

施用方式和氮肥种类对水稻土中氮素迁移的影响效应^①

凌 德^{1,2}, 李 婷², 王火焰^{1*}, 刘晓伟¹, 陈照明¹, 周健民¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘 要: 通过田间微区试验, 研究稻田中氮肥施用方式及种类对氮素迁移的影响。试验设 4 种施用方式(撒施、上层 10 cm 土混施、土下 10 cm 点施、3% 土体混施)和 4 种氮肥(尿素、氯化铵、硫酸铵、磷酸铵)。不同施用方式试验结果表明, 培养期 60 天内, 在土下 10 cm 点施下尿素处理 6~16 cm 土壤无机氮含量 > 200 mg/kg, 远高于其他 3 种尿素施用方式。4 种施用方式保肥能力大小分别为: 土下 10 cm 点施 > 3% 土体混施 > 上层 10 cm 土混施 > 撒施。不同种类氮肥试验结果表明, 培养期第 30 天和 60 天尿素处理土壤无机氮含量均高于其他肥料处理, 最大值分别达到 544 mg/kg 和 477 mg/kg, 而氯化铵处理无机氮含量最大仅为 324 mg/kg 和 106 mg/kg, 但是总体来看尿素处理与磷酸铵处理无明显区别。4 种氮肥在土下 10 cm 点施下保肥能力大小为: 尿素、磷酸铵 > 硫酸铵 > 氯化铵。研究认为氮肥施入土壤后与土壤混合的初始体积越小, 养分损失越低; 施用越集中, 肥际养分浓度越高。结合预示稻田土下 10 cm 点施氮肥较其他施肥方法在维持肥际高浓度无机氮和减少氮肥损失方面有明显优势。

关键词: 氮肥; 施用方式; 氮素迁移扩散

中图分类号: S143

据统计, 2009 年我国氮肥消费高达 3 358 万 t, 而氮肥当季利用率仅 30%~41%, 每年因不合理施肥造成 1 000 多万 t 的氮素流失到农田之外^[1-3], 流失的养分是水体富营养化、饮用水硝酸盐污染等环境问题产生的重要来源^[4-6]。如何提高氮肥利用率是当前农业发展和环境保护迫切需要解决的问题, 王火焰和周健民^[7]认为通过特定施肥措施可使氮肥养分扩散与根系伸展范围达到匹配, 此方法能大幅度提高肥料当季利用率。然而, 其实现前提需要了解不同施用方式及氮肥种类影响下土壤中氮素迁移扩散的特征。但是, 国内外相关研究多集中在通过水分调控措施带动氮素迁移扩散^[8-11], 而通过改变水稻施氮方式和氮肥种类从而减少氮肥损失方面却鲜有报道。因此, 研究施用方式和氮肥种类对水稻土中氮素迁移扩散的影响有助于在施肥方式创新方面做出突破, 以此为氮肥高效利用提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

试验地点位于安徽省宣城市广德县邱村镇, 属亚

热带季风气候区, 年平均气温 17.5℃, 年均降水量 1 149.7 mm, 试验于水稻季(2013 年 5—11 月)进行。供试土壤类型为水稻土, 质地为中壤, 肥力中等, 土壤利用大型粉碎机粉碎后备用。土壤基本理化性质为: pH 5.6、全氮 1.08 g/kg、有机质 19.4 g/kg、速效磷 5.77 mg/kg、速效钾 88 mg/kg。

1.2 试验设计

田间试验选用 4 种氮肥, 分别为尿素、硫酸铵、氯化铵和磷酸铵, 尿素采用小颗粒型号(含氮 46%), 其余氮肥采用分析纯药品, 药品粉碎后备用。设置 4 种施肥处理, 分别为: 表面撒施、上层 10 cm 土混施、土下 10 cm 点施、3% 土体混施, 每个处理重复 3 次, 共计 48 个微区。微区采用塑料板围成长 0.54 m、宽 0.5 m、高 0.35 m 的长方形区域(塑料板露出土壤 0.15 m)并均分为 4 块。试验区当地 N、P₂O₅、K₂O 推荐施用量分别为 180、120、120 kg/hm²。微区内填土方量 50 kg(磷钾肥添加后混匀), 填土深度 19~21 cm, 不种植水稻。试验布设完毕后灌水泡田, 此后田间管理与当地习惯一致。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB127401)、国家自然科学基金项目(41271309)和江苏省科技支撑计划项目(BE2011821)资助。

* 通讯作者(hywang@issas.ac.cn)

作者简介: 凌德(1990—), 男, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 主要从事氮肥养分高效利用方面的研究。E-mail: dling@issas.ac.cn

撒施：氮肥均匀撒在土壤表面；上层 10 cm 土混施：上层 10 cm 土壤与氮肥混匀；土下 10 cm 点施：用特制施肥器将氮肥注入土下 10 cm 位置；3% 土体混施：用 1.5 kg 土壤与氮肥混匀后制成圆柱体土柱（直径 8 cm，高 8 cm），埋入土表下 6 cm。

1.3 样品采集

试验设 3 次取样，分别为试验开始后第 30、60 和 90 天。土壤样品采用破坏性采集方式，分竖直方向与水平方向采样（仅土下 10 cm 点施与 3% 土体混施处理水平取样）。

竖直方向：在氮料施用位置，采用特制取样器竖直向下截取约 16 cm 土块（至犁底层），每隔 2 cm 共采集 8 份土样。

水平方向：将框中一半土壤全部挖出，形成一个小坡面（至犁底层），在肥料施用位置且平行土表面方向截取约 10 cm 土块，每隔 2 cm 共采集 5 份土样。

1.4 样品分析

土壤样品使用 2 mol/L KCl 溶液作为提取液，提取离心后的上清液利用全自动化学分析仪（Smart chem. 200）测定无机氮含量（铵态氮、硝态氮及亚硝态氮）；供试土壤基本理化性质测定采用常规方法^[12]。

1.5 数据处理与分析

结果采用平均值±标准差表示，Excel 2007 进行数据统计分析。

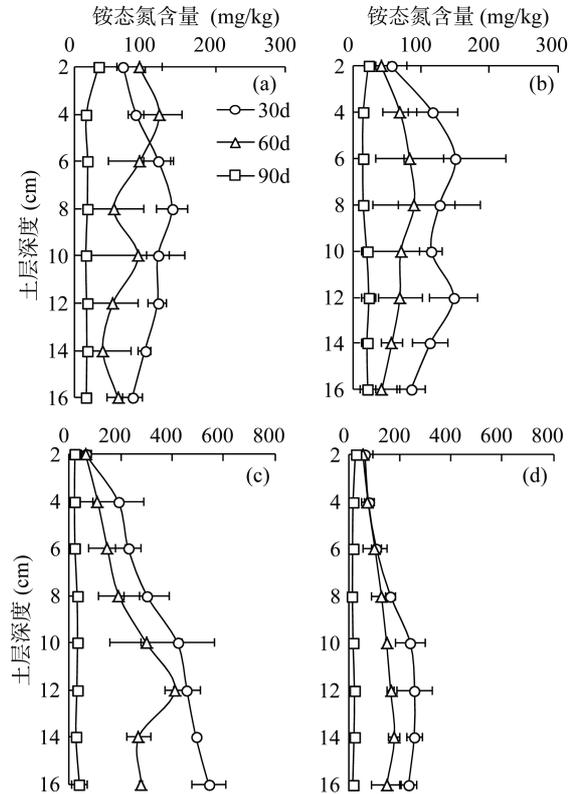
2 结果与分析

2.1 尿素不同施用方式对土壤铵态氮含量的影响

不同施用方式处理结果表明，土壤铵态氮含量总体随着培养周期延长呈现下降并且铵态氮有向下运移的趋势（图 1、图 2）。撒施和上层 10 cm 土混施处理在培养 30 天垂直方向各土层铵态氮含量均 < 150 mg/kg，而土下 10 cm 点施和 3% 土体混施分别在 4~16 cm 和 8~16 cm 土层铵态氮含量高于 200 mg/kg，并且土下 10 cm 点施处理在 14~16 cm 土层铵态氮含量达到极大值 542 mg/kg。随着培养时间达到 60 天时，各处理垂直（土壤表层为起点）及水平方向（氮肥施用位置为起点）土壤铵态氮含量均有小幅下降。然而，在培养 90 天各处理土壤铵态氮含量显著降低，并且其水平均低于 50 mg/kg（图 1、图 2）。4 种施用方式下土壤铵态氮含量大小顺序为：土下 10 cm 点施 > 3% 土体混施 > 上层 10 cm 土混施 > 撒施。

2.2 尿素不同施用方式对土壤无机氮的影响

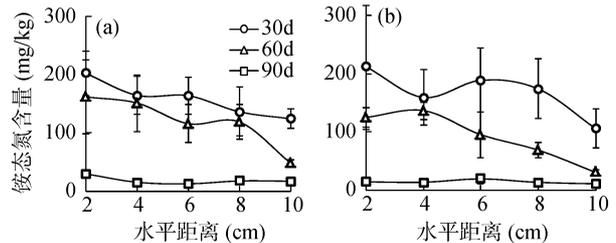
不同施肥方式处理下，尿素处理 3 个时期无机氮含量平均值见图 3、图 4，从图中可看出培养期 0~60



(a)：撒施；b：上层 10 cm 土混施；c：土下 10 cm 点施；d：3% 土体混施

图 1 尿素不同施用方式对土壤铵态氮含量的影响（垂直方向）

Fig. 1 Effects of urea fertilization methods on soil ammonium contents



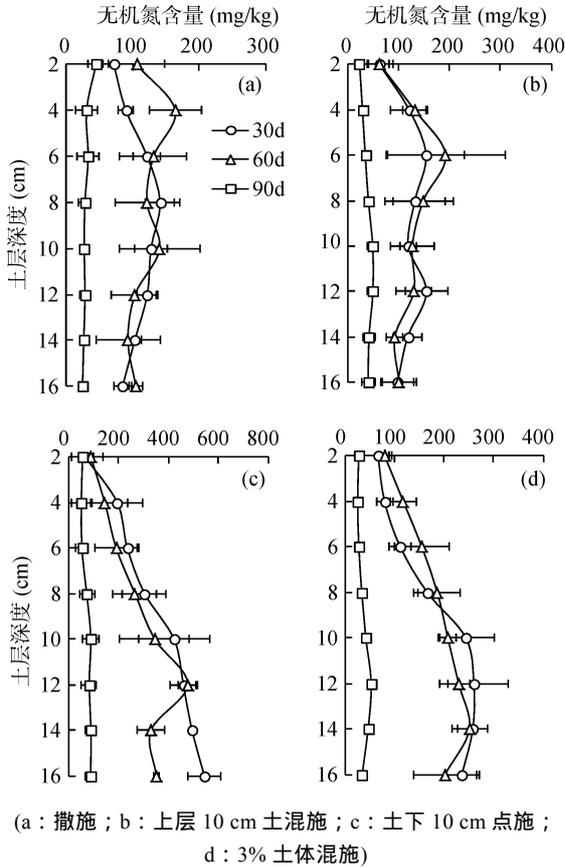
(a)：土下 10 cm 点施；b：3% 土体混施

图 2 尿素不同施用方式对土壤铵态氮含量的影响（水平方向）

Fig. 2 Effects of urea fertilization methods on soil ammonium contents

天内土壤无机氮含量大体上无变化，而 60~90 天内土壤无机氮含量显著降低。撒施和上层 10 cm 混施处理在 60 天内，0~16 cm 垂直方向土层无机氮浓度 < 200 mg/kg；而土下 10 cm 点施和 3% 土体混施处理分别在 6~16 cm 和 8~16 cm 土层无机氮浓度均 > 200 mg/kg。研究结果表明，氮肥施入后与土壤混合的初始体积越大，养分损失越高，而氮肥施用越集中，养分损失越小且肥际养分浓度越高。然而，不论何种施肥方式，0~16 cm 土壤无机氮在 90 天均显著减少，其中撒施、上层 10 cm 混施和 3% 土体混施处理无机

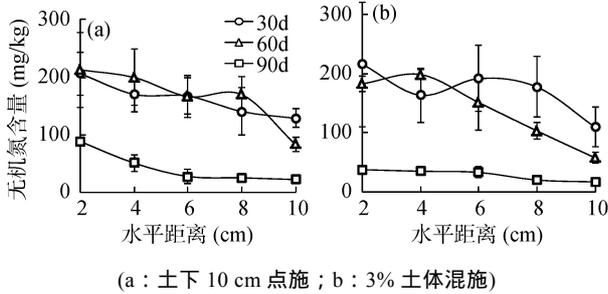
氮浓度总体 < 50 mg/kg；但是，土下 10 cm 点施处理无机氮浓度却能保持在 50 ~ 100 mg/kg。对比 4 种施用方式土壤铵态氮和无机氮含量变化，各处理保肥能力大小顺序为：土下 10 cm 点施 > 3% 土体混施 > 上层 10 cm 土混施 > 撒施。



(a : 撒施 ; b : 上层 10 cm 土混施 ; c : 土下 10 cm 点施 ; d : 3% 土体混施)

图 3 尿素不同施用方式对土壤无机氮含量的影响 (垂直方向)

Fig. 3 Effects of urea fertilization methods on soil inorganic nitrogen contents



(a : 土下 10 cm 点施 ; b : 3% 土体混施)

图 4 尿素不同施用方式对土壤无机氮含量的影响 (水平方向)

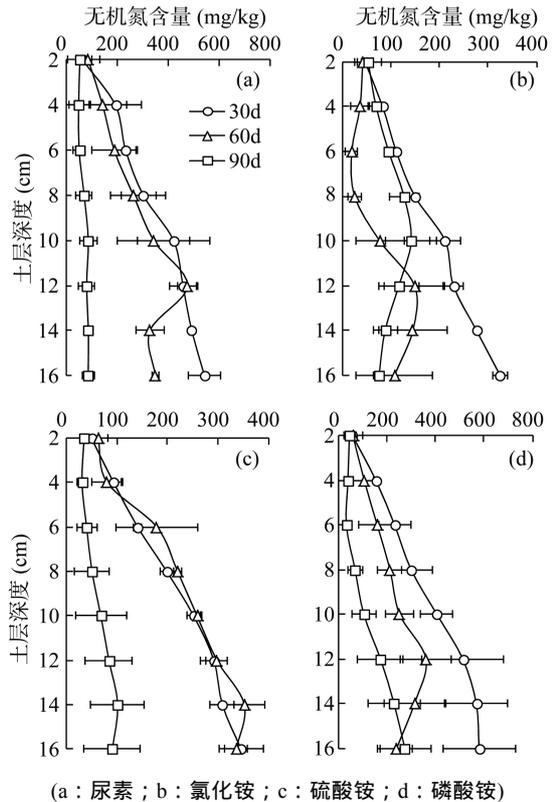
Fig. 4 Effects of urea fertilization methods on soil inorganic nitrogen contents

研究结果显示培养期第 30 天和 60 天各土层无机氮含量总体无明显变化，而通过无机氮组分含量分析表明培养期 30 天时土壤中硝态氮和亚硝态氮含量分别低于 10 mg/kg 和 1 mg/kg，土壤无机氮以铵态氮

为主；而培养时间达 60 天，土壤中铵态氮部分向硝态氮转化，铵态氮含量有小幅下降，硝态氮含量显著上升；在培养末期 90 天时，土壤中铵态氮和硝态氮损失严重，其中撒施和上层 10 cm 混施处理对比土下 10 cm 点施和 3% 混施处理，其养分损失更为明显(图 3)。

2.3 氮肥种类对土壤无机氮含量的影响

撒施、上层 10 cm 混施及 3% 土体混施处理下，不同氮肥种类对土壤无机氮含量影响差异不明显。而在土下 10 cm 点施模式下，尿素处理在培养期第 30 和 60 天时 0 ~ 16 cm 土层无机氮浓度处于 66 ~ 544 mg/kg 和 88 ~ 477 mg/kg 范围内，而磷酸铵处理保肥能力与尿素处理并无明显区别(图 5)。但是培养期 90 天时，各处理无机氮含量总体较低，磷酸铵处理在 8 ~ 16 cm 土层无机氮含量均 > 100 mg/kg，说明培养末期磷酸铵保肥能力较强。总体来看整个培养期内 4 种氮肥在土下 10 cm 点施下保肥大小顺序为：磷酸铵、尿素 > 硫酸铵 > 氯化铵。



(a : 尿素 ; b : 氯化铵 ; c : 硫酸铵 ; d : 磷酸铵)

图 5 土下 10 cm 点施下氮肥种类对土壤无机氮含量的影响
Fig. 5 Effects of different nitrogen fertilizers on inorganic nitrogen contents in soils (point fertilization at 10 cm soil depth)

3 讨论

氮肥(铵态氮肥)施入稻田后，土壤中无机氮养分主要以铵态氮为主，铵态氮含量变化一定程度上能够反映土壤无机氮变化的趋势，而氮挥发一直是制约氮

肥高效利用的重要问题。前人研究指出水稻田淹水条件下氮挥发主要发生在田面水和大气接触面,而田面水 pH 及铵态氮含量的变化也是影响氮挥发的重要因素^[13-14]。土下 10 cm 点施与 3% 土体混施处理在培养期第 30 天其土壤铵态氮含量远高于撒施及上层 10 cm 土混施处理,这可能是氮肥施用位置远离大气及田面水进而起到减少氮挥发作用。研究结果同时显示土下 10 cm 点施和 3% 土体混施处理 60 天培养期内肥料施用位置附近土层铵态氮仍处在较高水平,而撒施和上层 10 cm 混施处理在培养期 60 天时养分损失明显,而土下 10 cm 点施处理土壤无机氮含量高于 3% 土体混施处理;这可能是氮肥集中施用减少了与土壤接触面,起到延缓养分释放的作用并减少铵态氮损失。已有研究认为尿素施用的深度在 8~10 cm 肥效可增大一倍^[2,15],并且氮肥点状深施比条状深施效果更好^[16-18]。

氯化铵、硫酸铵及磷酸铵属无机肥,肥料施入土壤后能直接水解出氨,之后不可避免产生氨挥发。硫酸铵施入土壤后,根圈土壤中亚硝酸细菌数量过早增长,结果导致肥料养分被消耗并加大损失^[19]。氯化铵施入土壤附带的氯离子在土壤中积累达到一定浓度后,能够减少土壤中亚硝酸细菌的数量,将导致硝态氮的转化受到影响,而土壤溶液中铵态氮含量过高同时也加剧氨挥发的速率^[20-21]。研究显示磷酸铵处理土壤无机氮浓度在培养期第 90 天时仍能保持较高浓度,可能是肥料施入土壤后形成磷酸盐缓冲体系,降低土壤中 NH₃ 分压,产生抑制氨挥发和促进硝化作用的效果,也可能是磷酸铵本身移动性所致^[22-23]。尿素是酰胺态氮肥,施入土壤后以分子的形式存在,并在脲酶的作用下转化才能被利用,而土下 10 cm 点施下尿素集中施用导致土壤的接触面积减少,氨的转化及挥发受到影响,所以养分释放的速率达到最低,但是尿素处理土壤无机氮浓度在整个培养期内与磷酸铵处理并无明显差异。

4 结论

不同施用方式和氮肥种类对水稻土中氮素迁移有明显影响。氮肥施入土壤后与土壤混合的初始体积越小,其养分扩散速率越低并且损失越小;施用越集中,肥际养分浓度则越高。本研究认为 4 种施用方式的保肥能力大小为:土下 10 cm 点施>3%土体混施>上层 10 cm 土混施>撒施。土下 10 cm 点施处理下不同种类氮肥对氮素迁移也具有明显影响。4 种氮肥在土下 10 cm 点施处理下保肥能力顺序为:尿素、磷酸

铵>硫酸铵>氯化铵,采用土下 10 cm 点施下尿素处理表明,在 90 天培养期内在减少氮肥养分损失方面效果最好,并且尿素在培养期 60 天内 6~16 cm 土壤无机氮含量均>200 mg/kg。综合农业生产实践,本研究认为在稻田采用尿素和土下 10 cm 点施模式能够明显减少氮肥养分损失,但对于不同种类氮肥在土壤中表现出的特点,其扩散机理还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 张福锁,王激清,张卫峰,崔振岭,马文奇,陈新平,江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924
- [2] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783
- [3] 赵其国,钱海燕. 低碳经济与农业发展思考[J]. 生态环境, 2009, 18(5): 1 609-1 614
- [4] Suthar S, Bishnoi P, Singh S, Mutiyar PK, Nema AK, Patil NS. Nitrate contamination in groundwater of some rural areas of Rajasthan, India[J]. Journal of hazardous materials, 2009, 171(1): 189-199
- [5] Chen S, Wu W, Hu K, Li W. The effects of land use change and irrigation water resource on nitrate contamination in shallow groundwater at county scale[J]. Ecological Complexity, 2010, 7(2): 131-138
- [6] Hoben JP, Gehl RJ, Millar N, Grace PR, Robertson GP. Nonlinear nitrous oxide (N₂O) response to nitrogen fertilizer in on farm corn crops of the US Midwest[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1 140-1 152
- [7] 王火焰,周健民. 根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施[J]. 土壤, 2013, 45(5): 785-790
- [8] Randall GW, Mulla DJ. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(2): 337-344
- [9] 徐力刚,王晓龙,崔锐,张奇. 不同农业种植方式对土壤中硝态氮淋失的影响研究[J]. 土壤, 2012, 44(2): 225-231
- [10] 宋海星,李生秀. 根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵态氮分布的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 96-101
- [11] 李久生,杨风艳,栗岩峰. 层状土壤质地对地下滴灌水氮分布的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 25-31
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 农业出版社, 2000: 7-126
- [13] Sommer SG, Olesen JE. Modelling ammonia volatilization from animal slurry applied with trail hoses to cereals[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(15): 2 361-2 372
- [14] 宋勇生,范晓晖,林德喜,杨林章,周健民. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 265-269

- [15] 苏正义, 韩晓日. 氮肥深施对作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1997, 28(4): 292-296
- [16] De Datta SK. Improving nitrogen fertilizer efficiency in lowland rice in tropical Asia[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1986, 9(1-2): 171-186
- [17] Zhu ZL. Fate and management of fertilizer nitrogen in agro-ecosystems[A]// Zhu ZL, Wen QX, Freney J. *Nitrogen in Soils of China*[M]. Netherlands: Springer, 1997: 239-279
- [18] 吴建富, 潘晓华, 石庆华, 王苏影, 李涛, 李强. 江西双季水稻施肥中存在的问题及对策[J]. 中国稻米, 2012, 18(5): 33-35
- [19] 李振高, 俞慎, 吴胜春, 王俊华, 潘映华. 不同氮肥对水稻根圈微生物生物量及硝化-反硝化细菌的影响[J]. 土壤, 2003, 35(6): 490-494
- [20] 马国瑞, 陈美慈. 氯离子对土壤中氮肥的行为及微生物数量和酶活性的影响[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(4): 437-440
- [21] 程明芳, 金继运, 李春花, 王玉军, 王贺. 氯离子对作物生长和土壤性质影响的研究进展[J]. 浙江农业科学, 2010(1): 12-14
- [22] Mandal B, Mukhopadhyay AK. Ammonium fixation in soils from application of NH_4^+ -producing fertilizers[J]. *Soil Sci. Soc. Am. j.*, 1984, 32(3): 486-487
- [23] Abbasi MK, Adams WA. Estimation of simultaneous nitrification and denitrification in grassland soil associated with urea-N using ^{15}N and nitrification inhibitor[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(1): 38-44

Effects of Fertilization Methods and Forms of Nitrogen Fertilizers on Nitrogen Diffusion and Migration in Paddy Soil

LING De^{1,2}, LI Ting², WANG Huo-yan^{1*}, LIU Xiao-wei¹, CHEN Zhao-ming¹, ZHOU Jian-min¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 2 *College of Resource, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China*)

Abstract: The effects of fertilization methods and forms of nitrogen fertilizers on nitrogen diffusion and migration were studied by field micro-plot experiment. 4 fertilization methods (broadcast, mixed fertilization with 10 cm top soil, point fertilization at 10 cm depth, mixed fertilization with 3% soil at 10 cm depth) and 4 nitrogen fertilizers (urea, ammonium chloride, ammonium sulfate and ammonium phosphate) were investigated. The results showed that inorganic nitrogen concentration (INC) in 6-16 cm soil of urea point fertilization treatment was higher than 200 mg/kg during 60 day incubation, higher than those of the other 3 fertilizer methods. The preservation capacity of the high INC in soil of the fertilization methods showed a sequence of point fertilization > mixed fertilization with 3% soil > mixed fertilization with 10 cm top soil > broadcast. With the point fertilization method, the INC of urea treatment after 30 d and 60 d was higher than other three fertilization methods. The maximum INC was up to 544 mg/kg and 377 mg/kg for urea after incubated for 30 d and 60 d, respectively. While the similar values for ammonium chlorides were 324 mg/kg and 106 mg/kg, respectively. There was no significant difference between urea and ammonium phosphate treatments. The capacity of the 4 nitrogen fertilizers in maintaining the high INC in soil under point fertilization method followed the sequence of urea and ammonium phosphate > ammonium sulfate > ammonium chloride. The results demonstrated that the smaller the initial volume of the soil with which the nitrogen fertilizers mixed, the higher INC could achieved in soil and also the lower the inorganic nitrogen lost. Point fertilization of urea at 10 cm depth had obvious advantages in improving nitrogen use efficiency as compared with the conventional broadcast method.

Key words: Nitrogen fertilizer; Fertilization methods; Nitrogen diffusion and migration