

## 碱性土改良施肥对沃柑果园土壤性质的影响

喻莹, 贾晓晨, 夏心杰, 吕强, 谢让金, 马岩岩, 郑永强, 易时来\*

[西南大学柑桔研究所 / 国家柑桔工程技术研究中心 / 国家数字种植业(柑橘) 创新分中心, 重庆 400712]

**摘要:** 在等氮、磷、钾施肥条件下, 开展碱性土改良施肥对沃柑果园土壤性质的影响试验研究, 以期获得碱性土改良施肥技术方案, 为果园碱性土改良技术应用提供理论依据。以枳橙砧木高接8年的沃柑品种为研究对象, 分别设置常规复合肥(CF)、配方肥(尿素+硫酸钾+过磷酸钙, FF)、复合肥+硫磺粉(CF+S)、复合肥+脱硫石膏(CF+T)、配方肥+硫磺粉(FF+S)、配方肥+脱硫石膏(FF+T)6个处理, 研究不同碱性土改良施肥处理对沃柑果园土壤性质的影响。与CF处理相比, 不同碱性土改良施肥均增加了土壤总孔隙度与有机质含量, 分别以FF+T、CF+T处理相对最高, 比CF处理分别增加了9.2%、60.1%, 同时不同程度地增加了土壤营养元素含量, 且以FF+T处理相对最高; 各碱性土改良施肥处理均减小了土壤容重、pH值、Na<sup>+</sup>交换量, 且均以FF+T处理相对最小, 分别比CF处理减少了9.7%、15.6%、16.7%; FF+T处理的土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活力均相对最高, 分别较CF处理提高了17.8%、43.8%、48.8%、38.4%; 土壤碳排放通量以7月相对较大、12月相对较小, 均以FF+T处理最小, 分别比CF处理降低了25.5%、12.7%。各处理主成分综合得分高低顺序为FF+T>CF+T>FF+S>CF+S>FF>CF, 即碱性土改良施肥FF+T处理对改善沃柑果园土壤性质的效果相对最优。

**关键词:** 碱性土; 改良施肥; 土壤性质; 沃柑

土壤是柑橘果树的生存之基。碱性土壤是pH值>7.5的土壤, 而最适宜柑橘生长的土壤pH值5.5~6.5, 土壤酸碱性对土壤养分有效性、柑橘树体生长及产量、品质形成等有重要影响<sup>[1]</sup>。西南地区柑橘果园存在分布较广的石灰性紫色土, 由于该类土壤pH值较高, 影响大多土壤养分的有效性, 不利于柑橘的正常生长发育, 因此需进行土壤改良。研究发现, 土壤改良剂在碱性土壤中施用, 能够降低土壤容重、增加土壤气孔结构、增强土壤缓冲能力; 提高土壤有机质含量, 促进营养元素的释放和吸收; 降低土壤的碳氮比, 调节土壤pH值, 从而改善土壤生态环境<sup>[2]</sup>。土壤化学改良是经济有效的土壤改良方法之一, 通过施用石膏、过磷酸钙等钙制剂, 粗硫酸、硫磺粉等钙活化剂以及土壤抑盐剂、腐植酸等化肥与土壤改良剂来

改善土壤结构, 提高土壤肥力<sup>[3]</sup>。近年来, 我国施用脱硫石膏改良土壤应用越来越广泛, 国内外对碱土改良利用进行了深入研究, 而通过施用石膏来增加碱性土壤中Ca<sup>2+</sup>以代换土壤胶体上多余的Na<sup>+</sup>方法被广泛认可<sup>[4-5]</sup>。施用脱硫石膏对玉米<sup>[6]</sup>、向日葵<sup>[7]</sup>盐碱土的碱化度、有机质、盐分等土壤性质有明显的改善作用, 刘安鸿<sup>[8]</sup>、Zhao等<sup>[9]</sup>分别在不同地区、不同碱化度的土壤上施用石膏, 其土壤碱性磷酸酶、脲酶以及土壤总酶等活性均有不同程度的提高。研究表明, 碱性土蓝莓种植区主要施用硫磺粉<sup>[10-11]</sup>来降低其土壤pH值, 并结合施用硫酸钾、过磷酸钙等酸性肥料<sup>[12-13]</sup>来维持与降低土壤pH值; 付崇毅等<sup>[14]</sup>的研究发现, 南丰蜜橘园以单施150 mg/kg硫磺粉的土壤pH值下降幅度最大; 李亚东等<sup>[15]</sup>的研究表明, 越桔果园土壤pH值随着施硫量的增加而下降。目前, 有关土壤改良剂、酸性肥料等对石灰性紫色土柑橘园土壤改良的研究报道尚鲜见, 也未见通过土壤改良剂和酸性肥料混施改良柑橘园碱性土的相关报道。本研究拟以川渝石灰性紫色土沃柑果园为对象, 在等量氮、磷、钾养分投入下, 开展碱性土改良剂及生理酸性肥料配施对果园土壤性质的影响, 以

收稿日期: 2024-05-12; 录用日期: 2024-06-28

基金项目: 乡村振兴专项“万州丘陵山地玫瑰香橙园差异化精准变量施肥技术”; 国家重点研发计划课题(2018YFD0700602); 中国农业科学院柑桔研究所荆门专家工作站(二期)。

作者简介: 喻莹(1998-), 在读硕士研究生, 研究方向为果树栽培生理与施肥技术。E-mail: 1433483698@qq.com。

通讯作者: 易时来, E-mail: yishilai@swu.edu.cn。

期筛选出适宜柑橘园碱性土壤改良的材料及肥料配方,为柑橘优质丰产栽培提供理论依据与技术支持。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料与试验地概况

试验于2022—2024年在重庆市北碚区西南大学柑桔研究所沃柑果园进行。该果园地处29°45'N、106°22'E,为亚热带季风气候型,年均气温19.48℃,年均降水量1275.97 mm,年均日照时长1240.61 h。果园土壤背景状况见表1。供试肥料为尿素(N 46.7%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12.0%)、硫酸钾(K<sub>2</sub>O 51.0%)、复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 春、夏、秋施用比例分别为21-8-11、15-5-15、15-15-15);土壤改良剂为脱硫石膏(纯度为70%~85%;生产厂家为巩义市元亨净水材料厂),根据俞仁培<sup>[16]</sup>、李玉波等<sup>[17]</sup>研究结果确定脱硫石膏推荐用量为15000 kg/hm<sup>2</sup>;硫磺粉(纯度为99%,生产厂家为SKEM)用量与脱硫石膏一致。

表1 沃柑果园土壤化学性质

土层深度 (cm)	pH值	有机质 (g/kg)	碱解氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
0~20	8.20	17.94	60.00	25.33	168.00

### 1.2 试验设计

以枳橙砧木、福本作为中间砧木高接8年的沃柑品种为研究对象,分别设置复合肥(常规施肥,CF)、配方肥(尿素+硫酸钾+过磷酸钙,FF)、复合肥+硫磺粉(CF+S)、复合肥+脱硫石膏(CF+T)、配方肥+硫磺粉(FF+S)、配方肥+脱硫石膏(FF+T)6个试验处理,具体施肥情况如表2所示,其中CF、FF、FF+S、FF+T、CF+S、CF+T处理的氮、磷、钾纯养分均相同,每年分别为0.42、0.22、0.44 kg/株,3次施肥(纯养分)比例分别为2:5:3。试验区域覆盖3行,共36株,每行树体生长健壮、长势中庸且基本一致;每行作为一个大重复(裂区设计),每行处理及单株重复株数均相同,每行相邻2株树为同一个处理。每年在3月萌芽期、7月膨大期和10月转色期进行施肥,氮、磷、钾肥3次施用的比例与复合肥(CF处理)一致,即分别为21-8-11、15-5-25、15-15-15。施肥位置为靠近树体行间两侧滴水线外侧各挖1个长、宽、深分别为1.0、0.2、0.3 m的条沟,将肥料和土壤改良材料与挖出的土拌匀后回填处理。果园病虫害和其他田间管理按常规技术统一进行。本研究连续两年开展了碱性土改良试验,因碱性土改良剂发挥作用的时间较长,故本研究仅针对第二年试验的观测数据进行分析。

表2 施肥试验设计

处理		每年施肥量(kg/株)						每年施纯养分(kg/株)		
		复合肥	尿素	过磷酸钙	硫酸钾	硫磺粉	脱硫石膏	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CF	复合肥	2.5	—	—	—	—	—	0.42	0.22	0.44
FF	配方肥	—	0.8	2.4	0.8	—	—			
FF+S	配方肥+硫磺粉	—	0.8	2.4	0.8	1.5	—			
FF+T	配方肥+脱硫石膏	—	0.8	2.4	0.8	—	1.5			
CF+S	复合肥+硫磺粉	2.5	—	—	—	1.5	—			
CF+T	复合肥+脱硫石膏	2.5	—	—	—	—	1.5			

### 1.3 样品采集与项目测定

#### 1.3.1 土壤物理指标

于10月基肥施用前,在离树冠滴水线施肥穴外10 cm处采用环刀对0~20 cm的土层进行取样,两端立刻加盖并称重,于水中浸泡12 h后称重,后将环刀放入烘箱中烘干至恒重并再次称重,用容重-比重换算法<sup>[18]</sup>测定土壤总孔隙度与容重。

#### 1.3.2 土壤化学指标

于10月基肥施用前,在0~20 cm土层,离树冠滴水线施肥穴外侧10 cm处采集土壤样品,单株分别取土样,每个处理共采集6个土样。土壤样品经自然晾干、去杂、研磨,分别过1、0.425、0.15 mm尼龙筛后密封保存,用于测定其土壤化学性质指标。测定方法参照鲍士旦<sup>[19]</sup>的《土壤农化分析》,具体方法见表3。

表3 土壤化学指标及其测定方法

土壤指标	测定方法
pH 值	单位法 (水土比为 2.5:1)
有机质	重铬酸钾容量法 - 外加热法
碱解氮	碱解扩散法
有效磷	碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗比色法
速效钾	乙酸铵浸提 - 火焰光度法
Na <sup>+</sup> 交换量	乙酸钠 - 火焰光度法
铁、锰、铜、锌	盐酸浸提 - 电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP)
钙、镁	乙酸铵浸提 - 电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP)

### 1.3.3 土壤酶活性

利用上述制备通过 0.425 mm 尼龙筛后用自封袋密封保存的土壤样品, 用试剂盒 (北京索莱科技有限公司) 测量土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶及碱性磷酸酶活性。

### 1.3.4 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的测定

土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量用 LI-8100A (美国 LI-COR

公司) 监测。将圆环埋入土中, 保持土面平整并保持圆环固定, 分别在 4、7、10 及 12 月进行土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的测定。

### 1.3.5 数据处理

利用 Excel 2019、SPSS 26.0 进行数据分析, 采用 GraphPad Prism 8 进行绘图, 采用 Duncan 新复极差法分析差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 碱性土改良施肥对土壤物理性质的影响

从图 1 可知, 各处理的土壤总孔隙度随土壤改良剂施入呈增大趋势, 土壤容重呈下降趋势。各处理的土壤总孔隙度范围为 40.87% ~ 44.62%, 平均值为 42.21%; 各处理的土壤总孔隙度大小顺序为 FF+T>CF+T>FF+S>CF+S>FF>CF, 以 FF+T 处理相对最大, 为 44.62%, 比 CF 处理增加了 9.2%, 且差异显著。各处理的土壤容重范围为 1.40% ~ 1.53%, 平均值为 1.48%, 以 FF+T 处理的土壤容重相对最小, 为 1.40%, 比 CF 处理减少了 9.7%, 但差异均不显著。

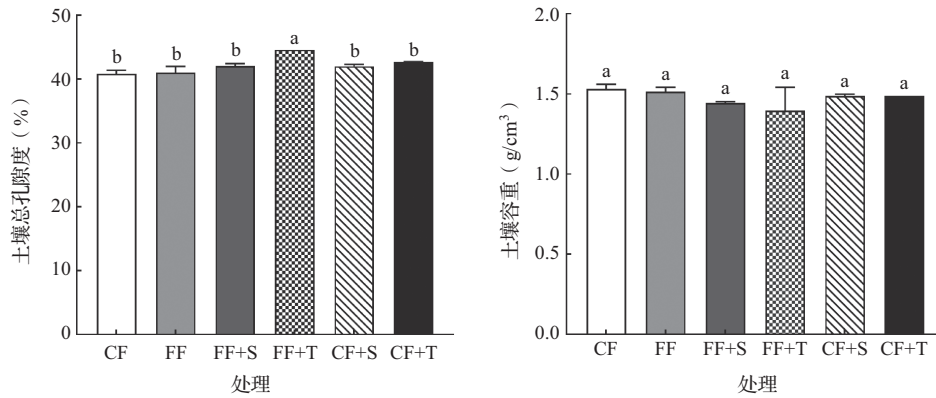


图 1 不同处理对沃柑果园土壤总孔隙度和容重的影响

注: 图中不同小写字母表示处理间的差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 碱性土改良施肥对土壤化学性质的影响

由表 4 可知, 各处理的土壤有机质含量随土壤改良剂施入呈增加趋势, pH 值与 Na<sup>+</sup> 交换量呈下降趋势。各处理的土壤 pH 值范围为 6.49 ~ 7.50, 平均值为 6.90; 土壤 pH 值由低至高顺序为 FF+T<FF+S<CF+S<CF+T<FF<CF, 以 FF+T 处理相对最低, 为 6.49, 比 CF 处理降低了 15.6%, 且差异显著。各处理的土壤 Na<sup>+</sup> 交换量范围为 2.83 ~ 3.30 cmol/kg, 平均值为 3.05 cmol/kg, 以 FF+T 处理相对最小, 为 2.83 cmol/kg, 比 CF 处理减少了

16.7%, 但差异均不显著。土壤有机质含量范围为 20.87 ~ 33.41 g/kg, 平均值为 25.53 g/kg; 有机质含量高低顺序为 CF+T>FF+S>CF+S>FF+T>FF>CF, 以 CF+T 处理相对最大, 为 33.41 g/kg, 比 CF 处理增加了 60.1%, 且差异显著。

由表 5 可知, 各处理的土壤碱解氮含量范围为 60.75 ~ 90.90 mg/kg, 平均值为 74.71 mg/kg; 土壤碱解氮含量高低顺序为 CF+T>FF+S>CF+S>FF+T>FF>CF, 以 CF+T 处理相对最高, 为 90.90 mg/kg, 比 CF 处理增加了 49.6%, 且差异显著。各

表 4 不同处理对沃柑果园土壤化学性质的影响

处理	pH 值	有机质 (g/kg)	Na <sup>+</sup> 交换量 (cmol/kg)
CF	7.50 ± 0.12a	20.87 ± 2.48b	3.31 ± 1.04a
FF	7.26 ± 0.30a	21.13 ± 2.88b	3.30 ± 0.38a
FF+S	6.55 ± 0.38bc	30.05 ± 10.33a	3.11 ± 0.89a
FF+T	6.49 ± 0.47c	21.45 ± 2.81b	2.83 ± 0.65a
CF+S	6.75 ± 0.31bc	26.29 ± 7.27ab	2.83 ± 0.21a
CF+T	6.87 ± 0.40b	33.41 ± 13.23a	2.94 ± 0.40a

注: 不同小写字母表示处理间的差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。下同。

表 5 不同处理对土壤大量元素有效含量的影响 (mg/kg)

处理	碱解氮	有效磷	速效钾
CF	60.75 ± 8.74c	74.66 ± 7.72c	512.87 ± 119.05bc
FF	62.94 ± 6.35c	68.73 ± 20.07c	474.78 ± 88.31c
FF+S	86.15 ± 5.19ab	88.28 ± 16.58b	541.17 ± 55.87abc
FF+T	66.74 ± 2.06c	99.08 ± 9.55b	614.42 ± 105.70a
CF+S	80.76 ± 11.49b	113.72 ± 6.58a	578.18 ± 80.41ab
CF+T	90.90 ± 8.52a	99.39 ± 5.57b	515.50 ± 33.42bc

处理的土壤有效磷含量范围为 68.73 ~ 113.72 mg/kg, 平均值为 90.64 mg/kg; 土壤有效磷含量高低顺序

为 CF+S>CF+T>FF+T>FF+S>CF>FF, 以 CF+S 处理相对最高, 为 113.72 mg/kg, 比 CF 处理增加了 52.3%, 且差异显著。各处理的土壤速效钾含量范围为 474.78 ~ 614.42 mg/kg, 平均值为 539.48 mg/kg; 土壤速效钾含量高低顺序为 FF+T>CF+S>FF+S>CF+T>CF>FF, 以 FF+T 处理相对最高, 为 614.42 mg/kg, 比 CF 处理增加了 19.8%, 且差异显著。

由表 6 可知, 各处理的土壤有效钙含量范围为 4391.25 ~ 5764.03 mg/kg, 平均值为 5035.78 mg/kg; 土壤有效钙含量高低顺序为 FF+T>CF+T>FF+S>CF+S>FF>CF, 以 FF+T 处理相对最高, 为 5764.03 mg/kg, 比 CF 处理增加了 31.3%, 且差异显著。各处理的土壤有效镁含量范围为 187.36 ~ 214.31 mg/kg, 平均值为 196.44 mg/kg, 高低顺序与有效钙含量一致, 以 FF+T 处理相对最高, 为 214.31 mg/kg, 比 CF 处理增加了 14.4%, 且差异显著。各处理的有效铁、锰、铜、锌含量均以 FF+T 处理相对最高, 其含量分别为 14.12、47.87、0.79、5.04 mg/kg, 分别比 CF 处理增加了 36.3%、10.5%、17.9%、20.9%, FF+T 处理的土壤有效中、微量元素含量 (有效锰除外) 均与 CF 处理差异显著。

表 6 不同处理对土壤中、微量元素有效含量的影响

处理	有效钙	有效镁	有效铁	有效锰	有效铜	有效锌
CF	4391.25 ± 627.17e	187.36 ± 7.51c	10.36 ± 2.01b	43.31 ± 1.93a	0.67 ± 0.09b	4.17 ± 0.31c
FF	4764.58 ± 379.01d	189.86 ± 6.14bc	10.95 ± 1.51b	43.52 ± 4.09a	0.67 ± 0.06b	4.43 ± 0.28bc
FF+S	5196.47 ± 207.47bc	197.08 ± 11.79bc	12.63 ± 1.07ab	46.59 ± 3.06a	0.69 ± 0.07b	4.74 ± 0.49ab
FF+T	5764.03 ± 470.92a	214.31 ± 6.59a	14.12 ± 5.01a	47.87 ± 5.35a	0.79 ± 0.19a	5.04 ± 0.59a
CF+S	4842.92 ± 181.59cd	191.81 ± 10.66bc	11.10 ± 0.94b	45.33 ± 4.34a	0.67 ± 0.04b	4.51 ± 0.47bc
CF+T	5255.42 ± 169.05b	198.19 ± 14.99b	11.31 ± 2.60b	46.12 ± 7.93a	0.67 ± 0.04b	4.53 ± 0.48bc

2.3 碱性土改良施肥对土壤酶活性的影响

由图 2 所示, 各处理的土壤蔗糖酶活性范围是 12.00 ~ 14.13 U/g, 平均值为 12.65 U/g; 各处理土壤蔗糖酶活性大小顺序为 FF+T>FF+S>CF+T>CF+S>FF>CF, 以 FF+T 处理相对最大, 为 14.13 U/g, 比 CF 处理增加了 17.8%, 且差异显著。各处理土壤脲酶活性范围是 632.83 ~ 1008.61 U/g, 平均值为 779.88 U/g; 各处理土壤脲酶活性大小顺序为 FF+T>CF+T>FF+S>CF+S>CF>FF, 也以 FF+T 处理相对最大, 为 1008.61 U/g, 比 CF 处理增加了 43.8%, 且差异显著。

由图 3 所示, 各处理的土壤碱性磷酸酶活性范围是 6866.30 ~ 10218.66 U/g, 平均值为 8585.11 U/g; 各处理土壤碱性磷酸酶活性大小顺序为 FF+T>CF+T>FF+S>CF+S>FF>CF, 以 FF+T 处理相对最大, 为 10218.66 U/g, 比 CF 处理增加了 48.8%, 且差异显著。各处理的土壤过氧化氢酶活性范围是 15.96 ~ 22.09 U/g, 平均值为 19.23 U/g; 土壤过氧化氢酶活性大小顺序为 FF+T>CF+T>FF+S>CF+S>FF>CF, 也以 FF+T 处理相对最大, 为 22.09 U/g, 比 CF 处理增加了 38.4%, 且差异显著。

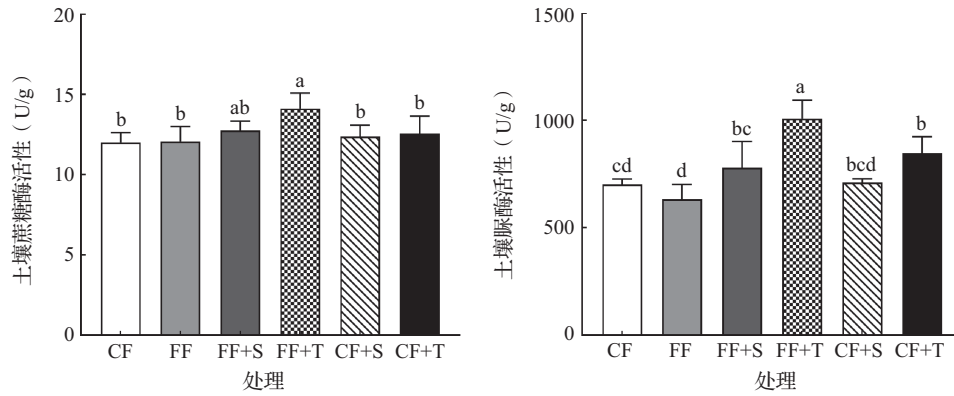


图2 不同处理对沃柑果园土壤蔗糖酶和脲酶活性的影响

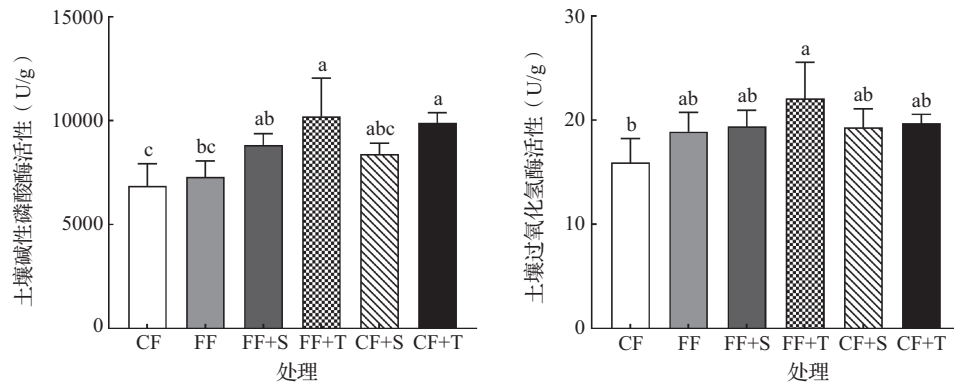


图3 不同处理对沃柑果园土壤碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性的影响

#### 2.4 碱性土改良施肥对土壤碳排放通量的影响

4—12月土壤CO<sub>2</sub>排放连续监测动态数据(图4)表明,各处理CO<sub>2</sub>排放通量均呈先升高后降低的趋势,其中7月最高、12月最低。7月各处理的土壤碳通量范围是4.99~6.30 μmol/(m<sup>2</sup>·s),平均值为5.72 μmol/(m<sup>2</sup>·s);各处理土壤碳通量由小至大的顺序为FF+T<CF+S<FF+S<CF+T<CF<FF,以FF+T处理相对最小,为4.99

μmol/(m<sup>2</sup>·s),比CF处理降低了25.5%,且差异显著。12月各处理的土壤碳通量范围是1.55~1.75 μmol/(m<sup>2</sup>·s),平均值为1.65 μmol/(m<sup>2</sup>·s);土壤碳通量由小至大的顺序为FF+T<FF+S<CF+S<CF+T<FF<CF,也以FF+T处理相对最小,为1.55 μmol/(m<sup>2</sup>·s),比CF处理降低了12.7%,且差异显著。

#### 2.5 碱性土改良施肥对土壤性质影响的综合评价

选取影响沃柑果园土壤性质的主要指标,以各处理主要指标进行主成分分析。经检验,标准化数据矩阵KMO取样適切性量数为0.558,大于0.5;巴特利特球形度检验,近似卡方为184.169,自由度为78,且BTS检验显著性P值为0.000,均符合主成分分析的要求。不同指标的主成分得分系数及贡献率如表7所示,3个主成分积累方差贡献率为76.9%,包含各参数的大部分信息;其中主成分1主要作用的是土壤孔隙度、土壤CO<sub>2</sub>排放量、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、有效镁含量,方差贡献率达到了49.7%;主成分2主要作用的是土壤有机质、有效锰、有效锌含量,方差贡献率达到了19.0%;主成分3主要作用的是土壤pH值、脲酶

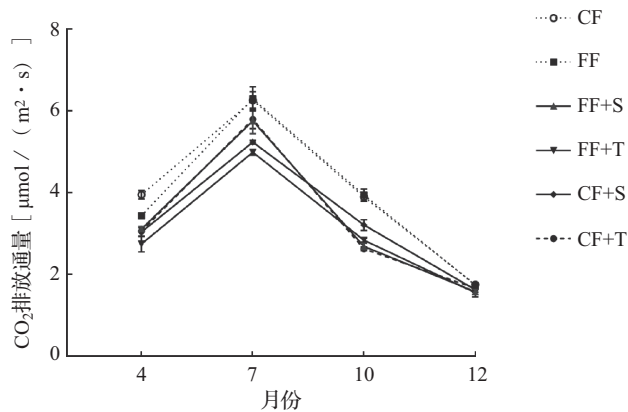


图4 不同处理对土壤CO<sub>2</sub>排放的影响

活性、碱性磷酸酶活性、有效钙、有效铁含量，方差贡献率达到了 8.2%。

表 7 不同指标的主成分得分系数及贡献率

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
X <sub>1</sub> 土壤孔隙度	0.346	0.202	0.091
X <sub>2</sub> pH 值	-0.282	0.162	0.540
X <sub>3</sub> 土壤有机质	0.111	-0.445	-0.147
X <sub>4</sub> 土壤 CO <sub>2</sub> 排放量	-0.292	-0.118	0.235
X <sub>5</sub> 土壤蔗糖酶活性	0.315	-0.170	-0.196
X <sub>6</sub> 土壤脲酶活性	0.319	0.230	0.330
X <sub>7</sub> 土壤过氧化氢酶活性	0.274	0.226	-0.187
X <sub>8</sub> 土壤碱性磷酸酶活性	0.301	0.139	0.345
X <sub>9</sub> 有效钙	0.308	0.186	-0.315
X <sub>10</sub> 有效镁	0.320	-0.199	0.126
X <sub>11</sub> 有效铁	0.268	-0.304	0.374
X <sub>12</sub> 有效锰	0.046	0.569	0.018
X <sub>13</sub> 有效锌	0.255	-0.280	0.254
特征值	6.46	2.47	1.07
贡献率 (%)	49.68	19.02	8.21
累计贡献率 (%)	49.68	68.70	76.91

通过标准化后的数据可以将主成分表达为 3 个线性组合：

$$F1=0.346ZX_1-0.282ZX_2+0.111ZX_3-0.292ZX_4+0.315ZX_5+0.319ZX_6+0.274ZX_7+0.301ZX_8+0.308ZX_9+0.320ZX_{10}+0.268ZX_{11}+0.046ZX_{12}+0.255ZX_{13};$$

$$F2=0.202ZX_1+0.165ZX_2-0.445ZX_3-0.118ZX_4-0.170ZX_5+0.230ZX_6+0.226ZX_7+0.139ZX_8+0.186ZX_9-0.199ZX_{10}-0.304ZX_{11}+0.569ZX_{12}-0.280ZX_{13};$$

$$F3=0.091ZX_1+0.540ZX_2-0.147ZX_3+0.235ZX_4-0.196ZX_5+0.330ZX_6-0.187ZX_7+0.345ZX_8-0.315ZX_9+0.126ZX_{10}+0.374ZX_{11}+0.018ZX_{12}+0.254ZX_{13};$$

$$F=0.497 \times F1+0.190 \times F2+0.082 \times F3。$$

本研究参考主成分综合得分的计算方法<sup>[20]</sup>，利用计算公式计算不同碱性土改良施肥处理不同指标的 3 个主成分综合得分 (Dn)。由表 8 可知，各处理的综合得分高低顺序为 FF+T>CF+T>FF+S>CF+S>FF>CF。

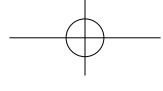
表 9 不同处理主成分分析的综合得分

处理	D1	D2	D3	D	排序
CF	-3.09	-0.26	0.47	-1.55	6
FF	-2.19	-0.30	0.00	-1.15	5
FF+S	0.61	-0.40	-0.26	0.21	3
FF+T	4.23	0.77	0.29	2.27	1
CF+S	-0.29	0.03	-0.64	-0.19	4
CF+T	0.73	0.15	0.14	0.40	2

### 3 讨论

#### 3.1 碱性土改良施肥对沃柑园土壤理化性质的影响

本研究结果表明，土壤孔隙度以添加了脱硫石膏的处理相对最大，土壤容重以 FF+T 处理相对最小。这可能是因为碱性土壤上施用过磷酸钙、硫酸钾等生理酸性肥料，其中含有较多的游离硫酸而呈酸性，有效调节了土壤性质，增加了土壤孔隙度，降低了土壤容重<sup>[21]</sup>。土壤 pH 值与 Na<sup>+</sup> 交换量均以 FF+T 处理较小，可能是因为碱性土施用脱硫石膏后，脱硫石膏中的 CaSO<sub>4</sub> 与土壤中的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 或 NaHCO<sub>3</sub> 反应置换出土壤中的 Na<sup>+</sup>，随水淋洗后增加了土壤的酸性，导致土壤 pH 值<sup>[4, 22]</sup>和 Na<sup>+</sup> 交换量降低<sup>[23]</sup>。土壤的酸碱度是影响土壤养分转化及营养元素数量、形态和有效性的决定因素<sup>[24]</sup>。刘文科等<sup>[25]</sup>的研究发现，土壤 pH 值、有机质含量与土壤有效铁含量有显著相关性，碱性土壤由于存在大量游离态碳酸钙，导致土壤中的铁离子容易与碳酸钙发生反应生成固态铁氧化物，从而使土壤中可供植物利用的游离态铁含量降低，植株出现缺铁失绿症；与周阳<sup>[26]</sup>的研究结果一致，这可能是因为土壤的酸碱度是影响土壤养分转化及营养元素数量、形态和有效性的决定因素<sup>[24]</sup>。土壤有效磷含量以添加硫磺粉处理相对最高，可能与磷在土壤中难以移动，且土壤施入硫磺粉后土壤 pH 值缓慢持续降低有关。参考柑橘园土壤有效养分丰缺标准<sup>[27]</sup>，本研究中土壤有效钙、锰含量过量，有效镁、铜、锌含量适宜，添加脱硫石膏与硫磺粉的碱性土改良施肥处理均能够有效提高土壤中、微量元素含量，其中 FF+T 处理的土壤有效钙、镁含量相对最高，这可能是因为脱硫石膏能降低盐碱地土壤容重和电导率<sup>[28]</sup>，并



且添加的外源脱硫石膏本身含有钙、硫、镁等元素<sup>[29]</sup>，使土壤的中、微量元素含量基本保持在适宜或过量范围。

### 3.2 碱性土改良施肥对沃柑果园土壤酶活性的影响

土壤酶是评价土壤肥力与土壤健康的重要指标，它推动土壤的物质转化和能量流动，反映了土壤物质代谢的旺盛程度<sup>[30]</sup>。在本研究中，各处理的土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶与过氧化氢酶活性均以 FF+T 处理较高，分别比 CF 处理增加了 17.8%、43.8%、48.8%、38.4%。这是由于施用脱硫石膏降低了碱性土的 pH 值，提高了土壤根际微生物数量和活性，使根系微生态环境得以改善，进而提高了土壤酶活性，但对各种酶活性的提高幅度各不相同。施用脱硫石膏有利于碱性磷酸酶活性的提高，这与土壤酶可以促进土壤中糖类、含氮有机物质的分解产生有机质、碱解氮相吻合<sup>[31]</sup>；施用脱硫石膏在一定程度上改善了土壤过氧化氢酶活性，促进过氧化氢对各种化合物的转化功能，其与土壤呼吸强度有密切关系<sup>[29]</sup>。同样地施用脱硫石膏在提高土壤质量、改善土壤环境方面有积极的作用，土壤蔗糖酶产生脲酶活性与土壤有机质、微生物数量呈正相关，所以土壤蔗糖酶和脲酶活性常被认为是土壤改良效果的重要酶活性指标<sup>[32]</sup>。

### 3.3 碱性土改良施肥对土壤碳排放通量的影响

碱性土改良措施在一定程度上能影响温室气体 CO<sub>2</sub> 的排放<sup>[33-34]</sup>，本试验中，7 月碳排放通量最大，可能是由于果实膨大期刚施肥完毕，此时土壤养分含量迅速升高，同时全年中以 7 月的土壤温度相对较高，加之此期间降水量较多，土壤根际微生物代谢旺盛，脱硫石膏中的 Ca<sup>2+</sup> 含量与根际呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 生成 CaCO<sub>3</sub>，从而降低 CO<sub>2</sub> 的排放<sup>[35]</sup>；12 月碳排放通量相对较小，可能是因为此时离施肥时间较长，且此期间气温较低，土壤代谢减弱。相比 CF 处理，各碱性土改良施肥处理对不同生长时期的土壤碳排放通量均有明显降低，其中 7 和 12 月均以 FF+T 处理相对最小，同比 CF 处理分别降低了 25.5% 和 12.7%。

## 4 结论

不同碱性土改良施肥一定程度上降低了沃柑果园土壤 pH 值、Na<sup>+</sup> 交换量，增加了土壤总孔隙度、有机质和营养元素含量；各处理的土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶与过氧化氢酶活性均以 FF+T 处理

相对最高；各碱性土改良施肥处理的土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量比 CF 处理均有明显降低。主成分分析综合得分高低顺序为 FF+T>CF+T>FF+S>CF+S>FF>CF，即不同碱性土改良施肥中以 FF+T 处理对沃柑果园土壤性质改善相对最好。

## 参考文献：

- [1] 唐灵欣. 柑橘专用肥开发与应用评价 [D]. 重庆: 西南大学, 2024.
- [2] 李连智, 韩琳. 土壤改良剂的研究与应用进展 [J]. 江西农业, 2019 (14): 24.
- [3] 冯浩杰. 水稻种植条件下脱硫石膏改良碱土的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [4] Clark R B, Ritchey K D, Baligar V C. Benefits and constraints for use of FGD products on agricultural land [J]. Fuel, 2001, 80 (6): 821-828.
- [5] Chun S, Nishiyama M, Matsumoto S. Sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulfurization: corn production and soil quality [J]. Environmental Pollution, 2001, 114 (3): 453-459.
- [6] 王英男. 浑河一级阶地脱硫石膏改良碱化土壤的过程与效果研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [7] 张菁, 田荣荣, 王淑娟, 等. 钙基型土壤改良剂对盐碱土壤改良和向日葵产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (11): 68-76.
- [8] 刘安鸿. 新型调理剂对滨海盐渍土的改良效果及机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2024.
- [9] Zhao Y G, Wang S J, Jia J, et al. Fertility and biochemical activity in sodic soils 17 years after reclamation with flue gas desulfurization gypsum [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20 (12): 3312-3322.
- [10] 赵敏, 罗开源, 李性苑. 硫磺粉对土壤 pH 及蓝莓幼苗生长的影响 [J]. 贵州农业科学, 2017, 45 (3): 58-61.
- [11] 刘燕妮, 高琪, 陈志远. 硫磺粉和皂素废水两种土壤酸性改良法对蓝莓幼苗定植影响的对比研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (4): 295-300.
- [12] 李今淳. 不同增效硫酸钾对土壤养分及柑橘品质的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- [13] 朱利楠, 化党领, 杨金康, 等. 不同改良剂对微碱性土壤镉形态及小麦吸收的影响 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3559-3566.
- [14] 付崇毅, 张秀芳, 王玉静, 等. 施用有机肥和硫磺粉对北方日光温室南丰蜜橘生长及石灰性土壤化学性质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2013 (2): 17-21.
- [15] 李亚东, 吴林, 孙晓秋, 等. 施硫对土壤 pH、越桔树体生长营养的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 1995, 17 (2): 49-53.
- [16] 俞仁培. 土壤碱化及其防治 [J]. 土壤, 1984 (5): 163-170.
- [17] 李玉波, 许清涛, 李广帅. 脱硫石膏改良轻度碱化土壤对燕麦生长的影响研究 [J]. 白城师范学院学报, 2018, 32

- (10): 1-5.
- [18] Feng X M, Hao Y B, Hojatollah L, et al. Effects of subsoiling tillage on soil properties, maize root distribution, and grain yield on mollisols of northeastern China [J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110 (4): 1607-1615.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-271.
- [20] 司若彤, 刘维, 林电. 有机肥部分替代化肥对台农芒果产量和品质的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2020 (4): 107-114.
- [21] 徐伟. 平衡施肥对青脆李果园土壤理化性质及果实品质的影响研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [22] Sakai Y, Matsunoto S, Sadakata M. Alkali soil reclamation with flue gas desulfurization gypsum in China and assessment of mental content in corn grains [J]. *Soil Sediment Contamination*, 2004, 13 (1): 65-80.
- [23] 姜展博, 宁松瑞, 王全九. 脱硫石膏改良盐碱土壤综合评价研究 [J]. *土壤学报*, 2024, 61 (3): 699-713.
- [24] 陆景陵. 植物营养学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 194-195.
- [25] 刘文科, 杜连风, 刘东臣. 石灰性土壤中铁肥的形态转化及其供铁机理研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002 (3): 344-348.
- [26] 周阳. 脱硫石膏与腐植酸改良盐碱土效果研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [27] 苏婷婷, 周鑫斌, 徐墨赤, 等. 重庆市柑橘园土壤养分现状研究 [J]. *土壤*, 2017, 49 (5): 897-902.
- [28] 哈斯格日乐. 不同改良剂和耕作措施对重度盐碱地改良效果与作物生长的影响研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [29] 毛玉梅, 李小平. 烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36 (1): 225-231.
- [30] 邱珊莲, 刘丽花, 陈济琛, 等. 长期不同施肥对黄泥田土壤酶活性和微生物的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2013 (4): 30-34.
- [31] 景宇鹏. 土默川平原盐渍化土壤改良前后土壤特性及玉米品种耐盐性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [32] 李振高, 骆永明, 腾应. 土壤与环境微生物研究法 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 398-399.
- [33] 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: 64-74.
- [34] 徐莹, 罗曼琳, 木志坚, 等. 生物炭和脱硫石膏混施对稻田碳排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42 (11): 2614-2624.
- [35] 贺坤, 童莉, 盛钊, 等. 烟气脱硫石膏和园林废弃物堆肥混合施用对滨海盐渍土壤的改良 [J]. *环境工程学报*, 2020, 14 (2): 552-559.

### Effect of improved fertilization on soil properties of Orah orchard in alkaline soil

YU Ying, JIA Xiao-chen, XIA Xin-jie, LV Qiang, XIE Rang-jin, MA Yan-yan, ZHENG Yong-qiang, YI Shi-lai\*  
[Citrus Research Institute, Southwest University/National Citrus Engineering Research Center/National Digital Planting (Citrus) Innovation Sub-Center, Chongqing 400712]

**Abstract:** Under the condition of equal nitrogen, phosphorus and potassium fertilization, the experimental study on the effect of improved fertilization on soil properties in orchard alkaline soil was carried out in order to obtain the technical scheme of improved fertilization in alkaline soil and provide theoretical basis for the application of improved technology in orchard alkaline soil. The effects of different alkaline soil improvement and fertilization treatments on soil properties of Orah orchard were studied by using eight-year-old Orah varieties with Citrange as the base stock and Fukumoto navel orange as the intermediate stock. Six experimental treatments were set up, including conventional compound fertilizer (CF), formula fertilizer (urea + potassium sulfate + calcium superphosphate, FF), compound fertilizer + sulfur powder (CF+S), compound fertilizer + desulfurized gypsum (CF+T), formula fertilization + sulfur powder (FF+S), and formula fertilizer + desulfurized gypsum (FF+T). Compared with CF treatment, the improved fertilization of different alkaline soils increased the total porosity and organic matter content of the soil, and the FF+T and CF+T treatments were relatively the largest, which increased by 9.2% and 60.1% compared with the CF treatment. At the same time, the content of soil nutrient elements was increased in different degrees, and the FF+T treatment was the highest. The soil bulk density, pH value and  $\text{Na}^+$  exchange capacity of each alkaline soil improved fertilization treatment were reduced, and the FF+T treatment was the smallest, which was 9.7%, 15.6% and 16.7% lower than that of CF treatment, respectively. The activities of soil sucrase, urease, alkaline phosphatase and catalase in FF+T treatment were the highest, which were 17.8%, 43.8%, 48.8% and 38.4% higher than those in CF treatment, respectively. The soil carbon emission flux of the orchard was relatively large in July and relatively small in December, and the FF+T treatment was the smallest, which was 25.5% and 12.7% lower than the CF treatment, respectively. The order of the comprehensive scores of the principal components of each treatment was  $\text{FF+T} > \text{CF+T} > \text{FF+S} > \text{CF+S} > \text{FF} > \text{CF}$ , that was, the effect of FF+T treatment on improving the soil properties of the citrus orchard was relatively optimal.

**Key words:** alkaline soil; improved fertilization; soil properties; Orah