成片衰亡^[3];同时,对森林土壤的物理化学性质^[4],土壤酶活性^[5]以及土壤微生物^[6]等均具有明显的影响。孙岩等^[7]研究发现:随模拟酸雨 pH 值的下降,玉米 *Zea mays* 幼苗根际土壤中的氮、磷和钾含量逐渐下降;不同种类微生物对酸雨的敏感程度有差异,模拟酸雨 pH 值的增大会使土壤微生物总数减少,其中细菌数量下降最显著,放线菌数量下降不明显,而适当酸雨会促进真菌的生长^[8-9]。植物凋落物分解是一个重要的生态系统过程^[10]。凋落物通过土壤动物和微生物分解,逐渐将营养元素释放于土壤中^[11]。凋落物分解可增加土壤持水量和通气度^[12],逐渐降低土壤酸度^[13],并对土壤有机质^[14]、土壤酶活性^[15]、土壤养分含量^[16]以及土壤微生物等^[17]均有影响。逯军峰等^[18]研究表明,油松 *Pinus tabulaeformis* 凋落量、分解率与土壤全氮、全磷和全钾含量等呈正相关,而与土壤容重呈负相关;周存宇^[19]通过研究 8 种落叶树种对土壤微生物的影响发现,凋落物明显提高土壤中微生物种类和数量。酸雨能够降低凋落物的分解速率,并抑制了凋落物中大多数酶的活性^[1,20]。酸雨与凋落物相互作用对土壤养分和微生物影响的研究鲜见报道。柳杉 *Cryptomeria fortunei* 为杉科 Taxodiaceae 柳杉属 *Cryptomeria* 乔木,适于深厚肥沃、排水良好的酸性土壤^[21]。浙江临安市天目山国家级自然保护区是中国柳杉的分布中心^[22],也是酸雨的重灾区。目前,对柳杉的研究主要集中在纯林改造^[23]、衰退原因^[24]、病虫害^[25]以及酸雨和凋落物对柳杉影响^[26]等方面,但是,酸雨改变凋落物分解与土壤养分和微生物群落之间相关关系的研究鲜见报道。因此,本研究模拟酸雨、柳杉凋落物以及模拟酸雨与柳杉凋落物的复合处理对土壤养分和微生物影响进行研究,为柳杉林植被更新提供一定的理论依据。

1 研究方法

1.1 试验材料

试验所用土壤为盆栽柳杉幼苗根际土壤,设取样点 3 个·盆⁻¹,各点取深度距土壤表层 5~10 cm,距离幼苗 2 cm 左右的细粒土壤,各个处理的 5 盆重复取样后所得 15 份土壤充分混匀,采用四分法取土,部分鲜土进行土壤微生物数量测定,另一部分鲜土自然风干进行土壤养分质量分数测定。栽植柳杉幼苗的土壤取自浙江农林大学植物园,土壤类型为红壤。去除土壤中原有的植物碎屑、死根等其他杂质,混匀用于花盆柳杉幼苗。柳杉幼苗为 3 年生实生苗(由江西林业种苗公司提供),株高 30~40 cm,于 2012 年 4 月栽植于花盆中($\varphi=35$ cm, $h=26$ cm),1 株·盆⁻¹。盆栽苗置于温室中,缓苗期间用自来水浇灌,进行常规管理,缓苗 2 个月后进行处理。

柳杉凋落物于 2012 年 5 月取自天目山柳杉林,并将其自然风干,保存备用。模拟酸雨的配制根据浙江省临安市酸雨监测分析资料,按照酸雨中 $x[\text{SO}_4^{2-}]:x[\text{NO}_3^-]=4:1$ (摩尔比)的比例,用浓硫酸和浓硝酸配制母液,再用蒸馏水稀释成不同 pH 值(pH 5.6, pH 4.0 和 pH 3.0)的酸液。

1.2 试验处理

选取长势基本一致的盆栽柳杉 50 盆,随机分为 10 组,5 盆·组⁻¹,进行处理。酸雨单独处理组(pH 5.6, pH 4.0 和 pH 3.0),根据临安市常年月均降水量确定酸雨喷施量,喷施 2 次·周⁻¹,喷施 100 mL·次⁻¹·盆⁻¹;凋落物单独处理组,根据对天然柳杉林凋落物的调查结果,凋落物量设为 3 个梯度,分别为 400 (L₁), 500 (L₂)和 600 g·m⁻² (L₃);酸雨与凋落物复合处理组,根据预试验结果选用 500 g·m⁻² (L₂),同时采用不同 pH 酸雨处理。设置对照组 ck(不添加凋落物,自来水浇灌处理)。处理 3 个月后测定土壤养分含量与微生物数量。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤养分的测定方法 土壤养分测定参照鲁如坤^[27]的方法,土壤全氮测定采用开氏消煮法,碱解

氮测定采用碱解扩散法；土壤全磷测定采用酸溶-钼锑抗比色法，有效磷的测定采用 Bray 法；土壤全钾测定采用酸溶-原子吸收法，速效钾测定采用乙酸铵提取法。

1.3.2 微生物数量的测定方法 微生物数量采用稀释平板计数法^[28]。细菌培养采用牛肉膏蛋白胨固体培养基；真菌培养采用马丁氏(Martin)固体培养基；放线菌培养采用改良高氏(Gause) I 号培养基。

1.4 数据处理

使用 Oringin 8.0 和 SPSS 软件进行数据处理、图表制作及统计分析，并采用单因素方差分析的最小显著差法(LSD 法)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 酸雨处理对土壤养分质量分数的影响

不同 pH 值酸雨对土壤养分的影响结果见图 1。pH 5.6 酸雨处理对土壤氮、磷和钾质量分数的影响无显著性差异，随着酸雨 pH 值的降低，土壤氮、磷和钾质量分数均呈下降趋势；pH 4.0 和 pH 3.0 酸雨处理土壤中全氮和碱解氮质量分数呈极显著的降低，全氮质量分数与对照相比分别下降了 19.0% 和 25.9% ($P<0.01$)，碱解氮质量分数分别下降了 39.7%，44.9% ($P<0.01$)；pH 4.0 和 pH 3.0 酸雨处理土壤全氮和碱解氮质量分数均极显著低于 pH 5.6 酸雨处理 ($P<0.01$) (图 1A)。pH 4.0 和 pH 3.0 酸雨处理土壤全磷质量分数分别比对照下降了 29.4 % 和 33.5% ($P<0.01$)，有效磷分别下降了 59.3% 和 69.5% ($P<0.01$)；土壤全磷和有效磷质量分数在 pH 4.0 和 pH 3.0 酸雨处理时极显著低于 pH 5.6 酸雨处理，且 pH 3.0 酸雨处理土壤有效磷极显著低于 pH 4.0 酸雨处理 ($P<0.01$) (图 1B)。pH 4.0 酸雨处理对全钾质量分数影响不显著，使土壤速效钾质量分数下降了 14.5% ($P<0.05$)；pH 3.0 处理极显著降低了土壤全钾和速效钾质量分数，分别比对照下降了 24.0% 和 32.4% ($P<0.01$)；土壤全钾和速效钾质量分数在 pH 4.0 和 pH 5.6 酸雨处理之间有显著性差异 ($P<0.05$)，在 pH 3.0 酸雨处理与 pH 5.6，pH 4.0 酸雨处理之间有极显著差异 ($P<0.01$) (图 1C)。

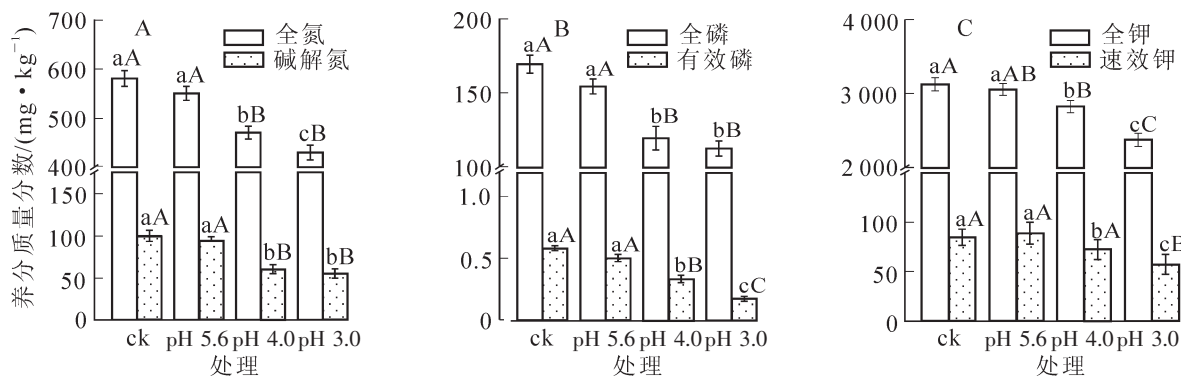


图 1 不同 pH 值酸雨处理下土壤养分质量分数的变化

Figure 1 Change of the content of soil nutrients in different pH values of acid rain

2.2 酸雨处理对土壤微生物数量的影响

不同 pH 值酸雨处理后土壤微生物数量的变化见图 2。随酸雨 pH 值下降，细菌和放线菌数量逐渐减少。pH 5.6 酸雨处理，细菌和放线菌数量与对照相比差异不显著，pH 4.0 和 pH 3.0 处理土壤细菌数量与对照相比分别减少了 15.8% 和 47.7% ($P<0.01$)；放线菌数量分别减少了 22.2% 和 44.4% ($P<0.01$)。真菌数量随酸雨 pH 值的下降而增加，酸雨 pH 5.6 处理与对照相比差异不显著，pH 4.0 和 pH 3.0 酸雨处理与对照相比分别增加了 69.0% 和 110.1% ($P<0.01$)。土壤细菌、真菌和放线菌数量在 pH 5.6，pH 4.0 和 pH 3.0 各处理之间均达到极显著差异 ($P<0.01$)。

2.3 凋落物处理对土壤养分质量分数的影响

添加不同凋落物添加量对土壤养分的影响结果见图 3。土壤氮、磷和钾质量分数随凋落物添加量的增加均呈上升趋势。400 和 500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 凋落物处理对土壤全氮质量分数影响差异不显著，600 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理全氮质量分数比对照增加了 24.1% ($P<0.01$)；400，500 和 600 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理使土壤碱解氮质量分数分别

比对照增加了 17.5% ($P<0.05$), 24.5% ($P<0.01$) 和 57.4% ($P<0.01$); 土壤全氮和碱解氮质量分数在凋落物 $600\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理与 400 和 $500\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理之间达到极显著差异 ($P<0.01$), 而在 400 和 $500\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理之间没有显著差异 (图 3A)。添加凋落物处理对土壤全磷质量分数影响均不显著, 500 和 $600\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理土壤有效磷质量分数分别比对照增加了 13.6% 和 15.3% ($P<0.05$); 土壤磷质量分数在不同添加量凋落物处理之间均无显著性差异 (图 3B)。400 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理对土壤全钾质量分数影响不显著, 500 和 $600\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理均使全钾质量分数极显著增加, 比对照分别增加了 22.9% 和 29.6% ($P<0.01$); 400, 500 和 $600\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 土壤速效钾质量分数分别比对照增加了 70.9%, 105.5% 和 109.0% ($P<0.01$); 500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理土壤全钾、速效钾质量分数极显著高于 400 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理 ($P<0.01$) (图 3C)。

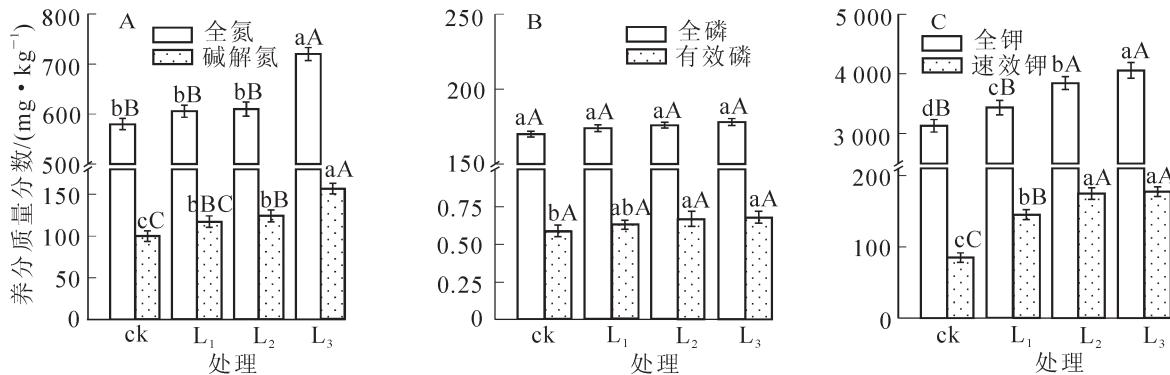


图 3 不同凋落物添加量处理下土壤养分质量分数的变化

Figure 3 Change of the contents of soil nutrient in different litter amounts

2.4 凋落物处理对土壤微生物数量的影响

不同凋落物添加量对土壤微生物数量的影响结果见图 4。凋落物处理对土壤微生物数量具有促进作用, 400 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理对细菌、真菌和放线菌数量影响均无显著性差异; 500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理土壤细菌和放线菌数量分别比对照增加了 83.7% 和 102.8% ($P<0.01$), 真菌数量增加了 27.9% ($P<0.05$); 3 种微生物数量在 600 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理时均极显著增加, 细菌、放线菌和真菌数量分别比对照增加了 166.6%, 130.6% 和 50.7% ($P<0.01$)。土壤细菌、真菌和放线菌数量在 400, 500 和 $600\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 各处理之间均达到极显著差异 ($P<0.01$)。

2.5 酸雨与凋落物的复合处理对土壤养分质量分数的影响

不同 pH 值酸雨与凋落物复合处理对土壤养分的影响结果见图 5。pH 5.6+L₂ 和 pH 4.0+L₂ 处理对土壤全氮和全磷质量分数的影响无显著性差异, pH 3.0 + L₂ 处理全氮和碱解氮质量分数比对照分别下降了 14.0% ($P<0.01$) 和 34.3% ($P<0.01$); 土壤全氮和碱解氮质量分数在 pH 5.6 + L₂, pH 4.0 + L₂ 和 pH 3.0 + L₂ 各处理间均达到极显著差异 ($P<0.01$) (图 5A); 土壤全磷、有效磷质量分数比对照分别下降了 30.0%

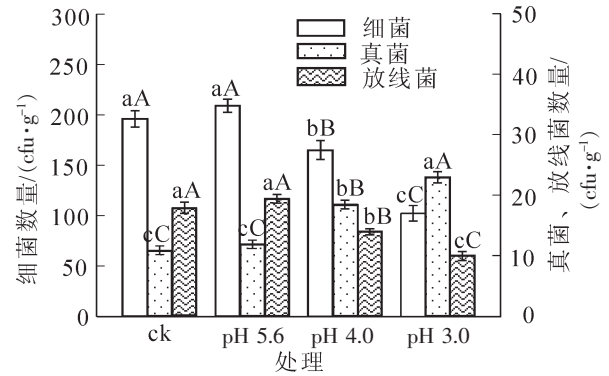


图 2 不同 pH 值酸雨处理下土壤微生物数量的变化

Figure 2 Change of soil microbial quantity in different pH values of acid rain

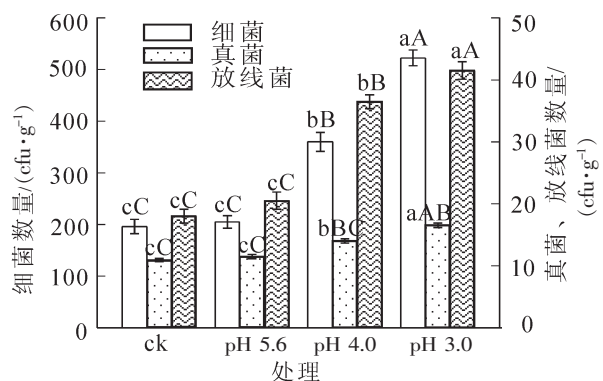


图 4 不同凋落物添加量处理下土壤微生物数量的变化

Figure 4 Change of soil microbial quantity in different litter amounts

($P<0.01$)和 20.3%($P<0.05$); pH 3.0 + L₂ 处理土壤全磷和有效磷质量分数极显著低于 pH 5.6 + L₂ 和 pH 4.0 + L₂ 处理($P<0.01$)(图 5B); pH 5.6+ L₂ 和 pH 4.0+ L₂ 处理对全钾质量分数影响不显著, 使速效钾质量分数分别比对照增加了 43.1%和 24.0%($P<0.01$), pH 3.0 + L₂ 处理土壤全钾质量分数极显著低于对照 23.6%($P<0.01$), 对速效钾质量分数影响不显著; pH 3.0 + L₂ 处理土壤全钾和速效钾质量分数极显著低于 pH 5.6 + L₂ 和 pH 4.0 + L₂ 处理($P<0.01$)(图 5C)。

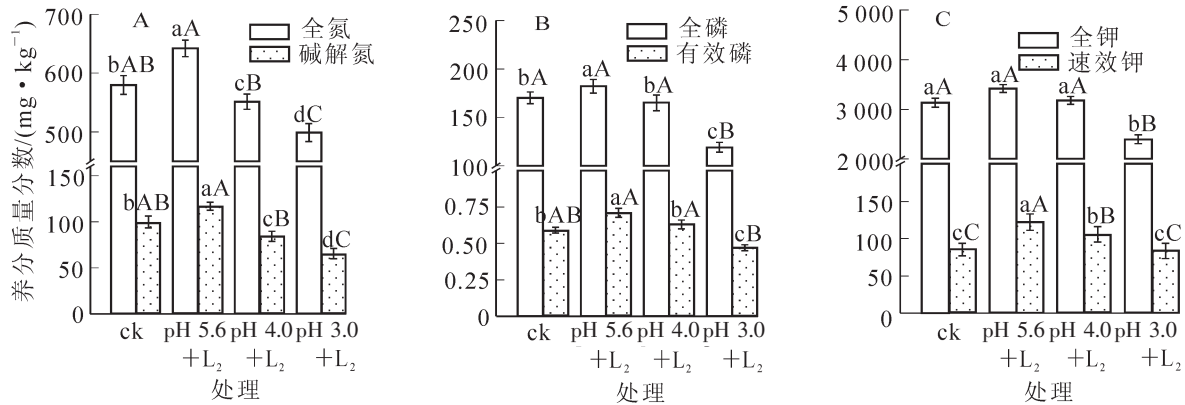


图 5 复合处理对土壤养分质量分数的影响

Figure 5 Effects on the contents of soil nutrient in combined treatments

2.6 酸雨与凋落物的复合处理对土壤微生物数量的影响

酸雨与凋落物复合处理对土壤微生物数量影响见图 6。pH 5.6 + L₂ 复合处理促进了细菌和放线菌生长, 分别使其比对照显著增加了 15.3% 和 16.7% ($P<0.05$), 对真菌数量影响不显著; pH 4.0 + L₂ 复合处理对细菌和放线菌数量影响无显著性差异, 使真菌数量比对照增加了 100.91%($P<0.01$); pH 3.0 + L₂ 处理使细菌和放线菌数量极显著低于对照 20.9%和 19.4% ($P<0.01$), 真菌数量极显著增加了 119.18% ($P<0.01$)。pH 3.0 + L₂ 处理使细菌和放线菌数量极显著低于 pH 5.6 + L₂ 和 pH 4.0 + L₂ 复合处理; 真菌数量在 pH 5.6 + L₂, pH 4.0 + L₂ 和 pH 3.0 + L₂ 各复合处理之间均达到极显著差异水平($P<0.01$)。

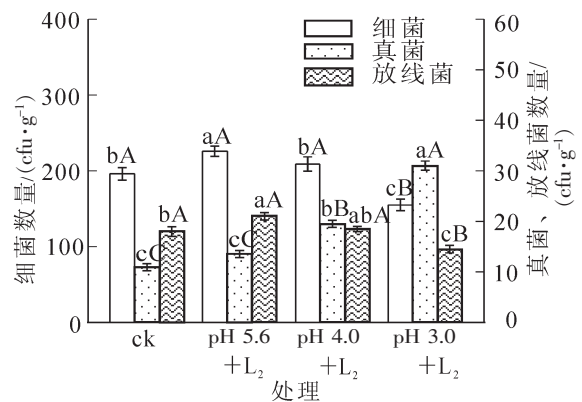


图 6 复合处理对土壤微生物数量的影响

Figure 6 Effects on the quantity of soil microbial in combined treatments

3 讨论

酸雨对土壤生态系统有多方面的影响, 长时间酸雨淋洗会使土壤酸化加剧, 导致土壤中矿物质发生风化, 释放盐基离子^[29], 并使土壤氮、磷、钾等含量发生变化^[30], 造成土壤养分贫瘠。随酸雨 pH 值的下降, 全氮和碱解氮质量分数均呈下降趋势, 该结果与张新明等^[31]研究相一致; 土壤全磷和有效磷质量分数随酸雨 pH 值下降而减少, 可能是由于酸雨 pH 值下降促使磷的活性吸附点位增加, 达到增加磷酸根离子的配位吸附的目的, 从而增加了磷的吸附固定, 促使磷质量分数下降^[32]。随酸雨 pH 值降低土壤中全钾和速效钾质量分数下降, 可能是由于酸雨打破了原有土壤体系中钾与交换性钾之间的转化平衡, 土壤中的钾转化为部分交换性 K⁺以缓冲酸雨影响作用^[33]。酸雨除了能够改变土壤理化性质外, 还影响土壤生物学过程^[1]。随酸雨 pH 值下降, 土壤细菌和放线菌数量减少, 真菌数量增加, 酸雨可降低参与氮素转化的固氮菌、芽孢杆菌的数量^[34]。张萍华等^[35]研究表明: 酸雨处理导致土壤中细菌、真菌和放线菌比例发生变化, 减少土壤微生物数量, 抑制了氮素生理细菌的生长, 促进了纤维素分解菌的生长。

凋落物分解是一个重要的生态系统过程。凋落物自身在土壤微生物作用下生成可溶性矿物质渗入土壤^[36], 保持了土壤肥力, 保证了生产力的稳定性。添加不同质量凋落物处理增加了土壤氮、磷、钾养分

元素质量分数,且均随凋落物添加量的增加而增加,土壤磷素质量分数变化不显著,而氮和钾质量分数变化明显。可能是由于凋落物在分解过程中释放氮并通过微生物转化为有效氮进入土壤,使土壤氮素增加^[37];植物和凋落物中本身含磷较少,因此分解进入土壤的磷元素变化不明显;凋落物中钾易溶于水被淋失,且钾的移动性较大^[38],容易渗入土壤。凋落物与微生物之间有密切联系,一方面凋落物为土壤生物提供了营养物质,是生态系统中腐屑食物链的重要物质基础;另一方面,微生物参与凋落物分解,使有机物转化为无机物,保障土壤养分持续循环^[39]。添加不同质量凋落物促进了土壤细菌、真菌和放线菌的生长,可能是由于凋落物作用改变了土壤营养结构和生物条件^[40]。Malosso等^[41]研究发现凋落物在分解过程中,真菌与细菌的比例升高;刘增文等^[17]研究发现:凋落叶片分解时土壤细菌的增幅最大,其次是放线菌,真菌的增幅较少。

酸雨与凋落物均对土壤生态系统具有重要的影响作用,两者之间也存在显著的相关性。酸雨淋失凋落物中的盐基离子^[42],减少了凋落物补给到土壤中的养分含量。马元丹等^[43]研究表明:酸雨胁迫降低了毛竹凋落物的分解速率;程煜等^[44]研究得出:不同浓度酸雨对凋落物分解速率也有影响。梁国华等^[45]研究了亚热带优势树种凋落物对酸雨的响应发现,酸雨抑制了优势树种叶凋落物的分解。各pH值酸雨与凋落物复合处理对土壤养分质量分数的影响较单一酸雨处理比较均表现出明显的缓冲作用,但在pH 3.0与凋落物复合处理均使土壤全量元素极显著降低,说明强酸与凋落物共存时,凋落物对酸雨的缓冲作用有所下降,可能是高浓度酸雨减少了凋落物质量^[1],使其缓冲作用减弱。真菌数量在各pH值酸雨与凋落物复合处理时均有所增加,细菌和放线菌数量呈先增加后下降趋势,进一步说明凋落物可缓解一定浓度酸雨对土壤养分和微生物的影响。

综上所述,随酸雨pH值下降,土壤氮、磷、钾质量分数及细菌、放线菌数量均呈下降趋势,真菌数量增加;添加不同质量凋落物处理使土壤养分质量分数和微生物数量均有不同程度增加;酸雨与凋落物复合处理比单一酸雨处理对土壤养分质量分数和微生物数量的影响程度有所缓和,说明凋落物能够缓解酸雨对土壤养分质量分数和微生物数量的影响。

4 参考文献

- [1] WANG Congyan, GUO Peng, HAN Guomin, *et al.* Effect of simulated acid rain on the litter decomposition of *Quercus acutissima* and *Pinus massoniana* in forest soil microcosms and the relationship with soil enzyme activities [J]. *Sci Total Environ*, 2010, **408**(13): 2706 – 2713.
- [2] MALAKOFF D. Taking the sting out of acid rain [J]. *Science*, 2010, **330**(6006): 910 – 911.
- [3] 孔国辉, 陆耀东, 刘世忠, 等. 大气污染对 38 种木本植物的伤害特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, **11**(4): 319 – 328.
KONG Guohui, LU Yaodong, LIU Shizhong, *et al.* Injury symptoms of 38 woody species exposed to air pollutants [J]. *J Tropic Subtrop Bot*, 2003, **11**(4): 319 – 328.
- [4] LIANG Xiaoqin, WANG Renqing, DING Wenjuan, *et al.* Effects of simulated acid rain on soil chemical properties of potting yellow cinnamon soil under *Quercus variabilis* [J]. *Appl Mech Mater*, 2013, **260/261**: 776 – 780.
- [5] LING Dajiong, HUANG Qianchun, OUYANG Ying. Impacts of simulated acid rain on soil enzyme activities in a latosol [J]. *Ecotoxicology Environ Saf*, 2010, **73**(8): 1914 – 1918.
- [6] 齐泽民, 杨万勤. 苞箭竹根际土壤微生物数量与酶活性[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(11): 1370 – 1374.
QI Zemin, YANG Wanqin. Microbial quantity and enzyme activity in *Fargesia denudate* rhizosphere soil of western Sichuan [J]. *Chin J Ecol*, 2006, **25**(11): 1370 – 1374.
- [7] 孙岩, 全炳武. 模拟酸雨对玉米幼苗根部土壤的影响[J]. 延边大学农学学报, 2009, **31**(4): 247 – 251.
SUN Yan, QUAN Bingwu. Effect of simulated acid rain on rhizosphered soil of corn seedlings [J]. *J Agric Sci Yanbian Univ*, 2009, **31**(4): 247 – 251.
- [8] 张萍华, 闵航, 申秀英, 等. 模拟酸雨对白术根际微生物的影响[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2005, **28**(3): 309 – 312.
ZHANG Pinghua, MIN Hang, SHEN Xiuying, *et al.* Influence of simulated acid rain on the rhizospheric microorganisms in *Atractylodes macrocephala* [J]. *J Zhejiang Norm Univ Nat Sci*, 2005, **28**(3): 309 – 312.

- [9] 杨宣华, 聂呈荣, 麦焯棉. 华南地区酸雨对花生土壤微生物的影响[J]. 花生学报, 2004, **33**(2): 26 – 29.
YANG Xuanhua, NIE Chengrong, MAI Zhuomian. Effect of acid rain on the main microbial strains of peanut soil in South China [J]. *J Peanut Sci*, 2004, **33**(2): 26 – 29.
- [10] MCMAHON S K, WILLIAMS M A, BOTTOMLEY P J, *et al.* Dynamics of microbial communities during decomposition of carbon-13 labeled ryegrass fractions in soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2005, **69**(4): 1238 – 1247.
- [11] 李海涛, 于贵瑞, 李家永, 等. 亚热带红壤丘陵区四种人工林凋落物分解动态及养分释放[J]. 生态学报, 2007, **27**(3): 898 – 908.
LI Haitao, YU Guirui, LI Jiayong, *et al.* Decomposition dynamics and nutrient release of litters for four artificial forests in the red soil and hilly region of subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(3): 898 – 908.
- [12] 郑思俊, 张庆费, 吴海萍, 等. 上海外环线绿地群落凋落物对土壤水分物理性质的影响[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(7): 1122 – 1126.
ZHENG Sijun, ZHANG Qingfei, WU Haiping, *et al.* Effects of greenbelt plant communities' litterfalls in Shanghai outer ring on soil water physical properties [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27**(7): 1122 – 1126.
- [13] 林开敏, 章志琴, 邹双全, 等. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤性质的影响[J]. 土壤通报, 2006, **37**(2): 258 – 262.
LIN Kaimin, ZHANG Zhiqin, ZOU Shuangquan, *et al.* The influence of Chinese fir mixed with broadleaf litter decomposition on character of forest soil [J]. *Chin J Soil Sci*, 2006, **37**(2): 258 – 262.
- [14] 傅静丹, 薛立, 郑卫国, 等. 加勒比松凋落物对土壤性状的影响[J]. 林业科学研究, 2009, **22**(2): 303 – 307.
FU Jingdan, XUE Li, ZHENG Weiguo, *et al.* Impacts of litter on soil characteristics in a *Pinus caribaea* stand [J]. *For Res*, 2009, **22**(2): 303 – 307.
- [15] FIORETTO A, PAPA S, CURCIO E, *et al.* Enzyme dynamics on decomposing leaf litter of *Cistus incanus* and *Myrtus communis* in a Mediterranean ecosystem [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, **32**(13): 1847 – 1855.
- [16] 刘骄, 黄义雄, 叶功富, 等. 福建沿海主要防护林树种的生物量、凋落物及其对林下土壤养分的影响[J]. 水土保持研究, 2011, **18**(1): 146 – 152.
LIU Jiao, HUANG Yixiong, YE Gongfu, *et al.* Research on biomass and undergrowth soil nutrient of main tree species for shelterbelt along Fujian coastal area [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2011, **18**(1): 146 – 152.
- [17] 刘增文, 段而军, 高文俊, 等. 秦岭山区人工林地枯落物客置对土壤生物、化学性质的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(4): 704 – 710.
LIU Zengwen, DUAN Erjun, GAO Wenjun, *et al.* Effects of leaf litter replacement on soil biological and chemical characteristics in main artificial forests in Qinling Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19**(4): 704 – 710.
- [18] 逯军峰, 王辉, 曹靖, 等. 油松人工林凋落物对土壤理化性质的影响[J]. 西北林学院学报, 2007, **22**(3): 25 – 28.
LU Junfeng, WANG Hui, CAO Jing, *et al.* Effect of forest litters on soil physical and chemical properties in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *J Northwest For Univ*, 2007, **22**(3): 25 – 28.
- [19] 周存宇. 凋落叶分解对土壤微生物数量和组成的影响[J]. 湖北民族学院学报: 自然科学版, 2006, **24**(4): 335 – 338.
ZHOU Cunyu. Effect of different leaf fall decomposition on soil microorganisms [J]. *J Hubei Inst Natl Nat Sci Ed*, 2006, **24**(4): 335 – 338.
- [20] 任来阳, 于澎涛, 刘霞, 等. 重庆酸雨区马尾松与木荷的叶凋落物分解特征[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(2): 246 – 250.
REN Laiyang, YU Pengtao, LIU Xia, *et al.* Decomposition characteristics of leaf litter of *Pinus massoniana* and *Schima superba* in the acid rain region of Chongqing, China [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, **22**(2): 246 – 250.
- [21] 陈有民. 园林树木学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [22] 楼涛, 赵明水, 杨淑贞, 等. 天目山国家级自然保护区古树名木资源[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21**(3): 269 – 274.
LOU Tao, ZHAO Mingshui, YANG Shuzhen, *et al.* Resources of precious and ancient trees in Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2004, **21**(3): 269 – 274.
- [23] 郝云庆, 王金锡, 王启和, 等. 柳杉纯林改造后林分空间结构变化预测[J]. 林业科学, 2006, **42**(8): 8 – 13.

- HAO Yunqing, WANG Jinxi, WANG Qihe, *et al.* Preview of spatial structure of *Cryptomeria fortunei* plantation after stand improvement [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(8): 8 – 13.
- [24] 张欣, 杨淑贞, 赵明水, 等. 天目山自然保护区柳杉种群种内和种间竞争[J]. 农村生态环境, 2004, **20**(4): 1 – 5.
- ZHANG Xin, YANG Shuzhen, ZHAO Mingshui, *et al.* Intra- and inter-specific competition within *Cryptomeria fortunei* populations in the Mountain Tianmu National Nature Reserve [J]. *Rural Eco-Environ*, 2004, **20**(4): 1 – 5.
- [25] 姜文华, 张晟, 陈刚才, 等. 酸沉降对重庆南山森林生态系统土壤和植被的影响[J]. 环境科学研究, 2002, **15**(6): 8 – 11.
- JIANG Wenhua, ZHANG Sheng, CHEN Gangcai, *et al.* Effect of acid deposition on soil and vegetation offorest ecosystem in Nanshan of Chongqing [J]. *Res Environ Sci*, 2002, **15**(6): 8 – 11.
- [26] 俞飞, 侯平, 宋琦, 等. 柳杉凋落物自毒作用研究[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27**(4): 494 – 500.
- YU Fei, HOU Ping, SONG Qi, *et al.* Autotoxicity of *Cryptomeria fortunei* litter [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(4): 494 – 500.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [28] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [29] 刘楠, 王玉杰, 赵占军, 等. 西南亚热带典型林分枯落物层对酸沉降的响应[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(2): 108 – 113.
- LIU Nan, WANG Yujie, ZHAO Zhanjun, *et al.* Responses of typical forest litters to acid deposition in southwestern subtropical region [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, **25**(2): 108 – 113.
- [30] 刘绍贵, 张桃林, 王兴祥, 等. 江西省余江县土壤肥力变化和驱动因素与对策研究[J]. 土壤通报, 2006, **37**(5): 869 – 874.
- LIU Shaogui, ZHANG Taolin, WANG Xingxiang, *et al.* Driving factors and countermeasure for the temporal-spatial variability of soil fertility in Yujiang Country of Jiangxi Province [J]. *Chin J Soil Sci*, 2006, **37**(5): 869 – 874.
- [31] 张新明, 张俊平, 刘素萍, 等. 模拟酸雨对荔枝园土壤氮素迁移和土壤酸化的影响[J]. 水土保持学报, 2007, **20**(6): 18 – 21.
- ZHANG Xinming, ZHANG Junping, LIU Suping, *et al.* Effects of simulated acid rain on nitrogen transplant and acidifying potential in Litch Orchard soils [J]. *J Soil Water Conserv*, 2007, **20**(6): 18 – 21.
- [32] 刘广深, 许中坚, 徐文彬, 等. 模拟酸雨对土壤有效磷衰减的影响[J]. 矿物学报, 2002, **22**(1): 35 – 38.
- LIU Guangshen, XU Zhongjian, XU Wenbin, *et al.* Decline of available phosphorus in soil affected by “Acid Rain” [J]. *Acta Mineral Sin*, 2002, **22**(1): 35 – 38.
- [33] BERTSCH P M, THOMAS G W. Potassium status of temperate region soils [R]//MUNSON R D. *Potassium in Agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1985: 131 – 162.
- [34] 牛建刚, 牛荻涛, 周浩爽. 酸雨的危害及其防治综述[J]. 灾害学, 2008, **23**(4): 110 – 116.
- NIU Jiangang, NIU Ditao, ZHOU Haoshuang. Review on damage and control measures of acid rain [J]. *J Catastrophology*, 2008, **23**(4): 110 – 116.
- [35] 张萍华, 申秀英, 许晓路, 等. 酸雨对白术土壤微生物及酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2005, **36**(2): 227 – 229.
- ZHANG Pinghua, SHEN Xiuying, XU Xiaolu, *et al.* Effects of simulated acid rain on the microbsand enzyme activity in soil of *Atractylodes macrocephala* [J]. *Chin J Soil Sci*, 2005, **36**(2): 227 – 229.
- [36] KRIVTSOV V, LIDDELL K, BEZGINOVA T, *et al.* Forest litter bacteria: relationships with fungi, microfauna, and litter composition over a winter-spring period [J]. *Pol J Ecol*, 2005, **53**(3): 383 – 394.
- [37] COTRUFO M F, RASCHI A, LANINI M, *et al.* Decomposition and nutrient dynamics of *Quercus pubescens* leaf litter in a naturally enriched CO₂ Mediterranean ecosystem [J]. *Funct Ecol*, 1999, **13**(3): 343 – 351.
- [38] 夏汉平, 余清发, 张德强. 鼎湖山3种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特性[J]. 生态学报, 1997, **17**(6): 645 – 653.
- XIA Hanping, YU Qingfa, ZHANG Deqiang. The soil acidity and nutrient contents, and their characteristics of seasonal dynamic changes under 3 different forests of Dinghushan Nature Reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 1997, **17**(6): 645 – 653.

- [39] 严海元, 辜夕容, 申鸿. 森林凋落物的微生物分解[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(9): 1827 – 1835.
YAN Haiyuan, GU Xirong, SHEN Hong. Microbial decomposition of forest litter: a review [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29**(9): 1827 – 1835.
- [40] 温明章, 郭继勋. 不同凋落物量对东北羊草草原土壤生物的影响[J]. 中国草地学报, 2008, **30**(5): 7 – 12.
WEN Mingzhang, GUO Jixun. Influences of litter on soil organisms in Northeastern *Leymus chinensis* grassland of China [J]. *Chin J Grassl*, 2008, **30**(5): 7 – 12.
- [41] MALOSSO E, ENGLISH L, HOPKINS D W, *et al.* Use of ¹³C-labelled plant materials and ergosterol, PLFA and NLFA analyses to investigate organic matter decomposition in Antarctic soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36**(1): 165 – 175.
- [42] 汪思龙, 陈楚莹. 凋落物对土壤酸化的缓冲及其对根系生长的影响[J]. 生态学杂志, 1992, **11**(4): 11 – 17.
WANG Silong, CHEN Chuying. Buffering of forest litter to soil acidification and its effect on growth [J]. *Chin J Ecol*, 1992, **11**(4): 11 – 17.
- [43] 马元丹, 江洪, 余树全, 等. 模拟酸雨对毛竹凋落物分解的影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, **49**(2): 95 – 99.
MA Yuandan, JIANG Hong, YU Shuquan, *et al.* Effects of simulated acid rain on the decomposition of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatsen*, 2010, **49**(2): 95 – 99.
- [44] 程煜, 陈灿, 洪伟, 等. 模拟酸雨及降水量对木荷、马尾松叶凋落物分解的影响[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2009, **38**(6): 595 – 599.
CHENG Yu, CHEN Can, HONG Wei, *et al.* Effect of acid rain and water addition on decomposition of *Schima superba* and *Pinus massoniana* leaf litter [J]. *J Fujian Agric For Univ Nat Sci Ed*, 2009, **38**(6): 595 – 599.
- [45] 梁国华, 李荣华, 丘清燕, 等. 南亚热带两种优势树种叶凋落物分解对模拟酸雨的响应[J]. 生态学报, 2014, **34**(20): 5728 – 5735.
LIANG Guohua, LI Rongqing, QIU Qingyan, *et al.* Response of leaf litter decomposition of two dominant trees to simulated acid rain in southern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(20): 5728 – 5735.