

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21564

## 不同滴灌磷肥对棉田土壤磷含量及磷肥利用率的影响

甘浩天, 廖欢, 郝海波, 管新羽, 王卓然, 侯振安\*

(石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003)

**摘要:** 通过田间试验, 研究不同磷肥对滴灌棉田土壤有效磷及棉花产量和磷肥利用效率的影响。试验选取 5 种滴灌用磷肥: 磷酸一铵 (MAP)、聚磷酸铵 (APP) 以及大量元素水溶肥固体型 (SF)、悬液型 (LSF)、清液型 (LCF), 并以不施磷肥为对照 (CK), 共 6 个处理。测定土壤有效磷含量以及棉花生长、磷素吸收和产量。结果表明: 在一个灌溉施肥周期内, 施用清液型水溶肥 (LCF) 和聚磷酸铵 (APP) 较其它处理显著增加了土壤有效磷含量; 在棉花各生育期, 聚磷酸铵 (APP) 0 ~ 20 cm 土层土壤有效磷含量较其它处理显著增加, 清液型水溶肥 (LCF) 20 ~ 40 cm 土层土壤有效磷含量最高, 在盛铃期时较聚磷酸铵 (APP) 显著增加了 21.41%; 聚磷酸铵 (APP) 较磷酸一铵 (MAP) 显著促进了吐絮期棉花茎、叶的干物质及磷素积累量, 而清液型水溶肥 (LCF) 干物质和磷素吸收在棉铃的分配比例最高, 分别为 64.89%、69.28%; 清液型水溶肥 (LCF) 产量最高, 聚磷酸铵 (APP) 次之, 分别较磷酸一铵 (MAP) 提高了 8.97%、2.87%; 施用清液型水溶肥 (LCF) 较其它处理显著提高了棉花的磷肥偏生产力和磷肥农学效率, 而聚磷酸铵 (APP) 的磷肥表观利用率最高。综上, 施用聚磷酸铵 (APP) 和清液型水溶肥 (LCF) 能使土壤有效磷含量保持在较高水平, 但清液型水溶肥有更强的磷素迁移能力。两种肥料 (聚磷酸铵、清液型水溶肥) 均能促进棉花干物质积累和磷素吸收, 但聚磷酸铵的磷肥表观利用率最高, 而清液型水溶肥则是增加了磷肥偏生产力和磷肥农学效率, 增产效果最为显著。

**关键词:** 滴灌磷肥; 土壤有效磷; 磷素吸收; 磷肥利用率

棉花作为新疆农业发展的主导产业, 在区域经济发展中占有重要地位<sup>[1]</sup>。2020 年, 新疆植棉面积为  $250.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占到全国植棉总面积的 78.9%<sup>[2]</sup>。磷是棉花生长发育不可缺少的主要营养元素, 是作为影响产量的关键因素之一。新疆大部分土壤为石灰性土壤, 由于大量重碳酸盐的存在, 大部分的磷在当季被土壤固定, 导致主要农作物磷肥当季利用率普遍较低<sup>[3-4]</sup>。因此, 如何增加土壤磷素的有效性, 提高磷肥利用率, 对实现新疆棉田可持续发展有重大意义。

目前, 滴灌水肥一体化技术被认为是提高水肥利用效率的最佳技术<sup>[5]</sup>。研究表明, 作物在滴灌条件下的水分利用效率更高, 并且能使水肥达到同步供应, 使作物对养分的吸收更加高效<sup>[6-8]</sup>。可以根

据土壤状况和作物生长发育规律, 合理调控灌溉和施肥, 减少水分养分的渗漏淋失, 提高水肥利用效率, 进而减少施肥量, 降低肥料成本<sup>[9-11]</sup>。

传统磷肥多作基肥施用, 随着滴灌技术的大面积应用, 磷肥随水施用技术应运而生。目前, 适用于水肥一体化的固体水溶性磷肥有磷酸一铵、聚磷酸铵、磷酸脲等<sup>[12]</sup>。有研究表明, 随水滴施液体磷酸一铵较固体磷酸一铵显著提高石灰性土壤磷素的有效性, 促进冬小麦干物质积累, 增加产量<sup>[13]</sup>。近年来, 以磷酸一铵、磷酸二铵或者磷酸为原料的酸性磷肥及液体复合磷肥、载体磷肥等成为新型高效磷肥的主要发展方向之一<sup>[14]</sup>。有研究表明, 滴灌条件下, 施用液体磷肥 (磷酸、焦磷酸、聚磷酸) 可显著提高磷在土壤中的移动性和有效性, 增加作物磷素吸收量和产量<sup>[15-17]</sup>。Bertrand 等<sup>[18]</sup>利用  $^{32}\text{P}$  示踪技术比较了三料磷肥、磷酸一铵、磷酸二铵和磷酸在石灰性土壤上的施用效果, 结果表明, 液体磷酸显著提高了植株对  $^{32}\text{P}$  的富集吸收。虽然, 国内外针对不同种类和形态磷肥的施用效果已有大量研究<sup>[19-21]</sup>, 但关于不同磷肥随水滴施对土壤磷素及作物磷素吸收利用和产量的研究相对

收稿日期: 2021-10-25; 录用日期: 2022-01-23

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200100, 2018YFD0800804)。

作者简介: 甘浩天 (1996-), 硕士研究生, 从事新型肥料与现代施肥技术的研究。E-mail: ganhaotianshz@163.com。

通讯作者: 侯振安, E-mail: hzaty@163.com。

较少。

了解不同磷肥随水滴施对土壤磷素转化及有效性的影响,对于滴灌棉田合理施用磷肥、提高磷肥利用率至关重要。研究选择5种滴灌肥料[磷酸一铵、聚磷酸铵和3种大量元素水溶肥(固体型、悬液型和清液型)],探讨不同磷肥对滴灌棉田土壤磷含量及棉花产量和磷肥利用率的影响,旨在为滴灌棉田磷肥合理施用提供依据。

表1 试验地土壤基本理化性质

土层深度 (cm)	有机质 (g/kg)	硝态氮 (mg/kg)	铵态氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
0 ~ 20	15.80	44.16	3.28	32.73	449.40
20 ~ 40	12.50	36.38	1.63	27.81	376.49
40 ~ 60	5.43	19.70	2.05	9.01	239.52
60 ~ 80	3.16	9.85	3.03	6.43	198.99
80 ~ 100	3.51	6.04	3.56	6.23	183.85

## 1.2 试验设计与处理

试验采用单因素随机区组设计,设置6个处理:(1)对照(不施磷肥,CK);(2)磷酸一铵(MAP,12-61-0);(3)聚磷酸铵(APP,18-60-0);(4)大量元素水溶肥(固体型)(SF,11-20-20);(5)大量元素水溶肥(悬液型)(LSF,15-15-7.5);(6)大量元素水溶肥(清液型)(LCF,19-9-2.5)。其中,磷酸一铵(MAP)为当地滴灌棉田普遍使用的磷肥品种。试验中肥料养分含量均以重量百分含量表示。每个处理重复3次,共18个试验小区,小区面积220 m<sup>2</sup>。

试验各处理氮、磷、钾肥用量保持一致,均为氮肥(N)300 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)90 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥(K<sub>2</sub>O)75 kg/hm<sup>2</sup>。因不同肥料中氮、磷、钾养分含量不同,所以每次施肥时保持磷素养分用量一致,氮、钾养分不足分别用尿素(N 46%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)补齐。

棉花种植采用机采棉模式,一膜三管六行,行距配置为66 cm+10 cm,株距为10 cm,播种密度为25×10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>。2021年4月18日播种,干播湿出。灌溉方式为膜下滴灌,棉花生长期共灌水9次,灌水周期7~10 d,总灌水量450 mm。试验中所有肥料全作追肥,在棉花生长期分6次随水滴施。肥料施用时间及分配比例见表2。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

田间试验于2021年在新疆石河子市石河子大学教学试验场(44°33'N,85°98'E)进行。该地区为温带大陆性气候,多年平均降水量为210 mm,年蒸发量为1660 mm。土壤类型为灰漠土,质地为壤土。土壤基本理化性状如表1所示,供试作物为棉花(新陆早64)。

表2 施肥时间及分配比例 (%)

肥料	6月20日	6月29日	7月6日	7月14日	7月22日	8月2日
N	10	18	20	20	17	15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	18	20	20	17	15
K <sub>2</sub> O	12	18	20	20	18	12

### 1.3 样品采集与测定

土壤样品:分别在棉花蕾期(6月23日)、初花期(7月9日)、盛花期(7月25日)、盛铃期(8月5日)采集土壤样品,采样深度为0~20、20~40、40~60 cm。同时,选取第3个灌水施肥周期(7月6日),分别在施肥后1、2、3、5、7 d采取不同土层(0~20、20~40、40~60 cm)土壤样品。有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,硝态氮和铵态氮含量(新鲜土样)采用2 mol/L KCl浸提-流动分析仪测定,有效磷含量采用0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

植株样品:在棉花蕾期(6月23日)、初花期(7月9日)、盛花期(7月25日)、盛铃期(8月5日)、吐絮期(9月5日)采集植株样品,每个小区选取3个采样点,每个采样点采集3株长势均匀的植株,从子叶节处剪断,分成茎、叶、铃(花

或蕾) 3 部分。植株样品洗净后, 105℃下杀青 30 min, 75℃烘至恒重, 称量干物质重。样品粉碎后过 0.05 mm 筛, 采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮, 钒钼黄比色法测定棉花各器官全磷含量。

产量: 在棉花吐絮期, 每个处理统计 6.67 m<sup>2</sup> 面积内所有株数、棉铃数; 棉花吐絮后每小区分 3 次采收 90 朵完全吐絮棉桃, 测定平均单铃重, 并计算棉花产量<sup>[22]</sup>, 最后实收记产。

#### 1.4 数据处理与分析

磷肥农学效率 (kg/kg) = (施磷区产量 - 对照产量) / 磷肥用量 (1)

磷肥表观利用率 (%) = (施磷区植株磷素吸收量 - 对照植株磷素吸收量) / 施磷量 × 100 (2)

磷肥偏生产力 (kg/kg) = 施磷区产量 / 磷肥施用量 (3)

数据处理和制图使用 Excel 2010。应用 SPSS 22.0 进行数据的单因素方差分析, 方差分析达到显著性水平 ( $P < 0.05$ ) 后, 采用 Duncan 法进行处理间的多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 一个灌水施肥周期内土壤有效磷含量的动态变化

在一个灌水施肥周期内 (7 d), 0 ~ 60 cm 土层土壤有效磷含量变化如图 1 所示。各施磷处理不同土层土壤有效磷含量均显著高于 CK。0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层土壤有效磷含量在 1 ~ 3 d 内快速降低, 随后趋于平缓; 40 ~ 60 cm 土层土壤有效磷含量变化较小, 且不同施磷处理间无显著差异。从不同施磷处理 (MAP、APP、SF、LSF、LCF) 来看, 在 0 ~ 40 cm 土层, LCF 处理在 1 ~ 2 d 内土壤有效磷含量始终最高, 显著高于 MAP、APP、SF、LSF 处理, 这 4 个处理间无显著差异。从第 3 d 开始 APP 与 LCF 处理间差异不显著, 但显著高于 MAP、SF、LSF 处理; 3 ~ 7 d, 0 ~ 20 cm 土层 MAP、SF 和 LSF 处理间无显著差异, 而在 20 ~ 40 cm 土层 LSF 处理显著低于 MAP 和 SF 处理。40 ~ 60 cm 土层土壤有效磷含量较 0 ~ 40 cm 土层显著降低, 在整个灌水施肥周期内各磷肥处理土壤有

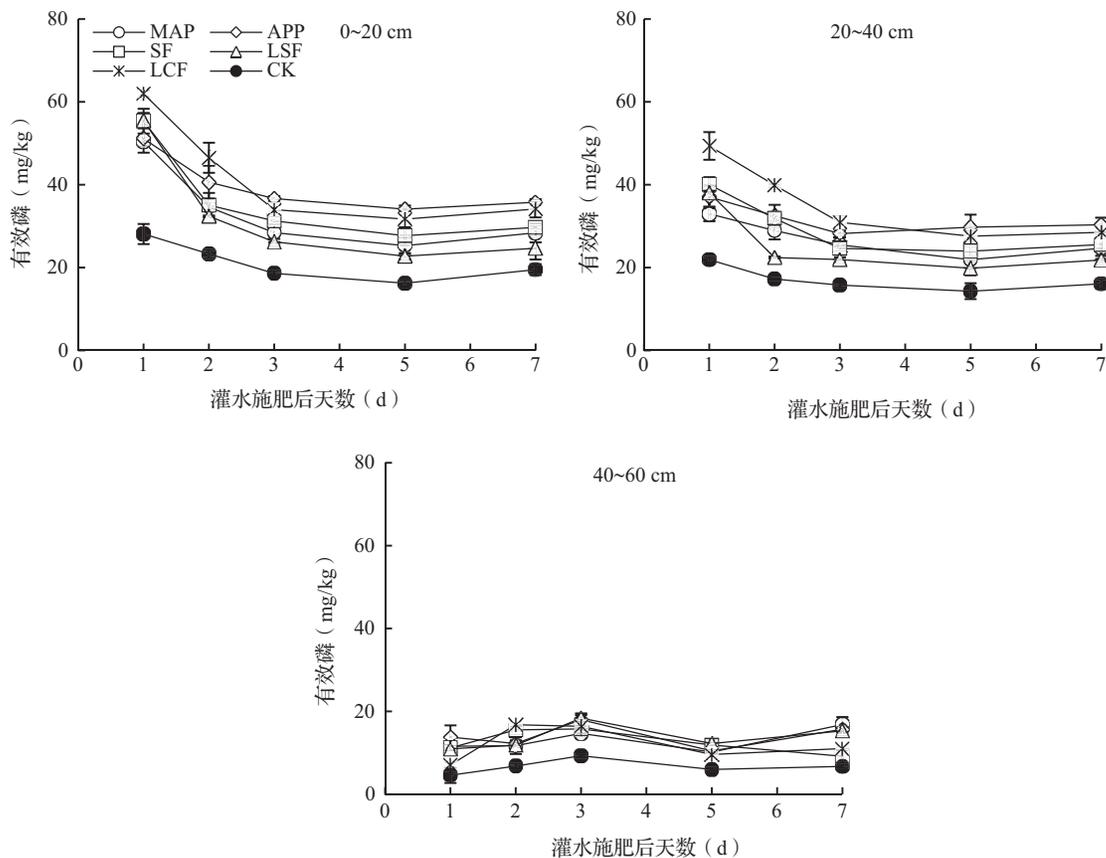


图 1 不同滴灌磷肥对棉花各生育期土壤有效磷含量的影响

效磷含量趋势平缓无明显变化, 且处理间无显著差异。

### 2.2 棉花生育期内土壤有效磷含量的动态变化

棉花蕾期, 各施磷处理 0 ~ 20 cm 土层土壤有效磷含量均高于 CK, APP、SF 和 LCF 处理较常规磷肥 (MAP) 分别提高了 73.26%、20.61% 和 44.52%。初花期、盛花期各施磷处理较 CK 处理各

土层土壤有效磷含量均有显著提高, 但不同施磷处理间差异不显著。盛花期各施磷土壤有效磷含量较其它时期有所提高。盛铃期, 各磷肥处理 0 ~ 40 cm 土层土壤有效磷含量差异极显著 ( $P < 0.01$ ), LCF 处理在 20 ~ 40 cm 土层中土壤有效磷含量最高, 较聚磷酸铵 (APP) 处理增加了 21.41%, 说明其有更强的移动性 (图 2)。

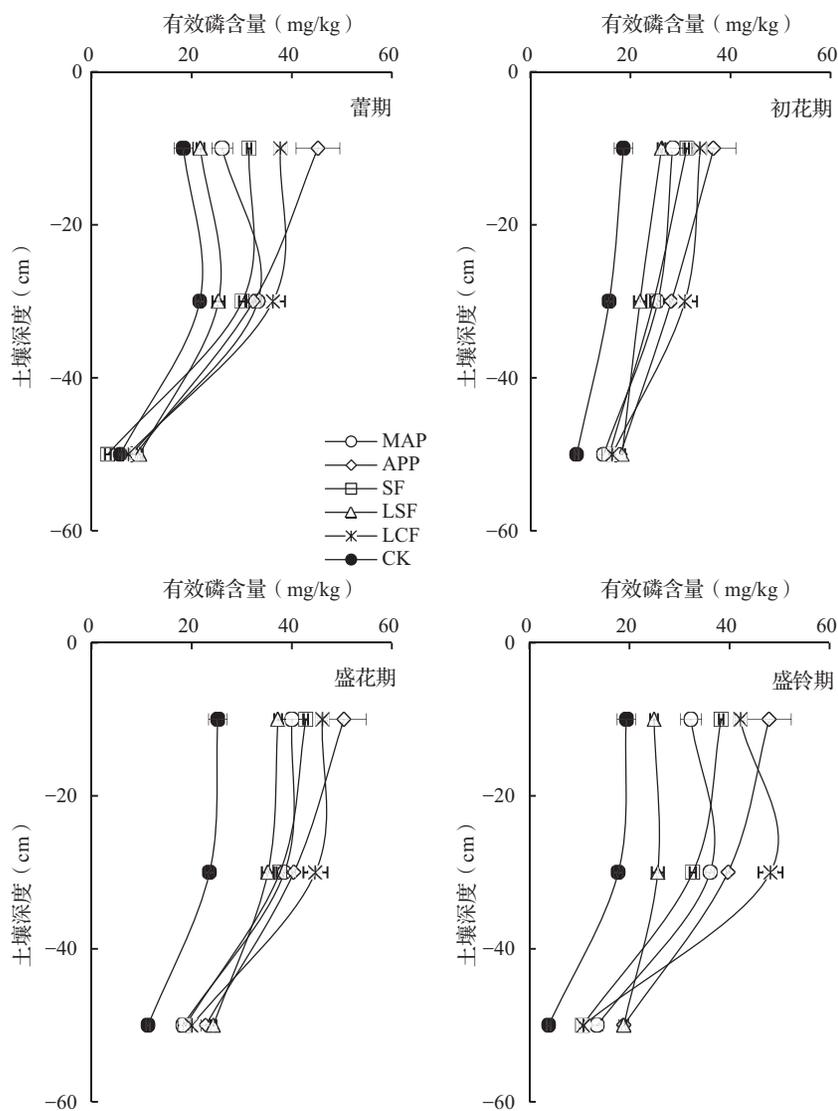


图 2 不同滴灌磷肥对棉花各生育期土壤有效磷含量的影响

### 2.3 棉花干物质积累

#### 2.3.1 干物质积累动态

棉花干物质质量随出苗后天数的增加而增加, 呈现“S”形增长趋势 (图 3)。各施磷处理在出苗后 59 d 时干物质积累均显著高于 CK。最大干物质积累速率 ( $V_m$ ) 和快速积累持续期 ( $\Delta t/d$ ) 是造成

各处理间棉花干物质积累差异的主要原因 (表 3)。各处理均较 CK 显著增加了最大干物质积累速率和快速积累持续的时间。APP 和 LCF 处理的最大干物质积累速率分别较 MAP 处理 (常规磷肥) 显著增加了 40.23% 和 20.69%, 快速积累持续的时间分别较 MAP 处理减少了 1 和 9 d。

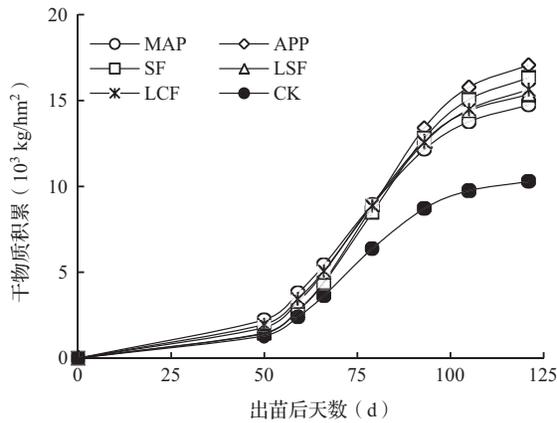


图3 不同滴灌磷肥对棉花地上部干物质质量动态变化的影响

### 2.3.2 干物质积累与分配

各施磷处理均较不施磷处理显著提高了吐絮期棉花的干物质质量(表4)。APP较MAP处理总干物质增加了15.65%，但棉铃的干物质没有显著差异，说明APP较MAP处理主要促进了茎和叶的干物质积累。LCF处理显著促进了棉铃干物质质量的增加，铃干物质分配比例较MAP处理提高了3.39%，说明LCF处理更有利于棉花生殖生长，进而提高产量。LSF处理铃的干物质质量较MAP处理无显著差异，SF处理叶的干物质质量较MAP处理降低了8.84%。

表3 不同滴灌磷肥对棉花地上部干物质积累 Logistic 方程

处理	方程	$t_0$ (d)	$t_1$ (d)	$t_2$ (d)	$\Delta t$ (d)	$V_m$ [kg/( $hm^2 \cdot d$ )]	$R^2$
MAP	$y=15219/(1+222e^{-0.073x})$	85	57	113	56	218	0.980*
APP	$y=17572/(1+730e^{-0.084x})$	99	71	126	55	306	0.978*
SF	$y=16846/(1+622e^{-0.082x})$	94	67	120	53	279	0.986*
LSF	$y=15745/(1+438e^{-0.081x})$	82	59	104	45	256	0.986*
LCF	$y=16189/(1+306e^{-0.075x})$	85	61	108	47	261	0.981*
CK	$y=10491/(1+433e^{-0.082x})$	78	58	98	40	185	0.995**

注:  $x$  为棉花出苗后天数(d),  $y$  为棉花干物质积累量( $kg/hm^2$ ),  $t_0$  为干物质积累最大速率出现时间,  $t_1$ 、 $t_2$  分别为 Logistic 生长函数的两个拐点,  $\Delta t$  为干物质快速积累持续时间,  $V_m$  为干物质最大增长速率。\* 与 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。下同。

表4 不同滴灌磷肥对棉花地上部干物质积累与分配的影响(吐絮期)

处理	干物质质量 ( $10^3 kg/hm^2$ )				分配比例 (%)		
	茎	叶	铃	总	茎	叶	铃
MAP	2.59 ± 0.14c	2.76 ± 0.14c	9.01 ± 0.09bc	14.36 ± 0.35d	18.05 ± 0.56d	19.19 ± 0.70c	62.76 ± 1.18b
APP	3.73 ± 0.06a	3.86 ± 0.07a	9.02 ± 0.44bc	16.61 ± 0.44a	22.46 ± 0.87bc	23.24 ± 0.53a	54.30 ± 1.21d
SF	3.94 ± 0.12a	2.52 ± 0.08d	9.39 ± 0.29b	15.85 ± 0.20b	24.84 ± 0.88a	15.93 ± 0.51d	59.23 ± 1.38c
LSF	3.24 ± 0.19b	3.19 ± 0.20b	8.73 ± 0.02c	15.16 ± 0.37c	21.39 ± 0.93c	21.06 ± 1.30b	57.56 ± 0.44c
LCF	2.68 ± 0.08c	2.81 ± 0.13c	10.15 ± 0.04a	15.64 ± 0.04bc	17.16 ± 0.51d	17.95 ± 0.79c	64.89 ± 0.43a
CK	2.47 ± 0.23c	2.42 ± 0.03d	5.53 ± 0.09d	10.41 ± 0.19e	23.66 ± 1.76ab	23.24 ± 0.69a	53.10 ± 1.26d

注: 不同小写字母表示同一列各处理的差异显著性 ( $P < 0.05$ )。表 6、7、8 同。

## 2.4 棉花磷素吸收

### 2.4.1 磷素积累动态

施用不同磷肥后, 棉花磷素吸收积累与棉花干物质积累量变化基本一致, 均呈“S”形(图4)。各施磷处理磷素吸收快速积累持续的时间均较不施磷处理有所增加(表5)。APP处理的棉花地上部磷素吸收最大积累速率出现的时间( $t_0$ )和磷素吸收快速积累终止时期( $t_2$ )较MAP处理都提前了1

d。而LCF的 $t_0$ 较MAP处理推后了1d, SF和LSF处理的 $t_0$ 与MAP处理无显著差异, $t_2$ 较MAP提前了8d。

### 2.4.2 磷素吸收与分配

与CK相比, 施用磷肥可以显著促进棉花的磷素吸收(表6), APP处理的磷素吸收量最高, LCF处理次之, 分别较MAP处理显著增加了15.37%、7.62%。但APP处理主要促进了棉花茎、

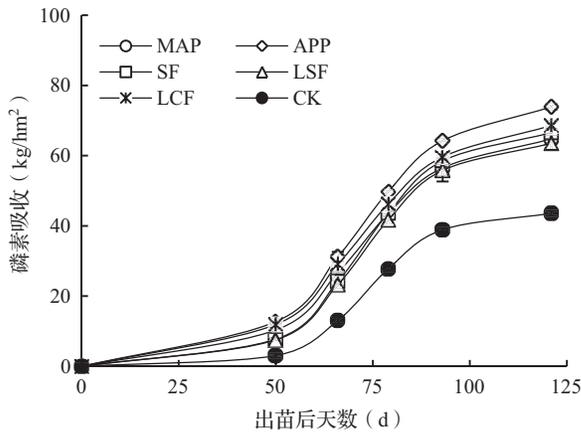


图4 不同滴灌磷肥对棉花磷素吸收动态变化的影响

叶的磷素吸收，棉铃的磷素吸收分配比例较 MAP 处理显著降低了 18.25%。磷素吸收在棉铃上的分配比例 LCF 处理最高，APP、LSF 和 SF 处理之间无显著差异，说明 LCF 处理较其它处理更有利于磷素在棉铃中的积累。

### 2.5 磷肥利用效率

不同磷肥对磷肥表观利用率、磷肥偏生产力和磷肥农学效率有显著的影响 (表 7)。磷肥表观利用率 APP 处理最高，LCF 处理次之，分别较 MAP 处理显著增加 50.16%、24.87%。LSF、SF 处理磷肥表观利用率较 MAP 处理无显著差异。而磷肥偏生产力和农学效率表现为 LCF 处理最高，APP 处

表 5 不同滴灌磷肥对棉花地上部磷素吸收 Logistic 方程

处理	方程	$t_0$ (d)	$t_1$ (d)	$t_2$ (d)	$\Delta t$ (d)	$V_m$ [kg/(hm <sup>2</sup> ·d)]	$R^2$
MAP	$y=65.872/(1+305.634e^{-0.081x})$	74	50	98	47	0.81	0.969 <sup>*</sup>
APP	$y=75.341/(1+240.859e^{-0.078x})$	73	49	97	47	1.11	0.989 <sup>*</sup>
SF	$y=67.324/(1+747.789e^{-0.092x})$	74	54	94	39	1.16	0.994 <sup>*</sup>
LSF	$y=64.275/(1+702.753e^{-0.091x})$	74	54	94	39	1.11	0.988 <sup>*</sup>
LCF	$y=69.915/(1+235.276e^{-0.078x})$	75	51	98	46	1.06	0.973 <sup>*</sup>
CK	$y=43.842/(1+2939.88e^{-0.108x})$	76	57	94	37	0.81	0.980 <sup>*</sup>

注: x 为棉花出苗后的天数 (d), y 为棉花磷素吸收量 (kg/hm<sup>2</sup>),  $t_0$  为最大磷素吸收速率出现时间,  $t_1$ 、 $t_2$  分别为 Logistic 生长函数的两个拐点,  $\Delta t$  为磷素快速积累持续时间,  $V_m$  为磷素吸收最大增长速率。

表 6 不同滴灌磷肥对吐絮期棉花磷素吸收及分配的影响

处理	磷素吸收 (kg/hm <sup>2</sup> )				分配比例 (%)		
	茎	叶	铃	总	茎	叶	铃
MAP	12.51 ± 0.70c	10.19 ± 0.83cd	39.89 ± 2.05b	62.59 ± 2.01cd	20.03 ± 1.78d	16.26 ± 0.92cd	63.71 ± 1.45b
APP	19.65 ± 0.63b	14.93 ± 0.47a	37.63 ± 2.29b	72.21 ± 2.15a	27.25 ± 1.60c	20.68 ± 0.43b	52.08 ± 1.62c
SF	22.53 ± 1.33a	9.40 ± 0.49de	33.37 ± 1.81c	65.30 ± 0.88b	34.53 ± 2.48a	14.39 ± 0.60de	51.08 ± 2.08c
LSF	19.13 ± 1.28b	11.18 ± 0.88bc	31.59 ± 1.35c	61.95 ± 4.84d	30.89 ± 1.50b	18.09 ± 1.81c	50.03 ± 1.00c
LCF	11.95 ± 0.90c	8.74 ± 0.39e	46.67 ± 1.66a	67.36 ± 1.90b	17.75 ± 1.42d	12.97 ± 0.28e	69.28 ± 1.16a
CK	10.81 ± 1.04c	12.17 ± 0.40b	20.10 ± 1.18d	43.40 ± 1.48e	24.89 ± 2.05c	28.08 ± 1.64a	47.03 ± 1.42d

表 7 不同磷肥对棉花磷素利用效率的影响

处理	磷肥表观利用率 (%)	磷肥偏生产力 (kg/kg)	磷肥农学效率 (kg/kg)
MAP	21.31 ± 2.23c	67.78 ± 1.27c	23.20 ± 1.27c
APP	32.00 ± 2.39a	70.53 ± 0.55b	25.94 ± 0.55b
SF	24.33 ± 0.98bc	66.90 ± 1.46c	22.32 ± 1.46c
LSF	20.55 ± 2.16c	63.45 ± 1.48d	18.87 ± 1.48d
LCF	26.61 ± 2.11b	73.86 ± 0.82a	29.28 ± 0.82a

理次之。LSF 处理的磷肥偏生产力和农学效率分别较 MAP 处理降低了 6.39%、18.66%。SF 处理磷肥偏生产力和磷肥农学效率较 MAP 处理无显著差异。

### 2.6 棉花产量

施用不同磷肥对棉花单株结铃数、单铃重、产量均有显著 ( $P < 0.05$ ) 影响 (表 8)。LCF 处理产量最高, 达到 6647 kg/hm<sup>2</sup>, 较 MAP 处理提高了 8.97%。APP 处理次之, 较 MAP 处理增加了 2.87%。

表 8 棉花产量及构成因子

处理	株数 (10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> )	单株结铃数 (个)	单铃重 (g)	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
MAP	23.52 ± 0.21a	4.88 ± 0.14b	5.24 ± 0.06b	6100 ± 114c
APP	23.85 ± 0.64a	4.99 ± 0.16ab	5.28 ± 0.17b	6275 ± 104b
SF	24.00 ± 0.00a	4.82 ± 0.21b	5.21 ± 0.11b	6021 ± 131c
LSF	23.55 ± 0.21a	4.86 ± 0.25b	5.00 ± 0.01c	5710 ± 133d
LCF	23.85 ± 0.64a	5.16 ± 0.29a	5.42 ± 0.05a	6647 ± 73a
CK	23.55 ± 0.21a	4.51 ± 0.16c	4.60 ± 0.11d	4879 ± 71e

## 3 讨论

土壤中有效磷的含量是土壤肥力供应状况的重要指标, 对于施肥有着直接的指导意义, 而土壤磷素有效性与磷肥品种密切相关<sup>[23-24]</sup>。本研究发现, 一个灌水施肥周期内, 第 1 d 时清液型液体肥在 0 ~ 40 cm 土层土壤有效磷含量最高, 而聚磷酸铵处理与磷酸一铵处理无显著差异, 在 3 d 后聚磷酸铵处理的有效磷含量显著高于除清液肥外的其它处理 (图 1)。这是由于聚磷酸铵是一种缓释磷肥, 由多聚磷酸盐、焦磷酸盐和正磷酸盐组成, 正磷酸盐被作物直接吸收利用, 多聚磷酸盐和焦磷酸盐逐步水解后供作物吸收<sup>[25-27]</sup>。在棉花不同生育期聚磷酸铵和清液型水溶肥处理较磷酸一铵均能显著提高土壤有效磷含量, 与高艳菊等<sup>[28]</sup>和王雪薇等<sup>[29]</sup>的研究结果一致, 在石灰性土壤中施用聚磷酸铵较磷酸一铵可显著提高土壤有效磷含量, 进而促进作物的磷素吸收量。王小华等<sup>[30]</sup>的研究结果也表明, 聚磷酸铵可以缓慢水解, 释放出正磷酸盐, 提高土壤磷的有效性。在 20 ~ 40 cm 土层, 清液型液体肥处理土壤有效磷含量显著高于其它处理, 说明清液型液体肥在石灰性土壤中的迁移能力更强, 这可能是由于清液型液体肥是一种酸性液体肥 (pH=2), 在滴灌模式下较水溶性固体聚磷酸铵有更强的溶解性, 施用后可降低土壤 pH, 土壤酸

SF 与 MAP 处理之间差异不显著, LSF 较 MAP 处理产量降低了 6.39%。各施磷处理单株结铃数与单铃重均显著高于 CK。LCF 处理与 APP 处理单株结铃数差异不显著, 且均显著高于其它处理。LCF 处理单铃重最高, APP、MAP、SF 处理间差异不显著。说明产量的差异主要是受单株结铃数和单铃重的影响。

碱度的降低可以促进磷的活化, 溶解出更多的有效磷<sup>[31-32]</sup>。

磷素吸收直接影响作物的生长发育, 从而影响作物的产量<sup>[33]</sup>。本研究发现, 在棉花盛花期土壤有效磷含量较其它时期有所提高, 这一时期也正是棉花磷素吸收快速积累期 (图 4), 这与吉冰洁<sup>[34]</sup>的研究结果一致, 植株吸磷量与土壤有效磷含量呈显著线性相关。已有研究表明, 棉花生物量、磷素积累均符合 Logistic 生长模型<sup>[35]</sup>, 本研究取得了相同的结果。干物质的生产是作物高产的前提, 其积累与合理分配是提高作物产量的关键<sup>[36]</sup>。本研究发现, 聚磷酸铵处理的最大干物质积累速率出现的时间是 99 d, 较其它处理显著推迟, 从而造成棉花后期生长旺盛, 主要促进了棉花营养器官的干物质积累, 干物质积累量最大, 但使得干物质分配到生殖器官的比例明显下降。而清液型水溶肥的生殖器官分配比例大, 这可能是由于清液型液体肥促进了棉花后期营养生长和生殖生长的协调发展。清液型水溶肥处理产量最高, 聚磷酸铵处理次之, 分别较磷酸一铵处理提高了 8.97%、2.87%。不同磷肥种类对磷肥利用率也影响显著, 本研究结果表明, 聚磷酸铵处理磷肥表观利用率最高, 清液型水溶肥处理次之, 且均较磷酸一铵处理显著增加, 而清液型水溶肥的磷肥偏生产力和农学效率较聚磷酸铵处理显著增加, 这是因为产量对其的影响<sup>[37]</sup>。

## 4 结论

施用聚磷酸铵和清液型水溶肥能使土壤有效磷含量保持在较高水平,但清液型水溶肥有更强的磷素迁移能力。相比当地普遍使用磷肥(磷酸一铵),聚磷酸铵和清液型水溶肥更能促进棉花生长和磷素吸收,但聚磷酸铵主要是促进了棉花茎、叶的干物质量和磷素吸收,提高了磷肥表观利用率。清液型水溶肥则是促进了棉铃的干物质和磷素积累,增产效果最为显著。

## 参考文献:

- [1] 邓亚辉, 宁硕. 新疆机采棉发展现状及一些问题解决与展望 [J]. 棉花科学, 2020, 42 (5): 26-29.
- [2] 晓婷. 国家统计局: 2020 年全国棉花产量持平略增 [J]. 中国纤检, 2021 (1): 97.
- [3] 常艳丽. 关中平原冬小麦/夏玉米轮作体系施肥现状调查及施肥推荐 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [4] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 915-924.
- [5] 忠智博, 翟国亮, 邓忠, 等. 水氮施量对膜下滴灌棉花生长及水氮分布的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39 (1): 67-76.
- [6] Lu J S, Xiang Y Z, Fan J L, et al. Sustainable high grain yield, nitrogen use efficiency and water productivity can be achieved in wheat-maize rotation system by changing irrigation and fertilization strategy [J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107177.
- [7] Li C, Wang Q S, Wang N J, et al. Effects of different plastic film mulching on soil hydrothermal conditions and grain-filling process in an arid irrigation district [J]. Science of the Total Environment, 2021, 795: 108886.
- [8] 纪祥龙, 邵红英, 姚德贵, 等. 水肥一体化对烤烟生长与养分吸收的影响 [J]. 陕西农业科学, 2021, 67 (2): 17-22, 29.
- [9] 高祥照, 杜森, 钟永红, 等. 水肥一体化发展现状与展望 [J]. 中国农业信息, 2015 (4): 14-19, 63.
- [10] 江景涛, 杨然兵, 鲍余峰, 等. 水肥一体化技术的研究进展与发展趋势 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (5): 1-9.
- [11] 杨启航, 刘永来, 李淮源, 等. 水肥一体化减量施肥对坡地烤烟肥料利用率及土壤养分平衡的影响 [J]. 西南农业学报, 2020, 33 (9): 2027-2036.
- [12] 张皓禹, 张君, 张凤麟, 等. 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.
- [13] 李娟茹, 孙明清, 张辉, 等. 不同磷肥用量及施用方式对土壤有效磷分布和冬小麦产量的影响 [J]. 农学学报, 2021, 11 (9): 28-32.
- [14] 冯尚善, 崔荣政, 王臣. 我国新型肥料产业发展现状及展望 [J]. 磷肥与复肥, 2020, 35 (10): 1-3.
- [15] 王静. 不同施肥策略对磷在土壤中移动、转化及磷肥利用率的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
- [16] 张国桥. 不同磷源及其施用方式对石灰性土壤磷的有效性对磷肥利用效率的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2014.
- [17] 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.
- [18] Bertrand I, McLaughlin M J, Holloway R E, et al. Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74 (1): 27-40.
- [19] 吉庆凯, 王栋, 杨文宝, 等. 长期施磷对玉米-小麦轮作系统作物产量和磷素吸收及土壤磷积累的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32 (7): 2469-2476.
- [20] Ibrahim K, Wang Q, Wang L, et al. Determining the optimum level of soil Olsen phosphorus and phosphorus fertilizer application for high phosphorus-use efficiency in *zea mays* L. in black Soil [J]. Sustainability, 2021, 13 (11): 1-15.
- [21] 吉冰洁, 李文海, 徐梦洋, 等. 不同磷肥品种在石灰性土壤中的磷形态差异 [J]. 中国农业科学, 2021, 54 (12): 2581-2594.
- [22] 胡国智, 张炎, 胡伟, 等. 施磷对棉花磷素吸收、利用和产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2010 (4): 27-31.
- [23] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 等. 不同基因型棉花磷效率特征及其根系形态的差异 [J]. 棉花学报, 2014, 26 (6): 506-512.
- [24] 郭忠勇, 田长彦, 胡明芳, 等. 不同形态磷肥对棉花生长和 AM 真菌接种效应的影响 [J]. 干旱区研究, 2008 (2): 196-200.
- [25] 郭大勇, 袁玉玉, 曾祥, 等. 石灰性土壤施用不同磷肥对玉米苗期生长和土壤无机磷组分的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (4): 243-249.
- [26] 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.
- [27] 亢龙飞, 王静, 朱丽娜, 等. 不同形态磷酸盐及施用方式对石灰性土壤磷移动性和有效性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (7): 1179-1187.
- [28] 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.
- [29] 王雪薇, 王冲, 褚贵新. 短链聚磷酸磷肥对土壤无机磷转化及铁锰锌有效性的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (9): 2970-2978.
- [30] 王小华, 闫宁, 张营, 等. 聚磷酸铵对石灰性土壤有效磷含量和无机磷形态分布的影响 [J]. 西北农林科技大学学报

- (自然科学版), 2021, 49 (10): 64-72.
- [31] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期施肥对红壤磷组分及活性酸的影响 [J]. 中国农学通报, 2007 (3): 254-259.
- [32] 王方斌. 氮肥减施对滴灌棉田氮素气态损失和棉花产量的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
- [33] 叶壮. 滴灌条件下液体磷源在石灰性土壤的有效性及其磷肥高效利用研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2010.
- [34] 吉冰洁. 不同品种磷肥在瘠土中磷形态转化及其有效性 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [35] 闫晓宇, 郭文君, 秦都林, 等. 滨海盐碱地棉花秸秆还田和深松对棉花干物质积累、养分吸收及产量的影响 [J]. 作物学报, 2022, 48 (5): 1235-1247.
- [36] 文明, 李明华, 蒋家乐, 等. 氮磷钾运筹模式对北疆滴灌棉花生长发育和产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2021, 54 (16): 3473-3487.
- [37] 秦永林, 田艳花, 樊明寿, 等. 磷肥种类对石灰性土壤马铃薯产量和磷肥利用率的影响 [J]. 中国蔬菜, 2019 (5): 70-75.

### Effects of different drip irrigation phosphorus fertilizer on soil phosphorus content and phosphorus utilization rate in cotton field

GAN Hao-tian, LIAO Huan, HAO Hai-bo, GUAN Xin-yu, WANG Zhuo-ran, HOU Zhen-an\* (College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832003)

**Abstract:** A field experiment was conducted to study the effects of different phosphorus (P) fertilizers on soil available P, cotton yield and P fertilizer use efficiency in drip irrigation cotton field. Five kinds of phosphorus fertilizers for drip irrigation were selected in the experiment: monoammonium phosphate (MAP), ammonium polyphosphate (APP), solid (SF), suspension (LSF) and clear liquid of water-soluble fertilizer (LCF) and no phosphorus fertilizer was used as control (CK). There were six treatments in total. Soil available P content and cotton growth, P uptake and yield were measured. The results showed that in a period of irrigation fertilization, LCF and APP significantly increased available P content in soil compared with other treatments. The soil available P content in 0 ~ 20 cm soil layer of APP increased significantly compared with other treatments in each growth stage of cotton, and the soil available P content in 20 ~ 40 cm soil layer of LCF was the highest, which increased 21.41% significantly compared with APP in full bolling stage. APP significantly promoted the dry matter and P accumulation in stem and leaf of cotton at boll opening stage compared with MAP, while LCF had the highest proportion of dry matter and phosphorus absorption in boll, which were 64.89% and 69.28%, respectively. The yield of LCF was the highest, followed by APP, which increased by 8.97% and 2.87%, compared with MAP, respectively. Application of LCF significantly increased P partial productivity and P agronomic efficiency of cotton, while apparent P utilization of APP significantly increased by 20.26% compared with LCF. In conclusion, application of APP and LCF can keep the soil available P content at a higher level, but the liquid soluble fertilizer has a stronger phosphorus migration ability. Both of the two fertilizers (APP and LCF) could promote dry matter accumulation and P uptake, but ammonium polyphosphate had the highest apparent phosphorus utilization rate, while clear water soluble fertilizer increased partial phosphorus productivity and agricultural efficiency of phosphorus fertilizer, and the yield increase effect was the most significant.

**Key words:** drip irrigation phosphorus fertilizer; soil available phosphorus; phosphorus absorption; phosphorus utilization rate