川南天然常绿阔叶林土壤酶活性特征及其对模拟 N 沉降的响应

宋学贵,胡庭兴*,鲜骏仁,肖春莲
(四川农业大学林学园艺学院,四川雅安 625014)

摘要:通过原位进行低氮(LN, 50 kg N·hm^{-2}·a^{-1})、中氮(MN, 100 kg N·hm^{-2}·a^{-1})和高氮(HN, 150 kg N·hm^{-2}·a^{-1})处理,研究了川南天然常绿阔叶林土壤酶活性特征及其对模拟 N 沉降的响应。结果表明,森林土壤过氧化氢酶、脲酶、纤维素酶和蔗糖酶的活性在垂直分布上均表现为 0 ~ 10 cm 土层高于 10 ~ 20 cm 土层;各种土壤酶活性的季节变化明显,但土壤酶活性还因取样时间和土层不同而异。其中,0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层中过氧化氢酶活性高峰均出现在秋季(92 d);0 ~ 10 cm 土层中脲酶活性高峰出现在秋季,而 10 ~ 20 cm 土层中脲酶活性高峰出现在冬季(183 d);0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层中土壤纤维素酶活性高峰则出现在翌年春季(274 d);0 ~ 10 cm 土层中蔗糖酶活性有两个高峰,分别出现在秋季和翌年春季;而 10 ~ 20 cm 土层中蔗糖酶活性只有一个高峰,出现在翌年春季。总体上,常绿阔叶林中不同土壤酶活性对 N 沉降的响应有所差异。其中,N 沉降降低了常绿阔叶林土壤纤维素酶和过氧化氢酶活性,增加了土壤脲酶和蔗糖酶活性。不同浓度 N 处理间酶活性表现出了不同程度的差异性,但其变化的规律还不明显。

关键词:土壤酶活性;常绿阔叶林;氮沉降;川南
文章编号:1000-0933(2009)03-1234-07 **中图分类号**:Q143.4,S154.1,S718.5 **文献标识码**:A

Soil enzyme activities and its response to simulated nitrogen deposition in an evergreen broad-leaved forest, southern Sichuan

SONG Xue-Gui, HU Ting-Xing*, XIAN Jun-Ren, XIAO Chun-Lian
College of Forestry and Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1234 ~ 1240.**

Abstract: To explore the response of soil enzyme activities to simulated nitrogen deposition, an in situ experiment was conducted in a native evergreen broad-leaved forest in southern Sichuan. Nitrogen-addition was carried out within the forest in 2005. Four nitrogen addition treatments i.e, null nitrogen level (CK), low nitrogen level (LN, 50 kg N hm^{-2} a^{-1}), moderate nitrogen level (MN, 100 kg N hm^{-2} a^{-1}) and high nitrogen level (HN, 150 kg N hm^{-2} a^{-1}), were established in the forest. All nitrogen treatments were carried out in triplicates. All plots of treatments were laid out randomly. Beginning in July, 2005, Ammonium nitrate (NH_4NO_3) solution was sprayed by hand monthly onto the floor of these plots throughout the whole year. During the study period, the enzyme activities of hydrogen peroxides, urease, cellulose and invertase presented a virtical higher distribution at 0 − 10 cm depth than those at 10 − 20 cm depth. All enzyme activities changed with seasons, but their patterns varied depending on sampling time and soil layers. The peaks of activities occurred in Autumn at both soil depths of 0 − 10 cm and 10 − 20 cm for hydrogen peroxides, for urease, which occurred in Autumn at the depth of 0 − 10 cm and in Winter at the depth of 10 − 20 cm, for cellulose at both soil depths, which occurred in Spring, for invertase at the depth of 0 − 10 cm, which occurred in Autumn and Spring, and at the depth of 10 − 20 cm, which occurred only in Spring. Overall, the responses of soil enzyme activities to nitrogen deposition in the evergreen broad-

基金项目:国家科技部"十五"重大科技攻关资助项目(2004BA606A-06);四川省科技攻关资助项目(05SG023-009)
收稿日期:2007-09-28; **修订日期**:2008-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hutx001@yahoo.com.cn

leaved forests were different. Nitrogen deposition had negative effect to some degree on hydrogen peroxides activities. In contrast, the urease activities were found to be stimulated by nitrogen deposition. The results also showed that cellulose activities decreased in all treatments, whereas invertase activities increased to some degree by nitrogen deposition.

Key Words: soil enzyme activities; evergreen broad-leaved forest; nitrogen deposition; southern Sichuan

土壤酶是土壤生物化学过程的积极参与者,在森林生态系统的物质循环和能量流动过程中具有十分重要的作用[1]。其中,土壤蔗糖酶、脲酶和纤维素酶等水解酶能够表征土壤 C、N 等养分的循环状况,过氧化氢酶也常被认为是土壤有机质和微生物活性的一个有效指标[2]。人类活动可能改变森林植物群落结构、土壤生物区系、土壤水热状况和土壤理化性质等,从而对森林土壤酶活性产生深刻影响[3]。因此,研究森林土壤酶活性可以了解人类干扰对森林生态系统的影响。

在过去几十年中,化石燃料、化肥使用以及畜牧业集约化经营等人类活动向大气排放了大量的氮化物,在大气中累积并不断向陆地和水域生态系统沉降[4]。据估计[5],全球每年沉降到各类生物群系的活性氮达 43.47 Tg $N \cdot a^{-1}$。目前,氮沉降的增加已造成了河口、海口和江湖等水域氮富集和陆地生态系统氮超负荷,并引起和将引起一系列严重的生态问题。如影响森林植物生长、森林植物组成和多样性等,严重者导致森林衰退[6]。因此,氮素沉降增加引起了科学家和公众的广泛关注[4,7~9]。据报道[10],从 1961 ~ 2000 年,亚洲活性氮的排放从 $1.4 \times 10^{10} kg \cdot a^{-1}$ 升至 $6.8 \times 10^{10} kg \cdot a^{-1}$,预计在 2030 年将上升至 $1.05 \times 10^{11} kg \cdot a^{-1}$,目前我国已成为全球三大氮沉降集中区之一。随着社会经济和工农业的进一步发展,我国氮沉降量可能还会继续升高[7]。因此,持续升高的 N 沉降必将从多方面(如土壤中催化各种生物化学反应的酶)对森林生态系统产生深远影响,这在人口密集和工农业生产较发达的区域可能更加明显。

亚热带常绿阔叶林地区人口密集、工农业发展较快,由于长期、高强度的人为活动影响,原始植被类型分布已十分有限。地处川南的沐川县凉风坳森林公园,较完好地保存了我国亚热带地区最典型的地带性植被类型——亚热带常绿阔叶林。为此,本文旨在通过研究模拟 N 沉降对土壤酶活性影响,为理解 N 沉降对亚热带常绿阔叶林生态系统的影响、生态环境建设中如何应对 N 沉降、类似区域残存植被的保存及退化常绿阔叶林植被的恢复与重建等提供基础数据。

1　研究区概况

试验地设在四川盆地西南边缘沐川县凉风坳森林公园(103°47′ ~ 103°49′ E、28°29′ ~ 28°54′ N,海拔 1350 m)。该区属亚热带湿润季风气候区,年平均降水量 1780 mm,主要集中在 7 ~ 8 月份;年均相对湿度达 90%,年日照时数 939 h。全年日平均气温 12.8 ℃,最热月(7 月份)和最冷月(12 月份)的平均气温分别为 25 ℃和 3 ℃;土壤为黄壤,土层厚度 60 ~ 90 cm,质地为中壤,粒状结构,石砾含量 10% ~ 20%。实验区远离工业城市,年均氮沉降为 15 ~ 20kg $N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$。试验地坡向为东北,坡度 26°。

样地土壤特征见表 1。

表 1　样地土壤特征

Table 1　The soil properties of experiment plots (mean ± SD)

土层深 Soil layer (cm)	有机 C Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	全 N Total N ($g \cdot kg^{-1}$)	全 P Total P ($g \cdot kg^{-1}$)	全 K Total K ($g \cdot kg^{-1}$)	pH
0 ~ 10	116.59 ± 1.65a	3.37 ± 0.11a	0.44 ± 0.03a	6.53 ± 0.70a	3.44 ± 0.06a
10 ~ 20	46.63 ± 1.79b	1.38 ± 0.04b	0.33 ± 0.04a	6.46 ± 0.44a	3.70 ± 0.04a

同列标有相同字母的表示差异不显著($P < 0.05$)　Values suffixed with same letters within one column mean no significantly difference at $P < 0.05$, $n = 3$

该区域植物种类丰富,乔木层高约 21 m、郁闭度约 70%,主要树种有白毛新木姜子(*Neolitsea aurata*)、木荷(*Schima superba*)、硬斗石栎(*Lithocarpus hancei*)、润楠(*Machilus pingii*)、总状山矾(*Symplocos botryantha*)、柃

木(*Eurya nitida*)、青榨槭(*Acer davidii*)、大叶石栎(*L. megalophyllus*)、野漆(*Rhus succedanea*)、深裂中华槭(*A. sinense*)、利川润楠(*M. lichuanensis*)和肉桂(*Cinnamomum cassia*)等。灌木层高 2 ~ 3 m、盖度约 80%,以总状山矾、大叶石栎、柃木和山茶(*Camellia* sp.)等为主。草本层发育极不完善。

2 研究方法

2.1 试验设计

2005 年 5 月 10 日,建立试验样地。在常绿阔叶林内选取有代表性的林地建立 12 个 2m × 2m 样方,并进行编号。样方之间留有足够宽的地带(10 ~ 20m 宽),以防止相互之间造成干扰。参照 Emmett 等[11]的方法进行试验设计,各处理施 N 水平分别为:对照(CK,0 $kgN \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$),低氮(LN,50 $kgN \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$),中氮(MN,100 $kgN \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)和高氮(HN,150 $kgN \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)每个处理组重复 3 次。从 2005 年 7 月开始,每月中旬喷施 NH_4NO_3。即根据氮处理水平,将每个样方每次所需要喷施的 NH_4NO_3 溶解在 0.4 L 水中(全年所增加的水量相当于新增降水 1.2 mm)后,用手提式喷雾器在林地内均匀喷洒,对照样方则喷等量的水。

2.2 样品采集、处理和测定

因试验从 7 月中旬开始,实际取样时间为实验开始后的第 92 天 (10 月份)、183 天 (翌年 1 月份)、274 天 (4 月)和 365 天 (7 月份)。试验区土壤较深厚,但细根主要分布在土壤表层的 20 cm 内,故采样时用土钻按机械分层(0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm,每层 5 点)在各处理中取样(每一处理组内相同层次混合样约 1 kg)。室内过 2mm 筛后保存在 4 ℃冰箱中待测。

本研究中所涉及的土壤酶主要包括:可反应土壤有机质和微生物活性的过氧化氢酶,能够表征土壤 C、N 等养分循环状况的纤维素酶、脲酶和蔗糖酶。其活性分别采用 $KMnO_4$ 滴定法、蒽酮比色法、苯酚-次氯酸钠比色法和 3,5-二硝基水杨酸比色法测定[1]。用 $K_2Cr_2O_7$ 容量法测定有机质,用凯氏定氮法测定全氮[12]。

2.3 数据分析

利用 SPSS10.0 软件进行 One way ANOVA 统计分析,然后以 LSD 多重检验法检验土壤酶活性在不同处理间的差异显著性。

3 结果分析

3.1 常绿阔叶林土壤酶活性的季节变化

对照样地(CK)未进行任何 N 沉降处理,完全处于自然状态,其土壤酶活性变化情况基本可以反映本研究区域森林土壤酶活性的季节特征。图 1 ~ 图 4 显示,研究期间,0 ~ 10cm 的过氧化氢酶、脲酶、纤维素酶和蔗糖酶活性显著高于 10 ~ 20cm。各种土壤酶活性的季节变化明显,但土壤酶活性还因取样时间和土层不同而异。其中,0 ~ 10cm 和 10 ~ 20cm 的过氧化氢酶活性高峰均出现在秋季(92 d);0 ~ 10cm 的脲酶活性高峰也出现在秋季,而 10 ~ 20cm 土层中脲酶活性高峰则出现在冬季(183 d);0 ~ 10cm 和 10 ~ 20cm 土层中土壤纤维素酶活性高峰均出现在翌年春季(274 d);不同土层的蔗糖酶活性季节变化各异,0 ~ 10 cm 的蔗糖酶活性在秋季和翌年春季出现高峰;10 ~ 20 cm 土层中蔗糖酶活性只在翌年春季出现一个高峰。

3.2 土壤酶活性对模拟 N 沉降的响应

实验期内,各 N 处理下,0 ~ 10cm 的过氧化氢酶活性都高于 10 ~ 20cm,但不同层次过氧化氢酶活性的季节变化均呈下降趋势(图 1)。0 ~ 10cm 的过氧化氢酶活性显著低于对照($P < 0.05$);10 ~ 20 cm 的过氧化氢酶活性也低于对照,但差异不显著。因此,N 沉降显著地抑制常绿阔叶林土壤过氧化氢酶的活性,但其作用随深度的增加而减弱。在 0 ~ 10cm 和 10 ~ 20cm 土层,除 0 ~ 10cm 土层 92d 外,其他取样时间均表现为中 N 处理对过氧化氢酶活性的抑制作用强于高 N 和低 N 处理($P < 0.05$),其原因和变化趋势有待进一步研究。

各 N 处理下,0 ~ 10cm 的脲酶活性均高于 10 ~ 20cm;0 ~ 10cm 的脲酶活性的季节变化都表现为下降趋势,而 10 ~ 20 cm 则表现为先上升后下降 (图 2)。氮处理水平和处理时间的不同,各 N 处理与 CK 之间的差异情况也不一致,未表现出明显的规律。尽管在 92d、183d 时 N 处理对 10 ~ 20 cm 土层脲酶活性有一定的抑制作用,但对 0 ~ 10cm 土层脲酶活性的促进作用明显。从整体上看,在春天 N 处理对脲酶活性有明显的促进

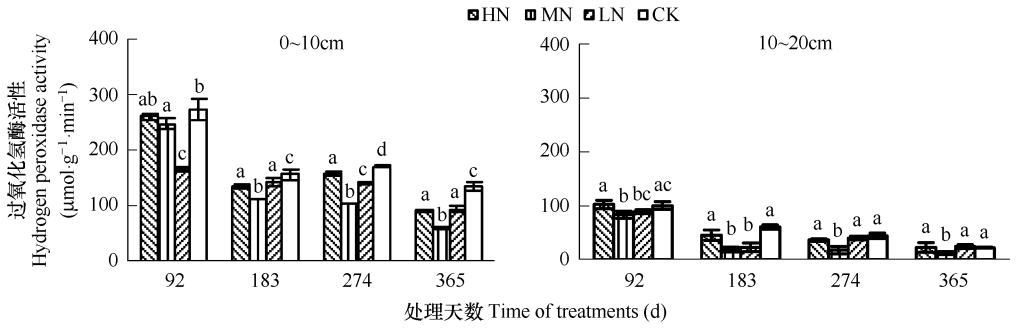

图 1　土壤过氧化氢酶活性对 N 沉降的响应

Fig. 1　The response of soil hydrogen peroxidase activity to nitrogen deposition

竖条表示标准差($n=3$),不同字母表示有显著差异($P<0.05$),下同　Different letters above the columns indicate significant differences among the four groups ($P<0.05$), The same below bars indicate SD($n=3$)

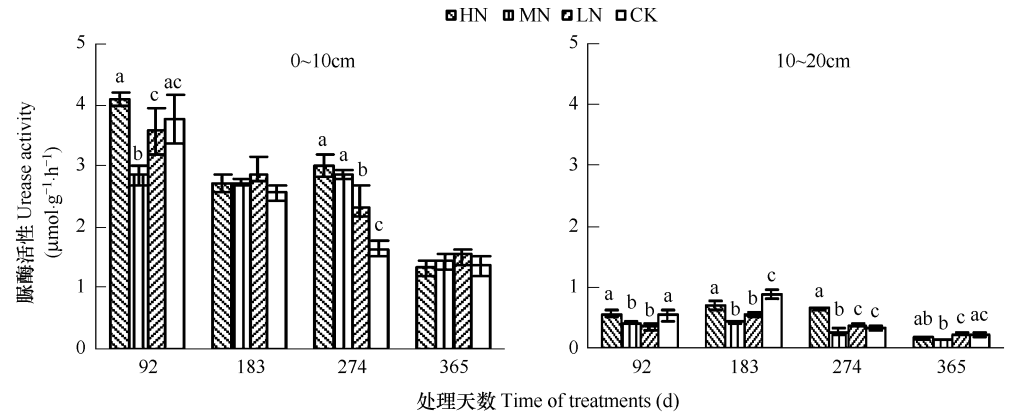

图 2　土壤脲酶活性对 N 沉降的响应

Fig. 2　the response of soil urease activity to nitrogen deposition

作用,而在其他季节促进作用不明显。

各 N 处理下,0 ~ 10cm 的纤维素酶活性均高于 10 ~ 20cm,不同层次的纤维素酶活性在 274d 时最高(图 3)。0 ~ 10cm 和 10 ~ 20cm 的纤维素酶活性均显著低于对照 ($P<0.05$),即 N 沉降显著地抑制常绿阔叶林土壤纤维素酶活性 ($P<0.05$)。实验期内,不同 N 处理间的差异并未表现出一致性。

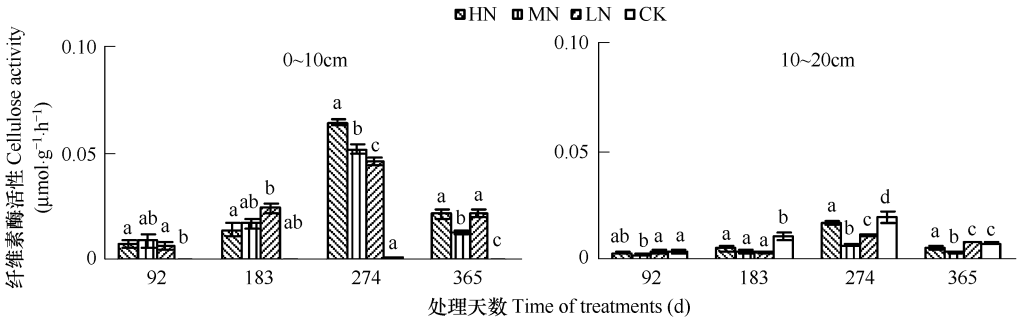

图 3　土壤纤维素酶活性对 N 沉降的响应

Fig. 3　The response of soil cellulose activity to nitrogen deposition

各 N 处理下,0 ~ 10cm 的蔗糖酶活性均高于 10 ~ 20cm,不同土壤层次的蔗糖酶活性均在 274d 时最高(图 4)。随着处理时间的延长,N 处理对蔗糖酶活性的影响也不相同,不同土层对 N 处理的响应也有差异。其

中,N 处理对 0 ~ 10cm 土层蔗糖酶活性有一定的促进作用,尤其在 183d 和 274d 时表现明显;各 N 处理与 CK 相比较,未表现出明显的规律性。但从整体来看,N 处理对常绿阔叶林土壤蔗糖酶活性趋向于一定的促进效应。

因此,亚热带常绿阔叶林中土壤酶对 N 沉降的响应因酶的种类而异。N 沉降降低了土壤纤维素酶和过氧化氢酶的活性,而增加了土壤脲酶和蔗糖酶的活性。不同浓度 N 处理间酶活性表现出了不同程度的差异性,但其变化的规律还不明显。

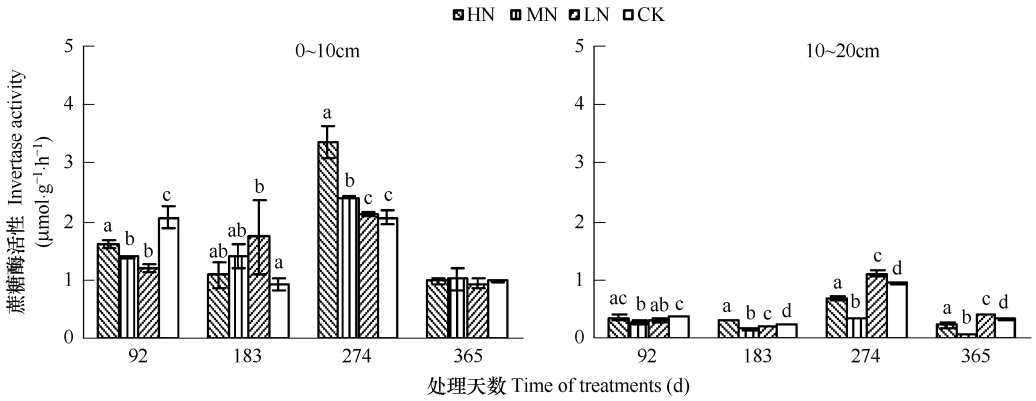

图 4 土壤蔗糖酶活性对 N 沉降的响应

Fig. 4 The response of soil invertase activity to nitrogen deposition

4 结论与讨论

4.1 常绿阔叶林土壤酶活性

本研究表明,川南常绿阔叶林土壤过氧化氢酶、脲酶、纤维素酶和蔗糖酶的活性均随土壤深度的增加而显著降低。这与 Taylor 等[13]、García-Gil 等[14]和杨万勤等[15]的研究结果一致,即在未受扰动的生态系统中,土壤酶活性随着土壤深度增加而降低。其原因是上层土壤(0 ~ 10 cm)受凋落物分解的影响明显,且野外采样时也发现根系分布较多,这也有利于该层次微生物的活动[2],加之其具有良好的理化性质(见表 1),上述作用均随土壤深度的增加而逐渐减弱。

本研究中,川南常绿阔叶林各种土壤酶活性的季节变化明显,但趋势并不一致。其中,土壤过氧化氢酶活性在秋季最高;这与杨万勤等[15]在缙云山的研究结果并不一致,其原因可能是植物群落物种组成差异所致。0 ~ 10cm 的脲酶活性高峰也出现在秋季,这可能因为秋季是凋落物的凋落高峰,其“起爆剂效应(priming effect)”增强了与土壤脲酶分泌有关的微生物的活性。纤维素酶和蔗糖酶活性高峰都出现在春季,可能是春季植物生长发育开始,植物的根系和土壤微生物活性迅速增强,从而提高纤维素酶和蔗糖酶的活性。但本研究结果并不支持“土壤酶活性高峰主要出现在温度较高的季节”[16~18]。这可能是土壤酶的来源及其对环境响应的敏感性不同所致,即森林土壤酶活性的季节变化与森林土壤性质、土壤水热状况、土壤代谢及土壤生物(动物和微生物)区系及数量和植物生物多样性等密切相关[3]。因此,还应加强对不同区域森林生态系统的土壤酶活性动态的研究。

4.2 常绿阔叶林土壤酶活性对模拟 N 沉降的响应及其机制

在川南常绿阔叶林中,N 沉降对常绿阔叶林土壤过氧化氢酶活性有抑制作用,但其作用随深度的增加而减弱。这与 Carreiro 等[19]、Sinsabaugh 等[20]和 DeForest 等[21,22]的研究结果一致,即 N 沉降对氧化性酶有显著抑制作用。其原因主要有:(1)N 沉降抑制了植物根系的活性[23,24]。(2) N 沉降使土壤硝化作用增强,导致土壤 pH 降低,也使 C 的有效性降低[25],外加 N 还与土壤中的 C 缩合[26,27],使本来易被利用的 C 源不能被微生物利用,从而降低相关微生物的活性。另外,N 沉降还会通过减少微生物群落的多样性而改变微生物群落的结构[21,22,28]。(3)N 沉降明显减少了土壤动物数量和生物量[29~32]。但与其他一些研究结果存在一定差

异,如 Frey 等[28]的研究指出 N 沉降对氧化性酶活性的影响不大;Gallo 等[33]和 Waldrop 等[34]的研究表明,N 沉降显著提高了北方温带森林的土壤过氧化氢酶活性;陈立新[35]、杜红霞等[36]指出施用 N 肥提高了落叶松林(*Larix gmelinii*)、云南松林(*Pinus yunnansins*)和糙皮桦(*Betula util*)土壤过氧化氢酶活性。这可能是因研究区域不同所致。

从本研究也可看出,N 沉降对常绿阔叶林土壤脲酶活性有较强的促进作用。这与 Saiya-Cork 等[37]研究所得出的 N 沉降提高了北美密歇根州糖枫林(*A. saccharum* Marsh) 土壤脲酶活性的结论相似,也与 N 肥促进了落叶松林土壤脲酶活性的研究结果[35]相似,这是因为 N 沉降在一定程度上提高了土壤 N (HN_4^+ 和 NO_3^-)的有效性,刺激了专性较强的土壤脲酶活性。同时,在本研究中,N 沉降对土壤纤维素酶活性有明显的抑制作用。这与 Deforestd 等[21,22]的研究结果相似,这是由于 N 沉降抑制森林凋落物的分解[38~40],使凋落物生物区系发生变化,尤其是微生物的数量和活性降低[41]。但也有研究表明,N 沉降提高了土壤纤维素酶活性[19,28,37],或无明显影响[34]。其原因可能是森林类型不同。本研究还表明,N 沉降促进了土壤蔗糖酶的活性,这与外源 N 干扰提高了落叶松林、云南松林、糙皮桦和连香树(*Cercidiphyllum japonicum*) 林地土壤蔗糖酶活性的研究结果相似[35,36]。研究期间,不同浓度 N 处理之间对几种酶活性的促进或抑制作用还未表现出较强的规律性,这可能与取样频率、N 处理时间长短以及不同季节环境因子的变化等有关,有待进一步开展深入的研究。

可见,不同的区域、不同的森林生态系统,其土壤酶活性对 N 沉降的响应也不同,因此,还需在更多的区域、对不同类型的森林进行研究。对植物细根的生长、微生物/土壤动物的种类/数量与活性等也应引起足够的重视从而为充分了解 N 沉降对川南常绿阔叶林及其地下生态过程的影响提供基础数据,为生态环境建设中如何应对 N 沉降、类似区域残存植被的保存及退化常绿阔叶林植被的恢复与重建等提供科学依据。

References:

[1] Zhou L K. Soil enzymology. Beijing: Science Press, 1989.

[2] Guan S Y. Soil Enzyme and Its Study Methods. Beijing: Agricultural Press, 1986.

[3] Yang W Q, Wang K Y. Advance in forest soil enzymology. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(2):152 -159.

[4] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al*. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. Ecological Applications, 1997, 7(3):737 -750.

[5] Holland E A, Dentene F J R, Braswell B H, *et al*. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets. Biogeochemistry, 1999, 46: 7 -43.

[6] Li D J, Mo J M, Fang Y T, *et al*. Impact of nitrogen deposition on forest plants. Acta Ecologica Sinica, 2003. 23 (9):1891 -1900.

[7] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. Ambio, 2002, 31: 64 -71.

[8] Kaiser J. The other global pollutant: nitrogen proves tough to curb. Science, 2001, 294:1268 -1269.

[9] Mooney H, Vitousek P M, Matson P A. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Science, 1987, 238: 926 -932.

[10] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, *et al*. The Asian nitrogen cycle case study. Ambio, 2002, 31:79 -87.

[11] Emmett B A, Boxman A W, Bredemeier M, *et al*. Predicting the effects of atmospheric nitrogen deposition in conifer stands: evidence from the NITREX ecosystem-scale experiments. Ecosystems, 1998, 1:352 -360.

[12] Zhang W R, Xu B T. The Method of Long-term Research on Forest Soil. Beijing: Chinese Forestry Press, 1986.

[13] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, *el al*. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34: 387 -401.

[14] García-Gill J C, Plaza C, Solwe-Rovira P, *et al*. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32:1907 -1913.

[15] Yang W Q, Zhong Z C, Han Y P. Study on the distribution characteristics and seasonal dynamics of forest soil enzymatic activities and its relations with *Gordonia Acuminata* on Mt. Jinyun. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science), 1999, 24(3): 318 -324.

[16] Burger J A, Kelting D L. Using soil quality indicators to assess forest stand management. Forest Ecology and Management, 1999, 122:155 -166.

[17] Sinsabaugh R L, Antibus R K, Linkins A E, *et al*. Wood decomposition: nitrogen and phosphorus dynamics in relation to extracellular enzyme activity. Ecology, 1993, 74:1586 -1593.

[18] 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. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32:1505 -1513.

[19] Carreiro M M, Sinsabaugh R L, Repert D A, *et al*. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition.

Ecology, 2000, 81:2359 －2365.
[20] Sinsabaugh R L, Carreiro M M, Repert D A. Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter composition, N deposition, and mass loss. Biogeochemistry, 2002, 60:1 －12.
[21] DeForest J L, Zak D R, Pregiter K S, *et al*. Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36:965 －971.
[22] DeForest J L, Zak D R, Pregitzer K S, *et al*. Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in northern hardwood forests. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68:132 －138.
[23] Persson H, Ahlstr K, Clemensson -Lindell A. Nitrogen addition and removal at Gårdsjön-effects on fine-root growth and fine-root chemistry. Forest Ecology and Management, 1998, 101:199 －205.
[24] Van-Dijk H F G, De Louw M H J, Roelofs J G M, *et al*. Impact of artificial, ammonium-enriched rainwater on soils and young coniferous trees in a greenhouse. II. Effects on the trees. Environmental Pollution, 1990, 63(1):41 －59.
[25] Thirukkumaran C M, Parkinson D. Microbial respiration, biomass, metabolic quotient and litter decomposition in a lodge pole pine forest floor amended with nitrogen and phosphorous fertilizers. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32:59 －66.
[26] Keyser P, Kirk T K, Zeikus J G. Ligninolytic enzyme system of Phanerochaete chrysosporium: synthesized in the absence of lignin in response to nitrogen starvation. Journal of Bacteriology, 1978, 135:790 －797.
[27] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, *et al*. Nitrogen saturation in northern forest ecosystem- Hypothesis and implications. BioScience, 1989, 39:379 －386.
[28] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, *et al*. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. Forest Ecology and Management, 2004, 196: 159 －171.
[29] Whalen J K, Parmelee R W, Edwards C A. Population dynamics of earthworm communities in corn agroecosystems receiving organic or inorganic fertilizer amendments. Biology Fertility of Soils, 1998, 27(4):400 －407.
[30] Sarathchandra S U, Ghani A, Yeates G W, *et al*. Effect of nitrogen and phosphate fertilisers on microbial and nematode diversity in pasture soils. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(7-8): 953 －964.
[31] Nkem J N, Lobry de bruyn L A, Hulugalle N R, *et al*. Changes in invertebrate populations over the growing cycle of an N-fertilised and unfertilised wheat crop in rotation with cotton in a grey Vertosol. Applied Soil Ecology, 2002, 20(1):69 －74.
[32] Xu G L, Mo J M, Zhou G Y. Effects of N deposition on soil fauna: a summary for one year. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(3): 1 －7.
[33] Gallo M, Amonette R, Lauber C, *et al*. Microbial community structure and oxidative enzyme activity in nitrogen-amended north temperate forest soils. Microbial Ecology, 2004, 48(2):218 －229.
[34] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(9):1443 －1451.
[35] Chen L X. Effect of fertilization on soil enzymes and microbes in *Larix gemlinii* plantations. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 1000 －1004.
[36] Du H X, Liu Z W, Pan K W, *et al*. Effects of external source C, N disturbances on enzymes activities of forest soil. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(2):35 －38.
[37] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34:1309 －1315.
[38] O'Connell A M. Decomposition and nutrient content of litter in a fertilized eucalypt forest. Biology and Fertility of Soils, 1994, 17(4): 159 －166.
[39] Berg B, Ekbohm G. Litter mass-loss rates and decomposition patterns in some needle and leaf litter types. Long-term decomposition in a Scots pine forest. Ⅶ. Canadian Journal of Botany, 1991, 69:1449 －1456.
[40] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic: matter in forest systems. Environmental Reviews, 1997, 5(1):1 －25.
[41] Micks P, Downs M R, Magill A H. *et al*. Decomposing litter as a sink for ^{15}N —— enriched additions to an oak forest and a red pine plantation. Forest Ecosystem and Management, 2004, 196(1):71 －87.

参考文献:

[1] 周礼恺. 土壤酶学. 北京:科学出版社, 1989.
[2] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京:农业出版社, 1986.
[3] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展. 林业科学, 2004, 2(40):152 ~159.
[6] 李德军, 莫江明,方运霆,等. 氮沉降对森林植物的影响. 生态学报, 2003, 23(9):1891 ~1900.
[12] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法. 北京:中国林业出版社, 1986.
[15] 杨万勤, 钟章成, 韩玉萍. 缙云山森林土壤酶活性的分布特征、季节动态及其与四川大头茶的关系研究. 西南师范大学学报(自然科学版), 1999, 24 (3):318 ~324.
[32] 徐国良, 莫江明, 周国逸. N沉降下土壤动物群落的响应:1 年研究结果总述. 北京林业大学学报, 2006, 28(3):1 ~7.
[35] 陈立新. 落叶松人工林施肥对土壤酶和微生物的影响. 应用生态学报, 2004, 15(6):1000 ~1004.
[36] 杜红霞, 刘增文, 潘开文, 等. 外源性 C、N 干扰对森林土壤酶活性的影响. 西北林学院学报, 2006, 21(2):35 ~38.