

网络出版时间:2019-04-22 17:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.11.010
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190422.1733.020.html

赣南脐橙生长发育期果实和叶片矿质营养与 重金属元素的动态变化及相关性分析

王小玲¹,刘卓荣¹,幸学俊¹,高 柱^{1,2}

(1 江西省科学院 生物资源研究所,江西 南昌 330096;2 江西农业大学 园林与艺术学院,江西 南昌 330045)

【摘 要】【目的】探索赣南脐橙不同生长发育期果实营养物质含量及果实与叶片中大量元素、微量元素、重金属元素和轻稀土元素的变化特征,并分析果实和叶片中不同元素之间的相关性,为研究脐橙生理代谢和品质形成的调控机理提供依据。【方法】以赣南 10 年生组荷尔脐橙为试验材料,自脐橙盛花期后 90 d (7 月)起,每月测定不同生长发育期脐橙果实糖酸含量及果实和叶片中大量元素(N、P、K、Ca、Mg)、微量元素(B、Fe、Mn、Cu、Zn)、重金属元素(Pb、Cr、Cd)和轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Pm)等的含量,分析其周年动态变化规律及相关性。【结果】9 月份是脐橙果实和叶片矿质营养及重金属元素变化的关键时期。果实纵、横径和单果质量均与生长发育期呈显著正相关,脐橙果实近球形,果形指数为 1.04~1.07。柠檬酸是脐橙果实总酸的主要组成成分,最高可达 82.76%。叶片矿质营养和重金属元素含量均高于果实。大量元素 Ca、Mg 和微量元素 Cu、Zn 是影响果实和叶片矿质营养积累的关键因子,其中 Ca 可以促进果实 Mg 和 Cu 的积累,抑制叶片 Mg 和 Zn 积累;Mg 与果实 Cu 和叶片 Zn 含量呈显著正相关。脐橙果实中未检测出 Pb 和 Cd 元素,叶片中 Pm 与其他 4 种轻稀土元素含量的变化趋势相反,其在果实发育过程中呈先减少后增大的趋势。B 是影响叶片 Pm 积累的关键因子,能显著促进叶片 Pm 积累,果实中未检测出 Pm;果实和叶片中的 La、Ce、Pr、Nd 元素之间表现出显著的促进作用。【结论】脐橙果实品质受矿质营养元素的协同影响,其中大量元素 Ca、Mg 和微量元素 Cu、Zn 是影响脐橙果实品质的关键因子;脐橙果实品质未受到重金属 Pb、Cr、Cd 的污染;脐橙叶片轻稀土元素 La、Ce、Pr、Nd 含量越高,转移积累到果实中的量也越高。

【关键词】 赣南脐橙;矿质营养;果实品质

【中图分类号】 S666.401

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)11-0077-10

Dynamics changes and correlation of mineral nutrition and heavy metal elements in fruits and leaves of navel orange during growth and development in Southern Jiangxi

WANG Xiaoling¹, LIU Zhuorong¹, XING Xuejun¹, GAO Zhu^{1,2}

(1 Institute of Biological Resources, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang, Jiangxi 330096, China;

2 College of Landscape Architecture and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: 【Objective】To provide basis for studying regulation of physiological metabolism and quality formation of navel orange, this study explored nutrient contents in leaves and fruits of navel orange investigated the changing characteristics of abundant elements, trace elements, heavy metal elements and light rare

【收稿日期】 2018-10-19

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31760551);江西省重大自然科学基金项目(20152ACB21002);江西省科学院协同创新专项(2013-XTPH1-05)

【作者简介】 王小玲(1979—),女,陕西白水人,副研究员,博士,主要从事园艺植物抗逆机理和创新利用研究。
E-mail: wangxiaoling1979@126.com

【通信作者】 高 柱(1981—),男,江西上饶人,副研究员,博士,主要从事抗逆性植物筛选及高值农业研究。
E-mail: jxaugz2008@126.com

earth elements, and analyzed the correlation between different elements at different growth and development stages in Southern Jiangxi. 【Method】 The 10-year-old navel orange trees were selected in this study. From 90 d (July) after blossom, sugar and acid contents in fruits as well as abundant elements (N, P, K, Ca and Mg), trace elements (B, Fe, Mn, Cu and Zn), heavy metal elements (Pb, Cr and Cd) and light rare earth elements (La, Ce, Pr, Nd and Pm) in the fruits and leaves were measured at different growth and development stages. 【Result】 September was a critical period for changes of mineral nutrition and heavy metal elements in fruits and leaves. There were significant positive correlations between fruits longitudinal diameter, transverse diameter, single fruits weight and growth time. The fruits were near spherical with shape index of 1.04—1.07. Citric acid was the main component of total acids in navel orange fruits, accounting for up to 82.76%. The contents of mineral nutrition and heavy metal elements in leaves were higher than that in fruits. The abundant (Ca and Mg) and trace elements (Cu and Zn) were the key factors influencing the accumulation of mineral nutrition in fruits and leaves. Ca promoted the accumulation of Mg and Cu in fruits while inhibited the accumulation of Mg and Zn in leaves. Mg was positively correlated with Cu in fruits and Zn in leaves. Pb and Cd were not detected in fruits. The trend of Pm was opposite to other four light rare earth elements in leaves. B significantly promoted the accumulation of Pm in leaves, while Pm was not detected in fruits. La, Ce, Pr, and Nd showed a significant promoting effect on each other in fruits and leaves. 【Conclusion】 The navel orange quality was affected by all mineral nutrient elements, among them abundant elements (Ca and Mg) and trace elements (Cu and Zn) were the key factors. Navel orange fruit quality was not polluted by heavy metals Pb, Cr and Cd. Higher levels of light rare earth elements (La, Ce, Pr and Nd) in leaves would lead to higher contents in fruits.

Key words: navel orange in Southern Jiangxi; mineral nutrition; fruit quality

矿质营养是果树生长发育、产量形成和果实品质提高的物质基础,叶片养分含量反映果树的营养状况,且与果实品质密切相关^[1]。江西赣州是著名的“赣南脐橙”产地,享有“世界脐橙之乡”的美誉。虽然赣南脐橙久负盛名,销售市场前景乐观,但近年来随着柑橘黄龙病的暴发,大面积毁园转产,不仅造成脐橙生产面积大幅度减少,而且影响市场对赣南脐橙果品质量的评价^[2]。另一方面,种植户为了提高产出比,逐渐提高氮、磷、钾化肥用量,有机肥用量减少,生产中营养施肥不均衡,叶片缺素症引起的黄化现象在赣南脐橙优势产区普遍存在,严重制约了脐橙产量和品质的提升^[3]。此外,赣南享有“稀土王国”之美誉,矿区土壤中最低稀土含量是我国土壤稀土平均含量的 2 倍多^[4]。钟林生^[5]、郭鹏然等^[6]、汪振立等^[7]研究认为,赣南脐橙口感品质上乘,这与土壤中高稀土含量关系密切,尤其是在稀土矿区内种植的脐橙,有机营养物质指标均高于低稀土背景区。同时,刘平辉等^[8]、董素钦^[9]、尚媛等^[10]、姚艳丽等^[11]在南丰蜜桔、柑桔、苹果梨和菠萝等水果中的研究表明,果园较高的稀土含量,可促进果树生长,进而提高果实品质和产量,且轻稀土元素的影响大于重稀土元素。

因此,为了赣南脐橙产业的可持续发展,掌握脐橙果实营养的动态变化,探究影响脐橙果实营养含量和品质的关键因素,本研究在以往单独讨论某一因素对脐橙品质影响的基础上,较为全面地阐述不同生长发育期脐橙果实营养物质含量的变化,分析果实和叶片中大量元素(N、P、K、Ca、Mg)、微量元素(B、Fe、Mn、Cu、Zn)、重金属元素(Pb、Cr、Cd)和轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Pm)的含量及其变化特征,探讨果实和叶片中不同元素之间的相关性,为进一步研究脐橙生理代谢和品质形成的调控作用提供科学依据,进而为指导赣南脐橙产业的合理施肥和提高品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 试材取样及处理

试验于 2017 年在江西省赣州市信丰县龙舌村(115°00′27″E, 25°23′05″N, 海拔 181.7 m)脐橙园进行,选取 10 年生生长健康、结果稳定的纽荷尔脐橙(*Citrus sinensis* (L.) Osbeck ‘Newhall’) 30 株为试材,每小区 10 株,3 次重复。

1.2 果园土壤养分情况

分别采集样株树冠下和根际区域 0~20 cm 和

20~40 cm 土层的土壤各 1 kg,每棵样株下均匀采集 4~6 个点,不同土层土壤混匀后,采用四分法弃除多余土壤,风干研磨过 2 mm 筛,测定土壤中大量

元素(N、P、K、Ca、Mg)、微量元素(B、Fe、Mn、Cu、Zn)、重金属元素(Pb、Cr、Cd)及轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Pm)的含量,结果见表 1。

表 1 脐橙园土壤养分测定结果

Table 1 Detection results of soil nutrients in navel orange orchard

mg/kg

土层深度/cm Soil depth	P	K	Ca	Mg	B	Fe	Mn	Cu	Zn
0~20	7 505	329	0. 668	7. 3	289	189	325	236	988
20~40	6 169	297	0. 867	7. 7	185	155	388	211	1 022
土层深度/cm Soil depth	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Pb	Cr	Cd	
0~20	121. 72	223. 46	24. 25	87. 27	18. 56	71. 13	<20. 0	0. 072	
20~40	105. 54	176. 83	17. 48	65. 31	14. 38	68. 95	<20. 0	0. 068	

1.3 试验方法

自盛花期后 90 d(7 月)起,每隔 1 个月自植株树冠外围结果枝中上部的 4 个方向采取健康果(外观颜色和果实大小相当)8~10 个,自植株树冠外围中上部新梢中部的 4 个方向采取健康叶片 15~20 片。采后立即洗净擦干,果实分别测定横径、纵径和单果质量,叶片去除主叶脉。然后,将果肉切碎混匀后,一部分样品置液氮中迅速冷冻,贮藏于-80 ℃超低温冰箱,用于总糖、蔗糖、还原糖、总酸和柠檬酸含量等营养指标的测定;另一部分果肉和全部叶片烘干、粉碎后过 2 mm 筛,聚乙烯自封袋中保存,用于大量元素(N、P、K、Ca、Mg)、微量元素(B、Fe、Mn、Cu、Zn)、重金属元素(Pb、Cr、Cd)及轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Pm)含量营养指标的测定。

1.3.1 脐橙果实形态指标测定 每组取脐橙新鲜样果 20 个,采用电子天平(0.1 g)称量 20 个单果的鲜质量,用数码游标卡尺测量 20 个鲜果的纵径和横径,分别取平均值,计算果形指数:果形指数=纵径/横径。

1.3.2 脐橙果实营养成分测定 按照GB/T 5009.7—2008 直接滴定法测定果实总糖、蔗糖、还原糖含量,按照 GB/T 8210—2011 酸碱滴定法测定总酸含量,按照 GB/T 23877—2009 高效液相色谱法测定柠檬酸含量。

1.3.3 脐橙果实和叶片矿质元素含量测定 ①大量元素。按 GB 5009. 5—2010 食品安全国家标准中蛋白质的检测方法测定 N 含量,GB/T 5009. 7—2003 磷的检测方法测定 P 含量,GB/T 5009. 91—2003 钾的检测方法测定 K 含量,GB/T 5009. 92—2003 钙的检测方法测定 Ca 含量,GB/T 5009. 90—2003 镁的检测方法测定 Mg 含量。②微量元素。按照 GB/T 6041—2002 质谱分析方法通则测定 B

含量,GB/T 5009. 90—2003 检测方法测定 Fe 和 Mn 含量,GB/T 5009. 13—2003(第一法)检测方法测定 Cu 含量,GB/T 5009. 14—2003(第一法)检测方法测定 Zn 含量。③重金属元素。按照 GB 5009. 12—2010(第一法)检测方法测定 Pb 含量,GB 5009. 15—2014 方法测定 Cd 含量,GB 5009. 123—2014 方法测定 Cr 含量,并计算重金属的污染指数(重金属含量实测值和评价标准的比值)。④轻稀土元素。采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,样品消解参照食品安全国家标准中“植物性食品中稀土元素的测定(GB 5009. 94—2012)”的微波消解方法但有所修改,具体操作步骤参见王小玲等^[12]的方法。

1.4 数据处理

试验数据用 SPSS 16.0 统计分析和 Excel 法进行统计整理和分析,采用 Excel 2007 绘图。

2 结果与分析

2.1 脐橙果实形态分析

由表 2 可知,在脐橙果实生长发育期,其果形指数维持在相对平衡状态,果实近球形。7—9 月份是脐橙果实迅速生长期,其横径和纵径的增长量分别占全期增长量的 84. 29%和 77. 07%;脐橙单果鲜质量也随之迅速增加,此阶段的增长量占全期增长量的 71. 79%。10—11 月份,脐橙果实横径和纵径虽有增长,但差异不显著,而单果鲜质量则显著增加。这表明尽管 10—11 月份脐橙果径增长减缓,但由于营养物质的持续积累,单果鲜质量随着生长时期延长仍有显著增加。相关性分析表明,脐橙果实横径、纵径和单果鲜质量随着果实发育期延长而递增,且呈显著正相关关系($R^2_{横径}=0. 885\ 8$, $R^2_{纵径}=0. 927\ 4$)。

表 2 脐橙果实形态指标的测定

Table 2 Detection results of morphological indexes of navel orange fruit

检测月份 Month of determination	横径/cm Transverse diameter	纵径/cm Longitudinal diameter	单果鲜质量/g Single fruit weight	果形指数 Fruit shape index
7	53.67±3.67 Cc	57.41±3.48 Bc	79.82±3.10 De	1.07
8	65.56±3.12 Bb	68.61±4.37 BB	147.40±4.55 Cd	1.05
9	78.40±4.06 Aa	81.78±1.46 Aa	241.02±9.11 Bc	1.04
10	79.91±2.29 Aa	84.74±3.04 Aa	266.23±8.47 Bb	1.06
11	83.02±2.61 Aa	89.03±4.07 Aa	304.37±11.34 Aa	1.07

注:同列数据后标不同小写字母表示不同生长期在 0.05 水平差异显著,大写字母表示在 0.01 水平差异显著。下表同。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, while different capital letters indicate significant difference at 0.01 level. The same below.

2.2 脐橙果实营养成分分析

糖、酸含量是决定脐橙果实品质的关键指标,糖酸比越高,品质越好。由表 3 可知,脐橙果实糖酸比随着生育期延长而逐渐增大。进一步分析表明,从 7 月至 11 月份,脐橙果实总糖积累量随着发育期延长逐渐增加,蔗糖和还原糖积累量则极显著增加,蔗糖和还原糖分别占总糖的 43.82%和 42.77%,其中蔗糖在 7—9 月份积累量急剧增加,10—11 月份增加缓慢,而还原糖积累量的增加幅度与蔗糖相反。

果实总酸含量在 7—9 月份极显著减少,10—11 月份减少不显著;果实柠檬酸含量最高可占总酸量的 82.76%,柠檬酸含量变化趋势与总酸相同,其中 7—9 月份柠檬酸含量降低了 62.64%。可见,脐橙生长发育期也是果实总糖积累和总酸转化减少的过程,果实总酸含量主要受柠檬酸含量的影响,不同时期蔗糖和还原糖对果实总糖的贡献率还有待深入研究。

表 3 脐橙果实营养成分的测定

Table 3 Detection results of nutritional components in navel orange fruit

测定月份 Month of determination	总糖/ (g·kg ⁻¹) Total sugar	蔗糖/ (g·kg ⁻¹) Sucrose	还原糖/ (g·kg ⁻¹) Reducing sugar	总酸/ (g·kg ⁻¹) Total acid	柠檬酸/ (g·kg ⁻¹) Citric acid	糖酸比 Sugar acid ratio
7	88.7±15.0	2.5±0.6 Cc	20.7±4.3 Bb	14.1±2.5 Aa	9.1±1.8 Aa	9.75
8	92.0±11.8	24.2±5.1 BCb	24.5±5.7 Bb	10.8±2.4 ABa	7.2±1.6 ABa	12.78
9	95.2±11.4	43.6±8.5 ABa	28.7±5.2 Bb	4.4±1.8 BCb	3.4±0.7 BCb	27.99
10	110.2±7.3	47.5±9.6 ABa	32.8±3.6 ABb	3.5±1.0 Cb	2.7±0.7 Cb	40.81
11	114.8±10.5	50.3±7.7 Aa	49.1±4.2 Aa	2.9±0.9 Cb	2.4±0.7 Cb	47.81

2.3 脐橙果实和叶片矿质元素含量分析

2.3.1 大量元素 图 1 表明,在脐橙生长发育期,果实中的 N、P、K、Ca、Mg 积累量始终低于叶片。在脐橙果实中,大量元素含量依次表现为 K>N>Ca>P>Mg,且其含量均随果实生长发育期延长总体呈递减趋势,递减幅度依次表现为 Ca>P>Mg>K>N。叶片生长发育过程中,大量元素含量依次表现为 Ca>K>N>Mg>P,其中 Ca 元素含量随着生长发育期延长逐渐递增,说明叶片吸收合成 Ca 元素的量大于转移消耗的量;其他 4 种元素含量的变化规律与果实相同,递减幅度依次表现为 P>Mg>K>N。表明 Ca 是影响果实和叶片大量元素积累的主要因子,P 和 Mg 次之,K 和 N 最小。另外,果实和叶片大量元素的积累量在 7—9 月份的变化幅度大于 10—11 月份。

片,随着生长发育期延长,果实和叶片中的 5 种微量元素含量变化表现出分异现象。果实生长发育过程中,微量元素含量依次表现为 Zn>B>Mn>Cu>Fe,其中 Fe、Mn 和 Cu 含量总体上呈递增趋势,分别增加了 33.33%,17.73%和 93.90%;Zn 和 B 含量呈递减趋势,分别降低了 3.61%和 6.64%。叶片生长发育过程中,微量元素含量依次表现为 Mn>Fe>Zn>B>Cu,其中 Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量变化趋势与果实相同,且 Fe、Mn 和 Cu 含量分别增加了 68.28%,95.06%和 111.86%,Zn 含量降低了 9.62%。叶片 B 含量增加了 25.52%,与果实变化趋势相反。可见,叶片中微量元素含量不仅高于果实,而且变化幅度也大于果实,其中 9 月份是微量元素吸收、转运及分配的关键时期,而在 10—11 月份,除叶片 Cu 元素和果实 Zn 元素含量外,其他元素含量的变化基本趋于稳定。

2.3.2 微量元素 由图 2 可知,在脐橙生长发育过程中,果实中的 B、Fe、Mn、Cu、Zn 积累量均低于叶

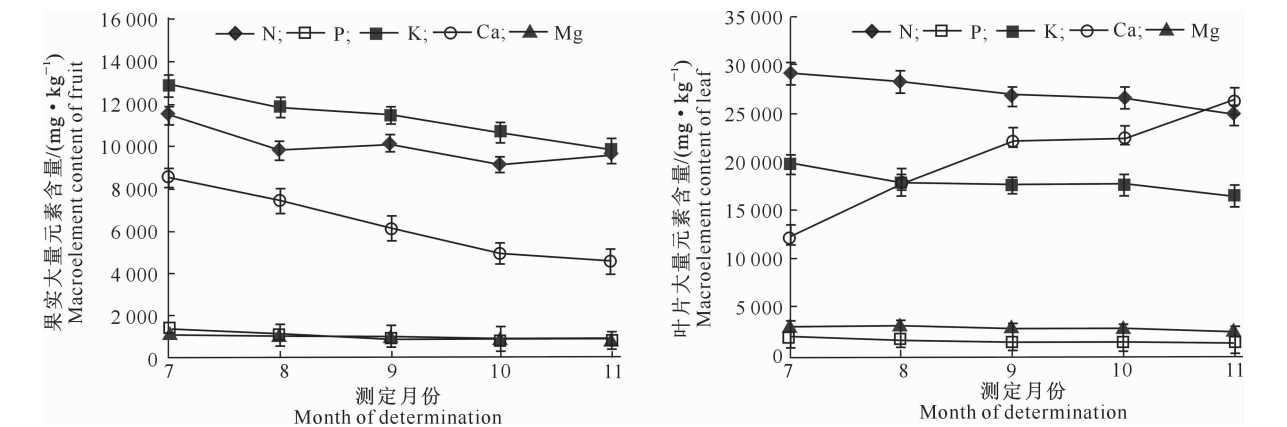


图 1 脐橙果实和叶片中 N、P、K、Ca、Mg 含量的动态变化

Fig. 1 Changes of N,P,K,Ca and Mg contents in navel orange fruits and leaves

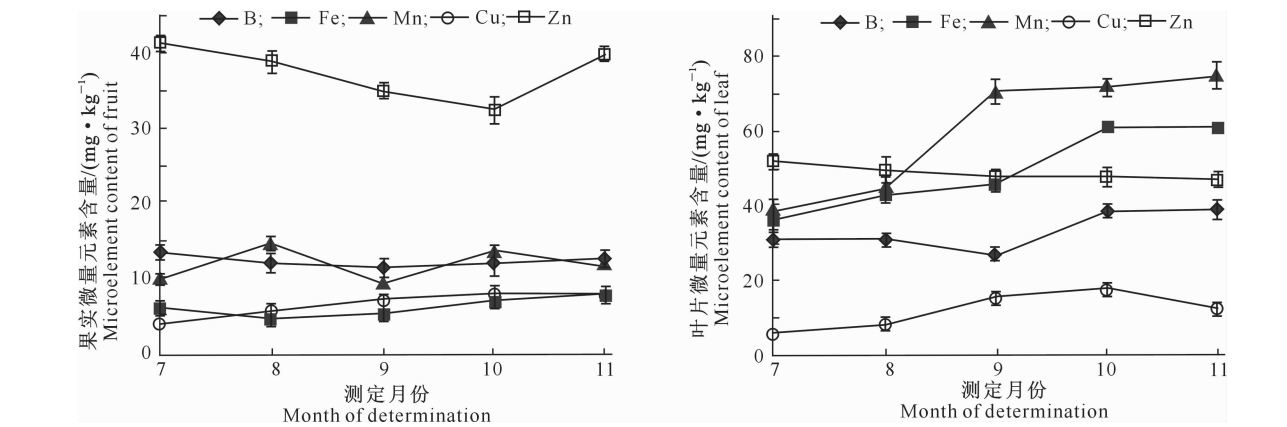


图 2 脐橙果实和叶片中 B、Fe、Mn、Cu、Zn 含量的动态变化

Fig. 2 Change of B,Fe,Mn,Cu and Zn contents in navel orange fruits and leaves

2.3.3 重金属元素 脐橙果实中重金属元素含量的安全评价标准采用 GB 2762—2017 食品中污染物的限量(水果)值,其中 $Pb \leq 0.1$ mg/kg、 $Cr \leq 0.5$ mg/kg、 $Cd \leq 0.05$ mg/kg。测定结果(表 4)表明,在脐橙的生长发育期内,Pb 元素含量在叶片中呈现出逐渐增加趋势,而在果实中未检出。对 Cr 元素而言,叶片中的 Cr 元素含量在 7—9 月份呈先降低后升高趋势,且变化幅度较大,10—11 月份又逐渐降

低;在果实中,7—9 月份 Cr 元素急剧增加了 76.36%,10—11 月份又缓慢降低了 17.46%;Cd 元素在叶片和果实中的检测值均小于 0.003 mg/kg。因此,虽然脐橙叶片 Pb 含量表现出增加趋势,但果实并未受到重金属 Pb 和 Cd 的污染;不同时期脐橙果实 Cr 元素的综合污染量为 0.10~0.19 mg/kg,远小于 0.5 mg/kg 的限量值,因此赣南脐橙是无重金属 Pb、Cr、Cd 污染的安全水果。

表 4 脐橙果实和叶片中 Pb、Cr、Cd 含量的动态变化

Table 4 Changes of Pb,Cr and Cd contents in navel orange fruits and leaves

测定月份 Month of determination	叶片 Leaf			果实 Fruit		
	Pb	Cr	Cd	Pb	Cr	Cd
7	0.23	0.51	—	—	0.055	—
8	0.28	0.19	—	—	0.076	—
9	0.35	0.29	—	—	0.097	—
10	0.41	0.25	—	—	0.063	—
11	0.47	0.20	—	—	0.052	—

注:“—”表示未检出。
Note:“—” indicates not detected.

2.3.4 轻稀土元素 在王小玲等^[12]研究的基础上,进一步分析脐橙果实和叶片中 5 种轻稀土元素

(La、Ce、Pr、Nd、Pm)的变化特征。结果(图 3)表明,叶片轻稀土元素含量极显著高于果实。不同生

长时期内,叶片 Pm 含量的变化趋势与其他 4 种轻稀土元素呈相反趋势。在 9 月份,叶片 Pm 元素积累量最少,La、Ce、Pr、Nd 积累量均达到最多;10—11 月份,叶片 Pm 元素含量逐渐升高,而 La、Ce、Pr、Nd 元素含量均有所降低。另外,随着生长时期的延长,果实中轻稀土元素 La、Ce、Pr、Nd 的积累量持续

减少,而 Pm 元素未检出。由此可见,9 月中旬以后叶片 Pm 积累量高于 Pr 含量,但转移到果实中的 Pm 极少。Pm 和 Pr 元素在脐橙叶片和果实中的转移转化特性具有一定的差异性,其原因还有待深入研究。

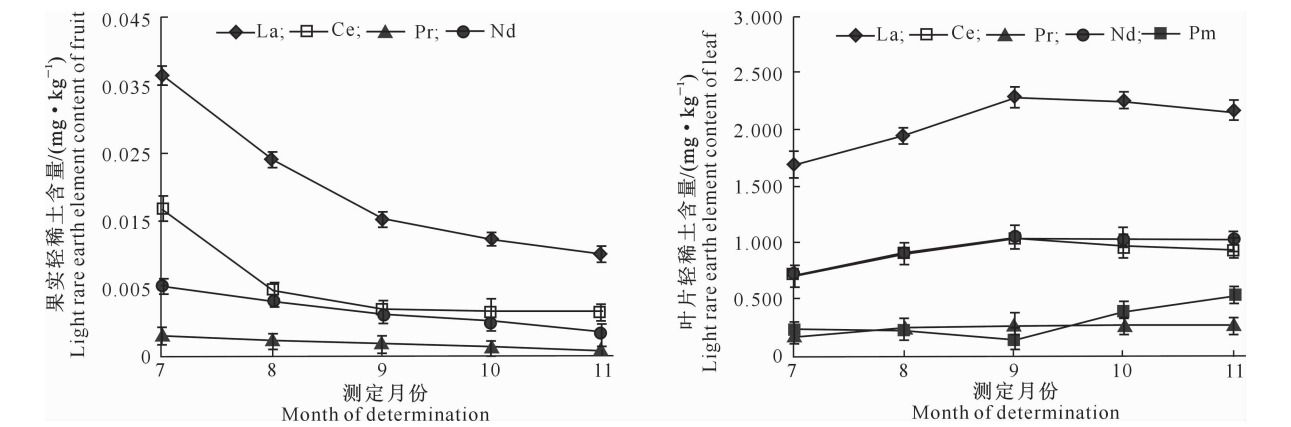


图 3 脐橙果实和叶片中轻稀土元素含量的动态变化

Fig. 3 Change of light rare earth element contents in navel orange fruits and leaves

2.4 脐橙果实和叶片各元素的相关性分析

脐橙果实各元素的相关性分析结果(表 5)表明,大量元素 P 与 N、Ca、Mg 呈显著正相关,K 与 Ca、Mg 呈极显著正相关,说明脐橙果实中 N、P、K、Ca 和 Mg 的吸收具有相互促进作用。微量元素 B、Fe、Mn、Cu、Zn 间的相关性未达到显著水平,而 Cu 与大量元素相关性显著,其中 Cu 与 N、K、Mg 呈显著负相关,与 P、Ca 呈极显著负相关,这说明微量元素之间的吸收相互间影响不大,而大量元素 N、P、K、Ca、Mg 的含量均会密切影响 Cu 元素的吸收与分配,且与其存在拮抗关系。果实轻稀土元素之间,

除 Ce 与 Nd 的相关性未达到显著水平外,其他各元素之间均呈显著或极显著正相关;微量元素 Cu 与 4 种轻稀土元素 La、Ce、Pr、Nd 呈显著或极显著负相关;另外,轻稀土元素 Ce 含量与大量元素 N、P 呈显著正相关,而 La、Pr、Nd 含量分别与 P、K、Ca、Mg 元素呈显著或极显著正相关。由此说明,脐橙果实微量元素 Cu 含量越高,对其他元素吸收与积累的影响作用越明显,而其他元素之间存在不同程度的协同促进关系,其中 P、K、Ca 的协同促进作用尤为突出。

表 5 脐橙果实中各元素的相关性分析

元素 Element	N	P	K	Ca	Mg	B	Fe	Mn	Cu	Zn	La	Ce	Pr
P	0.894 *												
K	0.801	0.877											
Ca	0.822	0.944 *	0.965 **										
Mg	0.766	0.898 *	0.979 **	0.992 **									
B	0.718	0.737	0.393	0.477	0.375								
Fe	-0.304	-0.471	-0.736	-0.729	-0.796	0.246							
Mn	-0.643	-0.234	-0.263	-0.198	-0.162	-0.241	-0.068						
Cu	-0.889 *	-0.992 **	-0.929 *	-0.977 **	-0.945 *	-0.654	0.566	0.246					
Zn	0.655	0.732	0.349	0.558	0.452	0.754	-0.063	-0.171	-0.661				
La	0.867	0.985 **	0.938 *	0.968 **	0.942 *	0.661	-0.551	-0.204	-0.994 **	0.605			
Ce	0.913 *	0.956 *	0.826	0.848	0.795	0.841	-0.267	-0.327	-0.936 *	0.643	0.949 *		
Pr	0.853	0.937 *	0.989 **	0.989 **	0.985 **	0.495	-0.690	-0.271	-0.973 **	0.485	0.974 **	0.879 *	
Nd	0.787	0.926 *	0.984 **	0.987 **	0.990 **	0.469	-0.719	-0.147	-0.963 **	0.457	0.972 **	0.858	0.992 **

注: ** 表示在 $P<0.01$ 水平上极显著相关, * 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。下表同。

Note: “**” indicates highly significant correlation at $P<0.01$ level, “*” indicates significant correlation at $P<0.05$ level. The same below.

脐橙叶片中各元素的相关性分析结果(表 6)表明,大量元素中除 Ca 与其他元素呈显著或极显著负相关外,其他各元素间均存在相互促进作用,其中 K 与 N、P、Mg 呈显著正相关,这说明 K 对其他元素的促进或抑制作用较小。微量元素 Mn 与 Cu 呈显著正相关,与 Zn 呈显著负相关,其他元素间相关性不显著;但是 Mn 与大量元素 Ca 呈显著正相关,与其

他大量元素呈显著负相关,Zn 元素则相反。轻稀土元素 La、Ce、Pr、Nd 间呈显著或极显著正相关,但 Pm 元素对其他 4 种轻稀土元素影响甚微,微量元素 B 对 Pm 元素的吸收、积累具有显著的促进作用;大量元素 Ca 可以促进 La、Nd 元素的吸收,微量元素 Zn 则会抑制其吸收。

表 6 脐橙叶片中各元素的相关性分析
Table 6 Correlation analysis of mineral and heavy metal elements in navel orange leaves

元素 Element	N	P	K	Ca	Mg	B	Fe	Mn	Cu	Zn	La	Ce	Pr	Nd
P	0.991**													
K	0.920*	0.940*												
Ca	-0.979**	-0.997**	-0.953*											
Mg	0.995**	0.989**	0.890*	-0.976**										
B	-0.567	-0.513	-0.468	0.490	-0.556									
Fe	-0.874	-0.875	-0.797	0.873	-0.881*	0.816								
Mn	-0.924*	-0.946*	-0.802	0.944*	-0.953*	0.428	0.851							
Cu	-0.668	-0.735	-0.593	0.759	-0.719	0.307	0.758	0.884*						
Zn	0.897*	0.945*	0.952*	-0.966**	0.891*	-0.306	-0.769	-0.893*	-0.770					
La	-0.794	-0.861	-0.780	0.887*	-0.822	0.219	0.742	0.933*	0.941*	-0.928*				
Ce	-0.676	-0.763	-0.765	0.804	-0.689	-0.014	0.555	0.798	0.824	-0.917*	0.950*			
Pr	-0.754	-0.834	-0.831	0.872	-0.766	0.204	0.716	0.855	0.882*	-0.950*	0.973**	0.974**		
Nd	-0.828	-0.893*	-0.859	0.921*	-0.842	0.245	0.756	0.916*	0.890*	-0.971**	0.988**	0.962**	0.990**	
Pm	-0.729	-0.666	-0.639	0.637	-0.703	0.954*	0.838	0.527	0.286	-0.457	0.294	0.093	0.282	0.345

3 讨论与结论

柑橘类果实中的糖、酸含量是决定果实品质的重要指标。一般认为,柑橘类果实的糖积累属于蔗糖积累型^[13],蔗糖含量是影响果实风味的主要成分^[14]。果实中的可溶性糖来自叶源的光合同化,其先贮藏在液泡中,再以蔗糖的形式运输到果实,纽荷尔脐橙果实中的蔗糖含量最高可达总糖的 60.19%^[15]。王贵元等^[16]的研究表明,红肉脐橙中的蔗糖主要在果实着色期积累,而葡萄糖和果糖主要于果实成熟期积累。本研究表明,脐橙果实中蔗糖和还原糖占总糖量的比率差异不大,但不同时期表现出的增量变化非常明显。因此,脐橙果实中糖的积累量不仅受品种的影响,且不同时期起主要作用的糖种类也会存在差异。

按成熟果实中所积累的主要有机酸,可将果实分为苹果酸型、柠檬酸型和酒石酸型 3 大类,柑橘属柠檬酸型^[17],即其果实中的有机酸主要为柠檬酸,含量最高可达总酸的 75.4%~96.9%,是影响风味的决定性有机酸^[18]。本研究表明,脐橙柠檬酸含量最高可达总酸含量的 82.76%,与孙达等^[15]对 11 个纽荷尔脐橙产地果实样品分析的结果一致,即柠檬酸是脐橙果实的主要有机酸。脐橙果实近球形,不

同时期糖酸比变化差异较大,为 9.75~47.81。研究表明,不同时期脐橙果实的糖酸含量受土壤类型、气候因素、贮藏方式、施肥种类、树龄大小等多种因素的影响^[19-21],但主要原因还有待于采用统计方法针对单一因素进行进一步分析。

土壤矿质营养是果树生长发育、产量和品质形成的物质基础,树体所需的矿质营养直接来源于土壤^[22]。研究表明,土壤营养状况不仅会直接影响果实产量和糖酸含量,提高固/酸值和糖/酸值,改善果实品质^[23-25],而且还可以通过叶片分析反映树体的营养状况以及果实的生长发育和品质状况^[26]。本研究发现,矿质营养元素对脐橙生长发育至关重要,9 月份是脐橙叶片和果实矿质营养元素变化的关键时期,不同生长时期叶片矿质元素含量都高于果实,其中微量元素 Fe、Mn、Cu 处于积累状态,但 Zn 元素却相反,这可能与 Zn 元素转移到其他器官导致 Zn 元素含量不足,进而影响脐橙园产量有关^[27]。相关性分析进一步表明,大量元素 Ca、Mg 和微量元素 Cu、Zn 是影响果实和叶片矿质营养积累的关键因子。果实大量元素间相互促进积累,但大量元素明显抑制 Cu 的积累,这可能与 Cu 是重金属元素有关,适量的 Cu 元素可以促进果树生长,提高果实品质,但超过临界值,果实的生长和品质就会受到抑

制,也会对人体健康造成威胁,这与关军锋^[28]和陈丽旋等^[29]的研究结果一致。因此,脐橙果实的生长发育和品质形成直接受叶片和果实中各种矿质营养元素的协同调控,其调控的关键因素及其对果树生长和果实品质的影响机制还有待深入探究。

基于国内对杨梅^[30]、枣^[31]、桃^[32]等果实重金属元素的检测研究,尤其是重金属在苹果^[33-34]中的富集水平及对品质影响的深入研究表明,虽然 80%果实处于安全范围之内,但重金属检出率则达到了 100%,可见果实中重金属超标的潜在可能性不容忽视。对贵州柑橘园的调查研究发现,果实中的重金属富集量与叶片和土壤中的重金属含量同时呈正相关^[35],但是叶片和土壤重金属含量对果实重金属含量的贡献率还不清楚。王星梅等^[36]和贺灵等^[37]对赣南脐橙园的调查评价表明,部分重金属存在潜在的环境风险,并轻度超标。本研究对信丰脐橙园的调查研究表明,虽然土壤和果实均未受 Pb、Cr、Cd 3 种重金属的污染,果实中 Pb 和 Cd 的检出率为 0,但并不代表其他重金属元素不会对脐橙品质造成影响。因此,关于重金属对赣南脐橙品质的影响研究还需要大面积调查,查清造成潜在风险的影响因素和重金属元素的形态分布特征。

赣南是全国稀土储量和产量最多的地区,矿区土壤中稀土最低含量为我国土壤稀土平均含量的 2 倍多。多数研究认为,轻稀土元素有利于植物吸收,在植物体内的分布丰度较大^[38],与植物品质的相关性较强^[39],有利于提高植物果实的品质^[40]。因此,越来越多的研究者开始探寻赣南脐橙的优质品质与稀土元素的相关性,汪振立等^[7]的研究表明,赣南脐橙果园土壤中 La、Ce、Pr、Nd 4 种轻稀土元素有利于促进脐橙有机营养物质的形成。但也有研究表明,不同脐橙品种和部位对轻稀土元素吸收积累的差异较大,脐橙对轻稀土元素的吸收能力也受到元素种类的影响^[41]。本研究表明,脐橙叶片对轻稀土元素的吸收能力远高于果实,脐橙对 4 种轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd)的积累量与其在土壤中的含量及果实与叶片中的轻稀土元素含量呈正相关,但在脐橙果实中未检测出 Pm 元素,推测这与叶片 Pm 元素积累受微量元素 B 的显著影响有关。

[参考文献]

[1] 徐 慧,陈欣欣,王永章,等. ‘富士’苹果果实矿质元素与品质指标的相关性与通径分析 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(25): 116-121.

Xu H, Chen X X, Wang Y Z, et al. Correlation and path analysis between mineral element and quality indicators of ‘Fuji’ apple fruits [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(25): 116-121.

[2] 陈亚艳, 接云云, 李越荣, 等. 赣南脐橙品质与营销的制约因素及产业发展对策 [J]. 贵州农业科学, 2016, 44(12): 153-157.

Chen Y Y, Jie Y Y, Li Y R, et al. Constrains of quality and marketing of Gannan navel orange and the industrial development countermeasures [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, 44(12): 153-157.

[3] 凌丽俐, 彭良志, 淳长品, 等. 赣南脐橙叶片营养状况对果实品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 947-954.

Ling L L, Peng L Z, Chun C P, et al. The relationship between leaf nutrients and fruit quality of navel orange in southern Jiangxi province of China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 947-954.

[4] Liang T, Li K X, Wang L Q. State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2014, 186(3): 1499-1513.

[5] 钟林生. 赣南脐橙果园土壤中稀土元素的分布特征研究 [D]. 江西赣州: 赣南师范学院, 2012: 29-38.

Zhong L S. The distribution characteristics of rare earth elements in the soil of navel orange orchard in southern Jiangxi province of China [D]. Ganzhou, Jiangxi: Gannan Normal University, 2012: 29-38.

[6] 郭鹏然, 贾晓宇, 段太成, 等. 土壤中稀土元素的形态分析 [J]. 分析化学, 2008, 36(11): 1483-1487.

Guo P R, Jia X Y, Duan T C, et al. Speciation analysis of rare earth elements in soil [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2008, 36(11): 1483-1487.

[7] 汪振立, 邓通德, 胡正义, 等. 脐橙品质与自然土壤中稀土元素相关性分析 [J]. 土壤, 2010, 42(3): 459-466.

Wang Z L, Deng T D, Hu Z Y, et al. Correlation analysis between navel orange quality and REE in natural soil [J]. Soils, 2010, 42(3): 459-466.

[8] 刘平辉, 芮玉奎, 叶长盛. 南丰蜜桔中稀土元素与土壤的关系 [J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(12): 2575-2577.

Liu P H, Rui Y K, Ye C S. Effects of soil on the concentration of rare earth in Nanfeng orange [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(12): 2575-2577.

[9] 董素钦. 喷施微量元素和稀土对柑桔经济性状和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2007, 1(4): 71-72.

Dong S Q. Trace elements of the economic character and quality of citrus [J]. Chinese Soil and Fertilizer, 2007, 1(4): 71-72.

[10] 尚 媛, 王冬艳, 李月芬, 等. 土壤稀土元素特征与苹果梨品质相关关系分析 [J]. 吉林农业大学学报, 2010, 32(1): 68-71, 80.

Shang Y, Wang D Y, Li Y F, et al. Study on the correlation between the characteristic of REE in soil and quality of apple-peer [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2010, 32(1): 68-71, 80.

- [11] 姚艳丽,张秀梅,刘忠华,等. 硝酸镧和硝酸铈对菠萝产量品质和抗氧化酶系统的影响 [J]. 热带作物学报, 2010, 31(8): 1372-1376.
Yao Y L, Zhang X M, Liu Z H, et al. Effects of lanthanum nitride and cerium nitrate on pineapple yield and quality and antioxidant enzyme system [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(8): 1372-1376.
- [12] 王小玲,田晓娟,高 柱. 赣南典型脐橙园土壤-脐橙系统中轻稀土元素相关性研究 [J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(1): 32-39.
Wang X L, Tian X J, Gao Z. The correlation between light rare earth elements in soil and navel orange tree system in south Jiangxi region [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(1): 32-39.
- [13] Ayaz F A, Kadioglu A, Bertoft E, et al. Effect of fruit maturation on sugar and organic acid composition in two blueberries (*Vaccinium arctostaphylos* and *V. myrtillus*) native to Turkey [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2001, 29: 137-141.
- [14] 林 玲,孙光明,李绍鹏,等. 园艺植物果实中糖代谢的研究进展 [J]. 华南热带农业大学学报, 2005, 11(4): 37-41.
Lin L, Sun G M, Li S P, et al. Advance in research on sugar metabolism in fruits of horticulture plants [J]. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 2005, 11(4): 37-41.
- [15] 孙 达,张红艳,程运江. 11 个产地纽荷尔脐橙果实风味物质含量差异 [J]. 植物科学学报, 2015, 33(4): 513-520.
Sun D, Zhang H Y, Cheng Y J. Contents of flavor components in newhall navel oranges (*Citrus sinensis*) harvested from eleven production areas of China [J]. Plant Science Journal, 2015, 33(4): 513-520.
- [16] 王贵元,吴强盛,孙俊雄. 红肉脐橙果实发育过程中主要糖含量的变化 [J]. 长江大学学报(自然科学版): 农学, 2007, 4(1): 12-13, 22.
Wang G Y, Wu Q S, Sun J X. Changes of sugar concentration during the development of Cara Cara navel orange [J]. Journal of Yangtze University (Nat Sci Ed): Agri Sci, 2007, 4(1): 12-13, 22.
- [17] 姚改芳,杨志军,张绍铃,等. 梨不同栽培种果实有机酸组分及含量特征分析 [J]. 园艺学报, 2014, 41(4): 755-764.
Yao G F, Yang Z J, Zhang S L, et al. Characteristics of components and contents of organic acid in pear fruits from different cultivated species [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2014, 41(4): 755-764.
- [18] Yamaki Y T. Organic acid in the juice of citrus fruits [J]. Journal of Japan Horticultural Science Society, 2009, 58(3): 587-594.
- [19] 赖九江,马小焕,钟莉华,等. 赣南纽荷尔脐橙果实品质比较研究 [J]. 中国南方果树, 2012, 41(5): 5-7, 12.
Lai J J, Ma X H, Zhong L H, et al. Comparative study on fruit quality of newhall navel orange in southern Jiangxi province [J]. South China Fruit, 2012, 41(5): 5-7, 12.
- [20] 何义仲,陈兆星,刘润生,等. 不同贮藏方式对赣南纽荷尔脐橙果实品质的影响 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(4): 736-748.
He Y Z, Chen Z X, Liu R S, et al. Effects of different storage methods on fruit quality of 'Newhall' navel orange (*Citrus sinensis* sbeck 'Newhall') in southern Jiangxi province [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(4): 736-748.
- [21] 施婷婷,陈金印,王 雄. 不同贮藏温度对赣南脐橙果实有机物质含量的影响 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 76-78.
Shi T T, Chen J Y, Wang X. Influence of temperature on preservation characteristics of Gannan navel orange during post-harvest storage period [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(20): 76-78.
- [22] 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.
Huang C H, Qu X Y, Liu K P, et al. Analysis of soil physico-chemical properties, leaf nutrients and fruit qualities in the orchards of 'Jinkui' kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. Journal of Fruit Science, 2014, 31(6): 1091-1099.
- [23] 周继芬,杨雅婷,李兴发,等. 不同氮、磷、钾、钙水平对脐橙产量及果实品质的影响 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(2): 54-57.
Zhou J F, Yang Y T, Li X F, et al. On influence of different percentage of N, P, K and Ca on navel orange yield and fruit quality [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 40(2): 54-57.
- [24] 郭 雯,李丙智,张林森,等. 不同施钾量对红富士苹果叶片光合特性及矿质营养的影响 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(4): 192-195.
Guo W, Li B Z, Zhang L S, et al. Effects of different fertilization of potassium on photosynthetic characteristics and leaf nutrition of red Fuji apple [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(4): 192-195.
- [25] 王 强,王秀琪,曾 明. 钙处理对纽荷尔脐橙裂果及果实品质的影响 [J]. 西南农业学报, 2013, 26(1): 308-311.
Wang Q, Wang X Q, Zeng M. Effect of Ca on fruit cracking and fruit quality of newhall navel orange [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(1): 308-311.
- [26] Denise N, Gerry N. Nutritional effects on fruit quality for apple trees [J]. New York Fruit Quarterly, 2009, 17(3): 21-24.
- [27] 凌丽俐,彭良志,淳长品,等. 赣南不同产量纽荷尔脐橙园叶片养分状况分析 [J]. 中国南方果树, 2010, 39(5): 30-32.
Ling L L, Peng L Z, Chun C P, et al. Analysis of nutrient status of the leaf of navel orange at different yield in southern Jiangxi province [J]. Chinese Southern Fruits, 2010, 39(5): 30-32.
- [28] 关军锋. 苹果幼果发育期间 Ca、Mg、K 含量的变化 [J]. 河北科技师范学院学报, 2004, 18(2): 19-22.
Guan J F. Changes of content of Ca, Mg and K during apple fruitlet growth [J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2004, 18(2): 19-22.
- [29] 陈丽旋,李金雨,蔡晓东,等. 2 种葡萄柚果实发育过程中金属

营养元素变化及活性氧代谢差异 [J]. 热带作物学报, 2010, 31(12): 2180-2186.

Chen L X, Li J Y, Cai X D, et al. Changes of metal elements and differences of active oxygen metabolism during the fruits development of two kinds of *Citrus paradise* marcf [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(12): 2180-2186.

[30] 尚素微, 吕爱华, 祝新明, 等. 浙江省杨梅果实重金属含量水平及其质量安全评价 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 71-74.

Shang S W, Lü A H, Zhu X M, et al. Concentration of heavy mental and assessment on quality and safety of *Myrica rubra* fruits in Zhejiang province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(21): 71-74.

[31] 辛永清, 杨 斌, 李 楠, 等. 靖远小口枣果实重金属和农药残留污染评价 [J]. 西北林学院学报, 2009, 24(1): 132-135.

Xin Y Q, Yang B, Li N, et al. Evaluation to heavy metals and pesticide residues pollution of fruit of *Ziziphus jujube* in Jingyuan [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(1): 132-135.

[32] 贺行良, 刘昌岭, 任宏波, 等. 山东莱西桃果实重金属含量调查 [J]. 中国果树, 2006(3): 47-49.

He X L, Liu C L, Ren H B, et al. Investigation of heavy metal content on walnut fruit in Shandong province [J]. China Fruits, 2006(3): 47-49.

[33] 张林生, 梁 俊, 武春林, 等. 陕西苹果园土壤重金属含量水平及其评价 [J]. 果树学报, 2004, 21(2): 103-105.

Zhang L S, Liang J, Wu C L, et al. Evaluation and concentration of soil heavy metals in apple orchards of Shaanxi province [J]. Journal of Fruit Science, 2004, 21(2): 103-105.

[34] 张翠花, 赵政阳. 陕西苹果产区果实重金属含量水平调查 [J]. 西北农业学报, 2006, 15(4): 126-128.

Zhang C H, Zhao Z Y. Survey on heavy metals content of fruits in apple production area of Shaanxi province [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2006, 15(4): 126-128.

[35] 李金强, 罗 恽, 柏自琴, 等. 贵州柑橘园土壤与果实重金属含量特征及其评价 [J]. 贵州农业科学, 2017, 45(1): 99-102.

Li J Q, Luo Y, Bai Z Q, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal content in soil and fruit of citrus orchards in Guizhou [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2017, 45(1): 99-102.

[36] 王星梅, 张文星, 蒋委红, 等. 赣南脐橙果园土壤重金属形态分布特征研究 [J]. 赣南师范学院学报, 2013(6): 71-73.

Wang X M, Zhang W X, Jiang W H, et al. Chemical speciation distribution of heavy metals in navel orange orchard soils in Gannan [J]. Journal of Gannan Normal University, 2013(6): 71-73.

[37] 贺 灵, 曾道明, 魏华玲, 等. 赣南脐橙种植区典型果园土壤重金属元素评价 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(2): 292-297.

He L, Zeng D M, Wei H L, et al. Evaluating heavy metals of navel orange orchard soil in Gannan area [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(2): 292-297.

[38] Khadija S, Osman B, Salah A, et al. Mobility of rare earth elements in the system soils-plants-groundwaters; a case study of an arid area (Oman) [J]. Arab J Geo Sci, 2009, 2: 143-150.

[39] Fang J, Wen B, Shan X, et al. Evaluation of bioavailability of light rare earth elements to wheat (*Triticum aestivum* L.) under field conditions [J]. Geoderma, 2007, 141: 53-59.

[40] 齐国亮, 苏雪玲, 王 俊, 等. 宁夏枸杞主产区土壤和果实中稀土元素含量及其相关性 [J]. 南方农业学报, 2014, 45(7): 1206-1210.

Qi G L, Su X L, Wang J, et al. Contents of rare earth elements in soils and fruits of *Lycium bararum* L. in different regions and their relationship [J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(7): 1206-1210.

[41] 谢振东, 方宣忠, 郑 文. 江西信丰县优质脐橙果和叶中稀土元素分布特征研究 [J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1418-1423.

Xie Z D, Fang X Z, Zheng W. Distribution characteristics of REE in quality navel orange fruit and leaf in Xinfeng county, Jiangxi [J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1418-1423.