

氮沉降对森林土壤碳收支机制的影响

王汝南, 蔺兆兰, 王春梅*

北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083

摘要: 森林土壤储存着全球陆地生态系统大约45%的碳, 在维持全球碳平衡方面具有重要的作用。不断加剧的全球氮沉降对森林生态系统碳循环和碳吸存产生了深刻的影响, 进而改变了森林生态系统的生产力和生物量积累。本文以欧洲和北美温带地区开展的有关氮沉降对森林生态系统影响的研究为基础, 提炼出最可能决定加氮影响碳输入、输出效应方向和大小的因素: 凋落物分解、细根周转、外生菌根真菌、土壤呼吸及可溶性有机碳淋失, 并探讨了森林生态系统碳动态对氮沉降响应的不确定性。陆地生态系统碳氮循环密切相关, 由于氮循环的复杂性, 尽管以往碳循环研究都考虑了氮对碳循环的限制作用, 但在碳氮循环耦合机理方面的研究还比较少见。在未来研究中, 应通过探寻森林土壤碳氮相互作用特征, 及土壤微生物、土壤酶等与土壤碳氮过程的互动机制, 来增进氮沉降对森林碳储量和碳通量的理解。

关键词: 氮沉降; 森林土壤碳库; 碳收支; 机制; 响应

中图分类号: X144

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2011) 03-0576-07

近几十年来, 由于人类活动诸如人口增长、矿物燃料燃烧、含氮化肥的生产和使用、畜牧业的大规模发展等, 向大气中排放的含氮化合物越来越多, 导致大气氮沉降成比例增加^[1]。据报道, 欧洲和北美大部分国家的大气氮沉降量比工业革命前至少增加了3~10倍^[2]。如欧洲工业发达地区氮沉降量超过了25 kg·hm⁻²·a⁻¹ (以N计)^[3], 在北美, 某些森林地区大气氮沉降量也达到了40 kg·hm⁻²·a⁻¹ (以N计)^[4]。并且, 随着经济发展的全球化, 氮沉降问题也呈现出全球化趋势。目前, 我国已成为继欧、美之后的第三大氮沉降集中区之一^[5]。从1961年至2000年, 我国活性氮的排放从1.4×10⁷ t·a⁻¹升至6.8×10⁷ t·a⁻¹, 预计在2030年将上升至1.05×10⁸ t·a⁻¹^[6], 而且, 随着社会经济的进一步发展, 氮沉降量可能会继续增加, 预计2050年将会达到195 Tg·a⁻¹^[7]。过量的大气氮沉降已经严重威胁到生态系统的功能和结构, 研究结果显示: 大气氮沉降的显著增加会引起陆地生态系统生物地球化学循环的诸多变化^[8], 包括改变生物多样性、影响生态系统的初级生产力及养分平衡^[9]、诱导养分缺乏, 导致必须养分淋溶等^[7]。

从20世纪80年代末开始, 欧洲和北美的生态学家就已经开展了一些关于氮沉降对森林生态系统结构和功能影响的研究^[10]。而我国关于氮沉降增加对森林生态系统的影响研究还处于刚起步阶段, 虽然近年来在森林碳、氮循环领域开展了大量研究, 但已有研究结果未能明确表明氮沉降对碳循环过程的确切影响及其影响效应的方向及大小。本文从森林土壤碳输入、输出角度综述了氮沉降对凋落物分解、细根周转、外生菌根真菌生产力、土壤呼吸、土壤可溶性有机碳淋失5个过程的影响特征及其作用机制, 以明确加氮对碳循

环的影响机理, 希望对该领域的进一步研究有所帮助。

1 氮沉降对森林生态系统土壤碳库的影响

土壤是陆地生态系统的最主要碳储量载体, 全球大约75%的陆地碳存储在土壤中^[11]。森林作为陆地生态系统的主体, 其碳储量约为陆地土壤的45%^[12]。森林生态系统每年固定的碳约占整个陆地生态系统的2/3^[13]。森林生态系统直接影响着陆地碳储量和大气CO₂浓度, 是碳源与碳汇研究的重要组成部分^[14]。影响森林生态系统土壤碳库的因素很多, 其中氮素作为植物生长所必须的大量元素之一, 已经逐渐引起广泛关注。截至目前, 由人为因素引起的氮输入已成为生态系统中氮元素的重要来源^[12]。已有研究表明, 经由大气沉降进入到森林生态系统中的外源氮只有少部分被植物利用, 而绝大部分均被固定在土壤中^[15], 这部分氮素主要以NH₄⁺、NO₃⁻等形式存在, 极易被土壤微生物利用或者与土壤有机物及盐基离子相结合, 直接或间接影响土壤碳的输入及输出, 极大地干预了森林生态系统碳循环和碳累积过程^[16]。Nadelhoffer等^[17]对北半球温带森林施肥后, 发现氮素输入使土壤碳储存大约每年增加0.3~0.5 Pg。Spinnler等^[18]在模拟森林土壤碳库对不同氮沉降水平的响应实验中, 发现氮沉降延缓了土壤腐殖质的分解速度, 进而提高了碳储量。Karjalainen等^[19]在排除气候变化, 只考虑氮沉降的情况下, 发现森林生态系统土壤碳储量与对照相比增加了11%。然而也有一些研究表明, 氮输入对生态系统碳储存没有明显的促进作用, 相反, 会一定程度上减少生态系统碳储量^[20-21]。由于土壤碳动态对氮输入的响应存在很大的不确定性, 所以传统方法(计算碳流失率、CO₂通量等)难以检测到其中微妙的变化。而且目前氮对土壤碳库的影响机理

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (200-1240991); 国家自然科学基金项目 (30600090)

作者简介: 王汝南(1986年生), 女, 主要研究全球气候变化和碳循环。E-mail: ludongling123@126.com

*通讯作者: 王春梅。E-mail: sdwcm@126.com

收稿日期: 2011-01-28

还不是很明确, 故其研究结果还有待于进一步确认。

2 氮沉降对土壤碳库中碳输入的影响

2.1 对凋落物分解的影响

森林凋落物是指森林生态系统内由生物组分产生并归还到林地表面的有机物质的总称。它在维持森林生态系统的能量流动和物质循环、森林资源的利用、涵养水源等方面都具有重要作用。在陆地生态系统中, 90%以上的地上部分净生产量通过凋落物的方式返回地表^[22], 因此, 凋落物贮存和分解是森林生态系统养分循环过程中的一个重要环节。凋落物的生产与分解及其相关过程变化直接影响着陆地碳储量和大气二氧化碳浓度, 与全球碳循环和全球气候变化密切相关^[23]。森林凋落物分解包括水溶性化合物的淋溶、土壤动物对凋落物的破碎、由微生物进行的物质转换以及有机物和矿质化合向土壤转化等过程, 其分解的快慢程度则取决于这些过程的综合作用^[22]。大气氮沉降是全球变化的重要现象之一, 已经对全球多种生态系统产生了严重的影响, 同时也影响着凋落物的分解过程^[23]。一方面, 过量的氮沉降改变了森林生态系统的结构和功能, 使其外部环境发生变化, 进而影响了凋落物自身的理化性质, 以至于间接影响森林凋落物的分解。Carreiro等^[24]对阔叶林采用高、低氮处理后, 发现氮沉降对凋落物分解的影响与其自身的理化性质密切相关, 其分解率主要由凋落物自身的木质素和纤维素含量决定。Downs等^[25]在施氮后阔叶林和杉木凋落物分解的对比研究中, 也认为凋落物最初的理化性质在其分解过程中发挥着不容小觑的作用。另一方面, 凋落物分解过程中外源性氮的输入, 直接影响着凋落物分解的化学过程, 同时也改变了凋落物的分解速率^[26]。Berg等^[27]发现, 在受氮限制的生态系统中施加氮会降低木质素降解酶的活性, 从而使高木质素含量的凋落物对氮沉降的负响应更强烈。

目前, 国内外学者关于外源性氮输入对森林凋落物分解的影响仍然存在很大分歧, 而且对影响机理的认识也不尽相同。大量研究表明外源性氮输入对凋落物分解具有促进作用、抑制作用、或者无明显影响^[24]。

2.1.1 对凋落物分解的促进作用

Melillo等^[28]研究发现, 在凋落物分解初期, 有效性氮的输入能够加速其分解。他们认为, 在分解的初始阶段, 参与分解作用的主要是一些水溶性化合物和易分解的非木质性纤维素, 而氮元素的输入则可以刺激分解作用。Vestgarden^[29]的研究结果也表明凋落物本身含氮量高或者外加氮对凋落物的分解都能够起到促进作用。Magill等^[30]在美国马萨诸塞州Harvard Forest长期模拟氮沉降的试验中, 观察到在较高的外源氮输入情况下, 针叶和阔叶树种的凋落物分解率显著提高。莫江明等^[31]在鼎湖山森林(季风常绿阔叶林、混交林和马尾松林)主要植物凋落物分解及其对模拟氮沉降的响应研究中, 发现在马尾松林中, 氮沉降仅

在试验开始后3个月对马尾松针叶凋落物分解有明显的促进作用($P<0.05$), 其原因可能为马尾松针叶凋落物氮含量较低, 外源氮一定程度上提高了凋落物可利用的氮素水平, 从而加速了其分解。在混交林中, 经过6个月实验后, 中氮($10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)处理则明显地促进了马尾松针叶凋落物的分解($P<0.05$), 这可能与混交林土壤氮素供应能力较高有关。樊后保等^[32]通过野外模拟氮沉降试验后, 得出低氮($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、中氮($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)两种处理方式对凋落物的分解都存在促进作用。外加氮素提高了土壤肥力, 满足了参与分解的微生物对氮素的需求, 进而加快凋落物分解。

2.1.2 对凋落物分解的抑制作用

Keyser等^[33]认为, 在凋落物分解的后期, 较难分解的木质素含量会逐渐增多, 而氮元素的输入会降低木质素分解酶的活性, 从而抑制了凋落物的分解。Magill和Aber^[34]对长期处于不同氮沉降梯度下的红松和阔叶混交林树种凋落物分解的试验表明, 凋落物的分解率随着氮沉降的增加而降低。Micks^[35]在Harvard Forest的研究表明, 在凋落物分解的最初2 a, 外加氮对凋落物的分解没有明显影响, 但是在3 a或4 a后, 氮沉降在一定程度上抑制了凋落物的分解, 与Ågren和Bosatta等^[36]的结论一致。徐国良等人在研究南亚热带3种森林生态系统(季风常绿阔叶林、混交林和马尾松林)凋落物在氮沉降下的分解动态时发现, 氮沉降处理对季风林凋落物的分解表现出了一定的抑制作用, 其原因可能为季风林内土壤肥力状况良好, 有效氮含量较高, 已使季风林土壤中的氮素趋于饱和, 在这种情况下, 外源性氮的输入打破了系统内原有的元素平衡状态, 干扰了参与凋落物分解的微生物的生命活动, 既而对凋落物的分解产生不利影响^[37]。樊后保等^[32]在杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应研究中发现, 高氮($240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)处理对凋落物的分解存在着一定的抑制作用。其根本原因是高氮输入会对土壤微生物的群落组成及其活性产生影响, 以至于对凋落物的分解产生负面影响。

2.1.3 对凋落物分解无影响

Prescott^[20]发现外加氮对于氮含量在0.33%~1.56%范围内的凋落物分解速率没有显著影响^[35]。廖利平等对杉木(*Cunninghamia Lanceolata*)针叶凋落物分解的研究表明氮的可利用性加大未必一定促进其分解, 氮的形态也是不可忽视的因素之一。莫江明等^[31]在研究亚热带森林凋落物分解对N沉降的响应时发现, 在混交林中, 6个月的低N($10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)处理对马尾松凋落物的分解无明显作用。这可能与马尾松林土壤中氮的累积量有关, 氮沉降累积到一定程度后, 使氮素不再成为主要的限制因素, 那么其他因素就可能上升为限制性因素。

综上所述, 不同气候条件或不同的分解阶段, 凋落物分解的主导因子可能不同。环境因子、凋落物性

质、分解者群落组成与结构是影响森林凋落物分解的主要因素。已有的研究表明,氮沉降对凋落物的分解具有促进、抑制和无影响3种作用。不同的试验方法和研究对象所得的结论不尽相同。许多研究证实了适度的氮沉降对凋落物分解会起到促进作用,对于氮素匮乏的凋落物与环境来说,在分解的早期阶段,氮输入往往表现为促进作用,而在后期常表现为抑制作用;如果凋落物或其所处外部环境中氮含量比较丰富,则氮沉降可能对凋落物分解无实质性影响。此外,氮沉降对凋落物的分解可能同时存在促进和抑制作用。氮输入在一定程度上增加了凋落物可利用的氮素,满足了微生物的生长需求,加快了凋落物的分解;但是,在凋落物分解过程中,外加氮可能与某些物质作用,生成难降解的复合物,降低了微生物活性,甚至改变了微生物群落组成,进而延缓了凋落物的分解,其结果则体现了促进和抑制这两个过程的相对强弱。

2.2 对细根周转过程的影响

根系在土壤碳库的存储和周转中具有重要作用。细根一般指直径小于2 mm的根,虽然仅占根系总生物量的3%~30%^[38],但是生理活性很强,是树木水分和养分吸收的主要器官,对森林生态系统净初级生产力贡献巨大,是林木重要养分的“源”和光合产物的“汇”^[39],在陆地生态系统碳分配格局和养分循环中起着关键作用。细根周转是土壤碳库的主要来源之一,氮沉降可以通过改变细根化学成分、生长量和周转速度来影响细根周转^[2]。在全球氮沉降持续增加的背景下,各生态系统细根对氮沉降的响应存在很大的不确定性^[40]。

贾淑霞等人对中国东北落叶松和水曲柳人工林研究表明,氮素输入导致两种林分活细根生物量分别降低了18.4%和27.4%,死细根生物量分别降低了34.8%和127.4%^[41],其原因可能为虽然表层土壤氮有效性提高,但在贫瘠的深层,细根可吸收的氮素很少,碳投入比例很低,水分相对过多,从而导致细根死亡增加以及活细根显著减少。Persson等^[42]在欧洲和北美森林生态系统模拟氮沉降对细根生长特性的影响后,得出氮饱和必将导致细根生物量下降,他们认为当土壤养分充足时,再增加肥力,光和产物会减少向根系的分配,导致细根生物量下降。Majdi^[43]用传统的生物量连续取样法研究细根后,认为细根生长量和生物量随氮输入量升高而增加,其可能原因为长期施肥后,土壤表层的养分充足,淋溶到亚表层的养分随之增加,有利于亚表层细根的生长,进而促进了细根生物量的增加。但Gower^[44]用同样的方法却得出了相反的结论,他认为外源氮的输入反而降低了细根的生物量,与C. Jourdan^[45]的结论一致,研究表明,当土壤有效氮提高后,细根呼吸作用增强,分配到根系的C主要用于维持氮的吸收和同化,而并非用于新根的生长,所以细根的生物量下降。Pregitzer等^[46]利用

生物量法研究发现,外源氮输入会对细根的周转产生负作用。随着氮有效性的增加,细根的结构和形态可能发生变化,例如细根的直径、比根长增加,导致细根寿命延长等。Nadelhoffer^[47]应用碳氮平衡法研究细根周转速度后,发现虽然外源氮输入降低了土壤中现存的细根生物量,却明显提高了细根总生长量,从而加快了细根的周转速度, Farrar^[48]认为土壤氮有效性提高后,叶面积增大,光和产物增加,分配到根部的碳增多,促进了细根的生长,同时,由于细根组织氮含量增加,根系呼吸强度增大,导致氮的吸收效率下降,植物可能通过缩短细根寿命来保证吸收效率并降低呼吸消耗,导致周转加快。

细根周转与氮素有效性之间存在着较强的相关性,影响生态系统氮循环的因子可解释75%的细根周转变化^[49]。细根生命周期与土壤氮素有效性可能呈正相关,也可能呈负相关。目前,关于氮素对细根的影响主要有两种不同的结论:一是氮输入会促进细根呼吸,如果细根分配到的能量不足以弥补呼吸消耗,那么细根的死亡率将提高,细根周转加快;二是随着氮有效性的提高,细根吸收效率提高,成为一个较强的碳汇,由于有足够的碳维持细根的生命,所以细根周转率下降。这主要取决于植物的种类、器官、氮素在土壤的空间分布以及植物体内的养分平衡等^[50]。除氮素有效性之外,影响细根周转的因素还包括细根形态、土壤水分、温度、碳分配等。

2.3 对外生菌根真菌的影响

外生菌根是土壤真菌(主要为担子菌和子囊菌)与植物根部形成的特殊共生体。外生菌根真菌(EMF)是由真菌菌丝紧密地包围植物的吸收根而形成的致密的鞘套,并在其上长出菌丝,取代植物的根毛,同时部分侵入根的外皮层细胞间隙而形成的特殊的哈氏网(Hartig network)^[51]。在植物根系生长过程中,菌根真菌是根际微生物区系中最早出现的前导微生物^[52],菌根侵染植物根系的能力可以反映出植物根系利用营养的状况,在帮助根系吸收养分和水分方面具有重要作用。

Ruhling^[53]在欧洲的研究表明,过量的大气氮沉降会通过减少真菌菌丝、降低子实体生产力来减弱外生菌根真菌的生产力。Wallander^[54]认为低氮处理可以迅速提高根外菌丝生物量,而高氮处理则明显抑制了菌丝的生长。Arnebrant^[55]在樟子松的模拟氮沉降试验中也得出了相似的结果。由于外源性氮的输入,菌丝体生长量减少,进而影响到外生菌根真菌侵染植物根部的潜在能力。Hutchinson等^[56]对松林施肥后,认为随着氮素的施加,植物的根系和菌根的生长均受到抑制,氮输入削弱了植物根系对营养物质的摄取能力。Lena等^[57]研究得出,在一年半内当施用硝酸铵达35 kg·hm⁻²·a⁻¹时,外生菌根真菌的子实体产量明显减少。Arnolds^[58]在瑞典水青冈森林模拟氮沉降的实验表明,

连续3年施用氮肥几乎导致了所有的外生菌根真菌停止生产子实体。在成熟樟子松样地里, 调查研究也发现, 氮输入与外生菌根真菌子实体的数量变化成负相关^[59]。但并非所有研究均表现一致的结果。TorErik等在瑞典的Gardsjn森林研究发现, 氮增加导致NITREX样地大部分物种的子实体生产力大幅下降, 但管形鸡油菌的子实体在处理后生产力反而提高^[60]。Fahey等^[61]在研究外生菌根真菌对氮沉降的响应后也发现, 在高氮处理的样地中, 子实体数量并未发生明显变化或仅部分微量增加。由此可见, 过量氮沉降会导致外生菌根真菌子实体生产力下降, 但并非全然。

3 氮沉降对土壤碳库中碳支出的影响

3.1 对土壤呼吸的影响

土壤呼吸是土壤碳库中碳的重要输出途径之一, 主要包括3个生物学过程(根系呼吸、土壤微生物呼吸以及土壤动物呼吸)和含碳物质的化学氧化这一非生物学过程^[62]。外源性氮输入对土壤呼吸可能有促进作用、抑制作用或者无明显影响^[63]。Richard等^[64]在Harvard温带森林模拟的氮沉降试验表明, 在试验开始的第1年, 随着氮素的加入阔叶林的土壤呼吸速率增加, 其可能原因为施氮初期根系生物量和氮浓度增加使得林分生产力提高, 但也可能与根系微生物活性增强有关。Pregitzer等^[65]对白杨幼龄林的短期氮沉降模拟研究也发现了类似结果。然而, 在连续13 a的氮素施肥后, 高氮处理的两种林分在生长季土壤呼吸均降低了41%。这说明氮素的过量施加使土壤对施氮响应发生逆转, 根系活性降低, 导致根际沉积的有机物质减少, 进而抑制土壤微生物分解, 因此减少了CO₂的产生量^[64]。Franklin^[66]对一块连续施氮20年的针叶林样地研究后, 得出施氮样地的土壤总呼吸量要比对照样地低40%左右, 并认为当土壤氮含量超过一定程度, 例如达到饱和状态后, 过量的氮沉降就会对土壤呼吸产生相反的作用, 与Maier和Kress^[67]的结论一致。涂利华等在模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林细根特性和土壤呼吸的影响后发现, 氮沉降使细根生物量和代谢强度增加, 并通过增强微生物活性促进了根际土壤呼吸^[40]。Oren^[54]对火炬松人工林土壤呼吸研究后, 认为与林地增加的生物量相比, 土壤呼吸对氮输入的响应并不明显。此外, 土壤呼吸对氮沉降的响应与土壤微生物群落的结构组成也是密不可分的。贾淑霞等^[69]发现, 氮沉降对落叶松和水曲柳的土壤呼吸均表现为抑制, 在生长季中土壤呼吸速率分别下降了30%和24%, 这可能与根系生物量减少以及土壤微生物群落结构发生变化有关。Compton^[70]在Harvard Forest发现长期施加氮素降低了微生物生物量, 使微生物呼吸受到抑制, 与Phillips等^[71]的结果相似。在同一研究地点, Frey等人发现, 阔叶林和针叶林土壤中的活性真菌生物量对氮增加响应明显, 分别比对照样地低27%~61%和42%~69%, 而活性细菌的生物量

变动不大, 施氮明显降低了真菌/细菌的生物量比率, 这种结构变化可能导致抑制酶系统的产生, 在某些方面影响了微生物的分解, 进而影响土壤碳流通^[72]。还有研究指出土壤矿化速率也会影响到CO₂的释放。Berg和Matzner^[73]在森林凋落物和土壤有机质对氮沉降响应的研究中发现, 高氮沉降下的土壤呼吸速率略有升高。氮沉降与土壤呼吸的这种正向作用主要是因为高氮输入改善了凋落物质量, 提高了氮和碳的矿质化速率, 进而增加了土壤CO₂的排放通量。

上述研究结果表明, 氮素输入对森林生态系统土壤呼吸的影响效果是各不相同的, 土壤呼吸的不同组分对氮输入也有不同的响应, 大气氮沉降对土壤呼吸的影响机理较为复杂。目前, 关于氮素增加对于土壤呼吸的影响还没有一致的结论。大部分研究证明了氮素增加对土壤呼吸有抑制作用, 然而也有研究显示氮沉降促进了土壤呼吸或对土壤呼吸没有明显影响。森林土壤呼吸在全球碳循环中具有重要作用, 即使土壤呼吸速率发生微小变化, 都会对大气CO₂浓度和土壤碳储量产生深远的影响。因此, 更深入、全面地了解氮输入对土壤呼吸的影响机制是十分必要的。

3.2 对土壤可溶性有机碳(DOC)的影响

DOC是土壤微生物可直接利用的有机碳源, 一般认为DOC主要来源于凋落物、腐殖质分解和细根分泌物, 其含量高低是微生物对有机物分解与利用的综合反映^[74], 它对土壤有机碳的周转及碳、氮生物地球化学循环过程都具有重要影响。有研究显示, 土壤DOC动态与新近凋落物和土壤有机物的数量是保持一致的。Gundersen等^[75]对欧洲森林地被物研究后发现, 土壤DOC通量与凋落物数量有关, 认为碳的供应和周转速率是决定地被物层的DOC渗漏量的关键因素。Tipping和Woof^[76]在沼泽地监测实验中发现, 有机质含量相对高的地段DOC浓度较高, DOC渗漏和CO₂矿化与地被物层有机物质数量呈正相关。Currie等^[77]在研究山地森林后, 认为高的凋落物输入或分解速率对于DOC和CO₂通量有决定性作用。Kalbitz^[78]对采伐后的森林短期研究后, 则认为DOC产生可能与凋落物输入质量无关。由于DOC中酸性组分比重很大, 所以对矿物的分化有着显著的促进作用, 在DOC含量丰富时会导致强烈的溶蚀作用。此外, 它对土壤营养元素(如C、N、P)的有效性和流动性、污染物的毒性和迁移特性以及生物活性也有直接的影响^[79]。例如, 它能通过竞争吸附以及与重金属离子形成有机-金属络合物而降低重金属在土壤表面的吸附^[80], 增加土壤中重金属离子的迁移性和植物有效性^[81]。正是由于DOC充当了许多微量有机或无机污染物的主要迁移载体, 诸多难溶污染物, 如重金属和疏水性有机污染物才得以在土壤和水环境中产生明显的迁移或扩散^[79]。目前, 关于氮沉降对土壤中DOC影响的研究在理论和实验结果方面还存在

着争议。氮沉降可能增加、降低或者不影响森林土壤中DOC的产生及淋失。方华军等认为,陆地生态系统碳、氮循环过程是密切相关的,土壤DOC的动态对氮素输入响应明显^[82]。Findlay曾报道,氮沉降可能导致土壤中DOC大量流失^[83]。Pregitzer等^[84]对美国北部阔叶林连续8a施加氮肥后发现,氮输入对土壤中DOC的生产和淋溶有明显的促进作用。Gundersen^[85]在NITREX试验基地的研究表明,氮素可以通过增加土壤腐殖质的稳定性和促进细菌生长来降低土壤中DOC含量。相反,Sinsabaugh等^[86]则认为,氮沉降可能通过抑制土壤中木质素的分解来增加土壤中DOC的含量。而McDowell^[87]在美国Harvard Forest模拟氮沉降试验中得出,土壤DOC浓度并没有随着氮素输入而发生变化。Bergkvist等^[88]在瑞典西南部,对经过8~29 a施加氮肥的样地上采集的土壤进行分析后,发现氮输入并未影响土壤溶液中DOC的含量。

4 结论与展望

综上所述,氮沉降对于森林生态系统土壤碳库的影响是一个复杂而综合的过程。近年来国内已初步开展了氮输入对典型生态系统碳动态影响的相关研究,但是与欧洲和北美开展的一系列长期氮沉降模拟试验相比,总体上研究还很零散、不够全面。综合已有的研究成果,氮沉降对土壤碳库的研究在理论和技术方面都还存在一定的不足。过去的大部分结论都是在单因素实验中得出的,仅涉及到影响土壤碳库的某个过程或某几个过程,具有一定的局限性,不能够准确的描述氮沉降下土壤碳库变化的真实过程。此外,不同的森林生态系统下,土壤碳动态对氮输入的响应存在很大的不确定性,而从系统角度对氮沉降引起的各个碳组分之间的转化以及碳、氮耦合模式的研究都还处于探索阶段。综合分析还存在以下问题有待于进一步研究:

首先,凋落物分解是一个复杂而缓慢的过程,氮沉降不仅能够直接影响凋落物分解,还可以通过土壤、气候、林木生长等与凋落物分解密切相关的因素来间接影响。目前有关氮沉降对凋落物分解的研究大部分集中在欧洲和北美经济发达地区,而且以针叶林为主,不具有普遍的代表性。我国森林类型多样,凋落物种类丰富,不同地区森林氮素状况及限制因子可能不同。因此,开展不同地区、不同林型氮沉降对凋落物分解的影响研究是十分必要的。此外,氮沉降对凋落物分解的影响是一个长期的过程,而且牵涉到很多方面。例如,可以通过干扰植物生长来间接影响凋落量,或在凋落物分解过程中,影响土壤微生物、凋落物自身化学组成以及相关酶的活性等。所以,在氮输入对凋落物分解过程的影响机理方面还需要进一步深入探索。

其次,细根周转会影响森林生态系统碳的分配格局,对生态系统生产力具有重要意义。由于受到理论和研究方法的限制,目前仍无法明确氮沉降对细根周

转过程的影响。到目前为止,虽然研究方法比较多,但各种方法都存在着不同的局限性。例如,目前细根研究中最常用的传统生物量取样法,在统计学上就存在着比较大的缺陷,它可能过高或过低估计细根的生长量;另外,碳氮收支平衡法在氮流失量和细根生长量的计算方面也存在着较大的不确定性,为了准确评价氮沉降对细根周转的影响,应该进一步完善相应的研究方法。此外,在氮沉降条件下,土壤水分对细根生长、周转的重要性也不容小觑。目前国内关于土壤水分、养分及二者的交互作用对森林生态系统细根生长动态和周转的研究还处于起步阶段,因此,为了更好地理解林木细根生长动态以及揭示森林生态系统生产力变化机理,开展不同林木类型的土壤养分、水分及其相互作用的研究是十分必要的。

再次,氮沉降对土壤呼吸的研究牵涉到很多方面。土壤呼吸的不同组分对氮输入有不同的响应,大气氮沉降对土壤呼吸的影响机理也较为复杂。由于氮沉降对土壤呼吸的影响可能存在阶段性,所以准确区分根系自养呼吸、根际微生物呼吸和SOM分解对氮沉降的响应,即将氮沉降对各部分呼吸的影响从其对总呼吸量的影响中分离出来,在土壤呼吸碳输出过程的研究中具有十分重要的意义。由于大气氮沉降输入到森林生态系统中的氮绝大多数保留在土壤中,但是国内外学者关于土壤碳动态对活性氮增加的潜在响应机理还存在较大分歧,土壤呼吸对氮沉降的响应除了与沉降量高低和持续时间有关外,在微生物结构和功能、腐殖质分解及相关酶活性等方面的影响也存在诸多不确定性。所以,要确切地了解森林土壤呼吸对氮沉降响应的内在机理,以便准确估测氮沉降对森林生态系统系统碳储存和碳收支的影响程度。

最后,迄今关于氮沉降对土壤中DOC产生和淋失影响的研究还比较少见,尤其在氮沉降对DOC在土壤中的迁移转化规律和土壤中DOC淋失过程影响方面还比较欠缺。因此,加强大气氮沉降与影响土壤DOC动态及周转的重要环境因子(生物和非生物)关系的综合研究,定量化有机物输入类型、数量、质量与土壤DOC的动态变化关系,并探索活性有机碳源(微生物生物量、根系分泌物、凋落物等)与土壤DOC的互动机制等内容,将是未来森林生态系统土壤碳氮过程研究的重点。

参考文献:

- [1] WRIGHT R F, RASMUSSEN L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101: 1-7.
- [2] HALL S J, MATSON P A. Nutrient status of tropical rain forests influences soil N dynamics after N additions[J]. *Ecological Monographs*, 2003, 73(1): 107-129.
- [3] BINKLEY D, SON Y, VALENTINE D W. Do forest receive occult inputs of nitrogen? [J]. *Ecosystems*, 2000, 3: 21-331.
- [4] 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.
- [5] MO J M, XUE J H, FANG Y T. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China[J]. *Acta*

- Ecologica Sinica, 2004, 24 (7): 1413-1420.
- [6] ZHENG X, FU C, Xu X, et al. The Asian nitrogen case study[J]. Ambio, 2002, 31: 79-87.
- [7] GALLOWAY J N, DENTENER F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: past, present and future[J]. Biogeochemistry, 2004, 70, 153-226.
- [8] 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.
- FAN Houbao, HUANG Yuzi, YUAN Yinghong, et al. Carbon cycling of forest ecosystems in response to global nitrogen deposition: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 2997-3009.
- [9] LI D J, MO J M, FANG Y T, et al. Impact of nitrogen deposition on forest plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [10] 方运霆, 莫江明, PER G. 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): 1524-1531.
- FANG Yunting, MO Jiangming, PER G. Nitrogen transformations in forest soils and its responses to atmospheric nitrogen deposition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1524-1531.
- [11] JILL L, GAYTRI B, TIM R, et al. Spatial and temporal variability in growing season net ecosystem carbon dioxide exchange at a large peatland in Ontario, Canada[J]. Ecosystems, 2003, 6: 353-367.
- [12] 邓小文, 韩士杰. 氮沉降对森林生态系统土壤碳库的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26 (10): 1622-1627.
- DENG Xiaowen, HAN Shijie. Impact of nitrogen deposition on forest soil carbon pool[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(10): 1622-1627.
- [13] KRAMER P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and drymatter production[J]. BioScience, 1981, 31: 29-33.
- [14] 黄玉梓, 樊后保, 李燕燕, 等. 氮沉降对杉木人工林生长及林下植被碳库的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1407-1412.
- HUANG Yuzi, FAN Houbao, LI Yanyan, et al. Effects of nitrogen deposition on tree growth and understory carbon pools in Chinese fir plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1407-1412.
- [15] YANO Y, MCDOWELL W H, ABER J D. Biodegradable dissolved organic carbon in forest soil solution and effects of chronic nitrogen deposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1743-1751.
- [16] MOFFAT A S. Global nitrogen overload problem grows critical[J]. Science, 1998, 279: 988-989.
- [17] NADELHOFFER K J, EMMETT B A, GUNDERSEN P, et al. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests[J]. Nature, 1999, 398: 145-148.
- [18] HAGEDORN F, SPINLERD, SIEGWOLF R. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35: 1683-1692.
- [19] KARIJALAINEN T, PUSSINEN A. Effects of climate change and nitrogen deposition on the carbon sequestration of a forest ecosystem in the boreal zone[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1999, 29: 1490-1501.
- [20] SCHULZE E D. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest[J]. Science, 1989, 244: 776-783.
- [21] WOODWARD F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change[J]. Nature, 1998, 393: 249-252.
- [22] GLADYS L, JEAN-FRANCOIS P, DANIEL I, et al. Leaf decomposition in two semi-evergreen tropical forests: influence of litter quality[J]. Biol-Fertil Soils, 2002, 35: 247-252.
- [23] 方华, 莫江明. 氮沉降对森林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3127-3136.
- FANG Hua, MO Jiangming. Effects of nitrogen deposition on forest litter decomposition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 3127-3136.
- [24] CARREIROM 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.
- [25] DOWNS M R, NADELHOFFER K J, MELILLO J M, et al. Immobilization of a 15-N labeled nitrate addition by decomposing forest litter[J]. Oecologia, 1996, 105: 141-150.
- [26] BERG B, MATZNER E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 5: 1-25.
- [27] BERG M P, KNIENE J P, ZOOMER R, et al. Long-term decomposition of successive organic strata in a nitrogen saturated Scots pine forest soil[J]. For. Ecol. Manage, 1998, 107(1/3): 159-172.
- [28] MELILLO J M, ABER J D, MURATORE J M. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics[J]. Ecology, 1982, 63: 621-626.
- [29] VESTGARDEN L S. Carbon and nitrogen turnover in the early stage of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needle litter decomposition: Effects of internal and external nitrogen [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33: 465-474.
- [30] MAGILL A H, ABER J D. Dissolved organic carbon and nitrogen relationships in forest litter as affected by nitrogen deposition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 603-613.
- [31] 莫江明, 薛花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对N沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1413-1420.
- MO Jiangming, XUE Jinghua, FANG Yunting. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [32] 樊后保, 刘文飞, 杨跃霖, 等. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 8-13.
- FAN Houbao, LIU Wenfei, YANG Yuelin, et al. Decomposition of leaf litter of Chinese fir in response to increased nitrogen deposition[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(2): 8-13.
- [33] KEYSER P, KIRK T K, ZEIKUS J G. Ligninolytic enzyme systems of Phanerochaete chrysosporium synthesized in the absence of lignin in response to nitrogen starvation[J]. J. Bacteriol, 1978, 135: 790-797.
- [34] MAGILL A H, ABER J D. Long-term effects of experimental nitrogen additions on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems[J]. Plant Soil, 1998, 203: 301-311.
- [35] MICKS P, DOWNS M R, MAGILL A H. Decomposition litter as a sink for 15-N enriched additions to an oak forest and a red pine plantation[J]. Forest Ecosystem and Management, 2004, 196: 71-87.
- [36] ÅGREN G, BOSATTA E, MAGILLA H. Combining theory and experiment to understand effects of inorganic nitrogen on litter decomposition[J]. Oecologia, 2001, 128: 94-98.
- [37] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 等. 氮沉降下鼎湖山森林凋落物分解及与土壤动物的关系[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 901-907.
- XU Guoliang, MO Jiangming, ZHOU Guoyi, et al. Litter decomposition under N deposition in Dinghushan forests and its relationship with soil fauna[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(6): 901-907.
- [38] VOGT K A, VOGT D J, PALMETTO P A, et al. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species[J]. Plant and Soil, 1996, 187(2): 159-219.
- [39] COPLEY J. Ecology goes underground. Nature, 2000, 406: 452-454.
- [40] 涂利华, 胡庭兴, 张健. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林细根特性和土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2472-2478.
- TU Lihua, HU Tingxing, ZHANG Jian. Effects of simulated nitrogen deposition on the fine root characteristics and soil respiration in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2472-2478.
- [41] 贾淑霞, 王政权, 梅莉, 等. 施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤呼吸的影响[J]. 植物生态报, 2007, 31(3): 372-379.
- JIA Shuxia, WANG Zhengquan, MEI Li, et al. Effect of nitrogen fertilization on soil respiration in *Larix Gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantation in China[J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2007, 31(3): 372-379.
- [42] PERSSON H. The distribution and productivity of fine roots in boreal forest[J]. Plant Soil, 1983, 71: 87-101.
- [43] MAJDI H. Changes in fine root production and longevity in relation to water and nutrient availability in a Norway spruce stand in northern Sweden[J]. Tree Physiology, 2001, 21: 1057-1061.
- [44] GOWER S T, VOGT K A, GRIER C C. Carbon dynamics of Rocky Mountain Douglas-fir: Influence of water and nutrient availability[J]. Ecological Monographs, 1992, 62: 43-65.
- [45] JOURDAN C, EVSILVA, MGONÇALVES J M, et al. Fine root production and turnover in Brazilian Eucalyptus plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes[J]. Forest Ecosystem and Management, 2008, 256(3): 396-404.
- [46] PREGITZER K S, HENDRICK R L, FOGEL R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen[J]. New Phytologist, 1993, 125: 575-580.
- [47] NADELHOFFER K J. The potential effects of nitrogen deposition on fine root production in forest ecosystems[J]. New Phytologist, 2000, 147: 131-139.
- [48] FARRAR J F, JONES D L. The control of carbon acquisition by roots[J]. New Phytologist, 2000, 147: 43-53.
- [49] NADELHOFFER K J, ABER J D, et al. Fine roots, net primary production and soil nitrogen availability: A new hypothesis[J]. Ecology, 1985, 66(4): 1377-1390.
- [50] HENDRICK R L, PREGITZER K S. Applications of mini-rhizosphere to understand root function in forests and other natural ecosystems[J]. Plant and Soil, 1996, 185(2): 293-304.
- [51] 薛花, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对外生菌根真菌的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1790-1796.
- XUE Hua, MO Jiangming, FANG Yunting, et al. Effects of nitrogen deposition on ecto-mycorrhizal fungi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1790-1796.
- [52] CAIL, LUI Y J, ZHANG K Q. The behavior and application of mycorrhiza[J]. Shan dong Forestry Science and Technology, 2001, 4: 52-54.
- [53] ARNOLDS E. Decline of ecto-mycorrhizal fungi in Europe[J]. Agriculture ecosystems and environment, 1991, 35: 209-244.
- [54] WALLANDER H, NYLUND J E. Effects of excess nitrogen and phosphorus starvation on the extramatrical mycelium of ectomycorrhizas of *Pinus sylvestris*[J]. New Phytologist, 1992, 120: 495-503.
- [55] ARNEBRANT K. Nitrogen amendments reduce the growth of extramatrical ecto-mycorrhizal mycelium[J]. New Phytologist, 1994, 5: 7-15.
- [56] HUTCHINSON T S, WATMOUGH S A, SAGERE P S, et al. The impact of simulated acid rain and fertilizer application on a mature sugarmaple forest in central Ontario, Canada[J]. Water Air Soil Pollution, 1999, 109: 17-39.
- [57] LENA J, DAH LBERG A, BRANDRUD T. Temporal distribution of an ecto-mycorrhizal community in an oligotrophic Swedish Picea forest subjected

- to experimental nitrogen addition: above and below ground views[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 132: 143-156.
- [58] RUHLING A, TYLER G. Effects of simulated nitrogen deposition to the forest floor on micro fungi flora of a beech forest[J]. *Ambio*, 1991, 20: 261-263.
- [59] TERMO A J, SCHAFFERS A P. Occurrence of carpophores of mycorrhizal fungi in selected stands of *Pinus sylvestris* in the N enter lands in relation to stand vitality and airpollution[J]. *Plant and soil*, 1987, 104: 209-217.
- [60] TORERIK B. Ectomycorrhizal fungi in the NITREX site at Sweden: below and above ground responses to experimentally changed nitrogen inputs 1990-1995[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101: 207-214.
- [61] LILLESKOVE A, FAHEY T J. Patterns of ectomycorrhizal diversity over an atmospheric nitrogen deposition gradient near Kenai, Alaska[J]. *Abstracts of the First International Conference*, 1996.
- [62] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7-201.
- [63] HANSON P J, EDWARDS T, GARTEN C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115-1461.
- [64] RICHARD D, BOWDEN A, ERIC D, 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.
- [51] PREGITZER K S, ZAK D R, MAZIASZ J, et al. Interactive effects of atmospheric CO₂ and soil N availability on fine roots of *Populus tremuloides*[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 10: 18-33.
- [66] FRANKLIN O G, HEGBERG P G, EKBLAD A G, et al. Pine forest floor carbon accumulation in response to N and P K additions: Bomb 14-C modeling and respiration studies[J]. *Ecosystem*, 2003, 6: 644-658.
- [67] MAIER C A, KRESS L W. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability[J]. *Can. J. For. Res.*, 2000, 30: 347-359.
- [68] OREN R, ELLSWORTH D S, JOHNSEN K H, et al. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystem s in a CO₂ enriched atmosphere[J]. *Nature*, 2001, 411: 469-472.
- [69] JIA Shuxia, WANG Zhengquan, LI Xingpeng, et al. N fertilization affects on soil respiration, microbial biomass and root respiration in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations in China[J]. *Plant Soil*, 2010, 333: 325-336.
- [70] COMPTON J E, WATRUD L S, PORTEOUS L A, et al. Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest[J]. *For Ecol Manag*, 2004, 196: 143-158.
- [71] PHILLIPS P, FAHEY T J. Fertilization effects on fine root biomass, rhizosphere microbes and respiratory fluxes in hardwood forest soils[J]. *New Phytol*, 2007, 176: 655-664.
- [72] FREY S D, KNORRM, PARRENT J L, et al. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soilmicrobial community in temperate hardwood and pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 159-171.
- [73] BERG B, MATZNER E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems[J]. *Environmental Review*, 1997, 5: 1-25.
- [74] QUALLSR G, HAINES B L. Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution, and stream water[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 578-586.
- [75] GUNDERSEN P, EMMETT B A, KJONAAS O J, et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: A synthesis of NITREX data[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101: 37-55.
- [76] TIPPING E, WOOF C, RIGG E, et al. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 25: 83-95.
- [77] CURRIE W S, ABER J D. Modeling leaching as a decomposition process in humid montane forests[J]. *Ecology*, 1997, 78: 1844-1860.
- [78] KALBITZ K, SCHWESIG D, SCHMERWITZ J, et al. Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(8): 1129-1142.
- [79] 庞学勇, 包维楷, 吴宁. 森林生态系统土壤可溶性有机质(碳)影响因素研究进展[J]. *应用环境生物学报*, 2009, 15(3): 390-398.
- PANG Xueyong, BAO Weikai, WU Ning. Influence factors of soil dissoluble organic matter (carbon) in forest ecosystems: A Review[J]. *China Application of Ecological Environment*, 2009, 15(3): 390-398.
- [80] GUISQUIANI P L, CONCEZZI L, BUSINELLI M, et al. Fate of pigsludge liquid fraction in calcareous soil: agricultural and environmental implications[J]. *Environment Quality*, 1998, 27: 364-371.
- [81] ANTONIADIS V, ALLOWAY B J. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 117: 515-521.
- [82] 方华军, 程淑兰, 于贵瑞. 森林土壤碳、氮淋失过程及其形成机制研究进展[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(3): 29-37.
- FANG Huajun, CHENG Shulan, YU Guirui. Research on process and mechanism of carbon and nitrogen leaching for forest soils[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(3): 29-37.
- [83] FINDLAY S E G. Increased carbon transport in the Hudson River: Unexpected consequence of nitrogen deposition? [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(3): 133-137.
- [84] PREGITZER K S, ZAK D R, BURTON A J, et al. Chronic nitrate additions dramatically increase the export of carbon and nitrogen from northern hardwood ecosystems[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 68: 179-197.
- [85] GUNDERSEN P, EMMETT B A, Kjonaas O J, et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: A synthesis of NITREX data[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101: 37-56.
- [86] SINSABAUGH R L, ZAK D R, GALLOM, et al. Nitrogen deposition and dissolved organic carbon production in northern temperate forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 1509-1515.
- [87] MCDOWELL W H, CURRIE S, ABER J D, et al. Effects of chronic nitrogen amendment on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils[J]. *Water Air Soil Pollution*, 1998, 105: 175-182.
- [88] SJÖBERG G, BERGKVIST B, BERGGREN D, et al. Long-term N addition effects on the C mineralization and DOC production in humus under spruce[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 1035-1045.

Effects of nitrogen deposition on forest soil carbon budget mechanism

WANG Runan, LIN Zhaolan, WANG Chunmei *

Environmental Science and Engineering College of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Forest ecosystems contain 45 percent of the carbon stored in terrestrial biosphere with the majority of it stored in the soil, which plays a critical role in global carbon balance. In forest ecosystems, patterns of carbon sequestration and cycling are being influenced by elevated N deposition and anthropogenic N deposition have altered rates of productivity and biomass accumulation. Based on the studies about the impacts of nitrogen deposition for forest ecosystems conducted in temperate forest regions in Europe and North America, the paper refined decisive factors underlying the influence of nitrogen deposition on carbon budget in direction and scale: litter decomposition, fine root turnover, exogenous mycorrhizal fungi (EMF) productivity, soil respiration, dissolved organic carbon leaching. The uncertainties as to the interactions between forest ecosystem carbon dynamics and nitrogen deposition were also analyzed and discussed. Terrestrial carbon cycle and nitrogen cycle are closely coupled. Although nitrogen effects on carbon cycle was considered in the previous researches, the researches on the fields of the interaction between carbon and nitrogen was scarce because of the complexity of nitrogen cycle. Future studies should focus on the interaction between soil carbon and nitrogen process, and the mechanism of soil microbiology and enzyme related to soil carbon and nitrogen process, contributing to understanding the effects of N deposition on the carbon reserves and fluxes from forest soils.

Key words: nitrogen deposition; forest soil carbon pool; carbon budget; mechanism; response