



聚磷酸盐与水溶性磷酸二铵不同比例掺混施用对滴灌棉花产量形成和经济效应的影响

江席亮¹, 马林¹, 马伟栋¹, 甘子华¹, 张静雯¹, 危常州¹,
李俊华¹, 普正仙², 王芳², 张新疆^{1*}

(1. 石河子大学农学院农业资源与环境系, 新疆 石河子 832003;

2. 云南云天化股份有限公司研发中心, 云南 昆明 650228)

摘要: 探究聚磷酸盐与常规水溶磷肥在滴灌棉田中最佳的掺混方式, 以期达到磷肥施用兼顾经济和高效利用的目的。在等磷施用量下 (P_2O_5 120 kg/hm²), 将聚磷酸铵 1 (APP1)、聚磷酸铵 2 (APP2) 和三聚磷酸钾 (KTPP) 按照含 P_2O_5 占总磷用量的 10%、30% 和 50% 与水溶性磷酸二铵掺混, 形成 9 种不同种类的聚磷酸掺混磷肥, 依次表示为 APP1-10、APP2-10、KTPP-10、APP1-30、APP2-30、KTPP-30、APP1-50、APP2-50 和 KTPP-50。同时设置不掺混聚磷酸盐的常规水溶磷肥 (DAP) 和不施磷肥 (P0) 为对照。于滴灌棉花盛花期和盛铃期分别测定土壤深度 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土壤有效磷含量、棉花植株生物量和磷吸收量。同时监测棉花结铃动态, 成熟期测定产量及产量构成。0 ~ 20 cm 土壤有效磷含量、棉花地上部生物量、磷吸收量、棉花单株结铃数、籽棉产量、伏前桃数、磷肥农学利用率和产投比均随聚磷酸盐掺混比例的增加表现出增加趋势。3 种不同聚磷酸盐在增加土壤有效磷含量、棉花地上部生物量、磷吸收量、棉花单株结铃数、籽棉产量、伏前桃数、磷肥农学利用率和产投比上总体表现为 APP2 最优, 其次是 KTPP, 最后为 APP1。在棉花盛花期和盛铃期, APP2-50 处理 0 ~ 20 cm 土壤有效磷含量和棉花磷吸收量均显著高于 DAP 和其他施磷处理, 20 ~ 40 cm 土壤有效磷在所有施肥处理间无显著性差异。盛花期 APP2-50 处理棉花生物量与 DAP 无显著差异, 但在盛铃期 APP2-50 棉花生物量显著高于 DAP 和其他施磷处理。所有聚磷酸掺混磷肥处理棉花结铃数均显著高于 DAP, 但棉花单铃重在各施磷处理间无差异。APP2-50 处理籽棉产量、磷肥农学利用率和产投比最高。与 DAP 相比, APP2-50 处理籽棉产量、磷肥农学利用率和产投比分别增加了 10.7%、88.3% 和 7.6%。以上结果表明, 将 APP2 按照含 P_2O_5 占总磷用量的 50% 与水溶性磷酸二铵掺混施用, 可以提高滴灌棉田土壤有效磷含量, 且对棉花产量和产投比增加有积极作用, 是一种兼顾磷肥高效和经济施用的施肥选择。

关键词: 聚磷酸铵; 滴灌棉花; 磷肥农学利用率; 产投比

磷在农业生产中具有重要作用, 但磷肥当季利用率只有 10% ~ 25%^[1-2]。磷是一种不可再生资源, 在我国磷资源储备量仅为 252.84 亿 t^[3]。据统计, 2020 年我国磷肥用量较 1980 年增长了 2.39 倍, 而粮食产量只增长了 1.09 倍^[4]。可见, 我国磷矿资源的消耗和粮食产量的增加并不匹配。因此, 提高磷肥利用率, 减少磷矿资源浪费, 对我国农业生产

和磷资源可持续发展尤为重要。

研究表明, 磷肥在施入土壤 3 h 内就有高达 51.6% 的磷衰减为无效磷^[5], 其主要原因是磷在土壤中易发生化学沉淀和吸附固定。土壤中磷的迁移距离一般只有 2.5 ~ 5.1 cm^[6], 不合理的施磷方式会导致作物根系磷养分吸收与磷迁移不匹配, 以上是造成作物磷肥当季利用率低的主要原因。因此, 增加土壤中磷的有效性和提高其在土壤中的迁移距离是提高作物磷肥利用率的关键, 同时也是磷肥减量增效的突破口, 而磷肥的有效性直接与磷肥本身的组成和形态有关^[7-9]。

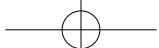
聚磷酸盐作为一种新型肥料已经在农业生产中应用^[10-12]。常规聚磷酸(铵)磷肥主要由正磷酸盐、焦磷酸盐、三聚及三聚以上磷酸盐组成^[11]。

收稿日期: 2022-09-11; 录用日期: 2022-10-30

基金项目: 石河子大学高层次人才科研启动项目 (RCZK201946); 企业横向课题 (YTHZWYJY2020001); 石河子大学大学生研究训练计划 (SRP) 项目 (srp2022018, srp2021041)。

作者简介: 江席亮 (1998 -), 硕士研究生, 主要从事植物营养研究。E-mail: 1766758215@qq.com。

通讯作者: 张新疆, E-mail: xinjiangzhang0218@126.com。



聚磷酸盐进入土壤后需要水解成正磷酸盐才可以被作物吸收^[13-14]。聚磷酸盐的水解是一种缓慢释放正磷酸盐的过程,这就能提高土壤磷的移动性,达到提高作物磷肥利用效率的目的^[15-16]。研究发现,三聚磷酸盐(TPP)可与金属离子形成金属离子-TPP 闭环络合物,这种络合物的形成可以减缓磷沉淀的发生时间,进而提高磷在土壤中的有效性^[17]。同时,相比于磷酸一铵和液体磷肥,土壤施用聚磷能够降低土壤中速效态磷向难溶性磷(HCl-P 和残渣磷)的转化比例,进而提高土壤剖面中磷向下的移动距离^[18]。但由于工业级聚磷酸盐生产成本低,导致其价格难以被农户接受。本研究尝试在新疆滴灌棉花上将不同工业级聚磷酸盐和常规水溶性滴灌磷酸二铵(DAP)进行不同比例掺混施用,以期得到在滴灌棉花上兼顾聚磷酸磷肥特性和经济型的掺混磷肥品种和最佳掺混比例。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

于2021年4月20日在新疆石河子市天业生态园区开展田间试验,于2021年10月20日收获。试验区土壤为石灰性灰漠土,土壤碱解氮69.73 mg/kg,有效磷(Olsen P)14.44 mg/kg,速效钾454.52 mg/kg,土壤pH 8.09,电导率167.02 μS/cm。

1.2 试验材料

供试棉花品种为新陆早83号。供试3种聚磷酸盐分别为聚磷酸铵1(APP1,平均聚合度2.3,聚合率75%)、聚磷酸铵2(APP2,平均聚合度1.8,聚合率75%)和三聚磷酸钾(KTPP,平均聚合度3.0,聚合率95%)。试验过程中所需肥料养分含量和市售价格如表1。

表1 本试验用肥料养分含量和市场价格

肥料种类	养分含量(%)			市价 (元/kg)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
KTPP	0	45	51	12.0
APP1	16	60	0	6.8
APP2	16	60	0	6.8
DAP	16	51	0	6.0
尿素	46	0	0	1.5
硫酸钾	0	0	51	2.5

注:不同肥料价格以2021年新疆地区市场销售价格为准。

1.3 试验设计

分别将APP1、APP2和KTPP以聚磷酸盐带入P₂O₅含量占总磷施用量(P₂O₅ 120 kg/hm²)的10%、30%和50%与DAP进行掺混,形成9种不同种类的聚磷酸掺混磷肥处理,依次表示为APP1-10、APP2-10、KTPP-10、APP1-30、APP2-30、KTPP-30、APP1-50、APP2-50和KTPP-50。同时设置不掺混聚磷酸盐的常规水溶磷肥处理(DAP)和不施磷肥处理(P0)为对照,以上共计11个施肥处理,每处理重复3次。滴灌棉花施肥量为N 300 kg/hm²,P₂O₅ 120 kg/hm²,K₂O 90 kg/hm²。除P0外,其他处理保持等氮、磷、钾养分投入,不同处理不足养分用尿素和硫酸钾补齐。

供试氮肥为尿素(N 46%),磷肥为滴灌磷酸二铵(N 16%,P₂O₅ 51%),钾肥为硫酸钾(K₂O 51%)。所有处理中钾肥以基肥形式一次性投入,氮磷肥料均以滴灌追施的方式均分为3次,分别在棉花蕾期(25%)、盛花期(40%)和盛铃期(35%)随水滴施。

棉花于2021年4月20日播种。播种模式为“1膜3管6行”,膜宽2.05 m,小区面积为2.05 m×10 m,播种密度为22.5×10⁴株/hm²。播种后滴入出苗水,灌水量为300 m³/hm²。棉花全生育周期内共灌水9次,6月13日滴头水,8月28日停水,全生育期共计灌水量为4500 m³/hm²。其他田间管理措施与当地田间管理习惯一致。

1.4 测试指标

1.4.1 土壤有效磷

分别于棉花盛花期和盛铃期施肥第3 d后,采集滴灌带滴头正下方深度分别为0~20和20~40 cm新鲜土壤,使用Olsen法测定新鲜土壤有效磷含量。

1.4.2 棉花生物量

于棉花盛花期(出苗后68 d)和盛铃期(出苗后104 d),每个处理选择长势均一的连续3穴棉花进行地上部干物重的测定。将棉花从基部子叶节处剪断,取其地上部分,分为茎、叶及花蕾铃等洗净,植株样品在105℃杀青30 min后,70℃烘干至恒重记录。

1.4.3 棉花磷吸收量

将盛花期及盛铃期植株样烘干,粉碎,过0.5 mm筛,用H₂SO₄-H₂O₂消煮,钒钼黄比色法测



定植株全磷含量。

1.4.4 棉花结铃特征调查

每处理小区标记固定的 10 株棉花, 分别调查棉花伏前桃数 (2021 年 7 月 11 日), 伏桃数 (2021 年 7 月 21 日) 和秋桃数 (2021 年 8 月 10 日)。在各取样期以棉花铃直径大于 20 mm 的铃记为有效铃。

1.4.5 棉花产量和产量构成

于棉花成熟期, 在各小区选择 2.05 m (膜宽) × 3.25 m (膜长) 样方调查棉花株数、铃数, 并采收小区内 100 朵棉花测定棉花单铃重, 最终计算产量。

1.4.6 磷肥农学利用率及施肥产投比计算

磷肥农学利用率 = (施磷小区棉花产量 - 不施磷小区棉花产量) / 磷肥投入量

施肥产投比 = (棉花籽棉产量 × 当年籽棉价格) / 肥料投入成本

1.5 数据处理和作图

数据采用 Excel 2016 进行计算, 采用 SPSS 20.0 进行方差分析和多重比较 (LSD 法), 利用 Excel 2016 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同掺混聚磷酸磷肥对土壤有效磷的影响

在盛花期和盛铃期, 随着 3 种不同聚磷酸盐掺混比例的增加, 0 ~ 20 cm 深度土壤有效磷含量表现出增加趋势, 其中以 APP2-50 处理最高。在相同掺混比例下, 3 种不同聚磷酸掺混磷肥处理 0 ~ 20 cm 土壤有效磷含量以 APP2 为原料的处理最高, 其次是以 KTPP 和 APP1 为原料的掺混磷肥处理 (图 1)。

土壤 0 ~ 20 cm 有效磷含量在盛花期的 APP1-10、APP1-30 处理和盛铃期的 APP1-10、DAP 处理均与 P0 无显著性差异, 在棉花盛花期和盛铃期其余各施肥处理 0 ~ 20 cm 土壤有效磷含量均高于 P0。在棉花盛花期, DAP 处理 0 ~ 20 cm 深度土壤有效磷含量显著低于 APP2-50, 且 DAP 与除 APP1-10 处理外的其他掺混磷肥处理间无显著性差异。在棉花盛铃期, DAP 处理 0 ~ 20 cm 土壤有效磷含量显著低于 APP2-30 和 APP2-50, 但 DAP 与其他掺混磷肥处理间无显著差异。在棉花盛花期和盛铃期, 各施肥处理 20 ~ 40 cm 土壤有效磷含量均高于 P0, 所有添加聚磷酸盐施肥处理与 DAP 相比均没有显著差异 (图 1)。

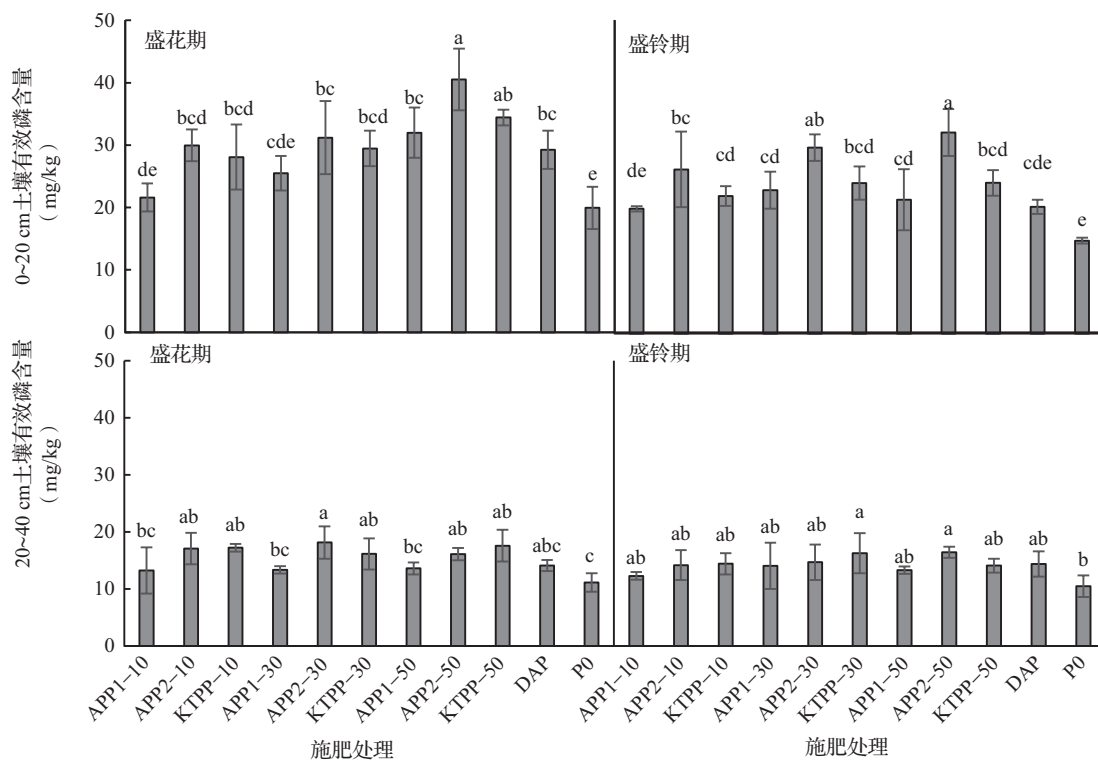
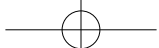


图 1 不同施肥处理下土壤有效磷含量

注: 同一生育期相同土层深度内, 柱上不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。



2.2 不同掺混聚磷酸磷肥对棉花生长的影响

在棉花盛花期和盛铃期,随着聚磷酸盐掺混比例的增加,棉花地上部生物量均表现出增加趋势。在相同掺混比例下,3种不同聚磷酸盐掺混磷肥处理地上部生物量在盛花期表现为以 APP2 为原料的处理最高,其次是以 KTPP 和 APP1 为原料的掺混磷肥处理,在盛铃期表现为以 KTPP 为原料的处理最高,其次是以 APP2 和 APP1 为原料的掺混磷肥处理(图 2)。

在棉花盛花期和盛铃期,所有施肥处理棉

花生物量均显著高于 P0。棉花盛花期,APP2-30, KTPP-30 和 APP2-50 处理棉花生物量均高于 DAP 处理,其中以 APP2-30 处理棉花生物量显著高于 DAP。棉花盛铃期,APP2-30、KTPP-30、APP2-50 和 KTPP-50 处理棉花生物量高于 DAP,其中 APP2-50 和 KTPP-50 处理棉花生物量显著高于 DAP。在盛铃期,与 DAP 相比,APP2-30、KTPP-30 处理生物量分别增加了 7.3%、10.4%,APP2-50、KTPP-50 处理生物量分别增加了 17.0%、21.4%(图 2)。

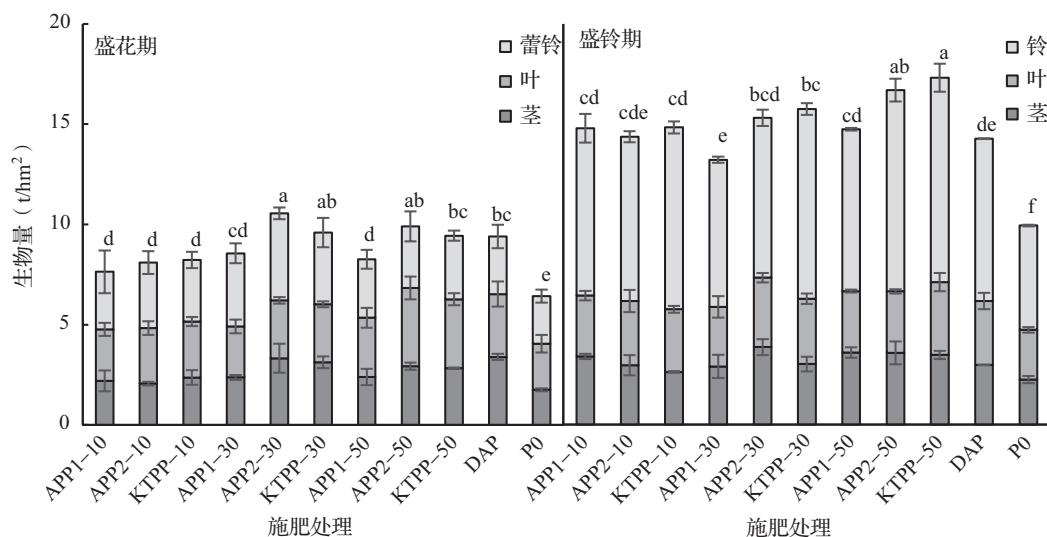


图 2 不同施肥处理棉花生物量

注:同一生育期内,柱上不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著 ($P<0.05$)。图 3 同。

2.3 不同掺混聚磷酸磷肥对棉花磷吸收的影响

图 3 数据显示,在棉花盛花期和盛铃期,随着聚磷酸盐掺混比例的增加,棉花磷吸收量在以 APP1 为原料的掺混磷肥处理中表现出先增加后降低的趋势,而以 APP2 和 KTPP 为原料的掺混磷肥处理均表现为随着掺混比例的增加,棉花磷吸收量表现为逐步增加的趋势。在相同掺混比例下,3 种不同聚磷酸盐掺混磷肥处理棉花磷吸收量在盛花期和盛铃期均表现为以 APP2 为原料的处理最高,其次是以 KTPP 和 APP1 为原料的掺混磷肥处理(图 3)。

在盛花期和盛铃期,所有施磷处理棉花磷吸收量均显著高于 P0。在盛花期,APP1-10、APP2-10 和 KTPP-10 处理的棉花磷吸收量显著低于 DAP,APP2-50 和 KTPP-50 处理棉花磷吸收量显著高于其他磷肥处理,其中以 APP2-50 处理磷吸收量最高。在盛铃期,APP1-10 处理棉花磷吸收量

显著低于 DAP,APP2-50 处理棉花磷吸收量显著高于 DAP 和其他聚磷酸盐掺混磷肥处理(图 3)。

2.4 不同掺混聚磷酸磷肥对棉花产量形成的影响

图 4 数据显示,随着聚磷酸盐掺混比例的增加,棉花单株结铃数、籽棉产量和伏前桃数总体表现出增加的趋势,而棉花单铃重,秋桃和伏桃没有表现出类似规律。在相同掺混比例下,3 种不同聚磷酸盐掺混磷肥处理棉花单株结铃数、籽棉产量和伏前桃数均表现为以 APP2 为原料的处理最高,其次是以 KTPP 和 APP1 为原料的掺混磷肥处理。

与 DAP 相比,除 KTPP-10 处理以外,其他聚磷酸盐掺混磷肥处理棉花结铃数均显著增加,其中以 APP2-50 处理棉花结铃数最高。APP2-30、KTPP-30 和 APP2-50 处理棉花籽棉产量显著高于 DAP,其中以 APP2-50 处理棉花籽棉产量最高,但其

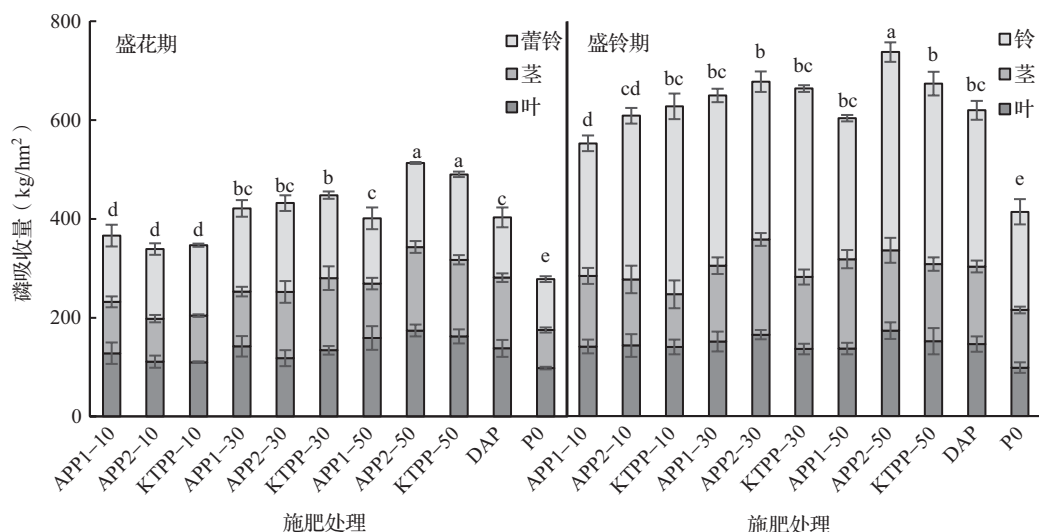


图3 不同施肥处理下棉花盛花期和盛铃期地上部磷吸收量

余聚磷酸掺混磷肥处理籽棉产量与 DAP 差异不显著。以上结果表明, 施磷能显著增加棉花单株结铃数和籽棉产量, 但对棉花单铃重无显著性影响, APP2-50 处理棉花结铃数最大, 籽棉产量也最高 (图 4)。

由图 4 可知, 所有施磷处理棉花伏前桃和伏桃均显著高于 P0。棉花伏前桃在 APP2-10、APP1-30、APP2-30、K1TPP-30、APP1-50、APP2-50 和

K1TPP-50 处理下均显著高于 DAP, 其中以 APP2-50 处理最高, APP1-10 和 K1TPP-10 处理与 DAP 差异不显著。棉花伏桃在 APP2-10、APP2-50 和 K1TPP-50 处理下显著高于 DAP, 其中以 APP2-50 处理最高, K1TPP-10 和 APP1-30 处理棉花伏桃数显著低于 DAP。棉花秋桃在 APP1-10、K1TPP-10、APP1-30 和 K1TPP-30 处理下显著高于 DAP, 其余聚磷酸掺混磷肥处理与 DAP 无显著性差异 (图 4)。

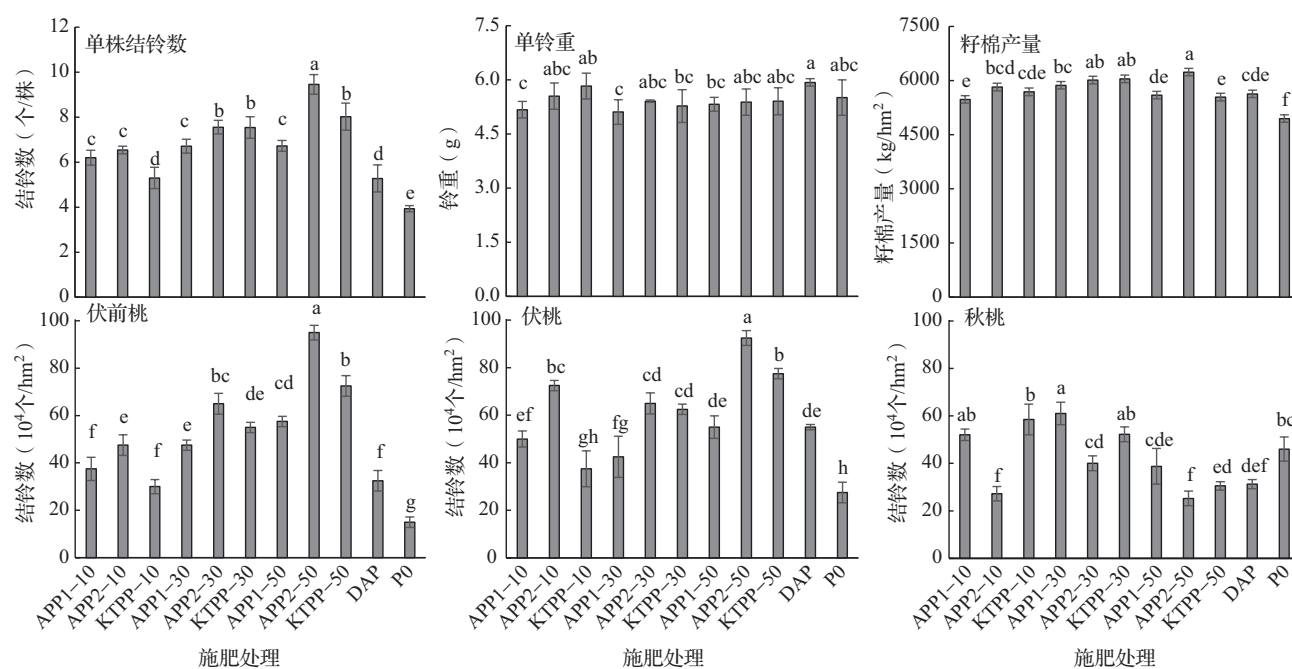


图4 不同施肥处理下棉花产量、产量构成及结铃动态

注: 柱上不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。



2.5 不同掺混聚磷酸磷肥对棉花磷肥农学利用率和棉花施肥经济效益的影响

表 2 数据显示, 随着聚磷酸盐掺混比例的增加, 棉花磷肥农学利用率和产投比以 APP2 为原料的掺混磷肥处理表现出增加趋势, 而以 APP1 和 KTPP 为原料的掺混磷肥处理则总体表现为先增加后降低的趋势。在相同掺混比例下, 3 种不同聚磷酸盐掺混磷肥处理棉花磷肥农学利用率和产投比表现为以 APP2 为原料的处理最高。

与 DAP 相比, APP1-30、APP2-30、KTPP-30、APP2-50 处理的磷肥农学利用率显著高于 DAP。APP2-10、KTPP-10 磷肥农学利用率高于 DAP, 处理间无显著性差异。在等磷施用量的前提下, 掺混聚磷酸磷肥各处理肥料投入成本均高于 DAP。与 DAP 相比, APP1-10、APP1-30 和 APP1-50 处理肥料投入成本分别增加 16、48 和 80 元/hm²。以 APP2 为聚磷酸掺混原料的磷肥投入成本与 APP1 一致。相比 DAP, KTPP-10、KTPP-30 和 KTPP-50 处理肥料投入成本分别增加 144、431 和 719 元/hm²。产投比数据表明, APP2-30 和 APP2-50 处理产投比显著高于 DAP。KTPP-10、KTPP-30 和 KTPP-50 处理产投比均显著低于 DAP。APP1-10、APP2-10、APP1-30 和 APP1-50 处理产投比与 DAP 无显著性差异 (表 2)。

表 2 不同掺混聚磷酸磷肥对棉花磷肥农学利用率、棉田肥料投入成本及产投比的影响

处理	磷肥农学利用率 (kg/kg)	肥料投入总成本 (元/hm ²)	产投比 (%)
APP1-10	4.45e	2531.1	22.81de
APP2-10	7.34bcd	2531.1	24.31bc
KTPP-10	6.22cde	2658.9	22.54e
APP1-30	7.75bc	2563.1	24.20bc
APP2-30	8.95ab	2563.1	24.81ab
KTPP-30	9.24ab	2946.4	21.58f
APP1-50	5.46de	2595.1	22.73de
APP2-50	10.81a	2595.1	25.43a
KTPP-50	5.00e	3233.9	17.86g
DAP	5.74de	2515.1	23.63cd
PO	—	1419.4	—

注: 同列数据后不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著 ($P<0.05$)。养分投入量为 N 330 kg/hm², P₂O₅ 120 kg/hm², K₂O 90 kg/hm²。肥料价格按照 2021 年新疆本地市场价计算, APP 6800 元/t, KTPP 12000 元/t, DAP 6000 元/t, 尿素 1500 元/t, 硫酸钾 2500 元/t, 籽棉 11000 元/t。

3 讨论

3.1 不同掺混聚磷酸磷肥对土壤磷有效性和棉花磷肥利用率的影响

研究表明, 磷在施入土壤 3 h 后大量被土壤固定^[5], 其原因是正磷酸盐在土壤中易与 Ca²⁺、Fe³⁺、Al³⁺ 等发生化学沉淀或被次生黏土矿物吸附, 这同样是造成土壤磷有效性差和磷肥当季利用率低的主要原因^[19]。在本研究中, 0 ~ 20 cm 土壤有效磷含量在棉花盛花期表现为 APP2-50 处理显著高于 DAP, 在盛铃期 APP2-30 和 APP2-50 处理显著高于 DAP。此外, 在盛铃期 APP2-50 处理棉花生物量和磷吸收量 (图 2、3), 以及成熟期籽棉产量和磷肥农学利用率均显著高于 DAP 处理 (图 4, 表 2)。综合以上结果表明, 以 APP2 为主要聚磷酸盐掺混原料的磷肥可以提高土壤磷有效性和磷肥利用效率 (图 1)。这与高艳菊等^[20] 和熊子怡等^[21] 的研究结果类似。其原因是聚磷酸盐施入土壤一定时间后才能被水解为正磷酸盐, 这一过程在一定程度上可以减少土壤对其的化学沉淀与吸附^[17]。另一方面, 在棉花盛花期和盛铃期, 0 ~ 20 cm 土壤有效磷含量在以 APP1 和 KTPP 为原料的掺混聚磷酸磷肥处理与 DAP 相比无差异 (图 1), 甚至 APP1-50 处理盛铃期棉花磷吸收量、籽棉产量和磷肥农学利用率还低于 DAP 和 KTPP-50 处理 (图 3、4, 表 2)。造成以上结果的原因可能与供试聚磷酸磷肥的聚合度及聚合率有关。在本研究中, 与 APP2 相比, APP1 和 KTPP 的平均聚合度更高, 且 KTPP 聚合率高于 APP1。根据 Mcbeath 等^[22] 研究, 发现聚磷酸盐比正磷酸盐在土壤中的吸附亲和力更高, 最新研究也指出三聚磷酸盐施入土壤后会被土壤矿物先吸附, 随后才会表现出水解特性^[23]。这意味着较高聚合度聚磷酸盐可能会被土壤直接吸附, 进而影响其水解释放正磷酸盐, 这可能是造成在本试验中以 APP1 和 KTPP 为原料的聚磷酸掺混磷肥肥效不如 APP2 为原料处理的主要原因。陈小娟等^[24] 也发现以中低聚合度为主的聚磷酸磷肥在满足玉米生长前期磷养分需求方面要优于高聚合度聚磷酸铵。此外, 核磁共振测定焦磷酸盐的半衰期为 15 ~ 21 d^[25], 而三偏磷酸盐在水中培养 90 d 后仅水解了 30%^[15]。在本试验中, 磷肥分别在棉花花蕾期、盛花期及盛铃期分 3 次施用, 每次施肥间隔在 25 ~ 35 d。APP2 聚合度为 1.8, 其主要成分为



焦磷酸盐,加之盛花期—吐絮期棉花磷吸收量占全生育期的 72.73%^[26],这表明以 APP2 为主的聚磷酸盐水解释放正磷酸盐的速度与棉花吸磷高峰期更匹配。当 APP2 掺混比例为 30% 和 50% 时,大量焦磷酸盐在土壤中可以形成稳定的磷源,以保证棉花在不同施肥间隔期间的持续供磷。本文中,造成 KTPP 土壤磷含量、磷吸收量方面等优于 APP1 可能是因为聚合率所造成的。高艳菊等^[20]指出高聚合率聚磷酸盐在提高土壤有效磷含量上更具优势。综合上述来看,聚合度和聚合率均会影响聚磷酸盐在土壤中的有效性磷,在本研究中以低聚合度 APP2 为原料,掺混比例为 30% 和 50% 的掺混聚磷酸磷肥在提高土壤磷有效性和棉花磷肥利用率方面有较好表现。

3.2 不同聚磷酸掺混磷肥对棉花产量形成和经济效应分析

施用聚磷酸铵能够显著提高番茄成熟期植株的磷吸收量和产量^[24]。喷施聚磷酸磷肥于棉花上也显著提高了籽棉产量^[25]。在本研究中,APP1-30、APP2-30、KTPP-30 和 APP2-50 处理棉花籽棉产量显著高于 DAP,其中以 APP2-50 棉花籽棉产量最高,但各施肥处理间棉花单铃重无显著性差异,由此可见聚磷酸掺混磷肥增产主要是通过增加棉花的结铃数引起的(图 4)。此外,图 4 棉花结铃动态显示,APP2-10、APP2-30 和 APP2-50 处理棉花伏前桃和伏桃数量显著高于 DAP 和其他同掺混比例的掺混磷肥处理,而 APP2-50 和 APP2-30 处理的秋桃数又与 DAP 相当,且显著低于 P0 处理。由此可见,掺混聚磷酸磷肥可以提高棉花产量,主要表现在提高棉花结铃数和促进早期铃数的成熟。本研究中聚磷酸掺混磷肥处理能在土壤中维持较高的磷有效性(图 1),同时棉花地上部干物质积累量也显著高于 DAP 和 P0 处理(图 2),这些结果是保证棉花形成较高结铃数的关键。研究发现棉花结铃数是对磷肥施用表现最为敏感的产量性状,磷素在棉花成铃过程中起重要作用,磷肥的充分供应可以有效减少棉花叶片的早衰和脱落,进而提高棉花光合产物向蕾铃的转移,以提高棉花的结铃数^[27-28]。

聚磷酸磷肥在农资市场普遍价格较高,导致农户的接受度低。在本研究中,将一定比例聚磷酸盐和常规水溶磷肥掺混后施用会提高滴灌棉花的肥料投入成本,但以 APP1 和 APP2 为原料的掺混磷肥成本增加幅度不大,相比 DAP,APP1-10、APP1-

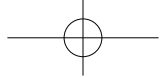
30 和 APP1-50 处理肥料投入成本分别增加 16、48 和 80 元/hm²,以 APP2 为聚磷酸掺混原料的磷肥投入成本与 APP1 一致。与 DAP 相比,KTPP-10、KTPP-30 和 KTPP-50 处理肥料投入成本分别增加 144、431 和 719 元/hm²(表 2)。进一步分析棉花产投比数据,以 APP2-30 和 APP2-50 处理产投比显著高于 DAP,而 APP1-10、APP2-10、APP1-30 和 APP1-50 处理产投比与 DAP 无显著性差异。综合磷肥农学利用率,棉花产量和棉花肥料产投比来看,APP2-50 可以作为滴灌棉田兼顾磷肥高效和经济施用的肥料选择。

4 结论

将聚磷酸盐按一定比例和常规水溶磷肥掺混施用可以提高滴灌棉田土壤有效磷含量,且对棉花产量增加有一定作用,是一种兼顾磷肥高效和经济施用的施肥技术。在聚磷酸掺混磷肥的实际应用要优先考虑选择低聚合度和高聚合率的聚磷酸盐原料,且要充分考虑最佳的掺混比例。在新疆滴灌棉田中,选择平均聚合度为 1.8 的聚磷酸铵与常规水溶性磷酸二铵按照含磷量各为 50% 的比例进行掺混在棉花磷肥利用率、产量和产投比等方面表现最优。

参考文献:

- [1] 沈善敏. 论我国磷肥生产与应用对策(一)[J]. 土壤通报, 1985, 16(3): 97-103.
- [2] 张海涛, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 284-290.
- [3] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2018 [R/OL]. (2018-12-20) [2022-09-10]. <http://www.mnr.gov.cn>.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [M/OL]. [2022-09-10]. <http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2021/indexch.htm>.
- [5] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 磷在土壤中有有效性的衰减[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 323-329.
- [6] Blane L, Mercik S, Koerschens M, et al. Phosphorus content in soil uptake by plants and balance in three European long-term field experiments [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 56(3): 263-275.
- [7] Wang Y, Marschner P, Zhang F S. Phosphorus pools and other soil properties in the rhizosphere of wheat and legumes growing in three soils in monoculture or as a mixture of wheat and legume[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1/2): 283-298.
- [8] Terry J R, Bingah H, Zed R. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting

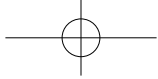


- phosphorus dynamics [J]. Plant and Soil, 2010, 326 (1/2): 159–170.
- [9] Bol R, Julich D, Brodlin D, et al. Dissolved and colloidal phosphorus fluxes in forest ecosystem: an almost blind spot in ecosystem research [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2016, 179 (4): 425–438.
- [10] Dick R, Tabatabai M. Hydrolysis of polyphosphates by corn roots [J]. Soil Science, 1986, 142 (3): 132–140.
- [11] Kulakovskaya T V, Vagabov V M, Kulaev I S. Inorganic polyphosphate in industry, agriculture and medicine: modern state and outlook [J]. Process Biochem, 2012, 47 (1): 1–10.
- [12] 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.
- [13] Khasawneh F E, Hashimoto I, Sample E C. Reactions of ammonium ortho- and polyphosphate fertilisers in soil: III. Effects of associated cations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43: 58–65.
- [14] Blanchar R W, Hossner L R. Hydrolysis and sorption of ortho-, pyro-, tripoly-, and trimetaphosphate in 32 midwestern soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33 (4): 622–625.
- [15] Torres–Dorante L O, Claassen N, Steingrobe B, et al. Hydrolysis rates of inorganic polyphosphates in aqueous solution as well as in soils and effects on P availability [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168 (3): 352–358.
- [16] 马林, 夏晓阳, 普正仙, 等. 聚磷酸磷肥不同基追比对石灰性土壤上滴灌盆栽棉花生长的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28 (5): 946–952.
- [17] Hamilton J G, Hilger D, Peak D. Mechanisms of tripolyphosphate adsorption and hydrolysis on goethite [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 491: 190–198.
- [18] Shah J A, Chu G. Short-chain soluble polyphosphate fertilizers increased soil P availability and mobility by reducing P fixation in two contrasting calcareous soils [J]. Peer Journal, 2021, 9 (3): e11493.
- [19] Rutkowska B, Szulc W, Sosulski, T, et al. Soil micronutrient availability to crops affected by long-term inorganic and organic fertilizer applications [J]. Plant Soil and Environment, 2014, 60 (5): 198–203.
- [20] 高艳菊, 亢龙飞, 褚贵新. 不同聚合度和聚合率的聚磷酸磷肥对石灰性土壤磷与微量元素有效性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (5): 1294–1302.
- [21] 熊子怡, 邱焯, 郭琳钰, 等. 聚磷酸铵在土壤中有有效性的变化及其影响因素 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (8): 1473–1480.
- [22] Mcbeath T M, Lombi E, McLaughlin M J, et al. Pyrophosphate and orthophosphate addition to soils: sorption, cation concentrations, and dissolved organic carbon [J]. Soil Research, 2007, 45 (4): 237–245.
- [23] Hamilton J G, Grosskleg J, Hilger D, et al. Chemical speciation and fate of tripolyphosphate after application to a calcareous soil [J]. Geochem T, 2018, 19 (1): 1–11.
- [24] 陈小娟, 杨依彬, 龚林, 等. 三种不同聚合度组成的聚磷酸铵对玉米苗期生长的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (2): 337–342.
- [25] Mcbeath T M, Smernik R J, Lombi E, et al. Hydrolysis of pyrophosphate in a highly calcareous soil: a solid-state phosphorus 31 NMR study [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70 (3): 856–862.
- [26] 孙克刚, 姚健, 焦有, 等. 棉花的需肥规律与施钾研究 [J]. 土壤肥料, 1999 (3): 12–14.
- [27] Li H, Wang J, Huang X, et al. Novel intra-boll yield components and Q-score can further evaluate the effect of phosphorus fertilizer on cotton yield and fiber quality [J]. Field Crops Research, 2022, 275: 108325.
- [28] Ahmad I, Zhou G, Zhu G, et al. Response of boll development to macronutrients application in different cotton genotypes [J]. Agronomy, 2019, 9 (6): 322.

Effects of different proportions of polyphosphate combined with water-soluble diammonium phosphate on yield formation and economic effect of drip-irrigated cotton

JIANG Xi-liang¹, MA Lin¹, MA Wei-dong¹, GAN Zi-hua¹, ZHANG Jing-wen¹, WEI Chang-zhou¹, LI Jun-hua¹, PU Zheng-xian², WANG Fang², ZHANG Xin-jiang^{1*} (1. Department of Agricultural Resources and Environment, College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832003; 2. Research and Development Center of Yunnan Yuntianhua Co. Ltd., Kunming Yunnan 650228)

Abstract: The purpose of this paper was to explore the best mixed application mode of polyphosphate and conventional water-soluble phosphate fertilizer in drip-irrigated cotton field, in order to achieve the purpose of economic and efficient utilization of phosphate fertilizer. Under equal phosphorus application (P_2O_5 120 kg/hm²), the ammonium polyphosphate 1 (APP1), ammonium polyphosphate 2 (APP2) and potassium tripolyphosphate (KTPP) were mixed with water-soluble diammonium phosphate according to three different ratios to form 9 kinds of polyphosphate fertilizers. In these 9 polyphosphate fertilizers, 10%, 30% and 50% of the total P_2O_5 came from APP1, APP2 and KTPP, respectively, which were expressed as APP1-10, APP2-10, KTPP-10, APP1-30, APP2-30, KTPP-30, APP1-50, APP2-50 and KTPP-50. At the same time, conventional water-soluble diammonium phosphate treatment without polyphosphate (DAP) and no phosphate fertilizer (P0) were used



as controls. The soil available phosphorus contents at 0–20 cm and 20–40 cm soil depth, biomass and phosphorus uptake of drip irrigated cotton were measured at full flowering stage and boll stage. At the same time, the boll setting dynamics of cotton was monitored, and the yield and yield components were determined at the mature stage. The soil available phosphorus content in 0–20 cm, cotton shoot biomass, phosphorus uptake of cotton, boll number per plant, seed yield, boll number before dog days, phosphorus agronomic utilization rate and output-input ratio increased with the increase of polyphosphate blending ratio. In terms of increasing soil available phosphorus content, cotton shoot biomass, phosphorus uptake of cotton, boll number per plant, seed yield, the boll number before dog days, phosphorus agronomic utilization rate and output-input ratio, the overall performance of three different polyphosphates was that APP2 treatment was the best, followed by KTPP treatment, and finally APP1 treatment. At the full flowering stage and boll stage, the soil available phosphorus content in 0–20 cm soil and phosphorus uptake of cotton in APP2-50 treatment were significantly higher than those in DAP and other phosphorus application treatments, while 20–40 cm soil available phosphorus content had no significant difference among all fertilization treatments. There was no significant difference in cotton biomass between APP2-50 and DAP treatment at full flowering stage, but at boll stage, the biomass of cotton in APP2-50 treatment was significantly higher than that in DAP and other phosphorus treatments. The boll number of cotton treated with polyphosphate fertilizers was significantly higher than that of DAP, but there was no difference in cotton boll weight among different phosphorus application treatments. The seed yield, phosphorus agronomic utilization rate and output-input ratio of APP2-50 were the highest. Compared with DAP, APP2-50 treatment increased seed cotton yield, phosphorus agronomic utilization rate and yield-input ratio by 10.7%, 88.3% and 7.6%, respectively. The above results show that the mixed application of APP2 treatment with water-soluble diammonium phosphate according to 50% of the total phosphorus content of P_2O_5 can increase the content of available phosphorus in drip-irrigated field, and has a positive effect on the increase of cotton yield and the ratio of output to input. It is a fertilization choice with both high efficiency and economic application of phosphate fertilizer.

Key words: ammonium polyphosphate; drip-irrigated cotton; phosphorus agronomic utilization rate; output-input ratio