

## 调酸培肥技术对井冈蜜柚果园土壤及果实产量和品质的影响

梁喜欢<sup>1, 2</sup>, 李秀秀<sup>1, 2#</sup>, 黎鑫林<sup>3</sup>, 伍亮<sup>3</sup>, 曾天宝<sup>3</sup>, 陈先茂<sup>1, 2</sup>, 谢江<sup>1, 2</sup>,  
邓国强<sup>1, 2</sup>, 关贤交<sup>1, 2</sup>, 邹雪兰<sup>1</sup>, 旷允慧<sup>3</sup>, 戴星照<sup>2</sup>, 彭春瑞<sup>1, 2</sup>, 陈金<sup>1, 2\*</sup>

[1. 井冈山红壤研究所 (江西省农业科学院井冈山分院), 江西 吉安 343016; 2. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所 / 国家红壤改良工程技术研究中心 / 农业农村部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室 / 农业农村部酸化土重点实验室 / 国家农业环境宜春观测试验站, 江西 南昌 330200; 3. 井冈山农业科技园管理委员会, 江西 吉安 343016]

**摘要:** 井冈蜜柚是江西省果业三大品牌之一, 生产中不合理的肥料施用导致的土壤酸化是柚园土壤退化的重要表现之一, 也是制约蜜柚果实产量和品质的关键因素。选取江西省吉安市 6 年树龄金沙柚, 在 2020—2022 年开展田间定位试验, 试验设置农民习惯施肥技术和调酸培肥技术 (有机肥替代 30% 化肥 + 石灰 + 硅钙钾镁肥 + 绿肥周年间作) 2 个处理, 研究调酸培肥技术对土壤及果实产量和品质的影响。结果表明, 与农民习惯施肥技术相比, 采用调酸培肥技术 3 年, 土壤 pH 平均提高了 0.93 ( $P < 0.05$ ), 土壤有机质含量平均提高了 19.17% ( $P < 0.05$ ), 土壤碱解氮、有效磷、速效钾、交换性镁、交换性钙含量显著增加, 土壤质量指数显著提高了 0.25 ( $P < 0.05$ ), 蜜柚叶片氮、钾、镁和钙含量均随之显著提高。同时, 施用调酸培肥技术蜜柚产量显著提高了 25.99% ( $P < 0.05$ ), 果实维生素 C 含量和糖酸比分别提高了 5.85% 和 23.60% ( $P < 0.05$ ), 可滴定酸含量显著降低。此外, 采用调酸培肥技术 3 年, 产值平均增加了 3.41 万元·hm<sup>-2</sup>, 经济效益平均增加了 2.28 万元·hm<sup>-2</sup>。综上, 调酸培肥技术能够降低红壤区蜜柚果园土壤酸度, 提高土壤和叶片养分含量, 改善树体营养, 提升果实产量和品质, 提高果园经济效益, 是改善土壤质量、实现井冈蜜柚果园提质增效的有效措施。

**关键词:** 红壤; 调酸培肥; 井冈蜜柚; 产量; 品质

柑橘 (*Citrus reticulata* Blanco) 是世界第一大类水果, 柚类作为柑橘的重要种类之一, 在我国广泛种植, 面积达  $9.33 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>, 年产量约 500 万 t, 约占全球产量的 52%, 是农民经济增收的重要来源<sup>[1-2]</sup>。井冈蜜柚是江西省吉安市生产栽培的具有地方特色的优质蜜柚品牌, 据统计, 2021 年井冈蜜柚果园总面积为  $2.56 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>, 投产面积  $1.32 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>, 总产量  $8.34 \times 10^4$  t<sup>[3]</sup>。近年来, 井冈蜜柚产业快速发展, 已成为带动农业增效、农民

增收的优势产业, 是最具吉安特色的富民支柱产业之一, 有利于实现当地乡村振兴<sup>[4]</sup>。井冈蜜柚主要种植在红壤丘陵坡地和低山缓坡地, 受氮肥施用不合理、水土流失严重、酸沉降等因素影响, 土壤酸化日益严重<sup>[5-6]</sup>, 且土壤酸化进一步加剧了土壤养分淋失、生物多样性下降等土壤退化问题, 进而制约了蜜柚产量和果实品质的提高<sup>[7-9]</sup>。因此, 改善施肥技术、降低柚园土壤酸度并提升肥力对蜜柚提质增效和产业可持续发展具有重要意义。

有机肥替代部分化肥<sup>[10-11]</sup>、土壤调理剂施用<sup>[12-14]</sup>及绿肥间作<sup>[15-17]</sup>是改良土壤和提高柑橘果实品质的常用措施。俞巧钢等<sup>[11]</sup>在浙江省衢州市 10 年树龄柑橘园开展了 2 年定位试验, 结果表明, 与化肥处理相比, 施用猪粪或鸡粪替代化肥处理阻控了土壤酸化, 全氮、有效磷、速效钾和有机质含量分别提高 16.1% ~ 54.7%、15.9% ~ 30.1%、12.9% ~ 36.9% 和 6.8% ~ 39.6%, 柑橘产量提高 5.1% ~ 19.5%。石灰和硅钙钾镁肥是常用的土壤酸化调理剂, Zhang 等<sup>[13]</sup>研究显示, 在蜜柚果园

收稿日期: 2023-07-13; 录用日期: 2023-09-04

基金项目: 江西省重大科技研发专项 (20203ABC28W014); 江西现代农业科研协同创新专项 (JXXTCX201904); 江西省吉安市科技计划项目 (吉财教指 [2019] 55 号); 井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目 (20222-051246)。

作者简介: 梁喜欢 (1995-), 研究实习生, 硕士, 研究方向为作物栽培与土壤改良。E-mail: liangxihuan0101@163.com。李秀秀 (1992-), 助理研究员, 博士, 研究方向为土壤改良与培肥。E-mail: lixiuxiu\_tfs@foxmail.com。梁喜欢和李秀秀共同为第一作者。

通讯作者: 陈金, E-mail: chenjin2004777@163.com。

施用石灰可有效提高土壤 pH 和土壤氮、磷、钙、镁有效性;栗方亮等<sup>[14]</sup>在福建平和柚园连续 3 年开展单施硅钙钾镁肥的定位试验,发现施用硅钙钾镁肥可有效增强土壤抗酸化能力,提高土壤磷、钾、钙和镁的有效性,提高柚子产量和果实维生素 C、可溶性糖含量。间作绿肥是“以园养园,用养结合”的重要措施,梁琴等<sup>[17]</sup>在四川南充 4 年树龄柑橘园间作豆科绿肥南选山豆、光叶紫花苕和白三叶,结果显示,3 种绿肥均可提高土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量,并使柑橘增产 13.6% ~ 34.9%。然而,目前果园多以单一技术措施应用为主,存在效果单一、见效慢、易返酸等问题<sup>[18]</sup>,亟须研究长效调酸培肥综合技术模式。

因此,本研究于 2020 年选取 6 年树龄井冈蜜柚特色品种金沙柚果园,构建了以有机肥替代化肥、增施石灰与硅钙钾镁肥和周年间作豆科绿肥为核心的红壤蜜柚果园长效调酸培肥技术,通过田间定位试验,系统研究调酸培肥技术对土壤酸度和肥力、叶片养分、蜜柚产量及品质的影响,以期为红壤果园土壤质量提升、果实优质高产和可持续发展提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2020 年 3 月至 2022 年 12 月在江西省吉安市井冈山农业科技园(27° 8' 21" N, 114° 51' 41" E)进行。该地属亚热带季风湿润气候,年均温为 17.1 ~ 18.6 °C,年平均降水量为 1487 mm。试验果园坡度 3° 左右,土壤类型为第四纪红黏土母质发育的红壤,试验开始时土壤基础理化性质为 pH 4.57,有机质 11.34 g · kg<sup>-1</sup>,碱解氮 25.20 mg · kg<sup>-1</sup>,有效磷 14.31 mg · kg<sup>-1</sup>,速效钾 212.62 mg · kg<sup>-1</sup>,交换性镁 123.49 mg · kg<sup>-1</sup>,交换性钙 684.57 mg · kg<sup>-1</sup>。试验蜜柚园果树于 2014 年移栽,品种为井冈蜜柚主推品种金沙柚,株行距为 4 m × 5 m,目标产量为 24750 kg · hm<sup>-2</sup>。

### 1.2 试验设计

试验共设置 2 个处理,分别为农民习惯施肥(CK)和调酸培肥技术模式(T)。试验采用随机区组设计,每个处理 3 次重复,共 6 个小区,每个小区 30 棵果树。2 个处理蜜柚施肥量均为 N 495 kg · hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 297 kg · hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 495 kg · hm<sup>-2</sup>。农民习惯施肥处理(CK)为有机肥替代 7.5% 化

肥和行间自然生草,其中有机肥以总施氮量为基准替代 7.5% 纯氮,有机肥中磷、钾不足部分用化肥补足,有机肥全部作基肥施用。调酸培肥技术模式集成了有机肥替代 30% 化肥、增施土壤改良剂、周年间作绿肥等 3 种单项技术,其中有机肥以总施氮量为基准替代 30% 纯氮,有机肥中磷、钾不足部分用化肥补足,有机肥在基肥和壮果肥各施用 50%。土壤改良剂硅钙钾镁肥和熟石灰在采果后全园撒施,硅钙钾镁肥每年施用 1 次,熟石灰每 3 年施用 1 次,2020 年 10 月第 1 次撒施,肥料及改良剂具体施用量见表 1。在 5 和 10 月按照 60 kg · hm<sup>-2</sup> 分别撒播夏季绿肥竹豆和冬季绿肥毛叶苕子,分别于 9 月底和次年 4 月底采用机械翻压还田。各处理每年分 4 次施肥,分别在采果后 1 周(11 月,基肥)、3 月上旬(萌芽肥)、5 月中上旬(保果肥)和 7 月中上旬(壮果肥)进行,各时期 N 施用比例为 40 : 15 : 15 : 30, K<sub>2</sub>O 施用比例为 30 : 10 : 10 : 50; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 施用比例为基肥 : 壮果肥 = 70 : 30。各时期均沿滴水线处沟施,深度为 15 ~ 20 cm。

表 1 不同处理肥料及改良剂施用量 (kg · hm<sup>-2</sup>)

处理	牛粪 (干基)	化肥			改良剂	
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	硅钙钾 镁肥	熟 石灰
CK	3569.71	457.875	287.595	427.185	0	0
T	14278.85	346.500	258.390	223.740	1500	3000

供试肥料为尿素(N 46%)、钙镁磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、硫酸钾(K<sub>2</sub>O 50%)、硅钙钾镁肥(pH 8 ~ 11, Si ≥ 6%、Ca ≥ 14%、K<sub>2</sub>O ≥ 3%、Mg ≥ 2%)和堆沤腐熟牛粪(含水率 68%,干基含有机质、N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别为 54.5%、1.04%、0.27%、1.90%)。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 土壤样品采集与测定

在 10 月下旬果实成熟期,每个小区选择 5 株代表性果树,避开施肥区,在树冠滴水线下采集 0 ~ 20 cm 土壤样品,每个小区 5 株树的土壤样品为 1 个混合样,剔除石块、根系等后风干、过筛待测。

土壤 pH 采用电位法测定,有机质含量采用高温外热重铬酸钾氧化法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用钼锑抗比色法测定,速效钾采用火焰光度法测定,交换性镁和交换性钙采用 EDTA 络合滴定法测定<sup>[19]</sup>。参照 Liu 等<sup>[20]</sup>的方法

计算土壤质量指数 (SQI)。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i$$

式中,  $W_i$  表示第  $i$  个指标的权重,  $S_i$  表示第  $i$  个指标得分,  $n$  表示变量个数。

### 1.3.2 叶片样品采集与测定

在 10 月下旬果实成熟期, 每个小区选择 5 株代表性果树, 在每株果树东南西北 4 个方位取当年生的营养性春梢的倒 2、倒 3 叶, 每株取 10 片, 每个小区 5 株树的叶片样品为 1 个混合样, 105℃ 杀青 30 min, 75℃ 烘干, 研磨待测。

叶片氮含量采用自动定氮仪法 (瑞士 BUCHI K360) 测定, 磷含量采用钼锑抗比色法测定, 钾含量采用火焰光度计 (FP6410) 测定, 钙和镁含量采用 EDTA 络合滴定法测定<sup>[19]</sup>。

### 1.3.3 产量测定

在 10 月下旬果实成熟期, 每个小区选择 5 株代表性果树, 测定单株果数、单果重, 每个小区 30 棵果树全部收获测定产量, 按照《井冈蜜柚商品果》(DB36/T 810—2020) 分级标准, 将特级 (果重 800 ~ 1000 g) 和一级果 (果重 700 ~ 800 或 1000 ~ 1100 g) 作为商品果计算商品果率。

### 1.3.4 果实品质测定

测产时, 每个小区选择 5 株代表性果树, 在每株果树东南西北 4 个方向各采集大小中等的果实 2 个, 每个小区 5 株树的果实样品为 1 个混合样。直尺测定果实横径和纵径, 并计算果形指数, 测定果皮厚度。采用蒽酮比色法测定糖含量, 2, 6-二氯酚酚测定法测定维生素 C 含量, 酸碱滴定法测定可滴定酸含量, 并计算可食率、糖酸比<sup>[21-22]</sup>。

$$\text{果形指数} = \text{果实纵径} / \text{果实横径}$$

$$\text{可食率} (\%) = (\text{果实重量} - \text{外果皮重} - \text{内果皮重} - \text{种子重量}) / \text{果实重量} \times 100$$

$$\text{糖酸比} = \text{可溶性糖含量} / \text{可滴定酸含量}$$

### 1.3.5 经济效益

以熟石灰 850 元 · t<sup>-1</sup>、硅钙钾镁肥 4000 元 · t<sup>-1</sup> 计算改良剂成本, 以牛粪 300 元 · t<sup>-1</sup>、尿素 3000 元 · t<sup>-1</sup>、硫酸钾 6000 元 · t<sup>-1</sup>、钙镁磷肥 1200 元 · t<sup>-1</sup> 计算肥料成本, 以竹豆种子 10 元 · kg<sup>-1</sup>、毛叶苕子种子 19 元 · kg<sup>-1</sup> 计算种子成本, 以绿肥翻压机械成本 1500 元 · hm<sup>-2</sup>、改良剂施用人工成本 1200 元 · hm<sup>-2</sup> 计算机械和人工成本, 果园日常施肥、修剪、采果等以 5000 元 · hm<sup>-2</sup> 计算管理成本, 以商品果 10 元 · kg<sup>-1</sup>、非商品果 7 元 · kg<sup>-1</sup> 计算产值。

$$\text{总投入} (\text{万元} \cdot \text{hm}^{-2}) = (\text{改良剂成本} + \text{肥料成本} + \text{种子成本} + \text{机械和人工成本} + \text{管理成本}) / 10000$$

$$\text{产值} (\text{万元} \cdot \text{hm}^{-2}) = (\text{商品果产量} \times \text{商品果单价} + \text{非商品果产量} \times \text{非商品果单价}) / 10000$$

$$\text{经济效益} (\text{万元} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{产值} - \text{总投入}$$

### 1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2016 进行数据整理和绘图, 采用 SPSS 26.0 进行  $t$ -test 和主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤性质

从表 2 可知, 调酸培肥技术显著提高了土壤 pH、有机质和养分含量。与 CK 处理相比, T 处理土壤 pH 在第 1 年施用石灰后由 4.61 快速升高至 6.42, 随后逐渐下降, 在第 3 年降至 4.89, 3 年平均提高了 0.93 ( $P < 0.05$ ); 土壤有机质含量 3 年平均提高了 19.17% ( $P < 0.05$ ), 碱解氮含量平均提高了 15.16% ( $P < 0.05$ ), 有效磷含量平均提高了 32.73% ( $P < 0.05$ ), 速效钾含量平均提高了 3.91% ( $P < 0.05$ ), 交换性镁含量平均增加了 34.39% ( $P < 0.05$ ), 交换性钙含量平均增加了 42.26% ( $P < 0.05$ )。

表 2 调酸培肥技术对土壤性质的影响

年份	处理	pH	有机质 (g · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 (mg · kg <sup>-1</sup> )	有效磷 (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾 (mg · kg <sup>-1</sup> )	交换性镁 (mg · kg <sup>-1</sup> )	交换性钙 (mg · kg <sup>-1</sup> )
2020	CK	4.61 ± 0.10b	11.32 ± 0.19a	23.88 ± 1.51b	13.81 ± 0.35b	251.85 ± 2.32a	122.03 ± 5.82b	614 ± 36b
	T	6.42 ± 0.16a	11.78 ± 0.24a	31.84 ± 1.14a	17.91 ± 0.37a	250.85 ± 4.43a	154.13 ± 4.91a	923 ± 38a
2021	CK	4.61 ± 0.12b	11.26 ± 0.71a	44.92 ± 1.04a	17.84 ± 0.94b	233.20 ± 3.08a	122.92 ± 8.39b	600 ± 32b
	T	5.33 ± 0.06a	13.61 ± 0.72a	50.65 ± 2.23a	24.33 ± 0.63a	234.49 ± 3.30a	168.02 ± 3.57a	868 ± 4a
2022	CK	4.63 ± 0.01b	11.27 ± 0.88b	51.67 ± 1.40a	21.23 ± 0.64b	221.67 ± 5.17b	129.06 ± 6.32b	503 ± 24b
	T	4.89 ± 0.06a	14.95 ± 0.03a	56.23 ± 1.15a	27.94 ± 0.92a	249.00 ± 5.00a	180.48 ± 9.18a	656 ± 36a
年份		**	NS	**	**	*	*	**
处理		**	**	**	**	*	**	**
年份 × 处理		**	*	NS	*	*	NS	*

注: 表中数据为平均值 ± 标准误。同一年份不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。\* 和 \*\* 表示差异显著 ( $P < 0.05$  和  $P < 0.01$ ), NS 表示差异不显著。下同。

T 处理土壤质量指数 (SQI) 较 CK 处理 3 年平均提高了 0.25 ( $P<0.05$ ), 第 3 年 SQI 低于前 2 年, 其主要原因是受 pH 下降的影响 (图 1)。

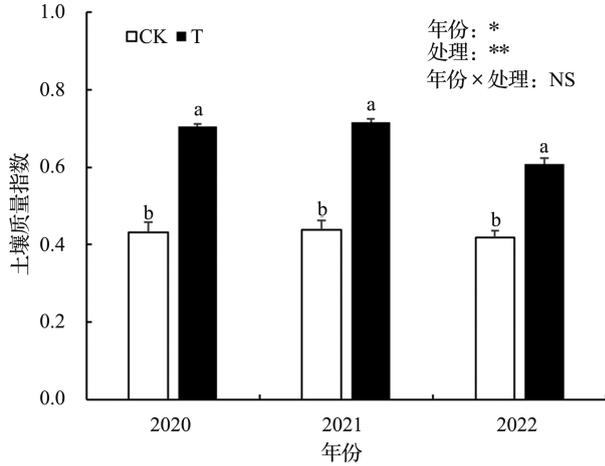


图 1 调酸培肥技术对土壤质量指数的影响

注: 同一年份不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.2 叶片养分

从表 3 可知, 调酸培肥技术显著提高了叶片氮、钾、镁和钙含量。与 CK 处理相比, T 处理叶

片氮含量 3 年平均提高了 11.25% ( $P<0.05$ ), 钾含量平均提高了 14.30% ( $P<0.05$ ), 镁含量平均增加了 5.80% ( $P<0.05$ ), 钙含量平均提高了 10.64% ( $P<0.05$ ), 磷含量无显著变化。

### 2.3 果实产量

从表 4 可知, 调酸培肥技术通过增加单株果数提高了果实产量。与 CK 处理相比, T 处理单株果数 3 年平均提高了 22.12% ( $P<0.05$ ), 产量平均增加了 25.99% ( $P<0.05$ ), 其中 2022 年差异显著; 商品果率增加但差异不显著。

### 2.4 果实品质

调酸培肥技术对果实外观品质的影响较小, 但显著改善了果实内在品质。与 CK 处理相比, T 处理果皮厚度 3 年平均降低了 7.5%, 其中 2022 年差异显著; 果形指数和单果重无显著变化 (表 5)。与 CK 处理相比, T 处理果实维生素 C 含量、糖酸比 3 年分别平均提高了 5.85% 和 23.60% ( $P<0.05$ ), 可滴定酸含量平均降低了 15.67% ( $P<0.05$ ); 可溶性糖含量和可食率分别平均增加了 3.12% 和 2.35%, 其中在 2022 和 2021 年分别达到显著水平 (表 6)。

表 3 调酸培肥技术对叶片养分含量的影响

( $g \cdot kg^{-1}$ )

年份	处理	氮	磷	钾	镁	钙
2020	CK	23.75 ± 0.27b	2.43 ± 0.10a	16.08 ± 1.22a	1.88 ± 0.04a	30.17 ± 0.36b
	T	28.32 ± 0.19a	2.38 ± 0.02a	17.78 ± 1.17a	1.89 ± 0.02a	35.62 ± 1.44a
2021	CK	23.18 ± 0.15b	2.44 ± 0.02a	20.50 ± 0.17a	3.22 ± 0.08b	26.32 ± 0.76a
	T	25.13 ± 0.24a	2.49 ± 0.06a	20.43 ± 0.07a	3.67 ± 0.08a	28.98 ± 0.97a
2022	CK	21.81 ± 0.20b	1.39 ± 0.04a	13.32 ± 0.67b	2.80 ± 0.13a	39.00 ± 0.74a
	T	23.02 ± 0.10a	1.43 ± 0.02a	18.82 ± 0.72a	2.80 ± 0.16a	41.05 ± 0.49a
年份		**	**	*	**	**
处理		**	NS	*	*	**
年份 × 处理		**	NS	NS	*	NS

表 4 调酸培肥技术对果实产量的影响

年份	处理	单株果数 (个)	产量 ( $kg \cdot hm^{-2}$ )	商品果率 (%)
2020	CK	27 ± 1b	12504.80 ± 402.83a	87.01 ± 1.12a
	T	36 ± 3a	15824.05 ± 1146.12a	87.07 ± 2.70a
2021	CK	26 ± 2a	7309.50 ± 416.44a	73.35 ± 1.74a
	T	33 ± 4a	8992.50 ± 75.50a	80.27 ± 2.71a
2022	CK	68 ± 4b	20979.75 ± 138.13b	58.46 ± 1.34a
	T	80 ± 2a	26581.50 ± 122.98a	64.03 ± 5.67a
年份		**	**	**
处理		**	**	NS
年份 × 处理		NS	NS	NS

表 5 调酸培肥技术对果实外观品质的影响

年份	处理	果形指数	果皮厚 (mm)	单果重 (g)
2020	CK	1.07 ± 0.06a	11.0 ± 0.5a	868.33 ± 42.09a
	T	1.13 ± 0.01a	10.7 ± 0.8a	883.33 ± 14.81a
2021	CK	1.05 ± 0.00a	9.0 ± 0.6a	573.37 ± 22.91a
	T	1.08 ± 0.01a	8.6 ± 0.1a	580.53 ± 5.18a
2022	CK	1.14 ± 0.02a	12.0 ± 0.1a	609.79 ± 10.66a
	T	1.15 ± 0.00a	10.3 ± 0.3b	665.22 ± 21.76a
年份		NS	**	**
处理		NS	NS	NS
年份 × 处理		NS	NS	NS

表 6 调酸培肥技术对果实内在品质的影响

年份	处理	维生素 C 含量 (mg · 100 g <sup>-1</sup> )	可溶性糖 (%)	可滴定酸 (%)	糖酸比	可食率 (%)
2020	CK	46.49 ± 0.02a	9.85 ± 0.56a	0.57 ± 0.02a	17.49 ± 1.17a	58.53 ± 0.45a
	T	48.15 ± 1.39a	9.87 ± 0.36a	0.49 ± 0.03a	20.56 ± 1.86a	59.69 ± 0.89a
2021	CK	51.52 ± 0.92b	9.32 ± 0.13a	0.50 ± 0.02a	18.71 ± 0.52a	60.18 ± 0.14b
	T	54.72 ± 0.46a	9.67 ± 0.31a	0.42 ± 0.02b	23.40 ± 1.85a	62.61 ± 0.21a
2022	CK	29.56 ± 0.33b	14.98 ± 0.09b	0.39 ± 0.00a	38.64 ± 0.23b	54.50 ± 1.46a
	T	32.15 ± 0.45a	15.68 ± 0.12a	0.32 ± 0.00a	48.52 ± 0.38a	54.99 ± 0.37a
年份		**	**	**	**	**
处理		*	NS	**	**	NS
年份 × 处理		NS	NS	NS	**	NS

### 2.5 经济效益

从表 7 可知, 调酸培肥技术提高了井冈蜜柚果园的经济效益。与 CK 处理相比, T 处理总投入随着改良剂、绿肥种子和人工、机械等投入成

本的增加而增加, 总投入 3 年平均增加了 1.13 万元 · hm<sup>-2</sup>, 但随着果园产量的提高, 产值平均增加了 3.41 万元 · hm<sup>-2</sup>, 经济效益平均增加了 2.28 万元 · hm<sup>-2</sup>。

表 7 调酸培肥技术对果园经济效益的影响

年份	处理	改良剂成本 (元 · hm <sup>-2</sup> )	肥料成本 (元 · hm <sup>-2</sup> )	种子成本 (元 · hm <sup>-2</sup> )	机械和人工成本 (元 · hm <sup>-2</sup> )	管理成本 (元 · hm <sup>-2</sup> )	总投入 (万元 · hm <sup>-2</sup> )	产值 (万元 · hm <sup>-2</sup> )	经济效益 (万元 · hm <sup>-2</sup> )
2020	CK	0	12000	0	0	5000	1.70	12.02	10.32
	T	8550	11850	1740	2850	5000	3.00	15.19	12.19
2021	CK	0	12000	0	0	5000	1.70	6.73	5.03
	T	6000	11850	1740	2850	5000	2.74	8.45	5.71
2022	CK	0	12000	0	0	5000	1.70	18.37	16.67
	T	6000	11850	1740	2850	5000	2.74	23.71	20.97

## 3 讨论

### 3.1 对土壤性质和叶片养分的影响

本研究表明, 有机肥替代 30% 化肥结合石灰及硅钙钾镁肥施用并周年间作豆科绿肥能够降低土壤酸度, 显著增加土壤有效养分含量, 提高叶片养分含量, 改善树体营养。李苹等<sup>[23]</sup>研究表明, 有机肥替代 30% 化肥提高了土壤肥力和柑橘产量; 李水祥等<sup>[24]</sup>报道, 有机肥替代化肥较单施化肥可显著提高‘三红蜜柚’叶片部分养分含量, 调节树体营养水平。其原因是施用有机肥可以直接提高土壤有机质和矿质养分含量, 进而增加土壤微生物多样性, 促进微生物代谢活性<sup>[25-26]</sup>; 同时, 有机质增加能够改善土壤结构, 增强土壤通气供肥性能<sup>[27-28]</sup>, 有利于植物根系对养分的吸收, 改善了树体矿质营养水平。石灰常用于降低土壤酸度, 尤其是在施用初期效果显著, 但存在返酸和土壤板结等问题<sup>[29-31]</sup>。罗玲等<sup>[32]</sup>研究表明, 有机肥和石灰混施相比于单施有机肥或单施石灰, 降低土壤酸度、提高土壤养分和酶活性的效

果更佳。硅钙钾镁肥是一种富含养分元素的碱性土壤调理剂, 可以有效克服施用石灰造成土壤板结的不足, 有效提高土壤 pH 和速效养分含量<sup>[14]</sup>。豆科绿肥可通过生物固氮作用增加土壤中的氮素, 改善土壤结构, 提高土壤有效养分含量, 但长期间作绿肥可能会增加土壤酸度<sup>[33]</sup>。本研究集成的调酸培肥技术较好地解决了单项技术缺陷, 稳定提升了土壤酸度, 提高了土壤有机质、养分含量和土壤质量指数, 实现了红壤果园土壤肥力提升。

### 3.2 对井冈蜜柚果实产量与品质的影响

有机肥替代化肥、石灰、种植绿肥和硅钙钾镁肥均能提高柑橘产量与改善果实品质<sup>[14, 17, 34-35]</sup>。本文研究的调酸培肥技术能够提高蜜柚果实产量和品质, 主要原因包括: (1) 有机肥含有多种矿质元素, 分解物质随时间在土壤中富集, 能满足树体所需, 提高产量, 改善品质<sup>[36]</sup>; (2) 豆科绿肥能活化土壤中难利用的磷、钾, 且绿肥翻压腐解后又可释放养分以供果树利用, 保证柑橘果实品质与产量<sup>[37]</sup>; (3) 硅钙钾镁肥富含钾、钙、镁等微量元

素,可以为果树提供各种养分,进而改善果实品质<sup>[38]</sup>。栗方亮等<sup>[14]</sup>研究表明,连续3年施入不同用量的硅钙钾镁肥均提高了平和蜜柚产量,改变了蜜柚维生素C含量和可溶性糖含量。这与本研究结果一致。此外,本研究调酸培肥技术施用石灰、硅钙钾镁肥和周年间作绿肥等增加了总投入成本,但显著提高了井冈蜜柚产量和商品果率,增加了产值,从而提高了经济效益。综上所述,调酸培肥技术在减少化肥施用和增加土壤碳含量的基础上,提升了果实产量和品质,提高了经济效益,是满足“两减”政策和“双碳”战略的可持续发展技术。

#### 4 结论

本研究构建的以“有机肥替代30%化肥+石灰+硅钙钾镁肥+绿肥周年间作”为核心的长效调酸培肥技术较农民习惯施肥技术显著降低了土壤酸度,提高了土壤养分含量,改善了树体营养,提升了蜜柚果实产量、品质 and 经济效益。因此,红壤果园长效调酸培肥技术模式是实现果园土壤质量提升和果实优质丰产的有效途径,有利于实现井冈蜜柚果园提质增效。

#### 参考文献:

- [1] 罗自威,陶晶霞,侯凯捷,等.养分优化管理实现蜜柚高产高效和降低碳排放[J].植物营养与肥料学报,2022,28(4):688-700.
- [2] Chen X H, Xu X Z, Lu Z Y, et al. Carbon footprint of a typical pomelo production region in China based on farm survey data [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 277: 124041.
- [3] 闵赛珍.吉安年鉴(2022)[M].北京:线装书局,2022.
- [4] 黄鹃,赵晓东,刘璐琳,等.井冈蜜柚产业发展现状、存在问题及对策建议[J].现代园艺,2019(1):43.
- [5] 李敬博,林伟杰,李湘君,等.琯溪蜜柚园土壤酸化特征研究[J].经济林研究,2020,38(1):169-176.
- [6] 刘娇娟,崔骏,刘洪宝,等.土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(1):173-184.
- [7] 余璇,文婷,马青龄,等.金沙柚果实品质与土壤、叶片、果实矿质养分的相关性分析[J].江西农业大学学报,2021,43(1):70-81.
- [8] Zhao X Q, Chen R F, Shen R F. Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils [J]. *Soil Science*, 2014, 179: 503-513.
- [9] 肖作义,马飞,柳开楼,等.红壤区旱地和水田土壤磷素状况及其流失风险[J].中国土壤与肥料,2021(1):282-288.
- [10] 姜翔鹤,王登亮,查波,等.菜桔与复合肥配施对常山胡柚产量、品质及抗冻性的影响[J].中国南方果树,2022,51(4):29-33.
- [11] 俞巧钢,孙万春,叶静,等.有机肥替代化肥对橘园土壤培肥及果实产量品质的影响[J].农业资源与环境学报,2023,40(4):755-762.
- [12] 黄双勇.施用土壤调理剂对强酸性蜜柚果园土壤及蜜柚产量和品质的影响[J].福建农业科技,2022,53(6):48-52.
- [13] Zhang S W, Yang W H, Muneer M A, et al. Integrated use of lime with Mg fertilizer significantly improves the pomelo yield, quality, economic returns and soil physicochemical properties under acidic soil of southern China [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 290: 110502.
- [14] 栗方亮,张青,王煌平,等.土壤调理剂对蜜柚产量、品质及土壤性状的影响[J].中国农学通报,2018,34(6):39-44.
- [15] 马昕伶,秦文婧,刘凯,等.竹豆间种对柑橘园土壤化学性质及微生物碳源代谢特征的影响[J].中国土壤与肥料,2021(5):200-206.
- [16] 唐红琴,李忠义,曾成城,等.不同绿肥种类和还田量对柑橘园土壤养分的动态影响[J].江苏农业科学,2021,49(16):214-219.
- [17] 梁琴,蒋进,周泽弘,等.四川丘陵柑橘园种植豆科绿肥的环境和增产提质效应[J].中国土壤与肥料,2021(6):143-148.
- [18] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等.我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J].中国科学院院刊,2018,33(2):160-167.
- [19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [20] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, et al. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 140: 74-81.
- [21] 曹胜,杨水芝,龚碧涯,等.有机无机肥配施碱性物料对柑橘园土壤性状和果实品质的影响[J].中国果树,2022(3):44-49.
- [22] 李江鹤,胡承孝,刘怀伟,等.连续五年氮、磷减量施用对琯溪蜜柚产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(6):1081-1091.
- [23] 李苹,付弘婷,逢玉万,等.有机肥配施化肥对柑橘养分吸收及土壤酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2022(3):39-45.
- [24] 李水祥,余文琴,吴世涛,等.有机肥替代部分化肥改善“三红蜜柚”树体营养及果实品质[J].热带作物学报,2020,41(4):649-654.
- [25] 韩建,尹兴,郭景丽,等.有机肥施用对红地球葡萄产量、品质及土壤环境的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(1):131-142.
- [26] 邓正昕,高明,熊子怡,等.有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响[J].环境科学,2023,44(12):6955-6964.
- [27] 孙梅.长期施用有机肥旱地红壤孔隙的分布与变化特征[D].长沙:湖南农业大学,2014:1-59.
- [28] Sarker T C, Incerti G, Spaccini R, et al. Linking organic matter

- chemistry with soil aggregate stability—Insight from  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 175–184.
- [29] 张昊青, 赵学强, 张玲玉, 等. 石灰和双氰胺对红壤酸化和硝化作用的影响及其机制 [J]. *土壤学报*, 2021, 58 (1): 169–179.
- [30] Che J, Zhao X Q, Zhou X, et al. High pH-enhanced soil nitrification was associated with ammonia-oxidizing bacteria rather than archaea in acidic soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 85: 21–29.
- [31] Goulding K W T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom [J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32 (3): 390–399.
- [32] 罗玲, 潘宏兵, 钟奇, 等. 石灰和有机肥对芒果园酸性土壤的改良效果及对芒果品质的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (3): 169–177.
- [33] Xiang X, Adams J M, Qiu C, et al. Nutrient improvement and soil acidification inducing contrary effects on bacterial community structure following application of hairy vetch (*Vicia villosa* Roth L.) in Ultisol [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2021, 312: 107348.
- [34] 陈大超, 张跃强, 甘涛, 等. 有机肥施用量及深度对柑橘产量和品质的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (4): 143–147.
- [35] 张影, 胡承孝, 谭启玲, 等. 施用石灰对温州蜜柑树体营养和果实品质及酸性柑橘园土壤养分有效性的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33 (4): 72–76.
- [36] 王文赞, 韩建, 倪玉雪, 等. 有机肥替代化肥氮对苹果产量、品质及温室气体排放的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29 (3): 437–448.
- [37] 田想, 张威, 伍玉鹏, 等. 绿肥种植配施减量氮肥对橘园土壤肥力及果实质量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2020 (6): 197–204.
- [38] 赵跃, 黄楠, 刘继培. 生物有机肥配施硅钙钾镁肥对西瓜产量、品质及土壤养分的影响 [J]. *农学学报*, 2022, 12 (9): 37–41.

#### Effects of acid regulation and fertilization techniques on the soil, fruit yield and quality of Jinggang pomelo orchard

LIANG Xi-huan<sup>1, 2</sup>, LI Xiu-xiu<sup>1, 2#</sup>, LI Xin-lin<sup>3</sup>, WU Liang<sup>3</sup>, ZENG Tian-bao<sup>3</sup>, CHEN Xian-mao<sup>1, 2</sup>, XIE Jiang<sup>1, 2</sup>, DENG Guo-qiang<sup>1, 2</sup>, GUAN Xian-jiao<sup>1, 2</sup>, ZOU Xue-lan<sup>1</sup>, KUANG Yun-hui<sup>3</sup>, DAI Xing-zhao<sup>2</sup>, PENG Chun-rui<sup>1, 2</sup>, CHEN Jin<sup>1, 2\*</sup> [1. Jinggangshan Institute of Red Soil (Jinggangshan Branch of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences), Ji'an Jiangxi 343016; 2. Soil and Fertilizer & Resources and Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/ Key Laboratory of Acidified Soil Improvement and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment of Yichun, Nanchang Jiangxi 330200; 3. Jinggangshan Agricultural Science and Technology Park Management Committee, Ji'an Jiangxi 343016]

**Abstract:** Jinggang pomelo is one of the three major brands in the fruit industry of Jiangxi province. Soil acidification caused by improper fertilizer application is one of the important feature of soil degradation in pomelo orchards and a key factor restricting the yield and quality of honey pomelo fruits. 6-year-old Jinsha pomelo trees in Ji'an, Jiangxi were selected, and field experiment was conducted from 2020 to 2022 including two treatments: farmers' fertilization practice and acid regulation and fertilization techniques (substituting 30% chemical fertilizer with organic fertilizer + lime + silicon-calcium-potassium-magnesium fertilize + green manure intercropping) to investigate the effects of acid regulation and fertilization techniques on soil, fruit yield and quality. The results showed that compared with farmers' fertilization practice, the acid regulation and fertilization techniques increased the soil pH by 0.93 units over 3 years ( $P<0.05$ ), and the organic matter content by 19.17% ( $P<0.05$ ). The contents of alkaline nitrogen, available phosphorus, available potassium, exchangeable magnesium, and exchangeable calcium in the soil were significantly increased. The soil quality index (SQI) was significantly improved by 0.25 ( $P<0.05$ ), and the nitrogen, potassium, magnesium, and calcium contents in the pomelo leaves were also significantly increased. Moreover, acid regulation and fertilization techniques significantly raised the yield by 25.99% ( $P<0.05$ ), and the vitamin C content and sugar-acid ratio of the fruits were elevated by 5.85% and 23.60%, respectively ( $P<0.05$ ), while the titratable acidity content significantly decreased. In addition, acid regulation and fertilization techniques enhanced the annual output value of pomelo orchard by RMB 34100 per hectare and the average economic benefits by RMB 22800 per hectare over 3 years. In summary, the acid regulation and fertilization techniques could reduce soil acidity in red soil pomelo orchards increase soil nutrient content and nutrient absorption in leaves, improve tree nutrition, enhance fruit yield and quality, enhance the economic benefits of orchards, and provide an effective measure to improve soil quality and enhance the quality of Jinggang pomelo orchards.

**Key words:** red soil; acid regulation and fertilization; Jinggang pomelo; yield; quality