



毛敬麟, 刘可星, 何慧中, 等. 活化剂对富钾页岩、钾长石的活化效果及作用机理[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(1): 60-64.

# 活化剂对富钾页岩、钾长石的活化效果及作用机理

毛敬麟, 刘可星, 何慧中, 郭小雪, 廖宗文

(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

**摘要:**【目的】综合利用我国丰富的非水溶性钾矿,以缓解我国钾肥市场“供-需”矛盾。【方法】通过水浸提和盆栽试验,比较了活化剂 QN 对富钾页岩和钾长石的活化效果,并通过 X 衍射分析活化剂 QN 对富钾页岩和钾长石的作用机理。【结果和结论】水浸提试验结果表明,在 QN 比例 0.1% ~ 10.0% 范围内,富钾页岩、钾长石的活化效果不同,随 QN 比例的增加,活化页岩的水溶性钾释放量先增加后下降,1.0% QN 活化页岩的水溶性钾累积量最高;活化钾长石的水溶性钾含量则随 QN 比例的增加而增加,QN 比例为 10.0% 时的水溶性钾累积量最高。盆栽结果表明,活化页岩的玉米生物量显著高于富钾页岩,而与氯化钾的生物量相当;活化钾长石处理的玉米生物量与钾长石处理差异不显著,且显著低于氯化钾活化页岩处理。X 衍射结果分析表明,QN 活化富钾页岩和钾长石的作用机理是  $\text{Na}^+$  与  $\text{K}^+$  间的交换反应,活化页岩中新增的钠盐有  $\text{K}_{0.96}\text{Na}_{0.04}\text{AlSi}_3\text{O}_8$ 、 $\text{Na}_4\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{17}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_6\text{PbO}_4$ ,活化钾长石中新增的钠盐为  $\text{Na}_3\text{Mn}(\text{PO}_4)(\text{CO}_3)$ 。

**关键词:**富钾页岩;钾长石;活化剂;X 衍射

中图分类号:S511;S502

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2015)01-0060-05

## Effects of the activator on potassium release from potassium-rich shale and potassium feldspar and its mechanism

MAO Jinglin, LIU Kexing, HE Huizhong, GUO Xiaoxue, LIAO Zongwen

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:**【Objective】Comprehensive utilization of water-insoluble potassium resources is helpful to relieve the contradiction between supply and demand of potash market. 【Method】The activated effects and fertilizer effects were studied by water extraction experiment and pot trial. The mechanism of activation was discussed by X-ray diffraction (XRD). 【Result and conclusion】The results of water extraction experiment indicated that, within the QN ratio of 0.1% - 10.0%, potassium-rich shale and potassium feldspar had different activated effects. With the increase of QN ratio, the water-soluble K extraction from potassium-rich shale increased and then decreased, and the activated ratio of 1.0% was the best. For potassium feldspar, the water-soluble K accumulative amount increased as the ratio of QN increased, and when the QN ratio was 10.0%, the accumulation of water-soluble K was the highest. The pot trail results showed that the pot biomass of activated K-shale was 49.42% higher than that of K-shale, reaching the potassium chloride level. For activated K-feldspar, the corn biomass was not significantly different from K-feldspar, which was lower than that of K-chloride and activated K-shale. The results of XRD analysis indicated that, the mechanism of QN activated potassium-rich shale and potassium feldspar was an ion ex-

收稿日期:2013-12-28 优先出版时间:2014-12-02

优先出版网址:<http://www.cnki.net/kcms/doi/10.7671/j.issn.1001-411X.2015.01.011.html>

作者简介:毛敬麟(1986—),女,硕士研究生, E-mail:349396165@qq.com;通信作者:刘可星(1970—),男,副教授,博士, E-mail:kxliu@scau.edu.cn

基金项目:广东省科技计划项目(2013B020310007);公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203013);广东省-教育部产学研结合项目(2011B090400498)

<http://xuebao.scau.edu.cn>

change reaction between  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$ . Some new sodium minerals can be found in activated K-shale and activated K-feldspar. In activated K-shale, the new sodium minerals include  $\text{K}_{0.96}\text{Na}_{0.04}\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ,  $\text{Na}_4\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{17}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Na}_6\text{PbO}_4$ , but it is  $\text{Na}_3\text{Mn}(\text{PO}_4)(\text{CO}_3)$  in activated K-feldspar.

**Key words:** potassium-rich shale; potassium feldspar; activated agent; X-ray diffraction

我国有近 1.2 亿  $\text{hm}^2$  的农业耕地,是世界钾肥主要消费国,据土壤普查资料统计,我国约 70% 的耕地缺钾,其中 45% 的耕地严重缺钾,南方缺钾尤其严重<sup>[1-2]</sup>,我国钾肥主要依赖进口,对外依存度高达 50%,钾肥在生产上已不同程度地限制了我国的农业发展<sup>[3]</sup>,因此要保证未来粮食的稳定增产,解决钾肥资源的供给问题则变得尤为重要.我国拥有丰富的钾矿资源,但水溶性钾矿资源严重短缺.由于我国钾肥市场“供-求”间的矛盾问题,自 20 世纪 50 年代以来,国内许多学者开始研究从非水溶性钾盐中提取钾的技术<sup>[4]</sup>,通常都以热法和湿化学法提取钾为主<sup>[5-7]</sup>,存在能耗高、成本大,并易造成二次污染等缺陷.近年来在难溶性磷矿、镁矿及枸溶性磷肥方面运用的一种温和活化技术效果明显<sup>[8-12]</sup>,该技术是基于经典有效性提出的一种居于有效态和难溶态之间的一种新有效态——活化态<sup>[13]</sup>,这种技术在非水溶性钾盐的钾长石上也表现出明显的活化效果<sup>[14-15]</sup>.本文是在活化技术对钾长石效果显著的基础上,应用不同比例活化剂活化富钾页岩和钾长石,通过 3 次水浸提试验,比较活化技术对富钾页岩和钾长石的活化效果;通过盆栽试验,比较活化页岩及活化钾长石的肥效;并通过 X 衍射分析活化技术对富钾页岩、钾长石的作用机理,为综合利用非水溶性钾盐生产钾肥提供理论和技术上的支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

富钾页岩:产自河北张家口,全钾 [ $w(\text{K}_2\text{O})$ ] 为 11.88%;钾长石:产自广东五华,全钾 [ $w(\text{K}_2\text{O})$ ] 为 9.80%;活化剂 QN 为含 Na、不含 K 的无机材料,华南农业大学新肥料研究中心研制.

供试土壤:赤红壤,取自华南农业大学校园,土壤理化性质为 pH 5.32,有机质  $31.78 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮、全磷、全钾分别为  $0.35$ 、 $1.73$  和  $27.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮、有效磷、速效钾分别为  $16.93$ 、 $2.61$  和  $22.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,缓效钾为  $103.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

供试作物:玉米 *Zea mays* L. 品种为华农糯玉米,由华南农业大学农学院提供.

### 1.2 方法

1.2.1 活化页岩及活化钾长石的制备 富钾页岩、钾长石分别与 QN 按质量比 19.98:0.02、19.90:0.10、19.80:0.20、19.00:1.00、18.00:2.00 [即  $w(\text{QN})$  分别为 0.1%、0.5%、1.0%、5.0%、10.0%],富钾页岩分别记为 T1、T2、T3、T4、T5,钾长石分别记为 t1、t2、t3、t4、t5. ]混合,再加入 2 mL 蒸馏水研磨 5 min,风干、磨细备用;富钾页岩原样记为 CK0,钾长石原样记为 ck0.

1.2.2 水溶性钾的测定 称取 0.500 0 g 样品放入 100 mL 离心管中,准确加入蒸馏水 50 mL,拧紧瓶塞,摇匀,  $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  振荡 15 min,  $5000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 3 min,小心倒出上清液,过滤得滤液 I;剩余样品留在离心管中,重复 2 次上述步骤,得滤液 II、III. 采用火焰分光光度计法<sup>[16]</sup>分别测定滤液 I、II、III 中钾的浓度.

1.2.3 活化页岩及活化钾长石的 X 衍射分析 富钾页岩、钾长石及研制的  $w$  为 1% QN 活化页岩和  $w$  为 1% QN 活化钾长石研磨过 200 目筛,取 1 mg 左右的分析样与光谱纯级溴化钾粉末在玛瑙研钵中混匀后压片,用于 X 衍射分析(仪器型号为 XD-2X/M4600,由北京谱析通用仪器公司生产).测定的技术参数:起始角  $20^\circ$ ,终止角  $80^\circ$ ,步宽  $0.02^\circ$ ,波长  $1.5406 \text{ nm}$ ,管压 36 kV,管流 30 mA.

1.2.4 活化钾肥玉米盆栽试验 试验设 6 个处理,每个处理 4 次重复,每盆装土 4 kg,具体处理内容如下: I—不施钾肥, II—施氯化钾, III—施富钾页岩, IV—施钾长石, V—施  $w$  为 1% QN 活化页岩, VI—施  $w$  为 1% QN 活化钾长石.各处理氮、磷肥用量一致,即按 1 kg 土分别施入尿素 [ $w(\text{N})46\%$ ] 120 mg、过磷酸钙 [ $w(\text{P}_2\text{O}_5)12\%$ ] 80 mg,处理 III、IV 的全钾含量与处理 II 相等,即按 1 kg 土施入  $\text{K}_2\text{O}$  100 mg,处理 V 与处理 III 的钾肥用量相等,处理 VI 与处理 IV 的钾肥用量相等.玉米于 2012 年 7 月 18 日播种,每盆 4 粒种子,1 周后定植为 3 株/盆,2012 年 9 月 8 日收获,生长期为 52 d.收获时收割玉米地上部分,烘干后称干质量,并分析植株内全钾含量<sup>[16]</sup>.

试验数据采用 SAS System Release 9.0 分析软件处理.

## 2 结果与分析

### 2.1 活化页岩、活化钾长石的钾释放特性

水浸提试验结果(表1)表明,活化页岩、活化钾长石的水溶性钾含量均显著高于富钾页岩(CK1)和钾长石(ck1)处理,随着浸提次数的增加,水溶性钾含量总体上逐渐降低(T4除外),但后期活化页岩、活化钾长石的水溶性钾含量仍显著高于CK1、ck1。

与富钾页岩原样(CK0)相比,活化页岩处理(CK1、T1、T2、T3、T4、T5)的水溶性钾3次累积释放

量分别提高了1.01、3.18、4.44、4.80、3.66和4.27倍,随QN的增加,活化效果先提高后降低,在 $w$ 为1%QN(T3)时的活化效果最佳;而在活化钾长石中,ck1、t1、t2、t3、t4、t5连续3次累积钾释放量分别比钾长石(ck0)提高0.42、0.71、0.88、0.94、1.14和2.56倍,随QN比例的增加,活化效果逐渐提高,这说明活化剂QN对富钾页岩和钾长石都有明显的活化效果,在 $w$ 为0.1%~10.0%的QN活化范围内,富钾页岩的活化效果是先增加后降低,而钾长石的活化效果则是逐渐增加。

表1 不同比例QN活化富钾页岩和钾长石的钾素( $K_2O$ )释放动态<sup>1)</sup>

钾矿	处理	$w(QN)/\%$	第1次	第2次	第3次	累积总量
富钾页岩	CK0		861.07 ± 13.36f	629.04 ± 42.71e	377.50 ± 7.29e	1 867.61 ± 41.85f
	CK1	0	1 346.78 ± 50.06f	1 467.52 ± 52.70d	953.94 ± 16.74b	3 768.24 ± 40.76e
	T1	0.1	4 822.88 ± 29.49d	2 107.76 ± 68.11c	879.66 ± 47.78bc	7 810.30 ± 35.34d
	T2	0.5	7 708.62 ± 49.31b	1 886.60 ± 61.16c	558.11 ± 24.44d	10 153.33 ± 65.19b
	T3	1.0	8 409.21 ± 18.10a	1 865.30 ± 47.16c	558.40 ± 40.55d	10 832.90 ± 80.08a
	T4	5.0	3 302.80 ± 37.77e	3 687.72 ± 63.69a	1 712.13 ± 51.84a	8 702.65 ± 107.37c
	T5	10.0	6 556.99 ± 50.65c	2 521.99 ± 155.23b	765.32 ± 111.44c	9 844.30 ± 155.47b
钾长石	ck0		378.89 ± 11.85e	135.16 ± 6.84e	87.43 ± 9.47c	601.48 ± 15.72e
	ck1	0	518.13 ± 4.05e	197.11 ± 4.73c	136.17 ± 7.22b	851.41 ± 4.88e
	t1	0.1	660.21 ± 16.02d	242.70 ± 9.94b	124.05 ± 5.76b	1 026.96 ± 29.44d
	t2	0.5	761.91 ± 3.35c	245.92 ± 12.28b	121.56 ± 12.12b	1 129.38 ± 20.54cd
	t3	1.0	793.99 ± 7.88c	259.58 ± 10.01b	115.41 ± 8.36b	1 168.99 ± 16.70c
	t4	5.0	888.32 ± 26.03b	270.04 ± 6.24b	129.94 ± 1.48b	1 288.30 ± 32.17b
	t5	10.0	1 345.52 ± 68.02a	592.68 ± 21.38a	205.38 ± 6.69a	2 143.58 ± 83.33a

1) 表中数据为3次重复的平均值±标准误,同种钾矿同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示差异不显著(Duncan's法,  $P > 0.05$ )。

### 2.2 活化页岩、活化钾长石的盆栽玉米生物量

从表2可以看出,施钾肥处理的玉米干质量均高于不施钾肥处理(I),说明施钾肥可在一定程度上促进玉米生长,提高植株生物量.在活化钾肥中,活化页岩处理(V)的玉米干质量显著高于富钾页岩处理(III),提高了49.42%,但与氯化钾处理(II)的相当;活化钾长石(VI)生物量仅比钾长石处理(IV)高8.27%,差异不显著,但显著低于氯化钾处理(II)及同等活化比例下的活化页岩(V).可见,富钾页岩、钾长石活化后的生物有效性均有提高,且在 $w$ 为1%QN时,活化页岩肥效优于活化钾长石,可达氯化钾水平。

### 2.3 活化钾肥的盆栽玉米植株含钾量及吸钾量

与不施钾肥处理(I)相比,施钾肥处理的玉米植株含钾量和吸钾量都显著增加,说明施钾有助于玉米植株对钾的吸收.活化钾肥中,活化页岩处理

表2 不同钾肥处理的盆栽玉米钾含量和吸钾量<sup>1)</sup>

Tab.2 Potassium content and uptake of corn in different treatments of potash fertilizer

处理	生物量/ (g·盆 <sup>-1</sup> )	钾含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	吸钾量/ (mg·盆 <sup>-1</sup> )
I	8.40 ± 0.73c	5.11 ± 0.24e	43.27 ± 5.22d
II	17.43 ± 3.57a	18.39 ± 0.28a	317.58 ± 31.06a
III	12.14 ± 2.67b	10.86 ± 0.53c	135.39 ± 14.60b
IV	11.00 ± 1.12b	7.79 ± 0.30d	85.03 ± 6.75c
V	18.14 ± 1.04a	16.79 ± 0.32b	303.81 ± 13.36a
VI	11.91 ± 2.56b	11.84 ± 0.42c	139.6 ± 17.05b

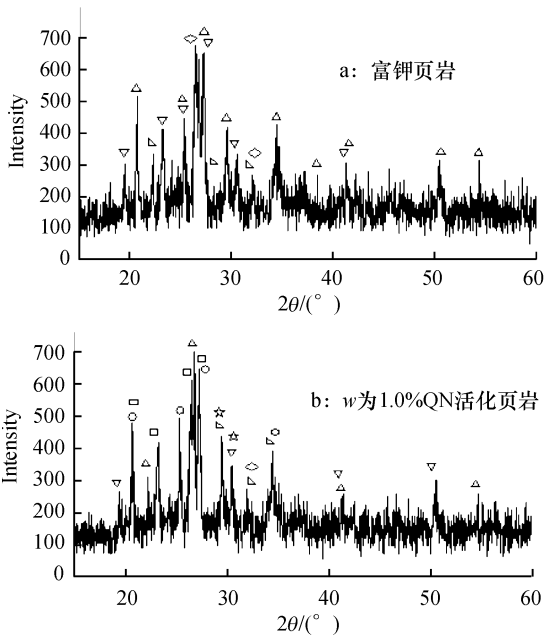
1) 表中数据为3次重复的平均值±标准误,同列数据后凡是有一个相同小写字母者,差异不显著(Duncan's法,  $P > 0.05, n = 4$ )。

(V)的玉米植株含钾量和吸钾量显著高于富钾页岩处理(III),吸钾量与氯化钾处理(II)相近;活化钾长石处理(VI)的玉米植株含钾量和吸钾量也显著高

于钾长石原样(IV),V处理的玉米植株含钾量和吸钾量明显高于VI,说明富钾页岩和钾长石活化后,由于水溶性钾释放量的增加(表1),玉米植株的吸钾量也显著提高。

### 2.4 富钾页岩、钾长石及其活化钾肥的 X 衍射结果分析

通过对富钾页岩、钾长石及其活化页岩、活化钾长石的 X 衍射分析,经 JCPDS 标准卡片比对待知,钾长石的主要成分为  $KAlSi_3O_8$  和  $SiO_2$ ;富钾页岩的组分较复杂,主要有  $KAlSi_3O_8$ 、 $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ 、 $K_2Pb_4Si_8O_{21}$ 及部分  $Na_4SiO_4$ 。从 X 衍射图谱峰值强度来看,富钾页岩的峰强小于 700,且杂峰、重叠峰较多;而钾长石的主峰强度明显高于富钾页岩,并且杂峰、重叠峰现象少(图 1a、2a)。



△:  $KAlSi_3O_8$ ; ▽:  $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ ; ◇:  $K_2Pb_4Si_8O_{21}$ ; ▤:  $Na_4SiO_4$ ; □:  $K_{0.96}Na_{0.04}AlSi_3O_8$ ; ○:  $Na_4Al_2Si_6O_{17} \cdot 2H_2O$ ; ☆:  $Na_6PbO_4$ 。

图 1 富钾页岩及 1%QN 活化页岩的 X 衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction graph of potassium-rich shale and 1.0% QN activated K-shale

富钾页岩经 QN 活化后,其钾盐衍射峰(如  $KAlSi_3O_8$ 、 $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ 、 $K_2Pb_4Si_8O_{21}$ )减弱,而钠盐  $K_{0.96}Na_{0.04}AlSi_3O_8$ 、 $Na_4Al_2Si_6O_{17} \cdot 2H_2O$  和  $Na_6PbO_4$  的衍射峰则相应增强,且富钾页岩活化后的主衍射峰( $2\theta = 26.40^\circ \sim 27.3^\circ$ )强度略有下降,从 676~633 下降到 648~618(图 1b)。钾长石活化后的  $KAlSi_3O_8$  衍射峰( $2\theta = 26.36^\circ$ )明显减弱,新增  $Na_3Mn(PO_4)(CO_3)$  特征峰,此外,钾长石活化后的主峰强度显著下降,从 2 917 降低到 1 799(图 2b)。以上

结果分析表明,活化页岩和活化钾长石中均有钠盐物质新增,说明 QN 活化使富钾页岩和钾长石中部分钾盐中的钾离子与钠离子发生置换,形成钠盐,其中,活化页岩中新增的是  $K_{0.96}Na_{0.04}AlSi_3O_8$ 、 $Na_4Al_2Si_6O_{17} \cdot 2H_2O$  和  $Na_6PbO_4$  钠盐,而钾长石中主要为  $Na_3Mn(PO_4)(CO_3)$ 。

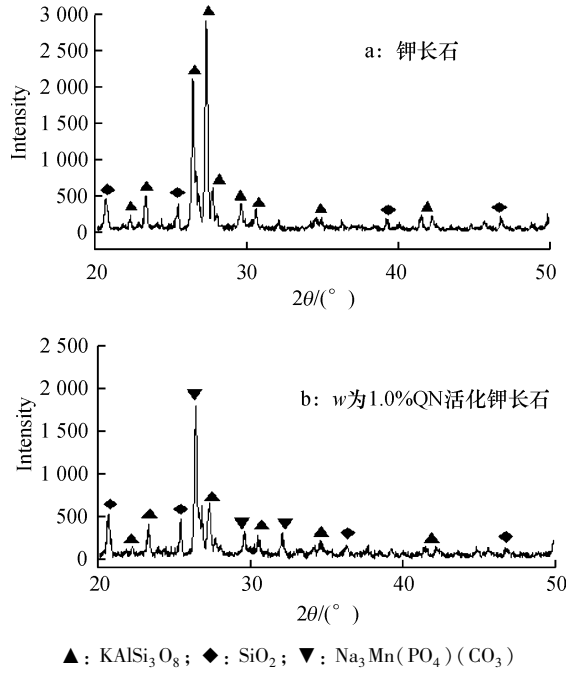


图 2 钾长石及 1% QN 活化钾长石的 X 衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction graph of potassium feldspar and 1.0% QN activated K-feldspar

### 3 讨论与结论

富钾页岩是在表生环境的常温常压下由母岩风化、生物作用和某些火山作用产生的物质历经搬运、沉积和成岩等作用而形成的沉积岩,层状结构;钾长石是由地下深处炽热的岩浆在地下或在地表冷凝形成的岩浆岩,晶格结构<sup>[17-18]</sup>,二者成岩条件和结构明显不同,X 衍射分析表明,富钾页岩物相组分复杂,主要有  $KAlSi_3O_8$ 、 $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ 、 $K_2Pb_4Si_8O_{21}$ 等钾盐,还有部分  $Na_4SiO_4$ ,且杂峰、重叠峰较多,晶型结构不明显;钾长石主要组成物相为微斜长石和石英,成分较单一。与标准卡片比对,发现活化页岩和活化钾长石的 X 衍射图谱上均有钠盐成分增加,而相应的钾盐衍射峰减弱,其中 1.0% QN 页岩新增的是多种钠盐,有  $K_{0.96}Na_{0.04}AlSi_3O_8$ 、 $Na_4Al_2Si_6O_{17} \cdot 2H_2O$  和  $Na_6PbO_4$ ,而 1.0% QN 钾长石中新增的是  $Na_3Mn(PO_4)(CO_3)$ ,说明 QN 活化富钾页岩和钾长石的作用机理是矿物中的  $K^+$  与活化剂 QN 中的  $Na^+$  发生了离子交换反应,从而达到释放钾的效果。

根据不同比例 QN 活化富钾页岩、钾长石的 3 次水浸提结果可知, QN 在活化富钾页岩和钾长石的机理方面存在差异. 由于富钾页岩中组成元素较多, 除了  $K^+$ 、 $Al^{3+}$  外, 还有  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ba^{2+}$  等阳离子, 研究表明  $Na^+$  不仅可与  $K^+$  发生置换反应, 与  $NH_4^+$ 、 $Ba^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  等阳离子也可发生交换反应<sup>[19-20]</sup>, 因此, 推测 QN 活化富钾页岩时, 不仅有  $Na^+$  与  $K^+$  交换, 还存在  $Na^+$  与其他阳离子间的交换, 当 QN 比例较小时,  $Na^+$  含量较少,  $Na^+$  与  $K^+$  发生交换; 当 QN 比例逐渐增大,  $Na^+$  逐渐增多,  $Na^+$  就可与其他离子 (如  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  等) 发生交换反应, 形成其他阳离子与  $K^+$  争夺  $Na^+$ , 使与  $K^+$  发生交换的  $Na^+$  减少, 导致置换出的  $K^+$  减少, 所以 QN 对富钾页岩的活化效果是先增加后降低, 在 1.0% QN 比例时活化释放的水溶性钾量最多, 比 CK0 提高 4.80 倍, 当 QN 比例增加 (5.0%、10.0%) 时, 水溶性钾释放量反而降低; 钾长石因其主要成分都是含钾物相, QN 活化时, 主要存在  $K^+$  与  $Na^+$  的交换反应, 故随 QN 比例增大, 钾长石的活化效果越好.

1.0% QN 页岩和 1.0% QN 钾长石的盆栽试验结果表明, 活化页岩的盆栽玉米植株生物量比富钾页岩提高 49.42%, 可达氯化钾水平, 而活化钾长石处理的玉米植株生物量与钾长石处理差异不显著, 并且明显低于氯化钾处理及同等活化比例下的活化页岩. 结合水溶性钾测定结果可知, 富钾页岩在  $w$  为 1.0% QN 时的活化效果最好, 水溶性钾累积量可显著提高 4.8 倍; 而钾长石在  $w$  为 1.0% QN 活化条件下, 水溶性钾含量只比钾长石提高 94.35%. 此外, 由于盆栽过程中的影响因素较多, 其差异可能未显现出来, 所以在  $w$  为 1.0% QN 活化时, 活化页岩的生物有效性优于活化钾长石, 说明钾肥的水溶性钾量与肥效有直接的正相关性.

#### 参考文献:

- [1] 石林. 脱硫酸与钾矿石复合生产钾钙硅镁硫酸肥料研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(10): 2339-2342.
- [2] 王姗姗, 徐明岗, 甘良涛, 等. 我国南方地区钾肥使用及市场调查研究分析[J]. 中国土壤与肥料, 2012(2): 98-103.
- [3] 陈焯, 连宾. 钾素循环及其农业利用[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(25): 12087-12090.
- [4] 顾汉念, 王宁, 杨永琼, 等. 不溶性含钾岩石制备钾肥研

究现状与评述[J]. 化工进展, 2011, 11(30): 2450-2455.

- [5] 马鸿文, 苏双青, 王芳, 等. 钾长石分解反应热力学与过程评价[J]. 现代地质, 2007, 21(2): 426-434.
- [6] 石林, 曾小平, 柴妮, 等. 添加剂对  $KAlSi_3O_8 - CaSO_4 - CaCO_3$  体系反应表现活化能的影响[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(1): 90-94.
- [7] 姬海鹏, 徐锦明. 利用钾长石提钾的研究进展[J]. 现代化工, 2011, 31(1): 30-33.
- [8] 吴平霄, 廖宗文. 几种高效磷肥在酸性土壤中的肥效及电子顺磁共振研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 30(5): 505-509.
- [9] 孙克君, 赵冰, 卢其明, 等. 活化磷肥的磷素释放特性、肥效及活化机理研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1722-1729.
- [10] 熊金涛, 张俊涛, 毛小云, 等. 印度磷矿粉集中促释处理的动态释磷特点及肥效研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 660-663.
- [11] 代明, 谭天水, 廖宗文. 活化磷肥在水稻上的肥效研究[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(5): 83-84.
- [12] 王艳, 鄢海印, 刘可星, 等. 活化钙镁磷肥的养分释放特点及其对玉米生长的影响[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(4): 479-483.
- [13] 廖宗文, 毛小云, 刘可星. 养分有效性概念的思考与促释新技术的开拓[J]. 中国农业科学, 2011, 44(18): 3918.
- [14] 王俊, 刘辉, 张俊涛, 等. 不同理化处理对钾长石中钾的促释效果研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 451-454.
- [15] 鄢海印, 刘可星, 廖宗文, 等. 化学及生物活化钾长石的释钾效果比较研究[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(2): 149-152.
- [16] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 1-336.
- [17] 姜尧发, 孙宝玲, 钱汉东. 矿物岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 88-111.
- [18] 李昌年. 简明岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010: 25-114.
- [19] 张铨昌, 杨华蕊, 韩成. 天然沸石离子交换性能及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 185-191.
- [20] 赵亮. 合成钾离子吸附剂离子交换特性的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2008.

【责任编辑 周志红】