

滴灌下酸性物质对石灰性土壤磷有效性及作物吸收的影响^①

赵红华^{1,2}, 危常州^{1,2*}, 侯建伟^{1,2}, 朱金龙^{1,2}, 张书捷^{1,2}, 虎净^{1,2}

(1 石河子大学农学院, 新疆石河子 832003; 2 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003)

摘要: 大田滴灌条件下研究了少量多次施用硫酸和磷酸对石灰性土壤 pH、磷有效性以及改善作物磷营养的效果。结果表明, 施用磷酸和硫酸降低局部土壤 pH, 且随施用次数的增加, 酸化效果趋于加强, 在第 5 次施用酸化剂时下降到最大。水平方向上, 滴灌带附近 pH 降低最大, 随距离增加酸化效果减弱, pH 最大降幅 0.26 个单位。垂直方向上, 0~10 cm 酸化最为强烈, pH 最大降幅 0.29 个单位。pH 降低提高了土壤磷的有效性, 0~20 cm 土层深度酸化剂处理有效磷含量均显著高于对照($P<0.05$), 且硫酸与磷酸酸化效果接近。相同养分用量投入和管理水平下, 酸化剂处理棉花吸磷量增加 17.6%~23.4%, 皮棉产量提高 9.9%~11.4%。滴灌条件下施用酸化剂提高石灰性土壤养分有效性是一种可行的提高养分资源利用效率的方法。

关键词: 石灰性土壤; 酸化剂; 滴灌; 土壤有效磷; 棉花

中图分类号: S147.2; S562

石灰性土壤较高的 pH, 导致土壤中磷、锌等元素有效性低^[1], 成为限制营养元素有效性提高的重要障碍因子^[2]。在土壤中施用硫酸、磷酸等酸化剂能有效降低土壤 pH, 提高石灰性土壤中磷、锌等元素有效性^[3]。但由于土壤自身的缓冲作用, 对土壤实施大面积的酸化所需的酸化剂用量太大, 成本昂贵, 难以用于实际生产。铵态氮肥与硝化抑制剂配施^[4]形成增铵环境具有的生理酸化作用和酸性根际肥^[5]均能通过降低根际土壤 pH, 提高碱性-石灰性土壤养分的有效性。滴灌施肥是一种高频率、局部和定点灌溉的灌溉施肥技术^[6], 将酸化剂随滴灌施入土壤, 由于局部灌溉的特点, 需要的酸化剂较淹灌少, 可降低酸化剂用量。高频灌溉则有利于少量多次施入酸化剂, 避免土壤快速中和其酸性, 维持较长的酸化时间。定点灌溉则有利于酸化剂的酸化作用产生叠加(增强)效应, 因此在滴灌条件下施用酸化剂, 可能降低酸化剂使用成本, 成为一种提高土壤和肥料养分利用效率的途径。本研究在大田条件下以磷酸和硫酸为酸化剂, 探究以滴灌为平台少量多次施用酸化剂对石灰性土壤养分有效性及对作物磷养分吸收的影响, 以期在滴灌条件下提高石灰性土壤养分利用效率提供新的途径。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验在石河子大学农学院试验站进行, 试验田块土壤为灌耕灰漠土, pH 8.62, 有机质 14.9 g/kg, 全氮 0.75 g/kg, 碱解氮 66.88 mg/kg, 速效磷 18.32 mg/kg, 速效钾 180.75 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设对照和两种酸化剂共 3 个处理。采用磷酸和硫酸分别作为土壤酸化剂, 通过滴灌系统稀释后以追施方式施入土壤。试验施肥总量为 N 360 kg/hm², P₂O₅ 135 kg/hm², K₂O 90 kg/hm², 基肥用量均为 N 0 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm² 和 K₂O 60 kg/hm², 肥料选用重过磷酸钙和硫酸钾。酸化剂全部用于追施, 由于磷酸为含磷物质, 相应的磷酸处理中扣除相当于普通磷肥的含磷量。各处理追肥用量为 N 360 kg/hm², P₂O₅ 45 kg/hm² 和 K₂O 30 kg/hm²。

具体追肥方案为: 对照处理(CK): 为了避免重过磷酸钙在滴灌系统中溶解度不足造成滴头堵塞和养分损失, 采用磷酸二氢钾作为磷源, 45 kg/hm² P₂O₅ 折合含 P₂O₅ 52.2%、K₂O 34.7% 的磷酸二氢钾 86 kg/hm², 其中含 K₂O 30 kg/hm², 刚好补足 K₂O 的需要量。磷

基金项目: 农业部行业公益性专项(201103003, 201503217)资助。

* 通讯作者(changzhouwei@126.com)

作者简介: 赵红华(1989—), 女, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 研究方向为养分循环与养分管理。E-mail: zhaohonghuaxs@163.com

酸(AP)处理: 选用含磷酸 85% 的工业磷酸, 测定含 P_2O_5 72.4%, 45 kg/hm² P_2O_5 折合磷酸 73 kg/hm², 施入补充钾素 30 kg/hm², 用含 K_2O 50% 的硫酸钾 60 kg/hm², 氮肥用量与 CK 相同。硫酸(AS)处理: 选用 98% 分析纯硫酸试剂, 以等摩尔酸计算, 由于磷酸含 3 个 H^+ , 硫酸含 2 个 H^+ , 即硫酸用量应为磷酸摩尔数的 1.5 倍。换算硫酸实物量为 95 kg/hm², 氮肥和磷酸二氢钾用量与 CK 处理相同。

试验采用完全随机设计, 3 次重复。供试作物为

棉花, 品种惠远 710 (*Gossypium hirsutum* L.)。试验小区面积 3.6 m × 7 m = 25.2 m², 在播种前覆膜, 膜宽 120 cm, 膜间距 60 cm, 每个小区之间设 80 cm 保护行。棉花按株距 10 cm, 30-60-30 宽窄行种植, 一膜 4 行 2 管, 滴头流量为 3.2 L/h, 滴头间距 30 cm。全生育期灌水 8 次, 总灌水量为 4 500 m³/hm²。灌溉时期、灌量及追肥用量如表 1 所示, 其他田间管理按当地丰产栽培措施进行管理, 生育期不施用微肥。

表 1 灌溉时期、灌量及追肥量
Table 1 Irrigation scheduling and topdressing scheduling

项目	日期(月-日)								合计
	6-16	6-24	7-4	7-14	7-23	8-3	8-12	8-23	
灌量(m ³ /hm ²)	825	675	675	600	600	450	375	300	4 500
N(kg/hm ²)	28.8	36	36	72	72	54	36	25.2	360
P ₂ O ₅ (kg/hm ²)	5.625	5.625	5.625	5.625	5.625	5.625	5.625	5.625	45
K ₂ O(kg/hm ²)	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	30

1.3 样品采集及测定方法

1.3.1 土壤样品 分别在苗期(6 月 22 日)、蕾期(6 月 30 日)、花铃期(7 月 28 日)和吐絮初期(8 月 28 日)浇水后 4 天, 以滴灌带滴头为中心, 分不同水平距离(5、10、15 cm), 不同土层深度(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm)采集土壤样品。

土壤 pH 用 1:2.5 的土水比, 用 PHS-3C 型酸度计测定新鲜土样 pH。

土壤中有效磷用 pH = 8.5 的 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提新鲜土样, 钼锑抗比色法测定。

1.3.2 植株样品 取样时间同取土时间, 在每条膜两内行采集长势均匀连续棉花各 2 株, 将植株地上部分分为茎、叶、蕾(铃)等(吐絮期铃分成籽粒和铃壳)后用清水洗净黏着的土壤、灰尘等, 再用蒸馏水冲洗。植株鲜样于 105℃ 杀青 30 min 后在 75℃ 烘干 72 h 后称重, 用不锈钢粉碎机粉碎。

称取一定量粉碎的过 0.5 mm 筛的植株样用 H₂SO₄-H₂O₂ 进行消煮, 待测液用钒钼黄比色法进行植株全磷含量测定^[7]。

在棉花吐絮后, 随机选定 6.67 m² 面积对各处理分 3 次进行测产, 测定单株铃数、单铃重, 汇总后计算产量。棉花晾干后室内轧花考种, 计算衣分。

1.4 数据计算与分析

植株全株磷含量(%) = \sum [植株各器官磷含量(%) × 各器官干物质质量(g/株)] / 植株全株干物质质量(g/株)

作物磷素累积量(kg/hm²) = 植株磷含量(%) × 单位

面积干物质重(kg/hm²)

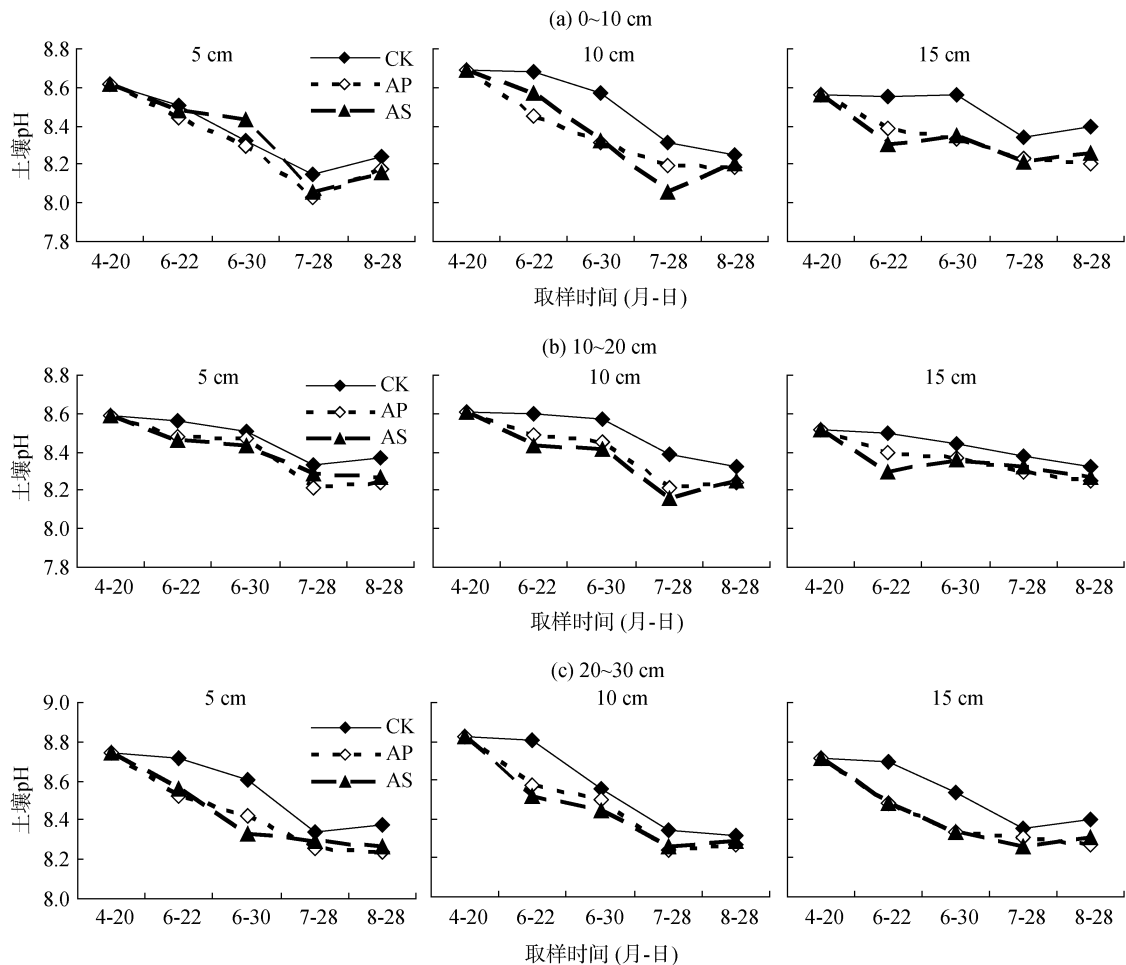
试验数据处理采用 Excel 2003 软件完成, 方差分析采用 SPSS 软件分析。不同处理间比较, 采用 Duncan 法进行检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 的时空动态

棉田土壤 pH 随生育期推进呈现下降趋势, 这是植物根系活动的结果。而滴灌施肥配施酸化剂比对照较多降低局部土壤 pH, 随酸化剂施用次数的增加, 距滴头水平距离 0~15 cm 和深度 0~30 cm 土壤 pH 均趋于降低(图 1), 在 7 月 28 日(花铃期)土壤空间 pH 表现为最低, 且相对对照降低幅度达 0.26 个单位; 在生育后期略有上升, 但总体表现为酸化剂处理 pH 低于常规施肥。在追肥期, 常规施肥 pH 均高于酸化剂处理, AP 和 AS 处理均表现出较强的酸化作用, 相比播种前 pH 最大降幅分别为 0.57 和 0.59 个单位。

对 0~30 cm 土层深度来说, 酸化剂处理土壤 pH 存在差异, 总体表现为下层土壤 pH 要高于表层, 0~10 cm 土层酸化最为强烈, AP 和 AS 处理 pH 最大降幅分别为 0.26 和 0.29 个单位; 而距滴头不同距离, 酸化剂处理下土壤 pH 也存在不同, 表现为距滴头越近土壤 pH 越低, 随土层深度的增加表现越加明显, AP 和 AS 处理 pH 最大降幅分别为 0.25 和 0.26 个单位。结合不同土层深度和距滴头不同距离土壤 pH 的变化来看, 垂直方向上 pH 的变幅要大于水平距离。



(a, b, c 图分别表示 0~10, 10~20, 20~30 cm 土层深度土壤 pH; 从左至右分别表示距滴头水平距离 5, 10, 15 cm 处土壤 pH)

图 1 不同酸化剂处理下 0~30 cm 土壤剖面 pH 的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil pH under different acidic material treatments at 0-30 cm layer

随酸化剂施入次数增加, 土壤 pH 逐步降低, 表明酸化作用有一定的累积效应。

2.2 土壤有效磷动态变化

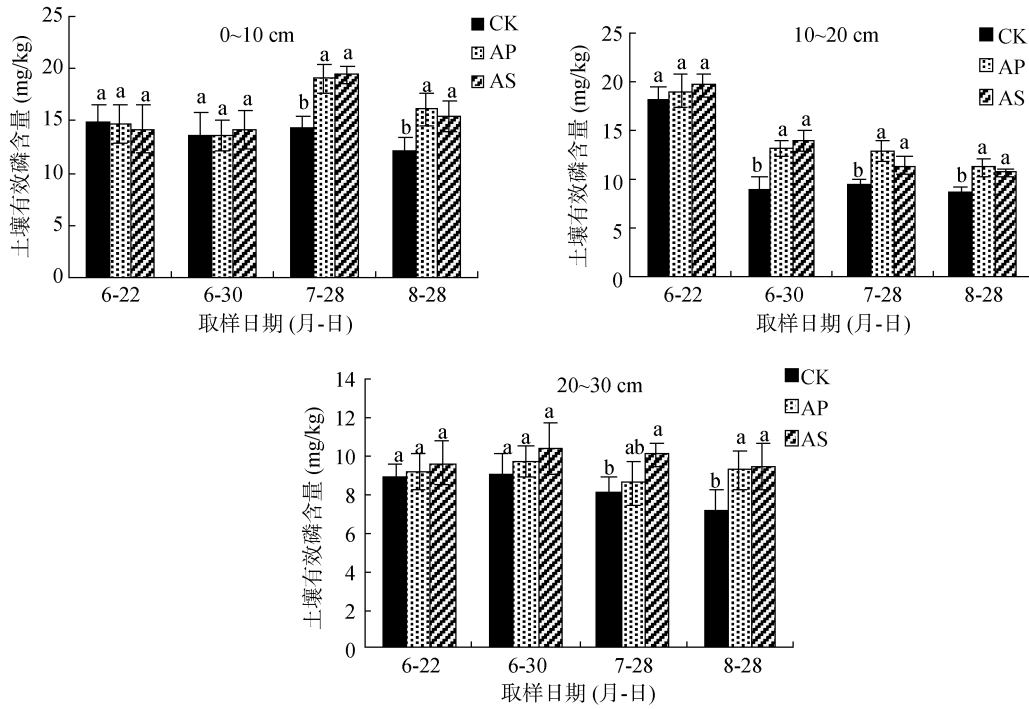
酸化剂在不同土层深度中均使土壤有效磷含量(显著)增加(图 2), 表明酸化剂对土壤磷有一定的活化作用。生育前期, 各酸化剂处理不同土层深度土壤有效磷含量无明显差异($P>0.05$), 随生育期的推进, 各酸化剂处理 0~10 cm 土层深度土壤有效磷含量在 7 月 28 日(第五次施用酸化剂)后显著增加($P<0.05$), 10~20 cm 土层深度则从 6 月 30 日(第二次施用酸化剂)后开始显著增加($P<0.05$); 在 20~30 cm 土层, AS 处理土壤有效磷含量在 7 月 28 日(第五次施用酸化剂)后显著高于对照($P<0.05$), 最大增幅为 2.22 mg/kg, AS 和 AP 处理在 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤有效磷最大增量分别为 5.03, 4.68 mg/kg 和 4.81, 4.16 mg/kg。AS 和 AP 处理土壤有效磷含量在全生育期均高于或等于对照, 但 AS 和 AP 处理间差异不显著($P>0.05$)。

2.3 酸化剂处理对棉花磷吸收的影响

在整个生育期, 酸化剂处理磷吸收量均显著高于对照($P<0.05$)(图 3)。苗期棉花对磷的吸收量少, 且酸化剂投入量少, 各处理下磷的吸收差异不显著($P<0.05$); 随生育期的推进, 酸化剂施用次数增加, 酸化剂效果逐渐表现出来, 各处理植株磷的积累量显著增加($P<0.05$), 在花铃期 AP、AS 处理植株磷的吸收量较常规施肥分别增加 21.9%、23.1%, 而在吐絮初期则分别为 17.6%、23.4%。

2.4 酸化剂处理对棉花产量及构成的影响

滴灌施肥配施酸化剂处理皮棉产量达显著差异($P<0.05$), AP、AS 处理增产率分别为 9.9% 和 11.4%(表 2)。在产量构成要素中, 单株结铃数受到酸化剂的显著影响($P<0.05$), AP、AS 处理单株结铃数分别比对照增加 6.9%, 12.8%; 单铃重差异虽未达统计显著水准($P>0.05$), 也分别比对照增加 6.0%, 5.9%; 衣分虽有增加, 但差异不显著($P>0.05$)。滴灌配施 AP 和 AS 有利于作物生长, 通过增加棉花的单株结铃数和单铃重来显著提高棉花产量。



(图中小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下图同)

图 2 距滴头 10 cm 处 0~30 cm 土壤剖面有效磷含量的变化

Fig. 2 Dynamic of available P content at 0~30 cm layer at 10 cm distance from emitter

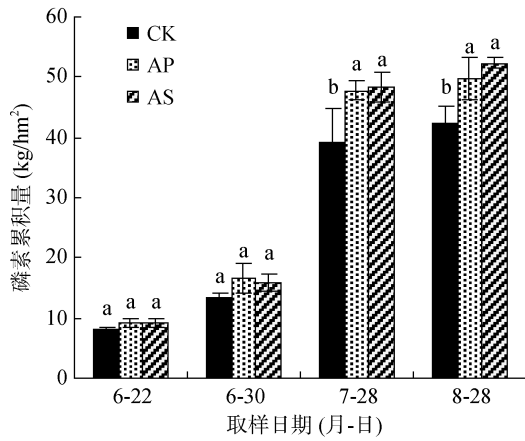


图 3 酸化剂对棉花磷积累的影响

Fig. 3 Effects of different acidic materials on P accumulation in cotton

表 2 酸化剂对棉花产量及产量构成的影响

Table 2 Effects of different acidic materials on yield and yield components of cotton

处理	单株结铃数(个)	单铃重(g)	株数($10^5/\text{hm}^2$)	皮棉产量(kg/hm^2)	衣分(%)	增产率(%)
CK	4.93 ± 0.08 c	5.79 ± 0.08 a	1.88	$2\ 246 \pm 31.5$ b	41.9 ± 1.0 a	-
AP	5.27 ± 0.15 b	6.14 ± 0.09 a	1.80	$2\ 536 \pm 186.4$ a	43.6 ± 1.0 a	9.92
AS	5.56 ± 0.12 a	6.13 ± 0.38 a	1.76	$2\ 586 \pm 41.6$ a	43.3 ± 0.9 a	11.40

注:表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

大,有效磷活化量在该时期也达最大。同时酸化剂与滴灌灌溉、施肥配合施用,并不会增加施肥的复杂性与人工劳动。局部灌溉使在石灰性土壤采用酸化剂提

3 讨论

3.1 滴灌施肥配施酸化剂局部降低土壤 pH 并提高有效磷含量

在石灰性土壤中,较高的 pH 导致磷养分有效性低。用酸性物质降低土壤 pH 是提高磷、锌等元素活性的一种途径^[8-10],但每中和 15 cm 表土层内 1% 的碳酸钙需要硫酸量在 $2.2 \times 10^{11} \text{ kg}/\text{hm}^2$ 以上^[11],而在滴灌施肥条件下,由于滴灌高频率、近根、局部灌溉特点,少量的酸化剂即可维持一定的酸化强度,避免酸化剂一次投入后被快速钝化,较长时间维持较高的土壤有效养分。酸化剂随水多次施入,具有一定的累积效果,在第 5 次灌水后(花铃期)土壤 pH 下降幅度最

高土壤养分有效性成为一种经济上可行的选择。

3.2 酸化剂活化养分主要是酸溶作用

硫酸因较强的酸性,在初施入土壤时土壤 pH 快

速下降。随时间推移,在土壤自身缓冲作用下,AP、AS 处理酸化作用均受到一定程度的钝化,而随酸化剂施用次数的增加,酸化作用能起到一定累积效应。酸化剂处理 pH 下降对应土壤有效磷的活化,表明该试验条件下酸溶作用是土壤磷活化的主要途径。另外,酸化剂可以溶解滴灌系统管道中的肥料与金属离子形成的沉淀物,防止滴头堵塞^[12],提高灌溉均匀度。酸化剂对土壤养分的活化可能并非局限于磷一种元素,其他元素如 Mn、Zn、Fe 很可能也有不同程度的活化,需要开展进一步的研究。

3.3 酸化剂施用显著提高作物对磷养分的吸收

滴灌处理具有吸收作用的棉花根系主要分布在土壤 40 cm 以上的土层,且窄行间分布比重大^[13-14],酸化剂活化区域与之相匹配。Khorsandi 等^[15]研究发现酸性物质施入后对土壤 pH 的降低,是提高养分有效性和产量的主要原因。肖艳等^[16]研究发现滴灌施肥配施柠檬酸能活化土壤磷、铁,促进番茄对磷和铁的吸收,增加产量,提高水、肥生产效率。在石灰性褐土上,小麦在减少一半磷肥使用量的情况下,通过施用廉价的酸性物质小麦的产量并未明显降低,这在一定程度上可大大减少肥料成本^[17]。本研究发现在等养分用量投入前提下,酸化剂处理棉花对磷的吸收量增加了 20%,土壤磷活化、植株磷吸收及产量最大的处理相匹配,说明滴灌配施酸化剂通过活化土壤养分,促进植株对该养分的吸收,从而促进产量的增加。配施酸化剂比常规滴灌处理提高了对土壤养分的利用,同时等养分投入下增产接近 10%。从应用角度来说,磷酸和硫酸酸化作用接近,但磷酸是一种含磷物质,可作为肥料的组分,以磷酸作为磷源生产水溶性肥料将是一种可以提高土壤养分资源利用率的施肥方式。磷酸和硫酸较强的腐蚀性、较高的原料成本及在使用过程中较高的运输费用,使其推广运用受到限制,但这为滴灌条件下提高石灰性土壤养分有效性提供了一种思路。

4 结论

1) 在滴灌条件下,少量多次局部施用磷酸和硫酸能降低棉花窄行内 0~30 cm 土层深度土壤的 pH。

2) 酸化剂施用增加了土壤有效磷含量,同时酸化部位与根系的分布相匹配,促进植株对磷的吸收。

3) 在相同养分用量投入和管理水平下,棉花产量增幅达 9.9%~11.4%。滴灌条件下施用酸化剂提高石灰性土壤养分有效性是一种可行的提高养分资源

利用效率的方法。

参考文献：

- [1] 曹秀华, 曲东. 土壤养分活化途径的探讨[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(4): 9-14
- [2] 张凌云, 张宪法, 翟衡. 土壤因子对植物缺铁失绿的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 74-77
- [3] 姚晓芹, 马文奇, 楚建周. 磷酸对石灰性土壤 pH 及微量元素有效性的影响[J]. 土壤肥料, 2005(2): 14-16, 20
- [4] Thomson CJ, Marschner H, Römheld V. Effect of nitrogen fertilizer form on pH of the bulk soil and rhizosphere, and on the growth, phosphorus, and micronutrient uptake of bean[J]. Journal of Plant Nutrition, 1993, 16(3): 493-506
- [5] 李燕婷, 白灯莎·买买提艾力, 张福锁, 江荣风, 毛达如. 酸性根际肥对石灰性土壤 pH 和铁有效性的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 312-316
- [6] 张晓伟, 黄占斌, 李秧秧, 范新科. 滴灌条件下玉米的产量和 WUE 效应研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(1): 72-75, 98
- [7] 鲍士旦. 土壤农业化学分析. 3 版 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 268-270
- [8] Ghehsareh AM, Samadi N. Effect of soil acidification on growth indices and microelements uptake by greenhouse cucumber[J]. African Journal of Agricultural Research, 2012, 7(11): 1 659-1 665
- [9] 肖艳, 张怀文, 王克武, 曹一平, 王敬国. 柠檬酸对土壤养分的活化及对作物吸收 Fe、P 的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 638-640
- [10] 吴曦, 陈明昌, 杨治平. 碱性土壤施硫磺对油菜生长、土壤 pH 和有效磷含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 671-677
- [11] Mortvedt JJ. Iron sources and management practices for correcting iron chlorosis problems[J]. Journal of Plant Nutrition, 1986, 9(3-7): 961-974
- [12] Mikkelsen RL, Jarrell WM. Application of urea phosphate and urea sulfate to drip-irrigated tomatoes grown in calcareous soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(2): 464-468
- [13] 危常州, 马富裕, 雷咏雯, 李俊华, 冶军, 张福锁. 棉花膜下滴灌根系发育规律的研究[J]. 棉花学报, 2002, 14(4): 209-214
- [14] 胡晓棠, 陈虎, 王静, 蒙晓斌, 陈福宏. 不同土壤湿度对膜下滴灌棉花根系生长和分布的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1 682-1 689
- [15] Khorsandi F. Sulfuric acid effects on iron and phosphorus availability in two calcareous soils[J]. Journal of Plant Nutrition, 1994, 17(9): 1 611-1 623
- [16] 肖艳, 陈清, 王敬国, 魏荔, 曹一平. 滴灌施肥对土壤铁、磷有效性及番茄生长的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(9): 1 322-1 327
- [17] 郭莹梅, 黄学芳, 王改兰, 韩和平, 池宝亮. 酸性物质对石灰性褐土上小麦产量的影响[J]. 土壤, 1999, 31(6): 330-332

Acidic Materials on Mobilization of Phosphorus in Calcareous Soil and Its Impact on Phosphorus Uptake of Drip-irrigated Cotton

ZHAO Hong-hua^{1,2}, WEI Chang-zhou^{1,2*}, HOU Jian-wei^{1,2}, ZHU Jin-long^{1,2},
ZHANG Shu-Jie^{1,2}, HU Jing^{1,2}

(1 College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2 Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture, Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: The effects of acidic materials (phosphoric and sulfuric acid) applied to soil through drip irrigation at low dosage, high frequency on soil pH change and soil P availability, cotton plant growth and P uptake was studied. The results showed that adding acidic materials under drip irrigation decreased the regional soil pH, and acidification effect tended to strengthen with the increase of the acidulant application, in the fifth application the effect of acidification reached to the peak. In the horizontal direction, acidification decreased with increasing horizontal distance from the drip emitter, pH decreased 0.26 units at most, while at 0–10 cm layer, pH decreased 0.29 units. The decreased of soil pH increase soil available P content, at 0–20 cm layer, soil available P content were significantly higher in acidic materials treatment than that of control, sulfuric acid and phosphoric acid showed similar acidification effects. Under the uniform nutrient inputs and management level, plant P uptake of acidulant treatment increased by 17.6%–23.4%, and lint production of cotton increased by 9.9%–11.4%. Applying acidic material can improve nutrient availability in calcareous soil, and is an economically feasible way to improve the efficiency of nutrient in drip irrigation cultivation.

Key words: Calcareous soil; Acidic material; Drip irrigation; Available P; Cotton