

李晗灏, 李文庆, 王媛, 等. 杂卤石对花生生长及养分吸收的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 169-175.

LI Han-hao, LI Wen-qing, WANG Yuan, et al. Effect of polyhalite on peanut growth and nutrient uptake[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2): 169-175.

杂卤石对花生生长及养分吸收的影响

李晗灏^{1,2}, 李文庆^{1,2*}, 王媛^{1,2}, 赵丽娅^{1,2}

(1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018; 2. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要:为探讨杂卤石在北方典型棕壤上的应用效果,以花生为研究对象,于2015年2月至6月通过盆栽试验,以不施钾肥为对照,研究了杂卤石不同用量对花生荚果质量和花生秧干质量的影响,并比较了其与氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾对花生养分吸收及产量的影响差异。结果表明:在每千克土施用0~0.133 g K₂O时,随着杂卤石施用量增加,花生荚果质量和花生秧干质量呈现出先增高后降低的趋势,其中每千克土施用0.089 g K₂O时均最大,花生荚果质量较其他处理提高14.74%~48.08%,与每千克土壤施入0、0.022 g和0.044 g K₂O的处理差异达显著水平;花生秧干质量较其他处理显著提高13.33%~49.08%。在每千克土施用0.089 g K₂O的条件下,杂卤石处理花生荚果质量较氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾处理提高2.42%~12.32%,与氯化钾处理差异达显著水平,花生秧干质量较三种常规钾肥处理显著提高18.49%~25.44%。杂卤石处理植株氮含量较氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾处理平均显著提高1.92%~6.78%,植株钾含量较氯化钾、硫酸钾镁处理平均显著提高15.37%,钾肥表观利用率显著高于氯化钾和硫酸钾镁处理,钾肥农学利用率及钾肥偏生产力显著高于氯化钾处理,植株钙含量较氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾处理平均显著提高4.67%~9.86%,植株硫含量较氯化钾处理显著提高19.13%。研究表明,施用杂卤石能够提高花生荚果质量及花生秧干质量,并促进花生对氮、钾、钙和硫的吸收,其中杂卤石处理花生吸硫量提高可能是其花生荚果质量较氯化钾处理显著提高的主要原因,而吸钙量和吸氮量的提高可能是杂卤石处理花生秧干质量较氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾处理显著提高的主要原因。

关键词:棕壤;杂卤石;钾肥;花生;生物性状;养分

中图分类号:S519;S143.3 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2019)02-0169-07 doi: 10.13254/j.jare.2018.0294

Effect of polyhalite on peanut growth and nutrient uptake

LI Han-hao^{1,2}, LI Wen-qing^{1,2*}, WANG Yuan^{1,2}, ZHAO Li-ya^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an 271018, China; 2. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: In order to explore the scientific application of polyhalite in brown soil, the effects of polyhalite on nutrient uptake and plant growth of peanut were studied by pot experiment. The results showed that within 0~0.133 g K₂O·kg⁻¹ soil, the yield of peanut increased first and then decreased with the increasing of the application rate of polyhalite. The peanut pod weight of 0.089 g K₂O·kg⁻¹ soil of polyhalite treatment increased 14.74%~48.08%, the difference was significant between the treatment of 0, 0.022 g and 0.044 g K₂O·kg⁻¹ soil. In addition, the total biomass of 0.089 g K₂O·kg⁻¹ soil polyhalite treatment increased significantly by 13.33%~49.08% compared with other treatments. Under the same K₂O application rate, the pods weight of peanut treated with polyhalite was higher than that of potassium chloride, potassium magnesium sulfate and potassium sulfate, which increased by 2.42%~12.32%, and the difference was significant with potassium chloride. The total biomass of polyhalite treatment was significantly higher (18.49%~25.44%) than that of three kinds of conventional potas-

收稿日期:2018-10-26 录用日期:2018-12-25

作者简介:李晗灏(1994—),男,河南信阳人,硕士研究生,从事生物炭应用研究。E-mail: lihanhao_happy@126.com

*通信作者:李文庆 E-mail: wqli@sdau.edu.cn

基金项目:山东省重点研发计划项目(2016CYJS05A02, 2017CXGC0306);山东省发展计划项目(2013GNC11309)

Project supported: Major Research Project of Shandong Province (2016CYJS05A02, 2017CXGC0306); Shandong Province Science and Technology Development Project (2013GNC11309)

sium fertilizer. Polyhalite could promote the absorption of nitrogen, potassium, calcium and sulfur in peanut. Compared with potassium chloride, potassium magnesium sulfate and potassium sulfate, polyhalite treatment increased average nitrogen content by 1.92%~6.78%, the potassium content of plant was 15.37% higher than that of potassium chloride and potassium magnesium sulfate treatments in an average. The apparent use efficiency of polyhalite treatment was significantly higher than potassium chloride and potassium magnesium sulfate treatment. And the K agronomic efficiency and K partial factor productivity were significantly higher than potassium chloride treatment. The calcium content of plant increased by 4.67%~9.86% on average compared with potassium chloride, potassium magnesium sulfate and potassium sulfate treatment. The sulfur content of plant was 19.13% higher than that of potassium chloride. The application of polyhalite can increase the pod weight of peanut and total biomass of peanut and promote the absorption of nitrogen, potassium, calcium and sulfur in peanut. The increase of sulfur absorption in peanut treated with polyhalite treatment may be the main reason for significantly increasing the pod weight of peanut compared with potassium chloride treatment. The increase of calcium uptake and nitrogen uptake may be the main reason for the increase of total biomass of peanut of polyhalite treatment compared with the treatment of potassium chloride, potassium magnesium sulfate and potassium sulfate.

Keywords: brown soil; polyhalite; potassium fertilizer; peanut; biological properties; nutrients

我国钾盐资源相对匮乏^[1],2014年的调查显示我国已查明可溶性钾盐储量折合氯化钾为11.2亿t,仅占世界总储量的1.6%,全国钾肥消费量到2020年预计将达到1580万t,而中国钾肥供应能力最多只能达到850万t,钾肥对外依存度高达50%以上^[2],因此迫切需要寻求新的钾肥资源缓解我国钾肥的供需矛盾。杂卤石 $[K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O]$ 是一种含钾、钙、镁及硫的矿物,其成分含量分别为13.0% K_2O 、13.3% Ca 、4.0% Mg 和21.3% S 。杂卤石在我国分布广泛,在四川、青海、湖北、山东等地均有大量储藏,据初步估算,仅四川东部杂卤石资源折合 K_2O 储量约在100亿t以上。目前关于杂卤石的研究多集中于开采和提取硫酸钾、硫酸镁和建筑石膏,而在农业生产上的应用研究较少。杂卤石具有作为钾肥的潜力^[3],Fraps^[4]研究表明,磨碎后过20目筛的杂卤石与 KCl 和 K_2SO_4 肥料相比提供了96%的K等效性,Tiwari等^[5]研究表明杂卤石能够提高土壤中的硫素和钾素含量,提高芥菜和芝麻等油籽品种的产量。近年来,有不少学者对杂卤石在国内自然条件下的肥效进行了研究探索,如黄宣镇^[6]在四川省通过小区对比试验得出杂卤石作钾肥较氯化钾处理小麦产量提高约15%;陈际型^[7]在南方红壤上进行的肥效试验证明杂卤石粉肥效不亚于水溶性盐。但有关杂卤石肥效的试验多在南方土壤上进行,在北方典型棕壤的相关研究鲜见报道。花生在北方的种植面积约占全国的65%~70%,与对氮、磷、钾的需求相同,钙、镁、硫同样是花生生长发育必需的矿质营养元素,因此,本文以花生为研究对象探讨了杂卤石作钾肥在北方典型棕壤上的应用效果,并比较其与常规钾肥在效果上的差异,旨在探索适合北方农

业生产的杂卤石用量及作用机理,为科学施用杂卤石提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

采用盆栽试验方法,栽培盆为上口直径26.50 cm、高20 cm的陶土盆。于2015年2月至6月在山东省泰安市玻璃温室进行,供试土壤取自泰山脚下0~20 cm耕层土壤,土壤类型为棕壤(筒育湿润淋溶土),质地为砂壤土(含黏粒14.23%,砂粒64.36%,粉粒21.41%),pH 7.12,有机质 $4.6 g \cdot kg^{-1}$,硝态氮 $35.01 mg \cdot kg^{-1}$,铵态氮 $23.09 mg \cdot kg^{-1}$,有效磷 $35.74 mg \cdot kg^{-1}$,速效钾 $126.09 mg \cdot kg^{-1}$,交换性钙 $2.09 g \cdot kg^{-1}$,有效硫 $6.57 mg \cdot kg^{-1}$ 。供试花生品种为山花108。供试杂卤石为市售杂卤石粉,含 K_2O 15%、 SO_3 51%、 MgO 6.4%、 CaO 17.8%,尿素含N 46%,重过磷酸钙含 P_2O_5 46%。

1.2 试验设计

本试验中杂卤石处理共设4个水平,分别为每千克土施用0.022、0.044、0.089、0.133 g K_2O ,在每千克土施用0.089 g K_2O 条件下,又设氯化钾、硫酸钾和硫酸钾镁三种不同类型钾肥,以不施钾肥为空白对照(CK),共设8个处理。其中杂卤石不同用量的处理分别用T1、T2、T3、T4表示,每个处理重复4次。所有处理施入相同数量的氮肥和磷肥,即每千克土施用0.089 g的N和 P_2O_5 。肥料在播种前作为基肥一次性施入,并与土壤充分混匀。试验前将土壤进行风干,过筛后装盆,每盆装土8 kg。选取饱满一致的花生种子,每盆穴播5粒,浇水,在出苗后进行间苗,每盆留1

株。定期浇水,试验期间将水分含量控制在田间持水量的65%左右。

1.3 样品采集与分析

收获期将植株清洗干净后按照地上部、荚果等部位分开。于105℃条件下杀青30 min,65℃烘至恒重,分别称取质量,将花生秧粉碎测定氮、磷、钾及钙、镁、硫含量。采用火焰光度法测钾、钼锲抗比色法测磷、凯氏定氮法测氮、原子吸收法测钙和镁、比浊法测硫。

钾肥农学利用率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=(施钾处理产量-不施钾处理产量)/钾肥用量(以 K_2O 计)

钾肥偏生产力($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=施钾处理产量/钾肥用量(以 K_2O 计)

钾肥表观利用率=(施钾处理植株总吸钾量-不施钾处理植株总吸钾量)/钾肥用量(以 K_2O 计) $\times 100\%$

试验数据采用SAS 8.0软件进行统计分析,用Microsoft Excel 2016软件作图。

2 结果与分析

2.1 杂卤石用量及钾肥种类对花生荚果和花生秧质量的影响

从测定结果来看,施用杂卤石能够促进花生荚果质量和花生秧干质量提高(表1)。随着杂卤石施用

量增加,花生的荚果质量及花生秧干质量均呈先增加后降低的趋势,T1~T4处理花生荚果质量较CK分别提高17.90%、21.00%、48.08%和29.06%,其中T3处理与T1、T2处理差异达显著水平。施用杂卤石同样提高了花生秧干质量,T1~T4处理较CK分别提高了21.36%、31.55%、49.08%和25.59%,其中T3处理花生秧干质量显著高于其他处理。

施用不同类型钾肥均能够提高花生荚果质量和花生秧干质量(表2),与氯化钾、硫酸钾镁、硫酸钾肥相比,在每千克土施入0.089 g K_2O 水平下,杂卤石处理花生荚果质量较氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾处理分别提高12.32%、5.66%和2.42%,与氯化钾处理差异达显著水平;杂卤石处理花生秧干质量较氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾分别提高25.44%、21.79%和18.49%,差异均达到显著水平。这说明以杂卤石作钾肥能够提高花生荚果产量和生物产量,且效果优于氯化钾,这与Pavuluri等^[8]研究相符。

2.2 不同钾肥对花生植株养分吸收的影响

2.2.1 不同处理对花生钾素利用率的影响

作物生长状况主要取决于作物对养分的吸收利用能力,在相同钾肥用量条件下,分析不同类型钾肥对花生钾素利用率的影响。结果(表3)表明,施用杂

表1 不同杂卤石用量处理花生荚果质量及花生秧干质量

Table 1 The pod weight and straw biomass of peanut under different fertilizer amount treatments

杂卤石施肥水平 Polyhalite application rates	荚果 Pod		花生秧 Peanut straw	
	荚果质量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$ Pod weight/ $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	较CK增加 Increase vs. CK/%	花生秧干质量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$ Peanut straw biomass/ $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	较CK增加 Increase vs. CK/%
CK	15.14 $\pm$ 1.30c	—	26.69 $\pm$ 2.10c	—
T1	17.85 $\pm$ 0.45b	17.90	32.39 $\pm$ 0.24c	21.36
T2	18.32 $\pm$ 0.10bc	21.00	35.11 $\pm$ 1.51b	31.55
T3	22.42 $\pm$ 0.29a	48.08	39.79 $\pm$ 0.72a	49.08
T4	19.54 $\pm$ 0.55ab	29.06	33.52 $\pm$ 1.98b	25.59

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in a column indicate significant difference at $P<0.05$ level. The same below.

表2 不同类型钾肥处理花生荚果质量及花生秧干质量

Table 2 The pod weight and straw biomass of peanut under different fertilizer type

钾肥类型 Potash fertilizer type	荚果 Pod		花生秧 Peanut straw	
	荚果质量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$ Pod weight/ $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	杂卤石较其他处理增加 Polyhalite increase vs. other/%	花生秧干质量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$ Peanut straw biomass/ $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	杂卤石较其他处理增加 Polyhalite increase vs. other/%
杂卤石	22.42 $\pm$ 0.28a	—	39.79 $\pm$ 0.72a	—
氯化钾	19.96 $\pm$ 0.68b	12.32	31.72 $\pm$ 0.48b	25.44
硫酸钾镁	21.22 $\pm$ 0.47a	5.66	32.67 $\pm$ 0.38b	21.79
硫酸钾	21.89 $\pm$ 0.50a	2.42	33.58 $\pm$ 0.49b	18.49

注:不同类型钾肥施用量均为每千克土0.089 g K_2O 。

Note: The application rates of potash fertilizer are 0.089 g $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil.

卤石能够促进花生对钾的吸收,且钾肥表观利用率显著高于氯化钾和硫酸钾镁处理。其中杂卤石处理钾吸收量较CK提高68.28%,差异达显著水平。与其他三种钾肥相比,杂卤石处理花生植株钾吸收量和钾肥表观利用率较氯化钾、硫酸钾镁处理平均显著提高15.37%和49.09%,但与硫酸钾处理相比有所降低,且差异达显著水平。从钾肥农学利用率与钾肥偏生产力来看,杂卤石处理钾肥农学利用率和钾肥偏生产力较氯化钾处理分别显著提高50.95%和12.11%,但与硫酸钾镁、硫酸钾处理差异未达到显著水平。这说明杂卤石作钾肥能够促进植株对钾素的吸收,且肥效略优于氯化钾和硫酸钾镁。

2.2.2 不同钾肥对花生氮、磷、钙、镁、硫吸收的影响

在杂卤石处理钾肥利用率并未表现出明显优势的情况下,花生荚果质量却高于其他三种常规钾肥,这可能由于杂卤石中的其余组分影响了作物对养分的吸收,鉴于作物养分吸收之间存在相互作用^[9],本研究对花生植株钙、镁、硫、氮、磷吸收量也进行了测定。结果(表4)表明,杂卤石处理植株钙和氮吸收量高于氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾处理,硫吸收量高于氯化钾和硫酸钾镁处理,不同钾肥处理花生镁和磷吸收量未表现出显著差异。

本试验中杂卤石处理植株氮和钙的吸收量较其他处理分别提高1.92%~6.78%和4.67%~9.86%,与氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾处理差异达显著水平;杂卤

石、硫酸钾镁和硫酸钾三种含硫钾肥植株硫吸收量显著高于氯化钾处理,但三者处理间差异未达到显著水平。这说明施用杂卤石较其他三种钾肥能够提高花生植株对钙和氮的吸收,相较于氯化钾处理能够提高对硫的吸收。

2.2.3 植株养分吸收与产量间的相关性分析

植株养分吸收与产量间的相关分析(表5)表明,花生吸钙量、吸硫量与花生荚果质量和花生秧干质量均呈极显著正相关关系($r=0.663\sim0.712$),而吸钾量与花生荚果质量呈极显著正相关($r=0.733$),与花生秧干质量呈显著正相关关系($r=0.525$)。花生植株对不同养分吸收之间同样存在相关关系,植株吸钙量与植株吸硫量、吸钾量之间,植株吸钾量与吸硫量之间均呈极显著正相关关系(0.614~0.717),而植株吸镁量与吸钾量间呈显著负相关关系($r=-0.512$)。

3 讨论

3.1 杂卤石对花生钾素利用的影响

本试验以氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾三种常规钾肥作对照,研究了杂卤石作为钾肥在棕壤花生上的施用效果。其中杂卤石处理植株吸钾量和钾肥表观利用率较氯化钾处理分别显著提高13.58%和41.75%,且花生荚果质量和花生秧干质量分别显著提高12.32%和25.44%,这说明与氯化钾相比杂卤石具有更好的肥效。而杂卤石处理钾吸收量和钾肥表观利

表3 不同类型钾肥处理花生的钾肥利用率

Table 3 Potassium utilization efficiency of peanut with different types of potash fertilizer

肥料种类 Fertilizer type	钾吸收量/ $\text{mg}\cdot\text{盆}^{-1}$ K absorption/ $\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$	钾肥表观利用率 K apparent use efficiency/%	钾肥农学利用率 K agronomic efficiency/ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	钾肥偏生产力 K partial factor productivity/ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	247.23±8.68d	—	—	—
杂卤石	416.00±4.63b	23.70±0.65b	10.22±0.39a	31.48±0.39a
氯化钾	366.27±2.63c	16.72±0.37c	6.77±0.96b	28.04±0.96b
硫酸钾镁	355.08±4.38c	15.15±0.62c	8.54±0.67ab	29.81±0.67ab
硫酸钾	451.79±7.76a	28.73±1.09a	9.49±0.70a	30.75±0.70a

表4 不同类型钾肥处理花生植株氮、磷、钙、镁、硫吸收量($\text{mg}\cdot\text{盆}^{-1}$)

Table 4 N, P, Ca, Mg and S uptake of peanut plants with different types of potash fertilizer($\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$)

钾肥类型 Potash fertilizer type	氮吸收量 N absorption	磷吸收量 P absorption	钙吸收量 Ca absorption	镁吸收量 Mg absorption	硫吸收量 S absorption
杂卤石	141.39±1.44a	47.43±1.48a	161.38±2.19a	82.84±4.99a	91.81±1.85a
氯化钾	132.41±3.87c	45.61±0.97a	146.89±6.30b	84.76±7.32a	77.07±5.88b
硫酸钾镁	133.69±3.97bc	44.87±2.68a	154.18±3.19b	86.33±2.16a	87.69±2.02a
硫酸钾	138.72±1.21b	44.47±1.00a	150.26±3.81b	80.22±3.62a	95.72±3.10a

表5 植株养分吸收量与产量间的相关性($n=20$)

Table 5 The correlation coefficient between plant nutrient uptake and yield($n=20$)

项目 Items	荚果质量 Pod weight	花生秧干质量 Peanut straw biomass	钙吸收量 Ca absorption	镁吸收量 Mg absorption	硫吸收量 S absorption	钾吸收量 K absorption
荚果质量	1					
花生秧干质量	0.821**	1				
钙吸收量	0.663**	0.668**	1			
镁吸收量	-0.340	-0.252	-0.310	1		
硫吸收量	0.674**	0.712**	0.614**	-0.436	1	
钾吸收量	0.733**	0.525*	0.695**	-0.512*	0.717**	1

注:"*"和"***"分别表示显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)相关。
Note:"*" and "***" indicate significant ($P<0.05$) and extremely significant($P<0.01$) correlation respectively.

用率显著低于硫酸钾处理,这可能是施用杂卤石引入的阳离子一定程度上抑制了植株对钾的吸收^[10],但同时也保证了多种中微量营养元素的均匀供给^[11-13],促进作物养分吸收,因此两处理的花生荚果质量、钾肥农学利用率和钾肥偏生产力均未表现出明显差异。杂卤石作为一种难溶性钾肥,保证花生钾素充足供应的同时,在土壤中能够缓慢释放钾素,做到养分的长期供应,而不会污染环境^[14]。

3.2 杂卤石对花生荚果质量和花生秧干质量的影响

花生不是典型的忌氯作物,但在本次试验中氯化钾处理花生荚果质量和花生秧干质量较杂卤石处理均显著降低,这可能与植株对中微量元素的吸收强弱有直接关系^[15]。通过植株养分吸收量与产量间的相关性分析可知,植株钾、钙和硫的吸收量与荚果质量和花生秧干质量呈不同程度的显著正相关关系,因此其吸收量的增加可能是花生荚果质量和花生秧干质量提高的原因之一。从植株吸钾量来看,杂卤石和硫酸钾处理显著高于硫酸钾镁和氯化钾处理,但杂卤石处理花生荚果质量与硫酸钾镁处理差异不显著,花生秧干质量与硫酸钾处理差异显著,因此植株钾吸收量增加并不是杂卤石处理较其他处理花生增产的主要因素。花生是一种需硫量较多的作物,充足的硫供应能够改善花生植株的农艺性状^[16]。本试验中,杂卤石、硫酸钾镁和硫酸钾三种含硫钾肥处理植株吸硫量和荚果质量均显著高于氯化钾处理,而杂卤石处理花生秧干质量显著高于其他三种钾肥处理,因此,植株吸硫量提高可能是杂卤石处理荚果质量显著高于氯化钾处理的原因,但不是花生秧干质量高于其他钾肥处理的主要因素。钙是杂卤石相较于氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾所独有的元素,也是维持细胞正常结构、辅助内源激素合成和维持细胞生理生化反应的重要

元素^[17]。从植株吸钙量来看,杂卤石处理花生钙吸收量和花生秧干质量显著高于其他三种钾肥处理,但荚果质量与硫酸钾镁和硫酸钾处理差异不显著,因此,杂卤石处理花生秧干质量显著高于其他三种钾肥处理可能是施用杂卤石促进了植株对钙的吸收造成的。在本试验中,各处理氮肥的添加量保持一致,但杂卤石处理植株氮含量较其他三种钾肥处理显著提高1.92%~6.78%,这可能因为施用杂卤石提高了植株吸钙量,提高叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性,有利于氮的转移和再利用,改善了花生植株氮和碳水化合物代谢^[18]。周卫等^[19]的研究也表明钙能够促进花生对 NO_3^- 的吸收。因此,植株吸氮量增加同样可能是杂卤石相较于其他钾肥促进花生秧干质量增加的原因之一。

3.3 杂卤石对花生养分吸收的影响

相比其他钾肥,杂卤石钾含量相对较低且组成成分较为复杂,过量施用可能会造成盐害,降低作物产量。在本试验中,随着杂卤石用量增加,花生钾、钙、硫的吸收量与花生荚果质量和花生秧干质量呈正相关关系。Satisha等^[20]的研究表明,施用杂卤石作为钙、硫来源,能够提高花菜和卷心菜的产量。与本试验结果基本一致。通常情况下,钙和钾在吸收上存在竞争关系,而本研究中钾和钙的吸收表现出显著的正相关关系,这可能是钾、钙、镁三者间的协同作用造成的^[21],杂卤石中含有镁,在施入土壤后,钾、钙、镁三者间的结合促进了根系的生长,增强根膜的吸收能力,减弱了钾和钙离子对吸收位点的竞争作用。因此在合理用量范围之内,施用杂卤石能够促进花生对部分中微量元素的吸收,提高作物产量。特别是我国降水量较大的地区土壤矿质养分缺乏,加之高浓度复合肥的大量施用加剧了土壤中微量元素不足的问题^[22],杂

卤石不仅能够有效供应钾素,同时富含钙、镁、硫三种重要的营养元素,有助于平衡施肥,为作物供应均衡的养分。由于杂卤石不含有氯离子,特别是对于忌氯作物具有更好的效果,因此具有更加广泛的应用范围。

4 结论

(1)施用杂卤石能够提高花生荚果质量及花生秧干质量。当每千克土施用0.089 g K_2O 时,与不同类型钾肥相比,杂卤石处理花生荚果质量较氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾处理提高2.42%~12.32%,花生秧干质量较三种常规钾肥显著提高18.49%~25.44%。

(2)杂卤石能够促进花生对氮、钾、钙和硫的吸收。杂卤石处理花生吸硫量提高可能是其花生荚果质量较氯化钾处理显著提高的主要原因,而吸钙量和吸氮量的提高可能是杂卤石处理花生秧干质量较氯化钾、硫酸钾镁和硫酸钾处理显著提高的主要原因。

参考文献:

- [1] 张苏江,崔立伟,高鹏鑫,等. 中国钾盐资源形势分析及管理对策建议[J]. 无机盐工业, 2015, 47(11):1-6.
ZHANG Su-jiang, CUI Li-wei, GAO Peng-xin, et al. Analysis on development situation of potash ore resources and recommended management strategies in China[J]. *Inorganic Salt Industry*, 2015, 47(11):1-6.
- [2] 王兴富,王石军,田红斌,等. 青海盐湖提钾技术进展与我国钾肥工业的发展[J]. 化工矿物与加工, 2017(11):48-52.
WANG Xing-fu, WANG Shi-jun, TIAN Hong-bin, et al. Advances in potassium extraction technology progress in Qinghai Salt Lake and development of potash fertilizer industry in China[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2017(11):48-52.
- [3] Prakash S, Verma J P. Global perspective of potash for fertilizer production[M]//Meena V S, Maurya B R, Verma J P, et al. Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. Springer India, 2016:327-331.
- [4] Fraps G S. Availability to plants of potash in polyhalite[J]. *Texas Agricultural Experiment Station Bulletin*, 1932.
- [5] Tiwari D D, Pandey S B, Katiyar N K. Effects of polyhalite as a fertilizer on yield and quality of the oilseed crops mustard and sesame[R]. International Potash institute, 2015, 42:10-17.
- [6] 黄宣镇. 杂卤石——一种理想的钾肥[C]//非金属矿物材料与环保、生态、健康研讨会论文集. 北京:中国硅酸盐学会, 2003.
HUANG Xuan-zhen. An ideal potassium fertilizer[C]//Proceedings of the symposium on non-metallic mineral materials and environmental protection, ecology and health. Beijing: The Chinese Ceramic Society, 2003.
- [7] 陈际型. 杂卤石在红壤上的肥效[J]. 土壤, 1999, 31(1):33-35.
CHEN Ji-xing. Fertilizer efficiency of heterohalite on red soil[J]. *Soil*, 1999, 31(1):33-35.
- [8] Pavuluri K. Potato response to polyhalite as a potassium source fertilizer in Brazil: Yield and quality[J]. *Hort Science*, 2018, 53(3):373-379.
- [9] 付学鹏, 吴凤芝, 吴 瑕, 等. 间套作改善作物矿质营养的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2):525-535.
FU Xue-peng, WU Feng-zhi, WU Xia, et al. Advances in the mechanism of improving crop mineral nutrients in intercropping and relay intercropping systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(2):525-535.
- [10] 张 丽, 王 寅, 鲁剑巍, 等. 施钾对直播油菜产量及钾钙镁养分吸收的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(3):336-343.
ZHANG Li, WANG Yin, LU Jian-wei, et al. Effect of potassium application on absorption of potassium, calcium and magnesium for direct-sowing winter rapeseed[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2015, 37(3):336-343.
- [11] 侯迷红, 范 富, 宋桂云, 等. 钾肥用量对甜荞麦产量和钾素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2):340-346.
HOU Mi-hong, FAN Fu, SONG Gui-yun, et al. Effect of K application rate on yield and K use efficiency of buckwheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2):340-346.
- [12] 汪家铭. 不溶性钾矿制取矿物钾肥及综合利用研究进展[J]. 化学工业, 2014, 32(1):25-28.
WANG Jia-ming. Progress in preparation and comprehensive utilization of mineral potassium fertilizer from insoluble potassium ore[J]. *Chemical Industry*, 2014, 32(1):25-28.
- [13] 秦文利, 刘忠宽. 黑麦-花生一体化种植模式中花生施肥量的研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(增刊):409-414.
QIN Wen-li, LIU Zhong-kuan. Study on the NPK fertilization of peanut in the integrative planting of peanut and rye in one year[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(Suppl):409-414.
- [14] 李文博, 官厚江, 吕 剑, 等. 杂卤石——富有潜力的钾盐矿资源[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2017(3):3-5.
LI Wen-bo, GUAN Hou-jiang, LÜ Jian, et al. Heterohalite: A potential potash mineral resource[J]. *China Non-metallic Mining Industry*, 2017(3):3-5.
- [15] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2):474-482.
YONG Tai-wen, LIU Xiao-ming, LIU Wen-yu, et al. Effects of reduced N application rate on yield and nutrient uptake and utilization in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2):474-482.
- [16] 王媛媛, 高 波, 张佳蕾, 等. 硫肥不同用量对花生生理性状及产量、品质的影响[J]. 山东农业科学, 2014(12):67-71.
WANG Yuan-yuan, GAO Bo, ZHANG Jia-lei, et al. Effects of different sulfur application rates on physiological characteristics, yield and quality of peanut[J]. *Shandong Agricultural Science*, 2014(12):67-71.
- [17] 沈 浦, 吴正锋, 王才斌, 等. 花生钙营养效应及其与磷协同吸收特征[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(1):85-90.
SHEN Pu, WU Zheng-feng, WANG Cai-bin, et al. Calcium nutrition function in peanut and its synergistic absorption characteristics with

- phosphorus[J]. *Chinese Journal of Oil Crops Sciences*, 2017, 39(1): 85-90.
- [18] 于天一, 王春晓, 张思斌, 等. 土壤酸胁迫下不同花生品种(系)钙吸收、分配及钙效率差异[J]. 核农学报, 2018, 32(4): 751-759.
- YU Tian-yi, WANG Chun-xiao, ZHANG Si-bin, et al. Differences of calcium uptake, distribution and calcium efficiency of different peanut varieties (lines) under soil acidification stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(4): 751-759.
- [19] 周 卫, 林 葆. 硝酸钙对花生生长和钙素吸收的影响[J]. 花生学报, 1996(4): 225-227.
- ZHOU Wei, LIN Bao. Effects of calcium nitrate on growth and calcium absorption of peanut[J]. *Journal of Peanut*, 1996(4): 225-227.
- [20] Satisha G C, Ganeshamurthy A N. Bioefficacy of polyhalite application on yield and quality of cabbage and cauliflower[R]. International Potash Institute, 2016, 44: 21-31.
- [21] 陈际型, 宣家祥. 低盐基土壤 K、Ca、Mg 的交互作用对水稻生长与养分吸收的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 433-439.
- CHEN Ji-xing, XUAN Jia-xiang. Effect of interactions of K, Ca and Mg applied to soils with low base content on growth and nutrient uptake by rice plant[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4): 433-439.
- [22] 王 飞, 李清华, 何春梅, 等. 酸性低钾土硫酸钾镁肥对花生生长及养分吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1090-1093.
- WANG Fei, LI Qing-hua, HE Chun-mei, et al. Effect of sulphate-potassium magnesium on growth and nutrient absorption of peanut in poor-K acid soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(6): 1090-1093.