

王桂伟, 陈宝成, 王国鹏, 等. 超微细活化磷肥对小白菜生长及磷利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 9-15.

WANG Gui-wei, CHEN Bao-cheng, WANG Guo-peng, et al. Effects of superfine activated phosphorus fertilizers on growth and phosphorus utilization of pakchoi[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 9-15.

超微细活化磷肥对小白菜生长及磷利用的影响

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 276700)

摘要:为减少磷肥在土壤中的固定损失, 提高其有效性, 增加作物产量, 通过小白菜盆栽试验, 研究不同超微细活化磷肥对小白菜产量、品质、土壤养分以及肥料利用率的影响。本试验以不施肥和常规施肥为对照, 设置磷肥与钾肥、腐植酸、沸石粉、硅藻土不同搭配并进行超微细化处理。结果表明: 超微细活化磷肥处理均显著提高了小白菜的产量, 增产率达0.44%~12.82%; 与氮磷钾常规施肥处理相比, 超微细磷钾-腐植酸-硅藻土-沸石粉活化处理小白菜的Vc含量增加了5.37%, 硝酸盐含量降低了18.23%, 可溶性糖含量降低了53.13%, 土壤有效磷含量提高了17.20%~24.87%, 磷肥利用率提高了3.28~8.47个百分点。在本试验条件下, 推荐在肥料生产和施用中选择超微细磷钾-腐植酸-沸石粉活化处理的肥料。

关键词:磷肥; 活化; 小白菜; 产量; 品质; 利用率

中图分类号: S143.2; S634.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2019)01-0009-07 doi: 10.13254/j.jare.2018.0065

Effects of superfine activated phosphorus fertilizers on growth and phosphorus utilization of pakchoi

WANG Gui-wei¹, CHEN Bao-cheng^{1*}, WANG Guo-peng¹, LI Han-hao¹, LIANG Hai¹, ZHOU Hua-min¹, CHEN Jian-qiu²

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

Abstract: To reduce the soil fixing of phosphorus fertilizer, improve the nutrition efficiency, and increase crop yield, the potted pakchoi experiment was conducted to study the effects of fertilizer on the yield and quality of pakchoi, soil nutrients and fertilizer use efficiency. In this study, we set up a control, a conventional fertilizer treatment and seven novel phosphorus fertilizers that combined with humic acid, zeolite powder, diatomite activator in different proportions. The results showed that, several optimized phosphorus treatments significantly increased the yield of pakchoi with increase rate from 0.44% to 12.82%; Compared with nitrogen, phosphorus and potassium regular fertilization, the superfine phosphorus and potassium-humic acid-diatomite-zeolite activation treatment increased the content of Vc by 5.37% of pakchoi and reduced the nitrate content and soluble sugar content by 18.23%, 53.13% respectively; The content of available phosphorus in soil increased by 17.20%~24.87%, and the utilization rate of phosphate fertilizer increased from 11.70% (nitrogen, phosphorus and potassium regular fertilization) to 20.17% (superfine phosphorus and potassium-humic acid-zeolite activation treatment). Thus, under the conditions of this experiment, it is recommended to select the superfine phosphorus potassium-humic acid-zeolite-activated fertilizer in fertilizer production and application.

Keywords: phosphorus fertilizers; activation; pakchoi; yield; quality; utilization rate

收稿日期: 2018-03-16 录用日期: 2018-05-07

作者简介: 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 E-mail: bcch108205@163.com

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0200705)

Project supported: National "13th Five-Year Plan" key Research and Development Program(2017YFD0200705)

磷是农作物生长和发育过程中必需的营养元素,在保证作物的优质优产方面发挥着重要作用^[1]。全世界耕地约有43%的土壤缺磷,我国约有2/3的农田土壤缺磷^[2]。磷肥施入土壤后容易被吸附和固定,磷肥的固定降低了磷肥的利用率,我国磷肥的当季利用率只有10%~25%,约75%~90%的磷肥以各种磷酸盐的形式按平均每年增长11%的速度在土壤中积累^[3-4]。刘彦伶等^[5]通过肥效长期定位试验发现,缺磷时作物产量显著下降,玉米产量受磷肥的影响与氮肥基本持平。而施磷过多不仅会对作物的产量和品质产生不良影响^[6],甚至会引发水体富营养化等一系列环境问题^[7]。因此合理施用磷肥,提高磷肥的有效性在农业生产中尤为重要。

土壤中磷的有效性受土壤的pH、磷肥种类、种植方式、磷素活化剂等多种因素的影响^[8-11],其中磷素活化剂能够释放土壤中固定的磷并转化为可供作物利用的状态。李见云等^[12]研究发现,硅藻土改性磷肥减少了 H_2PO_4^- 在迁移过程中的阻碍,增加了土壤中水溶性磷含量,提高了土壤磷素的有效性。杨莹等^[13]发现有机酸能增加土壤中水溶性磷的含量,提高磷素的生物有效性。腐植酸对土壤中的磷素有活化作用,在改良肥料性状、提高肥料稳定性和有效性方面发挥重要的作用^[14]。

将磷矿粉的粒径研磨至小于 $100\ \mu\text{m}$ 称为磷矿粉的超微细化^[15]。何振全等^[16]研究发现,通过超微细化处理磷矿粉,提高了土壤有效磷含量,并且随着所施磷矿粉颗粒细度的增加,土壤Olsen-P含量随之增加。赵夫涛等^[17]以有机、无机活化剂对超微细化磷矿粉进行活化处理,研究发现超微细活化后的磷矿粉其有效磷含量显著提升。黄雷等^[18]研究发现,将磷矿粉进行超微活化处理后显著地提高土壤有效磷和活性磷含量。现有研究多是将磷矿粉进行超微细化后施入土壤,或是将磷矿粉超微细化后与活化剂混合施用,关于添加增效剂后对磷肥进行超微细化的研究鲜有报道。本试验将磷肥与钾肥、增效剂充分混合进行超微细化,以期达到减少磷肥固定,提高磷肥有效性和作物产量的目的,为高效磷肥的研制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

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基地($36^{\circ}09'N$, $117^{\circ}08'E$),属暖温

带半湿润季风性气候。供试土壤取自山东省泰安郊区,土壤类型为普通简育湿润淋溶土(普通棕壤),土壤质地为中壤,有机质含量 $8.50\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤硝态氮含量 $55.28\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,铵态氮含量 $1.53\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $9.52\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $108.82\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

试验用白色塑料盆装土 $8.00\ \text{kg}$,上口直径 $26.50\ \text{cm}$ 、高 $20.00\ \text{cm}$ 、土面直径 $25.00\ \text{cm}$ 。

腐植酸:褐煤腐植酸,产自内蒙古霍林河,主要成分为腐植酸大分子,腐植酸含量60%。

硅藻土:粉末,产自湖北武汉, SiO_2 含量91%。

沸石粉:粉末,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: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%)

供试作物:小白菜(上海青),生长期30 d。

1.2 试验设计

肥料的制作方法:将过磷酸钙、硫酸钾、腐植酸、沸石粉、硅藻土等按不同搭配充分混匀后,放到球磨机中研磨,制成超微细肥料颗粒(小于 $30\ \mu\text{m}$),粒径大小由BT-9300型激光粒度仪测定。

试验设9个处理,3次重复。CK处理不施肥;NK处理为氮钾常规施肥;NPK处理为氮磷钾常规施肥;H1处理(常规磷钾-腐植酸肥)为磷钾肥与腐植酸混合处理;H2处理(超微细磷-腐植酸肥)为钾常规、过磷酸钙、腐植酸混合超微细化;H3处理(超微细磷钾-腐植酸肥)为过磷酸钙、硫酸钾、腐植酸混合超微细化;HZ处理(超微细磷钾-腐植酸-沸石粉肥)为过磷酸钙、硫酸钾、腐植酸、沸石粉混合超微细化;HD处理(超微细磷钾-腐植酸-硅藻土肥)为过磷酸钙、硫酸钾、腐植酸、硅藻土混合超微细化;HDZ处理(超微细磷钾-腐植酸-硅藻土-沸石粉肥)为过磷酸钙、硫酸钾、腐植酸、硅藻土、沸石粉混合超微细化。施肥时,除了CK处理,其他处理将尿素以 $225\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与各处理磷肥混合施入土壤。具体试验处理及配比见表1。

播种时间为2017年4月15日,肥料与土混匀后装盆一次施入,浇水播种,出苗5 d后间苗,每盆留粗壮小白菜苗10株。2017年5月15日收获。

1.3 样品采集及测定方法

装盆前采集基础土壤样品,测定硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾、pH值、电导率;苗期(生长15 d时)、成熟期(生长30 d时)分别测定株高和叶面积;收获后采集地上部分,记录产量,每盆均匀分取代表性3株,测定可溶性糖、硝酸盐(NO_3^-)、维生素C(Vc)等品质指

表1 施肥处理和施肥量(kg·hm⁻²)

Table 1 Experiment design and the amount of fertilizers applied(kg·hm⁻²)

处理	说明	过磷酸钙	硫酸钾	腐植酸	沸石粉	硅藻土
CK	不施肥	0	0	0	0	0
NK	氮钾常规施肥	0	450	0	0	0
NPK	氮磷钾常规施肥	1500	450	0	0	0
H1	常规磷钾-腐植酸肥	1500	450	244	0	0
H2	超微细磷-腐植酸肥	1500	450	244	0	0
H3	超微细磷钾-腐植酸肥	1500	450	244	0	0
HZ	超微细磷钾-腐植酸-沸石粉肥	1500	450	244	195	0
HD	超微细磷钾-腐植酸-硅藻土肥	1500	450	244	0	195
HDZ	超微细磷钾-腐植酸-硅藻土-沸石粉肥	1500	450	244	195	195

标;小白菜剩余部分测定质量后,105℃杀青30 min,90℃烘干至恒质量,计算总干物质的质量;测定氮磷钾营养元素含量,计算总养分吸收量和养分利用率。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:可溶性糖用酸水解铜还原直接滴定法测定;硝酸盐用紫外-分光光度法测定;Vc含量用2,4-二硝基苯肼比色法测定;植株用硫酸-双氧水联合消煮后,待测液中N用凯氏定氮法、P用钒钼黄比色法、K用火焰光度计法测定。

土壤化学性质测定方法^[19]:土壤硝态氮和铵态氮用0.01 mol·L⁻¹氯化钙浸提新鲜土样后,用AA3-A001-02E型流动注射分析仪测定;土壤有效磷用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法测定吸光度,土壤速效钾用中性醋酸铵浸提火焰光度计法测定。

1.4 数据处理

肥料利用效率的计算方法^[20]:

(1)磷肥利用率=(施磷区吸磷量-不施磷区吸磷量)/施磷量

(2)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

(3)氮肥偏生产力=作物产量/施氮量

1.5 统计分析

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Dunnnett'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 不同超微细活化磷肥处理对小白菜产量的影响

收获后对不同处理小白菜的鲜质量进行测定。结果(表2)显示,与NK处理相比,施磷处理小白菜产量增加了0.39%~13.26%,与氮磷钾常规施肥相比,添加活化剂的处理在不同程度上提高了小白菜的产量,

表2 不同处理下小白菜的鲜质量及增产率

Table 2 Effect of different treatments on yield and yield increase of pakchoi

处理	地上部鲜质量/kg·hm ⁻²	增产率/%			
		较CK增产	较NK增产	较NPK增产	较H1增产
CK	64 434.38±1 194.68e	—	—	—	—
NK	97 017.19±414.07d	50.57	—	—	—
NPK	97 396.88±2 024.28d	51.16	0.39	—	—
H1	97 828.13±666.62d	51.83	0.84	0.44	—
H2	104 273.44±2 265.20c	61.83	7.48	7.06	6.59
H3	105 764.06±1 591.63bc	64.14	9.02	8.59	8.11
HZ	108 576.56±949.92ab	68.51	11.91	11.48	10.99
HD	105 342.19±138.02bc	63.49	8.58	8.16	7.68
HDZ	109 884.38±893.09a	70.54	13.26	12.82	12.32

注:同列不同小写字母表示处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in a row indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

增产幅度在0.44%~12.82%之间,其中HDZ处理产量最高,与氮磷钾常规施肥处理差异达显著水平,而H1处理与氮磷钾常规施肥相比差异不显著;与H1处理相比,H2、H3、HZ、HD、HDZ处理显著地增加了小白菜的产量,分别增加了6.59%、8.11%、10.99%、7.68%、12.32%;H3、HD处理间无显著差异,而二者与HDZ处理差异显著。本试验条件下,磷肥与腐植酸、沸石粉、硅藻土三者搭配混合后超微细化施入土壤,对提升小白菜的产量有显著效果。

2.2 不同超微细活化磷肥处理对小白菜品质的影响

磷素是影响作物品质的重要因素。收获后测定小白菜鲜样的品质指标,结果如表3所示,与氮磷钾常规施肥相比,H1、HD、HDZ处理显著增加了小白菜的Vc含量,分别增加了31.13%、30.33%、5.37%;与H1处理相比,各超微细磷活化处理并未显著提高小白菜Vc含量,反而有降低的趋势;与氮磷钾常规施肥相比,处理H1、HZ、HD、HDZ均显著地降低了小白菜硝酸盐的含量,分别降低52.96%、17.73%、67.49%、18.23%;与H1处理相比,处理H2、H3、HZ、HDZ的小

白菜硝酸盐含量显著提升,分别增加了94.76%、321.04%、74.87%、73.82%;与氮磷钾常规施肥相比,各处理小白菜的可溶性糖含量均有所下降;与H1处理相比,各超微细活化磷钾处理小白菜的可溶性糖含量有所提升,且处理H3、HZ较H1处理显著增加了小白菜可溶性糖含量,分别增加了52.63%、15.79%,小白菜的可溶性糖含量以H3处理为最高,但与氮磷钾常规施肥相比仍低9.38%。超微细活化磷肥处理普遍降低了小白菜硝酸盐含量,提高了小白菜食用安全性,在Vc、可溶糖含量方面普遍低于普通磷肥处理。

2.3 不同超微细活化磷肥处理对不同时期小白菜株高和叶面积的影响

株高和叶面积能在一定程度上反映小白菜的生长状况,表4显示了超微细活化磷肥处理对不同时期小白菜株高和叶面积的影响。苗期小白菜的株高为6.40~7.15 cm,各超微细活化磷肥处理间小白菜株高普遍低于氮磷钾常规施肥处理,且差异显著。成熟期小白菜的株高在19.17~21.33 cm之间,超微细活化磷肥处理的小白菜株高均高于氮磷钾常规施肥处理,株

表3 不同处理下小白菜的品质
Table 3 Effect of different treatments on the quality of packchoi

处理	Vc/mg·kg ⁻¹	Vc较NPK增加/%	NO ₃ /g·kg ⁻¹	NO ₃ 较NPK增加/%	可溶性糖/%	可溶性糖较NPK增加/%
CK	861.08±6.64a	—	2.60±0.34e	—	0.29±0.01a	—
NK	577.04±7.76d	—	6.15±0.31b	—	0.25±0.01b	—
NPK	576.76±3.32d	—	4.06±0.05c	—	0.32±0.01a	—
H1	756.28±3.56b	31.13	1.91±0.05f	-52.96	0.19±0.01d	-40.63
H2	570.59±2.73d	-1.07	3.72±0.11cd	-8.37	0.19±0.01cd	-40.63
H3	426.80±7.04f	-26.00	7.87±0.06a	93.84	0.29±0.00a	-9.38
HZ	495.35±6.73e	-14.12	3.34±0.03d	-17.73	0.22±0.00c	-31.25
HD	751.69±1.41b	30.33	1.32±0.03f	-67.49	0.21±0.01cd	-34.38
HDZ	607.76±2.49c	5.37	3.32±0.03d	-18.23	0.15±0.01e	-53.13

表4 不同处理下小白菜的株高和叶面积
Table 4 Effect of different treatments on plant height and leaf area of pakchoi

处理	苗期株高/cm	成熟期株高/cm	苗期叶面积/cm ²	成熟期叶面积/cm ²
CK	7.07±0.07ab	19.17±0.44b	28.60±1.06ab	43.29±0.29c
NK	7.15±0.09a	20.00±0.58ab	29.06±0.65ab	62.92±0.39b
NPK	7.10±0.06a	19.33±0.33b	31.53±1.17a	62.52±1.36b
H1	6.40±0.06e	21.00±0.00ab	28.45±0.64ab	69.99±2.38ab
H2	6.67±0.09cd	20.67±0.67ab	28.68±1.24ab	71.24±1.02ab
H3	6.77±0.03c	20.67±0.88ab	30.13±0.67ab	74.28±7.08a
HZ	6.40±0.06e	21.33±0.88a	29.27±0.88ab	68.64±4.25ab
HD	6.87±0.07bc	20.00±0.58ab	31.16±2.45a	71.16±0.31ab
HDZ	6.55±0.09de	20.33±0.33ab	27.19±0.50b	72.10±0.18ab

高增加幅度为3.47%~10.35%,其中HZ处理小白菜株高较氮磷钾常规施肥处理显著增加了10.35%;测定苗期和成熟期小白菜的叶面积,结果(表4)表明,与氮磷钾常规施肥处理相比,超微细活化磷肥处理小白菜叶面积在苗期有所下降,但在成熟期有上升趋势。

2.4 不同超微细活化磷肥处理对土壤速效养分的影响

土壤速效养分是作物营养的直接来源,是表征土壤养分供应水平的重要指标。表5显示了超微细活化磷肥处理对土壤性质的影响。与氮磷钾常规施肥相比,各超微细活化磷肥处理显著地提高了土壤中硝态氮、铵态氮的含量,总体上提高了土壤的供氮水平;与氮磷钾常规施肥相比,处理H2、H3、HZ、HD、HDZ土壤有效磷含量呈现显著性提高,分别增加了24.87%、17.20%、28.48%、24.78%、22.13%;与H1处理相比,处理H2、H3、HZ、HD、HDZ土壤有效磷含量也显著提高,分别增加了13.19%、6.23%、16.47%、13.11%、10.71%,原因可能是磷肥配施腐植酸显著地提高了肥际可溶性磷的含量^[21],而硅藻土、沸石粉比表面积大,具有强离子吸附能力。将腐植酸、硅藻土、

沸石粉与磷肥混合超微细化后施入土壤,会将磷素吸附在表面并缓慢释放。与氮磷钾常规处理相比,H3、HZ处理显著地提升了土壤中速效钾的含量,分别增加了10.53%、4.10%,这可能与活化剂中的硅与磷肥配施改善了土壤磷素和钾素的供应能力有关^[22]。磷肥与钾肥和活化剂配合超微细化,不但能提高土壤对磷的保肥性,也不同程度提高了土壤对钾的保肥性。

2.5 不同超微细活化磷肥处理对小白菜养分累积和磷肥利用率的影响

测定小白菜植株氮磷钾养分含量,计算出小白菜氮磷钾养分累积情况、磷肥的肥料利用率,以了解小白菜养分吸收状况。结果(表6)显示,与氮磷钾常规施肥处理相比,超微细磷活化处理显著地提高了小白菜氮磷钾累积,增加幅度分别为1.93%~36.12%、10.07%~26.00%和23.46%~45.50%,超微细磷活化处理小白菜的磷肥利用率较氮磷钾常规处理增加了3.28~8.47个百分点,其中HZ处理的小白菜氮磷钾养分的吸收量最高,分别达到23.58、35.37、327.48 kg·hm⁻²,且与其他超微细活化处理差异显著,另外HZ处

表5 不同施肥处理土壤速效养分含量(mg·kg⁻¹)

Table 5 Effect of different treatments on content of soil available nutrients in soil (mg·kg⁻¹)

处理	硝态氮	铵态氮	有效磷	速效钾
CK	8.55±0.07e	0.96±0.02bcd	8.50±0.17d	116.34±1.37d
NK	15.64±0.14a	0.94±0.06cd	9.81±0.24d	136.13±1.58bc
NPK	9.83±0.02d	0.92±0.05d	11.34±0.60c	135.33±1.37c
H1	11.64±0.04c	1.12±0.08abc	12.51±0.34c	137.71±2.74bc
H2	13.16±0.94b	1.02±0.11abc	14.16±0.54a	135.33±1.37c
H3	13.16±0.14b	0.99±0.06bc	13.29±0.62ab	149.58±1.37a
HZ	14.62±0.45a	1.21±0.11ab	14.57±0.46a	140.88±1.58b
HD	13.11±0.23b	1.19±0.04abc	14.15±0.54a	140.08±1.37bc
HDZ	13.18±0.43b	1.27±0.11a	13.85±0.59ab	137.71±0.00bc

表6 不同处理下小白菜养分累积以及磷肥利用率

Table 6 Effect of different treatments on nutrient absorption and utilization of phosphate fertilizer of pakchoi

处理	氮累积/ kg·hm ⁻²	氮较NPK处理 增加/%	磷累积/ kg·hm ⁻²	磷较NPK处理 增加/%	钾累积/ kg·hm ⁻²	钾较NPK处理 增加/%	磷肥利用 率/%	磷肥利用率较NPK 处理增加的百分点
CK	7.25±0.45e	—	16.10±0.44f	—	166.24±0.48f	—	—	—
NK	16.17±0.84d	—	18.00±0.12e	—	194.93±1.89e	—	—	—
NPK	17.32±0.53d	—	28.07±0.49d	—	225.07±5.33d	—	11.70	—
H1	19.52±0.08c	12.70	30.90±0.24c	10.08	280.09±2.29c	24.45	14.98	3.28
H2	17.66±0.21d	1.96	32.23±0.00bc	14.82	277.87±8.92c	23.46	16.52	4.82
H3	22.17±0.85ab	28.00	32.53±0.35bc	15.89	282.16±2.59c	25.37	16.88	5.18
HZ	23.58±0.63a	36.14	35.37±0.36a	26.01	327.48±8.78a	45.50	20.17	8.47
HD	19.31±0.38c	11.49	32.43±0.27bc	15.53	283.33±4.49c	25.89	16.76	5.06
HDZ	21.46±0.44b	23.90	32.81±1.33b	16.89	304.85±4.47b	35.45	17.20	5.50

理小白菜的磷肥利用率最高,达到20.17%。

3 讨论

腐植酸是一种成分复杂的可溶性有机胶体物质,属高分子有机酸,对磷素具有较强吸附和一定的溶解性。在本试验中,超微细磷-腐植酸肥处理较常规磷-腐植酸肥处理小白菜产量有显著提升,而常规磷钾-腐植酸肥处理与氮磷钾常规施肥处理小白菜产量无显著差异,土壤有效磷含量也呈现出类似差异,产生此结果的原因可能是磷肥与腐植酸混合后超微细化,增加了磷肥与腐植酸的接触面积,施入土壤后与黏土等物质形成新的土壤团聚体^[23-24],在这个过程中腐植酸吸附了土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子,减少了磷肥在土壤中的固定。

硅藻土、沸石粉比表面积大且疏松多孔,具有强离子吸附能力,与磷肥混合进行超微细化施入土壤后,会将磷素吸附在表面并缓慢释放。在本试验中,CK处理小白菜品质优于各施肥处理。原因可能是基础土壤肥力较低,施肥导致小白菜的品质出现了浓缩效应^[25]。与氮磷钾常规施肥相比,超微细活化磷肥处理小白菜的Vc、可溶性糖以及硝酸盐含量均得到改善,在一定程度上提高了小白菜的品质。这是由于磷肥和钾肥与活化剂进行超微细化后紧密结合,使得肥料中的磷素和钾素具有一定的缓释性能,浓缩效应降低。这个过程也减少了磷肥与土壤阳离子结合的概率,降低了磷在土壤中的化学固定,提高了磷素的有效性。与硅藻土相比,沸石粉含有更大的比表面积,本试验中配施沸石的处理土壤有效磷含量、作物对磷素的吸收以及磷肥利用率均高于配施硅藻土的处理,另外沸石粉市场价格较低,在实践中宜选用沸石粉与其他活化剂和磷肥配合施用。

4 结论

(1)超微细活化磷肥处理提高了土壤速效养分的含量,其中土壤有效磷含量增加17.20%~24.87%,土壤速效钾含量和硝态氮、铵态氮含量也有所提升。

(2)超微细活化磷肥处理显著地提高了小白菜的产量和养分累积,增产率达到0.44%~12.82%;氮累积比氮磷钾常规处理增加1.96%~36.14%,磷累积增加10.08%~26.01%,钾累积增加23.46%~45.50%。超微细活化磷钾肥处理的磷肥利用率达到了14.98%~20.17%,较氮磷钾普通施肥增加3.28~8.47个百分点。

(3)磷肥进行超微细活化处理后,磷素与活化剂

充分接触,施入土壤后增加了土壤的保肥、供肥性能 and 小白菜产量。综合施肥效果和原料市场价格等各方面因素,推荐选择超微细磷钾-腐植酸-沸石粉活化处理的肥料进行生产和施用。

参考文献:

- [1] 胡霭堂. 植物营养学(上册)[M]. 二版. 北京:中国农业大学出版社, 2003:35-47.
HU Ai-tang. Plant nutrition (Volume One)[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agricultural University Press, 2003:35-47.
- [2] 曲均峰, 戴建军, 徐明岗, 等. 长期施肥对土壤磷素影响研究进展[J]. 热带农业科学, 2009, 29(3):75-80.
QU Jun-feng, DAI Jian-jun, XU Ming-gang, et al. Advances on effects of long-term fertilization on soil phosphorus[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2009, 29(3):75-80.
- [3] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1):4-6.
LU Ru-kun. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1):4-6.
- [4] 鲁如坤, 时正元, 顾益初. 土壤积累态磷研究 II. 磷肥的表观积累利用率[J]. 土壤, 1995(6):286-289.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan, GU Yi-chu, et al. Study on accumulating phosphorus in soil II. Apparent accumulation utilization rate of phosphate fertilizer[J]. *Soil*, 1995(6):286-289.
- [5] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期氮磷钾肥配施对贵州黄壤玉米产量和土壤养分可持续性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11):3581-3588.
LIU Yan-ling, LI Yu, ZHANG Ya-rong, et al. Effect of long-term application of NPK fertilizer on maize yield and yellow soil nutrients sustainability in Guizhou, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11):3581-3588.
- [6] Cerozi B D, Fitzsimmons K. The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 219:778-781.
- [7] Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T, et al. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(2):160-166.
- [8] Schwab A P, Kulyingyong S. Changes in phosphate activities and availability indexes with depth after 40 years of fertilization[J]. *Soil Science*, 1989, 147(3):179-186.
- [9] McKenzie R H, Jwb S, Dormaar J F, et al. Long-term crop rotation and fertilizer effects on phosphorus transformations: I. In a Chernozemic soil[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1993, 72(4):581-589.
- [10] 李清华, 王飞, 林诚, 等. 水旱轮作对冷浸田土壤碳、氮、磷养分活化的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6):113-117.
LI Qing-hua, WANG Fei, LI Cheng, et al. Effect of paddy-upland rotation on the nutrient activation of soil carbon, nitrogen and phosphorus in cold waterlogged paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6):113-117.
- [11] 龚蓉. 磷肥减量施用对玉米和小白菜生长、养分吸收利用及养

- 分淋失的影响[D].长沙:湖南农业大学,2015.
- GONG Rong. Effect of phosphorus reduction on corn and cabbage growth, nutrition uptake, utilization and nutrition leaching in the embankment upland[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.
- [12] 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.
- LI Jian-yun, HUA Quan-xian, ZHOU Jian-min, et al. Effect of diatomite on phosphorus adsorption and desorption in ferrosols[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 181-184.
- [13] 杨莹, 杨雪芹, 关文玲, 等. 不同添加材料对化肥中磷素释放和扩散的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 84-86.
- YANG Ying, YANG Xue-qin, GUAN Wen-ling, et al. Effects of different amendments on the release and diffusion of phosphorus from chemical fertilizer[J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2005, 33(6): 84-86.
- [14] 李春越, 党廷辉, 王万忠, 等. 腐植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.
- LI Chun-yue, DANG Ting-hui, WANG Wan-zhong, et al. Influence of humic acid on the adsorption behavior of phosphorus in agricultural soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 77-82.
- [15] 国林涛. 超微细磷矿粉的生物有效性及其机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- GUO Lin-tao. Biological availability and mechanism of phosphorus rock power[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2008.
- [16] 何振全. 超微细磷矿粉的释磷特征及对冬小麦的营养效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- HE Zhen-quan. The phosphorus-releasing characteristics of ultra-fine rock phosphate powder and its nutritional effects on wheat[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2010.
- [17] 赵夫涛, 盖国胜, 井大伟, 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.
- ZHAO Fu-tao, GAI Guo-sheng, JING da-wei, et al. Ultrafine grinding activations of phosphate rock and their dynamic phosphorus releases[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 474-477.
- [18] 黄雷, 毛小云, 陈炯, 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.
- HUANG Lei, MAO Xiao-yun, CHEN Xian, et al. Phosphorus availability and fertilizer efficiency of rock phosphate as affected by ultra-fine activation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 769-777.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2005.
- [20] 陈云峰, 李双来, 胡诚, 等. 荆州市粮棉油作物肥料偏生产力和农学效率现状[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(增刊1): 67-69.
- CHEN Yun-feng, LI Shuang-lai, HU Cheng, et al. Partial productivity and agronomic efficiency of grain, cotton and oil in Jingzhou[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(Suppl 1): 67-69.
- [21] 杜振宇, 王清华, 刘方春, 等. 腐植酸物质对磷在褐土中迁移的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(2): 14-17, 50.
- DU Zhen-yu, WANG Qing-hua, LIU Fang-chun, et al. Phosphorus movement in a cinnamon soil as affected by humic substances[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(2): 14-17, 50.
- [22] 朱从桦, 张嘉莉, 郭翔, 等. 硅磷肥配施提高四川春玉米的氮磷钾吸收和产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1603-1611.
- ZHU Cong-hua, ZHANG Jia-li, GUO Xiang, et al. Effect of increasing N, P and K uptake and yield of spring maize through combined silicon and phosphate fertilizer application in Sichuan[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1603-1611.
- [23] Kulikova N A, Kholodov V A, Perminova I V, et al. Adsorption of the herbicide acetochlor by different soils types[J]. *Eurasian Soil Science*, 2005, 38(5): 533-540.
- [24] Iyamuremye F, Dick R P, Baham J. Organic amendments and phosphorus dynamics: II. Distribution of soil phosphorus fractions[J]. *Soil Science*, 1996, 161(7): 436-443.
- [25] 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.
- LI Hui-he, WANG Zheng-yin. Influence and assessment of nitrogen rates on nitrate content and nutrient quality of Chinese cabbage (*B. chinensis* L.)[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(4): 53-55.