

土壤供氮能力研究方法进展^①

闫德智 王德建

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘要 根据土壤供 N 能力确定合理施肥量, 是保证作物高产、提高 N 肥利用率、减少环境污染的基本途径。本文综述了土壤供 N 能力研究中常用的植物吸收法、室内矿化培养法、化学方法、田间原位测定法、总矿化 N 测定和土壤 N 矿化模型等方法, 以期为选择合适的土壤供 N 能力研究方法提供依据。

关键词 供氮能力; 矿化; 测定方法

中图分类号 S158

氮素是作物生长发育所需的重要营养元素, 而多数土壤的含 N 量较低, 施用 N 肥为作物补充 N 素是保证作物高产的重要措施。但 N 肥的过量施用会造成利用率降低, 经济效益下降, 并引起地下水、地表水和大气污染, 影响人体健康。根据土壤供 N 能力确定合理施肥量, 是保证作物高产、提高 N 肥利用率、减少环境污染的基本途径。土壤向作物供应的 N 素, 一部分来自于作物种植时土壤中的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N, 一部分来自于作物生长期间土壤有机态 N 的矿化。土壤中的矿质 N 是较容易测定的, 而土壤有机态 N 的矿化量却是很难预测的。土壤 N 矿化是指在土壤动物和微生物的作用下, 土壤有机质中的 N 素从难以被植物吸收利用的有机态转化成可被植物直接吸收利用的无机态的过程, 这个过程受到土壤质地、温度、水分、耕作、N 肥和有机物质投入等因素的影响。弄清楚土壤 N 矿化过程对于合理推荐施肥、提高 N 肥利用率、充分发挥其增产效益以及防止 N 素损失所造成的环境污染等都有着积极的意义。

研究土壤供 N 能力已有相当长的历史, 其研究方法不断得到改进, 每种方法都试图准确、有效的评价土壤供 N 能力, 但每种方法都有其适用性和局限性。目前常用的研究方法可以分成 3 类, ①生物学方法: 主要有以植物吸 N 量为基础的植物吸收法和以土壤微生物对有机质利用为基础的室内培养法、田间原位培养法、总矿化量的测定等; ②化学方法: 使用化学试剂来提取土壤中易矿化水解的那部分 N 素作为土壤的供 N 能力指标; ③数学方法: 为了预测土壤 N 素矿化量及其过程所建立的 N 矿化模型。现将目前常用的研究方法综述如下, 并对各

种研究方法的优缺点进行评价。

1 植物吸收法

植物吸收法出现的最早, 从 1923 年提出的幼苗吸收法逐步得到改进。目前常用的方法是无 N 区全生长期吸 N 量法^[1], 其基本假设是在没有外源 N 素供应的自然条件下, 作物吸收 N 量等于土壤矿化 N 量。植物吸收法确定的土壤矿化 N 量能够综合反映特定的土壤—作物—环境下各种因素的影响, 常被用来作为评价其他方法的参比标准方法。许多肥料效应试验中的无肥区试验都能够提供作物地上部的吸 N 量, 具有广泛的应用基础, 但要使用植物吸收法来计算土壤矿化 N 量, 还应该包括以下部分的含 N 量: ①未被收获的作物吸 N 量, 如根系、麦茬、凋落的叶子等中的 N 素; ②试验前后土壤中矿质 N 含量的差值。

使用植物吸收法确定土壤矿化 N 量只能反映当季作物生长条件下的土壤供 N 量, 对于下季作物只能给出一个粗略的估计, 而且将作物吸收 N 量作为土壤矿化量并不准确, 它没有考虑到: ①通过淋洗和反硝化而损失的 N; ②植物分泌物对微生物数量和活性的影响; ③前季作物的影响; ④不同作物具有不同的吸 N 模式和总需 N 量; ⑤地下生物群含 N 量的变化^[2]; ⑥作物收获前通过叶片蒸腾所损失的 N 量^[3]; ⑦ N 素通过干湿沉降或灌溉进入土壤也是不可避免的。要解决这些问题, 就要应用 N 素平衡研究^[4]来确定土壤的矿化 N 量, 它不仅要测定植物吸 N 量, 还要测定土壤剖面中的 N 量、土壤各有机 N 库中的 N 量和各种方式损失的 N 量, 需要进行大量的分析测定工作, 相当费时、费力。

①基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999011802) 和中科院知识创新工程项目 (KZCX2-413-6) 资助。

使用同位素N肥可以区分植物吸收的N素是来自于肥料，还是来自于土壤矿化，这样通过计算收获时作物中的未标记N与作物种植前后土壤中未标记矿质N的变化之和，就可以计算施肥条件下土壤的N矿化量，这是无肥区植物吸N量法的延伸。但是同位素试验和无肥区试验确定的土壤N矿化量通常存在着较大的差异，通过同位素试验计算的土壤N矿化量通常较大^[5]，这可能是因为N肥的使用能够促进有机质的矿化，而更为重要的可能是因为标记的N肥代替了一部分未标记的土壤矿化N，避免了未标记N的固定和损失^[6]。因此通过同位素试验来确定土壤的N矿化量是否准确值得进一步的研究。

2 室内矿化培养法

室内矿化培养法是一种已被广泛使用的方法，通常在实验室内将一定量的土壤样品调节到一定湿度后，在一定温度下进行一段时间的培养，然后测定土壤所释放出的矿质N量，其原理是土壤中供植物生长吸收的速效N实际上是通过有机质矿化、水解而提供的，而土壤矿物质本身并不含N的化合物^[1]。在上世纪50~60年代，土壤学界对土壤矿化培养法进行了大量研究，包括该法结果与田间、盆栽作物生长量和吸N量等标准方法的比较，均肯定了培养矿化法的基本可靠性。这种方法的优点是培养条件（温度、水分）是可控制的，且能够保持一致，避免了田间土壤时空异质性的影响，为研究土壤N素释放规律提供了便利，缺点是实验室内的培养条件与田间条件存在着较大的差异，由培养矿化法得到的土壤N矿化量在应用于田间自然条件前必须经过校正。大多数的培养试验都对土样进行了混匀、过筛、冷藏、解冻、风干、重新湿润等处理，这些处理对土壤中好气和厌气的微生物活性及土壤有机质的易分解性^[7]产生了不同的影响，从而影响了土壤矿化过程，而且适宜的温度和水分很少在田间条件下起主导作用^[8]，所以通过培养矿化法得出的矿化量通常高于田间的测定值，与田间研究的相关性较差。许多研究试图通过采用原状土柱培养^[9]来减少土壤样品前处理的影响，但是这样又会受到空间异质性的影响，使用原状土柱培养要进行大量的重复才能保证结果的可靠性，而且存留在土块中的根系等有机物质也会影响矿化结果。

室内矿化培养法分为好气培养法^[10]和淹水培养法。好气培养法以史坦福的间歇淋洗法^[11]使用最为广泛，它适用于大批样品培养测定，快速，简便，

并可用于连续培养测定。淹水培养法^[12]的发展迟于好气培养法，其测定结果更加稳定，且通常只需测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ，测定更简便，而且也适用于水稻土以外的土壤。

借助于室内矿化培养法，我们能更好的了解土壤N素矿化过程，而且能够对不同土壤的矿化特征进行比较。但是要有效的利用这种方法准确的预测田间土壤实际矿化量和矿化过程，需要对这种方法标准化，并建立适宜的模型应用于不同的土壤-作物-环境系统。

3 化学方法

由于植物吸收法和室内矿化培养法都需要相当长的一段时间才能确定土壤N矿化量，为了快速确定下季作物生长期间的土壤矿化N量，以便及时的推荐合理施肥量，人们用各种化学方法提取土壤中易矿化水解的那部分N素和土壤初始矿质N，即速效N量。如果某一化学方法的测定结果，与标准方法（如作物生长量、作物吸N量及培养矿化N量）的测定结果之间能够有良好的相关性，则认为该化学方法可以代表土壤矿化N量。主要的化学方法有以下几种。

3.1 化学提取法^[1]

为了快速、简便的测定土壤有机质中易矿化分解的部分，可以使用化学试剂进行提取。不同提取剂的化学性质不同，有些是强水解性的，如酸化的高锰酸钾和重铬酸盐溶液；有些是相对温和的热水或热盐溶液，各种提取法都有被成功使用的例子，但目前还没有哪种提取法被证明适用于各种土壤而能够进行广泛的使用。

3.2 电超滤法

电超滤法^[13]是利用电超滤作用使电磁场内土壤悬浊液的阳离子和阴离子分离，经过处理的土壤悬浊液不仅包括矿质N，还包括可溶的有机态N，这些N素被认为会在短期内矿化分解而被作物吸收利用。在欧洲，这种方法使用的较多，它为确定合理的施N量提供了较好的预测^[14]。但在有些研究中它与作物吸N量间的相关性却较差^[15]。这种方法通常能够较好的预测土壤N素的短期供应，并指导N肥的早期施用，但它不可能提供整个作物生长季的土壤供N量，而且也不能适用于各种土壤。

3.3 土壤有机质和全N

土壤全N包括所有形式的有机和无机态N，是土壤N素总量和供应植物有效N素的来源，综合反

映了土壤的 N 素状况,土壤有机质也是 N 素存在的主要场所,一些研究认为可以将全 N 和有机质作为土壤供 N 能力指标^[16]。但也有不少研究者持反对观点,因为各种土壤的有机质成分、土壤性质、环境条件均不相同,土壤全 N 含量和有机质与作物吸 N 量之间的相关性也较差,将土壤有机质和全 N 含量作为土壤供 N 能力的指标是不可靠的,而且在一定时间内有机质或全 N 含量比较稳定,难以反映土壤供 N 能力的变化^[17]。

4 田间原位测定

4.1 矿质 N 的测定

通过测定土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量在一段时间内的变化,也可以得出土壤的 N 矿化量,在两次采样之间一部分土壤有机质已经矿化,所得到的矿化量可以反映出不同土壤间矿化能力的差异,而且在整个生长季都会存在这种差异。已有研究发现表土中的矿质 N 量与作物吸收 N 量有较好的相关性^[18]。但受到土壤内部 N 循环、N 素转化、外部输入和 N 素损失等因素的影响,通过计算土壤矿质 N 前后差值的方法得到的土壤 N 矿化量是不真实的,而且土壤矿质 N 的多少也并不能够反映其重要性,例如土壤 NO_3^- -N 含量在某一时间可能是很小的,但可能在 1~2 天内迅速增大而保持对作物的有效供应^[19]。使用这种方法确定土壤 N 矿化量也会受到空间异质性的影响,而且很难对不同时间的测定结果进行比较。

4.2 田间矿化培养法

由于室内矿化培养法所采用的培养条件与田间情况有较大的差异,使其不能准确的计算土壤的 N 矿化量。为了研究田间条件下土壤的 N 矿化过程,进行田间矿化试验是非常必要的。最初使用的田间矿化培养法是将采集的土样放入塑料袋中,并重新放回原来的位置,经过一段时间后取出,通过比较土样培养前后矿质 N 的差异来计算土壤 N 矿化量^[20]。在这段时间内土壤温度是随周围环境的变化而变化,土壤含水量与开始采集土样时的含水量基本保持一致,土壤中的 N 素也不被作物吸收。为了减少土壤前处理对土壤 N 矿化造成的影响,以后的田间矿化培养逐渐使用塑料管来采集原状土柱进行培养^[21]。考虑到田间条件下较强的反硝化损失和淋洗损失,还出现了乙炔密闭培养法^[22]和 RCT 法 (the resin-core technique)^[23]。乙炔密闭培养法是在培养容器中加入一定量的乙炔后密封,并放回土壤中,乙炔作为硝化抑制剂能够减少通过硝化-反硝化过

程损失的 N 素。RCT 法是在培养容器的底部加入阴离子交换树脂,在培养期间原状土柱向下淋洗的 NO_3^- -N 就被吸附在树脂上。

在田间矿化培养法中,培养土样尽量保持与外界温度和含水量的一致,排除了 N 素反硝化损失和淋洗损失的影响,并阻止作物的吸收,通过连续多次的培养可以进行长时间的测定^[24],为评价田间条件下整个作物生育期土壤 N 矿化量提供了一个简便的方法。但所有的田间矿化培养法都不同程度的改变了土壤的存在状况。由于将原状土柱放置在培养容器中,在培养期间土壤无法与外界环境中的含水量保持一致,而且乙炔密闭法可能会导致培养中土壤氧气浓度的下降影响矿化,因此田间培养的时间不能过长。受土壤空间异质性的影响,使用原状土柱进行培养的变异性较大,需要进行大量的重复测定以获得真实值。在乙炔密闭法中既要保证乙炔对硝化的抑制作用,还要保证土壤中的气体组分不能变化太大,而在 RCT 法中没有考虑到反硝化所造成的 N 素损失。

田间矿化培养法目前还没有一个标准的方法,方法间的交叉比较也较少。

5 土壤氮素总矿化的测定

土壤有机质中的 N 通过微生物的作用转化成矿质态 N 释放出来,与此同时一部分矿质态 N 又会被微生物利用,转化成构成自身细胞组成的有机物质,矿化和固定这两个过程是同步进行的,两者转化 N 素的相对多少决定了土壤可以向作物供应多少 N 素,以上的各种测定方法也都是测定两者的差值,即静矿化量。但是在土壤 N 素矿化-固定过程中,土壤有机态 N 的总矿化是一个基本过程,反映了有机 N 的特性以及与外界环境的相互作用。对土壤 N 素总矿化的测定有利于我们更加准确、合理的掌握土壤 N 素转化,并进一步建立基本的机理模型。

土壤 N 素总矿化的测定是很困难的,但应用 N 同位素技术成为一种有效的方法。现在最常用的是 ^{15}N 稀释技术^[25-27],它的基本方法是将含一定丰度标记 N 的溶液注入土壤中,经一段时间的培养后测定土壤中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量及其丰度,通过公式的换算得到土壤 N 素的总矿化速率。这个方法应用的前提是:①土壤 N 素转化过程以匀速进行;② ^{15}N 和 ^{14}N 在所有的 N 库中所占的比例相同,而且被各种转化过程利用的机会相同;③同位素加入土壤后能够与土壤原有 N 库迅速达到平衡。

^{15}N 稀释技术为我们排除硝化和作物吸收等过程的影响, 对土壤 N 素总矿化进行单独的研究提供了一种方法, 但存在着以下问题: ①在各种 N 素转化过程, 许多微生物对 ^{15}N 和 ^{14}N 的利用是有差异的^[28]; ②由于土壤异质性的影响, 矿质态 N 要达到均一分布是很困难的^[29], 这就使得 ^{15}N 和 ^{14}N 不可能以相同的机会被利用, 因此在使用这项技术的时候要注意对结果的分析。

6 土壤氮矿化模型

使用模型描述土壤 N 矿化过程, 有利于我们更深入的揭示土壤内部 N 循环, 能够帮助我们更准确的预测土壤的 N 矿化量, 制定更合理的施肥制度。在以往的研究中已经提出了较多的模型^[30, 31]。大量的室内培养结果被用于建立土壤 N 素矿化模型。不同的模型适用于不同的土壤状况。在许多情况下, 一级动力学模型能较好的描述土壤 N 素矿化过程^[32], 而有时其他模型可能更适合, 例如零级动力学模型能更好的描述原状土壤的 N 矿化过程^[33]。由于土壤有机质中不同组分分解性不同, 有些模型将有机态 N 分为易分解部分和难分解部分, 或分为生物物质部分、化学稳定部分和物理稳定部分, 然后用一级或零级动力学模型对各部分有机态 N 分别进行模拟^[34, 35], 更好的描述了 N 素矿化过程。

根据模型的用途, N 矿化模型可以分为研究性模型和实用性模型。研究性模型尽可能多的考虑了影响 N 矿化过程的因素及其所起的作用, 考虑了各个 N 素转化过程间的关系, 从而更准确的描述土壤 N 矿化过程。实用性模型主要是用来指导施肥, 以此提高经济效益和环境效益, 可以不考虑对矿化过程影响不大的因素, 所需的输入项一般是一些容易测定的土壤指标。

总之, 以上各种研究方法都能在一定程度上评价土壤供 N 能力, 但都存在着一定的问题, 没有一种方法能够定量的描述土壤的 N 矿化量和矿化过程。在指导施肥方面, 植物吸收法和室内培养法应用的较多, 但田间测定法、土壤 N 总矿化和 N 矿化模型等方法也有一定的发展, 并应成为下一步的重点研究方向。

参考文献

1 周鸣铮编著. 土壤肥力测定与测土施肥. 北京: 农业出版社, 1988, 96 ~ 106

2 Saffigna PG. ^{15}N methodology in the field. In: Wilson JR.ed. *Advances in Nitrogen Cycling in Terrestrial Ecosystems*. Wallingford. CAB International, 1988, 433 ~ 451

3 李世娟, 李建民. 氮肥损失研究进展. 农业环境保护. 2001, 20 (5): 377 ~ 379

4 Powlson DS, Pruden G, Johnston AE, Jenkinson DS. The nitrogen cycle in the Broadbalk Wheat Experiment: Recovery and losses of ^{15}N -labelled fertilizer applied in spring and inputs of nitrogen from the atmosphere. *J. Agric. Sci.*, 1986, 107(2): 591 ~ 609

5 Powlson DS, Hart PBS, Poulton PR, Johnston AE, Jenkinson DS. Influence of soil type, crop management and weather on therecovery of ^{15}N -labelled fertilizer applied to winter wheat in spring. *J. Agric. Sci.*, 1992, 118 (1): 83 ~ 100

6 Hart PBS, Rayner JH, Jenkinson DS. Influence of pool substitution on the interpretation of fertilizer experiments with ^{15}N . *J. Soil. Sci.*, 1986, 37 (3): 389 ~ 403

7 宋建国, 刘伟, 赵紫娟, 林杉, 吴文良, 毛达如. 土壤干燥过程对土壤易矿化有机态氮的影响. 植物营养与肥料学报, 2001, 7 (2): 183 ~ 188

8 Adams MA, Attiwill PM. Nutrient cycling and nitrogen mineralization in eucalypt forests of south-eastern Australia. II. Indices of nitrogen mineralization. *Plant Soil*, 1986, 92 (3): 341 ~ 362

9 Liao Liping, Ineson P. Effect of fluctuating temperatures on forest soil nitrogen mineralization. *Pedosphere*, 1997, 7 (1): 31 ~ 34

10 Chen Jia-zhou, Qin Hua-chang. Nitrogen mineralization potentials of upland soils in central China. *Pedosphere*, 1995, 5 (2): 127 ~ 133

11 巨晓棠, 李生秀. 土壤氮素矿化的温度水分效应. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 (1): 37 ~ 42

12 高亚军, 黄东迈, 朱培立, 王志明, 李生秀. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对氮素肥力的影响. 土壤学报, 2000, 37(4): 456 ~ 463

13 徐福利, T. 阿培尔. 电超滤法(EUF)浸提测定 ^{15}N 标记植物残体有机氮和无机氮的转化. 西北农业学报, 1995, 4 (2): 45 ~ 58

14 Mengel K. Available nitrogen in soils and its determination by the 'N-Min' method and by electroultrafiltration (EUF). *Fertilizer Res.*, 1991, 28 (3): 251 ~ 262

15 Saint Fort R, Frank KD, Schepers JS. Role of nitrogen

- mineralization in fertilizer recommendations. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.*, 1990, 21 (13/16): 1945 ~ 1958
- 16 李生秀, 付会芳, 袁虎林, 肖俊璋. 几种测氮方法在反映土壤供氮能力方面的效果. *土壤*, 1990, 22 (4): 194 ~ 197
- 17 李菊梅, 王朝辉, 李生秀. 有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义. *土壤学报*, 2003, 40 (2): 232 ~ 238
- 18 胡田田, 李生秀. 土壤供氮能力测试方法的研究 IV 土壤剖面中的起始 NO_3^- -N-可靠的土壤氮素有效性指标. *干旱地区农业研究 (增刊)*, 1993, 74 ~ 82
- 19 Davidson EA, Stark JM, Firestone MK. Microbial production and consumption of nitrate in an annual grassland. *Ecology*, 1990, 71 (5): 1968 ~ 1975
- 20 Smith SJ, Young LB, Miller GE. Evaluation of soil nitrogen mineralization potentials under modified field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1977, 41 (1): 74 ~ 76
- 21 苏波, 韩兴国, 渠春梅, 黄建辉. 东灵山油松纯林和油松-辽东栎针阔混交林土壤氮素矿化 / 硝化作用研究. *植物生态学报*, 2001, 25 (2): 195 ~ 203
- 22 Hatch DJ, Jarvis SC, Philipps Lois. Field measurement of nitrogen mineralization using soil core incubation and acetylene inhibition of nitrification. *Plant and soil*, 1990, 124 (1): 97 ~ 107
- 23 Bhogal A, Hatch DJ, Shepherd MA, Jarvis SC. Comparison of methodologies for field measurement of net nitrogen mineralisation in arable soils. *Plant and Soil*, 1999, 207 (1): 15 ~ 28
- 24 Gill K, Jarvis SC, Hatch DJ. Mineralization of nitrogen in long-term pasture soils: effects of management. *Plant and Soil*, 1995, 172 (1): 153 ~ 162
- 25 Ledgard SF, Jarvis SC, Hatch DJ. Short-term nitrogen fluxes in grassland soils under different long-term nitrogen management regimes. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30 (10/11): 1233 ~ 1241
- 26 李玉中, 祝廷成, Redmann RE. 三种利用类型羊草草地氮总矿化、硝化和无机氮消耗速率的比较研究. *生态学报*, 2002, 22 (5): 668 ~ 673
- 27 李玉中, 祝廷成, Redmann RE. 羊草草地氮总矿化、硝化和无机氮消耗速率研究. *中国农业科学*, 2002, 35 (11): 1428 ~ 1431
- 28 Heaton TE. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and the atmosphere: A review. *Chem. Geol.*, 1986, 59: 87 ~ 102
- 29 Barraclough D. The use of mean pool abundances to interpret ^{15}N tracer experiments I. Theory. *Plant and Soil*, 1991, 131 (1): 89 ~ 96
- 30 穆小民, 樊小林. 土壤氮素矿化的生态模型研究. *应用生态学报*, 1999, 10 (1): 114 ~ 118
- 31 彭令发, 郝明德, 来璐. 土壤有机氮组分及其矿化模型研究. *水土保持研究*, 2003, 10 (1): 46 ~ 70
- 32 Matus FH, Rodriquez J. A simple model for estimating the contribution of nitrogen mineralization to the nitrogen supply of crops from a stabilized pool of soil organic matter and recent organic input. *Plant and Soil*, 1994, 162 (2): 259 ~ 271
- 33 Addiscott TM. Kinetics and temperature relationships of mineralization and nitrification in Rothamsted soils with differing histories. *J. Soil. Sci.*, 1983, 34 (2): 343 ~ 353
- 34 Deans JR, Molina JAE, Clapp CE. Models for predicting potentially mineralizable N and decomposition rate constants. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986, 50 (2): 323 ~ 326
- 35 Beauchamp EG, Reynolds WD, Brasche-villeneuve D, and Kirby K. Nitrogen mineralization kinetics with different soil pretreatments and cropping histories. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986, 50 (6): 1478 ~ 1483

METHODS FOR STUDYING SOIL NITROGEN SUPPLY CAPACITY

YAN De-zhi WANG De-jian

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

Abstract The methods that are commonly used in studying nitrogen supply capacity, including chemical methods, field measurements, measurement of gross mineralization, etc. are systematically summarized in the hope that the work may provide a useful basis for the study on soil N supply capacity.

Key words Soil nitrogen supply capacity, Mineralization, Analysis method