

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22322

褚橙果实品质指标与土壤养分状况关联分析

刘志宗^{1, 2}, 王 晟^{2, 3}, 陈亚俊^{1, 2}, 张乃明^{1, 2*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 云南 昆明 650201; 3. 云南农业大学植物保护学院, 云南 昆明 650201)

摘 要:褚橙作为云南省高原特色农业重要的组成部分, 具有极高的食用和经济价值。为全面了解褚橙庄园土壤养分状况和果实品质指标现状, 在玉溪市新平褚橙庄园内 16 hm² 种植示范区中采集果实及 0~30 和 30~60 cm 土层的土壤, 对果实品质指标和土壤理化性质进行检测分析, 探究褚橙种植示范区果实营养元素与土壤养分的关联。结果表明: (1) 庄园种植示范区土壤有机质、有效磷和有效铁含量适宜褚橙生长, 土壤处于足硒水平; 褚橙果实品质和含硒量稳定, 但仍有提升空间。(2) 相对 30~60 cm 土层而言, 0~30 cm 土层的营养元素含量对果实品质指标的影响更大。(3) 利于提高褚橙品质的土壤锌、铁、钙含量最适范围分别是 1.46~2.61, 15.58~21.02、1410.94~1998.44 mg · kg⁻¹。

关键词:褚橙; 果实品质; 土壤养分; 相关性分析

钙、铁、锌、硒是人体必需的矿质元素, 维持人体正常的生理功能^[1-3]。因膳食结构的特点, 我国居民易缺乏这 4 种矿物质元素。2012 年中国居民营养与健康状况监测结果显示: 我国居民钙、锌和铁缺乏 (即摄入量低于平均需要量) 的风险分别为 96.60%、35.60% 和 11.50%, 部分微量元素缺乏的状况比较严重^[4]。我国是缺硒情况较为严重的国家, 中国贫硒国土面积按照世界卫生组织推荐值 (0.100 mg · kg⁻¹) 和中国规范 (0.125 mg · kg⁻¹) 计算, 分别占 21.10% 和 31.60%^[5], 硒元素缺乏会引起克山病、癌症、高血压和免疫系统功能紊乱等疾病^[6-7]。目前人们主要通过药品、保健品、食品添加剂等方式补充上述营养元素^[8-10], 忽视了饮食的补充, 而食品营养强化是世界卫生组织推荐用于改善人群微量营养素缺乏的重要措施之一^[11]。由于大部分植物性食物对矿质元素的吸收率和利用率有限, 因此, 通过现代生物技术和农艺措施, 标准化调整优化农产品的营养成分, 满足人们个性化需求的功能农业已成为

当前的研究热点, 同时这一方向很好地契合于当前我国农业从注重“量”转向注重“质”的战略需求^[12]。

土壤是植物从外界吸收营养元素的主要来源, 与人体健康存在密切关系^[13]。其中一个主要的积极影响是将养分从土壤转移到植物, 并通过饮食从植物转移到人体。生物强化能够提高植物中对人类健康至关重要的营养物质水平, 是解决营养不良问题的可持续解决方案^[14]。褚橙对土壤营养元素的种类和供给强度有比较明确的目的性, 土壤不同的营养状况对褚橙植株的生理状况和果实品质指标均有不同地影响。因此, 探明褚橙种植土壤养分状况与果实品质指标的相关性, 并在此基础上提高营养元素从土壤向果实转移的效率, 将对促进褚橙健康可持续发展和迈向功能农业起到十分重要的作用。由于目前研究存在地区性差异, 而且不同研究得出的标准值之间差异性较大, 所以在指导褚橙施肥、改善褚橙品质和提高褚橙对人体有益营养元素等方面存在较大的困难。为进一步明确新平县褚橙庄园果树的生长状况、果实品质、营养元素含量和园区土壤养分状况之间的关系, 选取园区内的 16 hm² 种植示范区进行野外调查取样和室内试验, 对褚橙果实品质和钙、铁、锌、硒等营养成分与其相应的土壤性质间的相互关系进行探究, 为褚橙庄园园区向“功能农业”的发展提供科学依据。

收稿日期: 2022-05-23; 录用日期: 2022-06-15

基金项目: 云南省科技重大专项-农产品产地环境净化关键技术研究与示范应用 (20200202AE32005)。

作者简介: 刘志宗 (1995-), 在读硕士研究生, 研究方向为土壤培肥与改良。E-mail: lzzynau@163.com。

通讯作者: 张乃明, E-mail: zhangnaiming@sina.com。



1 材料与方法

1.1 研究区概况

褚橙种植区主要分布在南盘江流域和红河流域。其中“褚橙庄园”种植园区位于云南省玉溪市新平彝族傣族自治县境内(23° 38' 15"—24° 26' 5" N, 101° 16' 30"—102° 16' 50" E), 地处哀牢山中段东麓, 地形以山地为主, 县境山区面积 4139.60 km²。全域属温带气候区, 年平均气温 18.10℃, 年最高气温 32.80℃, 年最低气温 1.30℃, 年均降水量 869.00 mm, 总日照时数 2838.70 h。园区内褚橙种植面积达 420 hm², 年均产量超过 1 万 t, 是著名水果褚橙的主要产区之一。同时, 园区土壤硒平均含量为 0.38 mg · kg⁻¹, 高于全国土壤硒平均含量 0.29 mg · kg⁻¹, 岩石中硒的“初始含量”和后期土壤中硒的次生富集是园区硒的主要来源。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与处理

采样区面积 16 hm², 树龄 6~7 年, 每公顷栽植 1200 棵橙树。一年施肥两次, 分别在 12 月到次年 1 月(采果后)和 4 月(盛花期), 12 月施肥以有机肥为主, 配合施用复合肥和中、微量营养元素, 每公顷施有机肥 360 kg, 油枯 1800 kg, 复合肥 240 kg, 钙、镁、磷肥 600 kg 和钾肥 240 kg, 4 月施肥以复合肥为主, 每公顷施复合肥 600 kg, 硫酸钾 260 kg, 硝酸钙 120 kg。

土壤、果实样品采集于 2021 年 9 月, 采样点共 24 个, 分布如图 1 所示。其中土壤样品按照 5 点取样法先采集耕层 0~30 cm 土样; 在 24 个取样点中随机选取 8 个取样点, 按照 5 点采样法分别采

集附近 5 棵果树的初熟果实样品 2 个和 30~60 cm 土层土壤样品。

1.2.2 样品测定方法与数据分析

土壤营养元素含量测定: 土壤 pH 按照《土壤 pH 的测定》(NY/T 1377—2007); 土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量的参考《土壤农化分析》^[15]的方法; 土壤有效锌、有效铁、有效铜含量按照《土壤有效态锌、锰、铁、铜含量的测定 二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提法》(NY/T 890—2004); 交换性钙含量按照《土壤检测 土壤交换性钙和镁的测定》(NY/T 1121.13—2006); 土壤硒含量按照《土壤中全硒的测定》(NY/T 1104—2006)。

果实品质的测定按照李玲^[16]的方法: 果实可溶性总糖采用蒽酮法, 维生素 C 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法, 可溶性蛋白采用考马斯亮蓝染料结合法, 有机酸采用指示剂滴定法, 可溶性固形物(糖度)采用折光仪法, 果实铜、锌、钙、铁、硒含量分别采用标准《食品安全国家标准 食品中铜的测定》(GB 5009.13—2017)、《食品安全国家标准 食品中锌的测定》(GB 5009.14—2017)、《食品安全国家标准 食品中钙的测定》(GB 5009.92—2016)、《食品安全国家标准 食品中铁的测定》(GB 5009.90—2016)、《食品安全国家标准 食品中硒的测定》(GB 5009.93—2017)。

1.2.3 柑橘园土壤 pH 值、有机质和养分分级标准

柑橘园土壤 pH、有机质及各营养元素养分分级指标参考鲁剑巍等^[17]的分级标准。pH 值分级标准: pH 值 < 4.50 为强酸性, 4.50 ~ 5.50 为酸性, 5.50 ~ 6.50 为弱酸性, 6.50 ~ 7.50 为中性, 7.50 ~ 8.50 为碱性, > 8.50 为强碱性; 强酸性和强碱性土壤不适于褚橙生长, 其余土壤均适合或基本适合褚橙生长, 最适 pH 值为 5.50 ~ 6.50。土壤有机质(g · kg⁻¹)分级标准: < 5.00 为极低, 5.00 ~ 10.00 为低, 10.00 ~ 15.00 为偏低, 15.00 ~ 30.00 为适宜, > 30.00 为丰富。土壤碱解氮、有效磷、速效钾和中、微量元素(mg · kg⁻¹)分级标准如表 1 和表 2 所示。

1.3 数据处理

数据使用 Excel 2016、SPSS 26.0 进行统计分析, 采用 Pearson 进行相关性分析, 图表使用 Arc-GIS 10.7 和 Excel 2016 制图。

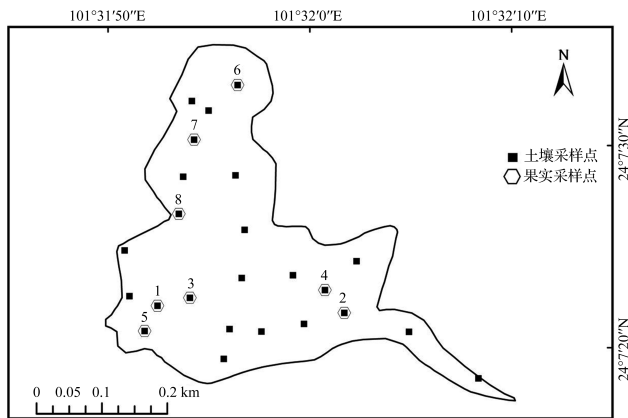


图 1 土壤及褚橙果实采样点示意图

表 1 土壤大量元素丰缺标准 (mg · kg ⁻¹)					
养分	缺乏	低量	适量	高量	过量
碱解氮	<50.00	50.00~100.00	100.00~200.00	200.00~300.00	>300.00
有效磷	<5.00	5.00~15.00	15.00~80.00	80.00~200.00	>200.00
速效钾	<50.00	50.00~100.00	100.00~200.00	200.00~360.00	>360.00

表 2 土壤中、微量元素丰缺标准 (mg · kg ⁻¹)			
养分	低量	适量	高量
交换性钙	<400.00	400.00~600.00	>600.00
交换性镁	<50.00	50.00~250.00	>250.00
有效铁	<5.00	5.00~20.00	>20.00
有效锌	<1.50	1.50~3.00	>3.00
有效铜	<2.00	2.00~4.00	>4.00

2 结果与分析

2.1 种植土壤营养元素含量与果实品质

2.1.1 研究区土壤基本状况

研究区土壤有机质和 pH 值分布状况和频数如图 2 所示。0~30 cm 土层土壤的有机质含量平均值为 20.87 g · kg⁻¹，68.75% 的样品处于适宜范围，21.88% 样品处于丰富水平；30~60 cm 土层土壤的有机质含量平均值为 20.87 g · kg⁻¹，75.00% 的样品处于适宜范围，剩余样品均处于低量水平。0~30 cm 土层土壤的 pH 平均值为 7.00，有 12.50% 的样品 pH 值适宜褚橙生长，81.25% 的样品高于适宜范围；30~60 cm 土层的土壤 pH 平均值为 6.41，有 12.5% 的样品 pH 值适宜褚橙生长，62.50% 的样品高于适宜范围。

土壤大量元素检测结果如表 3 所示。0~30 cm 土层碱解氮、有效磷、速效钾平均值分别为 87.50、41.40、365.80 mg · kg⁻¹，上述指标分别有 29.00%、83.33%、8.33% 的样品处于适宜范围；30~60 cm 土层碱解氮、有效磷、速效钾平均值分别为 62.30、55.11、333.41 mg · kg⁻¹，分别有 0.00%、87.50%、13.50% 的样品处于适宜范围。

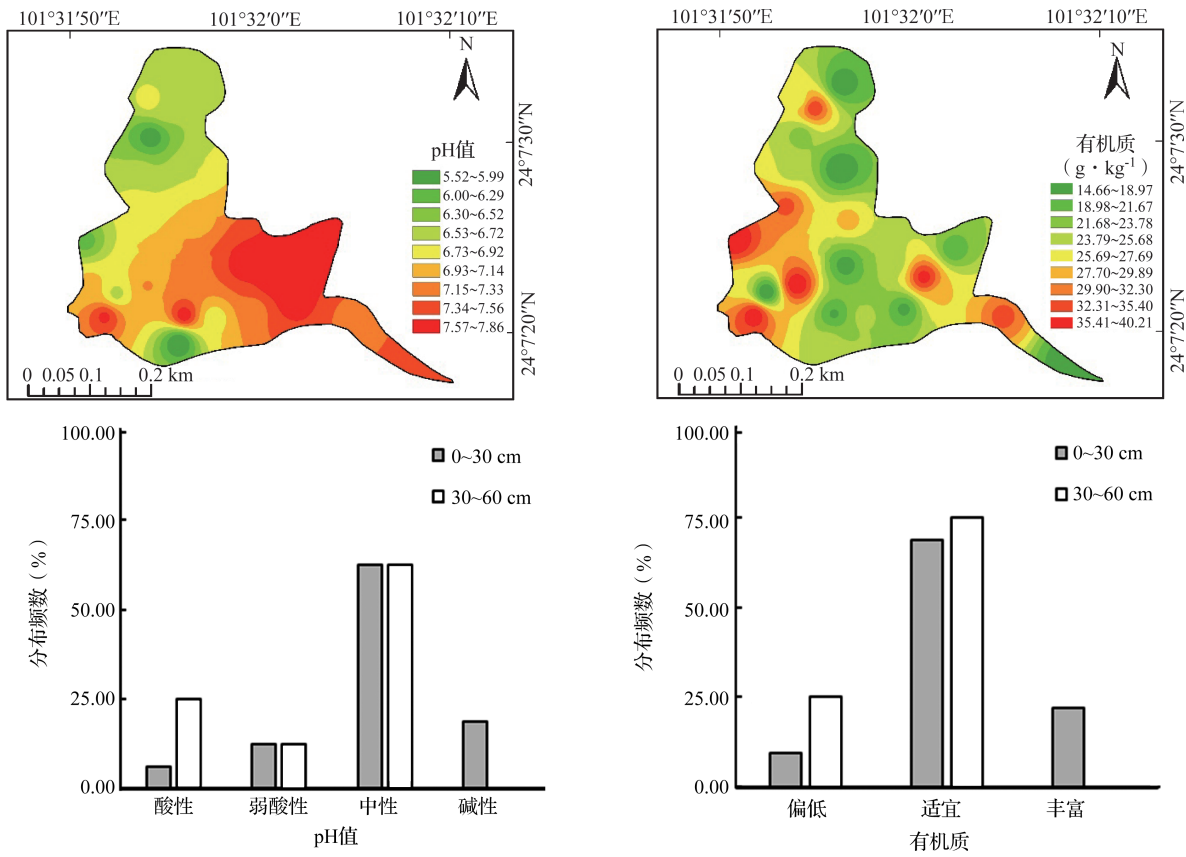


图 2 研究区土壤有机质含量和 pH 值分布频数

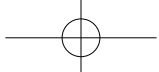


表 3 研究区土壤大量营养元素现状

土层 (cm)	土壤养分	变幅 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数 (%)	分布频率 (%)				
					缺乏	低量	适量	高量	过量
0~30	碱解氮	30.80~168.00	87.50 ± 38.88	44.43	17.00	54.00	29.00	0.00	0.00
	有效磷	12.40~135.60	41.40 ± 27.90	67.40	0.00	8.33	83.33	8.33	0.00
	速效钾	171.75~577.50	365.80 ± 120.44	32.93	0.00	0.00	8.33	41.67	50.00
30~60	碱解氮	33.60~95.20	62.30 ± 23.75	38.00	50.00	50.00	0.00	0.00	0.00
	有效磷	27.80~90.80	55.11 ± 20.53	37.00	0.00	0.00	87.50	22.50	0.00
	速效钾	135.00~588.25	333.41 ± 146.81	44.00	0.00	0.00	13.50	37.50	50.00

土壤中、微量元素的检测结果如表 4 所示。0~30 cm 土层土壤交换性钙、有效铁、有效锌、有效铜含量的平均值分别为 3852.99、16.07、3.63、 $1.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，上述指标分别有 0.00%、75.00%、29.17%、29.00% 的样品处于适宜水平，土壤含硒量变幅为 0.091~0.436 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 0.250

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。30~60 cm 土层土壤交换性钙、有效铁、有效锌、有效铜含量的平均值分别为 2517.77、20.03、2.58、 $1.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，分别有 0.00%、50.00%、25.00%、22.50% 的样品处于适宜水平，所有样品均处于高量水平，30~60 cm 土层的土壤含硒量变幅为 0.122~0.396 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 0.262 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 4 研究区土壤中、微量营养元素

土层 (cm)	土壤养分	变幅 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数 (%)	分布频率 (%)		
					低量	适量	高量
0~30	交换性钙	1410.94~10267.19	3852.99 ± 2149.11	55.78	0.00	0.00	100.00
	有效铁	7.36~25.96	16.07 ± 5.26	32.73	0.00	75.00	25.00
	有效锌	0.52~7.84	3.63 ± 1.75	48.20	8.33	29.17	62.50
	有效铜	0.56~2.64	1.60 ± 0.57	35.72	71.00	29.00	0.00
	总硒	0.091~0.436	0.250 ± 0.100	39.41			
30~60	交换性钙	1098.44~3814.06	2517.77 ± 832.30	33.10	0.00	0.00	100.00
	有效铁	13.62~27.32	20.03 ± 5.22	26.10	0.00	50.00	50.00
	有效锌	0.82~4.36	2.58 ± 1.42	55.20	25.00	25.00	50.00
	有效铜	0.42~2.64	1.09 ± 0.71	64.80	87.50	22.50	0.00
	总硒	0.122~0.396	0.262 ± 0.121	46.10			

结果表明，研究区土壤呈中性，有机质、有效磷和有效铁含量适宜，碱解氮和有效铜含量偏低，土壤速效钾、交换性钙和有效锌含量过高，土壤处于足硒水平。

2.1.2 果实营养元素含量与品质基本状况

果实营养元素含量如表 5 所示，果实中钙、铁、锌、铜、硒的平均含量分别为 808.55、5.54、

1.25、0.92、 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其中钙和硒含量比较稳定，变异系数分别为 15.32% 和 6.31%。取样点褚橙的有机酸、维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白和可溶性固形物平均值分别为 0.26%、7.80 $\text{mg}/100 \text{ g}$ 、12.03 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $0.0037 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 10.03%，糖酸比平均值为 38.58，各取样点之间果实品质相对稳定。

表 5 褚橙果实品质指标

测定指标	变幅	平均值	标准偏差	变异系数 (%)
钙 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	507.60~907.74	808.55	123.91	15.32
铁 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	3.08~11.10	5.54	2.29	41.42
锌 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.52~3.49	1.25	0.87	69.42
铜 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.35~1.61	0.92	0.46	49.54
硒 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.014~0.017	0.015	0.0009	6.31
有机酸 (%)	0.19~0.34	0.26	0.06	23.46
维生素 C ($\text{mg}/100 \text{ g}$)	6.94~9.17	7.80	0.82	10.45
可溶性固形物 (%)	9.20~11.00	10.03	0.61	6.10
可溶性糖 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	8.94~13.53	12.03	1.51	12.52
可溶性蛋白 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	0.003~0.0047	0.0037	0.0006	16.22

2.2 研究区土壤养分与果实品质、营养元素含量的相关性分析

果实品质与养分（果实、土壤）的相关性结果如表 6 和表 7 所示。0~30 cm 土层土壤碱解氮含量与果实可溶性蛋白含量呈显著负相关，与果实可溶性糖含量呈极显著负相关；30~60 cm 土层土壤碱解氮与果实维生素 C 含量呈显著正相关，与

可溶性固形物含量呈显著负相关。0~30 cm 土层的土壤有效锌含量与果实铜含量呈显著负相关，与果实钙和硒含量呈极显著负相关。此外，褚橙果实硒含量还与土壤 pH 值和交换性钙含量呈显著负相关。相较 30~60 cm 土层而言，0~30 cm 土层的营养元素含量对果实品质和营养元素含量影响更大。

表 6 褚橙果实品质与 0~30 cm 土层土壤养分含量相关性分析

指标	有机酸	维生素 C	可溶性固形物	可溶性糖	可溶性蛋白	铜（果实）	锌（果实）	钙（果实）	铁（果实）	硒（果实）
有机酸	1									
维生素 C	0.346	1								
可溶性固形物	-0.245	-0.408	1							
可溶性糖	-0.461	-0.376	0.617	1						
可溶性蛋白	-0.195	-0.004	0.166	0.485	1					
铜（果实）	0.306	-0.033	-0.060	0.054	0.594	1				
锌（果实）	-0.189	-0.020	0.502	0.452	0.700	0.388	1			
钙（果实）	-0.266	-0.134	0.475	0.540	0.295	0.511	0.116	1		
铁（果实）	-0.137	-0.090	0.631	0.556	0.729*	0.416	0.962**	0.270	1	
硒（果实）	0.267	0.027	0.215	0.217	0.036	0.591	0.091	0.685	0.231	1
有机质	0.040	-0.205	0.153	-0.169	-0.231	0.022	0.313	-0.173	0.123	-0.161
pH	-0.280	0.117	-0.006	-0.253	-0.065	-0.415	0.328	-0.656	0.115	-0.756*
碱解氮	0.398	0.235	-0.520	-0.875**	-0.788*	-0.327	-0.515	-0.618	-0.648	-0.211
有效磷	0.067	-0.043	0.553	0.037	-0.234	-0.524	-0.023	-0.108	0.134	-0.067
速效钾	0.301	0.408	-0.250	-0.399	-0.160	-0.197	-0.526	-0.287	-0.517	-0.571
有效锌	-0.021	0.170	-0.419	-0.489	-0.437	-0.752*	-0.319	-0.911**	-0.468	-0.839**
有效铜	-0.320	-0.116	0.366	0.287	-0.377	-0.355	0.260	-0.059	0.154	0.040
有效铁	0.490	-0.148	-0.213	-0.338	0.076	0.227	-0.464	0.107	-0.315	0.025
交换性钙	-0.113	-0.317	-0.110	-0.062	-0.145	-0.452	0.114	-0.663	-0.085	-0.768*
硒（土壤）	0.701	-0.525	0.171	0.074	0.061	0.188	-0.188	0.142	0.025	0.318
指标	有机质	pH	碱解氮	有效磷	速效钾	有效锌	有效铜	有效铁	交换性钙	硒（土壤）
有机酸										
维生素 C										
可溶性固形物										
可溶性糖										
可溶性蛋白										
铜（果实）										
锌（果实）										
钙（果实）										
铁（果实）										
硒（果实）										
有机质	1									
pH	0.650	1								
碱解氮	0.380	0.345	1							
有效磷	-0.317	0.001	-0.016	1						
速效钾	-0.100	0.095	0.244	0.077	1					
有效锌	0.147	0.691	0.607	0.168	0.410	1				
有效铜	0.675	0.409	0.151	-0.028	-0.540	0.104	1			
有效铁	-0.586	-0.493	-0.005	0.203	0.700	-0.108	-0.905**	1		
交换性钙	0.611	0.815*	0.284	-0.196	0.281	0.699	0.453	-0.448	1	
硒（土壤）	-0.535	-0.625	-0.195	0.420	0.356	-0.286	-0.518	0.710*	-0.405	1

注：* 表示在 0.05 水平相关性显著。** 表示在 0.01 水平相关性显著。下同。

表 7 褚橙果实品质与 30~60 cm 土层土壤养分含量相关性分析

指标	有机酸	维生素 C	可溶性固形物	可溶性糖	可溶性蛋白	铜 (果实)	锌 (果实)	钙 (果实)	铁 (果实)	硒 (果实)
有机酸	1									
维生素 C	-0.346	1								
可溶性固形物	-0.245	-0.408	1							
可溶性糖	-0.461	-0.376	0.617	1						
可溶性蛋白	-0.195	-0.004	0.166	0.485	1					
铜 (果实)	0.306	-0.033	-0.060	0.054	0.594	1				
锌 (果实)	-0.189	-0.020	0.502	0.452	0.700	0.388	1			
钙 (果实)	-0.266	-0.134	0.475	0.540	0.295	0.511	0.116	1		
铁 (果实)	-0.137	-0.090	0.631	0.556	0.729*	0.416	0.962**	0.270	1	
硒 (果实)	0.267	0.027	0.215	0.217	0.036	0.591	0.091	0.685	0.231	1
有机质	-0.065	-0.090	-0.433	0.162	0.045	0.382	-0.427	0.473	-0.416	0.327
pH	0.388	0.900	-0.223	-0.391	-0.076	-0.323	0.265	-0.590	0.045	-0.564
碱解氮	-0.214	0.720*	-0.753*	-0.603	-0.407	-0.420	-0.559	-0.492	-0.682	-0.395
有效磷	-0.444	-0.034	0.269	0.306	0.279	-0.524	0.038	-0.156	0.107	-0.627
速效钾	-0.270	0.156	-0.491	-0.120	0.216	0.064	0.472	0.150	0.471	0.341
有效锌	-0.296	0.346	-0.173	-0.320	-0.479	-0.824*	-0.580	-0.406	0.570	0.569
有效铜	-0.342	0.526	0.011	-0.429	-0.601	-0.364	-0.136	-0.120	-0.253	-0.052
有效铁	-0.195	-0.285	0.037	-0.076	-0.004	-0.064	-0.427	0.267	-0.381	-0.360
交换性钙	-0.345	0.696	-0.570	-0.480	0.223	0.043	0.053	-0.365	-0.125	-0.500
硒 (土壤)	0.359	-0.292	-0.019	0.167	0.335	0.379	-0.269	0.422	-0.057	0.304
指标	有机质	pH	碱解氮	有效磷	速效钾	有效锌	有效铜	有效铁	交换性钙	硒 (土壤)
有机酸										
维生素 C										
可溶性固形物										
可溶性糖										
可溶性蛋白										
铜 (果实)										
锌 (果实)										
钙 (果实)										
铁 (果实)										
硒 (果实)										
有机质	1									
pH	-0.478	1								
碱解氮	0.114	0.540	1							
有效磷	-0.357	0.085	0.057	1						
速效钾	0.566	-0.108	0.438	0.359	1					
有效锌	-0.267	0.299	0.672	0.612	0.342	1				
有效铜	-0.271	0.636	0.470	-0.251	-0.250	0.356	1			
有效铁	0.277	-0.228	0.028	0.402	0.728*	0.330	-0.095	1		
交换性钙	-0.032	0.750*	0.683	0.127	0.490	0.268	0.313	0.125	1	
硒 (土壤)	0.382	-0.823*	-0.282	0.205	0.469	-0.079	-0.744*	0.401	-0.319	1

2.3 果实营养元素富集系数

褚橙果实营养元素富集系数如表 8 所示。褚橙果实对铜、锌元素富集系数平均值可分别达 83.21% 和 43.46%，其中铜元素富集系数最大值为

209.09%；褚橙对钙元素和铁元素富集能力相近，对硒富集较差，仅有 7.55%。不同取样点之间，2 号取样点各元素富集能力较差，3 号取样点富集能力相对较强。

表 8 褚橙果实营养元素富集系数 (%)

微量元素	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
钙	30.25	13.09	37.26	22.38	17.88	52.40	72.36	28.13	34.22 ± 19.64
铁	26.15	18.50	30.19	99.55	21.71	25.46	39.04	20.35	35.12 ± 26.83
锌	38.62	11.05	41.22	53.03	22.71	26.29	91.58	63.20	43.46 ± 25.64
铜	126.60	22.60	41.63	81.10	20.35	40.91	123.36	209.09	83.21 ± 65.99
硒	6.04	6.25	15.02	9.68	10.77	3.94	4.56	4.16	7.55 ± 3.93

2.4 果实营养元素与土壤养分含量关系

研究区各取样点果实营养元素与土壤中、微量元素含量关系如图 3 所示。土壤中、微量元素与相应果实营养元素间的关系比较复杂，土壤养分含量较低，而果实中相应的营养元素含量较高；相反，较高的土壤养分含量并不能满足对果实的营养供应。

根据果实中营养元素含量发现，不同营养元素的土壤含量最适宜范围不同，土壤锌、铁和钙含量的最适宜范围分别为 1.46~2.61，15.58~21.02 和 1410.94~1998.44 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其中土壤铁和锌元素的含量均在表 2 所示的柑橘生长最适宜范围内，而土壤硒元素含量相对较低且果实硒含量稳定，并无明显的最适范围。

3 讨论

矿质营养元素是影响植物生长发育的重要因素^[18]，养分的丰缺直接影响到褚橙的产量和品质，植株对于养分的吸收利用主要依靠根系从土壤中获取，因此，园区土壤理化性质对褚橙养分的吸收利用十分重要。

3.1 果园土壤与果实品质相关性分析

研究区土壤多为中性红壤，不利于褚橙根系吸收利用养分，土壤有机质含量处于适宜和丰富范围。这与张绩等^[19]针对新平县冰糖橙果园的研究不同，可能与褚橙庄园钙肥过量施用和深施有机肥有关，前人研究证实^[20-22]，土壤 pH 与土壤钙元素含量呈显著正相关。研究区土壤碱解氮含量多处于缺乏状态，Pearson 相关性分析表明，土壤碱解氮含量对褚橙品质有明显影响，土壤碱解氮含量与维生素 C、可溶性固形物和可溶性蛋白含量呈显著相关，与可溶性糖含量呈极显著负相关。与前人研究^[23-24]有一定区别，这可能与作物种类、品种或生长环境不同有关。

3.2 果实营养元素及其与土壤养分含量关系分析

褚橙果实中钙、铁、锌、铜、硒的平均含量分别为 808.55、5.54、1.25、0.92、0.015 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。褚

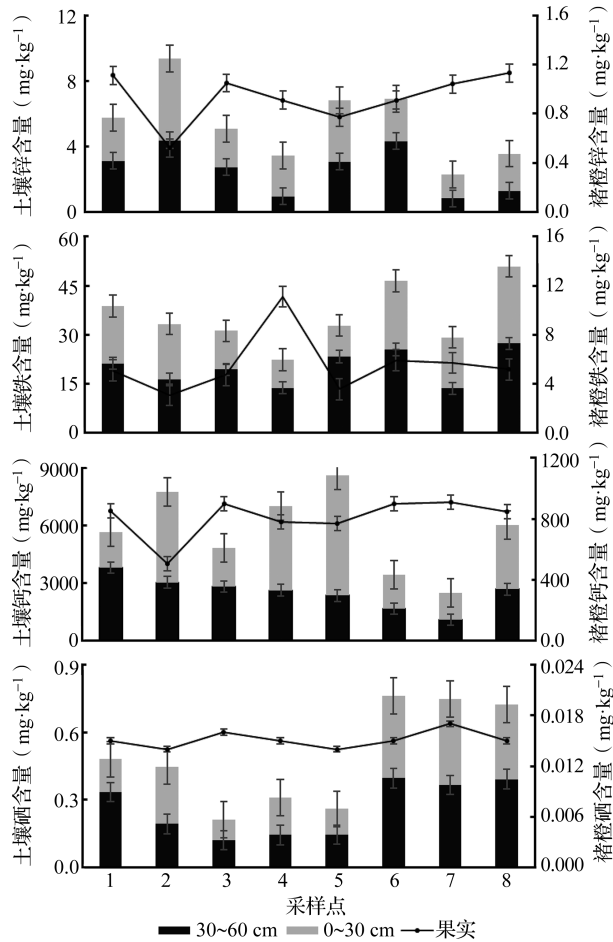
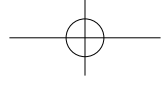


图 3 果实营养元素与土壤养分含量



橙果实对 5 种元素的富集系数并不相同, 其中果实铜富集系数平均值高达 83.21%, 这可能与园区喷施农药^[25]或树体进行选择吸收有关^[26]。而果实硒含量富集系数仅为 7.55%, 除了硒元素本身性质和土壤含硒量外, 经相关性研究分析证明这可能与园区土壤 pH 值和钙含量过高有极大的关系, 这与吴俊^[27]和柴龙飞等^[28]的研究结果相同。褚橙果实硒含量未达到富硒食品的标准, 前人研究发现, 通过外源补硒^[29-30]或施用土壤活化剂^[31]可显著提升果实硒含量。

0~30 cm 土层土壤有效锌含量与果实铜含量呈显著负相关, 与果实钙含量和硒含量呈极显著负相关。前人研究^[32-33]发现, 在施用氮、磷、钾基础上施用锌肥可以提高果实的品质。研究区褚橙果实营养元素的含量与土壤中、微量元素含量并不呈正相关, 相反, 当土壤中、微量元素过高时会抑制果实对营养元素的吸收, 这与曹胜等^[34]研究结果相同。研究区土壤的有效锌、有效铁和交换性钙含量适宜褚橙生长的范围分别为 1.46~2.61, 15.58~21.02 和 1410.94~1998.44 mg · kg⁻¹, 但是由于土壤中钙元素严重过量, 土壤钙元素含量的范围仍有待继续探究。

4 结论

褚橙庄园种植示范区土壤呈中性, 土壤速效钾、交换性钙和有效锌含量过高, 有机质、有效磷和有效铁含量适宜, 碱解氮和有效铜含量偏低, 同时土壤处于足硒水平。褚橙果实品质稳定但仍有提升空间, 含硒量稳定但未达到富硒食品的标准。0~30 cm 土层土壤中, 土壤碱解氮、有效锌含量分别与果实可溶性糖、果实钙和硒含量呈极显著相关; 30~60 cm 土层土壤中, 土壤碱解氮、有效锌含量分别与果实维生素 C 和可溶性固形物、有效铜含量呈显著相关; 相对 30~60 cm 土层而言, 0~30 cm 土层的营养元素含量对果实品质指标的影响更大。种植示范区利于提高褚橙品质指标的土壤有效锌、有效铁、交换性钙含量的最适范围分别是 1.46~2.61, 15.58~21.02、1410.94~1998.44 mg · kg⁻¹。

参考文献:

[1] Harvey N C, Biver E, Kaufman J M, et al. The role of calcium supplementation in healthy musculoskeletal ageing [J].

Osteoporosis International, 2017, 28 (2): 447-462.
[2] Ishfaq M, Wakeel A, Shahzad M N, et al. Severity of zinc and iron malnutrition linked to low intake through a staple crop: a case study in east-central Pakistan [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43 (10): 4219-4233.
[3] Fairweather-Tait S J, Bao Y, Broadley M R, et al. Selenium in human health and disease. [J]. Antioxidants & Redox Signaling, 2011, 14 (7): 1337-1383.
[4] 于冬梅, 何宇纳, 郭齐雅, 等. 2002—2012 年中国居民能量营养素摄入状况及变化趋势 [J]. 卫生研究, 2016, 45 (4): 527-533.
[5] 王学求, 柳青青, 刘汉粮, 等. 关键元素与生命健康: 中国耕地缺硒吗? [J]. 地学前缘, 2021, 28 (3): 412-423.
[6] Jie H, Tong W, Liu M, et al. Suboptimal selenium supply—A continuing problem in Keshan disease areas in Heilongjiang province [J]. Biological Trace Element Research, 2011, 143 (3): 1255-1263.
[7] 鲁格兰, 金敏, 雷淑月. 小儿大骨节病与微量元素的关系及其临床意义 [J]. 中国地方病学杂志, 2004, 23 (6): 488-491.
[8] 景傲, 吴红果, 湛永乐, 等. 妊娠期营养素补充剂的使用对妊娠期妇女贫血状况影响的队列研究 [J]. 中华疾病控制杂志, 2021, 25 (2): 128-132.
[9] Shrestha B M, Mundorff S A, Bibby B G. Preliminary studies on calcium lactate as an anticaries food additive [J]. Caries Res, 1982, 16 (1): 12-17.
[10] 刘志皋. 食品营养强化与营养增补 [J]. 中国食品添加剂, 2003 (1): 6-9.
[11] 李湖中, 钟伟, 黄建, 等. 食品中矿物质最高强化水平的风险评估 [J]. 中国食品学报, 2020, 20 (6): 263-269.
[12] 赵其国, 尹雪斌, 孙敏, 等. 2008—2018 年功能农业的理论发展与实践 [J]. 土壤, 2018, 50 (6): 1061-1071.
[13] Oliver M A, Gregory P J. Invited review soil, food security and human health: a review [J]. European Journal of Soil Science, 2017, 66 (2): 257-276.
[14] Bhullar N K, Grissom W. Nutritional enhancement of rice for human health: The contribution of biotechnology [J]. Biotechnology Advances, 2013, 31 (1): 50-57.
[15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 中国农业出版社, 2000.
[16] 李玲. 植物生理学模块实验指导 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
[17] 鲁剑巍, 陈防, 王富华, 等. 湖北省柑橘园土壤养分分级研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002 (4): 390-394.
[18] 马斯纳. 高等植物的矿质营养 [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1991.
[19] 张绩, 李俊杰, 杨江波, 等. 新平冰糖橙果园营养水平与产量, 品质状况系统分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (3): 164-171.
[20] 刘东海, 乔艳, 谢和平, 等. 夷陵区柑橘园土壤和叶片养分状况研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (5): 237-242.
[21] 刘世全, 张世熔, 伍钧, 等. 土壤 pH 与碳酸钙含量的关系

[J]. 土壤, 2002, 34 (5): 279-282, 288.

[22] 周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镁、锰、活性炭和石灰对土壤 pH 及镉有效性的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26 (6): 199-203, 208.

[23] 涂常青, 王开峰, 温欣荣, 等. 沙田柚主产区土壤养分状况与果实品质关系初探 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17 (6): 1128-1131.

[24] 马亚平, 曹兵, 王艳. 灵武长枣土壤养分与果实品质间的相关性分析 [J]. 经济林研究, 2017, 35 (4): 105-111.

[25] 蔡道基, 单正军, 朱忠林, 等. 铜制剂农药对生态环境影响研究 [J]. 农药学报, 2001, 3 (1): 61-68.

[26] 吴清莹, 林宇龙, 孙一航, 等. 根系分泌物对植物生长和土壤养分吸收的影响研究进展 [J]. 中国草地学报, 2021, 43 (11): 97-104.

[27] 吴俊. 福建省寿宁县土壤硒分布特征及影响因素 [J]. 中国地质, 2018, 45 (6): 1167-1176.

[28] 柴龙飞, 李杰, 钟晓宇, 等. 广西桂中南部地区富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系 [J]. 土壤通报, 2019, 50 (4): 899-903.

[29] Luo L, Zhang J, Zhang K, et al. Peanut selenium distribution, concentration, speciation, and effects on proteins after exogenous selenium biofortification [J]. Food Chemistry, 2021, 354 (5): 129515.

[30] Wu M, Cong X, Li M, et al. Effects of different exogenous selenium on Se accumulation, nutrition quality, elements uptake, and antioxidant response in the hyperaccumulation plant *Cardamine violifolia* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 204: 111045.

[31] Zhe L, Liang D L, Peng Q, et al. Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review [J]. Geoderma: An International Journal of Soil Science, 2017, 295: 69-79.

[32] 牛惠杰, 徐福利, 王渭玲, 等. 施用 Fe, Zn 对山地梨枣生长及品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2015 (3): 55-61.

[33] 廖育林, 郑圣先, 戴平安, 等. 钾镁锌硼钼肥对椪柑产量和品质的影响 [J]. 土壤通报, 2007, 38 (6): 1158-1161.

[34] 曹胜, 周卫军, 刘沛, 等. 冰糖橙果园土壤养分与果实品质关系的多元分析及优化方案 [J]. 土壤, 2021, 53 (1): 97-104.

Correlation analysis of fruit quality index and soil nutrient status of Chu orange

LIU Zhi-zong^{1, 2}, WANG Sheng^{2, 3}, CHEN Ya-jun^{1, 2}, ZHANG Nai-ming^{1, 2*} (1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201; 2. Yunnan Soil Fertilization and Pollution Remediation Engineering Laboratory, Kunming Yunnan 650201; 3. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201)

Abstract: As an important part of the characteristic agriculture in Yunnan plateau, Chu orange has high edible and economic values. In order to fully understand the status of soil nutrients and fruit quality indicators of Chu orange orchard, samples of fruits, 0~30 and 30~60 cm soil layers were collected in the 16 hectare planting demonstration area in Xinping Chu orange orchard, Yuxi city. The fruit quality indicators and soil physical and chemical properties were tested and analyzed to explore the relationship between fruit nutrients and soil nutrients in Chu orange planting demonstration area. The results showed that: (1) The contents of organic matter, available phosphorus and available iron in the soil of the orchard planting demonstration area were suitable for the growth of Chu orange, and the soil was at the sufficient selenium level. The fruit quality and selenium content of Chu orange were stable, but there was still space for improvement. (2) Compared with 30~60 cm soil layer, the contents of nutrient elements in 0~30 cm soil layer had a greater impact on fruit quality and nutrient elements. (3) The optimum range of soil Zn, Fe and Ca contents for improving the quality of Chu orange was 1.46~2.61, 15.58~21.02 and 1410.94~1998.44 mg · kg⁻¹, respectively.

Key words: Chu orange; fruit quality; soil nutrients; correlation analysis