

氮磷配施和施肥方式对潮土 Olsen-P 和小麦磷吸收的影响

苏同庆^{1,3}, 邢璐^{2,3}, 王火焰^{3,4}, 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, 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西南宁 530001;
2. 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东 临沭 276700; 3. 中国科学院 南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室,
江苏 南京 210008; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了研究磷肥与氮肥配施及施肥方式对磷肥利用率和作物产量的影响,通过温室盆栽试验,在石灰性潮土上种植小麦,探讨了磷酸二氢钙(P1)和磷酸氢二铵(P2)配施尿素(N1)与硫酸铵(N2)在全土混施(A),垂直方向距土壤表层5 cm、水平方向距小麦根系0 cm条施(B),垂直方向距土壤表层5 cm、水平方向距小麦12 cm条施(C)3种根系施肥方式下土壤 Olsen-P 和小麦磷吸收情况。结果表明,磷酸二氢钙(P1)处理施肥点 pH 值降低较磷酸氢二铵(P2)更为强烈,Olsen-P 含量更高,配施硫酸铵(P1N2;219.62 mg/kg)较配施尿素(P1N1;154.05 mg/kg)增强了 Olsen-P 含量的提高。在小麦生长发育方面,施用磷酸氢二铵 P2 的效果优于磷酸二氢钙(P1),肥料在一定土层深度施用优于全土混施,但在土面下 5 cm 根下施用与距根 12 cm 施用没有显著差异。上述结果表明,对于潮土-小麦种植季,磷酸氢二铵(P2)比磷酸二氢钙(P1)更有优势,且地表土层下 5 cm 深度集中施用比撒施、表层土混施更为合适,这为提高潮土磷肥利用率及小麦产量提供了施肥参考。

关键词:小麦;磷肥;氮肥;施肥方式;潮土

中图分类号:S512.1;S143 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2021)01-0152-07

doi:10.7668/hbxb.20191575



The Impacts of Nitrogen Combined with Phosphorus and Application Methods on Olsen-P and Phosphorus Uptake of Wheat in Fluvo-aquic Soil

SU Tongqing^{1,3}, XING Lu^{2,3}, WANG Huoyan^{3,4}, ZHOU Jianmin³

(1. Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education, Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linshu 276700, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To understand the effects of combined application and fertilization methods on utilization rate of phosphate fertilizer and crop yield, wheat was planted in calcareous fluvo-aquic soil through the potting experiment and the content of soil Olsen-P and phosphorus uptake of wheat were investigated. The mixed application was calcium dihydrogen phosphate(P1) and diammonium hydrogen phosphate(P2) combined with urea(N1) and ammonium sulfate(N2). The three different fertilizer methods included: (A) in the whole soil pot; (B) strip application with a vertical distance of 5 cm from the soil surface and a horizontal distance of 0 cm from the root system of wheat; and (C) strip application with a vertical distance of 5 cm from the soil surface and a horizontal distance of 12 cm from the root system of wheat. The results showed that the decrease of pH at the fertilization point of P1 treatment was more intense than that of P2 and the content of Olsen-P was high-

收稿日期:2020-07-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0200901);国家自然科学基金项目(31960238);广西科技基地和人才专项项目(桂科AD19245103);广西高校中青年教师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)系统基金项目(GTEU-KL0P-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。

通讯作者:王火焰(1971-),男,安徽怀宁人,研究员,博士,博士生导师,主要从事土壤养分迁移转化、高效施肥理论与技术等研究。

er, and the application of N2 (P1N2: 219.62 mg/kg) enhanced the increase of Olsen-P content in soil compared with the application of N1 (P1N1: 154.05 mg/kg). For wheat growth and development, the application of P2 was better than P1, and the application of fertilizer at a certain soil depth was better than the mixed application in the whole soil pot, but the application at 5 cm depth under root and 12 cm far from root had no significant differences. This study demonstrated that, for the fluvo-aquic soil-wheat growing season, P2 was more advantageous than P1, and it was more appropriate to apply concentrated application at a depth of 5 cm below the surface soil layer than to spread and mixed the surface soil, which provided fertilization reference for increasing phosphate utilization efficiency and wheat yield in fluvo-aquic soil.

Key words: Wheat; Phosphate fertilizer; Nitrogen fertilizer; Application methods; Fluvo-aquic soil

磷是作物正常生长发育所必需的重要营养元素,在提高作物产量和增强作物抗性方面作用显著,而磷流失也是造成农业面源污染、地表水体富营养化的重要因素^[1-2]。在农业生产中,土壤有效磷主要受磷肥施用的影响,而磷肥在土壤中的转化过程非常复杂,受土壤 pH 值、碳酸钙含量等土壤性质和土地利用类型等多方面因素的影响^[3]。土壤对磷肥的吸附固定能力极强,这种现象在石灰土上更加明显,有 70%~90% 的磷肥在当季被土壤固定^[4],造成磷肥当季利用率过低,仅为 10%~25%^[5]。影响精准化施肥效果的主要因素有肥料种类、施用深度及施用位置^[6],因此,优化磷肥种类、调整施肥方式是提高磷肥利用率,缓解施磷环境压力的有力举措^[7-12],根区施肥就是一种将肥料施到植物活性根系分布区域,使肥料养分扩散的动态范围与根系伸展的动态范围尽可能达到最佳匹配,以期养分供应的浓度(强度)、用量、空间和时间与植株养分需求高度匹配的施肥模式^[13]。据江尚焘等^[7]研究,磷酸氢二铵对小麦的增产效果优于磷酸二氢钙,且种子正下方 5 cm 条施增产效果优于其他施肥方式。杨云马等^[9]研究表明,磷肥集中施在 24 cm 土层处理夏玉米的根系长度最大,籽粒产量最高。张瑞富等^[10-11]研究显示,深松措施下,磷肥施用深度适度下移至 12 cm 可提高春玉米的总根干质量、比根长、磷素吸收效率、磷肥利用效率和籽粒产量。磷肥适度深施促进作物更好生长,同时减少地表径流和土壤侵蚀对磷肥造成的损失,降低农业面源污染的潜在风险。前人研究一定程度上探讨了耕作措施、磷肥种类、施肥深度对磷肥利用率和作物产量的影响,但是对于不同种类氮肥配施条件下磷肥利用率和作物产量,特别是距离施肥位点不同距离处有效磷含量与分布情况研究尚不充分。潮土在华北平原分布广泛,地势平坦,土层深厚,水热资源较丰富,产量潜力巨大,是我国主要的旱作土壤。因此,本研究选用潮土为材料,采用温室盆栽方法,选择尿素和硫酸铵

2 种氮肥,探讨在不同氮肥配施下磷酸二氢钙和磷酸氢二铵的不同施用方式对距施肥位点不同距离处 Olsen-P、小麦产量、吸磷量和磷肥表观利用率的影响,以期为提高磷肥利用效率,缓解施肥环境压力提供理论支撑。

1 材料和方法

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)。土壤质地为砂质壤土,其基本理化性质采用传统方法测定^[14],具体为:pH 值 8.29,有机质 18.4 g/kg,全氮 1.25 g/kg,全磷 0.64 g/kg,碳酸钙 74.5 g/kg,有效磷 16.21 mg/kg。土壤风干磨细过 2 mm 筛备用。供试的小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为宁麦 13,供试磷肥为磷酸二氢钙(P1)和磷酸氢二铵(P2),配施氮肥为尿素(N1)和硫酸铵(N2)。

1.2 试验设计

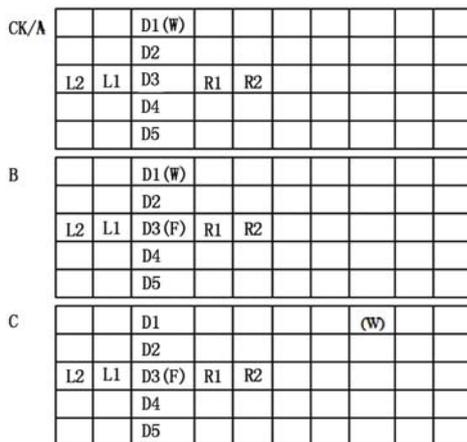
试验在中国科学院南京土壤研究所温室内进行。试验选用的钵钵长 35 cm、宽 25 cm、高 12 cm,每盆装土 10 kg,土层深度约为 10 cm,肥料品种为磷酸二氢钙、磷酸氢二铵、尿素、硫酸铵、氯化钾,施肥量为 P₂O₅ 0.1 g/kg, K₂O 0.1 g/kg, N 0.1 g/kg,其他元素以 10 mL/kg 阿农营养液(100 倍)的方式加入。磷肥与配施氮肥组合为:①磷酸二氢钙,配施尿素(P1N1);②磷酸二氢钙,配施硫酸铵(P1N2);③磷酸氢二铵,配施尿素(P2N1);④磷酸氢二铵,配施硫酸铵(P2N2)。磷肥与配施氮肥施用方式如下:①全土混施,将肥料与全土混匀施用(A);②垂直方向距土壤表层 5 cm,水平方向距小麦根系 0 cm 条施(B);③垂直方向距土壤表层 5 cm,水平方向距小麦根系 12 cm 条施(C),同时设置不施肥对照处理(CK),共 13 个处理,每个处理重复 3 次。钾肥和含其他元素的营养液与全土混匀施用。选取籽粒均一、发芽一致催芽后的小

麦种子,等株距播种,每盆平行于施肥带播种 1 行,共 25 粒,其他管理措施与田间管理一致。

1.3 样品采集与测定

植物样品:在小麦成熟收获后,收取地上部植物样。将籽粒与秸秆分开采集,用去离子水洗净、烘干后称质量。将小麦样品磨碎, $H_2SO_4-H_2O_2$ 消解后,用 ICP-AES 测定其中总磷的含量。

土壤样品:在小麦成熟收获后采集土壤样品。条施处理(B、C)中分别取施肥条带上下左右的土壤样品。土壤样品为截面 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$,且去除与盆钵接触部分的土壤条带,不施肥(CK)、全土混施(A)的取样方法参考条施处理,土壤取样分布如图 1 所示。土壤样品风干、过 0.84 mm 筛后,选择 C 施肥方式下的 D3 土样测定其 pH 值(土水比为 $1.0:2.5$),并选择所有处理下的 D3 及其垂直方向临近土样(D1, D2, D4, D5)和水平方向临近土样(L2, L1, R1, R2)用 $NaHCO_3$ 溶液(土水比 $1:20$)浸提,钼蓝比色法测定其 Olsen-P^[14]。



W. 小麦;F. 肥料。
W. Wheat; F. Fertilizer.

图 1 小麦种植与土壤取样

Fig. 1 Wheat planting and soil sampling

1.4 数据处理与分析

试验数据用 Excel 2010 处理, Origin 8.5 作图,并用 SPSS 20.0 对施肥点 pH 值、施肥点 Olsen-P、小麦籽粒生物量、秸秆生物量、地上生物量、收获指数、籽粒总磷、秸秆总磷、地上部总磷、磷收获指数和磷肥表观利用率进行单因素方差分析(One-way ANOVA, LSD, $\alpha = 0.05$),不同字母表示差异显著($P < 0.05$),图中数据为平均值 \pm 标准差。用 SPSS 20.0 一般线性模型检验肥料种类、施肥方式及其相互作用对不含对照的施肥点 Olsen-P、小麦籽粒生物量、秸秆生物量、地上生物量、收获指数、籽粒总磷、秸秆总磷、地上部总磷、磷收获指数和磷肥表观利用率的影响。

相关计算如下:

收获指数 = 小麦籽粒生物量/地上生物量;

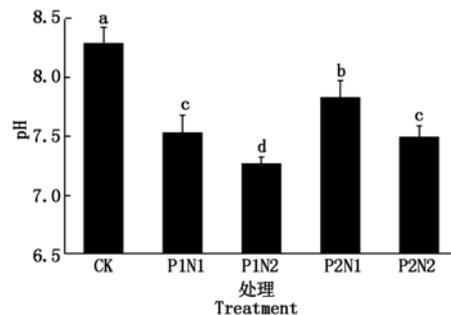
磷收获指数 = 小麦籽粒总磷/地上总磷;

磷肥表观利用率 = (施磷处理总量 - 对照处理总量)/施磷量 $\times 100\%$ 。

2 结果与分析

2.1 氮磷配施对施肥点 pH 值的影响

肥料施用后,施肥点土壤 pH 值均显著下降($P < 0.05$),以 P1N2 下降最显著, pH 值接近中性(7.27),下降幅度依次是 $CK < P2N1 < P1N1 \approx P2N2 < P1N2$ (图 2)。由于硫酸铵属于酸性肥料,同等情况下,配施硫酸铵较配施尿素土壤 pH 值下降更为剧烈,磷酸二氢钙比磷酸氢二铵对土壤 pH 值的降低作用更为显著。



不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。图 3-6 同。

Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$). The same as Fig. 3-6.

图 2 氮磷配施在 C 施肥方式下(土下 5 cm, 根侧 12 cm 条施)施肥点的土壤 pH 值

Fig. 2 Soil pH at fertilizing site under nitrogen combined with phosphorus and application method C (strip application with a vertical distance of 5 cm from the soil surface and a horizontal distance of 12 cm from the root system of wheat)

2.2 氮磷配施和施肥方式对土壤中 Olsen-P 的影响

不同氮磷配施和施肥方式对土壤 Olsen-P 影响明显不同。对于 A 施肥方式不同位置和 B、C 施肥方式非施肥点位置(除 D3 之外位置),不同磷肥种类和不同氮肥配施的土壤 Olsen-P 在垂直方向和水平方向均无显著差异,且与对照处理相同位置 Olsen-P 无显著差异。对于施肥点位置,肥料种类和施肥方式均对土壤 Olsen-P 影响显著(图 3、表 1)。总体来说,土壤 Olsen-P 依施肥方式 A、施肥方式 B、施肥方式 C 次序递增,施用磷酸二氢钙处理优于施用磷酸氢二铵处理,配施硫酸铵处理较配施尿素处理为高,以磷酸二氢钙配施硫酸铵(P1N2)的 C 施肥方式为最高(219.62 mg/kg),而磷酸二氢钙配施尿素(P1N1)的 C 施肥方式为 154.05 mg/kg 。

表 1 肥料种类、施肥方式及其相互作用对相关指标(不含对照)的影响(F 值)Tab.1 The effects of fertilizer species, application methods and their interaction on relevant indicators(excluding CK) (F value)

相关指标 Relevant indicators	肥料种类(F) Fertilizer species	施肥方式(A) Application methods	F × A
施肥点 Olsen-P Olsen-P at fertilizing site	87.50**	566.12**	31.21**
籽粒生物量 Grain biomass	4.85**	11.39**	0.82
秸秆生物量 Straw biomass	2.91	14.79**	0.94
地上生物量 Aboveground biomass	1.28	0.05	0.47
收获指数 Harvest index	7.26**	27.68**	1.37
籽粒总磷 Grain total phosphorus	2.81	0.71	0.87
秸秆总磷 Straw total phosphorus	3.44*	29.24**	1.98
地上部总磷 Aboveground total phosphorus	1.27	20.31**	3.03*
磷收获指数 Phosphorus harvest index	3.61*	24.04**	1.10
磷肥表观利用率 Phosphorus fertilizer apparent use efficiency	1.29	20.31**	3.03*

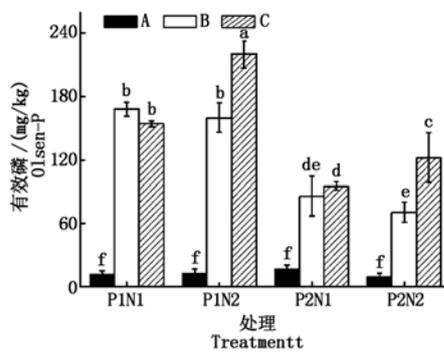
注: * . $P < 0.05$; ** . $P < 0.01$.Note: * . $P < 0.05$; ** . $P < 0.01$.

图 3 氮磷配施和施肥方式下施肥点土壤 Olsen-P

Fig.3 Soil Olsen-P at fertilizing site under nitrogen combined with phosphorus and application methods

2.3 氮磷配施和施肥方式对小麦秸秆、籽粒、地上部生物量和收获指数的影响

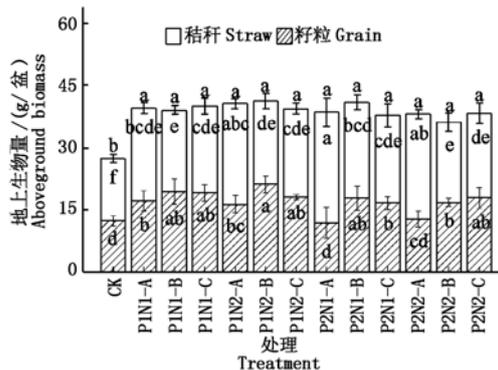


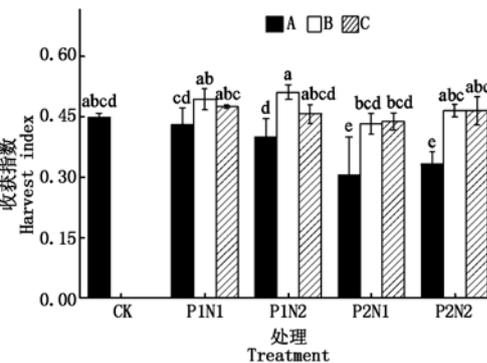
图 4 氮磷配施和施肥方式下小麦的地上生物量和收获指数

Fig.4 The aboveground biomass and harvest index of wheat under nitrogen combined with phosphorus and application methods

2.4 氮磷配施和施肥方式对小麦秸秆、籽粒、地上部总磷、磷收获指数和磷肥表观利用率的影响

氮磷配施和施肥方式对小麦秸秆、籽粒、地上部总磷和磷收获指数影响有所相同(图 5、表 1)。施肥方式 A 小麦秸秆总磷显著高于对照处理(0.01 g/盆),且在 P2N1 和 P2N2 肥料组合下显著

不同氮磷配施和施肥方式的小麦地上生物量和秸秆生物量均显著高于不施肥对照处理(27.37, 15.03 g/盆),但不同氮磷配施和施肥方式对小麦地上、籽粒、秸秆生物量和收获指数影响不同(图 4、表 1)。对于小麦秸秆生物量,施肥方式 A 明显优于施肥方式 B 和 C,且施肥方式 B 和 C 之间差异不显著,其中磷酸氢二铵配施尿素(P2N1)的 A 施肥方式小麦秸秆生物量最高(26.77 g/盆),较对照(15.03 g/盆)提高 78%。相同肥料组合的 B 和 C 的小麦籽粒生物量与收获指数均没有显著差异,但 P1N1 之外的其他肥料组合的施肥方式 B 的小麦籽粒生物量和收获指数均显著优于施肥方式 A,其中磷酸二氢钙配施硫酸铵(P1N2)的 B 施肥方式最优(21.11 g/盆,0.51)。



优于施肥处理 B 和 C。在 A 施肥方式下,无论配施尿素还是硫酸铵,磷酸氢二铵处理小麦秸秆总磷均显著高于磷酸二氢钙相应处理。相比对照处理,施肥处理不同程度提高了小麦籽粒总磷,但不同肥料种类和施肥方式之间没有显著差异。不同氮磷配施和施肥方式的小麦地上部总磷均显著高于不施肥对

照处理(0.05 g/盆),且施肥方式 A 更大程度地提高了小麦地上部总磷,特别是 P2N1、P2N2 均达到显著水平,均为 0.11 g/盆。施肥方式 A 的磷收获指数低于施肥方式 B 和 C,同时显著低于不施肥对照

处理。总体来看,施肥方式 A 磷肥表观利用率优于施肥方式 B 和 C(图 6、表 1),但是这掩盖了施肥方式 B 和 C 中更多的磷进入小麦籽粒的事实。

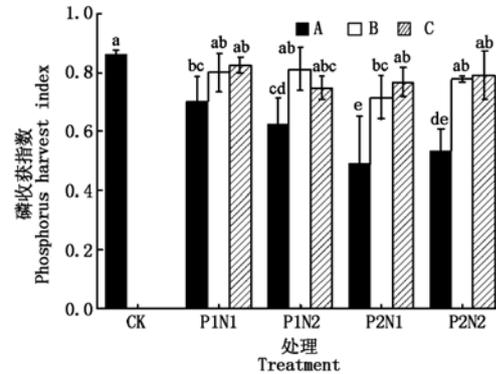
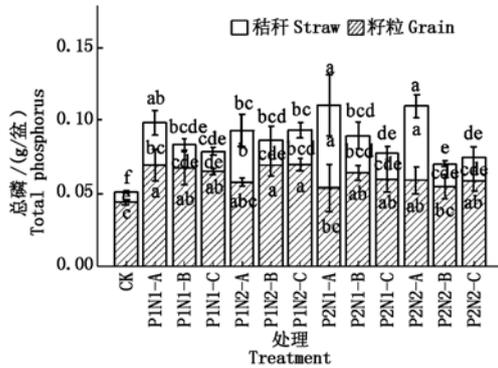


图 5 氮磷配施和施肥方式下小麦的地上总磷和磷收获指数

Fig. 5 The aboveground total phosphorus and phosphorus harvest index of wheat under nitrogen combined with phosphorus and application methods

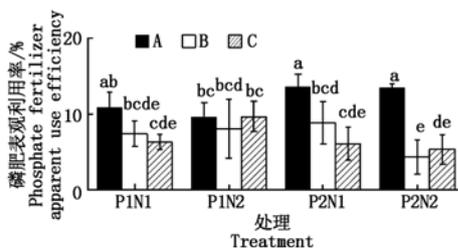


图 6 氮磷配施和施肥方式下磷肥的表观利用率

Fig. 6 Phosphorus fertilizer apparent use efficiency under nitrogen combined with phosphorus and application methods

3 讨论与结论

磷肥配施不同氮肥显著影响施肥点土壤 pH 值和磷肥的有效性。不同肥料种类条施均显著降低施肥点土壤 pH 值,提高 Olsen-P 含量,从施肥处理 C 施肥点土壤 pH 值和 Olsen-P 含量可以看出,土壤 Olsen-P 含量与 pH 值呈明显的负相关。前人研究指出,施用磷酸二氢钙和磷酸氢二铵均能显著降低土壤 pH 值,且施用磷酸二氢钙降低作用更为显著^[15-16]。配施尿素和硫酸铵均较单施磷酸二氢钙降低了土壤 pH 值,且配施硫酸铵降低作用更为显著,这主要是因为尿素水解产生的 NH₄⁺ 浓度低于添加硫酸铵之后的 NH₄⁺ 浓度。石灰性土壤 pH 值普遍较高,施肥造成其 pH 值下降,但仍在 7.0 以上,这加剧了磷肥的溶解,提高了土壤 Olsen-P 含量,又不至于造成 pH 值过低(酸性环境)引起碳酸钙大量溶解而降低磷肥有效性^[16]。

磷肥配施不同氮肥显著影响小麦生物量和对磷的吸收利用。氮磷配施对小麦地上部生物量和地上

部总磷的影响均不显著,但是在小麦籽粒与秸秆分配中明显不同。小麦生长前期,土壤中氮磷含量较高,不同磷肥及配施氮肥均能满足小麦生长,故小麦秸秆生物量处理之间差异不显著,但施肥处理 A 方式下施用磷酸氢二铵的小麦秸秆总磷显著高于施用磷酸二氢钙处理,其原因主要是 2 种磷肥在土壤中转化方式与迁移距离不同,这与江尚焘等^[7]研究结果,即磷酸氢二铵对小麦的效果优于磷酸二氢钙相一致。小麦生长后期,小麦籽粒生物量在施肥处理 A 方式下施用磷酸二氢钙较高,其原因可能是本试验中磷肥均作为基肥一次施用,较多的磷酸氢二铵中的磷存在于小麦秸秆中,导致后期小麦籽粒形成过程中磷酸氢二铵供应不足。

肥料不同施用方式显著影响小麦生物量和对磷的吸收利用。研究显示,磷肥深施能促进作物植株对磷的吸收利用,提高磷效率,进而提高作物产量^[17-18]。也有研究指出,磷肥深施仅促进作物营养生长阶段的生长,提高植株对磷的吸收,但对产量影响不显著^[19-20]。在本研究中,从小麦地上生物量看,磷肥不同施用方式之间没有显著差异,但从小麦的收获指数,即小麦籽粒占小麦地上部生物量的比值可以看出,施肥处理 B 方式下, P1N2、P2N1 和 P2N2 肥料组合的小麦的收获指数和磷收获指数均显著高于 A 施肥方式。植物不同器官之间存在一定的比例,植物不同器官内营养元素之间存在一定的生态化学计量比例^[21],小麦生长前期, A 施肥方式小麦吸收更多的氮磷用来形成营养器官,即小麦秸秆,小麦生长后期, A 施肥方式小麦不能获取充足的氮磷来进行生殖生长,因此,小麦的收获指数和磷

收获指数均较低。施肥方式 B 和 C, 氮磷肥料组合距离小麦根系一定距离条施, 不同程度起到了控释的作用, 避免了小麦前期秸秆的徒长和养分的奢侈吸收。小麦后期吸收更多的氮磷用来进行籽粒的形成, 小麦的收获指数和磷收获指数更高, 因此, 施肥方式 B 和 C 对小麦籽粒的形成更为有利。本研究为温室盆栽试验, 浇水较大田规律、及时, 土壤大多时间处于相对湿润的状态, 小麦根系的生长和肥料的扩散与质流共同造成小麦能吸收到更远距离的氮磷, 这可能是造成 B 和 C 施肥方式差异不显著的主要原因。

本研究为短期温室盆栽试验, 主要研究了肥料施用对土壤磷素和作物吸收利用磷的影响, 对土壤中其他养分元素、土壤结构、土壤有机质等土壤性质的响应未做探讨。后续研究应该开展生产实践的验证, 同时对施肥后土壤性质进行长期跟踪监测, 以真实、客观评价施肥对土壤和作物的短期效果与长期效应。

磷肥施用种类、配施氮肥种类与肥料施用方式均对潮土 Olsen-P 和小麦生长发育存在显著影响。从本研究可以看出, 磷酸二氢钙处理施肥点 pH 值降低较磷酸氢二铵更为强烈, Olsen-P 含量更高, 配施硫酸铵较配施尿素增强了 Olsen-P 含量的提高。在小麦生长发育方面, 施用磷酸氢二铵的效果优于磷酸二氢钙, 肥料在一定土层深度施用优于全土混施。因此, 在复合肥研发与生产中, 磷酸氢二铵比磷酸二氢钙更有优势, 在施肥措施中, 一定土层深度集中施用比撒施、表层土混施更为合适, 这不仅可以提高肥料利用率和小麦产量, 还可减少肥料向邻近水体的流失, 降低农业面源污染和水体富营养化的潜在风险。

参考文献:

- [1] 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮. 基于 DPERS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4555 - 4563. doi:10.13227/j. hjkx. 201912077.
Feng A P, Wang X L, Xu Y, Huang L, Wu C Q, Wang C Z, Wang H L. Assessment of potential risk of diffuse pollution in Haihe river basin based using DPERS model[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10): 4555 - 4563.
- [2] 吴汉卿, 万炜, 单艳军, 陈延华, 李强, 李存军, 胡海棠, 张宝贵. 基于磷指数模型的海河流域农田磷流失环境风险评估[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 17 - 27, 327. doi:10.11975/j. issn. 1002-6819. 2020. 14. 003.
Wu H Q, Wan W, Shan Y J, Chen Y H, Li Q, Li C J, Hu H T, Zhang B G. Environmental risk assessment of phosphorus loss from farmland based on phosphorus index model in the Haihe River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(14): 17 - 27, 327.
- [3] Maharjan M, Maranguit D, Kuzyakov Y. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2018, 87: 17 - 24. doi:10.1016/j. ejsobi. 2018. 04. 002.
- [4] Wen Z H, Shen J B, Blackwell M, Li H G, Zhao B Q, Yuan H M. Combined applications of nitrogen and phosphorus fertilizers with manure increase maize yield and nutrient uptake via stimulating root growth in a long-term experiment[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(1): 62 - 73. doi:10.1016/S1002-0160(15)60023-6.
- [5] 张皓禹, 张君, 张凤麟, 刘地, 危常州. 滴灌条件下不同磷肥品种对土壤磷有效性及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 189 - 195. doi:10.13870/j. cnki. stbxb. 2019. 02. 030.
Zhang H Y, Zhang J, Zhang F L, Liu D, Wei C Z. Effects of different phosphorus fertilizers on soil phosphorus availability and maize yield under drip irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 189 - 195.
- [6] 余琼, 索炎炎, 司贤宗, 张翔, 李亮, 孙艳敏. 不同缓控释肥种类及施用深度对花生养分积累及产质量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(2): 152 - 160. doi:10.7668/hbnxb. 20190624.
Yu Q, Suo Y Y, Si X Z, Zhang X, Li L, Sun Y M. Effects of different slow controlled release fertilizers and application depth on nutrient accumulation, yield and quality of peanut[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(2): 152 - 160.
- [7] 江尚焘, 王火焰, 周健民, 陈照明, 刘晓伟, 贾云生. 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. doi:10.13287/j. 1001-9332. 201605. 034.
Jiang S T, Wang H Y, Zhou J M, Chen Z M, Liu X W, Jia Y S. Effects of phosphorus fertilizer application methods and types on the yield and phosphorus uptake of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1503 - 1510.
- [8] 马阳, 吴敏, 郭献彬, 王亚玲, 李鸿池, 王艳群, 彭正萍, 郭丽果. 新型耕作施肥方式下夏玉米田土壤水分分布和磷素利用研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 98 - 102. doi:10.13870/j. cnki. stbxb. 2019. 02. 016.
Ma Y, Wu M, Guo X B, Wang Y L, Li H C, Wang Y Q, Peng Z P, Guo L G. Soil water distribution and phosphorus utilization in summer maize field under new tillage and fertilization method[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 98 - 102.
- [9] 杨云马, 孙彦铭, 贾良良, 贾树龙, 孟春香. 磷肥施用深度对夏玉米产量及根系分布的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(8): 1518 - 1526. doi:10.3864/j. issn. 0578-1752. 2018. 08. 009.
Yang Y M, Sun Y M, Jia L L, Jia S L, Meng C X. Effects of phosphorus fertilization depth on yield and root distribution of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(8): 1518 - 1526.
- [10] 张瑞富, 杨恒山, 范秀艳, 张宏宇, 柳宝林, 刘晶. 施磷深度和深松对春玉米磷素吸收与利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 880 - 887. doi:10.11674/zwyf. 17388.
Zhang R F, Yang H S, Fan X Y, Zhang H Y, Liu B L, Liu J. Effects of phosphorus application depths on its uptake and utilization in spring maize under subsoiling tillage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 880 - 887.
- [11] 张瑞富, 张玉芹, 杨恒山. 深松措施下磷肥施用深度对春玉米根系特性的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(1): 204 - 212. doi:10.7668/hbnxb. 201750319.
Zhang R F, Zhang Y Q, Yang H S. Effect of phosphorus application depth on root characteristics of spring maize under the subsoiling measures[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(1): 204 - 212.

- [12] 赵亚丽,杨春收,王群,刘天学,李翰海. 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. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2010.23.005.
Zhao Y L, Yang C S, Wang Q, Liu T X, Li H H. Effects of phosphorus placement depth on yield and nutrient uptake of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010,43(23):4805-4813.
- [13] 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. doi:10.13758/j.cnki.tr.2013.05.004.
Wang H Y, Zhou J M. Root-zone fertilization—a key and necessary approach to improve fertilizer use efficiency and reduce non-point source pollution from the cropland[J]. *Soils*, 2013,45(5):785-790.
- [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.
Lu R K. Analytic methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,2000.
- [15] 金亮,周健民,王火焰,陈小琴,杜昌文. 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. doi:10.3969/j.issn.1007-6220.2008.05.005.
Jin L, Zhou J M, Wang H Y, Chen X Q, Du C W. Transformation and translocation of fertilizer-P with DAP application at fertisphere in calcareous soil[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2008,23(5):14-18.
- [16] 金亮,周健民,王火焰,陈小琴,杜昌文. 石灰性土壤肥际磷酸-钙的转化及肥料磷的迁移[J]. 土壤, 2009,41(1):72-78. doi:10.3321/j.issn:0253-9829.2009.01.013.
Jin L, Zhou J M, Wang H Y, Chen X Q, Du C W. Transformation and translocation of fertilizer-P with monocalcium phosphate monohydrate application in fertisphere of calcareous soil[J]. *Soils*, 2009,41(1):72-78.
- [17] Schwab G J, Whitney D A, Kilgore G L, Sweeney D W. Tillage and phosphorus management effects on crop production in soils with phosphorus stratification[J]. *Agronomy Journal*, 2006,98(3):430-435. doi:10.2134/agronj2005.0050.
- [18] Singh D K, Sale P W G, Routley R R. Increasing phosphorus supply in subsurface soil in northern Australia: rationale for deep placement and the effects with various crops[J]. *Plant and Soil*, 2005,269:35-44. doi:10.1007/s11104-004-2475-6.
- [19] Borges R, Mallarino A P. Deep banding phosphorus and potassium fertilizers for corn produced under ridge tillage[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2001,65(2):376-384. doi:10.2136/sssaj2001.652376x.
- [20] Borges R, Mallarino A P. Broadcast and deep-band placement of phosphorus and potassium for soybean managed with ridge tillage[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2003,67(6):1920-1927. doi:10.2136/sssaj2003.1920.
- [21] 陈婵,王光军,赵月,周国新,李栎,高吉权. 会同杉木器官间C、N、P化学计量比的季节动态与异速生长关系[J]. 生态学报, 2016,36(23):7614-7623. doi:10.5846/stxb201512142500.
Chen C, Wang G J, Zhao Y, Zhou G X, Li L, Gao J Q. Seasonal dynamics and allometric growth relationships of C, N, and P stoichiometry in the organs of *Cunninghamia lanceolata* from Huitong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016,36(23):7614-7623.