

我国南方水稻土供硅能力的研究*

臧惠林 张效朴

(中国科学院南京土壤研究所)

何电源

(中国科学院长沙农业现代化研究所)

硅肥对水稻的增产作用,在日本早就有了肯定的结果^[1]。近年来试验证明,在我国南方部分土壤上,水稻施用硅肥有增产效果^[2]。为了明确水稻施用硅肥肥效和土壤类型之间的关系,提出我国南方水稻施用硅肥有效的土壤和植株指标,本文对我国长江以南主要类型水稻土供硅水平的研究进行了总结。

一、土壤硅素供应水平对水稻生长和吸收硅素的影响

于1980年进行盆栽试验,供试土壤的性质见表1。每盆栽土1.25公斤,分以下两个处理:(1)对照,每盆加尿素1克,氯化钾0.7克,过磷酸钙3克(含 P_2O_5 18.5%);(2)高炉渣硅肥(氮、磷、钾用量同对照),每盆加高炉渣6克(含2%柠檬酸提取的 SiO_2 28.5%);水稻品种是广陆矮4号,育秧后在三叶期栽插,生育过程用蒸馏水灌溉。

水稻成熟时称取茎叶和籽粒干重,三次重复。从表2可看出在有效硅^D(SiO_2)含量是5毫克/100克土的水稻土(母质是花岗片麻岩)和8毫克/100克土的水稻土(母质是轻质第四纪红色粘土)上,施用硅肥对水稻生长有明显促进作用(照片1),对籽粒部分的增加较茎叶更为明显。根据我们1978和1979年的盆栽试验结果,施用炉渣促进水稻生长主要是炉渣中硅的效果^[2]。至于其它四种土壤,水稻地上部分干物重处理间没有显著差异。这说明盆栽条件下土壤有效硅低至8毫克时,水稻生长就受硅素供应不足的影响。这种影响主要表现在水稻灌浆阶段基部叶片和功能叶早衰死亡,水稻光合作用受到影响,导致千粒重降低(表2),颖壳上有褐斑(照片2)。施用炉渣后籽粒灌浆明显改善,千粒重增加。

用重量法测定收获时水稻茎叶和籽粒中的 SiO_2 含量(占干物重的%),所得结果列于表3。从表3可看出,茎叶和籽粒中的 SiO_2 含量有随着土壤有效硅含量增加而增加的趋势,施用炉渣对六种土壤上水稻地上部吸硅总量均有增加,在缺硅土壤上增加更为明显。

* 本工作得到湛江地区、苏州地区、芜湖地区、景德镇市和衢县农科所罗亦梅、潘遵谱、王齐年、万立渊、陈冠昂以及金华蒋堂农场郑根宝、刘家站垦殖场余金顺等同志的协助。

1) 本文的有效硅均为pH 4的HAc-NaAc缓冲液提取,单位是 SiO_2 毫克/100克土。

田间条件下我国南方水稻成熟期茎叶的 SiO_2 含量有低至 3.2% 和高达 21.6% 的。根据 60 个样品统计的结果, 水稻茎叶的 $\text{SiO}_2\%$ (占干物重) 和土壤有效硅的含量相关关系如图 1 所示。我国南方不同类型的土壤性质虽然差别很大, 但从图 1 来看水稻茎叶的硅素含量主要受土壤有效硅含量影响, 和盆栽结果是一致的。

表 1 供试土壤性质 (盆栽试验)

Table 1 Some properties of the soils (pot culture)

土壤名称和采样地点 Soil and locality	成土母质 Parent material	有效硅含量 (SiO_2 , mg/100g soil) Available SiO_2	pH	有机质 (%) O. M.	质地 Texture
黄沙土(广东化州) Paddy soil (Huazhou, Guangdong)	花岗岩麻岩 Gneiss	5.0	4.6	1.19	砂壤土 Sandy loam
淤浆土(浙江金华) Paddy soil (Jinhua, Zhejiang)	轻质第四纪红色粘土 ¹⁾ Light quaternary red clay	8.0	5.2	2.87	粘壤土 Clay loam
赤土田(广东徐闻) Paddy soil (Xuwen, Guangdong)	玄武岩 Basalt	16.5	4.7	2.51	粘 土 Clay soil
大泥土(浙江金华) Paddy soil (Jinhua, Zhejiang)	粘质第四纪红色粘土 ²⁾ Clay quaternary red clay	20.5	5.8	3.02	粘壤土 Clay loam
乌山土(江苏无锡) Paddy soil (Wuxi, Jiangsu)	湖积物 Lacustrine deposits	36.0	6.0	2.40	粘壤土 Clay loam
紫色土(浙江金华) Paddy soil (Jinhua, Zhejiang)	紫色页岩 Purplish shale	44.0	6.3	1.33	粘壤土 Clay loam

注: 1) 含 0.05—0.01 mm 粒级为 36%; 2) 含 0.05—0.01mm 粒级为 25%。

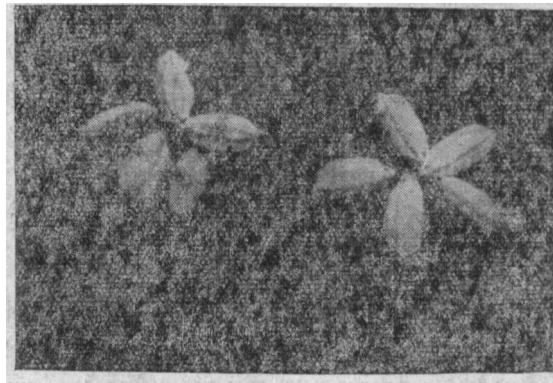
Note: 1) Content of 0.05—0.01mm particle is 36%; 2) Content of 0.05—0.01mm particle is 25%.



照片 1 硅肥炉渣对水稻生长的影响

Photo. 1 The effect of slag on rice plant growth

- (1) 片麻岩母质发育的水稻土
(1) The paddy soil derived from gneiss
(2) 轻质第四纪红色粘土发育的水稻土
(2) The paddy soil derived from light quaternary red clay



照片 2 硅肥炉渣对水稻籽粒的影响

Photo. 2 The effect of slag on rice grain

- 左: 对照
Left: CK
右: 施炉渣
Right: Applied slag

表 2 土壤有效硅对水稻干物重的影响 (克/盆)

Table 2 The effect of soil available SiO_2 on the dry weight of rice (g/pot)

土壤名称和母质 Soil and parent materials	有效硅含量 (SiO_2 mg/ 100g soil) Available SiO_2	茎 叶 Straw		籽 粒 Grain		总 重 Total weight			千粒重 (g) Weight of 1000 grains	
		对 照 CK	施 硅 Si	对 照 CK	施 硅 Si	对 照 CK	施 硅 Si	和对照比 As compared with CK	对 照 CK	施 硅 Si
黄 沙 土 (花岗岩麻岩) Paddy soil (Gneiss)	5.0	7.60	15.43	3.91	14.74	11.51	30.17	18.66**	14.9	21.7
麸 浆 土 (轻质第四纪红色粘土) Paddy soil (Light quaternary red clay)	8.0	15.02	19.05	14.69	20.42	29.71	39.47	9.76**	17.3	21.0
赤 土 田 (玄武岩) Paddy soil (Basalt)	16.5	15.95	14.97	10.48	10.20	26.43	25.17	-1.26	22.0	23.0
大 泥 土 (粘质第四纪红色粘土) Paddy soil (Clay quaternary red clay)	20.5	17.50	17.97	23.39	22.25	40.89	40.22	-0.67	22.5	22.6
乌 山 土 (湖积物) Paddy soil (Lacustrine deposits)	36.0	20.92	19.90	25.42	26.91	46.34	46.81	0.47	22.8	23.3
紫 色 土 (紫色页岩) Paddy soil (Purple shale)	44.0	18.42	16.98	21.88	22.49	40.30	39.47	-0.83	23.1	23.0

** $p \leq 0.01$

表 3 土壤有效硅对水稻吸收硅素的影响
Table 3 The effect of available SiO₂ in soil on the uptake of SiO₂ by rice

土壤名称和母质 Soil and parent material	SiO ₂ % (占干物重) (On dry weight)				地上部吸收 SiO ₂ 的数量(克/盆) Total amount of SiO ₂ in straw(g/pot)							
	茎 叶 Straw		籽 粒 Grain		茎 叶 Straw		籽 粒 Grain		总 量 Total amount		比对照增加 As compared with CK	
	对照 CK	施硅 Si	对照 CK	施硅 Si	对照 CK	施硅 Si	对照 CK	施硅 Si	对照 CK	施硅 Si		
黄 沙 土 (花岗岩麻岩) Paddy soil (Gneiss)	1.79	3.13	0.48	0.99	0.136	0.483	0.019	0.146	0.155	0.629	0.474**	
紫 浆 土 (轻质第四纪红色粘土) Paddy soil (Light quaternary red clay)	2.25	4.55	0.37	0.77	0.338	0.867	0.054	0.157	0.392	1.024	0.632**	
赤 土 田 (玄武岩) Paddy soil (Basalt)	2.44	2.96	0.63	1.10	0.389	0.443	0.066	0.112	0.455	0.555	0.100**	
大 泥 土 (粘质第四纪红色粘土) Paddy soil (Clay quaternary red clay)	3.23	4.28	1.13	1.58	0.565	0.769	0.264	0.352	0.829	1.121	0.292**	
乌 山 土 (湖积物) Paddy soil (Lacustrine deposits)	6.58	6.42	1.17	1.83	1.377	1.278	0.297	0.492	1.674	1.770	0.096	
紫 色 土 (紫色页岩) Paddy soil (Purplish shale)	5.72	7.29	1.13	1.76	1.053	1.238	0.247	0.396	1.300	1.634	0.334**	

** p ≤ 0.01

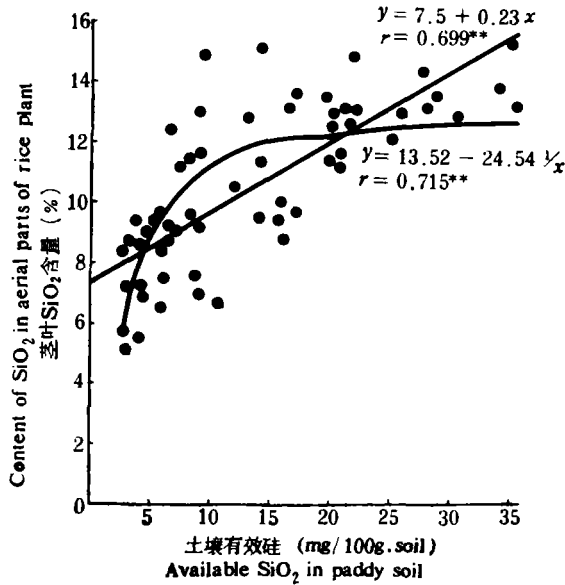


图 1 水稻植株茎叶含硅量与土壤有效硅的关系

Fig. 1 The relationship between available SiO_2 in paddy soil and content of SiO_2 in aerial parts of rice plant

二、硅肥肥效和土壤硅素供应水平及植株硅素含量的关系

自 1977 至 1980 年在浙江、广东、江苏、安徽和江西五省的一些水稻土上进行田间试验,按统一的试验方案布置。处理分:(1)对照,每亩 8—12 斤氮(硫酸铵或尿素),40—60 斤过磷酸钙,20 斤硫酸钾(或 15 斤氯化钾);(2)硅肥(氮、磷、钾同对照),每亩高炉渣(含 2% 柠檬酸提取的 SiO_2 是 28.5%)或粉煤灰硅钙肥(含 2% 柠檬酸提取的 SiO_2 16%)300 斤作基肥。小区面积 0.03—0.1 亩,重复 3—4 次。

在水稻收获时测定结果,施用硅肥使土壤有效硅增加 16.5 毫克/100 克土(25 个试验平均),水稻茎叶的 SiO_2 含量增加 2.3% (23 个试验平均)。硅肥的增产效果则主要由土壤有效硅水平和植株含硅量而定。

(一) 土壤有效硅含量对水稻施用硅肥效果的影响

在我国南方一些有效硅含量低的土壤上,水稻施用硅肥通常有 10% 左右的增产效果。但是当土壤有效硅含量高时,硅肥的增产效果就不明显,在土壤有效硅 1.5—23.4 毫克范围内,44 个田间试验结果的统计如图 2 所示。按图 2 中的关系式推断,当土壤有效硅低于 9.5 毫克时,水稻施用硅肥有可能获得 5% 以上的增产。根据国外研究的结果^[3],日本施用硅肥有效的指标为土壤有效硅低于 10.5 毫克,朝鲜是 10 毫克,我们得出的 9.5 毫克这一临界值和他们的结果相近。

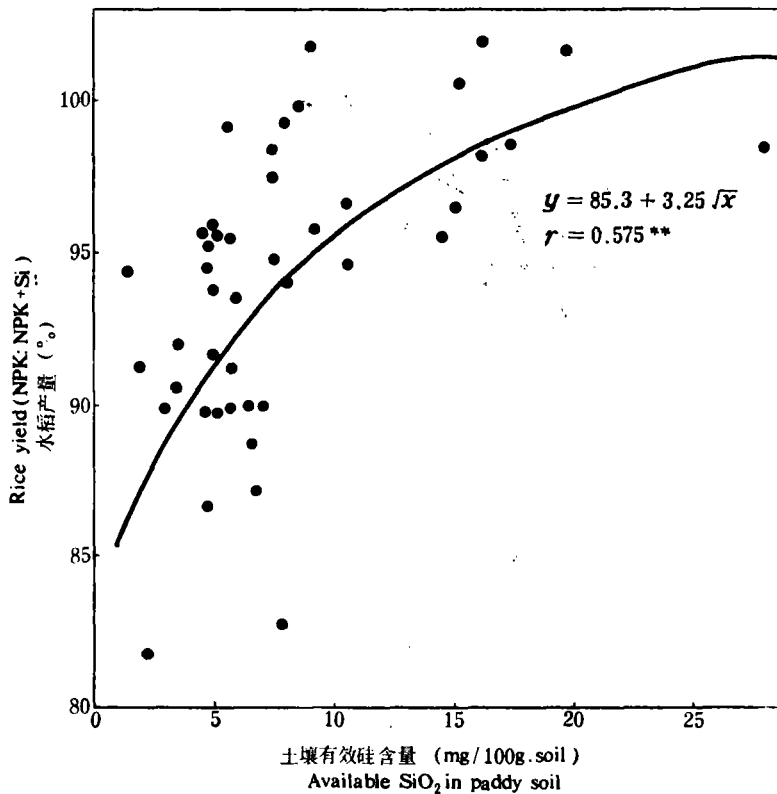


图2 硅肥肥效和土壤有效硅含量的关系

Fig. 2 The response of rice yield to Si-fertilizer in relation to available SiO_2 in paddy soil

(二) 水稻植株硅素含量作为硅肥效果的指标

由于水稻茎叶中的硅素含量和土壤有效硅水平有很好的相关，水稻植株中的 SiO_2 含量同样可作为判断水稻施用硅肥效果的指标。图3是水稻成熟期对照处理茎叶 SiO_2 含量在3.2—14.5%范围内，28个硅肥效果和成熟期茎叶 SiO_2 含量的相关统计结果。从图3可看出，水稻成熟期茎叶中 SiO_2 含量10%以下可以作为硅肥施用的指标，日本和朝鲜提出11%，我国台湾省的临界值是9%（早稻）。

应该指出以水稻植株硅素含量作为判断硅肥效果指标时比土壤有效硅更为可靠，上述同样的28个水稻施用硅肥的试验，统计水稻施用硅肥的增产% (y) 和土壤有效硅 (x) 的相关，其相关系数 $r = -0.477^{**}$ 。这是由于水稻吸收硅素除受土壤有效硅影响外，还受到其它条件的影响，除氮肥水平外^[2]，土壤的氧化还原状况也很重要。如贵州平坝的鸭屎泥和广东遂溪的黑泥田均为还原性较强的次生潜育化类型水稻土，四个土壤样品有效硅虽然都在10毫克/100克土以上，但水稻茎叶含的 SiO_2 均低于7%。因此水稻植株体内的硅素含量是土壤条件对水稻吸收硅素影响综合作用的结果，它比土壤有效硅更能反应水稻对硅素的要求。

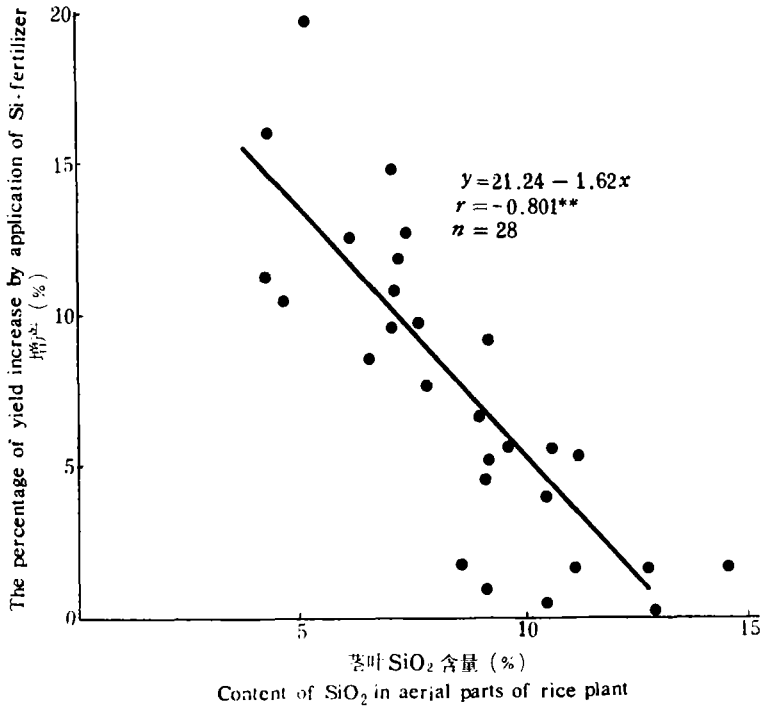


图3 水稻施用硅肥增产效果和水稻茎叶 SiO₂ 含量的关系

Fig. 3 Rice yield increase by application of Si-fertilizer in relation to content of SiO₂ in aerial parts of rice plant

三、我国南方水稻土供硅能力的划分

以上盆栽和田间试验的结果表明，土壤有效硅的含量和水稻茎叶中的含硅量都可以作为水稻施用硅肥的依据。分析了我国长江以南一些起源于不同母质的水稻土耕层有效硅 229 个样品和 105 个标本大田水稻成熟期茎叶的 SiO₂%，结合不同土壤上布置的 48 个水稻施用硅肥的田间试验结果，把我国南方水稻土的供硅能力划分成低、中和高三个类型（表 4）。

第一类是供硅能力低的土壤，其有效硅一般在每百克土 8 毫克以下，水稻茎叶含 SiO₂ 8.5%。我国南方广泛分布的红砂岩、花岗岩、花岗片麻岩和浅海沉积物母质发育的水稻土，以及位于红壤丘陵二级阶地的轻质第四纪红色粘土母质发育的水稻土，均为供硅能力低的类型。这类土壤上布置的 24 个水稻施用硅肥的田间试验，平均增产率是 9.6%，每亩增产稻谷 55 斤。特别是红砂岩母质发育的水稻土，以往总认为在肥料正常施用的情况下，这类土壤上的水稻早衰低产是由于漏水漏肥的结果，我们的试验表明其早衰原因可能是由于水稻硅素供应不足。因为除了土壤有效硅低外，灌溉水中的溶性 SiO₂ 仅为 1.8—3 ppm，是南方水稻土地区最低的含量。在这类土壤上的 6 个水稻施用硅肥的试验，平均增产 14.6%，因此施用硅肥可以作为成土母质是红砂岩地区的水稻增产措施。

第二类是中等供硅能力的水稻土，土壤有效硅 12 毫克左右，植株的 SiO₂ 平均含量

表 4 我国南方水稻土供硅能力的划分
Table 4 Grouping of Si-supplying capacity of paddy soils in south China

供硅能力 Si-supplying capacity	土壤类型 Type of paddy soils	分布地点 Locality	pH	土壤有效硅 (mg/100g soil) Available SiO ₂	稻草含 SiO ₂ (%) in rice straw	硅肥效果 Efficiency of Si-fertilizer	
						试验数 No. of test	平均增产(%) Average increme- nt of rice yield
低 Low	红砂岩发育的砂壤土 Sandy loamy soil derived from red sand stone	浙、赣、湘 Zhejiang, Jiangxi, Hunan	5.2—6.2	6.1±2.1 [25]	7.61±1.75 [13]	6	14.6
	花岗岩、片麻岩发育的粉砂壤土 Silty loamy soil derived from granite and gneiss	闽、赣、粤 Fujian, Jiangxi, Guangdong	5.0—6.0	5.4±2.9 [51]	8.75±0.50 [9]	9	7.3
	轻质第四纪红色粘土发育的粘壤土 Clay loamy soil derived from light quaternary red clay	浙江 Zhejiang	5.2—5.6	5.3±0.9 [13]	7.85±0.60 [12]	4	8.1
中 Medium	浅海沉积物发育的砂壤土 Sandy loamy soil derived from marine deposits	广东 Guangdong	5.2—6.0	6.3±4.0 [12]	7.7±2.35 [10]	5	8.8
	粘质第四纪红色粘土发育的粘壤土 Clay loamy soil derived from clay quaternary red clay	浙、赣、湘 Zhejiang, Jiangxi, Hunan	5.2—6.5	12.5±3.9 [30]	11.23±2.84 [12]	14	3.8
高 High	玄武岩发育的粘质土 Clay soil derived from basalt	广东 Guangdong	4.5—5.5	30.1±8.8 [22]	13.52±2.73 [19]	10	0.7
	江湖沉积物发育的粘壤土 Clay loamy soil derived from lacustrine deposits	江苏 Jiangsu	6.3—7.5	20.5±8.7 [48]	13.50±0.43 [8]		
	江河下游三角洲沉积的粘壤土 Clay loamy soil derived from sand mud of the delta	广东、福建 Guangdong, Fujian	5.5—6.5	25.6±3.3 [12]	14.3±1.53 [12]		
	紫色页岩发育的粘壤土 Clay loamy soil derived from purple shale	浙江、湖南 Zhejiang, Hunan	6.5—7.5	24.6±12.5 [16]	12.25±1.34 [10]		

注: 表中 [] 中数字为样品数。

Note: Figure in the [] indicates number of sample.

11%。位于红壤丘陵谷地地下缘由第四纪红色粘土母质发育的粘质水稻土和新开垦的黄泥土、长江以南黄土母质发育的丘陵白土均属于中等供硅能力类型。1977—1980 年在这些土壤上进行的 14 个硅肥试验，有 4 个达到 $p \leq 0.05$ 显著平准的增产效果。这类土壤上当氮肥水平提高时，硅肥可能表现增产作用。

第三类是供硅能力高的水稻土，其有效硅的含量一般高于 20 毫克，茎叶含 SiO_2 平均高于 12%。如玄武岩母质发育的赤土田，长江冲积和太湖淤积物发育的淤泥田，苏南黄土性母质发育的黄泥土，南方大江大河下游三角洲的潮沙泥田和紫色页岩母质发育的紫泥田。这些土壤分布地区的灌溉水中的溶性硅含量也较高，如玄武岩母质成土地区一般 SiO_2 含量高于 10ppm，苏南河网平原是 8ppm 左右。在这类土壤上布置的 10 个水稻施用硅肥的田间试验，水稻产量处理间均无明显差异，因此施用硅肥通常在这类土壤上没有效果。

以上材料表明土壤的供硅能力主要决定于成土母质类型。从土壤性质来说土质愈砂和土壤 pH 值愈低，有效硅的含量就愈少。据估算我国长江以南这种既酸又砂的水稻土有 2 千多万亩，是典型的缺硅土壤，施用硅肥对水稻会有良好的增产效果。

四、小 结

本工作通过盆栽和田间试验，研究了土壤有效硅水平和水稻植株硅素含量与水稻施用硅肥肥效的关系。提出我国南方水稻土水稻施用硅肥的指标是每百克土有效硅在 9.5 毫克以下，水稻茎叶 SiO_2 含量低于 10%，而以水稻茎叶的含硅量作指标更合适。

根据上述指标，对我国南方一些水稻土的土壤和水稻植株进行分析，按照水稻对硅肥肥效的反应，把我国南方水稻土的供硅能力划分成低、中和高三个类型。属于供硅能力低的水稻土的土壤有效硅在每百克土 8 毫克以下，水稻茎叶的 SiO_2 含量一般 8.5%，施用硅肥通常有良好的增产效果。属于中等供硅能力水稻土的有效硅是 12 毫克左右，茎叶含 SiO_2 平均 11%，高氮水平时这类土壤施用硅肥对水稻可能有增产效果。供硅能力高的水稻土的有效硅一般高于 20 毫克，植株含 SiO_2 平均大于 12%，通常这类土壤上施用硅肥没有效果。

参 考 文 献

- [1] 今泉吉郎,吉田昌一,1958: 水田土壤の硅酸供给力関する研究,农业技术研究所报告 13 第 18 号,6,261—304。
- [2] 何电源、臧惠林、张效朴,1980: 炉渣作为硅肥在红壤性水稻土上的效应。土壤学报,第 17 卷 4 期,355—364 页。
- [3] International Rice Research Institute, 1978: "Soil And Rice", p156, p537—538, Los Banos, Philippines.

ON THE SILICON SUPPLYING CAPACITY OF PADDY SOILS IN SOUTH CHINA

Zang Hui-lin and Zhang Xiao-pu

(Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing)

He Dian-yuan.

(Institute of Agricultural Modernization, Academia Sinica, Changsha)

Summary

This article deals with silicon supplying capacity of paddy soils in south China.

1. The content of SiO_2 in the surface soil extracted by HAc-NaAc (pH 4) for the soils with 5% increase of rice yield due to application of Si-fertilizer was generally less than 9.5 mg per 100 g soil.

For the soils with more than 5% increase in rice yield due to application of Si-fertilizer, the critical percentage of SiO_2 in straw was usually less than 10% (at ripe stage).

2. The Si-supplying capacity of paddy soils in south China is divided into 3 types:

The first type is the soils with low level of Si-supplying capacity, the average available SiO_2 in soil of this type is less than 8 mg, and the SiO_2 in rice straw is about 8.5%. Application of Si-fertilizer to rice plants on the soils of this type may give more than 5% increase of yield. This type includes paddy soils derived from granite, red sand stone and the quaternary red clay occurring on the second terrace of the rolling hills.

The second type is the soils with medium level of Si-supplying capacity, the available SiO_2 amounts to 12 mg, while the SiO_2 in plant straw is about 11%. The paddy soils derived from the quaternary red clay occurring on lower slope and valleys of hilly land belong to this type. When they are heavily dressed with nitrogen fertilizer, Si-fertilizer might give yield increase.

The third type is paddy soils with high level of Si-supplying capacity. This type includes the paddy soils developed on lateritic soils of basalt origin, and those derived from lacustrine deposits and alluvial deposits of the delta regions, generally rice plant gives no response in yield to Si-fertilizer on soils of this type.