

# 酸性水稻土上水稻对硅、钾、钙、镁的吸收及其动力学研究

魏朝富, 谢德体, 郭碧花, 高明, 车福才

(西南农业大学资源环境学院, 重庆 400716)

**摘要:**运用盆栽试验研究了南方稻区酸性水稻土上增施硅(Si)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)肥对水稻产量的影响及其水稻对 Si、K、Ca、Mg 的吸收。结果表明,在酸性水稻土上增施 Si、K、Ca、Mg 肥及其配合施用均具有显著的增产效益,能明显地提高水稻对该种元素吸收速率和总吸收量。施 Si 肥主要是增加了水稻后期对 Si 的吸收,使水稻成熟期能保持较高的 Si 含量;施用 K 肥使水稻在移栽后能较长时间内保持较高的 K 吸收速率;施 Ca、Mg 肥能使水稻保持较高的 Ca 吸收速率;K 和 Ca 之间存在不同程度的交互作用。扩散方程、Elovich 方程和多项式方程均能很好地描述水稻生长期内水稻对 Si、K、Ca、Mg 的吸收过程。可用扩散方程和 Elovich 方程的参数 b 值来评价水稻对 Si、K、Ca、Mg 吸收速率。

**关键词:**酸性水稻土;养分吸收;动力学

**中图分类号:**S511;Q945.12 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-505X(2002)04-0452-06

## Study on uptake of Si, K, Ca, Mg by rice and its dynamics in acid paddy soil

WEI Chao-fu, XIE De-ti, GUO Bi-hua, GAO Ming, CHE Fu-cai

(College of Resour. and Envir., Southwest Agric. Univ., Chongqing 400716, China)

**Abstract:** Effect of Si, K, Ca and Mg fertilizers applied to acid paddy soil on yield of rice and uptake of Si, K, Ca and Mg by rice was investigated with pot culture experiment. The results showed that there were significant yield effects on rice with the single or compound application of Si, K, Ca and Mg fertilizers on the basis of NP fertilizers in acid paddy soil, and the uptake capacity and uptake rate of these nutrients were increased by the rice. Si could mainly raise the uptake capacity and uptake rate of rice during the late growth period, and had higher Si content in rice plant at mature stage. Potash supplied could keep rice higher rate of K uptake rate for a longer time. The higher rate of Ca uptake has been held by the application of Ca and Mg fertilizers during growth period of rice. There was an interaction between K and Ca. Elovich equation, Diffusion equation and Quantic equation could describe the uptake processes of rice on Si, K, Ca and Mg during growth period of rice. The uptake rate of Si, K, Ca and Mg might be evaluated with parameter b in Elovich equation and Diffusion equation.

**Key words:** acid paddy soil; nutrient uptake; dynamics

近 20 余年来,我国对南方酸性土壤尤其是酸性水稻土的 K、Ca、Mg、Si 营养及施肥效应等方面做了大量的研究工作<sup>[1~3]</sup>。南方酸性土壤有效 K、Ca、Mg 和 Si 的含量低,作物表现不同程度的亏缺现象。随着 NP 肥用量增加、复种指数和产量的提高,施用

K 肥已成为重要的增产措施之一<sup>[1,2,4]</sup>;水稻土(主要是酸性和砂质水稻土)Si 素营养和 Si 肥的研制、应用正在逐步改善土壤的缺 Si 状况<sup>[5~7]</sup>;而施用石灰来补充和改善土壤的 Ca、Mg 营养元素在我国有悠久历史<sup>[1,3,8]</sup>。然而已有的研究工作侧重于单个

收稿日期:2001-10-10

作者简介:魏朝富(1962—),男,四川省乐山市人,教授,主要从事水土资源管理的研究。

元素的肥效研究。K、Ca、Mg 和 Si 在土壤中的转化、移动以及作物的吸收均存在着复杂的相互作用<sup>[1,9]</sup>。Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 的交换性吸附能促进粘土表面的交换性 K<sup>+</sup> 和层间 K<sup>+</sup> 的释放,进而促进 K 的植物有效性<sup>[10]</sup>;而植株体 K 的增加会阻碍 Mg 向地上部转移而产生颞颞作用<sup>[11]</sup>;施用钾肥能提高水稻对 Si 的吸收;施 Si 有利于水稻对 Si 的吸收,增加植株 Si 的含量,但会阻碍水稻对 K 的吸收<sup>[12]</sup>。同时,我国钾肥资源匮乏,K 的开源一直都是受到各级政府和广大科技工作者的重视<sup>[13,14]</sup>。因此,研究土壤 Si、K、Ca、Mg 的相互作用和作物的吸收规律,可为利用我国 K<sub>2</sub>O 含量在 10% 左右的中低品位含钾硅酸盐矿物生产含钾硅钙镁等元素的复合肥以及南方酸性土壤 Si、K、Ca、Mg 肥的合理施用提供依据。

## 1 材料与方方法

### 1.1 试验设计

供试土壤为三选系须家河组灰白色、黄灰色石英粉砂岩坡积物母质上发育的黄泥田,其有机质含量为 15.6 g/kg,全 K 16.5 g/kg,有效 K 49.0 mg/kg,有效 Si 40.0 mg/kg,代换性 Ca 403.0 mg/kg,代换性 Mg 35 mg/kg,pH(H<sub>2</sub>O) 5.2。供试水稻品种为 II 优 6078,秧龄为 35d。

盆栽试验设:CK<sub>0</sub>(无肥)、CK<sub>1</sub>(NP)、K(NP+K)、Si(NP+Si)、KSi(NP+K+Si)、CaMg(NP+Ca+Mg)、KSi-CaMg(NP+K+Si+Ca+Mg)等 7 个处理,随机区组排列,重复 10 次,其中 6 次用于水稻吸收 Si、K、Ca、Mg 养分的动力学研究。

每盆栽装风干土 8 kg,施 N 0.15g/kg,N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 1:0.5。施肥量按设计要求施用,即每盆施尿素(含 N 46%) 2.61g、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%) 3.75g、氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%) 1.0g、硅酸钠(含 SiO<sub>2</sub> 21.4%) 12.22g,碳酸钙(化学纯,含

CaO 55.4%) 7.47g,碳酸镁(化学纯,含 MgO 42%) 2.02g。各种肥料均作底肥,与土壤混匀后一起装入盆钵内,浸泡 5d 后栽秧,每钵栽水稻秧苗 3 株。试验期间,注意灌水使盆钵中的水层厚度保持在 4~6cm。并及时打农药,防治病虫害。

### 1.2 分析方法

土壤有效 K 用 1.0 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定;土壤有效 Ca、Mg(包括水溶态和交换态)用 1.0 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 交换-原子吸收光谱法测定;土壤有效 Si 用 HOAc 缓冲液浸提-硅钼蓝比色法测定。

从栽秧到水稻收获,共采植株样 7 次。生长期间的 6 次植株样品,每次每处理取一个盆钵,分根系和茎叶全部收集,测定其根重、茎叶重和生物量以及水稻生长性状如分蘖数。根和茎叶样品烘干,磨细供分析用。收获时,收集所有盆钵的植株样品,分根、茎叶和子粒收集。考种后,每个处理的根、茎叶和子粒混匀后,供分析用。植株 Si 含量用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-重量法测定;植株 K 含量用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-火焰光度法测定;植株 Ca、Mg 含量用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-原子吸收光谱法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对水稻产量的影响

水稻盆栽试验研究结果(表 1)表明,由于施肥的种类和配置不同,各施肥处理间的水稻子粒产量、根重、茎叶重和生物量差异均达到了显著或极显著水平。多重比较表明,在 N、P 肥施用基础上,增施 Si 肥、K 肥和 Ca、Mg 肥均表现出不同程度的增产效果,其中 Si 肥和 Ca、Mg 肥处理达到了极显著和显著水平,增产幅度达 18.4% 和 10.0%。Si 肥和 K 肥配施的效果低于 Si 肥和 K 肥单独施用的效果,Si 肥单施与 Si、K 肥配施及 K 肥处理间的子粒产量达到了显著性差异。

表 1 施用 K、Ca、Mg、Si 肥对水稻产量和经济性状的影响

Table 1 Effect of Si, K, Ca and Mg on yield and economic characters of rice

处理 Treatment	穗数 Spike (no./pot)	根重 Root	茎叶重 Stem and Leaf .....g/pot.....	子粒重 Grain	生物量 Biomass	千粒重 1000-grains (g)	粒/穗 Grain/spike
CK <sub>0</sub>	32.8	7.6	65.4	56.6	129.6	22.96	75.2
K	27.3	10.9	74.2	61.4	146.5	24.21	93.0
Si	30.7	10.3	72.3	67.0	149.6	23.90	92.3
KSi	28.8	9.6	74.0	60.1	143.7	25.03	83.6
CaMg	29.5	11.3	81.7	62.3	155.3	22.88	78.3
KSiCaMg	35.0	9.8	74.4	70.1	154.3	23.74	84.4
F 值 <sup>1)</sup>		10.96**	6.11**	7.65**	18.89**		

1) F<sub>0.05</sub> = 2.90 ; F<sub>0.01</sub> = 4.56。

在 N、P 肥基础上, Si、K、Ca、Mg 等多种元素肥料配施的效果最好, 水稻子粒产量明显高于 Si 肥, K 肥, Ca、Mg 肥单独施用或两种肥料配施。水稻子粒产量间的差异均达到了显著或极显著水平, 比 CK 增产 23.9%。因此, Si 肥, K 肥, Ca、Mg 肥的施用或者配合施用对提高酸性水稻土水稻单位面积产量具有重要的意义。

## 2.2 水稻对 Si、K、Ca、Mg 的吸收

2.2.1 水稻对 Si 的吸收 在施 N、P 肥基础上, 增施 Si 肥后水稻根系、茎叶和子粒的 Si 含量分别增加

了 41.55%、100.28% 和 42.51% (表 2); 水稻对 Si 的吸收量增加了 105.78%。表明增施 Si 肥能显著地提高水稻对 Si 的吸收。Si 肥与 K 肥或 Si 肥与 K 肥, Ca、Mg 肥配施也能明显地增加水稻植株体内 Si 的含量, 与无肥对照(CK<sub>0</sub>)相比, 水稻吸收 Si 量分别增加了 44.2% 和 53.6%。增施 K 肥对提高水稻植株 Si 含量的作用不明显, 但施 K 肥能促进水稻的生长, 使水稻 Si 吸收量增加了 32.96%。施用 Ca、Mg 肥对水稻吸收 Si 没有明显的影响, 水稻茎叶和子粒的 Si 含量甚至还低于 CK。

表 2 水稻对 Si、K、Ca、Mg 的吸收  
Table 2 Uptake of Si, K, Ca and Mg by rice

处理 Treatment	含量 Content(mg/g)			吸收量 Capacity of uptake (mg/pot)			
	根 Root	茎叶 Shoot	子粒 Grain	根 Root	茎叶 Shoot	子粒 Grain	总量 Total
	Si						
CK	64.71	31.92	12.28	491.80	2087.60	695.00	3274.40
K	64.24	39.01	12.36	700.20	2894.50	758.90	4353.60
Si	91.60	63.93	17.50	943.50	4622.10	1172.50	6738.10
KSi	53.46	31.43	17.39	609.30	3065.80	1045.10	4720.10
CaMg	72.33	29.13	10.19	817.30	2379.90	634.80	3832.00
KSiCaMg	72.10	39.13	20.12	706.90	2911.30	1410.40	5028.60
	K						
CK	0.88	7.15	2.47	6.69	467.61	139.80	614.10
K	1.50	9.10	2.64	16.35	675.22	162.10	853.67
Si	1.34	6.19	2.62	13.80	447.54	175.54	636.86
KSi	1.22	8.19	2.23	11.71	606.06	134.02	751.79
CaMg	0.96	7.31	2.14	10.85	597.23	133.32	741.40
KSiCaMg	1.09	8.67	2.71	10.68	645.05	189.97	845.70
	Ca						
CK	1.47	2.63	0.20	11.17	172.00	11.32	194.49
K	1.25	1.77	0.12	13.63	131.33	7.37	152.33
Si	1.31	2.46	0.22	13.49	177.86	14.74	206.09
KSi	1.87	2.50	0.19	17.95	185.00	11.42	214.37
CaMg	1.35	3.00	0.18	14.89	245.10	11.21	271.20
KSiCaMg	1.70	2.65	0.13	16.66	197.16	9.11	222.93
	Mg						
CK	0.49	1.45	0.62	3.72	94.83	35.09	133.64
K	0.44	1.55	0.58	4.80	115.01	35.61	155.42
Si	0.31	1.46	0.60	3.19	105.56	40.20	148.95
KSi	0.43	1.47	0.56	4.13	108.78	33.66	146.57
CaMg	0.48	1.46	0.51	5.42	119.28	31.77	156.47
KSiCaMg	0.60	1.53	0.80	5.88	113.83	56.08	175.79

从水稻对 Si 的吸收速率(图 1)来看, 在不施 Si 肥(CK<sub>0</sub>、K、Ca、Mg 等 3 个处理)的情况下, 栽秧后 45d 内, 水稻对 Si 的吸收速率逐渐增强, 并出现第一个吸收高峰值; 在 45~60d, 水稻对 Si 的吸收呈现下降, 在 60~76d 是水稻吸收 Si 最多的时期, 也是吸收速率最高的一个时期, 水稻对 Si 的吸收速率达到最大值; 随后, 水稻对 Si 的吸收速率又呈现下降, 到水稻收获前半个月左右, 水稻吸收 Si 速率呈现负值, 即水稻部分茎叶和根系的死亡脱落, 使水稻已吸

收的 Si 以枯枝落叶的形式归还土壤, 其水稻体内的含 Si 量呈负增长。增施 K 肥使水稻在达到吸收 Si 最高峰值后, 其吸收 Si 速率下降的幅度明显低于 CK, 这样水稻在收获可保持相对较多的 Si 素, 有助于水稻的抗倒伏和抗病虫; Ca、Mg 肥处理前期水稻对 Si 的吸收速率相对较低, 但吸收高峰值以后, 其吸收速率下降的幅度也明显小于 CK, 因而使 Ca、Mg 肥处理在水稻收获时保持的 Si 含量也高于 CK。

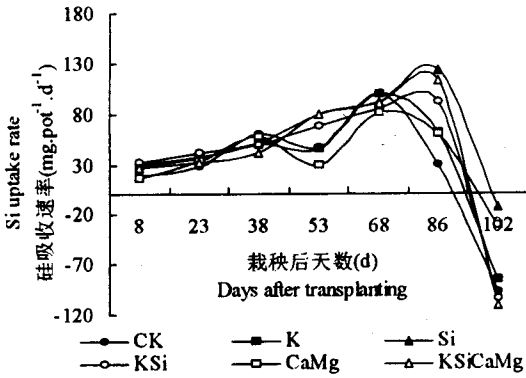


图1 水稻对硅的吸收速率

Fig. 1 Uptake rate of Si by rice

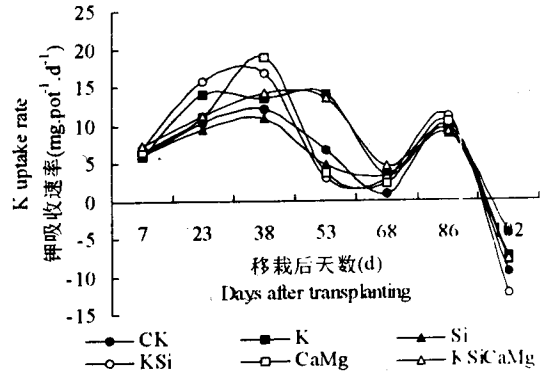


图2 水稻对钾的吸收速率

Fig. 2 Uptake rate of K by rice

与不施 Si 的处理相比,增施 Si 或者 Si 与 K 肥、Ca、Mg 肥配施,水稻对 Si 的吸收速率显著增加。栽秧后,水稻对 Si 的吸收速率逐渐增加,直至 76~96d,水稻对 Si 的吸收速率和吸收量均达到最高值, Si 吸收高值出现的时间延迟半个月左右;同时,施 Si 处理水稻吸收 Si 的速率也比不施 Si 处理高得多。表明施 Si 后能显著地增强水稻生长后期对 Si 的吸收,使水稻成熟期时能保持较高的 Si 含量。

**2.2.2 水稻对 K 的吸收** 在 N、P 肥基础上,增施 K 肥均能促进水稻对 K 素的吸收,提高水稻植株体 K 的含量(表 2),其中 N、P、K 配施对提高水稻对 K 的吸收作用最大,水稻吸收 K 总量比 CK 高 39.0%。据报道,增施 Si 肥有降低水稻茎叶(秸秆)含 K 量的趋势<sup>[12]</sup>。虽然 N、P、K、Si 肥配施和 N、P、K、Si、Ca、Mg 肥配施对提高水稻植株体含 K 量的作用没有单独施用 K 肥的作用大,但能显著地提高水稻对 K 的吸收量。与 CK 相比,施 Ca、Mg 肥能在一定程度上提高水稻对 K 的吸收,这与 Ca、Mg 肥的施用促进了土壤 K 的释放有关<sup>[10]</sup>。

在不施 K (CK、Si、Ca、Mg 等处理)条件下,水稻对 K 的吸收速率呈现 2 个高峰值(图 2)。第一个吸收速率高峰值出现在 30~45d,即分蘖盛期,其中以 Ca、Mg 处理最高,达到  $16.83 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ;第二个吸收速率高峰值是出现 76~96d,即灌浆期;吸收低谷值,出现 60~76 或 45~76d 之间,以 CaMg 处理吸收速率低值持续时间最长,在 45~76d,导致其吸收的 K 相对较低;96~106d 水稻体内的 K 含量呈现负增长。

施 K 对水稻吸收 K 的影响主要是表现在第一个峰值,尤其是 K、KSiCaMg 处理,在 15~60d,水稻对 K 保持较高的吸收速率,表明施用 K 肥在较长时间内有足够的水溶性 K 供移栽后水稻利用。

**2.2.3 水稻对 Ca 的吸收** 分布于我国南方湿润地区的土壤中 Ca 大量淋失,除石灰性土壤外,土壤中 Ca 的含量多在 1% 以下,甚至有时低于 0.1%,这些土壤上往往出现不同程度的缺 Ca 现象,施 Ca 肥表现出明显的增产效果。从表 2 看出,在 N、P 肥基础上,施用 Ca 肥能促进水稻对 Ca 的吸收,尤其能提高水稻茎叶 Ca 的含量。Ca 可使水稻植株体细胞壁强度增大,有助于增强水稻抗病虫害的能力<sup>[15]</sup>。施 Si 肥水稻根系和茎叶 Ca 含量略有降低;K 和 Ca 之间存在不同程度的颞颞作用,施用 K 肥或者 Si、K、Ca、Mg 肥配施有降低水稻植株体内 Ca 含量的作用,减少水稻对 Ca 的吸收<sup>[15]</sup>。

在不施 Ca 肥的情况下,水稻对 Ca 的吸收速率的变化趋势同水稻吸收 K 的趋势相似(图 3),分别在 30~45 和 76~96d 出现 2 个较为明显的高峰值。施用 Ca 肥,栽秧后 15~96d,水稻对 Ca 一直保持着较高的吸收速率。

**2.2.4 水稻对 Mg 的吸收** Mg 在土壤中的性质和化学行为与 Ca 大体相似,受降水的淋溶作用而易于流失,在我国南方的酸性土壤、砂质土壤上往往表现出不同程度的缺 Mg 现象。如表 2 所示,与 CK 比较,单独施用 Si 肥、K 肥或 Ca、Mg 肥后,水稻植株体内 Mg 的含量没有明显的变化。但是,由于其作物生长量增大,对 Mg 的总吸收量也就明显增加。Si、K、Ca、Mg 肥配合施用能提高植株体内 Mg 的含量,其吸收总量增加明显。

水稻对 Mg 的吸收速率,因施肥有较大的差异。CK 和增施 K 肥,水稻对 Mg 的吸收速率在 60~76d 才达到高峰值。而施 KSi 肥和施 KSiCaMg 肥, Mg 吸收速率峰值是出现在 45~60d,持续时间较长(图 4)。

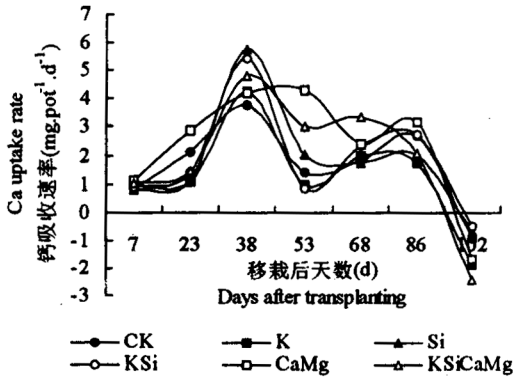


图3 水稻对钙的吸收速率

Fig. 3 Uptake rate of Ca by rice

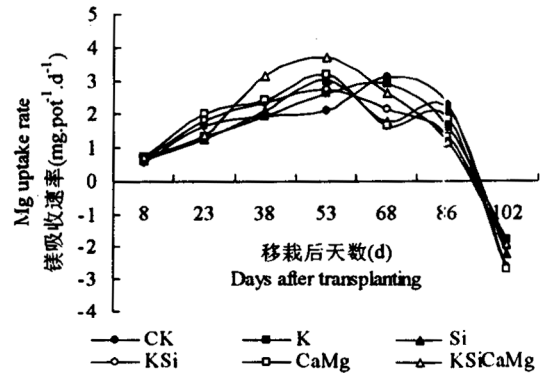


图4 水稻对镁的吸收速率

Fig. 4 Uptake rate of Mg by rice

2.3 水稻对 Si、K、Ca、Mg 的吸收动力学

表3 水稻对 Si、K、Ca、Mg 的吸收动力学数学模型

Table 3 Uptake kinetic equation of the rice on Si, K, Ca and Mg

处理 Treat.	Elovich 方程 Elovich equation			多项式方程 Quantic equation				扩散方程 Diffusion equation		
	qt = a + blnt			qt = at <sup>2</sup> + bt + c				qt = a + bt <sup>1/2</sup>		
	a	b	r	a	b	c	r	a	b	r
Si										
CK	-5900	2106	0.912	-0.4499	98.77	-1520.2	0.941	-2375	634.2	0.923
K	-7094	2507	0.915	-0.1361	70.31	-882.2	0.952	-3024	771.7	0.944
Si	-21077	3737	0.924	-0.0279	83.69	-1051.5	0.967	-4739	1154.8	0.957
KSi	-5945	2172	0.918	-0.1611	65.84	-660.2	0.947	-2392	665.1	0.941
CaMg	-5793	2059	0.956	-0.1540	62.30	-770.4	0.981	-2407	628.1	0.977
KSiCaMg	-8463	2907	0.905	-0.0109	64.31	-905.4	0.955	-3804	902.7	0.942
K										
CK	-755.8	306.1	0.972	-0.0712	14.87	-123.6	0.978	-230.2	90.39	0.964
K	-1134.5	438.1	0.984	-0.0958	20.61	-216.8	0.992	-386.7	129.97	0.978
Si	-754.0	300.6	0.983	-0.0469	11.90	-76.5	0.988	-246.7	89.89	0.986
KSi	-884.9	369.9	0.966	-0.1027	19.89	-158.7	0.974	-239.9	107.97	0.948
CaMg	-913.0	365.9	0.975	-0.0857	17.83	-157.7	0.978	-283.5	107.90	0.963
KSiCaMg	-1108.5	429.8	0.980	-0.0868	19.41	-192.2	0.991	-379.5	128.16	0.979
Ca										
CK	-279.2	100.9	0.976	-0.0109	3.439	-40.39	0.991	-111.2	30.55	0.958
K	-228.6	83.7	0.964	-0.0149	3.557	-45.69	0.979	-87.8	25.14	0.970
Si	-314.7	112.3	0.942	-0.0189	4.628	-66.37	0.985	-126.2	33.75	0.970
KSi	-314.0	112.0	0.968	-0.0115	3.754	-48.06	0.985	-128.2	33.96	0.971
CaMg	-407.1	146.0	0.974	-0.0191	5.379	-70.83	0.991	-163.9	44.15	0.967
KSiCaMg	-358.7	127.4	0.961	-0.0206	5.174	-75.99	0.981	-146.3	38.48	0.965
Mg										
CK	-222.1	79.91	0.952	-0.1610	3.622	-52.79	0.972	-88.8	23.98	0.958
K	-251.6	88.32	0.995	-0.0093	2.998	-43.50	0.970	-106.3	26.94	0.970
Si	-244.8	85.99	0.997	-0.0104	3.077	-45.41	0.976	-102.7	26.15	0.970
KSi	-232.4	84.08	0.966	-0.0163	3.727	-52.21	0.983	-90.8	25.21	0.971
CaMg	-248.3	90.25	0.963	-0.0177	4.024	-55.33	0.980	-96.2	27.04	0.967
KSiCaMg	-290.3	102.85	0.959	-0.0189	4.444	-67.96	0.977	-118.3	30.99	0.965

注: r<sub>0.01</sub> = 0.874, r<sub>0.05</sub> = 0.754, n = 7; qt 为水稻对营养元素的累积吸收量 (mg/pot), t 为栽秧后的天数。

Note: r<sub>0.01</sub> = 0.874, r<sub>0.05</sub> = 0.754, n = 7; qt means total uptake rate of nutrients by rice (mg/pot), t means days after transplanting.

用扩散方程、Elovich 方程和多项式方程来描述移栽后的生长期水稻对 Si、K、Ca、Mg 的吸收过程。结果(表 3)表明,3 个方程的拟合度均达到了极显著性水平( $r=0.912\sim 0.997$ );从相关系数  $r$  均值与变异系数来看,水稻对 4 种养分元素的吸收规律以多项式方程的拟合度最好,该方程对 4 种元素的吸收过程均具有最高的相关系数均值,其相关系数的变异性也较小。实际上,只要不限定多项式方程的项数和方次数,多项式方程总是能逼近所选定的拟合过程。但多项式方程的系数没有具体的意义,难以表达作物吸收养分过程的物理本质。

扩散方程和 Elovich 方程对水稻吸收 Si、K、Ca、Mg 过程的拟合也具有很高的吻合程度,相关系数的变异性也小,而且方程的参数  $b$  值的大小与水稻吸收 Si、K、Ca、Mg 的总量或平均吸收速率之间有很好的依赖关系,其相关系数为  $0.994^{**}$  ( $n=24$ )。可以由这 2 个方程的  $b$  值来评价水稻对 Si、K、Ca、Mg 吸收。因此,用扩散方程和 Elovich 方程来描述水稻对 Si、K、Ca、Mg 吸收过程比多项式方程好,尤以 Elovich 方程为佳。

### 3 结语

我国南方地区土壤酸化进程有明显加速的趋势,土壤酸化是南方地区土壤退化的重要方式。防止土壤酸化,开展酸化土壤的修复研究是区域生态环境恢复和重建的重要内容。本研究表明,在酸性水稻土上增施 Si 肥, K 肥, Ca、Mg 肥以及其配施能明显地提高水稻对该种元素吸收速率和总吸收量,保证水稻正常生长发育,具有显著的增产效益。因此,改善土壤的植物营养状况,应作为酸性土壤修复的重要措施。在酸性土壤地区,应大量加强 Si 肥, K 肥, Ca、Mg 肥及多元素复合性肥料的生产应用,如施用钙镁磷肥能促进早稻提早分蘖,增强稻株抗病性能,增加产量,提高经济效益,并能缓解土壤酸化。磷矿粉直接施用于酸性土壤上,除了增加土壤有效磷含量从而提高作物产量外,还能提高土壤 pH 值,增加交换性钙含量,降低交换性铝含量,增加土壤负电荷,是一种低投入的土壤改良剂。利用硫酸

盐矿(如明矾石、杂卤石)和硅酸盐矿(如钾长石、霞石、绿豆岩)等不溶性钾盐矿或岩石与石灰石高温煅烧,生产含 K、Si、Ca、Mg 等元素的多元复合肥也具有明显降低土壤酸度,提高水稻产量的作用。酸性土壤应尽力减少甚至不再使用如过磷酸钙、氯化钾、硫酸铵等生理酸性肥料。这样,才能有效地减土壤的酸化进程,或者促进酸性土壤的修复。

### 参考文献:

- [1] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料[M]. 上海:上海科学技术出版社,1994. 265-284,316-362.
- [2] 农业部科学技术司. 中国南方农业中的钾[M]. 北京:农业出版社,1991.
- [3] 梁水超,沈其荣,张爱国,等. 钙、硅对酸雨胁迫下小麦生长和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报,1999,10(5): 589-592.
- [4] 杨振明,周文佐,鲍士旦,等. 我国主要土壤供钾能力的综合评价[J]. 土壤学报,1999,36(3),377-386.
- [5] Kato N, Owa N. Dissolution of slag fertilizers in a paddy soil and Si uptake by rice plant [J]. Soil Sci. and Plant Nutr.,1997,43(2): 329-341.
- [6] 马同生. 我国水稻土中硅素丰缺原因[J]. 土壤通报,1997,28(4): 169-171.
- [7] 魏朝富,高明,谢德体,等. 紫色水稻土硅有效性研究[J]. 植物营养与肥科学报,1997,3(3): 229-236.
- [8] 孟赐福,傅庆林,水建国,等. 浙江中部红壤施用石灰对红壤交换性钙、镁及土壤酸度的影响[J]. 植物营养与肥科学报,1999,5(2): 129-136.
- [9] 狄伯 DW, 汤姆森 WR. 钾与其它养分的交互作用[A]. 芒森 R D. 农业中的钾[C]. 北京:科学出版社,1995. 414-430.
- [10] 王敬国. 植物营养的土壤化学[M]. 北京:北京农业大学出版社,1995. 131-141.
- [11] Ohno T, Grunes L. Potassium-magnesium interactions affecting nutrient uptake by wheat forage [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 45:685-690.
- [12] 魏朝富,等. 氮钾硅配施对水稻产量和养分吸收的影响[J]. 土壤通报,1997,28(3):121-123.
- [13] 谢建昌. 中国土壤钾素研究的回顾[A]. 中国科学院南京土壤研究所. 李庆逵与我国土壤科学的发展[C]. 南京:江苏科学技术出版社,1992. 110-116.
- [14] 刘国怀. 化肥生产及应用[M]. 济南:山东科学技术出版社,1980. 166-244.
- [15] 鲁如坤,等. 土壤-植物营养学(原理和施肥)[M]. 北京:化学工业出版社,1998. 281-296.