DOI：10.13718/j.cnki.xdzk.2025.11.007
韩如婷，喻莹，贾晓晨，等. 碱性土改良施肥对沃柑产量和品质的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版)，2025，47(11)：88-98.

碱性土改良施肥对沃柑产量和品质的影响

韩如婷[1]，　喻莹[1]，　贾晓晨[1]，　夏心杰[1]，
吕强[1]，　刘一丁[2]，　易时来[1]

1. 西南大学 柑桔研究所/国家柑桔工程技术研究中心，重庆 400712；2. 重庆三峡职业学院，重庆 万州 404155

摘要：在等量氮磷钾养分投入下，以西南石灰性紫色土 8 年生沃柑园为对象，设置复合肥(CK)、配方肥(T1)、配方肥配施硫磺粉(T2)、配方肥配施脱硫石膏(T3)、复合肥配施硫磺粉(T4)、复合肥配施脱硫石膏(T5)等 6 个处理，于 2022－2024 年进行试验，研究各处理对沃柑产量和品质的影响。研究结果表明：2023 年、2024 年各碱性土改良施肥处理的果实产量分别较复合肥处理增加了 7.8%～60.2%、3.5%～60.2%，且分别以复合肥配施脱硫石膏和配方肥配施脱硫石膏处理相对最高；2024 年果实成熟采收时，配方肥配施脱硫石膏处理的果皮厚度最薄，比配方肥处理显著降低了 25.3%，配方肥配施硫磺粉处理的果皮硬度最小，比复合肥处理显著降低了 15.4%，配方肥配施脱硫石膏、复合肥配施脱硫石膏、复合肥配施硫磺粉处理的大果型(L 级和 XL 级)的占比较高，且均与复合肥处理差异显著；2023 年、2024 年果实成熟采收时，配方肥配施脱硫石膏处理的果实可溶性固形物(TSS)含量分别比配方肥处理显著增加了 11.0%、9.2%，配方肥配施脱硫石膏处理的果实可滴定酸(TA)分别比配方肥和复合肥处理降低了 5.0%和 11.8%，配方肥配施脱硫石膏处理的果实固酸比(TSS/TA)分别比配方肥、复合肥处理显著增加了 16.2%、15.5%，配方肥配施脱硫石膏和复合肥配施硫磺粉处理的果实维生素 C(Vc)含量分别比复合肥、配方肥处理提高了 10.9%、6.7%；果皮硬度与 TA、V_C 含量分别呈正、负相关；各处理产量品质指标主成分分析综合得分从高到低依次为配方肥配施脱硫石膏、配方肥配施硫磺粉、复合肥配施脱硫石膏、复合肥配施硫磺粉、复合肥、配方肥。可见，碱性土改良施肥处理增加了沃柑产量，改善了果实品质，且以配方肥配施脱硫石膏的综合效果最佳。

关　键　词：沃柑；碱性土；改良施肥；产量；品质
中图分类号：S666.1　　**文献标识码**：A
文 章 编 号：1673－9868(2025)11－0088－11
开放科学(资源服务)标识码(OSID)：

Effects of Alkaline Soil Improvement Fertilization on Yield and Quality of Orah

HAN Ruting[1]，　YU Ying[1]，　JIA Xiaochen[1]，　XIA Xinjie[1]，
LYU Qiang[1]，　LIU Yiding[2]，　YI Shilai[1]

收稿日期：2025－05－21
基金项目：国家重点研发计划课题(2018YFD0700602)；重庆市万州区科技局项目(wzstc-20220129)。
作者简介：韩如婷，硕士研究生，主要从事柑橘栽培生理与施肥技术研究。
通信作者：易时来，副研究员。

1. Citrus Research Institute, Southwest University/National Citrus Engineering Research Center, Chongqing 400712, China;
2. Chongqing Three Gorges Vocational College, Wanzhou Chongqing 404155, China

Abstract: Under the condition of equal input of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients, a 8-year-old Orah orchard on calcareous purple soil in Southwest China was selected as the research object, an experiment with six treatments, namely compound fertilizer (CK), formula fertilizer (T1), formula fertilizer plus sulfur powder (T2), formula fertilizer plus desulfurized gypsum (T3), compound fertilizer plus sulfur powder (T4), and compound fertilizer plus desulfurized gypsum (T5), was set up. The effects of these treatments on the yield and quality of Orah were studied for two continuous years from 2022 to 2024. The results showed that the fruits yields of various alkaline soil improvement fertilization treatments in the 2023 and 2024 increased by 7.8% to 60.2% and 3.5% to 60.2%, respectively, compared to the compound fertilizer, with the compound fertilizer combined with gypsum and the formulated fertilizer combined with gypsum treatments having the highest yields. At the time of fruit maturity and harvest in the 2024, the fruit peel thickness of the formulated fertilizer combined with gypsum treatment was the smallest, significantly less by 25.3% compared to the formulated fertilizer treatment, and the fruit peel hardness of the formulated fertilizer combined with sulfur powder treatment was the smallest, significantly less by 15.4% compared to the compound fertilizer treatment. The proportion of large-size fruits (L and XL grade) in the formulated fertilizer combined with gypsum, compound fertilizer combined with gypsum, and compound fertilizer combined with sulfur powder treatments was relatively high, respectively, and all were significantly different from that of the compound fertilizer treatment. At the time of fruit maturity and harvest in the 2023 and 2024, the soluble solid content (TSS) of the fruits in the formulated fertilizer combined with gypsum treatment was significantly increased by 11.0% and 9.2%, respectively, compared to the formulated fertilizer treatment, the titratable acid (TA) of the fruits in the formulated fertilizer combined with gypsum treatment was significantly reduced by 5.0% and 11.8%, respectively, compared to the formulated fertilizer and compound fertilizer treatments, and the solid-acid ratio (TSS/TA) of the fruits in the formulated fertilizer combined with gypsum treatment was significantly increased by 16.2% and 15.5%, respectively, compared to the formulated fertilizer and compound fertilizer treatments. The vitamin C (Vc) content of the fruits in the formulated fertilizer combined with gypsum and compound fertilizer combined with sulfur powder treatments was increased by 10.9% and 6.7%, compared to the compound fertilizer and formulated fertilizer treatments, respectively. The fruit peel hardness was positively associated with titratable acid (TA) content, but negatively associated with vitamin C (Vc) content. The order of the comprehensive scores of the main component analysis of the yield and quality indicators of each treatment from high to low was formulated fertilizer combined with gypsum, formulated fertilizer combined with sulfur powder, compound fertilizer combined with gypsum, compound fertilizer combined with sulfur powder, compound fertilizer, formulated fertilizer. It can be seen that the fertilization treatment for alkaline soil improvement increased the yield of Orah, and improved the fruit quality. Among them, the combined application of formulated fertilizer and desulfurized gypsum had the best overall effect.

Key words: Orah; alkaline soil; improved fertilization; yield; quality

沃柑(*Citrus reticulata* 'Orah')属于晚熟杂交柑橘，我国沃柑年产量高达 750 万 t，主要分布在广西、云南、四川、重庆等省(区、市)[1]。沃柑以鲜食为主，其果实富含膳食纤维、抗氧化物质、维生素 C 等，营养物质丰富，保健价值高。土壤酸碱度是衡量土壤质量的重要指标之一，对作物生长和产量、品质影响至关重要，沃柑种植适宜的土壤 pH 值范围为 5.5～6.5，即微酸性土壤[2-4]，而重庆有接近 36%的柑橘园土壤 pH 值高于 7.5，土壤中碳酸钙积累，降低土壤养分的有效性，阻碍根系发育，不利于柑橘地上部的生长，严重影响了柑橘产量与品质，故亟需进行碱性土改良[5]。

除了施用有机肥、种植绿肥和轮作等措施外，土壤改良剂提供了另一种有效的土壤改良途径[6]。土壤改良剂是指能改善土壤物理、化学和生物性质的一类化合物，主要分为有机改良剂、无机(化学)改良剂、微生物改良剂和合成改良剂[7]。通过改良剂调节土壤酸碱度，为作物生长创造更适宜的土壤环境条件，实现作物高产优质的目的[8-9]。目前，化学改良法以其显著的效果和较低的成本，成为盐碱地改良的首选方法[10]。脱硫石膏中溶解的 Ca^{2+} 可置换土壤胶体吸附的 Na^{+}，借助淋洗过程将钠排出土体，以达到碱性土改良的目的[11]。硫磺粉通过化学和生物过程被氧化，从而释放出氢离子，可使土壤酸化。碱性土除了采用土壤酸性改良剂，还可通过施用过磷酸钙、硫酸钾等酸性肥料，降低土壤 pH 值，提高土壤养分的生物有效性，有利于作物生长及其产量、品质的提升[12-13]。因此，如何科学有效地改良柑橘园碱性土壤，筛选出适宜的碱性土改良材料及配方，对果树产量、品质的提升具有十分重要的作用。合佳敏等[14]研究发现，在低盐碱环境下，距土壤表层 0～20 和 0～30 cm 施加脱硫石膏，均可显著提高藜麦产量。杨恩宇等[15]研究表明，通过单施脱硫石膏，可显著提高高粱的籽粒产量。李性苑等[16]提出，适量施用硫磺粉对蓝莓产量和果实维生素 C(Vc)、可溶性糖、可滴定酸含量具有促进效果。申海林等[17]研究发现，有机肥配施硫磺粉可显著提高葡萄果实可溶性固形物含量。王雨等[18]对桃施用硫酸钾肥，果实的可溶性固形物、可溶性糖、可溶性蛋白含量提高，而可滴定酸含量下降。王江林等[19]在桃树果实成熟期喷施硫酸钾肥，发现适量浓度的硫酸钾可提升果实硬度、可溶性固形物及糖含量。余苏凤[20]对金艳猕猴桃施用硫酸钾肥，果实可溶性固形物含量显著提高，可滴定酸含量显著降低。徐湘婷等[21]施用硫酸钾可显著提高葡萄果实 V_C 含量、可溶性固形物含量和降低可滴定酸含量。杨梦宇等[22]、袁嘉玮等[23]对苹果树分别增施与适量施用硫酸钾肥，均可提升果实可溶性固形物和 V_C 含量，降低可滴定酸含量。

目前，我国有关碱性土改良主要涉及藜麦、高粱、水稻等[14-15, 24-26]粮食作物以及蓝莓、葡萄、桃、猕猴桃、苹果等水果作物[16-23, 27]，而有关柑橘园碱性土改良剂、酸性肥料的相关研究应用以及二者协同改良的相关报道鲜见。本研究以 8 年生沃柑园为对象，在氮、磷、钾养分投入一致的基础上，探究不同碱性土改良施肥处理对沃柑产量及内外品质的影响，选出适合柑橘园碱性土改良施肥的材料与配方，以期为柑橘优质高产栽培提供理论依据与技术支持。

1　材料与方法

1.1　试验地概况与供试肥料

在重庆市北碚区西南大学柑桔研究所沃柑园(29°45′ N，106°22′ E)于 2022－2024 年连续开展两年重复试验。果园土壤为碱性(pH 值 8.2)，有机质 17.9 g/kg，碱解氮、有效磷、速效钾分别为 60、25、168 mg/kg。试验以枳橙为基砧、福本为中间砧高接 8 年生的沃柑为试材。供试肥料为含 N 47%的尿素、含 P_2O_5 12%的过磷酸钙、含 K_2O 51%的硫酸钾、复合肥(N-P_2O_5-K_2O 在春、夏、秋三季施用比例分别为 21∶8∶11、15∶5∶25、15∶15∶15)，土壤改良剂为纯度 70.0%～85.0%脱硫石膏和 99.0%硫磺粉，生产厂家分别为河南省巩义市元亨净水材料厂和山西省牧颜宸科技有限公司。根

据李玉波等[28]的研究结果，确定脱硫石膏和硫磺粉适宜施用量为15 000 kg/hm^2。烟气脱硫石膏样品重金属含量满足《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中pH值≥7.53的二级标准要求。

1.2 试验设计

试验分别设置复合肥(CK)、配方肥(T1)、配方肥配施硫磺粉(T2)、配方肥配施脱硫石膏(T3)、复合肥配施硫磺粉(T4)、复合肥配施脱硫石膏(T5)等6个处理，具体改良施肥材料及其施用量如表1所示，各处理N、P_2O_5、K_2O养分施用量一致，年施肥量分别为0.42 kg/株、0.22 kg/株、0.44 kg/株，每处理6株。每年于3月、7月、10月进行施肥，T1、T2、T3处理3次施肥比例均为2∶5∶3，CK、T4、T5处理3次施肥比例均为8∶10∶7。于树体行间两侧滴水线外侧位置各挖一条长度为100 cm、宽度为20 cm、深度为30 cm的施肥沟，将准备好的肥料、土壤改良材料与从沟内挖出的土壤充分搅拌混合均匀后填回施肥沟内，且回填土比周边土面高10 cm左右。果园植保、树体修剪等其他田间管理按常规技术统一进行。

表1 不同处理的年施肥量 g/株

处理	复合肥	尿素	过磷酸钙	硫酸钾	脱硫石膏	硫磺粉
CK	2 500	—	—	—	—	—
T1	—	900	1 825	870	—	—
T2	—	900	1 825	870	—	1 500
T3	—	900	1 825	870	1 500	—
T4	2 500	—	—	—	—	1 500
T5	2 500	—	—	—	1 500	—

1.3 样品采集与测定

分别于2022年8月至2023年1月以及2023年8月至2024年1月，即从果实膨大期开始，每月中旬在每株树上沿树冠中部东、南、西、北4个方向各采4个果作为1个混合样，单株为1次重复，每处理共6个重复样，用于测定果实内外品质指标。分别于2023年1月和2024年1月果实成熟期按单株全部采收称重测产量，2024年1月对每株树采收的所有果实进行分级。分级标准为：果实横径55.0～60.0 mm为小果型(S)，60.0～65.0 mm为中果型(M)，65.0～70.0 mm为大果型(L)，70.0～80.0 mm为超大果型(XL)[29]。

果实经去离子水清洗、擦干后，以游标卡尺测量果皮厚度，采用GY-4果实硬度计测定果皮硬度。榨汁后，使用PAL-1数显糖度仪测定可溶性固形物(TSS)含量，采用NaOH中和滴定法、2，6-二氯靛酚钠滴定法测定可滴定酸(TA)含量和维生素C(V_C)含量，比值法计算固酸比(TSS/TA)。

1.4 数据处理与分析

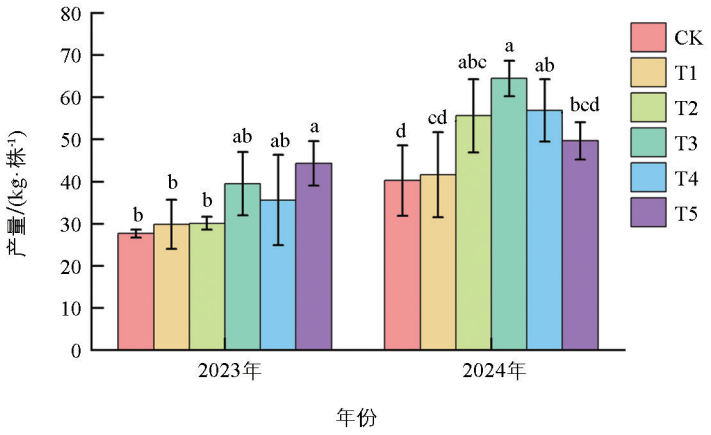
采用Microsoft Excel 2019统计试验数据，利用R语言进行方差分析，使用Origin Pro 2025软件绘图，并运用配套插件进行主成分分析和综合评价。

2 结果与分析

2.1 碱性土改良施肥对沃柑产量的影响

由图1分析可知，2024年、2023年各处理沃柑单株平均产量分别为51.42 kg、34.51 kg，前者比后者提高了49.0%；相较于CK处理，各碱性土改良施肥处理的沃柑产量均有所提升。2023年各碱性土改良施肥处理的沃柑单株平均产量较CK增产了7.8%～60.2%，其中T5处理的产量最高，

与 CK 处理差异显著；2024 年各碱性土改良施肥处理的沃柑单株平均产量较 CK 增产了 3.5%～60.2%，以 T3 最高，与 CK 处理差异显著。



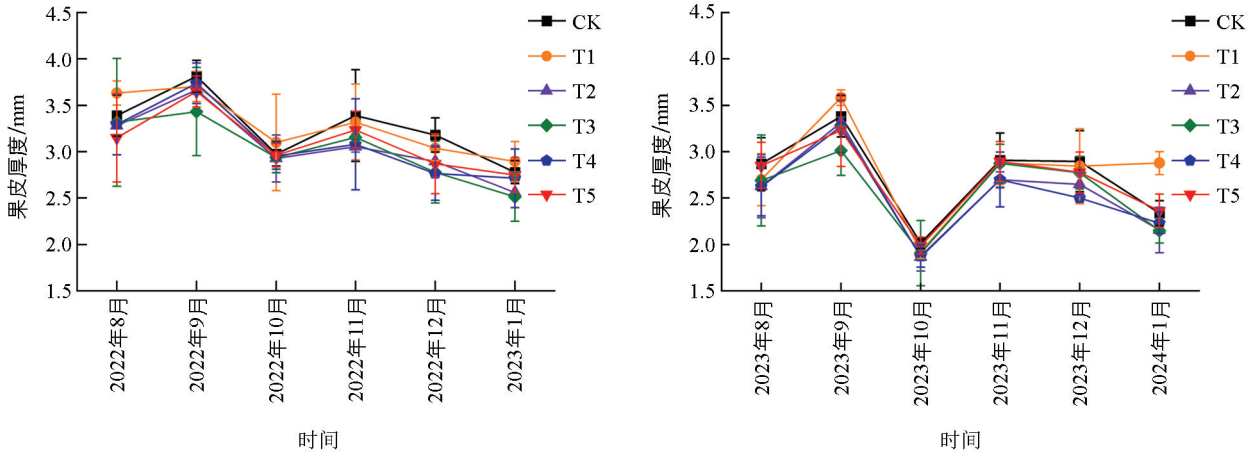
处理间不同小写字母表示差异达到显著水平($p<0.05$)。

图 1　不同处理对沃柑产量的影响

2.2　碱性土改良施肥对沃柑果实外观品质的影响

2.2.1　碱性土改良施肥对沃柑果皮厚度的影响

从 8 月至翌年 1 月沃柑果皮厚度检测结果表明(图 2)，两年试验的动态变化规律一致，即随着时间的推移，呈先增加后降低再增加最后缓慢降低的趋势。2023 年 1 月采收时，T3 处理的果皮厚度最薄，为 2.51 mm；T1 处理最厚，为 2.89 mm；但各处理差异均不显著。2024 年 1 月采收时，T3 处理果皮厚度最薄，为 2.15 mm；T1 处理最厚，为 2.88 mm；T3 处理的果皮厚度比 T1 降低了 25.3%，且两个处理间差异显著。



a. 2022–2023年　　b. 2023–2024年

图 2　不同处理对沃柑果皮厚度的影响

2.2.2　碱性土改良施肥对沃柑果皮硬度的影响

从 9 月至翌年 1 月沃柑果皮硬度监测结果表明(图 3)，2023 年 9 月至 10 月果皮硬度迅速降低，10 月至 12 月缓慢降低至平稳，至 2023 年 1 月采收时又略有降低；2023 年 1 月果实成熟采收时各处理果皮硬度为 16.63～19.44 N，其中 T4 处理最小，T1 处理最大，T4 比 T1 处理显著降低了 14.5%。2023 年 9 月至 11 月果皮硬度快速降低，11 月至 12 月缓慢降低，至 2024 年 1 月采收时又略有升高；2024 年 1 月果实成熟采收时各处理果皮硬度为 19.21～22.69 N，以 T2 处理相对最小，CK 处理最大，T2 比 CK 处理显著降低了 15.4%。

2.2.3　碱性土改良施肥对沃柑果实大小的影响

由表 2 可知，2024 年各处理大果型(L 级和 XL 级)级别分布频率以 T3、T5、T4 处理相对较高，均显著高于 CK 处理；各处理 M 级中型果分布频率以 T2、T3、T4、T5 处理较高，显著高于 T1 处理；各处理 S 级小型果分布频率以 CK、T1 处理显著高于其他处理。

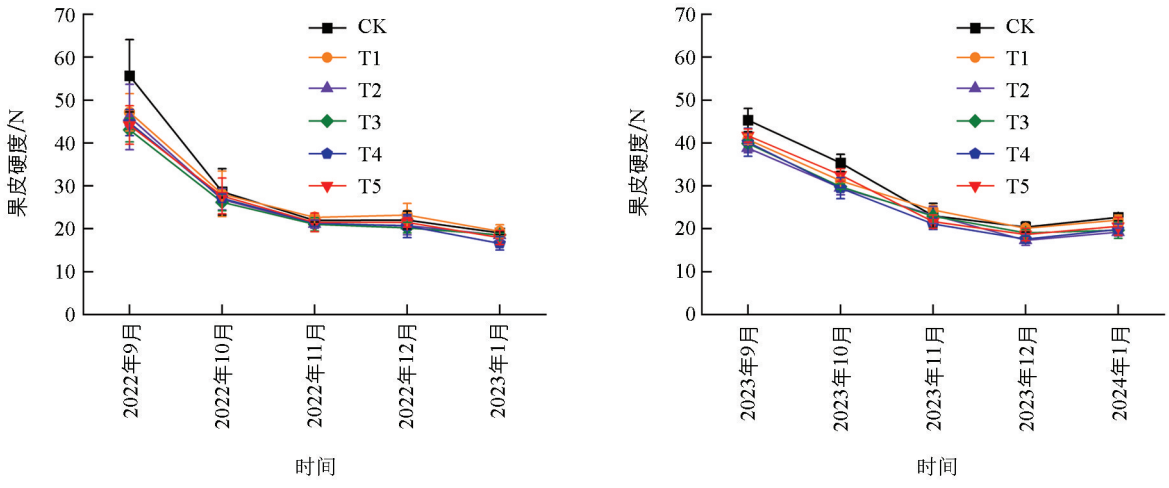


图3 不同处理对沃柑果皮硬度的影响

表2 不同处理对沃柑果实大小分级分布频率的影响(2024年度)

处理	S级/%	M级/%	L级/%	XL级/%
CK	70.50±6.66a	21.50±4.73ab	7.00±2.45d	0.00±0.00c
T1	69.50±9.00a	10.75±2.99b	15.50±4.20bcd	0.00±0.00c
T2	50.00±9.13b	27.50±11.90a	15.00±7.07cd	7.50±6.45bc
T3	22.00±7.26c	36.00±13.93a	32.25±10.50a	9.75±4.50b
T4	30.00±9.13c	32.50±9.57a	25.00±4.08ab	12.50±6.45ab
T5	28.25±3.95c	32.75±8.18a	20.50±5.26bc	18.50±8.10a

注:同一级别不同处理数据后小写字母不同,表示差异达到显著水平($p<0.05$)。

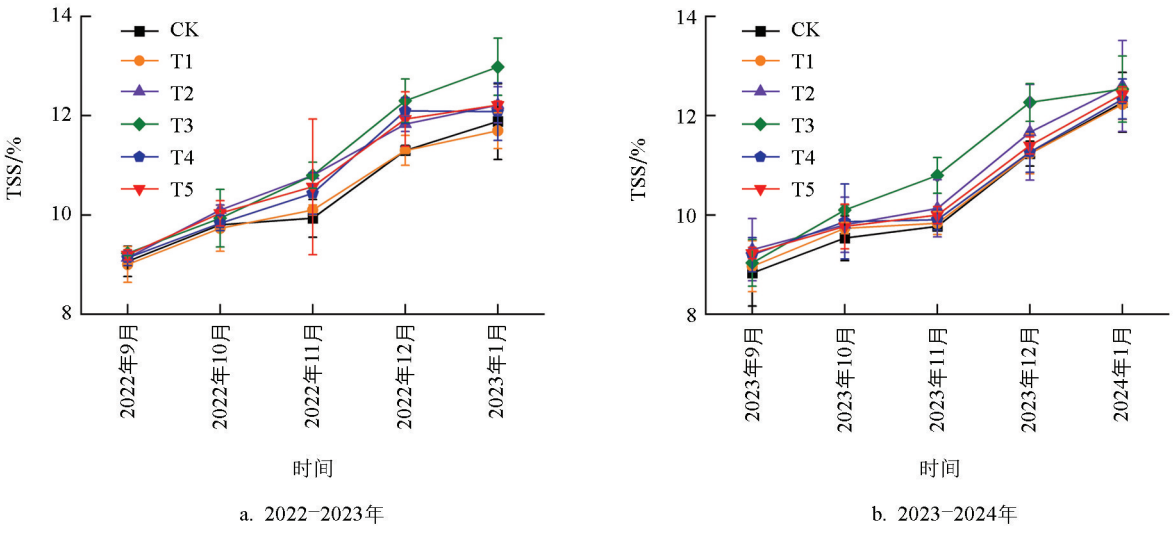
2.3 碱性土改良施肥对沃柑果实内在品质的影响

2.3.1 碱性土改良施肥对沃柑果实TSS含量的影响

从9月至翌年1月沃柑果实TSS含量检测结果表明(图4),2022年9月至11月果实TSS含量缓慢升高,11月至12月快速升高,12月至翌年1月缓慢升高至最大值。2023年1月采收时,T3处理的果实TSS含量最大,为12.98%;T1处理最小,为11.70%;T3比T1处理显著提高了11.0%。2024年9月至11月果实TSS含量缓慢升高,11月至翌年1月快速升高至最大值。2023年12月各处理的果实TSS含量,以T3处理相对最高,为12.27%;CK和T1处理最小,为11.23%;T3处理比CK、T1处理均显著增加了9.2%。2024年1月采收时,T2处理的TSS含量最大,比CK处理提高了2.7%,但差异未达显著水平。

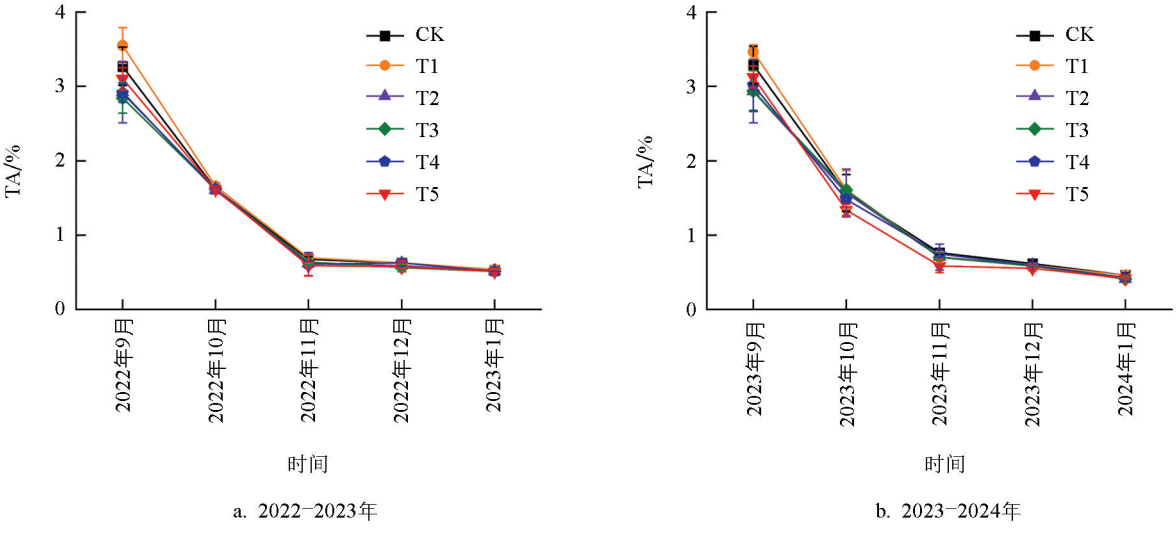
2.3.2 碱性土改良施肥对沃柑果实TA含量的影响

从9月至翌年1月沃柑果实TA含量检测结果表明(图5),两年试验的动态变化规律一致,即9月至11月果实TA含量快速下降,11月至翌年1月缓慢下降,至采收时达相对最低。2023年1月采收时,T3和T4处理的果实TA含量最小,为0.51%;T1处理最大,为0.54%;T3和T4分别比T1处理降低了5.0%、5.0%,但各处理间无显著性差异。2023年12月,T5处理的果实TA含量相对最小,为0.56%;CK处理最大,为0.62%;T5比CK处理显著降低了10.1%。2024年1月采收时,T3处理的果实TA含量最小,为0.41%,T3比CK处理降低了11.8%,但各处理间无显著差异。



a. 2022−2023年　　b. 2023−2024年

图 4　不同处理对沃柑果实 TSS 含量的影响



a. 2022−2023年　　b. 2023−2024年

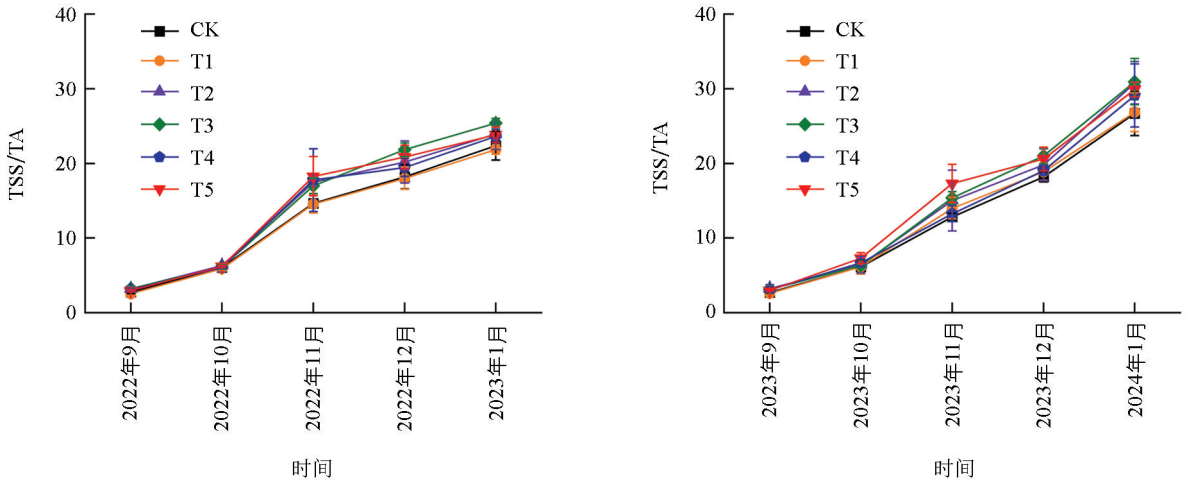
图 5　不同处理对沃柑果实 TA 含量的影响

2.3.3　碱性土改良施肥对沃柑果实 TSS/TA 的影响

从 9 月至翌年 1 月沃柑果实 TSS/TA 检测结果表明(图 6)，2022 年 9 月至 10 月沃柑果实 TSS/TA 缓慢升高，10 月至 11 月快速升高，11 月至翌年 1 月缓慢升高至最大值。2023 年 1 月采收时，T3 处理的 TSS/TA 最大，为 25.42；T1 处理最小，为 21.87；T3 比 TI 显著提高了 16.2%。2023 年 9 月至 10 月沃柑果实 TSS/TA 缓慢升高，10 月至翌年 1 月快速升高至最大值。2023 年 12 月，T3 处理的果实 TSS/TA 最大，为 21.02；CK 处理最小，为 18.20；T3 处理比 CK 显著增加了 15.5%。2024 年 1 月采收时，T3 处理的 TSS/TA 最大，为 30.94，但各处理间差异不显著。

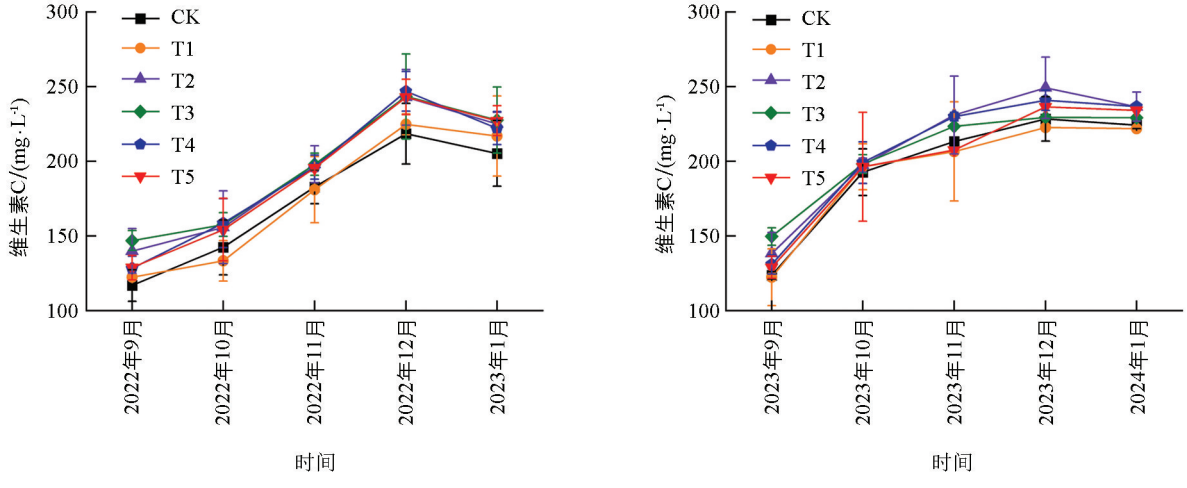
2.3.4　碱性土改良施肥对沃柑果实 V_C 含量的影响

从 9 月至翌年 1 月沃柑果实 V_C 含量检测结果表明(图 7)，2022 年 9 月至 10 月沃柑果实 V_C 含量缓慢升高，10 月至 12 月快速升高至最高值，至 2023 年 1 月采收时有所降低。2023 年 1 月采收时，T3 处理的果实 V_C 含量最大，为 227.6 mg/L；CK 处理最小，为 205.3 mg/L；T3 比 CK 提高 10.9%，但不存在显著性差异。2023 年 9 月至 10 月沃柑果实 V_C 含量迅速升高，10 月至 12 月缓慢升高至最高值，至 2024 年 1 月采收时有所下降。2024 年 1 月采收时，T4 处理的果实 V_C 含量最大，为 236.6 mg/L；T1 处理最小，为 221.8 mg/L；T4 与 T1 处理差异显著。



a. 2022—2023年　　b. 2023—2024年

图6　不同处理对沃柑果实TSS/TA的影响



a. 2022—2023年　　b. 2023—2024年

图7　不同处理对沃柑果实V_C含量的影响

2.4　不同碱性土改良施肥处理的指标综合评价

2.4.1　不同碱性土改良施肥处理的果实外观、内质指标的量化关系

将2023年和2024年1月中旬果实成熟采收期各处理指标的数据取平均值，通过多项式拟合，探究果皮硬度、果皮厚度分别与果实TSS、TA、V_C含量之间的相关性。数据分析结果表明，果皮硬度与果实TA含量、果实V_C含量之间存在显著的相关性，呈现出较高的曲线拟合度($R^2>0.8$)。从图8a可知，果皮硬度与TA含量呈正相关，其变化趋势在T3处理时出现转折。从图8b可见，果皮硬度与V_C含量呈负相关，于T2处理时发生明显转折。由上可见，当果实变软时，TA下降，V_C升高。各碱性土改良施肥处理均能有效提高沃柑果实外观内质。

2.4.2　不同碱性土改良施肥处理的各指标主成分分析

各碱性土改良施肥处理产量及品质指标两年平均值的主成分分析载荷图表明(图9)，主成分1和主成分2贡献率分别为58.9%、16.5%，累计贡献率达75.4%，主成分1中起决定作用的指标有产量、果皮厚度、果皮硬度、TSS/TA，主成分2主要由TSS、TA、V_C含量决定。

2.4.3　碱性土改良施肥处理的综合评价

由表4所示，选取特征值大于1的两个主成分，对不同碱性土改良施肥处理进行综合评价。不同碱性土改良施肥处理的综合得分，由大到小的顺序为T3、T2、T5、T4、CK、T1。

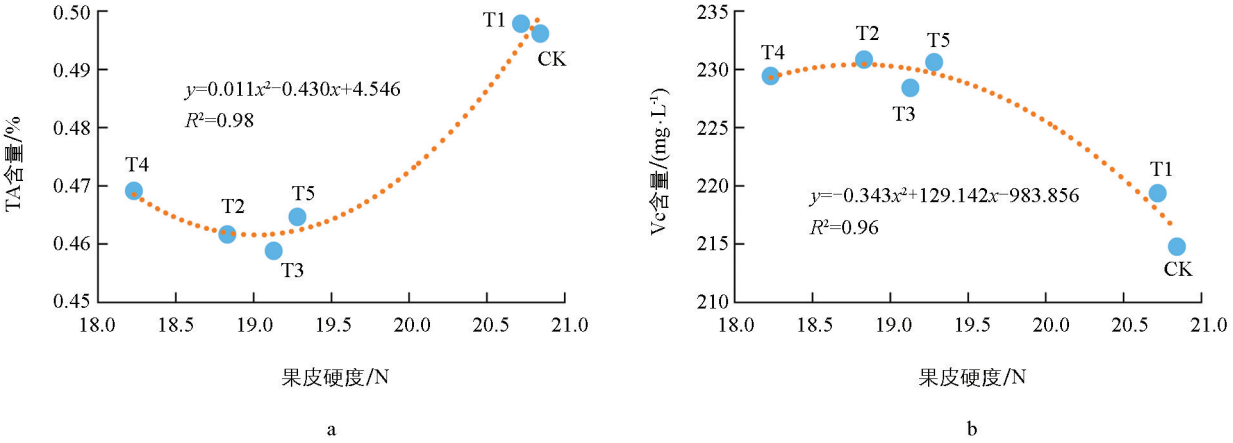


图 8　果皮硬度与果实 TA、Vc 含量的关系

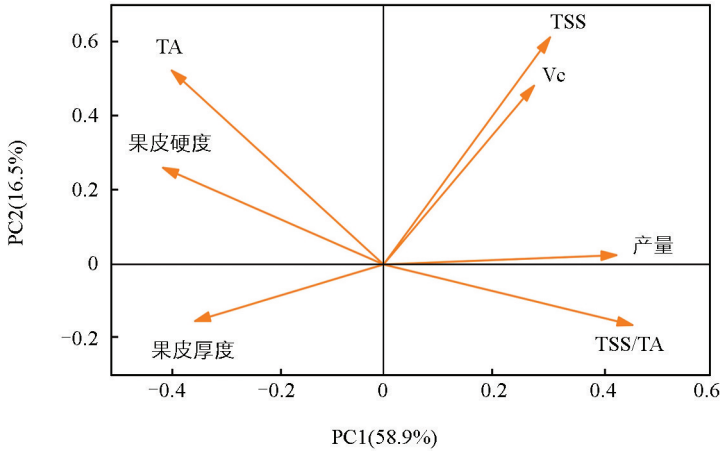


图 9　沃柑产量品质指标载荷图

表 4　主成分及综合得分

处理	PC1 得分	PC2 得分	综合得分	排名
CK	−1.12	0.00	−0.88	5
T1	−1.32	−0.18	−1.07	6
T2	0.60	0.04	0.48	2
T3	1.05	0.43	0.92	1
T4	0.42	−0.27	0.27	4
T5	0.36	−0.02	0.28	3

3　讨论与结论

3.1　讨论

碱性土改良施肥在保证氮、磷、钾等养分的供应下，配施脱硫石膏降低了土壤含盐量，配施硫磺粉降低了土壤的 pH 值，为作物创造了适宜其生长的土壤环境，有利于作物的生长发育。2023 年和 2024 年各碱性土改良施肥处理的沃柑产量分别较 CK 增加了 7.8%～60.2%和 3.5%～60.2%，且分别以 T5 和 T3 处理最高，这与前人[14-15, 30-31]研究结果一致，可能与配施脱硫石膏置换土壤中的 Na^+，降低土壤含盐量，提高根系活力，有效延长叶片功能期，增加干物质积累量，促进果实生长发育有关。

果实中的钙以果胶酸钙的形式参与细胞壁和胞间层的构成，从而使果实器官或组织具有一定的机械强度，进而提高了果皮硬度[32]。本试验结果表明，果实成熟采收时各碱性土改良施肥处理的果皮厚度及果皮

硬度比单施化肥均有一定程度的改善，其中2024年度果皮厚度以T3处理最薄，以T1处理最厚，T3比T1处理显著降低了25.3%，这可能与脱硫石膏与土壤中的碳酸盐反应生成中性盐和碳酸钙，降低了土壤pH值，提高了土壤有效磷含量，吸收利用的磷促进果肉生长、降低果皮厚度有关。果皮硬度以T2处理相对最小，比CK处理显著降低了15.4%，这可能与硫磺粉氧化生成硫酸氧化物，置换出一定量的氢离子，与土壤中的碳酸钙发生反应生成可溶性钙盐，易随雨水或灌溉水淋失，造成了土壤中钙的流失，间接影响果实中的钙含量，从而降低果皮硬度有关[33]。果实大果型(L级和XL级)比例变化范围为7.00%～42.00%，其中以T3处理的比例最高，与CK相比显著提升，可能与脱硫石膏降低了土壤pH值，提高了土壤有效氮、磷、钾等含量和促进了养分的吸收利用，有利于果实的膨大有关。盐碱地改良试验结果表明，施用脱硫石膏可提高葡萄的叶面积和叶绿素含量，有利于叶片的光合作用，从而促进了果实中光合产物的积累，最终提高了果实品质[34]。连续两年的试验结果表明，果实成熟采收时各碱性土改良施肥处理的沃柑果实内在品质与单施化肥相比均有一定程度的提升，其中2023年和2024年果实TSS含量均以T3处理最高，比T1处理显著增加了11.0%和9.2%，可能与脱硫石膏通过置换Na^+，降低了土壤pH值，缓解了碱性土对沃柑的胁迫，提高了土壤中磷、铁、锌等元素的有效性，有利于沃柑根系对土壤矿质元素的吸收利用，促进了叶片光合产物的合成与转运，进而提高了沃柑果实TSS含量有关。T3处理的沃柑果实TA含量分别比T1、CK降低了5.0%、11.8%，可能与脱硫石膏提供了一定量的钙，钙通过稳定细胞膜的结构，减少柠檬酸、苹果酸等有机酸在液泡中的积累，从而降低了沃柑果实TA含量有关。V_C含量分别以T3和T4处理相对最大，T4比T1处理显著增加了6.7%，可能与硫磺粉提供了硫，可提高叶片光合效率，增加糖分供应，而糖是V_C合成的碳骨架来源，进而提高V_C含量有关，这与前人[16-17, 34]的研究结果一致。

可见，施用酸性肥料及脱硫石膏、硫磺粉等碱性土改良剂，不仅能改善果实外观品质，还显著增加了沃柑产量，提高了果实TSS、V_C含量，以及降低了果实TA含量。对沃柑成熟期果实外观内质指标进行曲线拟合，分析发现果皮硬度与果实TA、V_C含量之间有较好的相关性，当硬度下降时，TA下降，V_C升高，分别以T3和T2处理为最佳。借助果皮硬度与果实内在品质指标的良好相关性量化模型，结合果皮硬度快速监测技术，甚至可以通过触摸果皮“手感”硬度的经验性判断，今后可通过果皮硬度的“触感”来快速、实时、无损估测果实内在品质与成熟度情况。利用主成分分析对成熟期沃柑产量及外观内质指标进行综合评价，分析不同碱性土改良施肥处理对果实品质形成的影响，以T3处理即配方肥(尿素＋硫酸钾＋过磷酸钙)配施脱硫石膏的综合得分最高。

3.2 结论

本试验条件下，与常规单施复合肥相比，酸性肥料(过磷酸钙和硫酸钾)和土壤改良剂(硫磺粉和脱硫石膏)配施，有利于果园碱性土壤的改良培肥，进而提高了沃柑产量，改善了果实外观内质。基于主成分分析的沃柑产量、品质评价得出，T3处理即配方肥(尿素＋硫酸钾＋过磷酸钙)配施脱硫石膏的综合得分最高，亦即西南地区石灰性紫色土柑橘园通过脱硫石膏结合施用酸性磷、钾肥的综合改良效果为最佳。

参考文献：

[1] 巫美桥红，熊莉. “全国每五个沃柑就有一个来自武鸣”[N]. 广西日报，2023-07-11(5).

[2] 南文卓，姬建新. 陕西苹果园土壤pH现状及改良措施[J]. 农业科技通讯，2021(12)：319-321.

[3] 廖世雪. 沃柑优质栽培技术[J]. 现代农业科技，2020(2)：68-69.

[4] 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.

[5] 王彤，朱攀攀，习建龙，等. 重庆柑橘园土壤微量营养元素养分状况分析[J]. 果树学报，2018，35(12)：1478-1486.

[6] 周岩，武继承. 土壤改良剂的研究现状、问题与展望[J]. 河南农业科学，2010，39(8)：152-155.

[7] 张智，何豪豪，郁妙，等. 化肥减量配施土壤改良剂对土壤酸度、土壤养分和水稻产量的影响[J]. 浙江农业学报，2025，37(6)：1301-1308.

[8] ZHAO Y C，YAN Z B，QIN J H，et al. The Potential of Residues of Furfural and Biogas as Calcareous Soil Amendments for Corn Seed Production[J]. Environmental Science and Pollution Research，2016，23(7)：6217-6226.

[9] 姜雪，郭丽琢，牛济军，等. 不同改良剂对河西灌区盐碱地土壤肥力状况的改良效应 [J]. 江西农业大学学报，2024，46(4)：1086-1098.
[10] 安长聪，韩凤兰，江成云，等. MH 盐碱地改良材料对盐碱土壤性能的影响 [J/OL]. 矿产综合利用，(2023-11-28) [2025-06-22]. https：//kns. cnki. net/kcms/detail/51. 1251. TD. 20231124. 1805. 009. html.
[11] 张敬沙，周建强，方海兰. 脱硫石膏在我国土壤改良方面应用的研究现状分析及展望 [J]. 现代化工，2025，45(S1)：6-11.
[12] 王龙，贾莉莉，陈剑秋. 碱性土壤施酸性肥料对棉花生长的影响 [J]. 湖北农业科学，2019，58(S2)：145-147，166.
[13] 朱家骝. 盐碱地水稻甬优 1540 施肥技术试验 [J]. 浙江农业科学，2020，61(11)：2228-2229.
[14] 合佳敏，张永清，梁萍，等. 脱硫石膏对盐碱胁迫下藜麦农艺性状、生理特性及产量的调控作用 [J/OL]. 草业科学，(2024-07-18) [2025-06-21]. https：//kns. cnki. net/kcms/detail/62. 1069. S. 20240717. 1340. 004. html.
[15] 杨恩宇，王珍，张峰举，等. 生物炭与脱硫石膏配施对龟裂碱土理化性质的影响 [J/OL]. 农业科学研究，(2025-04-14) [2025-06-22]. https：//link. cnki. net/doi/10. 13907/j. cnki. nykxyj. 20250412. 001.
[16] 李性苑，罗开源，杨芩，等. 施硫磺粉对土壤养分及蓝莓产量品质的影响 [J]. 中国南方果树，2015，44(5)：101-105.
[17] 申海林，闫可，邹利人，等. 土壤改良对‘着色香’葡萄生长发育的影响 [J]. 中外葡萄与葡萄酒，2020(5)：22-24.
[18] 王雨，陈湖，武军凯，等. 不同钾肥施用量对设施桃果实品质及产量的影响 [J]. 江西农业学报，2023，35(3)：84-90.
[19] 王江林，王志强，曾文芳，等. 钾肥喷施量对桃树光合作用、果实糖酸组分及综合品质的影响 [J]. 江苏农业科学，2024，52(10)：165-172.
[20] 余苏凤. 钾肥施用量对金艳猕猴桃光合特性及果实品质的影响 [J]. 南方农业，2023，17(10)：44-46.
[21] 徐湘婷，胡文杰，王春艳，等. 不同钾肥对阳光玫瑰葡萄养分吸收及果实品质的影响 [J]. 贵州农业科学，2024，52(8)：94-103.
[22] 杨梦宇，杨怡帆，唐玉薇，等. 不同施肥处理对苹果果实品质和土壤理化性状的影响 [J]. 北方园艺，2025(8)：123-130.
[23] 袁嘉玮，张健，王璐，等. 长期施钾对富士苹果光合特性和果实品质的影响 [J/OL]. 江苏农业科学，(2025-03-25) [2025-06-21]. https：//kns. cnki. net/kcms/detail/32. 1214. S. 20250324. 1645. 010. html.
[24] 闫晶蓉，庞春花，张永清，等. 脱硫石膏与腐殖酸配施对盐碱地土壤及藜麦生长的影响 [J/OL]. 作物杂志，(2025-02-05) [2025-06-22]. https：//kns. cnki. net/kcms/detail/11. 1808. S. 20250205. 1623. 017. html.
[25] 王笛，李达，韩东辰，等. 脱硫石膏对改良盐碱地种植甜高粱的影响 [J]. 农业与技术，2021，41(18)：44-48.
[26] 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，2015.
[27] 杨浩，吴文龙，闾连飞，等. 土壤 pH 值对蓝莓生长和生理特性的影响及其调节方法综述 [J]. 江苏农业科学，2022，50(6)：1-8.
[28] 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.
[29] 喻莹. 碱性土改良施肥对沃柑生长发育及土壤性质的影响 [D]. 重庆：西南大学，2024.
[30] 隋世江，张海楼，陈丛斌. 脱硫石膏与硫酸亚铁配施对苏打盐碱水田的改良效果 [J]. 辽宁农业科学，2022(2)：79-81.
[31] 闫洪，仲生柱，温晓亮，等. 不同改良剂对盐碱地向日葵农艺性状及产量的影响 [J]. 北方农业学报，2021，49(3)：36-40.
[32] 林小芳，王贵元. 钙在果树生理代谢中的作用 [J]. 江西农业学报，2007，19(5)：61-63.
[33] BELAL E E，SOWFY D M E，RADY M M. Integrative Soil Application of Humic Acid and Sulfur Improves Saline Calcareous Soil Properties and Barley Plant Performance [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis，2019，50(15)：1919-1930.
[34] 李映龙，单守明，刘成敏，等. 土施脱硫石膏对盐碱地“赤霞珠”葡萄生长发育和果实品质的影响 [J]. 北方园艺，2018(15)：65-69.

责任编辑　王新娟
杨光明