

外源性氮和磷添加对藜蒭林土壤养分及生化特性的影响

朱仕明, 董喜光, 薛立*, 肖玲玲, 张越

(华南农业大学林学院, 广州 510642)

摘要: 目前全球性的氮沉降和施磷肥不断增加对森林土壤产生重要影响。藜蒭 (*Castanopsis fissa*) 是我国南方重要的用材树种之一, 研究外源性氮和磷对藜蒭林土壤养分和生化特性的影响, 可以为藜蒭人工林的可持续经营提供理论指导。针对广东省云勇林场一片立地条件相似的 14 年生藜蒭人工林进行为期 2 年的模拟氮和磷沉降, 设置不施肥 (对照)、施 N 肥、施 P 肥、施 N+P 肥 4 种处理, 对应的氮和磷施用量分别为 0, 200 kg N, 80 kg P 和 200 kg N+80 kg P ($\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 每种处理有 8 个重复。结果表明, 加 N 减少了土壤全 P、全 K 和速效 K 含量, 增加了土壤碱解 N 含量; 加 P 提高了土壤有机质、全 N、全 P、速效 P 和速效 K 含量, 减少了土壤全 K 含量; 加 N+P 提高了土壤有机质、全 N、全 P、碱解 N 和速效 P 含量, 减少了土壤全 K 含量。加 N、加 P 和加 N+P 处理增加了土壤细菌、真菌数量及磷酸酶和过氧化氢酶活性。加 P 处理还增加了土壤放线菌数量及土壤脲酶活性, 加 N+P 处理也提高了脲酶活性。

关键词: 藜蒭; 外源性氮磷; 土壤酶; 土壤微生物; 土壤养分

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2015)03-0347-06

Effects of N and P addition on soil nutrient and biochemical characteristics in a *Castanopsis fissa* plantation

ZHU Shiming, Dong Xiguang, XUE Li, XIAO Lingling, Zhang Yue

(College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642)

Abstract: An ever-increasing of atmospheric N deposition and P fertilization in the world significantly affect forest soils. *Castanopsis fissa* is one of the important timber species in southern China. Elucidation of the effects of N and P addition on *C. fissa* plantation ecosystems can provide theoretical guidance for the sustainable management of *C. fissa* plantations. In this paper, a field experiment was conducted to investigate the response of forest ecosystem to the increased N and P deposition in a 14-year-old *Castanopsis fissa* plantation in Yunyong Forest Farm, Guangdong province. Treatments included CK, N, P, and N+P addition groups at doses of 0, 200 kg N, 80 kg P and 200 kg N+80 kg P ($\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), respectively, with eight replicates per treatment. The results indicated that N addition decreased the total P, total K and effective K and increased the alkalized N in the soil. Addition of P increased soil organic matter, total N, total P, effective P, and effective K and decreased total K. Addition of N+P increased soil organic matter, total N, total P, alkalized N, and effective P and decreased total K. Addition of N, P, and N+P increased the number of soil bacteria and fungi and the activities of soil urease and acid phosphatase. Moreover, addition of P increased the number of soil actinomycetes and urease activity and addition of N+P also increased soil urease activity.

Key words: *Castanopsis fissa*; N and P addition; soil nutrient; soil microorganism; soil enzyme

随着人类活动干扰的加剧,全球氮沉降持续增加^[1], 目前我国已经成为继欧洲、北美之后的第三大氮沉降区^[2]。我国一些地区, 如珠江三角洲北缘的

鼎湖山自然保护区也出现了高氮沉降的问题^[3-4]。因此, 大气氮沉降的生态效应日益成为人们关注的焦点^[5-9]。磷肥 (P) 的广泛应用引起许多生态系统土

收稿日期: 2014-12-24

基金项目: 广东省林业局资助项目“林分改造优良乡土阔叶树种筛选”(4400-F08018)资助。

作者简介: 朱仕明, 硕士研究生。E-mail: 1624214463@qq.com

* 通信作者: 薛立, 博士, 教授。E-mail: forxue@scau.edu.cn

壤 P 的富集。随着人工速生丰产林等的发展, P 肥的使用将在 P 缺乏的森林红壤中逐步增加。氮沉降不但改变土壤 C 和 N^[10], 而且会导致磷限制^[11], 进而影响土壤有机质。氮沉降持续增加背景下土壤微生物与酶活性的改变是调控土壤有机质的核心机制^[12-13], 已经成为陆地生态系统与全球变化研究的新生长点和科学研究前沿^[14]。研究表明, 一系列长期的加氮试验, 导致了土壤有机氮 (DON) 含量的增加^[15-16], 全氮含量和 C:N 比值降低^[17], 土壤微生物量和群落结构的改变^[18], 以及土壤有机质氮矿化和硝化作用的增加^[19]。另外, Hagedorn 等^[20]实施的加氮试验表明, 氮沉降使土壤有机质含量明显增加。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云勇林场位于广东省佛山市境内, 位于 112°40'E, 44°43'N, 地处南亚热带, 是佛山市唯一的国有林场, 森林面积 1928.73 hm², 为丘陵地形。试验地属于亚热带季风气候, 气候温和, 年平均气温、最高气温和最低气温分别为 22℃、34.5℃和 3.5℃, 无霜期长达 360 d, 受季风影响。该区雨量充沛,

年平均降雨量 2000 mm, 集中在 4~8 月, 年平均相对湿度 80%。土壤为花岗岩发育的酸性赤红壤 (pH<5), 土层深厚而肥沃。

1.2 试验方法

本研究参照 NITREX 项目^[28-29]和北美 Aber 等^[30]类似的研究设计, 于 2008 年 4 月在选择 14 a 的黎蒴人工林中随机设置了 8 块 20 m×20 m 的试验样地, 在设置好的样地内设 5 m×5 m 中心区域, 试验在中心区域进行。每个小样方内分 4 个处理: 不施肥 (对照)、施 N 肥、施 P 肥及施 N+P 肥。施用的 N 肥选用氯化铵 (NH₄Cl), P 肥选用二水合磷酸二氢钠 (NaH₂PO₄·2H₂O), 每次施肥量为 N 5 g·m⁻², N 5 g·m⁻²+P 2 g·m⁻², P 2 g·m⁻², 4 个处理水平以沉降量分别为 0、200 kg N、200 kg N+80 kg P、80 kg P(hm⁻²·a⁻¹)。对照样方喷施同样量的水, 以减少因外加的水而造成对森林的影响。每隔 3 个月用肥料溶液喷洒样地。黎蒴林概况见表 1。表 1 中的主要林下植被为: 金毛狗、潺槁树、三叉苦、乌毛蕨、五指毛桃、淡竹叶、红椎、火炭母、鬼灯笼、梅叶冬青、红背山麻杆、玉叶金花。

表 1 试验林概况

Table 1 General characteristics of experimental stands

林分 Stand	坡向 Slope	坡度 Gradient	平均胸径/cm Average DBH	郁闭度 Canopy density	平均树高/m Average tree height	冠幅/m Crown diameter
黎蒴 <i>Castanopsis fissa</i>	SE30°	27°	19.5	0.90	11.7	9

2010 年 4 月试验结束时, 分别在 8 个样方的 4 个处理采取 0~20 cm 处的土样, 混合成 1 kg 土样, 分成 2 份, 1 份用于土壤养分和酶活性测定, 另 1 份用于土壤微生物测定。有机质用重铬酸钾容量法测定; 全 N 用半微量凯氏法测定; 用氢氧化钠碱熔法将土壤样品熔融后提取待测液, 用钼蓝比色法测全 P, 火焰光度计测全 K; 碱解 N 用碱解扩散法测定; 用 0.5 mol·L⁻¹ 的碳酸氢钠提取土壤样品后, 用钼蓝比色法测速效 P; 用 1 mol·L⁻¹ 的中性醋酸钠提取土壤样品后, 用火焰光度计测速效钾^[31]。所有样品做 3 个重复。

土壤微生物计数用稀释平板法测定^[32], 细菌采用牛肉蛋白胨培养基, 真菌采用孟加拉红马丁氏琼脂培养基, 放线菌采用改良高氏 1 号培养基培养。脲酶采用比色法测定, 酶活性以 37℃ 下培养 24 h 后 1 kg 土释放的 NH₃-N 的毫克数表示; 酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定, 酶活性以 37℃ 下培养 2 h 后 100 g 土消耗五氧化二磷的毫克数表

示; 过氧化氢酶活性采用 0.1 mol·L⁻¹ 高锰酸钾滴定法测定, 酶活性以常温条件培养 1 h 后 1 g 土消耗 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ 的毫升数表示^[33]。所有样品做 3 个重复。

用微软公司的 Microsoft Excel 2003 对土壤生物化学性质指标进行处理并作图, 用 SAS8.2 对数据进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤化学性质

各处理的土壤有机质含量 (g·kg⁻¹) 为加 N+P(30.69)>加 P(26.52)>加 N(24.33)>对照 (23.36) (图 1a)。加 P 和 N+P 处理的土壤有机质含量均显著大于对照 ($P<0.05$), 表明这 2 种处理均显著提高了黎蒴林土壤的有机质含量。

各处理的土壤全 N 含量 (g·kg⁻¹) 为加 P(1.17)>加 N+P(1.08) >对照(1.03)>加 N(1.02)。加 P 和 N+P 处理的土壤全氮含量显著大于对照 ($P<0.05$) (图 1b)。土

壤全 P 含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)为加 P (0.22) 和加 N+P(0.22) > 对照(0.20) > 加 N(0.18)。加 P 和加 N+P 处理的土壤全 P 含量显著大于对照($P<0.05$), 而加 N 处理的显著小于对照(图 1c)。各处理的土壤全 K 含量均显著

小于对照($P<0.05$)(图 1d), 表明各处理均减少了土壤全 K 含量。加 N 减少了土壤全 P 和全 K 含量, 加 P 和 N+P 提高了土壤有机质、全 N 和全 P 含量, 减少了土壤全 K 含量。

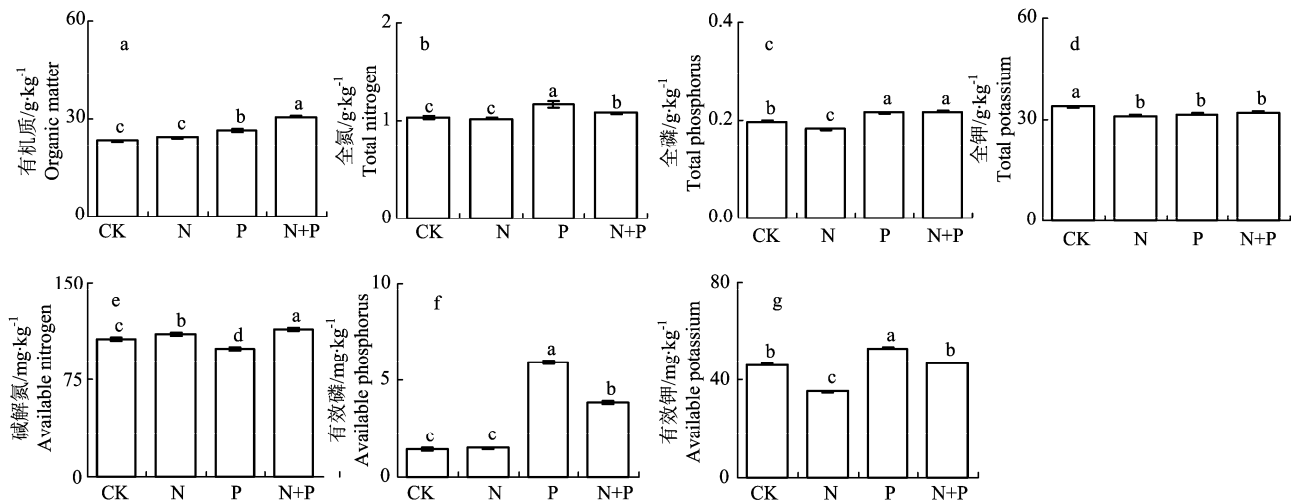


图 1 土壤化学性质

Figure 1 Soil chemical properties

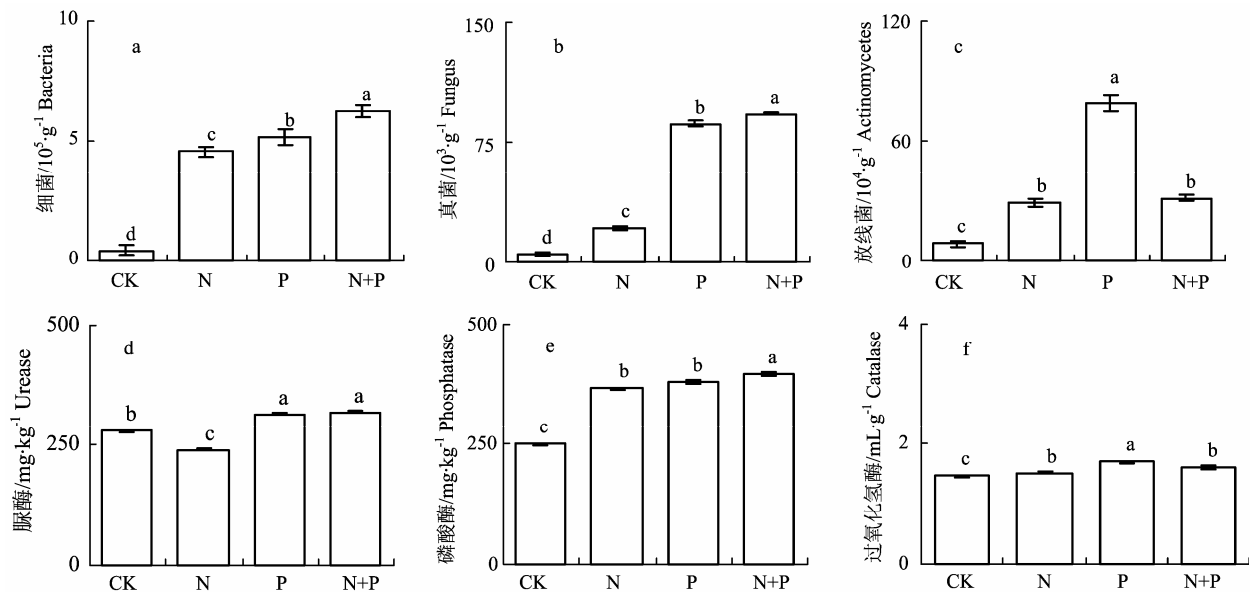


图 2 土壤微生物数量和酶活性

Figure 2 Soil microorganism number and enzyme activities

各处理的土壤碱解 N 含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)为加 N+P(114.06) > 加 N(110.04) > 对照(106.01) > 加 P(98.56)(图 1e)。加 N 和 N+P 的土壤碱解 N 含量显著大于对照, 而加 P 处理的显著小于后者($P<0.05$)。各处理的土壤有效 P 含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)为加 P(5.93) > 加 N+P(3.83) > 加 N(1.49) > 对照(1.41), 加 P 和 N+P 处理的土壤有效 P 含量显著大于对照($P<0.05$)(图 1f)。

土壤有效 K 含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)为加 P(52.90) > 加 N+P(46.69) > 对照(46.22) > 加 N(35.10), 加 P 处理的土壤有效 K 含量显著大于对照, 加 N 处理则显著小于后者($P<0.05$)(图 1g)。总之, 加 N 增加了土壤碱解 N 含量和减少了有效 K 含量, 加 P 减少了土壤碱解 N 和增加了有效 P 和有效 K 含量, 加 N+P 提高了土壤碱解 N 和有效 P 含量。

2.2 对土壤微生物的影响

各处理的土壤细菌数量(10^5 个·g⁻¹干土)为加N+P(6.27) >加P(5.14) >加N(4.55) >对照(0.43) (图2a)。土壤真菌数量(10^3 个·g⁻¹干土)的顺序与细菌相同,为加N+P(92.67) >加P(86.50) >加N(21.33) >对照(4.67)(图2b)。土壤放线菌数量(10^4 个·g⁻¹干土)为加P(78.83) >加N+P(31.33) >加N(29.00) >对照(8.90)(图2c)。各处理的土壤细菌、真菌和放线菌数量均显著大于对照($P < 0.05$)。其中,加P处理的土壤放线菌数量显著大于其他处理,而加N+P处理的土壤细菌和真菌显著大于其他处理($P < 0.05$)。

各处理的土壤脲酶活性(mg·kg⁻¹)为加N+P(317) >加P(314) >对照(278) >加N(238),加N+P和加P处理的土壤脲酶活性显著大于对照,而加N处理的显著小于后者($P < 0.05$)(图2d)。土壤磷酸酶活性(mg·kg⁻¹)为加N+P(396) >加P(379) >加N(365) >对照(249)(图2e),土壤过氧化氢酶活性(mL·g⁻¹)为加P(1.69) >加N+P(1.61) >加N(1.51) >对照(1.46)(图2f),各处理的土壤磷酸酶和过氧化氢酶活性均显著大于对照($P < 0.05$)。

3 讨论

加N处理导致林地土壤有机质、碱解N和速效P的增加,同时导致了全P、全K和速效K的下降。外源性N可以直接增加土壤全N和碱解N的含量。试验用的NH₄Cl在土壤会发生水解,产生H⁺,可以增加土壤酸度,而NH₄⁺在硝化过程中产生大量H⁺,从而导致土壤酸化^[34]。另一方面酸化使土壤中的磷酸酶活性增强,从而提高了土壤速效P的含量。在瑞士酸性壤土的云杉-山毛榉林里,加氮处理显著增加土壤有机质含量,原因是氮的添加,增加新碳输入而对原存有机质矿质化产生抑制作用^[15]。Berg^[35]和Couteaux^[36]也发现,外源性氮可以直接增加土壤有效氮的含量。Marklein等^[10]通过全球性自然生态系统氮磷添加试验数据研究,表明氮添加促进土壤磷酸酶的活性。所以,氮沉降增加促进土壤磷酸酶的提高,有利于含磷有机物的分解,提高土壤磷的有效性。

加P处理导致了除了碱解N以外的土壤有机质、N、P、K的增加。外源性P直接增加了土壤P含量,因此各林地土壤全P和速效P均有增加。试验林地母岩是花岗岩,富含钾长石,林地温度高时有利于岩石和矿物质的风化,增加了K的数量。另外,南方土壤缺磷,外源性P可以使微生物数量的

增加和酶活性提高,促进了凋落物的分解和养分释放,导致土壤的速效K含量增加^[37-38]。

加N+P处理导致林地土壤有机质、N、P、K的增加。加N+P处理可提高树木叶片可利用的N和P的含量,影响微生物群的生长和结构,林地土壤的微生物数量和酶活性增加,凋落物的分解速率加快,土壤有机质、全N和碱解N、全P和速效P都增加。另外,外源性N和P直接增加了土壤N和P含量。施P和施N+P后土壤有效磷含量都显著提高,可能是由于华南地区酸性土壤对磷的吸附作用较强,吸收量大且吸附率高,当外源性磷含量高时,引起土壤吸附率高甚至达到饱和度,从而磷的吸附力减弱,吸附率下降,土壤饱和后过量的无机磷便留在土壤中^[39];或者土壤微生物代谢过程中产生各种酸性或碱性磷酸酶,各种有机磷酸盐水解转化为植物可以吸收利用的可溶性磷^[40]。

总体来看,各处理均促进了微生物数量和酶活性的增加,加N、加P和加N+P处理增加了土壤细菌、真菌数量及磷酸酶和过氧化氢酶活性增加。加P处理还增加了土壤放线菌数量及土壤脲酶活性,加N+P处理也提高了脲酶活性。土壤细菌是土壤微生物的主要组成部分,能分解各种有机质。由于加N和P增加了土壤有效氮和有效磷,为微生物生长提供了丰富的营养来源,促进了其生长。Johnson等^[41]发现,欧石楠丛生的荒地生态系统中,增加氮显著增加微生物量。Paul等^[42]亦发现在高氮样地明显比低氮样地的土壤微生物量要高得多。Allison等^[43]对阿拉斯加北部森林的研究发现,施N条件下土壤微生物生物量为对照的2.5倍。施P处理明显增加了土壤微生物数量。P是南亚热带红壤、砖红壤微生物的重要限制因子,所以施P处理促进了土壤微生物的繁殖。

土壤酶与森林土壤有机质含量和微生物数量密切相关^[44]。土壤有机质含量和微生物数量的增加,促进了土壤酶活性的提高。有研究报道,氮沉降增加了糖槭林土壤磷酸酶的活性^[45]和北方温带森林的土壤过氧化氢酶活性^[46]。磷酸酶的活性可以影响土壤中的有机P转化并且反映土壤受到P元素限制的程度^[47]。Saiya-Cork等^[48]认为,随着北美密歇根的温带森林N沉降的增加,土壤中磷酸酶的活性亦明显增加。Sinsabaugh等^[49]提出,N饱和条件下,土壤磷酸酶的活性获得提升。这些研究与本研究的结果相同。

参考文献:

- [1] Lamarque J F, Kiehl J T, Brasseur G P, et al. Assessing future nitrogen deposition and carbon cycle feedback using a multimodel approach: Analysis of nitrogen deposition[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D19): D19303.
- [2] Lü C, Tian H. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D22): D22S05.
- [3] 黄忠良, 丁明懋, 张祝平, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林的水文学过程及其氮素动态[J]. *植物生态学报*, 1994, 18(2): 194-199.
- [4] 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响[J]. *生态学报*, 2001, 21(12): 2002-2012.
- [5] 方运霆, 莫江明, Gundersen P, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [6] Throop H L. Nitrogen deposition and herbivory affect biomass production and allocation in an annual plant[J]. *Oikos*, 2005, 111(1): 91-100.
- [7] Stursova M, Crenshaw C L, Sinsabaugh R L. Microbial responses to long-term N deposition in a semiarid grassland[J]. *Microbial Ecology*, 2006, 51(1): 90-98.
- [8] Vourlitis G L, Pasquini S, Zorba G. Plant and soil N response of southern californian semi-arid shrub lands after 1 year of experimental N deposition[J]. *Ecosystems*, 2007, 10(2): 263-279.
- [9] 周晓兵, 张元明. 干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3825-3845.
- [10] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems[J]. *New Phytologist*, 2012, 193(3): 696-704.
- [11] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [12] van Diepen L, Lilleskov E, Pregitzer K, et al. Simulated nitrogen deposition causes a decline of intra- and extraradical abundance of arbuscular mycorrhizal fungi and changes in microbial community structure in Northern Hardwood Forests[J]. *Ecosystems*, 2010, 13(5): 683-695.
- [13] Zechmeister-Boltenstern S, Michel K, Pfeiffer M. Soil microbial community structure in European forests in relation to forest type and atmospheric nitrogen deposition[J]. *Plant and Soil*, 2011, 343(1): 37-50.
- [14] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [15] Britton A J, Fisher J M. Growth responses of low-alpine dwarf-shrub heath species to nitrogen deposition and management[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153: 564-573.
- [16] Horswill P, O'Sullivan O, Phoenix G K, et al. Base cation depletion, eutrophication and acidification of species-rich grasslands in response to long-term simulated nitrogen deposition[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 155: 336-349.
- [17] Pilkington M G, Caporn S J M, Carroll J A, et al. Effects of increased deposition of atmospheric nitrogen on an upland moor: leaching of N species and soil solution chemistry[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 135: 29-40.
- [18] Johnson D, Leake J R, Lee J A, et al. Changes in soil microbial biomass and microbial activities in response to 7 years simulated pollutant nitrogen deposition on a heathland and two grasslands[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 103: 239-250.
- [19] Pilkington M G, Caporn S J M, Carroll J A, et al. Effects of increased deposition of atmospheric nitrogen on an upland Calluna moor: N and P transformation[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 135: 469-480.
- [20] Hagedorn F, Spinnler D, Siegwolf R. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35: 1683-1692.
- [21] 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[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [22] 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[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 159-171.
- [23] 樊后保, 黄玉梓, 袁颖红, 等. 森林生态系统碳循环对全球氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2997-3009.
- [24] 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 280-285.
- [25] 薛立, 韦如萍, 谭天泳, 等. 华南阔叶树种幼苗叶片的养分特征[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1820-1824.
- [26] 薛立, 李燕, 屈明, 等. 火力楠、荷木和藜蒴林的土壤特性及水源涵养的研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1623-1627.
- [27] 谭家得, 赵鸿杰, 张学平, 等. 藜蒴等树种在 3 种人工松林中的生长量和生物量比较[J]. *中国城市林业*, 2012, 10(2): 36-39.
- [28] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101: 1-7.
- [29] Vejre H, Callesen I, Vesterdal L, et al. Carbon and nitrogen in Danish forest soils-Contents and distribution determined by soil order soil[J]. *Sci Soc Am J*, 2003, 67: 335-343.
- [30] Aber J D, McDowell W, Nadelhoffer K J, et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: Hypotheses re-

- visited[J]. *BioScience*, 1998, 48: 921-934.
- [31] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [32] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [33] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [34] Skeffington R A. Accelerated nitrogen inputs—A new problem or a new perspective[J]. *Plant and Soil*, 1990, 128(1): 1-11.
- [35] 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[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1991, 69(7): 1449-1456.
- [36] Couteaux M M, Bottner P, Berg B. Litter decomposition, climate and litter quality[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1995, 10(2): 63-66.
- [37] 薛立, 向文静, 何跃君, 等. 不同林地清理方式对杉木林土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1417-1421.
- [38] 薛立, 薛晔, 李燕, 等. 皆伐对杉木林土壤养分的短期影响[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 73-75, 89.
- [39] 陈金林, 吴春林, 黄全能. 杉林红壤的供 P 缓冲性与 P 肥需要量研究[J]. *林业科学研究*, 2002, 15(5): 50-54.
- [40] 盛荣, 肖和艾, 谭周进, 等. 土壤解磷微生物及其磷素有效性转化机理研究进展[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1505-1510.
- [41] Johnson D, Leake J R, Lee J A, et al. Changes in soil microbial biomass and microbial activities in response to 7 years simulated pollutant nitrogen deposition on a heathland and two grasslands[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 103: 239-250.
- [42] Paul J W, Beauchamp E G. Soil microbial biomass C, N mineralization and N uptake by corn in dairy cattle slurry and urea amended soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, 76: 469-472.
- [43] Allison S D, Czimczik C I, Treseder K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(5): 1156-1168.
- [44] 陆耀东, 薛立, 曹鹤, 等. 去除地面枯落物对加勒比松林土壤特性的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3205-3211.
- [45] 森林娜, 刘勇, 李国雷, 等. 林土壤酶研究进展[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(4): 21-25.
- [46] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(9): 1443-1451.
- [47] Turner B L, Baxter R, Whitton B A. Seasonal phosphatase activity in three characteristic soils of the English uplands polluted by long-term atmospheric nitrogen deposition[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 120(2): 313-317.
- [48] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. Effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1309-1315.
- [49] Sinsabaugh R L, Carreiro M M, Rebert D A. Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter decomposition, N deposition, and mass loss[J]. *Biogeochemistry*, 2002, 60: 1-24.