

土壤无机氮残留的施氮影响及调控研究进展

张春¹, 王少先¹, 孙火喜^{1*}, 周开洪¹, 范芳¹, 陈萍¹, 付红¹, 胡启锋¹, 阿布都艾尼·阿布都西提²

(1. 江西省农业科学院, 江西南昌 330200; 2. 新疆阿克陶县农业技术推广中心, 新疆阿克陶 845550)

摘要 土壤无机氮残留与生态环境安全以及土壤氮素有效性、氮肥减量施用等紧密关联, 日益成为生态、环境、土壤和植物营养等学科十分关注的热点之一。氮肥(化肥和有机肥)是耕作土壤无机氮残留的主要来源, 并产生重要影响。通过合理施肥等, 可以调控土壤中残留无机氮含量。今后, 可在最佳经济施氮量的确定和植物性硝化抑制剂等方面作更多的研究。

关键词 土壤残留无机氮; 氮肥; 调控

中图分类号 S143.1 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2013)24-09978-03

Research Progress on Nitrogen Fertilizer Effect and Regulation of Soil Inorganic Nitrogen Residual

ZHANG Chun et al (Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang, Jiangxi 330200)

Abstract Residual soil inorganic nitrogen (N) is related to ecological safety, soil nitrogen availability and reduced use of nitrogen fertilizer. It is becoming the hot topic for scientists of ecology, environment, soil, plant nutrition and so on. Nitrogen fertilizers have significant effects on residual soil inorganic N. Residual soil inorganic N can be regulated by reducing N fertilizer, rational fertilization and so on. In the future research, the economically optimum N application and plant-nitration inhibitor can be paid more attention.

Key words Residual soil inorganic nitrogen; Nitrogen fertilizers; Regulation

土壤残留无机氮为环境、生态、土壤和植物营养等学科所关注。它与生态环境安全及氮肥资源有效利用紧密关联^[1]。土壤残留无机氮为下季作物提供速效氮营养^[2]。一般, 旱作物偏喜好硝态氮^[3], 水稻偏喜好铵态氮。土壤作为“类生物体”, 当外源氮施入后, 土壤发生变化并适应它。氮肥通过植物吸收、氨挥发、反硝化损失、径流和淋溶等移出土壤^[4-5], 多余的为土壤固持而残留^[6]。化学氮肥残留多数为无机态。氮肥对耕作土壤无机氮残留产生重要的影响。分析、调控施用氮肥对耕作土壤无机氮残留效应具有重要的理论和现实意义。

1 氮肥对土壤无机氮残留效应

1.1 氮肥用量 施用氮肥, 尤其当过量施用时, 能显著增加土壤残留无机氮浓度, 引起残留无机氮在土壤中大量累积, 从而增加氮素淋失的潜在风险。一些研究表明, 当超过正常施氮量时, 土壤中 NO_3^- -N 浓度随施氮量线性增加^[7-8]。粮食作物如玉米和小麦施氮量一般应在 $150 \sim 200 \text{ kg/hm}^2$ 的范围内^[9]。但是, 我国氮素平均用量多在 200 kg/hm^2 以上, 北方一些高产地区甚至超过 500 kg/hm^2 ^[11]。

1.2 施肥时间 作物不同生育期对养分的需求数量和吸收养分的能力均表现出不同。当施肥时间不当时, 肥料中的氮无法被作物充分利用, 就会在土壤中残留而引起淋失。在冬小麦生长前期, 有些不施氮肥的田块也有盈余氮素, 施肥的田块则更多; 随着扬花后吸氮量的增加, 施氮肥处理也会出现氮素亏缺^[10]。在夏玉米播种到吐丝期间, 土壤氮素往往出现盈余, 吐丝到收获则多出现亏缺。在河北省吴桥县进行

的试验表明, 拔节期或开花期的灌水都可能引起硝态氮的向下淋洗^[11-12]。施肥量和时间是控制 NO_3^- -N 排放到水体的关键措施。适期施肥使得氮肥供应与作物需求协调一致, 有利于减少土壤中 NO_3^- -N 残留量。控制作物需肥高峰前和中后期的氮素有效性是选择施肥时期的关键, 而要达到这一目标, 考虑氮肥在土壤中的转化和有机氮的矿化是非常重要的。

施肥年限影响土壤剖面氮残留。在陕西关中地区的研究表明, 种植五季作物后不同栽培模式 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土壤剖面残留硝态氮平均在 $218 \sim 329 \text{ kg/hm}^2$ 之间, 且残留的硝态氮主要集中在 $100 \sim 200 \text{ cm}$ 土层。随着种植年限和施氮量的增加, $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层残留无机氮显著增加^[13]。

1.3 氮肥种类 铵态氮肥中的氮素常以 NH_4^+ -N 形态残留在土壤中, NH_4^+ -N 能被土壤胶体吸附, 淋失的可能性甚小; 经过土壤微生物硝化作用形成 NO_3^- -N 后, 有可能发生严重淋失^[14-15]。硝铵和硝酸钾的淋失量远高于尿素和硫酸铵。控释性肥料在土壤残留的无机氮比普通化肥相对较少, 淋失量大为降低^[16]。

有机物料还田也会影响土壤残留无机氮含量。由于化学和物理性质间的差异, 有机物料可以增加或减少土壤无机氮数量和氮淋溶。C/N 比低的豆科残体可提高土壤氮的净矿化, 增加无机氮数量; C/N 比较高的非豆科残体可以固定土壤无机氮^[17]。

1.4 氮肥与其他肥料配合施用 氮肥单施可能增加氮素流失^[18]。氮肥与磷、钾肥配合施用或氮、磷、钾与有机肥配合施用可显著降低土壤中残留无机氮的累积^[19]。施磷对减少残留无机氮的影响已有比较明确的结论, 即在缺磷土壤上, 施磷可促进作物根系和地上部分生长, 提高作物利用深层水分的能力, 减少水分向深层运移。这是施磷减少氮素淋失的主要原因。另外, 磷素可增加作物对氮素的吸收, 降低土壤剖面中残留无机氮的累积, 从而从氮源上进一步减少流失的

基金项目 江西省自然科学基金项目(20132BAB204014); 江西省农业科学院创新基金博士启动项目(2012CBS009); 农业部植物营养与肥料重点实验室开放基金(2013-2)。

作者简介 张春(1972-), 男, 江西萍乡人, 高级农艺师, 硕士, 从事科研管理方面的工作。* 通讯作者, 研究员, 硕士, 从事作物遗传育种和农业经济管理等方面的研究, E-mail: sunhx116@163.com。

收稿日期 2013-07-15

潜在风险。

配施有机肥可改善土壤理化性质,增加土壤团聚化程度,加强微生物活性,最后降低残留无机氮在土壤中的累积。在合适的用量条件下,有机肥本身是氮源,长期大量施用同样可能引起残留无机氮在土壤中的累积,增加流失的风险^[4]。同时,有机肥料中的氮素与化肥氮素的行为不同。大部分化肥氮在施用当年会被作物吸收,仅有一小部分残留在土壤中;而有机氮有较长后效,施用后的2~3年期间也可以大量释放氮^[20]。

2 合理施肥调控土壤无机氮残留

2.1 减少氮肥用量

国际安全施肥量为225 kg/hm²,而我国很多地方超过此限。稻田、麦地、菜地、竹林地、苗圃地、桑园土等超过更多。在目前水平下,大约可减少氮肥用量1/3而作物产量仍能保持较高水平。

随着施氮量的增加,土壤残留无机氮含量持续增加^[13,21]。在0~100 cm土壤剖面,施用氮肥没有改变剖面硝态氮总量随玉米生育进程波状变化的趋势,但明显增强其变化幅度^[6,22]。一贯施用低量至中量的尿素(~450 kg/hm²)可提高长期的氮有效性;但是,施用高量尿素(600 kg/hm²)未提高氮的矿化,导致钙镁等阳离子从土壤中流失,所以可降低土壤质量^[23]。杨玉惠等^[24]在黄土高原中部雨养农业区春小麦氮肥试验表明,氮肥施用量对土壤硝态氮的移动深度没有受到影响,但显著影响土壤硝态氮的含量与累积。当连续施氮3年后第3季春小麦收获时,0~200 cm土壤剖面中累积大量的硝态氮,其中48.96%~81.38%的总累积量和60.49%~122%的当年净累积量存在于0~110 cm土层中。在玉米与大豆轮作中,当施氮肥为100 kg/hm²以下时,土壤残留NO₃⁻-N差异不显著,但当施氮肥100 kg/hm²以上时,差异在0.05水平显著。在大豆中的NO₃⁻-N淋溶潜能大^[25]。在传统灌溉条件下,与增氮处理相比,减氮处理降低了0~180 cm土层的NO₃⁻-N含量^[26]。减少氮肥用量就是要同作物需氮相匹配^[2]。

2.2 最佳经济施肥

在最佳经济施肥时,土壤残留硝态氮含量在收获后保持在理想水平70 kg/hm²^[6]。一致的施肥量不适宜,应该借助遥感根据各点状况区别施肥,以达到最佳经济施肥。在1997和1999年分田块比统一用量分别少施氮69和75 kg/hm²,带来经济益8和23美元/hm²^[27]。分田块比统一用量还可以提高利润38美元/hm²^[28]。经济施肥量田块和年份间差异大^[28]。Stanger等^[29]轮作肥料比较试验表明,112和224 kg/hm²处理回报最高,分别比56和0 kg/hm²多32和85美元/hm²。

2.3 与其他肥料配施

合理的氮磷配比可有效减少土壤残留无机氮的累积。在不合理的氮磷配比下,低施氮量会造成土壤残留无机氮的大量累积^[24]。当不施氮和氮磷比例为1:1时,连续施氮3年后土壤残留无机氮总累积量最低,数量几乎相等。

有机肥是全能肥料,滥放乱排造成污染,但施用不当同样带来污染。一般,土壤中易分解的有机碳含量与土壤反硝

化潜势之间有着极好的正相关,因此新鲜有机物料如植物残体、未经腐熟的有机肥等的施用或添加可显著增强土壤的反硝化潜势,从而削弱土体中NO₃⁻-N的积累。另外,农田施用有机肥可增加土壤黏粒及团聚体的含量,提高土壤阳离子的代换量,增加对无机氮的固持作用,进而阻碍残留无机氮的流失^[30]。高C/N比秸秆的还田会引起土壤微生物的大量活动,导致大量矿质氮转化为固持态氮。据估计,在秸秆还田后2~3个月内,每1 kg秸秆可固定5~10 g氮,但秸秆还田能增大地面覆盖,减少地面蒸发,增加土壤水分下渗,对氮素淋失的影响有时比施氮量因素更大^[31]。羊粪有机肥本身可产生无机氮的累积。原因在于施入有机肥后,分解有机物质的土壤微生物将转化更多的利用有机氮源,导致无机氮在土壤中的累积。随着有机肥施入量的增加,从土壤淋失的氮量显著增加。当施入363.15 kg/hm²的氮时,淋溶损失的硝态氮达到55.15 kg/hm²。硝态氮淋失量占氮素施入量的14%~17%^[32]。适量有机肥(120 kg N/hm²)的增产效果显著,且不会造成硝态氮向下层土壤剖面淋溶,不会增加硝态氮的淋洗损失,基本没有环境风险^[8]。

一般认为,无机氮肥施用量的增加将导致氮淋失率的增加,而化肥和有机肥配施可降低氮素淋失量。适量施用有机肥可以协调土壤养分供应能力,促进氮素吸收,增加土壤碳库,提高微生物活性,增强对铵的固定及反硝化作用,降低无机氮淋失风险。而当过量施用有机肥时,由于铵的固定和反硝化作用趋于饱和,无机氮超过作物需求,同样会加剧氮淋失^[32]。在津巴布韦玉米种植土壤,低有机肥施用量(12.5 Mg/hm²)加上60 kg/hm²化肥的氮淋溶少,并保持较高的干物质产量。化学N肥(特别在120 kg N/hm²高用量)和有机肥加化肥的处理导致高的淋滤液NO₃⁻-N浓度(34 mg/L)和高的NO₃⁻-N淋溶(56 kg/(hm²·年))^[33]。

2.4 施用控/缓释氮肥

控/缓释氮肥的施入可减少土壤无机氮残留。控释氮肥处理的氮淋失量可降低32.5%^[15]。尿素的硝化-反硝化损失量占施入氮量的34.5%,而控释氮肥只占2.0%^[16]。当施用量为280 kg/hm²时,聚烯烃包膜尿素比常规尿素氮淋溶少38%^[5]。在早稻种植季节,90 kg/hm²用量下尿素和控释氮肥的NO₃⁻-N淋失量分别为9.19和6.7 kg/hm²,分别占施尿素氮和控释氮肥氮的10.2%和7.4%。控释氮肥的氮淋失量比尿素分2次施用的降低27.1%。控释氮肥的氮利用率(平均76.3%)比尿素分次施用的(平均37.4%)高出38.9%,也提高了水稻产量^[16]。

2.5 使用脲酶/硝化抑制剂

脲酶抑制剂延缓尿素水解,延长施肥点处尿素扩散时间,从而降低土壤溶液中NH₄⁺-N浓度。硝化抑制剂抑制亚硝化细菌活性,阻止NH₄⁺-N的第一步氧化,从而减少NO₂⁻的累积,进而控制NO₃⁻的形成^[34]。脲酶/硝化抑制剂的使用将减少土壤无机氮的累积。硫硝铵+硝化抑制剂DMPP(3,4-dimethylpyrazole phosphate,3,4-二甲基吡唑磷酸盐)减少了土壤NO₃⁻-N累积,减少了NO₃⁻-N的向下淋洗^[31]。

3 今后土壤无机氮残留的研究工作

3.1 确定最佳经济施肥量 氮肥是土壤无机氮残留的最重要影响因素。施氮量的增加通常导致土壤无机氮残留的增加。减少氮肥用量是调控土壤无机氮残留的有效措施。目前,我国耕作土壤可减施氮肥 1/3 而仍保持较高产量。确定氮肥减少量,一般考虑农学、环境、经济等意义,采用最佳经济施肥量兼顾考虑农学和环境等意义。由于土壤的多样性,确定最佳经济施肥量时还要考虑气候、地形、作物、季节、环境容量、价格等。最佳经济施肥量的确定还要通过多点调查和田间试验,借助 3S(GIS, GPS, RS) 技术。

3.2 植物性硝化抑制剂的研制和开发 脲酶/硝化抑制剂可调控土壤无机氮残留,但化学抑制剂成本高,或多或少会带来环境问题。为此,有些科学家研究自然硝化抑制剂尤其是植物性硝化抑制剂。植物性材料在土壤中空穴供体,分解缓慢,分解产生酸,可提供局部的厌氧条件。这些都为它作为硝化抑制剂提供条件。有研究表明,茶树枯枝落叶、印楝油等硝化抑制效果较好^[35-36]。从有机物料滥放导致水环境问题、施入土壤可增加碳储存和减少化肥用量等角度考虑,植物性硝化抑制剂研制和开发意义重大。但是,植物性材料施入土壤可增加反硝化潜势,带来负面环境影响。所以,植物性硝化抑制剂值得深入研究。

参考文献

[1] ZHANG W L, TIAN Z X, ZHANG N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1996, 59: 223 - 231.

[2] SHRESTHA R K, LADHA J K. Recycling of residual soil nitrogen in a lowland rice - sweet pepper cropping system [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 1689 - 1698.

[3] 唐文菊, 赵庆芳. 硝态氮与铵态氮对西伯利亚百合生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(14): 6125 - 6126, 6145.

[4] BERGSTRÖM L F. Leaching of total nitrogen from nitrogen-15-labeled poultry manure and inorganic nitrogen fertilizer [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(4): 1283 - 1290.

[5] ZVOMUYA F, ROSEN C J, RUSSELLE M P, et al. Nitrate leaching and nitrogen recovery following application of polyolefin-coated urea to potato [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 480 - 489.

[6] BÉLANGER G, ZIADI N, WALSH J R. Residual soil nitrate after potato harvest [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 607 - 612.

[7] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 有机肥对土壤硝态氮累积的影响[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 197 - 200.

[8] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 286 - 291.

[9] 王兴仁, 张福锁, ODOWSKI R. 石灰性潮土对氮肥连续施用的环境承受力[J]. *北京农业大学学报*, 1995, 21(S1): 95 - 98.

[10] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表现盈亏 I. 冬小麦[J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1782 - 1784.

[11] 李建民, 李世娟, 曾长立, 等. 冬小麦限水灌溉条件下土壤硝态氮变化与氮素平衡[J]. *华北农学报*, 2003, 18(2): 51 - 55.

[12] 张霞, 罗延庆, 张胜全, 等. 限水条件下氮肥用量及施氮时期对冬小麦产量、土壤硝态氮含量的影响[J]. *华北农学报*, 2007, 22(3): 163 - 167.

[13] 王春阳, 周建斌, 郑险峰, 等. 不同栽培模式对小麦 - 玉米轮作体系土壤硝态氮残留的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 991 - 997.

[14] 谢云, 王延华, 杨浩. 土壤氮素迁移转化研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(8): 3442 - 3444, 3462.

[15] 郑志侠, 宋马林. 柘皋河流域农田土壤磷迁移过程的模拟研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(13): 7667 - 7669, 7909.

[16] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2): 137 - 142.

[17] INGRID K T, BENT T C. Cropping system and residue management effects on nitrate leaching and crop yields [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1998, 68: 73 - 84.

[18] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 施用磷肥对土壤硝态氮累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(4): 397 - 403.

[19] 孙志梅, 薛世川, 彭正萍, 等. 影响土壤硝态氮淋失的因素及预防措施[J]. *河北农业大学学报*, 2001, 24(3): 95 - 99.

[20] KIRCHMANN H. Balance study with aerobic-anaerobic and flesh ¹⁵N-labelled poultry manure [M]//HANSEN J A, HENRIKSEN K. Nitrogen in organic wastes applied to soils. London: Academic Press, 1989: 113 - 125.

[21] 熊亚梅, 梁银丽, 周茂娟, 等. 氮肥水平对甘蓝产量和品质及土壤硝态氮含量的影响[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(4): 839 - 843.

[22] 尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 等. 盐渍区农田氮肥施用量对土壤硝态氮动态变化的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(2): 596 - 602.

[23] FOX T R. Nitrogen mineralization following fertilization of douglas-fir forests with urea in Western Washington [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 1720 - 1728.

[24] 杨玉惠, 张仁陟. 氮肥施用对黄土高原中部雨养农业区土壤硝态氮分布与累积的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(4): 672 - 676.

[25] ZHU Y, FOX R H. Corn-soybean rotation effects on nitrate leaching [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 1028 - 1033.

[26] 董建力, 张学军, 李红霞, 等. 不同水肥处理对春小麦产量、品质和土壤硝态氮含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(1): 77 - 80.

[27] MAMO M, MALZER G L, MULLA D J. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 958 - 964.

[28] SCHARF P C, KITCHEN N R, SUDDUTH K A. Spatially variable corn yield is a weak predictor of optimal nitrogen rate [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 2154 - 2160.

[29] STANGER T F, LAUER J G, CHAVAS J. The profitability and risk of long-term cropping systems featuring different rotations and nitrogen rates [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1): 105 - 113.

[30] BHOGAL A, YONG S D, SYLVESTER B R. Straw in incorporation and immobilization of spring applied nitrogen [J]. *Soil Use and Manage*, 1997, 13: 111 - 116.

[31] 高强, 巨晓棠, 张福锁. 几种新型氮肥对叶菜硝酸盐累积和土壤硝态氮淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 9 - 13.

[32] 郭彦军, 田茂春, 宋代军, 等. 施用羊粪条件下人工草地土壤硝态氮淋失量研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 2(2): 53 - 56.

[33] NYAMANGARA J, BERGSTRÖM L F, PIHA M I, et al. Fertilizer use efficiency and nitrate leaching in a tropical sandy soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 599 - 606.

[34] 隗英华, 陈利军, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂在土壤 N 转化过程中的作用[J]. *土壤通报*, 2007, 38(4): 773 - 780.

[35] USHA KIRAN, PATRA D D. Influence of natural essential oils and their by-products as nitrification retarders in regulating nitrogen utilization for Japanese mint in sandy loam soils of subtropical central India [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94: 237 - 245.

[36] 李宝珍, 王正银, 李会合. 植物性硝化抑制剂对茼蒿 NO₃⁻-N 和品质的影响[J]. *西南农业大学学报*, 2002, 24(3): 211 - 213.

(上接第 9977 页)

[17] KANE D L, STEIN J. Water movement in seasonally frozen soils [J]. *Water Resources Research*, 1983, 19: 1547 - 1557.

[18] BRULAND O, MAREÁCHAL D, SAND K, et al. Killingveit I. Energy and

water balance studies of a snow cover during snowmelt period at a high arctic site [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2001, 70: 53 - 63.

[19] 刘佳, 范昊明, 周丽丽, 等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 186 - 189.