

湖北省棉花磷肥效应及推荐用量研究^①

李银水¹, 鲁剑巍^{1*}, 李小坤¹, 鲁明星², 刘光文³, 张耀学⁴, 徐维明⁵, 李彬⁶

(1 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2 湖北省土壤肥料工作站, 武汉 430070;

3 湖北省武穴市土壤肥料工作站, 湖北武穴 436300; 4 湖北省黄梅县土壤肥料工作站, 湖北黄梅 436500;

5 湖北省沙洋县土壤肥料工作站, 湖北沙洋 448200; 6 湖北省荆州市土壤肥料工作站, 湖北荆州 434000)

摘要: 通过 14 个大田试验, 研究了湖北省棉花 P 肥效应及适宜用量。结果表明, 适量施用 P 肥对棉花具有明显的增产增收效果, 14 个试验施 P 处理比对照处理增产子棉 100 ~ 896 kg/hm², 平均增产 347 kg/hm²; 施 P 处理增产率 2.1% ~ 25.2%, 平均增产率为 10.4%; 施 P 处理纯利润平均为 1 764 元/hm², 产投比平均为 6.61; P 肥偏生产力和农学利用率平均分别为 P₂O₅ 51.27 kg/kg 和 P₂O₅ 4.15 kg/kg。根据肥料效应方程, 在当前生产条件下, 棉花生产的 P 肥经济用量平均为 P₂O₅ 112.7 kg/hm², 推荐幅度为 P₂O₅ 42.9 ~ 183.2 kg/hm²。土壤有效 P 含量与棉花 P 肥经济推荐用量呈极显著负相关 ($r = -0.7628^{**}$, $n = 13$), 根据土壤有效 P 含量 (x , 单位为 mg/kg) 水平, 湖北省目前棉花生产适宜用 P 量 (y , 单位为 kg/hm²) 可通过公式 $y = 273.42 - 78.488 \ln(x)$ 求得。

关键词: 棉花; 磷肥; 产量; 经济效益; 磷肥推荐用量

中图分类号: S562.01

子棉产量的形成是种籽、气候、水肥条件、田间管理等多种因素综合作用的结果, 科学施肥是保障棉花丰产稳产的重要措施^[1]。棉花高产优质栽培的目标是获得较高的产量和纤维品质, 而棉铃发育好坏直接影响子棉的产量和品质。研究表明, 棉铃发育除了受品种遗传特性影响外, 土壤矿质营养是一个重要影响因素^[2], P 素是植物生长发育所必需的三大矿质营养元素之一^[3-4], 施 P 能加快棉花生长发育进程, 促进早熟, 提高霜前花率, 有利于铃壳干物质的积累和再分配, 从而有效提高子棉的产量和品质^[5]。湖北省是我国重要的棉花生产基地, 从 1997 年开始发展杂交棉, 2000 年后得到迅速发展, 现普及率已达 60% 以上, 杂交棉的发展, 对提高湖北省棉花产量潜力起到了一定的促进作用, 但杂交棉的大面积推广并没有带来全省棉花产量的大幅度增加^[6], 原因与近年来对长江中下游地区棉花种植的养分管理研究较少, 农民对棉花栽培管理比较盲目等因素有一定的关系。为此, 我们在湖北省不同生态区域、不同茬口、不同熟制条件下开展了棉花 P 肥肥效田间试验, 目的是拟建棉花 P 肥效应方程, 寻求棉花 P 肥经济施用量, 建立 P 肥用量与土壤 P 素水

平间的函数关系, 以期为湖北省棉花 P 肥推荐提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

2007 年度分别在湖北省的沙洋、荆州、黄梅、武穴 4 个县(市)布置了 14 个棉花大田 P 肥肥效试验, 试验田的基本理化性质及供试棉花品种见表 1。试验点 0 ~ 20 cm 耕作层土壤有效 P 含量在 4.5 ~ 18.0 mg/kg 之间(其中有 10 个试验的土壤有效 P 含量分布在 6.0 ~ 11.0 mg/kg), 平均为 10.1 mg/kg。供试棉花品种均为目前推广品种, 沙洋、黄梅采用油菜-棉花轮作(即试验前茬作物为油菜), 荆州、武穴采用小麦-棉花套作。试验进程根据各地具体情况决定, 2007 年 3 月 30 日至 4 月 20 日播种, 油菜-棉花轮作区采用营养钵育苗, 4 月 27 日至 5 月 28 日移栽, 移栽密度 1.95 ~ 2.58 万株/hm², 小麦-棉花轮作区采用套播, 播种密度 1.25 ~ 1.80 万株/hm², 2007 年 8 月 20 日至 9 月 1 日第一次收子棉, 11 月 1 日至 11 月 15 日最后一次收获, 共收获 6 ~ 8 次。一般采用 2 m 宽厢, 每厢种植 2 行棉花。

①基金项目: 国家十一五科技支撑重点项目(2008BADA4B08)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NECT-07-0345)和国家测土配方施肥项目资助。

* 通讯作者(lujianwei@mail.hzau.edu.cn)

作者简介: 李银水(1979-), 女, 云南大理人, 硕士研究生, 主要从事现代施肥技术研究。E-mail: lysh@webmail.hzau.edu.cn

表 1 试验田土壤基本理化性质及供试棉花品种

Table 1 Basic physical-chemical properties and cotton varieties in experimental sites

试验号	试验地点	品种	土壤类型	pH	有机质 (g/kg)	碱解 N (mg/kg)	有效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)
1	沙洋李市镇	鄂杂 5 号	潮土	8.0	14.2	79.0	10.4	65.0
2	沙洋沙洋镇	国抗杂 9 号	潮土	7.9	14.7	72.0	10.9	68.0
3	荆州菱湖镇	鄂杂棉 13 号	潮土	6.7	14.3	98.0	6.5	164.9
4	黄梅独山镇	楚杂 180 号	红壤	4.7	22.5	82.0	7.6	98.0
5	武穴刊江镇	SGK791	潮土	8.0	17.1	48.0	15.1	78.0
6	武穴龙坪镇	鄂杂 3 号	潮土	8.1	18.3	160.0	18.0	83.0
7	沙洋李市镇	鄂杂 5 号	潮土	8.0	14.2	75.0	10.4	85.0
8	沙洋沙洋镇	国抗杂 9 号	潮土	7.9	14.7	112.0	10.9	68.0
9	荆州弥市镇	鄂杂棉 17 号	潮土	7.7	6.0	123.2	17.7	55.3
10	黄梅分路镇	南抗 9 号	潮土	7.5	15.3	100.9	9.1	75.0
11	黄梅分路镇	南抗 9 号	潮土	7.5	25.3	100.9	6.1	45.0
12	黄梅蔡山镇	华抗 1 号	潮土	7.6	16.9	65.8	4.5	132.0
13	黄梅新开镇	楚杂 180 号	潮土	7.5	14.6	83.2	6.6	42.0
14	黄梅小池镇	鄂杂 11 号	潮土	7.5	15.1	59.7	7.4	112.0
平均	-	-	-	7.5	15.9	90.0	10.1	83.7

1.2 试验设计

P肥用量设 4 个水平, 具体用量分 3 种, “设计I” (1~6 号试验) 的 P 肥用量分别为 P_0 、 $P_{37.5}$ 、 P_{75} 、 $P_{112.5}$ (下标表示纯 P_2O_5 用量, 单位为 kg/hm^2 , 下同); “设计II” (7~10 号试验) 的 P 肥用量分别为 P_0 、 P_{54} 、 P_{72} 、 P_{90} ; “设计III” (11~14 号试验) 的 P 肥用量分别为 P_0 、 P_{75} 、 P_{150} 、 P_{225} 。根据各地土壤养分含量差异及当地技术人员的生产经验, 各处理的其他养分施用量分别为纯 N (N) 270~330 kg/hm^2 , 纯 K (K_2O) 150~300 kg/hm^2 (其中有 10 个试验的纯 K 用量为 150 kg/hm^2)。N、P、K 肥品种分别为尿素 (含 N 460 g/kg)、过磷酸钙 (含 P_2O_5 120 g/kg) 和氯化钾 (含 K_2O 600 g/kg)。N 肥 45% 作基肥 (移栽前施用), 10% 作提苗肥 (6 月 15 日左右施用), 30% 作花铃肥 (8 月 15 日左右施用), 15% 作补桃肥 (9 月 15 日左右施用); K 肥 60% 作基肥, 40% 作花铃肥; P 肥作基肥一次性施用。小区面积 20 m^2 , 重复 2 次, 随机区组排列, 其他栽培管理方式同当地大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 子棉产量 产量为实收产量, 从吐絮期开始分小区收获, 到霜前结束, 各小区产量为各次产量的累加总和。

1.3.2 土壤养分 土壤养分含量采用常规分析方

法测定^[7]。土壤 pH 按水土比 2.5:1, pH 计测定; 有机质采用重铬酸钾容量法; 碱解 N 用碱解扩散法; 有效 P 用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法; 速效 K 用 1 mol/L NH_4OAc 浸提-火焰光度法。

1.3.3 有关参数的计算方法 P 肥偏生产力 (PFPP) = 施 P 区产量/施 P 量^[8]; P 肥农学利用率 (APUE) = (施 P 区产量 - 不施磷区产量)/施 P 量^[8]; 根据肥料效应回归方程: $y = ax^2 + bx + c$ (式中 y 为子棉产量, x 为 P 肥施用量), 可求出最高产量施肥量 $x_{max} = -b/(2 \times a)$, 最佳经济施肥量 $x_e = [(P_x/P_y) - b]/(2 \times a)$ (P_x 为 P 肥价格, P_y 为子棉价格, 根据 14 个试验 P 肥和子棉价格的平均值计算, 本研究 P 肥和子棉价格分别为 3.83 元/kg 和 6.10 元/kg)。

1.4 数据分析工具

试验数据的计算和作图在 Excel 中进行, 产量的方差分析用 DPS v3.01 软件统计分析, 结果均用 LSD 法检验 $p < 0.05$ 水平上的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 磷肥用量对子棉产量的影响

“设计I”试验产量结果 (表 2) 表明, 施用 P 肥能显著提高子棉产量, 各施 P 处理与对照处理间产量差异显著 (6 号试验除外)。总体而言, 3 个施 P 处

理的产量以 P_{75} 处理最高, 平均高达 $4\ 078\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 以 $P_{37.5}$ 处理最低, 平均为 $3\ 893\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 但不同施 P 处理间产量差异不显著, P_{75} 处理比 $P_{37.5}$ 处理平均增产 $185\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 而 $P_{112.5}$ 处理比 P_{75} 处理平均减产 154

kg/hm^2 。说明 P 素供应对子棉产量有一定的影响作用, 适量施用 P 肥能提高子棉产量, 过量施用 P 肥并不能提高子棉产量, 而且大量 P 肥的施用可能会导致土壤 P 素累积, 反而会对棉株生长产生负作用。

表 2 “设计 I” P 肥用量对子棉产量的影响 (kg/hm^2)

Table 2 Effects of P application rates on cotton yield in “design I” experiments

P 肥用量	产量						平均 \pm 标准差
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	试验 6	
P_0	3 684 b	3 355 b	4 245 b	3 557 c	2 606 c	4 772 a	$3\ 703 \pm 746\ \text{b}$
$P_{37.5}$	3 819 a	3 505 a	4 372 a	3 972 b	2 816 b	4 872 a	$3\ 893 \pm 708\ \text{a}$
P_{75}	3 924 a	3 595 a	4 486 a	4 452 a	3 162 a	4 847 a	$4\ 078 \pm 632\ \text{a}$
$P_{112.5}$	3 864 a	3 445 b	4 422 a	3 977 b	3 102 a	4 732 a	$3\ 924 \pm 602\ \text{a}$

注: 同一列中不同的小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著, 下同。

“设计 II” 试验的产量结果列于表 3。结果表明, 施用 P 肥能显著提高子棉产量, 各施 P 处理与对照处理间产量差异显著。总体而言, 3 个施 P 处理的产量

以 P_{72} 处理最高, 平均高达 $3\ 573\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 以 P_{90} 处理最低, 平均为 $3\ 504\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。各处理间的产量差异趋势与“设计 I” 相同。

表 3 “设计 II” P 肥用量对子棉产量的影响 (kg/hm^2)

Table 3 Effects of P application rates on cotton yield in “design II” experiments

P 肥用量	产量				平均 \pm 标准差
	试验 7	试验 8	试验 9	试验 10	
P_0	3 355 b	3 100 c	3 285 c	3 252 b	$3\ 248 \pm 107\ \text{b}$
P_{54}	3 505 a	3 415 ab	3 602 a	3 537 a	$3\ 515 \pm 78\ \text{a}$
P_{72}	3 505 a	3 535 a	3 669 a	3 582 a	$3\ 573 \pm 72\ \text{a}$
P_{90}	3 535 a	3 355 b	3 468 b	3 656 a	$3\ 504 \pm 126\ \text{a}$

从“设计 III” 试验产量结果 (表 4) 可知, 11、12 号试验子棉产量随 P 肥用量的增加一直有上升的趋势, 两个试验的产量均以 P_{225} 处理为最高; 而 13、14 号试验的产量则以 P_{150} 处理最高, 当 P 肥用量高达 $225\ \text{kg}/\text{hm}^2$

时, 两个试验的产量均出现了减产趋势。总体而言, 施 P 处理与对照处理间产量差异显著, 但不同施 P 处理间产量差异不明显, 说明棉花施用适量 P 肥具有明显的增产效果, 但随着施用量的增加, 单位肥料的增产量在递减。

表 4 “设计 III” P 肥用量对子棉产量的影响 (kg/hm^2)

Table 4 Effects of P application rates on cotton yield of “design III” experiment

P 肥用量	产量				平均 \pm 标准差
	试验 11	试验 12	试验 13	试验 14	
P_0	3 602 b	3 207 c	3 782 bc	3 797 b	$3\ 597 \pm 275\ \text{b}$
P_{75}	3 752 a	3 597 b	3 877 b	4 007 a	$3\ 808 \pm 175\ \text{a}$
P_{150}	3 767 a	3 697 a	4 007 a	4 057 a	$3\ 882 \pm 177\ \text{a}$
P_{225}	3 802 a	3 792 a	3 972 a	4 007 a	$3\ 893 \pm 112\ \text{a}$

2.2 施磷经济效益

试验结果 (表 5) 表明, 棉花施用适量 P 肥具有极

显著的增产增收效果。14 个试验施 P 增产 $100 \sim 896\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 平均增产 $347\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 试验的增产量主要分

布在 200 ~ 450 kg/hm²之间, 所占比例达 57.1%, 另有 21.4% 的试验增产量高于 450 kg/hm²。施P增产幅度在 2.1% ~ 25.2% 之间, 平均增产率为 10.4%, 有 57.1% 的试验增产率在 5% ~ 15% 之间, 另有 14.3% 的试验增产率高于 20%。

按 2007 年 P 肥和子棉价格计算, 湖北省棉花施 P 纯利润在 464 ~ 5 178 元/hm²之间, 平均为 1 764 元/hm²。施 P 纯利润主要分布在 1 000 ~ 3 000 元/hm²之间, 所占比例为 57.1%, 另有 28.6% 试验的施 P 纯利润低于 1 000 元/hm², 高于 3 000 元/hm²的试验占 14.3%。棉花施P产投比在 2.39 ~ 19.03 之间, 平均为

6.61。有 42.9% 试验的产投比分布在 4 ~ 6 之间, 另有 35.7% 试验的产投比 > 7, 产投比 < 4 的试验占 21.4%。结果说明, 在目前生产条件下棉花施用适量 P 肥具有较高的经济收益。

2.3 磷素利用效率分析

试验结果(表 5)表明, 不同 P 肥用量下 P 素利用效率存在明显的差别。14 个试验的 P 肥偏生产力在 P₂O₅ 16.85 ~ 129.92 kg/kg 之间, 平均为 P₂O₅ 51.27 kg/kg。P 肥偏生产力主要分布在 P₂O₅ 40.00 ~ 60.00 kg/kg 之间, 所占比例达 64.3%, > 60.00 kg/kg 的只占 14.3%。

表 5 棉花施用 P 肥的经济效益和 P 肥利用效率

Table 5 P use efficiency and benefit response of cotton under phosphorus application

试验号	P 肥用量 (kg/hm ²)	增产量 (kg/hm ²)	增产幅度 (%)	纯利润 (元/hm ²)	产投比	P 肥偏生产力 (P ₂ O ₅ kg/kg)	P 肥农学利用率 (P ₂ O ₅ kg/kg)
1	75.0	240	6.5	1 174	5.09	52.32	3.19
2	75.0	240	7.1	1 175	5.09	47.93	3.20
3	75.0	241	5.7	1 183	5.12	59.81	3.21
4	75.0	896	25.2	5 178	19.03	59.37	11.95
5	75.0	556	21.3	3 103	11.80	42.16	7.41
6	37.5	100	2.1	464	4.23	129.92	2.66
7	54.0	150	4.5	707	4.42	64.90	2.77
8	72.0	435	14.0	2 376	9.61	49.10	6.04
9	72.0	384	11.7	2 067	8.49	50.96	5.33
10	90.0	404	12.4	2 120	7.15	40.62	4.49
11	75.0	150	4.2	629	3.19	50.03	2.00
12	225.0	585	18.3	2 709	4.14	16.85	2.60
13	150.0	225	5.9	798	2.39	26.71	1.50
14	150.0	260	6.9	1 012	2.76	27.05	1.73
平均	-	347	10.4	1 764	6.61	51.27	4.15

注: 增产量 = 施 P 区产量 - 不施 P 区 (P₀) 产量。

14 个试验的 P 肥农学利用率在 P₂O₅ 1.50 ~ 11.95 kg/kg 之间, 平均为 P₂O₅ 4.15 kg/kg。P 肥农学利用率主要分布在 P₂O₅ 2.00 ~ 4.00 kg/kg 之间, 所占比例达 50.0%, > 4.00 kg/kg 的占 37.5%。试验结果表明, 在不同试验条件下, 油菜的 P 肥偏生产力和 P 肥农学利用率存在较大差异。

2.4 肥效方程及磷肥推荐用量

用一元二次肥料效应方程拟合 P 肥用量与产量间的关系, 根据方程求解试验的推荐施肥量^[9]。结果表明(表 6), 14 个试验的 P 肥推荐最高用量在 51.1 ~

207.2 kg/hm²之间, 平均为 112.7 kg/hm²; 经济用量在 42.9 ~ 183.2 kg/hm²之间, 平均为 95.0 kg/hm²; 最高用量比经济用量平均高 17.7 kg/hm²。有 35.7% 的试验 P 肥最高用量高于 150 kg/hm², 而有 92.9% 的试验 P 肥经济用量低于 150 kg/hm²。一般而言, 最高施肥量是产量最高时的施肥量, 而经济施肥量是经济效益最好时的施肥量, 综合试验的产量结果以及相应的推荐施肥量, 我们建议在实际生产中使用经济施 P 量来指导生产。

根据肥料效应方程以及相应的 P 肥推荐用量计算

结果 (表 6), 试验的理论最高产量在 3 130 ~ 4 874 kg/hm² 之间, 平均为 3 878 kg/hm²; 理论最高产量比经济产量平均高 6 kg/hm²。

表 6 棉花 P 肥效应方程及相应的推荐用量

Table 6 Response equations of P fertilization and P recommended rates for cotton

试验号	肥料效应方程	相关系数 (<i>r</i>)	推荐用量 (kg/hm ²)		理论产量 (kg/hm ²)	
			最高	经济	最高	经济
1	$y = -0.034 6x^2 + 5.611 4x + 3 677.7$	0.985 3 [*]	81.1	72.0	3 905	3 902
2	$y = -0.053 3x^2 + 6.960 8x + 3 346.0$	0.973 2 [*]	65.3	59.4	3 573	3 571
3	$y = -0.034 0x^2 + 5.543 2x + 4 236.8$	0.978 2 [*]	81.5	72.3	4 463	4 460
4	$y = -0.158 4x^2 + 22.464 0x + 3 505.5$	0.933 0 ^{ns}	71.0	69.0	4 304	4 303
5	$y = -0.048 1x^2 + 10.295 0x + 2 579.2$	0.962 8 [*]	107.0	100.5	3 130	3 128
6	$y = -0.038 2x^2 + 3.902 6x + 4 774.1$	0.997 6 ^{**}	51.1	42.9	4 874	4 871
7	$y = -0.018 3x^2 + 3.578 4x + 3 355.9$	0.992 5 ^{**}	97.8	80.6	3 531	3 525
8	$y = -0.101 1x^2 + 12.324 0x + 3 095.3$	0.952 2 [*]	60.9	57.8	3 471	3 470
9	$y = -0.124 0x^2 + 13.577 0x + 3 278.2$	0.969 1 [*]	54.7	52.2	3 650	3 649
10	$y = -0.018 8x^2 + 6.109 7x + 3 252.9$	0.998 4 ^{**}	162.5	145.8	3 749	3 744
11	$y = -0.005 1x^2 + 1.971 5x + 3 609.6$	0.973 9 [*]	193.3	131.7	3 800	3 781
12	$y = -0.013 1x^2 + 5.427 8x + 3 220.9$	0.989 6 [*]	207.2	183.2	3 783	3 776
13	$y = -0.005 8x^2 + 2.233 5x + 3 772.0$	0.966 9 [*]	192.5	138.4	3 987	3 970
14	$y = -0.011 6x^2 + 3.508 1x + 3 799.9$	0.997 7 ^{**}	151.2	124.1	4 065	4 057
平均	-	-	112.7	95.0	3 878	3 872

注: * 表示 $p < 0.05$ 显著水平, ** 表示 $p < 0.01$ 显著水平。

用对数关系拟合 13 个试验 (4 号试验肥效方程检验不显著, 不参与拟合) 的土壤有效 P 含量 (x) 与推荐施 P 量 (y) 间的回归方程^[10-11]。结果 (图 1、图 2) 表明, 土壤有效 P 含量与 P 肥推荐最高用量和经济用量之间极显著负相关, 相关系数分别为 $r = -0.7868^{**}$ 和 $r = -0.7628^{**}$, 说明土壤有效 P 含量能很好地反映田块需要施用的 P 肥量。因此, 在本试验区域内, 在产前测定土壤有效 P 含量 x (mg/kg), 根据

推荐施肥回归方程 $y = 273.42 - 78.488 \ln(x)$, 可以计算出相应的 P 肥经济施用量 y (kg/hm²)。

根据拟合的推荐施肥回归方程 (图 1、图 2), 可以推算出相应田块的 P 肥推荐最高用量和经济用量 (表 7)。目前湖北省棉田的土壤有效 P 含量主要分布在 6 ~ 18 mg/kg 之间, 其相应的 P 肥经济用量为 46.6 ~ 132.8 kg/hm², 其用量与实际生产基本相符。

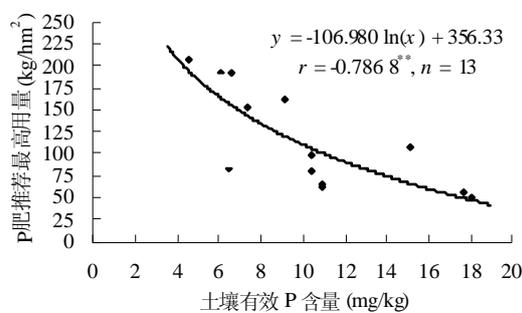


图 1 土壤有效 P 含量与 P 肥最高用量间的关系

Fig.1 Relationship between soil available P and maximal P application rate

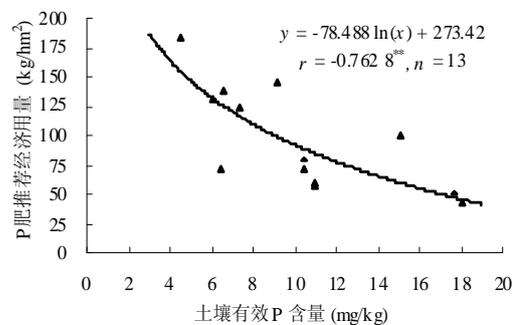


图 2 土壤有效 P 含量与 P 肥经济用量间的关系

Fig.2 Relationship between soil available P and economical P application rate

表 7 根据回归方程推算棉花 P 肥用量
Table 7 Recommendation rates of P fertilizer for cotton based on regression equations

土壤有效 P (mg/kg)	P肥最高用量 (kg/hm ²)	P肥经济用量 (kg/hm ²)
6	164.6	132.8
8	133.9	110.2
10	110.0	92.7
12	90.5	78.4
14	74.0	66.3
16	59.7	55.8
18	47.1	46.6

3 讨论

3.1 影响棉花施磷效果的因素

总体而言, 增施 P 肥可以改善棉花营养状况, 促进棉株营养生长和生殖器官发育, 有效地防止棉花早衰, 从而提高子棉产量。但从试验结果可知, 不同试验点间棉花施 P 效果存在一定的差异, 主要原因可能与试验田块的土壤有效 P 供应状况不同有关。例如 6 号试验施 P 效果不明显, 而 12 号试验施 P 显著地提高了子棉产量, 产量随 P 肥用量的增加一直有上升的趋势, 原因是前一个试验的土壤有效 P 含量较高, 达 18.0 mg/kg, 而后一个试验的土壤有效 P 含量较低, 只有 4.5 mg/kg。一般而言, 土壤有效 P 含量越高, 土壤供 P 能力越强, 作物对当季肥料 P 的依赖程度越小, 施用 P 肥的当季增产效果便不明显, 因此土壤有效 P 含量在一定程度上反映了土壤的供 P 能力^[12]。在一定条件下施 P 可以刺激棉花根系生长, 使根表面积和根密度增大, 有利于根系对营养元素的吸收, 但在土壤供 P 能力较强的情况下, P 肥施用过多, 易引起土壤中营养元素比例失调 (例如高 P 可能会引起缺 Zn), 从而会对棉株产生不利的影响^[13]。如 9 号试验, 在施 P 0 ~ 72 kg/hm² 范围内, 子棉产量随 P 肥用量的增加而增加, 但当 P 肥用量达 90 kg/hm² 时试验出现了减产。这从一个侧面说明, 测土配方施肥具有重要的现实意义。

P 肥肥效的发挥, 除了受土壤有效 P 含量水平影响外, 耕作制度以及栽培措施也是重要的影响因子。例如 5 号试验, 在基础地力中等 (土壤有效 P 15.1 mg/kg) 条件下, 试验最高产量只有 3 162 kg/hm², 远低于本地理论平均经济产量 (3 872 kg/hm²) 水平, 原因可能与该试验为小麦棉花套种有关, 麦棉共生期间存在养分竞争, 棉株前期生长受小麦胁迫, 棉株根部生长缓慢, 不利于棉株对养分的

吸收, 从而影响了 P 肥的肥效。而除此之外, 与该试验点的种植密度偏小 (1.25 万株/hm²) 可能有一定的关系, 原因是种植密度太小, 棉花产量主要靠生育后期的上部果枝和外围果节成铃, 而中部和内围的中期优质铃比例相对减少, 进而会影响 P 肥肥效和产量^[6]。当然, P 肥肥效的发挥是多种因素综合作用的结果, 由于本研究的试验点较多, 且分布在湖北省不同区域, 试验所用的棉花品种、气候条件、生产力水平、土壤的其他养分含量、甚至不同试验的 N、K 肥用量也有一定的差别, 这些因素均会影响 P 肥的肥效, 由于各种因素间的相互影响及其复杂性, 本文未能作更深入的探讨, 有待今后作进一步研究。

3.2 磷肥利用效率指标的应用

从试验结果可知, 不同试验点间 P 肥偏生产力和 P 肥农学利用率存在较大差别, 原因可能与各试验点的产量水平以及 P 肥施用量不同有关。如 P 肥偏生产力以 6 号试验最高, 达 P₂O₅ 129.92 kg/kg, 而以 12 号试验最低, 只有 P₂O₅ 16.85 kg/kg, 同时从试验的产量结果来看, 6 号试验的生产力能力最强, 施 P 37.5 kg/hm² 时产量已达 4 872 kg/hm², 而 12 号试验在施 P 达 225 kg/hm² 条件下, 产量只有 3 792 kg/hm²。综合 14 个试验的产量结果和 P 肥用量, 发现 P 肥偏生产力的大小主要与 P 肥用量和产量有关, P 肥偏生产力反映的是棉花吸收肥料 P 和土壤 P 后所产生的边际效应^[6], 表现的是由土壤的自然肥力与人工肥力综合形成的经济肥力, 它反映了土壤为植物生长提供养分、水分以及优良环境条件的能力。

棉花的 P 肥农学利用率以 4 号试验最高, 而施 P 增产量也以 4 号试验为最高。P 肥农学利用率反映的是施用每千克纯 P 增收子棉的能力^[8], 反映的是棉花施用 P 肥后能增产的能力, 它与施 P 产投比相一致。在施 P 增产潜力有限的条件下, 随着 P 肥用量的增加, 其农学利用率会继续下降, 例如 13、14 号试验, 施 P 增产 225、260 kg/hm², 但 P 肥用量达 150 kg/hm², 因此其农学利用率远远低于 6 号试验。综合以上分析, 衡量土壤综合生产能力时, 可以用 P 肥偏生产力作指标; 但在衡量土壤施 P 增产能力时, 用 P 肥农学利用率作指标更能反映客观实际。

4 结论

(1) 施 P 增产 100 ~ 896 kg/hm², 平均增产 347 kg/hm²; 施 P 增产幅度为 2.1% ~ 25.2%, 平均为 10.4%。施 P 纯利润为 464 ~ 5 178 元/hm², 平均为 1 764 元/hm²; 产投比为 2.39 ~ 19.03, 平均为 6.61。

(2) P 肥偏生产力在 P_2O_5 16.85 ~ 129.92 kg/kg 之间, 平均为 P_2O_5 51.27 kg/kg; P 肥农学利用率在 P_2O_5 1.50 ~ 11.95 kg/kg 之间, 平均为 4.15 kg/kg P_2O_5 。

(3) P 肥最高推荐用量在 51.1 ~ 207.2 kg/hm² 之间, 平均为 112.7 kg/hm²; 经济用量在 42.9 ~ 183.2 kg/hm² 之间, 平均为 95.0 kg/hm²; 最高用量比经济用量平均高 17.7 kg/hm²。理论最高产量在 3 130 ~ 4 874 kg/hm² 之间, 平均为 3 878 kg/hm²; 理论经济产量在 3 128 ~ 4 873 kg/hm² 之间, 平均为 3 872 kg/hm²; 理论最高产量比经济产量平均高 6 kg/hm²。

(4) 本试验区域内, 产前测定土壤速效 P 含量 x (mg/kg), 根据推荐施肥方程 $y_{\max} = 356.33 - 106.980 \ln(x)$ ($r = -0.786 8^{**}$, $n = 13$) 和 $y_e = 273.42 - 78.488 \ln(x)$ ($r = -0.762 8^{**}$, $n = 13$), 可以计算出相应的 P 肥最高用量和经济用量 y (kg/hm²)。

参考文献:

- [1] 王平, 陈新平, 田长彦, 张福锁. 不同水氮管理对棉花产量、品质及养分平衡的影响. 中国农业科学, 2005, 38(4): 761-769
- [2] 范术丽, 许玉璋, 张朝军. 氮磷钾对棉花伏桃发育的影响. 棉花学报, 1999, 11(1): 24-30
- [3] 庞荣丽, 介晓磊, 方金豹, 谭金芳, 李有田. 有机酸对石灰性潮土有机磷组分的影响. 土壤, 2008, 40 (4): 566-570
- [4] 宋春, 韩晓增. 长期施肥条件下土壤磷素的研究进展. 土壤, 2009, 41 (1): 21-26
- [5] 吴翠平, 王海燕, 郭宗民. 棉花氮磷钾化肥配施的效果及适宜用量试验. 山东农业科学, 2007(1): 79-80
- [6] 羿国香, 巴四合, 闻敏. 湖北省杂交棉栽培技术存在的主要问题与优化措施. 中国棉花, 2006, 33(2): 2-3
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-110
- [8] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924
- [9] 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 毛达如, 张福锁. “3414”肥料试验模型拟合的探讨. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409-413
- [10] 吕晓男, 陆允甫. 浙中红壤油菜田供钾特性和钾肥用量研究. 土壤通报, 2000, 31(5): 228-231
- [11] 李银水, 鲁剑巍, 邹娟, 李小坤, 黄和平, 余勇, 姚忠清, 彭文勇, 李彬. 湖北省油菜磷肥效应及推荐用量研究. 中国油料作物学报, 2009, 31(1): 44-50
- [12] 李刚华, 丁艳锋, 杨文祥, 吴昊. 江苏省主要土壤的磷肥指数及适宜磷肥用量. 土壤通报, 2005, 36(6): 896-898
- [13] 崔水利, 张炎, 王讲利, 姚家鹏. 施磷对棉花根系形态及其对磷吸收的影响. 植物营养与肥料学报 1997, 3(3): 249-253

Study on Response to Phosphorus Application and Optimal P Recommended Rate for Cotton in Hubei Province

LI Yin-shui¹, LU Jian-wei¹, LI Xiao-kun¹, LU Ming-xing², LIU Guang-wen³, ZHANG Yao-xue⁴, XU Wei-ming⁵, LI Bin⁶

(1 Resources & Environment College, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2 Soil and Fertilizer Station of Hubei Province, Wuhan 430070, China; 3 Soil and Fertilizer Station of Wuxue City, Wuxue, Hubei 436300, China; 4 Soil and Fertilizer Station of Huangmei County, Huangmei, Hubei 436500, China; 5 Soil and Fertilizer Station of Shayang County, Shayang, Hubei 448200, China; 6 Soil and Fertilizer Station of Jingzhou City, Jingzhou, Hubei 434000, China)

Abstract: A study was carried out in Hubei Province to evaluate the effects of phosphorus (P) fertilization rates on yield, economic benefit, P use efficiency and optimal P recommendation rate of cotton at 14 tested sites. The results revealed that the yield and profit of cotton significantly increased when P supplied moderately. The main results were as follows: ① Compared with the treatment without P fertilizer, the cotton yield of P application increased to 100 - 896 kg/hm² for all treatments with an average increase of 347 kg/hm². The increment rate ranged from 2.1% to 25.2% with the average rate of 10.4% for P application. ② The average net profit of the P application was 1 764 Yuan/hm² and the value to cost ratio was 6.61. ③ The average partial factor productivity of applied P (PFPP) and agronomic P use efficiency (APUE) were P_2O_5 51.27 kg/kg and P_2O_5 4.15 kg/kg respectively. ④ According to fertilizer response equations, the economical P application rate ranged from 42.9 kg/hm² to 183.2 kg/hm², and the average rate was 112.7 kg/hm². It showed that the economical P application rate had a significantly negative correlation with soil available P level, and the economical P application rate of cotton could be gained through the equation $y = 273.42 - 78.488 \ln(x)$ (here y means applied rate of P_2O_5 , x means soil available P content) in Hubei Province.

Key words: Cotton, Phosphorus fertilizer, Seed-cotton yield, Profit, Optimal P recommended rate