◆健康保育与环境修复◆

磷酸脲型酸性水溶肥的制备及其在石灰性土壤大豆种植上的应用效果

马培根[1]，王开勇[2]，刘　旭[1]，刘懂飞[2]，崔文理[2]，杨　俊[1]

（1. 瓮福（集团）有限责任公司，贵州 贵阳　550002；2. 石河子大学 农学院，新疆 石河子　832061）

［摘　要］介绍磷酸脲型酸性水溶肥的制备。为验证石灰性土壤大豆全生育周期施用磷酸脲型酸性水溶肥的可行性，采用田间试验研究酸性磷肥对大豆生长及产量的影响。结果表明：相较于空白组，施用磷酸脲型酸性水溶肥的大豆在苗期、分枝期、花期、结荚期、鼓粒期和成熟期的鲜质量、干质量和株高均有提高；空白、工业级磷酸一铵和磷酸脲型水溶肥组的产量分别为4 528.11、4 863.89、5 254.52 kg/hm^2，磷酸脲型水溶肥组比工业级磷酸一铵组产量提高8%，效益增加3 091.23元/hm^2。施用磷酸脲型酸性水溶肥相较于工业级磷酸一铵效果更好。

［关键词］石灰性土壤；磷酸脲型酸性水溶肥；大豆

［中图分类号］TQ444.2；S147.2　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2024）08-0067-04

Production of urea phosphate type acid water-soluble fertilizer and its application effect on soybean planting in calcareous soil

MA Peigen[1], WANG Kaiyong[2], LIU Xu[1], LIU Dongfei[2], CUI Wenli[2], YANG Jun[1]

(1. *Wengfu(Group)Co., Ltd., Guiyang* 550002, *China*; 2. *Agricultural College, Shihezi University, Shihezi* 832061, *China*)

Abstract: The preparation of urea phosphate type acid water-soluble fertilizer is introduced. In order to verify the feasibility of applying urea phosphate type acid water-soluble fertilizer on the whole fertility cycle of soybean in calcareous soil, the field experiment is set up to study the effects of acid phosphate fertilizer on soybean growth and yield. The results show that, compared with the blank group, the fresh weight, dry weight and plant height at seeding, meristem, flowering, scab, bulb and matturity stages are higher in soybean fertilized with acid phosphorus fertilizer are increased; The yields of the CK, TMAP and AP groups are 4 528.11, 4 863.89, 5 254.52 kg/hm^2, respectively; The yield and benefit of AP group are 8% and 3 091.23 RMB Yuan/hm^2 higher than that of TMAP group, respectively. The application of urea phosphate type acid water-soluble fertilizer is more effective compared with industrial grade monoammonium phosphate.

Key words: calcareous soil; urea phosphate type acid water-soluble fertilizer; soybean

2022年新疆大豆种植面积高达4.00万hm^2，比2021年增加145.4%[1]。肥料中氮磷钾是维持大豆生长发育所必需的大量营养元素，对大豆产量与品质具有重要作用[2]。然而，新疆以石灰性土壤为主，土壤中大量的Ca^{2+}易将磷肥固定[3]。大量的无效施肥又将加剧土壤盐碱化，导致土地生产力降低。酸性磷肥的施用能有效改善土壤pH，避免正磷酸盐被固化[4]。同时，研究表明，合理补充磷肥可使大豆产量增加6.47%～19.88%[5]。因此选择合适的酸性磷肥对提高大豆产量有积极意义。

相关研究表明，在石灰性土壤上，局部降低土壤pH能提高土壤有效磷含量[6]。崔磊等[7]通过施加硫酸铵、草酸、柠檬酸改善土壤pH，提高棉花产量。酸性磷肥由于其自身带有的酸性，能很好地降低盐碱土壤pH。张皓禹等[8]研究发现，相较于磷酸一铵（MAP），磷酸脲（UP）处理土壤pH较低，有利于改善土壤的供磷能力，提高土壤有效磷含量，磷肥利用率从19.68%提高到28.18%。刘道等[9]研究发现，滴施酸性水溶性磷肥不同程度地降低玉米根系周围土壤pH，其中磷酸脲可显著降低0～40 cm土壤pH。刘键等[10]研究发现，相比常规施肥，用磷酸脲滴灌对棉花的生长，特别是后期

［收稿日期］2024-05-27

［作者简介］马培根（1995-），男，四川平昌人，助理工程师，主要研究方向为磷化工工艺及产品。E-mail：mapeigen0@163.com

［通信作者］杨　俊（1984-），男，工程师，长期从事磷复肥研究工作。E-mail：644897802@qq.com

［基金项目］萃余磷酸梯级高值化利用技术创新中心（黔科合中引地[2023]004）

生长有促进作用，可使棉铃脱落减少，单铃质量增加，棉花品质提升，平均增产率为10.8%。酸性水溶性磷肥已广泛应用于棉花和玉米的种植，但对盐碱地大豆的应用效果尚不明确，尤其是磷酸脲型酸性水溶肥的应用，需要开展农化试验验证。通过设2种酸性磷肥处理，研究不同酸性磷肥对大豆生长和产量的影响，为提高大豆产量、提高资源利用效率提供理论依据和技术支撑。

1 磷酸脲型酸性水溶肥的制备

1.1 制备方法

向肥料级磷酸中加入其质量10%的浓硫酸，混匀后加入一定质量的尿素，控制混合溶液 $n(P_2O_5)/n(N)$ 为0.90～1.10，混合溶液在70 ℃下真空浓缩，控制 $w(P_2O_5)$ 为40%～42%，冷却降温至40 ℃后保持2 h，离心分离烘干后得到磷酸脲型酸性水溶肥，母液加入肥料级磷酸、硫酸和尿素后用于循环制备产品。

1.2 产品特性及规格

磷酸脲型酸性水溶肥指标见表1，水溶肥总养分 $w(P_2O_5+N)$ 达到56.2%，且产品水溶性很好。水溶液显强酸性，肥水质量比1∶250时pH为2.2，产品各项指标均达到NY/T 1107—2020固体产品要求。由产品XRD（见图1）可知，产品的特征峰与磷酸脲基本一致，由此推断产品主要组成为磷酸脲。

表1 磷酸脲型酸性水溶肥产品指标

Table 1 Product index of urea phosphate acid water-soluble fertilizer

项目	w(大量元素)/%	w(水不溶物)/%	$w(H_2O)$/%	w(缩二脲)/%	pH(1∶250水溶液)	w(Hg)/%	w(As)/%	w(Cd)/%	w(Pb)/%	w(Cr)/%
NY/T 1107—2020固体产品要求	≥50.0	≤1.0	≤3.0	≤0.9		≤0.000 5	≤0.001 0	≤0.001 0	≤0.005 0	≤0.005 0
磷酸脲型酸性水溶肥	56.2	未检出	1.4	0.34	2.2	0.28	7.23	0.14	1.91	44.53

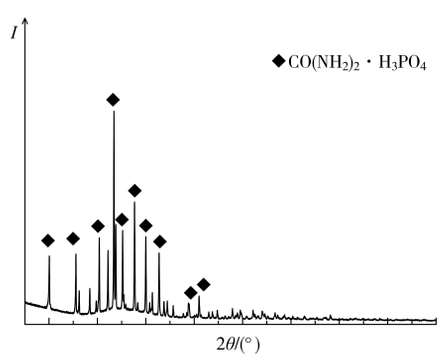

图1 磷酸脲型酸性水溶肥产品XRD图

Fig. 1 XRD of urea phosphate acid water-sduble fertilizer

1.3 成本测算

磷酸脲型酸性水溶肥成本如表2所示，产品成本为3 946元/t，折合单养分价格约71.1元，成本较传统晶体磷酸一铵更低。

表2 磷酸脲型酸性水溶肥成本测算

Table 2 Cost calculation of urea phosphate acid water-soluble fertilizer

项目	单价/(元·t⁻¹)	吨产品消耗/t	吨产品成本/元
磷酸(100%P_2O_5计)	5 500	0.42	2 310
尿素	2 900	0.29	841
硫酸	300	0.10	30
蒸汽	290	1.00	290
电耗①	0.5	100	50
设备折旧			125
人工成本			200
包装袋②	2.5	40	100
合计			3 946

注：①单位kW·h；②单位元/个。

2 酸性磷肥的应用效果评价

2.1 试验区概况

试验于新疆维吾尔自治区沙湾市乌兰乌苏农业气象试验站进行田间种植，试验土壤质地为壤土。土壤基础指标为：0～40 cm土层土壤 w(碱解氮) 43.7 mg/kg、w(有效磷) 7.8 mg/kg、w(速效钾) 242.7 mg/kg。

2.2 试验材料

供试大豆品种为垦农23号，2023年4月28日播种。

供试肥料磷酸一铵（工业级，12-60-0），由瓮福达州化工有限责任公司生产；尿素（农业级，w(N) 46.0%），由新疆天业股份有限公司生产；硫酸钾（农业级，$w(K_2O)$ 52%），由国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司生产。

2.3 试验方法

本试验设置不施磷肥处理（CK）、施用工业级磷酸一铵（TMAP）处理和磷酸脲型酸性水溶肥（AP）处理，每个处理重复3次，共9个4 m×5 m的小区。按667 m^2大田施纯氮（以N计）225 kg、纯磷（以P_2O_5计）150 kg、纯钾（以K_2O计）135 kg，5月至8月参照大豆不同生育期的需肥情况，分6个阶段随水滴灌施入，如表3所示。整个大豆生育期，所有小区滴灌量和当地农民滴灌量保持一致，每个小区667 m^2滴灌量为450 m^3。

表 3　大豆不同时期施肥方案

Table 3　Fertilization plan for soybean at different stages

生育时期	施氮肥量占比/%	施磷肥量占比/%	施钾肥量占比/%	施入时间
苗期	4	3	4	5 月 27 日
分枝期	13	11	17	6 月 12 日
花期	31	59	43	6 月 25 日
结荚期	19	1	23	7 月 12 日
鼓粒期	12	14	6	7 月 21 日
成熟期	21	12	7	8 月 9 日

在不同生长时期，从每小区选择有代表性的植株 3 株，测定其鲜质量和株高后置于烘箱内，先 105 ℃杀青 30 min，后 75 ℃烘干至恒质量，测定干物质质量。大豆成熟期，每小区均全部收获，测定籽粒产量和百粒质量。各指标值均取 3 次重复的平均值。

增产效益=(施磷肥产量×大豆价格−施肥量×肥料价格)−(不施磷肥产量×大豆价格)。

大豆和肥料价格均按当地市场价格计算，其中大豆价格为 8.0 元/kg，尿素、工业级磷酸一铵、磷酸脲型酸性水溶肥和硫酸钾的价格分别为 3.0、6.0、4.9 、4.8 元/kg。

2.4　数据处理

数据处理和分析在 Excel 2007 和 SPSS 11.5 软件中进行。处理间差异采用单因素方差分析，采用 Duncan 法进行显著性差异分析。

3　结果与分析

3.1　酸性磷肥对大豆生长的影响

不同处理下大豆的鲜质量、干质量、株高变化分别见图 2、图 3、图 4。由图 2 可知，施加酸性磷肥处理，生长过程中鲜质量明显高于对照组。同时施加磷酸脲型酸性磷肥的组鲜质量也比施加磷酸一铵的组高，在分枝期，AP 组相较 TMAP 组相比，鲜质量增加了 7.2%。由图 3 可知，相较于 CK 组，AP 组在各个生长期大豆干质量均增加了 10%以上。在结荚期和成熟期，AP 组干质量较 TMAP 组分别高 5.6%和 5.5%。如图 4 所示，AP 组相较于 TMAP 组在大豆生长的各个周期，株高更高，但差异不大，酸性磷肥的施用提高了大豆的株高。从鲜质量、株高和干质量方面来看，大豆在各生长期均呈现 AP > TMAP > CK 的趋势。

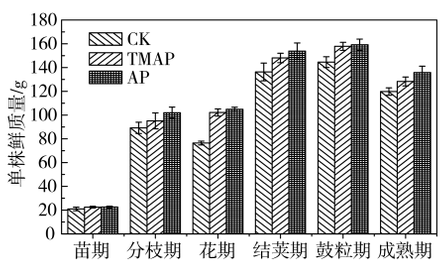

图 2　不同处理下大豆的鲜质量变化

Fig. 2　Changes of fresh mass of soybean under different treatments

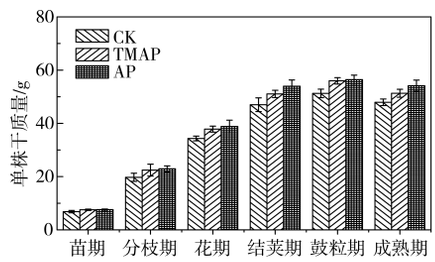

图 3　不同处理下大豆的干质量变化

Fig. 3　Changes of dry mass of soybean under different treatments

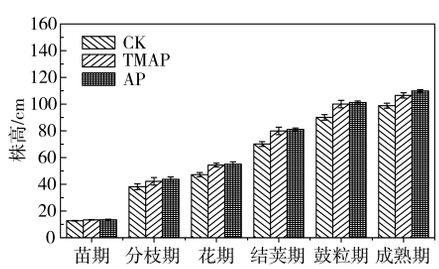

图 4　不同处理下大豆的株高变化

Fig. 4　Changes of plant height of soybean under different treatments

3.2　酸性磷肥对产量和收益的影响

不同处理下大豆的百粒质量和产量见表 4。由表 4 可知，相较于 CK 组和 TMAP 组，AP 组百粒质量，分别显著提高了 10.5%和 6.9%，CK 组和 TMAP 组百粒质量不存在显著差异。CK、TMAP 和 AP 组产量均存在显著差异，AP 组产量最高，达到 5 254.52 kg/hm^2，较 CK 和 TMAP 组分别提高 16.0%和 8.0%。

表 4　不同处理下大豆的百粒质量和产量

Table 4　Hundred-grain mass and yield of soybean under different treat ments

处理	百粒质量/g	产量/(kg·hm^{-2})
CK	17.64 ± 0.48b	4 528.11 ± 110.47c
TMAP	18.24 ± 0.26b	4 863.89 ± 112.75b
AP	19.49 ± 0.47a	5 254.52 ± 146.49a

注：表中数据为平均值±标准差，同行不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

对不同处理的大豆经济效益进行比较，结果见表 5。由表 5 可知，与 CK 组比，AP 组增产效益最高，达到 4 494.50 元/hm^2。AP 组与 TMAP 组比，产量存在明显差异，增产效益达 3 091.23 元/hm^2。综上分析可以看出，施用磷酸脲型酸性水溶肥不但能显著提高大豆产量，还能增加经济效益。

表5 不同处理对大豆经济效益的影响

Table 5 Effects of different treatments on economic beaefits of soybean

处理	产量/（kg·hm^{-2}）	产值/（元·hm^{-2}）	肥料成本/（元·hm^{-2}）	增产效益/（元·hm^{-2}）
CK	4 528.11	36 224.92	2 713.55	
TMAP	4 863.89	38 911.15	3 996.51	1 403.27
AP	5 254.52	42 036.18	4 030.32	4 494.50

4 讨论与结论

在施加同等氮、钾肥条件下，随着磷肥的施加，大豆生长过程中干质量、株高、产量提升，这与前人的研究结果一致[11-13]。本研究中，AP组与TMAP组相比，施加的氮、磷和钾肥量一致，但AP组大豆生长得更好，且产量更高，这可能是磷酸脲型酸性水溶肥改善了土壤的pH，减少了土壤对磷的固化，提高了有效磷含量[8]，更多的磷被大豆吸收。N肥和P肥是株高的主导影响因子[11]，在一定范围内，磷肥施用量显著影响大豆产量[5]，因此其干质量、株高和产量均有所提高。

本试验研究表明，施用酸性磷肥后大豆全生育期的生物量均有明显提升，百粒质量和单产有显著提高。磷酸脲型酸性水溶肥可与氮肥和钾肥在大豆全生育期配施，且在施用同等量磷素条件下，施用磷酸脲型酸性水溶肥比工业级磷酸一铵产量提高了8%，效益增加了3 091.23元/hm^2，因此，石灰性土壤种植大豆施用磷酸脲型酸性水溶肥更为合适。

[参考文献]

[1] 焦灰敏，何宗铃，桑玉伟，等.阿拉尔地区夏播大豆引种比较[J].黑龙江农业科学，2024(4)：43-48.
JIAO H M，HE Z L，SANG Y W ，et al. Comparision of summer soybean introduction in the alar Region [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences，2024(4)：43-48.

[2] 韩德志，闫晓飞，魏然，等.不同施肥处理对黑河43农艺性状、产量及品质的影响[J].大豆科学，2024，43(2)：194-201.
HAN D Z，YAN X F，WEI R，et al. Effects of different fertilization treatments on agronomic traits，Yield，and quality of Heihe 43[J]. Soybean Science，2024，43(2)：194-201.

[3] WEN Z H，SHEN J B，BLACKWELL M，et al. Combined applications ofnitrogen and phosphorus fertilizers with manure increase maize yieldand nutrient uptake via stimulating root growth in a long-termexperiment[J]. Pedosphere，2016，26(1)：62-73.

[4] 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.
KANG L F，WANG J，ZHU L N，et al. Mobility and availability of phosphate under different phosphate sources and application methods in calcareous soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2020，26(7)：1179-1187.

[5] 周欣，陈士亮，王瑞霞，等.氮磷钾肥不同用量配施对春大豆干物质积累和经济效益的影响[J].河北农业科学，2023，27(6)：28-34.
ZHOU X，CHEN S L，WANG R X，et al. Effects of different amounts of nitrogen，phosphorus and potassium fertilizers on dry matter accu-mulation and economic benefit of spring soybean [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences，2023，27(6)：28-34.

[6] 余凯凯，裴海荣，郭景丽，等.不同磷源在碱性土壤中的淋溶特征研究[J].肥料与健康，2021，48(4)：25-28.
YU K K，PEI H R，GUO J L，et al. Leaching characteristics of different phosphorus sources in alkaline soils[J]. Fertilizer & Health，2021，48(4)：25-28.

[7] 崔磊，马腾飞，哈丽哈什·依巴提，等.滴施酸化剂种类及用量对棉花生长的影响[J].新疆农业科学，2023，60(1)：25-31.
CUI L，MA T F，HALIHASHI Y，et al. Effects of acidifier types and dosage on cotton growth[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，2023，60(1)：25-31.

[8] 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.
ZHANG H Y，ZHANG J，ZHANG F L，et al. 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.

[9] 刘道，刘梦洁，梁飞，等.滴施不同水溶性磷肥对石灰性土壤磷分布及玉米磷素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报，2022，28(9)：1720-1733.
LIU D，LIU M J，LIANG F，et al. Effects of water-soluble phosphorus fertilizer on distribution of phosphorus in calcareous soil and utilization of phosphorus by maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2022，28(9)：1720-1733.

[10] 刘键，杜建卫，张卫星.磷酸脲对膜下滴灌棉花品质和产量的影响[J].中国土壤与肥料，2006(4)：37-39.
LIU J，DU J W，ZHANG W X. Effect of urea-phosphate on the quality and yield of cotton by drip irrigation under plastic film [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2006(4)：37-39.

[11] 孙振宁，李晶，段兴武，等.氮磷钾施肥水平对大豆产量及性状的影响[J].作物杂志，2012(5)：135-139.
SUN Z N，LI J，DUAN X W，et al. Effects of combined fertilization of N，P and K on soybean yield and yield traits[J]. Crops，2012(5)：135-139.

[12] 司玉坤，齐欣，武庆慧，等.氮、磷肥用量对豫中地区大豆产量、干物质及经济效益的影响[J].中国农学通报，2019，35(15)：30-34.
SI Y K，QI X，WU Q H，et al. Nitrogen and phosphorus fertilizer rate affect yield，dry matter and economic benefits of soybean in central Henan [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2019，35(15)：30-34.

[13] 张慧敏，常鸿杰，王二伟，等.氮磷钾肥配施对大豆产量及性状的影响[J].陕西农业科学，2022，68(7)：35-38.
ZHANG H M，CHANG H J，WANG E W，et al. Effect of N，P and K combined application on yield and characters of soybean [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences，2022，68(7)：35-38.