

# 稳定同位素技术在陆地生态系统氮循环中的应用

陈佳琪, 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9月3日; 录用日期: 2021年10月4日; 发布日期: 2021年10月12日

## 摘要

人类活动导致的氮沉降增加对陆地生态系统有着复杂的影响, 氮氧化物排放过量时生态系统将会达到氮饱和, 这将改变陆地生态系统的养分循环。为了对陆地生态系统氮循环进行更深入了解, 稳定同位素技术由于其测量简单, 已被广泛应用于大尺度研究中。稳定同位素技术可以帮助了解陆地生态系统氮循环规律及影响因素,  $\delta^{15}\text{N}$ 可能提供陆地生态系统如何对氮添加进行响应的信息。但目前研究多集中于某些特定过程, 而非对系统进行综合性研究。为此, 本文从稳定同位素的基本原理, 稳定同位素技术在陆地生态系统氮循环研究中的应用进展, 以及当前研究中存在的不足等方面进行总结, 旨在为以后的研究提供理论基础。

## 关键词

稳定同位素技术,  $\delta^{15}\text{N}$

# Application of Stable Isotope Technique to Nitrogen Cycling in Terrestrial Ecosystems

Jiaqi Chen, Yajuan Xing\*

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

Received: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Oct. 4<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The increase of nitrogen deposition caused by human activities has a complex effect on terrestrial

\*通讯作者。

ecosystems. When nitrogen oxides are emitted excessively, the ecosystem will reach nitrogen saturation, which will change the nutrient cycle of terrestrial ecosystems. To understand the nitrogen cycle in terrestrial ecosystems more deeply, the stable isotope technique has been widely used in large-scale studies due to its simplicity in measurement. Stable isotope technology can help to understand the nitrogen cycle and its influencing factors in terrestrial ecosystems, and  $\delta^{15}\text{N}$  can provide information on how terrestrial ecosystems respond to nitrogen addition. However, the current research focuses on some specific processes, rather than a comprehensive study of the system. In this paper, the basic principles of stable isotopes, the application of stable isotopes in the study of the nitrogen cycle in terrestrial ecosystems, and summarize the shortcomings of the current research, in order to provide theoretical basis for the future research.

## Keywords

Stable Isotope Technology,  $\delta^{15}\text{N}$

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)对陆地生态系统生产力具有一定的限制作用[1]。人类活动所导致的全球氮沉降的急剧增加,预计到2050年将达到  $200 \text{ Tg N yr}^{-1}$  [2]。尽管人类活动所导致的反应性氮增加对陆地生态系统的氮限制起到了一定的缓解作用,但过量的氮排放会导致陆地生态系统氮循环失衡,从而引发一系列新的环境问题[3]。基于此,为了解决对全球氮污染问题,需要对陆地生态系统中的氮循环过程进行深入的了解。

植物  $^{15}\text{N}$  自然丰度值是氮循环转化的综合结果,能够提供氮输入、转化和输出的综合信息,间接反映陆地生态系统氮循环的特征[4]。自20世纪40年代末至今,稳定N同位素的自然丰度值(表示为  $\delta^{15}\text{N}$  的  $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ )被广泛用作生态系统中以及N转化过程中的N状态的指标[5] [6] [7]。同时,稳定同位素技术具有示踪、对N的来源的指示作用及整合功能[8],且安全性高,不易受到其他因素干扰以及能够较为准确的反映陆地生态系统对氮循环的响应情况等特性,是对陆地生态系统氮循环进行研究的有效方法。

一般稳定同位素技术在陆地生态系统中的应用主要集中于,通过应用稳定同位素自然丰度方法定量或半定量分析长时间和大空间尺度上的元素循环过程;通过应用稳定同位素标记的方法识别短时尺度和小空间尺度的确定元素循环机制两方面。

本文首先对稳定同位素技术的基本原理进行了简单介绍,随后对稳定同位素在陆地生态系统氮循环研究中的一些进展进行了综述。通过分析当前研究的局限性,对未来的研究提出展望。

## 2. 稳定同位素技术基本原理

### 2.1. 稳定同位素

稳定同位素是一类原子数相同,中子数不同,且天然存在的不具有放射性的同位素,其之间化学性质没有明显差别,但质量不同会导致化学性质上的差异[4]。不同的同位素通常具有相同的化学行为,但中子数不同使同位素具有不同的原子质量(或质量数),因此较重的同位素往往比同一元素的较轻的同位素反应更慢,因为带有较轻的同位素的分子具有较高的振动能,即动力学同位素效应(Kinetic isotope effect),在反应不完全的情况下,在元素循环过程中,基质中元素同位素的自然丰度会逐渐富集,即同位素分馏

(Isotope fractionation)。由于同位素之间存在物理化学性质上的差异,使其反应物和生成物在组成上有所不同,因此可以利用稳定同位素进行科学研究。

目前发现的稳定同位素已经超过 200 种,由于稳定同位素技术具有示踪,指示等作用,同时具有检测快速、结果准确等特点,稳定同位素已经被广泛运用于自然科学的许多研究领域,解决包括医学、生态学及其相关领域如环境科学、林学、农学等相关问题,譬如,确定河流中的污染物来源、推断异养硝化作用反应的发生过程、估算 C 周转率、确定某一特定猎物对捕食者食物的贡献百分比,以及对其他技术模型进行检验等[9]。稳定同位素的常规分析方法主要有:质谱法、核磁共振谱法、气相色谱法、中子活化分析法、光谱法等。

除此之外,稳定同位素技术还可以运用于微生物中,根据稳定性同位素核酸探针技术将复杂环境中微生物物种组成及其生理功能耦合分析,可以克服在整体水平上清楚认知复杂环境中微生物群落生理代谢过程的分子机制的困难,在群落水平揭示复杂环境中重要微生物生理生态过程的分子机制。

稳定同位素在蛋白质组学中也有重要的应用。基于稳定同位素标记的蛋白质组定量方法可以分为代谢标记法、化学标记法和酶解标记法。不同方法标记同位素的样品混合步骤不同,越早混合,样品预处理步骤引入的误差越小,定量的准确度越高。

## 2.2. 氮的稳定同位素

氮元素有两种中子数不同的稳定性同位素,即  $^{14}\text{N}$  和  $^{15}\text{N}$ 。对于  $^{14}\text{N}$  和  $^{15}\text{N}$  来讲,大气氮气中  $^{14}\text{N}$  和  $^{15}\text{N}$  的相对丰度分别为 99.635% 和 0.365%,氮同位素丰度比( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ )为 0.003613。通常情况下,对测定稳定同位素的绝对含量与国际标准比对后进行比较研究,一般用  $\delta^{15}\text{N}$  表示某种物质中 N 稳定性同位素的丰富度(enrichment) [10] [11]。

陆地生态系统中不同组分之间的  $\delta^{15}\text{N}$  值变化主要是由同位素分馏和同位素混合引起的。在反应过程中,产物中轻同位素  $^{14}\text{N}$  的含量通常较高,基质中通常富含重同位素的  $^{15}\text{N}$  含量。对于一个生态系统 N 库,其  $\delta^{15}\text{N}$  值由输入过程和输出过程共同决定[12]。相比于土壤和植物的  $\delta^{15}\text{N}$  值[12],大气 N 沉积和生物固氮通常是同位素消耗的,因此,如果 N 的产出率保持恒定,则 N 的输入率将增加降低土壤和植物的  $\delta^{15}\text{N}$  值。但是反硝化和浸出等氮的输出过程通常对  $^{15}\text{N}$  具有很强的同位素分馏作用[5] [13]。如果这些输出过程的速率在氮沉降增加的情况下发生变化,则植物和土壤  $\delta^{15}\text{N}$  值的响应将更加复杂[14] [15] [16]。例如,长期施用氮肥可以通过气态途径增加氮素的流失,并显著增加土壤的  $\delta^{15}\text{N}$  值[16]。因此,土壤和植物的  $\delta^{15}\text{N}$  可以提供有关生态系统输出过程如何响应增加的 N 输入的信息。

不同来源的含氮物质中具有不同的同位素丰度值。植物  $\delta^{15}\text{N}$  值主要取决于土壤中的氮库( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ),而土壤  $\delta^{15}\text{N}$  值受地理、气候以及农业施肥等条件影响[17]。植物和土壤氮同位素结合可以帮助了解氮输入对生态系统氮循环的影响,可以在大面积区域进行研究不受取样时间和空间的限制同时还具有测量简单的优点[8] [18]。因此,稳定的氮同位素可以被用来帮助追踪陆地生态系统中物质的来源及流转过程,已被广泛用于对陆地生态系统氮循环的研究中。

## 3. 稳定同位素在氮循环中的应用

### 3.1. $^{15}\text{N}$ 自然丰度技术的应用

$^{15}\text{N}$  自然丰度技术法主要是利用氮周转过程中的同位素分馏作用[19]。植物  $^{15}\text{N}$  自然丰度值是氮循环转化的综合结果,可以提供氮输入、转化和输出的综合信息,间接反映陆地生态系统氮循环的特征。 $^{15}\text{N}$  自然丰度值可被用来评估生态系统的氮通量,因此稳定 N 同位素的自然丰度值(表示为  $\delta^{15}\text{N}$  的  $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ )已被广泛用作生态系统中以及 N 转化过程中的 N 状态的指标[20] [21]。

### 3.1.1. $^{15}\text{N}$ 自然丰度值( $\delta^{15}\text{N}$ )对陆地生态系统氮循环的指示作用

过量的氮输入可以缓解一些生态系统的氮限制, 但可能导致氮循环的不平衡, 造成许多负面影响。N 循环是复杂的, 具有多个转化过程、反馈以及与其他生物地球化学循环的相互作用。土壤和植物的  $\delta^{15}\text{N}$  信号可以提供有关生态系统输出过程如何响应增加的 N 输入的信息。

Liu [22]等人进行 meta 分析发现, 土壤全氮  $\delta^{15}\text{N}$  值受氮输入通量和氮输出通量的调控。无机氮肥的  $\delta^{15}\text{N}$  值一般接近于零。在输出通量不变的情况下, 添加氮会导致土壤  $\delta^{15}\text{N}$  值的降低。因此, 在施氮条件下, 土壤  $\delta^{15}\text{N}$  值的增加趋势一定是由输出通量引起的。研究表明, 林地、草地和农田土壤全氮  $\delta^{15}\text{N}$  值均显著增加, 这是由于 N 输入加速了许多氮循环过程, 如反硝化和矿化。氮肥还会使植株  $\delta^{15}\text{N}$  值显著增加, 不同的氮添加对植物  $\delta^{15}\text{N}$  影响不同。当施用氨盐( $\text{NH}_4\text{Cl}$  或  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )时, 植物  $\delta^{15}\text{N}$  值增幅最大, 硝酸盐( $\text{KNO}_3$  或  $\text{NaNO}_3$ )肥料处理均对植物的  $\delta^{15}\text{N}$  值有积极影响, 而尿素对植物的  $\delta^{15}\text{N}$  值有负面影响。

叶片对氮沉降的响应受包括氮沉降形式和污染物形态的差异, 以及植物叶片的不同类型等条件影响, 只能用做反应总氮沉降的指标而无法确定来源。不同类型植物叶面性质差异显著, 对氮的吸收、吸附功能也存在很大差异, 叶面大、湿度高的叶片对氮的吸收更显著, 同种叶片新叶吸收率显著高于老叶[23]。

### 3.1.2. $^{15}\text{N}$ 自然丰度值( $\delta^{15}\text{N}$ )对陆地生态系统氮饱和状态的指示作用

Pardo 等[24]对美国东北部中等水平氮沉降梯度研究与欧洲观测到的较高水平氮沉降形成对比有助于评估森林流域到氮饱和的时间过程。在过去的研究中, 对生态系统氮循环和氮状况的评价大多依赖于长期监测水系化学[25], 以确定生态系统氮的输入 - 输出, 这种方法提供了许多有用信息, 包括 N 通量的季节和年度变化[26]。但这种研究的测量强度和长期性限制了它们用于大规模的氮循环或氮饱和区域评估。相比之下, 稳定的氮同位素比是进行 N 饱和度区域评估的潜在有价值的方法。植物和土壤的稳定同位素测量具有以下优点: 一是可用于调查大面积区域, 二是不仅可以提供即时信息, 而且可以通过单次采样对一个地点的氮循环历史进行综合测量[8]。

植物和土壤的氮同位素组成记录了植物新陈代谢和氮循环影响因子的综合作用, 由于植物和土壤的  $^{15}\text{N}$  自然丰度值( $\delta^{15}\text{N}$ )可以通过多种不同采样方式进行, 能够提供长期氮循环的综合度量[24], 因此已被用作森林氮状态的替代特征。如果森林中的氮达到饱和状态(即硝化作用增强, 从而使  $^{15}\text{N}$  贫化的  $\text{NO}_3$  损失增加), 则土壤和植物将富含  $^{15}\text{N}$  [27]。因此, 叶面和土壤中的  $^{15}\text{N}$  已被用来评估温带, 寒带和热带森林中的区域氮状况[27] [28]。

与低氮系统相比, 氮饱和生态系统中的氮循环更加开放, 氮的输入和损失要比内部氮循环更大[29] [30] [31]。植物从土壤中吸收氮, 然后将其分配给各种组织。因此, 叶面氮含量能够对用于植物生长的土壤氮量起到指示作用。

叶片的  $^{15}\text{N}$  自然丰度值( $\delta^{15}\text{N}$ )集成了氮在空间和时间上的循环, 所以可作为用来预测森林生态系统何时接近氮饱和的有效工具。而且, 叶片的  $\delta^{15}\text{N}$  值能够对植物吸收的无机氮进行标记, 无机氮的同位素特征本身就是对转化的综合度量, 包括从植物可用的氮库中传递和去除氮的转化过程。Pardo [27]的研究表明, 叶面  $\delta^{15}\text{N}$  比单独的叶面氮浓度更好地衡量了内部氮循环。

### 3.1.3. $^{15}\text{N}$ 自然丰度值技术对气候变化条件下氮循环的指示作用

$^{15}\text{N}$  自然丰度技术还可以帮助对气候变化条件下的 N 循环过程进行研究, 进行增温、降雨和  $\text{CO}_2$  浓度升高等控制试验, 以缓解过量氮排放所导致的全球变暖现象。为解释生态系统对氮沉降响应的大尺度模式在欧洲进行了 NITREX 研究, 发现森林地面氮状况和碳氮是生态系统对氮输入响应的重要决定因素[24]。

### 3.2. $^{15}\text{N}$ 标记技术的应用

$^{15}\text{N}$  标记技术是在系统中(植物、土壤或整个生态系统)添加一定数量的  $^{15}\text{N}$  富集的含氮化合物, 经过一段时间后分析其去向[32]。 $^{15}\text{N}$  标记示踪技术主要包括  $^{15}\text{N}$  的示踪和稀释技术。在国际上  $^{15}\text{N}$  标记技术已被广泛应用于植物固氮、氮的输入、输出及总转化速率的研究, 极大地提高了人们对陆地生态系统氮循环规律及其影响因素的认识[33]。

氮(N)是森林生态系统中生物生长的主要限制因素。在天然林中, 植物可用氮主要来自土壤可用氮和外部氮输入, 例如大气氮沉降和固氮作用。在这些来源中, 大气氮沉降正在成为氮输入的重要来源, 活性氮输入可以深刻改变土壤氮的转化和森林生态系统的长期生产力。为对森林生态系统中氮沉积对内部土壤氮循环的影响进行深入研究, Cheng [34]等对全球范围内通过  $^{15}\text{N}$  标记进行的研究进行了 meta 分析, 发现森林土壤有机层和矿质层的总氮转化率对氮添加的响应存在差异。结果表明, 氮输入对森林土壤总氮转化的净效应受土壤碳分布的高度分层影响, 从而挑战了氮有效性普遍限制氮矿化的观点。这些结果有利于更好地预测未来 N 沉积情景下森林生态系统的循环和碳汇潜力。

#### 3.2.1. 同位素示踪技术

同位素示踪技术作为一种独特的、不可替代的技术手段, 在农业领域的应用中为主要作物的高产、高效、优质生产和动物保健生产提供了重要的科学依据和技术支撑。在陆地生态系统氮循环的研究中, 通常通过利用放射性或稳定同位素示踪剂研究氮在土壤、动植物和环境中的迁移、转化、运输、吸收、代谢和分布。 $^{15}\text{N}$  示踪法是以稳定同位素  $^{15}\text{N}$  作为指示物来标记研究对象的微量分析方法, 主要用于测定 N 素在土壤 - 植物 - 微生物间的分配[35]。在室内培养密闭条件下添加  $^{15}\text{N}_2$ , 可以对生物固氮对土壤氮库的贡献进行研究[36]; 而对陆地生态系统中添加外源标记  $^{15}\text{N-N}$  ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ ), 既可以了解到植物对土壤和外源氮添加的利用率[37] [38], 又可以对植物 - 土壤系统中总氮和有机氮的矿化率进行研究[39] [40]。

首先, 同位素示踪技术能够帮助揭示作物营养元素氮的有效转化机理, 这是由于植物累积的氮素有 50%~70% 来自土壤, 而土壤氮素主要来源于外源有机肥料, 但外源肥料与原土壤之间会发生一些化学反应, 很难通过常规方法区分, 且不能清楚地表明施入土壤的肥料氮对各种形式有机氮的贡献, 而  $^{15}\text{N}$  示踪剂技术的应用可以有效的解决这一技术瓶颈[41]。

同时, 同位素示踪技术在温室气体减排研究中同样起到了重要作用。社会快速发展及人类活动使氮肥施用量大幅提高, 但实际利用率远低于氮肥施用量, 大量流失的氮肥会对陆地生态环境造成严重污染。利用同位素示踪技术对农田不同施氮模式下来自外源氮肥的氮挥发量进行定量研究, 能够帮助优化施氮, 起到降低土壤氮挥发和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量的作用[42] [43]。

#### 3.2.2. 同位素稀释技术

同位素稀释法作为一种计量学认可的、可溯源的痕量核素分析方法, 已被广泛应用于环境、生物、农业等领域。目前研究氮素总转化速率主要采用  $^{15}\text{N}$  的同位素稀释法, 通过测定土壤 N 库稳定性同位素  $^{15}\text{N}$  的原子百分数下降量来估算土壤总氨化速率和总硝化速率, 只需添加少量底物就能够同时对多个氮素转化过程进行定量研究[44] [45] [46] [47]。

在使用同位素稀释法进行定量分析过程中, 当待测样品中某一目标同位素的丰度受示踪剂影响, 不能维持自然丰度时, 就需要测量样品中各同位素的丰度比。这就导致了当待测样品数量有限或测量时间有限时, 常规同位素稀释法的应用被限制, 一方面是多次同位素丰度比测量使分析时间延长, 效率降低, 同时可能出现由于待测样品量有限, 而难以完成多次同位素丰度比的测量的情况。另外, 由

于待测样品与加入稀释剂后的混合样品中同位素丰度相差较大, 为避免对不同样品间测量产生影响, 需要采取一定措施。为此, 方随[48]等根据物质的量守恒原理, 建立了一种可省略待测样品丰度比测量环节的快速同位素稀释定量方法。通过关联的运算, 得到待测样品后, 只需进行一次添加同位素稀释剂后混合样品的丰度比测量即可完成目标同位素的定量分析。该方法能够降低样品消耗量、简化测量步骤、减小记忆效应影响、提高测量效率, 适用于有 3 种或更多稳定同位素的元素, 既保证了测量结果的准确性, 又可缩短分析时间, 减少样品消耗量, 为同位素示踪、污染泄漏和扩散的溯源提供了一种可靠、高效的分析方法。

#### 4. 当前研究中仍存在的问题

稳定同位素技术已被广泛应用于生态系统中 N 循环的研究, 但这些研究大多集中于某些特定的过程, 缺乏系统的综合性研究。

稳定同位素标记技术在一定程度上可以帮助对陆地生态系统氮循环进行深入了解, 但目前大多数研究只能反映局部地区氮循环的变化。这是因为与稳定同位素自然丰度法相比, 同位素标记技术所使用的标记化学物质可能对生态系统 N 循环产生一定干扰, 因此同位素标记技术多适用于微观实验。一方面原因是, 如果对整个生态系统大量添加 N 化学物质, 过量的氮输入会超出生态系统的负荷以至于引起生态系统功能的变化, 产生不良的环境后果。另外一方面, 当前同位素标记物单价仍相对较高, 如果大量使用需要考虑成本。

此外, N 稳定同位素的源识别非常粗糙, 只能用于一般源类型的识别, 不能用于确定源。因此, 如何更明确地识别生态系统中氮源仍需要继续进行探索。

稳定同位素标记技术对研究 N 的来源、命运和转化方面具有许多特殊优势, 但由于环境变化所产生的的不确定性和植物、微生物和动物生理特性上的差异, 影响植物、微生物和动物代谢中 N 同位素分馏的因素很多, 一些分馏机制/分馏因子尚不明确或不确定, 仍需进行进一步研究。

#### 5. 结论

随着科学研究的不断发展, 稳定同位素技术也愈加广泛的被应用于各个领域, 根据目前的国内外研究现状可以看出, 稳定同位素技术已广泛应用于陆地生态系统氮循环过程种并取得了较为理想的效果, 但这些研究大多是针对某一子过程或某几个环节, 且对这些子过程和环节的研究多停留在规律的探讨上, 缺乏对其转化机理的揭示。基于此, 本文先是简要概述了稳定同位素技术的基本原理, 然后对近年来稳定同位素技术应用于陆地生态系统氮循环中的研究进行小结, 包括  $^{15}\text{N}$  自然丰度技术、 $^{15}\text{N}$  标记技术的广泛应用, 能够帮助指示生态系统 N 饱和状态, 还能够帮助揭示作物营养元素氮的有效转化机理等, 极大地提高对陆地生态系统氮循环规律及其影响因素的认识。

#### 6. 展望

作物的  $\delta^{15}\text{N}$  受多种因素的影响(如作物种类、施肥频率、环境条件和田间管理), 为了在不久的将来, 能够通过  $\delta^{15}\text{N}$  鉴别有机和常规作物, 可以建立与可能影响作物  $\delta^{15}\text{N}$  的因素相关的作物  $\delta^{15}\text{N}$  数据库。实验结果与模型模拟相结合可能有助于揭示生态系统  $\delta^{15}\text{N}$  的变化机制。不同生态系统尺度下碳氮同位素机制模型的建立是今后研究的重点。

此外, 全球变化与陆地生态系统 N 循环的关系、邻近生态系统 C 和 N 的环境效应、陆地生态系统对 N 输入响应等方面的研究还不够全面和深入。因此, 在未来基于多种稳定方法和模型的研究中, 这些方面应该得到更多的关注。在不久的将来, 同位素自然丰度和标记技术的应用, 结合元素和分子生物标记信息, 可以在一定程度上解决这些问题。

## 参考文献

- [1] 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>
- [2] Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erismann, J.W., *et al.* (2008) Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science*, **320**, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
- [3] Galloway, J.N. (1990) The Global Nitrogen Cycle: Changes and Consequences. 10.
- [4] Yao, F.-Y., Zhu, B. and Du, E.-Z. (2013) Use of  $^{15}\text{N}$  Natural Abundance in Nitrogen Cycling of Terrestrial Ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **36**, 346-352. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1258.2012.00346>
- [5] Bai, E. and Houlton, B.Z. (2009) Coupled Isotopic and Process-Based Modeling of Gaseous Nitrogen Losses from Tropical Rain Forests: Modeling N Gas Fluxes from Rain Forests. *Global Biogeochemical Cycles*, **23**, 1-10. <https://doi.org/10.1029/2008GB003361>
- [6] Kalcsits, L.A., Buschhaus, H.A. and Guy, R.D. (2014) Nitrogen Isotope Discrimination as an Integrated Measure of Nitrogen Fluxes, Assimilation and Allocation in Plants. *Physiologia Plantarum*, **151**, 293-304. <https://doi.org/10.1111/ppl.12167>
- [7] Craine, J.M., Elmore, A.J., Aida, M.P.M., *et al.* (2009) 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>
- [8] Robinson, D. (2001)  $\delta^{15}\text{N}$  as an Integrator of the Nitrogen Cycle. *Trends in Ecology & Evolution*, **16**, 153-162. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)02098-X](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)02098-X)
- [9] Sulzman, E.W. (2007) Stable Isotope Chemistry and Measurement: A Primer. In: *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, 2nd Edition, Wiley-Blackwell, Hoboken, 1-21. <https://doi.org/10.1002/9780470691854.ch1>
- [10] Craig, H. (1954) Carbon-13 Variations in Sequoia Rings and the Atmosphere. *Science*, **119**, 141-143. <https://doi.org/10.1126/science.119.3083.141>
- [11] 易现峰, 张晓爱. 稳定性同位素技术在生态学上的应用[J]. 生态学杂志, 2005(3): 306-324.
- [12] Amundson, R., Austin, A.T., Schuur, E.A.G., *et al.* (2003) Global Patterns of the Isotopic Composition of Soil and Plant Nitrogen: Global Soil and Plant N Isotopes. *Global Biogeochemical Cycles*, **17**, 1031. <https://doi.org/10.1029/2002GB001903>
- [13] Houlton, B.Z., Sigman, D.M. and Hedin, L.O. (2006) Isotopic Evidence for Large Gaseous Nitrogen Losses from Tropical Rainforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**, 8745-8750. <https://doi.org/10.1073/pnas.0510185103>
- [14] Kalcsits, L.A., Min, X. and Guy, R.D. (2015) Interspecific Variation in Leaf-Root Differences in  $\delta^{15}\text{N}$  among Three Tree Species Grown with Either Nitrate or Ammonium. *Trees*, **29**, 1069-1078. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1186-3>
- [15] Högborg, P., Johannisson, C. and Högborg, M.N. (2014) Is the High  $^{15}\text{N}$  Natural Abundance of Trees in N-Loaded Forests Caused by an Internal Ecosystem N Isotope Redistribution or a Change in the Ecosystem N Isotope Mass Balance? *Biogeochemistry*, **117**, 351-358. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9873-x>
- [16] Kriszan, M., Amelung, W., Schellberg, J., *et al.* (2009) Long-Term Changes of the  $\delta^{15}\text{N}$  Natural Abundance of Plants and Soil in a Temperate Grassland. *Plant and Soil*, **325**, 157-169. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9965-5>
- [17] 蔡德陵, 李红燕. 稳定碳、氮同位素在河流系统研究中的应用[J]. 海洋科学进展, 2004(2): 225-232.
- [18] Templer, P.H., Arthur, M.A., Lovett, G.M., *et al.* (2007) Plant and Soil Natural Abundance  $\delta^{15}\text{N}$ : Indicators of Relative Rates of Nitrogen Cycling in Temperate Forest Ecosystems. *Oecologia*, **153**, 399-406. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0746-7>
- [19] 方运霆, 刘冬伟, 朱飞飞, 等. 氮稳定同位素技术在陆地生态系统氮循环研究中的应用[J]. 植物生态学报, 2020, 44(4): 373-383.
- [20] Nadelhoffer, K.J., Downs, M.R., Fry, B., *et al.* (1995) The Fate of  $^{15}\text{N}$ -Labelled Nitrate Additions to a Northern Hardwood Forest in Eastern Maine, USA. *Oecologia*, **103**, 292-301. <https://doi.org/10.1007/BF00328617>
- [21] Pardo, L.H., Hemond, H.F., Montoya, J.P., *et al.* (2001) Long-Term Patterns in Forest-Floor NITROGEN-15 Natural Abundance at Hubbard Brook, NH. *Soil Science Society of America Journal*, **65**, 1279-1283. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541279x>
- [22] Liu, J., Wang, C., Peng, B., *et al.* (2017) Effect of Nitrogen Addition on the Variations in the Natural Abundance of Nitrogen Isotopes of Plant and Soil Components. *Plant and Soil*, **412**, 453-464. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3081-0>

- [23] 刘学炎, 肖化云, 刘丛强. 植物叶片氮同位素( $\delta^{15}\text{N}$ )指示大气氮沉降的探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007(4): 405-409.
- [24] Pardo, L.H., McNulty, S.G., Boggs, J.L., *et al.* (2007) Regional patterns in Foliar  $^{15}\text{N}$  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>
- [25] 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>
- [26] Gilliam, F.S., Yurish, B.M. and Adams, M.B. (2001) Temporal and Spatial Variation of Nitrogen Transformations in Nitrogen-Saturated Soils of a Central Appalachian Hardwood Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, **31**, 18. <https://doi.org/10.1139/x01-106>
- [27] Pardo, L.H., Templer, P.H., Goodale, C.L., *et al.* (2006) Regional Assessment of N Saturation Using Foliar and Root  $\delta^{15}\text{N}$ . *Biogeochemistry*, **80**, 143-171. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9015-9>
- [28] 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>
- [29] Koopmans, C., Van, D.D. and Tietema, A. (1997) Natural  $^{15}\text{N}$  Abundance in Two Nitrogen Saturated Forest Ecosystems. *Oecologia*, **111**, 470-480. <https://doi.org/10.1007/s004420050260>
- [30] Magnusson, W.E., Carmozina de Araújo, M., Cintra, R., *et al.* (1999) Contributions of C3 and C4 Plants to Higher Trophic Levels in an Amazonian savanna. *Oecologia*, **119**, 91-96. <https://doi.org/10.1007/PL00008821>
- [31] Sah, S.P. and Ilvesniemi, H. (2006) Effects of Clear-Cutting and Soil Preparation on Natural  $^{15}\text{N}$  Abundance in the Soil and Needles of Two Boreal Conifer Tree Species. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, **42**, 367-377. <https://doi.org/10.1080/10256010600991094>
- [32] Templer, P.H., Mack, M.C., III, F.S.C., *et al.* (2012) Sinks for Nitrogen Inputs in Terrestrial Ecosystems: A Meta-Analysis of  $^{15}\text{N}$  Tracer Field Studies. *Ecology*, **93**, 1816-1829. <https://doi.org/10.1890/11-1146.1>
- [33] 蔡德陵, 张淑芳, 张经. 天然存在的碳、氮稳定同位素在生态系统研究中的应用[J]. 质谱学报, 2003(3): 434-440.
- [34] Cheng, Y., Wang, J., Chang, S.X., *et al.* (2019) Nitrogen Deposition Affects both Net and Gross Soil Nitrogen Transformations in Forest Ecosystems: A Review. *Environmental Pollution*, **244**, 608-616. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.054>
- [35] 刘碧荣, 王常慧, 黄建辉, 等.  $^{15}\text{N}$ 库稀释法和 $^{15}\text{N}$ 示踪法在草地生态系统氮转化过程研究中的应用——方法与进展[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1153-1162.
- [36] Kohls, S.J., van Kessel, C., Baker, D.D., *et al.* (1994) Assessment of  $\text{N}_2$  Fixation and N Cycling by Dryas along a Chronosequence within the Forelands of the Athabasca Glacier, Canada. *Soil Biology and Biochemistry*, **26**, 623-632. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90251-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90251-8)
- [37] 彭佩钦, 仇少君, 侯红波, 等.  $^{15}\text{N}$ 交叉标记有机与无机肥料氮的转化与残留[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 858-865.
- [38] Lee Roberts, T., Normon, R.J., Fulford, A., *et al.* (2013) Assimilation of  $^{15}\text{N}$  Labeled Fertilizer Injected at Various Depths by Delayed-Flood Rice. *Soil Science Society of America Journal*, **77**, 2039-2044. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.02.0076>
- [39] Hoekstra, N.J., Lalor, S.T.J., Richards, K.G., *et al.* (2011) The Fate of Slurry-N Fractions in Herbage and Soil during Two Growing Seasons Following Application. *Plant and Soil*, **342**, 83-96. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0669-7>
- [40] Chalk, P.M., Magalhães, A.M.T. and Inácio, C.T. (2013) Towards an Understanding of the Dynamics of Compost N in the Soil-Plant-Atmosphere System Using  $^{15}\text{N}$  Tracer. *Plant and Soil*, **362**, 373-388. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1358-5>
- [41] 杨俊诚, 李桂花, 姜慧敏, 等. 同位素示踪农业应用的研究热点[J]. 同位素, 2019, 32(3): 162-170.
- [42] 王秀斌. 优化施氮下冬小麦/夏玉米轮作农田氮素循环与平衡研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [43] 姜慧敏, 张建峰, 李玲玲, 等. 优化施氮模式下设施菜地氮素的利用及去向[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1146-1154.
- [44] Kirkham, D. and Bartholomew, W.V. (1954) Equations for Following Nutrient Transformations in Soil, Utilizing Tracer Data. *Soil Science Society of America Journal*, **18**, 33. <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800010009x>
- [45] Luxhøi, J., Nielsen, N.E. and Jensen, L.S. (2004) Effect of Soil Heterogeneity on Gross Nitrogen Mineralization Measured by  $^{15}\text{N}$ -Pool Dilution Techniques. *Plant and Soil*, **262**, 263-275.

---

<https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000037043.26369.9b>

- [46] 兰婷, 韩勇, 唐昊冶. 采用 $^{15}\text{N}$  同位素稀释法研究不同层次土壤氮素总转化速率[J]. 土壤, 2011, 43(2): 153-160.
- [47] 袁红朝, 葛体达. 稳定同位素质谱技术在生态系统氮素循环中的应用[J]. 质谱学报, 2015, 36(1): 91-96.
- [48] 方随, 李志明, 徐江, 等. 一种快速同位素稀释定量方法及其在示踪方面的应用[J]. 分析化学, 2020, 48(11): 1542-1551.