

氮肥损失研究进展

李世娟 李建民

(中国农业大学植物科技学院,北京 100094 E-mail: lishijuan@sohu.com)

摘要: 在查阅大量大田实验和 ¹⁵N 追踪实验文献资料的基础上,对肥料氮损失量及主要损失途径进行了总结。结果表明,土壤中氮肥去向问题非常复杂,氮素损失量与施氮量和土壤水分有关。冬小麦生长期间发生淋失的可能性很小,主要是反硝化损失。

关键词: 肥料氮;损失

中图分类号: S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0267(2001)05-

Research Progress on Losses of Fertilizer Nitrogen

LI Shi-juan, LI jian-min

(Chinese Agriculture University, Beijing 100094 China E-mail: lishijuan@sohu.com)

Abstract: Today because of low nitrogen utilization efficiency (NUE), high nitrogen-fertilizer application rates are often inevitable, leading to more and more losses of N-fertilizer. This article summarizes the data from a lot of field experiments and ¹⁵N trace experiments, and assessed loss amounts of N-fertilizer and main loss way. The fate of N-fertilizer applied to soil is very complicated. Loss amounts are generally related to N rates and water moisture. In winter wheat growing season, the possibility of leaching beyond root zone is very small, while the losses by denitrification are substantive.

Keywords: losses; fertilizer N

我国从 70 年代初开始大量使用氮肥,1995 年—1996 年中国的氮肥生产量和消耗量位于世界第一位,并且中国氮肥的消耗量是美国的一倍以上。中国的氮肥消耗量远大于生产量,所以中国还需大量进口氮肥。1996 年中国进口的尿素约占世界出口量的 49.5%^[1],存在氮肥需求和供应的矛盾。而另一方面大田生产中却存在氮肥盲目使用的现象,目前中国平均施氮量超过 200 kgN·hm⁻²^[2],相当于西欧。

国外的氮肥使用量也很高。William 指出在目前的氮肥利用率基础上,世界范围内谷物生产氮肥利用率每提高 1%,将会花费 234 658 462 美元的肥料费用,若提高 20%,每年将额外花费 4.7 亿美元^[3]。

盲目提高氮肥使用量,并不能连续增加作物产量,氮肥利用率降低,同时也不能达到高效的目的。Gauer 等得出提高氮肥量并不能提高籽粒中的蛋白质含量,氮肥利用率随氮水平的提高而降低,尤其在干旱土壤条件下^[4]。过量氮肥也会对水土环境产生不良影响。

由于试验条件、计算方法等差异,前人对氮肥利用率研究结果在数值上有所不同。William 认为世界谷类作物氮肥利用率大约 33%^[3]。发达和发展中国家的氮肥利用率分别为 42%和 29%^[3]。Olsen 和 Swallow 在传统栽培制度下给冬小麦分别施不等量的氮肥(56—112kgN·hm⁻²),连续 5 年后籽粒氮肥

利用率只有 27%—33%^[5]。Leitch 和 Vaidyanathan 发现由于栽培方法、施肥量和施肥时间的不同,冬小麦对标记氮肥的回收率在 30%—50% 之间^[6]。Powlson 等认为春季施用氮肥冬小麦的氮素利用率较高,地上部回收率达 68%^[7]。我国一般将氮肥利用率看作 30%,《中国化肥工业大全》收集的尿素氮肥利用率数据是 30%—40%。朱兆良曾总结国内 728 个田间实验结果,得出我国水稻及麦类作物对氮肥的利用率只有 28%—41%。中国农业科学院土壤肥料研究所的氮肥利用率结果为 30%—40%^[8],也有氮肥当季利用率 30%—35% 的报道。

农田生态系统中化肥氮的去向,是在作物与环境条件的影响下,土壤中氮素的转化和移动各过程的综合表现。可粗分为三个方面,即作物吸收、土壤残留和损失。氮肥损失的途径很多,主要包括淋洗、反硝化、氨挥发等。许多有关土壤中化肥氮去向的研究表明,盆栽试验中大约 40%,大田实验约 60% 的肥料氮在当年不能被作物吸收,其中一部分固定在土壤中,另有相当一部分以气态从土壤中损失及以硝酸盐或亚硝酸盐形式从土壤中淋洗损失^[9]。氮肥平衡分析可知增施的氮肥降低氮肥利用率的同时提高了损失量。

研究表明土壤残留氮素大部分保留在表层中(0—20 cm),并且大多数已被固定。在 Olsen 等的小麦大田试验中,成熟期土壤残留标记肥料氮的 70%—75% 在 0—10 cm 表层中,其中 90% 已固定^[10]。Olsen 等研究结果表明在小麦生长过程中,土壤中肥料氮残留大部分在 0—10cm 表层中,12 月份占总残留

收稿日期:2000-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(39570437)

作者简介:李世娟(1975—),女,中国农业大学农学系在读博士。

量的 83.8% , 这一比例随小麦生长而逐渐降低, 成熟期为 78.1%。Powlson 等结果表明多年内试验小区土壤含氮率保持稳定^[10]。

Powlson 等认为作物-土壤系统中的氮肥损失量施肥量较高的处理大于施肥量较低的处理, 4 年的研究结果中氮损失量在 14%—36% 之间^[7]。许多 ¹⁵N 回收试验报道谷类作物生产中肥料氮损失量在 20%—50% 之间。硝酸盐形态的氮肥损失一般多于尿素及铵态氮肥。所以合理使用氮肥, 提高氮肥利用率, 是作物生产中必须解决的一个关键问题。影响肥料氮损失的因素很多, 如土壤类型、试验方法、肥料种类、施肥量及施肥方法、灌水和生态环境条件等, 其中施肥量和水分是两个最主要的因子, 并且两者是相互联系、相互作用的。我们在大田生产中可以通过栽培措施进行调控, 减少氮素损失, 提高作物氮吸收量, 这是提高氮素生理效率的前提。

下面分别讨论氮肥主要损失途径的研究现状。

1 淋洗损失

过量使用氮肥是引起环境污染的重要因素之一, 在一些发达国家由于过量使用氮肥, 土壤和水质已受到严重污染。过量使用氮肥引起土壤中 NO₃-N 的累积, 如果浇水时进行大水漫灌或者碰上降雨量较大的年份, 势必导致 NO₃-N 的淋失, 从而可能对地下水和地表水造成不同程度的污染。淋洗的数量和深度与施肥量、灌水量及土壤质地等密切相关, 一般来说, 施氮量、灌水量过大会提高淋洗数量和增加深度, 土壤质地越重淋洗深度就越小。

范丙全等认为氮肥用量是硝态氮淋溶损失的决定因素^[11]。施肥量超过对于当地生产条件来说的最佳使用量后, 不但不增加产量, 反而会造成肥料浪费, 污染了环境。孙昭荣等认为土壤下渗水中的氮素含量以硝态氮为主, 且随土壤施氮量增加而增加。土壤下渗水中的氮素流失, 不施氮处理每公顷 10 kg 左右, 每公顷施氮 150 kg 处理的流失为 30.2—41.9 kgN, 施氮愈多, 流失越大。并指出小麦的最佳施肥量范围为每公顷 150—225 kgN。硝酸盐淋洗量的增加已在许多北欧国家有过报道。一些研究者认为欧洲农业集约化导致氮肥用量的增加和硝酸盐淋洗量存在明显的正相关关系^[12]。Olson 和 Swallow 认为当所施氮肥量超过谷物最高产量所需的数量时, 硝酸盐的淋洗量增加显著^[5]。黄绍敏等对小麦-玉米轮作制度下潮土硝态氮的分布研究表明, 每季施氮量小于 225 kg·hm⁻² 时, 1 m 土层各时期硝态氮含量变化不大, 当施氮量增加到 375 kg·hm⁻² 时, 1 m 土层的硝态氮含量增加 1.5—7.4 倍^[13]。Prins 等也报道了肥料氮对淋洗硝酸盐的影响, 认为对谷类作物来说, 如果施肥量在最适数量值以下, 矿化氮数量并不受或很少受氮水平的影响; 但如果氮肥用量超过最适量, 就会有硝酸盐的累积^[12]。

灌水时更要适时适地灌溉, 应避免一次灌水过多引起 NO₃-N 淋失。贾树龙在壤质潮土上研究不同灌溉定额对小麦氮肥利用率及损失率的结果表明, 追施尿素后大水漫灌明显降低了追肥肥效; 适宜灌水量 (1050 m³·hm⁻²) 基础上, 每公顷多灌水 450 m³, 损失率增加 5.54%^[14]。在 Olson 的试验结果中, 由

于 1978 年—1980 年小麦生长期降雨量超过 450 mm, 比正常量超出 161 mm 还多, 所以容易发生淋失。3 月末的一次大雨后有 22 kg·hm⁻² 的硝酸盐淋洗量, 其中 5 kg 来自肥料氮。Magdoff 认为硝酸盐淋失是由于水的移动引起的, 在作物生长季节蒸发的水量通常大于进入土壤的水量, 所以淋洗到根区外的硝酸盐数量并不显著; 而秋季水分凝结量超过蒸发量, 只要土壤没有结冰, 淋洗就会发生^[15]。

然而周凌云实验表明, 化肥氮土壤残留量的 65% 以上集中于 0—40 cm 土层中, 并通过 160 cm 石英砂滤层中残留液体样品的分析表明, ¹⁵N 淋洗到 160 cm 的渗漏量为零^[16]。张绍林在黄泛区潮土上的实验结果也表明, 土壤中的残留化肥氮主要集中在 0—40 cm 土层中^[17]。向敏超利用 ¹⁵N 研究新疆灌淤土-冬小麦系统中尿素氮去向结果认为, 尿素氮在种植冬小麦生育期内的淋洗下渗损失是极少的^[18]。Nyborg 等发现在正常年份的实验点, 大麦收获后 45—60 cm 土层中已检测不到 ¹⁵N 存在, 另一实验点即使六月份有一场 130 mm 的大雨, 收获后 55—70 cm 土层中仅有少量 (1.8%) ¹⁵N 存在^[19]。近些年来, 随着节水农业的研究及推广, 越来越多的研究表明, 淋失似乎并不是冬小麦氮素损失的主要途径。大量的硝酸盐损失可能只发生在轻壤土或者发生特别大的降雨时^[20]。

2 反硝化损失

反硝化损失是土壤中氮素损失的一条重要途径, 它是由微生物在特定条件下进行的。土壤中有多种微生物在缺氧时能推动反硝化作用, 从这一过程取得氧, 以供自身的呼吸作用, 干湿交替的环境比较有利于反硝化作用的进行。反硝化作用不仅会造成肥料损失, 形成的含氮氧化物也会污染大气。近些年的研究表明, 在冬小麦生长季节内, 化肥氮损失主要是反硝化损失, 而淋失损失的可能性极小, 并且反硝化损失量极其可观, 在生产中尽量减少这一部分损失是提高氮肥利用的关键。

张绍林认为即使在较为适宜的氮肥用量和使用技术下, 化肥氮的反硝化损失仍达 33%—45%^[17]。赵广才等研究结果中损失率高达 55%—58%^[21]。Aulakh 等报道冬小麦气态氮损失中反硝化比例为 9.5%^[22]。影响反硝化损失的因素很多, 有土壤类型、肥料品种、土壤水分条件、温度等等, 但人们一致认为起决定作用的因素是土壤水分条件, 氮肥量和氮肥品种次之。其它影响因素可能在特殊实验条件或气候条件下起到了主要作用。

Powlson 曾经做过三种不同土壤反硝化损失量的实验, 结果表明, 三种土壤的最大和最小损失值分别发生在不同的年份, 并没有一类土壤总是有相当大或者相当小的损失。反之施肥后 3 个月内的降雨量是主要影响因素: 每增加 10 mm 降雨, 就有 2%—6% 的肥料氮损失掉^[23]。而李贵宝认为不同土类之间存在差异, 试验表明潮土的氮素利用率大于砂姜黑土^[24]。

朱兆良等 (1979) 研究苏州地区平田黄泥土氮素供应过程及其与氮肥使用方法的关系, 指出不同氮肥以及同一种氮肥在不同使用方法下的氮素平衡情况差异很大。肥料表施时尿素和碳酸氢铵的损失量大于硫铵, 尿素混施可以降低损失^[9]。张

绍林认为不同肥料的损失量以碳酸氢铵为最高,硫酸铵和硝酸铵次之,尿素和硝酸铵中的硝态氮损失最低^[17]。在中部及中北部的阿尔伯塔,大麦冬季施肥时反硝化损失在 2%~33% 之间,铵态肥料的效果要优于硝酸盐肥料。Nyborg 等在实验中整个冬季不种作物以看氮肥损失量,结果尿素损失 31%,硝酸钾损失 70%。并且大麦收获后旱区试点回收率较高(≥84%),而六月份一次降雨量较大(130 mm)的实验点的回收率低,尿素为 56%,硝酸钾仅 10%^[19]。

大多数的研究侧重于损失量,而关于气态损失形态及影响条件的研究较少。Dowdell 和 Webster 的结果中有 13%—19% 的肥料氮损失,作者认为是反硝化引起的,并且主要通过 N₂O₄ 的形态损失^[25]。许多研究表明,氮素损失发生在因早春上层土壤开始解冻而使土壤保持水分饱和状态时^[26]。假如土壤处于水分饱和状态并且温度维持在 20℃,所施加的硝酸盐每天损失大约 20%^[19]。Aulakh 和 Rennie 指出,所施尿素肥料的氨态氮反硝化损失发生在两个时期,秋末天气变冷到结冰期间和早春土壤变暖时,并且速率较低^[27]。张绍林也认为潮土—冬小麦系统中,化肥氮的损失主要发生在春季气温回升以后的一段时间内^[17]。另有研究则认为当氮肥量超过最高产量所需的施肥量时,作物生物量和土壤有机氮增加^[28],而增加的土壤有机氮会提高反硝化损失。

3 氨挥发损失

施入土壤的氮肥损失除了淋洗、反硝化损失外,还有氨挥发、径流、侧渗以及通过作物叶片的生理损失等。在冬小麦生长季节,由于没有特别大的降雨和大水漫灌,径流和侧渗一般可以忽略不计,这里主要讨论氨地表挥发和生理挥发损失。

氨地表挥发量高低与施肥方法密切相关,有研究表明肥料氮的地表挥发损失为施入总氮量的 1% (62)—13%^[29],不耕种时普遍偏低。施入的尿素如果不与土壤混合,肥料氮的氨挥发损失会超过 40%^[30],并且会随温度、土壤 pH 值、地表残留氮量的增加而增加。许多研究已经证明,将肥料条施或穴施比与土壤混施的效果好,可以提高作物产量和氮素吸收量^[31]。

直到近些年科学家才指出谷类作物开花后能从组织中释放氮,主要是氨。利用¹⁵N 示踪技术得出玉米氮损失的 52%—73% 是生理损失引起的^[32],冬小麦生理损失的比例在 21%^[33]和 41% 之间。Harper 等(1987)认为冬小麦和茎秆的氨挥发损失量显著^[33]。Recous 等(1988)认为从开花一成熟期的大量¹⁵N 损失归因于氨生理挥发^[34]。Mary 等认为氨的气态损失可能主要发生在作物生长后期^[35]。而 Freney 等认为氮素损失的主要时期在小麦前期营养生长旺盛期,在一定的土壤供水条件下,氮素供给量越多,叶片含氮量越高,氨态氮挥发损失越大^[36]。Parton 等结果表明小麦茎秆的氨挥发损失量非常显著,并且这一数值受叶面积系数的影响要大于施肥量的影响^[37]。Harper 等发现,开花前当土壤氮临时缺乏时,冬小麦会吸收空气中的氨,整个生育期中有 21% 的肥料氮通过氨挥发损失掉了,而从空气中吸收的氨相当于肥料氮的 1%^[33]。

参考文献:

[1] 谢建昌. 植物营养与肥科学报,1998,4(4),321—330

[2] Chinese Agricultural Yearbook. Beijing: Agricultural Publishing House, 1994.

[3] William R Raun and Gordon V Johnson. *Agron J*, 1999, 91:357—363.

[4] Gauer L E, Grant C A and Bailey L D. *Can J Plant Sci*, 1992, 72: 235—241.

[5] Olsen R V and Swallow G W. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48:583—586.

[6] Leitch M H and Vaidyanathan L V. *J Agric Sci*, 1983, 87, 461—471.

[7] Powlson D S, Pruden G, Johnson A E and Jenkinson D S. *J Agric Sci, Camb*, 1986, 107: 591—609.

[8] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料. 上海:上海科学技术出版社, 1994. 3—5.

[9] 陈子元,温贤芳,胡国辉. 核技术及其在农业科学中的应用. 北京:科学出版社, 1983.

[10] Olson R V, Murphy L S, Moser H C and Swallow C W. *Soil Sci Soc Am J*, 1979, 43: 973—975.

[11] 范丙全,胡春芳,平建立. 植物营养与肥科学报,1998,4(1): 16—21.

[12] Prins W H, Dilz K and Neeteson J J. The Fertilizer Society of London. UK. 1988: 3—27.

[13] 黄绍敏,宝德俊,皇甫湘荣,等. 土壤与环境, 1999,4(8).

[14] 贾树龙,王译文,古伯贤,等. 核农学报, 1991,5(4):210—214.

[15] Fred Magdoff. *Commun. Soil Sci Plant Anal*, 1992, 23(17—20): 2 103—2 109.

[16] 周凌云. 植物营养与肥料学报,1998,4(3):237—241.

[17] 张绍林,朱兆良,许银华. 核农学报,1989,3(1):9—15.

[18] 向敏超,毛瑞明. 土壤肥料,1994,4:18—52.

[19] Nyborg M, Malhi S S and Solberg E D. *Can J Soil Sci*,1990,70:21—31.

[20] Addiscott T M and Powlson D S. *J Agric Sci, Camb*, 1992, 118: 101—107.

[21] 赵广才,张保明,王崇义. 作物学报,1998,24(6):854—858.

[22] Aulakh M S, Renney D A and Paul E A. *Can J Soil Sci*, 1982, 62: 187—195.

[23] Powlson D S, Hart P B S and Poulton P R et al. *J Agric Sci, Camb*, 1992, 118: 83—100.

[24] 李贵宝,张水旺. 核农学报,1997,11(4):243—246.

[25] Dowdell R J and Webster C P. *J Soil Sci*, 1984, 35: 183—190.

[26] Malhi S S and Nyborg M. *Agron J*, 1983, 75: 71—74.

[27] Aulakh M S and Rennie D A. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48:1 184—1 189.

[28] Raun W R, Johnson G V and Phillips S B et al. *Soil Tillage Res*, 1998, 47: 323—330.

[29] Chichester F W and Richardson C W. *J Environ Qual*, 1992, 21:587—590.

[30] Fowler D B and Brydon J. *Agron J*, 1989, 81: 518—524.

[31] Malhi S S and Nyborg M. *Agron J*, 1983, 77: 27—32.

[32] Francis D D, Schepers J S and Vigil M F. *Agron J*, 1993, 85: 659—663.

[33] Harper L A, Sharpe R R and Langdale G W, et al. *Agron J*, 1987, 79: 965—973.

[34] Recous S, Machet J M and Mary B. *Plant Soil*, 1988, 112: 215—224.

[35] Mary B, Recous S and Machet J M. Nitrogen Efficiency in Agricultural soils, 1988: 85—94.

[36] Freney J R and Simpson J R. Gaseous loss of nitrogen from plant—soil system. Martinus Nijhoff, 1983.

[37] Parton W J, Morgan J A and Altenhofen J M. *Agron J*, 1988, 80:419—425.