

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.006

张磊, 宋航, 陈小琴, 等. 穴施条件下肥料养分在土壤中迁移规律的初步研究. 土壤, 2020, 52(6): 1137–1143.

穴施条件下肥料养分在土壤中迁移规律的初步研究^①

张磊^{1,2}, 宋航^{1,2}, 陈小琴¹, 卢殿君¹, 王火焰^{1,2*}

(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 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 根区施肥是高效施肥的重要措施, 确定根区施肥的最佳位置, 需要了解肥料施用后养分在土壤中的迁移规律。本研究通过室内模拟试验来研究尿素、聚磷酸铵和氯化钾复合肥穴施条件下, 土壤含水量、培养时间对两种土壤中氮磷钾养分迁移的影响效果。结果表明: 随土壤含水量由 300 g/kg 增加到 420 g/kg, 氮磷钾在土壤中的迁移距离都会显著增加, 培养 15 d 的姜堰和广德两种土壤中, 铵态氮、速效磷和速效钾的迁移距离分别由 9~11、4~10 和 9~10 cm 增加到 12~14、5~6 和 11 cm。土壤含水量增加使氮磷养分的迁移距离平均增加了约 1/3。随培养时间从 15 d 延长到 30 d, 300 g/kg 土壤含水量条件下两种土壤中速效磷迁移距离无显著变化, 而速效钾的迁移距离显著增加, 铵态氮迁移距离在广德水稻土中增加显著, 但在姜堰水稻土中增加幅度较小。肥料穴施条件下铵态氮的硝化作用除受土壤含水量、pH 和时间因素影响外, 还受肥际高浓度养分的强烈抑制作用, 这种抑制作用延缓了铵态氮向硝态氮的转化, 是根区一次施肥技术中氮肥持续高效供应的重要原因。总体而言, 氮磷钾养分迁移距离表现为: 硝态氮>铵态氮>速效钾>速效磷, 肥料氮的迁移受硝化作用影响大, 速效磷的迁移受土壤含水量影响较大, 而速效钾与铵态氮的迁移规律较为类似, 都因土壤含水量的增加和时间的延长而逐渐增加。

关键词: 穴施; 根区施肥; 肥际; 迁移规律; 硝化作用

中图分类号: S143 **文献标志码:** A

Primary Study on Nutrient Migration Under Hole Fertilization in Soils

ZHANG Lei^{1,2}, SONG Hang^{1,2}, CHEN Xiaolin¹, LU Dianjun¹, WANG Huoyan^{1,2*}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Root zone fertilization is an important measure for efficient fertilization. To determine the optimal location of root zone fertilization, it is necessary to understand the law of nutrient transfer in the soil after fertilization. The effects of soil water content and incubation time on nitrogen, phosphorus, and potassium migration of point-applied compound fertilizer which composed of urea, ammonium polyphosphate and potassium chloride were studied with laboratory incubation experiment. The results showed that with the increase of soil water content from 300 g/kg to 420 g/kg, the migration distances of nutrients increased significantly. After incubated for 15 d in soils of Jiangyan and Guangde, the migration distance of ammonium nitrogen, available phosphorus, and available potassium increased from 9–11 cm, 4 cm and 9–10 cm to 12–14 cm, 5–6 cm and 11 cm, respectively. With the increase of soil water content, the distance of N and P migration increased by about one third on average. With the increase of incubation time from 15 d to 30 d, there was no significant change in the migration distance of available phosphorus, but the migration distance of available potassium increased significantly. The migration distance of ammonium nitrogen increased significantly in Guangde paddy soil with weak nitrification, while it increased slightly in Jiangyan paddy soil with strong nitrification. The nitrification of ammonium nitrogen under fertilizer hole-application was not only affected by soil water content, pH and time but also strongly inhibited by high concentration nutrients of ferti-sphere. High concentration nutrients delayed the transformation of ammonium to nitrate, which was an important mechanism account for the efficient nitrogen supply under root zone fertilization technology. In a whole, the nutrient migration distance is as follows: nitrate nitrogen > ammonium nitrogen > available potassium > available phosphorus. Nitrogen migration is easily affected by nitrification, while

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200901, 2016YFD0200108)资助。

* 通讯作者(hywang@issas.ac.cn)

作者简介: 张磊(1993—), 男, 安徽巢湖人, 硕士研究生, 研究方向为肥料养分迁移。E-mail: zhanglei@issas.ac.cn

the available phosphorus migration is greatly affected by soil water content. The migration patterns of available potassium and ammonium nitrogen are similar, both of which increase gradually with the increased time and soil water content.

Key words: Hole fertilization; Root zone fertilization; Ferti-sphere; Migration Pattern; Nitrification

我国是化肥生产与使用大国,人均耕地少,农田复种指数高。为了保证作物高产,农民通常需要施用大量的化学肥料。化肥的大量使用虽然提高了农作物产量,但也造成了肥料资源的浪费和一系列环境污染问题,严重影响了农产品质量制约了农业可持续发展^[1]。如何在提高肥料效益、促进粮食增产的同时减少肥料用量和降低环境污染一直是农业研究的热点。王火焰和周健民^[2]提出根区施肥的理念:将肥料施入根区活性范围,使肥料养分动态扩散范围与作物根系生长的动态范围相匹配,从而实现肥料养分被作物最佳吸收利用的目标。根区施肥作为高效施肥的重要措施,将肥料施在根区合适位置不仅能够使作物更易吸收,还能够减少养分在作物无法吸收的土体中的固定和损失。近年来,随着施肥机械技术的发展,水稻机械侧深施肥技术得到了推广应用^[3-4]。但该施肥技术是效果有限的侧条施肥,还不是位置更加精准的根区穴施。研究发现穴施颗粒尿素相比常规施肥养分持续时间更长^[5]。穴施在根区的尿素,氨挥发和径流损失会大幅度下降,从而提高了氮肥的利用率。在玉米和水稻上,将尿素穴施在根区附近合适位置不仅能够实现一次施肥,还能够提高水稻和玉米的产量以及养分吸收利用率^[6-8]。这些研究都证明尿素穴施具有很好的应用前景。然而对于氮磷钾复合肥穴施条件

下,养分在土壤中的迁移规律研究很少。穴施复合肥料将导致局部养分浓度比穴施单一尿素更高,对于穴施肥料位置和施肥深度都有更精确的要求,过近容易造成烧苗,过远会影响作物对养分的吸收。比如,小麦次生根生长一般发生在出苗后 15 d,当小麦种子里的养分耗尽后,必须靠根系吸收养分才能维持生长,而小麦对铵态氮又十分敏感,当溶液中的铵浓度达到 10 mmol/L 时,会对小麦生长发育造成抑制^[9-10]。在实际的氮素管理中,提高作物氮形态喜好、氮肥形态、土壤氮素转化特点以及气候因素之间的契合程度,可以显著提高氮肥利用率、降低施氮量、减少活性氮向环境的扩散^[11]。因此,需要通过研究来明确穴施条件下各养分在土壤中迁移扩散及转化规律,为确定根区施肥下最佳施肥位置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为江苏姜堰长江三角洲早期冲积母质发育的高砂土和安徽广德第四纪红色黏土发育的棕红壤,采集自土壤耕层 0~20 cm,采样时间为水稻季收获后。土壤采回后风干,过 2 mm 筛备用。土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 土壤基本理化性质
Table 1 Basic physiochemical properties of tested soils

土壤来源	pH	有机质 (g/kg)	铵态氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	CEC (cmol/kg)	2~0.05 mm (g/kg)	0.05~0.002 mm (g/kg)	<0.002 mm (g/kg)	土壤质地
姜堰	8.00	22.1	22.5	14.3	75.3	11.4	406	515	79	粉砂壤土
广德	4.89	17.3	27.6	28.7	73.9	15.1	216	653	131	粉砂壤土

1.2 试验处理

为了研究水稻/小麦轮作体系中穴施肥料养分早期迁移规律,试验设置两个培养时间段(15 d 和 30 d),两种水分含量(土壤含水量为 300 g/kg,约为姜堰土壤田间最大持水量的 70%;土壤含水量为 420 g/kg,相当于姜堰土壤田间最大持水量)和两种土壤(广德土壤和姜堰土壤)。试验处理具体为:①180 g 水、培养 15 d、姜堰土;②180 g 水、培养 30 d、姜堰土;③252 g 水、培养 15 d、姜堰土;④252 g 水、培养 30 d、姜堰土;⑤180 g 水、培养 15 d、广德土;⑥252 g

水、培养 15 d、广德土;⑦180 g 水、培养 30 d、广德土;⑧252 g 水、培养 30 d、广德土;每个处理 3 个重复。

1.3 试验方法

室内培养器具采用长方形塑料盒,长 19 cm、宽 7 cm、高 4.5 cm。每盒装过 2 mm 筛的土壤 600 g,自然压实后,姜堰土壤容重 1.25 g/cm³,广德土壤容重 1.15 g/cm³。在土面放置一张滤纸,通过将水缓慢加在滤纸上以减少对土壤的冲击。加入去离子水后静置 12 h,使水与土充分平衡。之后将 1.50 g 尿素、1.00

g 聚磷酸铵、1.50 g 氯化钾充分混合(N : P₂O₅ : K₂O = 15 : 10 : 16)集中穴施在距离塑料盒一端 4 ~ 5 cm 且距土表 1 cm 的位置上,盖上留有 5 个小孔的塑料盖,放在 25℃ 恒温培养箱中进行培养。

1.4 样品采集与分析测定

在培养的 15 d 和 30 d 取样,以施肥点位置为坐标原点每隔 1 cm 取一份样,向左取 4 份,向右取 14 份,共 19 份。将取好的样混匀,放入自封袋中待测,硝态氮、铵态氮当天提取当天测,速效钾和速效磷第二天测定。同时测定含水量以便换算成风干土重量。铵态氮、硝态氮采用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提,速效磷采用 0.5 mol/L、pH 8.5 碳酸氢钠溶液提取,速效钾采用 1 mol/L 中性醋酸铵溶液提取,除速效钾采用火焰光度法测定外,其余都用全自动化学分析仪(Smartchem 200)进行分析测定。

1.5 数据分析与作图

试验数据采用 Excel 2007 与 Origin 2017 处理、分析与作图。

2 结果分析

2.1 不同土壤含水量条件下氮在不同土壤中的迁移规律

土壤含水量对养分迁移有着显著影响。从图 1 中可以看出,不同土壤含水量条件下,姜堰土壤中铵态氮随着时间的增加,迁移距离不断增加。在 300 g/kg 土壤含水量条件下,从培养 15 d 到 30 d,铵态氮在姜堰土壤中迁移距离由 9 cm 变为 10 cm,增加了 1 cm。在 420 g/kg 土壤含水量条件下,培养 15 d 时,土壤中铵态氮的迁移距离为 12 cm,比在 300 g/kg 土壤含水量条件下迁移的距离多 3 cm;培养 30 d 时,铵态氮迁移距离超过 14 cm。在 300 g/kg 土壤含水量条件下,培养 15 d 时,姜堰土壤中硝态氮平均总量为 121.9 mg。此时,硝态氮含量在距离施肥点 6 cm 处达到最大,该位置硝态氮平均含量为 425 mg/kg;培养 30 d 时,土壤中硝态氮平均总量为 210 mg,且在距离施肥点 7 cm 处硝态氮含量达到最大,平均含量为 567.8 mg/kg。在 420 g/kg 土壤含水量条件下,培养 15 d 时,土壤中硝态氮平均总量为 10 mg,在距离施肥点 6 cm 处含量达到最大,此处平均含量为 53 mg/kg;培养 30 d 时,土壤中硝态氮平均总量为 99 mg,在距离施肥点 8 cm 处含量达到最大,平均含量为 215 mg/kg。由此可知,随着土壤含水量增加和时间的延长,铵态氮在姜堰土壤中的迁移距离增加,而土壤中硝态氮总量随着时间的延长和土壤含水

量的减少而增加。

广德土壤中氮的迁移趋势与姜堰土壤中相似。从图 2 中可以看出,在 300 g/kg 土壤含水量条件下,广德土壤中铵态氮在培养 15 d 时,迁移距离为 11 cm;而到培养 30 d 时,铵态氮迁移距离超过 14 cm,比 15 d 时增加 3 cm 以上。在 420 g/kg 土壤含水量条件下,培养 15 d 和 30 d 时铵态氮的迁移距离都超过 14 cm;30 d 时,距离施肥点 14 cm 处的铵态氮平均含量达到 142.8 mg/kg,而 15 d 时,该位置的铵态氮平均含量为 52.3 mg/kg。在 300 g/kg 土壤含水量条件下,培养 15 d 时,广德土壤中硝态氮平均总量为 23 mg;此时在距离施肥点 9 cm 处硝态氮含量达到最大,平均含量为 67 mg/kg;培养 30 d 时,土壤中硝态氮平均总量为 57 mg,且在距离施肥点 9 cm 处硝态氮含量达到最大,平均含量为 199 mg/kg。在 420 g/kg 土壤含水量条件下,土壤中硝态氮总量极低,培养 15 d 和 30 d 时平均仅有 3 mg 左右。相同条件下,广德土壤中硝态氮含量比姜堰土壤中硝态氮含量低。

对比图 1 和图 2 可以发现,在 300 g/kg 土壤水分条件下培养 15 d 时,广德和姜堰两种土壤中距离施肥点 4 cm 内铵态氮含量差异不显著。在距离施肥点 4 cm 以外,姜堰土壤中铵态氮含量相对于广德土壤中的铵态氮含量显著降低。两种土壤中硝态氮含量随着离施肥点距离的增加呈现先上升后下降的趋势,且随着时间的增加硝态氮含量不断增加。

2.2 不同土壤含水量条件下磷在不同土壤中的迁移规律

磷在土壤中迁移能力较弱。由图 3 可知,在 300 g/kg 土壤含水量条件下,培养 15 d 和 30 d 时,速效磷在姜堰土壤中的迁移距离都只达到了 4 cm;与 15 d 时相比,30 d 时速效磷迁移的距离没有增加,但是在距离施肥点 4 cm 内各位置上的速效磷含量有差异。随着时间的增加,距离施肥点 4 cm 处的速效磷含量显著增加,培养 15 d 时,距离施肥点 4 cm 处速效磷平均含量为 43 mg/kg,30 d 时达到 177 mg/kg。培养 15 d 时土壤中速效磷平均总量为 146 mg,30 d 时为 181.8 mg。在 420 g/kg 土壤含水量条件下,培养 15 d 时土壤中速效磷的迁移距离达到了 6 cm;培养 30 d 时相对 15 d 时,速效磷的迁移的距离没有变化。培养 15 d 时土壤中速效磷平均总量为 182 mg,30 d 时为 210 mg。

在广德土壤中,速效磷有着不同于在姜堰土壤中的变化。由图 4 可知,在 300 g/kg 土壤含水量条件下,

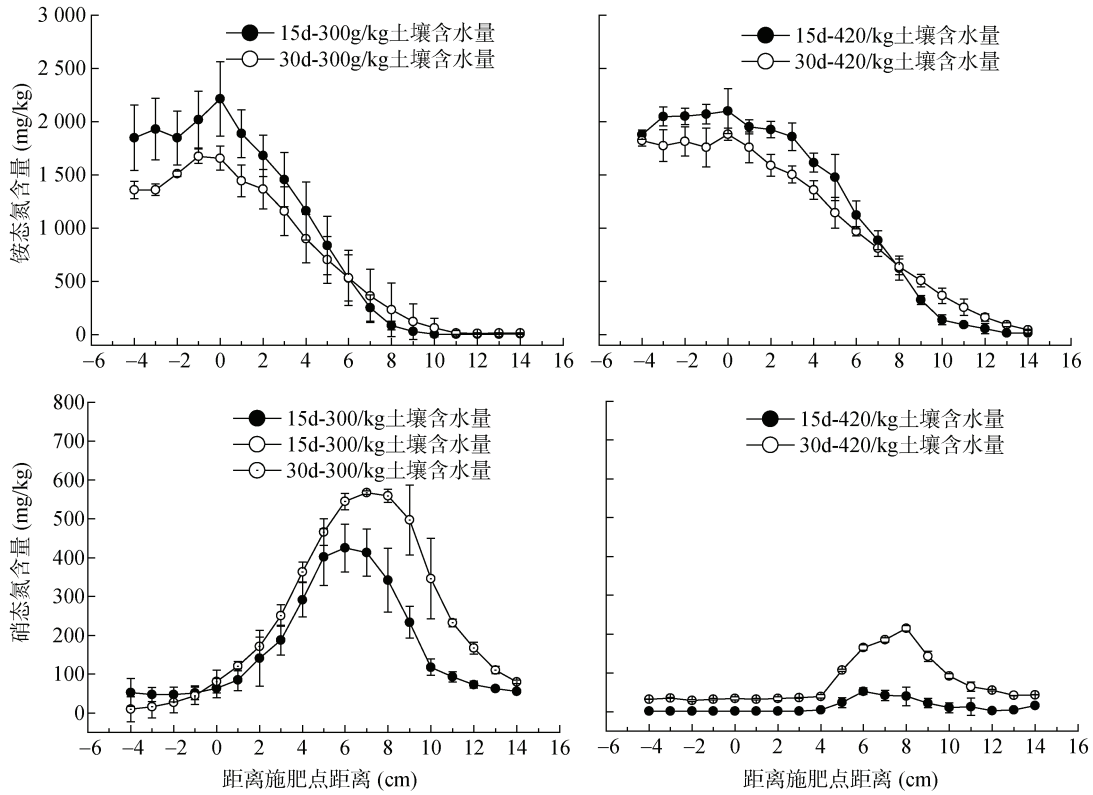


图 1 不同土壤含水量条件下氮在姜堰土壤中的迁移和含量变化

Fig 1 Nitrogen movement and concentration changes in Jiangyan soil under different soil water content

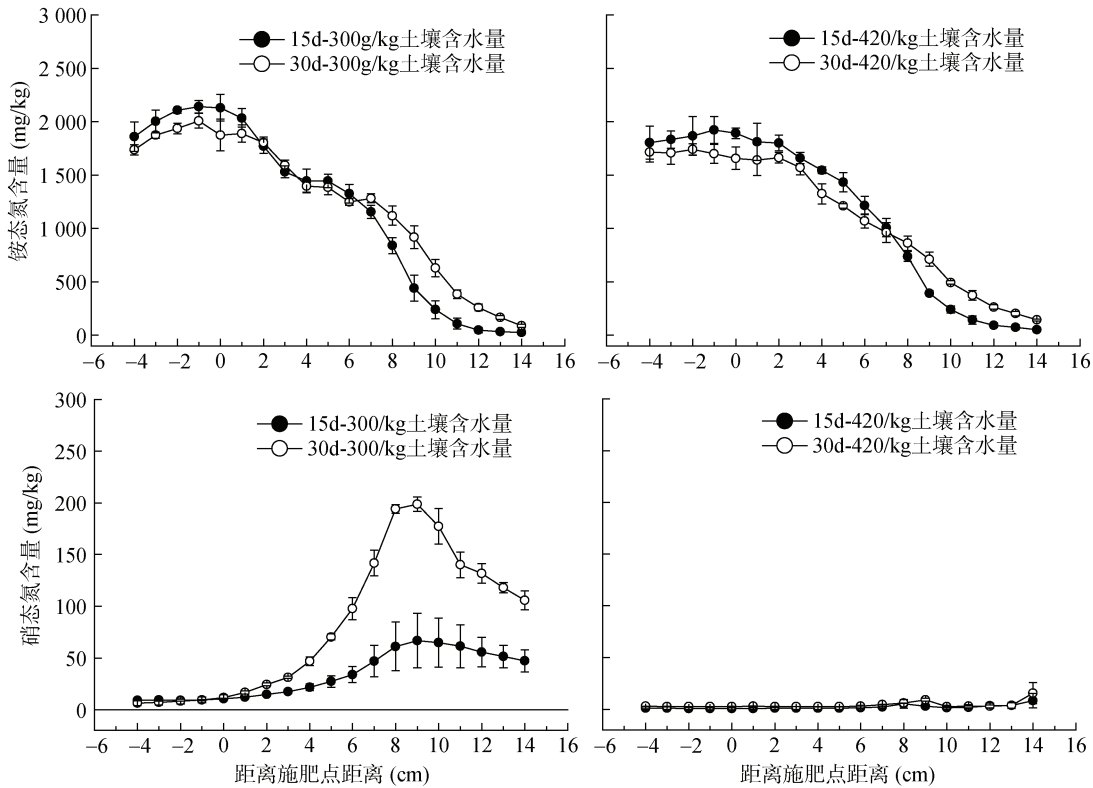


图 2 不同土壤含水量条件下氮在广德土壤中的迁移和含量变化

Fig. 2 Nitrogen movement and concentration changes in Guangde soil under different soil water content

培养 15 d 和 30 d 时速效磷迁移距离都为 4 cm；培养 15 d 时土壤壤中速效磷平均总量为 202 mg，30 d 时平均总量为 194 mg；培养 15 d 时，距离施肥点 4 cm 处速效磷平均含量为 71 mg/kg，30 d 时达到 237 mg/kg。而在 420 g/kg 土壤含水量条件下，培养 15 d 和 30 d 时速效磷在土壤中的迁移距离为 5 cm；培养 15 d 时土壤中速效磷平均总量为 122 mg，30 d

时为 104 mg。两种土壤含水量条件下速效磷总量差异显著。在姜堰土壤中速效磷总量随着土壤含水量的增加而增加，而在广德土壤中速效磷总量随着水分含量的增加而减少。在 300 g/kg 土壤含水量条件下，姜堰土壤速效磷总量要低于广德土壤；在 420 g/kg 土壤含水量条件下，姜堰土壤速效磷总量高于广德土壤。

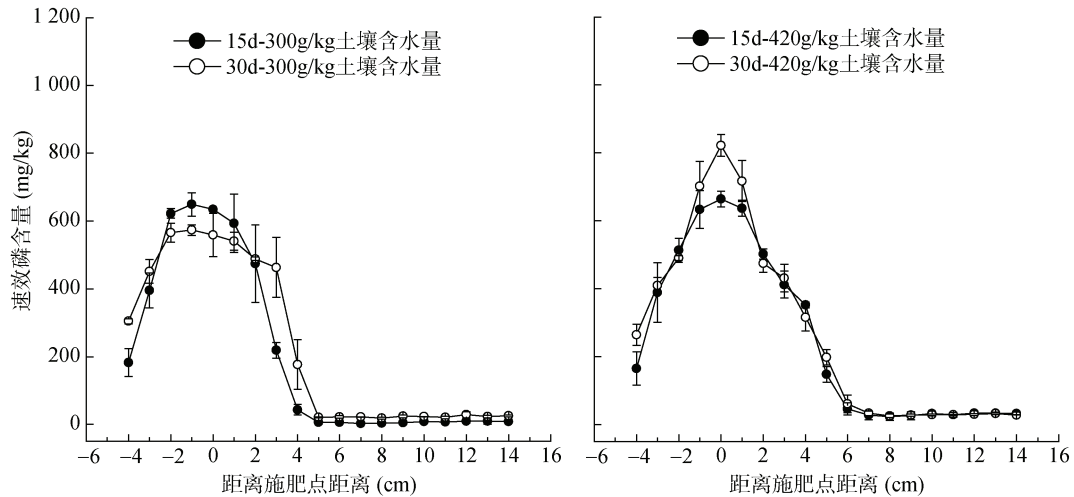


图 3 不同土壤含水量条件下速效磷在姜堰土壤中的迁移和含量变化

Fig. 3 Available phosphorous movement and concentration changes in Jiangyan soil under different soil water content

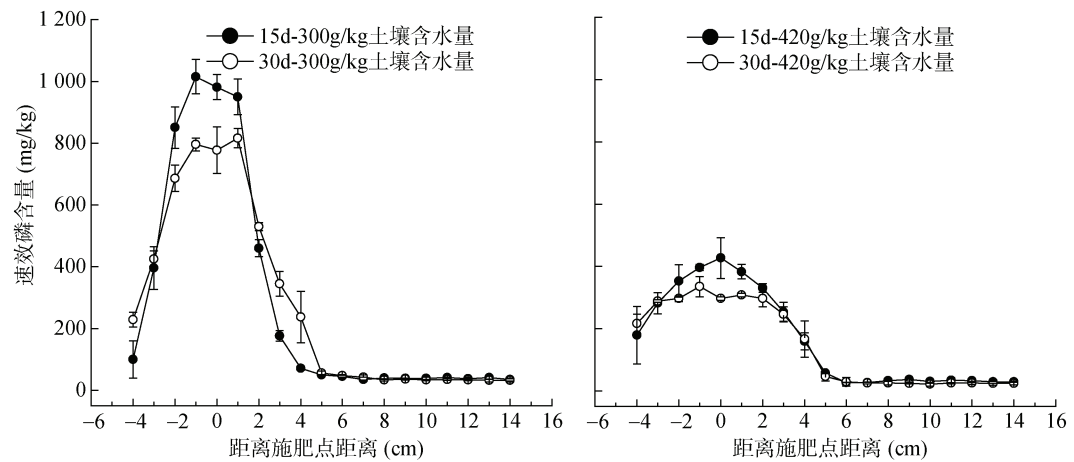


图 4 不同土壤含水量条件下速效磷在广德土壤中的迁移和含量变化

Fig. 4 Available phosphorous movement and concentration changes in Guangde soil under different soil water content

2.3 不同土壤含水量条件下钾在不同土壤中的迁移规律

速效钾在土壤中迁移受土壤含水量和时间的影 响。由图 5 可知，在 300 g/kg 土壤含水量条件下，姜堰土壤中速效钾的迁移距离随着时间的增加而增加。从培养 15 d 到 30 d 时，土壤中速效钾迁移距离由 10 cm 增加到了 13 cm。在 420 g/kg 土壤含水量条件下，从培养 15 d 到 30 d，土壤中速效钾迁移距离由 11 cm 增加到了 14 cm 以上。培养 15 d 时，不同土壤含水

量条件下，姜堰土壤中速效钾的迁移距离相差 1 cm。施肥点附近速效钾含量随着时间的增加而减少；距离施肥点 4 cm 以外的各位置上速效钾含量随着时间的增加而增加。

从图 6 可以看出，在 300 g/kg 土壤含水量条件下，广德土壤速效钾的迁移距离随着时间的增加也在增加；从培养 15 d 到 30 d，土壤中速效钾迁移距离从 9 cm 增加到 12 cm。而在 420 g/kg 土壤含水量条件下，从培养 15 d 到 30 d，土壤中速效钾迁移距离

由 11 cm 增加到了 14 cm 以上。培养 15 d 时, 不同土壤含水量条件下土壤中速效钾的迁移距离相差 2 cm。

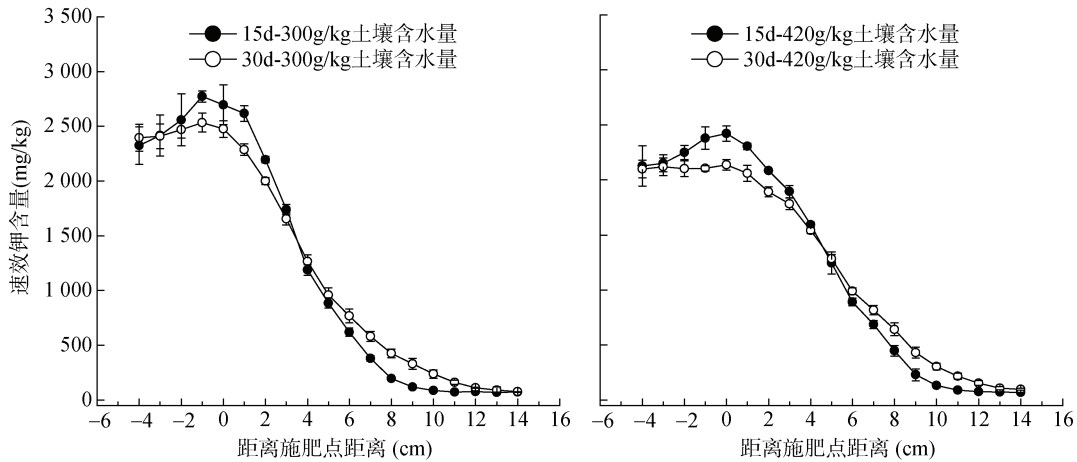


图 5 不同土壤含水量条件下速效钾在姜堰土壤中的迁移和含量变化

Fig. 5 Available potassium movement and concentration changes in Jiangyan soil under different soil water content

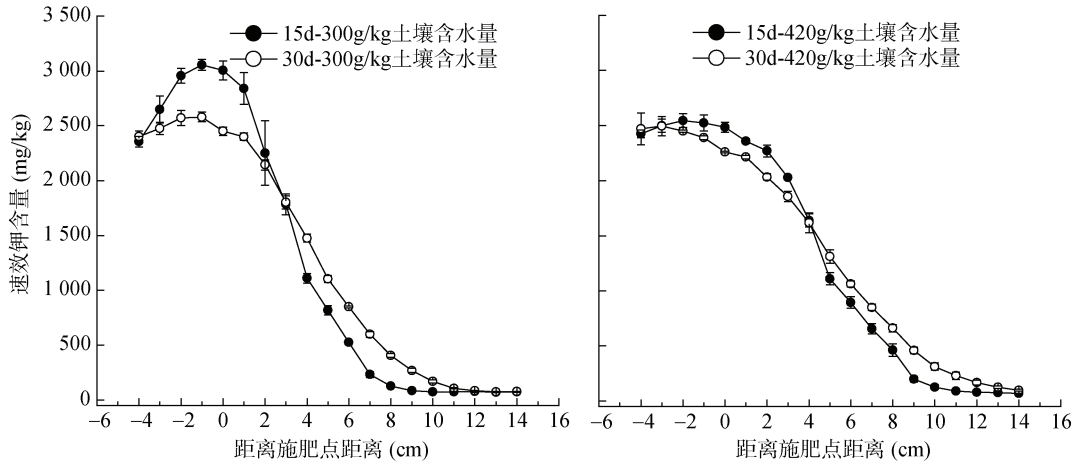


图 6 不同土壤含水量条件下速效钾在广德土壤中的迁移和含量变化

Fig. 6 Available potassium movement and concentration changes in Guangle soil under different soil water content

3 讨论

穴施条件下铵态氮的横向迁移主要受土壤含水量和时间影响, 随着时间的延长和土壤含水量的增加, 铵态氮横向迁移距离也在增加。研究表明 pH 越低, 土壤含水量越高, 硝化作用越弱^[12-14]。广德土壤中硝态氮总量显著低于姜堰土壤中硝态氮总量, 这主要是因为广德土壤 pH 较低, 因此硝化作用弱。土壤含水量越大, 土壤中氧气含量越低, 因此 420 g/kg 土壤含水量处理的硝态氮总量显著低于 300 g/kg 土壤含水量处理。铵态氮转化为硝态氮后, 硝态氮会发生横向迁移且迁移速度比铵态氮快, 因而增加了氮的迁移距离。距离施肥点越近, 硝态氮含量越低, 这主要是因为肥际高浓度养分和盐分抑制了硝化作用, 这

可见, 速效钾在这两种土壤中的迁移趋势相同, 姜堰土壤中钾在相同条件下有着更远的迁移潜力。

与邹高龙^[15]和张先富^[16]的研究结果一致。在距离施肥点 4 cm 内, 两种土壤中的硝化作用均十分低。肥际微域不同于周围土体的理化性质使得该位置附近的氮长时间以铵态氮的形式存在。铵态氮在土壤中比硝态氮更容易被固定, 从而不易随水流失, 因此在施肥点附近的高氮浓度能够持续较长时间, 这解释了为什么根区一次穴施条件下氮肥能够供应较长时间。

穴施条件下磷的横向迁移距离很短。培养 15 d 和 30 d 时, 在 300 g/kg 土壤含水量条件下两种土壤中磷的迁移距离只有 4 cm。因为磷容易被土壤中的钙铁离子所固定, 所以磷在土壤中的迁移需要更大的能量来克服土壤的阻力^[17]。磷的迁移距离受时间和供试土壤类型影响较小, 受土壤含水量影响大。在 420 g/kg 的土壤含水量条件下, 两种土壤中磷的迁移

距离比 300 g/kg 土壤含水量条件下增加 1~2 cm。研究表明聚磷酸盐的水解速率与土壤 pH 和含水量有关, pH 越低、含水量越大聚磷酸盐水解速率越快^[18-19]。聚磷酸铵作为一种新型磷肥,在 300 g/kg 土壤含水量的广德土壤中分解为正磷酸盐的速率比在姜堰土壤中快。因此培养 15 d 时,广德土壤中的速效磷总量要比姜堰土壤中速效磷总量多 30% 左右。在 420 g/kg 土壤含水量条件下,姜堰土壤中速效磷总量比广德土壤中多,这主要是因为低 pH 和淹水条件促进了聚磷酸盐的水解。广德土壤中的聚磷酸铵在培养前 15 天之内就已完全水解,从而导致更多的磷被土壤固定和转化。姜堰土壤中的聚磷酸铵在 420 g/kg 土壤含水量条件下促进了水解。由于姜堰土壤 pH 较高,聚磷酸铵水解速率比在广德土壤中慢,尚未被土壤充分固定,因此姜堰土壤中速效磷总量仍然保持在较高水平。

穴施条件下钾的迁移距离比磷的迁移距离远。仅在培养 15 d 时,土壤含水量为 300 g/kg 的姜堰土壤中钾迁移距离比铵态氮远,其余条件下钾的迁移距离要比铵态氮短。在供试两种土壤中,钾的横向迁移距离随时间的延长和土壤含水量的增加而增加。

因此,在穴施复合肥时,要考虑土壤含水量、土壤类型,以及不同养分的迁移距离和作物需求来决定施肥位置。除此之外,养分配比、肥料品种等因素综合作用下养分迁移转化规律仍需进一步探究。

4 结论

1) 复合肥穴施条件下,各养分在土壤中迁移距离:硝态氮>铵态氮>速效钾>速效磷。在姜堰和广德土壤中,随着土壤含水量从 300 g/kg 增加到 420 g/kg,氮、磷、钾在土壤中的迁移距离都会显著增加。铵态氮和速效磷的迁移距离平均增加了 1/3,而速效钾的迁移距离增加了 1~2 cm。从培养 15 d 到 30 d,硝态氮、铵态氮和速效钾在土壤中随着时间的增加迁移距离增加,但速效磷迁移距离随时间增加无显著变化。

2) 在供试两种土壤中,土壤的养分含量、含水量和 pH 对铵态氮转化起至关重要的作用。在培养 15 d、300 g/kg 含水量条件下,对比姜堰和广德土壤中铵态氮和硝态氮含量可知,姜堰土壤中施肥点 4 cm 内的铵态氮含量与广德土壤中差异不大,几乎没有发生转化;4 cm 以外,随着距离施肥点越远,在姜堰土壤中硝态氮含量出现先增加后降低的趋势。速效磷与速效钾在施肥点 4 cm 内养分含量也很高,为抑制硝化作用做出贡献。正是由于氮磷钾的复合作用,提高了肥际的离子浓度,抑制了硝化作用的产生,从而使肥

际铵态氮含量能够持续存在较长时间,为根区一次施肥提供了可能性。

参考文献:

- [1] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [2] 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.
- [3] 杨艳明. 机插侧深施肥对寒地水稻产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [4] 李子建, 马德仲. 应用侧深施肥技术实现水稻绿色安全生产的调查分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 48-51.
- [5] Savant N K, de Datta S K. Movement and distribution of ammonium-N following deep placement of urea in a wetland rice soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(3): 559-565.
- [6] 姜超强, 王火焰, 卢殿君, 等. 一次性根区穴施尿素提高夏玉米产量和养分吸收利用效率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 146-153.
- [7] 刘晓伟, 陈小琴, 王火焰, 等. 根区一次施氮提高水稻氮肥利用效率的效果和原理[J]. 土壤, 2017, 49(5): 868-875.
- [8] 刘晓伟, 王火焰, 朱德进, 等. 氮肥施用方式对水稻产量以及氮、磷、钾养分吸收利用的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(2): 203-210.
- [9] 谈峰. 基于模型的小麦根系可视化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [10] 李春顺. 高铵胁迫对小麦幼苗生长的影响及其生理基础[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [11] 程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 507-515.
- [12] 曹彦强, 闫小娟, 罗红燕, 等. 不同酸碱性紫色土硝化活性及微生物群落组成[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 194-202.
- [13] 王智慧. 不同 pH 紫色土中硝化作用及硝化微生物宏基因组研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [14] 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅. 稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4275-4283.
- [15] 邹高龙. 盐度变化对含氮氨废水处理的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [16] 张先富. 苏打盐碱土对氮转化影响实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [17] 徐明岗, 张一平, 孙本华. 土壤磷扩散规律及其能量特征的研究. III. 土壤磷扩散的动力学及能量特征[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 3-5.
- [18] McBeath T M, Lombi E, McLaughlin M J, et al. Polyphosphate-fertilizer solution stability with time, temperature, and pH[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 170(3): 387-391.
- [19] 王蕾, 邓兰生, 涂攀峰, 等. 聚磷酸铵水解因素研究进展及在肥料中的应用[J]. 磷肥与复肥, 2015, 30(4): 25-27.