

氮沉降增加对土壤微生物的影响

薛璟花, 莫江明*, 李 炯, 王 晖

中国科学院华南植物园鼎湖山森林生态系统定位研究站, 广东 肇庆 526070

摘要:综述了国外氮沉降对土壤微生物的影响研究现状, 主要从土壤微生物群落结构组成及功能等方面对氮沉降的响应进行了综述, 并从微生物对底物的利用模式及碳分配状况, pH 值的变化方面初步探讨了土壤微生物对过量氮沉降的响应机制。研究表明, 过量氮沉降会给土壤微生物在以下几个方面带来负影响: 首先, 改变微生物群落结构组成, 表现为土壤真菌细菌相关丰富度发生改变, 真菌生物量的减少, 真菌/细菌生物量比率的减少, 土壤微生物量的减少, 微生物群落结构发生改变; 其次, 改变微生物功能, 表现为减少土壤呼吸率, 土壤酶活性的降低, 改变微生物对底物的利用模式等等。此外, 文章还指出了未来该方面研究重点和方向。

关键词: 氮沉降; 土壤微生物; 影响; 机制

中图分类号: S154.2; X171.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2005) 05-0777-06

近几十年来, 由于化肥使用增加和化石燃料燃烧造成氮沉降量迅速增加。欧洲NITREX (Nitrogen Saturation Experiments) 项目研究得出其森林每年氮饱和的临界负荷的最小值为 $N\ 10\ kg\cdot hm^{-2}$ ^[1], 但目前中欧森林大气氮输入为每年 $N\ 25\sim 60\ kg\cdot hm^{-2}$, 大大超过了森林的年需要量^[2]。在北美, 某些森林地区大气氮沉降量每年也达到了 $N\ 40\ kg\cdot hm^{-2}$ ^[3, 4]。一项调查表明, 我国降水 NO_3^- 离子浓度 ($0.32 \times 10^{-6}\ mol\cdot L^{-1}$) 和沉降量 ($0.20 \times 10^{-6}\ mol\cdot L^{-1}$) 与美国、日本接近, 我国降水 NH_4^+ 浓度则更高, 其沉降量也更大, 离子浓度高达 $3.77 \times 10^{-6}\ mol\cdot L^{-1}$, 分别是美国和日本的四倍和3.7倍, 我国氮沉降通量分别是美国和日本的3倍和1.8倍^[5]。大气氮沉降作为全球变化的重要现象之一, 沉降量不断增加所带来的一系列生态问题日趋严重。近几十年来, 因大气污染而不断增加大气氮沉降量, 过剩的氮沉降将增加 NH_4^+ 的硝化和 NO_3^- 的淋失, 加速土壤的酸化, 影响树木的生长以及生态系统的功能和生物多样性, 对森林产生危害作用^[6-15]。

土壤微生物作为分解者, 在森林生态系统物质循环中起着极其重要的作用, 而且土壤微生物的多样性也是影响陆地生态系统功能的关键因素^[16]。因此了解氮沉降对土壤微生物区系特征和动态变化的影响及其机理对于森林和环境管理等方面均具有重要的理论和实践意义。长期增加的氮沉降在许多森林类型里改变了生物地球化学循环已是事实, 然而, 有关氮沉降如何影响微生物群落的变化方面我们仍知之甚少。事实上, 国外关于微生物对氮沉

降的响应的研究亦是近几年才起步, 这些研究的大部分的结果表明, 长期氮沉降的增加能给微生物带来负影响: 改变其群落结构和功能, 表现为真菌生物量的减少, 真菌和细菌生物量比率的减少, 土壤真菌细菌相关丰富度发生改变, 外生菌根真菌物种多样性的减少, 减少土壤呼吸率, 改变微生物对底物的利用模式, 土壤酶活性的降低, 等等^[17-23]。本文通过综述近年来国外在氮沉降对土壤微生物影响方面的研究情况, 为我国开展该方面的研究、森林管理、环境保护以及为生态系统可持续发展等方面提供参考。

1 过量氮沉降对土壤微生物的影响

土壤微生物的生长与植物、pH 值、土壤养分有着各种各样的关系^[24-26], 因此氮沉降能间接或直接影响土壤微生物的生长繁殖和活动能力, 土壤微生物的种类、数量、物种多样性、种群结构及其功能将会随之发生变化, 进而对土壤中物质转化、土壤中营养物质有效性产生影响。

1.1 改变土壤微生物的群落结构组成

土壤微生物是土壤的重要组成部分, 且对土壤污染具有特别的敏感性, 是降解污染物质和恢复土壤环境的先锋者。目前的研究表明, 过量氮沉降使土壤微生物群落剖面发生改变, 主要表现为减少土壤微生物量 (碳), 降低真菌/细菌生物量比率。如Frey等^[20]在长期施氮的哈佛森林研究表明, 阔叶林和松林施氮样地的真菌生物量分别比对照的低27%~61%和42%~69%, 而细菌生物量对施氮增加的响应则不如真菌的大, 因此施氮明显降低真菌/细菌

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30270283); 广东省自然科学基金项目 (021524); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (KSCX2-SW-133); 中国科学院华南植物研究所所长基金项目

作者简介: 薛璟花 (1979 -), 女, 助理研究员, 研究方向为全球变化尤其是 C、N 循环对微生物的影响及其响应。

*通讯作者: 莫江明。E-mail: mojm@scib.ac.cn

收稿日期: 2005-06-02

生物量比率。DeForest等^[17]在密切根北部的一个成熟的北方阔叶林中的施氮(NO_3^-)样地亦发现了微生物生物量比对照减少了68%。Wallenstein等^[27]在3个长期施氮样地(哈佛森林, MA, Mt. Ascutney, VT 和 Bear Brook Watershed, ME, USA)中的2个样地发现施氮明显减少土壤微生物量,其中哈佛森林的松林样地的微生物量比未施氮样地减少了68%,阔叶林则减少了59%,而在Mt. Ascutney混交林样地的微生物量比未施氮样地减少47%,同时,这种减少也主要表现在真菌生物量,使真菌/细菌的生物量比率随氮输入的增加而减少。Wallenstein等^[28]在维吉尼亚西部的2个氮饱和样地里亦发现类似现象,即微生物量和真菌/细菌比率随施氮水平增加而减少。在英国北部的一个大草场样地,同样发现在不施氮的样地真菌/细菌生物量比率显著高于施氮样地^[29]。同时,亦有证据显示,在英国北部同样的大草场样地里,微生物碳在未施氮样地均高于施氮样地^[29]。Tietema等^[30]在欧洲氮沉降梯度研究中发现,在氮饱和样地的微生物量碳的效率和 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 比率会低于氮受限的样地,其中在高 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 比率的氮受限样地中,暗示了微生物群落以真菌占优势,因为真菌比细菌有更高的 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 比率,这也与样地计算的高碳利用率是一致的,因为样地中的纯培养研究亦得出真菌比细菌的效率更高。后来,Compton等^[19]在长期施氮的哈佛森林的研究中也发现,松林和阔叶林里施氮增加均引起土壤微生物量碳的减少。然而并非所有的研究结果均表现一致,Johnson等^[31]在一个长达7 a的模拟氮沉降实验中发现,在氮受限的欧石南丛生的荒地生态系统中氮增加可以显著增加微生物量和微生物活性,而在磷受限的草地生态系统中则减少微生物量及其活性。Paul等^[32]亦发现在高氮样地($\text{N } 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)明显比低氮样地($\text{N } 100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的土壤微生物量要高得多。然而,目前学术界还不清楚造成以上这些不同结果的原因,有待进一步的研究。

此外,过量的氮沉降还会改变土壤微生物类群和多样性。在长期施氮的哈佛森林发现,松林的低氮处理样地的外生菌根真菌群落的多样性明显低于对照样地^[20]。Compton等^[19]则发现施氮使松林和阔叶林土壤微生物类群均发生改变,因为在样地里16S rDNA这种喜氮菌的基因在所有样品中均有发现,单(加)氧氨酶基因(*amoA*)在高氮处理中有发现,在对照样地中则没有,而*nifH*这种用于 N_2 固定的基因则在除了氮处理土壤中难以扩大外,其它土壤中均有发现,这暗示了氮增加已改变了固氮类群。

然而,DeForest等^[33]在其研究中没有发现慢性氮

增加可改变微生物群落组成以及 NO_3^- 的增加可改变细菌、放线菌和真菌或PLFAs的相对丰度的证据。Boxman等^[34]在NITREX项目的实验样地中亦发现,输入的氮几乎对真菌和细菌生物量没有任何影响。这也许是研究进行的时间不够长,或者是和样地实验前氮的状况相关,还有一个可能的原因是施用的氮量不够大,还不足以在短期内产生明显的作用。

1.2 过量氮沉降对土壤微生物功能的影响

土壤微生物功能和结构基因对氮循环的进程的研究是非常重要的。土壤微生物群落功能的改变对土壤的形成和土壤的肥力状况会有直接和间接的影响。过量氮沉降将带来微生物功能的改变,如降低酶的活性,减少土壤呼吸速率,改变了微生物对底物的利用模式等等。而微生物对氮沉降的响应最终会对生态系统碳氮循环造成反作用。

1.2.1 降低土壤酶的活性

土壤酶是土壤生物活性的一个重要指标,它们参与土壤有机物质的分解转化,土壤酶活性的高低可以反映土壤养分(尤其是氮、磷)的转化强弱。随着氮沉降研究的不断深入,近年来已有研究显示长期氮增加造成土壤酶活性的降低,特别是木质素溶解酶活性、纤维素降解酶活性的降低^[17, 18, 20, 35]。Carreiro等^[35]首次报道了由于生态系统长期氮增加而造成了木质素细胞溶解酶的活性降低。Berg等^[36]在凋落物分解研究中发现,氮增加明显降低凋落物尤其是后期的分解速率,这是由于木质素降解酶主要由白腐真菌产生,而白腐真菌通常仅在氮受限的条件下才能生产它。还有研究发现,氮增加通过抑制木质素细胞溶解酶的活性而阻止碳流向异养型土壤食物网,与此同时,却增加了香兰素的同化,从而降低了土壤有机碳的分解速率,导致土壤碳的累积^[17, 33]。以上现象被学者们用来解释氮沉降增加减缓植物凋落物分解原因的一个重要机制,也因此有人认为在温带北方阔叶林里氮沉降的增加有利于提高土壤碳的吸存力^[17-20, 35]。

然而,酶活性对氮沉降的响应因生态系统不同而异,如Waldrop等^[18]在3种北方温带森林(黑橡树/白橡树(BOWO),糖槭/红橡树(SMRO),糖槭/椴木(SMBW))施氮实验1 a后发现,在BOWO生态系统,最高水平的氮沉降趋向于减少石炭酸氧化酶(是一种木质素细胞溶解酶)活性和过氧化酶活性,同时减少了 ^{13}C -香草醛(一种由木质素解聚合作用的单酚产物)和苯磷二酚的降解,相反,在SMRO和SMBW生态系统,氮沉降则趋向于增加石炭酸氧化酶活性和过氧化酶活性,且能增加香草醛和苯磷二酚的降解,但在实验中未发现氮增加对 ^{13}C -纤维二糖(一种由纤维素解聚合作用的二糖产

物)的降解有影响。Deforest等^[17]亦发现了石炭酸氧化酶和过氧化酶的活性因氮沉降增加而减少,如在矿质土层中与对照相比,施氮使 β -Glucosidase(是一种纤维素降解酶)的活性降低24%,在凋落物层中则抑制了石炭酸氧化酶活性达35%,而 ^{13}C -纤维二糖在细菌或真菌的PLFAs中均未发现受氮沉降增加的影响, ^{13}C -香草醛则随氮沉降增加而增加。同时Deforest等^[33]还观察到,在矿质土层中的 β -Glucosidase和凋落物层的酚氧化酶受到明显的抑制,这暗示了长期氮沉降可以通过土壤微生物酶活性来减少木质素和纤维素的降解。Carreiro等^[35]观察到,酶活性强弱随氮增加因凋落物种类不同而异,如对山茱萸凋落物的分解是促进作用,而对橡树凋落物的分解则是抑制作用,对糖槭凋落物的分解没有影响。Frey等^[20]在哈佛森林研究的结果与Magill等^[37]早期的研究结果即凋落物的低分解率与高的木质素含量是一致的,并且暗示了随着氮的增加木质素降解率的抑制作用要大于纤维素降解酶的累积作用。

1.2.2 降低土壤呼吸

土壤呼吸是土壤微生物活性和土壤肥力的一个重要指标。已有研究表明,短期氮沉降对土壤呼吸速率无影响^[38-40],但长期的氮沉降增加则会降低土壤呼吸速率^[29, 41-43]。Bowden等^[29]在哈佛森林长期的施氮研究样地里还详细研究了施氮时间与土壤呼吸的关系,他发现在阔叶林施氮第1年土壤呼吸率有所提高(对照 $\text{C } 482.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,高氮 $\text{C } 596.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),第2年施氮样地的呼吸率则与对照样地并无不同;在松林里施氮第1年土壤呼吸速率在低氮和高氮样地分别比对照(对照 $\text{C } 482.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)降低21%和25%,第2年减少得更多第13年两样地则均降低了41%。Patricia等^[44]发现,在哈佛森林长期施 NH_4NO_3 ($\text{N } 15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)实验中发现松林中高氮处理的土壤呼吸率在施氮第1年、第2年和第13年明显受到抑制,而在阔叶林样地,氮处理则在第1年增加了土壤呼吸率,而高氮和对照样地的土壤呼吸率在第2年、第5年和第13年则没有差别。此外,还有研究显示森林土壤总氮矿化率和净氮固定率与土壤呼吸速率具有显著正相关关系^[30, 45, 46]。

1.2.3 改变土壤微生物对底物的利用模式

微生物对底物的利用模式直接影响到土壤营养循环。目前研究发现氮沉降增加能改变土壤微生物对底物的利用模式。Deforest等^[33]在北方硬叶阔叶林的氮沉降样地中研究发现,长期高氮沉降可以改变凋落物的生产力和生物化学组成,并且同时改变异养型微生物群落的底物有效性。因为纤维素是最普通的由植物产生的有机底物,如果这种底物的

新陈代谢能力受到抑制将通过减少来自纤维素降解酶活性的酶的能量而逐渐的影响剩余的土壤食物网。Compton等^[19]在哈佛森林的长期氮输入的实验中发现,在松林的施氮处理样地中对含氮底物的利用率要低于对照处理样地,这也暗示了氮的增加可以减少松林中微生物的潜在活性,而在阔叶林中对底物利用率与氮的增加的影响并不一致,且高于松林,首批数据暗示了微生物对含氮底物的利用率比松林中的氮处理样地要低,且显示了底物利用率与阔叶林中的氮增加没有强烈响应。而Johnson等^[31]在欧石南丛生的荒地中则发现,氮增加造成了微生物对底物碳和氮的利用率提高了3倍,对底物磷的利用率则因施氮水平的不同而异,在 $\text{N } 8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 处理中增加10倍,在 $\text{N } 12 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 处理中增加18倍。但在酸性的草地中则相反,土壤微生物对氮增加的响应表现为降低对碳源的利用率。后来,Frey等^[20]在哈佛森林的研究里发现,松林中土壤微生物对含氮底物的利用率在高氮样地低于对照样地,即氮沉降的增加降低了对底物氮的利用率。然而,并非所有森林类型均表现以上现象,Frey等^[20]在同样的研究里发现,阔叶林和混交林土壤微生物对底物的利用率与氮增加并没有明显的关系,因此需要进一步的深入研究。

2 土壤微生物对过量氮沉降的响应机制

微生物对氮沉降响应的具体机理正在研究中,目前学者普遍认为,氮沉降增加给微生物带来的影响与植物生产力和碳的供应相关。在施氮早期,植物生物量及凋落物量是随氮沉降增加呈增加趋势,然而之后却处于下降变化,当然这些变化与开始时样地的氮受限状态有关。一旦氮过量,随着氮沉降的增加,供应给土壤微生物的有机质开始减少,同时这些有机质的碳氮比也随之下降,此时碳供应可能成为微生物生长的限制因素^[47]。Bowden等^[29]在长期施氮样地的研究中观察到,由于土壤微生物不断得到来自于地表凋落物和地面木材碳的补充,从而促进了其自养呼吸,增加的土壤呼吸与地面木材和凋落物生物量的增加存在显著的正相关关系。Waldrop等^[17]在北方森林生态系统的研究中观察到,随着氮沉降的增加,土壤微生物量和微生物呼吸的变化与土壤碳含量的改变十分吻合。

微生物群落的改变可能由于酶生产力和有机物的分解效率不同造成。目前大多数研究发现,氧化酶的活性和木质素降解对氮沉降的响应主要来自白腐真菌的研究,然而,白腐真菌并不是唯一有氧化酶活性的有机体,其它的有机体也许响应不一致,如有些软的腐生菌*Aspergillus wentii*在氮增加时木质素降解速度反而加快^[48]。Carreiro等^[35]观察到,

橡树凋落物分解率和氧化酶活性随氮增加而下降,随之带来土壤真菌生物量和微生物量减少,真菌/细菌生物量比率减少降低,从而导致整个微生物群落发生改变,但山茱萸凋落物分解率和氧化酶活性则随氮增加而增加。因此,白腐真菌对氮沉降增加的负响应使凋落物分解受到抑制,然而凋落物循环周期快慢可能促进了不同的真菌群落的产生^[48, 49]。

微生物群落的改变还可能是由于土壤pH值的减少造成,因为氮增加间接降低了土壤pH值(见下继续讨论)。Smolaner等^[50]认为,施氮后尽管土壤有机质有所增加,但不易被土壤微生物分解利用,且土壤pH值下降,因而影响了微生物量的形成或导致微生物群落结构的改变。Aerts等^[51]在哈佛森林的研究中发现,阔叶林和松林土壤pH值与土壤微生物活性均呈正相关。此外,氮增加间接改变了土壤碱基阳离子和有毒金属的有效性,这可能也是微生物群落的改变的重要原因^[19, 52]。

然而,氮沉降对微生物的影响的机制是复杂的,是生态系统的一个自我调节的一个过程,目前有限的研究对过量氮沉降改变土壤微生物群落结构组成的原因还没法进行很好的解释,需要更多的研究验证和发现。

3 问题与展望

虽然过量氮沉降对森林生态系统功能和结构会产生负影响这一事实已被大多数学者接受,但是氮沉降对土壤微生物的影响研究起步较晚,目前的研究还存在很大的局限性,很多问题仍未解决。

3.1 现研究结果的地域性和局限性

目前为止,氮沉降对土壤微生物的影响的研究几乎仅集中在欧洲和北美森林,而且多数以针叶林为研究对象,其结果具有一定的地域性和局限性,热带亚热带地区森林类型比较复杂,森林的氮状况也各不相同,那么在亚热带、热带地区的各种森林类型的土壤微生物对氮沉降的响应又是如何?

3.2 应加强从生理学特征上去研究

大多数学者对氮沉降对微生物的影响的研究是通过提出假想,进而对假想进行大量的实验证明其假想的准确性。如温带森林生产力一般受氮限制,这意味着增加大气氮沉降将会提高生态系统的碳储量,而高无机氮将通过抑制白腐担子菌的活性而降低对木质素的氧化作用,从而增强纤维素的水解作用,因此,学者们假设氮沉降将在某些方面改变微生物分解,而这种改变的方式将会与酶活性的变化及真菌的分解能力一致。亦有学者假设长期氮沉降将通过抑制氧化酶及木质纤维素解聚作用来减少碳流向异养型土壤食物网^[17]。大量实验证明这种假想是成立的。因此,在未来的研究方向里,

应加强在该方面的探讨,尤其是在生理学特征上去把握,提出假想,通过实验去验证其正确性。

3.3 不同微生物对氮沉降增加的响应状况不相同

不同的微生物对氮沉降增加的响应状况亦不相同,因此在氮沉降增加的过程当中出现了部分喜氮物种,部分厌氮物种^[19, 21],同时也会出现不受氮因子影响的抗污染物种,这些物种将有利于指示氮污染的状况,及时了解发现这些物种将有助于我们更好的探讨氮沉降对微生物的影响机制。这也是未来我们的研究方向之一。

3.4 氮沉降条件下土壤微生物对生态系统的影响

有研究表明土壤微生物群落多样性与植物群落多样性呈正相关,土壤微生物与碳氮循环有着密切的关系,因此在氮沉降条件下微生物对生态系统存在两方面的影响。有研究表明,白腐菌与软腐菌数量的变化可能是在大气氮沉降条件下生态系统物种对土壤碳循环影响的主要原因,但仍须从更多的生理学特征上去把握及量化。此外,有学者通过跟踪¹³C流向,其一部分通过微生物群落变成土壤有机碳(SOC),一部分为可溶性有机碳(DOC),一部分为微生物呼吸,但是并没有直接证据显示腐殖质层中SOC的提高。未来要加强测定氮沉降是否改变了SOC的生化机能^[17]。

3.5 森林氮饱和的临界负荷

在NITREX项目中研究得出 $N\ 10\ kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 代表了欧洲森林氮饱和的临界负荷的最小值^[1],那么在热带亚热带森林里,或者其它营养受限的森林里,其临界负荷是多少呢?成熟林与幼林的临界负荷也是有所差别的,究竟大量的氮输入才是对森林起促进作用呢?为评价森林健康提供可靠依据,这些问题值得进一步的研究。

3.6 研究技术方面

在研究技术方面,目前的研究水平要量化以上提出的指标可能还存在一些困难,比如传统的稀释平板法等,都只能反映土壤中部分微生物的影响。随着分子生物技术的发展,越来越多的分子生物技术(如PCR(基础分子鉴定方法)技术、PCR-RFLP(聚合酶链反应-限制片段长度多态型分析)和PCR-RAPD(随机片段长度多态性)等^[54])应用于土壤微生物结构组成和多样性以及土壤酶活性的研究,这样测得的结果更为可靠同时也给我们的研究带来了新的希望。

参考文献:

- [1] WRGHT R F, ROFLOFS J G M, BREDEMEIER M, *et al.* NITREX: responses of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen [J]. *Forest Ecology and Management*, 1995, 71: 163 - 169.

- [2] KAZDA M. Indications of unbalanced nitrogen of Norway spruce status [J]. *Plant and Soil*, 1990, 128: 97 - 101.
- [3] LOVETT G, REINERS W A, OLSEN R K. Cloud droplet deposition in subalpine balsam fir forests: Hydrological and chemical inputs[J]. *Science*, 1982, 218: 1303 - 1304.
- [4] PARKER G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle [J]. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13: 57 - 133.
- [5] 孙崇基. 酸雨[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
SUN C J. Acid Rain [M]. Beijing: Press of Environmental Science of China, 2001.
- [6] LOVETT G M, LINDBERG S E. Atmospheric deposition and canopy interactions of nitrogen in forests [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23: 1603 - 1616.
- [7] ULRICH B. The history and possible causes of forest decline in central Europe, with particular attention to the German situation [J]. *Environmental Reviews*, 1995, 3: 262 - 276.
- [8] VITOUSEK P M, ABER J D, HOWARTH R H *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: Source and consequences [J]. *Ecological Applications*, 1997, 7: 737 - 750.
- [9] FENN M E, POTH M A, JOHNSON D W. Evidence for nitrogen saturation in the San Bernardino Mountains in Southern California [J]. *Forest Ecology and Management*, 1996, 82: 211 - 230.
- [10] KAUPPI P E, MIELIKAINEN K, KUUSELA K. Biomass and carbon budget of European forests 1971—1990 [J]. *Science*, 1992, 256: 70 - 74.
- [11] DISE N B, WRIGHT R F. Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition [J]. *Forest Ecology and Management*, 1995, 71: 153 - 161.
- [12] BERENDSE F, AERTS R, BOBBINK R. EDS VOS, OPDAM C C[M]. Chapman Hall, London: *Landscape Ecology of a Stressed Environment*, 1993: 105 - 121.
- [13] GALLOWAY J N, COWLING E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change [J]. *Ambio*, 2002, 31: 64 - 71.
- [14] 薛 花, 莫江明, 李炯, 等. 氮沉降对外生菌根真菌的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(8): 1785 - 1792.
XUE J H, MO J M, LI J, *et al.* Effects of nitrogen deposition on ectomycorrhizal fungi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1785 - 1792.
- [15] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响[J]. *林业科学*, 2001, 37(4): 111 - 116.
XIAO H L. Effects of Atmospheric nitrogen deposition on forest soil acidification [J]. *Scintia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 111 - 116.
- [16] COPLEY J. Ecology goes underground[J]. *Nature*, 2000, 406: 452 - 454 (news feature).
- [17] DEFOREST J L, ZAKA D R, PREGITZER K S, *et al.* Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 965 - 971.
- [18] WALDROP M P, ZAKA D R, SINSABAUGH R L. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 1443 - 1451.
- [19] COMPTON J E, WATRUDA L S, PORTEOUS A L A, *et al.* Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 143 - 158.
- [20] FREY S D, KNOOR 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.
- [21] LILLESKOV E A, FAHEY T J, LOVETT G M. Ectomycorrhizal fungal aboveground community change over an atmospheric nitrogen deposition gradient [J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(2): 397 - 410.
- [22] LILLESKOV E A, FAHEY T J, HORTON T R, *et al.* Belowground ectomycorrhizal fungal community change over a nitrogen deposition gradient in Alaska[J]. *Ecology*, 2002, 83: 104 - 115.
- [23] LILLESKOV E A, HOBBI E A, FAHEY T J. Ectomycorrhizal fungal taxa differing in response to nitrogen deposition also differ in pure culture organic nitrogen use and natural abundance of nitrogen isotopes [J]. *New Phytologist*, 2002, 154: 219 - 231.
- [24] CRAIG L M, DOBBS F C, TIEDJE J M. Phylogenetic diversity of the bacterial community from a microbial mat at an active, Hydrothermal vent system, Loihi Seamount, Hawaii. [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61: 1555 - 1562.
- [25] JOHNSON D W. Nitrogen retention in forest soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21: 1 - 12.
- [26] KEENCY D R. Prediction of soil nitrogen availability in forest ecosystems: A literature review [J]. *Forest Science*, 1980, 26: 159 - 171.
- [27] WALLENSTEIN M D. Effects of nitrogen fertilization on soil microbial communities, *Geophysical Research Abstracts* [J]. *European Geophysical Society*, 2003, 5: 13087.
- [28] WALLENSTEIN M D. Effects of increased nitrogen deposition on forest soil nitrogen cycling and microbial community structure [J]. *Ecosystem Ecology*, 2004.
- [29] BOWDEN R D, DAVIDON E, SAVAGE K, *et al.* Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 43 - 56.
- [30] TIETEMA A. Microbial carbon and nitrogen dynamics in coniferous forest floor material collected along a European nitrogen deposition gradient [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101: 29 - 36.
- [31] 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.
- [32] PAUL J W, BEAUCHAMPE 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.
- [33] DEFOREST J L, ZAK D R, PREGITZER K S, *et al.* Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in Northern Hardwood forests [J]. *Soil Science Society America*, 2004b, 68: 132 - 138.
- [34] BOXMAN A W, BLANCK K, BRANDRUD T E, *et al.* Vegetation and soil biota response to experimentally changed nitrogen inputs in coniferous forest ecosystems of the NITREX project [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101: 65 - 79.
- [35] CARREIRO M M, SINSABAUGH R L, REPERT D A, *et al.* Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition [J]. *Ecology*, 2000, 81(9): 2359 - 2365.
- [36] BERG B. Nutrient release from litter and humus in coniferous forest soils a mini review [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1986, 1: 359 - 369.
- [37] MAGILL A H, ABER J D. Long term effects of experimental nitrogen addition on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems [J]. *Plant Soil*, 1998, 203: 301 - 311.
- [38] FESSENDEN R J, CALVERT R F, ARMSON K A. Effect of some fertilizers and simazine on the activity of the microorganisms in jack

- pine humus[J]. Forest Chronicle, 1971, 47: 227 - 288.
- [39] FLANAGAN P W, Van C K. Nutrient cycling in relation to decomposition and organic-matter quality in taiga ecosystems [J]. Forest Research, 1983, 13(5): 795 - 817.
- [40] SALONIUS P O. Microbiological response to fertilizer treatments in organic forest soils [J]. Soil Science, 1972.
- [41] BÅÅTH E, Lundgren B, SÖDERSTRÖM B. Effects of nitrogen fertilization on the activity and biomass of fungi and bacteria in a podzolic soil[J]. Z. Bakteriell. Mikrobiol. Hyg. I Abt Orig. C, 1981, 2: 90 - 98.
- [42] NOHRSTEDT H Ö, ARNEBRANT K, BÅÅTH E, *et al.* Change in carbon content, respiration rate, ATP content, and microbial biomass in nitrogen fertilized pine forest soils in Sweden [J]. Forest Research, 1989, 19(3): 323 - 328.
- [43] SÖDERSTRÖM B, BÅÅTH E, LUNDGREN B. Decrease in soil microbial activity and biomasses owing to nitrogen amendments [J]. Microbiol, 1983, 29: 1500 - 1506.
- [44] PATRICIA M, ABER J D, BOONE R D, *et al.* Short term soil respiration and nitrogen immobilization response to nitrogen applications in control and nitrogen enriched temperate forests [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 196: 57 - 70.
- [45] HART S C, NASON G E, MYROLD D D, *et al.* Dynamics of gross nitrogen transformations in an old growth forest: the carbon connection [J]. Ecology, 1994, 75(4): 880 - 891.
- [46] SCHIMEL D S. Carbon and nitrogen turnover in adjacent grassland and cropland ecosystem [J]. Biogeochemistry, 1986, 2: 345 - 357.
- [47] WILLIAMS B L, SILCOCK D J. Nutrient and microbial changes in the peat profile beneath *Sphagnum magellanicum* in response to additions of ammonium nitrate[J]. Applied Ecology, 1997, 34: 961 - 970.
- [48] FOG K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter[J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 1988, 63: 433 - 462.
- [49] WALDROP M P, ZAK D R, SINSABAUGH R L, *et al.* Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity [J]. Ecological Applications, 2004, 14(4): 1172 - 1177.
- [50] SMOLANDER A, KURKA A, KITUNEN V, *et al.* Microbiomass C and N and respiratory activity in soil of repeatedly limed and N and P fertilized Norway Spruce stands [J]. Soil biology and biochemistry, 1994, 26:957 - 962.
- [51] AERTS R C, DE CALUWE H. Nitrogen deposition effects on carbon dioxide and methane emissions from temperate peatland soils [J]. Oikos, 1999, 84: 44 - 54.
- [52] WALLANDER H. A new hypothesis to explain allocation of dry matter between mycorrhizal fungi and pine seedlings in relation to nutrient supply [J]. Plant and Soil, 1995, 169: 243 - 248.
- [53] SINSABAUGH R L, CARREIRO M M, REPERT D A. Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter composition, N deposition, and mass [J]. Biogeochemistry, 2002, 60: 1 - 24.
- [54] 于富强, 刘培贵. 外生菌根真菌研究及应用的回顾与展望 [J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2217 - 2226.
- YU F Q, LIU P G. Reviews and prospects of the ectomycorrhizal research and application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(12):2217 - 2226.

Effects of nitrogen deposition on soil microorganism

XUE Jing-hua, MO Jiang-ming*, LI Jiong, WANG Hui

South China Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing, Guangdong 526070, China

Abstract: As a result of increasing anthropogenic nitrogen deposition, N availability in many forest ecosystems, which are normally N-limited, has been enhanced. Yet, little is known about the effects of nitrogen deposition on microbial activity and community composition. Increased N availability may impact the soil microorganism that are generally regarded as an adaptation to nutrient limited conditions. Based on available scientific knowledge the effects of nitrogen deposition on soil microorganism, including the change of soil microbial community structure and function are reviewed in this paper. The potential impacts were related to the following two aspects. Elevated nitrogen deposition would affect the soil microbial community structure, such as decreased soil microbial biomass, $w(C)/w(N)$, fungi abundance, fungi/bacteria, and lead to the change of the function of soil microorganism, for example the reduction of soil respiration, extracellular enzymatic activity, and altered the pattern of microbial substrate use. Moreover, the future research work and new method about the nitrogen deposition and soil microorganism is also discussed in this paper.

Key words: nitrogen deposition; soil microorganism; effect; mechanism