植物营养与肥料学报 2012,18(3):749 -757
Plant Nutrition and Fertilizer Science

有机肥氮素矿化及影响因素研究进展

李玲玲, 李书田*
(农业部植物营养与肥料重点实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要: 本文综述了有机肥氮素矿化和影响因素的研究进展。有机肥氮素矿化的研究方法主要有室内培养法和田间原位培养法。非淋洗通气培养法和原状土柱培养法虽不破坏土壤结构,但可能低估有机氮的矿化潜力;间歇淋洗通气培养法可模拟植物吸收不断移除矿质氮,适合大批样品的快速测定,但可能高估有机氮的矿化潜力。田间原位培养法包括聚乙烯袋培养法、顶盖埋管培养法和离子交换树脂法。聚乙烯袋培养法目前使用最广泛,但具有不透水、破坏土壤结构、矿质氮损失等缺点,顶盖埋管培养法虽可透水且不易被损坏,但可引起矿化氮流失。离子交换树脂芯法在不破坏土壤原状的条件下进行培养,虽费时、费力,但对土壤温度、湿度、通气状况反应灵敏,并可消除矿质氮累积的影响。影响有机肥氮素矿化的因素主要包括有机肥特性、温度、水分、土壤质地、施肥等因素。关于畜禽粪便的种类、熟化程度、C/N 比、碳氮化合物组成等影响有机肥的矿化量和矿化动力学特征的研究较多。用有效积温来表示有机肥的矿化与温度之间的关系更为合理。目前,关于水分的影响,主要集中在干湿交替对有机氮矿化的影响;关于土壤质地的影响,主要集中在研究粘粒含量与有机质矿化的关系;关于施肥的影响,则重点研究氮肥、钾肥对有机氮矿化和粘土矿物固定氮的影响。今后,研究重点应放在有机肥矿化与有机氮组分关系、与植物有效性关系,有机肥替代化肥当量和替代率以及室内研究结果如何应用到田间指导合理施肥。

关键词: 有机肥;有机氮矿化;影响因素
中图分类号: S141;S131　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)03-0749-09

A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors

LI Ling-ling, LI Shu-tian*
(*Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer/*
Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: This article reviewed the research progress in mineralization of organic N in manure and impacting factors. There were two methods for study mineralization of manure N, incubation in lab and in situ culture in the field. Non-leaching aerobic incubation and original soil column incubation methods did not destroyed soil texture, but might underestimated N mineralization potential. Leaching aerobic incubation method simulating plan uptake to periodically remove the mineralized N was suitable for rapid test but might overestimate the organic N mineralization potential. In situ culture in the field includes polyethylene bag incubation, top-open buried pipes and ion exchange resin methods. Polyethylene bag incubation method has been popular but has disadvantages such as waterproof, destroying soil texture and nitrate leaching loss. Top-open buried pipes method was permeable and protected soil texture from destroyed, but nitrate leaching loss was unavoidable. Ion exchange resin method incubating without destroying soil texture, although time and labor consuming, was sensitive to soil temperature, moisture, aeration and eliminated the impact of nitrate accumulation. Factors affecting manure N mineralization include manure characteristics, temperature, moisture, soil texture and fertilizer application. Studies mainly focused on the effect of different animal manures, compost maturity, C/N ratio and organic compounds on N mineralization. It is reasonable to use accumulative temperature to express the relationship between temperature and N mineralization.

收稿日期: 2011-02-22　　**接受日期:** 2012-03-18
基金项目: 国际科技合作计划项目(2005DFA31100);国家重点基础研究发展计划课题(2007CB109308)资助。
作者简介: 李玲玲(1985—),女,河南省新密市人,硕士研究生,主要从事肥料资源高效利用研究。E-mail: llling200502@163.com
*通讯作者 Tel: 010-82108000-815, E-mail: stli@caas.ac.cn

Studies on moisture mainly in the effect of alternation of wetting and drying conditions, soil texture mainly in relationship between clay content and N mineralization, and fertilization mainly on clay mineral fixed N as affect by N or K fertilizer additions. In summary, the studies in the future will focus on relationship between organic N mineralization and organic N components, plant availability of mineralized N, manure substitution equivalence and rate for fertilizer N and how the incubation results in lab will be applied in the field.

Key words: manure; organic nitrogen mineralization; affecting factor

化肥减施并合理配施有机肥可确保粮食安全与环境友好,被认为是创造集约与可持续农业双赢局面的一个重要因素[1]。由于有机肥养分完全,且肥效较长,含有微生物、酶等,因此可促进根际营养,保水、保肥,调节土壤理化性状,提高土壤缓冲能力[2-3],提高农产品品质[4]。适量施用还可增加土壤固碳,减少温室气体 CO_2 排放[5]。近年来,随着种植业和养殖业的发展,农作物秸秆和畜禽粪便的数量增加,据估算,当前全国有机肥资源量约为49.5亿吨,可提供氮、磷、钾($N+P_2O_5+K_2O$)养分约7400万吨[6],然而,由于技术和政策措施等方面的原因,有机肥有效返还农田的比例仍然不高,加剧了环境风险[7-8]。因此,在不超出耕地有机肥承载量的条件下,施用有机肥仍是化肥减施、培肥地力、减少面源污染的主要途径之一。

有机肥中的氮大部分为有机氮,而有机氮必须矿化为无机氮后才能被作物吸收利用,因此,了解有机肥施入土壤后氮素矿化及影响因素,对高效、合理施用有机肥具有重要指导意义。国内外研究者采用不同的方法对有机肥氮素矿化进行了大量研究,取得一定进展,对指导有机肥的合理施用、提高有机肥氮素利用率起到了重要作用。为此,本文对现有的研究进行综合和分析,针对存在的问题,提出今后研究建议。

1 有机肥氮素矿化的研究方法

研究有机肥中有机氮矿化的方法很多,归结起来主要有室内培养法和田间原位培养法两种。

1.1 室内培养法

室内培养法是在适宜的温度、水分条件下研究有机肥氮素矿化,分为好气培养法和原状土柱培养法。好气培养法又分为非淋洗通气培养法[9-12]和间歇淋洗通气培养法[9,13]。非淋洗通气培养法即将有机肥与土壤充分混匀培养,定期取样测定矿质氮含量,培养一段时间后有机肥氮素矿化量为施用有机肥处理培养前后矿质氮含量与不施有机肥对照培养前后矿质氮含量的差值。间歇淋洗通气培养法是将有机肥与掺有一定量石英或蛭石的土壤混匀一起培养,并用加压抽气控制含水量,采用0.01 mol/L $CaCl_2$ 间歇淋洗矿化的无机氮。间歇淋洗通气培养法排除了培养体系中矿化氮累积对后续氮素矿化的影响,可连续培养测定,适用于大批样品的快速培养测定,使用较为广泛,但其缺点是土壤结构被破坏,通气较好,可能过高估计有机氮的矿化潜力。而原状土柱培养法与非淋洗通气培养法类似,虽然不破坏土壤结构,但由于矿质氮不像间歇淋洗法那样定期移出,积累的矿质氮影响之后有机氮的矿化,可能低估有机氮的矿化潜力。

1.2 田间原位培养法

田间原位培养法在田间条件下进行,主要有聚乙烯袋培养法[11-12,14-15]、顶盖埋管培养法[15-16]、离子交换树脂法[17-18]等。

聚乙烯袋培养法最简便、成本最低,对试验点位的温度波动反应灵敏,也是目前田间试验条件下研究有机肥氮素矿化使用最早、且最广泛的一种研究方法。具体做法是:先用环刀或土钻采集土样,一部分用来分析采样点土壤矿质氮含量,另一部分放入聚乙烯袋,与一定的有机肥混合均匀,埋入取土点进行原位培养,聚乙烯袋敞口露出地面,培养一段时间后,取出培养袋,测定其中的矿质氮含量变化,计算有机肥氮素的矿化量。这种培养法的缺陷在于:聚乙烯袋不透水,使得袋内水分含量不能真实地反应田间试验条件下的水分状况。而且,培养前采样时破坏了土壤结构,培养过程中土壤动物或植物根系可能对培养袋造成的物理性破坏,将导致矿化出氮通过质流和扩散作用转移到培养袋外的土壤[14]。此外,有研究表明,聚乙烯袋内大量的矿质氮素累积也将影响有机肥氮素的进一步转化,如影响硝化反硝化作用[19-20]。

顶盖埋管培养法是用PVC管或金属管培养,克服了聚乙烯袋不透水且易被损坏的缺陷。培养过程中保持顶部封口、底部开放、管侧壁穿孔,以获得与外部土壤环境相似的通气状况和土壤湿度,还可防止土壤和有机肥被雨水直接淋洗[16]。但有研究者

提出,顶盖埋管培养法中,管内矿化氮可能通过通气孔和开放的培养管底部发生扩散或质流,转移至管外土壤[20],此外,进入培养管内或在培养管周围生长的作物根系可能会吸收利用培养微环境内的矿化氮。

鉴于聚乙烯袋培养法和顶盖埋管培养法的这些缺点,研究者提出用更精密的离子交换树脂芯法来研究有机肥氮素矿化,包括离子交换树脂袋法[17]和离子交换树脂膜法[18]。具体操作步骤为:采用 PVC 管直接插入土壤,取管内表层 0—5 cm 的土壤与应施有机肥混匀重新装入管内,PVC 管上下两端用离子交换树脂袋或离子交换树脂膜封口,形成一个"三明治夹心"结构,在不破坏土壤原状的条件下进行培养。与聚乙烯袋培养法和顶盖埋管培养法相比,此法费时、费力,须做预试验充分考虑离子竞争和树脂吸附饱和点,以确保有机肥和土壤培养过程中矿化出的氮能完全被离子交换树脂所吸附。但这种培养方法不仅对试验点位微区土壤温度、湿度、通气状况反应灵敏,而且可以消除矿质氮累积对有机氮转化过程的影响,还可提供基于一定质量或体积的土壤-有机肥的氮素转化[21]。

2　影响有机肥氮素矿化的因素

有机肥施入土壤后,通过一系列物理、化学和生物学过程完成有机氮素矿化。因此,凡是影响土壤物理、化学和生物学的因素必然影响有机氮的矿化过程和矿化速率,这些因素除有机肥本身特性外,还包括温度、水分、土壤理化性质如土壤质地等。

2.1　有机肥本身特性

不同有机肥的特性不同,这决定了其施入土壤后的矿化行为,同时也决定了其通过矿化可转化为植物有效性氮的数量。王正银[22]研究表明,鸡粪的矿化速率较快,但整个矿化过程较短暂;猪粪则具有持续性和衡稳性,施用猪粪的处理累积矿化氮呈缓慢增加趋势;牛粪矿化氮累积总量最低,且矿化过程由慢到快,呈低速递增趋势。这一点与其他研究一致,如 Eghball 等[23]指出,猪粪和鸡粪有机氮的矿化率大约可达到 55%,牛粪的矿化率大约为 30%。赵明等[24]通过室内培养实验研究表明,鸡粪、猪粪、牛粪的碱解氮释放量在培养 120 d 时分别为施入氮总量的 39.9%、35.3% 和 20.6%。Cordovil 等[25]采用室内培养法估算活性氮时认为,用有机肥可矿化氮与全氮含量之比来表示有机肥的活性氮百分数(ANF,Active N Fraction),则鸡粪的活性氮百分数相对最高,约为 37%,猪粪的活性氮百分数略大于猪粪堆肥,但均介于 25%～33% 之间。即使是同种畜禽粪便,腐熟与否以及腐熟程度也影响有机氮的矿化,腐熟处理可降低畜禽粪便有机肥氮素矿化量,且腐熟程度越充分,降低幅度越大[26-27]。Hadas 和 Portnoy 研究表明,堆肥后氮素有效性相对降低,牛粪堆肥在培养 32 周后释放的无机氮量仅为全氮的 11%～29%,不超过不溶性氮的 10%[28]。其原因主要是,有机肥腐熟过程中微生物的参与将无机态氮和易转化有机态碳氮化合物分解,或以气体形式损失,或形成较稳定的腐殖质,增加了有机肥剩余碳氮的稳定性[29-31]。

有机肥的 C/N 比在调控其氮素矿化与固持的过程中起着至关重要的作用,是决定有机肥氮素矿化的最主要的特性指标之一[25]。宽 C/N 比有机肥施入土壤后,在矿化初期,如果条件适宜,有机肥碳、氮矿化速率较大,矿化出的碳部分为微生物提供碳源,部分以 CO_2 的形式释放出来,相应地,部分氮被微生物吸收,满足其对氮素营养的需求,因此出现了氮的净固定[28,32]。之后,随着 C/N 比逐渐变窄,开始出现氮的净矿化。C/N 比在 4～15 范围内,有机肥的氮素矿化量和矿化速率与其 C/N 比之间存在显著负相关关系[11,25,33-35]。一般认为,当有机肥的 C/N 比小于 15 时,有机肥可出现净矿化;C/N 比大于 19 时,有机肥出现净固定。沈其荣等[33]认为,有机肥总 C/N 比影响氮素矿化的总趋势,猪粪、鸡粪的 C/N 比小于 12,其氮素有效性高,而牛粪、羊粪的总 C/N 比大于 20,其氮素有效性则低。李俊良等[34]认为,不同有机肥料的全碳及碳氮联合测定的氮素之比和氮素矿化率成直线关系,和植物吸收氮素成幂函数相关,在 C/N 比低于 17～21 时,有机肥料开始释放无机氮,在 C/N 比小于 14 时,植物才能大量吸收有机肥料中的氮素。Calderón 等[36]在采用培养实验研究 107 种乳牛粪的碳、氮矿化动力学时,也认为在培养期间出现净矿化的有机肥的平均 C/N 比为 16.0,而出现矿化量为负值即出现净固定的有机肥的平均 C/N 比为 19.0。Probert 等[37]认为,C/N 比 20 是有机肥在培养初期出现净固定和净矿化的临界值,当 C/N 比大于 20 时,有机肥在矿化初始阶段出现净固定,直至这部分新固定的氮重新释放,土壤无机氮含量才开始逐渐增多。

有机肥料的矿化不仅与其 C/N 比有关,还受有机肥的氮素含量、尿酸含量、碳氮化合物组分、有机氮/无机氮比例、纤维素和木质素含量的影响。若有

机肥碳组分以糖、淀粉和有机酸为主时，会提高有机肥氮的矿化率，而含纤维素、半纤维素较多时，则矿化速率减缓[33,38-40]。Tagliavini 等[39]在研究苹果叶子及黑麦草腐解过程中氮素矿化动力学特征时，发现木质素与氮的比率大，比率约13的有机肥中木质素最终不能被降解，但当比率大于23时，木质素最终可得以降解。有研究表明，高氮含量能抑制木质素生物降解酶类的形成及减少可降解木质素的微生物数量（如担子菌）。朱大威等[40]指出，作物残体的矿化与其初始C/N比，初始碳、氮含量以及木质素的含量均相关。近红外光谱分析技术的发展有助于将有机肥碳、氮组分进一步细分，以便更深入地研究不同碳、氮组分对有机肥氮素矿化的影响。然而，有研究认为，C/N比及其碳、氮含量和组分与有机肥矿化量的关系即使达到了显著水平，但由于回归系数较小[41]，也不能充分解释不同有机肥氮素矿化的差异性。因此，仅凭其组成参数还不能对有机肥氮素矿化做出准确的预测。

有机肥的种类和特性也影响其氮素矿化动力学特征。一般来说，不同有机物料在与土壤混合培养时的氮素矿化可概括为下面4个模式：

1）在矿化最初阶段为氮的净固定，之后一段时间出现净矿化；

2）氮素释放速率随矿化的进行逐渐减慢；

3）整个培养期内氮素呈稳定的线性释放；

4）培养最初几天快速释放，之后速率减慢，呈线性释放。

家畜、家禽有机肥的矿化特征为非线性释放1）、4）模式的综合，即在前4周无净矿化或极少矿化，4～12周矿化速率逐渐加快，之后以恒定的速率常数释放氮素，直至26周培养结束，可用 Stanford 和 Smith[42] 提出的氮素矿化单库模型来描述[10,43-45]。但对于C/N比不断变化的有机物如作物秸秆，要采用更为复杂的模型表述，并同时考虑温度、水分和土壤质地的影响[40]。

因此，有机氮素的矿化和有效性与有机肥的种类、特性、处理方式、腐熟程度等密切相关，但关于有机肥中有机氮种类和特性与氮素矿化和有效性的关系，不同土壤对不同有机肥矿化和有效性的影响的研究较少，有待进一步研究。

2.2 温度

有机肥的氮素矿化是由多种微生物和土壤酶参与的一系列过程，温度通过影响微生物群落结构、数量、活性以及土壤酶活性影响有机肥氮素矿化。相关研究资料表明，随着温度升高，土壤中可溶性矿化底物扩散增强，更易于被微生物利用，土壤微生物群落结构发生明显改变，嗜温微生物含量增加，易矿化氮库容增加，有机肥氮素矿化量也随之增加[46-47]。培养温度在30～35℃之间时，硝化速率最快[48]，表明此温度范围为有机肥矿化的最适温度。Whitmore[49]认为，温度对腐熟鸡粪氮素矿化的影响符合指数方程 $k_T = k_0 \exp[1/T_0 - B/T]$，式中，$T_0$、T分别为参考温度和设定温度，$k_0$、$k_T$ 分别为相对应的矿化速率常数，B为常数。多数研究者使用有效积温来表示温度对有机肥氮素矿化的影响，如李俊良等[34]采用好气培养—间歇淋洗实验研究表明，玉米秸秆和猪粪氮素的矿化累积量与有效积温之间的关系可用直线方程 $y = a + bx$ 来描述，相关系数分别为0.9417和0.9925；沈其荣等[33]的淹水培养试验结果表明，牛粪、羊粪、猪粪、鸡粪的氮素矿化累积量与有效积温的关系可用 $y = x/(a + bx)$ 表示，矿化量高低依次为鸡粪 > 猪粪 > 羊粪 > 牛粪。此外，Griffin 和 Honeycutt[50]采用室内好气非淋洗实验表明，当土壤水分含量最佳时，在10～24℃温度范围内，猪粪、鸡粪、牛粪的氮素矿化量随温度升高而增加，NO_3^--N的累积速率与有效积温的关系可用单指数函数描述，NH_4^+-N的累积速率与有效积温成直线相关。因此，使用有效积温来表示有机肥的矿化与温度之间的关系更为合理，使得采用不同培养温度所得有机肥的矿化速率可以相互比较。

2.3 水分

水分条件将改变土壤通气状况，影响有机肥中可溶性底物在土壤中的扩散，改变微生物群落结构及活性[51]，进而影响有机肥氮素矿化过程中的氨化、硝化、反硝化作用。有研究表明，当田间持水量（WHC）为18%～45%时，有机肥氮素净矿化量随水分含量增加而增加[52]。WHC为60%时，参与有机肥氮素矿化的好气微生物的活性最强，有机肥的硝化速率最大[53]。超过此值，参与反硝化作用的厌氧微生物活性增强，反硝化作用较强[54]；反之，低水分含量降低土壤中可溶性底物的扩散作用，土壤微生物活性受到抑制，硝化作用较弱，不能及时地为作物提供有效氮，甚至造成氨毒害[32]。

此外，雨养田的土壤含水量不是恒定不变的，而是处于一定的变化范围内。WHC为30%～60%的干湿交替过程增加有机肥的矿化量，矿化速率加快，增加的幅度与土壤有机质含量和干燥时间长短有关[32]。其原因可能是，干燥过程导致微生物活性降

低[55],数量减少[32],其所固定氮通过微生物细胞的自溶或腐解得以释放;干燥使有机氮转化为可溶性较强的复合体,从而易于微生物对其进行分解,使无机氮释放增多[32];干湿交替导致土壤中水溶性团聚体的裂解,使得其与微生物的接触表面积增大,矿化量增大。

2.4　土壤质地

土壤质地不同,其孔隙系统、通气状况以及持水能力不同,进而影响参与降解有机肥的微生物活性,因此其对有机肥氮的矿化速率及矿化量的影响更为复杂,很难断定试验结果差异是单纯由质地差异引起,还是由其他因素的交互作用所致。

目前,对于土壤质地与有机肥矿化关系的研究结果为有机肥氮素净矿化量与土壤粘粒含量呈负相关[10, 56-57]或不相关[58-59]。认为有机肥的矿化速率与土壤粘粒含量呈负相关的原因是土壤质地越粘重,土壤颗粒越细,对矿化底物的物理性保护越强,对微生物活动的抑制越强,有机肥矿化速率越慢[57]。此外,土壤质地越粘重,施入有机肥易矿化碳库容减小幅度越小,C/N 比降低的速率越慢,有机氮的矿化速率越慢[56]。然而,^{15}N 标记有机肥氮研究试验表明,土壤粘粒含量在 4%～16% 之间时,有机肥氮矿化速率受土壤质地的影响较小,而土壤氮的微生物固定则与粘粒含量呈正相关,即土壤粘粒含量越高,施入有机肥后微生物对土壤中无机氮的固定量越高,有机肥的净矿化量越低,但有机肥自身的矿化速率并不受影响[58-59]。

因此,土壤粘粒含量的变化范围以及研究方法可能影响土壤质地对有机肥氮素矿化研究的结论。当土壤粘粒含量较低时,有机肥自身氮素矿化速率不受土壤质地影响。常规试验中,有机肥氮素矿化的动态趋势可能被土壤内源氮的动态变化所掩蔽,采用稳定性同位素^{15}N 更能客观地揭示土壤质地对有机肥氮素矿化的影响。

2.5　其它理化性状

除土壤温度、水分、质地之外,其它理化性状也可能影响有机肥氮素矿化,如土壤 pH 值、土壤重金属含量等[60-61]。试验表明,当鸡粪中尿酸和未消化蛋白在土壤 pH≥5 时,降解速率最快[60];银(Ag)、汞(Hg)和铜(Cu)的加入可能通过抑制参与氮素矿化酶类如 β-葡萄糖苷酶活性,进而抑制有机肥氮素的矿化[62]。

2.6　施肥

施用化学氮肥对有机肥氮素矿化的影响有两种情况:一种是促进作用,增加其氮素矿化量,提高矿化速率,特别是在砂质、低肥土壤上,这种效果尤其显著[63-65];另一种是无显著影响。有研究表明,无论土壤肥力高低,配施尿素均可增加有机肥氮的净矿化量,尤其在矿质氮含量较低的土壤上更明显[65-66],可能是因为化肥氮的施入一方面降低有机肥矿化初始 C/N 比,从而使有机肥氮易于矿化,另一方面土壤矿质氮含量较低时,异养微生物活性较低,适量添加化肥氮为异养微生物提供充足无机氮,增强了其活性,促进了有机肥氮素的矿化分解[64, 67]。但也有研究者认为,配施尿素对有机肥氮素有效性无显著影响[68],可能是试验采用的有机肥 C/N 比较宽,即使施入适量的化肥氮,仍不足以使微生物活性发生显著变化[63],或者供试土壤内源无机氮含量较高,即使不配施化肥,也能为微生物活动提供充足氮源。化肥与有机肥^{15}N 交叉标记试验表明,猪粪和化肥配施时,由于猪粪性质柔和、供肥平稳,与单施猪粪相比,土壤微生物量氮来自于猪粪的比例变化不大,来自于土壤氮的比例却有所提高,这可能与猪粪和化肥配施时氮素养分浓度较高,与土壤氮素发生置换作用,使土壤氮被微生物固定有关[69]。此外,等氮条件下化肥与有机肥配施,可增加粘土矿物固定态铵的总量及粘土矿物对有机肥氮的固定[70],此部分"新固定铵"在作物生长生育期内能够再次释放出来供作物利用,进而提高有机肥氮素有效性[71-72]。但当有机肥与含钾无机肥料配施时,过量的钾可能会阻碍固定态铵的释放[71]。

3　问题与展望

我国是化肥消费大国,化肥消费量($N+P_2O_5+K_2O$)已占世界化肥消费量的 1/3 以上,达到 5600 多万吨,其中氮超过 3000 万吨。氮肥施用过量、利用率低、损失严重等对生态环境构成威胁,并限制农业可持续发展。如何利用好有机肥资源,实现有机无机配合一直是植物营养学科的研究热点。与化肥一样,有机肥的施用也不是越多越好,过量施用同样会带来硝酸盐淋失、温室气体排放等生态风险,有机无机肥料的用量和比例决定着其可以提供给作物的有效氮含量和供肥强度,是研究有机无机肥合理配施必须解决的首要问题。因此,必须了解有机肥的

矿化潜力和生物有效性,才能确定有机肥的合理用量和有机无机配合施用的比例。

综上,通过对有机肥矿化研究方法和影响有机氮矿化的因素进行分析和综合,以下问题值得进一步研究。

1)虽然有机肥氮素矿化的研究方法相对成熟,但有机肥氮素矿化动力特征与作物有效性关系研究相对薄弱,是否可以通过测定有机肥氮素矿化来估计有机肥氮素有效性有待进一步研究。室内模拟试验的优点在于培养条件易于控制,试验结果较稳定,能够得出规律性的结论,但有机肥氮素矿化的实验室培养结果与大田作物吸收氮素的相关性研究有待加强,旨在提出有机肥在不同气候区域农田的实际氮素矿化系数,为农业中有机肥料的合理施用提供科学依据。

2)关于有机肥有机氮矿化和有效性,不同研究者研究结果各异,但关于有机肥氮替代化肥氮的比例研究少有报道,不同有机肥氮素释放、转化和替代化肥氮当量需要进一步研究。过去有机无机配合研究多数都是在推荐化肥用量的基础上,研究增施有机肥的效果,很少考虑随有机肥施入的养分,因而很可能过高估计有机肥料的作用和有机无机肥配合施用的交互作用。比较等养分条件下不同比例有机肥氮替代化肥氮对作物产量、氮素利用效率以及氮肥后效的影响,找出有机肥氮替代化肥氮的最佳替代比例,才是实现节约氮肥施用,实现有机无机配合的真正目标。

3)目前对影响有机肥氮素矿化的因素研究较多,得到了一定的结果和规律,但如何把这些因素如土壤、温度、水分的影响综合考虑到有机肥氮素矿化动力学数学模型中,以预测不同气候条件下有机肥的氮素矿化量、矿化速率和矿化潜力,对不同区域有机肥的合理施用更有实际性意义,应该是今后研究的重点内容之一。

4)国内外关于有机肥的 C/N 比对有机氮矿化的影响研究较多,但对矿化过程中有机氮组分的转化特征及其与氮素矿化的关系较少研究。近年来,近红外光谱分析技术和色谱分析的发展将有助于对有机肥氮素组成进行更精确地分析,以监测不同氮组分的转化及其对有机肥氮素矿化的影响。另外,虽然有机肥的施用能够影响土壤微生物数量及其群落结构,但这种微生物数量及其群落结构的变化对有机肥的矿化是否有影响还缺乏深入系统地研究。

参 考 文 献:

[1] Singh U. Integrated nitrogen fertilization for intensive and sustainable agriculture[J]. J. Crop Improv., 2006, 15: 259-288.

[2] 郑宝仁, 赵静夫. 土壤与肥料[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
Zheng B R, Zhao J F. Soils and fertilizers[M]. Beijing: Peking Univ. Press, 2007.

[3] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
The National Agro-Tech Extension and Service Center. Organic fertilizer resources in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.

[4] Mozafar A. Enrichment of some b-vitamins in plants with application of organic fertilizers[J]. Plant soil, 1994, 167: 305-311.

[5] Lal R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon[J]. Adv. Agron., 2001, 71: 145-191.

[6] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207-4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(20): 4207-4229.

[7] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006, (1): 3-8.
Huang H X, Li S T, Li X L *et al*. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. Soil. Fert., 2006, (1): 3-8.

[8] 刘晓燕, 金继运, 任天志, 等. 中国有机肥料养分资源潜力和环境风险分析[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2092-2098.
Liu X Y, Jin J Y, Ren T Z *et al*. Potential of organic manures nutrient resources and their environmental risk in China[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(8): 2092-2098.

[9] Parker C F, Sommers L E. Mineralization of nitrogen in sewage sludges[J]. J. Environ. Qual., 1983, 12: 150-156.

[10] Chae Y M, Tabatabai M A. Mineralization of nitrogen in soil amended with organic wastes[J]. J. Environ. Qual., 1986, 15: 193-198.

[11] Calderón F J, McCarty G W, Reeves J B. Analysis of manure and soil nitrogen mineralization during incubation[J]. Biol. Fert. Soils, 2005, 41: 328-336.

[12] Cusick P R, Powell J M, Kelling R F *et al*. Dairy manure N mineralization estimates from incubations and litter bags[J]. Biol. Fert. Soils, 2006, 43: 145-152.

[13] Christensen B T, Olesen J E. Nitrogen mineralization potential of organomineral size separates from soils with annual straw incorporation[J]. Eur. J. Soil Sci., 1998, 49: 25-36.

[14] Eno C H. Nitrate production in the field by incubating the soil in polyethylene bags[J]. Soil. Sci. Soc. Am. Proc., 1960, 24: 277-279.

[15] Hanselman T A, Graetz D A, Obreza T A. A comparison of *in situ* methods for measuring net nitrogen mineralization rates of organic soil amendments[J]. J. Environ. Qual., 2003, 33: 1098-1105.

[16] Adams M A, Polglase P J, Attiwill P M *et al*. *In situ* studies of nitrogen mineralization and uptake in forest soils: some comments on methodology[J]. Soil Biol. Biochem., 1989, 21: 423-429.

[17] Distefano J F, Gholz H L. A proposed use of ion exchange resins to measure nitrogen mineralization and nitrification in intact soil cores[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1986, 17: 989-998.

[18] Abrams M M, Jarrell W M. Bioavailability index for phosphorus using ion exchange resin impregnated membranes[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1532-1537.

[19] Raison R, Connell M, Khnana M. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*[J]. Soil Biol. Biochem., 1987, 19: 521-530.

[20] Subler S, Parmelee R W, Allen M F. Comparison of buried bag and PVC core methods for *in situ* measurement of nitrogen mineralization rates in an agricultural soil[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1995, 26: 2369-2381.

[21] Hart S C, Firestone M K. Evaluation of three *in situ* soil nitrogen availability assays[J]. Can. J. For. Res., 1989, 19: 185-191.

[22] 王正银. 有机肥氮和碳素矿化动力学[J]. 西南农业大学学报, 1993, 15(3): 197-201.
Wang Z Y. Modeling nitrogen and carbon mineralization from organic materials[J]. J. Southwest Agric. Univ., 1993, 15(3): 197-201.

[23] Eghball B, Wienhold B J, Gilley J E *et al*. Mineralization of manure nutrients[J]. J. Soil Water Conserv., 2002, 57: 470-473.

[24] 赵明, 蔡葵, 赵征宇, 等. 不同有机肥料中氮素的矿化特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 146-149.
Zhao M, Cai K, Zhao Z Y *et al*. Characteristics of NO_3^--N and NH_4^+-N mineralization from different organic fertilizers[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2007, 26(Suppl.): 146-149.

[25] Cordovil C M d S, Cabral F, Coutinho J. Potential mineralization of nitrogen from organic wastes to ryegrass and wheat crops[J]. Biores. Technol., 2007, 98: 3265-3268.

[26] Bernal M P, Sánchez-Monedero M A, Paredes C *et al*. Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 1998, 69: 175-189.

[27] Preusch P L, Adler P R, Sikora L J *et al*. Nitrogen and phosphorus availability in composted and uncomposted poultry litter[J]. J. Environ. Qual., 2002, 6: 2051-2057.

[28] Hadas A, Portnoy R. Nitrogen and carbon mineralization rates of composted manures incubated in soils[J]. J. Environ. Qual. 1994, 23: 1184-1189.

[29] Eghball B, Wienhold B J, Gilley J E *et al*. Mineralization of manure nutrients[J]. J. Soil Water Conserv., 2002, 57: 470-473.

[30] 贺琪, 李国学, 张亚宁, 等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 169-176.
He Q, Li G X, Zhang Y N *et al*. N loss and its characteristics during high temperature composting[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2005, 24(1): 169-173.

[31] 高伟, 郑国砥, 高定, 等. 堆肥处理过程中猪粪有机物的动态变化特征[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 986-990.
Gao W, Zheng G D, Gao D *et al*. Transformation of organic matter during thermophilic composting of pig manure[J]. Chin. J. Environ. Sci., 2006, 27(5): 986-990.

[32] Stevenson F J, Cole M A. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients (2nd edn.)[M]. New York, USA: John Willey & Sons Lotd, 1999. 155-231.

[33] 沈其荣, 沈振国, 史瑞和. 有机肥氮素的矿化特征及其与化学组成的关系[J]. 南京农业大学学报, 1992, 15(1): 59-64.
Shen Q R, Shen Z G, Shi R H. The characteristics of mineralization of nitrogen in organic manure and its relation to chemical composition of organic manure[J]. J. Nanjing Agric. Univ., 1992, 15(1): 59-64.

[34] 李俊良, 韩琅丰. 碳、氮比对有机肥料氮素释放和植物吸氮的影响[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(5): 57-61.
Li J L, Han L F. Effects of C/N on the release of nitrogen from organic manures and of nitrogen absorbed by plant[J]. J. China Agric. Univ., 1996, 1(5): 57-61.

[35] Gale E S, Sullivan D M, Hemphill D *et al*. Predicting nitrogen availability from organic amendments: Laboratory, field and computer simulation[A]. Sterens B. Western Nutrient Manayement Conference Proceedings[C]. Salt Lake City, UT: Potash and Phosphate Institute, 2005, 236-243.

[36] Calderón F J, McCartyd G W, Van Kessel J A S, Reeves J B. Carbon and nitrogen dynamics during incubation of manured soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2004, 68: 1592-1599.

[37] Probert M E, Delve R J, Kimani S K *et al*. Modelling nitrogen mineralization from manures: representing quality aspects by varying C:N ratio of sub-pools[J]. Soil Biol. Biochem., 2005, 37: 279-287.

[38] Gordillo R M, Cabrera M L. Mineralizable nitrogen in broiler litter: I. Effect of selected litter chemical characteristics[J]. J. Environ. Qual., 1997, 26: 1672-1679.

[39] Tagliavini M, Tonon G, Scandellari F *et al*. Nutrient recycling during the decomposition of apple leaves (*Malus domestica*) and mowed grasses in an orchard[J]. Agric., Ecosyst. Environ.,

2007, 118: 191-200.

[40] 朱大威, 黄耀, 卢燕宇. 有机肥氮素释放动态模型的初步研究[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(3): 146-150.
Zhu D W, Huang Y, Lu Y Y. A primary study on modeling nitrogen release from organic manure[J]. J. Nanjing Agric. Univ., 2006, 29(3): 146-150.

[41] Van Kessel J S, Reeves J B. Nitrogen mineralization potential of dairy manures and its relationship to composition[J]. Biol. Fert. Soils, 2002, 36:118-123.

[42] Stanford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potentials of soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1972, 109: 190-196.

[43] 巨晓棠, 李生秀. 培养条件对土壤氮素矿化的影响[J]. 西北农业学报, 1997, 6(2): 64-67.
Ju X T, Li S X. Effects of incubation conditions on soil nitrogen mineralization[J]. Northwest China J. Agric. Univ., 1997, 6(2): 64-67.

[44] Cordovil C M D S, Coutinho J, Goss M *et al*. Potentially mineralizable nitrogen from organic materials applied to a sandy soil: fitting the one-pool exponential model [J]. Soil Use Manage., 2005, 21: 65-72.

[45] Khorsandi N, Nourbakhsh F. Prediction of potentially mineralizable N from amidohydrolase activities in a manure-applied corn residue-amended soil [J]. Eur. J. Soil Biol., 2008, 44: 341-346.

[46] MacDonald N W, Zak D R, Pregitzer K S. Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59: 233-240.

[47] Zogg G P, Zak D R, Ringelberg D B *et al*. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61: 475-481.

[48] Stark J M. Modeling the temperature response of nitrification[J]. Biogeochemistry, 1996, 35: 433-445.

[49] Whitmore A P. Determination of the mineralization of nitrogen from composted chicken manure as affected by temperature[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2007, 77: 225-232.

[50] Griffin T S, Honeycutt C W. Using growing degree days to predict nitrogen availability from livestock manures[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 1876-1882.

[51] Agehara S, Warncke D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69: 1844-1855.

[52] De Neve S, Hofman G. Quantifying soil water effects on nitrogen mineralization from soil organic matter and from fresh crop residues [J]. Biol. Fert. Soils, 2002, 35: 379-386.

[53] Flowers T H, O'Callaghan J R. Nitrification in soils incubated with pig slurry or ammonium sulphate[J]. Soil Biol. Biochem., 1983, 15: 337-342.

[54] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48: 1267-1272.

[55] Cortez J. Effect of drying and rewetting on mineralization and distribution of bacterial constituents in soil fractions[J]. Biol. Fert. Soils, 1989, 7: 142-151.

[56] Thomsen I K, Olesen J E. C and N mineralization of composted and anaerobically stored ruminant manure in differently textured soils[J]. J. Agri. Sci., 2000, 135: 151-159.

[57] Hubbard R K, Bosch D D, Marshall L K *et al*. Nitrogen mineralization from broiler litter applied to southeastern Coastal Plain soils [J]. J. Soil. Water Conserv., 2008, 63: 182-192.

[58] Sörensen P, Jensen E S, Nielsen N E. The fate of ^{15}N-labelled organic nitrogen in sheep manure applied to soils of different texture under field conditions [J]. Plant Soil, 1994, 162: 39-47.

[59] Sörensen P, Jensen E S. Mineralization of carbon and nitrogen from fresh and anaerobically stored sheep manure in soils of different texture [J]. Biol. Fert. Soils, 1995, 19: 29-35.

[60] Nahm K H. Factors influencing nitrogen mineralization during poultry litter composting and calculations for available nitrogen [J]. World's Poult. Sci. J., 2005, 61: 238-255.

[61] Gordillo R M, Cabrera M L. Mineralizable nitrogen in broiler litter: II. Effect of selected soil characteristics[J]. J. Environ. Qual., 1997b, 26: 1679-1686.

[62] Ekenler M, Tabatabai M A. Effects of trace elements on β-glucosaminidase activity in soils [J]. Soil Biol. Biochem., 2002, 34: 1829-1832.

[63] 娄运生, 徐本生, 杨建堂, 任丽轩. 玉米秸配施氮磷肥对其腐解及潮土供氮磷特性的影响[J]. 土壤肥料, 1998, (2): 26-28.
Lou Y S, Xu B S, Yang J T *et al*. Effects of combined corn staw and chemical fertilizers on its decomposition and nitrogen and phosphorus supply of Chao soil[J]. China Soils Fert., 1998, (2): 26-28.

[64] Chantigny M H, Angers D A, Prévost D *et al*. Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization[J]. Soil Biol. Biochem., 1999, 31: 543-550.

[65] Han K H, Choi W J, Han G H *et al*. Urea-nitrogen transformation and compost-nitrogen mineralization in three different soils as affected by the interaction between both nitrogen inputs [J]. Biol. Fert. Soils, 2004, 39: 193-199.

[66] 黄东迈. 有机肥无机肥对提高土壤氮素肥力的作用及其配合施用[J]. 土壤通报, 1985, 16(5): 197-201.

[67] Sikora L J, Enkiri N K. Efficiency of compost-fertilizer blends compared with fertilizer alone[J]. Soil Sci., 2000, 165: 444-451.

[68] Choi W J, Jin S A, Lee S M *et al*. Corn uptake and microbial immobilization of ^{15}N-labeled urea-N in soil as affected by composted pig manure[J]. Plant Soil, 2001, 235: 1-9.

[69] 韩晓日, 郑国砥, 刘晓燕, 等. 有机肥与化肥配合施用土壤

微生物量氮动态、来源和供氮特征[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 765-772.

Han X R, Zheng G D, Liu X Y *et al*. Dynamics, sources and supply characteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer[J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(4): 765-772.

[70] 王岩, 张莹, 沈其荣, 等. 施用有机、无机肥后土壤微生物量、固定态铵的变化及其有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 307-314.

Wang Y, Zhang Y, Shen Q R *et al*. The changes of soil microbial biomass and the clay fixed ammonium after application of organic and inorganic fertilizers and their bio-effects[J]. Plant nutr. Fert. Sci., 1997, 3(4): 307-314.

[71] 沈其荣, 王岩, 史瑞和. 土壤微生物量和土壤固定态铵的变化及水稻对残留 N 的利用[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 330-338.

Shen Q R, Wang Y, Shi R H. Changes of soil microbial biomass N and soil fixed ammonium during rice growth and use efficiency of residual N by rice[J]. Acta Pedol. Sin., 2000, 37(3): 330-338.

[72] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素配施有机物料时土壤不同氮素形态的动态及利用[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 52-56.

Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Dynamics of various nitrogen forms in soil and nitrogen utilization under application urea and different organic materials[J]. J. China Agric. Univ., 2002, 7(3): 52-56.