

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19165

氮对磷在潮土中迁移与转化的影响

苏同庆^{1, 2, 3}, 王火焰^{3*}, 周健民³

(1. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西 南宁 530001;
2. 南宁师范大学广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西 南宁 530001; 3. 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, 江苏 南京 210008)

摘要: 通过土柱培养试验对磷肥在潮土中的迁移转化和其受不同氮肥的影响进行了研究。结果表明: 培养 60 d 后, 单施磷酸二氢钙处理 (MCP) 距施肥点 0 ~ 2 mm 土壤 pH 值从 8.29 降至 7.82, 土柱中水溶性磷 (W-P)、Ca₂-P 和 Ca₈-P 分别为 7.4、18.6 和 9.0 mg, 分别占土壤无机磷增量的 13.0%、32.7%、15.8%。配施尿素处理 (MCP+U) 和配施硫酸铵处理 (MCP+AS) 均较 MCP 降低了距施肥点 0 ~ 2 mm 土壤的 pH 值, 提高了 W-P 的迁移距离和 Ca₂-P 与 Ca₈-P 的分布范围。MCP+U 土柱中 W-P、Ca₂-P 分别下降 63.5% (2.7 mg)、65.6% (6.4 mg), Ca₈-P 则提高 176.7% (24.9 mg), 而 MCP+AS 土柱中 W-P、Ca₂-P 分别提高 100% (14.8 mg)、32.3% (24.6 mg), Ca₈-P 则下降 42.2% (5.2 mg)。相比 MCP, MCP+AS 提高了磷肥的速效性, 对于作物养分亏缺时及时供给磷素更为有利; MCP+U 的磷肥速效性有所降低, 对于磷肥供作物中长期利用效果更显著。

关键词: 潮土; 磷; 氮; 迁移; 形态转化

化学肥料集中施入土壤后, 肥料颗粒附近养分浓度远高于整个土体, 其物理、化学和生物学性质与整个土体有显著差异, 该区域对肥料的迁移距离与形态转化影响深远。磷肥移动性差, 施入土壤后大部分被吸附固定, 特别是在石灰性土壤中, 磷酸钙盐的固定作用更为剧烈, 磷肥的有效性进一步降低。

磷肥在土壤中的迁移与形态转化已有部分报道。已有研究表明, 磷的迁移距离和形态转化因磷肥种类^[1-4]、土壤类型、施肥量和培养时间不同而存在显著差异, 土壤对磷吸附固定能力越强, 磷的迁移距离越短^[4-5], 施肥量越大, 磷的迁移距离越长^[6], 培养时间越长, 磷的迁移距离越长^[4-10]。施用磷肥同时配施不同肥料和肥效调节剂, 对磷在土壤中的迁移和形态转化存在显著影响。在石灰性

潮土中施磷同时配施腐植酸钠, 缩短了磷的迁移距离, 降低了施肥点附近水溶性磷和酸溶性磷含量, 而施磷同时配施腐殖酸则显著增加了磷的迁移距离, 施肥点附近不同形态磷的含量均有显著提高^[8]。在水稻土中施磷同时配施草酸, 显著增加了磷的迁移距离, 施肥点附近水溶性磷和有效磷的含量均有显著提高^[4, 7], 同时配以淹水条件, 磷的迁移距离与形态转化又存在明显不同^[7]。在酸性土壤中施磷同时配施石灰, 土壤 pH 值升高, 水溶性磷迁移距离缩短, 施肥点附近浓度降低^[10]。在酸性红壤中施磷同时配施钾肥、铵态氮肥和尿素, 钾肥、铵态氮肥和尿素均未改变磷在红壤中的迁移距离, 但是钾肥和铵态氮肥显著增加了施肥点附近酸溶性磷和有效磷含量^[11], 而尿素则显著降低了施肥点附近酸溶性磷和有效磷的含量^[12]。在中国广大北方地区的石灰性潮土中, 碳酸钙的存在导致磷的有效性进一步降低, 而对不同形态氮肥在潮土中对磷肥的迁移与形态转化的研究尚属空白。

本研究以河北衡水的石灰性潮土为材料, 采用室内土柱培养、切片的方法, 研究潮土中不同形态氮肥对磷肥的迁移与形态转化的影响, 以期揭示磷肥在不同形态氮肥配施时的迁移转化规律, 为中国北方石灰性潮土中氮磷肥的合理配施提供理论指导。

收稿日期: 2019-04-15; 录用日期: 2019-06-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200901); 广西高校中青年教師科研基础能力提升项目 (2019KY0421); 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室 (南宁师范大学) 和广西地表过程与智能模拟重点实验室 (南宁师范大学) 系统基金 (GTEU-KLOP-X1813)。

作者简介: 苏同庆 (1982-), 男, 河北大城人, 助理研究员, 博士, 主要从事土壤肥力、土壤生态研究。E-mail: tqsu2007@163.com。

通讯作者: 王火焰, E-mail: hywang@issas.ac.cn。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为潮土, 采自河北衡水市郊 (37° 44'

N, 115° 47' E) 耕层 (0 ~ 20 cm), 基本理化性质如表 1 所示。土壤风干磨细过 0.84 mm 筛备用。供试肥料为分析纯磷酸二氢钙 (MCP)、尿素 (U) 和硫酸铵 (AS), 磨细备用。

表 1 供试土壤的基本理化性质

pH 值 (H ₂ O, 1:2.5)	阳离子交换量 (cmol · kg ⁻¹)	有机质 (g · kg ⁻¹)	全氮 (g · kg ⁻¹)	全磷 (g · kg ⁻¹)	碳酸钙 (g · kg ⁻¹)	有效磷 (mg · kg ⁻¹)
8.29	17.74	18.4	1.25	0.64	74.5	16.21

1.2 试验设计与培养方法

本研究采用室内土柱培养, 所用容器为内圆外方的蜡筒, 高 160 mm, 内径 50 mm。蜡筒底端用滤纸封口, 均匀装土 435 g, 装土后土柱容重为 1.34 g · cm⁻³。将装好的土柱垂直放置在装有去离子水的石英砂盘上, 通过毛细作用使土柱吸水 12 h 至饱和。将吸水后的土柱移至干石英砂盘上去除重力水 (12 h), 用保鲜膜将整个蜡筒密封以防止水分散失, 垂直放置, 平衡 48 h, 此时土柱含水量为最大田间持水量。本研究设置单施磷酸二氢钙 (MCP)、磷酸二氢钙和尿素共施 (MCP+U) 与磷酸二氢钙和硫酸铵共施 (MCP+AS) 3 个处理, 每个处理重复 3 次, 同时设置不施肥空白对照。磷酸二氢钙用量为 (以 P₂O₅ 计) 0.3 g · kg⁻¹ 土, 尿素和硫酸铵用量均为 (以纯 N 计) 0.3 g · kg⁻¹ 土。所有肥料磨细, 准确称重后, 均匀撒在一块塑料板上 (土柱等直径的圆内), 将水分已平衡好的土柱移至塑料板上, 使肥料和土柱底端土壤紧密结合, 置于 25℃ 恒温培养箱内培养 60 d, 然后用自制的切片机每 2 mm 切片取样, 经风干磨细后用于分析测试, 切片机详细信息参见相关文献 [13]。

1.3 样品测定与数据分析

土样 pH 值的测定: 称取 1.00 g 土样于 10 mL 玻璃瓶中, 加入已去除 CO₂ 的去离子水 2.5 mL, 于往返振荡机上振荡 5 min, 静置 30 min 后, 用 pH 计测定。

不同形态磷的提取过程如下: 称取 0.50 g 土样于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 去离子水, 于往返振荡机上振荡 1 h, 离心取上清液用于水溶性磷 (W-P) 的测定。然后按照顾益初等提出的石灰性土壤无机磷分级方法^[14] 进行提取, 电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-AES, Thermo Elemental) 测定。

本试验中, 土壤样品中磷含量用干基表示, 有

效磷含量为水溶性磷 (W-P) 与磷酸二钙 (Ca₂-P) 含量之和。数据分析采用 SPSS 20.0 统计软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对潮土 pH 值的影响

不同施肥处理均降低了施肥点附近土壤的 pH 值 (图 1)。单施磷酸二氢钙处理施肥点附近 0 ~ 2 mm 土壤 pH 值从 8.29 降至 7.82; 磷酸二氢钙与尿素共施处理 pH 值显著下降至 7.25, 较单施磷酸二氢钙降低 7.3%; 磷酸二氢钙与硫酸铵共施处理 pH 值则显著下降至 6.47, 较单施磷酸二氢钙降低 17.3%。随距施肥点距离的增加, 各施肥处理土壤的 pH 值均呈上升趋势, 直至与不施肥对照持平。单施磷酸二氢钙对土壤 pH 值降低最小, 影响距离最短 (15 mm); 磷酸二氢钙与尿素共施对土壤 pH 值降低较多, 影响距离也是 15 mm; 磷酸二氢钙与硫酸铵共施对土壤 pH 值降低最大, 影响距离最长, 直至 80 mm 仍与不施肥对照处理有显著差异。

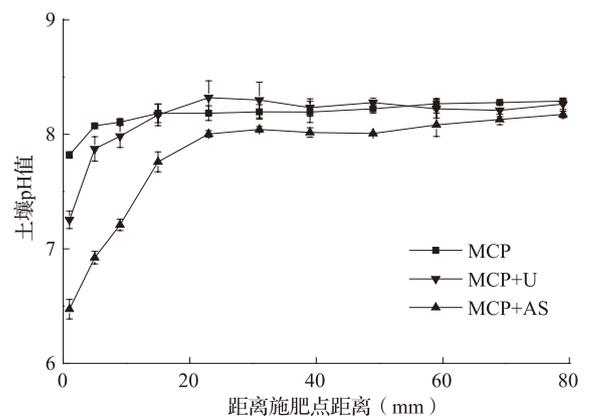


图 1 不同施肥处理对潮土 pH 值的影响

2.2 不同施肥处理对潮土中磷迁移与形态转化的影响

不同施肥处理均提高了施肥点附近土壤的水溶性磷 (W-P)、磷酸二钙 (Ca₂-P)、磷酸八

钙 (Ca₈-P) 和有效磷含量 (图 2)。单施磷酸二氢钙处理施肥点附近 0 ~ 2 mm 土壤 W-P 含量达到了 1 159 mg · kg⁻¹, 与硫酸铵共施处理显著上升至 1 470 mg · kg⁻¹, 较未施硫酸铵时增加 26.9%, 而与尿素共施处理则显著下降到 133 mg · kg⁻¹, 较未施尿素时降低 88.5% (图 2a)。随距施肥点距离的增加, W-P 均呈下降趋势, 共施硫酸铵处理显著高于等距离单施磷酸二氢钙处理, 迁移距离最长 (21 mm), 较单施磷酸二氢钙处理 (15 mm) 增加了 40%, 而共施尿素处理施肥点附近 0 ~ 2 和 2 ~ 4 mm 土壤显著低于, 之后显著高于等距离单施磷酸二氢钙处理, 迁移距离增加 13.3% (17 mm) (图 2a)。

土壤 Ca₂-P 在施肥后也发生了显著变化, 但与 W-P 不尽相同 (图 2b), 单施磷酸二氢钙处理施肥点附近 0 ~ 2 mm 土壤达到 3 122 mg · kg⁻¹, 与硫酸铵共施处理为 2 886 mg · kg⁻¹, 显著性分析表明其和单施磷酸二氢钙差异不显著 (*P*>0.05), 而与尿素共施处理则显著下降至 436 mg · kg⁻¹, 降幅高达 86.0%。随距施肥点距离的增加, 各施肥处理 Ca₂-P 均呈下降趋势, 在 4 mm 之后, Ca₂-P 含量共

施硫酸铵 > 共施尿素 > 单施磷酸二氢钙, 且施肥引起新增 Ca₂-P 分布范围共施硫酸铵 (21 mm) > 共施尿素 (17 mm) > 单施磷酸二氢钙 (15 mm) (图 2b)。

与 W-P、Ca₂-P 不同, 与硫酸铵共施处理施肥点附近 0 ~ 2 mm 土壤 Ca₈-P 含量 386 mg · kg⁻¹, 较单施磷酸二氢钙 (1 642 mg · kg⁻¹) 降低了 76.5%, 而与尿素共施处理则显著上升至 3 757 mg · kg⁻¹, 较单施磷酸二氢钙提高至 2.29 倍 (图 2c)。随距施肥点距离的增加, 各施肥处理的 Ca₈-P 都呈下降趋势, 在 4 mm 之后, Ca₈-P 含量共施尿素处理 > 共施硫酸铵处理 > 单施磷酸二氢钙处理, 且施肥引起新增 Ca₈-P 分布范围共施尿素 (21 mm) = 共施硫酸铵 (21 mm) > 单施磷酸二氢钙 (13 mm), 共施氮肥处理较单施磷肥处理分布范围增加 61.5% (图 2c)。

土壤有效磷指能为当季作物吸收的磷量, W-P 和 Ca₂-P 活性高, 易于被作物吸收利用, 因此将 W-P 和 Ca₂-P 含量之和作为土壤有效磷。有效磷含量在施用不同肥料之后有显著增加。单施磷酸二氢钙处理施肥点附近 0 ~ 2 mm 土壤有效磷含量

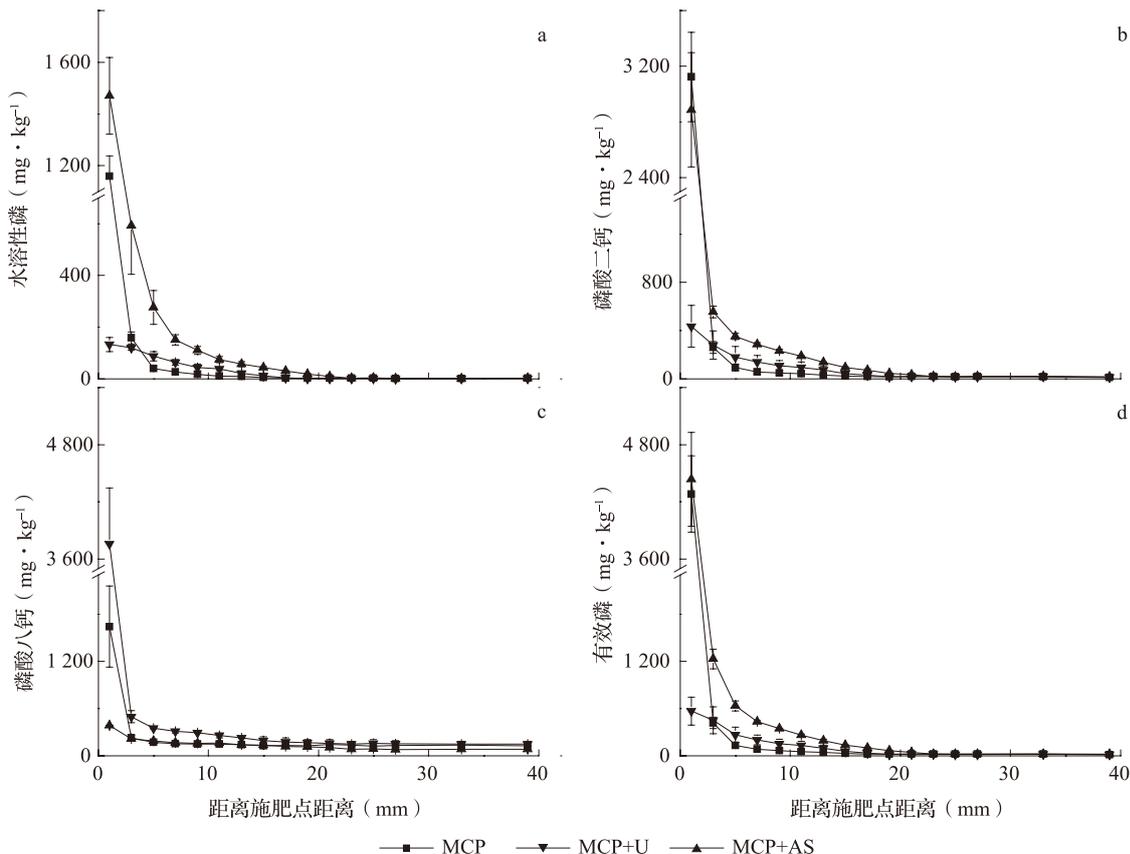


图 2 不同施肥处理对潮土水溶性磷 (W-P)、磷酸二钙 (Ca₂-P)、磷酸八钙 (Ca₈-P) 和有效磷的影响

达到 $4\ 282\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与硫酸铵共施处理为 $4\ 437\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著性分析表明其和单施磷酸二氢钙差异不显著 ($P>0.05$), 而与尿素共施处理则显著下降到 $569\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较未施尿素时降低 86.7% (图 2d)。随距施肥点距离的增加, 有效磷均呈下降趋势, 共施硫酸铵处理显著高于等距离单施磷酸二氢钙处理, 施肥引起新增有效磷分布范围最广 (21 mm), 较单施磷酸二氢钙处理 (15 mm) 增加了 40%, 而共施尿素处理施肥点附近 0 ~ 2 mm 土壤显著低于, 4 ~ 6 mm 土壤及之后显著高于等距离单施磷酸二氢钙处理, 施肥引起新增有效磷分布范围增加 13.3% (17 mm) (图 2d)。

不同施肥处理明显改变了施肥点区域土壤的磷酸铝 (Al-P)、磷酸铁 (Fe-P)、闭蓄态磷 (O-P) 和磷酸十钙 ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) 含量 (图 3), 相比 W-P、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P、Fe-P、O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 变化幅度相对较小。单施磷酸二氢钙处理施肥点附近 0 ~ 2 mm 土壤 Al-P 含量达到 $448\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与硫酸铵共施处理为 $219\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较未施硫酸铵时降低 51.1%, 而与尿素共施处理则显著上升至 $824\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较未施尿素时提高了 83.9% (图 3a)。随

距施肥点距离的增加, 各施肥处理 Al-P 均呈下降趋势, 且施肥引起新增 Al-P 分布范围共施尿素与共施硫酸铵处理均 15 mm, 较单施磷酸二氢钙 (11 mm) 增加了 36.4% (图 3a)。单施磷酸二氢钙处理施肥点附近 0 ~ 2 mm 土壤 Fe-P、O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 分别为 134、271 和 $455\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 共施硫酸铵处理 Fe-P 没有明显变化, 共施尿素处理 Fe-P 降为 $32\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比单施磷酸二氢钙降低了 76.3%, O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 有不同程度的增加, 分别达到 408 和 $651\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比单施磷酸二氢钙分别提高 50.4% 和 43.1% (图 3b, 3c, 3d)。尽管不同施肥处理对施肥点附近 Fe-P、O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量影响较大, 但对其施肥引起增量分布范围没有明显影响, 均只是影响到距离施肥点 0 ~ 2 mm 土壤。

2.3 不同施肥处理对潮土磷存在形态和增加量的影响

土壤无机磷分级测定结果表明, 共施不同氮肥均对磷酸二氢钙转化过程有显著影响, 在距施肥点 0 ~ 2 mm 土壤表现更为突出 (图 4)。单施磷酸二氢钙, 磷主要以 W-P、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 存在, 分别为 1 159、3 123 和 1 642 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别占距施

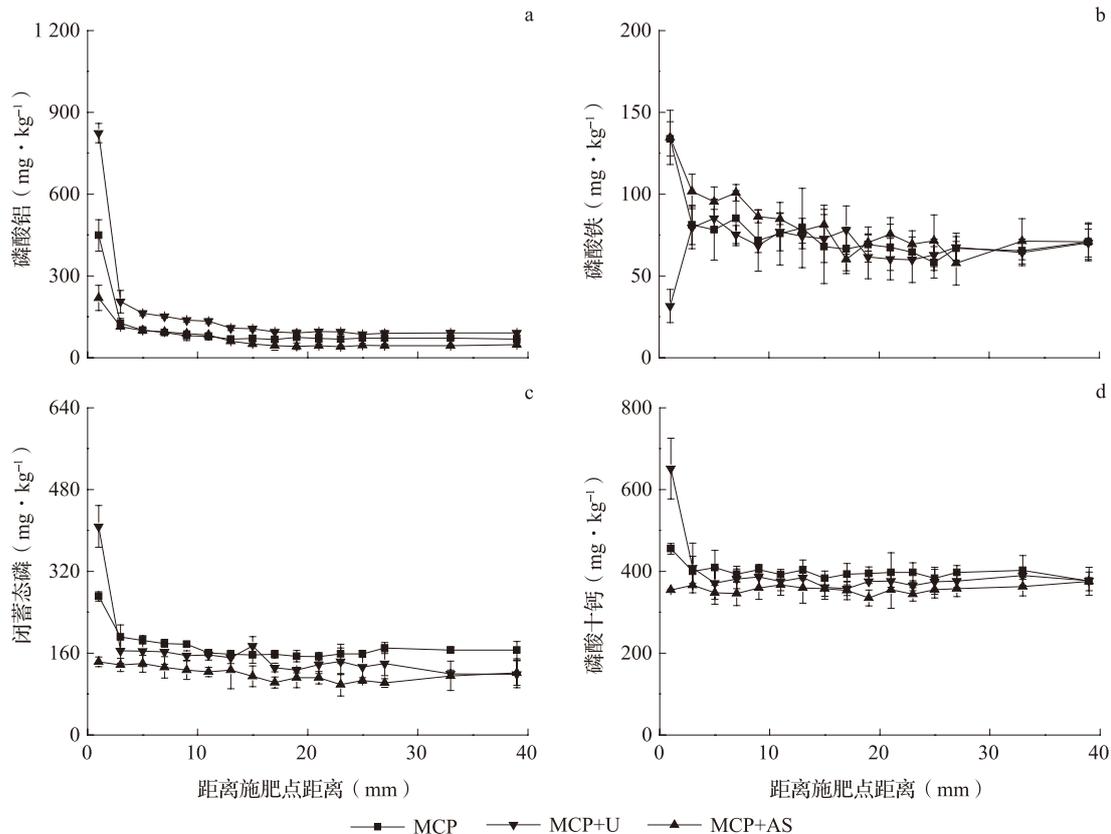


图 3 不同施肥处理对潮土磷酸铝 (Al-P)、磷酸铁 (Fe-P)、闭蓄态磷 (O-P) 和磷酸十钙 ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) 的影响

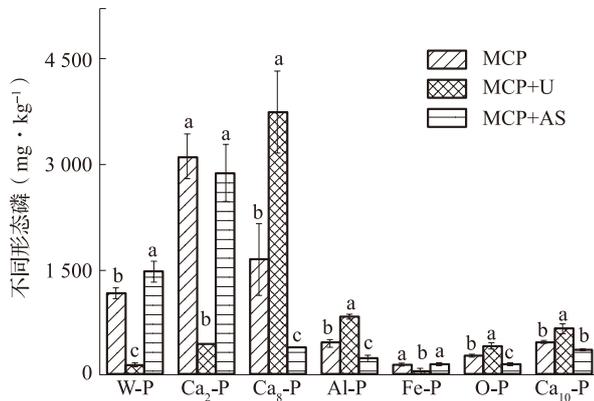


图4 不同施肥处理对潮土距施肥点0~2 mm 土壤不同形态磷的影响

肥点0~2 mm 土壤无机磷总量的16.0%、43.2%和22.7%，三者之和占总量的81.9%。共施硫酸铵处理，磷主要以W-P和Ca₂-P存在，分别为1470和2886 mg·kg⁻¹，两者之和占无机磷总量的77.9%。与单施磷酸二氢钙相比，W-P显著增加，增加量达26.9%，Ca₈-P显著下降，降低量达76.5%。共施尿素处理，磷主要以Ca₈-P和

Al-P存在，分别为3757和824 mg·kg⁻¹，两者之和占无机磷总量的73.4%。与单施磷酸二氢钙相比，W-P和Ca₂-P显著减少，分别达88.5%和86.0%，Ca₈-P和Al-P显著提高，分别提高129%和83.9%。

不同施肥处理均提高了土壤中无机磷总量(表2)，单施磷酸二氢钙、共施尿素和共施硫酸铵处理无机磷增量分别为38.9、42.4和47.2 mg，分别为施磷量的68.2%、74.4%和82.8%，而在W-P、Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P和Ca₁₀-P这7种形态中，3种施肥处理前4种形态磷增量之和分别占施磷量的66.2%、69.9%和82.3%。单施磷酸二氢钙处理，W-P、Ca₂-P、Ca₈-P和Al-P增量分别为7.4、18.6、9.0和2.7 mg，分别占施磷量的13.0%、32.7%、15.8%和4.7%，而共施尿素处理分别为4.8% (2.7 mg)、11.3% (6.4 mg)、43.7% (24.9 mg)和10.1% (5.8 mg)，共施硫酸铵处理分别为25.9% (14.8 mg)、43.1% (24.6 mg)、9.1% (5.2 mg)和4.2% (2.4 mg)。

表2 不同施肥处理下不同形态磷在潮土中的增加量

处理	施磷量 (mg)	增加量 (mg)							总磷量
		W-P	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	
MCP	57.0	7.4 b	18.6 b	9.0 b	2.7 b	0.3 a	0.6 a	0.3 a	38.9 c
MCP+U	57.0	2.7 c	6.4 c	24.9 a	5.8 a	-0.2 a	1.4 a	1.4 a	42.4 b
MCP+AS	57.0	14.8 a	24.6 a	5.2 c	2.4 b	0.3 a	0.0 a	0.0 a	47.2 a

注：同一列中不同字母表示在P<0.05水平下差异显著(LSD)。施磷量和增加量均为每个土柱的量。

2.4 不同施肥处理对潮土水溶性钙、镁的影响

不同施肥处理均提高了土壤水溶性钙(W-Ca)、水溶性镁(W-Mg)含量，同时增加了W-Ca、W-Mg的分布范围。单施磷酸二氢钙处理距施肥点0~2 mm 土壤W-Ca含量为1158 mg·kg⁻¹，与硫酸铵共施处理显著增加至6301 mg·kg⁻¹，较未施硫酸铵时增加了4.4倍，而与尿素共施处理则显著下降到476 mg·kg⁻¹，较未施尿素时降低58.9% (图5a)。随距施肥点距离的增加，各处理的W-Ca均有下降，且共施硫酸铵处理>单施磷酸二氢钙处理>共施尿素处理，影响距离共施硫酸铵处理(15 mm)>共施尿素处理(5 mm)>单施磷酸二氢钙处理(3 mm) (图5a)。对于W-Mg，单施磷酸二氢钙处理距施肥点0~2 mm 含量为108 mg·kg⁻¹，与硫酸

铵共施处理则显著上升至315 mg·kg⁻¹，较未施硫酸铵时增加1.9倍，而与尿素共施处理含量为93 mg·kg⁻¹，和未施尿素时差异不显著(图5b)。随距施肥点距离的增加，各处理中的W-Mg均有下降，但共施硫酸铵处理的含量显著高于等距离其他处理，且分布范围最大，为15 mm，而单施磷酸二氢钙处理和共施尿素处理仅为3 mm。

3 讨论

本试验中，不施肥对照处理土柱内土壤pH值、不同形态磷含量、W-Ca、W-Mg含量均没有显著变化，且与距施肥点远端没有显著差异，此结果与前人研究一致^[2, 15]。

土壤pH值是重要的土壤指标，对养分的吸附、

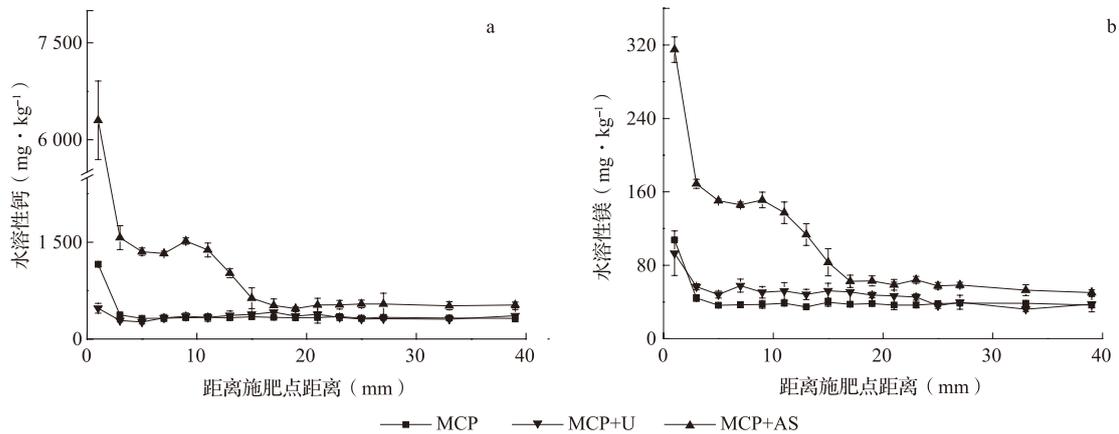


图5 不同施肥处理对潮土水溶性钙 (W-Ca) 和水溶性镁 (W-Mg) 的影响

解吸和形态转化有重大影响。培养 60 d 后, 磷酸二氢钙在石灰性潮土中进行异成分溶解, 使 pH 值显著下降^[2, 16]。共施硫酸铵施肥点附近饱和溶液呈酸性反应, pH 值下降更剧烈^[11-12], 共施尿素 pH 值下降较多, 但相对共施硫酸铵为弱, 原因在于 NH_4^+ 对土壤固相表面 H^+ 的交换作用, 尿素作用较弱是由于尿素水解产生的 NH_3 在碱性土壤中会有部分逸出损失。在酸性红壤中, 磷酸二氢钙与尿素共施土壤 pH 值有所升高^[12], 这主要由于土壤性质、培养时间和尿素水解反应时间不同。

石灰性土壤中, 磷的移动一般不超过 1 ~ 3 cm。本试验中, 单施磷酸二氢钙磷的迁移距离为 15 mm, 共施尿素为 17 mm, 共施硫酸铵为 21 mm, 共施尿素和共施硫酸铵均促进了磷在石灰性潮土中的迁移, 以硫酸铵效果最为显著。前人也有研究证实, 施用磷酸氢二铵肥料磷的迁移距离显著大于施用等量磷酸二氢钙^[1-2], 硫酸铵和氯化铵均对磷的扩散有影响, 而硫酸铵影响最大^[17], 铵态氮和尿素促进了磷在石灰性土壤中的迁移扩散^[18], 说明陪伴离子对肥料磷的迁移有重要影响, 且尿素水解产生 NH_3 , 在碱性环境中会有部分逸出损失, 这是共施尿素磷的迁移距离小于共施硫酸铵的重要因素之一。

土壤无机磷分级测定结果表明, 磷酸二氢钙施入土壤培养 60 d 后, 石灰性潮土中各种形态的无机磷均有增加, 以有效性较高的 W-P、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的增幅较大, 这与前人的研究结果相一致^[2, 19-20]。与不同氮肥共施, 肥料磷转化的不同形态无机磷含量存在显著差异, 特别在施肥点附近区域 (0 ~ 2 mm) 磷转化差异更为显著。共施硫酸铵促进了更多的磷向 W-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的转化, 而共施

尿素则促进了较多的磷向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的转化。原因可能是在石灰性潮土施肥点附近, 磷酸离子浓度很高, 磷的固定不是以吸附为主, 而以沉淀为主。共施尿素降低了施肥点附近区域土壤 pH 值, 但仍为碱性环境, 尿素水解产生的 NH_4^+ 会将土壤胶体表面吸附的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等交换下来同磷酸离子生成沉淀而降低 W-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的含量, 同时提高了 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量。共施硫酸铵使土壤 pH 值降至酸性环境, 尽管产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 更多, 但难与磷酸形成沉淀, 故 W-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量升高, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量降低。

磷肥对作物地上部生物量和产量构成起重要作用, 施肥位置和施肥方式对磷肥的当季利用率影响巨大, 根区施肥^[21]和磷肥深施^[22-23]能够有效提高作物产量和其对磷肥的吸收。江尚焘等^[24-25]的田间微区试验证实, 距作物相同距离施用磷酸氢二铵处理作物较磷酸二氢钙处理有更高的吸磷量, 且差异显著, 这从田间间接证明配施氮肥促进了磷肥的移动, 提高了磷肥的有效性, 从而提高了磷肥的利用率, 这也是本研究在生产实践中的现实意义所在。

4 结论

硫酸铵和尿素与磷酸二氢钙共施, 显著影响了土壤 pH 值、磷的迁移距离和形态转化。单施磷酸二氢钙降低了施肥点附近区域土壤的 pH 值, 不同程度提高了不同形态的无机磷含量, 且在施肥点附近区域 (0 ~ 2 mm) 增加最为显著。配施硫酸铵和尿素均较单施磷肥降低了施肥点附近区域土壤的 pH 值, 以配施硫酸铵降低幅度最大。配施硫酸铵较单施磷肥显著提高了施肥点附近区域土壤的 W-P 含量, 降低了 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量, 促进了磷的迁移,

提高了磷肥的速效性,对于作物养分亏缺时及时供给磷素更为有利。配施尿素提高了施肥点附近区域土壤的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量, W-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量有所降低,磷肥的速效性有所降低,对于磷肥供作物中长期利用效果更显著。

参考文献:

- [1] 金亮,周健民,王火焰,等. 石灰性土壤肥际磷酸二铵的转化与肥料磷的迁移[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(5): 14-18.
- [2] 金亮,周健民,王火焰,等. 石灰性土壤肥际磷酸一钙的转化及肥料磷的迁移[J]. 土壤, 2009, 41(1): 72-78.
- [3] 金亮,周健民,王火焰,等. 石灰性土壤肥际磷酸一铵的转化及其机制探讨[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (6): 5-10.
- [4] 康欧,李廷轩,陈小琴,等. 不同土壤和供肥模式对磷在肥际微域中的迁移和转化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 22-26.
- [5] Benbi D K, Gilkes R J. The movement into soil of P from superphosphate grains and its availability to plants[J]. Fertilizer Research, 1987, 12(1): 21-36.
- [6] 杜振宇,王清华,周健民,等. 磷在潮土肥际微域中的迁移和转化[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 725-730.
- [7] 陈小琴,康欧,周健民,等. 水分与有机酸对水稻土肥际微域磷迁移转化的影响[J]. 土壤, 2013, 45(5): 838-844.
- [8] 杜振宇,王清华,刘方春,等. 腐殖酸物质对磷在褐土中迁移的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (2): 14-17, 50.
- [9] Du Z Y, Zhou J M, Wang H Y, et al. Potassium movement and transformation in an acid soil as affected by phosphorus[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(6): 2057-2064.
- [10] Hao X Y, Cho C M, Racz G J, et al. Chemical retardation of phosphate diffusion in an acid soil as affected by liming[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 64(3): 213-224.
- [11] 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.
- [12] Du Z Y, Zhou J M, Wang H Y, et al. Effect of nitrogen fertilizers on movement and transformation of phosphorus in an acid soil[J]. Pedosphere, 2005, 15(4): 424-431.
- [13] 苏同庆,王火焰,周健民,等. 水稻土肥际微域铵对钾形态转化与迁移的影响[J]. 土壤, 2011, 43(3): 367-373.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] Du Z Y, Zhou J M. A simple procedure to study the movement of fertilizer P in soil microsites[J]. Agrochimica, 2005, 69: 112-117.
- [16] 胡霭堂. 植物营养学(下册)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [17] 凌云霄. 土壤中磷酸离子扩散的研究[J]. 土壤学进展, 1980, (4): 1-8.
- [18] 邹春琴,杨志福. 氮素形态对春小麦根际 pH 与磷素营养状况的影响[J]. 土壤通报, 1994, 25(4): 175-177.
- [19] 吕家珑,刘文革,王旭东,等. 长期施肥对土壤无机磷形态组成的影响[J]. 西北农业大学学报, 1995, 23(3): 51-54.
- [20] 吕家珑,张一平,陶国树,等. 23年肥料定位试验 0-100 cm 土壤剖面中各形态磷之间的关系研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 48-50.
- [21] 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.
- [22] 赵亚丽,杨春收,王群,等. 磷肥施用深度对夏玉米产量和养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4805-4813.
- [23] Gealy D R. Deep phosphorus fertiliser placement and reduced irrigation methods for rice (*Oryza sativa* L.) combine to knock-out competition from its nemesis, barnyard grass (*Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv)[J]. Plant and Soil, 2015, 391: 427-431.
- [24] 江尚焘,王火焰,周健民,等. 磷肥施用方式及类型对冬小麦产量和磷素吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1503-1510.
- [25] 江尚焘,王火焰,周健民,等. 磷肥施用对水稻生长和磷素吸收的影响[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1085-1091.

The effect of nitrogen on phosphorus movement and transformation in fluvo-aquic soil

SU Tong-qing^{1, 2, 3}, WANG Huo-yan^{3*}, ZHOU Jian-min³ (1. Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning Guangxi 530001; 2. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning Guangxi 530001; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu 210008)

Abstract: The movement and transformation of phosphate fertilizer and the effects by different nitrogen fertilizers were studied using the soil column experiment. The results showed that after 60 days incubation, soil pH in the distance of 0 ~ 2 mm close to fertilizer placement in the treatment of monocalcium phosphate (MCP) applied alone decreased from 8.29 to 7.82, and water-soluble phosphorus (W-P), $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ in soil column were 7.4, 18.6, 9.0 mg, accounting for

[下转第 55 页]

Effects of organic fertilizer application on soil C/N ratio and grain yield of spring wheat under whole field soil-plastic mulching and bunch seeding in semiarid area

YIN Jia-de¹, HOU Hui-zhi², ZHANG Xu-cheng^{1, 2*}, MIAO Ping-gui¹, YU Xian-feng², FANG Yan-jie², WANG Hong-li², MA Yi-fan² (1. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070; 2. Institute of Dry-land Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070)

Abstract: The effects of organic fertilizer application on soil carbon, soil nitrogen, and soil C/N of spring wheat under whole field soil-plastic mulching and bunch seeding were studied to provide theoretical guidance on fertilizer management efficiently in semiarid area. The field experiment was conducted in the semiarid area of middle Gansu province from 2016 to 2017, the involved three treatments were whole field soil plastic mulching (PMS), whole field soil plastic mulching and organic fertilization (PMO), non-mulched and bunch seeded (CK). The contents of soil available nitrogen (SAN) and soil organic carbon (SOC), SAN dynamic change and surplus, soil C/N (SOC/SAN), leaf nitrogen content, partial factor productivity, Water use efficiency (WUE) and the yield of spring wheat were recorded and calculated. The results showed that the PMO averagely enhanced SAN content at 0 ~ 50 cm profile by 131.96% and 64.39%, SOC content at 0 ~ 30 cm profile by 50.04% and 44.23% in the whole wheat growth stages respectively, as compared with PMS and CK. PMO significantly increased SAN content by 67.80% and 201.62% at 0 ~ 30 cm profile at the flag leaf stage to flowering stage, the observably surplus of the SAN accumulation at 30 ~ 50 cm profile were recorded in the harvesting stage, as compared with PMS and CK. From the flagging to maturing stage, PMO averagely decreased SOC/SAN by 22.25% at 0 ~ 30 cm profile, and 60.22% at 0 ~ 10 cm profile as compared with PMS and CK, respectively. PMO averagely increased total nitrogen content of flag leaf by 4.44% and 20.21% from heading stage to filling period, increased the partial chemical fertilizer productivity by 5.13% and 58.96%, the WUE by 26.49% and 59.18%, the yield by 5.12% and 59.00% respectively, as compared with PMS and CK. Consequently, the application of organic fertilizer could increase the SAN and SOC content of topsoil, decrease soil C/N ratio, enhance the supplying capacity of soil nitrogen and prolong the longevity of fertilizer, which result in the significant increment of yield and WUE of spring wheat in semiarid area.

Key words: whole field soil-plastic mulching; organic fertilizer; organic carbon; available nitrogen; soil C/N ratio

[上接第 30 页]

13.0%, 32.7%, 15.8% of soil inorganic phosphorus increment, respectively. Compared with MCP, co-application with urea (MCP+U) or ammonium sulfate (MCP+AS) reduced soil pH in the distance of 0 ~ 2 mm close to fertilizer placement, and increased the movement distance of W-P and the distribution of Ca₂-P, Ca₈-P. The W-P, Ca₂-P decreased by 63.5% (2.7 mg), 65.6% (6.4 mg), while Ca₈-P increased by 176.7% (24.9 mg) in MCP+U soil column. However, W-P, Ca₂-P increased by 100% (14.8 mg), 32.3% (24.6 mg), while Ca₈-P decreased by 42.2% (5.2 mg) in MCP+AS soil column. Compared with MCP, MCP+AS improved rapid availability of phosphate fertilizer, and it is more favorable for the timely supply of phosphorus when the crop nutrient is deficient, while, MCP+U reduced the rapid availability of phosphate fertilizer, and it is more beneficial for the medium and long term crop utilization of phosphorus fertilizer.

Key words: fluvo-aquic soil; phosphorus; nitrogen; movement; transformation