

# 湖南省土壤中硅的形态 与土壤性质的关系

向万胜\* 何电源 廖先苓

(中国科学院长沙农业现代化所)

## 摘 要

湖南省几种主要土壤中各种形态硅的含量顺序为无定形硅>活性硅>有效硅>水溶性硅。土壤pH、粘粒含量和CEC是影响土壤有效硅及活性硅的正效应因素,而有机质含量为负效应因素。盆栽试验结果表明,大部分土壤施硅后水稻籽粒产量显著提高,其增产率与土壤有效硅及活性硅均呈明显负相关,表明土壤活性硅也可作为衡量土壤供硅能力的指标。

大量的研究结果已表明,施用硅肥可以提高水稻产量,其增产效果主要与土壤有效硅的丰缺有关。但土壤有效硅的含量直接受到土壤理化性质的影响,臧惠林等(1987)研究了土壤有效硅与土壤性质的关系,认为土壤pH值对有效硅的影响最为显著,其次为粘粒含量。

土壤中的硅除结晶态硅外,还有无定形硅、活性硅及水溶性硅3种形态。Hashimoto和Jackson(1960)提出的0.5mol/L NaOH碱热溶法,目前已被普遍作为分离无定形硅的方法,所溶出的硅包括无定形的铝硅酸盐和氧化硅。Tweneboah(1967)等把溶于pH1.5的0.5mol/L CaCl<sub>2</sub>中的氧化硅称为活性硅。Weaver(1975)研究发现pH1.5的0.5mol/L CaCl<sub>2</sub>浸提的粘粒中的活性硅与之水铝石在pH4.6--6.0范围内对硅酸的吸附量(0.2—1.2mgSiO<sub>2</sub>/g)非常接近,因此而推测土壤活性硅很可能主要是被吸附在粘粒Al—O表面上的那部分硅酸。土壤水溶性硅主要是单分子态硅酸(H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>),它是可为植物所直接吸收利用的形态,并与土壤固相其它形态的硅保持着动态平衡。

土壤有效硅是可供当季作物吸收利用的硅,包括土壤中的单硅酸及各种易于转化为单硅酸的盐类。1mol/L NaOAc—HAc是目前用来测定有效硅较为普遍的提取剂,其测定值与水稻茎叶含硅量及施硅增产率均呈显著的正相关。然而,土壤中不同形态硅对作物的有效性及其与有效硅之间的相互关系的研究目前尚少报道。本文从农业化学的角度出发,探索湖南省几种主要土壤中各种形态的硅与土壤性质的关系及其对水稻的有效性,以便为硅肥的有效施用提供依据。

## 一、材料和方法

### (一)土壤样本的采集

\* 本文为作者硕士论文的一部分。土壤有机质、CEC及粘粒含量分析由本所周卫军同志完成,谨致谢意。

采集了湖南省几种主要母质(母岩)发育的农田耕层土样共36个,供研究土壤性质与各种形态硅的关系。并采集了8种母质发育的水稻耕层土壤,经风干、碾碎,供盆栽用。凡用作化学分析的土样均分别过20和100目筛保存备用。

## (二)水稻盆栽试验

1989年连续进行了早、晚两季水稻盆栽试验。供试土壤主要理化性质及各种形态硅的含量见表1。设施硅与不施硅两个处理,每盆装土3kg,每处理4次重复,随机排列。每季每盆施N 0.45g, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.3g, K<sub>2</sub>O 0.45g。施硅处理每盆施无定形硅酸3g(无定形硅酸由Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>入盐酸制备),与土壤混匀后装盆。早稻品种为威优46,5月8日移栽,每盆3穴,每穴1株,7月28日收获。早稻收获后继续种植一季晚稻,施硅的处理继续施无定形硅酸3g/盆。晚稻品种为威优64,8月3日移栽,每盆2穴,每穴1株,10月20日收获。收获后测定稻谷产量,并采集土壤及植株样。

## (三)测定方法

1. 土壤水溶性硅 为了便于得到澄清的滤液,采用0.02mol/L CaCl<sub>2</sub>代替蒸馏水作为浸提剂,土液比为1:5在25℃下振荡12小时,用FeSO<sub>4</sub>还原一硅铜蓝比色法测定滤液中的硅。  
2. 土壤活性硅 采用Tweneboah法提取,NaHSO<sub>3</sub>还原硅铜蓝法测硅。  
3. 土壤无定形硅 0.5mol/L NaOH煮沸2.5分钟,土液比1:10,FeSO<sub>4</sub>还原硅铜蓝法测硅。  
4. 土壤有效硅 pH 4.0 1mol/L HOAc—NaAc法。土壤基本性质的分析与植株P、Si含量的测定均参见《土壤理化分析》与《土壤农业化学常规分析方法》两书。

表1 供试土壤基本性质及各种形态硅含量

土壤号	土壤名称	母质(母岩)	pH (H <sub>2</sub> O)	全N (g/100g)	O.M. (g/100g)	CEC (cm/100g)	粘粒 <0.001mm. (g/100g)	无定形硅 (g/100g)	活性硅 (mg/100g土)	有效硅 (mg/100g土)	水溶性硅 (mg/100g土)
1	酸性紫泥田	紫色砂岩	5.13	0.152	2.08	18.1	29.6	0.78	35.1	4.3	1.1
2	河沙泥	湘江冲积物	4.98	0.154	1.88	14.6	20.6	0.80	28.0	2.6	1.4
3	扁砂泥	板页岩	5.73	0.191	2.69	18.9	24.2	0.73	39.0	7.1	1.1
4	红砂泥	红砂岩	4.99	0.135	1.85	10.8	15.2	0.24	23.3	2.6	0.8
5	潮沙泥	沅江冲积物	5.62	0.193	2.89	13.0	19.6	0.46	39.0	5.3	1.2
9	灰黄泥	石灰岩	6.15	0.127	2.51	18.1	34.5	1.40	50.0	14.7	1.2
7	麻砂泥	花岗岩	4.99	0.140	2.18	9.61	18.5	1.25	30.2	3.0	1.0
8	青夹黄泥田	第四纪红土	5.98	0.149	3.59	14.2	26.4	0.88	39.8	7.3	1.0

## 二、结果与讨论

### (一)土壤中各种形态硅的含量

供试土壤中各种形态硅的含量见表2。结果表明,各种形态硅的含量顺序为无定形硅>活性硅>有效硅>水溶性硅。

土壤中有效硅的平均含量约为4—39mg/100g土,在碱性土壤中含量较高,在酸性土壤中则较低,尤其以花岗岩和红砂岩母质发育的土壤为最低。前人的研究已表明,土壤有效硅含量与水稻茎叶含硅量及硅肥的增产效果呈显著相关,目前已被广泛作为衡量土壤供硅能力及硅肥有效施用的指标。

土壤中活性硅的平均含量约为24—201mg/100g土。在不同土壤中含量的分布规律基本上与有效硅相似。相关分析表明,土壤活性硅与有效硅呈极显著正相关(水田, r<sub>1</sub> = 0.088\*\*

表 2 不同母质发育的土壤中各种形态硅的含量 ( $\bar{x} \pm \delta$ )及土壤基本性质

母质 (母岩)	耕作方式	样本数	无定形硅 (g/100g土)	活性硅 (mg/100g土)	有效硅 (mg/100g土)	水溶性硅 (mg/100g土)	pH	O-M. (g/100g)	CEC (cmol/100g)	粘粒 < 0.001mm (g/100g)
石灰岩	水田	1	0.79	201	23.0	1.10	7.53	3.12	22.9	20.7
	旱地	1	0.61	116	38.7	1.85	7.71	1.98	17.2	21.0
花岗岩	水田	4	1.25±0.37	25.1±6.9	4.80±0.75	1.60±0.48	4.99-5.75	2.18-3.62	9.61-13.8	18.5-25.6
	旱地	4	1.12±0.24	28.9±6.7	4.20±0.57	1.68±0.44	4.48-4.96	0.86-1.62	7.53-11.5	13.0-21.8
第四纪红土	水田	4	1.44±0.39	34.9±4.0	6.40±1.39	1.56±0.36	4.86-5.98	1.75-3.59	10.7-14.2	26.4-29.3
	旱地	4	1.86±0.10	44.6±11.1	11.9±4.30	4.09±1.14	4.88-5.64	0.92-1.67	11.9-18.9	21.4-35.5
洞庭湖 (长江) 沉积物	水田	1	0.29	86.2	18.1	1.82	8.22	3.37	20.0	21.6
	旱地	1	0.22	90.9	28.2	4.17	8.38	1.55	19.5	23.3
河流冲积物	水田	2	0.61±0.22	33.5±5.5	4.10±1.20	1.29±0.80	4.98-5.62	1.88-2.39	13.0-14.6	19.5-30.5
	旱地	2	0.91±0.39	49.7±17.7	12.9±0.60	4.25±0.53	4.93-6.39	1.53-1.98	13.0-16.6	24.0-30.0
紫色砂页岩	水田	2	0.82±0.46	67.0±31.9	15.8±11.5	1.75±0.61	5.13-7.75	2.08-3.80	18.1-23.1	17.1-20.6
	旱地	2	0.69±0.19	72.9±43.3	21.7±14.5	3.30±1.90	5.07-7.56	0.89-1.49	18.9-23.3	15.8-28.4
板页岩	水田	2	0.86±0.01	30.9±8.2	5.60±1.50	1.10±0.40	4.83-5.37	2.69-2.98	8.36-8.93	20.9-24.2
	旱地	2	0.92±0.01	41.0±6.0	10.7±2.60	3.26±1.14	5.46-5.96	1.60-2.77	11.4-12.4	25.7-28.0
红砂岩	水田	2	0.73±0.37	24.1±0.80	3.80±1.20	1.03±0.19	4.99-5.23	1.95-2.78	14.8-15.9	15.2-17.1
	旱地	2	0.79±0.03	34.8±8.3	6.95±2.85	2.04±0.85	4.64-5.86	1.34-1.68	11.4-14.8	14.4-27.8
总平均	水田	18	1.02	50.0	8.12	1.48				
	旱地	18	1.15	55.4	13.4	3.15				

\*注: 为不同母质土壤的加权平均值。

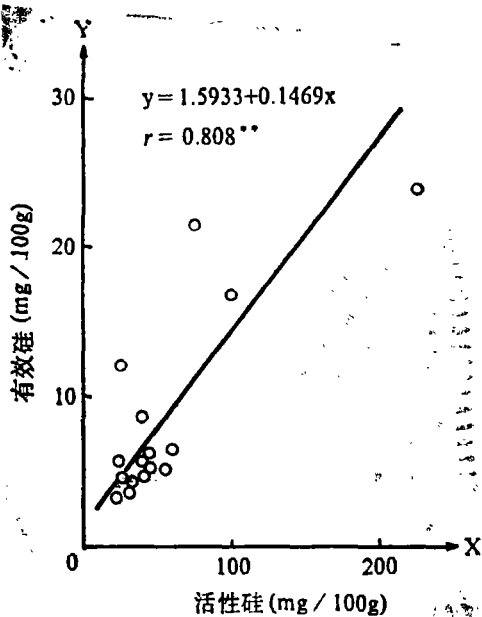


图 1 水田土壤中有效硅与活性硅的关系

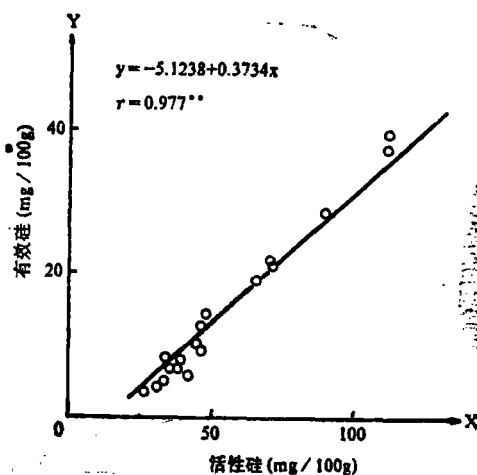


图 2 旱地土壤中有效硅与活性硅的关系

旱地土壤:  $r_2 = 0.977^{**}$ ,  $n_1 = n_2 = 18$ , 见图 1 和 2)。因此土壤活性硅也可作为衡量土壤供硅能力的指标之一。

土壤无定形硅的平均含量约为0.2—1.9g/100g土，在酸性土壤中含量较高，其中又以花岗岩和第四纪红土发育的土壤为最高；而碱性土壤则含量较低，一般为0.2—0.8g/100g土。尽管无定形硅在土壤中的含量较高，但由于在一般土壤条件下溶解度很小，硅的释放十分缓慢而且与有效硅的相关也不明显，因此不能用它作为衡量土壤供硅能力的指标。

土壤水溶性硅含量很低，平均含量约1—4mg/100g土，尽管它可供作物直接吸收利用，但因其含量低，且对各种环境因子的影响十分敏感，它与土壤有效硅也无明显相关，故不宜作为衡量土壤供硅能力的指标。

研究结果还表明，土壤供硅能力与风化成土过程关系十分密切。处于碳酸盐风化阶段的土壤，如石灰岩、石灰性紫色砂页岩和洞庭湖北岸长江冲积物发育的土壤，其风化度和脱硅作用较弱，粘土矿物以水云母为主，土壤活性硅和有效硅均较高，供硅能力较强。而处于强烈脱硅富铝化阶段的土壤，如花岗岩、红砂岩、第四纪红土、板页岩母质发育的土壤，均已经历较强的脱硅淋溶作用，粘土矿物以高岭石为主，土壤有效硅和活性硅均较低。前人的研究表明，华中地区不同风化壳的土壤，其硅的随水迁移系数为花岗岩(0.57) > 第四纪红土(0.27) > 板页岩(0.22) > 石灰岩(0.04) > 石灰性紫色砂岩(0.03)。可见，花岗岩风化壳脱硅作用最强，因而土壤供硅能力最弱；石灰岩和石灰性紫色岩脱硅作用最弱，因而土壤供硅能力较强。

耕作方式明显影响土壤有效硅、活性硅及水溶性硅含量。采样地点和成土母质相同的土壤，旱地中水溶性硅含量均高于水田，多数旱地的有效硅及活性硅含量也高于水田，这一方面是由于水田土壤硅受到强烈淋溶的影响，另一方面也与水稻吸收大量的硅酸有关。以上结果说明，水稻土更易于缺硅。

## (二) 各种形态硅与土壤基本性质的关系

对酸性土壤(pH < 6.5)有效硅( $y_1$ )与土壤 pH( $x_1$ )、O.M.( $x_2$ )、CEC( $x_3$ )和粘粒含量( $x_4$ )进行多元回归分析，得到的复相关式为：

$$y_1 = -24.90 + 5.569x_1 - 2.829x_2 + 0.229x_3 + 0.228x_4$$

$$(R = 0.892, F = 24.22^{**}, n = 30)$$

经F检验，土壤有效硅与上述基本性质的相关达极显著水平。对各项偏回归系数进行校正后的标准偏回归系数分别为  $B_1' = 0.608$ ,  $B_2' = -0.462$ ,  $B_3' = 0.159$ ,  $B_4' = 0.331$ 。可见对有效硅产生正效应影响的大小顺序为 pH > 粘粒含量 > CEC，其中 pH 的影响达极显著水平 ( $F_1 = 29.23^{**}$ )，粘粒含量的影响达显著水平 ( $F_4 = 7.21^*$ )。有机质的负效应也达极显著水平 ( $F = 21.22^{**}$ )。

土壤 pH、粘粒含量对土壤有效硅的影响均与土壤粘粒对硅酸的吸附作用有关。土壤矿物风化所释放的单硅酸可吸附在各种氧化物及铝硅酸盐矿物表面裸露的—OH 基团上，这种吸附作用随着 pH 升高而增加，在 pH 7—9 时达到最大，因而 pH 较高的土壤吸附硅酸的能力较强，矿物风化作用释放出来的单硅酸不易淋失，土壤吸附态硅酸含量也较高，所以有效硅含量也较高。土壤有效硅与活性硅呈极显著正相关已证明了这一点。土壤对硅酸的吸附主要发生在粘粒的表面上，粘粒含量高的土壤对硅酸的吸附量也较大。研究表明，花岗岩、红砂岩及酸性紫色砂岩发育的土壤由于质地较粗，粘粒含量低，土壤有效硅含量也很低；而第四纪红土、板页岩及河流冲积物发育的土壤，由于粘粒含量变化大，有效硅含量变化范围也较大这与前人的研究结果是一致的。

土壤 CEC 对有效硅的影响主要决定于粘粒和有机质两方面的综合作用，由于有机质对有

效硅的影响为负效应，因而 CEC 对有效硅的正效应影响小于粘粒含量的影响。关于有机质对土壤有效硅的负作用，其原因可能与粘粒上有机-无机复合体的形成有关。由于有机-无机复合体的形成掩盖了部分专性吸附点，使粘粒对硅酸的吸附能力降低；或是由于这种复合物的包被作用，使得吸附态硅难以释放。

土壤基本性质对活性硅含量的影响与它们对有效硅的影响基本相似。对酸性土壤 ( $pH < 6.5$ ) 活性硅含量 ( $y_2$ ) 与土壤  $pH(x_1)$ 、 $O.M.(x_2)$ 、 $CEC(x_3)$  和粘粒含量 ( $x_4$ ) 进行多元回归分析，得到多元回归方程为： $y_2 = -52.63 + 16.52x_1 - 5.011x_2 + 0.451x_3 + 0.247x_4$  ( $R = 0.838$ ,  $F = 14.77^{**}$ ,  $n = 30$ )。校正后的标准偏回归系数分别为  $B_1' = 0.736$ ,  $B_2' = -0.334$ ,  $B_3' = 0.127$ ,  $B_4' = 0.138$ 。对活性硅影响的正效应顺序也是  $pH >$  粘粒含量。  $>$  CEC。其中  $pH$  的影响达极显著水平 ( $F_1 = 29.57^{**}$ )，有机质的负效应也达显著水平 ( $F_2 = 7.65^{**}$ )。

土壤无定形硅含量与土壤  $pH$  呈极显著负相关 ( $r = -0.610^{**}$ ,  $n = 36$ )。碱性土壤中由于无定形硅在长期风化作用中易于损失，因而含量均很低。酸性土壤中无定形硅与粘粒含量呈显著正相关，( $r = 0.378^*$ ,  $n = 30$ )，也与 CEC 成显著正相关 ( $r = 0.384^*$ ,  $n = 30$ )，但与有机质的相关性不明显。

供试酸性土壤水溶性硅与土壤  $pH$  无显著相关，这与前人的研究结果是一致的。但它与粘粒含量 ( $r = 0.481^{**}$ ,  $n = 30$ ) 及 CEC ( $r = 0.517^{**}$ ,  $n = 30$ ) 均呈极显著正相关。水溶性硅与有机质的相关则因耕作方式不同而异，在旱地土壤中它与有机质无明显相关；但在水田土壤中则呈极显著相关 ( $r = 0.599^{**}$ ,  $n = 15$ )。

### (三) 硅对水稻生长发育及产量的影响

盆栽试验结果表明，水稻施硅到中后期显示出茎秆粗壮、叶片刚健，齐穗期提早3—4天。收获时，除个别土壤外，一般都有不同程度的增产，其中含有效硅较低的如酸紫泥、河沙泥、

表 3 施硅对水稻茎叶和稻谷产量的影响  
(1989年盆栽试验)

季别	土壤	茎叶重(g/盆)			谷粒重(g/盆)		
		CK	+ Si	增产%	CK	+ Si	增产%
早	1	30.4	32.7	7.6	47.0	56.4	20.0*
	2	27.4	34.0	24.1*	44.9	50.4	12.2*
	3	30.1	34.2	13.6*	49.9	55.9	12.0*
	4	28.7	32.6	13.6*	50.3	56.5	12.3*
	5	31.5	33.3	5.7	53.4	56.6	6.0
	6	29.5	34.5	16.9*	54.6	55.1	0.9
	7	27.0	28.1	4.1	45.0	48.8	8.4*
	8	31.9	32.0	0.3	49.9	49.2	-1.4
晚	1	21.6	22.4	3.7	31.2	37.7	20.8*
	2	22.5	24.7	9.8	33.5	43.3	29.3*
	3	20.0	23.2	16.0*	30.8	35.8	16.2*
	4	19.7	21.4	8.6	30.0	36.6	22.0**
	5	21.7	24.5	12.9*	31.7	38.4	21.1*
	6	23.9	23.2	-2.9	31.9	33.5	5.0
	7	21.7	21.9	0.9	32.3	37.1	14.9*
	8	21.5	24.0	11.6	38.5	36.1	11.1

注：\* 达5%显著水平，\*\*达1%显著水平。

扁砂泥、红砂泥和麻砂泥5种土壤，早稻施硅后稻谷增产均达5%显著水平，增产幅度为8.4—20%。晚稻连续施硅，除上述5种土壤的增产幅度提高到14.9—29.3%外，沅江冲积物发育的潮沙泥的增产幅度也从早稻的6%提高到晚稻时的21.1%(表3)。施硅后稻谷增产率(%)与土壤有效硅成明显负相关(早稻  $r_1 = -0.682$ ；晚稻  $r_2 = -0.768^*$ )，也与土壤活性硅成明显的负相关(早稻  $r_1 = -0.590$ ，早稻  $r_2 = -0.796^*$ )，到晚稻时施硅增产率与土壤有效硅及活性硅的相关性均达到5%的显著水平。可见土壤中含有效硅和活性硅的含量水平可作为衡量土壤供硅能力及可以预测硅肥效应的重要指标。

本试验表明，施硅之所以能使稻谷增产，主要是提高了籽粒千粒重，其次与增加有效穗数和每穗实粘数及提高结实率也有一定关系。这些水稻经济性状的改善，与施硅改善

了植物的硅、磷营养有关。施硅后水稻茎叶含硅量和吸硅量均有明显提高。如将茎叶和颖壳的吸硅量相加作为水稻地上部分的总吸硅量(糙米含硅极低,可忽略不计),其提高幅度为17.4—55.2%。施硅后茎叶中的含磷量大部分有明显降低,而籽粒(糙米)中的含磷量和吸磷

表 4 施硅对水稻吸磷的影响  
(1989年早稻盆栽)

土壤	茎叶含P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 量 (g/kg)		籽粒(糙米)含P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 量 (g/kg)		籽粒(糙米)吸磷量 (g/盆)		地上部分总吸磷量 (g/盆)	
	CK	+Si	CK	+Si	CK	+Si	CK	+Si
	1	1.12	0.93	3.95	4.07	0.142	0.166**	0.176
2	1.42	1.33	4.26	4.65	0.152	0.183*	0.193	0.225
3	1.28	1.20	3.23	4.47	0.126	0.196**	0.164	0.239*
4	0.71	0.65	4.26	3.79	0.166	0.154	0.186	0.175
5	1.26	1.05	4.20	4.42	0.179	0.190	0.220	0.226
6	1.17	0.98	3.65	4.21	0.147	0.174	0.181	0.207
7	1.78	1.67	4.40	5.30	0.149	0.186*	0.201	0.230
8	0.94	1.01	3.31	4.23	0.130	0.156**	0.160	0.199**

注: \* 为达5%显著水平, \*\* 达1%显著水平。

量则大部分有明显增加(表4),这可能与施硅后促进了磷从茎叶向籽实的转运有关,这与前人的研究结果是一致的。正是由于水稻施硅改善了植株的硅、磷营养,使水稻生长健壮,光合作用加强,因而提高了稻谷产量。(参考文献略)

(上接第136页)

表 6 钾肥用量对烤烟产量及产值的影响

土壤类型	处 理	产 量(千克/亩)	中上等烟比例(%)	产 值(元/亩)
红壤	高钾区	135.7	69.5	310.8
	中钾区	114.8	75.2	268.7
	无钾区	79.3	71.3	203.8
黄棕壤	高钾区	158.4	77.5	335.8
	中钾区	139.1	63.7	261.5
	无钾区	37.3	4.8	12.3
水稻土	高钾区	109.1	91.4	345.9
	中钾区	98.7	72.8	253.6
	无钾区	46.1	21.9	41.5
潮土	高钾区	116.2	81.1	314.8
	中钾区	122.2	77.1	320.0
	无钾区	58.2	64.0	117.5

上,施用钾肥对烟叶是至关重要的,否则将严重影响产量和产值。

总之,不同施钾水平的烟叶含钾量,红壤、黄棕壤和水稻土都是 $K_2 > K_1 > K_0$ ;相同施钾水平,轻质土壤(潮土和水稻土)的烟叶含钾量高,钾肥效应好;较粘重的土壤(红壤和黄棕壤)钾肥肥效差,烟叶含钾量也低;施钾肥后,烟叶含钾量增加的幅度与土壤速效钾含量呈反相关;无钾处理区,种植前土壤的速效钾含量与烟叶含钾量有极显著的正相关;相同叶位,烟叶含钾量与钙镁含量呈显著的负相关;4种土壤上烟叶产量及产值都是 $K_2 > K_1 > K_0$ 。