果　树　学　报　2020，37（6）：848-856
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20190606

‘琯溪蜜柚’园土壤和树体的硫素营养研究

林伟杰[1]，李歆博[1]，于建霞[1]，林　锋[1]，庄木来[2]，朱东煌[2]，郭九信[1]，陈立松[1]，李　延[1*]

（[1]福建农林大学资源与环境学院·福建省土壤环境健康与调控重点实验室，福州 350002；
[2]平和县农业农村局琯溪蜜柚综合试验站，福建漳州 363700）

摘　要：**【目的】**研究‘琯溪蜜柚’园土壤和树体的硫素状况及其影响因素，探讨土壤硫富集与土壤酸化以及钙、镁淋失的关系。**【方法】**采集和分析314个‘琯溪蜜柚’园土壤、叶片样品以及27个土壤剖面样品的硫含量。**【结果】**‘琯溪蜜柚’园土壤有效硫含量（*w*，后同）范围10.98~116.65 mg·kg^{-1}，平均值55.63 mg·kg^{-1}，土壤有效硫高量（＞30 mg·kg^{-1}）、适量（16~30 mg·kg^{-1}）和低量（＜16 mg·kg^{-1}）的比例分别为83.44%、13.06%和3.50%，土壤有效硫含量随土壤有机质含量、阳离子交换量和黏粒（＜0.002 mm）含量的增加而提高，随种植年限的延长呈升高的趋势，剖面土壤有效硫含量平均值为40~60 cm＞20~40 cm＞0~20 cm。相关分析表明，土壤有效硫含量与土壤pH以及交换性钙、镁含量均呈极显著负相关。‘琯溪蜜柚’叶片硫含量的范围为0.24%~0.53%，平均值为0.34%，叶片硫适量（0.2%~0.4%）和高量（＞0.4%）的占比分别为86.94%和13.06%。**【结论】**‘琯溪蜜柚’园土壤和树体均存在硫过量问题，土壤硫富集会导致土壤酸化、促进钙和镁的淋失，生产上应减少含硫肥料的使用。

关键词：‘琯溪蜜柚’；果园；土壤有效硫含量；叶片硫含量；影响因素

中图分类号：S666.3　　　**文献标志码**：A　　　**文章编号**：1009-9980（2020）06-0848-09

Sulfur nutrition status in trees and soils of ‘Guanximiyou’ pomelo orchards

LIN Weijie[1], LI Xinbo[1], YU Jianxia[1], LIN Feng[1], ZHUANG Mulai[2], ZHU Donghuang[2], GUO Jiuxin[1], CHEN Lisong[1], LI Yan[1*]

(*[1]College of Resources and Environmental Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University/Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fuzhou 350002, Fujian, China; [2]Comprehensive Experiment Station for Guanximiyou, Agriculture and Rural Affairs Bureau of Pinghe County, Zhangzhou 363700, Fujian, China*)

Abstract:【Objective】‘Guanximiyou’ pomelo is a product of national geographical indication in Pinghe county (24°02′-24°35′ N，116°53′-117°31′ E), Zhangzhou city, Fujian province. The planting area of honey pomelo in Pinghe county was approximately 4.67×10^4 hm^2 with a yield about 120×10^4 t in 2017. The planting area, yield and export volume all rank the first in the country. Sulfur is an essential nutrient element for plant growth and development. It participates in many important physiological and metabolic processes in plants. Citrus is considered as “Cl^- sensitive crop”, therefore, farmers have used potassium sulfate, magnesium sulphate and other sulfur-containing fertilizers for a long time. The fertilizer application amount for honey pomelo in Pinghe county ranks the first among the main citrus producing counties in China. Long-term excessive fertilization has caused problems such as soil acidification, nutrient enrichment, and nutritional imbalances, which seriously affect the yield and quality of honey pomelo. Therefore, integrated nutrient management in honey pomelo orchards is very important. In order to provide theoretical and practical basis for the rational application of sulfur-containing fertilizers, soil sulfur content status, soil sulfur distribution characteristics and factors affecting sulfur content in

收稿日期：2019-12-20　　接受日期：2020-03-23

基金项目：国家农业(柑橘)产业技术体系专项经费(CARS-26-01A)；国家自然科学基金(31801947)；福建农林大学科技创新专项基金(105/KF2015072)

作者简介：林伟杰，男，硕士，主要研究方向为柑橘养分资源综合管理研究。Tel：0591-83789361，E-mail：847975166@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel：0591-83789361，E-mail：fauliyan@163.com

honey pomelo orchards were analyzed. The relationships of sulfur enrichment with soil acidification, and with calcium and magnesium leaching were discussed.【Methods】314 representative honey pomelo orchards for soil and leaf sample collection were selected from 10 major pomelo producing towns (Wenfeng, Qiling, Luxi, Jiufeng, Nansheng, Guoqiang, Banzai, Shange, Xiazhai and Xiaoxi) in Pinghe county, Fujian province. In order to explore the distribution characteristics of available sulfur in the soil profile, 27 honey pomelo orchards with planting years of 15 or more were selected, and soil samples from three soil layers (0-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm) were collected at 10 cm inward from the canopy drip line for avoiding fertilization ditch. A total of 81 soil profile samples from honey pomelo orchards were collected. After air drying, the soil samples were gently ground, sieved (0.850 mm and 0.150 mm) and properly stored before analysis. In addition, 55 samples of commercial organic fertilizers were collected from the market in Pinghe county for test of total sulfur content on dry weight basis.【Results】Soil available sulfur content in the honey pomelo orchards was in a range of 10.98-116.65 $mg \cdot kg^{-1}$ and the average value was 55.63 $mg \cdot kg^{-1}$. The soil available sulfur content was classified into the high (>30 $mg \cdot kg^{-1}$), the moderate (16-30 $mg \cdot kg^{-1}$) and the low (<16 $mg \cdot kg^{-1}$) levels, which were 83.44%, 13.06% and 3.50%, respectively. The average content of soil available sulfur of pomelo orchards in all towns exceeded the high (30 $mg \cdot kg^{-1}$) level, and the proportion of high (>30 $mg \cdot kg^{-1}$) samples exceeded 70%. Soil available sulfur content increased with the increases in soil organic matter content, cation exchange capacity (CEC) and clay content. The results also showed that soil available sulfur content increased with the ages of orchard. There was a significant negative correlation between soil available sulfur content and soil pH in the honey pomelo orchards. The average value of soil available sulfur content in the soil layers at 40-60 cm, 20-40 cm and 0-20 cm was 72.50 $mg \cdot kg^{-1}$, 97.81 $mg \cdot kg^{-1}$ and 141.70 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. The average value of soil available sulfur content in the 40-60 cm soil layer was 95.45% and 44.87% higher compared with the 0-20 cm and the 20-40 cm soil layers, respectively. Correlation analysis showed that the content of soil exchangeable calcium and exchangeable magnesium were extremely significantly negatively correlated with the content of available sulfur. The sulfur content in the leaves ranged from 0.24% to 0.53%, with an average value of 0.34%. The leaf sulfur content of all honey pomelo orchards was higher than 0.2%, and the proportion of the moderate (0.2%-0.4%) and the high (>0.4%) levels were 86.94% and 13.06%, respectively. The coefficient of variation and the proportion of samples with high soil available sulfur content were 3.00 times and 6.39 times higher than that of leaf sulfur content, respectively, indicating that excessive application of sulfur fertilizer affected sulfur absorption by honey pomelo.【Conclusion】There was a problem of excessive sulfur in the soil and leaves in honey pomelo orchards in Pinghe county. Soil available sulfur enrichment led to soil acidification. Sulfur is easily leached in the soil, which promotes the leaching of calcium and magnesium in the soil. The use of sulfur-containing fertilizers should be controlled in Pinghe county. It is necessary to carry out research on the effect of partial chloride- sulfur substitution on yield and quality of pomelo.

Key words: ‘Guanximiyou’ pomelo; Orchard; Soil available sulfur content; Leaf sulfur content; Influencing factors

硫在植物体内参与细胞质膜结构与功能的表达、光合电子传递、酶促反应以及蛋白质合成等重要生理代谢过程，是植物生长发育所必需的营养元素[1]。以往关于硫素营养的研究主要集中在水稻[2]、小麦[3]、玉米[4]、蔬菜[5]、烟草[6]等农作物，研究内容涉及土壤硫含量状况[7-9]、缺硫对作物生理代谢的影响[10-12]以及硫肥效应[13-15]。传统上柑橘一直被认为是“忌氯作物”，长期施用硫酸钾型复合肥、硫酸镁等含硫肥料已使柑橘园土壤出现硫的累积[16]，周继文等[17]对湖北省兴山县456个柑橘园土壤有效硫含量（w，后同）进行测定，以＜16 $mg \cdot kg^{-1}$、16~30 $mg \cdot kg^{-1}$、30~50 $mg \cdot kg^{-1}$和＞50 $mg \cdot kg^{-1}$分别作为土壤有效硫

缺乏、适宜、高量和过量的评价标准，结果显示，柑橘园土壤有效硫含量范围为18.9~95.0 mg·kg^{-1}，平均值为45.0 mg·kg^{-1}，所有样品的土壤有效硫含量均在适宜值以上，其中高量、过量的比例分别占37.5%、25.0%。苏婷婷等[18]测定了重庆市7个代表性县区104个柑橘园土壤有效硫含量，有71.2%的果园土壤有效硫含量高于土壤背景值，40.4%柑橘园土壤有效硫含量＞40 mg·kg^{-1}。福建省平和县是'琯溪蜜柚'（以下简称蜜柚）的原产地，截至2017年，全县蜜柚种植面积已达4.67万hm^2，产量达120万t，种植面积、产量和出口量均居全国首位[19]。位高生等[20]调查表明，平和县蜜柚年平均养分施用量为N 1.60 kg•株$^{-1}$、P_2O_5 1.25 kg•株$^{-1}$、K_2O 1.36 kg•株$^{-1}$，肥料施用量居全国柑橘主产县的首位。长期过量施肥导致土壤酸化、养分富集和营养不均衡的问题，已严重影响蜜柚的产量和品质[21]，然而，迄今为止，有关蜜柚园土壤硫素营养状况的研究未见报道。本研究对采自福建省平和县314个蜜柚园的土壤、叶片样品和27个蜜柚园土壤剖面各土层土壤的硫含量进行测试，分析'琯溪蜜柚'园土壤硫素含量状况、分布特征以及影响硫素含量的因素，探讨硫富集与土壤酸化以及钙、镁淋失的关系，旨在为蜜柚合理施用硫肥提供依据。

1 材料和方法

1.1 样品的采集

1.1.1 *土壤和叶片样品采集* 在福建省平和县10个蜜柚主产乡镇选取具有代表性的314个蜜柚园进行土壤和叶片样品的采集，其中文峰镇、崎岭乡、芦溪镇、九峰镇、南胜镇、国强乡、坂仔镇、山格镇、霞寨镇和小溪镇的蜜柚园数量分别为15、17、16、20、22、26、39、49、54和56个。土壤和叶片的采样方法参照《亚热带果树营养诊断样品采集技术规范(DB35/T742—2007)》[22]。在树冠滴水线内侧10 cm处（避开施肥沟）采集0~40 cm深度的土壤样品，每株采集对称方向的2个点，将5株所取的土壤样品均匀混合为1个样品。在树冠外围4个方向采集当年生春梢营养枝第1~2枚成熟叶片，每株采20枚叶片，每100枚叶片作为1个样品。

1.1.2 *土壤剖面样品采集* 选择树龄在15 a以上的'琯溪蜜柚'园27个，每个果园选取5株长势一致并具代表性的蜜柚作为采样株，在每株树冠滴水线内侧10 cm处（避开施肥沟）采集对称方向2个点（0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm）3个土层的土壤样品，将5株所取的土壤样品分层均匀混合为3个独立的样品，合计采集81个蜜柚园土壤剖面样品，用于土壤有效硫、交换性钙和交换性镁含量的测定。

1.1.3 *有机肥样品* 采集平和县农资市场销售的有机肥样品55个，其中有机肥料、生物有机肥和有机无机复混肥料各41个、10个和4个，用于硫含量的测定。

1.2 样品测定

土壤基本理化性状参照《土壤农业化学分析方法》[23]进行测定，土壤pH值采用电位法测定（水土体积比为2.5∶1）；土壤质地采用比重计法测定；CEC采用醋酸铵法测定；土壤有机质采用高温外热重铬酸钾氧化容量法测定；土壤有效硫含量采用磷酸盐-乙酸浸提-硫酸钡比浊法测定；土壤交换性钙、交换性镁采用醋酸铵浸提-原子吸收分光光度法测定；'琯溪蜜柚'叶片和有机肥的硫含量采用X射线荧光光谱法测定。

1.3 数据处理

采用Microsoft Office Excel 2010和IBM SPSS Statistics 19.0分析软件对数据进行作图、方差分析和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 蜜柚园土壤有效硫含量及与土壤酸化的关系

依据庄伊美等[24]的柑橘土壤养分分级标准，将土壤有效硫含量分为低量（＜16 mg·kg^{-1}）、适量（16~30 mg·kg^{-1}）和高量（＞30 mg·kg^{-1}）。平和县314个蜜柚园土壤有效硫含量范围为10.98~116.65 mg·kg^{-1}，平均值为55.63 mg·kg^{-1}，土壤有效硫含量属于高量（＞30 mg·kg^{-1}）、适量（16~30 mg·kg^{-1}）和低量（＜16 mg·kg^{-1}）的比例分别为83.44%、13.06%和3.50%（表1）。各乡镇蜜柚园土壤有效硫含量变异系数达44.11%，不同乡镇蜜柚土壤有效硫含量的平均值存在差异，土壤有效硫含量平均值由高到低的排序为：南胜镇（68.68 mg·kg^{-1}）、国强乡（66.46 mg·kg^{-1}）、芦溪镇（58.06 mg·kg^{-1}）、霞寨镇（57.85 mg·kg^{-1}）、崎岭乡（55.27 mg·kg^{-1}）、小溪镇（54.33 mg·kg^{-1}）、九峰镇（53.34 mg·kg^{-1}）、坂仔镇（51.72 mg·kg^{-1}）、文峰镇（50.68 mg·kg^{-1}）、山格镇（47.97 mg·kg^{-1}），所有乡镇

表1 平和县蜜柚园土壤有效硫含量状况

Table 1 Soil avail-S content of pomelo orchards in Pinghe county

乡镇 County	数值范围 Data range/ (mg·kg^{-1})	平均值 Average/ (mg·kg^{-1})	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	土壤有效硫含量分级比例 Classification percent for soil avail-S content/%		
					高量 High	适量 Adequate	低量 Low
文峰镇 Wenfeng	15.56~109.80	50.68 c	28.91	57.04	73.33	20.00	6.67
崎岭乡 Qiling	13.95~112.36	55.27 abc	21.55	38.99	94.12	0.00	5.88
芦溪镇 Luxi	20.60~108.62	58.06 abc	28.45	49.00	87.50	12.50	0.00
九峰镇 Jiufeng	28.30~82.53	53.34 abc	15.72	29.47	90.00	10.00	0.00
南胜镇 Nansheng	16.80~116.65	68.68 a	28.38	41.32	86.36	13.64	0.00
国强乡 Guoqiang	12.65~102.40	66.46 ab	27.64	41.59	84.62	11.54	3.85
坂仔镇 Banzai	13.65~102.40	51.72 bc	25.08	48.49	76.92	12.82	10.26
山格镇 Shange	10.98~101.65	47.97 c	19.43	40.50	81.63	16.33	2.04
霞寨镇 Xiazhai	13.65~99.98	57.85 abc	22.08	38.17	87.04	11.11	1.85
小溪镇 Xiaoxi	12.60~113.60	54.33 abc	26.12	48.08	80.36	16.07	3.57
平均值 Average	10.98~116.65	55.63	24.54	44.11	83.44	13.06	3.50

注：同列数据后不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

Note: Different small letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level. The same below.

蜜柚园土壤有效硫的平均含量都超过高量(30 mg·kg^{-1})水平，且土壤有效硫含量属于高量(＞30 mg·kg^{-1})的样品比例均超过 70%，表明平和县蜜柚园土壤硫富集的问题明显且普遍。

土壤酸化是平和县蜜柚生产中存在的主要问题[21]，相关分析表明，蜜柚园土壤 pH 与土壤有效硫含量存在极显著的负相关关系（图 1），相关方程为 y（土壤 pH 值）= −0.006 6x（土壤有效硫含量）+4.712 6（r=−0.365**，n=314），表明土壤有效硫富集会导致土壤的酸化。

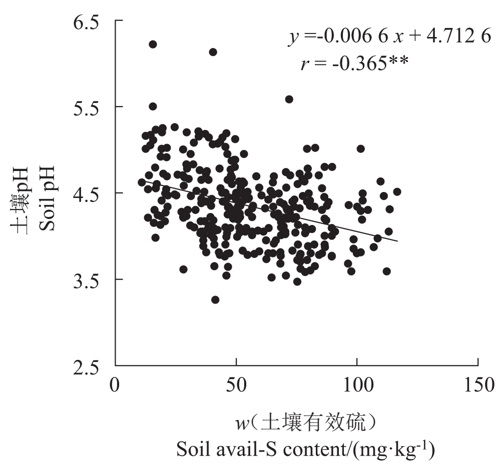


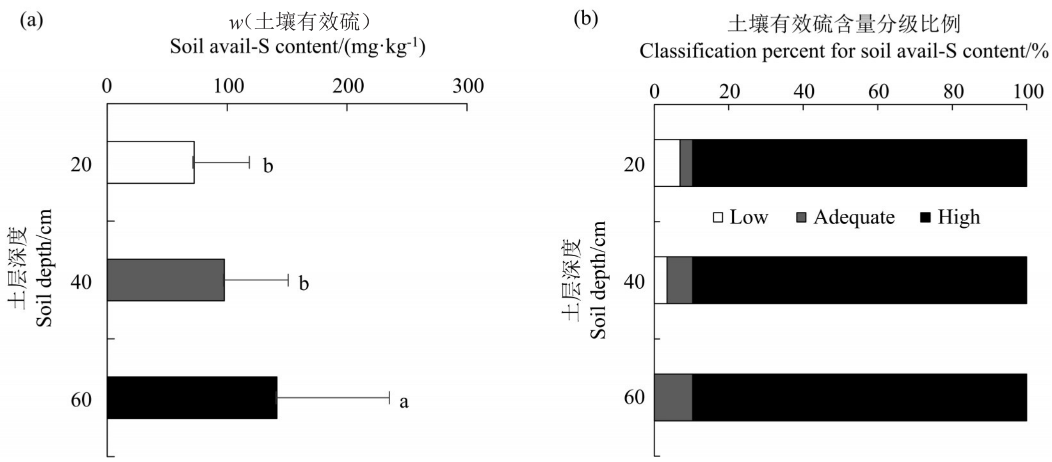
图1 平和县蜜柚园土壤pH与土壤有效硫含量的相关关系

Fig. 1 Relationship between soil pH and avail-S content in pomelo orchards in Pinghe county

2.2 蜜柚园土壤剖面有效硫的分布特征及与交换性钙、镁的关系

蜜柚园不同土层土壤有效硫含量的平均值随土层深度的增加而提高，0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤有效硫含量的平均值分别为 72.50 mg·kg^{-1}、97.81 mg·kg^{-1} 和 141.70 mg·kg^{-1}，40~60 cm 土层土壤有效硫含量的平均值较 0~20 cm 和 20~40 cm 土层分别提高了 95.45%和 44.87%，差异均达到显著水平（图 2-a）。土壤有效硫含量分级的比例在不同土层中亦存在明显差异（图 2-b），有效硫低量（＜16 mg·kg^{-1}）的比例随土层深度的增加而降低，适量（16~30 mg·kg^{-1}）的比例则相反，20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤有效硫适量（16~30 mg·kg^{-1}）的占比分别较 0~20 cm 土层提高了 100%和 199.71%，高量（＞30 mg·kg^{-1}）的比例各土层均为 89.66%，但 20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤有效硫含量＞100 mg·kg^{-1} 的比例分别较 0~20 cm 土层提高了 71.38%和 142.81%，说明硫在土壤中的移动性大，存在明显的淋溶现象。

土壤 SO_4^{2-} 的迁移是与 Ca^{2+}、Mg^{2+} 等离子相伴随的[25-26]，土壤剖面交换性钙、交换性镁含量与土壤有效硫含量的相关分析表明（图 3），土壤交换性钙、交换性镁含量与土壤有效硫含量均呈极显著负相关关系，拟合方程分别为 y（土壤交换性钙



不同小写字母表示在 p <0.05 水平上差异显著。

Different small letters indicate significant difference at p <0.05.

图2 蜜柚园剖面土壤有效硫的分布特征

Fig. 2 The distribution of soil avail-S content in soil profiles of pomelo orchard

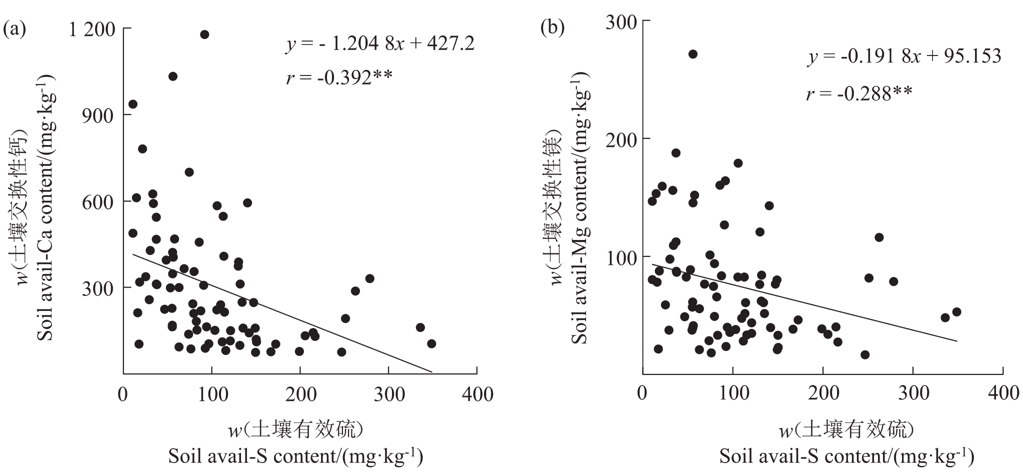


图3 土壤剖面交换性钙、交换性镁含量与有效硫含量的相关关系

Fig. 3 Relationships of avail-Ca and avail-Mg content with soil avail-S content in soil profiles

含量)=−1.204 8x(土壤有效硫含量)+427.2(r=−0.392**,n =81)和 y(土壤交换性镁含量)=−0.191 8 x(土壤有效硫含量)+95.153(r=−0.288**,n=81),说明土壤硫的淋溶会促进钙、镁养分的淋失。

2.3 土壤有效硫含量的影响因素分析

2.3.1 土壤有机质含量 将土壤有机质含量按<15 g·kg^{-1}、15~30 g·kg^{-1}和>30 g·kg^{-1}进行分级,比较不同级别的土壤有效硫含量(表2),结果显示,蜜柚园土壤有效硫含量的平均值随土壤有机质含量的增加而提高,土壤有机质含量15~30 g·kg^{-1}、>30 g·kg^{-1}的土壤有效硫含量平均值分别较土壤有机质含量<15 g·kg^{-1}提高了18.23%、29.57%,而土壤有效硫高量(>30 mg·kg^{-1})的占比分别增加了4.71%和

表2 平和县蜜柚园土壤有机质含量对土壤有效硫含量的影响

Table 2 Effects of OM content on soil avail-S content of pomelo orchards in Pinghe county

w(土壤有机质) OM content/(g·kg-1)	样本数 Number of samples	土壤有效硫含量平均值 Average/(mg·kg-1)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	土壤有效硫含量分级比例 Classification percent for soil avail-S content/%		
					<16 mg·kg-1	16~30 mg·kg-1	>30 mg·kg-1
<15	32	46.46 b	20.44	43.99	9.38	9.38	81.24
15~30	201	54.93 a	22.50	40.96	2.49	12.44	85.07
>30	67	60.20 a	25.88	42.99	1.49	13.43	85.08

4.73%。有机肥施用所带来的硫投入量增加和有机质提高土壤对硫的吸附是有机质提高土壤有效硫含量的原因，采集自平和县农资市场的 3 类有机肥，其全硫含量平均值的高低顺序是有机无机复混肥料（1.85%）＞生物有机肥（1.36%）＞有机肥料（0.90%），有研究表明，具有两性的土壤有机质可吸附 SO_4^{2-}，且吸附量随土壤有机质含量的增加而提高[27]。

2.3.2　土壤阳离子交换量和土壤质地　相关分析（图 4）表明，土壤有效硫含量随阳离子交换量（CEC）的增加而提高，二者存在极显著的正相关（图 4-a），土壤质地是影响土壤胶体数量和吸附性能的重要因素，土壤有效硫含量与土壤黏粒（＜0.002 mm）、粉粒（0.002~0.02 mm）和砂粒（0.02~2 mm）含量的相关分析结果显示，土壤有效硫含量与土壤黏粒含量呈极显著的正相关（图 4-b，r=0.497**），与土壤砂粒含量存在极显著的负相关（图 4-d，r=−0.445**），而与粉粒含量无显著相关（图 4-c），表明土壤胶体对 SO_4^{2-}的吸附可降低硫的淋溶，进而提高土壤有效硫的含量。

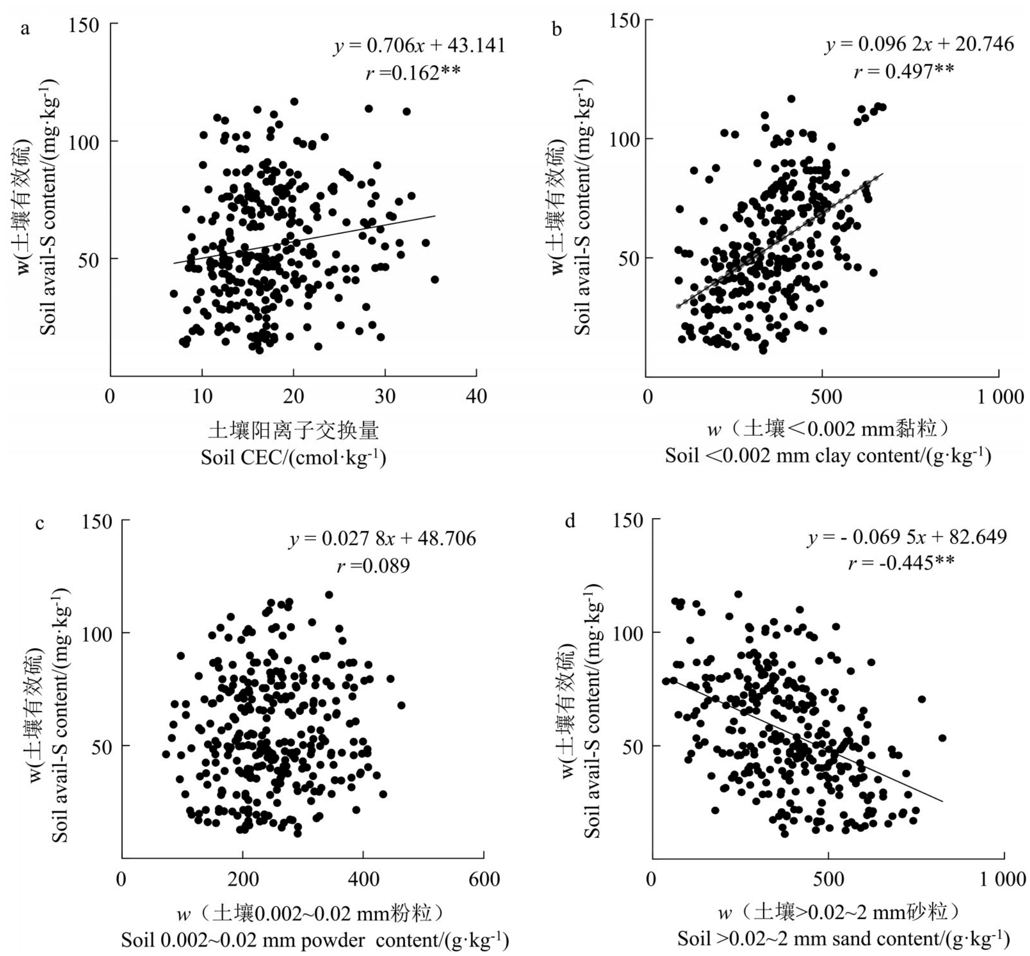


图4　平和县蜜柚园土壤有效硫含量与质地、土壤CEC的相关关系

Fig. 4　Relationships of soil avail-S and and soil texture with CEC of pomelo orchards in Pinghe county

2.3.3　种植年限　将种植年限按＜10 a、10~15 a 和＞15 a 进行划分，可以看出（表 3），不同种植年限蜜柚园土壤有效硫含量的平均值没有明显差异，但种植年限按＜10 a 的土壤有效硫低量（＜16 mg·kg^{-1}）的占比分别较 10~15 a 和＞15 a 提高 374.38%和 142.49%，而高量（＞30 mg·kg^{-1}）的占比则分别降低 12.25%和 7.33%，表明随种植年限的增加，蜜柚园土壤有效硫有提高的趋势。

2.4　蜜柚叶片硫含量状况

平和县蜜柚叶片硫含量的范围为 0.24%~0.53%，平均值为 0.34%（表 4），叶片硫含量属于高量（＞0.4%）、适量（0.2%~0.4%）的占比分别为 13.06%和 86.94%，没有低量（＜0.2%）的样品。不同乡镇蜜柚叶片硫含量的平均值有明显差异，其中叶片硫高量（＞0.4%）占比＞20%的乡镇有文峰镇（40.00%）、九峰镇（25.00%）、南胜镇（22.73%）和山

表3 种植年限对平和县蜜柚园土壤有效硫含量的影响

Table 3 Effects of orchard age on soil avail-S content in pomelo orchards in Pinghe county

种植年限 Planting years/a	样本数 Number of samples	土壤有效硫含量平均值 Average/(mg·kg^{-1})	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	土壤有效硫含量分级比例 Classification percent for soil avail-S content/%		
					＜16 mg·kg^{-1}	16~30 mg·kg^{-1}	＞30 mg·kg^{-1}
＜10	79	54.47 a	26.97	49.51	7.59	15.19	77.22
10~15	125	54.30 a	20.99	38.66	1.60	10.40	88.00
＞15	96	59.43 a	26.88	45.23	3.13	13.54	83.33

表4 平和县蜜柚叶片的硫含量

Table 4 Leaf sulfur content of pomelo orchards in Pinghe county

乡镇 County	数值范围 Date range/%	平均值 Average/%	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	叶片硫含量分级比例 Classification percent for leaf sulfur content/%		
					高量 High	适量 Adequate	低量 Low
文峰镇 Wenfeng	0.28~0.45	0.36 ab	0.06	16.67	40.00	60.00	-
崎岭乡 Qiling	0.27~0.45	0.34 bcd	0.04	11.76	5.88	94.12	-
芦溪镇 Luxi	0.29~0.41	0.35 bc	0.04	11.43	6.25	93.75	-
九峰镇 Jiufeng	0.31~0.47	0.38 a	0.05	13.16	25.00	75.00	-
南胜镇 Nansheng	0.27~0.45	0.35 bc	0.05	14.29	22.73	77.27	-
国强乡 Guoqiang	0.24~0.42	0.33 cd	0.05	15.15	7.69	92.31	-
坂仔镇 Banzai	0.26~0.44	0.35 bc	0.04	11.76	12.82	87.18	-
山格镇 Shange	0.25~0.53	0.36 ab	0.06	16.67	24.49	75.51	-
霞寨镇 Xiazhai	0.25~0.42	0.32 d	0.03	9.38	1.85	98.15	-
小溪镇 Xiaoxi	0.26~0.50	0.32 d	0.04	12.50	5.36	94.64	-
平均值 Average	0.24~0.53	0.34	0.05	14.71	13.06	86.94	-

格镇(24.49%)。相关分析表明,蜜柚叶片硫含量与土壤有效硫含量存在显著的正相关(r=0.140*,n=314),表明土壤有效硫是蜜柚硫素营养的重要来源。对比蜜柚园土壤有效硫和叶片硫含量的变异系数及高量样品的比例,可以发现,土壤有效硫含量的变异系数(44.11%)和高量样品的比例(83.44%)分别是叶片硫含量变异系数(14.71%)和高量占比(13.06%)的3.00倍和6.39倍,说明虽然蜜柚叶片硫含量会随土壤有效硫含量的提高而增加,但过量施用硫肥会影响蜜柚对硫的吸收。有研究表明,植物对硫酸根的吸收存在由酶控制的反馈调节,高硫会降低植物对硫的吸收,使硫在植株体内的积累速度减缓[28]。

3 讨 论

平和县蜜柚园土壤存在明显的硫富集,由于旱地土壤的有效硫主要以硫酸盐的形式存在,而SO_4^{2-}在土壤中易被淋失,导致不同土层土壤有效硫含量的平均值表现为40~60 cm＞20~40 cm＞0~20 cm。樊军等[29]的硫肥长期定位试验发现,SO_4^{2-}在土壤剖面中的移动性很大,短期内SO_4^{2-}主要累积在40~80 cm土层,而长期累积的峰值出现在120 cm土层。Farina等[30]研究表明,SO_4^{2-}在土壤中的迁移取决于土壤溶液SO_4^{2-}浓度、土壤水分管理和土壤吸附SO_4^{2-}的能力。研究表明,土壤剖面交换性钙、交换性镁含量与土壤有效硫含量均呈极显著负相关,说明土壤SO_4^{2-}的淋溶会促进钙、镁养分的淋失,这可能是平和县蜜柚钙、镁缺乏的原因之一。硫促进土壤钙、镁流失,一方面是由于硫肥施用造成土壤酸化,土壤H^+浓度增加[31],H^+与土壤胶体表面吸附的Ca^{2+}、Mg^{2+}发生交换反应,使Ca^{2+}、Mg^{2+}进入土壤溶液而随水流失;另一方面则是由于pH降低提高了土壤铝离子[Al^{3+}、$Al(OH)^{2+}$、$Al(OH)_2^+$]含量[26],土壤胶体对铝离子的吸附削弱了其对Ca^{2+}、Mg^{2+}的吸持能力[32],导致Ca^{2+}、Mg^{2+}的淋失。

施用硫肥导致土壤酸化国内外均有报道[33],邹长明等[34]在红壤稻田开展的26 a长期定位试验表明,与施用含氯肥料处理比较,含硫肥料更易造成土壤的酸化。本研究也发现,蜜柚园土壤pH与土壤有效硫含量存在极显著的负相关关系,说明土壤

有效硫富集是导致蜜柚园土壤酸化的重要原因。土壤有效硫富集导致土壤酸化的原因尚不完全清楚，陈铭等[31]研究认为，施用含硫肥料处理的土壤电导率较含氯肥料高，而土壤电解质浓度的提高压缩了胶体表面的双电层从而代换出较多的 H^+，是含硫肥料导致土壤 pH 降低的原因。此外，土壤 SO_4^{2-}淋溶使 Ca^{2+}、Mg^{2+}离子淋失加剧，降低土壤对酸化的缓冲能力，也是硫富集土壤酸化的原因[32]。本研究有关土壤硫富集导致柑橘园土壤酸化的结论和机制还有待通过长期的田间试验进行验证。

4 结 论

平和县蜜柚园的土壤和叶片均存在硫过量的问题，土壤有效硫富集会导致土壤酸化、促进土壤 Ca^{2+}、Mg^{2+}离子的淋失，生产上应控制含硫肥料的过量使用。含氯肥料（氯化钾）部分替代含硫肥料（硫酸钾）时，由于蜜柚需钾高峰的结果期往往也是秋旱发生时期，因此研究重点应该是干旱胁迫下以氯代硫对蜜柚产量和品质的影响。

参考文献 References：

[1] KOPRIVA S, MALAGOLI M, TAKAHASHI H. Sulfur nutrition: impacts on plant development, metabolism, and stress responses[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(16): 4069-4073.

[2] 孙玉桃，董春华，聂军，鲁艳红，唐友云，廖育林 . 湖南中低产双季稻田硫肥施用效应[J]. 西北农业学报，2019，28(10)：1-8.
SUN Yutao, DONG Chunhua, NIE Jun, LU Yanhong, TANG Youyun, LIAO Yulin. Response of rice growth to sulfur fertilizer application in low and medium-yield double rice-cropping system in Hunan province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2019, 28(10): 1-8.

[3] 赵玉霞，李娜，王文岩，李雪芳，周芳，王林权 . 施用硫肥对陕西关中地区冬小麦氮、硫吸收与转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2013，19(6): 1321-1328.
ZHAO Yuxia, LI Na, WANG Wenyan, LI Xuefang, ZHOU Fang, WANG Linquan. Effects of sulfur application rate on the absorption and translocation of nitrogen and sulfur and grain yield of winter wheat in Guanzhong area of Shaanxi[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(6): 1321-1328.

[4] 曹殿云,王宏伟,徐晓旭 . 硫肥用量对玉米氮硫吸收分配和产量的影响[J]. 中国生态农业学报，2017，25(9): 1298-1305.
CAO Dianyun, WANG Hongwei, XU Xiaoxu. Effect of sulfur on nitrogen/sulfur uptake/distribution and yield of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1298-1305.

[5] 季延海，武占会，钟启文，于平彬，刘明池 . 不同浓度硫素对韭菜产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2017，23(4): 1112-1119.
JI Yanhai, WU Zhanhui, ZHONG Qiwen, YU Pingbin, LIU Mingchi. Suitable sulfur concentrations in the nutrient solution used for Chinese chives in hydroponic production[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(4): 1112-1119.

[6] 张继光，梁洪波，申国明，董建新，张清明，陈向东，吴元华，查婷，于海容 . 连续多年施用硫酸钾肥对烟田土壤及烟株硫素含量的影响[J]. 中国烟草科学，2013，34(6): 77-82.
ZHANG Jiguang, LIANG Hongbo, SHEN Guoming, DONG Jianxin, ZHANG Qingming, CHEN Xiangdong, WU Yuanhua, ZHA Ting, YU Hairong. Effects of successive fertilization of potassium sulfate on change of sulfur content in soil and tobacco plant[J]. Chinese Tobacco Science, 2013, 34(6): 77-82.

[7] 刘崇群，曹淑卿，陈国安，吴锡军 . 中国南方农业中的硫[J]. 土壤学报 1990，27(4): 398-404.
LIU Chongqun, CAO Shuqing, CHEN Guoan, WU Xijun. Sulphur in the agriculture of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1990, 27(4): 398-404.

[8] 钱晓华，杨平，周学军，胡荣根，孙海龙，张兆坤，孙旭进 . 安徽省土壤有效硫现状及时空分布[J]. 植物营养与肥料学报，2018，24(5): 1357-1364.
QIAN Xiaohua, YANG Ping, ZHOU Xuejun, HU Ronggen, SUN Hailong, ZHANG Zhaokun, SUN Xujin. Current situation and spatial-temporal distribution of soil available sulfur in Anhui Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(5): 1357-1364.

[9] 李金凤，陈洪斌，张玉龙，江景宽 . 辽宁大豆主产区土壤硫素状况及不同硫肥肥效研究[J]. 土壤通报，2004，35(4): 470-473.
LI Jinfeng, CHEN Hongbin, ZHANG Yulong, JIANG Jingkuan. Sulfur status and effectiveness of sulfur fertilizers in the main soybean-planted soils in Liaoning province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(4): 470-473.

[10] D'HOOGHE P, ESCAMEZ S, TROUVERIE J, TROUVERIE J. Sulphur limitation provokes physiological and leaf proteome changes in oilseed rape that lead to perturbation of sulphur, carbon and oxidative metabolisms[J]. BMC Plant Biology, 2013, 13 (1): 1471-1485.

[11] 徐莹 . 硫素胁迫对烟草生长和生理过程的影响研究[D]. 福建农林大学，2010.
XU Ying. The effect of sulfur stress on growth and physiological process of tobacco [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural And Forestry University, 2010.

[12] 袁园园 . 水稻幼苗缺硫胁迫应答机理研究[D]. 新乡：河南师范大学，2017.
YUAN Yuanyuan. Responsive mechanism of sulphate deficiency in rice seedlings[D]. Xinxiang:Henan Normal University, 2017.

[13] 迟凤琴，魏丹，申惠波，杨军 . 黑龙江省主要类型稻田土壤硫现状及硫肥效果的研究[J]. 中国土壤与肥料，1999(6): 7-11.
CHI Fengqin, WEI Dan, SHEN Huibo, YANG Jun. Present status of sulphur and the effect of sulphur fertilization in main paddy soils of Heilongjiang province [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 1999(6): 7-11.

[14] LONGKUMER L T, SINGH A K, JAMIR Z, MANOJ K. Effect of sulphur and boron nutrition on yield and quality of soybean (*Glycine max* L.) grown in an acid soil[J]. Communications in

Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(4): 405-411.

[15] 谢如林，谭宏伟，周柳强，黄美福，黄金生 . 广西主要经济作物土壤硫素状况和硫肥效应研究[J]. 广西农业科学，2009，40(1): 53-55.
XIE Rulin, TAN Hongwei, ZHOU Liuqiang, HUANG Meifu, HUANG Jinsheng. Soil S status and effects of S-fertilizer on cash crops in Guangxi[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2009, 40(1): 53-55.

[16] 戴平安，刘崇群，郑圣先，易国英 . 湖南桔园土壤硫素含量及其影响因素研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版)，2003，29(3): 231-234.
DAI Pingan, LIU Chongqun, ZHENG Shengxian, YI Guoying. On sulphur content of soil in citrus gardens of Hunan province and factors affecting it[J]. Journal of Hunan Agricultural University（Natural Sciences）, 2003, 29(3): 231-234.

[17] 周继文，李述举，张祥城，刘本勇，彭东林 . 兴山县柑桔园土壤营养状况研究[J]. 中国南方果树，2012，41(6)：41-45.
ZHOU Jiwen, LI Shuju, ZHANG Xiangcheng, LIU Benyong, PENG Donglin. Xingshan county citrus orchard soil nutritional status[J]. South China Fruits, 2012, 41(6): 41-45.

[18] 苏婷婷，周鑫斌，高阿祥，石孝均 . 重庆市柑橘园土壤养分现状研究[J]. 土壤，2017，49(5): 897-902.
SU Tingting, ZHOU Xinbin, GAO Axiang, SHI Xiaojun. Study on nutrient status of citrus orchard soil in Chongqing[J]. Soils, 2017, 49(5): 897-902.

[19] 张世祺，程琛，林伟杰，李歆博，朱东煌，陈立松，郭九信，李延 . ‘琯溪蜜柚’园土壤和树体的硼素营养与果实粒化关系分析[J]. 果树学报，2019，36(4): 468-475.
ZHANG Shiqi, CHENG Chen, LIN Weijie, LI Xinbo, ZHU Donghuang, CHEN Lisong, GUO Jiuxin, LI Yan. Analysis of boron nutrition status in soils and trees and its relationship with fruit granulation in‘Guanximiyou' pomelo[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(4): 468-475.

[20] 位高生，胡承孝，谭启玲，朱东煌，李潇彬 . 氮磷减量施肥对琯溪蜜柚果实产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2018，24(2): 471-478.
WEI Gaosheng, HU Chengxiao, TAN Qiling, ZHU Donghuang, LI Xiaobin. The effect of nitrogen and phosphorus fertilizer reduction on yield and quality of Guanxi pomelo[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2): 471-478.

[21] LI Y, HAN M Q, LIN F, TEN Y, LIN J, ZHU D H, GUO P, WENG Y B, CHEN L S. Soil chemical properties,‘Guanximiyou’pomelo leaf mineral nutrient status and fruit quality in the southern region of Fujian province, China [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2015, 15(3): 615-628.

[22] 福建省质量技术监督局 . DB35/T742—2007 亚热带果树营养诊断样品采集技术规范[S]. 2007: 1-3.
Fujian Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. DB35/T 742—2007, Technical specification for sampling of nutritional diagnosis of subtropical fruit trees[S]. 2007: 1-3.

[23] 鲁如坤 . 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社，2000: 13-212.
LU Rukun. Methods for agricultural chemical analysis of soil [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 13-212.

[24] 庄伊美，许文宝，王仁玑，陈丽璇，叶水兴 . 红壤柑桔园硼铜镁营养失调的诊断[J]. 中国柑桔，1991，20(3): 6-8.
ZHUANG Yimei, XU Wenbao, WANG Renqi, CHEN Lixuan, YE Shuixing. Diagnosis of boron, magnesium and magnesium malnutrition in citrus orchard[J]. China Citrus, 1991, 20(3): 6-8.

[25] 朱博麟，李绪谦，刘娜，朱荣东 . 硫酸根离子在弱透水层中的迁移行为[J]. 世界地质，2010，29(4): 658-662.
ZHU Bolin, LI Xuqian, LIU Na, ZHU Rongdong. Migration behavior of sulfate irons in aquitard [J]. Global Geology, 2010, 29(4): 658-662.

[26] SOGN T A, ABRAHAMSEN G. Effects of N and S deposition on leaching from an acid forest soil and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) after 5 years of treatment[J]. Forest Ecology and Management, 1998, 103(2): 177-190.

[27] 周卫，林葆 . 土壤与植物中硫行为研究进展[J]. 土壤肥料,1997(5): 8-11.
ZHOU Wei, LIN Bao. Research progress on sulfur behavior in soil and plants [J]. Soil Fertilizer, 1997(5):8-11.

[28] ANDERSON S W, ANDERSON J W. Effect of sulfur nutrition on the redistribution of sulfur in vegatative soybean plants[J]. Plant Physiology, 1996, 112(2): 623-631.

[29] 樊军，郝明德 . 旱地长期定位施肥土壤剖面中有效硫累积及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报，2002，8(1): 86-90.
FAN Jun, HAO Mingde. Accumulation of available sulfur in soil profile and affecting factors in a long-term fertilizer experiment of dry land farming[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2002, 8(1): 86-90.

[30] FARINA M P W, C HANNON P. Acid-subsoil amelioration: II. Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(1): 175-180.

[31] 陈铭，孙富臣，刘更另 . 含硫及含氯化肥对湘南水田土壤酸度和养分有效性的影响[J]. 热带亚热带土壤科学，1993，2(4): 189-194.
CHEN Ming, SUN Fuchen, LIU Gengling. Effects of SO_4^{2-} and Cl^- fertilizers on soil acidity and nutrient availability of paddy in southern Hunan province [J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1993, 2(4): 189-194.

[32] LI J Y , LIU ZH D , ZHAO W Z , MASUD M M, XU R K . Alkaline slag is more effective than phosphogypsum in the amelioration of subsoil acidity in an Ultisol profile[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 149: 21-32.

[33] AZEEZ J O, ADELEYE O A, OYINLOLA R O. The effect of sulfur and urea on the heavy metal extraction by African wild sunflower (*Tithonia diversifolia*) in an artificially contaminated soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47(16): 1940-1949.

[34] 邹长明，高菊生，王伯仁，申华平 . 长期施用含硫化肥对水稻产量和养分吸收的影响[J]. 土壤通报，2006，37(1): 103-106.
ZOU Changming, GAO Jusheng, WANG Boren, SHEN Huaping. Effects of long-term application of sulfur-containing chemical fertilizers on yield and nutrient uptake by rice[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 103-106.