

超微细磷钾—活化剂肥在小白菜上的肥效研究

王桂伟¹, 陈宝成¹, 王国鹏¹, 李晗灏¹, 梁海¹, 周华敏¹, 陈剑秋²

(1. 山东农业大学土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018;

2. 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要: 为提高磷钾肥的有效性, 减少磷钾肥固定及淋失, 提高作物产量, 节约农业资源和减少面源污染, 研制超微细磷钾—活化剂肥, 通过盆栽小白菜试验, 研究该肥对小白菜的产量、品质、土壤养分含量及肥料利用率的影响。以常规磷钾肥和添加腐殖酸磷钾肥为对照, 研究磷钾肥与腐殖酸、沸石粉、硅藻土活化剂不同配比并磨细制造超微细磷钾—活化剂肥施肥效果, 共9个处理。结果表明: 超微细磷钾—活化剂肥显著提高了小白菜的产量, 增产率达13.22%~35.14%; 超微细磷钾—腐殖酸—沸石粉肥、超微细磷钾—腐殖酸—硅藻土肥、超微细磷钾—腐殖酸—沸石粉—硅藻土肥处理的小白菜硝酸盐含量降低了30.46%~74.31%, 可溶性糖增加41.70%~150.00%; 土壤有效磷含量平均提高23.15%; 超微细磷钾—活化剂肥的磷肥利用率提高47.58%~238.62%, 农学利用率提高114.12%~303.44%, 钾肥的肥料偏生产力提高13.22%~35.15%, 均达显著水平。超微细磷钾—活化剂肥提高了其保肥和供肥性能, 增加了产量, 建议在肥料生产和施用中选择超微细磷钾—腐殖酸—沸石粉肥料。

关键词: 超微细磷钾; 活化剂; 利用率; 小白菜

中图分类号: S143.4⁺3; S634.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0315-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.050

Study on Fertilizer Efficiency of Superfine Phosphorus and Potassium Activator Fertilizer on Pakchoi

WANG Guiwei¹, CHEN Baocheng¹, WANG Guopeng¹, LI Hanhao¹,

LIANG Hai¹, ZHOU Huamin¹, CHEN Jianqiu²

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018; 2. State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Shandong Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linshu, Shandong 276700)

Abstract: A novel superfine phosphorus-potassium fertilizer was developed to reduce the soil fixing and leaching of phosphorus-potassium fertilizer, improve the nutrition efficiency, reduce the fertilizer application rate, reduce non-point source pollution, and increase crop yield. The potted pakchoi experiment was conducted to study the effects of this new fertilizer on the yield and quality of pakchoi, soil nutrients and fertilizer use efficiency. Nine treatments were designed in this study, with common phosphorus-potassium fertilizer plus Humic Acid and common phosphorus-potassium fertilizer as the control. The phosphate-potassium fertilizer was grinded and mixed with Humic Acid, zeolite powder, diatomite activator respectively in different proportions, which were used to produce the superfine phosphorous-potassium activator fertilizer. The results were as follows: The superfine phosphorus-potassium activator fertilizer significantly increased the pakchoi yield by 13.22%~35.14%. The superfine phosphorus-potassium-Humic Acid-zeolite powder fertilizer, the superfine phosphorus-potassium-Humic Acid-diatomite fertilizer and superfine phosphorus-potassium-Humic Acid-zeolite powder-diatomite fertilizer reduced the nitrate contents in pakchoi by 30.46%~74.31%, and increased the soluble sugar contents by 41.70%~150.00%. The available phosphorus contents of soil increased 23.15% in average. For the superfine phosphorus-potassium activator fertilizer, the utilization rates of phosphate fertilizer were increased by 47.58%~238.62%. The agronomic utilization rates were increased by 114.14%~303.46%. The partial factor productivities of potassium fertilizer were increased by 13.22%~35.15%. The results indicated that the superfine phosphorus-potassium

收稿日期: 2018-02-05

资助项目: 国家“十三五”重点研发计划子课题项目“超微细磷钾腐殖酸缓释肥研制及纳米缓控释肥肥效及机理研究”(2017YFD0200705)

第一作者: 王桂伟(1995—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料研究。E-mail: 15550859323@163.com

通信作者: 陈宝成(1969—), 男, 山东潍坊人, 副教授, 主要从事土肥资源管理与高效利用研究。E-mail: bcch108205@163.com

activator fertilizer could contact enough with the activating agent, which improve the fertilizer efficiency. Thus, it was recommended to select the superfine phosphorus-potassium-Humic Acid-zeolite-activated fertilizer in fertilizer production and application.

Keywords: superfine phosphorus-potassium; activator; utilization rate; pakchoi

磷钾是作物生长发育所必需的两大营养元素,磷素既能通过多种途径参与作物的各种代谢过程,又是作物体内许多有机化合物的重要组分,在保持作物的优质高产和优良品种方面有显著的效果^[1]。然而磷在土壤中移动性较差,易通过化学沉淀、表面反应、闭蓄机制、生物固定等方式被土壤吸附固定,大大降低了磷素的有效性和磷肥利用率。我国作物的磷肥当季利用率为 5%~20%^[2],而施磷量的增加造成磷素资源损失与浪费,引起水体富营养化,对环境造成不可估量的破坏^[3];杨振兴等^[4]研究发现,当每年在褐土上 P_2O_5 的投入量过多时,造成磷素在土壤中的累积固定,使作物产量几乎不受磷素的影响,进而增加磷肥资源浪费^[5]。钾素能促进作物物质运转和合成,增加作物抗性,土壤施钾肥还可以促进作物对磷的吸收^[6]。钾肥在土壤的有效性较高,一般为 40%~45%^[7],但也存在着被土壤胶体颗粒固定和淋失情况,造成浪费。因此合理施用磷钾肥,提高其有效性,对提高作物产量和品质、节约资源、减少污染十分重要。

施用磷素活化剂是提高磷钾肥利用率的重要措施,磷素活化剂具有大量的活性基团,能显著提高水溶性磷的释放能力,增加磷的吸附性,减少其在土壤中的固定。常见的磷素活化剂有腐殖酸、沸石粉、硅藻土等。李春越等^[8]在中国典型农区的 5 种土壤上利用腐殖酸进行试验,发现土壤对磷的最大吸附量随着腐殖酸用量的增加而降低;李见云等^[9]精选提纯的硅藻土,发现其表面附着大量的硅羟基,对红壤磷素有较好的吸附和解吸的效果,能够增加红壤中的水溶性磷含量;He 等^[10]在研究中发现,在酸性土壤中添加沸石会增加磷矿中有效磷的比例;赵夫涛等^[11]、黄雷等^[12]、何振全等^[13]研究发现,超微细活化的磷矿粉对提高磷肥肥效、增加作物的生物量以及增加磷肥的抗固定能力有显著效果。然而前人研究只是将磷肥与活化剂进行简单混合后施入土壤,或是将磷矿粉超微细化后进行施用,采取磷钾肥与增效剂掺混并进行超微细化的方法进行高效磷肥的研制,目前还鲜有报道。

腐殖酸类物质是磷肥的有机活化剂,有较高的阳离子交换能力,通过金属离子(Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等)搭桥与磷酸盐形成腐殖酸—金属—磷酸盐络合物三元复合体,既能防止磷的固定,又易被作物吸收^[14];加入到土壤中的 K^+ 不与磷素产生沉淀,既能为作物生长提供营养,又能减少 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等离子与

磷肥结合形成的沉淀。因此本试验将磷肥与钾肥和几种活化剂按照不同搭配进行掺混,研磨成超细颗粒,使磷肥与钾肥和活化剂充分接触吸附,与磷钾不添加活化剂、磷钾和腐殖酸简单混施相比较,探究其在作物上的施用效果,以期达到减少磷肥在土壤中的固定及钾肥的淋失,为高效磷钾肥研制和施用提供科学依据,具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽试验地点设在山东农业大学土肥资源高效利用国家工程实验室试验基地温室大棚内。供试土壤为取自山东省泰安市的筒育干润淋溶土(普通褐土),土壤硝态氮含量 47.51 mg/kg,铵态氮含量 6.34 mg/kg,有效磷含量 4.00 mg/kg,土壤 pH(水:土为 5:1)8.50,土壤电导率 121.45 $\mu S/cm$ 。

栽培盆为白色塑料桶,上口直径 26.50 cm,高 20 cm,土面直径 25 cm,每盆装土 8 kg;腐殖酸:褐煤腐殖酸,产自内蒙古霍林河,腐殖酸含量 60%;硅藻土:粉末状,产自湖北武汉, SiO_2 含量 91%;沸石粉:粉末状,产自河南,孔隙率 $\geq 48\%$, SiO_2 含量 68%~70%, Al_2O_3 含量 13%~14%;供试肥料包括大颗粒尿素(含 N 46%),普通过磷酸钙(含 P_2O_5 15%),硫酸钾(含 K_2O 50%);小白菜品种为上海青,生长期 30 天。

1.2 试验设计

超微细磷钾—活化剂肥料的制作方法:过磷酸钙、硫酸钾、腐殖酸、沸石粉、硅藻土等按比例混合(表 1),放到球磨机中研磨,粉碎机粉碎后,制成超微细肥料颗粒($< 30 \mu m$)。

试验设 9 个处理,3 次重复。CK 为不施肥;处理 NK 为钾常规施肥;处理 NPK 为磷钾常规施肥;处理 H1 为常规磷钾—腐殖酸肥;处理 H2 为常规钾—超微细磷—腐殖酸肥;处理 H3 为超微细磷钾—腐殖酸肥;处理 HZ 为超微细磷钾—腐殖酸—沸石粉肥;处理 HD 为超微细磷钾—腐殖酸—硅藻土肥;处理 HDZ 为超微细磷钾—腐殖酸—硅藻土—沸石粉肥。除 CK 处理不施氮肥,其他处理均施用等量的常规尿素。具体试验处理及配比见表 1。

于 2017 年 4 月 15 日播种,所有肥料与土混匀后装盆一次性施入,浇水 1 L,水下渗之后,表面均匀撒施 30 粒种子,覆土 1 cm;5 天后间苗,每盆留粗壮小白菜苗 10 株。2017 年 5 月 15 日收获。

表 1 试验处理 单位:kg/hm²

处理	N—P ₂ O ₅ — K ₂ O	尿素	硫酸钾	过磷 酸钙	腐殖酸	沸石粉	硅藻土
CK	0—0—0	0	0	0	0	0	0
NK	225—0—225	489	450	0	0	0	0
NPK	225—225—225	489	450	1500	0	0	0
H1	225—225—225	489	450	1500	244	0	0
H2	225—225—225	489	450	1500	244	0	0
H3	225—225—225	489	450	1500	244	0	0
HZ	225—225—225	489	450	1500	244	195	0
HD	225—225—225	489	450	1500	244	0	195
HDZ	225—225—225	489	450	1500	244	195	195

1.3 样品采集及测定方法

小白菜装盆前,采集基础土壤样品,测定其硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾、pH 电导率;小白菜苗期(生长 15 天时),成熟期(生长 30 天时)分别测定株高(每盆代表性 5 株地上部自然高度的平均值)、SPAD 值(SPAD—502 叶绿素仪)和叶面积(每盆取代表性 5 株,每株取最大两个叶片,测量叶片最大长度和宽度,叶面积=长×宽×0.69^[15]);收获后采集地上部分,称重,记录产量,每盆均匀分取代表性 3 株,测定小白菜可溶性糖、硝酸盐、维生素 C 等品质指标;小白菜剩余部分称重后,烘干(105 ℃杀青 30 min,90 ℃烘干至恒重),测定水分,计算总干物质量,测定氮磷钾营养元素含量,计算总养分吸收量。小白菜收获后,均匀采集土壤样品,测定土壤中硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量。

植株样品指标测定方法:可溶性糖采用酸水解铜还原直接滴定法测定;硝酸盐含量采用紫外—分光光度法测定;维生素 C 采用 2,4—二硝基苯肼比色法测定;植株 N、P、K 含量采用硫酸—双氧水联合消煮,N 采用凯氏定氮法测定,P 采用钒钼黄比色法测定,K 采用火焰光度计法测定。

土壤化学性质测定方法:土壤硝态氮和铵态氮采用 0.01 mol/L 氯化钙浸提新鲜土样后,用 AA3-A001-02E 型流动注射分析仪测定;土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定吸光度;土壤速效钾采用中性醋酸铵浸提—火焰光度计测定;土壤 pH(水:土为 2.5:1)采用 PHSJ—3F 型 pH 计测定;土壤电导率(水:土为 5:1)用 DDS II A 型电导率仪测定^[16]。

1.4 相关计算公式^[17]

磷肥利用率=(施磷区吸磷量—不施磷区吸磷量)/施磷量

磷肥农学利用率=(施磷区作物产量—不施磷区作物产量)/施磷量

氮肥偏生产力=作物产量/施氮量

1.5 数据处理

试验数据处理采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件进

行统计分析,采用 Duncan 法进行方差分析,用 Dunnett’s T3(3)法检验不同处理间差异的显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对小白菜产量及品质的影响

收获后测定不同处理小白菜的鲜重和品质。从表 2 可以看出,与 NPK 处理(常规磷钾肥)相比,添加活化剂处理不同程度地提高了小白菜产量,其中超微细磷钾—活化剂肥处理差异达显著水平,增产幅度为 15.99%~38.45%,其中以 HDZ(超微细磷钾—腐殖酸—硅藻土—沸石粉肥)产量最高,而 H1(常规磷钾肥—腐殖酸肥)与处理 NPK 产量差异不显著;H2、H3、HZ、HD、HDZ(超微细磷钾—活化剂肥)比 H1(常规磷钾—腐殖酸肥)也显著增加了小白菜产量,分别增加了 13.22%,20.19%,25.19%,25.20%,35.14%;另外,处理 H3(超微细磷钾—腐殖酸肥)比 H2(常规钾肥—超微细磷肥—腐殖酸)也增产了 6.15%,进一步说明磷钾肥经超微细混合磨细处理能增加小白菜产量。处理 H3(超微细磷钾—腐殖酸肥)、HZ(超微细磷钾—腐殖酸—沸石粉肥)与 HD(超微细磷钾—腐殖酸—硅藻土肥)对小白菜产量差异不显著,而处理 HDZ(超微细磷钾—腐殖酸—沸石粉—硅藻土肥)小白菜产量显著高于处理 H3、HZ、HD,增产幅度为 7.94%~12.45%,说明腐殖酸、腐殖酸单独与沸石粉或硅藻土配施对小白菜产量无显著效果,而腐殖酸与沸石粉、硅藻土三者配合施用则效果增产显著。

维生素 C、硝酸盐和可溶性糖含量是反映小白菜营养品质的重要指标,而且受施肥的影响较大。一般情况下,Vc 及可溶性糖含量越高,硝酸盐含量越低,小白菜的营养及口感越好,其品质越好^[18-19]。小白菜收获后测定鲜样品质指标,结果表明所有施肥处理小白菜 Vc 含量都显著低于不施肥处理 CK,硝酸盐含量显著或不显著的高于 CK,可溶性糖都显著低于 CK,说明施肥虽然增加了小白菜产量,但降低了其品质。与磷钾常规施肥处理(NPK)相比,处理 HD 和处理 H1 显著增加了小白菜的 Vc 含量,分别增加了 21.28%和 23.54%,处理 H3、HZ 显著降低了 Vc 含量,分别降低了 23.28%和 16.36%,处理 H2 和 HDZ 则与处理 NPK 差异不显著;与 H1 相比,超微细磷钾—活化剂肥处理都不同程度降低了小白菜 Vc 含量,降低了 1.83%~37.90%。硝酸盐含量表明,与 NPK 处理相比,处理 H2、H3 显著增加了小白菜硝酸盐含量,分别增加了 24.18%和 33.33%,而处理 HZ、HD、HDZ 则显著降低了硝酸盐含量,分别降低了 27.55%,73.24%和 62.04%;与 H1 处理相比,处理 H2、H3 显著增加了小白菜硝酸盐含量,分别增加了 19.20%和 27.99%,而处理 HZ、HD、HDZ 则显著降低了

硝酸盐含量,分别降低了 30.46%,74.31%和 63.57%。与 NPK 处理相比,处理 H1、H2、HZ、HD 和 HDZ 显著增加了小白菜可溶性糖含量,其中以处理 HDZ 的可溶性糖含量最高,增加了 158.30%,其余各处理增长率为

41.70%~150.00%;与 H1 相比,H2、HD 和 HDZ 显著增加了小白菜可溶性糖含量,分别增加了 27.27%,36.36%和 40.91%,而处理 H3、HZ 则显著降低了可溶性糖含量,分别降低了 36.36%和 22.73%。

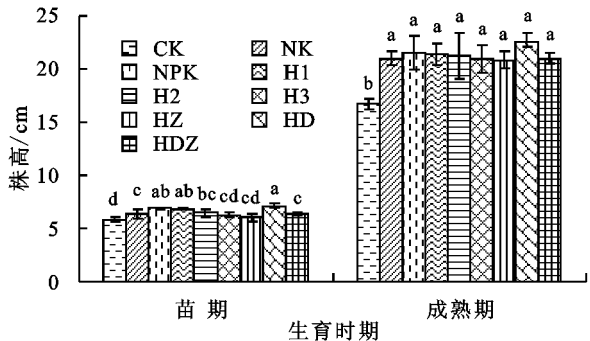
表 2 不同处理小白菜产量及品质

处理	产量			品质		
	鲜重产量/ (kg·hm ⁻²)	较 NPK 增产/%	较 H1 增产/%	Vc 含量/ (mg·kg ⁻¹)	硝酸盐含量/ (mg·g ⁻¹)	可溶性糖 含量/%
CK	33562.50f	—	—	861.08a	3.95e	0.89a
NK	68353.13e	—	—	577.04c	20.41a	0.16d
NPK	75459.38d	—	—	592.16c	11.25c	0.12e
H1	77306.25d	2.45	—	731.55b	11.72c	0.22c
H2	87525.00c	15.99	13.22	584.89c	13.97b	0.28b
H3	92910.94b	23.13	20.19	454.30d	15.00b	0.14de
HZ	96778.13b	28.25	25.19	495.35d	8.15d	0.17d
HD	96787.50b	28.26	25.20	718.15b	3.01e	0.30b
HDZ	104475.00a	38.45	35.14	626.98c	4.27e	0.31b

注:表内同列数据后相同字母表示在 0.05 水平上差异不显著。下同。

2.2 不同处理对小白菜株高的影响

株高反映了小白菜的生长状况,测定小白菜苗期和收获期株高,从图 1 可以看出,苗期小白菜的株高在 5.57~6.77 cm,CK 小白菜的株高最低且差异显著,HD 处理小白菜的株高最高,但与处理 NPK 和 H1 差异不显著,较 H2、H3、HZ、HDZ 处理分别增加了 9.19%,12.83%,16.72%和 11.50%,差异显著,处理 H2、H3、HZ、HDZ 株高低于 NPK 和 H1。试验结果表明,超微细磷钾—活化剂肥处理总体在小白菜苗期株高上没有明显效果,但苗期高度不是小白菜生长好坏的评价标准,苗壮的长势和叶片大小及生物量更能反应生长优劣;成熟期时小白菜株高为 16.03~21.67 cm,与 CK 相比,各施肥处理均表现出促进小白菜株高生长的趋势,增加幅度为 24.74%~35.14%,其中 HD 处理相对较好,但各施肥处理间株高差异不显著。



注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

图 1 不同处理小白菜株高变化

2.3 不同处理对小白菜叶片 SPAD 值和叶面积的影响

植株叶片的叶绿素含量是体现作物光合作用强弱的重要指标,也能够直接反映作物的营养状况,SPAD 值大小与叶绿素含量呈正相关^[20]。从表 3 可以看出,与 NPK 处理相比,添加活化剂处理苗期和收获期小白菜叶片叶绿素含量有不同程度提高,其中

苗期超微细磷钾—活化剂肥处理达显著差异水平,尤其是 HD、HDZ 处理差异更为显著,SPAD 值分别增加了 7.65%和 8.64%,收获期处理 HD、H1、H2、H3、HDZ 小白菜叶片叶绿素含量达显著水平,处理 HZ 则差异不显著。较高的叶绿素含量,促进了叶片光合作用,加快植株生长,为增产创造了良好的条件。

测量苗期及收获期小白菜叶面积。在苗期,与 NPK 处理相比,施用活化剂处理中除了 H1 处理,其他处理均在不同程度上增加了叶面积,其中 H3、HZ、HD、HDZ 差异达到显著水平,叶面积增加了 7.84%~13.50%,与 H1 处理相比,超微细磷钾—活化剂肥处理均显著提高了叶面积,增加了 12.01%~26.45%,苗期各处理中,HD 处理叶面积最大,分别比 NPK、H1 处理增加 13.50%和 26.45%;在收获期,与 NPK、H1 处理相比,HDZ 处理叶面积最大,且差异达到显著水平,其他施肥处理叶面积虽有不同程度的增减,但差异均不显著。

表 3 不同处理小白菜 SPAD 值和叶面积

处理	SPAD 值		叶面积/cm ²	
	苗期	成熟期	苗期	成熟期
CK	36.90c	35.63d	16.94e	44.48e
NK	37.03bc	38.90bc	21.50c	63.55d
NPK	37.37bc	36.93cd	22.45c	66.96bcd
H1	38.27bc	39.87ab	20.15d	67.35bcd
H2	39.60a	39.53ab	22.57c	65.26cd
H3	39.80a	39.03bc	25.26ab	70.85b
HZ	39.90a	36.90cd	24.21b	66.49bcd
HD	40.23a	41.47a	25.48a	68.48bc
HDZ	40.60a	38.00bc	24.60ab	79.25a

2.4 不同处理对土壤速效养分含量的影响

土壤速效养分含量是土壤供应养分的强度指标,直接影响作物产量。小白菜收获后测定土壤速效养分,从表 4 可以看出,与 NPK 处理相比,处理 H2、

H3、HZ 的土壤硝态氮含量有所提高,其他处理有所降低,但差异不显著;与处理 H1 相比,全部超微细磷钾—活化剂肥的处理中,处理 H2 土壤硝酸盐含量显著提高,且显著高于 HD 和 HDZ 处理,其他处理则与 H1 差异不显著;全部超微细磷钾—活化剂肥处理的土壤硝态氮含量平均值比 H1 高 23.20%,总体上提高了土壤供氮水平。全部超微细磷钾—活化剂肥处理土壤铵态氮含量与 NPK 处理和 H1 处理差异不显著,但也有所提高,平均值比处理 NPK 提高了 17.00%;与 NPK、H1 处理相比,H2、H3、HZ 和 HDZ 处理显著提高土壤有效磷含量,比 H1 分别增加了 27.64%,20.80%,43.98%,17.24%,HD 处理差异不显著,全部超微细磷钾—活化剂肥处理土壤有效磷平均含量比 H1 提高了 23.15%;与处理 NPK、H1 相比,处理 H2、H3、HD 显著提高了土壤速效钾含量,处理 HZ 显著降低了速效钾含量,处理 HDZ 差异不显著,速效钾含量降低的原因可能是小白菜产量高,从土壤中吸收钾素多造成的。从各处理土壤养分含量情况,结合小白菜产量,说明磷钾肥和活化剂混合一起磨细,制造成超微细新型磷钾肥,更有利于作物对磷肥和钾肥的吸收,进而也促进了氮肥的吸收和利用,为作物生长提供了良好的养分条件。

2.5 不同处理对小白菜磷吸收及利用的影响

测定小白菜对磷素的吸收量,计算磷肥肥料利用

率和农学利用率。从表 5 可以看出,与处理 NPK、H1 相比,超微细磷钾—活化剂肥处理都提高了小白菜磷吸收量,分别增加了 13.05%~62.48%和 12.07%~60.44%,均达显著水平,其中以处理 HZ 的磷吸收量最高;小白菜磷肥利用率分别比 NPK 处理、H1 处理提高了 55.13%~256.08%和 47.56%~238.70%,其中以 HZ 处理磷肥利用率最高;小白菜磷肥农学利用率较 NPK 处理、H1 处理分别提高了 169.71%~408.17%和 114.12%~303.44%,其中 HDZ 处理磷肥农学利用率最高。超微细磷钾—活化剂肥料能够使磷肥与腐殖酸或硅藻土、沸石粉充分接触,提高了吸附性和活化程度,具有很好的保肥和供肥性能,提高了作物对磷的吸收。

表 4 不同处理土壤速效养分的影响

处理	单位:mg/kg			
	硝态氮 含量	铵态氮 含量	有效磷 含量	速效钾 含量
CK	16.11d	3.69a	2.69f	140.08f
NK	21.16abc	3.02a	3.71e	173.32bc
NPK	21.76abc	2.99a	6.62d	168.57cd
H1	18.07bcd	3.50a	6.73d	169.37cd
H2	28.35a	3.15a	8.59b	182.03a
H3	22.64abc	3.55a	8.13bc	182.82a
HZ	23.63ab	3.76a	9.69a	156.70e
HD	17.57cd	3.47a	7.14cd	175.70b
HDZ	19.12bcd	3.56a	7.89bc	164.62d

表 5 不同处理小白菜磷吸收量及养分利用

处理	吸磷量/ (kg·hm ⁻²)	磷肥 利用率/%	较 NPK 增加/%	较 H1 处理 增加/%	磷肥农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	较 NPK 增加/%	较 H1 增加/%
CK	12.37g	—	—	—	—	—	—
NK	16.03f	—	—	—	—	—	—
NPK	21.19e	5.26	—	—	10.40	—	—
H1	21.46e	5.53	5.13	—	13.10	25.96	—
H2	24.05d	8.16	55.13	47.56	28.05	169.71	114.12
H3	27.55bc	11.72	122.81	111.93	35.93	245.48	174.27
HZ	34.43a	18.73	256.08	238.70	41.59	299.90	217.48
HD	25.62cd	9.77	85.74	76.67	41.60	300.00	217.56
HDZ	29.10b	13.30	152.85	140.51	52.85	408.17	303.44

2.6 不同处理对小白菜氮钾吸收及利用的影响

测定小白菜对氮素和钾素的吸收,计算氮肥、钾肥的偏生产力。从表 6 可以看出,与处理 NPK 和 H1 相比,超微细磷钾—活化剂肥处理提高了小白菜对氮素的吸收,分别提高了 3.25%~18.76%和 2.87%~20.69%,其中以 HZ 处理最高,差异达显著水平;与处理 NPK 和 H1 相比,超微细磷钾—活化剂肥处理提高了小白菜对钾素的吸收,分别提高了 30.15%~48.66%和 18.08%~34.88%,其中以 HDZ 处理最高,差异达显著水平。氮肥和钾肥的肥料偏生产力比处理 NPK、H1 也显著提高,提高幅度

分别达 15.99%~38.45%和 13.22%~35.15%。超微细磷钾—活化剂肥提高了土壤的保肥和供肥性能,促进了作物对氮素和钾素的吸收。

3 讨论

本试验采取超细磷钾肥与活化剂一起磨细紧密结合混施,产生了显著的效果,提高了土壤磷钾素有效性,比常规施肥显著提高了小白菜的产量,不同程度提高了小白菜品质。

试验所用的腐殖酸中的活性基团具有较强的络合性、离子交换性和生物活性,在肥料中添加腐殖酸能够提高肥料的利用率,腐殖酸配合磷肥施入土

壤后,不仅能够增加磷素在土壤中的移动性,降低土壤对磷素的固定作用,延缓土壤中有效磷转化成无效磷的过程,还能促进作物对磷的吸收,提高磷

肥的当季利用率;腐殖酸的强的吸附性和阳离子交换能力也增加了钾肥的保肥供肥能力,提高了钾肥的利用率。

表 6 不同处理小白菜氮钾养分吸收量及养分利用

处理	吸氮量/ (kg·hm ⁻²)	较 NPK 增加/%	较 H1 处理 增加/%	吸钾量/ (kg·hm ⁻²)	较 NPK 增加/%	较 H1 增加/%	钾肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	较 NPK 增加/%	较 H1 增加/%
NK	14.75d	—	—	177.92d	—	—	303.79e	—	—
NPK	15.99cd	—	—	181.52d	—	—	335.38d	—	—
H1	16.05cd	0.38	—	200.06c	10.21	—	343.58d	2.45	—
H2	17.54bc	9.69	9.28	236.24b	30.15	18.08	389.00c	15.99	13.22
H3	18.23ab	14.01	13.58	236.64b	30.37	18.28	412.94b	23.13	20.19
HZ	19.37a	21.14	20.69	266.71a	46.93	33.32	430.13b	28.25	25.19
HD	16.51c	3.25	2.87	236.79b	30.45	18.36	430.17b	28.26	25.2
HDZ	18.99ab	18.76	18.32	269.84a	48.66	34.88	464.33a	38.45	35.15

硅藻土、沸石粉具有比表面积大和结构多孔的特点,比表面积大,离子吸附能力强,能够吸附土壤和肥料中的磷钾,在作物生长期缓慢释放出来,减少了磷在土壤中的固定和钾的淋失,提高了磷钾肥利用率,这与曹畅等^[21]研究一致,本试验采取的磷钾肥与硅藻土和沸石粉一起进行充分的磨细,增加了磷钾吸附程度,减少了磷肥与土壤中高价阳离子的结合几率,减少了磷肥化学沉淀。另外由于钾肥的存在,通过质量作用定律原理,也降低了磷肥与土壤中高价阳离子的结合。

本试验设计中,主要目的是提高磷肥的有效性,在制造超微细肥料中加入了钾肥一是为了通过磷钾交互作用、减少土壤高价阳离子对磷的固定,增加磷肥有效性;二是与作为钾肥进行施用。在试验处理的设计中,没有设钾空白处理,因此无法计算钾肥利用率,虽然可以通过小白菜对钾的吸收量和钾肥肥料生产力体现钾肥的吸收利用情况,这也是试验处理设计中的一个缺陷。另外,考虑到腐殖酸对土壤综合性质的良好作用及目前肥料生产中腐殖酸利用较多,且试验处理总数量不宜过多,所以在试验处理设计中,除了有一个磷钾肥单独加腐殖酸外,其他每个超微细磷钾肥料与活化剂配施中都加入了腐殖酸,处理中也没有设计超微细磷钾单独与硅藻土或沸石粉混施的处理。本试验对超微细磷钾肥加活化剂产生的增产增效机理研究的较少,今后应通过对该新型肥料本身及在土壤中的吸附解吸、作物主要生长期土壤磷钾全量及速效含量等指标进行进一步的研究。

4 结 论

超微细磷钾—活化剂肥处理在不同程度上提高了土壤养分含量,有利于提高土壤的保肥供肥能力,为作物生长提供了良好的养分条件。

超微细磷钾—活化剂肥处理显著提高了小白菜的养分吸收。与常规磷钾—腐殖酸肥处理相比,小白菜氮

的吸收量增加了 3.25%~18.76%,磷的吸收量增加了 12.07%~60.44%,钾的吸收量增加了 18.08%~34.88%。超微细磷钾—活化剂肥显著地提高了小白菜产量,增产率达 13.22%~35.14%。磷肥利用率较常规磷钾—腐殖酸肥处理提高 47.58%~238.62%,磷肥农学利用率提高 114.14%~303.46%,钾肥的肥料偏生产力提高 13.22%~35.15%,均达显著水平。

超微细磷钾—腐殖酸—沸石粉肥在提升小白菜产量和磷肥利用率等方面均有显著效果,建议在肥料生产和施用中选择此种施肥处理。

参考文献:

[1] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 2 版. 北京:中国农业大学出版社,2003:2.

[2] 李志坚,林治安,赵秉强,等. 增效磷肥对冬小麦产量和磷素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1329-1336.

[3] Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T, et al. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. Soil and Water Conservation,1996,51(2):160-166.

[4] 杨振兴,周怀平,解文艳,等. 长期施肥褐土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(6):1529-1535.

[5] Wang H Y, Zhou J M, Du C W, et al. Potassium fractions in soils as affected by monocalcium phosphate, ammonium sulfate, and potassium chloride application[J]. Pedosphere,2010,20(3):368-377.

[6] 刘冬碧,陈防,鲁剑巍,等. 油菜干物质积累和养分钾、磷、硫吸收特点及施钾的影响[J]. 中国油料作物学报,2001,23(2):48-51.

[7] 刘春生. 土壤肥科学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2006:7.

[8] 李春越,党廷辉,王万忠,等. 腐殖酸对农田土壤磷素吸附行为的影响研究[J]. 水土保持学报,2011,25(3):77-82.

- 2010,29(6):1050-1056.
- [4] Anwarzeb K, Sardar K, Muhammad A K, et al. The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: A review[J]. Environmental Science and Pollution,2015,22(18):13772-13799.
- [5] Kwang K L, Han S C, Yong C M, et al. Cadmium and lead uptake capacity of energy crops and distribution of metals within the plant structures[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2013,17(1):44-50.
- [6] 刘俊祥,孙振元,勾萍,等. Cd 胁迫下多年生黑麦草的光合生理响应[J]. 草业学报,2012,21(3):191-197.
- [7] 李清芳,马成仓. 土壤有效硅对黄瓜种子萌发和幼苗生长代谢的影响[J]. 园艺学报,2002,29(5):433-437.
- [8] 魏国强,朱祝军,钱琼秋,等. 硅对黄瓜白粉病抗性的影响及其生理机制[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(2):202-205.
- [9] 刘彩凤,史刚荣,余如刚,等. 硅缓解植物镉毒害的生理生态机制[J]. 生态学报,2017,37(23):7799-7810.
- [10] Wu J W, Geilfus C M, Pitann B, et al. Silicon-enhanced oxalate exudation contributes to alleviation of cadmium toxicity in wheat[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016,131:10-18.
- [11] 宋阿琳,李萍,李兆君,等. 硅对 Cd 胁迫下白菜光合作用及相关生理特性的影响[J]. 园艺学报,2011,38(9):1675-1684.
- [12] Fryer M J, Andrews J R, Oxborough K, et al. Relationship between CO₂ assimilation, photosynthetic electron transport, and active O₂ metabolism in leaves of maize in the field during periods of low temperature [J]. Plant Physiology,1998,116:571-580.
- [13] Cakmak I, Strboe D, Marschner H. Activities of hydrogen peroxide-scavenging enzymes in germinating wheat seeds[J]. Journal of Experimental Botany,1993,44(1):127-132.
- [14] Dhindsa R S, Dhindsa P P, Thorpe T A. Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid-peroxidation and decreased levels of superoxide dismutase and catalase[J]. Journal of Experimental Botany,1981,32(126):93-101.
- [15] 李冬香,李光德,张华,等. 硅作用下 Cd 对小麦幼苗生理生化指标的影响研究[J]. 中国农学通报,2013,29(36):84-90.
- [16] Iwasaki K, Maier P, Fecht M, et al. Leaf apoplastic silicon enhances manganese tolerance of cowpea (*Vigna unguiculata*) [J]. Journal of Plant Physiology,2002,159(2):167-173.
- [17] Liu J, Zhang H, Zhang Y, et al. Silicon attenuates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* L. by reducing cadmium uptake and oxidative stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2013,68:1-7.
- [18] 冯建鹏. 硅对黄瓜幼苗 Cd、锰毒害的缓解效应研究[D]. 山东 泰安:山东农业大学,2009.
- [19] Farquar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology,1982,33:317-345.
- [20] 李慧圆,田春育,郑玉莹,等. 黄瓜耐 Cd 相关基因 CsNAC019 的克隆及表达分析[J]. 中国农业科学,2017,50(10):1855-1864.
- [21] 王喜艳,张玉龙,张恒明,等. 盐胁迫下硅对黄瓜保护酶活性和膜质过氧化物的影响[J]. 西北农业学报,2009,18(1):221-224,233.

(上接第 320 页)

- [9] 李见云,化全县,周健民,等. 硅藻土对磷在红壤中吸附解吸的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(4):181-184,200.
- [10] He Z L, Baligar V C, Martens D C, et al. Effect of byproduct, nitrogen fertilizer, and zeolite on phosphate rock dissolution and extractable phosphorus in acid soil [J]. Plant and Soil,1999,208(2):199-207.
- [11] 赵夫涛,盖国胜,井大炜,等. 磷矿粉的超微细活化及磷释放动态研究[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2):474-477.
- [12] 黄雷,毛小云,陈娟,等. 超微活化条件对磷矿粉磷素形态及肥效的影响[J]. 土壤学报,2013,50(4):769-777.
- [13] 何振全,刘春生,盖国胜,等. 磷矿粉超微细活化对磷有效性的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(2):210-212.
- [14] 陈静,黄占斌. 腐植酸在土壤修复中的作用[J]. 腐植酸,2014(4):30-34.
- [15] 刁红霞,周平,于和平,等. 海藻生根剂对四季小白菜生长的影响[J]. 现代农业科技,2014(2):97-98.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2005.
- [17] 陈云峰,李双来,胡诚,等. 荆州市粮棉油作物肥料偏生产力与农学效率现状[J]. 湖北农业科学,2010(增刊1):67-69.
- [18] 李会合,王正银. 施氮对小白菜产量和品质的效应[J]. 中国土壤与肥料,2007(4):53-55.
- [19] 吕锡山. 不同品种小白菜的生物学性状及品质比较研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2013.
- [20] 马宗斌,房卫平,谢德意,等. 氮肥和 DPC 用量对棉花叶片叶绿素含量和 SPAD 值的影响[J]. 棉花学报,2009,21(3):224-229.
- [21] 曹畅,梁绮雯,田宇,等. 硅藻土、改性海泡石对氮磷钾吸附和缓释作用的研究[J]. 中国农学通报,2016,32(18):136-141.