

# 氮添加对森林土壤呼吸的影响研究进展

张力元, 邢亚娟\*

黑龙江大学现代农业与生态环境学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2021年10月18日; 录用日期: 2021年11月22日; 发布日期: 2021年11月29日

## 摘要

森林土壤呼吸作为CO<sub>2</sub>的巨大排放源, 对全球气候变化有至关重要的作用, 土壤呼吸速率过高可能引起碳循环失衡进而导致气候变暖不断加剧。而森林土壤呼吸的变化与全球氮沉降的加剧有着密切的相关性, 不同的森林生态群落可能会对氮沉降作出不同的反应, 因此关于模拟氮沉降研究森林土壤呼吸变化, 成为了近年来研究的热点问题。本文综述了土壤呼吸及其组分对氮沉降的响应, 分析在氮添加作用下, 土壤微生物、凋落物及根系生物量对土壤呼吸的影响, 并在此基础上进行深入的探讨和展望, 以期探索森林土壤呼吸对氮沉降的作用提供理论参考。

## 关键词

土壤呼吸, 氮沉降, 土壤微生物, 凋落物, 根系生物量

# Research Progress on Response of Forest Soil Respiration to Nitrogen Addition

Liyuan Zhang, Yajuan Xing\*

College of Modern Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin Heilongjiang

Received: Oct. 18<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2021; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Forest soil respiration, as a huge emission source of CO<sub>2</sub>, plays a vital role in global climate change. Too high soil respiration rate may cause carbon cycle imbalance, and then lead to climate warming. The change of forest soil respiration is closely related to the intensification of global nitrogen deposition. Different forest ecological communities may respond differently to nitrogen deposition. Therefore, the study of forest soil respiration by simulating nitrogen deposition has become a

\*通讯作者。

**hot issue in recent years. This paper summarizes the response of soil respiration and its components to nitrogen deposition, analyzes the effects of soil microorganisms, litter and root biomass on soil respiration under the action of nitrogen addition, and makes an in-depth discussion and Prospect on this basis, in order to provide a theoretical reference for exploring the effect of forest soil respiration on nitrogen deposition.**

## Keywords

Soil Respiration, Nitrogen Deposition, Soil Microorganisms, Litter, Root Biomass

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

从 20 世纪中期开始, 由于森林砍伐、农业扩张、肥料燃烧使用和工业发展等一系列人类活动, 大气中的活性氮排放速率迅速升高, 导致过去的一个世纪里, 陆地生态系统中活性氮的大气沉积增加了 3~5 倍[1] [2]。有研究数据表明, 从 1980 至 2000 年, 中国氮沉降量一直处于快速增长趋势, 虽在 2011 至 2018 年氮沉积量有所减少, 但中国仍是全球三大氮沉积地区之一[3]。相比于中国, 近年来欧洲和美国等地区的氮沉积量得到了较好的管理和抑制, 但尽管如此, 全球陆地总氮沉积量依然不断增加, 预计到 2100 年, 地上氮沉积量可能较现在增加 2.5 倍, 其中东亚和南亚地区贡献的氮沉积量比例最大[4] [5]。关于氮沉降对于森林生态系统的影响, 具有积极和消极的两面性。氮的过度饱和对森林生态系统有消极影响, 特别是这种负荷超过了某一区域森林生态系统的吸收能力时, 可能造成其土壤酸化、森林结构破坏、森林植物多样性下降等一系列问题[6]。而一定范围内的氮沉积, 可能对增加森林植物多样性、提高森林植物生物量、调控土壤呼吸等有积极作用[7] [8] [9]。

土壤碳库是陆地生态系统中最大的有机碳库[10]。该碳库规模较大, 其有机碳含量约占碳总量的三分之二[11]。在过去土壤碳库是化石燃料燃烧释放到大气中的碳的潜在重要汇, 但随着大气氮沉降的日益加剧, 其碳汇功能受到了影响, 如今土壤碳库的源汇功能还有待进一步确定。土壤呼吸是陆地生态系统向大气输入碳的最主要途径, 主要以二氧化碳的形式出现, 氮沉降对土壤呼吸的影响主要表现为促进或抑制, 即使土壤呼吸的微小变化, 其产生的二氧化碳含量也可能大于或者等于每年因土地利用或化石燃料燃烧等人类活动向大气输入的二氧化碳的含量[12], 并可能显著影响到大气中二氧化碳的累计增加或减少, 从而影响生态系统的碳循环, 对气候变化产生反馈。因此探究土壤呼吸对氮沉降的响应机制对于了解森林生态系统氮梯度上土壤碳收支具有重要意义。

土壤呼吸对碳循环以及全球气候变化有着重要影响, 但以往的研究中, 关于氮输入对土壤呼吸  $\text{CO}_2$  通量的影响报道却较少。也有学者建立氮素添加模型, 研究氮素添加对土壤呼吸的作用机制和响应结果, 但是对于土壤呼吸对氮添加作何响应, 至今没有明确的结论。准确描述活性氮输入变化对森林土壤呼吸的作用, 可以为未来调控森林生态系统碳循环, 促进土壤碳库成为碳汇提供一定的理论依据。本文通过归纳整合近年来森林土壤呼吸对氮添加的响应结果, 分析在不同区域或不同条件下氮素添加对森林土壤呼吸及其内部组分的作用, 以及氮加作用下其他影响因子对土壤呼吸作用的潜在机制, 并对未来研究进行总结和展望。

## 2. 氮添加对森林土壤呼吸的影响

土壤呼吸是根呼吸、土壤动物呼吸、土壤微生物降解和土壤有机质分解产生二氧化碳的生态学过程, 土壤呼吸可分为异养呼吸和自养呼吸[13]。土壤碳(C)和氮(N)的有效性在土壤 CO<sub>2</sub> 排放中起着重要作用[14]。了解土壤 N 有效性对土壤呼吸(Rs)及其组成部分(异养呼吸(Rh)和自养呼吸(Ra))的影响对于理解土壤呼吸对大气氮沉降的响应非常重要。然而, 森林生态系统中土壤呼吸的变化对氮添加变化的响应尚不完全清楚。本文从土壤总呼吸、土壤各组分呼吸两方面讨论土壤呼吸对氮添加的响应。

### 2.1. 氮添加对森林土壤总呼吸的影响

氮素添加对不同森林生态系统有着不同的影响, 为了研究氮沉降对森林土壤呼吸的影响, 国内外进行了大量模拟氮沉降实验。实验的结果主要有三种, 第一, 氮添加对森林土壤呼吸呈促进作用。例如, 对中国长白山天然次生林进行氮添加发现, 在低氮施加处理下对土壤呼吸呈促进作用[15]。在天然麻栎林内进行模拟氮沉降实验发现, 氮沉降轻微提高了总土壤呼吸速率[16]。在加拿大老龄太平洋西北道格拉斯冷杉林进行氮素施加发现, 两个试验都表明, 施用氮肥最初导致 Rs 显著增加, 氮素施加对土壤呼吸在短期内(超过 3~4 个月)呈促进作用, 但在大约 4 个月后就无效[17]。第二, 氮素添加对森林土壤呼吸呈抑制作用。例如, 在中国热带森林进行氮沉降模拟实验表明, 高氮处理下的年平均土壤呼吸速率比对照处理低 14%, 热带森林土壤呼吸对大气氮沉降的响应是下降的, 但它可能随氮沉降速率而变化[18]。在美国北方阔叶林对生长季节和年度土壤 CO<sub>2</sub> 外流进行的估算表明, 在长期添加氮的第八年, 这些 C 通量降低了 15% [19]。哈佛森林科学研究中心在温带森林施氮研究表明, 氮添加降低了温带森林土壤的总土壤呼吸[20]。第三, 森林土壤呼吸对氮添加的反应不显著。例如, 在美国密歇根州森林进行氮素添加实验, 没有观察到土壤呼吸在研究地点对氮添加的反应发生变化的证据[21]。长期在亚高山生态系统森林施加氮肥进行实验发现, 对照地块的平均土壤呼吸测量值与施肥地块的平均土壤呼吸测量值没有显著差异[22]。在地中海山地森林生态系统中施加氮肥发现, 在冬季和夏季, RS 对氮沉积速率的增加没有反应[23]。关于森林土壤呼吸对氮沉降的响应, 至今没有一致的结果, 这种反应可能与季节、不同地区环境影响因子以及其他许多因素有关。但是可以综合结果表明, 氮素添加对大部分地区森林土壤呼吸存在一定的影响, 由于土壤呼吸的外界影响条件存在较大的差异和变化的不确定性, 需要因地制宜进行氮素添加模拟实验。

### 2.2. 氮添加对森林土壤呼吸各组分的的影响

土壤呼吸主要组成部分为自养呼吸(Ra)和异养呼吸(Rh), Ra 主要包括根呼吸和根际微生物呼吸, Rh 来源于土壤有机质的分解, 主要包括土壤微生物和动物呼吸。据测定在某些森林生态系统中, 自养呼吸对土壤呼吸的贡献比例大约占总呼吸的一半[24]。仅仅依靠测定和分析氮添加对土壤总呼吸的作用结果, 是无法得知氮沉降对土壤呼吸的作用机制的。因为氮添加对土壤呼吸的影响究竟是由于土壤自养呼吸还是异养呼吸, 亦或二者共同作用的结果, 是尚不明确的[25]。应考虑氮添加后, 土壤呼吸各组分呼吸强度的大小, 及其对总土壤呼吸的贡献有何变化。

森林土壤各组分呼吸对氮素添加所呈现的反应亦为促进、抑制和无明显作用[9], 而研究其反应结果的主要目的为探索在氮添加作用下, 不同森林生态系统土壤呼吸各组分对于总呼吸的贡献, 所以将其分为两种情况来讨论。一方面, 氮添加对土壤呼吸组分具有抑制作用, 从而抑制土壤总呼吸。首先, 有研究表明氮添加作用下, 自养呼吸对总呼吸贡献有所降低。例如, 在瑞典北部云杉林实验发现未施肥地块的自养呼吸占土壤总呼吸的 60% 以上, 在施肥地块中, 自养呼吸占土壤总呼吸的 50%。在绝对数量上, 施加氮素后自养呼吸比重降低 10% [26]。其次, 还有实验发现施氮后异养呼吸对总呼吸贡献有所降低。例如, 在中国东北部大兴安岭南瓮河国家自然保护区实验研究发现, 中氮和高氮抑制了异养呼吸, 在一

一定程度上减少了碳损失[27]。除此之外, 施加氮素还会促使自养呼吸和异养呼吸对土壤总呼吸贡献均有所降低。例如, 在杉木人工林施氮肥发现, 土壤自养呼吸和异养呼吸均有所降低, 并且  $R_h$  降低对  $R_s$  下降的贡献大于  $R_a$  降低[28]。

另一方面, 氮添加对土壤呼吸组分有促进作用, 从而促进土壤总呼吸。首先, 有在森林施加氮素实验表明, 自养呼吸对总呼吸贡献有所提高。例如, 在中国一个温带落叶松人工林施氮发现, 在湿润年份的春季, 由于施氮后氮限制大大缓解, 施氮显著增加了  $R_a$ , 提高了自养呼吸对总呼吸的贡献[29]。其次, 有研究表明氮添加作用下, 异养呼吸对总呼吸贡献有所提高。例如, 在亚高山针叶林施氮显著增加了  $R_h$ , 与此同时  $R_s$  也有所提高[30]。除此之外, 氮添加作用下, 自养呼吸和异养呼吸对总呼吸贡献均有所提高。例如, 在中国东北大兴安岭兴安落叶松天然林实验研究表明, 氮添加使  $R_s$ 、 $R_h$  和  $R_a$  分别显著增加 18.9%、7.2% 和 51% [31]。在青藏高原高山针叶林实验研究表明, 施氮促进了土壤自养呼吸和异养呼吸, 但随着施氮量增加这种促进作用有所下降[32]。综合以上结果表明, 在不同森林生态系统下, 氮素添加对土壤各组分呼吸的影响是有所不同的。同时, 还可以发现, 氮添加对土壤呼吸的影响, 可能会随施氮量的变化而变化, 施氮量越高, 对土壤呼吸的促进作用反而有降低的可能。

### 3. 氮添加作用下土壤呼吸影响因子

森林土壤呼吸施氮后的增加、减少与稳定, 既与土壤的温度、湿度和土壤酸碱性等环境因素相关, 也是森林生态系统中土壤微生物、凋落物和根系生物量等共同作用的结果, 本节主要讨论土壤微生物、凋落物和植被生物量对氮添加作用何响应以及其进一步对土壤呼吸的影响。

#### 3.1. 氮添加作用下土壤微生物对土壤呼吸的影响

土壤微生物是土壤中物质转化的动力, 是土壤生态系统的重要组成部分, 在土壤生态系统的物质循环和能量流动中起到至关重要的作用[33]。大气氮沉降直接或间接影响土壤微生物的生长、繁殖和活动, 并通过改变土壤的有效氮含量、C/N、土壤 pH、凋落物分解过程等影响土壤微生物群落的结构和功能。而土壤微生物活动是土壤异养呼吸的重要来源, 当森林生态系统为氮限制时, 施氮可以提高土壤有效氮含量, 为土壤微生物的生长繁殖提供丰富的养分来源, 影响土壤微生物活性和组成, 从而影响土壤呼吸。

一方面, 氮素添加刺激土壤微生物活性或增加微生物量从而促进土壤微生物呼吸, 提高土壤呼吸速率。在亚热带森林实验研究表明, 单施无机氮肥对土壤微生物生物量影响不大, 但是使用无机氮和有机氮比例为 3:7 混合施肥时, 土壤酶和微生物生物量表现出最高的活性, 此研究表明混施氮肥可以提高土壤微生物生物量[34]。在新罕布什尔州北方阔叶林进行长达八年施氮实验表明, 施肥地块的相应微生物生长效率较高, 总矿化率较高。施氮肥刺激了微生物的生长和周转速率, 从而提高土壤呼吸[35]。在德国的一个成熟山毛榉林进行氮素添加实验发现, 处理后土壤中有效氮的浓度提高, 促进了呼吸反应, 尽管土壤微生物总生物量保持不变, 但对氮有正生长反应的微生物的百分比增加了, 此实验依旧证明了土壤微生物呼吸对氮添加具有正响应从而促进土壤总呼吸[36]。

另一方面, 氮添加也可能抑制土壤微生物活性, 减少土壤微生物生物量, 降低土壤呼吸。例如, 在两个富氮热带森林施氮发现, 施氮抑制土壤氧化酶活性, 降低微生物周转速率, 从而减少土壤异养呼吸[37]。在哈佛森林实验研究发现, 氮的添加降低了微生物的活性, 从而降低了现场的  $CO_2$  产量, 并培育无根土壤进行土壤呼吸测量, 进一步证实微生物活性降低是导致土壤总呼吸降低原因之一[38]。研究中国西部多雨地区常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应, 分析其与土壤微生物的相互关系, 也得出氮添加抑制土壤微生物活性从而影响土壤呼吸的类似结果[39]。除此之外, 有研究表明, 施氮对土壤微生物活性和微生物量并无显著影响, 在紫金山森林的实验, 证实了这一结果[40]。甚至还有研究表明, 施氮即使

造成土壤微生物有所改变, 但是仍无法进一步影响土壤呼吸。在阿拉斯加北部森林进行的实验研究, 证明了施氮改变了微生物群落组成, 而未进一步影响土壤呼吸这一结果[41]。综上所述可以发现, 即使在施氮对微生物生物量没有影响的前提下, 氮添加也有可能影响某一生态系统中对氮素有正生长反应的微生物的百分比, 从而影响土壤呼吸, 所以研究氮添加对微生物土壤呼吸的影响, 不能单一从微生物生物量增减的角度判断。

### 3.2. 氮添加作用下凋落物对土壤呼吸的影响

凋落物一般是指自然界植物在生长发育的过程中所产生的新陈代谢产物, 凋落物的分解会影响土壤有机物的组成和活性[42] [43]。大气氮沉降和 CO<sub>2</sub> 的增加, 通常会刺激森林地上净初级生产力(NPP) [44], 改变土壤凋落物输入的质量和数量以及凋落物分解速率[45], 控制养分循环、土壤腐殖质形成、土壤肥力等[46], 而土壤微生物群落和呼吸由于所吸收的凋落物养分的增多或减少也将随之产生改变, 这种全球范围内的变化将对土壤呼吸和全球气候变化产生巨大的影响。

尽管有许多变量影响凋落物的分解, 但气候变化是其主导因素, 一般来说, 受大气 CO<sub>2</sub> 的增多以及全球气候变暖的影响, 如果土壤水分充足, 全球变暖只会增加凋落物的分解速率[47]。但是近年来许多研究发现, 虽然凋落物输入可通过改变碳有效性直接影响土壤呼吸, 还可以通过对土壤微生物的活动和土壤小气候的改变间接影响土壤呼吸, 但是凋落物分解可以通过氮添加进行平衡和调节进而作用于土壤呼吸。一方面氮添加可以增加凋落物中的氮含量, 降低其碳氮比, 提高凋落物的分解速率。例如, 在紫金山实验表明, 所有四种氮肥施加实验形式均显著加快阔叶林凋落物分解速率, 其中有两种氮肥形式显著加快针叶林凋落物分解速率, 并由此推断氮沉降导致的亚热带森林凋落物分解速率加速的长期后果, 可能是地下储存的碳释放到大气中[48]。还有实验表明, 长期沉积导致凋落物中 N 和其他养分浓度增加, 富含氮养分的植物凋落物的初始分解通常高于氮养分含量较低的凋落物[49]。更有实验表明, 在不添加氮的处理中, 微生物可能受到氮限制, 无法利用不同的凋落物基质。在较高的氮沉积下, 微生物可能已经从氮限制中释放出来, 并能够利用更多多样的基质, 所以在高氮沉降水平下, 种内凋落物多样性对土壤呼吸的影响最为显著[50]。

另一方面, 也有许多实验研究表明, 氮添加对凋落物的数量和分解速率具有抑制作用。例如, 研究氮添加对热带常绿阔叶林凋落物产量和养分的影响发现, 高氮沉降抑制凋落物的产生[51]。在中国热带三种森林类型(马尾松林、松阔叶混交林和成熟季风常绿阔叶林)连续施氮 2 年多实验结果表明, 施氮显著抑制了松林和成熟林凋落物分解速率[52]。在中国四川盆地西部边缘的五个森林进行氮添加实验也得出类似的结果, 这种氮对凋落物分解的抑制作用主要可以解释为外源无机氮对木质素分解的抑制作用[53]。此外, 还有实验表明, 模拟氮沉降对凋落物分解并无显著影响, 单靠氮的有效性, 无论是外源的还是内源的, 都不能控制凋落物的分解速率[54]。综合上述, 这种凋落物分解对氮添加的不同反应可能与森林生态系统是否为氮限制、森林树木木质素含量的多少有关, 且从以上结果可以得知, 对于受大气氮沉降影响, 土壤呼吸速率过高的森林生态系统, 可以适当进行去除凋落物处理, 从而为平衡森林生态系统碳循环做出贡献。

### 3.3. 氮添加作用下根系生物量对土壤呼吸的影响

根系是植物在土壤中的唯一器官, 虽然根系生物量只占总生物量的 5% 左右, 但是植物根系呼吸对土壤呼吸的贡献很大。有许多研究表明, 可以通过外源氮输入来影响根系生物量, 所以准确估计氮添加作用下的根系生物量变化对森林生态系统地下碳循环至关重要[55]。粗根含有大部分生物量, 但粗根的呼吸作用较低, 因此, 施氮对细根的影响可能会极大地影响植物根系呼吸和相关的根际呼吸。由于不同生态系统的土壤氮养分情况、环境条件不同, 所以细根特征对氮沉降的响应不一致, 主要包括促进、抑制和无影响。

许多研究表明, 施加氮会增加植物细根生物量和根系呼吸, 从而促进土壤呼吸。比如, 在亚热带竹林生态系统中实验表明, 土壤中有效氮的增加可能刺激细根生长, 增加细根组织中的氮浓度, 增强新陈代谢和呼吸[56]。在华西雨屏区苦竹林中研究也发现, 土壤呼吸与根系生物量和细根 N 含量呈显著正相关, 这可能是由于氮沉降使细根生物量和代谢强度增加, 并通过增加微生物活性促进了根际土壤呼吸[57]。但是, 在许多氮饱和生态系统中, 氮添加可能会减少细根生物量或对其没有影响。比如在热带桉树人工林中无 N 处理的细根生物量显著高于施氮处理的[58]。在中国落叶松和水曲柳人工林地研究发现施氮同时抑制了细根生物量和土壤呼吸[59]。在中国南方一个热带森林中施氮后发现, 土壤呼吸的减少发生在温暖和潮湿的生长季节, 与土壤微生物活性和细根生物量的减少有关[18]。在某亚热带樟树人工林中进行实验也得到类似的结果[60]。还有实验表明, 虽然土壤呼吸和植物细根生物量呈正相关, 但是施氮不影响两个树种的细根产量[61]。在亚热带幼林实验表明, 在特定条件下, 施氮对细根的年细根产量、死亡率和周转率没有影响[62]。

## 4. 结论与展望

### 4.1. 氮添加对森林土壤呼吸及其各组分呼吸共同作用研究

土壤呼吸作为一个复杂的生态学过程, 受林型、温度、湿度、土壤酸碱性及人类活动等多种外部因素的影响。而从其具体内部产生途径来看, 异养呼吸和自养呼吸作为内部作用呼吸源, 共同作用于土壤呼吸。综合总结许多研究发现, 土壤呼吸各组分对其总呼吸通量的贡献比例有所不同, 所以土壤呼吸的复杂性使区分土壤呼吸各组分的呼吸强度成为必要, 然而许多研究专注于氮素添加对土壤呼吸总通量的影响, 忽视了内部各组分呼吸数据的记录和分析。土壤各组分呼吸所利用的碳源不同, 对土壤呼吸的贡献也有一定的差异, 对全球变化的作用也不同, 只有了解土壤各组分呼吸在土壤总呼吸中的比例, 才能精确了解不同森林生态系统土壤呼吸的内部作用机制。所以精确区分各组分呼吸贡献, 了解其内在作用机制, 是今后研究的重要方向。

### 4.2. 氮添加影响下土壤呼吸影响因子共同作用研究

土壤微生物呼吸和根系生物量分别是  $R_h$  和  $R_a$  的重要来源, 凋落物是土壤呼吸重要的外部影响因素。所以氮添加作用下, 土壤微生物、凋落物和根系生物量等对于土壤呼吸贡献较大的因素不容忽视。汇总分析其作用原因发现, 从土壤微生物角度来看, 氮的富集可以促使许多生态系统中的微生物生物量增多或减少, 并相应地影响土壤呼吸。这可能是由于当森林生态系统为氮限制时, 施氮会促进该森林生态系统微生物活性的增加。而当施氮导致凋落物分解速率降低时, 会对土壤微生物活性降低和生长受限; 对于凋落物层面来说, 低木质素含量和高木质素含量的凋落物对氮的添加有明显的分解反应, 通常木质素含量低的凋落物能够在氮添加作用下加速分解, 所以木质素的含量多少是影响凋落物分解速率的重要因素; 从根系生物量来看, 也发现许多研究证明氮添加可以通过调控根系生物量来调节根系呼吸, 从而影响土壤呼吸, 这主要是由于根系生物量的多少对土壤呼吸起到直接的影响作用。所以关于氮沉降对土壤呼吸的作用影响, 应综合土壤内外部共同作用因素进行实验、研究和分析, 才能深入了解通过调节氮素含量影响土壤呼吸, 促进全球碳循环的理论方法。因此, 深入理解氮沉降效应和氮沉降对土壤呼吸作用机制应该是未来研究的重点。

## 参考文献

- [1] Janssens, I.A., Dieleman, W., Luyssaert, S., *et al.* (2010) Reduction of Forest Soil Respiration in Response to Nitrogen Deposition. *Nature Geoscience*, 3, 315-322. <https://doi.org/10.1038/ngeo844>

- [2] Lü, C.Q. and Han, Q. (2007) Spatial and Temporal Patterns of Nitrogen Deposition in China: Synthesis of Observational Data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **4**, 15-19. <https://doi.org/10.1029/2006JD007990>
- [3] Zhang, W.A., Wen, X.A., Qi, L.A., *et al.* (2018) Changes of Nitrogen Deposition in China from 1980 to 2018. *Environment International*, **144**, 35-39.
- [4] Reay, D.S., Dentener, F., Smith, P., *et al.* (2008) Global Nitrogen Deposition and Carbon Sinks. *Nature Geoscience*, **1**, 430-437. <https://doi.org/10.1038/ngeo230>
- [5] Beachley, G., Puchalski, M., Rogers, C., *et al.* (2018) A Summary of Long-Term Trends in Sulfur and Nitrogen Deposition in the United States: 1990-2013.
- [6] Grennfelt, P. and Hultberg, H. (1986) Effects of Nitrogen Deposition on the Acidification of Terrestrial and Aquatic Ecosystems. *Water Air & Soil Pollution*, **30**, 945-963. <https://doi.org/10.1007/BF00303359>
- [7] Wamelink, G., Dobben, H., Mol-Dijkstra, J.P., *et al.* (2009) Effect of Nitrogen Deposition Reduction on Biodiversity and Carbon Sequestration. *Forest Ecology & Management*, **258**, 1774-1779. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.024>
- [8] Cambui, C.A., Svennerstam, H., Gruffman, L., *et al.* (2011) Patterns of Plant Biomass Partitioning Depend on Nitrogen Source. *PLoS ONE*, **6**, e19211. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019211>
- [9] 陈骥, 曹军骥, 刘玉, 等. 氮素添加对土壤呼吸影响的研究进展[J]. 草原与草坪, 2013, 33(6): 7.
- [10] 付若仙, 余景松, 张云彬, 等. 氮添加下城市森林土壤呼吸动态变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 52-60.
- [11] Post, W.M., Emanuel, W.R., Zinke, P.J., *et al.* (1982) Soil Carbon Pools and World Life Zones. *Nature*, **298**, 156-159. <https://doi.org/10.1038/298156a0>
- [12] Zheng, P., Wang, D., Yu, X., *et al.* (2021) Effects of Drought and Rainfall Events on Soil Autotrophic Respiration and Heterotrophic Respiration. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **308**, Article ID: 107267. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107267>
- [13] 周健民, 沈仁芳. 土壤学大辞典[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] He, T., Wang, Q., Wang, S., *et al.* (2016) Nitrogen Addition Altered the Effect of Belowground C Allocation on Soil Respiration in a Subtropical Forest. *PLoS ONE*, **11**, e0155881. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155881>
- [15] 郭亮. 氮沉降对长白山天然次生林土壤呼吸的影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
- [16] 余景松. 短期氮沉降对万佛山麻栎林土壤呼吸及组分的影响机制[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- [17] Jassal, R.S., Black, T.A., Trofymow, J.A., *et al.* (2010) Soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O Flux Dynamics in a Nitrogen-Fertilized Pacific Northwest Douglas-Fir Stand. *Geoderma*, **157**, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.002>
- [18] Mo, J.M., Zhang, W., Zhu, W., *et al.* (2010) Nitrogen Addition Reduces Soil Respiration in a Mature Tropical Forest in Southern China. *Global Change Biology*, **14**, 403-412. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01503.x>
- [19] Burton, A.J., Pregitzer, K.S., Crawford, J.N., *et al.* (2010) Simulated Chronic NO<sub>3</sub>-Deposition Reduces Soil Respiration in Northern Hardwood Forests. *Global Change Biology*, **10**, 1080-1091. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00737.x>
- [20] Rdb, A., Ed, B., Ks, B., *et al.* (2004) Chronic Nitrogen Additions Reduce Total Soil Respiration and Microbial Respiration in Temperate Forest Soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, **196**, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.011>
- [21] Robertson, P.A.P. (2006) The Effect of Increased N Deposition on Nitrous Oxide, Methane and Carbon Dioxide Fluxes from Unmanaged Forest and Grassland Communities in Michigan. *Biogeochemistry*, **79**, 315-337. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-5313-x>
- [22] Allen, J. (2016) The Effects of Long Term Nitrogen Fertilization on Forest Soil Respiration in a Subalpine Ecosystem in Rocky Mountain National Park.
- [23] Fernández-Alonso, M.J., Díaz-Pinés, E. and Rubio, A. (2021) Drivers of Soil Respiration in Response to Nitrogen Addition in a Mediterranean Mountain Forest. *Biogeochemistry*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00827-2>
- [24] Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Kitzler, B., *et al.* (2008) Experimental Forest Soil Warming: Response of Autotrophic and Heterotrophic Soil Respiration to a Short-Term 10 °C Temperature Rise. *Plant and Soil*, **303**, 323-330. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9511-2>
- [25] 庞蕊, 刘敏, 李美玲, 等. 土壤碳排放组分分区的研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 9.
- [26] Olsson, P., Linder, S., Giesler, R., *et al.* (2010) Fertilization of Boreal Forest Reduces Both Autotrophic and Heterotrophic Soil Respiration. *Global Change Biology*, **11**, 1745-1753. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001033.x>

- [27] Liu, G., Yan, G., Chang, M., *et al.* (2021) Long-Term Nitrogen Addition Further Increased Carbon Sequestration in a Boreal Forest. *European Journal of Forest Research*, **140**, 1113-1126. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01386-9>
- [28] Wang, Q.K., *et al.* (2017) N and P Fertilization Reduced Soil Autotrophic and Heterotrophic Respiration in a Young *Cunninghamia lanceolata* Forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **232**, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.007>
- [29] Song, H.H., *et al.* (2020) Precipitation Variability Drives the Reduction of Total Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in Response to Nitrogen Addition in a Temperate Forest Plantation. *Biology and Fertility of Soils*, **56**, 273-279. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01417-z>
- [30] Liu, Y., Chen, Q., Wang, Z., *et al.* (2019) Nitrogen Addition Alleviates Microbial Nitrogen Limitations and Promotes Soil Respiration in a Subalpine Coniferous Forest. *Forests*, **10**, 1038. <https://doi.org/10.3390/f10111038>
- [31] Liu, G., Liu, T., Yan, G., *et al.* (2020) Effects of Long-Term Nitrogen Addition on Soil Respiration and Its Components in a Boreal Forest. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-57463/v1>
- [32] Wang, J., *et al.* (2019) Short-Term Effects of Nitrogen Deposition on Soil Respiration Components in Two Alpine Coniferous Forests, Southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Forestry Research*, **30**, 289-301. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0678-6>
- [33] 周晶, 姜昕, 马鸣超, 等. 长期施氮对土壤肥力及土壤微生物的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(6): 8-13.
- [34] Guo, P., Wang, C., Jia, Y., *et al.* (2011) Responses of Soil Microbial Biomass and Enzymatic Activities to Fertilizations of Mixed Inorganic and Organic Nitrogen at a Subtropical Forest in East China. *Plant and Soil*, **338**, 355-366. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0550-8>
- [35] Fisk, M.C. and Fahey, T.J. (2001) Microbial Biomass and Nitrogen Cycling Responses to Fertilization and Litter Removal in Young Northern Hardwood Forests. *Biogeochemistry*, **53**, 201-223. <https://doi.org/10.1023/A:1010693614196>
- [36] Scheu, J.S. (1999) Response of Soil Microorganisms to the Addition of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in a Forest Rendzina. *Soil Biology and Biochemistry*, **31**, 859-866. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00185-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00185-0)
- [37] Cusack, D.F., Torn, M.S., McDowell, W.H., *et al.* (2010) The Response of Heterotrophic Activity and Carbon Cycling to Nitrogen Additions and Warming in Two Tropical Soils. *Global Change Biology*, **16**, 2555-2572. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02131.x>
- [38] Bowden, R.D., Davidson, E., Savage, K., *et al.* (2004) Chronic Nitrogen Additions Reduce Total Soil Respiration and Microbial Respiration in Temperate Forest Soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, **196**, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.011>
- [39] Xiang, Y., Huang, C., Hu, T., *et al.* (2016) Responses of Soil Respiration to Simulated Nitrogen Deposition in Evergreen Broad-Leaved Forest in Rainy Area of Western China. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, **296**, 125-135.
- [40] Lv, Y., Wang, C., Wang, F., *et al.* (2013) Effects of Nitrogen Addition on Litter Decomposition, Soil Microbial Biomass, and Enzyme Activities between Leguminous and Non-Leguminous Forests. *Ecological Research*, **28**, 793-800. <https://doi.org/10.1007/s11284-013-1060-y>
- [41] Allison, S.D., Czimczik, C.I. and Treseder, K.K. (2010) Microbial Activity and Soil Respiration under Nitrogen Addition in Alaskan Boreal Forest. *Global Change Biology*, **14**, 1156-1168. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01549.x>
- [42] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展[J]. *林业科学*, 2006, 42(4): 93-100.
- [43] Hättenschwiler, S. and Bretscher, D. (2010) Isopod Effects on Decomposition of Litter Produced under Elevated CO<sub>2</sub>, N Deposition and Different Soil Types. *Global Change Biology*, **7**, 565-579. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00402.x>
- [44] Lebauer, D.S. and Treseder, K.K. (2008) Nitrogen Limitation of Net Primary Productivity in Terrestrial Ecosystems Is Globally Distributed. *Ecology*, **89**, 371-379. <https://doi.org/10.1890/06-2057.1>
- [45] Hines, J., Reyes, M., Mozder, T.J., *et al.* (2015) Genotypic Trait Variation Modifies Effects of Climate Warming and Nitrogen Deposition on Litter Mass Loss and Microbial Respiration. *Global Change Biology*, **20**, 3780-3789. <https://doi.org/10.1111/gcb.12704>
- [46] Fang, H. and Mo, J.M. (2006) Effects of Nitrogen Deposition on Forest Litter Decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, **26**, 3127-3136.
- [47] Akir, M. (2019) Climate Change Effects on Litter Decomposition and Soil Decomposers Community. *International Conference on Climate Change and Forestry*, **393**, 69-82.
- [48] Wang, C.Y., *et al.* (2011) Response of Litter Decomposition and Related Soil Enzyme Activities to Different Forms of Nitrogen Fertilization in a Subtropical Forest. *Ecological Research*, **26**, 505-513.



- <https://doi.org/10.1007/s11284-011-0805-8>
- [49] Berg, B. and Matzner, E. (1997) Effect of N Deposition on Decomposition of Plant Litter and Soil Organic Matter in Forest Systems. *Environmental Reviews*, **5**, 1-25. <https://doi.org/10.1139/a96-017>
- [50] Hunter, M.M. (2003) Intraspecific Litter Diversity and Nitrogen Deposition Affect Nutrient Dynamics and Soil Respiration. *Oecologia*, **136**, 124-128. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1253-0>
- [51] Zhou, J., Cui, J., Jia, Y., *et al.* (2013) Response of Nitrogen Deposition Simulation on Litter Production and Macronutrients of Evergreen Broad-Leaved Forest. *Journal of Northeast Forestry University*, **13**, 12-18.
- [52] Fang, H., Mo, J., Peng, S., *et al.* (2007) Cumulative Effects of Nitrogen Additions on Litter Decomposition in Three Tropical Forests in Southern China. *Plant and Soil*, **297**, 233-242. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9339-9>
- [53] Chen, L.H., *et al.* (2014) Nitrogen Addition Significantly Affects Forest Litter Decomposition under High Levels of Ambient Nitrogen Deposition. *PLoS ONE*, **9**, e88752. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088752>
- [54] Prescott, C.E. (1995) Does Nitrogen Availability Control Rates of Litter Decomposition in Forests? *Plant & Soil*, **168/169**, 83-88. <https://doi.org/10.1007/BF00029316>
- [55] Burton, A.J., Zogg, G.P., Pregitzer, K.S., *et al.* (1997) Effect of Measurement CO<sub>2</sub> Concentration on Sugar Maple Root Respiration. *Tree Physiology*, **17**, 421-427. <https://doi.org/10.1093/treephys/17.7.421>
- [56] Tu, L.H., Hu, T.X., Zhang, J., *et al.* (2013) Nitrogen Addition Stimulates Different Components of Soil Respiration in a Subtropical Bamboo Ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, **58**, 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.12.005>
- [57] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 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.
- [58] Jourdan, C., Silva, E.V., GonAlves, J., *et al.* (2008) Fine Root Production and Turnover in Brazilian Eucalyptus Plantations under Contrasting Nitrogen Fertilization Regimes. *Forest Ecology & Management*, **256**, 396-404. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.034>
- [59] Jia, S., Wang, Z. and Li, X. (2010) N Fertilization Affects on Soil Respiration, Microbial Biomass and Root Respiration in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* Plantations in China. *Plant and Soil*, **333**, 325-336. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0348-8>
- [60] Yan, W. (2016) The Effects of Nitrogen Addition on the Soil Microbial Biomass and Fine Root Biomass in *Cinnamomum camphora* Plantation.
- [61] Lee, K.H. and Jose, S. (2003) Soil Respiration, Fine Root Production, and Microbial Biomass in Cottonwood and Loblolly Pine Plantations along a Nitrogen Fertilization Gradient. *Forest Ecology & Management*, **185**, 263-273. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00164-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00164-6)
- [62] Xiong, D., Yang, Z., Chen, G., *et al.* (2018) Interactive Effects of Warming and Nitrogen Addition on Fine Root Dynamics of a Young Subtropical Plantation. *Soil Biology and Biochemistry*, **123**, 180-189. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.009>