

# 牡蛎壳土壤调理剂对土壤及黄地脐橙果实品质的改良效果

王妍<sup>1</sup>, 丁希月<sup>1</sup>, 翁凌<sup>1</sup>, 纪梦雅<sup>1</sup>, 章骞<sup>1</sup>, 王永明<sup>2</sup>, 曹敏杰<sup>1</sup>

(1. 集美大学海洋食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门玛塔生态股份有限公司, 福建 厦门 361015)

**[摘要]** 为探究施用牡蛎壳土壤调理剂对土壤及黄地脐橙果实品质的影响, 进行连续两年的田间实验。实验设置为对照组(2019年)(0 kg/棵)、实验组第一年(2020年)(5 kg/棵)和实验组第二年(2021年)(10 kg/棵)。测定土壤 pH 值、有机质和交换性钙含量, 以及黄地脐橙果实产量与品质, 探究牡蛎壳土壤调理剂对土壤和果实品质的改良效果。结果显示, 与 2019 年相比, 2020 年、2021 年施用牡蛎壳土壤调理剂后, 土壤 pH 值分别提高了 2.47 和 2.14, 土壤有机质含量分别提升了 55.19% 和 67.68%, 土壤交换性钙质量摩尔浓度分别增加了 2.00, 6.61 cmol/kg; 实验地的黄地脐橙产量逐年递升, 2020 年产量较 2019 年增加 50.0%, 2021 年产量较 2020 年增加 144.4%; 在果实糖酸比方面, 施用牡蛎壳土壤调理剂后, 2020 年、2021 年较 2019 年分别增加 6.37% 和 25.26%; 维生素 C 质量比也逐年增长, 与对照组(2019 年)的 0.41 mg/g 相比, 第一年(2020 年)施用牡蛎壳土壤调理剂后维生素 C 质量比提高至 0.53 mg/g, 第二年(2021 年)施用牡蛎壳土壤调理剂后, 维生素 C 质量比提高至 0.68 mg/g。说明, 施用牡蛎壳土壤调理剂可明显改善黄地脐橙土壤酸化情况, 提高土壤有机质和交换性钙含量, 同时可有效提升果实的产量及品质。

**[关键词]** 土壤酸化; 牡蛎壳; 土壤调理剂; 黄地脐橙; 果实品质

**[中图分类号]** S 571.1

## Effect of Oyster Shell Soil Conditioner on Soil and Fruit Quality of Huangdi Navel Orange

WANG Yan<sup>1</sup>, DING Xiyue<sup>1</sup>, WENG Ling<sup>1</sup>, JI Mengya<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>1</sup>, WANG Yongming<sup>2</sup>, CAO Minjie<sup>1</sup>

(1. College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Mata Ecology Co. Ltd., Xiamen 361015, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of oyster shell soil conditioner on soil and fruit quality improvement of Huangdi navel orange, a two consecutive years' field tests was carried out during 2020-2021. The total amount of soil conditioner applied to different oyster shells was set as control (0 kg/tree) and test group (5 kg/tree) in first year, and 10 kg/tree in second year, respectively. Several indices, such as soil pH value, organic matter and exchangeable calcium content, the yield and quality of Huangdi navel orange fruit were measured to evaluate the effects of fertilization. The results showed that compared with 2019, the soil pH value increased by

**[收稿日期]** 2022-08-16

**[基金项目]** 国家贝类产业技术体系项目 (CARS-49)

**[作者简介]** 王妍 (1996—), 女, 硕士生, 从事海洋资源高值化利用研究。通信作者: 曹敏杰 (1964—), 男, 教授, 从事水产品深加工研究。E-mail: mjcao@jmu.edu.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

2.47 and 2.14, respectively after applying oyster shell soil conditioner in 2020 and 2021; The content of soil organic matter increased by 55.19% and 67.68%, respectively; The exchangeable calcium content in soil increased by 2.00, 6.61 cmol/kg, respectively. Noticeably, the output of Huangdi orange in 2020 and 2021 increased by 50.0% and 144.4% from the previous year, respectively. Increment of 6.37% and 25.26% in fruit sugar acid ratio was observed after the first and second year fertilization. Compared with 0.41 mg/g of the control group (2019), the content of vitamin C increased to 0.53 mg/g after the first year of application, and to 0.68 mg/g after the second year. The present results showed that the application of oyster shell soil conditioner could significantly neutralize soil acidification, increase the content of soil organic matter and exchangeable calcium, and effectively improve the fruit yield and quality of Huangdi navel orange.

**Keywords:** soil acidification; oyster shell; soil conditioner; Huangdi navel orange; fruit quality

## 0 引言

土壤酸化是指土壤环境中 pH 值不断降低、交换性酸含量逐渐增加的过程<sup>[1]</sup>。实际上,因自然因素导致的土壤酸化进程十分缓慢<sup>[2]</sup>。但是,近几十年来,由于人类生产、生活活动的加剧,土壤酸化进程大大加快。其中,酸沉降和不当的农业措施是加剧土壤酸化的主要原因<sup>[3]</sup>。我国是全球第三大酸沉降区域,特别是华南地区先后出现重酸雨区,降水 pH 值均小于 4.5<sup>[4-5]</sup>。酸雨渗入土壤,形成强酸性物质,导致土壤 pH 值下降。不合理的种植方式和酸性化肥的过量施用,加剧了土壤酸化,活化了土壤重金属,降低了土壤养分的有效性<sup>[6]</sup>。土壤酸化不仅会抑制作物根系的生长发育,降低其对营养成分的吸收<sup>[7-8]</sup>,还会使土壤阳离子交换量和盐基饱和度降低,矿物质营养元素严重流失<sup>[9]</sup>。1980—2000 年间,我国耕地土壤 pH 值下降了 0.5,土壤酸化已成为制约我国农业发展的重要问题之一<sup>[10]</sup>。因此,缓解土壤酸化,改善土壤环境质量,对于农作物增产增收、提质增效意义重大。

长期以来,改良土壤酸化最常见的方式是施用石灰。石灰的施用可以在短时间内达到较好的改良效果<sup>[11]</sup>。但是,石灰的强碱性容易烧苗,石灰提供的过量钙会降低土壤中其他营养元素的有效性,长期施用会引起土壤复酸化。所以,寻找一种效果好、副作用小的环境友好型土壤调理剂是十分有必要的。

我国柑橘的种植面积及产量均位于世界第一<sup>[12]</sup>。福建省作为经济作物柑橘的主产区,如何提高该类作物的产量与质量直接关系到本省的乡村振兴。厦门市集美区后溪镇黄地村是特色农产品黄地脐橙的主产区,该村地处厦门市供水水源地板头、石兜水库上游,农药、化肥的使用受到严格限制。但由于土壤母质条件和早期化肥过度使用的影响,该村土壤酸化问题严重,土壤肥力不高,橙子的裂果率居高不下,果实品质与产量也逐年下降。因此,寻找一种绿色环保并能有效提升橙子产量与品质的肥料成为必然选择。在前期的研究中发现,牡蛎壳经高温煅烧后,其主要成分碳酸钙转化为氧化钙,表面形成大量相互连通的直径为 2~10 μm 的气孔,具备良好的吸附能力和酸化土壤中和能力<sup>[13-14]</sup>。高温煅烧的牡蛎壳作为土壤调理剂可明显改善春桃番茄<sup>[15]</sup>、柚子<sup>[16]</sup>、甜瓜<sup>[17]</sup>等作物的果实品质,提高产量。本研究将牡蛎壳土壤调理剂施用于黄地脐橙,以期改善土壤酸化情况,提升果实的产量与品质,为牡蛎壳的高值化利用提供实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验地和实验材料

实验田位于福建省厦门市集美区后溪镇黄地村(24°44'32"N, 117°58'37"E),平均海拔为 397 m,年平均气温为 21℃,年平均降雨量为 1 315 mm,常年日照总时长为 1 953 h,光热充足,属亚热带海洋性季风气候。

本实验供试作物为黄地脐橙, 平均树龄为 10 a, 树型为自然圆头形, 平均冠幅直径为 3 m。供试土壤为根际土壤, 土壤类型为赤红壤。

牡蛎壳土壤调理剂由厦门玛塔生态股份有限公司提供, 该产品粒度(1.00 ~ 4.75 mm)  $\geq 90\%$ , pH = 8.5 ~ 10.0,  $w(\text{CaO}) \geq 35\%$ 。

## 1.2 实验设计

实验田面积为 375 m<sup>2</sup>, 共计 46 棵果树。实验组牡蛎壳土壤调理剂施用总量为 15 kg/棵, 共分 3 次施用, 每次 5 kg/棵。实验于 2019 年 12 月开始, 于 2021 年 12 月结束, 持续时间 2 a, 探究连续两年在同一块土地施用牡蛎壳土壤调理剂对土壤和果实的影响。在 2020 年 3 月, 第一次施用牡蛎壳土壤调理剂 5 kg/棵, 12 月果实成熟后进行采收。同时, 将牡蛎壳土壤调理剂作为基肥施入果树根系附近, 施用量为 5 kg/棵。根据气候及脐橙生长情况, 2021 年 5 月, 再次施用调理剂为 5 kg/棵, 2021 年 12 月初进行果实采收。牡蛎壳土壤调理剂的施用方式均为撒施, 施用面积以树干到滴水线半径为 1.5 m 的圆面积, 每个处理以相同方式施加等量的有机肥和少量的氮、磷、钾肥, 田间管理按常规方法进行。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 土壤样品采集及指标测定

分别在 2019 年 12 月、2020 年 12 月和 2021 年 12 月黄地脐橙果实采摘后、施用牡蛎壳土壤调理剂前采集土壤样品。土样的采集采用五点取样法, 去除表面浮土后, 用 200 cm<sup>3</sup> 环刀(直径 70 mm × 高 52 mm) 采集树冠滴水线附近 0 ~ 20 cm 土层样品。每棵树取 4 点, 混合后装袋, 及时运回实验室, 置于阴凉处自然风干。风干后的土壤过筛, 测定其基本理化指标。

土壤 pH 值测定参考 NY/T 1377—2007; 土壤有机质含量的测定方法采用重铬酸钾容量法-稀释热法<sup>[18]</sup>; 土壤交换性 Ca<sup>2+</sup> 含量测定参考 NY/T 1121.13—2006。

### 1.3.2 果实采集及指标测定

1) 果实样品采集及前处理。分别在 2019 年 12 月、2020 年 12 月和 2021 年 12 月对成熟的黄地脐橙果实进行采样, 将每棵树的果实全部采下, 然后选取色泽、大小、饱满度基本一致的果实进行指标测定。

2) 果实品质指标测定。果型指数采用游标卡尺进行测定; 出汁率采用原汁机进行测定; 可溶性糖含量采用蒽酮比色法进行测定; 果实维生素 C 含量采用分光光度法进行测定。

## 1.4 数据处理

所有实验数据均采用 Excel 2019 进行整理, 应用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析及最小显著差异性检验(Duncan's 新复极差法,  $P < 0.05$ ), 采用 GraphPad Prism 8 进行图表绘制。

# 2 实验结果

## 2.1 牡蛎壳土壤调理剂对黄地脐橙土壤理化性质的影响

### 2.1.1 对土壤 pH 值的影响

2019 年 12 月, 对黄地脐橙实验土壤进行第一次采样, 测得土壤初始 pH 值为 3.40。根据我国土壤酸碱度的等级标准, 实验地土壤属于强酸性土壤。2020 年 3 月施用牡蛎壳土壤调理剂后, 同年 12 月测得土壤 pH 值为 5.87, 提高了 2.47 (见图 1), 具有显著性差异( $P < 0.05$ )。2021 年 12 月, 黄地脐橙成熟采摘后, 再次测定土壤 pH 值为 5.54, 与 2019 年 12 月相比, pH 值提升了 2.14, 具有显著性差异( $P < 0.05$ ); 与 2020 年 12 月相比, 土壤 pH 值略微下降, 但不具有显著性差异( $P > 0.05$ )。由以上结果可知, 施用牡蛎壳土壤调理剂后, 土壤 pH 值得到有效提升, 土壤更适宜黄地脐橙的生长。

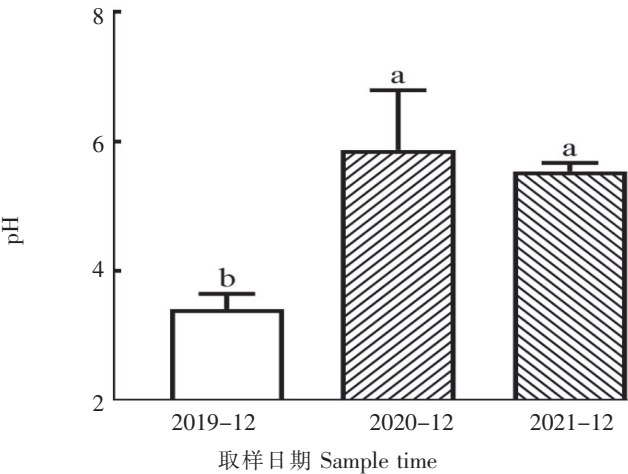
2.1.2 对土壤有机质质量比的影响

牡蛎壳土壤调理剂对黄地脐橙土壤有机质质量比的影响结果如图 2 所示。根据全国第二次土壤普查养分指标分级标准可知,2019 年 12 月,在未施用牡蛎壳土壤调理剂时,土壤中的有机质质量比为 28.25 g/kg,处于三级水平;2020 年 12 月,在第二次施肥前进行采样测定,土壤有机质质量比为 43.84 g/kg,提高了 55.19 %,处于一级水平,与 2019 年 12 月相比呈显著性差异 ( $P < 0.05$ )。持续施用土壤调理剂后,于 2021 年 12 月进行第三次采样,土壤有机质质量比为 47.37 g/kg,该结果相较于 2019 年 12 月和 2020 年 12 月的土壤有机质质量比,分别提高了 19.12, 3.53 g/kg,均具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。这些结果说明,施用牡蛎壳土壤调理剂可有效提高土壤有机质质量比。

2.1.3 对土壤交换性钙质量摩尔浓度的影响

供试土壤的交换性钙质量摩尔浓度初始值为 5.90 cmol/kg (2019 年 12 月)。施用牡蛎壳土壤调理剂后,在 2020 年 12 月,测得土壤交换性钙质量摩尔浓度为 7.90 cmol/kg,提高了 33.90% (见图 3),具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。2021 年继续施用牡蛎壳土壤调理剂后,土壤交换性钙质量摩尔浓度增至 12.51 cmol/kg,比 2019 年 12 月、2020 年 12 月分别提高了 6.61, 4.61 cmol/kg,均具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

当土壤处于酸性环境中时,交换性钙可被土壤胶体中的  $H^+$  所置换,加速了钙离子的淋失。另外,土壤有机质质量比与阳离子交换量成正比,土壤有机质质量比的提高使得吸附在土壤胶体表面的钙离子数量增多,土壤 pH 值也会随着交换性钙质量摩尔浓度的增加而提高。虽然 2021 年土壤 pH 值与 2020 年相比有略微降低,但没有形成显著性差异,而 2021 年施用过 2 次牡蛎壳土壤调理剂,所以土壤交换性钙质量摩尔浓度得到显著提升。因此,施用碱性的牡蛎壳土壤调理剂可有效提高土壤中的钙元素质量摩尔浓度,并提升其被作物利用的效率。



说明:柱状图上方不同小写字母表示不同土壤样品之间的显著性差异( $P < 0.05$ ),下同

Note: Different lowercase letters at the top of the bar chart indicate significant differences between different soil samples ( $P < 0.05$ ), the same as below

图 1 牡蛎壳土壤调理剂对土壤 pH 值的影响  
Fig.1 Effect of oyster shell soil conditioner on soil pH value

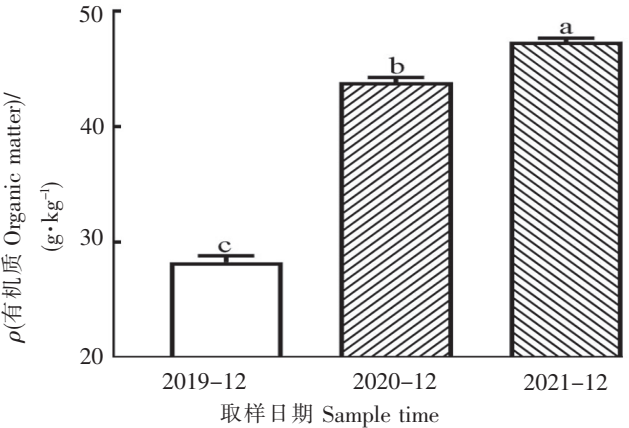


图 2 牡蛎壳土壤调理剂对土壤有机质质量比的影响

Fig.2 Effect of oyster shell soil conditioner on soil organic matter content

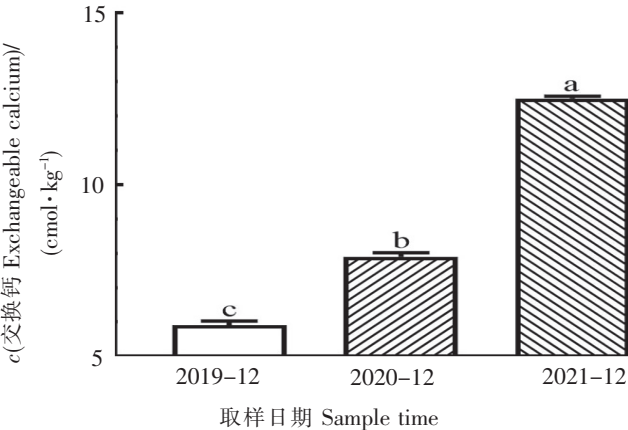


图 3 牡蛎壳土壤调理剂对土壤交换性钙质量摩尔浓度的影响

Fig.3 Effect of oyster shell soil conditioner on soil exchangeable calcium content



2.2 牡蛎壳土壤调理剂对黄地脐橙果实品质的影响

2.2.1 对黄地脐橙果实产量及单果质量的影响

由表 1 可见，黄地脐橙产量随着牡蛎壳土壤调理剂施用时间的延长呈明显上升趋势。2019 年未施用牡蛎壳土壤调理时，实验地（375 m<sup>2</sup>）的脐橙产量为 300 kg；2020 年施用牡蛎壳土壤调理剂后，其产量提高至 450 kg，增产 50%；2021 年果实成熟后，再次进行产量统计，产量达 1 100 kg，相比 2019 年和 2020 年，产量分别增加了 267% 和 144%。

牡蛎壳土壤调理剂的施用使黄地脐橙果实单果质量呈现下降趋势（见表 1）。与对照组（2019 年）相比，2020、2021 年施用牡蛎壳土壤调理剂后，果实单果质量分别降低了 12.06% 和 39.09%，均呈显著性差异（ $P < 0.05$ ）。牡蛎壳土壤调理剂的施用，因果实生长密度的增加降低了脐橙的单果质量，但可有效提高果实产量。

2.2.2 对黄地脐橙果实果形指数的影响

果形指数是评价果实外观质量的重要指标。2020 年施用牡蛎壳土壤调理剂后，与 2019 年的对照组相比，果形指数并无明显差异（ $P > 0.05$ ）；随着施肥时间的延长，2021 年的果形指数呈显著性上升趋势，与对照组相比，增加了 9.00%，比 2020 年第一次施肥后提高了 7.92%，均形成显著性差异（ $P < 0.05$ ）（见图 4）。

牡蛎壳土壤调理剂的施用可以改善黄地脐橙果实形状，使黄地脐橙果皮厚度更均一，形状更接近长球形（见图 5）。

表 1 牡蛎壳土壤调理剂对黄地脐橙果实单果质量及产量的影响

Tab. 1 Effects of oyster shell soil conditioner on single fruit weight and yield of Huangdi navel orange

处理组	产量	单果质量
Treatment groups	Yield/kg	Single fruit mass/g
2019 年未施用 Unapplied in 2019	300	286.80 ± 2.50 <sup>a</sup>
2020 年施用 Applied in 2020	450	252.20 ± 0.17 <sup>b</sup>
2021 年施用 Applied in 2021	1 100	174.70 ± 0.36 <sup>c</sup>

说明：表中数据同列右上方不同小写字母表示同一指标在不同采样时间果实样品之间的显著性差异（ $P < 0.05$ ）

Note: Different lower case letters at the top right of the same column in the data of the table indicate the significant difference between fruit samples of the same index at different sampling times（ $P < 0.05$ ）

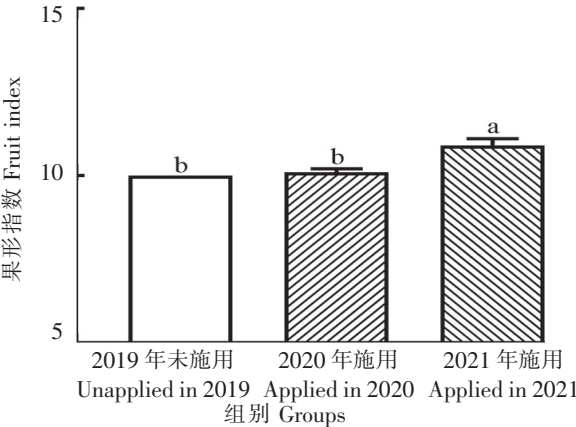


图 4 牡蛎壳土壤调理剂对黄地脐橙果形指数的影响  
Fig.4 Effect of oyster shell soil conditioner on fruit shape index of Huangdi navel orange



图 5 牡蛎壳土壤调理剂对黄地脐橙果形的影响

Fig.5 Effect of oyster shell soil conditioner on fruit shape of Huangdi navel orange

2.2.3 对黄地脐橙果实固酸比、糖酸比的影响

固酸比、糖酸比是衡量柑橘果实风味和品质的重要指标，优质果通常要求固酸比达到 12.0 以上、糖酸比达到 10.0 以上<sup>[19]</sup>。相比对照组（2019 年），2020 年施用牡蛎壳土壤调理剂后，黄地脐橙果实的可溶性固形物质量分数为 12.40%，提高了 0.73%；可溶性糖质量分数为 11.22%，增加了 3.51%

(见表2)。相比对照组和2020年施用组,2021年12月,果实成熟后再次进行测定,可溶性固形物质量分数分别提高了11.13%和10.32%,可溶性糖质量分数分别提高了21.86%和17.74%,均具有显著性差异( $P<0.05$ )。与2019年的对照组相比,2020年施用后,固酸比、糖酸比分别增加了3.53%和6.37%;2021年施用牡蛎壳土壤调理剂后,固酸比、糖酸比分别提高14.20%和25.26%。说明,牡蛎壳土壤调理剂的施用可以提高黄地脐橙果实的固酸比、糖酸比。

表2 牡蛎壳土壤调理剂对黄地脐橙固酸比、糖酸比的影响

Tab.2 Effects of oyster shell soil conditioner on solid acid ratio and sugar acid ratio of Huangdi navel orange

指标 Index	2019 年未施用 Unapplied in 2019	2020 年施用 Applied in 2020	2021 年施用 Applied in 2021
$w$ (可溶性固形物 Soluble solid)/%	12.31 ± 0.50 <sup>b</sup>	12.40 ± 0.35 <sup>b</sup>	13.68 ± 0.36 <sup>a</sup>
$w$ (可溶性糖 Soluble sugar)/%	10.84 ± 0.24 <sup>c</sup>	11.22 ± 0.21 <sup>b</sup>	13.21 ± 0.33 <sup>a</sup>
$w$ (可滴定酸 Titratable acid)/%	0.75 ± 0.29 <sup>a</sup>	0.73 ± 0.22 <sup>a</sup>	0.73 ± 0.21 <sup>a</sup>
固酸比 Solid acid ratio	16.41	16.99	18.74
糖酸比 Sugar acid ratio	14.45	15.37	18.10

说明:表中数据同行右上方不同小写字母表示同一指标在不同采样时间果实样品之间的显著性差异( $P<0.05$ )  
Note: Different lower case letters at the top right of the data row in the table indicate significant differences between fruit samples of the same index at different sampling times ( $P<0.05$ )

2.2.4 对黄地脐橙果实维生素C质量比的影响

维生素C是人类营养中最重要的维生素之一。维生素C的质量比可以作为果蔬营养品质和贮藏效果的评价指标。由图6可见,未施用牡蛎壳土壤调理剂时(2019年),黄地脐橙果实维生素C的质量比为0.41 mg/g。2020年第一年施用牡蛎壳土壤调理剂后,维生素C的质量比提高至0.53 mg/g,增加了29.2%,与对照组(2019年)相比呈显著性差异( $P<0.05$ );2021年继续施用牡蛎壳土壤调理剂后,维生素C质量比持续提升,相比2019年的对照组和2020年第一年施用后,分别增加了0.273,0.153 mg/g,均具有显著性差异( $P<0.05$ )。说明,施用牡蛎壳土壤调理剂可以提升黄地脐橙果实中的维生素C质量比。

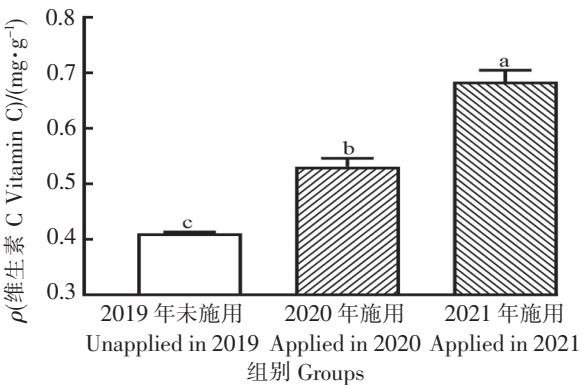


图6 牡蛎壳土壤调理剂对黄地脐橙维生素C质量比的影响

Fig.6 Effect of oyster shell soil conditioner on vitamin C content of Huangdi navel orange

3 讨论

适宜脐橙生长的土壤pH值范围在5.5~6.5,属微酸性环境<sup>[20]</sup>。近年来,由于酸雨的影响以及化肥的大量施用,我国土壤酸化情况愈发严重<sup>[21]</sup>。土壤酸化带来的土壤养分流失、微生物活性降低以及重金属离子的活化,会导致农作物减产,进一步成为全球农业发展的障碍因子。酸性土壤最常见的改良方式是施用石灰,但施用石灰不仅会降低土壤中其他营养元素的有效性,还会因其碱性过强,对施用者的身体尤其是手和眼睛会产生不良影响,还会出现烧苗的情况。长期大量施用石灰会导致土壤板结,养分分布不均衡,且在酸性土壤中施用石灰会出现复酸化现象<sup>[22]</sup>。

牡蛎是我国重要的经济贝类,福建更是我国牡蛎生产大省,其牡蛎产量约占全国总产量的40%。随着牡蛎养殖量和消费量的逐渐提升,牡蛎壳废弃物的处理问题受到关注。牡蛎壳的主要成分为碳酸钙,在800℃高温下将其煅烧,可将CaCO<sub>3</sub>分解为CaO,同时形成复杂的多孔结构<sup>[14]</sup>。

施用牡蛎壳土壤调理剂可明显提高黄地脐橙土壤的pH值。煅烧牡蛎壳产生的CaO微溶于水,能够游离出Ca<sup>2+</sup>和OH<sup>-</sup>,在改善土壤酸化的同时,还可以补充土壤中的Ca<sup>2+</sup>。大量的Ca<sup>2+</sup>与Al<sup>3+</sup>、

$H^+$  进行交换反应, 使土壤胶体中的碱性盐基离子含量增加, 氢饱和度降低, 土壤 pH 值增加, 改善了土壤环境。Huang 等<sup>[23]</sup> 研究发现, 施用 2 250 kg/hm<sup>2</sup> 的牡蛎壳粉可降低水稻土壤酸度, 使土壤 pH 值提高 4.1% ~ 24.5%, 并建议在红壤地区的酸性稻田中广泛应用。土壤有机质能促进土壤结构形成, 改善土壤环境<sup>[24]</sup>, 其含量成为衡量土壤质量和肥力的指标之一<sup>[25]</sup>。我国南方酸性土壤分布面积大, 土壤淋溶作用强烈, 使得有机质含量降低, 土壤肥力普遍较低<sup>[26]</sup>。在前期研究中发现, 施用牡蛎壳土壤调理剂后, 柚子土壤的 pH 值升高, 土壤微生物活性上升, 有利于提高土壤中有机质含量<sup>[27]</sup>。土壤 pH 值的变动会对土壤微生物的种类、数量产生一定影响, 而土壤有机质主要来源于动植物残体, 动植物残体的分解需要依靠微生物, 土壤 pH 值提高后, 土壤微生物和酶活性增强, 可以有效促进腐殖酸的形成以及矿质元素的矿化作用, 增加土壤有机质含量。此外, 农户也会根据脐橙树冠的冠幅大小每棵施用 8 ~ 10 kg 有机肥。农作物对钙的吸收利用与其在土壤中的交换性钙含量密切相关。交换性钙主要吸附于土壤胶体表面, 当土壤 pH 值降低时, 钙离子可被大量  $H^+$  交换进入土壤溶液中, 从而造成淋失, 因此, 土壤 pH 值与交换性钙含量呈显著正相关<sup>[28]</sup>。土壤 pH 值的提高以及土壤对钙的优先吸持作用, 可以使更多的钙吸附于土壤胶体表面。本实验结果也表明, 施用牡蛎壳土壤调理剂后, 土壤 pH 值得到提高, 土壤交换性钙含量也随之增加。

将牡蛎壳土壤调理剂应用于黄地脐橙种植中, 除了可以改良酸性土壤外, 还可以提升果实品质, 提高产量, 有效降低裂果率。钙作为第二信号系统, 直接参与植物代谢, 对植物的生长发育起着重要的作用<sup>[29]</sup>。外源增施钙肥可以提高果实抗氧化酶活性, 维持植物细胞结构与功能, 抑制酶促褐变的发生, 降低果实呼吸作用, 提高果实的硬度与光泽, 延长果实的保质期<sup>[30]</sup>。黄艳等<sup>[31]</sup> 研究发现, 外源施用 0.5% 的钙肥可以显著增加果实硬度、可溶性固形物和可溶性糖含量。张伟等<sup>[29]</sup> 发现, 对南果梨喷施不同浓度的钙溶液后, 果实的横径和纵径均显著高于对照组。梁和等<sup>[32]</sup> 研究发现, 喷洒钙肥可增加果实发育前期光合产物的积累, 进而促进果实发育中后期糖类的积累以及有机酸的转化。果胶对于维持细胞壁破裂应变力起重要作用, 钙与果胶结合形成钙盐, 可以增加原生质弹性和耐压力, 从而提高果皮的抗裂能力<sup>[33]</sup>。

2019 年, 实验地脐橙的裂果率为 7.2%, 经第一年施用牡蛎壳土壤调理剂后, 2020 年裂果率降至 4.0%, 同年 12 月将牡蛎壳土壤调理剂作为基肥再次施用, 于 2021 年 12 月果实成熟后统计裂果情况, 几乎无裂果。但是, 与对照组相比, 施用牡蛎壳土壤调理剂后, 果实单果质量逐年降低。推测其原因, 可能是产量的大幅提升与果实生长密度相关, 过高的密度导致单果质量降低, 因此, 有必要进行适当的疏果处理。在本研究中, 可滴定酸含量在施用牡蛎壳土壤调理剂前后并无差异, 出现此现象的原因还需进一步研究。

## 4 结论

在黄地脐橙土壤中施用牡蛎壳土壤调理剂, 可显著提高土壤 pH 值、有机质含量以及交换性钙含量, 改善土壤质量。同时, 提升了果实产量、维生素 C 含量以及糖酸比, 果实品质指标和适口性得到显著提高。本研究为牡蛎壳的高值化利用和黄地脐橙产量、果实的品质提升提供了参考。

## [ 参考文献 ]

- [1] 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.
- [2] 康飞, 杜学军, 胡树文, 等. 基于 Web of Science 和万方专利对土壤酸化和改良材料研究的计量分析[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1261-1270.
- [3] 袁浩亮, 龙泽东, 孙梅, 等. 国际土壤酸化研究知识图谱分析[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 989-997.
- [4] 余倩, 段雷, 郝吉明. 中国酸沉降: 来源、影响与控制[J]. 环境科学学报, 2021, 41(3): 731-746.
- [5] OU R, HAN G L. A critical review of the variation in rainwater acidity in 24 Chinese cities during 1982-2018[J]. Elementa Science of the Anthropocene, 2021, 9(1): 00142.



- [6] HAN T F, CAI A D, LIU K, et al. The links between potassium availability and soil exchangeable calcium, magnesium, and aluminum are mediated by lime in acidic soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1382-1392.
- [7] GUO F Y, DING C F, ZHOU Z G, et al. Stability of immobilization remediation of several amendments on cadmium contaminated soils as affected by simulated soil acidification[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 161: 164-172.
- [8] ZHANG Y J, YE C, SU Y W, et al. Soil Acidification caused by excessive application of nitrogen fertilizer aggravates soil-borne diseases: evidence from literature review and field trials[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 340: 108176.
- [9] 周碧青, 邱龙霞, 张黎明, 等. 基于灰色关联-结构方程模型的土壤酸化驱动因子研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1233-1242.
- [10] 李涛, 于蕾, 万广华, 等. 近30年山东省耕地土壤pH时空变化特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 180-190.
- [11] ZHU H H, CHEN C, XU C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 99-106.
- [12] 王珏, 周卫军, 商贵铎, 等. 不同母质柑橘园土壤养分特征及肥力综合评价[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(5): 933-940.
- [13] YANG X F, HUANG Y X, LIU K X, et al. Effects of oyster shell powder on leaching characteristics of nutrients in low-fertility latosol in South China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(37): 56200-56214.
- [14] 曹敏杰, 丁希月, 许玲玲, 等. 牡蛎壳资源利用研究进展[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2021, 26(5): 390-397.
- [15] 许玲玲, 翁凌, 章骞, 等. 牡蛎壳土壤调理剂对春桃番茄产量与品质的改善效果[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2022, 27(1): 37-44.
- [16] 李雁乔, 章骞, 黄永生, 等. 煅烧牡蛎壳粉对土壤酸化及琯溪蜜柚果实的改善效果[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2020, 25(4): 256-264.
- [17] 许玲玲, 章骞, 王永明, 等. 煅烧牡蛎壳粉对土壤酸化及玉菇甜瓜品质的改良效果[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2020, 25(5): 336-343.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 陈克玲, 刘建军, 罗楠, 等. 脐橙挂树贮藏期间果实品质变化规律研究[J]. *西南农业学报*, 2005, 18(6): 810-813.
- [20] 黄兰, 周卫军, 崔浩杰, 等. 湖南柑橘土壤中微量养分特征及施肥对策[J]. *土壤*, 2020, 52(2): 287-293.
- [21] 周玲红, 黄晶, 王伯仁, 等. 南方酸化红壤钾素淋溶对施石灰的响应[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 457-467.
- [22] 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.
- [23] HUANG D F, LUO T. Tebei calcium oyster powder may enhance rice output, decrease rice heavy metal concentration and reduce soil acidity[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1732(1): 12104-12106.
- [24] ZHAO N, JU F, SONG Q W, et al. Quantitative assessment of the contribution of soil organic matter functional groups and heteroatoms to PAHs adsorption based on the COSMO-RS model[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157415.
- [25] LIU M Y, ZHU J, YANG X, et al. Biochar produced from the straw of common crops simultaneously stabilizes soil organic matter and heavy metals[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 828: 154494.
- [26] 储成, 吴赵越, 黄欠如, 等. 有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2468-2475.
- [27] 李雁乔. 牡蛎壳土壤改良剂对琯溪蜜柚品质影响的研究[D]. 厦门: 集美大学, 2019.
- [28] 刘杰, 谭智勇, 周兴华, 等. 铜仁市植烟土壤交换性钙镁空间分布特征及其影响因素分析[J]. *核农学报*, 2022, 36(4): 812-819.
- [29] 张伟, 刘畅, 杜国栋, 等. 喷施钙肥对梨果实品质和石细胞代谢的影响[J]. *中国果树*, 2022(1): 34-39.
- [30] WANG K K, XU F, CAO S F, et al. Effects of exogenous calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>) and ascorbic acid (AsA) on the  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) metabolism in shredded carrots[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 152: 111-117.
- [31] 黄艳, 文露, 庞亚卓, 等. 喷施钙肥对‘夏黑’葡萄果实糖酸积累的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(2): 166-172.
- [32] 梁和, 马国瑞, 石伟勇, 等. 硼钙营养对不同品种柑桔糖代谢的影响[J]. *土壤通报*, 2002(5): 377-380.
- [33] 卢明, 洪珊, 剧虹伶, 等. 施钙对‘台农17号’菠萝裂柄的生理影响及效果[J]. *植物生理学报*, 2018, 54(4): 565-573.

(责任编辑 马建华 英文审校 刘静雯)