

模拟酸雨与凋落物对柳杉幼苗根际土壤酶活性的影响

王俊龙¹, 王 丹¹, 俞 飞¹, 沈卫东², 邹翠翠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. 浙江省天目山国家级自然保护区 管理局, 浙江 临安 311311)

摘要: 为了探讨酸雨和凋落物对柳杉 *Cryptomeria fortunei* 林地土壤酶活性的影响, 以柳杉幼苗根际土壤为材料, 采用酸雨(pH 4.0), 凋落物(500 g·m⁻²)和酸雨与凋落物复合等 3 种处理, 测定了短时间(30 d)和长时间(90 d)处理后土壤氧化还原酶和水解酶活性的变化。结果表明: 酸雨和凋落物处理对土壤氧化还原酶活性具有不同的影响, 酸雨对土壤硝酸还原酶活性无显著影响, 凋落物极显著地提高其酶活性, 复合处理极显著地降低其酶活性($P<0.01$); 3 种处理均显著提高了土壤多酚氧化酶活性($P<0.05$); 复合处理对土壤过氧化物酶活性无显著影响, 短时间酸雨和凋落物处理均对其具有抑制作用, 长时间处理具有促进作用($P<0.05$); 凋落物处理对土壤过氧化氢酶活性表现为抑制作用, 复合处理对其具有极显著促进作用($P<0.01$)。在水解酶中, 短时间 3 种处理和长时间复合处理均对土壤脲酶活性具有极显著促进作用($P<0.01$); 酸雨、长时间凋落物和复合处理对土壤酸性磷酸酶活性具有显著地抑制作用($P<0.05$); 酸雨和凋落物处理以及长时间复合处理均使土壤蛋白酶活性降低($P<0.05$); 长时间酸雨处理对土壤蔗糖酶活性具有显著抑制作用, 复合处理和短时间凋落物处理具有促进作用($P<0.05$)。酸雨和凋落物复合处理柳杉幼苗根际土壤, 显著改变了两者对土壤酶活性的影响, 说明酸雨和林地凋落物长时间并存, 能够缓解两者对除土壤蛋白酶外其他土壤酶活性的不利影响, 有助于改善土壤条件。图 2 参 35

关键词: 森林土壤学; 柳杉; 酸雨; 凋落物; 土壤酶活性; 天目山

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2014)03-0373-07

Enzyme activity in rhizosphere soil of *Cryptomeria fortunei* seedlings with simulated acid rain and litter

WANG Junlong¹, WANG Dan¹, YU Fei¹, SHEN Weidong², ZOU Cuicui¹, 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. Management Office, National Nature Reserve of Mount Tianmu, Lin'an 311311, Zhejiang, China)

Abstract: To determine the effects of acid rain and litter on enzyme activities of *Cryptomeria* forestry soils on Mount Tianmu, rhizosphere soil from *Cryptomeria fortunei* seedlings was treated with Tr1: simulated acid rain (pH 4.0), Tr2: litter (500 g·m⁻²), and Tr3: Tr1 and Tr2 combined, to determine soil oxidoreductase and hydrolase activities in rhizosphere soil after short-term(30 d) and a long-term(90 d) processing. Results showed that for soil nitrate reductase activity, Tr1 had no significant effect, but Tr2 significantly increased($P<0.01$) and Tr3 significantly reduced ($P<0.01$)activity. All three treatments significantly improved soil polyphenol oxidase activity ($P<0.05$). For soil peroxidase activity, Tr3 had no significant effect, but Tr1 and Tr2 were inhibited after 30 d and promoted after 90 d ($P<0.05$). For soil catalase enzyme activity, Tr2 inhibited and

收稿日期: 2013-04-03; 修回日期: 2013-05-24

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(2008FR101, 2010FR058)

作者简介: 王俊龙, 从事植物生理生态研究。E-mail: wangjunlong113@126.com。通信作者: 侯平, 教授, 博士, 从事森林生态学和恢复生态学研究。E-mail: houpingg@263.net

Tr3 promoted activity ($P<0.01$). Soil urease activity after 30 d was highly significant ($P<0.01$) for all three treatments. Soil acid phosphatase activity significantly decreased ($P<0.05$) with Tr1 as well as with Tr2 and Tr3 over 90 d ($P<0.05$). Soil protease activity was inhibited with Tr3 for 90 d ($P<0.05$) and with Tr1 and Tr2 ($P<0.05$). Tr1 after 90 d inhibited ($P<0.05$) soil invertase activity, but after 30 d Tr2 and Tr3 had a catalytic role on soil invertase activity ($P<0.05$). Thus, long term coexistence of acid rain and woodland litter were able to mitigate, except for protease, the adverse effects of each other on soil enzyme activities, and contributed to improved soil conditions. [Ch, 2 fig. 35 ref.]

Key words: forest soil science; *Cryptomeria fortunei*; acid rain; litter; soil enzyme activity; Mount Tianmu

酸雨已经成为全球十大环境问题之一^[1]。欧洲、北美东部和东南亚,以及中国南方地区是世界上受酸雨危害最为严重的地区,而且酸雨区域还在不断扩大^[2]。大量研究表明:酸雨对森林土壤的理化性质^[3]、养分组成^[4]、土壤微生物^[5]以及土壤酶活性^[6]等均具有明显的影响。张萍华等^[7]研究发现,模拟酸雨对白术 *Atractylodes macrocephala* 根际土壤脱氢酶、过氧化氢酶、脲酶和蛋白酶等活性具有明显的抑制作用,对磷酸酶活性有一定的促进作用;模拟酸雨对砖红壤中淀粉酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶、脲酶等的活性有不利影响^[8]。土壤-凋落物界面是植被对土壤生态系统产生直接和间接影响的最为重要的生态过程之一,也是生态系统内物质循环最为活跃的場所^[9]。凋落物分解产物能够提高土壤脲酶、蔗糖酶和脱氢酶活性^[10];新鲜凋落物可以通过调节土壤 pH 值来改变土壤酶活性^[11];也有研究显示凋落物分解过程与土壤酚氧化酶、木聚糖酶、纤维素分解酶、过氧化物酶活性密切相关^[12-13]。酸雨除了直接影响土壤生态系统外,还会影响森林凋落物分解和化感物质的释放^[14],间接对土壤酶活性产生影响^[6]。模拟酸雨加快了南美蟛蜞菊 *Wedelia trilobata* 凋落物的分解,提高了其周围土壤中凋落物层的化感潜力^[15];模拟酸雨能够降低青冈 *Cyclobalanopsis glauca*, 木荷 *Schima superba* 和马尾松 *Pinus massoniana* 等植物凋落物的分解速率^[16];水榆花楸 *Sorbus alnifolia* 叶凋落物早期分解速率和脱氢酶活性受酸雨的抑制^[17];酸雨会降低凋落物的分解速率,并抑制大多数酶的活性^[6]。关于酸雨和凋落物复合作用对植物根际土壤酶活性的研究鲜见报道。柳杉 *Cryptomeria fortunei* 是中国特有用材树种,浙江省临安市天目山国家级自然保护区为柳杉分布的中心之一^[18]。一些学者对天目山柳杉液流特征^[19]、自毒作用^[20]和病虫害^[21]等方面进行了研究。目前,天目山柳杉长势逐渐减弱,林内幼苗极为稀少,天然更新困难,其种群结构和景观生态功能逐渐衰退。天目山地处重酸雨区^[22],且柳杉林地有凋落物覆盖,酸雨胁迫和凋落物分解导致土壤环境的改变是否是柳杉长势减弱和幼苗建立失败的原因?本研究以柳杉幼苗根际土壤为研究对象,分析了模拟酸雨胁迫和柳杉凋落物分解的情况下柳杉幼苗根际土壤酶活性的变化,旨在为研究酸雨和凋落物分解对天目山柳杉林地土壤环境以及柳杉苗木生长的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

取3年生柳杉实生苗(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($\varphi=26$ cm, $h=35$ cm),1株·盆⁻¹。栽植幼苗所用土壤取自浙江农林大学植物园园土,土壤类型为山地红壤。去除土壤中原有的植物碎屑、死根等杂质,并与2~4 mm 粒径蛭石以4:1(V:V)混合后移置花盆中,各花盆内的供试土壤性质基本一致:土壤有机碳(12.1 ± 0.3) g·kg⁻¹,总氮(429.1 ± 16.2) mg·kg⁻¹,总磷(216.7 ± 12.0) mg·kg⁻¹,总钾(1.7 ± 0.1) g·kg⁻¹,速效磷(20.6 ± 2.3) mg·kg⁻¹,速效钾(692.8 ± 14.7) mg·kg⁻¹,酸碱度 pH 3.9 ± 0.3 。盆栽苗置于温室中,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,自然风干,保存备用。根据浙江省临安市多年自然降水监测的结果^[22],本研究采用分析纯浓硫酸和硝酸按摩尔浓度比4:1的比例配制模拟酸雨母液,并用蒸馏水稀释成 pH 4.0 的模拟酸雨溶液。

1.2 试验设计

选取长势相近的盆栽苗24盆,随机分为4组,分别进行处理。试验设酸雨处理组(AR, acid rain),凋落物处理组(L, litter),酸雨与凋落物复合处理组(AR+L)和对照组(ck),重复6盆·组⁻¹。经过对天目

山柳杉林地凋落物实地调查和计算,凋落物按 $500\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的密度均匀平铺于花盆中土壤表层。酸雨按照当地多年平均降雨量进行喷淋,隔 4 d 喷 1 次, $450\text{ mL}\cdot\text{次}^{-1}\cdot\text{盆}^{-1}$;凋落物处理组和对照组以自来水(pH 6.8)做模拟降水进行喷淋,喷淋量同酸雨。分别在处理 30 d 和 90 d 时取土,在不损伤幼苗根系的前提下,距离幼苗 10 cm 左右,按照栽植时幼苗主根深度,去除表层 5 cm 土壤后采集土壤,采集深度为 10 cm,去除明显的植物根系等杂质。土样带回实验室,自然风干后过筛,进行土壤酶活性分析。

1.3 试验方法

土壤酶活性测定主要参照关松荫^[23]的方法进行。过氧化物酶活性和多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法测定,硝酸还原酶活性采用酚二磺酸比色法测定,脲酶活性采用苯酚钠比色法测定,酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,蛋白酶活性采用茚三酮比色法测定,蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,过氧化氢酶活性采用紫外分光光度法^[24]测定。

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 统计分析软件进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤氧化还原酶活性的影响

3 种处理对不同土壤氧化还原酶活性具有不同程度的影响(图 1)。酸雨处理对土壤硝酸还原酶活性无显著影响(图 1A)。30 d 时,对土壤过氧化物酶和过氧化氢酶活性具有极显著的抑制作用($P<0.01$),与对照相比分别降低了 18.4%和 17.0%(图 1B,图 1C),对土壤多酚氧化酶活性具有极显著的促进作用($P<0.01$),与对照相比提高了 47.9%(图 1D)。90 d 时,对土壤过氧化物酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性均表现为促进作用,与对照相比分别提高了 12.7%($P<0.05$), 33.3%和 31.5%($P<0.01$)。

凋落物处理 30 d 时,促进了土壤硝酸还原酶活性,与对照相比提高了 18.4%($P<0.01$);抑制了土壤过氧化物酶和过氧化氢酶活性,与对照相比分别降低了 23.5%和 28.0%($P<0.01$);对土壤多酚氧化酶活性无显著影响。90 d 时,凋落物处理促进了土壤硝酸还原酶、过氧化物酶和多酚氧化酶活性,与对照相比分别提高了 19.1%, 21.9%($P<0.01$)和 8.1%($P<0.05$),抑制了过氧化氢酶活性,与对照相比降低了 10.5%($P<0.05$)。

酸雨与凋落物复合处理对土壤过氧化物酶活性无显著影响。30 d 时,复合处理使土壤硝酸还原酶活性比对照降低了 55.6%($P<0.01$);对土壤过氧化氢酶活性的影响不显著;使土壤多酚氧化酶活性比对照提高了 39.1%($P<0.01$)。90 d 时,复合处理使土壤硝酸还原酶活性比对照降低了 65.7%($P<0.01$);使土壤过氧化氢酶和土壤多酚氧化酶活性分别比对照提高了 46.9%和 17.7%($P<0.01$)。

2.2 不同处理对土壤水解酶活性的影响

3 种处理对不同土壤水解酶活性的影响程度不同(图 2)。30 d 时,酸雨处理对土壤蔗糖酶活性无显著影响(图 2A);对土壤脲酶活性具有极显著的促进作用($P<0.01$),与对照相比提高了 16.2%(图 2B);对土壤蛋白酶和酸性磷酸酶活性具有抑制作用(图 2C,D),与对照相比分别降低了 11.9%($P<0.05$)和 21.7%($P<0.01$)。90 d 时,酸雨处理对土壤脲酶活性无显著影响;对土壤蔗糖酶、蛋白酶和酸性磷酸酶活性具有抑制作用,与对照相比分别降低了 14.1%($P<0.05$), 21.5%和 34.3%($P<0.01$)。

30 d 时,凋落物处理促进了土壤蔗糖酶和脲酶活性,比对照分别提高了 35.6%和 24.0%($P<0.01$);抑制了土壤蛋白酶活性,比对照降低了 14.8%($P<0.05$);对土壤酸性磷酸酶活性无显著影响。90 d 时,凋落物处理对土壤蔗糖酶和脲酶活性的影响不显著;抑制了土壤蛋白酶和酸性磷酸酶活性,比对照分别降低了 43.0%和 39.0%($P<0.01$)。

酸雨与凋落物复合处理 30 d 时,对土壤酸性磷酸酶活性无显著影响;对土壤蔗糖酶、脲酶和蛋白酶活性具有促进作用,与对照相比分别提高了 10.6%($P<0.05$), 50.4%($P<0.01$)和 14.0%($P<0.05$)。90 d 时,复合处理对土壤蔗糖酶和脲酶活性具有促进作用,与对照相比分别提高了 17.3%和 33.1%($P<0.01$);对土壤蛋白酶和酸性磷酸酶活性具有抑制作用,与对照相比分别降低了 43.5%($P<0.01$)和 14.4%($P<0.05$)。

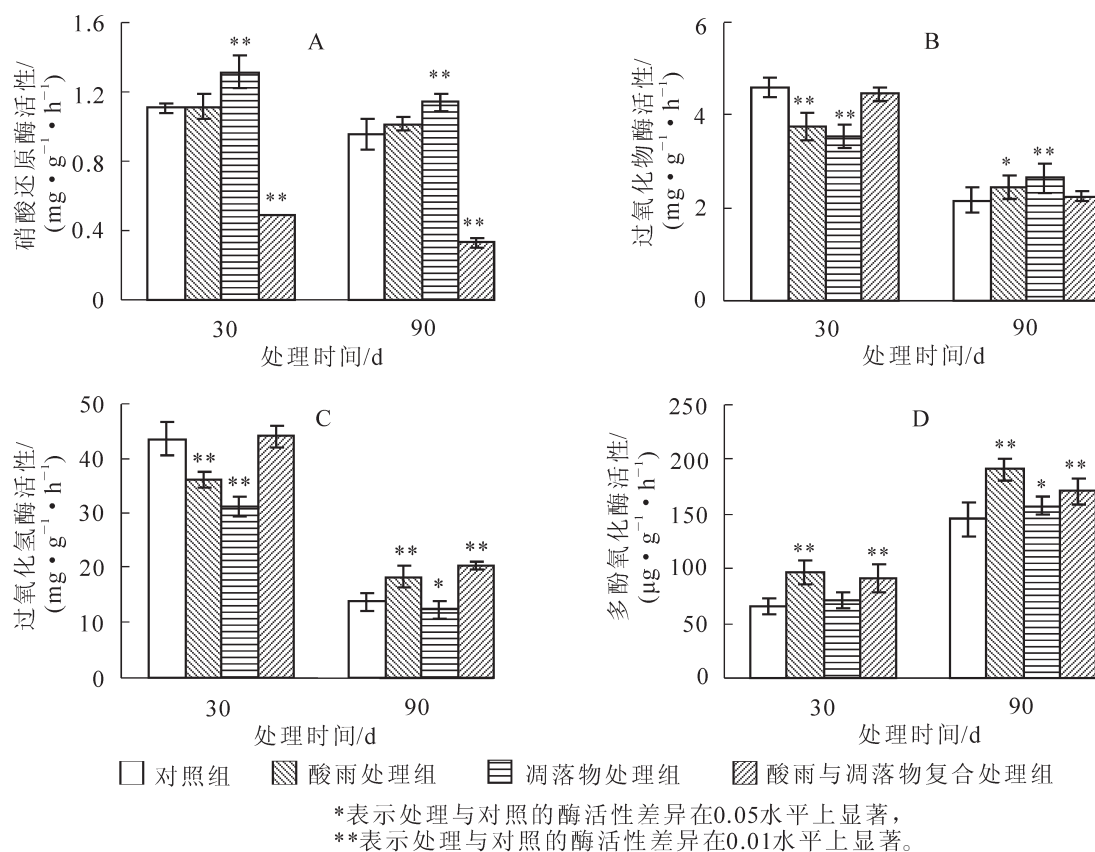


图1 不同处理对土壤氧化还原酶活性的影响

Figure 1 Effect of different treatment on the activity of soil oxidoreductase

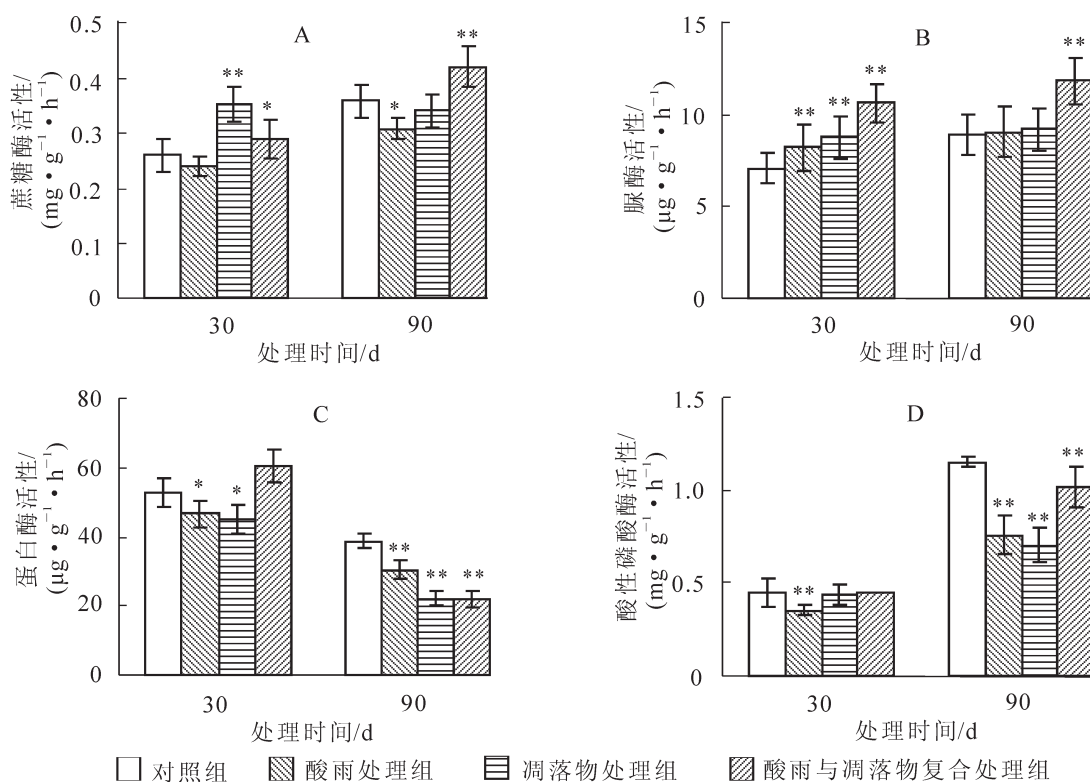


图2 不同处理对土壤水解酶活性的影响

Figure 2 Effect of different treatment on the activity of soil hydrolase

3 讨论

模拟酸雨对土壤蔗糖酶、蛋白酶和酸性磷酸酶活性具有显著抑制作用；短时间处理对土壤过氧化物酶和过氧化氢酶活性具有抑制作用，长时间处理后转变为促进作用；短时间处理对土壤脲酶活性的促进作用也达到显著水平。在 Wang 等^[6]、张萍华等^[7]研究中也有一致结果。王涵等^[25]研究发现：土壤酸化抑制了土壤多酚氧化酶和脲酶的活性，而本研究却发现模拟酸雨淋洗土壤使土壤多酚氧化酶极显著提高，短时间内对土壤脲酶活性的促进作用也达到显著水平。这种差异可能是由于不同类型土壤的酸缓冲容量不同，导致模拟酸雨对土壤酶活性的影响不同。砖红壤过氧化氢酶、酸性磷酸酶和脲酶等酶活性随模拟酸雨 pH 增大而上升^[8]，棕壤磷酸酶、脲酶等酶活性却未受到土壤酸化的影响^[26]。土壤中多酚氧化酶的活性与酚酸类化感物质的累积量变化趋势一致^[27]，俞飞等^[20]研究报道柳杉林地表层土壤中含有阿魏酸、肉桂酸和对羟基苯甲酸。本研究发现模拟酸雨使土壤多酚氧化酶活性极显著提高，模拟酸雨刺激柳杉幼苗根系分泌化感物质引起土壤酶活性变化也可能是产生酶活性差异的原因之一。本研究发现，模拟酸雨没有对土壤硝酸还原酶活性产生显著影响，其原因也可能与土壤中的化感物质有关^[28]，但其具体机制还需进一步研究。

Hu 等^[29]和徐秋芳等^[30]的研究表明：凋落物能够促进土壤脲酶、蔗糖酶和多酚氧化酶的活性；林晗等^[31]研究发现，不同的凋落物配比能够使土壤过氧化氢酶活性下降，本研究结果与其相一致。张丽萍等^[32]和陆耀东等^[33]研究发现，凋落物促进了酸性磷酸酶和蛋白酶活性，本研究结果却与其相反，凋落物种类不同可能是产生差异的主要原因^[13]。土壤酶来源于动物、植物和微生物及其分泌物，并且主要来源于微生物^[34]，凋落物不同导致土壤微生物量、区系组成以及代谢过程不同，从而使土壤酶的数量和活性也不同^[10]。研究表明，柳杉未分解凋落物、半分解凋落物中均含有酚酸类化感物质^[20]，凋落物的化感作用会影响土壤微生物特性，改变幼苗根系的代谢活力，从而引起土壤酶活性的改变；同时化感物质也会直接对土壤酶活性产生影响。

研究发现，复合处理改变了模拟酸雨和凋落物对土壤酶活性的影响，尤其缓解了凋落物对土壤硝酸还原酶的促进作用、模拟酸雨和凋落物对土壤过氧化物酶、过氧化氢酶、蛋白酶活性短时间处理后和对酸性磷酸酶活性长时间处理后的抑制作用，增强了模拟酸雨和凋落物对土壤脲酶活性的促进作用。Wang 等^[6]研究发现，模拟酸雨处理凋落物和土壤混合物，使土壤过氧化氢酶活性提高、硝酸还原酶和酸性磷酸酶活性降低，这与本研究结果基本相同；但土壤多酚氧化酶、脲酶和蔗糖酶的变化却与本研究相反，其原因可能与凋落物对酸雨的缓冲作用^[35]以及酸雨对凋落物的淋洗作用有关。凋落物覆盖在土壤表层，能够固持酸雨，延缓酸雨对土壤和幼苗根系的刺激过程，并使自身的 pH 值发生变化，改变物质释放模式和分解酶活性，加速凋落物中酶的溶解和渗出，直接补充土壤酶含量；同时由于凋落物的特殊性质使酸雨淋溶出的化感物质溶液浓度有所不同，从而引起凋落物化感作用强度的改变。

4 小结

长时间酸雨淋溶会降低植物根际土壤蛋白酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶等水解酶活性；凋落物分解会提高土壤硝酸还原酶活性，降低土壤过氧化氢酶、蛋白酶和酸性磷酸酶活性；酸雨与凋落物复合处理短时间内促进了土壤蛋白酶活性，长时间处理后则对其活性有极显著的抑制作用；抑制了土壤硝酸还原酶活性，缓解了酸雨和凋落物对土壤过氧化物酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶等酶活性的显著抑制作用，同时也增强了对土壤脲酶活性的促进作用。表明酸雨和林地凋落物长时间并存，会降低土壤对含蛋白质有机物的转化能力，提高土壤对尿素的水解能力和减少硝态氮的损失；同时也可以缓解酸雨和凋落物对土壤磷素转化的抑制作用，提高土壤有机质转化和腐殖质合成能力。

参考文献：

- [1] WANG Xiaoqin, LIU Zheng, NIU Li, *et al.* Long-term effects of simulated acid rain stress on a staple forest plant, *Pinus massoniana* Lamb: a proteomic analysis [J]. *Trees*, 2013, **27**(1): 297 – 309.
- [2] MALAKOFF D. Taking the sting out of acid rain [J]. *Science*, 2010, **330**(6006): 910 – 911.

- [3] 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.
- [4] CHIVENCE P, VANLAUWE B, GENTILE R, *et al.* Organic resource quality influences short-term aggregate dynamics and soil organic carbon and nitrogen accumulation [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, **43**(3): 657 – 666.
- [5] BAUMANN K, MARSCHNER P, SMERNIK R J, *et al.* Residue chemistry and microbial community structure during decomposition of eucalypt, wheat and vetch residues [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, **41**(9): 1966 – 1975.
- [6] 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.
- [7] 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 microbes and enzyme activity in soil of *Atractylodes macrocephala* [J]. *Chin J Soil Sci*, 2005, **36**(2): 227 – 229.
- [8] LING Dajiong, HUANG Qianchun, OUYANG Ying. Impacts of simulated acid rain on soil enzyme activities in a latosol [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2010, **73**(8): 1914 – 1918.
- [9] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. 林业科学, 2004, **40**(2): 152 – 159.
YANG Wanqin, WANG Kaiyun. Advances in forest soil enzymology [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**(2): 152 – 159.
- [10] 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 等. 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[J]. 生态学报, 2005, **25**(10): 2662 – 2668.
HU Yalin, WANG Silong, HUANG Yu, *et al.* Effects of litter chemistry on soil biological property and enzymatic activity [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25**(10): 2662 – 2668.
- [11] KRAUS T E C, DAHLGREN R A, ZASOSKI R J. Tannins in nutrient dynamics of forest ecosystems: a review[J]. *Plant & Soil*, 2003, **256**(1): 41 – 66.
- [12] CRIQUET S, FARNET A M, TAGGER S, *et al.* Annual variations of phenoloxidase activities in an evergreen oak litter: influence of certain biotic and abiotic factors [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, **32**(11): 1505 – 1513.
- [13] 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.
- [14] NEUVONEN S, SUOMELA J. The effect of simulated acid rain on pine needle and birch leaf litter decomposition [J]. *J Appl Ecol*, 1990, **27**(3): 857 – 872.
- [15] WANG R L, STAEHELIN C, DAYAN F E, *et al.* Simulated acid rain accelerates litter decomposition and enhances the allelopathic potential of the invasive plant *Wedelia trilobata* (Creeping daisy) [J]. *Weed Sci*, 2012, **60**(3): 462 – 467.
- [16] 洪江华, 江洪, 马元丹, 等. 模拟酸雨对亚热带典型树种叶凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(10): 5246 – 5251.
HONG Jianghua, JIANG Hong, MA Yuandan, *et al.* The inference of acid rain on the leaf litter decomposition of three dominant trees in subtropical forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(10): 5246 – 5251.
- [17] LIM S M, SHIM J K. Effects of simulated acid rain on microbial activities and litter decomposition [J]. *J Ecol Field Biol*, 2011, **34**(4): 400 – 401.
- [18] 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.
- [19] 蒋文伟, 汤富彬, 刘志梅, 等. 天目山柳杉古树的液流特征研究[J]. 林业科学研究, 2012, **25**(1): 58 – 64.
JIANG Wenwei, TANG Fubin, LIU Zhimei, *et al.* Study on the sap flow characters of two old trees of *Cryptomeria fortunei* on Tianmu Mountain [J]. *For Res*, 2012, **25**(1): 58 – 64.
- [20] 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.
- [21] 龚小峰, 朱云峰, 杨淑贞, 等. 天目山柳杉瘿瘤病发生规律的研究[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(6): 904

- 909.

GONG Xiaofeng, ZHU Yunfeng, YANG Shuzhen, *et al.* Pathogenesis regularity of the gall diseases of *Cryptomeria fortunei* in Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2012, **29**(6): 904 - 909.

- [22] 赵伟, 康丽莉, 林惠娟, 等. 临安大气本底站酸雨污染变化特征与影响因素分析[J]. 中国环境监测. 2012, **28**(4): 9 - 14.

ZHAO Wei, KANG Zaili, LIN Huijuan, *et al.* Characteristics and affecting factors analysis of acid rain at Lin'an atmosphere watch regional station [J]. *Environ Monit China*, 2012, **28**(4): 9 - 14.

- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

- [24] 杨兰芳, 曾巧, 李海波, 等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, **42**(1): 207 - 210.

YANG Lanfang, ZENG Qiao, LI Haibo, *et al.* Measurement of catalase activity in soil by Ultraviolet spectrophotometry [J]. *Chin J Soil Sci*, 2011, **42**(1): 207 - 210.

- [25] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH 变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, **17**(6): 2401 - 2406.

WANG Han, WANG Guo, HUANG Yingying, *et al.* The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil [J]. *Ecol Environ*, 2008, **17**(6): 2401 - 2406.

- [26] WAINWRIGHT M. Effect of exposure to atmospheric pollution on microbial activity in soil [J]. *Plant & Soil*, 1980, **55**(2): 199 - 204.

- [27] 张淑香, 高子勤, 刘海玲. 连作障碍与根际微生态研究(Ⅲ)土壤酚酸物质及其生物学效应[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(5): 741 - 744.

ZHANG Shuxiang, GAO Ziqin, LIU Hailing. Continuous cropping obstacle and rhizospheric microecology (Ⅲ) Soil phenolic acids and their biological effect [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2000, **11**(5): 741 - 744.

- [28] 马瑞霞. 化感物质对硝酸还原酶活性影响的研究[J]. 环境科学, 1999, **20**(1): 80 - 83.

MA Ruixia. Study on influence of allelochemicals on activity of nitrate reductases [J]. *Chin J Environ Sci*, 1999, **20**(1): 80 - 83.

- [29] HU Y L, WANG Silong, ZENG Dehui. Effects of single chinese fir and mixed leaf litters on soil chemical, microbial properties and soil enzyme activities [J]. *Plant Soil*, 2006, **282**: 379 - 386.

- [30] 徐秋芳, 钱新标, 桂祖云. 不同林木凋落物分解对土壤性质的影响[J]. 浙江林学院学报, 1998, **15**(1): 27 - 31.

XU Qiufang, QIAN Xinbiao, GUI Zuyun. Effects of litter decomposition of different stands on soil properties [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1998, **15**(1): 27 - 31.

- [31] 林晗, 陈辉, 吴承祯, 等. 千年桐与毛竹凋落叶混合分解对土壤酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18**(4): 539 - 545.

LIN Han, CHEN Hui, WU Chengzhen, *et al.* Effects of decomposition of *Aleurites montana* and *Phyllostachys pubescences* mixed foliage litter on activity of soil enzymes[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18**(4): 539 - 545.

- [32] 张丽萍, 张兴昌, 刘增文, 等. 人工林凋落叶分解对土壤性质的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, **36**(9): 87 - 92.

ZHANG Liping, ZHANG Xingchang, LIU Zengwen, *et al.* Effect of plantation litter decomposition on soil properties [J]. *J Northwest A & F Univ Nat Sci Ed*, 2008, **36**(9): 87 - 92.

- [33] 陆耀东, 薛立, 曹鹤, 等. 去除地面枯落物对加勒比松(*Pinus caribaea*)林土壤特性的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(7): 3205 - 3211.

LU Yaodong, XUE Li, CAO He, *et al.* Impacts of litter removal on soil characteristics in a *Pinus caribaea* stand [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(7): 3205 - 3211.

- [34] ZORNOZA R, GUERRERO C, MATAIX-SOLERA J, *et al.* Assessing air-drying and rewetting pre-treatment effect on some soil enzyme activities under Mediterranean conditions [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**(8): 2125 - 2134.

- [35] LI Zhi'an, CAO Yusong, ZOU Bi, *et al.* Acid buffering capacity of forest litter from some important plantation and natural forests in south China[J]. *Acta Bot Sin*, 2003, **45**(12): 1398 - 1407.