

施用方式和氮肥种类对砂姜黑土氮素迁移的影响^①

姜超强^{1,2}, 卢殿君¹, 祖朝龙², 周健民¹, 王火焰^{1*}, 王世济²

(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 安徽省农业科学院烟草研究所/玉米研究中心, 合肥 230031)

摘 要: 采用田间微区试验, 在砂姜黑土中研究了施肥方式(上层 12 cm 土混施、土下 12 cm 点施、土下 12 cm 条施)和氮肥种类(尿素、磷酸氢二铵)对氮素垂直运移和水平迁移动态的影响。不同施用方式试验结果表明, 在处理的 90 d 内, 砂姜黑土中土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均呈现土下 12 cm 点施>土下 12 cm 条施>上层 12 cm 土混施的趋势。尿素在土下 12 cm 点施条件下, 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要集中在垂直方向 6~18 cm 土层和水平距离 0~7 cm 范围内; 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的分布核心区土层超过 21 cm, 水平距离大于 15 cm; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 核心区浓度均随处理时间延长而明显下降。土下 12 cm 点施 90 d 后, 尿素和磷酸铵的氮素养分在砂姜黑土中的横向移动距离为 5~7 cm, 垂直方向上养分主要集中在 6~18 cm 的土层范围; 点施 90 d 时, 磷酸铵处理在土下 18 cm 和水平距离 12 cm 处无机态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量分别为 148.9 和 77.4 mg/kg, 其含量远大于尿素处理(96.3 和 53.2 mg/kg), 而在施肥点两种氮肥处理土壤无机态氮含量差异更大, 说明磷酸铵较尿素具有更高的保肥性。研究表明: 点施延缓了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化速率, 提高了肥际养分供应浓度。结合作物生长和需肥特性, 预示通过优化施肥位置和氮肥种类, 采用一次施肥可以实现 90 d 持续供应高浓度养分以满足旱地作物生长发育的养分需求。

关键词: 氮肥; 施用方式; 砂姜黑土; 迁移扩散

中图分类号: S143.1 **文献标识码:** A

化肥在保障我国粮食安全方面发挥着不可替代的支撑作用。然而, 农业生产中氮肥不合理施用现象普遍存在, 尤其是在一些农业集约化生产程度高的地区, 氮肥过量施用、氮肥利用率偏低的现象更为严重^[1]。2010 年, 我国年化肥消费量已达到 5 562 万 t, 占世界化肥年总消费量的 34%, 其中氮肥年消费量约为 3 200 万 t。但是, 我国主要粮食作物氮肥平均利用率却低于 30%, 并较 20 世纪 80 年代有显著下降^[2]。尽管 2013 年我国农业部研究报告表明, 水稻、玉米和小麦三大粮食作物的氮肥利用率已从 2008 年的 30% 提高到了 33%, 但仍然远低于国际水平^[2]。因此, 目前我国农田中化学氮肥的当季作物回收率仍然相当低, 通过各种途径所损失的总氮量约占 52%^[3]。提高氮肥利用率、减少养分损失是我国农业发展和环境保护迫切需要解决的重大问题。王火焰和周健民^[4]认为通过改进施肥位点使氮肥养分扩散与根系伸展范围

达到最佳匹配, 可以大幅度提高氮肥利用率。但是, 理想施肥位点的确定首先需要掌握不同施肥方式下土壤中肥料养分迁移扩散能力和范围。

氮肥利用率与其施入土壤后的迁移转化和被植物吸收利用的过程密切相关。为明确氮肥在土壤中的迁移转化特征, 人们开展了大量的研究, 包括不同土壤类型、肥料品种、施肥方式、水热条件等对氮肥迁移转化的影响^[5-8]。研究结果表明, 通过改变稻田中氮肥的施用方式, 增加施入土壤中氮肥的集中程度, 减小氮肥与土壤混合的初始体积, 能够提高肥际养分浓度, 降低肥料养分损失^[8]。张朝等^[7]对不同质地土壤中氮素迁移转化的研究发现, 水稻土中氮素的转化速率和硝化率均明显高于黑土, 主要是由于黑土黏粒含量远高于水稻土, 因为土壤硝化率与土壤黏粒含量呈显著负相关。灌水和

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB127401)、安徽省自然科学基金项目(1708085MC54)、安徽省农业科学院学科建设项目(17A0921)和国家自然科学基金项目(41271309)资助。

* 通讯作者(hywang@issas.ac.cn)

作者简介: 姜超强(1980—), 男, 广西贵港人, 博士, 助理研究员, 主要从事作物营养与高效施肥理论和技术方面的研究。E-mail: chaoqjiang@163.com

降雨也是影响土壤剖面氮素含量和累积的重要因素,高水处理会导致根区土壤 NO_3^- -N 大量淋失,降低了氮肥利用率^[9]。不同氮肥品种在土壤中的迁移转化有显著差异,比如砂壤土和黏壤土中肥料氮素的淋失量均是硝态氮肥 > 尿素 > 铵态氮肥,同等条件下砂壤土中氮肥的淋失量明显高于黏壤土^[10];在模拟土柱条件下,黑土中尿素的氮素转化速率明显高于硫酸铵^[11],但是,在水稻土中硫酸铵的氮素转化效率则略高于尿素^[7];我们以前的研究也表明,在氮肥点施模式下水稻土中的保肥能力为:尿素、磷酸铵 > 硫酸铵 > 氯化铵^[8]。综上所述,国内外相关研究主要集中在氮肥形态和不同土壤类型对氮素的迁移扩散方面,对不同施肥方式(施肥位点)下肥际微域氮肥动态迁移扩散和损失的研究甚少,这一规律的揭示是实现理想根区施肥模式的重要前提,也是优化施氮方式的重要决策依据。本文采用田间微区试验的方式,通过肥际微域土壤垂直分层和水平分段定期取样测定土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的含量,用以研究施氮方式与氮肥品种对氮素在砂姜黑土中迁移扩散的影响,以期揭示砂姜黑土中氮素的迁移转化特征,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太和县农业示范基地,试验土壤为砂姜黑土。土壤基本理化性质为:pH 8.0、有机质 15.96 g/kg、全氮 1.13 g/kg、碱解氮 95.5 mg/kg、有效磷 25.8 mg/kg、速效钾 235.3 mg/kg。

1.2 试验设计

田间试验设置3种施肥处理,分别为:上层12 cm 土混施、土下12 cm 点施、土下12 cm 条施;选用2种氮肥品种(尿素和磷酸铵),尿素采用小颗粒型号(含氮46%),磷酸铵采用分析纯的磷酸氢二铵(含氮21.2%)。每个处理重复3次,共计18个微区,微区面积为1.68 m²(1.4 m × 1.2 m)。施氮量按照当地种植玉米时的推荐用量180 kg/hm²,试验期间不种植玉米,不进行灌溉,清除杂草。

不同施肥方式具体操作为:上层12 cm 土混施:上层12 cm 土壤与氮肥充分混匀;土下12 cm 点施:采用专用的施肥器将氮肥施入土下12 cm 位置;土下12 cm 条施:开深12 cm、宽5 cm 的沟,将氮肥均匀施入沟内并覆土。其中混施先将长1.4 m、宽1.2 m、

深12 cm 的土层挖出置于塑料地膜与称量好的肥料进行充分混匀,再将土壤填回挖取的坑内。

1.3 样品采集与指标测定

试验期间进行3次取样,分别为试验开始后第30、60和90天。土壤样品分垂直方向和水平方向(仅土下12 cm 点施与土下12 cm 条施处理水平取样)采用破坏性采集方式取样。

垂直方向:在氮肥施用位置,采用特制取样器以直径为4 cm 垂直向下截取21 cm 土块,每隔3 cm 分层共采集7份土壤样品。

水平方向:以氮肥施用位置为起点,用特制取样器横向按0~3、3~5、5~7、7~9、9~12、12~15和15~18 cm 分7段采集土壤样品,每段取样深度为21 cm,宽度为3 cm。

供试土壤基本理化性质测定采用常规方法测定^[12];土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 经2 mol/L KCl 浸提采用全自动间断化学分析仪(Smart chem 200)测定^[8]。

1.4 数据处理

结果采用平均值 ± 标准差表示,Excel 2010 进行数据统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 尿素不同施用方式对土壤 NH_4^+ -N 含量的影响

不同施氮方式的结果表明,垂直方向土壤 NH_4^+ -N 含量总体随着处理时间延长呈现下降并且有向下迁移的趋势(图1)。上层12 cm 土混施处理30 d 垂直方向各土层 NH_4^+ -N 含量均小于30 mg/kg,其中0~9 cm 土层 NH_4^+ -N 含量相对较高;60 d 和90 d 垂直方向各土层 NH_4^+ -N 含量均小于15 mg/kg,且不同土层间差异较小。土下12 cm 点施土壤 NH_4^+ -N 主要集中在垂直方向6~18 cm 土层范围,30 d 在6~15 cm 土层 NH_4^+ -N 含量均大于400 mg/kg,在9~12 cm 处达到极大值1428 mg/kg;60 d 和90 d 垂直方向各土层 NH_4^+ -N 含量均大幅下降,但是在90 d 时9~12 cm 处 NH_4^+ -N 含量仍然达到88 mg/kg。土下12 cm 条施30 d 垂直方向0~9 cm 土层 NH_4^+ -N 含量相对较高,均大于50 mg/kg;随着时间延长不同土层 NH_4^+ -N 含量呈现下降的趋势,0~9 cm 土层的下降更明显。总体而言,尿素在3种施氮方式下垂直方向土壤 NH_4^+ -N 含量大小顺序为:土下12 cm 点施 > 土下12 cm 条施 > 上层12 cm 土混施。

不同时期水平方向土壤 NH_4^+ -N 含量如图2所示,土下12 cm 点施30 d 横向距离施肥位点0~3 cm 土壤 NH_4^+ -N 含量达到284 mg/kg,水平0~7 cm 是其

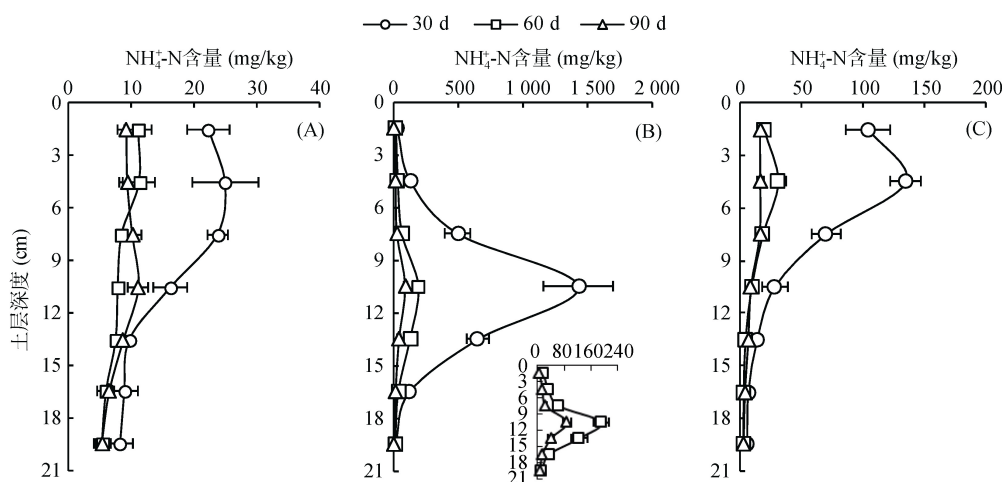


图 1 尿素不同施用方式下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的动态变化(垂直方向)(A. 混施, B. 点施, C. 条施)

Fig. 1 Dynamic changes of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents under different fertilization methods (vertical direction)

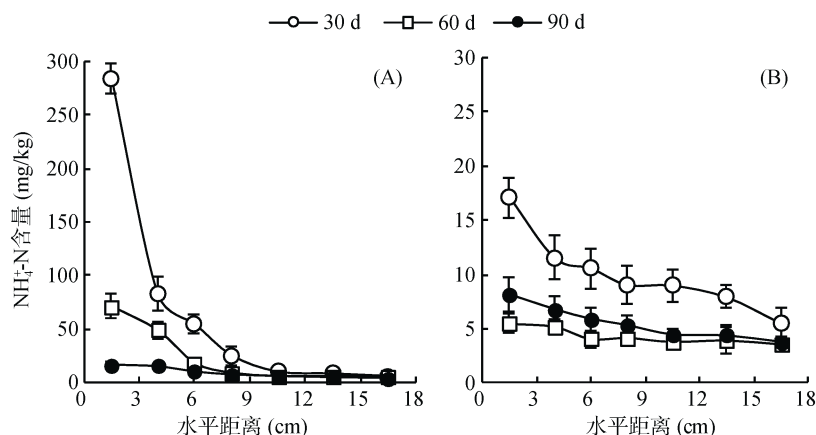


图 2 尿素不同施用方式下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的动态变化(水平方向)(A. 点施, B. 条施)

Fig. 2 Dynamic changes of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents under different fertilization methods (horizontal direction)

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的分布核心区, 含量大于 50 mg/kg; 随着时间的延长, 横向同一距离土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均有下降的趋势, 如横向距离 5~7 cm 处 30、60 和 90 d 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为 55、18 和 10 mg/kg。横向距离 12 cm 以外不同取样时间土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量基本一致。土下 12 cm 条施各水平距离土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均小于 20 mg/kg, 并且随着时间的延长呈下降的趋势。可见, 采取土下 12 cm 点施的施氮方式土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量大于土下 12 cm 条施处理。

2.2 尿素不同施用方式对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响

不同施氮方式下, 3 个取样时期垂直方向不同土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量如图 3 所示, 上层 12 cm 土混施处理垂直方向各土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均小于 40 mg/kg; 土下 12 cm 条施垂直方向 3~15 cm 各层次土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均大于 50 mg/kg, 而土下 12 cm 点施处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量则相对更高, 尤其在垂直方向 6~15 cm 各层次土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均大于 100 mg/kg, 90 d 时, 18~21 cm

土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量仍然高达 70 mg/kg。在处理 60 d 时, 土下 12 cm 点施垂直方向 6~18 cm 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量大于 150 mg/kg, 其中 9~12 cm 处达到 250 mg/kg; 而上层 12 cm 土混施和土下 12 cm 条施 6~18 cm 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量则分别小于 40 和 90 mg/kg。因此, 施入土壤的尿素与土壤混合的体积越大, 氮肥养分的损失越高, 尿素采用点施进行集中施用能减少养分损失, 提高肥际氮素浓度。

如图 4 所示, 土下 12 cm 点施和土下 12 cm 条施处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均随着水平方向距离的增加而呈现下降的趋势。土下 12 cm 点施在横向距离 0~9 cm 范围内, 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均表现为 30 d > 60 d > 90 d, 但在横向距离 12~18 cm 范围内则相反, 90 d 时相对最高。土下 12 cm 条施处理在横向距离 6~18 cm 范围内土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量则呈现 90 d > 60 d > 30 d 的趋势。土下 12 cm 点施 3 个取样时间在横向距离 0~9 cm 范围内土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均大于土下 12 cm 条施处理,

如处理 60 d 时,土下 12 cm 点施在横向距离 0~9 cm 土壤 NO_3^- -N 含量均大于 87 mg/kg,但是土下 12 cm

条施则均小于 40 mg/kg。可见,土下 12 cm 点施处理的氮肥养分损失较小。

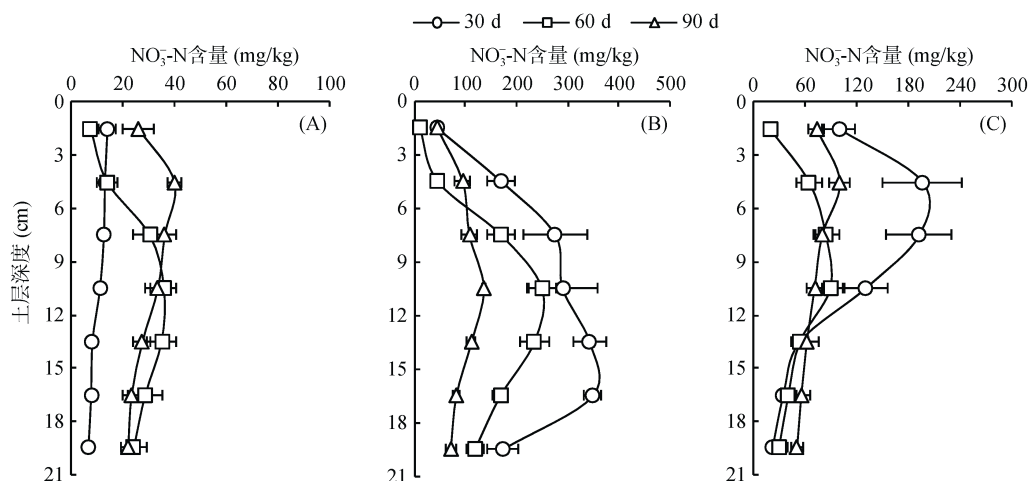


图3 尿素不同施用方式下土壤 NO_3^- -N 含量的动态变化(垂直方向)(A. 混施, B. 点施, C. 条施)

Fig. 3 Dynamic changes of soil NO_3^- -N contents under different fertilization methods (vertical direction)

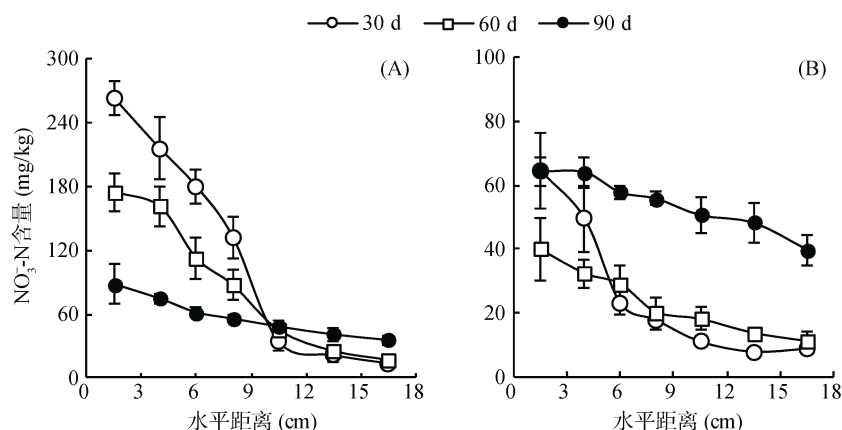


图4 尿素不同施用方式下土壤 NO_3^- -N 含量的动态变化(水平方向)(A. 点施, B. 条施)

Fig. 4 Dynamic changes of soil NO_3^- -N contents under different fertilization methods (horizontal direction)

2.3 点施条件下氮肥种类对土壤 NH_4^+ -N 含量的影响

采用土下 12 cm 点施的模式,尿素和磷酸铵处理垂直方向土壤 NH_4^+ -N 含量均呈现随着处理时间延长而下降的趋势,但是同一取样时间点,磷酸铵处理土壤 NH_4^+ -N 含量总体大于尿素处理(图 5)。两种氮肥处理垂直方向 6~15 cm 的土层 NH_4^+ -N 含量的差异更为明显,如 9~12 cm 处尿素和磷酸铵处理土壤 NH_4^+ -N 含量在处理 30、60 和 90 d 时分别是 1 428、191、88 mg/kg 和 2 019、461、219 mg/kg,随着时间的延长两种氮肥处理垂直方向上土壤 NH_4^+ -N 含量的差异呈增大的趋势。如图 6 所示,两种氮肥在土下 12 cm 点施的模式水平方向上土壤 NH_4^+ -N 含量的变化与垂直方向的趋势基本一致,随着时间的延长其 NH_4^+ -N 含量呈现下降的趋势,但是磷酸铵处理在横向距离 0~7 cm 范围内土壤 NH_4^+ -N 含量均大于尿素处理,并且随

培养时间的延长差异越明显。因此,总体来看在土下 12 cm 点施模式下,整个处理期内磷酸铵的保肥能力大于尿素,并且在处理的末期更加明显。

2.4 点施条件下氮肥种类对土壤 NO_3^- -N 含量的影响

尿素和磷酸铵在土下 12 cm 点施模式下对垂直方向不同土层 NO_3^- -N 含量的影响如图 7 所示,尿素处理土壤 NO_3^- -N 含量总体呈现随处理时间延长而降低的趋势,而磷酸铵处理则表现出增加的趋势。尿素土下 12 cm 点施在垂直方向 6~18 cm 土层 NO_3^- -N 含量从 30 d 的 276~350 mg/kg 下降至 60 d 的 168~250 mg/kg,90 d 时进一步下降到 82~136 mg/kg。与此相反,磷酸铵土下 12 cm 点施处理 30、60 和 90 d 在垂直方向 6~18 cm 土层 NO_3^- -N 含量分别为 116~152、83~174 和 129~230 mg/kg, NO_3^- -N 含量随时间延长呈逐渐增加的趋势。土下 12 cm 点施模式下,

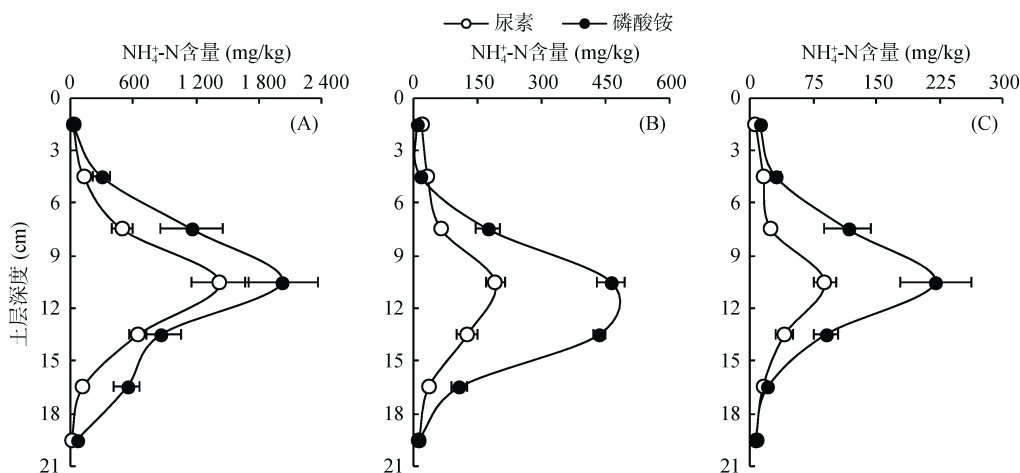


图 5 土下 12 cm 点施下氮肥种类对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响(垂直方向)(A. 30 d, B. 60 d, C. 90 d)

Fig. 5 Effects of different nitrogen fertilizers on soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents under point fertilization methods (vertical direction)

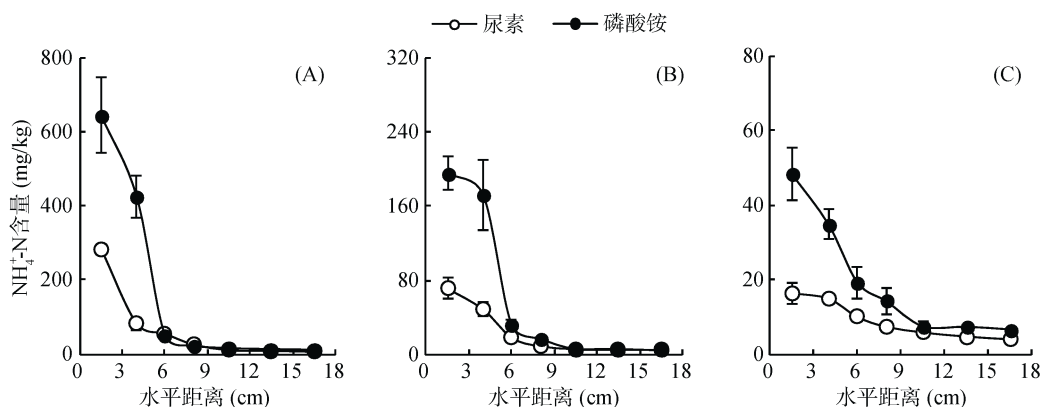


图 6 土下 12 cm 点施下氮肥种类对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响(水平方向)(A. 30 d, B. 60 d, C. 90 d)

Fig. 6 Effects of different nitrogen fertilizers on soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents under point fertilization methods (horizontal direction)

两种氮肥对水平方向上土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响如图 8 所示, 尿素土下 12 cm 点施在横向距离 0~9 cm 范围土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量随处理时间延长呈下降趋势, 而 9~18 cm 的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量则有增加的趋势, 从 30 d 的 14~34 mg/kg 增加到 90 d 时的 36~48 mg/kg。磷酸铵土下 12 cm 点施横向距离土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在 30 d 和 60 d 时基本一致, 而 90 d 时土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在同一横向距离点均明显增加, 其含量是 30 d 时的 1.3~8.1 倍。总体来看在土下 12 cm 点施模式下, 30 d 和 60 d 磷酸铵处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均小于尿素处理, 随处理时间延长两个处理之间的差异逐渐缩小, 至处理的 90 d 磷酸铵处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量则显著大于尿素处理, 其含量为尿素处理的 1.3~2.0 倍。可见, 土下 12 cm 点施模式下, 磷酸铵的硝态氮肥的释放速度相比尿素较慢, 肥效更长。

3 讨论

本研究表明, 施氮方式对土壤氮素有显著的影响, 总体而言土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均呈现: 土下 12 cm 点施 > 土下 12 cm 条施 > 上层 12 cm 土混施

的趋势。尿素土下 12 cm 点施在处理第 30 天其土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均远高于土下 12 cm 条施和上层 12 cm 土混施处理, 在垂直方向 9~12 cm 土层土壤的差异更为突出; 随着处理时间的延长, 60 d 和 90 d 时土下 12 cm 点施土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较 30 d 时均大幅下降, 但仍然明显高于土下 12 cm 条施和上层 12 cm 土混施处理。这可能主要是由于在点施条件下, 提高了尿素的集中程度, 减少了与土壤的接触面积, 从而延缓氮素释放、减少养分损失。Rees 等^[13]对陕西塿土的研究发现, 尿素土下 10 cm 点施处理在玉米采收后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均高于撒施和上层 15 cm 混施处理, 并且尿素采用点施能够有效减少 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 向下部土层的淋溶损失^[14]。我们最近的研究结果也表明, 采用点施方式可提高施入土壤中尿素的集中度, 减少了与土壤接触面, 能够延缓氮肥养分释放、减少 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 损失^[8]。因此, 本研究认为尿素在土下 12 cm 点施条件下, 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 核心分布在垂直方向 6~18 cm 土层和水平距离 7 cm 范围内, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的分布范围则更广。

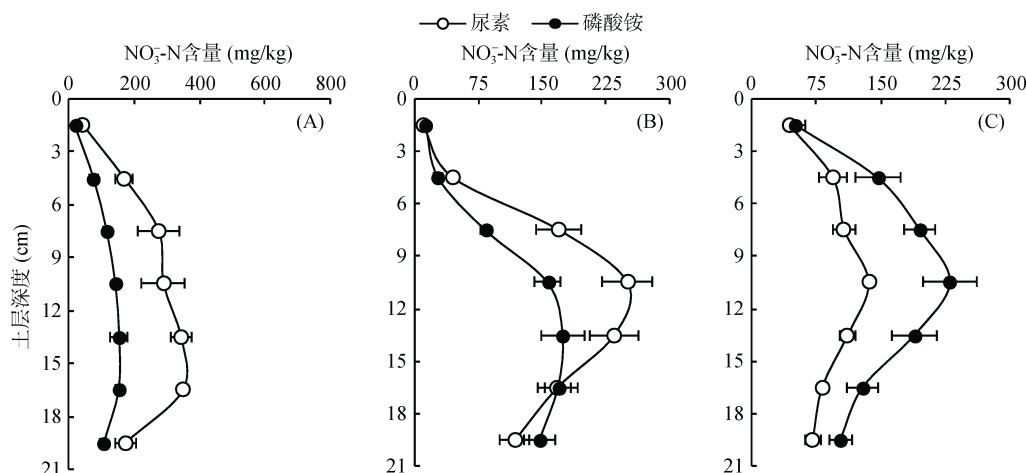


图7 土下12 cm点施下氮肥种类对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的影响(垂直方向)(A. 30 d, B. 60 d, C. 90 d)

Fig. 7 Effects of different nitrogen fertilizers on soil $\text{NO}_3\text{-N}$ contents under point fertilization methods (vertical direction)

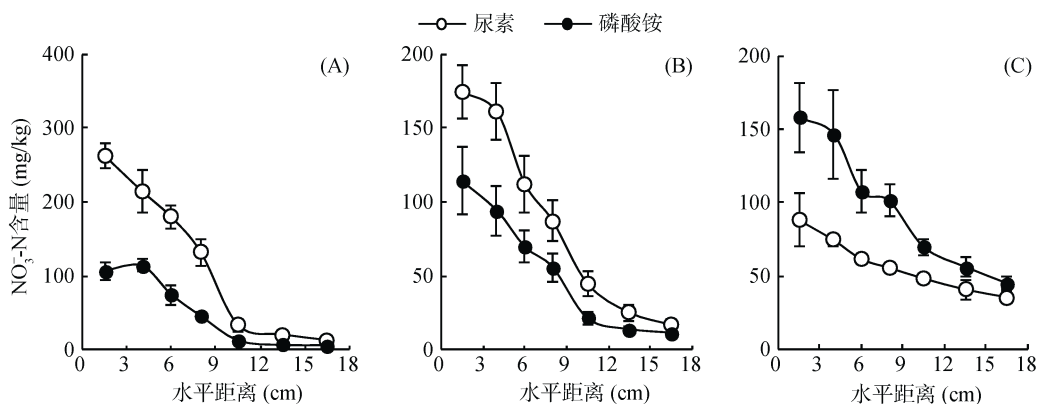


图8 土下12 cm点施下氮肥种类对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的影响(水平方向)(A. 30 d, B. 60 d, C. 90 d)

Fig. 8 Effects of different nitrogen fertilizers on soil $\text{NO}_3\text{-N}$ contents under point fertilization methods (horizontal direction)

氮肥在土壤中的迁移、转化和释放特性直接影响作物对肥料的吸收利用,选择合适的氮肥品种能够提高肥料养分、降低养分损失^[4]。本研究结果表明,在土下12 cm点施条件下,磷酸铵处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量总体上明显大于尿素处理,在垂直方向6~15 cm土层和水平方向0~7 cm范围内差异更为明显。与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不同,磷酸铵处理土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量为30 d和60 d时均小于尿素处理,而随着处理时间的延长至90 d时,其土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量则大于尿素处理。磷酸铵处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的降低和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的增加,可能主要是由于铵态氮肥施入土壤显著增加了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,但是随着硝化作用的进行, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量逐渐降低, $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量则逐渐增加^[10]。从土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (图5和6)和 $\text{NO}_3\text{-N}$ (图7和8)含量的变化看,施用磷酸铵和尿素后在培养期间土壤矿质态氮($\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)的含量均有降低的趋势。矿质态氮含量的降低可能是由于氨挥发和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的固定所致,一方面磷酸铵施入土壤后能直接水解出氨,产生氨挥

发;另一方面砂姜黑土因富含固铵能力强的黏土矿物,对施入的铵态氮肥会发生固定作用^[15]。此外,本研究期间夏季高温高湿条件下,尿素更加容易通过氨挥发损失,而且在碱性和石灰性土壤中氨挥发损失一直被认为是氮肥损失的重要途径^[16]。本研究发现,点施90 d时,尿素和磷酸铵处理在土下15~18 cm土层土壤无机态氮分别为96.3和148.9 mg/kg,而水平距离12 cm处则分别为77.4和53.2 mg/kg。可见,土下点施氮肥能够明显提高肥际矿质态氮含量、减少氮肥损失,而磷酸铵较尿素具有更高的保肥性。因此,结合旱地作物的生长发育和需肥特性,预示氮肥采用一次点施的方式在90 d内土壤能够持续供应较高浓度的氮素营养,可以满足生育期较短至中等的作物对氮素的需求,而对于生育期较长的作物(如小麦)通过优化氮肥品种(如磷酸铵)也可以实现一次施氮以满足作物全生育期的氮素需求,避免追肥带来的残留损失^[17]。

另外,肥料采用点施的方式在施肥点(区)周围形

成了特殊的微域养分环境,施肥集中度的改变将极大地改变肥料养分在土壤中的分布和扩散迁移,可能对肥料有效性和损失程度均产生重要影响^[8, 13-14]。本研究发现,尿素和磷酸铵在砂姜黑土中处理 90 d 的横向移动距离为 5~7 cm(肥料点半径为 1.0 cm),在施肥点水平距离 9 cm 范围内,随施肥点距离的增加,土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量呈指数曲线迅速下降。采用土下 12 cm 点施方式施入土壤氮素的扩散集中在 6~18 cm 的土层范围,即氮肥的垂直迁移集中在 6 cm 范围内,这与张朝等^[11]的研究结果基本一致,尿素和硫酸铵在黑土中肥料养分的迁移主要在 0~5 cm 土层深度范围内。王曙光等^[18]认为尿素在潮土中的扩散基本在 1~10 cm 范围内,其扩散范围与土壤性质(尤其是黏粒含量)和肥料用量有关。而东北黑土模拟土柱条件下尿素的迁移距离和硝化作用主要发生在 0~15 cm 和 0~50 cm 土层内^[19],这可能主要是由于取样点密度不同造成的,该文以 0~15 cm 作为一个取样点,这很可能人为地扩大了尿素的迁移距离。因此,研究肥料在土壤中的迁移扩散不仅要考虑肥料品种和土壤理化性状的差异,而且施肥点(区)附近的取样密度和整体范围也是影响研究结果的重要因素。结果还表明,同等条件下 NO_3^- -N 下移较 NH_4^+ -N 明显,而 NH_4^+ -N 则更加集中在施肥点附近,垂直向上和往下移范围较小,这可能与砂姜黑土具有较强的固铵作用有关^[15, 20]。然而,在种植作物的条件下,由于作物根系对肥料的吸收和根肥的交互作用^[21-22],必然会对施入土壤中氮肥的迁移转化产生影响,因此不同作物在不同土壤类型中理想的施肥位点还需进一步的探讨和优化。

4 结论

1) 土下 12 cm 点施土壤保肥能力明显高于上层 12 cm 土混施和土下 12 cm 条施。

2) 点施条件下,砂姜黑土中尿素和磷酸铵在处理 90 d 的横向移动距离为 5~7 cm,垂直迁移主要集中在 6~18 cm 土层范围,尿素的迁移大于磷酸铵,而磷酸铵的保肥性大于尿素。

3) 结合农业生产实践,本研究认为采用合适的氮肥品种进行一次点施是可以满足旱地作物生长发育的氮素需求。但不同作物、不同土壤类型,其最优的肥料品种和最佳的施肥位点还需要进一步研究。

参考文献:

[1] 崔振岭,陈新平,张福锁,等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系土壤硝态氮的适宜含量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2227-2232

[2] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 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

[3] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273

[4] 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

[5] Kim J H, Guo X J, Park H S. Comparison study of the effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification and nitrite accumulation[J]. Process Biochemistry, 2008, 43: 154-160

[6] 杜振宇,周健民,王火焰,等. 氮钾肥对磷在红壤肥际微域中迁移转化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 497-502

[7] 张朝,车玉萍,李忠佩. 水稻土模拟土柱中肥料氮素的迁移转化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3236-3242

[8] 凌德,李婷,王火焰,等. 施用方式和氮肥种类对水稻土中氮素迁移的影响效应[J]. 土壤, 2015, 47(3): 478-482

[9] 刘小刚,张富仓,田育丰. 交替隔沟灌溉和施氮对玉米根区水氮迁移的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2025-2032

[10] 习金根,周建斌,赵满兴,等. 滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 337-342

[11] 张朝,车玉萍,李忠佩. 模拟土柱条件下黑土中肥料氮素的迁移转化特征[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 683-688

[12] 张甘霖,龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012

[13] Rees R M, Roelcke M, Li S X, et al. The effect of fertilizer placement on nitrogen uptake and yield of wheat and maize in Chinese loess soils[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 47: 81-91

[14] 王夏晖,刘军,王益权. 不同施肥方式下土壤氮素的迁移特征研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 202-206

[15] 李德成,张甘霖,龚子同. 我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J]. 土壤, 2011, 43(4): 623-629

[16] 杨淑莉,朱安宁,张佳宝,等. 不同施氮量和施氮方式下田间氮挥发损失及其影响因素[J]. 干旱地区研究, 2010, 27(3): 415-421

[17] 王西娜,王朝辉,李华,等. 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 106-116

[18] 王曙光,侯彦林. 尿素肥斑扩散对土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2269-2274

[19] 胡晓航,周建朝,王秋红,等. 温度、水分和施肥对甜菜黑土氮素迁移转化的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 82-88

[20] Nommik H, Vahtras K. Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils//Stevenson F J. Nitrogen in agricultural soils[M]. American Society of Agronomy, 1982, 22: 123-171

- [21] Shen J, Li C, Mi G, et al. Maximizing root/rhizosphere efficiency to improve crop productivity and nutrient use efficiency in intensive agriculture of China[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 64(5): 1181–1192
- [22] Ma Q, Zhang F, Rengel Z, et al. Localized application of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ plus P at the seedling and later growth stages enhances nutrient uptake and maize yield by inducing lateral root proliferation[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372: 65–80

Effects of Different Fertilization Methods and Nitrogen Fertilizers on Nitrogen Diffusion and Migration in Lime Concretion Black Soil

JIANG Chaoqiang^{1,2}, LU Dianjun¹, ZU Chaolong², ZHOU Jianmin¹, WANG Huoyan^{1*}, WANG Shiji²

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *Tobacco Research Institute / Maize Research Center, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: Nitrogen (N) is one of the most important elements for plant growth and crop yield, however, excessive N fertilization and the relatively low N use efficiency (NUE) can results in the threat to environmental quality, but how to increase NUE has been an urgent problem still unsolved for agriculture development and environment protection, thus, it is important to study the diffusion and migration of N fertilizers to provide a theoretical basis for improving NUE and protecting the environment. A filed micro-plot experiment was carried out to study the effects of different fertilization methods and N fertilizers on the dynamics of soil N vertical diffusion and horizontal migration in lime concretion black soil, 3 fertilization methods (mixed uniformly with 12 cm top soil, placed in-hole at 12 cm depth, and placed in-furrow at 12 cm depth) and 2 nitrogen fertilizers (urea and ammonium phosphate) were designed, the concentrations of inorganic N (ammonium N and nitrate N) of different soil layers were determined at 30, 60 and 90 days after fertilization. The results showed that the concentrations of ammonium N and nitrate N in soils were in an order of placed in-hole at 12 cm depth > placed in-furrow at 12 cm depth > mixed uniformly with 12 cm top soil during 90 day treatment. With the point fertilization, the ammonium N of urea treatment was mainly concentrated in 6–18 cm along the vertical direction and in 0–7 cm alone horizontal distance, while the concentrated area of nitrate N reached the depth of 21 cm, and migrated to 15 cm away from fertilization point. Both the concentrations of ammonium N and nitrate N in soil declined obviously as the treatment time prolonged. The inorganic N of urea and ammonium phosphate point fertilization methods was mainly distributed in 6–18 cm soil, and the horizontal movement distance apart from the fertilization point was about 5–7 cm after 90 days. However, the inorganic N concentrations in soil 18 cm depth and 12 cm away from the ammonium phosphate fertilization point were 148.9 and 77.4 mg/kg, respectively, significantly higher than those of urea treatment (96.3 and 53.2 mg/kg, respectively). Moreover, the difference of inorganic N concentration between the two fertilizers was more apparent in the soil of fertilization point. It suggested that the capacity of ammonium phosphate in maintaining the high inorganic N concentration in soil under point fertilization method was better than that of urea. The results suggested that point fertilization could maintain higher inorganic N concentration in soil and reduce inorganic nitrogen losse. According to crop growth and fertilizer requirement, single basal application could supply the crop with a continuously high nutrient concentration during 90 days by optimizing the fertilizer placement and nitrogen species.

Key words: Nitrogen; Fertilization methods; Lime concretion black soil; Diffusion and migration