

氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响

张 炜^{1,2}, 莫江明^{1,*}, 方运霆¹, 鲁显楷^{1,2}, 王 晖^{1,2}

(1. 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; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 大气氮沉降已经并将继续对森林土壤主要温室气体 (CO_2 、 CH_4 和 N_2O) 通量产生影响。综述了国内外氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响及其机理的研究现状。由于森林类型、土壤 N 状况、氮沉降量及沉降类型等不同, 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响主要表现为抑制、促进和不显著 3 种效果。在 N 限制的森林中, 氮沉降对土壤主要温室气体通量无显著影响, 或促进土壤 CO_2 排放; 在“N 饱和”的森林中, 氮沉降可减少土壤 CO_2 排放, 抑制对大气 CH_4 的吸收, 增加 N_2O 排放。分析了产生以上影响效果的作用机理, 介绍了氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响的研究方法, 探讨了该领域存在的问题及未来研究的方向。

关键词: 氮沉降; 森林土壤; 温室气体通量; 影响; 全球变化

文章编号: 1000-0933(2008)05-2309-11 中图分类号: Q142, Q948, S718, X171 文献标识码: A

Effects of nitrogen deposition on the greenhouse gas fluxes from forest soils

ZHANG Wei^{1,2}, MO Jiang-Ming^{1,*}, FANG Yun-Ting¹, LU Xian-Kai^{1,2}, WANG Hui^{1,2}

1 Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing, Guangdong 526070, China

2 The Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2309 ~ 2319.

Abstract: Human activities such as combustion of fossil fuels, intensive agriculture and stockbreeding, have significantly altered the global nitrogen cycling in the last several decades, resulting in increasing concentrations of nitrogenous compounds in the atmosphere and increasing N deposition several fold. Nitrogen deposition can lead to changes in N-status of forest soils, species composition, and possible decline in the function and primary productivity of forest. In addition, nitrogen deposition can alter the rates of microbial N- and C- turnover, and thus, can affect the fluxes of greenhouse gases (e. g. CO_2 , CH_4 , and N_2O) from forest soils. The effects of N deposition on the fluxes of greenhouse gases from forest soils are reviewed in this paper. The effects of N deposition on greenhouse gas fluxes from forest soils range from positive to negative depending on forest type, N-status of the soil, and the rate of N deposition. In forest ecosystems where biological processes are limited by N supply, N additions either stimulate soil respiration or have no significant effect, whereas in “N saturated” forest ecosystems, N additions decrease CO_2 emission, reduce CH_4 oxidation, and elevate N_2O flux from the soil. The mechanisms and research methods about the effects of N deposition on greenhouse gas fluxes from forest soils are also reviewed in this paper. Finally, the present and future research needs about the effects of N deposition on the fluxes of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30670392); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-YW-432); 广东省自然科学基金资助项目 (7006915)

收稿日期: 2007-02-28; **修订日期:** 2007-12-29

作者简介: 张炜 (1975 ~), 男, 河南桐柏人, 博士, 主要从事环境生态学研究. E-mail: zhangwei@scbg.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mojm@scib.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30670392), Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-432) and the Provincial Natural Science Foundation of Guangdong, China (No. 7006915)

Received date: 2007-02-28; **Accepted date:** 2007-12-29

Biography: ZHANG Wei, Ph. D., mainly engaged in environmental ecology. E-mail: zhangwei@scbg.ac.cn

greenhouse gases from forest soils are discussed.

Key Words: nitrogen deposition; forest soil; GHG gas fluxes; effects; global change

以气候变暖为标志的全球变化已经发生。进入 20 世纪以来,全球气温升高速率为 $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,甚至更高^[1]。全球变化中另一个新近出现而又令人担忧的问题是大气中含 N 物质浓度迅速增加,并不断向陆地和水生生态系统沉降^[2],且这种趋势在未来几十年内还将持续下去^[3]。大气氮沉降增加,已造成了一些地区水域 N 富集和陆地生态系统“N 饱和”,严重威胁着水体和陆地生态系统的健康发展^[4]。森林是陆地生态系统的主体,森林土壤是 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等主要温室气体的源、汇地之一^[5],在减缓全球气候变化过程中发挥着重要作用,因此在全球变暖背景下对于氮沉降影响森林土壤主要温室气体通量的研究日益成为当今生态和环境学界共同关注的焦点之一^[6,7]。20 世纪 80 年代中期,欧洲和北美的生态学家就开始了有关氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响的研究^[8,9]。我国已成为继欧洲、美国之后的世界第三大氮沉降集中区^[10,11],且随着经济的进一步发展,氮沉降量还会继续升高^[11,12]。然而,在我国,关于氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响的研究报道很少。本文综述了国内外有关氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响及其作用机理的研究现状,并介绍了主要的研究方法,探讨了该研究领域目前存在的问题及未来研究方向等。目的是帮助人们更好地认识氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响,引起人们对氮沉降带来的环境问题和有效解决氮沉降全球化问题的重视,为我国开展该领域研究及相关管理提供参考。

1 温室气体及其研究意义

1.1 温室气体的组成

大气中温室气体除水汽外主要包括二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)、一氧化碳(CO)以及含氟氯烃气体(CFCs)等^[13]。其中 CO_2 对增强温室效应的贡献率最大,大约占 56%,是最重要的温室气体^[14]。其次是 CH_4 ,以其较大的温室效应潜能(单分子 CH_4 的温室效应潜能是 CO_2 的 23 倍)和较快的增加速度(上个世纪增加了近 2 倍),成为除 CO_2 外最重要的温室气体,对温室效应的贡献率约占 15%^[15]。 N_2O 不仅具有较大的温室效应潜能(单分子 N_2O 的温室效应潜能大约是 CO_2 的 296 倍)^[15]、较长的寿命(120a 左右)、较快的增加速度(每年以 0.25% 的速率增加)^[16],且能破坏 O_3 保护层,进一步使地表气温升高^[15]。大气中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 三种气体对增强温室效应的贡献率占了近 80%^[17]。

1.2 温室气体的来源及其影响因素

一般认为,大气中温室气体浓度增加主要是人类活动的结果,特别是大量化石燃料和生物质燃烧、工业废气排放及土地使用类型改变等造成的^[17,18]。事实上,自然过程也是温室气体的重要来源之一,如陆地生态系统呼吸过程排放的 CO_2 是燃烧化石燃料排放 CO_2 的 10~15 倍^[19]。据估计,大气中每年有 5%~20% 的 CO_2 、15%~30% 的 CH_4 、80%~90% 的 N_2O 来源于土壤^[15]。森林土壤 CO_2 来源于根系呼吸、土壤动物呼吸和各种微生物代谢以及有机质的矿化分解过程,其中根系呼吸和微生物代谢是主要部分^[20]。森林土壤 N_2O 主要来源于硝化、反硝化和化学还原过程^[21],通气性较好的森林土壤是 N_2O 源^[9],每年向大气中排放的 N_2O 约为 2.88~7.42 Tg ^[22]。森林土壤产生和消耗 CH_4 的过程是同时发生的^[23],一般认为通气性较好的森林土壤是大气 CH_4 汇^[24],其对大气 CH_4 的吸收取决于土壤中甲烷营养细菌(*Methanotrophic bacteria*)对渗透到土壤表层 CH_4 的氧化能力^[25]。

在全球和区域尺度上,气候(降水和气温)是森林土壤主要温室气体通量的驱动因子;在局部范围内,植被类型、土壤温度和湿度是影响森林土壤主要温室气体通量的关键因子^[26]。凋落物分解、土壤微生物量、根系生物量^[9]、土壤动物和各种真菌的数量及活性^[27]、土壤透气性以及人类活动(氮沉降、土地使用类型、森林管理等)^[28]等都影响着森林土壤主要温室气体通量。大气氮沉降日益成为影响森林土壤主要温室气体产生和消耗过程的重要因子之一^[29],尤其在氮沉降严重的地区。

1.3 温室气体的研究意义

大气成分变化导致的全球变暖可能给环境带来严重破坏,被破坏的生态环境对地-气系统负反馈^[18],将引发一系列自然灾害,如冰川、冻土消融,海平面上升;改变森林结构和功能,降低生物多样性及森林生产力;破坏水循环模式,加快沙漠化进程,从而改变区域耕作方式,直接影响社会经济结构平衡等^[15]。《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》、《京都议定书》等一系列国际公约的签订和 IPCC 等一系列国际学术会议的召开表明了人类共同减缓全球变化、维护生存环境可持续发展的决心。在全球变化的背景下研究森林土壤主要温室气体通量对大气氮沉降的响应,对于了解全球变暖机制及制定相应减缓措施具有重要的理论和实践意义。

2 全球氮沉降现状和未来趋势

由于化石燃料燃烧、含 N 化肥的大量生产和使用以及畜牧业发展等向大气中排放的含 N 化合物激增是引起大气氮沉降成比例增加的主要原因^[4,11]。在工业发展较早、农业集约化程度较高地区大气氮沉降明显增高,如欧洲工业发达地区氮沉降量超过了 $25 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[30],在严重污染地区(如荷兰),森林穿透雨中的 N 沉降量普遍在 $50 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上,有些地区甚至超过 $100 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[31];在美国东北部,目前氮沉降量比本底水平增加了 10~20 倍^[32]。随着人类活动的日益频繁,氮沉降的年增加量呈上升趋势,并且,随着经济发展的全球化,氮沉降问题呈现出全球化趋势^[33]。我国东南沿海工业发达地区也存在严重的氮沉降问题。如广州市 1990 年降水中氮沉降量为 $73 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[34]。处于广东省珠江三角洲下风向的鼎湖山自然保护区降水中氮沉降量 1989 年为 $36 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,10a 后升至 $38 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[35,36],这些氮沉降量与欧洲和北美一些高氮沉降区相当。事实上,我国已成为继欧洲、美国之后的世界第三大氮沉降集中区^[10,11],且随着我国经济的进一步发展,氮沉降问题还会越来越严重^[11,12]。

3 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响及机理

3.1 氮沉降对森林土壤 CO_2 排放的影响及其作用机理

森林土壤排放 CO_2 过程与很多因素相关,其中氮沉降的影响自 20 世纪 80 年代以来被越来越多的专家学者所重视。氮沉降将改变森林土壤 N 状况及 N 循环速率、C 吸存量、pH 值、生物(微生物、细根、土壤动物等)量等,进而影响地表 CO_2 通量,具体是增加、减少还是无显著影响?各地的试验结果不尽相同。

3.1.1 氮沉降促进森林土壤 CO_2 排放或无显著影响

Steudler 等^[37]在波多黎哥热带雨林进行的模拟氮沉降试验早期结果显示,N 输入可提高森林生产力,增加凋落物量及其分解速度,进而促进土壤 CO_2 的排放。Emmett 等^[38]也认为,在 N 限制(N-limited)的森林生态系统中,增加 N 输入量可增加土壤微生物量,并增强其活性,加速土壤有机物分解,促进森林土壤 CO_2 的排放。莫江明等^[39]在鼎湖山阔叶林中进行模拟氮沉降试验的初期结果也表明:N 输入短期内(90d)明显促进土壤 CO_2 的排放,且发现这种促进作用随 N 处理水平的升高而增强,国外也有类似的研究结果报道^[40]。这种促进作用随施 N 时间的推移存在可变性。

也有一些研究结果显示氮沉降对森林土壤 CO_2 排放无显著影响。Micks^[41]等在美国马萨诸塞州松林的试验结果显示初期施 N 对土壤 CO_2 排放的影响并不显著。莫江明等在鼎湖山马尾松林、混交林和苗圃中的试验结果也显示,土壤 CO_2 排放对模拟 N 沉降初期(90d)响应不显著^[39],经过 3a 的模拟施 N 后,N 沉降对马尾松林土壤 CO_2 排放仍没有显著影响^[42]。

3.1.2 氮沉降抑制森林土壤 CO_2 排放

更多的试验结果显示,随着持续、过量的 N 输入改变土壤 N 状况后,氮沉降开始表现出对森林土壤 CO_2 排放的抑制作用^[5,41,43,44]。Bowden 等^[5]在美国哈佛森林进行的长期模拟氮沉降试验中发现施 N 后第 1 年,土壤 CO_2 排放明显增加;第 2 年,阔叶林中高 N 处理样方土壤 CO_2 排放量低于低 N 处理样方,高、低 N 处理样方都和对照样方(不施 N)没有太大区别了,而针叶林中,高、低 N 处理样方 CO_2 排放量都明显低于对照样方;第 13 年时,所有 N 处理样方 CO_2 排放量都明显低于对照样方(高 N 处理样方降低了约 41%)。Micks 等^[41]在美国马萨诸塞州森林中经过 5a 的模拟 N 沉降试验后也得出类似的结果。莫江明等在鼎湖山混交林中进行的

氮模拟试验也显示,经过 3a 的施 N 后, N 沉降对地表 CO_2 通量由原来的无影响^[39] 转变为显著抑制^[42]。国外有不少相似的结果报道^[43,44]。过量的 N 输入可限制森林土壤 CO_2 的排放这一观点在室内土壤培养中也得到了验证^[45]。

3.1.3 氮沉降对森林土壤 CO_2 排放的影响机理

(1) 氮沉降促进森林土壤 CO_2 排放作用机理

在 N 限制的森林中, N 输入可提高森林生态系统生产力, 增加凋落物量, 提高土壤有机质含量和土壤微生物量及活性, 有利于 C 被氧化成 CO_2 ^[37,38]。Magill 等^[32] 发现在温带森林中施 N 增加土壤 CO_2 排放量与地上生物量、凋落物量和地下根系生物量的增加有关, 他们认为凋落物和地下死根分解过程中释放的 C 可刺激异养型微生物活性, 促进森林土壤呼吸过程中 CO_2 排放。Bowden 等^[5] 认为施 N 早期(2a) 增加土壤 CO_2 排放量主要是由于施 N 增加了细根生物量和微生物量及活性造成的, 根系增加后除自身呼吸量增加外, 根际分泌物还可提高自养型细菌的呼吸能力, 进一步增加土壤 CO_2 的排放量。Micks^[41] 等认为施 N 初期(30d) 增加的 CO_2 排放量主要来源于土壤微生物量的增加及其活性的增强, 因为细根生长需要一定时间。莫江明等^[39] 在鼎湖山主要森林进行的 N 模拟试验中发现阔叶林土壤有效 N 含量明显高于松林和混交林, 土壤 N 状况决定了阔叶林土壤中有机质和微生物量较高, N 输入初期(90d) 主要是刺激了微生物活性, 加快了有机物分解速度, 明显促进了土壤 CO_2 排放。

也有观点认为 N 沉降可增加植物对 N 的吸收利用^[46], 降低凋落物中木质素的 C:N 比^[47], 较低 C:N 比的木质素易被分解^[48], 从而增加了土壤 CO_2 排放量。但这种解释不具有普遍性。

(2) 氮沉降对森林土壤 CO_2 排放不显著影响的作用机理

土壤中易被微生物利用的 C(labile carbon) 量是土壤微生物对外加 N 固持的一个关键因素, 森林土壤 C 含量在一定程度上决定着土壤总 N 矿化和净有机 N 固持量^[49]。在土壤有机 C 含量不变的情况下, 施 N 不会明显增加土壤 CO_2 排放^[50]。另一种解释是施加的 N 以无机形式存在土壤中, 没有真正进入系统循环过程, 对土壤 CO_2 排放没有影响。Johnson 等^[51] 对多种类型森林土壤进行了氮沉降模拟试验, 发现有机 N 含量较高的土壤中, 外加 N 主要以无机形式存留在土壤中。Micks 等也认为 N 输入对土壤 CO_2 排放没有显著影响的主要原因是外加 N 以无机形式存留在土壤中, 土壤中 N 循环速率(硝化、反硝化和 N 矿化) 并没有明显变化, 这种 N 固持的非生物过程不会影响森林土壤中 C 的吸存量^[41], 当然对森林土壤 CO_2 排放量的影响也不显著。

(3) 氮沉降限制森林土壤 CO_2 排放的作用机理

试图从微生物学角度来解释氮沉降限制森林土壤 CO_2 排放机制的学者认为, 长期氮沉降增加了土壤氨态氮含量, 土壤中真菌^[52]、伴根生菌、各种生化酶以及与有机质分解有关的酶^[53] 数量及活性都会受到 NH_4^+ 的抑制, 从而减少土壤 CO_2 排放。Bloom 等^[54] 指出根呼吸产生的能量大部分用于营养元素(主要是 N、P、K 等) 的同化作用, 氮沉降增加了土壤中有效 N 含量后, 减少了根系吸收 N 素所需消耗的能量, 从而降低根系的呼吸能力是导致地表 CO_2 通量减少的主要原因。Bowden 等^[5] 也认为在 N 限制的森林系统中, 根呼吸产生的能量绝大部分用于氮素的吸收, 当系统中 N 素含量增加后, 更多的有效 N 可以被植物吸收利用时, 根吸收氮素所需要消耗的能量就会减少, 根的呼吸作用就会随之降低。Flanagan 等^[49] 认为长期氮沉降减少森林土壤 CO_2 的排放量的主要原因是受土壤中有效 C 的限制, 这种限制作用可能是土壤本身就有, 也可能是由于长期氮沉降引起的。对 N 限制的土壤施 N 肥, 随着时间的推移, 土壤本身 N 限制被解除后, 该系统可能由原来的 N 限制转变为 C 限制, 总的表现仍然是降低土壤呼吸能力^[55]。Söderström 等^[56] 也发现过量 N 可减少土壤中可被微生物利用的 C 量, 原因是土壤中 NH_4^+ 浓度增加可降低木质素分解酶活性, 降低凋落物中木质素的分解速率^[57]。更多的研究提出, 在 N 饱和(N-saturated) 的森林里, 长期过量的 N 输入可减少根系生物量^[41,54], 降低土壤微生物量及活性^[52,53], 降低凋落物分解速率^[12,42,58], 进而限制森林土壤 CO_2 的排放。

3.2 氮沉降对森林土壤 N_2O 通量的影响及其作用机理

3.2.1 氮沉降促进森林土壤 N_2O 排放

多数学者认同氮沉降可增加森林地表 N_2O 通量的观点。Nadelhoffer 等^[27]对不同类型的森林土壤分别喷施 $0 \sim 600 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 后发现地表 N_2O 通量与 N 输入量成正的线性相关。莫江明等^[59]在鼎湖山进行的模拟氮沉降试验结果显示,早期(90d)施 N 对阔叶林地表 N_2O 通量有明显促进作用,且这种促进作用随 N 处理水平的提高而增强。Butterbach-Bahl 等^[16]在德国高氮沉降区森林中试验发现约 1.3% ~ 5% 的 N 沉降被转化为 N_2O 排出。Ineson 等^[60]在一个养猪场下风向的松林(N 沉降主要以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为主)观测后得出大气氮沉降($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)是使该松林地表 N_2O 通量增加的主要原因,并测得氮沉降量的 3% 左右被转化成 N_2O 排出。Hall 等^[8]在热带雨林中分别向 N 限制和 P 限制(P-limited)的土壤施 N,测得 P 限制的土壤中外加 N 的 2% 被转化为 N_2O 排出,而 N 限制的土壤这个量远小于 2%,于是他们提出 N 沉降将导致热带雨林土壤 N_2O 排放量升高,原因是热带森林普遍被认为是不受 N 限制的。Brumme 等^[23]对森林土壤施 N 试验也得出相似的结论,高 N_2O 排放量与高 N 处理($175 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)使土壤 N 达“饱和”有关。Matson 等^[61]综述了氮沉降试验的结果得出:氮沉降将增加热带森林地表 N_2O 通量,短期内对温带森林影响不明显,但随着时间的推移,影响会逐步增强。

3.2.2 氮沉降对森林土壤 N_2O 排放不显著影响

也有研究显示氮沉降对森林土壤 N_2O 排放的影响不显著。Matson 等^[62]在美国落基山松林研究发现,尽管施 N 增加了土壤 N 含量,但地表 N_2O 通量增加不明显。莫江明等^[59]在鼎湖山的试验结果也表明,施 N 对马尾松林和混交林土壤 N_2O 的排放短期内(90d)影响不显著。国外有不少类似的报道^[32,37]。Adams 等^[63]在澳大利亚森林的研究也表明,南半球森林土壤 N_2O 排放对氮沉降的响应不明显,原因可能是南半球森林受到人为干扰较小。

目前尚未见有氮沉降减少森林地表 N_2O 通量的报道。

3.2.3 氮沉降对森林土壤 N_2O 排放影响的机理

(1) 氮沉降促进森林土壤 N_2O 排放的作用机理

在 N 限制的土壤中,根系与微生物间对氮素存在激烈的竞争,随着外加 N 的输入,可被硝化细菌和反硝化细菌利用的有效 N($\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$)增加,作为硝化和反硝化过程的反应底物增多,必将增强土壤硝化、反硝化作用,从而增加森林土壤 N_2O 的排放^[64]。Matson 等^[61]认为在“N 饱和”的森林中,增加 N 输入明显提高土壤有效 N 含量,增加硝化、反硝化细菌数量,进而增加土壤 N_2O 的排放量。森林地表 N_2O 通量不仅与土壤硝化、反硝化速率有关,还与土壤自身 N 状况和 C:N 比有关。较低 C:N 比的土壤,外部输入的 N 被转化为 N_2O 排出的比例就高,长期 N 沉降可降低森林土壤的 C:N 比,土壤 N_2O 排放量呈上升趋势^[65]。

另外,森林地表 N_2O 通量还与 N 的矿化速率有关。Kitzler 等^[66]在奥地利 Schottenwald 森林研究中发现,氮沉降可以提高一些植物的分解速度,增加 N 的矿化速度,且产生的 N 很快作为硝化细菌和反硝化细菌的反应底物被转化为 N_2O 排出^[22]。

(2) 氮沉降对森林土壤 N_2O 排放影响不显著的作用机理

Bowden 等^[67]认为森林土壤 N_2O 排放与土壤中 N 循环速率显著相关,而与外加 N 量关系不大,氮沉降只有在提高土壤有效 N 含量,促进土壤硝化、反硝化作用强度时才会明显影响土壤 N_2O 的排放量。在 N 限制的温带森林中,早期少量的氮沉降物主要被植物吸收利用了,而存留在土壤中的 N 很少,土壤中有效 N 含量没有明显变化,不足以改变土壤硝化和反硝化速率以及 N 的矿化速率,当然对土壤 N_2O 排放的影响也就不明显了。随着持续大量的 N 输入,土壤 N 含量逐渐达到“饱和”时,地表 N_2O 通量将会随之增加。另外,氮沉降在一定程度上可降低森林土壤 pH 值,在较低 pH 条件下化学还原作用增强,有利于 NO 的生成^[25],而 N_2O 的产生受到一定的限制^[68]。

产生 N_2O 的硝化作用和反硝化作用过程不仅与土壤中的有效 N 有关,还与土壤含氧量有关^[22],而土壤中氧的浓度又受制于土壤湿度、土壤空隙度、有机质层的厚度和结构以及土壤中各种微生物活性等,仅氮沉降一个因素的改变可能短期内不足以明显改变土壤 N_2O 的排放量。

3.3 氮沉降对森林土壤吸收大气 CH_4 的影响及机理

3.3.1 氮沉降抑制森林土壤吸收(氧化)大气 CH_4 的影响

Whalen 等^[69]估计氮沉降可使全球森林土壤每年吸收(氧化)大气 CH_4 的量减少约 0.91Tg。Gulledge 等^[70]在美国哈佛森林经过十几年模拟氮沉降试验后发现施 N 使针叶林和阔叶林土壤氧化 CH_4 的能力分别降低了 14% 和 51%。Sitaula 等^[71]在温带松林中的试验结果显示,施 N 样方土壤对大气 CH_4 的氧化率分别是对照样方的 85% 和 62%。Steudler 等^[72]也发现在温带松林中施加 N 可使土壤对大气 CH_4 氧化能力降低 33%。Castro 等^[73]对温带森林施加 $180 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 尿素后发现土壤对大气 CH_4 的吸收能力降低到原来的 $1/20 \sim 1/5$ 。King 等^[74]向森林仅施加 $10 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (NH_4Cl) 就发现处理土壤吸收大气 CH_4 的能力降低了约 20%。莫江明等在鼎湖山苗圃^[39]和阔叶林中也得到了类似的试验结果。

3.3.2 森林地表 CH_4 通量对氮沉降的不显著响应

Galloway 认为氮沉降不能削弱北半球高纬地区针叶林土壤对大气 CH_4 的吸收能力^[75]。Whalen 等^[76]在美国阿拉斯加针叶林进行的氮沉降模拟试验也显示,未来 N 沉降增加不会明显改变北半球高纬度地区森林土壤作为大气 CH_4 汇的功能,因为该地区森林土壤中 N 含量并未达到一定阈值(N 饱和),他们在北方针叶林分别施加 $140 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) 和 $580 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (NH_4Cl) 都没有明显的改变土壤对大气 CH_4 的吸收速率。

3.3.4 氮沉降对森林地表 CH_4 通量影响的机理

(1) 氮沉降限制森林土壤吸收大气 CH_4 的机理

氮沉降可通过增加硝化细菌数量抑制土壤中特别是有机质层中甲烷营养菌的生长及活性^[74],这种抑制作用被解释为甲烷营养菌在氧化 CH_4 时和硝化细菌氧化 NH_4^+ 时需要相同的微生物酶参与,两者对酶竞争的结果^[77]。同时, NH_4^+ 被氧化过程中产生的 NO_2^- 会对甲烷营养菌产生毒害作用,从而减少森林土壤对大气 CH_4 的氧化吸收^[78],这种解释被多数专家学者认可。另一种解释,氮沉降可增加土壤中的 NO_3^- 浓度, NO_3^- 及与 NO_3^- 结合的阳离子都对甲烷营养菌有直接的毒害作用^[79,80],限制了森林土壤对大气 CH_4 的氧化能力。此外,在不同的研究地,研究者给出了不同的解释,如:氮沉降可降低土壤 pH 值,较低 pH 条件下不利于甲烷营养菌的活性^[81];氮沉降使森林土壤 Al^{3+} 浓度增加, Al^{3+} 对 CH_4 氧化细菌的毒害作用非常明显^[82];在温带或更北区域的森林中,氮沉降可以增加土壤有机质量,增加了甲烷生成的反应底物,提高了森林土壤自身的 CH_4 生产量^[73],从而间接地减少了其对大气 CH_4 的吸收;在 N 受限制的森林中,氮沉降可增加细根生物量^[32],减少土壤空隙度,从而减少大气 CH_4 向土壤表层扩散的量,使土壤吸收 CH_4 的能力下降^[24,83]等。

(2) 氮沉降对森林土壤吸收 CH_4 影响不显著的机理

氮沉降对森林土壤氧化大气 CH_4 的影响程度与土壤本身 N 状况有关。土壤 N 含量较低时,增加 N 输入不会明显影响土壤对 CH_4 的吸收,原因是输入的 N 主要被植物根系吸收利用了^[70],土壤中有效 N 未达一定阈值("N 饱和")之前,氮沉降不会表现出限制土壤对大气 CH_4 的吸收^[76]。另一种解释是 NH_4^+ 的增加会增加土壤中氨氧化细菌(主要是硝化细菌)的数量,在一定条件下,氨氧化细菌也能氧化大气 CH_4 ^[74],抵消了 NH_4^+ 对甲烷营养菌活性的限制作用。森林土壤氧化 CH_4 能力变化对 N 沉降的敏感度还与甲烷营养菌所处的位置有关,森林土壤中甲烷营养菌主要分布在矿质层表层^[69,83],氮沉降物首先沉降到土壤表层,由于凋落物层的阻隔,氮沉降短期内对土壤吸收 CH_4 的影响不大。

4 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响的研究方法

森林土壤主要温室气体通量的测定方法主要有静态箱-气相色谱法、动态箱式法、便携式红外分析仪法、

Li-6400 气体分析仪法、碱石灰吸收法和同位素示踪法等。通常采用静态箱-气相色谱法。试验设计主要有以下几种:

4.1 氮模拟试验

在不同的森林类型中建立样地,通过模拟 N 沉降,观测森林土壤主要温室气体通量在不同 N 处理水平上的响应规律。如欧洲的 NITREX 和 EXMAN 研究项目^[31]、美国哈佛森林的研究^[5,53]和我国鼎湖山模拟氮沉降样地等^[39,42,59]都采用了这种方法。模拟施 N 量以试验点大气氮沉降本底值为准,一般采用倍增法。施 N 种类以 NH_4NO_3 、 NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 等为主。该方法易于揭示时间序列上森林土壤主要温室气体通量对氮沉降的响应规律,具有较强的预测性。但试验过程中人为干扰较大。

4.2 氮沉降梯度上的定点试验

沿自然状态下氮沉降梯度选择研究样地,分析不同氮沉降水平下森林土壤主要温室气体通量的变化特征^[64]。这种方法可减少人为因素的干扰,数据可靠,但样地异质性干扰难以排除。

4.3 控制 N 输入试验

人为去除大气中氮沉降物的一种试验方法,一般采用大棚荫蔽法去除 N 沉降物^[24,85]。为了降低由减少降水带来的影响,需人工补充等降雨量的去离子水。这种方法采用了逆推时间序列法,推演过去来预测未来氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响。试验过程中人为干扰较大,误差不易控制。

5 问题与展望

5.1 研究地域的局限性

目前,氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响的研究多见于北美和欧洲等经济发达的温带地区,热带、亚热带地区研究报道较少。随着经济全球化,氮沉降问题已经出现“全球化”趋势^[11],迫切需把氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响的研究工作在世界范围内铺开,共同寻求减缓全球变暖的科学对策。

5.2 研究时间的局限性

氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响的研究开始于 20 世纪 80 年代初,距今不过 20a 时间,国内相关研究开始更晚。真正搞清氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响规律还需要长时间的持续研究。

5.3 技术方法的局限性

测量方法不统一、仪器设备不同、精度不够导致各地的研究结果之间差异较大,没法精确估算全球森林土壤主要温室气体通量,不利于在全球范围内通盘考虑,建立数学模型估算温室气体通量。

5.4 展望

氮的源、汇分析将是 21 世纪人们面临的新课题。森林生态系统可容纳的 N 沉降物量有最大阈值,超过该阈值将威胁着森林生态系统结构和功能的健康发展,目前,各地能被人们接受的阈值并不清楚。多大范围的 N 输入量不会威胁森林生态系统的健康发展?多大速率的 N 输入可以使被破坏的系统自动恢复?氮沉降量在多大范围内不会影响森林土壤主要温室气体排放规律?氮沉降驱动下森林土壤碳吸存率如何变化?氮沉降对全球变暖的贡献有多大?这些问题都需进一步研究。

6 结语

氮沉降影响着森林土壤主要温室气体排放/吸收过程。已有的研究表明,由于森林类型、土壤自身 N 状况以及氮沉降类型等不同,氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响主要表现为抑制、促进和不显著 3 种效果。在 N 限制的森林中,N 输入对土壤主要温室气体通量影响不明显;在不受 N 限制或“N 饱和”的森林中,N 输入将降低土壤呼吸能力,减少 CO_2 的排放,抑制森林土壤对大气 CH_4 的氧化吸收,增加 N_2O 的排放量。由于气候、植被群落和土壤自身 N 状况等不同,温带地区森林土壤主要温室气体通量对氮沉降的响应与热带、亚热带地区不同。尽管不同地区的试验结果都给出了合理的机理解释,但目前仍没有达成共识,许多问题需进一步探讨。我国已成为世界上第三大氮沉降集中区,但有关氮沉降对森林土壤主要温室气体通量影响的研究才刚刚起步,应尽快深入开展该方面的研究,为全球变化背景下制订我国森林资源和环境管理政策提供

科学依据。

References:

- [1] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J, eds. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge, U. K. : Cambridge University Press, 1990.365.
- [2] Kaiser J. The other global pollutant: nitrogen proves tough to curb. *Science*, 2001, 294:1268 — 1269.
- [3] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, *et al.* Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70:153 — 226.
- [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] Bowden R D, Davidson E, Savage K, *et al.* Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology Management*, 2004, 196:43 — 56.
- [6] Jenkinson D S, Goulding K, Powlson D S. Nitrogen deposition and carbon sequestration. *Nature*, 1999, 400:629.
- [7] van Breeman N. What governs nitrogen loss from forest soils? *Nature*, 2002, 418:604.
- [8] Hall S J, Matson P A. Nitrogen oxide emissions after nitrogen additions in tropical forests. *Nature*, 1999, 400:152 — 155.
- [9] Papen H, Butterbach-Bahl K. A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystems in Germany 1. N_2O emissions. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104:18487 — 18503.
- [10] 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.
- [11] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 2002, 31:64 — 71.
- [12] Mo J M, Brown S, Xue J H, *et al.* Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China. *Plant Soil*, 2006, 282:135 — 151.
- [13] National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan. Climate Change Policy Division. 2006, 10 — 11.
- [14] Hansen J E, Lacis A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change. *Nature*, 1990, 346:713 — 719.
- [15] IPCC. Special Report on Emissions Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [16] Butterbach-Bahl K, Gasche R, Breuer L, *et al.* Fluxes of NO and N_2O from temperate forest soils: Impact of forest type, N deposition, and of liming on the NO/N_2O emissions. *Nutrition Cycle of Agroecosystem*, 1997, 48:79 — 90.
- [17] Kiehl J T, Trenberth K E. Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(2):197 — 208.
- [18] IPCC. Climate Change 2001-Synthesis Report: Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climatic Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [19] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44(b):81 — 89.
- [20] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review*, 1997, 43:449 — 528.
- [21] Henrich M, Haselwandter K. Denitrification and gaseous nitrogen losses from an acid spruce forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29:1529 — 1537.
- [22] Brumme R, Verchot L V, Martikainen P J, *et al.* Contribution of trace gases nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4) to the atmospheric warming balance of forest biomes. In the Carbon Balance of Forest Biomes. Griffiths H and Jarvis P G, eds. BIOS Scientific Publishers Ltd., Southampton, 2004, 291 — 315.
- [23] Bartlett K, Crill P, Bonassi J, *et al.* Methane flux from the Amazon River floodplain: emissions during rising water. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95:16773 — 16788.
- [24] Grosso S J D, Parton W J, Mosier A R, *et al.* General CH_4 oxidation model and comparisons of CH_4 oxidation in natural and managed systems. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14:999 — 1019.
- [25] van Cleemput O, Baert L. Nitrite: a key compound in N loss processes under acid conditions? *Plant Soil*, 1984, 76:233 — 241.
- [26] Smith K A, Ball T, Conen F, *et al.* Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interaction of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54:779 — 791.
- [27] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gundersen P, *et al.* Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature*, 1999, 398:145 — 148.

- [28] Butterbach-Bahl K, Rothe A, Papen P. Effect of tree distance on N_2O and CH_4 fluxes from soils in temperate forest Ecosystems. *Plant Soil*, 2002, 240:91—103.
- [29] Butterbach-Bahl K, Breuer L, Gasche R, *et al.* Exchange of trace gases between soils and the atmosphere in Scots pine forest ecosystems of the North Eastern German Lowlands 1. Fluxes of N_2O , NO/NO_2 and CH_4 at forest sites with different N-deposition. *Forest Ecology Management*, 2002, 167:123—134.
- [30] Binkley D, Son Y, Valentine D W. Do forest receive occult inputs of nitrogen? *Ecosystems*, 2000, 3:321—331.
- [31] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects. *Forest Ecology Management*, 1998, 101:1—7.
- [32] Magill A H, Aber J D, Hendricks J J, *et al.* Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition. *Ecological Applications*, 1997, 7:402—415.
- [33] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, *et al.* The nitrogen cascade. *Bioscience*, 2003, 53:341—356.
- [34] Ren R, Mi F, Bai N. A chemometrics analysis on the data of precipitation chemistry of China. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2000, 26(2):90—95.
- [35] Huang Z L, Ding M M, Zhang Z P, *et al.* The hydrological processes and nitrogen dynamics in a monsoon evergreen broad-leaved forest of Dinghushan. *Acta Phytocologia Sinica*, 1994, 18:194—199.
- [36] Zhou G Y, Yan J H. The influence of region atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21:2002—2012.
- [37] Steudler P A, Melillo J M, Bowden R D, *et al.* The effects of natural and human disturbances on soil nitrogen dynamics and trace gas fluxes in Puerto Rican wet forest. *Biotropica*, 1991, 23(4a):356—363.
- [38] Emmett B A. The impact of nitrogen on forest soils and feedbacks on tree growth. *Water, Air & Soil Pollution*, 1999, 116:65—74.
- [39] Mo J M, Fang Y T, Xu G L, *et al.* The short-term responses of soil CO_2 emission and CH_4 uptake to simulated N deposition in nursery and forests of Dinghushan in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4):682—690.
- [40] Castro M S, Peterjohn W T, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on the fluxes of N_2O , CH_4 , and CO_2 from soils in a Florida slash pine plantation. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24:9—13.
- [41] Micks P, 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. *Forest Ecology Management*, 2004, 196:57—70.
- [42] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, *et al.* Response of soil respiration to simulated N deposition in a disturbed and a rehabilitated tropical forest in southern China. *Plant Soil*, 2007, 296:125—135. DOI: 10.1007/s11104-007-9303-8.
- [43] Burton A J, Pregitzer K, Crawford J N, *et al.* Simulated chronic NO_3^- deposition reduces soil respiration in northern hardwood forests. *Global Change Biology*, 2004, 10:1080—1091.
- [44] Maier C A, Kress L W. Soil CO_2 evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30:347—359.
- [45] Thirukkumaran C M, Parkinson D. Microbial respiration, biomass, metabolic quotient and litter decomposition in a lodgepole pine forest floor amended with nitrogen and phosphorous fertilizers. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(1):59—66.
- [46] Hobbie S E. Interactions between lignin and soil nitrogen availability during leaf litter decomposition in a Hawaiian Montane Forest. *Ecosystems*, 2000, 3:484—494.
- [47] Hobbie S E, Gough L. Litter decomposition in moist acidic and non-acidic tundra with different glacial histories. *Oecologia*, 2004, 140:113—124.
- [48] Berg M P, Kniese J P, Zoomer R, *et al.* Long-term decomposition of successive organic strata in a nitrogen saturated Scots pine forest soil. *Forest Ecology Management*, 1998, 107:159—172.
- [49] Flanagan P W, Van C K. Nutrient cycling in relation to decomposition and organic-matter quality in taiga ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 1983, 13(5):795—817.
- [50] Fenn M E, Poth M A, Aber J D, *et al.* Nitrogen excess in North American ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecological Applications*, 1998, 8(3):706—733.
- [51] Johnson D W, Cheng W, Burke I C. Biotic and abiotic nitrogen retention in a variety of forest soils. *Soil Science Society America Journal*, 2000, 64:1503—1514.
- [52] 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 Management*, 2004, 196:159—171.
- [53] Compton J, Watrud L S, Porteus L A, *et al.* Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest. *Forest Ecology Management*, 2004, 196:143—158.

- [54] Bloom A J, Sukrapanna S S, Warner R L. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiology*, 1992, 99:1294 — 1301.
- [55] Aber J D, McDowell W, Nadelhoffer K J, *et al.* Nitrogen saturation in northern forest ecosystems, hypotheses revisited. *Bioscience*, 1998, 48:921 — 934.
- [56] Söderström B, Bååth E, Lundgren B. Decrease in soil microbial activity and biomasses owing to nitrogen amendments. *Canadian Journal Microbiology*, 1983, 29:1500 — 1506.
- [57] Fog K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. *Biological Review*, 1988, 63:433 — 462.
- [58] Micks P, Down M R, Magill A H, *et al.* Decomposition litter as a sink for ^{15}N -enriched additions to an oak forest and a red pine plantation. *Forest Ecology Management*, 2004, 196:71 — 87.
- [59] Mo J M, Fang Y T, Lin E D, *et al.* Soil N_2O emission and its response to simulated N deposition in the main forests of Dinghushan in subtropical China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(6):901 — 910.
- [60] Ineson P, Coward P A, Benham D G, *et al.* Coniferous forests as “secondary agricultural” sources of nitrous oxide. *Atmospheric Environment*, 1998, 32:3321 — 3330.
- [61] Matson P A, Lohse K, Hall S. The globalization of nitrogen deposition: Consequences for terrestrial ecosystems. *Ambio*, 2002, 31(2):113 — 119.
- [62] Matson P A, Gower S T, Volkman C, *et al.* Soil nitrogen cycling and nitrous oxide flux in a Rocky Mountain Douglas-Fir forest: Effects of fertilization, irrigation, and carbon addition. *Biogeochemistry*, 1992, 18:101 — 117.
- [63] Adams M A, Ineson P, Binkley D, *et al.* Soil functional responses to excess nitrogen inputs at global scales. *Ambio*, 2004, 33(8):530 — 536.
- [64] Venterea R T, Groffman P M, Verchot L V, *et al.* Nitrogen oxide gas emissions from temperate forest soils receiving long-term nitrogen inputs. *Global Change Biology*, 2003, 9:346 — 357.
- [65] Dise N B, Matzner E, Forsius M. Evaluation of organic C:N ratios as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe. *Environmental Pollution*, 1998, 102(S1):453 — 456.
- [66] Kitzler B, Zechmeister-Boltenstern S, Holtermann C, *et al.* Nitrogen oxides emission from two beech forests subjected to different nitrogen loads. *Biogeosciences*, 2006, 3:293 — 310.
- [67] Bowden R D, Steudler P A, Melillo J M, *et al.* Annual nitrous oxide fluxes from temperate forest soils in the northeastern United States. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95:13997 — 14005.
- [68] Bremner J M. Sources of nitrous oxide in soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49:7 — 16.
- [69] Whalen S C, Reeburgh W S, Barber V A. Oxidation of methane in boreal forest soils; a comparison of seven measures. *Biogeochemistry*, 1992, 16:181 — 211.
- [70] Gullledge J, Hrywna Y, Cavanaugh C, *et al.* Effects of long-term nitrogen fertilization on the uptake kinetics of atmospheric methane in temperate forest soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 49:389 — 400.
- [71] Sitaula B K. CH_4 uptake by temperate forest soil: effect of N input and soil acidification. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27:871 — 880.
- [72] Steudler P A, Bowden R D, Melillo J M, *et al.* Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature*, 1989, 341:314 — 316.
- [73] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, *et al.* Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochemical Cycle*, 1995, 9(1):1 — 10.
- [74] King G M, Schnell S. Effect of increasing atmospheric methane concentration on ammonium inhibition of soil methane consumption. *Nature*, 1994, 370:282 — 284.
- [75] Galloway J N. Deposition of sulfur and nitrogen from the remote atmosphere. In: Galloway J N, Charlson R J, Andreae M O, *et al.* eds. *The Biogeochemical Cycling of Sulfur and Nitrogen in the Remote Atmosphere*. Riedel, Dordrecht, 1985, 143 — 175.
- [76] Whalen S C, Reeburgh W S. Effect of nitrogen fertilization on atmospheric methane oxidation in boreal forest soils. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2:151 — 157.
- [77] Heutsch B W. Methane oxidation in soils of two long-term fertilization experiments in Germany. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28:773 — 782.
- [78] King G M, Schnell S. Ammonium and nitrite inhibition of methane oxidation by *Methylobacter albus* BG8 and *Methylosinus trichosporium* OB3b at low methane concentrations. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, 60:3508 — 3513.
- [79] Reay D S, Nedwell D B. Methane oxidation in temperate soils: effects of inorganic N. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36:2059 — 2065.
- [80] Xu X K, Inubushi K. Effects of N sources and methane concentrations on methane uptake potential of a typical coniferous forest and its adjacent orchard soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 40:215 — 221.

- [81] Bradford M A, Wookey P A, Ineson P, *et al.* Controlling factors and effects of chronic nitrogen and sulphur deposition on methane oxidation in a temperate forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33:93—102.
- [82] Nanba K, King G. Response of atmospheric methane consumption by maine forest soils to exogenous Aluminum salts. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, 66(9):3674—3679.
- [83] Striegl R G. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils. *Chemosphere*, 1993, 26:715—720.
- [84] Chen X Y, Mulder J. Indicators for nitrogen status and leaching in subtropical forest ecosystems, South China. *Biogeochemistry*, 2007, 82:165—180.
- [85] Walse C, Beier C, Warfving P, *et al.* Modelling “clean rain” treatments in acidified soils-EXMAN project results. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1995, 85(3):1807—1812.

参考文献:

- [34] 任仁,米丰杰,白乃彬. 中国降水化学数据的化学计量学分析. *北京工业大学学报*,2000,26(2):90~95.
- [35] 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. *植物生态学报*,1994,18(2):194~199.
- [36] 周国逸,闫俊华. 鼎湖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. *生态学报*,2001,21(12):2002~2012.
- [39] 莫江明,方运霆,徐国良,等. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO₂排放和 CH₄吸收对模拟 N 沉降的短期响应. *生态学报*,2005,25(4):682~690.
- [59] 莫江明,方运霆,林而达,等. 鼎湖山主要森林土壤 N₂O 排放及其对模拟 N 沉降的响应. *植物生态学报*, 2006,30(6):901~910.