

# 硫对猕猴桃叶绿体结构及果实品质的影响

尹显慧<sup>1</sup>, 王梅<sup>1</sup>, 龙友华<sup>1\*</sup>, 田雪莲<sup>1</sup>, 朱流红<sup>1</sup>, 黎晓茜<sup>1</sup>, 徐朝云<sup>2</sup>, 王英<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>贵州大学作物保护研究所, 贵阳 550025; <sup>2</sup>贵州农大黔盛生态农业有限公司, 贵阳 550200)

**摘要:**【目的】为猕猴桃种植中合理施用硫肥提供科学的参考依据。【方法】将土壤、有机肥和硫磺粉混匀后装盆, 移栽1 a生猕猴桃嫁接苗, 定期观察不同硫处理盆栽猕猴桃植株的生长情况; 另外冬季在‘米良一号’猕猴桃老果园中采用不同浓度硫磺粉和有机肥混合作基肥进行环状沟施, 翌年9月研究施硫处理对猕猴桃叶片叶绿体结构及果实品质的影响。【结果】施用适量的硫磺对翌年猕猴桃植株的生长有促进作用, 当硫质量浓度大于 $2.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 猕猴桃植株新梢生长较短, 叶片较小, 对猕猴桃植株的生长有抑制作用。施硫2 a后土壤性质发现了明显变化, 质量浓度为 $1.0\sim 2.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 硫处理后, 土壤pH符合猕猴桃适宜生长的范围, 而 $1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 硫处理后, 土壤的有机质、全氮和有效磷含量明显高于其他处理组。与对照不施硫相比, 田间 $1.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 硫处理的猕猴桃叶片中叶绿体呈规则的梭形, 环绕在细胞内表面, 基粒、基质片层清晰, 基粒类囊体垛叠多且排列致密整齐, 叶绿体内富含小颗粒的淀粉粒, 且叶片细胞大小均一, 排列整齐紧密; 同时低、中质量浓度的硫处理明显改善了猕猴桃果实品质, 其中以 $2.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 硫处理效果最好, 其单果质量、果形指数、果实硬度、可溶性固形物含量、维生素C含量、可溶性糖含量和可溶性蛋白含量分别比对照提高了11.19%、8.94%、32.65%、5.45%、9.16%、11.76%和26.92%; 随着施硫量的增加, 果实中全硫的含量也不断增加, 但所有处理均在作物全硫含量安全范围内。【结论】施硫质量浓度为 $1.0\sim 2.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时能改善土壤养分, 稳定维持猕猴桃叶片细胞和叶绿体结构, 明显改善果实品质。

**关键词:** 猕猴桃; 硫; 叶绿体结构; 品质

中图分类号: S663.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2017)04-0454-10

## Effects of sulfur treatment on chloroplast ultrastructure and fruit quality in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*)

YIN Xianhui<sup>1</sup>, WANG Mei<sup>1</sup>, LONG Youhua<sup>1\*</sup>, TIAN Xuelian<sup>1</sup>, ZHU Lihong<sup>1</sup>, LI Xiaoqian<sup>1</sup>, XU Chaoyun<sup>2</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Crop Protection, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; <sup>2</sup>Guizhou Nongdaqiansheng Ecological Agriculture Co. Ltd., Guiyang 550200, Guizhou, China)

**Abstract:** 【Objective】Sulfur (S), as a structural constituent of amino acids, iron-sulfur clusters, proteins, membrane sulpholipids, glutathione, glucosinolates and coenzymes, is essential for plant growth and development. Low-S soils, continuous cropping and use of high-yielding varieties may have increased sulfur starvation in crops. Absence or low sulfur concentration in the soil severely retards growth. And the research on soil sulfur and sulfur effect is receiving more and more attention. However, combinatorial examination of sulfur application on kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) production has rarely been reported. The development of chloroplasts is an important factor in crop yield and quality formation. And the changes of the ultrastructure of chloroplasts can be used to evaluate plant tolerance to fertilizer. Therefore, in this paper, chloroplast structure and fruit quality in kiwi under sulfur treatments at different concentrations ( $0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, \text{ and } 3.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) was observed in order to provide scientific reference for reasonable

收稿日期: 2016-09-18 接受日期: 2016-12-29

基金项目: 贵州省科技厅农业攻关项目 [黔科合 NY 字(2009)3022]; 国家自然科学基金(31460481)

作者简介: 尹显慧, 女, 副教授, 主要从事果树病虫害绿色防控及农产品质量安全研究。E-mail: xhyin@gzu.edu.cn

\*通信作者 Author for correspondence. E-mail: gzlyh126@126.com

application of sulfur in kiwifruit production.【Methods】The pot experiment was conducted to regularly observe the new growth after transplanting the 1-year-old grafted ‘Miliang No.1’ seedlings in pots filled with soil, organic fertilizer and sulfur powder. The field experiment was conducted in the winter of 2014 to study the effects of sulfur fertilizer on the ultrastructure of mesophyll cells, kiwifruit exterior (single fruit weight, longitudinal diameter, transverse diameter, pleurocaulis and fruit shape index) and interior quality (firmness, soluble solid content, vitamin C content, soluble sugar content, titratable acid content, sugar content/titratable acidity and soluble protein content), and the content of total sulfur in kiwifruit collected in the following September after the annual furrow application of base fertilizers of sulfur at above mentioned doses and 10 kg organic fertilizer per plant.【Results】The growth of new shoots was stimulated by applying appropriate amount of sulfur. When the concentration was greater than  $2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , the new shoot was shorter with smaller, curly and yellow leaves compared with the control group, and with the growth of the kiwi vines, the leaves withered and abscised. The results showed that kiwifruit plant growth was inhibited by excessive sulfur. Soil properties changed obviously after applying sulfur fertilizer for 2 years. The pH in the soil treated with sulfur at  $1.0\text{--}2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  was in the range that was suitable for kiwi growth. Moreover, the soil organic matter, total nitrogen contents and available phosphorus content in the soil treated with sulfur at  $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  were significantly higher than those in the other treatment groups. The chloroplast ultrastructure was destroyed under sulfur deficiency and excessive sulfur. The main symptoms included the poor uniformity in cell size and arrangement, increased intercellular space, thinner cell walls, more osmium-phillic particles, and decreased number of chloroplast and starch grains compared with the normal leaves. Under the treatment of excessive sulfur, the granum thylakoids in chloroplast expanded with disordered and irregular arrangement, and the chloroplast structure was destroyed and even cracked. In all treatments with sulfur, the shape of chloroplast was in regular fusiform around the intracellular surface with clear grana and stroma; the grana had many layers of thylakoids densely and neatly arranged. There were a lot of starch grains in the chloroplasts and the leaf cells were uniform and neatly arranged in the treatment with sulfur at  $1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . In the treatment groups with sulfur higher than  $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , fruit weight and fruit shape index increased and fruit length became longer. Therefore, the treatments improved the exterior quality of kiwi fruit. The treatments with low and medium concentrations of sulfur could significantly improve the intrinsic quality, and the effect of sulfur treatment at  $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  was the best, with fruit firmness, soluble solids content, vitamin C content, soluble sugar content and soluble protein content increased by 32.65%, 5.45%, 9.16%, 11.76% and 26.92%, respectively, compared with those in the control. The total sulfur content in fruit increased with the increase of sulfur concentration applied. However, in all treatments, the total sulfur content in fruit was below the safety limit in crops.【Conclusion】Using appropriate concentration of sulfur and organic fertilizer could improve soil nutrient, increase thylakoid layers in the grana and starch grains in the chloroplasts, improve the appearance and nutritional quality of kiwi fruit, and ensure fruit safety. It was recommended that annual furrow application of sulfur at doses of  $1.5\text{--}2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  and organic fertilizer in winter could be used in kiwifruit production.

**Key words:** Kiwifruit; Sulfur; Chloroplast ultrastructure; Quality

硫(S)是植物正常生长发育必需的矿质元素之一,其需求量仅次于氮、磷、钾,在植物生长发育及代谢过程中具有重要的生理功能,是生命物质的结构组分,并且参与生物体内许多重要的生化反应,缺硫

条件下植物的正常生长会严重受阻,甚至枯萎、死亡<sup>[1-2]</sup>。长期以来,大量的硫随着秸秆或收获物从土壤中移走,且含硫燃料和农药被限制使用,过去常用的含硫肥料被不含硫或含少量硫的化肥替代,同时

氮、磷、钾肥的不平衡施用掩盖了土壤和作物缺硫的现象<sup>[3-4]</sup>。刘崇群等<sup>[5]</sup>曾对我国南方 10 省土壤硫状况进行研究,根据土壤硫的收、支和硫肥对作物的效应估算,中国南方缺硫土壤面积约占耕地总面积的 1/4。土壤有效硫不足逐渐成为许多地区农业生产发展的制约因素<sup>[6-7]</sup>,因此对土壤硫含量和施硫效应的研究日益受到重视。

根据硫素的化学形态,含硫肥料主要分为硫酸盐和硫元素 2 种类型,常用的硫肥有硫磺、硫酸铵、普通过磷酸钙、硫酸钾、硫酸钙等,其中硫磺的含硫量最高、成本较低,虽其当年效果次于后 4 种硫肥,但能减少硫酸根的淋洗流失和保证作物生长季肥效的连续释放,因此后效显著<sup>[8-9]</sup>。目前,已有硫素营养对小麦<sup>[10]</sup>、花生<sup>[11]</sup>、大豆<sup>[12]</sup>、烤烟<sup>[13]</sup>、水稻<sup>[6]</sup>和大蒜<sup>[14]</sup>等产量及品质影响的相关报道。

猕猴桃(*Actinidia deliciosa*)作为世界公认的新兴水果,以富含维生素 C 著称,具有很高的营养价值,对保持人体健康具有重要作用<sup>[15]</sup>。张风云等<sup>[16]</sup>通过盆栽研究了猕猴桃对硫的耐性,发现土壤施硫质量分数低于 800 mg·kg<sup>-1</sup> 时对猕猴桃地上部分有较大的促进作用,当质量分数大于 1 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时有毒害作用。细胞亚显微结构的变化与植物耐肥性呈负相关关系,可作为植物耐肥性评价的细胞学指标<sup>[17]</sup>。而叶绿体是影响植物生长的重要细胞器之一,其发育程度是作物产量和质量形成的重要因素。近年来许多学者研究了不同条件下植物叶绿体超微结构的变化,任丽花等<sup>[18]</sup>通过叶绿体超微结构的变化特征,探讨了叶菜用甘薯对不同氮肥用量的响应;韩艳婷等<sup>[19]</sup>发现在 Mg<sup>2+</sup> 缺乏的情况下,葡萄叶片叶绿体结构发生变异,叶绿素和碳代谢受阻;同样地, Ostaszewska 等<sup>[20]</sup>通过叶肉细胞的超微结构变化分析了拟南芥在长期缺硫条件下线粒体的异质化。而对猕猴桃施硫肥条件下叶片超微结构和品质影响的研究还未见报道。为此,笔者结合贵州省修文县猕猴桃种植园区生态条件,研究了土壤施用不同浓度硫磺粉和有机肥对猕猴桃叶绿体结构和果实品质的影响,旨在为贵州种植园区施用合适浓度的硫肥及提高猕猴桃品质提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

‘米良一号’猕猴桃嫁接苗(以该品种果实种子

播种的实生苗为砧木),树龄 1 a,用于盆栽试验;树龄 18 a ‘米良一号’,每 666.7 m<sup>2</sup> 种植 74 株,其中雌株 68 株,T 型架栽培,树势整齐一致,管理水平中等,用于田间试验。

精制有机肥:总养分≥4%,且有机质≥30%(贵州吉龙生态科技有限公司)。

供试硫肥:硫磺粉(含硫量 95%)。

### 1.2 试验设计

1.2.1 盆栽试验 试验于 2014 年 12 月—2015 年 5 月在贵州省贵阳市花溪区贵州大学试验基地进行。供试土壤类型为黄壤,将土壤、有机肥和硫磺粉混匀后,盛装在塑料桶中,每盆移栽 1 株 1 a 生猕猴桃嫁接苗。施硫质量浓度为 S<sub>0.5</sub>:0.5 kg·m<sup>-3</sup> 硫磺粉(即 1 m<sup>3</sup> 土壤中加入 0.5 kg 的硫磺粉)+10 kg 有机肥;S<sub>1.0</sub>:1 kg·m<sup>-3</sup> 硫磺粉+10 kg 有机肥;S<sub>1.5</sub>:1.5 kg·m<sup>-3</sup> 硫磺粉+10 kg 有机肥;S<sub>2.0</sub>:2.0 kg·m<sup>-3</sup> 硫磺粉+10 kg 有机肥;S<sub>2.5</sub>:2.5 kg·m<sup>-3</sup> 硫磺粉+10 kg 有机肥;S<sub>3.0</sub>:3.0 kg·m<sup>-3</sup> 硫磺粉+10 kg 有机肥;S<sub>0</sub>:10 kg 有机肥(空白对照)。每个处理 5 次重复。

1.2.2 田间试验 于 2014 年 12 月 24 日,在贵阳市修文县龙场镇马关村益众农场猕猴桃种植基地进行试验。平均海拔 1 250 m,年平均气温 17 ℃,年平均降雨量 1 100 mm。供试果园土壤类型为黄壤,试验前在果园内随机多点采集深 0~60 cm 的混合土样作土壤背景值,其 pH 为 7.16,有机质质量分数( $\omega$ ,下同)为 31.85 g·kg<sup>-1</sup>,全氮为 1.78 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮为 105.35 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷为 4.80 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾为 106.72 mg·kg<sup>-1</sup>,有效硫为 15.67 mg·kg<sup>-1</sup>。

根据猕猴桃树冠大小估算,每株根系土壤体积按 1~1.5 m<sup>3</sup> 计算。试验采用随机区组设计,设 S<sub>0.5</sub>、S<sub>1.0</sub>、S<sub>1.5</sub>、S<sub>2.0</sub>、S<sub>2.5</sub>、S<sub>3.0</sub> 和对照 S<sub>0</sub> 共 7 个处理(同盆栽试验)。每个处理 3 株猕猴桃树,硫磺粉和有机肥混合均匀后每株采用环状沟施法作底肥施用,4 次重复,各处理之间设保护行。试验期间,所有处理管理水平一致,田间管理按照当地猕猴桃栽培技术进行。

### 1.3 盆栽猕猴桃植株生长情况观察

定期观察不同硫处理猕猴桃植株的生长情况,包括植株的生长势,叶片的颜色、大小及焦枯脱落情况,植株的存活率等。于 2015 年 4 月 1 日测量植株新萌发枝梢的枝长、茎粗和单叶面积,每个处理重复测定 9 次,取平均值。

### 1.4 园区猕猴桃根系土壤理化性质测定

2016年5月16日采集田间试验猕猴桃根系土壤(施硫后2.5 a),分别测定不同浓度硫处理下土壤pH和有机质、全氮、有效硫、有效磷和有效钾含量。

### 1.5 透射电镜样品制备与观察

2015年9月15日,选取田间试验园区猕猴桃1 a生枝条上从顶端向下数第4~5枚幼嫩叶,用手术刀将叶片剪切至长、宽1 cm的组织块,放入事先配制好的2.5%(φ)戊二醛磷酸缓冲液配制的固定液中,在4℃条件下固定2 h以上。然后将组织块取出用0.1 mol·L<sup>-1</sup>磷酸漂洗液漂洗15 min,3次重复,接着用1%(φ)锇酸固定液固定2~3 h,最后用0.1 mol·L<sup>-1</sup>磷酸漂洗液漂洗15 min,3次重复。将固定好的组织块用50%(φ,下同)乙醇在4℃条件下处理15~20 min。弃去溶液,用70%乙醇在4℃条件下处理15~20 min。弃去溶液,用90%乙醇在4℃条件下处理15~20 min。弃去溶液,用90%乙醇+90%(φ,下同)丙酮(1:1)溶液在4℃条件下处理15~20 min。弃去溶液,用90%丙酮在4℃条件下处理15~20 min。最后用100%丙酮在室温条件下处理3次,每次15~20 min。将脱水处理的组织块用纯丙酮+包埋液(2:1)室温处理24 h。弃去溶液,用纯丙酮+包埋液(1:2)室温处理24 h。弃去溶液,用纯包埋液37℃处理24 h。将包埋好的样品置于37℃烘箱内过夜,再将样品置于45℃烘箱内12 h,最后将样品置于60℃烘箱内48 h。用超薄切片机(德国莱卡Leica ultracut R型透射电镜)将干燥好的样品切成70 nm厚度的切片,然后用3%(ω)醋酸铀-枸橼酸铅双染色法对切片染色,最后对切片进行透射电镜(JEM1230型,日本JEOL公司)观察、拍片。

### 1.6 品质测定项目

2015年9月17日田间试验园区猕猴桃果实成熟后,按小区收获,各小区随机采集100个猕猴桃果实,带回实验室测定其品质、单果质量、纵径、横径及侧径,并计算果形指数。

果实品质测定参照文献[21]的方法:果实硬度使用GY-1水果硬度计测定;维生素C含量采用2,6-二氯酚靛酚法测定;可溶性总糖含量采用蒽酮比色法测定;可滴定酸含量采用酸碱滴定法测定;果实采摘7 d后后熟软化,分别从各处理中选取硬度均匀一致的猕猴桃采用手持式折光仪测定可溶性固形物含量。

### 1.7 猕猴桃果实中全硫含量测定

果实采摘后,利用HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>消煮硫酸钡比浊法<sup>[22]</sup>测定全硫含量:称取0.5 g样品于试管中,加4粒玻璃珠和2 mL浓HNO<sub>3</sub>。管口放小漏斗后静置过夜。将试管插入消煮器中加热至150℃,消煮1 h。通过漏斗加入2 mL 60%(φ)HClO<sub>4</sub>,缓慢加温至235℃消煮2 h。除去漏斗加1 mL HCl,150℃加热20 min。取出样品冷却,加35 mL水和10 mL缓冲盐溶液,定容至50 mL。过滤至150 mL烧杯中,加0.3 g BaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O晶体,在磁力搅拌器上搅拌1 min。取下静置1 min后在440 nm处比色。

### 1.8 数据分析

用SAS统计软件对数据进行单因子方差分析,Tukey's *F*检验不同处理间差异显著性(*P*<0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 硫对盆栽猕猴桃生长的影响

2.1.1 植株形态观察 定期观察各处理猕猴桃植株生长的形态表现,发现S<sub>0</sub>、S<sub>0.5</sub>、S<sub>1.0</sub>、S<sub>1.5</sub>、S<sub>2.0</sub>处理猕猴桃植株生长情况良好,新梢较长,叶片鲜绿,叶片较大。而S<sub>2.5</sub>和S<sub>3.0</sub>处理猕猴桃植株的生长势较弱,抽生的新梢较短,叶片较小且卷曲,叶片偏黄,且随着猕猴桃植物的不断生长,后期叶片出现焦枯和脱落现象,随后植株死亡。

2.1.2 硫对猕猴桃新萌发枝梢的影响 硫对猕猴桃新萌发枝梢的影响如表1所示。猕猴桃新萌发枝梢的枝长及单叶面积随施硫量的增加呈“增加-降低”的变化趋势。硫质量浓度为1.5 kg·m<sup>-3</sup>时,猕猴桃新萌发枝梢的枝长及单叶面积最大,植株生长最旺盛;其次是1.0 kg·m<sup>-3</sup>处理,植株生长较好;硫质量浓度为3.0 kg·m<sup>-3</sup>时,猕猴桃新萌发枝梢的枝长及单叶面积最小,植株生长最弱。而茎围受硫的影响较小,施硫质量浓度为0.5~3.0 kg·m<sup>-3</sup>时,施硫处理与不施硫

表1 硫对猕猴桃新萌发枝梢的影响  
Table 1 Effect of sulfur treatment on new shoot growth of kiwifruit

处理 Treatment	枝长 Branch length/cm	茎围 Stem diameter/cm	单叶面积 Leaf area/cm <sup>2</sup>
S <sub>0</sub>	5.63±0.50 de	0.50±0.06 abc	30.66±0.42 b
S <sub>0.5</sub>	8.27±0.12 c	0.55±0.09 a	34.33±1.10 b
S <sub>1.0</sub>	9.97±0.30 b	0.53±0.10 ab	41.80±3.15 a
S <sub>1.5</sub>	11.60±0.22 a	0.52±0.06 ab	42.14±2.12 a
S <sub>2.0</sub>	6.27±0.17 d	0.51±0.04 ab	32.03±5.02 b
S <sub>2.5</sub>	5.27±0.20 e	0.48±0.10 bc	28.48±3.17 bc
S <sub>3.0</sub>	4.73±0.26 e	0.45±0.07 c	24.41±1.89 c

注:表中数据为平均数±标准误,不同字母代表经Tukey's *F*检验在*P*<0.05水平差异显著。下同。

Note: Data are mean±SE. Different letters indicate significant difference by Tukey's *F* test (*P*<0.05). The same below.

处理无显著差异,但茎围仍随施硫量的增加而下降。说明施用适量的硫磺,猕猴桃植株新梢生长较长,叶片较大,对猕猴桃植株的生长有促进作用。而硫磺施用过多,猕猴桃植株新梢生长较短,叶片较小,对猕猴桃植株的生长有抑制作用。

## 2.2 硫对园区猕猴桃根系土壤的影响

从表2可以看出,施硫2 a后土壤性质发生了明显变化。其中pH值随着施硫浓度的增加逐渐下降,硫质量浓度为1.0~2.0 kg·m<sup>-3</sup>时,土壤的pH(5.5~6.5)

是猕猴桃适宜生长的范围。土壤中有效硫含量随着处理浓度的增加而增加,硫质量浓度为3.0 kg·m<sup>-3</sup>的有效硫质量分数最高,比对照增加了35.61 mg·kg<sup>-1</sup>,与其他处理差异显著,而其余处理组间差异不显著。有机质、全氮、有效磷和有效钾含量随着施硫浓度的增加出现先增后降趋势,其中1.5 kg·m<sup>-3</sup>硫处理后土壤的有机质和有效磷含量最大,比对照增加了68.52%和80.91%,与其余处理差异显著;硫处理浓度为1.5~2.0 kg·m<sup>-3</sup>的猕猴桃全氮含量较高,显

表 2 硫对猕猴桃根系土壤 pH 值和肥力的影响

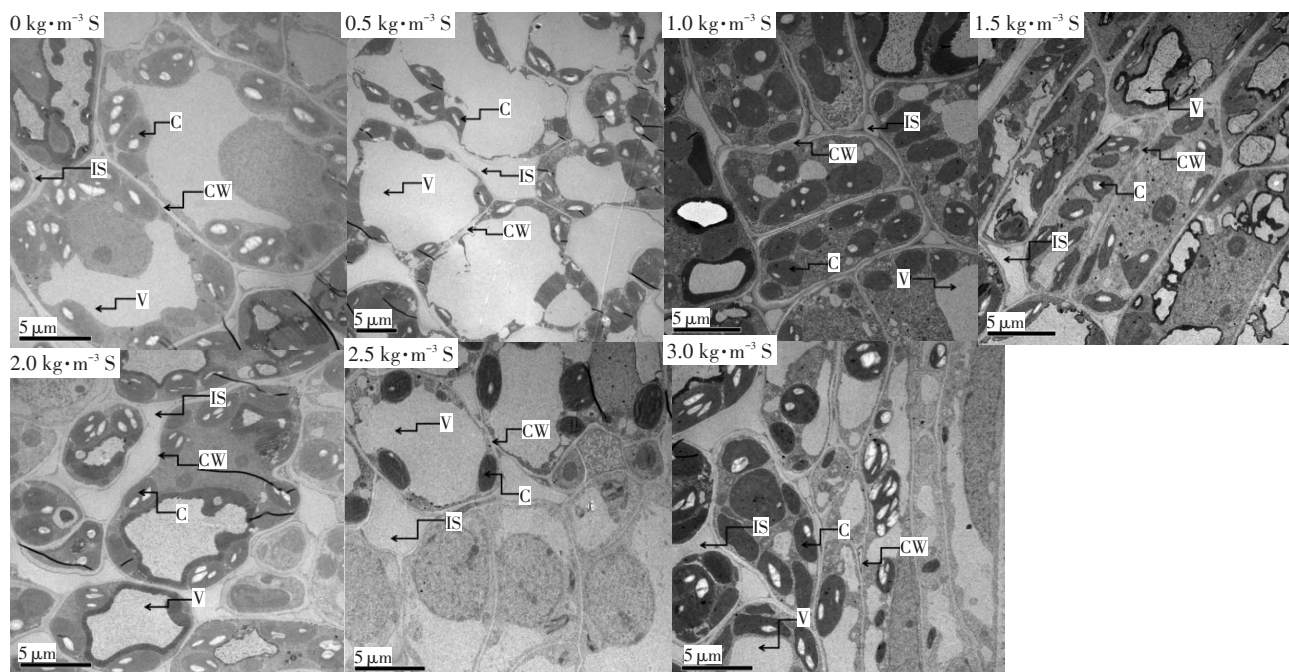
Table 2 Effect of sulfur on soil pH and fertility in kiwifruit root zone

处理 Treatment	pH	ω(有机质) Organic matter content/(g·kg <sup>-1</sup> )	ω(全氮) Total nitrogen content/(g·kg <sup>-1</sup> )	ω(有效硫) Available sulfur content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	ω(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	ω(有效钾) Available potassium content/(mg·kg <sup>-1</sup> )
S <sub>0</sub>	7.10±0.03 a	41.74±2.48 d	1.16±0.08 bc	50.37±1.26 b	15.30±0.42 d	1.27±0.05 b
S <sub>0.5</sub>	6.70±0.04 b	44.24±0.31 d	1.21±0.01 bc	50.64±1.21 b	15.95±0.57 d	1.34±0.01 ab
S <sub>1.0</sub>	6.12±0.03 c	48.10±0.94 c	1.26±0.02 b	51.38±1.51 b	21.20±0.16 c	1.41±0.03 ab
S <sub>1.5</sub>	5.53±0.02 cd	70.34±0.81 a	1.88±0.11 a	56.09±1.42 b	27.68±2.16 a	1.47±0.08 ab
S <sub>2.0</sub>	5.56±0.04 cd	65.51±0.87 b	1.76±0.05 a	55.94±3.34 b	24.36±0.48 b	1.58±0.02 a
S <sub>2.5</sub>	5.47±0.01 cd	41.00±0.79 de	1.07±0.02 bc	59.05±2.32 b	6.31±0.32 e	1.36±0.01 ab
S <sub>3.0</sub>	5.38±0.01 d	37.56±0.43 e	1.02±0.04 c	85.98±3.74 a	2.79±0.40 f	0.47±0.02 c

著高于其他处理组;以硫质量浓度2.0 kg·m<sup>-3</sup>的有效钾含量最高,与对照组和施硫质量浓度3.0 kg·m<sup>-3</sup>处理差异显著,但与其他处理差异不显著。

## 2.3 硫对园区猕猴桃叶片细胞结构的影响

田间施硫9个多月后采样分析发现,不施硫猕猴桃叶片细胞大小均一,排列整齐紧密,细胞间隙较小,而不同质量浓度硫处理后对猕猴桃叶片细胞结构具有明显的影响(图1)。低质量浓度0.5 kg·m<sup>-3</sup>硫



IS. 细胞间隙;C. 叶绿体;V. 液泡;CW. 细胞壁。

IS. Intercellular space; C. Chloroplast; V. Vacuole; CW. Cell wall.

图 1 不同硫浓度处理对猕猴桃叶片细胞结构的影响

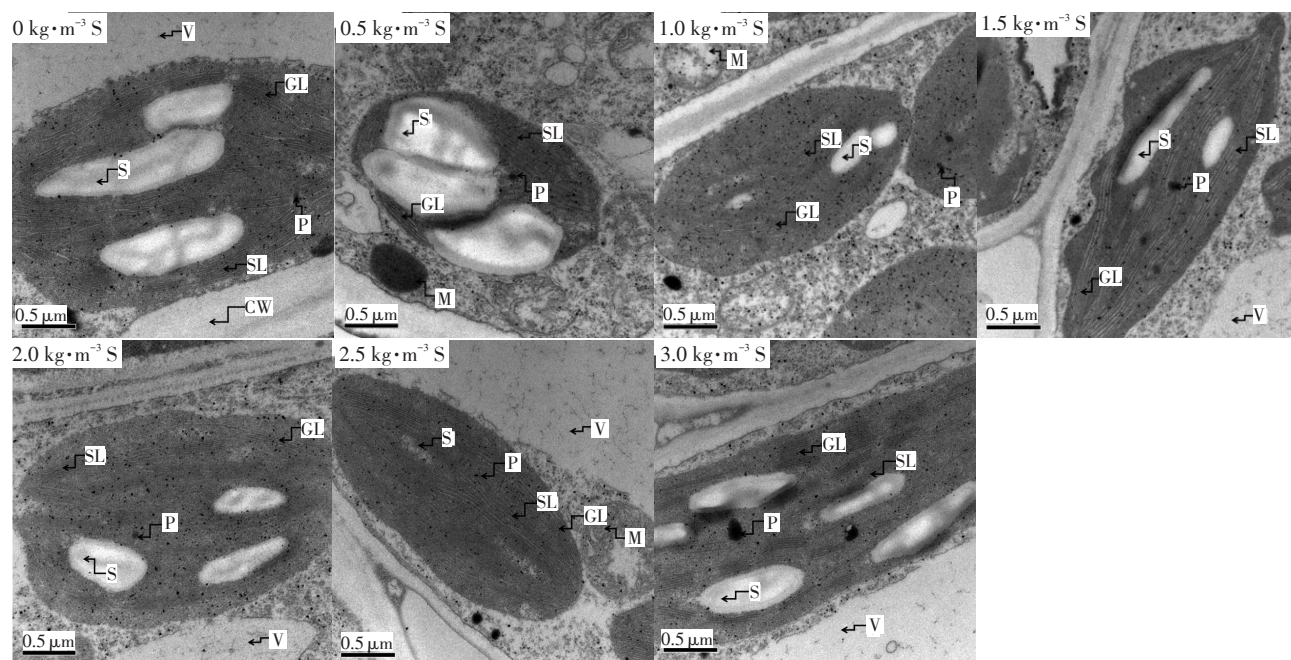
Fig. 1 Effects of different sulfur contents on the cell structure of kiwi leaves

处理叶片细胞大小均匀程度和排列整齐度较差,细胞间隙增大,细胞壁变薄且叶绿体数量减少;  $1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  硫处理的猕猴桃叶片细胞大小均一,排列整齐紧密,细胞间隙较小,细胞壁较厚,叶绿体数量多且环绕在细胞壁周围;  $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  硫处理叶片细胞大小均一,排列整齐紧密,与  $1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  硫处理相比,细胞间隙增大,细胞壁变薄,叶绿体数量减少且在细胞内排布不均匀;当硫处理质量浓度为  $2.0 \sim 3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,叶片细胞大小明显不均且部分畸形生长,排列整齐程度差,细胞间隙增大,细胞壁变薄,叶绿体数量减少且在细胞内分布不均匀,淀粉粒在叶绿体内分布不均,其中  $3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  硫处理中部分叶绿体被淀粉粒撑破。

#### 2.4 硫对园区猕猴桃叶绿体超微结构的影响

从图2可以看出,对照组(硫处理质量浓度为  $0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )猕猴桃叶片叶绿体体积呈规则的梭形,所含淀粉粒大小适中,基粒、基质片层清晰,只是在基粒类囊体垛叠排列上致密和整齐度较差。而不同浓度

硫处理后猕猴桃叶片叶绿体超微结构具有明显的变化。与对照相比,低质量浓度硫处理( $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )的叶片叶绿体基粒片层和基质片层变化幅度不大,只是淀粉粒体积增大,叶绿体偏离细胞壁一定的距离;当硫处理质量浓度为  $1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,叶绿体呈规则的梭形,紧贴细胞壁,环绕在细胞内表面,基粒、基质片层清晰,基粒类囊体垛叠多且排列致密整齐,叶绿体内富含小颗粒的淀粉粒;随着浓度增加,在  $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  硫处理下的叶绿体也呈梭形,但体积变大且不规则,两端狭小且中部边缘凹陷,基粒片层和基质片层排列疏松,嗜钺颗粒增多;  $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  硫处理的叶绿体体积减小且呈不规则的椭圆形,两端出现部分裂解,基粒片层和基质片层较对照模糊且排列疏松,淀粉粒减少,嗜钺颗粒增多;硫处理质量浓度为  $2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,叶绿体呈不规则梭形,基粒片层和基质片层排列疏松,几乎没有淀粉粒,嗜钺颗粒增多;当质量浓度高达  $3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,叶绿体呈不规则梭形,体积膨大,基粒片层和基质片层较对照模糊且排列疏松,淀粉粒体



V. 液泡; M. 线粒体; S. 淀粉粒; GL. 基粒片层; SL. 基质片层; P. 嗜钺颗粒; CW. 细胞壁。

V. Vacuole; M. Mitochondrion; S. Starch; GL. Granum lamella; SL. Stroma lamella; P. Plastoglobulus; CW. Cell wall.

图2 不同硫质量浓度处理对猕猴桃叶片叶绿体超微结构的影响

Fig. 2 Chloroplast ultrastructure in mesophyll cell under treatments at different sulfur concentrations

积缩小,嗜钺颗粒增多,边缘有一定程度的裂解。

#### 2.5 硫对猕猴桃外观品质的影响

不同水平的硫处理均能提高猕猴桃果实的单果质量,且在  $0 \sim 3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,随着施硫量的增加,猕猴桃

果实的单果质量呈“增加-降低”的变化趋势(表3)。其中  $2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  硫处理的效果最好,  $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  硫处理的效果次之,两处理间差异不显著,其平均单果质量分别比不施硫处理提高了 18.81% 和 11.19%;

表 3 硫对猕猴桃外观品质的影响

Table 3 Effect of sulfur on kiwifruit exterior quality

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass/g	纵径 Longitudinal diameter/cm	横径 Transverse diameter/cm	侧径 Pleurocaulis diameter/cm	果形指数 Fruit shape index
S <sub>0</sub>	103.67±8.31 b	61.11±3.23 b	51.02±1.78 c	42.28±3.21b	1.23±0.09 c
S <sub>0.5</sub>	107.24±16.55 b	70.82±2.10 ab	56.35±3.43 a	42.98±2.90 ab	1.25±0.10 c
S <sub>1.0</sub>	108.40±14.58 b	68.36±2.76 ab	54.75±2.15 ab	43.02±1.87 ab	1.23±0.06 c
S <sub>1.5</sub>	109.10±5.22 b	67.25±3.23 ab	54.03±1.50 ab	43.86±3.42 ab	1.27±0.06 c
S <sub>2.0</sub>	115.28±13.18 ab	69.69±1.98 ab	52.78±3.56 bc	45.93±3.10 a	1.34±0.13 bc
S <sub>2.5</sub>	123.17±8.76 a	78.60±5.00 a	56.41±6.01 a	44.31±1.11 ab	1.40±0.10 ab
S <sub>3.0</sub>	108.33±6.89 b	76.32±4.32 a	52.49±4.21 bc	43.65±2.11 ab	1.45±0.09 a

注:表内数据为平均数±标准差,不同小写字母表示经 LSD 多重比较差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Data are presented as mean±s, different small letters indicate significant difference at  $P < 0.05$  by LSD's multiple range test. The same below.

0.5 kg·m<sup>-3</sup>硫处理的效果最差,平均单果质量仅比不施硫处理提高 3.44%,与不施硫处理差异不显著。果形指数是猕猴桃外观品质评价的重要指标,‘米良一号’猕猴桃果实为圆柱形,与不施硫处理相比,施硫量低于 2.0 kg·m<sup>-3</sup>对果形指数没有显著影响,而施硫量高于 2.0 kg·m<sup>-3</sup>会使果形指数增加,果实变长,从而提高猕猴桃果实的外观品质。

## 2.6 硫对猕猴桃内在品质的影响

猕猴桃果肉的硬度能反映果实内部的化学品质,是贮藏过程中最重要的品质指标之一,也是最能反映猕猴桃货架期长短的指标。由表 4 可见,当施硫质量浓度为 2.0 kg·m<sup>-3</sup>时,猕猴桃果实的硬度最大,与不施硫处理差异显著;硫质量浓度低于 2.0 kg·m<sup>-3</sup>,随着施硫量的增加,果实的硬度随之增大;而施硫质量浓度高于 2.0 kg·m<sup>-3</sup>时,果实的硬度反而逐渐下降。

各施硫处理果实中维生素 C 质量分数均大于

表 4 硫对猕猴桃内在品质的影响

Table 4 Effect of sulfur on kiwifruit interior quality

处理 Treatment	硬度 Firmness/ (kg·cm <sup>-2</sup> )	ω(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	ω(可溶性糖) Soluble sugar content/%	ω(可滴定酸) Titratable acid content/%	糖酸比 Sugar content/ Titratable acidity	ω(可溶性蛋白) Soluble protein content/(mg·g <sup>-1</sup> )	ω(可溶性固形物) Soluble solids content/%
S <sub>0</sub>	2.91±0.08 c	1 157.1±32.9 b	9.97±0.41 b	1.15±0.05 b	8.64±0.21	0.26±0.04 d	13.40±0.34 b
S <sub>0.5</sub>	3.50±0.22 b	1 244.3±100.2 a	10.95±0.30 ab	1.15±0.09 b	9.40±0.14	0.27±0.02 d	13.43±0.21 b
S <sub>1.0</sub>	3.56±0.35 b	1 248.4±90.1 a	11.02±0.61 ab	1.18±0.05 b	9.30±0.32	0.29±0.01 c	13.53±0.10 b
S <sub>1.5</sub>	3.64±0.28 ab	1 252.3±123.3 a	11.06±0.32 ab	1.18±0.02 b	9.37±0.09	0.33±0.05 b	13.87±0.12 ab
S <sub>2.0</sub>	3.86±0.21 a	1 263.2±120.9 a	11.14±0.07 a	1.18±0.06 b	9.40±0.16	0.33±0.01 b	14.13±0.23 ab
S <sub>2.5</sub>	3.09±0.19 c	1 219.5±138.7 ab	10.45±0.15 ab	1.31±0.07 a	7.94±0.11	0.42±0.02 a	14.17±0.39 ab
S <sub>3.0</sub>	3.00±0.30 c	1 214.5±87.6 ab	10.29±0.23 ab	1.31±0.09 a	7.80±0.08	0.33±0.06 b	14.57±0.40 a

注:除可溶性固形物是采后 7 d 软化后测量,其余数据均为采摘当天测定,且纵列数据均为同一批次测定。

Note: Soluble solid contents were measured 7 days after harvest when fruit had softened, and the other data were collected on the day of fruit harvest. Data in the same columns were determined at the same time.

1 200 mg·kg<sup>-1</sup>,高于不施硫处理,但处理间差异不显著。其中 2.0 kg·m<sup>-3</sup>硫处理果实中维生素 C 质量分数最高,达 1 263.22 mg·kg<sup>-1</sup>,与不施硫处理差异显著。继续增加施硫量,果实中维生素 C 含量反而下降。说明为提高猕猴桃果实中维生素 C 的含量,施硫质量浓度为 2.0 kg·m<sup>-3</sup>较适宜。

可溶性糖含量是决定猕猴桃果实甜度的关键因素。随着施硫量的增加,猕猴桃果实中可溶性糖含量呈“增加-降低”的变化趋势,施硫处理的可溶性糖含量均高于不施硫处理,但处理间差异不显著。

施硫质量浓度为 2.0 kg·m<sup>-3</sup>时,果实中可溶性糖质量分数最高,为 11.14%,比不施硫处理高 11.74%,差异显著;而施硫质量浓度为 3.0 kg·m<sup>-3</sup>时,可溶性糖质量分数仅比不施硫处理高 3.21%,且差异不显著。

猕猴桃中的可滴定酸以枸橼酸为主,随着施硫量的增加,可滴定酸含量呈增加趋势。当施硫质量浓度为 0~2.0 kg·m<sup>-3</sup>时,果实中可滴定酸含量变化不显著,而施硫质量浓度高于 2.0 kg·m<sup>-3</sup>,可滴定酸含量显著上升。其中施硫质量浓度为 3.0 kg·m<sup>-3</sup>时,可滴定酸质量分数最高,比不施硫处理高 13.91%,且差异

显著。说明施硫处理增加了猕猴桃果实中可滴定酸含量,且硫质量浓度越高,果实中可滴定酸含量越高。

猕猴桃果实中可溶性糖含量及可滴定酸含量与其成熟度、贮藏性和品质密切相关,两者比值即糖酸比,决定了果实的口感。若糖酸比过高,果实味道偏甜而单调;若糖酸比过低,则味道偏酸而难以食用。由表4可知,随施硫质量浓度的增加,猕猴桃果实的糖酸比呈“增加-降低”的变化趋势。当施硫质量浓度为 $0.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,果实糖酸比最高,果实最甜;而施硫质量浓度为 $3.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,果实糖酸比最低,果实偏酸。

猕猴桃后熟软化可食用时的可溶性固形物质量分数一般为13%~14%。随着施硫量的增加,果实中可溶性固形物含量也相应增加。当施硫质量浓度为 $3.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,果实中可溶性固形物质量分数最高,为14.57%,与不施硫处理差异显著;而其余各处理间差异均不显著,但硫处理果实中可溶性固形物含量均比不施硫的高,说明硫可以提高猕猴桃果实中的可溶性固形物含量。

## 2.7 猕猴桃果实中全硫含量

由图3可知,随着施硫量的增加,猕猴桃果实中全硫含量也逐渐增加。施硫质量浓度为 $0.5\sim 3.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,猕猴桃果实中全硫质量分数为0.13%~0.26%。其中 $3.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 硫处理果实中全硫的质量分数最高,比不施硫处理多 $1.379\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,差异极显著;其次为 $2.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 硫处理,比不施硫处理多 $1.040\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,差异极显著;而 $0.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 硫处理增加得最少,仅比不施硫处理多 $0.099\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,差异不显著。

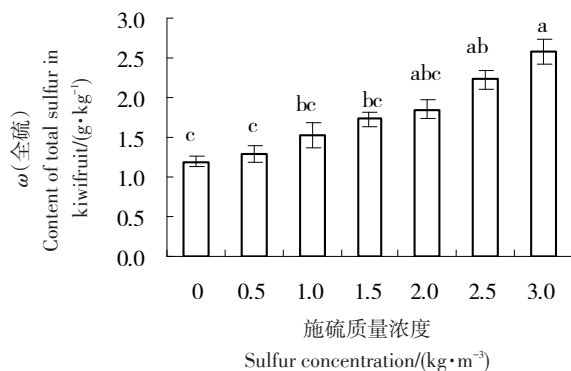


图3 硫对猕猴桃果实中全硫含量的影响

Fig. 3 Effect of sulfur application on the content of total sulfur in kiwi fruit

## 3 讨论

近年来,施用硫肥效果显著的报道逐年增多,硫

在改善土壤质量<sup>[23-24]</sup>、农作物的解毒<sup>[9]</sup>、防卫<sup>[25]</sup>和抗性<sup>[26]</sup>中具有重要作用,而且可以提高作物的产量和品质。冬季硫和有机肥混合后作底肥施用,2 a后发现猕猴桃根系土壤pH值随着施硫浓度增加明显下降,适量的硫还能明显地改善土壤养分,这与郑诗樟<sup>[9]</sup>研究硫肥对土壤性质影响的结果有相似之处,说明施用硫肥改变了土壤的有机代谢。笔者只测定了施硫后土壤的养分变化,但是对于不同供硫水平对猕猴桃根系、叶片和果实养分吸收及营养分布的变化情况还需进一步研究。

王庆仁等<sup>[27]</sup>采用扫描电镜和透射电镜并结合X-衍射显微探针分析技术进行了硫胁迫对油菜各器官影响的研究,直观地揭示了硫素营养对油菜细胞正常结构的维持和硫胁迫导致细胞结构和生理功能的异常现象。本试验中电镜观察表明,适当施用硫对维持叶片细胞和叶绿体结构具有重要作用,硫不足及硫过量均破坏了猕猴桃叶片叶绿体超微结构,主要表现为猕猴桃叶片细胞大小、均匀程度和排列整齐度较差,细胞间隙增大,细胞壁变薄,嗜银颗粒增多,叶绿体数量和淀粉粒量减少。李功藩等<sup>[28]</sup>证明类囊体结构的完整有序是光能转换正常有效进行的保证,而猕猴桃在施硫过量情况下叶绿体基粒类囊体膨胀和排列紊乱、不规则,叶绿体结构遭到破坏甚至部分裂解,这与Ostaszewska等<sup>[20]</sup>报道的拟南芥在长期缺硫下叶绿体超微结构变化的研究结果类似。本研究盆栽试验结果也表明,当施硫质量浓度为 $1\sim 1.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,猕猴桃植株生长较旺盛,而当施硫质量浓度大于 $2.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,猕猴桃植株的生长势较弱,抽生的新梢较短,叶片较小且卷曲,叶片偏黄,到花蕾期叶片出现焦枯和脱落现象,最后植株直接死亡。任丽花等<sup>[18]</sup>也报道了氮肥不足及施用过量均会对甘薯叶片叶绿体超微结构造成伤害,说明不同供硫水平与猕猴桃叶片叶绿体结构的关系密切。但硫不足或硫过量叶片叶绿体结构变化是否会引起叶绿素合成减少或受阻及相关功能基因表达差异,从而最终影响到植物光合作用的有效进行,还需要进一步研究。另外猕猴桃果实中的叶绿素代谢与猕猴桃的品质和贮存保鲜有密切的关系<sup>[29]</sup>,因此有必要继续研究硫处理对果实叶绿体细胞超微结构的影响。

在植物新陈代谢中,硫是硫甙、蛋白质、氨基酸及其他多种决定农作物营养品质化合物中的必需元素,而硫对农产品品质的影响程度主要取决于土壤



的理化性质和缺硫程度、农作物的种类、农产品的用途及其他生物影响因子<sup>[30]</sup>。本试验发现适量施硫可以改善猕猴桃果形指数,提高果实中的可溶性固形物、维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白的含量,提高猕猴桃的营养价值,这与施硫能增加甜菜块根糖分含量和改善小麦品质的研究结果一致<sup>[31-32]</sup>。

在本试验中,1.0 kg·m<sup>-3</sup>硫处理下,猕猴桃叶片细胞大小均一,排列整齐紧密,类囊体结构完整有序,但是施硫质量浓度为 2.0 kg·m<sup>-3</sup>时,猕猴桃的果实品质最好,这可能是因为不同发育程度的叶片硫素积累和再分配的形式不同。伸展到最大长度 60%~70%的叶片是硫素再分配的主要来源,在硫素营养供应正常的条件下,这种叶片中的硫素约有 90%被再次利用,主要保证植物生殖生长时期籽粒的需求;而硫供应充足时,随着环境介质中的硫素进入叶片数量增多,在叶片中会有硫素积累的现象,在硫胁迫条件下,叶片中的可溶性硫被合成有机硫固定在叶片中,不再输出<sup>[33]</sup>。

植物开花前硫主要分布于叶片中,成熟时叶片中的硫逐渐减少并向其他器官转移。对大多数作物而言,土壤有效硫的质量分数临界值为 12 mg·kg<sup>-1</sup>,当土壤中的有效硫含量在临界值以下时,植株体内硫的含量会随硫肥施用量的增加而增大<sup>[2]</sup>。本试验中也发现随着施硫量的增加,猕猴桃果实中全硫的含量也不断增加。因此,在农业生产上施用硫肥来提高猕猴桃产量和改善猕猴桃品质时一定要慎重,以防硫在猕猴桃果实中过量积累,硫在作物体内的安全质量分数一般为 0.1%~1.5%<sup>[34]</sup>。本试验所有处理猕猴桃果实中全硫的质量分数为 0.13%~0.26%,其含量在作物全硫含量安全范围内,因此在猕猴桃生产过程中施用 0.5~3.0 kg·m<sup>-3</sup>硫对果品来说是安全的。

## 4 结 论

施用适宜浓度的硫和有机肥,可较好地改善土壤养分,促进猕猴桃叶片细胞大小均一,基粒类囊体垛叠多且排列致密整齐,叶绿体数量和淀粉粒数量增多,并能较好地改善猕猴桃的外观品质和营养品质。因此,猕猴桃冬季施基肥时建议施用 1.5~2.0 kg·m<sup>-3</sup>硫磺和有机肥并作环状沟施处理。

### 参考文献 References :

[1] SINGH M I. A review of the sulphur research activities of the

- ICAR-AICRP micro and secondary nutrient project[J]. *Sulphur in Agriculture*, 1995, 19: 35-46.
- [2] RAUSCH T, WACHTER A. Sulfur metabolism: a versatile platform for launching defence operations[J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(10): 1360-1385.
- [3] 张秋芳. 作物硫素营养的生理作用及其胁迫研究[J]. *江西农业大学学报*, 2001, 23(5): 136-139.
- ZHANG Qiufang. Advances in the research on sulphur nutritional physiology and deficient-S stress in crops[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2001, 23(5): 136-139.
- [4] WEIL R R, MUGHOGHO S K. Sulfur nutrition of maize in four region of Malawi[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(4): 649-656.
- [5] 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.
- [6] 李娟, 林琼, 陈子冲, 章明清. 不同供硫水平对水稻生长和养分吸收的影响[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(11): 214-217.
- LI Juan, LIN Qiong, CHEN Zichong, ZHANG Mingqing. Effect of different levels of sulfur on rice growth and nutrients absorption [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(11): 214-217.
- [7] ERCOLI L, ARDUINI I, MARIOTTI M, LULLI L, MASONI A. Management of sulphur fertiliser to improve durum wheat production and minimize S leaching[J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 38(1): 74-82.
- [8] 包荣军, 郑树生. 土壤硫肥力与作物硫营养研究进展[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2006, 18(3): 37-40.
- BAO Rongjun, ZHENG Shusheng. Progress on soil sulfur fertility and crop sulfur nutrition[J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 2006, 18(3): 37-40.
- [9] 郑诗樟. 硫肥对土壤性质、重金属形态和作物生长的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- ZHENG Shizhang. Effect of sulphur fertilizers on soil properties, heavy metals fractions and crops growth[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [10] 邓占华, 卢树昌. 华北中部平原麦田土壤供硫水平及施硫肥效果研究[J]. *河北农业科学*, 2010, 14(2): 36-38.
- DENG Zhanhua, LU Shuchang. Study on sulfur content and sulfur fertilizer application in wheat soil in central North China Plain[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2010, 14(2): 36-38.
- [11] 王媛媛, 高波, 张佳蕾, 李向东. 硫肥不同用量对花生生理性状及产量、品质的影响[J]. *山东农业科学*, 2014, 46(12): 67-71.
- WANG Yuanyuan, GAO Bo, ZHANG Jialei, LI Xiangdong. Effects of different sulfur application rates on physiological characteristics, yield and quality of peanut[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2014, 46(12): 67-71.
- [12] 刘丽君. 硫素营养对大豆产量影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2005.
- LIU Lijun. Effect of sulfur on yields and quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill)[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2005.
- [13] 朱英华, 屠乃美, 肖汉乾, 王辉, 邓力超. 硫对烤烟生长发育及生理生化指标的影响[J]. *中国烟草学报*, 2008, 14(4): 28-32.
- ZHU Yinghua, TU Naimei, XIAO Hanqian, WANG Hui, DENG Lichao. Effect of sulfur on the growth and physiological and bio-

- chemical indices of flue-cured tobacco[J]. Chinese Acta Tabacaria Sinica, 2008, 14(4): 28-32.
- [14] 胡芳,王朴,石书兵,聂文魁,郭飞,刘正兴,院金谒. 硫肥对大蒜形态特征、抗病性和产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(1): 121-125.  
HU Fang, WANG Pu, SHI Shubing, NIE Wenkui, GUO Fei, LIU Zhengxing, YUAN Jinye. Effect of sulphur fertilizer on morphological characteristics, disease resistance and yield of the garlic[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(1): 121-125.
- [15] 龙友华,张承,龚芬,吴小毛,尹显慧. 叶面施硒对猕猴桃含硒量、镉铅积累及品质的影响[J]. 食品科学, 2015, 37(11): 74-78.  
LONG Youhua, ZHANG Cheng, GONG Fen, WU Xiaomao, YIN Xianhui. Effects of foliar application of selenium fertilizer on selenium content, accumulation of cadmium and lead, and fruit quality of kiwifruit[J]. Food Science, 2015, 37(11): 74-78.
- [16] 张凤云,毛富春,赵先贵. 猕猴桃对氯和硫的耐性研究[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(2): 37-40.  
ZHANG Fengyun, MAO Fuchun, ZHAO Xiangui. A study on the chlorine and sulphur tolerance of *Actinidia deliciosa*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2000, 15(2): 37-40.
- [17] TAKÁCS E, TÉCSI L. Effects of  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  ratio on photosynthetic rate, nitrate reductase activity and chloroplast ultrastructure in three cultivars of red pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. Journal of Plant Physiology, 1992, 140(3): 298-305.
- [18] 任丽花,余华,罗士炎,黄敏敏,蔡南通,邱永祥. 不同供氮水平对叶菜型甘薯生理指标及叶绿体结构的影响[J]. 福建农业学报, 2011, 26(3): 360-364.  
REN Lihua, YU Hua, LUO Tuyan, HUANG Minmin, CAI Nantong, QIU Yongxiang. Effects of nitrogen in physiological and chloroplast characteristics of vegetable sweet potato[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 26(3): 360-364.
- [19] 韩艳婷,杨国顺,石雪晖,刘昆玉,陈冲. 不同镁营养水平对红地球葡萄叶绿体结构及光合响应的影响[J]. 果树学报, 2011, 28(4): 603-609.  
HAN Yanting, YANG Guoshun, SHI Xuehui, LIU Kunyu, CHEN Chong. Effects of different magnesium concentrations on chloroplast ultrastructure and photosynthetic response of *Vitis vinifera* cv. Red Globe[J]. Journal of Fruit Science, 2011, 28(4): 603-609.
- [20] OSTASZEWSKA M, JUSZCZUK I M, KOŁODZIEJEK I, RYCHTER A M. Long-term sulphur starvation of *Arabidopsis thaliana* modifies mitochondrial ultrastructure and activity and changes tissue energy and redox status[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(7): 549-558.
- [21] 聂继云. 果品质量安全分析技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2009: 10-38.  
NIE Jiyun. Fruit quality and safety analysis technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 10-38.
- [22] 李西开. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学出版社, 1983.  
LI Youkai. Conventional analytical method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [23] 王利,高祥照,马文奇,刘艳华. 中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1219-1226.  
WANG Li, GAO Xiangzhao, MA Wenqi, LIU Yanhua. Sulphur consumption in Chinese agriculture: situation and outlook[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(6): 1219-1226.
- [24] KATIYAR A K, JAT A S, SINGH S. Response of sulphur fertilizers on the yield and oil content of mustard in sandy loam soils of Uttar Pradesh[J]. The Journal of Rural and Agricultural Research, 2014, 14(1): 52-54.
- [25] 郑长焰. 硫对圆叶决明若干生理代谢以及产量和质量的影响[D]. 福州:福建农林大学, 2007.  
ZHENG Changyan. Effect of sulphur on several physiological metabolisms, yield and quality of *Chamecrista rotundifolia* (CPI92985)[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007.
- [26] 慕康国,赵秀琴,李健强,刘西莉. 矿质营养与植物病害关系研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 84-90.  
MU Kangguo, ZHAO Xiuqin, LI Jianqiang, LIU Xili. Progressing on the relation between mineral nutrients and plant disease[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(1): 84-90.
- [27] 王庆仁,林葆. 硫胁迫对油菜超微结构及超细胞水平硫分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 46-49.  
WANG Qingren, LIN Bao. Effect of sulfur stress on ultrastructure and sulfur distribution in vegetative and reproductive parts of oil-seed rape[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(1): 46-49.
- [28] 李功藩,蔡琬平,吴亚君,刘东,张忠伟,黄峻. 叶绿体结构状态与光化学活性的关系[J]. 植物生理学报, 1987, 13(3): 295-301.  
LI Gongfan, CAI Wanping, WU Yajun, LIU Dong, ZHANG Zhongwei, HUANG Jun. The relationship between structural status and photochemical activity of chloroplasts[J]. Acta Phytophysiological Sinica, 1987, 13(3): 295-301.
- [29] 任亚梅. 猕猴桃果实叶绿素代谢及生理特性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.  
REN Yamei. Study on chlorophyll metabolism and physiology characteristics of kiwifruit[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2009.
- [30] 郑诗樟,刘志良. 硫肥对土壤质量和生物有效性的研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 688-693.  
ZHENG Shizhang, LIU Zhiliang. Advances on the availability of sulphur fertilizers for soil quality and biology[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 46(5): 688-693.
- [31] 刘勤,曹志洪. 作物硫素营养与产品品质研究进展[J]. 土壤, 2000, 32(3): 151-154.  
LIU Qin, CAI Zhihong. Advances on sulphur nutrition of crop for product quality[J]. Soil, 2000, 32(3): 151-154.
- [32] RILEY N G, ZHAO F J, MCGRATH S P. Availability of different forms of sulphur fertilisers to wheat and oilseed rape[J]. Plant and Soil, 2000, 222(1): 139-147.
- [33] THOMAS S G, HOCHING T J, BILSBORROW P E. Effect of sulphur fertilisation on the growth and metabolism of sugar beet grown on soils of differing sulphur status[J]. Field Crops Research, 2003, 83(3): 223-235.
- [34] 曾宪坤. 中国硫肥发展前景展望[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(7): 5-7.  
ZENG Xiankun. An outlook for China's sulfur fertilizer industry[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2003, 18(7): 5-7.