

施氮对小麦根-土界面磷迁移及根际磷素 组分变化特征的影响*

张富仓 康绍忠 李志军

(西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西杨凌 712100)

EFFECT OF APPLICATION OF NITROGEN FERTILIZER ON PHOSPHORUS TRANSLOCATION AND CHANGES OF INORGANIC PHOSPHORUS FRACTIONS AT SOIL-ROOT INTERFACE OF WHEAT

Zhang Fuchang Kang Shaozhong Li Zhijun

(Key Lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid Areas, Northwest
Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

关键词 铵态氮肥, 硝态氮肥, 小麦, 根际, 土壤磷组分

中图分类号 S158.3

植物根系养分吸收性能与土壤养分、水分、pH 值和温度等环境条件有着密切的关系, 同时又影响着近根微区(根际)土壤中养分的迁移和有效性。土壤中磷素在土壤中的迁移和吸收直接与土壤性质有关。在石灰性土壤中, 由于土壤中存在大量的碳酸钙和粘粒矿物, 土壤的 pH 较高, 土壤中磷的化学有效性较低^[1, 2]。因此, 通过降低石灰性土壤的 pH 值以提高土壤中磷的生物有效性是研究者普遍关注的问题。近些年来, 研究者发现施氮肥对土壤根际的 pH 值有较大影响。用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理的根际土壤 pH 值为 4.8, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 处理的根际 pH 为 7.1^[3]。土壤中施用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 肥料, 黑麦草的根-土界面磷耗竭程度加大, 提高了植物对土壤磷的利用效率^[4]; 禾本科作物对施用的氮素形态特别敏感, 其土壤 pH 的变化程度较其它植物大^[5]。对于施磷对植物根际磷的各种化学组分的动态研究表明^[6], 在正常供磷水平下, 油菜根际范围内 Olsen-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 均处于亏缺状态, 表明这两种磷是油菜吸收的主要给源; 而在土壤磷极度缺乏条件下, 根际 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 呈现亏缺状态。对于施用不同氮素形态对植物根际磷的各种化学组分动态的研究, 国内外至今报道的很少。本文在国内外学者研究的基础上, 对黄土区土施用不同氮素形态的肥料及用量对小麦根-土界面 pH 和不同化学组分的磷素的动态进行了定量研究, 探讨施氮对土壤磷素的迁移和吸收与生物有效性的作用。

1 试验材料和研究方法

供试作物为半冬性小麦, 品种为小燕 22。供试土壤为采自西北农林科技大学灌溉试验站的土耕层(0~20 cm)土壤, 肥力中等, 土壤 pH 值为 8.06, 土壤有机质含量为 11.8 g kg^{-1} , 全氮和全磷含量分别为 0.98 g kg^{-1} 和 1.34 g kg^{-1} , 速效磷(P)为 17.8 mg kg^{-1} 。

试验采用自制的根际盒。根际盒由上下两部分组成, 每个部分分别是直径 7.7 cm、高度 3 cm 的聚氯乙烯管, 组成上下室。上下室的底部分别用 50 μm 的尼龙筛网隔开(可以通过水和养分, 根系和土粒不能通过)。将根际盒的上下室分别装入试验处理的土壤, 在上室播种 10 粒小麦种子, 由于小麦根系的

* 国家杰出青年基金资助项目(49725102)的部分内容

收稿日期: 2002-02-26 收到修改稿日期: 2002-05-14

生长,将在上下室之间形成根土界面区。将根际盒放在装有细砂的大型容器中,容器的底部用通水管与马氏瓶相连,其根际盒的土壤水分条件由定水位的马氏瓶供给大容器的细砂,再由根际盒的下室土壤通过毛管作用将水分吸入输入到根际盒的上室供给小麦生长所需的水分。

将试验的土风干,过2 mm筛,土壤中加入 K_2HPO_4 肥料($P\ 100\ mg\ kg^{-1}$)作为底肥,土壤设定3种施氮处理,即无氮(N_0)、铵态氮肥和硝态氮肥。铵态氮肥用 $(NH_4)_2SO_4$,设两个施氮水平,分别为 $N\ 100$ 和 $300\ mg\ kg^{-1}$;硝态氮肥用 $Ca(NO_3)_2$,同样设定为 $N\ 100$ 和 $300\ mg\ kg^{-1}$ 两个水平。为了防止在试验的过程中铵态氮肥通过硝化作用转化为硝态氮肥,在试验的土壤中加入硫脲作为硝化抑制剂,加入的量为 $15\ mg\ kg^{-1}$ 土。按试验处理将所需的土壤和肥料及硝化抑制剂分别称好,与土壤充分混合,按容重为 $1.3\ g\ cm^{-3}$ 均匀装入根际盒的上下两个土环中,试验处理各重复3次。

整个试验装置放在植物生长箱中(加拿大康维伦公司,E8H型),生长箱温度控制为 $20^\circ C$ 。当小麦生长到20 d,将根际盒取出,采集地上部(生物学产量)和地下部(根系)试样(冲洗法)。将试样在 $60^\circ C$ 的烘箱中烘干,称重磨细,用凯氏定氮法测定植株全氮,用湿灰化法消解,测定植株全磷含量(地上部和根系)。将根际盒的下部土环取出,自上而下用冰冻切片法采取取小麦根不同距离的土样,将不同距离的土样风干,全部通过1 mm筛,用pH计(BECKMAN PH-10型)测定土壤的pH值($W_{水}:W_{土}=2.5:1$)。同时取过1 mm的剩余土样,研磨过0.25 mm筛,用石灰性土壤无机磷分组方法测定土壤中 Ca_2-P 、 Ca_5-P 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$ 、 $O-P$ 和 $Ca_{10}-P$ 的含量^[10]。

2 结果与分析

2.1 不同处理小麦的生长状况与氮磷吸收量

表1为不同氮肥处理条件下,小麦株高、地上部和地下部干重、植株全氮和全磷量。由表1可见,对于不同氮肥处理,小麦的株高没有明显的差异,说明在小麦的生长初期(20d),种子和土壤养分能满足小麦生长的需要。从不同处理的生物学产量看,随着 NH_4^+-N 肥料施用量的增加,小麦的生物学产量有较为明显的增加,施用 $NO_3^- -N$ 肥料也产生同样的趋势;两种氮肥比较,施用 NH_4^+-N 肥料增加的幅度要大一些。小麦根系干重的变化与生物学产量的变化趋势基本接近。小麦植株的全氮量随着施氮量(NH_4^+-N 肥或 $NO_3^- -N$ 肥)的增加明显增加,两种形态氮肥品种比较, NH_4^+-N 较 $NO_3^- -N$ 肥料增加的要多一些。随着施用铵态氮肥料量的增加,小麦植株的全磷含量也有较为明显的增加;但与不施氮比较,施用 $NO_3^- -N$ 肥料,植株全磷含量增加的不显著。

2.2 施用氮肥对土壤pH的影响

图1为不同氮肥形态和氮肥施用水平处理条件下小麦根-土界面pH的变化特征。由图1可以看出,氮肥形态和氮肥施用水平对小麦根-土界面的pH的影响较大,不施氮肥处理,随着离根距离的减小,根-土界面的pH值略有下降(与原土比较),大约下降0.2个单位。土壤中施用 NH_4^+-N 肥,土壤pH值比原土和不施氮处理都有明显的降低,且随着氮肥用量的增加,根-土界面土壤的pH值降低的幅度也较大。施用 $N\ 100$ 和 $300\ mg\ kg^{-1}$ 的 NH_4^+-N 肥,

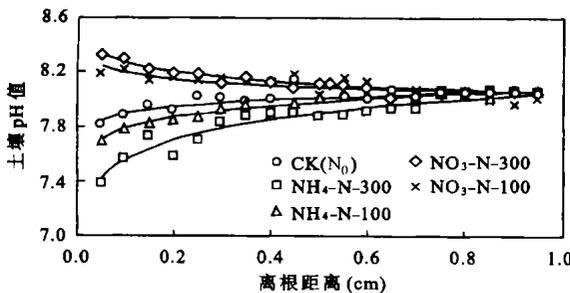


图1 不同氮肥形态和水平下小麦根-土界面pH的变化

根-土界面土壤pH的最大降幅分别为0.36和0.65个单位,并且根-土界面土壤pH的变化范围也随之扩大。相反当土壤中施用 $NO_3^- -N$ 肥,土壤pH值比原土和不施氮处理都有明显的提高,且随着氮肥用量的增加,根-土界面土壤的pH值提高的幅度也增加,但增加的范围不大。施用 $N\ 100$ 和 $300\ mg\ kg^{-1}$ 的 $NO_3^- -N$ 肥,根-土界面土壤pH的最大增幅分别为0.12和0.27个单位,并且根-土界面土壤pH的变化范围也随之扩大。以上结果表明,土壤中施用一定数量的 NH_4^+-N 肥料,与不施肥和施用 $NO_3^- -N$ 肥料比较,能明显地降低根-土界面土壤的pH值,因此它能明显地活化根-土界面一定范围内土壤磷,使界面上的土壤磷向根系迁移,被小麦吸收,从而增加了小麦的吸磷量(表1)。

表 1 不同处理对小麦生长与氮磷吸收量的影响

氮肥形态和水平 (mg kg^{-1})	株高 (m)	生物学产量 (g 盒^{-1})	根系干重 (g 盒^{-1})	植株全氮量 (g kg^{-1})	植株全磷量 (g kg^{-1})
N_0 (不施氮)	11. 6a	0. 174a	0. 083a	8. 6a	4. 8a
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (100)	12. 1a	0. 182b	0. 093b	11. 1b	5. 7b
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (300)	12. 3a	0. 196c	0. 104c	13. 6c	6. 4c
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (100)	12. 4a	0. 179b	0. 089b	10. 6b	5. 1a
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (300)	12. 5a	0. 187b	0. 095b	12. 2b	5. 6b

注: 字母 a、b 和 c 表示统计检验显著性达 5% ($p < 0.05$)

2.3 施氮对小麦根-土界面无机磷组分动态分布的影响

采用石灰性土壤无机磷分组方法^[7]对小麦生长收获后根-土界面各土层无机磷组分分布特征进行了测定, 其结果分别如下。

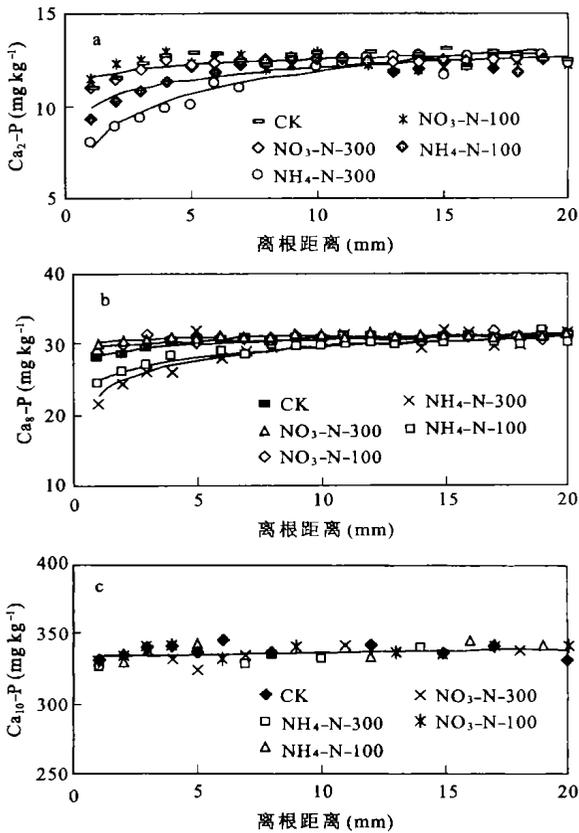


图 2 不同氮肥形态和用量对小麦根际 Ca-P 动态的影响

2.3.1 Ca-P 组分的动态分布特征 石灰性土壤的 Ca-P 中, 可分为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ (磷酸二钙型)、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ (磷酸八钙型) 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (钙灰石型) 三种组分。试验结果表明, Ca-P 在全部无机磷中占绝大多数, 而且呈现 $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 的趋势 (图 2 a, b, c)。

图 2a 为不同氮肥形态和氮肥施用水平下小麦根-土界面 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的变化。由图可见, 不施氮肥小麦根际 1~5 mm 范围内 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 呈亏缺, 在根际 1 mm 处亏缺率达 12%, 说明根系对 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的吸收消耗。土壤中施用铵态氮肥, 小麦根际 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的亏缺率加大, 且随着肥料施用量的增加, 亏缺范围逐步扩大, $\text{NH}_4^+\text{-N}100$

和 $\text{NH}_4^+-\text{N}300$ 的亏缺范围分别为 1~ 8 mm 和 1~ 11 mm, 在根际 1 mm 处, 这两种施肥量的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的亏缺率分别为 25% 和 36%。

石灰性土壤中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是磷肥施入土壤中的初始反应产物, 对大多数作物的有效程度较高。当土壤中施用铵态氮肥后, 作物吸收氮的同时, 向土壤中释放出 H^+ , 使根际土壤酸化, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的溶解度增大, 植物吸收的数量增加。由图 2a 还可看出, 当土壤中施入硝态氮肥料时, 小麦根-土界面 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的分布与不施氮肥相当, 且根际亏缺率稍低于对照, 说明土壤中施用硝态氮肥料对小麦根际 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的耗竭作用不大, 这与某些学者的研究结论较一致^[4]。

$\text{Ca}_8\text{-P}$ 是由 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 逐步转变成的一种较难溶解的无机磷形态。试验结果表明(图 2b), 土壤中施用铵态氮肥对小麦根际 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的亏缺也较大, 在根际 1 mm 处, $\text{NH}_4^+-\text{N} 100$ 和 $\text{NH}_4^+-\text{N} 300$ 施肥量的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的亏缺率分别为 22% 和 31%。其亏缺的程度小于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 。同样, 土壤在不施氮肥和施用硝态氮肥情况下, 小麦根际 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的亏缺较小, 说明此时它们对小麦吸磷的贡献不大。

$\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 是磷肥施入土壤后经长期转化形成的一种难溶性的土壤无机磷形态, 由于它在土壤无机磷中占的数量较大, 因此, 它是作物一种潜在性的磷源。研究结果表明(图 2c), 土壤中不同氮肥处理都没有对小麦根际 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的耗竭产生较为明显的影响, 说明 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 对小麦在任何情况下都无效, 这和较多学者的看法相同^[6]。

2.3.2 Al-P 和 Fe-P 组分的动态分布特征 石灰性土壤的 Al-P 和 Fe-P 是用 $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NH}_4\text{F}$ 溶液浸提出的两种难溶性的土壤无机磷。在土中, 这两种形态的无机磷所占的数量也较大。一些学者认为土壤中除 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 外, Al-P 和 Fe-P 可以看作是二级有效磷源, 说明它们在某些条件下对作物是有效的或部分有效。

试验结果表明(图 3), 土中施入不同形态及不同数量的氮素小麦根际的 Al-P 和 Fe-P 都有不同程度的亏缺。Al-P 和 Fe-P 的亏缺范围分别为 5 mm 和 3 mm。当土壤中施用铵态氮肥, 小麦根际的 Al-P 和 Fe-P 的亏缺程度较大, 对于 Al-P(图 3a), 施入 100 和 300 mg kg^{-1} 的铵态氮肥, 根际 1 mm 土壤 Al-P 的亏缺率分别为 10% 和 15%, 而不施氮的亏缺率仅为 5%。土壤中施用硝态氮肥, 小麦根际 Al-P 的亏缺率小于对照, 说明小麦对土壤中 Al-P 的吸收和利用也与氮肥形态有关; 对于 Fe-P(图 3b), 施用氮肥的效果与 Al-P 有同样的趋势, 只是小麦根际 Fe-P 的亏缺程度和范围要低一些; 施入 100 和 300 mg kg^{-1} 的硝态氮肥, 根际 1 mm 土壤 Fe-P 的亏缺率分别为 7% 和 11%, 而不施氮的亏缺率仅为 3%。施用硝态氮肥, 小麦根际 Fe-P 的亏缺率小于 3%。说明 Al-P 对小麦的有效性大于 Fe-P。

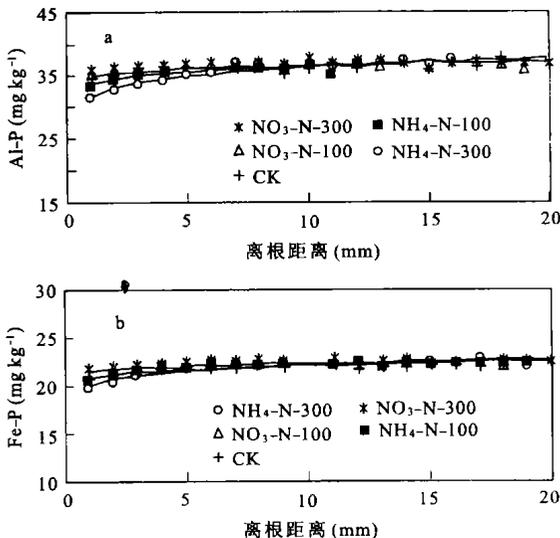


图 3 不同氮肥形态和氮肥用量下小麦根际 Al-P 和 Fe-P 动态

2.3.3 O-P和总磷量的动态分布特征 O-P是土壤中一种难溶性的闭蓄态磷。试验结果表明(图4a), 土壤中不同氮肥处理都没有对小麦根际O-P的耗竭产生较为明显的影响, 说明土壤中的O-P确实是小麦难吸收的一种无机磷。许多学者认为, O-P是水溶性磷肥施入石灰性土壤中经过长期与土壤作用形成的一种难溶性的磷化物, 对于土壤中O-P, 须经过长期的土壤转化才能被作物吸收利用^[8,9]。

土壤中总磷量(各无机磷组分含量之和)(图4b)表现出: 不同的施氮处理, 小麦根际的总磷量自根表向外逐渐增加, 根际总磷量的亏缺范围为0~8 mm, 土壤中施用铵态氮肥, 小麦根际总磷量的亏缺量比不施氮和施用硝态氮增加, 且随施氮量的增加而增加。

从图4b还可看出, 在试验期间, 小麦根际>8 mm的土壤总磷量变化较小, 这一方面说明小麦生长期较短, 吸收利用磷素的范围很小(主要是在小麦根际附近); 另一方面也反映出土壤磷素是很难移动的。土壤中施用硝态氮小麦根际磷的亏缺量较小, 同时也说明了小麦对根际土壤磷的吸收数量较小, 这和表1中土壤施用硝态氮小麦的全磷量低于施用铵态氮小麦的全磷量的结论是一致的。

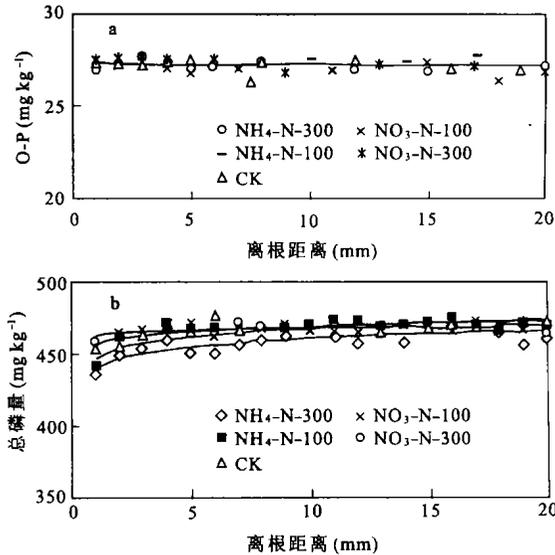


图4 不同氮肥形态和氮肥用量对小麦根际O-P和总磷量动态的影响

参考文献

1. 李庆远, 蒋柏藩, 鲁如坤. 中国矿业的农业利用. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992
2. 顾益初, 李阿荣, 蒋柏藩. 不同磷源在石灰性土壤中的供磷能力. 土壤, 1991, 23(6): 296~301
3. Marschner H, Romheld V. In vivo measurements of root induced pH change at the soil-root interface: Effect of plant species and nitrogen source. Z. Pflanzenphysiol, 1983, 111: 241~251
4. Gahoonia T S, Claassen N, Jungk A. Mobilization of phosphate in different soils supplied with ammonium or nitrate. Plant and Soil, 1992, 140: 241~248
5. 曹一平, 崔建宇. 石灰性土壤中油菜根际磷化学动态及生物有效性. 植物营养与肥料学报, 1994, 1(1): 50~54
6. 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法. 土壤, 1990, 22(2): 101~102
7. 刘文革, 李祖荫. 磷肥在石灰性土壤中的形态转化及施用时间对其肥效的影响. 土壤通报, 1993, 24(4): 154~157
8. 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性. 土壤学报, 1992, 29(1): 80~85