

氮稳定同位素自然丰度法在森林生态系统氮循环中的应用

尹志伟, 王庆贵*

黑龙江大学现代农业与生态环境学院, 黑龙江 哈尔滨
Email: *qgwang1970@163.com

收稿日期: 2021年4月4日; 录用日期: 2021年5月6日; 发布日期: 2021年5月18日

摘要

氮素是生态系统中的限制因子, 近年来, 人类生产生活方式的改变导致大气氮沉降急剧增加, 对生态系统的结构和功能产生一定的影响。因此研究大气氮沉降对生态系统的影响已经成为一个具有全球意义的话题。植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 被认为是研究氮循环的理想工具, 能够很好的反应氮循环对氮沉降的响应。本文从 ^{15}N 自然丰度法的原理、研究进展、影响因子等几方面进行了总结说明, 旨在为以后的研究提供理论基础。

关键词

氮沉降, ^{15}N 自然丰度, 森林生态系统, 氮循环

Application of Nitrogen Stable Isotope Natural Abundance Method to Nitrogen Cycle in Forest Ecosystem

Zhiwei Yin, Qinggui Wang*

College of Modern Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin Heilongjiang
Email: *qgwang1970@163.com

Received: Apr. 4th, 2021; accepted: May 6th, 2021; published: May 18th, 2021

Abstract

Nitrogen is a limiting factor in the ecosystem. In recent years, changes in human production and

*通讯作者。

lifestyle have led to a sharp increase in atmospheric nitrogen deposition, which has a certain impact on the structure and function of the ecosystem. Therefore, studying the impact of atmospheric nitrogen deposition on ecosystems has become a topic of global significance. Plant and soil $\delta^{15}\text{N}$ is considered to be an ideal tool for the study of nitrogen cycle, which can well reflect the response of nitrogen cycle to nitrogen deposition. Therefore, this article summarizes the principles, research progress, and influence factors of the ^{15}N natural abundance method in order to provide a theoretical basis for future research.

Keywords

Nitrogen Deposition, ^{15}N Natural Abundance, Impact Factor

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

氮(N)作为生态系统中的限制因子对树木生长有重要的影响[1], 通过生物固氮和有机质的周转等, N可以缓慢的被植物利用[2] [3], 维持生态系统的正常结构和功能。这一点在北方森林中尤为明显, 已有研究证明 N 的增加显著增加了北方森林生态系统的初级生产力和碳的吸收[4]。近年来, 人为排放含 N 化合物导致的大气 N 沉降速率逐渐增加, 对生态系统 N 循环产生影响, 甚至影响到生态系统的结构和功能。因此研究大气 N 沉降对森林生态系统的影响已经成为一个具有全球意义的话题[5]。

植物和土壤的 ^{15}N 自然丰度是许多生物地球化学过程的净结果[6], 有可能揭示 N 循环的空间和时间模式以及 N 循环是如何被扰动改变的[7], 可以提供 N 循环的综合信息[8], 因此被认为是研究 N 动态的有力工具, 被广泛的应用于生态系统氮循环的研究中[9]。之前的一些研究已经证明了植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与大气 N 沉降、N 保留能力、气态 N 损失、N 的可利用性以及菌根类型之间的关系[8] [10] [11] [12]

为此本文将重点介绍近年 ^{15}N 自然丰度法技术在研究 N 沉降对生态系统 N 循环影响的应用与研究进展。

2. ^{15}N 自然丰度法的原理

自然状态下, N 存在 ^{14}N 和 ^{15}N 两种同位素, ^{15}N 自然丰度($\delta^{15}\text{N}$)技术法主要是利用 N 循环过程中的同位素分馏作用。在 N 循环的过程中(氮的固定、转化和输出) [13], 存在着不同程度的同位素分馏效应, 导致反应产物和底物之间出现不同的同位素比值($^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 或 $\delta^{15}\text{N}$), 例如在植物通过菌根吸收 N 的过程中, 菌根会发生分馏效应, 致使植物吸收较轻的 ^{14}N , 而较重的 ^{15}N 则储存在土壤的剩余 N 库中, 导致土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 增加。N 沉降的增加会改变或促进 N 循环过程, 这些过程伴随着同位素分馏, 一般情况下土壤矿化、硝化作用会使得底物 $\delta^{15}\text{N}$ 升高(^{15}N 富集)。在土壤 N 淋失过程中, 通常 ^{15}N 贫化的 NO_3^- 淋失, 而 ^{15}N 富集的 NO_3^- 保留在生态系统中[14]。N 添加通过对氮循环的影响间接改变了植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的组成, 因此植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 作为表征生态系统 N 循环的理想工作, 被越来越多应用到生态系统 N 循环的研究中[15]。

3. ^{15}N 自然丰度研究进展

在一段时间内, 国内 N 稳定同位素技术的应用只局限于农业生态系统中的 N 循环研究中, 且更多地是应用同位素示踪技术。伴随着森林生态系统 N 沉降日渐严重, 研究 N 沉降给森林生态系统带来的影响也是十分必要的。之前的研究方法中存在着各种局限性, 例如之前应用较多的野外模拟 N 沉降法, 其优

点在于可以人为控制施 N 的时间和梯度, 但是其缺点在于试验周期较长尤其是在 N 限制的生态系统中。N 沉降梯度法虽然克服了施 N 时间长、不能很好的模拟自然变化的特点, 但是由于生态系统受多种因素(土地利用历史、植物组成)的影响, 限制了系统间的可比性, 使得研究结果缺乏说服力[16], 而 ^{15}N 自然丰度法被认为是自然且适用于大面积区域的对比研究且不受时间空间的限制, 取样测样简单, 因此被越来越多的应用到研究 N 沉降对森林生态系统 N 循环的影响研究中[17]。

3.1. $\delta^{15}\text{N}$ 用于指示植物的氮源

研究证明, 影响植物 $\delta^{15}\text{N}$ 的主要因素包括 N 来源和土壤 N 的利用形式[18], 生长在 N 沉降严重地区的植物 $\delta^{15}\text{N}$ 要比其他地区低很多, 例如主要使用 ^{15}N 富集土壤 N 的植物比使用大气沉积 N 的植物具有更高的 $\delta^{15}\text{N}$, 这可能是因为植物直接通过叶片、毛孔、细根吸收了沉降的 N [9], 化石燃料燃烧排放的是 ^{15}N 贫化的 NO_3^- -N, 同时 NH_4^+ 挥发过程是一个高度分馏的过程并产生 ^{15}N 贫化的 NH_4^+ -N [19], 因此吸收沉降的 N 会降低植物 $\delta^{15}\text{N}$ [20]。Gunderson 等为了评估 N 沉降下不同植物种间 $\delta^{15}\text{N}$ 自然丰度的差异, 作出以下假设: 由于不同物种间 N 获取机制的差异, 包括植物利用 N 的主要来源和形态, 在环境和年代施 N 条件下, 叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 在物种间存在显著差异。结果表明观察到的叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 的物种差异归因于 N 获取的差异, 主要是因为不同植物物种间使用 N 的主要来源和形式不同造成的[21]。例如在沿海地区的城乡地带, 植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 是贫化的, 因为在富 N 条件下, NO_3^- -N 是可供植物利用的有效 N 的主要形式, 且作为硝化作用的产物, NO_3^- -N 相对于 NH_4^+ -N 和 DON 贫化 $\delta^{15}\text{N}$ [7] [22], 如果植物使用 DON 和 NH_4^+ -N 作为 N 源, 那么植物可能更富集 $\delta^{15}\text{N}$ 。

3.2. 植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化对生态系统中 N 状态变化的指示作用

N 状态是一个相对性的概念, 是指 N 供应与 N 需求之间的关系[23]。当一个生态系统处于 N 限制状态时, 植物几乎吸收了所有可利用的 N, 此时植物 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 相似[24]。当外源 N 输入超过生物的需求量时, 土壤 N 淋失或气态 N 损失增加, 导致植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 增加[25], 因此随着 N 有效性的增加, 植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 是增加的。同时, 许多研究证实生态系统越接近 N 饱和, 植物和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值会越高 [10], [26]通过调查发现, 植物叶片含 N 量和 $\delta^{15}\text{N}$ 在 N 饱和地区显著高于 N 限制地区。植物和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 作为 N 循环过程综合作用的结果, 可以用做生态系统 N 状态及其 N 饱和的有力指标[27]。

3.3. $\delta^{15}\text{N}$ 对生态系统氮转化速率的指示作用

森林生态系统中的 N 循环主要包括生态系统内部的 N 循环以及与周围生态环境之间的相互作用两部分。N 在土壤中的转化十分复杂, 矿化、硝化、反硝化、淋失等过程受土壤养分状况的调控[28], 外部 N 的输入对 N 转化过程产生影响, 进而影响植物和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 。已有研究表明, 植物或土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 能够对森林生态系统 N 矿化和 N 硝化速率起到一定程度的指示作用, 植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤净 N 矿化、硝化成正相关关系[29], Templer 等(2007)等为了研究植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 对矿化和硝化速率的指示潜力, 分别研究了四种林分的植物叶片、细根、凋落物和有机土壤的 $\delta^{15}\text{N}$, 结果表明细根和土壤较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 与林分内较高的矿化和硝化速率呈显著正相关, 这说明植物细根和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 可以作为指示土壤 N 矿化和硝化速率的指标[30], Watmough 等发现叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 随硝态 N 的淋失而增加[31]。然而[32]等研究表明叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤净 N 矿化呈负相关, 这是因为植物 $\delta^{15}\text{N}$ 可能受土壤无机 N 来源以及土壤中 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 的控制。

3.4. 环境因子对 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响

3.4.1. 温度

在全球范围内, 生态系统中植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤特性和气候之间存在显著的关系。生态系统 N 循

环受温度影响, 温度通过影响土壤微生物活性以及植物体内相关酶的活性影响 N 转化过程[24], 进而通过 N 转化过程中的同位素分馏作用影响植物和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 。Martinelli 等研究了多个国家内的热带森林和温带森林植物 $\delta^{15}\text{N}$, 通过对比发现热带森林的植物 $\delta^{15}\text{N}$ 高于温带森林植物 $\delta^{15}\text{N}$ [33]。从全球来看, 植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与年平均气温正相关, 表明气候对 N 素循环有直接影响[34]。

3.4.2. 降水

降水作为影响生物地球化学循环的重要因素, 在土壤 N 库调控中发挥的作用较大[35], 因此降水对植物和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在一定的影响。之前的学者已经对植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与降水的关系进行了大量的研究, 结果表明植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与降水之间存在着显著的负相关, 尽管降水与叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 之间没有明显的断点, 但是平均而言, 降水每增加一个数量级, $\delta^{15}\text{N}$ 就降低 2.6%, [29], Austin 等调查了澳大利亚地区植物 $\delta^{15}\text{N}$ 与降水量的数据, 发现植物 $\delta^{15}\text{N}$ 随着降水量的增加而减少, 二者存在显著的负相关关系($P < 0.0001$, $R = -0.64$), 降雨量每增加 1000 mm, 植物 $\delta^{15}\text{N}$ 便降低 3.5‰ [36]。但是 Yang 等在调查研究青藏高原地区的高寒草原生态系统时却发现土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与降雨量之间并不存在显著关系[37]。

3.4.3. 海拔

海拔是生态系统 N 循环的影响因子之一, 海拔对 N 循环的影响是温度、湿度、光照以及土壤环境等多因素共同作用的结果[37]。目前, 已有很多关于植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与海拔之间关系的研究, 但是二者之间并不存在一定的规律性[38] [39] [40]。Liu 等发现中国西南部山区 1200 m 到 4500 m 之间的植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 随海拔的增加逐渐偏负, 并认为植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 在高海拔地区偏负是因为高海拔地区寒冷湿润的环境导致 N 矿化和硝化速率较低造成的[38]。Sah 在调查了松针和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与海拔之间的关系后, 同样发现随着海拔的增加, 松针和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 呈现偏负的趋势[41]。Liu 等调查了北京东灵山地区植物叶片随海拔之间的关系发现: 植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 随海拔变化之间的关系有正相关、负相关和不相关三种情况, 在低海拔地区, 降水是影响植物 $\delta^{15}\text{N}$ 的关键因素, 而在高海拔地区, 温度是影响植物 $\delta^{15}\text{N}$ 的关键因素[39]。但也有学者通过对青藏高原地区的植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 调查研究后发现二者之间也存在负相关关系, 研究者认为除了降水和温度对植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响外, 其他因子例如土壤特性、大气气体浓度、菌根类型等都可能起到了一定程度的影响, 但需要在进一步的研究中证明[40]。

3.4.4. 其他因素

在一些区域内, 气候因子对土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响是有限的, 土壤特性是决定土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的主要因子[42], 在之前的研究中已经证明土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 实际上随着土壤深度的增加而增加, 这是因为土壤有机质的组成和周转率发生了变化[43]。土壤 C/N 对土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响是存在的, 较高的土壤 C/N 通常代表着较低的可利用 N 以及较高的 N 保留率, 伴随着较少的 N 淋失(土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 高) [44]。土壤 pH 对 NH_4^+ 挥发过程有重要的影响, 因此可能影响植物和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ [40]。土壤质地对植物和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 产生影响, 在青藏高原地区, 植物 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤粘粒含量和粉粒含量呈负相关, 而土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 则呈现正相关趋势[37]。

与此同时, 不同菌根类型对土壤中 ^{15}N 的富集存在不同程度的影响, 因为在吸收 N 过程中, 菌根向寄主植物输送 ^{15}N 贫化的 N [45]。在菌根群中, 外生菌根植物中的叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 比丛枝菌根植物中的叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 更少, 这是因为在真菌到植物的 N 转移过程中, 外生菌根植物中的分馏更强[29] [46]。菌根真菌的存在被证明是芬兰森林生态系统中沿样带从南到北叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 富集最重要的原因之一, 与非菌根植物相比, 受菌根真菌感染的植物叶片中 $\delta^{15}\text{N}$ 减少了近 6%~7% [29]。

叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 会因为树种的不同而存在很大差异, 一些研究报告称: 针叶树的 $\delta^{15}\text{N}$ 往往低于阔叶树种 $\delta^{15}\text{N}$ [47], 同时生态系统 N 状态对叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 也才存在影响, 在 N 限制的系统叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化范围比在富

氮条件下大[48]。植物器官(叶、枝、茎和根)之间往往存在差异,这是由于N同化模式和N的再分配导致了植物 $\delta^{15}\text{N}$ 的变异[49][50],时间尺度上,有研究证明随着森林年龄的增长,它们变得富含N,而生态系统应该随着N流失而富含 ^{15}N [51]。

4. 展望

由于N循环的物理、生化过程中均伴随着不同程度的同位素分馏,导致生态系统中的不同N化合物具有不同的N同位素组成($\delta^{15}\text{N}$),因此N稳定同位素技术被认为是研究N循环的有效手段。尽管已经有大量的相关研究,但是许多不确定性还存在于前人研究的结果和结论中。所以在接下来的研究中,在全球变化的背景下,深入了解N循环各过程中发生的同位素分馏会加深我们对N循环的理解,同时对于评估N沉降对生态系统的影响也具有深远意义。

参考文献

- [1] 段洪浪, 刘菊秀, 邓琦, 陈小梅, 张德强. CO_2 浓度升高与氮沉降对南亚热带森林生态系统植物生物量积累及分配格局的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(3): 570-579.
- [2] Galloway, J. (1995) Acid Deposition: Perspectives in Time and Space. *Water, Air, & Soil Pollution*, **85**, 15-24. <https://doi.org/10.1007/BF00483685>
- [3] Vitousek, P.M., et al. (1997) Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Sources and Consequences. *Ecological Applications*, **7**, 737-750. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0737:HAOTGN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0737:HAOTGN]2.0.CO;2)
- [4] Schulte-Uebbing, L. and De vries, W. (2017) Global-Scale Impacts of Nitrogen Deposition on Tree Carbon Sequestration in Tropical, Temperate, and Boreal Forests: A Meta-Analysis. *Global Change Biology*, **24**, e416-e431. <https://doi.org/10.1111/gcb.13862>
- [5] Galloway, J. (1998) The Global Nitrogen Cycle: Changes and Consequences. *Environmental Pollution*, **102**, 15-24. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)80010-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)80010-9)
- [6] Sah, S.P. and Ilvesniemi, H.R. (2006) ^{15}N Natural Abundance of Foliage and Soil across Boreal Forests of Finland. *Biogeochemistry*, **80**, 277-288. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9023-9>
- [7] Fang, Y., Koba, K., Yoh, M., et al. (2013) Patterns of Foliar $\delta^{15}\text{N}$ and Their Control in Eastern Asian Forests. *Ecological Research*, **28**, 735-748. <https://doi.org/10.1007/s11284-012-0934-8>
- [8] Kameda, K., Koba, K., Hobara, S., et al. (2006) Pattern of Natural ^{15}N Abundance in Lakeside Forest Ecosystem Affected by Cormorant-Derived Nitrogen. *Hydrobiologia*, **567**, 69-86. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0052-0>
- [9] Fang, Y., Yoh, M., Koba, K., et al. (2011) Nitrogen Deposition and Forest Nitrogen Cycling along an Urban-Rural Transect in Southern China. *Global Change Biology*, **17**, 872-885. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02283.x>
- [10] Pardo, L.H., McNulty, S.G., Boggs, J.L., et al. (2007) Regional Patterns in Foliar ^{15}N across a Gradient of Nitrogen Deposition in the Northeastern US. *Environmental Pollution*, **149**, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.05.030>
- [11] Houlton, B.Z., Sigman, D.M. and Hedin, L. (2006) Isotopic Evidence for Large Gaseous Nitrogen Losses from Tropical Rainforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **103**, 8745-8750. <https://doi.org/10.1073/pnas.0510185103>
- [12] Mayor, J.R., Schuur, E.A.G., Mack, M.C., et al. (2012) Nitrogen Isotope Patterns in Alaskan Black Spruce Reflect Organic Nitrogen Sources and the Activity of Ectomycorrhizal Fungi. *Ecosystems*, **15**, 819-831. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9548-9>
- [13] Menyailo, O.V., Hungate, B.A., Lehmann, J., et al. (2003) Tree Species of the Central Amazon and Soil Moisture Alter Stable Isotope Composition of Nitrogen and Oxygen in Nitrous Oxide Evolved from Soil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, **39**, 41-52. <https://doi.org/10.1080/1025601031000096745>
- [14] 肖洋, 张翔, 王孟, 等. 鄱阳湖典型洲滩湿地植被叶片和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 特征分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 50-58.
- [15] 王焱. 海南尖峰岭热带山地雨林 ^{15}N 自然丰度及其分布特征的研究[M]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [16] Thomas, R.Q., Canham, C.D., Weathers, K.C., et al. (2009) Increased Tree Carbon Storage in Response to Nitrogen Deposition in the US. *Nature Geoscience*, **3**, 229-244. <https://doi.org/10.1038/ngeo721>
- [17] Pardo, L.H., Hemond, H.F., Montoya, J.P., et al. (2001) Long-Term Patterns in Forest-Floor Nitrogen-15 Natural Ab-

- undance at Hubbard Brook, NH. *Soil Science Society of America Journal*, **65**, 1279-1283.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541279x>
- [18] 周咏春, 程希雷, 樊江文. 植物氮同位素组成与其影响因子的关系研究进展[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 981-989.
- [19] Hastings, M.G., Jarvis, J.C. and Steig, E.J. (2009) Anthropogenic Impacts on Nitrogen Isotopes of Ice-Core Nitrate. *Science*, **324**, 1288. <https://doi.org/10.1126/science.1170510>
- [20] Cheng, W., Chen, Q., Xu, Y., *et al.* (2009) Climate and Ecosystem ^{15}N Natural Abundance along a Transect of Inner Mongolian Grasslands: Contrasting Regional Patterns and Global Patterns. *Global Biogeochemical Cycles*, **23**, GB2005. <https://doi.org/10.1029/2008GB003315>
- [21] Gurmesa, G.A., Lu, X., Gundersen, P., *et al.* (2019) Species Differences in Nitrogen Acquisition in Humid Subtropical Forest Inferred from ^{15}N Natural Abundance and Its Response to Tracer Addition. *Forests*, **10**, 991.
<https://doi.org/10.3390/f10110991>
- [22] Aber, J., McDowell, W., Nadelhoffer, K., *et al.* (1998) Nitrogen Saturation in Temperate Forest Ecosystems. *BioScience*, **48**, 921-934. <https://doi.org/10.2307/1313296>
- [23] Mclauchlan, K.K., Ferguson, C.J., Wilson, I.E., *et al.* (2010) Thirteen Decades of Foliar Isotopes Indicate Declining Nitrogen Availability in Central North American Grasslands. *New Phytologist*, **187**, 1135-1145.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03322.x>
- [24] Hgberg, P. (1998) Tansley Review No. 95: ^{15}N Natural Abundance in Soil-Plant Systems. *New Phytologist*, **137**, 179-203. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00808.x>
- [25] Nadelhoffer, K. (1994) Nitrogen Isotope Studies on Forest Ecosystems. In: Lajtha, K. and Michener, R., Eds., *Stable Isotopes in Ecology*, Blackwell, Oxford, 22.
- [26] Watmough, S. (2010) An Assessment of the Relationship between Potential Chemical Indices of Nitrogen Saturation and Nitrogen Deposition in Hardwood Forests in Southern Ontario. *Environmental Monitoring and Assessment*, **164**, 9-20. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0870-4>
- [27] Fang, H., Yu, G., Cheng, S., *et al.* (2011) Nitrogen-15 Signals of Leaf-Litter-Soil Continuum as a Possible Indicator of Ecosystem Nitrogen Saturation by Forest Succession and N Loads. *Biogeochemistry*, **102**, 251-263.
<https://doi.org/10.1007/s10533-010-9438-1>
- [28] Urakawa, R., Ohte, N., Shibata, H., *et al.* (2016) Factors Contributing to Soil Nitrogen Mineralization and Nitrification Rates of Forest Soils in the Japanese Archipelago. *Forest Ecology and Management*, **361**, 382-396.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.033>
- [29] Craine, J.M., *et al.* (2010) Global Patterns of Foliar Nitrogen Isotopes and Their Relationships with Climate, Mycorrhizal Fungi, Foliar Nutrient Concentrations, and Nitrogen Availability. *New Phytologist*, **183**, 980-992.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02917.x>
- [30] González-Prieto, S., Díaz-Ravi, A.M., Martí, N.A., *et al.* (2013) Effects of Agricultural Management on Chemical and Biochemical Properties of a Semiarid Soil from Central Spain. *Soil Tillage Research*, **134**, 49-55.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2013.07.007>
- [31] Hgbom, L., Nilsson, U., Ecology, G.R., *et al.* (2002) Nitrate Dynamics after Clear Felling Monitored by *in Vivo* Nitrate Reductase Activity (NRA) and Natural Abundance of *Deschampsia flexuosa* (L.) Trin. *Forest Ecology and Management*, **160**, 273-280. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00475-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00475-3)
- [32] Fang, H., Yu, G., Cheng, S., *et al.* (2010) Effects of Multiple Environmental Factors on CO_2 Emission and CH_4 Uptake from Old-Growth Forest Soils. *Biogeosciences*, **7**, 395-407. <https://doi.org/10.5194/bg-7-395-2010>
- [33] Martinelli, L.A., *et al.* (1999) Nitrogen Stable Isotopic Composition of Leaves and Soil: Tropical versus Temperate Forests. *Biogeochemistry*, **46**, 45-65. <https://doi.org/10.1007/BF01007573>
- [34] Amundson, R., *et al.* (2003) Global Patterns of the Isotopic Composition of Soil and Plant Nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles*, **17**, 1031. <https://doi.org/10.1029/2002GB001903>
- [35] Lin, L., Zhu, B., Chen, C., *et al.* (2016) Precipitation Overrides Warming in Mediating Soil Nitrogen Pools in an Alpine Grassland Ecosystem on the Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 31438.
<https://doi.org/10.1038/srep31438>
- [36] Austin, A.T. and Sala, O.E. (1999) Foliar Delta N-15 Is Negatively Correlated with Rainfall along the IGBP Transect in Australia. *Australian Journal of Plant Physiology*, **26**, 293-295. <https://doi.org/10.1071/PP98144>
- [37] Yang, Y., Ji, C., Robinson, D., *et al.* (2013) Vegetation and Soil ^{15}N Natural Abundance in Alpine Grasslands on the Tibetan Plateau: Patterns and Implications. *Ecosystems*, **16**, 1013-1024. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9664-1>
- [38] Liu, X.Z. and Wang, G. (2010) Measurements of Nitrogen Isotope Composition of Plants and Surface Soils along the Altitudinal Transect of the Eastern Slope of Mount Gongga in Southwest China. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **24**, 3063-3071. <https://doi.org/10.1002/rcm.4735>

- [39] Liu, X.Z., Wang, G.A., Li, J.Z., *et al.* (2010) Nitrogen Isotope Composition Characteristics of Modern Plants and Their Variations along an Altitudinal Gradient in Dongling Mountain in Beijing. *Science China Earth Sciences*, **53**, 128-140. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0175-z>
- [40] Zhou, Y., Cheng, X., Fan, J., *et al.* (2016) Patterns and Controls of Foliar Nitrogen Isotope Composition on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Plant and Soil*, **406**, 265-276. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2882-5>
- [41] Sah, S.P. and Brumme, R. (2003) Altitudinal Gradients of Natural Abundance of Stable Isotopes of Nitrogen and Carbon in the Needles and Soil of a Pine Forest in Nepal. *Journal of Forest Science*, **49**, 19-26. <https://doi.org/10.17221/4673-JFS>
- [42] Craine, J.M., Elmore, A.J., Wang, L., *et al.* (2015) Data from: Convergence of Soil Nitrogen Isotopes across Global Climate Gradients. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 8280.
- [43] Marty, C., *et al.* (2011) Isotopic Compositions of S, N and C in Soils and Vegetation of Three Forest Types in Quebec, Canada. *Applied Geochemistry*, **26**, 2181-2190. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.08.002>
- [44] Yang, Y.H., Fang, J.Y., Guo, D.L., *et al.* (2010) Vertical Patterns of Soil Carbon, Nitrogen and Carbon: Nitrogen Stoichiometry in Tibetan Grasslands. *Biogeosciences Discussions*, **7**, 1-24. <https://doi.org/10.5194/bgd-7-1-2010>
- [45] Hobbie, E.A. and Ouimette, A.P. (2009) Controls of Nitrogen Isotope Patterns in Soil Profiles. *Biogeochemistry*, **95**, 355-371. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9328-6>
- [46] Michelsen, A., Quarmby, C., Sleep, D., *et al.* (1998) Vascular Plant ^{15}N Natural Abundance in Heath and Forest Tundra Ecosystems Is Closely Correlated with Presence and Type of Mycorrhizal Fungi in Roots. *Oecologia*, **115**, 406-418. <https://doi.org/10.1007/s004420050535>
- [47] Templer, P.H., Arthur, M.A., Lovett, G.M., *et al.* (2007) Plant and Soil Natural Abundance Delta (^{15}N): Indicators of Relative Rates of Nitrogen Cycling in Temperate Forest Ecosystems. *Oecologia*, **153**, 399-406. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0746-7>
- [48] Nadelhoffer, K., Shaver, G., Fry, B., *et al.* (1996) ^{15}N Natural Abundances and N Use by Tundra Plants. *Oecologia*, **107**, 386-394. <https://doi.org/10.1007/BF00328456>
- [49] Xiao, H.Y., Wu, L.H., Zhu, R.G., *et al.* (2011) Nitrogen Isotope Variations in Camphor (*Cinnamomum camphora*) Leaves of Different Ages in Upper and Lower Canopies as an Indicator of Atmospheric Nitrogen Sources. *Environmental Pollution*, **159**, 363-367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.011>
- [50] Dijkstra, P., Williamson, C., Menyailo, O., *et al.* (2003) Nitrogen Stable Isotope Composition of Leaves and Roots of Plants Growing in a Forest and a Meadow. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, **39**, 29-39. <https://doi.org/10.1080/1025601031000102189>
- [51] Grimm, N.B., *et al.* (2003) Merging Aquatic and Terrestrial Perspectives of Nutrient Biogeochemistry. *Oecologia*, **137**, 485-501. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1382-5>