

# 陆地生态系统可溶性有机氮研究进展\*

刘艳<sup>1,2</sup> 周国逸<sup>1\*\*</sup> 刘菊秀<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院华南植物研究所, 广州 510650; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 可溶性有机氮(dissolved organic nitrogen DON)的流动是陆地生态系统氮循环的重要组成部分。本文就陆地生态系统 DON 的来源、组成、性质;森林生态系统 DON 的流动、季节动态以及 DON 在氮循环中的地位等方面作了概括和探讨。今后的陆地生态系统 DON 的研究应该集中在以下几个方面:确定陆地生态系统中 DON 的各分室 DON 的浓度、流量;DON 的源与汇问题;量化不同生态系统中 DON 库的大小和组成;研究 DON 在氮的矿化、微生物的固持、以及植物吸收等氮循环过程中的地位;对比研究 DON 与 DOC(dissolved organic carbon)的动态差别;探讨 DON 与植物营养和碳积累的关系等。

**关键词** 可溶性有机氮,陆地生态系统,氮循环

**中图分类号** X171.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000 - 4890(2005)05 - 0573 - 05

**Advances in studies on dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystems.** LIU Yan<sup>1,2</sup>, ZHOU guoyi<sup>1</sup>, LIU Juxiu<sup>1</sup> (<sup>1</sup> South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guang Zhou 510650, China; <sup>2</sup> Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 573 ~ 577.

Due to its active and effective character, dissolved organic nitrogen (DON) plays an important role in the terrestrial nitrogen cycle. The paper summarized the origin, property and flux of dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystems. Some suggestions for further study were put forward, which included, the assessment of hydrological process controls on the release and retention of DON in terrestrial ecosystems; quantification of sources and sinks of DON in terrestrial ecosystems; the ecological significance of DON in mineralization, immobilization, leaching and plant uptake process; differences in the dynamics of DON and DOC; and the relationship between DON and plant nutrition and carbon accumulation.

**Key words** dissolved organic nitrogen, terrestrial ecosystem, nitrogen cycle.

## 1 引言

氮是植物生长不可缺少的营养元素,长期以来科学家们都认为它和森林的生长密切相关。Perakis 等<sup>[47,48]</sup>分析了南美未受人类干扰的森林流域 13 个地区中的 100 条河流的化学成分,结果发现平均有 80% 的可溶性氮以有机态的方式丢失,这与以前对北美、欧洲等地人为影响较大的森林流域河流中水溶性无机氮占 70% 的结果相反;另外有些学者发现森林可直接利用有机氮<sup>[46]</sup>。但是有机氮的生态学意义目前还不清楚,有些形态的有机氮可以直接作为养分被初级生产者吸收<sup>[8,39]</sup>,有些形态的有机氮只能缓慢的被分解为生物可利用的氮,而还有些有机氮对一些生物来说是有毒的<sup>[59]</sup>。目前进一步澄清森林生态系统中氮主要存在形式,对深入揭示森林对氮的利用及森林氮素循环机制有重要作用<sup>[2]</sup>。本文试图根据国内外的文献,概括目前可溶性有机氮组成、性质、动态以及在氮循环中的地位等研究现状,为陆地生态系统物质循环的研究提供参考

依据。

## 2 DON 的来源、组成及性质

### 2.1 DON 的来源

迄今为止,还不能断定可溶性有机物 DOM (dissolved organic matter) 的主要来源究竟是新近的凋落物还是土壤有机质层<sup>[33]</sup>。McDowell<sup>[42]</sup>认为,腐殖质的淋溶和微生物分解过程中产生了可溶性有机物;Zsolnay<sup>[66]</sup>也认为有机物质腐殖化过程是可溶性有机物的主要来源之一;Michalzik 等<sup>[43]</sup>发现在生长季节,DON 在土壤溶液中的浓度随着凋落物增加而下降。但也有不少研究者持相反的观点。Qualls 等<sup>[51]</sup>发现,在成熟的生态系统中,可溶性有机物的最大流量出现在森林地面的枯枝落叶层中;Casals 等<sup>[17]</sup>观察到松林土壤沥出液中绝大部分的

\*中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KSCX2-SW-120)、科技部“973”前期项目(2001CCB00600)、广东省基金重点项目(010567)和中国科学院知识创新基金资助项目(KZCX2-407)。

\*\*通讯作者

收稿日期:2004 - 04 - 20 改回日期:2004 - 08 - 03

DON 来自于新近的凋落物层。因根际土壤的有机物进行快速流动,其亦是重要的来源<sup>[21,65]</sup>。最近对土壤溶液中可溶性有机物的组成和结构分析表明,微生物代谢产物是其的重要组成部分,因此可溶性有机物的另一个潜在重要来源是土壤微生物生物量<sup>[66]</sup>。

DON 是可溶性有机物的重要组成部分之一。有试验发现土壤溶液中的 DON 可能来源于微生物分解土壤有机物后产生的难溶物质,可溶性有机物成分的研究支持这一说法<sup>[26]</sup>。Qualls 等<sup>[50]</sup>研究土壤溶液中的可溶性有机物的溶解性,发现 DOC 与 DON 都是难溶物质;Gregorich 等<sup>[25]</sup>分别提取了热溶液和冷溶液中的 DON、DOC,检测它们的溶解性,发现 DON 与 DOC 的溶解性都很低;最近在海洋生态系统中的研究工作表明,相当大一部分的 DON 是可以生物降解的,但是不能因此断定土壤中情况也是如此<sup>[13,58]</sup>。也有研究表明,土壤溶液中的 DON 是生物体合成的有生物学意义的产物,例如:有机酸或是酶。最近 20 年认为植物根系和菌根共生体分泌出来的有机酸可以加快溶液的矿化速率<sup>[9,35]</sup>。胞外酶在土壤养分循环以及能量流中的意义以及它们是否存在于 DON 库中都还有待研究。目前一般认为 DON 同 DOM 的来源相同,新近凋落物和土壤腐殖质是最主要来源,而土壤微生物生物量、根系分泌物、降雨淋溶等亦是其重要来源<sup>[20,24,63]</sup>。

## 2.2 DON 的组成及性质

DON 的化学组成和性质与其功能有关,但不同来源的 DON 的生态学意义还不清楚。凋落物渗滤液中 DON 主要成分为半分解状态的植物、微生物、动物残体形成的难以降解的有机酸<sup>[15]</sup>;在凋落物残体和泥碳组成的有机物层,疏水性和亲水性酸浓度大致相当<sup>[62]</sup>;与草地和森林相比,农田土壤可溶性有机物成分中含有相对较多的亲水性酸<sup>[53]</sup>。目前,主要借助水样中 DOM 的一些性质对可溶性有机物进行组成、性质研究。许多研究者采用了红外光谱(IR)、核磁共振光谱(NMR)等有机结构分析方法,分析 DOM 的结构特征<sup>[11]</sup>;在定量或定性描述 DOM 的特征时,往往通过描述各组分及其组成比例来刻画 DOM 的总体性质<sup>[11,36]</sup>,但有关 DON 的化学组成及性质方面的报道较少。目前,DON 中只有低分子量的物质如有机酸、氨基酸等可进行化学鉴别,而高分子量的富里酸(FA)和胡敏酸(HA)等

其它复杂有机物结构尚未十分明确。大多研究表明多数的 DON 出现在腐殖化的、亲水性酸和亲水性中性成分中。到目前为止,只有 1/3 ~ 1/2 的 DON 是可以说明的已知化合物。

## 3 森林生态系统中 DON 的流动及季节变化

### 3.1 DON 在森林生态系统中的流动

DON 在森林生态系统氮循环过程中起着重要的作用。伴随着降雨和土壤水分运动,DON 发生浓度和流量的变化。Michalzik 等<sup>[40]</sup>研究了挪威云杉林内降水、穿透雨、20 和 90cm 深处土壤溶液及径流中全氮、氨态氮、硝态氮、DON 和 DOC 的流量,穿透雨中 DON 年输入量为  $3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,枯枝落叶层中 DON 年流量为  $5 \sim 7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。Qualls 等<sup>[52]</sup>的研究表明,从森林枯枝落叶层中以 DON 形式输出量占以凋落物(固体)形式输入量的 28%,穿透雨中大约有一半的可溶性氮是以有机形式存在,地表径流中 94% 的氮是有机态。Michalzik 等<sup>[37]</sup>汇总了 42 项在温带森林中开展有关穿透雨、枯枝落叶层渗滤液和土壤溶液各分室 DOC、DON 的浓度和流量,研究表明,枯枝落叶层渗滤液和土壤 A 层中 DON 浓度最高,而最大流量出现在枯枝落叶层。混交林和针叶林内土壤溶液中 DON 流量也常比阔叶林内的明显更高<sup>[15]</sup>。降雨中 DON 浓度一般较低,大气降水进入森林后,水流通过林冠层和枯枝落叶层 DON 浓度显著增加,这可能是因为叶片受到雨水淋溶的缘故。而当降水经过森林最后经径流或是以地下水的形式从矿质土壤层进入河流流出时,DON 浓度降低且保持稳定,这与矿质土层吸附 DON 的能力有关。此外,DON 的迁移作用与降雨强度、土层厚度、土壤质地、地表植被和地形地貌有关<sup>[22]</sup>。在整个森林水文过程中(从大气降水、穿透水、树干流、土壤水直到地表径流),DON 浓度基本呈先上升、再下降的趋势。

### 3.2 DON 在森林生态系统中的季节变化

森林生态系统的 DON 随凋落物、降雨、土壤质地、酸碱度、温度和微生物等季节变化而变化。森林土壤渗滤液中的研究表明,土壤渗滤液中的 DON 的浓度的季节变化与凋落物的输入量有显著的相关性<sup>[15,17]</sup>。Huang 等<sup>[27]</sup>指出,约 80% 的 DON 产生于新近凋落物层。Michalzik 等<sup>[40]</sup>在德国挪威云杉林分内调查降水、穿透雨、枯枝落叶层和不同深度土壤溶液中的 DON、DOC 浓度和流量时发现,DON 的浓

度和流量与 DOC 的显著相关,且均随季节发生动态变化,并随土层深度增加而减少。Stevens 等<sup>[60]</sup>认为,随着土层深度的增加, DON 逐渐向硝酸盐形态转化,在酸性土壤中,硝化现象非常显著。实验室的研究表明, DON 的浓度随着温度的升高而增加, DOC 与 DON 具有相同的季节动态变化模式,夏季的浓度比冬季高<sup>[44]</sup>。但亦有相反, Huang 等<sup>[27]</sup>发现,因夏季温度高,矿化速率较高, DON 在土壤溶液中的浓度比较低。在野外条件下,水文条件、凋落物的数量和质量、土壤质地以及土壤其他的一些物理化学特性的变化会掩盖 DON 对温度的反应。

#### 4 DON在氮循环中的地位

DON 为有机氮的重要组成部分,但有机氮的循环在很多生态系统中没有被很好的理解。例如:有机氮沉降很少监测过,但是它却占整个氮沉降的 1/3<sup>[45]</sup>;已经发现很多湿生植物可以利用有机态氮及低分子量的有机酸<sup>[31]</sup>,但还不确定在森林生态系统中有机态氮是否被大量吸收<sup>[23]</sup>;在成熟的森林中可溶性有机氮已经被作为氮流失的一个主要的指标,而可溶性有机氮在河流中的输出对于自然状态的生态系统的意义还不清楚<sup>[29,61]</sup>。虽然如此,但 DON 因其流动性和有效性在氮的矿化、固持、淋溶、植物吸收等动态过程中起着重要的作用。

DON 组成多为难溶、难降解的物质,但其在氮的矿化过程中占有重要的地位。DeLuca 等<sup>[19]</sup>发现高秆草原土壤层中可溶性氨基氮的含量随氮的矿化而显著减少。Mengel<sup>[41]</sup>调查 17 块农田、1 座森林、2 片草原的土壤中氮矿化与土壤可溶性氮库之间的关系时发现,氨基氮与氮矿化之间的关系密切。同样 Barraclough 等<sup>[10]</sup>发现,伴有植物残体分解的总氮的非常的稳定,持久,表明氨基氮和氨基糖可作为矿化的无机氮的直接来源。

现在发现很多微生物可以直接利用低分子量的可溶性有机氮<sup>[14]</sup>。Barraclough<sup>[12]</sup>在冬季小麦田中发现,除了 44%亮氨酸和 82%氨基乙酸矿化为氨态氮的形态,所有的氨基氮都被土壤微生物群体直接吸收。植物残体中的氮亦能够被土壤微生物群体迅速吸收, Jensen<sup>[32]</sup>对比添加油菜籽和没有添加的土壤中的 DON 的量,没有发现明显的差异。因此传统矿化作用——固持作用理论(MIT)定义固持为土壤微生物同化无机态氮化合物的过程,所涉及的信息太过孤立和简化。

新近研究表明,可溶性有机氮(DON)是森林土壤溶液中氮的最主要存在形式和运输载体之一<sup>[38,49]</sup>。Perakis 等<sup>[47,48]</sup>对南美未受人类干扰的森林流域研究发现,河流中溶解性氮 80%是以有机态形式存在,这与以前对北美、欧洲等地人为影响较大的森林流域河流中水溶性无机氮占 70%结果相反。有研究发现森林集水区向河流中的输出的氮的主要形式为 DON<sup>[67]</sup>。Hawkins 等<sup>[28]</sup>研究英国的德文郡草场土壤溶液时发现,占总氮 20%的有机氮从径流中流失。同样, Currie 等<sup>[15]</sup>报道,在生长着红松和阔叶树的土壤渗出液中 DON 的百分浓度会对应于施肥量增加。从森林土壤溶液中的检测到的数据表明, DON 在总氮中的百分比会随着总氮淋失增加而下降<sup>[23]</sup>。

通常认为,植物主要是利用无机氮,即不含碳的氮化合物。然而,在没有人类活动的影响下(例如,极地和温带荒野地),氮矿化速率极低无法满足植物需要, DON 为植物利用的主要氮源<sup>[30,34,55]</sup>。在沼泽地生态系统中氮绝大部分是以有机形态存在。Schmidt 等<sup>[57]</sup>经过 1 年的观测,发现氨态氮和氨基酸是亚热带荒野地区氮的主要形态。现有的研究已经证明,植物可以直接利用或是通过菌根共生体吸收土壤层中的可溶性有机氮<sup>[7,18]</sup>,例如一种杜鹃花科的矮化灌木通过菌根共生体直接吸收有机态氮<sup>[54]</sup>。

#### 5 结 语

缘于氮元素对植物生长中的重要性,氮循环一直是陆地生态系统研究的热点。目前已有氮循环的概念和模型均建立在无机态氮是森林生态系统氮循环最主要的假设上<sup>[16,56,64]</sup>,因此可溶性有机氮(DON)的研究一直没有受到人们的重视。近 20 年来出于对可溶性有机物(DOM)的关注,科学家们对森林土壤(特别是温带林)中 DON 的来源、动态调节、流量等方面作了一些研究,但总体上人们对 DON 的了解甚少<sup>[15,22,40,52]</sup>。研究表明 DON 在氮的矿化与固持中占有重要的地位,但是 DON 与其他形态的氮在矿化中的相关性数据相当缺乏<sup>[12,14,32]</sup>。有关 DON 在土壤中的动态报道的结论很多是相互矛盾。由于水文过程的差异,在野外与室内研究有关 DON 影响因素时常得不到一致甚至是相反的结果。在野外条件下,土壤层的水文变化可能比生物因素对 DON 的调节更为重要。因而,

在室内研究得出的结果有待于在室外条件下进一步验证<sup>[2]</sup>。此外,目前对不同土地利用方式和不同气候带中森林土壤 DON 形成及对环境条件的变化的反应不太清楚。对 DON 组成及性质的分析也远远落后于对可溶性有机物的研究。有关 DON 的生态学意义还不清楚。国内少数研究者最近对河流及土壤可溶性有机物的环境效应做了一些报道,但有关 DON 的研究工作还没有开展起来<sup>[1,3~6]</sup>。因此未来的工作将致力于确定陆地生态系统中 DON 的各分室 DON 的浓度、流量,确定各分室的 DON 的源与汇问题;量化不同生态系统中 DON 库的大小和组成;研究 DON 在氮的矿化、微生物的固持、以及植物吸收等氮循环过程中的地位;对比研究 DON 与 DOC 的动态差别,探讨 DON 与植物营养和碳积累的关系。只有当一系列有关 DON 问题都得到了解答,才可修正现有的氮循环模型,完善有关氮循环的理论。

#### 参考文献

- [1] 李香真. 1996. 污泥中水溶性 Cu、Zn 的形态及水溶性有机物与 Cu 的复合特性[J]. 中国农业大学学报, **1**(3): 113 ~ 117.
- [2] 杨玉盛, 郭剑芬, 陈水光, 等. 2003. 森林生态系统 DOM 的来源、特性及流动[J]. 生态学报, **22**(3): 547 ~ 558.
- [3] 陈友, 黄艺, 曹军, 等. 2002. 玉米根际土壤中铜形态的动态变化[J]. 生态学报, **22**(10): 1666 ~ 1671.
- [4] 赵劲松, 张旭东, 袁星, 等. 2003. 土壤溶解性有机质的特性与环境意义[J]. 应用生态学报, **14**(1): 126 ~ 130.
- [5] 郭朝晖, 黄昌勇, 廖坡, 等. 2003. 模拟酸雨对红壤中铝和水溶性有机质溶出及重金属活动性的影响[J]. 土壤学报, **40**(3): 380 ~ 385.
- [6] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 2002. 陆定生态系统中水溶性有机质的环境效应[J]. 生态学报, **22**(2): 259 ~ 269.
- [7] Atkin OK. 1996. Reassessing the nitrogen relations of arctic plants: a mini-review [J]. *Plant Cell Environ.*, **19**: 695 ~ 704.
- [8] Antia NJ, Harrison PJ, Oliveira L. 1991. The role of dissolved organic nitrogen in phytoplankton nutrition, cell biology and ecology [J]. *Phycologia*, **30**: 1 ~ 89.
- [9] Antweiler RC, Drever JI. 1983. The weathering of a late Tertiary volcanic ash: importance of organic solutes [J]. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, **47**: 623 ~ 629.
- [10] Barraclough D, Gibbs P, Macdonald AJ. 1998. A new soil nitrogen and carbon cycle [A]. In: Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science [C]. August: CD-ROM, ISSS-AISS-SICS, Montpellier, France, AFES. 20 ~ 26.
- [11] Benner R, Pakulski JD, Mc Carthy M, et al. 1998. Chemical characteristics of dissolved organic matter in the ocean [J]. *Science*, **255**(5051): 1561 ~ 1564.
- [12] Barraclough D. 1997. The direct or MIR route for nitrogen immobilization: a <sup>15</sup>N mirror image study with leucine and glycine [J]. *Soil. Biol. Biochem.*, **29**: 101 ~ 108.
- [13] Bronk DA, Glibert PM, Ward BB. 1994. Nitrogen uptake, dissolved organic nitrogen release, and new production [J]. *Science*, **265**: 1843 ~ 1846.
- [14] Barak P, Molina JAE, Hadas A, et al. 1990. Mineralization of amino acids and evidence of direct assimilation of organic nitrogen [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54**: 769 ~ 774.
- [15] Currie WS, Aber JD, McDowell WH, et al. 1996. Vertical transport of dissolved organic C and N under long-term N amendments in pine and hardwood forests [J]. *Biogeochemistry*, **35**: 471 ~ 505.
- [16] Chapin III FS. 1995. New cog in the nitrogen cycle [J]. *Nature*, **377**: 199 ~ 200.
- [17] Casals P, Romanya J, Cortina JF, et al. 1995. Nitrogen supply rate in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests of contrasting slope aspect [J]. *Plant Soil*, **168** ~ **169**: 67 ~ 73.
- [18] Chapin FS, Moilanen L, Kielland K. 1993. Preferential use of organic nitrogen for growth by a non-mycorrhizal arctic sedge [J]. *Nature*, **316**: 150 ~ 153.
- [19] DeLuca TH, Keeney DR. 1994. Soluble carbon and nitrogen pools of prairie and cultivated soils: seasonal variation [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**: 835 ~ 840.
- [20] Dalva M, Moore TR. 1991. Sources and sinks of dissolved organic carbon in a forested swampcatchments [J]. *Biogeochemistry*, **15**: 1 ~ 19.
- [21] Edwards NT, Harziz WF. 1977. Carbon cycling in a mixed deciduous forest floor [J]. *Ecology*, **58**: 431 ~ 437.
- [22] Edmonds RL, Thomas TB, Blew RD. 1995. Biogeochemistry of an old-growth forested watershed [J]. *Water Res. Bull.*, **31**: 409 ~ 419.
- [23] Fisher RF, Binkley D. 2000. Ecology and management of forest soils. 3<sup>rd</sup> ed [M]. New York: Wiley.
- [24] Flessa H, Ludwig B, Heil B, et al. 2000. The origin of soil organic C, dissolved organic C and respiration in a long-term experiment in Halle, Germany, determined by <sup>13</sup>C natural abundance [J]. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **163**: 157 ~ 163.
- [25] Gregorich EG, Beare MH. 2000. The long-term effects of disturbance on organic and inorganic nitrogen export in the White Mountains [J]. *Ecosystems*, **3**: 433 ~ 450.
- [26] Guggenberger G, Zech W. 1994. Composition and dynamics of dissolved organic carbohydrates and lignin degradation products in two coniferous forests [J]. *Soil Biol. Biochem.*, **26**: 19 ~ 27.
- [27] Huang WZ, Schoenau JJ. 1998. Fluxes of water-soluble nitrogen and phosphorus in the forest floor and surface mineral soil of a boreal aspen stand [J]. *Geoderma*, **81**: 251 ~ 264.
- [28] Hawkins JMB, Scholefield D, Jarvis SC. 1997. Organic N losses from a poorly drained grassland soil [A]. In: Petchey AM, eds. Proceedings of The Scottish Agricultural College Diffuse Pollution and Agriculture Conference [C]. Scotland: Edinburgh University, 246 ~ 248.
- [29] Hedin LO, Armesto JJ, Johnson AH. 1995. Patterns of nutrient loss from unpolluted, old-growth temperate forests: evaluation of biogeochemical theory [J]. *Ecology*, **76**: 493 ~ 509.
- [30] Jonasson S, Michelsen A, Schmidt IK. 1999. Coupling of nutrient cycling and carbon dynamics in the arctic, integration of soil microbial and plant processes [J]. *Appl. Soil Ecol.*, **11**: 135 ~ 146.
- [31] Jonasson S, Shaver GR. 1999. Within-stand nutrient cycling in arctic and boreal wetland [J]. *Ecology*, **80**: 2139 ~ 2150.
- [32] Jensen LS, Mueller T, Magid J, et al. 1997. Temporal variation of C and N mineralization, microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field [J]. *Soil Biol. Biochem.*, **29**: 1043 ~ 1055.
- [33] Kalbitz K, Solinger S, Park JH, et al. 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review [J]. *Soil Sci.*, **165**(4): 277 ~ 304.
- [34] Kielland K. 1994. Amino acid absorption by arctic plants: implications for plant nutrition and nitrogen cycling [J]. *Ecology*, **75**: 2373 ~ 2383.
- [35] Landeweert R, Hoffland E, Finlay RD, et al. 2001. Linking plants to

- rocks:ectomycorrhizal fungi mobilize nutrients from minerals [J]. *Trends Ecol. Evol.*, **16**:248 ~ 254.
- [36] Leenheer JA, Huffman EWD. 1976. Classification of organic solutes in water by using macro reticular resins [J]. *J. Res. US Geol. Surv.*, **4**(6):737 ~ 751.
- [37] Michalzik B, Kalbitz K, Park JH, et al. 2001. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen - a synthesis for temperate forests [J]. *Biogeochemistry*, **52**(2):173 ~ 205.
- [38] McHale, MR, Mitchell MJ, McDonnell JJ, et al. 2000. Nitrogen solutes in an Adirondack forested watershed: importance of dissolved organic nitrogen [J]. *Biogeochemistry*, **48**(2):165 ~ 184.
- [39] Murphy DV, MacDonald AJ, Stockdale EA, et al. 2000. Soluble organic nitrogen in agricultural soils [J]. *Biol. Fert. Soils*, **30**:374 ~ 387.
- [40] Michalzik B, Matzner E. 1999. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem [J]. *Soil Sci.*, **50**:579 ~ 590.
- [41] Mengel K, Schneider B, Kosegarten H. 1999. Nitrogen compounds extracted by electro ultra filtration (EUF) or CaCl<sub>2</sub> solution and their relationships to nitrogen mineralization in soils [J]. *Plant Nutr. Soil Sci.*, **162**:139 ~ 148.
- [42] McDowell WH, Likens GE. 1988. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard brook Valley [J]. *Ecol. Monogr.*, **58**:177 ~ 195.
- [43] Michel K, Zech W. 1998. The release of DOC and DON from forest floors in relation to solid phase properties, respiration and N-mineralization [J]. *Plant Nutr. Soil Sci.*, **162**:645 ~ 652.
- [44] McDowell WH, Currie WS, Aber JD, et al. 1998. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils [J]. *Water Air Soil Pollut.*, **105**:175 ~ 182.
- [45] Morris JT. 1991. Effect of nitrogen loading on wetland ecosystems with particular reference to atmospheric deposition [J]. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, **22**:257 ~ 279.
- [46] Nsholm T, Ekblad A, Nordin A, et al. 1998. Boreal forest plants take up organic nitrogen [J]. *Nature*, **392**:914 ~ 916.
- [47] Perakis SS, Hedin LO. 2002. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds [J]. *Nature*, **415**:416 ~ 419.
- [48] Perakis SS, Hedin LO. 2001. Fluxes and fates of nitrogen in soil of an unpolluted old-growth temperate forest [J]. *Ecology*, **82**(8):2245 ~ 2260.
- [49] Peterson DL. 2001. Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams [re: nitrogen and eutrophication of lake-sand streams] [J]. *Science*, **292**:86 ~ 92.
- [50] Qualls RB, Haines BL. 1992. Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution, and stream water [J]. *Soil Sci. Soci. Am. J.*, **56**:578 ~ 586.
- [51] Qualls RG, Haines BL, Swank WT. 1991. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest [J]. *Ecology*, **72**:254 ~ 226.
- [52] Qualls RG, Haines BL, Swank WT. 1986. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest [J]. *Ecology*, **50**:1576 ~ 1578.
- [53] Raber BK, Gel-Knabner I, Stein C, et al. 1998. Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons to dissolved organic matter from different soils [J]. *Chemosphere*, **36**:79 ~ 97.
- [54] Read DJ. 1993. Plant-microbe mutualism and community structure [A]. In: Schulze ED, eds. Biodiversity and ecosystem function. [C]. Ecolstud Ser. Berlin: Springer-Verlag, 181 ~ 203.
- [55] Schmidt IK, Jonasson S, Michelsen A. 1999. Mineralisation and microbial immobilization of N and P in arctic soils in relation to season, temperature and nutrient amendment [J]. *Appl. Soil Ecol.*, **11**:147 ~ 160.
- [56] Stark JM, Hart SC. 1997. High rates of nitrification and nitrate turn over in undisturbed coniferous forests [J]. *Nature*, **285**:61 ~ 64.
- [57] Schmidt S, Stewart GR. 1997. Waterlogging and fire impacts on nitrogen availability and utilization in a subtropical wet heathland (wallum) [J]. *Plant Cell Environ.*, **20**:1231 ~ 1241.
- [58] Seitzinger S, Sanders RW. 1997. Contribution of dissolved organic nitrogen from rivers to estuarine eutrophication [J]. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, **159**:1 ~ 12.
- [59] Smid S. 1994. Endangering of forest trees by organic air pollutants [J]. *J. Plant Dis. Prot.*, **101**:423 ~ 445.
- [60] Stevens PA, Wannop CP. 1987. Dissolved organic nitrogen and nitrate in an acid forest soil [J]. *Plant Soil*, **102**:137 ~ 139.
- [61] Sollins P, Grier CC, McCorison FM, et al. 1980. The internal element cycles of old-growth Douglas-fir ecosystems in western Oregon [J]. *Ecol. Monogr.*, **50**:261 ~ 85.
- [62] Tipping E, Woolf C, Rigg E, et al. 1999. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment [J]. *Environ. Int.*, **25**:83 ~ 95.
- [63] Uselman SM, Qualls RG, Thomas RB. 2000. Effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub>, temperature, and soil N availability on root exudation of dissolved organic carbon by a N-fixing tree (*Robinia pseudoacacia* L.) [J]. *Plant Soil*, **222**:191 ~ 202.
- [64] Vitousek PM, Matson PA. 1984. Mechanisms of nitrogen retention in forest ecosystems: a field experiment [J]. *Science*, **225**:51 ~ 52.
- [65] Vogt KA, Grier CC, Meier CE, et al. 1983. Organic matter and nutrient dynamics in forest floors of young and mature *Abies amabilis* stands in western Washington, as affected by fine root input [J]. *Ecol. Monogr.*, **53**:139 ~ 157.
- [66] Williams BB, Edwards AC. 1993. Processes influencing dissolved organic nitrogen, phosphorus and sulphur in soils [J]. *Chem. Ecol.*, **8**:203 ~ 215.
- [67] Wissmar RC. 1991. Forest detritus of nitrogen in a mountain lake [J]. *Can. J. For. Res.*, **21**:990 ~ 998.
- [68] Zsolnay A. 1996. Dissolved humus in soil waters [A]. In: Piccolo A, eds. Humic Substances in Terrestrial Ecosystems [C]. Amsterdam: Elsevier, 171 ~ 223.

作者简介 刘 艳,女,1980年生,硕士。从事森林养分循环与水化学研究。发表论文 1 篇。E-mail: yanliu@scib.ac.cn

责任编辑 王 伟