

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.01.013

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. 土壤, 2021, 53(1): 97–104.

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^①

曹 胜, 周卫军*, 刘 沛, 谭 洁, 宋 彪

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘 要: 对湖南省 74 个冰糖橙果园土壤矿质养分和果实品质含量进行测定分析, 运用 R 和 LINGO 软件多元统计分析筛选了影响果实品质因子的主要土壤养分因子, 探明了果实品质最佳时的土壤养分优化方案。研究表明, 调查果园中超过 86.20% 的样点果园土壤 pH 处于酸性至强酸性环境, 65.52% 的果园土壤缺钙, 75.86% 的果园缺镁, 82.76% 的果园缺硼。冰糖橙果实品质是多个土壤养分因子综合作用的结果, 偏最小二乘回归分析表明对冰糖橙单果质量影响较大的因子为土壤碱解氮、交换性钙; 果形指数主要受土壤有效磷、有效铜、有效锌和 pH 影响; 可溶性固形物含量主要受有机质、有效铜、有效锌和 pH 影响; 可滴定酸含量主要受土壤速效钾、有效硼和 pH 的影响; Vc 含量主要受土壤有机质、有效磷、速效钾、交换性镁和 pH 的影响。线性规划求解出 pH 为 5.50~6.50、有机质含量大于 39.68 g/kg、碱解氮为 169.17~170.41 mg/kg、有效磷 34.50 mg/kg、速效钾 158.95~160.88 mg/kg、交换性钙 1 954.69 mg/kg、交换性镁 123.81 mg/kg、有效铁 468.31 mg/kg、有效锰 96.09 mg/kg、有效铜 1.73 mg/kg、有效锌 10.93 mg/kg、有效硼 0.33~0.85 mg/kg 时, 冰糖橙果实品质最佳。调节土壤酸碱度, 增施有机肥, 及时补充钙、镁和硼肥是今后果实品质管理的关键。

关键词: 冰糖橙; 土壤养分; 果实品质; 多元统计分析; 优化方案

中图分类号: S666 **文献标志码:** A

Multivariate Analysis and Optimization of Relationship Between Soil Nutrients and Fruit Quality in *C. sinensis* (L.) Osbeck Orchard

CAO Sheng, ZHOU Weijun*, LIU Pei, TAN Jie, SONG Biao

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Soil mineral nutrients and fruit qualities of 74 *Citrus sinensis* Osbeck orchards in the main producing areas of Hunan Province were investigated and analyzed in order to explore the effects of soil nutrients on fruit quality, find out the problems in soil nutrients, and provide reference for guiding scientific fertilization to improve fruit quality. The multivariate statistical analysis of R and LINGO software were used to screen the main soil nutrient factors affecting fruit quality, and the optimal soil nutrient optimization plan was found with the best fruit quality. The results showed that more than 86.20% of the orchard soils were acidic to strong acid, 65.52%, 75.86% and 82.76% of the orchard soils were deficient in exchangeable Ca, Mg, and available B. The fruit quality of *Citrus sinensis* Osbeck was the result of the combined action of multiple soil nutrient factors. Partial least squares regression analysis showed that the factors that have greater impact on the fruit mass of *Citrus sinensis* Osbeck were soil alkaline N and exchangeable Ca. The fruit shape index was mainly affected by soil available P, Cu, Zn and pH. Total soluble solid content mainly affected by soil organic matter, available Cu, Zn and pH. Titratable acid content mainly affected by soil available K, B and pH. Vc content mainly affected by soil organic matter, available P, K, Mg and pH. The linear programming solution found that the quality of *Citrus sinensis* Osbeck was the best with pH of 5.50–6.50, soil organic matter content greater than 39.68 g/kg, alkaline nitrogen within 169.17–170.41 mg/kg, effective phosphorus of 34.50 mg/kg, available potassium within 158.95–160.88 mg/kg, exchangeable calcium of 1 954.69 mg/kg, exchangeable magnesium of 123.81 mg/kg, effective iron of 468.31 mg/kg, effective manganese of 96.09 mg/kg, effective copper of 1.73 mg/kg, effective zinc of 10.93 mg/kg, effective

①基金项目: 现代农业(柑橘)产业技术体系专项基金(CARS-27)资助。

* 通讯作者(wjzh0108@163.com)

作者简介: 曹胜(1991—), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 主要从事土地/土壤环境过程及模拟研究。E-mail: 513173361@qq.com

boron of 0.33–0.85 mg/kg. Adjusting soil pH, adding organic fertilizer, timely supplying Ca, Mg and B fertilizers are key to fruit quality management in the future.

Key words: *Citrus sinensis* Osbeck; Soil nutrition; Fruit quality; Multivariate statistical analysis; Optimum proposal

冰糖橙属芸香科柑橘属常绿乔木,是普通甜橙的一个优良芽变品种。永兴县是湖南省冰糖橙主产区,现有冰糖橙栽培面积 4 330 hm²,素有“冰糖橙之乡”的美称,是全国唯一的“中国优质冰糖橙基地重点县”^[1]。土壤是柑橘生产的基础,土壤养分和肥力状况直接影响柑橘的产量和品质,筛选影响果实品质的主要土壤养分障碍因子,才能有针对性地为优质果品生产提供指导^[2]。近年来,国内外果树工作者对芒果^[3]、苹果^[4]、猕猴桃^[5]等果园土壤理化性状与果实品质的关系已进行大量的报道。对柑橘而言,主要种植在南方酸性土壤上,由于长期大量施用化肥,特别是生理酸性肥料,加上酸沉降等外部环境的影响,导致柑橘园土壤养分失衡、土壤酸化严重,柑橘生长环境变劣、营养吸收受阻、果实品质下降等问题。矿质元素参与植物有机体代谢和调节机体酶活性,是果树生长发育、产量形成和品质提高的物质基础。马小川等^[6]分析了湖南省不同纬度温州蜜柑园果实矿质养分变化规律及需肥特点,表明多数果园土壤有效养分处于缺失状态,果实钾含量受纬度的影响;张涓涓等^[7]认为,土壤中诸多因子直接影响江西省马家柚的生长发育和品质表现,土壤 pH、有机质和有效铜含量显著影响果实可溶性固形物含量和出汁率;鲍江峰等^[8]研究表明,湖北省纽荷尔脐橙果实可溶性固形物含量与土壤有效磷和速效钾含量存在显著线

性关系。上述研究为筛选冰糖橙果实品质的影响因子提供了参考,但关于湖南冰糖橙果实营养与土壤养分的关系以及优质果品的土壤养分适宜方案鲜见报道,而这正是指导柑橘园土肥管理、明确改善果实品质的关键因素。于 2017—2018 年对湖南省永兴县 74 个冰糖橙的柑橘主产区土壤养分及果实品质含量进行采样测试分析,明确了柑橘园土壤养分丰缺状况,查明了影响柑橘园果实品质提升的土壤养分限制因子,通过应用偏最小二乘回归与线性规划方法定量化探讨冰糖橙果实品质含量丰富的土壤养分优化方案,为果树多自变量、多因变量关系的变量筛选提供方法,为指导湖南省柑橘园科学施肥、果树营养诊断提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

2017 年 11 月至 2018 年 12 月,在湖南省永兴县冰糖橙果园选择 74 个典型的柑橘园定点调查和采样(图 1),本次调查以甜橙为研究对象,主栽品种为冰糖橙(*C. sinensis* (L.) Osbeck),砧木为枳壳(*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.),树龄 15~30 a,株行距为 3 m×4 m,柑橘园 0~40 cm 土层的土壤容重为 1.22~1.64 g/cm³、孔隙度为 38.11%~53.96%、硬度为 25.40~46.40 kg/cm²。在果实成熟期同时采集土壤和果实样,每个果园按照

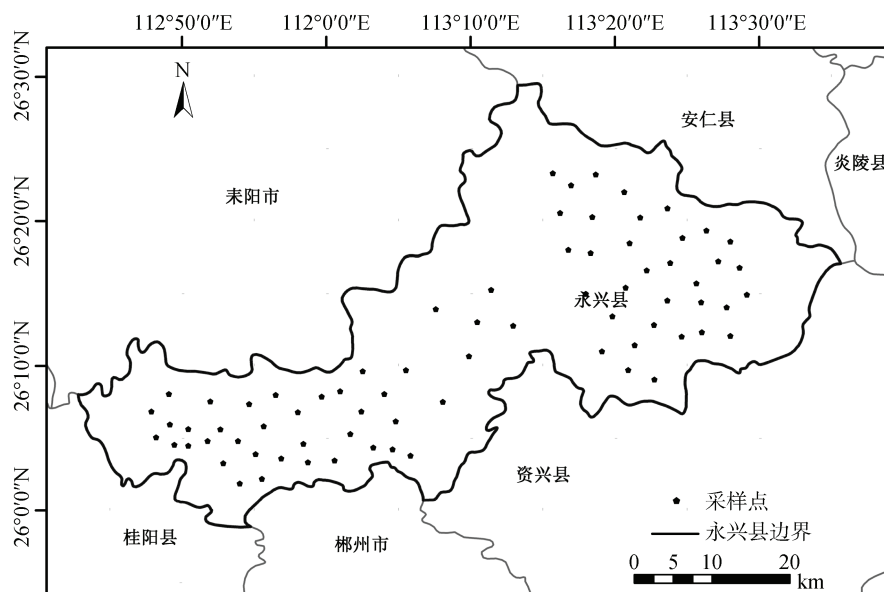


图 1 冰糖橙果园样点分布

Fig. 1 Sampling sites of *Citrus sinensis* Osbeck orchards

S 型布点法随机选取 5 株树，每株为 1 个取样小区，用土钻采集距树冠滴水线内侧 10 cm 位置 0~40 cm 土层土壤样品，混合均匀后，按四分法分取 1 kg 左右土样于室内自然风干，分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛，测定土壤养分。在土壤取样树的树冠四周随机取 8 个果实，每个果园共取果实 40 个左右，带回实验室测定果实品质。

1.2 测定指标与方法

土壤养分测定：重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量；碱解扩散法测定土壤碱解氮；氟化铵-碳酸氢钠-盐酸浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷；乙酸铵浸提-火焰光度法测定土壤速效钾；乙酸铵浸提-电感耦合等离子体发射光谱法测定土壤交换性钙和镁；DTPA 浸提-电感耦合等离子体发射光谱法测定土壤中的铁、锰、铜和锌含量；沸水-EDTA-电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MS, Agilent 7900, USA)测定土壤有效硼；电位法测定土壤 pH^[9]。

果实品质测定：百分之一天平称量单果质量，数显游标卡尺测量果形横纵径，TZ-62 手持折光仪测定可溶性固形物含量，0.1 mol/L NaOH 中和滴定法测定可滴定酸含量，0.01 mol/L 碘液测定柑橘果实 Vc 含量，固酸比为果实的可溶性固形物含量与可滴定酸含量之比^[10]。

所有数据采用 Microsoft Excel 2013(美国，微软公司)和 R 语言(新西兰，奥克兰大学)统计分析，LINGO 11 软件进行土壤养分优化方案求解。

2 结果与分析

2.1 柑橘园土壤和树体营养状况

2.1.1 土壤养分 通过对土壤养分分析,明确果园

土壤肥力状况,并查明树体营养状况的土壤养分限制因子,是果树营养诊断的重要辅助手段。参照柑橘园土壤养分分级标准,研究结果(表 1)显示,湖南省柑橘园土壤养分含量差异较大,有机质含量在 15.00~30.00 g/kg 的样点比例达到 65.52%,碱解氮含量大于 100.00 mg/kg 的占 100.00%,有效磷含量大于 15.00 mg/kg 的占 65.52%,速效钾含量大于 100.00 mg/kg 的占 82.76%,有效锌含量大于 1.00 mg/kg 的占 96.55%;铁、锰、铜含量处于高量水平的果园占比分别为 86.21%、37.93% 和 72.41%,果园养分差异较大;样点果园中 65.52% 的果园土壤缺钙,75.86% 的果园土壤缺镁,82.76% 的果园土壤缺硼。柑橘园 0~40 cm 土层土壤 pH 平均值为 4.30, pH≤5.5 处于酸性至强酸性环境的样点果园占 86.20%,而适宜柑橘生长的土壤 pH 5.5~6.5 的果园仅占 6.90%。

2.1.2 果实品质 从冰糖橙品质测定数据可知,果园间果实可滴定酸含量和固酸比差异较大,果形指数和可溶性固形物含量差异较小(表 2)。果实单果质量、Vc、可溶性固形物、可滴定酸含量和固酸比平均值分别为 137.17 g、693.7 mg/L、134.1 mg/g、4.6 mg/g 和 32.79%,符合国家甜橙水果质量标准(NY/T 426—2012)^[13]。与永兴县冰糖橙果实品质含量比较,曾柏全等^[14]报道的湖南洪江成熟期冰糖橙果实中的可溶性固形物、可滴定酸和 Vc 含量平均值分别只有 109.8 mg/g、5.5 mg/g 和 465.8 mg/L;周先艳等^[15]研究的云南新平县冰糖橙果实中的可溶性固形物、可滴定酸含量和固酸比分别只有 103.0 mg/g、6.4 mg/g 和 16.87,说明了永兴县近几年开展的柑橘园土壤改良培肥后,果实品质水平有了较大提高。

表 1 柑橘园土壤养分概况及丰缺评价
Table 1 Soil nutrients status and evaluation of citrus orchards

指标	范围	均值±标准差	变异系数(%)	适宜范围 ^[11-12]	低量水平(%)	适宜水平(%)	高量水平(%)
有机质(g/kg)	10.09~39.68	24.57±7.66	31.18	15.00~30.00	16.90	65.52	17.58
碱解氮(mg/kg)	161.00~177.81	169.17±4.33	2.56	100.00~200.00	0.00	100.00	0.00
有效磷(mg/kg)	2.39~99.83	34.50±26.02	75.42	15.00~80.00	34.48	62.07	3.45
速效钾(mg/kg)	85.87~372.56	158.95±70.13	44.13	100.00~200.00	17.24	65.52	17.24
交换性钙(mg/kg)	289.76~1 954.69	789.15±375.77	47.62	1 000.00~2 000.00	65.52	24.14	10.34
交换性镁(mg/kg)	36.07~391.00	123.81±85.37	68.96	150.00~300.00	75.86	17.24	6.90
有效铁(mg/kg)	13.61~468.31	106.49±98.17	92.27	10.00~20.00	0.00	13.79	86.21
有效锰(mg/kg)	4.05~96.09	25.37±22.93	90.38	5.00~20.00	6.90	55.17	37.93
有效铜(mg/kg)	0.44~3.79	1.73±0.89	51.45	0.50~1.00	3.45	24.14	72.41
有效锌(mg/kg)	0.73~10.93	3.76±2.33	61.97	1.00~5.00	3.45	75.86	20.69
有效硼(mg/kg)	0.11~0.85	0.33±0.18	54.55	0.50~1.00	82.76	17.24	0.00
pH	3.19~7.37	4.30±1.03	23.95	5.50~6.50	86.20	6.90	6.90

表 2 柑橘园果实品质概况
Table 2 Fruit quality parameters of citrus orchards

项目	单果质量(g)	果形指数	可溶性固形物(mg/g)	可滴定酸(mg/g)	Vc(mg/L)	固酸比
范围	72.00 ~ 140.00	0.89 ~ 1.05	114.7 ~ 151.7	1.8 ~ 8.4	579.4 ~ 847.2	15.72 ~ 76.11
平均值±标准差	137.17 ± 12.47	0.95 ± 0.05	134.1 ± 9.6	4.6 ± 1.5	693.7 ± 70.4	32.79 ± 12.30
变异系数 (%)	11.64	5.26	7.16	32.61	10.15	37.51

2.2 柑橘园果实品质与土壤养分含量关系

2.2.1 土壤养分指标间的相关性 果园土壤养分间各因素的关系十分复杂,元素间存在协同与拮抗作用。从表 3 可知,除土壤 pH、交换性钙和交换性镁外,土壤有机质含量与其他指标均呈正相关,其相关系数较大的为有效磷(0.38^{*})、有效锌(0.73^{**})、有效硼(0.59^{**}),说明提高土壤有机质含量可以有效提高土

壤中各矿质元素的含量;土壤 pH 与交换性钙(0.91^{**})、交换性镁(0.74^{**})呈极显著正相关,说明湖南冰糖橙果园土壤 pH 酸化是导致果树缺钙和缺镁的主要障碍因子。此外,土壤矿质元素含量间相关性显著的还有土壤交换性钙与交换性镁(0.71^{**}),有效铁与有效磷(0.62^{**})、有效铜(0.67^{**}),有效锌与有效铜(0.53^{**})、有效硼(0.43^{*})。

表 3 土壤养分间的相关性
Table 3 Correlation coefficients among soil nutrients

	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾	交换性钙	交换性镁	有效铁	有效锰	有效铜	有效锌	有效硼	pH
有机质	1.00											
碱解氮	0.13	1.00										
有效磷	0.38 [*]	-0.27	1.00									
速效钾	0.03	0.09	-0.06	1.00								
交换性钙	-0.22	-0.06	-0.28	-0.01	1.00							
交换性镁	-0.04	-0.15	-0.10	0.20	0.71 ^{**}	1.00						
有效铁	0.20	-0.04	0.62 ^{**}	-0.25	-0.27	-0.05	1.00					
有效锰	0.01	-0.14	-0.07	-0.15	0.02	0.20	0.18	1.00				
有效铜	0.36	0.02	0.33	-0.30	-0.08	0.24	0.67 ^{**}	0.23	1.00			
有效锌	0.73 ^{**}	0.19	0.24	0.23	-0.25	0.05	0.22	0.31	0.53 ^{**}	1.00		
有效硼	0.59 ^{**}	0.11	0.20	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	0.06	0.06	0.43 [*]	1.00	
pH	-0.37 [*]	-0.06	-0.45 [*]	-0.04	0.91 ^{**}	0.74 ^{**}	-0.26	-0.06	0.03	-0.35	-0.17	1.00

注: $n = 74$, ** 和 * 表示相关性分别达 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 显著水平(皮尔逊相关分析),下同。

2.2.2 果实品质与土壤养分间的相关性 果园土壤养分与树体营养水平间的关系比较复杂,有时候土壤养分含量并不高,而果树中有充足的营养;相反,高的土壤养分含量又不能满足对树体的营养供应。从土壤养分与果实品质间的相关关系(表 4)可知,果园土壤养分含量与果实品质含量相关性较弱,可能是因

为土壤养分主要影响植株的其他器官,进而间接影响果实品质。本研究中相关性显著的仅有土壤碱解氮与单果质量(-0.43^{*})、果形指数(0.43^{*}),土壤有效磷与果形指数(-0.57^{**}),速效钾与可滴定酸(0.56^{**})、固酸比(-0.49^{**}),交换性钙与单果质量(0.48^{**}),有效铁与果形指数(-0.40^{*}),土壤有效硼与可溶性固形物(0.41^{*})。

表 4 果实品质与土壤养分相关性
Table 4 Correlation coefficients between fruit quality parameters and soil nutrients

	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾	交换性钙	交换性镁	有效铁	有效锰	有效铜	有效锌	有效硼	pH
单果质量	0.14	-0.43 [*]	0.01	-0.25	0.48 ^{**}	0.24	-0.09	-0.07	-0.09	-0.33	-0.18	0.42 [*]
果形指数	-0.10	0.43 [*]	-0.57 ^{**}	0.29	0.04	0.02	-0.40 [*]	-0.23	-0.16	-0.02	-0.09	0.24
可溶性固形物	0.47	0.2	-0.24	0.18	-0.04	-0.21	-0.34	-0.15	-0.29	0.35	0.41 [*]	-0.13
可滴定酸	0.06	0.24	-0.31	0.56 ^{**}	0.08	0.23	-0.34	-0.06	-0.2	0.14	0.19	0.12
Vc	0.35	0.16	-0.36	0.34	-0.03	-0.23	-0.36	-0.23	-0.25	0.27	0.32	-0.05
固酸比	0.01	-0.07	0.15	-0.49 ^{**}	0.24	-0.10	0.16	-0.02	0.09	-0.14	-0.09	0.14

不同土壤养分因子与果实品质之间的相关系数差异较大,即便同一养分对果实不同品质参数的影响也不相同,而简单的相关分析不包括自变量之间的相互作用,因此在单一因子分析的基础上,还需要进行多元统计分析。

2.3 影响果实品质的土壤养分因子筛选及回归方程的建立

土壤养分与冰糖橙品质的关系属于多自变量和多因变量间的关系,应用偏最小二乘回归方法,将土壤养分因子作为自变量,果实品质因子作为因变量,建立土壤养分与果实品质的回归方程以及筛选影响冰糖橙果实品质含量的土壤养分因子,对回归方程进

行显著性检验,均达到显著性差异水平,表明建立的方程稳定可靠。从表 5 可知,在果实品质(Z) 与土壤养分(X)的正态总体中,单果质量主要受碱解氮和交换性钙影响,果形指数主要受碱解氮、有效铜、有效锌和土壤 pH 的影响,可溶性固形物含量主要受有机质、有效铜、有效锌和土壤 pH 的影响,可滴定酸含量主要受速效钾、有效硼和土壤 pH 的影响,Vc 含量主要受有机质、有效磷、速效钾、交换性镁和土壤 pH 的影响,固酸比主要受速效钾含量的影响。综上所述,柑橘果实品质的含量直接受相应土壤有效养分含量的影响,建议通过提高土壤 pH,根据果实需肥特性选取养分配比合适的肥料,可直接显著提高果实品质。

表 5 影响果实品质的主要土壤养分因子的筛选及回归方程
Table 5 Screening of soil nutrient factors affecting fruit quality and regression equations

果实品质	土壤因子	回归方程	方程 F 值	相关系数
单果质量(Z ₁)	X ₂ , X ₅	Z ₁ =295.060-1.137X ₂ +0.003X ₅	8.453**	0.394
果形指数(Z ₂)	X ₂ , X ₉ , X ₁₀ , X ₁₂	Z ₂ =0.032+0.004X ₂ -0.035X ₉ +0.011X ₁₀ +0.092 X ₁₂	9.734**	0.679
可溶性固形物(Z ₃)	X ₁ , X ₉ , X ₁₀ , X ₁₂	Z ₃ =8.982+0.076X ₁ -0.968X ₉ +0.211X ₁₀ +0.935X ₁₂	7.517**	0.620
可滴定酸(Z ₄)	X ₄ , X ₁₁ , X ₁₂	Z ₄ =0.210+0.001X ₄ +0.262X ₁₁ +0.108X ₁₂	4.433**	0.425
Vc (Z ₅)	X ₁ , X ₃ , X ₄ , X ₆ , X ₁₂	Z ₅ =43.401+0.610X ₁ -0.117X ₃ +0.042X ₄ -0.057X ₆ +3.567X ₁₂	9.564**	0.675
固酸比(Z ₆)	X ₄	Z ₆ =45.339-0.078X ₄	8.286**	0.408

注: X₁ 有机质, X₂ 碱解氮, X₃ 有效磷, X₄ 速效钾, X₅ 交换性钙, X₆ 交换性镁, X₇ 有效铁, X₈ 有效锰, X₉ 有效铜, X₁₀ 有效锌, X₁₁ 有效硼, X₁₂ pH。

2.4 果园土壤养分含量优化方案

为了进一步探明果实品质最佳时的土壤养分含量的适宜范围,在果实品质(Z)与土壤养分(X)正态总体中,以果实某一品质最大值(Z_{max})为目标函数(A),果实其余品质指标与土壤养分、pH 为约束条件(B),建立求解各果实品质指标最大时的线性规划方程组。当求解某一果实品质因子最大时,确保其他果实品质因素达到优质,同时给定土壤养分因子一定的约束范围。本研究中果实品质指标约束值下限为湖南省永兴县 74 个典型的柑橘园果实品质平均值,土壤养分因子约束值以调查果园最大值为上限,下限为调查果园平均值,土壤 pH 选择适宜冰糖橙生长的范围 5.5 ~ 6.5。

果实品质与土壤养分线性规划方程组,以果实单果质量最大值(Z_{max1})为例:

$$Z_{\max 1}=295.060-1.137 X_2+0.003 X_5 \quad (\text{A})$$

$$0.032+0.004 X_2-0.035 X_9+0.011 X_{10}+0.092 X_{12} \geq 0.95 \quad (\text{B})$$

$$8.982+0.076 X_1-0.968 X_9+0.211 X_{10}+0.935 X_{12} \geq 13.41$$

$$0.210+0.001 X_4+0.262 X_{11}+0.108 X_{12} \leq 0.46$$

$$43.401+0.610 X_1-0.117 X_3+0.042 X_4-0.057 X_6+3.567$$

$$X_{12} \geq 69.37$$

$$45.339-0.078 X_4 \geq 32.79$$

其中, $24.57 \leq X_1 \leq 39.68$; $169.17 \leq X_2 \leq 177.81$; $34.50 \leq X_3 \leq 99.83$; $158.95 \leq X_4 \leq 372.56$; $789.15 \leq X_5 \leq 1954.69$; $123.81 \leq X_6 \leq 391$; $106.49 \leq X_7 \leq 468.31$; $25.37 \leq X_8 \leq 96.09$; $1.73 \leq X_9 \leq 3.79$; $3.76 \leq X_{10} \leq 10.93$; $0.33 \leq X_{11} \leq 0.85$; $5.5 \leq X_{12} \leq 6.5$ 。

应用相同的方法,可建立求解果实中果形指数最大值(Z_{max2})、可溶性固形物最大值(Z_{max3})、可滴定酸最小值(Z_{min4})、Vc 最大值(Z_{max5})和固酸比最大值(Z_{max6})的线性规划方程。从表 6 可知,当柑橘园土壤酸碱度和养分范围: pH 5.50 ~ 6.50、有机质含量 39.68 g/kg、碱解氮 169.17 ~ 170.41 mg/kg、有效磷 34.50 mg/kg、速效钾 158.95 ~ 160.88 mg/kg、交换性钙 1 954.69 mg/kg、交换性镁 123.81 mg/kg、有效铁 468.31 mg/kg、有效锰 96.09 mg/kg、有效铜 1.73 mg/kg、有效锌 10.93 mg/kg、有效硼 0.33 ~ 0.85 mg/kg 时,冰糖橙果实品质最佳:单果质量 138.58 g、果形指数 1.37、可溶性固形物含量 187.1 mg/g、可滴定酸含量 4.6 mg/g、Vc 含量 864.5 mg/L、固酸比 32.94。

表 6 果实品质最佳的土壤养分含量和 pH
Table 6 Optimum ranges of soil nutrients and pH for high fruit quantity

土壤养分因子	Z ₁ 单果质量	Z ₂ 果形指数	Z ₃ 可溶性固形物	Z ₄ 可滴定酸	Z ₅ Vc	Z ₆ 固酸比	X 最佳区间
X ₁ 有机质 (g/kg)	39.68	39.68	39.68	39.68	39.68	39.68	39.68
X ₂ 碱解氮(mg/kg)	169.17	170.41	170.41	170.41	170.41	170.41	169.17 ~ 170.41
X ₃ 有效磷(mg/kg)	34.50	34.50	34.50	34.50	34.50	34.50	34.50
X ₄ 速效钾(mg/kg)	160.88	160.88	160.88	158.95	160.88	158.95	158.95 ~ 160.88
X ₅ 交换性钙(mg/kg)	1 954.69	1 954.69	1 954.69	1 954.69	1 954.69	1 954.69	1 954.69
X ₆ 交换性镁(mg/kg)	123.81	123.81	123.81	123.81	123.81	123.81	123.81
X ₇ 有效铁(mg/kg)	468.31	468.31	468.31	468.31	468.31	468.31	468.31
X ₈ 有效锰(mg/kg)	96.09	96.09	96.09	96.09	96.09	96.09	96.09
X ₉ 有效铜(mg/kg)	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
X ₁₀ 有效锌(mg/kg)	10.93	10.93	10.93	10.93	10.93	10.93	10.93
X ₁₁ 有效硼(mg/kg)	0.85	0.85	0.85	0.33	0.85	0.85	0.33 ~ 0.85
X ₁₂ pH	6.50	6.50	6.50	5.50	6.50	6.50	5.50 ~ 6.50
Z _{max} 果实品质	138.58	1.37	187.1	4.6	864.5	32.94	

注：单果质量单位 g，可溶性固形物单位 mg/g，可滴定酸单位 mg/g，Vc 含量单位 mg/L。

3 讨论

3.1 柑橘园土壤养分现状特征

果园土壤养分间存在错综复杂的协同、拮抗作用，相互作用的同时又共同影响果树根系养分的吸收。马小川等^[6]和曹胜等^[16]分别利用典型相关分析方法研究了温州蜜柑果实矿质养分与土壤养分的关系，揭示了影响不同果实矿质元素的土壤养分因子。但国内外鲜见关于“冰糖橙”果园土壤养分与果实品质的多元分析及优质果园土壤养分优化方案的报道。本研究参照鲁剑巍^[11]、沈兆敏和刘焕东^[12]制定的养分分级标准，对湖南省永兴县冰糖橙主产区 74 个柑橘园土壤营养状况和果实品质展开系统调查，研究结果表明永兴县超过 86.20% 的样点果园土壤 pH≤5.5，处于酸性至强酸性环境，这可能与柑橘栽培过程中果农长期偏施化肥有关。土壤有机质含量是土壤肥力的物质基础，国外丰产果园有机质甚至高达 20~60 g/kg，本研究发现有机质不仅可以调节土壤营养成分，还能直接影响果实品质的提高。调查显示近几年果农对于有机肥的施用意识普遍提高，在柑橘果园养分管理时，常施用菜枯、桐麸和畜禽粪等有机物料代替化肥使用，同时果园生草还田、修剪还田等措施也是近代果园土壤管理制度的变化趋势。合理施用碱性有机肥能够调节土壤酸碱性，改善土壤肥力。吴志丹等^[17]通过连续 5 a 田间定位试验研究配施有机肥茶园土壤 pH 的变化状况，结果发现 0~20 cm 土层土壤 pH 提高了 0.27~1.05。邓小华等^[18]研究发现石灰+生物有机肥协同改良酸性烟田土壤，不仅可以缓解土壤酸

性，还可提高土壤容重和有机质含量。南方酸性土壤中发生缺钙、缺镁的现象较为普遍，这可能与湖南亚热带气候地区土壤风化和淋溶作用强烈有关，当土壤 pH 下降时土壤中正电荷增加，对钙和镁等养分离子的吸附量显著减少^[19]。部分柑橘园土壤微量元素铁、锰和铜含量处于高量水平，这可能是因为柑橘病虫害防治时大量使用铜制剂、波尔多液和代森锰锌等杀菌剂引起局部的土壤含量过高问题。另外，柑橘园施肥时忽视硼肥的补充也是造成土壤缺硼的重要原因。

3.2 柑橘园果实品质与土壤养分关系

对柑橘进行营养诊断时，有必要将果实品质诊断与土壤营养诊断相结合，比较二者的异同点可以找出施肥中存在的问题。本文对冰糖橙果园 12 种土壤理化性质和 6 个果实品质因子进行关联分析，运用 pearson 相关性分析土壤养分与果实品质间关系，研究结果表明两者之间的相关性非常弱，各指标间关系比较复杂，而仅用简单的相关分析不够全面，需要应用多元统计分析方法进一步研究其相关性。偏最小二乘回归是一种新型的多元统计分析方法，包括了多元线性回归分析、典型相关分析和主成分分析，主要研究的是多因变量对多自变量的回归建模。国内外学者^[20-22]应用偏最小二乘回归方法在果树方面研究了土壤养分、叶片养分和果实品质特性之间的相互关系，研究认为土壤养分是果树生长的基础，土壤中某种养分含量不但对植株吸收该种养分产生直接的影响，同时还会影响到树体对其他养分的吸收，从而显示出土壤中养分与果实中养分元素间关系的复杂性。本研究应用偏最小二乘回归方法获得了影响湖

南冰糖橙果实品质的土壤养分限制因子,回归方程的系数可以判断出变量对果实品质影响的正负效应和重要程度,研究指出果园土壤中有有机质、碱解氮、速效钾、有效铜、有效锌含量和土壤 pH 是今后果园土壤管理的重点,与前人对苹果^[23]、猕猴桃^[5]和越橘^[24]等的研究结果较一致。

3.3 柑橘园土壤养分优化方案

施肥是柑橘栽培中的一项重要技术措施,“以果定肥、因土补肥”是柑橘优质丰产的营养保证^[25]。本研究通过线性规划法定量获得湖南省冰糖橙果园果实品质含量最佳的土壤养分含量优化方案,把理论计算出的土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁和有效硼等 12 项养分指标的最优阈值,与目前调查的果园土壤养分实测值进行比较,分析存在的关键问题,进而指导柑橘施肥。柑橘果实品质最优时土壤有机质和交换钙含量均取最大值,说明提高这些养分指标含量能直接影响果实品质的提高。土壤碱解氮含量除果实单果质量取最低值 169.17 mg/kg,其余果实品质指标均取 170.41 mg/kg,调查果园中 50%土壤碱解氮低于优化阈值;速效钾含量除可滴定酸和固酸比取最低值 158.95 mg/kg,其余果实品质指标均取 160.88 mg/kg,而 60.00% 土壤速效钾含量低于优化值;有效磷和交换性镁均取下限值 34.50 和 123.81 mg/kg,56.66% 土壤缺磷和 70.00% 缺镁;土壤有效硼除果实的可滴定酸含量取最低值 0.33 mg/kg,其余果实品质指标均取最大值 0.85 mg/kg,60.00% 果园土壤缺硼。与苏婷婷等^[26]基于重庆市 104 个果园土壤养分平均值相比,本优化方案中土壤碱解氮、有效磷和速效钾偏高,交换性钙、交换性镁和有效硼偏低,有效铁、锰、铜和锌相当,可能与果园土壤条件、气候条件、树种和树龄等因素有关。由于本研究是根据现有的柑橘园土壤养分和果实品质的调查资料进行理论计算结果,还需要根据不同地区果园土壤养分水平进行田间验证与调整,最终量化配方施肥,避免“一刀切”的管理模式。

4 结论

湖南永兴冰糖橙品质整体优良,但可滴定酸含量差异较大。被调查果园土壤普遍呈酸性,土壤养分肥力总体偏低且分布不平衡,土壤交换性钙、交换性镁和有效硼含量严重不足。偏最小二乘回归方法筛选出了影响果实品质的土壤养分因子,线性回归定量求解出了果园果实品质最佳时的土壤养分、pH 优化方案。

同一果实品质指标受到多个土壤养分因子的共同作用且影响大小不一,盲目地施肥不仅造成浪费、污染环境,还对果树造成毒害作用,导致果实品质下降,因此在果园土壤养分管理中应根据果实品质的需肥特性科学合理施肥。

参考文献:

- [1] 吴倩,付威宾,胡成,等. 麻阳冰糖橙果园营养状况与果实品质状况分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(6): 97-103.
- [2] Kumar S, Awasthi O P, Dubey A K, et al. Root morphology and the effect of rootstocks on leaf nutrient acquisition of Kinnow mandarin (*Citrus nobilis* Loureiro × *Citrus reticulata* Blanco)[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2018, 93(1): 100-106.
- [3] 兰子汉,姚智,陈瑞州,等. 陵水芒果园土壤养分、pH 与果实矿质营养的状况分析[J]. 热带作物学报, 2018, 39(3): 426-432.
- [4] 张强,魏钦平,刘旭东,等. 北京昌平苹果园土壤养分、pH 与果实矿质营养的多元分析[J]. 果树学报, 2011, 28(3): 377-383.
- [5] 黄春辉,曲雪艳,刘科鹏,等. ‘金魁’猕猴桃园土壤理化性状、叶片营养与果实品质状况分析[J]. 果树学报, 2014, 31(6): 1091-1099.
- [6] 马小川,卢晓鹏,张子木,等. 湖南省不同纬度温州蜜柑园土壤和叶片营养及果实品质分析[J]. 果树学报, 2018, 35(4): 423-432.
- [7] 张涓涓,杨莉,刘德春,等. 马家柚果实品质与土壤、叶片、果实矿质养分的相关性分析[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(5): 811-818.
- [8] 鲍江峰,夏仁学,彭抒昂,等. 湖北省组荷尔脐橙园土壤营养状况及其对果实品质的影响[J]. 土壤, 2006, 38(1): 75-80.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [10] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] 鲁剑巍. 湖北省柑橘园土壤—植物养分状况与柑橘平衡施肥技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.
- [12] 沈兆敏,刘焕东. 柑橘营养与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [13] 中华人民共和国农业部. 绿色食品-柑橘类水果: NY/T 426-2012. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [14] 曾柏全,甘霖,熊兴耀,等. 冰糖橙和冰糖脐橙的性状研究[J]. 广西园艺, 2006, 17(2): 3-4.
- [15] 周先艳,朱春华,李进学,等. 云南冰糖橙果实矿质营养与品质及产量的关系[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(4): 382-387.
- [16] 曹胜,欧阳梦云,周卫军,等. 湖南温州蜜柑果实矿质养分与土壤养分、pH 的多元分析与模拟[J]. 果树学报, 2019, 36(8): 1029-1039.

- [17] 吴志丹, 江福英, 尤志明, 等. 连续 5 年配施有机肥茶园土壤活性铝含量变化状况[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1070–1077.
- [18] 邓小华, 黄杰, 杨丽丽, 等. 石灰、绿肥和生物有机肥协同改良酸性土壤并提高烟草生产效益[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1577–1587.
- [19] 李华东, 白亭玉, 郑妍, 等. 土壤施钙对芒果果实钾、钙、镁含量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(6): 76–80.
- [20] 刘同祥, 龚榜初, 徐阳, 等. ‘次郎’甜柿土壤养分、叶片养分与果实品质的多元分析及优化方案[J]. 林业科学研究, 2017, 30(5): 812–822.
- [21] Casero T, Benavides A L, Recasens I. Interrelation between fruit mineral content and pre-harvest calcium treatments on ‘golden smoothee’ apple quality[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 33(1): 27–37.
- [22] 张强, 李民吉, 周贝贝, 等. 两大优势产区‘富士’苹果园土壤养分与果实品质关系的多变量分析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 105–114.
- [23] 张东, 赵娟, 韩明玉, 等. 黄土高原富士苹果叶片矿质养分与果实品质相关性分析[J]. 园艺学报, 2014, 41(11): 2179–2187.
- [24] 白永超, 卫旭芳, 陈露, 等. 笃斯越橘果实、叶片矿质元素和土壤肥力因子与果实品质的多元分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 170–181.
- [25] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 湖南省柑橘园土壤营养状况及其对叶片养分的影响[J]. 土壤, 2019, 51(4): 665–671.
- [26] 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.