

# 福建耕地土壤硫库、形态及吸附特性研究

彭嘉桂, 章明清, 林琼, 李娟, 陈子聪

(福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013)

**摘要:** 通过采集372个福建耕地土壤样品进行室内分析化验的结果, 全省耕层土壤平均有效硫含量为(27.6±23.5) mg·kg<sup>-1</sup>, 其中<16 mg·kg<sup>-1</sup>临界值的缺乏级样品占37.1%, 连同16~30 mg·kg<sup>-1</sup>潜在缺乏级样品共占68.20%, 说明福建是贫硫土壤省份, 且闽东南地区耕地土壤缺硫比闽西北地区更为严重。明确了耕地主要土种有效硫含量和分布状况, 以及它们之间的差异。通过10个土种土壤样品对硫吸附能力的试验表明, 不同土壤对硫的吸附能力不同, 并分别建立一元线性模型( $y=a+bx$ ), 其拟合精度都达到极显著水平, 从而计算出10个土种对硫的吸附固定率为35.5%~61.7%, 平均46.6%; 为确定土壤适宜施硫量, 对37个土样进行硫组分研究, 明确了不同利用类型土壤有机硫和无机硫组分含量和比例状况。

**关键词:** 土壤; 硫库; 形态; 吸附特性; 福建

中图分类号: S 158.3

文献标识码: A

## Study on soil sulphur pool, form and absorption character in arable land of Fujian

PENG Jia-gui, ZHANG Ming-qing, LIN Qiong, LI Juan, CHEN Zi-cong

(Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China)

**Abstract:** The results showed that average available sulphur was 27.6±23.5 mg·kg<sup>-1</sup> in 372 cultivated soil samples of Fujian arable land. 37.1% of the total samples was S deficient, 68.2% of total soil samples were S deficient or potential deficient, which suggested that sulphur was not enough in Fujian arable land. Sulphur in southeast territory was less than that in northwest territory. The content and distribution of available sulphur were different in main soil types of Fujian cultivated land. The analysis of soil absorbability of 10 soil sample showed that different soil had different absorbability to sulphur from 35.5% to 61.7% with the average of 46.6%, and a liner model ( $y=a+bx$ ) was significant, fitting the absorption characters. And the ratio of sulphur absorbed and fixed by different soil could provide index for sulphur fertilizer application. The studies on sulphur components of 37 soil sample revealed the different ratio of soil organic and inorganic sulphur content in different utilized soils.

**Key words:** Arable land soil; Sulphur pool; Forms; Absorption; Fujian

硫是继氮、磷、钾之后居第4位的植物生长必需的营养元素<sup>[1]</sup>, 它在植物生长发育及代谢过程中参与重要的生理功能。但近年来世界范围内土壤缺硫现象十分普遍, 福建地处亚热带地区, 气候炎热, 雨量充沛, 硫在土壤中淋失较为严重。目前, 农业生产又只注重氮、磷、钾肥料的配合, 忽视中微量元素的补充, 导致土壤养分平衡失调。所以, 了解土壤硫库及其供应状况, 对于合理指导施用硫肥是十分重要的。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤硫肥力调查

按水田、旱地(农地、蔬菜园、茶果园)不同

耕地利用类型采集耕作层土壤样品, 采用 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 浸提、 $\text{BaSO}_4$ 比浊法测定土壤有效硫, 然后按不同地区、耕地利用类型和土种类型进行分类统计。

### 1.2 土壤硫组分研究

根据水田、旱地两大耕地利用类型的不同母质、成土过程和利用状况, 按红壤性水稻土、冲积性水稻土、潜育性水稻土、农地、蔬菜园土、茶果园土等类型, 共采集耕作层(表土层)土壤样品37个(皆属酸性土壤)。酸性土壤硫组分为: 全硫; 有机硫, 包括酯硫( $\text{C}-\text{O}-\text{S}$ )、碳硫( $\text{C}-\text{S}$ )和惰性硫; 无机硫, 主要包括溶液硫和交换性硫。直接测定项

目及方法：全硫（酸氧化法）、还原硫（HI、甲酸、次磷酸混酸氧化法），C-S（碱性条件下Raner-Ni还原，用Johnson Nishita装置测定），无机硫[500 mg·L<sup>-1</sup> Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>浸提法，不加H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，用离子色谱法分析]。间接计算：有机硫（全硫—无机硫），C-O-S（HI还原硫—无机硫）、惰性硫（有机硫—C-O-S—C-S）<sup>[2~4]</sup>。

### 1.3 土壤硫吸附固定试验

把不同浓度梯度SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S（0、10、20、40、80、160 mg·L<sup>-1</sup>）溶液，分别加入5 ml的10个不同供试土样中，轻摇使之混匀，放置于无尘、无风恒温室内，风干后，以相同浸提方法测定各梯度提取硫含量，即采用美国国际农化服务公司A. H. Hunter博士提出的AS1土壤有效硫分析方法，2次重复，再以加入量（x轴）和培养后硫的提取量（y轴）建立一元线性模型（y=a+bx），并求出各供试土壤SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的吸附固定率。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同区域耕地土壤有效硫含量

土壤有效硫丰缺指标，目前尚无统一标准。根据刘崇群关于南方稻田有效硫3级丰缺指标划分方

法<sup>[5]</sup>，进行修改： $<16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为缺乏级， $16 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为潜在性缺乏级， $30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为丰富级， $>50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为极丰富级。表1显示，全省耕地土壤372个耕层样品有效硫含量平均为 $(27.6 \pm 23.5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其中低于 $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的缺乏级样品数占总样品数的37.10%，连同 $16 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 潜在性缺乏级样品数共占总数的68.20%，说明福建土壤多数贫硫。表1还显示，闽西北地区194个土壤样品有效硫含量平均为 $(28.9 \pm 22.4) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，比闽东南地区仅高出2.7个百分点，而闽东南地区178个土壤样品有效硫含量 $<16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样品数占该地区的总样品的比率高达45%，比闽西北同级别比率高出15个百分点。说明闽东南地区耕地土壤有效硫总体要比闽西北地区低。这主要是由于闽东南地区（莆田、泉州、厦门、漳州等市）和闽西北地区（龙岩、三明、南平、福州、宁德等地市），不仅是南亚热带和中亚热带两个不同气候类型区，光温资源、雨量分布、水土流失等情况存在明显差异，同时耕地土壤的母质（母岩）、种植制度、施肥水平也有较大差别，从而影响到土壤有效硫含量和分布<sup>[6,7]</sup>。

表1 不同区域有效硫含量及其分级状况

Table 1 Available sulphur content and its gradation in different areas

地区	样品数 (个)	$\bar{x} \pm s$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CV (%)	各丰缺指标的频率(%)			
				$<16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$16 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$>50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
闽东南	178	26.15±24.6	94.05	44.94	24.16	15.73	15.17
闽西北	194	28.90±22.4	77.51	29.90	37.63	19.07	13.40
全省	372	27.61±23.5	85.14	37.10	31.18	17.47	14.25

### 2.2 不同耕地利用类型土壤有效硫含量

按不同利用类型来看，全省372个耕层土壤样品的有效硫含量差异较大。其中，212个水田样品平均有效硫含量 $(27.7 \pm 75.3) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ， $<16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 样品数占水田总样品数的31.1%， $16 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 占37.3%，二者合计68.4%；160个旱地样品平均有效硫含量 $(27.5 \pm 22.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ， $<16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 样品占旱地总样品数的45.0%， $16 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 样品占23.1%。水田、旱地两大不同耕地利用类型的土壤有效硫平均含量差异不大，但旱地 $<16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ （缺乏级）样品数占总样品数比水田的高出14个百分点（表2）。说明旱地有效硫总体

比水田匮乏。在旱地中，3种不同利用类型土壤平均有效硫含量：茶果园>蔬菜园>农地；89个农地表层土壤有效硫平均仅 $(17.6 \pm 18.9) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，接近 $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的临界指标，远低于茶果园和蔬菜园土壤。

### 2.3 不同耕地主要土种有效硫含量

无论水田、旱地，主要土种耕层土壤有效硫含量不尽相同。这主要是因为不同土壤除母质、耕作制度、生态环境条件不同外，在耕作熟化过程中，因受人类活动影响也有很大差别。7个水田主要土种土壤有效硫含量：壤田>冷烂田>灰泥田>黄泥田>灰黄泥田>灰黄沙泥田>灰沙泥田，以海积物发

育的埭田为最高, 平均达  $(48.1 \pm 23.7) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 而以河流冲积物发育的灰沙泥田为最低, 平均仅  $(17.8 \pm 17.4) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。6个旱地主要土种, 平均有效硫含量顺序: 灰赤土>红泥土>灰沙泥土>赤沙土>灰赤沙土>风沙土, 以灰赤土为最高, 达  $(52.2 \pm 29.9) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这个土种主要种植茶叶和果树等经济作物, 肥料投入量大, 经济效益高。11个风沙土样品平均有效硫含量  $(12.0 \pm 11.7) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 远低于土壤有效硫的临界指标(表3)。

表2 不同耕地利用类型土壤有效硫含量及分级状况  
Table 2 Available sulphur content and its classification in different kinds of arable land

土壤类型	样品数 (个)	$\bar{x}_{\text{土s}}$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CV (%)	各丰缺指标的频率(%)			
				$<16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$16 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$>50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
蔬菜园(旱地)	26	$24.57 \pm 21.65$	88.11	46.15	26.92	19.23	7.69
茶果园(旱地)	45	$48.81 \pm 30.54$	62.57	8.89	24.44	26.67	40.00
农地(旱地)	89	$17.61 \pm 18.86$	107.09	55.22	28.09	10.11	5.62
水田	212	$27.69 \pm 75.28$	75.28	31.10	37.26	18.40	13.21
全省合计	372	$27.61 \pm 23.50$	85.14	37.10	31.18	17.47	14.25

表3 主要土种土壤有效硫含量状况  
Table 3 Available sulphur content in main species of soil

代号	土种	样品数 (个)	$\bar{x}_{\text{土s}}$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CV (%)	代号	土种	样品数 (个)	$\bar{x}_{\text{土s}}$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CV (%)
1	赤沙土	43	$20.42 \pm 21.81$	107.24	8	黄泥田	28	$27.99 \pm 16.55$	59.12
2	灰赤沙土	32	$18.62 \pm 18.79$	100.93	9	灰黄泥田	35	$24.79 \pm 16.04$	64.72
3	灰赤土	28	$52.15 \pm 29.94$	57.41	10	灰黄泥沙田	23	$24.09 \pm 18.41$	76.41
4	风沙土	11	$11.97 \pm 11.73$	98.01	11	灰泥田	38	$31.60 \pm 23.22$	73.48
5	红泥土	21	$30.21 \pm 27.12$	89.78	12	灰沙泥田	43	$17.78 \pm 17.42$	97.99
6	灰沙泥土	23	$27.87 \pm 23.96$	85.99	13	埭田	11	$48.10 \pm 23.74$	78.47
7	冷烂田	36	$32.52 \pm 19.10$	58.73					

## 2.5 不同耕地利用类型土壤硫组分比较

表4显示, 不同耕地利用类型土壤无机硫占全硫的5.4%~13.4%, 平均9.3%; 酸性土壤无机硫主要为水溶态硫和交换态硫, 是植物硫营养的直接供给源, 其平均含量顺序为: 茶果园土>菜园土>冲积性水稻土>潜育性水稻土>菜园土>农地土>红壤性水稻土。C-O-C形态硫是以C-O-C键结合的硫酸酯, 较易转化为无机硫供植物利用, 是土壤中主要的有效硫库; 不同耕地利用类型平均86.4~173.7  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 占全硫的42.1%~51.5%, 平均含量顺序为: 潜育性水稻土>菜园土>茶果园土>冲积性水稻土>红壤性水稻土>农地土。C-S形态硫是指不被HS还原, 但能为Rancy-ti还原的一类有机硫化合物, 主要是含硫氨基酸(胱氨酸、半胱氨酸、蛋

氨酸), 要经过较长时间分解转化为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 才能被植物利用, 是土壤中长期硫储库; 不同类型耕地平均C-S形态硫含量为24.4~83.6  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 占全硫的10.5%~33.7%, 其平均含量顺序为: 冲积性水稻土>红壤性水稻土>潜育性水稻土>菜园土>农地土>茶果园土。不同耕地利用类型土壤惰性硫平均为28.4~117.9  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 占全硫的11.1%~32.2%。一般认为惰性硫对植物无效, 但最近有学者却认为它对作物具有生物有效性, 这还需进一步的研究<sup>[2,3,8]</sup>。表4所示的HI-S还原硫, 除包括无机硫外, 主要是C-O-C形态硫, 是土壤硫储库, 较易转化为无机硫, 在研究制定丰缺指标时具有重要的参考价值。

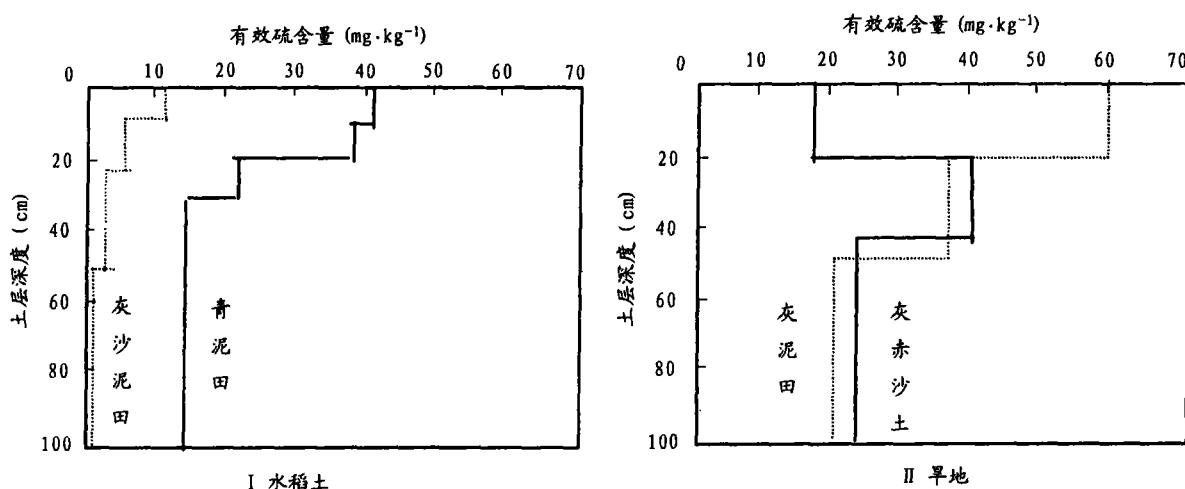
图1 不同土种  $\text{SO}_4^{2-}$  在土壤剖面垂直分布状况Fig. 1  $\text{SO}_4^{2-}$  in the altitudinal zonation of different species of soil

表4 不同耕地利用类型土壤硫组分状况

Table 4 Sulphur component of different cultivated land

土壤类型	样品数 (个)	全硫 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	还原态硫 <sup>①</sup> ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机态硫组分( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			无机态硫 <sup>②</sup> ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
				酯硫(C-O-S)	碳硫(C-S)	惰性硫	
红壤性水稻土	7	256.9	146.2	132.2	81.7	28.4	242.3
冲积性水稻土	6	300.7	162.5	134.6	83.6	54.6	272.8
潜育性水稻土	4	381.8	198.8	173.7	65.2	117.9	356.8
农地土	6	205.3	110.7	86.4	33.6	61.0	181.0
菜园土	7	340.5	194.8	163.1	57.6	88.1	308.8
茶果园土	7	266.7	173.9	138.2	24.4	68.4	231.0

注: ①指用  $\text{HI}$  还原的硫; ②指用  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  浸提的硫。

## 2.6 不同土种土壤对 $\text{SO}_4^{2-}$ 的吸附固定

2.6.1 不同土种土壤对  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸附特性 肥料施入土壤, 部分养分会被土壤吸附固定, 从而降低有效性和利用率,  $\text{SO}_4^{2-}$  亦然。因此, 评价土壤养分状况, 不仅要考虑养分含量水平, 还要注意到土壤对养分的吸附能力。根据10个不同供试土壤样品室内培养、测定结果, 建立供试土种的硫线性吸附模型(表5), 并求出吸附模型拟合的精度。结果相关系数高, 各供试土壤都达到极显著水平, 水田平均  $0.990 \pm 0.004$ , 旱地平均  $0.990 \pm 0.002$ 。

2.6.2 不同土种土壤对  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸附固定率 从表5可看出, 不同土壤的线性吸附模型( $y=a+bx$ )中的 $b$ 值是不同的。 $b$ 即为  $\text{SO}_4^{2-}$  的可提取率, 在10个不同土壤样品中, 最高的 $b$ 值是02号灰沙田, 达65.1%; 最低的 $b$ 值是03号黄泥田, 只有38.3%。

从图2还可以看出, 无论水田、旱地, 凡含粘粒多, 质地粘重(黄泥田、灰泥田、赤土)的, 其  $\text{SO}_4^{2-}$  提取量比沙性强的土种低, 而吸附固定率 [ $(1-b) \times 100\%$ ] 则高(图2)。这可能是由于热带亚热带地区土壤酸性较强, 带正电荷铁、铝胶体含量相对较高, 吸附固定能力较大的缘故。当然, 土壤吸附固定还受其他因素干扰, 这需进一步探讨。

## 3 小结与讨论

3.1 福建耕地土壤硫缺乏级( $<16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )与潜在缺乏级( $16 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )样品共占样品总数的68.2%, 水稻土、农地、蔬菜园的黄泥田、灰黄泥田、灰黄泥沙田、灰沙田、赤沙土、灰赤沙土、风沙土等土种普遍缺硫, 闽东南地区较闽西北地区严重。

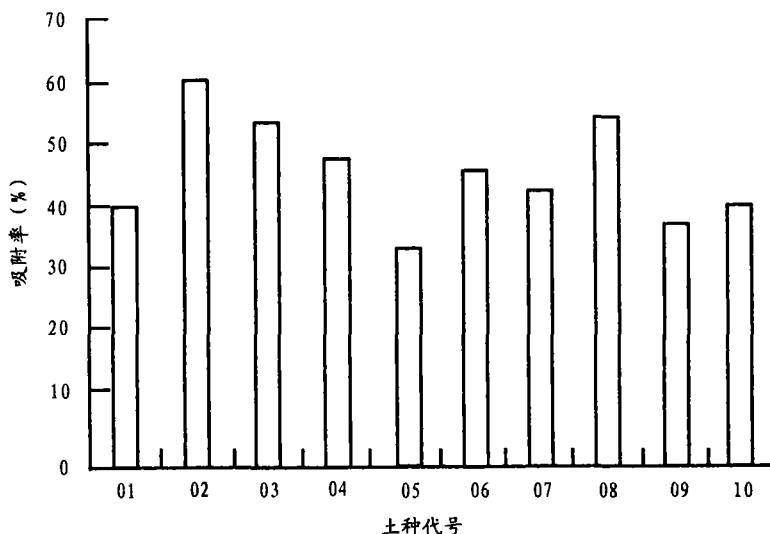
图2 不同土种土壤对  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸附固定能力

Fig. 2 Absorbability and fixing ability by different soil species

表5 不同土种土壤硫的线性吸附模型

Table 5 Fitting precision of liner model of sulphur in different soil species

耕地利用类型	编号	土种名称	$y = a + bx$	相关系数
水田	01	灰黄泥沙田	$y = 19.61 + 0.598x$	0.999**
	02	黄泥田	$y = 38.32 + 0.383x$	0.980**
	03	灰泥田	$y = 18.24 + 0.44x$	0.994**
	04	灰沙泥田	$y = 38.92 + 0.503x$	0.979**
	05	灰沙田	$y = 13.97 + 0.651x$	0.996**
旱地	06	灰赤沙土	$y = 22.53 + 0.518x$	0.985**
	07	赤沙土	$y = 12.40 + 0.539x$	0.988**
	08	赤土	$y = 12.03 + 0.462x$	0.996**
	09	风沙土	$y = 16.98 + 0.645x$	0.993**
	10	碱壤土	$y = 22.29 + 0.606x$	0.986**

3.2 不同耕地利用类型的37个土壤样品的测定结果表明,全硫平均在205.3~281.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,无机硫占全硫的9.3%,各类型土壤硫组分不尽相同。C-O-C(有效硫库)占全硫的42.1%~51.5%,C-S(长期硫储库)占全硫的10.5%~33.7%,惰性硫占全硫的11.1%~32.2%。惰性硫是否具有生物有效性,还有待进一步深入研究。

3.3 福建是一个土壤贫硫的省份,在合理施用氮、

磷、钾肥料时,应注意因土因作物科学补充硫肥,调节土壤养分平衡,促进作物产量提高和品质改善。

#### 参考文献:

- [1] Singh M V. A review of the sulphur research activities of the ICAR-AICRP micro-and secondary nutrients project [J]. Sulphur in Agriculture, 1995, 19: 35~46.
- [2] 张记棣, 胡正义, 马友华, 等. 安徽省土壤硫状况及作物硫效应研究 [A]. 国际硫研究所, 中科院南京土壤研究所, PRIS 硫磺公司, 澳大利亚国际农业研究中心. 中国农业硫肥研究进展和需求展望 [C]. 1997, 143~152.
- [3] 胡正义, 张记棣, 武佩龙, 等. 黄潮土硫库及供硫能力研究 [J]. 土壤通报, 1996 (6): 270~272.
- [4] Page A L. Methods of Soil Analysis Part 2 (2nd Edition) [J]. USA ISBN, 1982, 518~522.
- [5] 刘崇群. 我国南方土壤中硫和硫肥施用 [J]. 土壤学报, 1981 (2): 185~193.
- [6] 彭嘉桂, 章明清, 林琼, 等. 闽东南耕地土壤有效硫含量及主要粮油作物硫肥效应 [J]. 福建农业学报, 2002, 17 (1): 49~53.
- [7] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤 [M]. 福州: 福建科技出版社, 1991. 69~170.
- [8] Blair G J. 土壤有效硫测定方法概述 [A]. 国际硫研究所, 中科院南京土壤所, PRIS 硫磺公司, 澳大利亚国际农业研究中心. 中国农业硫肥研究进展和需求展望 [C]. 1997, 25~32.

(责任编辑: 刘用场)