

福建10个不同产地‘芙蓉李’果实品质与矿质元素含量的相关性分析与通径分析

周丹蓉, 林炎娟, 方智振, 叶新福*, 陈文光

(福建省农业科学院果树研究所, 福州 350013)

摘要: **目的** 研究福建10个不同产地‘芙蓉李’果实品质与矿质元素含量的关系, 分析果实品质与矿质元素含量的地区差异, 以及影响各果实品质的主要矿质元素。**方法** 采集福建10个产地果园的‘芙蓉李’, 测定8个品质指标和10种矿质元素含量, 利用比较分析、相关分析和通径分析等方法, 分析地区间品质和矿质元素含量的差异、相关性和通径系数。**结果** 不同产地间各果实品质指标、矿质元素含量均存在极显著差异($P < 0.01$)。相关性分析表明, 单果重与N含量呈显著正相关、与Mg含量呈显著负相关, 色泽亮度因子 L^* 与Zn含量呈极显著正相关($r = 0.903$)、与P含量呈显著正相关($r = 0.685$), 色泽红色因子 a^* 与Zn呈显著负相关($r = -0.706$), 色泽黄色因子 b^* 与Ca含量呈显著正相关($r = 0.677$)、而与Fe含量呈显著负相关($r = -0.705$)。通径分析表明, N对单果重的直接影响最大, P对硬度的直接影响最大, Mn对固酸比的直接影响最大; Zn是对可溶性固形物含量、色泽因子 L^* 、 a^* 均具有最大直接影响的元素, Fe是对可滴定酸、色泽因子 b^* 有最大直接影响的元素, 对‘芙蓉李’品质指标直接影响较大的元素还有B、Ca、K等。**结论** ‘芙蓉李’果实品质是多种元素共同作用的结果, 在生产中应协调好各种矿质元素的配比以提高果实品质, 实现优质高效生产。

关键词: 芙蓉李; 品质; 矿质元素; 相关分析; 通径分析

Correlation and path analysis of fruit quality and mineral element content of ‘Furongli’ from 10 kinds of different origins in Fujian

ZHOU Dan-Rong, LIN Yan-Juan, FANG Zhi-Zhen, YE Xin-Fu*, CHEN Wen-Guang

(Fruit Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

ABSTRACT: Objective To study the relationship between fruit quality and mineral element content of ‘Furongli’ from 10 kinds of different origins in Fujian, and analyze the regional differences in fruit quality and mineral element content, as well as the main mineral elements that affect the quality of each fruit. **Methods** ‘Furongli’ was gathered

基金项目: 福建省公益类科研院所专项(2020R10280016)、福建省人民政府与中国农业科学院协同实施农业高质量发展超越创新工程项目(XTCXGC2021006)、农业农村部热带作物种质资源保护项目(18200034)、福建省人力资源和社会保障厅访学研修项目(闽人社文〔2019〕166号)

Fund: Supported by the Special Projects for Public Welfare Research Institutes in Fujian Province (2020R10280016), the Collaborative Innovation Project from the People’s Government of Fujian Province & Chinese Academy of Agricultural Sciences (XTCXGC2021006), the Tropical Crop Germplasm Resources Protection Project of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (18200034), and the Study Visit and Training Project of Fujian Provincial Department of Human Resources and Social Security (Documents of Fujian Provincial Department of Human Resources and Social Security (2019) No.166)

*通信作者: 叶新福, 博士, 研究员, 主要研究方向为作物遗传育种。E-mail: yexinfu@126.com

*Corresponding author: YE Xin-Fu, Ph.D, Professor, Fruit Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China. E-mail: yexinfu@126.com

from 10 kinds of different origins in Fujian, then 8 kinds of quality indexes and 10 kinds of mineral elements content were determined. The differences, correlations and path coefficients of quality and mineral element content between regions were analyzed by the methods of comparative analysis, correlation analysis and path analysis. **Results** There were significant differences in fruit quality indexes and mineral element content among different locations ($P < 0.01$). Correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between fruit weight and N content, a significant negative correlation between fruit weight and Mg content. The color factor L^* was extremely significantly positively correlated with Zn content ($r = 0.903$), and was significantly positively correlated with P content ($r = 0.685$), there also was a significant negative correlation between color factor a^* and Zn content ($r = -0.706$), the color factor b^* was positively correlated with Ca content ($r = 0.677$), but negatively correlated with Fe content ($r = -0.705$). Path analysis showed that N had the greatest direct effect on fruit weight, P had a greatest direct effect on fruit firmness, Mn had a greatest direct effect on the soluble solid content/titratable acid content, while Zn was the element that had the greatest direct influence on soluble solid content, L^* and a^* . Fe was the element that had the greatest direct influence on titratable acid and b^* , besides, B, Ca and K, etc. also directly affected the quality of ‘Furongli’. **Conclusion** The fruit quality of ‘Furongli’ is the result of the joint action of various elements. In production, the ratio of various mineral elements should be well coordinated to improve fruit quality and achieve high-quality and efficient production.

KEY WORDS: ‘Furongli’; fruit quality; mineral elements; canonical correlation; path analysis

0 引言

果实品质一般是指果实形状、大小、单果重等外观品质和果实风味、香气、糖酸比、可溶性固形物含量、营养成分等内在品质,果实品质是果品质量和商品价值高低的直接决定因素,而矿质营养与果实品质密切相关,是果树生长发育、产量形成和品质提高的物质基础,对果树的生理代谢和品质形成具有十分重要的调控作用^[1-3],果实中适宜的养分含量与比例可明显提升果实的品质^[4-7],目前有关果实品质与矿质元素的关系研究主要集中在苹果^[3]、梨^[8]、橙^[9]、甜柿^[10]等树种,针对李的研究报道较少。目前,针对李的相关研究主要集中在李果实生长发育期矿质元素含量与营养成分的变化研究^[11-12]、不同肥料类型和用量对李品质的影响^[13-14]、生长调节剂及喷钙等处理对李生长情况及果实矿质元素含量的影响^[15-17]等方面,近年来有学者研究了‘芙蓉李’焦叶症与矿质元素含量的关系^[18],而关于李果实品质和矿质元素含量之间的关系还鲜见报道。

‘芙蓉李’是福建特产,有700多年的栽培历史,果实甜酸适口,品质上乘,可鲜食也可加工,是鲜食与加工兼用品种,也是福建名果之一,已列入国家土特产年鉴。‘芙蓉李’在福建闽西、闽东、闽北等多地均有种植,但不同产地‘芙蓉李’的品质差异较大。本研究以福建李主产区10个县市的‘芙蓉李’为对象,分析比较不同地区‘芙蓉李’果实品质及矿质元素含量的特性和差异,探讨影响不同品质指标的主要矿质元素因子,以期为提高‘芙蓉李’质量,实现‘芙蓉李’的科学种植、合理施肥和品质调控提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

2020年在福建省‘芙蓉李’主产区选择10个县市(连城、尤溪、龙岩、武平、永安、永泰、福安、屏南、将乐、古田)的‘芙蓉李’生产果园,主要栽培品种为‘芙蓉李’,砧木为毛桃,树龄5~10年,株行距为3~3.5 m×4~4.5 m, pH为4.6~7.5,在每个果园选择5株树冠大小、长势相对一致的树体作为重复,果实成熟时在每株树树冠外围中部沿东西南北4个方位随机选取成熟度相对一致、大小适中、无病虫害的果实样品30个,带回实验室保存在4℃冰箱中,进行果实品质指标测定;取样品切片后于80℃恒温干燥箱中烘干、粉碎后测定矿质元素。

硝酸、过氧化氢、氢氧化钠、硼酸、甲基红-溴甲酚绿等试剂(分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

TMS-PRO 食物物性测试仪(美国 FTC 公司); PAL-1 数显式糖度计、PAL-BX/ACID11 数显式糖酸一体机(日本 ATAGO 公司); NH310 色差计(深圳三恩驰科技有限公司); K9840 自动凯氏定氮仪(山东海能科学仪器有限公司); ULTIMA-2 电感耦合等离子体发射光谱仪(法国 JY 公司); ICAPQ 等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司)。

1.3 方法

样品的各项品质指标测定:单果重(fruit mass, FM)采用电子分析天平测定;果实硬度(fruit firmness, FF)采用 TMS-PRO 食物物性测试仪测定;可溶性固形物含量(soluble solid content, SSC)采用数显式糖度计测定;可滴定酸含量

(titratable acid content, TAC)采用数显式糖酸一体机测定;果实色泽采用色差计测定;固酸比(soluble solid/titratable acid ratio, SS/TA)用可溶性固形物含量和可滴定酸含量的比值表示。各指标重复 10 次,取平均值。

样品的矿质元素含量测定: N 采用 NY/T 2419—2013《植株全氮含量测定自动定氮仪法》测定; K、P、Ca、Fe、Mg、Mn、Cu、Zn 采用 GB/T 30376—2013《茶叶中铁、锰、铜、锌、镁、钾、钠、磷、硫的测定-电感耦合等离子体原子发射光谱法》进行测定; B 采用 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中的第一法电感耦合等离子体质谱法进行测定。

1.4 数据处理

应用 SPSS 12.0 软件对果园的果实矿质元素和果实品质数据进行方差分析、Duncan’s 新复极差分析及多重比较、相关性分析、通径分析等统计分析。

2 结果与分析

2.1 果实品质指标与矿质元素含量的特性

不同产地‘芙蓉李’的果实品质指标见表 1,从结果

可知,‘芙蓉李’单果重在 36.80~99.50 g,单果重最大为屏南产;可溶性固形物含量在 12.05%~14.09%,最高为连城产;可滴定酸含量在 0.63%~1.20%,最高为连城产;固酸比为 11.73~19.06,最高为将乐产;硬度为 5.88~10.42 N,最高为尤溪产;色泽亮度因子 L^* 为 35.84~54.35,最高值为尤溪产;红色因子 a^* 为 4.89~14.92,最高值为屏南产;黄色因子 b^* 为 4.55~15.42,最高值为龙岩产。

由表 1 还可以看出,不同产地‘芙蓉李’的品质指标存在一定差异,8 个品质指标中,仅果实可溶性固形物含量的变异程度较小,为 5.01%,色泽因子 a^* 的变异程度最大,达至 33.96%,其次为色泽因子 b^* (变异系数为 29.42%)、单果重(变异系数为 28.88%)、可滴定酸含量(变异系数为 22.52%)、固酸比(变异系数为 17.74%)、果实硬度(变异系数为 16.73%)、色泽因子 L^* (变异系数为 14.74%)。对不同产地‘芙蓉李’的各品质指标进行方差分析,结果表明产地间单果重、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、固酸比、硬度、色泽因子 L^* 、 a^* 、 b^* 均存在极显著差异。

表 1 ‘芙蓉李’果实品质指标
Table 1 Quality indexes of fruit of ‘Furongli’

地区	单果重/g	可溶性固形物/%	可滴定酸/%	固酸比	硬度/N	L^*	a^*	b^*
连城	49.40 ^{EF}	14.09 ^{2A}	1.20 ^{2A}	11.73 ^{EF}	9.47 ^{2AB}	49.62 ^{2AB}	7.30 ^{2DE}	4.55 ^{2D}
尤溪	36.80 ^{2G}	13.79 ^{2AB}	0.83 ^{2CD}	16.63 ^{2CD}	10.42 ^{2A}	54.35 ^{2A}	4.89 ^{2E}	12.76 ^{2AB}
龙岩	59.50 ^{2E}	12.89 ^{2CD}	0.87 ^{2C}	14.87 ^{2E}	8.24 ^{2CD}	35.84 ^{2F}	13.69 ^{2AB}	15.42 ^{2A}
武平	62.50 ^{2E}	12.51 ^{2CD}	0.67 ^{2EF}	18.80 ^{2AB}	7.70 ^{2ED}	41.20 ^{2DEF}	13.04 ^{2ABC}	13.20 ^{2AB}
永安	81.20 ^{2B}	12.68 ^{2CD}	0.81 ^{2C}	15.67 ^{2DE}	7.58 ^{2ED}	42.31 ^{2DE}	10.10 ^{2BCD}	12.36 ^{2ABC}
永泰	66.50 ^{2D}	13.60 ^{2AB}	1.10 ^{2B}	12.35 ^{2F}	7.25 ^{2DE}	36.66 ^{2EF}	12.32 ^{2ABC}	11.40 ^{2ABC}
福安	61.45 ^{2E}	13.60 ^{2AB}	0.75 ^{2D}	18.19 ^{2AB}	7.03 ^{2E}	52.36 ^{2AB}	5.85 ^{2DE}	7.36 ^{2CD}
屏南	99.50 ^{2A}	13.13 ^{2BC}	1.06 ^{2B}	12.35 ^{2F}	8.81 ^{2CB}	38.87 ^{2DEF}	14.92 ^{2A}	10.95 ^{2BCD}
将乐	73.00 ^{2C}	12.05 ^{2D}	0.63 ^{2F}	19.06 ^{2A}	7.05 ^{2E}	43.47 ^{2CD}	8.76 ^{2CDE}	11.52 ^{2ABC}
古田	98.00 ^{2A}	12.61 ^{2CD}	0.72 ^{2DE}	17.46 ^{2BC}	5.88 ^{2F}	48.18 ^{2BC}	12.92 ^{2ABC}	8.44 ^{2BCD}
平均值	68.79	13.09	0.86	15.71	7.94	44.29	10.38	10.80
标准差	19.87	0.66	0.19	2.79	1.33	6.53	3.52	3.18
最大值	99.50	14.09	1.20	19.06	10.42	54.35	14.92	15.42
最小值	36.80	12.05	0.63	11.73	5.88	35.84	4.89	4.55
变异系数/%	28.88	5.01	22.52	17.74	16.73	14.74	33.96	29.42
F 值	30.248	14.397	145.293	64.415	18.502	20.957	10.507	6.244
P(差异显著性)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

注:大写字母表示多重比较时,两两间在 0.01 水平上差异极显著;小写字母表示多重比较时,两两间在 0.05 水平上差异显著。

由表 2 可知,果实大量元素中以 K 元素的平均含量最高,其次为 N、P,大量元素平均总量约占矿质元素平均总量的 96.13%。微量元素中以 Mg 元素的平均含量最高,平均含量高达 514.52 mg/kg;其次为 Ca,平均含量为 206.81 mg/kg。各产地‘芙蓉李’中 Zn、Mn、Cu 含量较少,平均低于 10 mg/kg,但也有部分产区例外,尤溪产‘芙蓉李’中 Zn 含量达

10.51 mg/kg,武平产‘芙蓉李’中 Mn 含量达 10.92 mg/kg。其他元素 Fe、B 的平均含量分别为 53.00、27.52 mg/kg。此外,也有部分元素在不同产区的果实中差异较大,如 Fe 元素含量在连城产‘芙蓉李’中高达 361.93 mg/kg,在其他产区的‘芙蓉李’中均小于 50 mg/kg;Ca 元素含量在福安产‘芙蓉李’中仅为 13.44 mg/kg,而其在其他产区的‘芙蓉李’中均高于

100 mg/kg。

不同产地‘芙蓉李’果实中 10 种矿质元素含量的变异程度不同, Fe 元素含量的变异程度最大, 变异系数高达 205.43%, 其次为 Ca 元素含量, 变异系数为 58.59%; Mg 元素含量的变异程度最小, 变异系数为 9.95%。对不同产地 ‘芙蓉李’果实中矿质元素含量进行方差分析, 结果表明产地间 N、P、K、Ca、Fe、Mg、Zn、Mn、Cu、B 等矿质元素的含量均存在极显著差异。

2.2 果实品质指标与矿质元素含量的相关性

以‘芙蓉李’果实中 N (x_1)、P (x_2)、K (x_3)、Ca (x_4)、Fe (x_5)、Mg (x_6)、Zn (x_7)、Mn (x_8)、Cu (x_9)、B (x_{10})等矿质元素的含量为一个典型因子, 果实品质指标单果重(y_1)、可溶性固形物含量(y_2)、可滴定酸含量(y_3)、固酸比(y_4)、硬度(y_5)、色泽

因子 L^* (y_6)、 a^* (y_7)、 b^* (y_8)为另一个典型因子, 进行典型相关分析。结果由表 3 可知, 果实中矿质元素的含量与部分果实品质指标间存在显著的相关性, 但果实的生长发育与品质形成是各种矿质元素协同作用的结果。N 含量与单果重呈显著正相关, 相关系数为 0.742; Mg 含量与单果重呈显著负相关, 相关系数为-0.672。Zn 含量与色泽亮度因子 L^* 呈极显著正相关($r=0.903$)、与色泽红色因子 a^* 呈显著负相关($r=-0.706$), P 含量与色泽亮度因子 L^* 也呈显著正相关($r=0.685$); Ca 含量与色泽黄色因子 b^* 呈显著正相关($r=0.677$)、而 Fe 含量与色泽黄色因子 b^* 呈显著负相关($r=-0.705$); 由此可见, 矿质元素对李果实色泽形成具有较大影响。此外, 可溶性固形物含量、可滴定酸含量、固酸比、果实硬度等均与矿质元素含量不存在显著的相关性, 但果实品质各指标中起主要作用的元素不同。

表 2 ‘芙蓉李’果实矿质元素含量(干重, dw)
Table 2 Mineral element contents in fruit of ‘Furongli’ (dry weight, dw)

地区	N/(g/kg)	P/(g/kg)	K/(g/kg)	Ca/(mg/kg)	Fe/(mg/kg)	Mg/(mg/kg)	Zn/(mg/kg)	Mn/(mg/kg)	Cu/(mg/kg)	B/(mg/kg)
连城	4.54 ^{ef}	1.11 ^{bcdBC}	12.62 ^{cdeBC}	119.13 ^{cC}	361.93 ^{aA}	532.63 ^{bBC}	8.55 ^{bABCD}	6.06 ^{dDC}	3.97 ^{bB}	22.66 ^{cDE}
尤溪	5.19 ^{cdEF}	1.49 ^{aA}	14.63 ^{abAB}	315.01 ^{bcB}	12.68 ^{bB}	630.10 ^{aA}	10.51 ^{aA}	8.69 ^{bBC}	1.17 ^{efD}	34.91 ^{aAB}
龙岩	5.57 ^{cDE}	0.98 ^{cdeBC}	12.54 ^{deC}	301.69 ^{cB}	12.72 ^{bB}	533.28 ^{bB}	5.91 ^{dDE}	4.62 ^{deC}	6.00 ^{aA}	27.16 ^{cCD}
武平	6.43 ^{bCD}	0.94 ^{cC}	8.99 ^{fD}	393.70 ^{aA}	21.54 ^{bB}	529.91 ^{bBCD}	6.21 ^{cdCDE}	10.92 ^{aA}	3.77 ^{bB}	33.05 ^{bBC}
永安	7.62 ^{aAB}	1.20 ^{bcABC}	14.72 ^{abAB}	128.48 ^{cC}	36.38 ^{bB}	482.36 ^{cdDE}	8.08 ^{bBCD}	9.70 ^{abAB}	3.61 ^{bB}	20.35 ^{deF}
永泰	4.76 ^{deEF}	0.91 ^{cC}	12.24 ^{cC}	151.13 ^{deC}	11.91 ^{bB}	488.10 ^{cCDE}	4.89 ^{dE}	4.26 ^{cC}	1.59 ^{ed}	21.37 ^{dEF}
福安	6.39 ^{bBC}	1.22 ^{bAB}	13.99 ^{bcdABC}	13.44 ^{fD}	30.60 ^{bB}	509.12 ^{bBCD}	8.31 ^{bABC}	8.65 ^{bABC}	3.02 ^{cBC}	35.19 ^{aABC}
屏南	7.76 ^{aA}	1.18 ^{bcdAB}	12.57 ^{deC}	146.85 ^{deC}	12.33 ^{bB}	457.45 ^{deE}	5.98 ^{dDE}	5.64 ^{dDC}	2.71 ^{cdC}	27.11 ^{cD}
将乐	5.44 ^{cE}	0.95 ^{deBC}	15.62 ^{aA}	335.82 ^{bAB}	13.69 ^{bB}	451.03 ^{cE}	7.87 ^{bcdCD}	5.67 ^{dDC}	0.98 ^{fD}	35.43 ^{aA}
古田	6.76 ^{bC}	1.04 ^{bdeBC}	14.21 ^{bcABC}	162.81 ^{dC}	16.23 ^{bB}	531.20 ^{bB}	9.48 ^{abAB}	6.90 ^{cCD}	2.17 ^{dC}	18.03 ^{ef}
平均值	6.05	1.10	13.21	206.81	53.00	514.52	7.58	7.11	2.90	27.52
标准差	1.13	0.18	1.87	121.16	108.88	51.21	1.78	2.26	1.53	6.75
最大值	7.76	1.49	15.62	393.70	361.93	630.10	10.51	10.92	6.00	35.43
最小值	4.54	0.91	8.99	13.44	11.91	451.03	4.89	4.26	0.98	18.03
变异系数/%	18.65	15.95	14.18	58.59	205.43	9.95	23.47	31.74	52.70	24.51
F 值	33.533	7.566	20.036	139.677	50.256	40.484	12.288	33.167	94.756	54.342
P(差异显著性)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

注: 大写字母表示多重比较时, 两两间在 0.01 水平上差异极显著; 小写字母表示多重比较时, 两两间在 0.05 水平上差异显著。

表 3 不同产地 ‘芙蓉李’果实品质与矿质元素的相关性
Table 3 Correlation analysis between quality indexes and fruit mineral elementsof ‘Furongli’ from different locations

元素种类	单果重/g	可溶性固形物/%	可滴定酸/%	固酸比	硬度/N	L^*	a^*	b^*
N	0.742 [*]	-0.451	-0.309	0.190	-0.304	-0.156	0.416	0.158
P	-0.304	0.487	0.051	-0.004	0.610	0.685 [*]	-0.617	-0.110
K	0.101	-0.067	-0.203	0.176	-0.085	0.417	-0.496	-0.156
Ca	-0.269	-0.489	-0.433	0.399	0.196	-0.238	0.178	0.677 [*]
Fe	-0.337	0.527	0.587	-0.478	0.383	0.306	-0.329	-0.705 [*]
Mg	-0.672 [*]	0.460	-0.037	0.117	0.529	0.566	-0.443	0.066
Zn	-0.232	0.159	-0.296	0.370	0.189	0.903 ^{**}	-0.706 [*]	-0.377
Mn	-0.151	-0.139	-0.527	0.575	0.027	0.430	-0.303	0.055
Cu	-0.088	0.020	0.159	-0.213	0.091	-0.349	0.328	0.150
B	-0.465	-0.070	-0.465	0.560	0.266	0.293	-0.447	0.224

注: *为相关性在 0.05 水平上显著(双尾); **为相关性在 0.01 水平上显著(双尾)。

2.3 果实品质指标与矿质元素含量的通径分析

简单相关分析仅能表示矿质元素对果实品质指标的综合影响大小,不能反映单一元素对指标的直接作用和间接作用大小,为解决这一问题,依次对果实品质指标(y)与矿质元素 N (x₁)、P (x₂)、K (x₃)、Ca (x₄)、Fe (x₅)、Mg (x₆)、Zn (x₇)、Mn (x₈)、Cu (x₉)、B (x₁₀)进行通径分析,对果实各品质指标进行夏皮罗-威尔克检验(Shapiro-Wilk)以判定其正态性,结果表明所有果实品质指标的显著水平均大于 0.05,均服从正态分布(表 4),可以进行通径分析。

通径系数绝对值可直接用于比较各矿质元素含量对果实品质作用的重要程度,其中直接通径系数反映了该元素直接作用的大小;矿质元素含量除了能直接作用引起果实品质变化外,还可通过与其他元素间的相互作用间接引起果实品质的变化,其作用大小用间接通径系数表示。矿质元素含量对‘芙蓉李’果实品质的作用结果见表 5~12。

由表 5 可知,各矿质元素对单果重的直接影响中,N 元素的直接作用最大(0.946),其次为 Mn 元素(-0.545),且两者偏回归系数的显著性均小于 0.05,说明这 2 个元素与单果重

之间存在显著性差异,两者对单果重的增加均具有重要作用,N 元素为正向作用,Mn 元素为负向作用;其他元素的直接作用较小,大小依次为 P (-0.283)>Mg (-0.230)>B (-0.201)>Cu (-0.196)>K (-0.130)>Zn (0.028)>Fe (0.023)>Ca (0.008)。通过分析各个元素的间接通径系数发现,Mg (-0.701)、Zn (-0.609) 2 种元素通过其他元素对单果重产生较大负值的间接作用,对单果重的改变具有一定影响;其次 B (-0.370)、Fe (-0.366)、Ca (-0.327)等总间接通径系数也较大。综合直接影响和间接影响结果得出总效应值,对单果重影响较大的因子主要为 Mg、N、Zn、B、P 等。

表 6 表明,各矿质元素对可溶性固形物含量的直接贡献大小依次为 Zn (-0.529)>Fe (0.512)>P (0.487)>N (-0.384)>Mn (-0.315)>Ca (-0.275)>K (-0.261)>Mg (0.207)>B (-0.065)>Cu (-0.018),其中 Fe、P、Mg 的影响为正值,其他为负值。通过与其他元素的间接作用对可溶性固形物含量影响较大的为 P,且为负值;除 P 外,其他元素互作的间接作用对可溶性固形物含量的影响均较小,总间接通径系数绝对值均小于 0.3。综合直接影响和间接影响结果,对可溶性固形物影响较大的因子有 Fe、N、Mn 等。

表 4 果实各品质指标的正态性检验
Table 4 Shapiro-Wilk test of the fruit quality indicators

项目	单果重	可溶性固形物	可滴定酸	固酸比	硬度	L^*	a^*	b^*
统计量	0.95	0.96	0.92	0.90	0.96	0.94	0.92	0.95
显著水平	0.71	0.78	0.35	0.22	0.83	0.57	0.40	0.61

表 5 果实矿质元素与单果重的通径分析
Table 5 Path analysis between mineral elements and fruit mass

作用因子	直接通径系数	间接通径系数										总间接通径系数
		通过 x ₁	通过 x ₂	通过 x ₃	通过 x ₄	通过 x ₅	通过 x ₆	通过 x ₇	通过 x ₈	通过 x ₉	通过 x ₁₀	
N (x ₁)	0.946		-0.043	-0.003	-0.002	-0.010	0.086	-0.001	-0.223	-0.024	0.029	-0.190
P (x ₂)	-0.283	0.144		-0.054	-0.002	0.001	-0.128	0.019	-0.210	0.042	-0.050	-0.239
K (x ₃)	-0.130	0.021	-0.119		-0.002	-0.002	0.014	0.017	0.092	0.088	-0.002	0.106
Ca (x ₄)	0.008	-0.204	0.061	0.035		-0.007	-0.062	-0.002	-0.068	0.004	-0.085	-0.327
Fe (x ₅)	0.023	-0.408	-0.009	0.013	-0.002		-0.026	0.006	0.060	-0.052	0.052	-0.366
Mg (x ₆)	-0.230	-0.355	-0.157	0.008	0.002	0.003		0.016	-0.174	-0.006	-0.036	-0.701
Zn (x ₇)	0.028	-0.040	-0.192	-0.078	-0.001	0.005	-0.129		-0.214	0.065	-0.025	-0.609
Mn (x ₈)	-0.545	0.387	-0.109	0.022	0.001	-0.003	-0.073	0.011		-0.004	-0.060	0.172
Cu (x ₉)	-0.196	0.115	0.061	0.059	0.000	0.006	-0.007	-0.009	-0.012		0.040	0.252
B (x ₁₀)	-0.201	-0.134	-0.071	-0.001	0.003	-0.006	-0.041	0.003	-0.162	0.039		-0.370

表 6 果实矿质元素与可溶性固形物含量的通径分析
Table 6 Path analysis between mineral elements and soluble solids content

作用因子	直接通径系数	间接通径系数										总间接通径系数
		通过 x ₁	通过 x ₂	通过 x ₃	通过 x ₄	通过 x ₅	通过 x ₆	通过 x ₇	通过 x ₈	通过 x ₉	通过 x ₁₀	
N (x ₁)	-0.384		0.072	-0.006	0.059	-0.221	-0.078	0.022	-0.129	-0.002	0.009	-0.273
P (x ₂)	0.487	-0.058		-0.109	0.059	0.016	0.115	-0.359	-0.121	0.004	-0.016	-0.470
K (x ₃)	-0.261	-0.008	0.197		0.075	-0.052	-0.012	-0.318	0.053	0.008	-0.001	-0.059
Ca (x ₄)	-0.275	0.083	-0.102	0.071		-0.148	0.056	0.045	-0.039	0.000	-0.027	-0.062
Fe (x ₅)	0.512	0.166	0.015	0.027	0.079		0.023	-0.110	0.035	-0.005	0.017	0.247
Mg (x ₆)	0.207	0.144	0.262	0.015	-0.074	0.058		-0.297	-0.100	-0.001	-0.012	-0.005
Zn (x ₇)	-0.529	0.016	0.319	-0.157	0.023	0.106	0.116		-0.124	0.006	-0.008	0.298
Mn (x ₈)	-0.315	-0.157	0.181	0.044	-0.034	-0.056	0.066	-0.208		0.000	-0.019	-0.184
Cu (x ₉)	-0.018	-0.047	-0.101	0.118	0.006	0.136	0.007	0.175	-0.007		0.013	0.299
B (x ₁₀)	-0.065	0.055	0.118	-0.003	-0.116	-0.132	0.037	-0.066	-0.094	0.004		-0.197

矿质元素与可滴定酸含量的通径分析见表 7, 从中可以看出, 对可滴定酸含量的直接影响因子主要有 Fe (0.587)、Mn (-0.468)、Zn (-0.437)、B (-0.336), 其中 Fe 的直接通径系数为正值, 其他为负值。各矿质元素对可滴定酸含量的总间接通径系数依次为 P (-0.611)、B (-0.469)、Mg (-0.413)、Cu (0.409)、Mn (-0.397)、Ca (-0.314)、N (-0.275)、Zn (-0.202)、Fe (0.165)、K (-0.153), 其中仅 Cu、Fe 的总间接通径系数为正值, 其他均为负值。综合直接影响和间接影响结果, 对可滴定酸影响较大的因子有 Mn、B、Fe、Zn、Ca、P、Mg 等。

从表 8 中可以看出, 对固酸比直接影响较大的矿质元素为 Mn (0.575)、B (0.427)、Ca (0.332)等, 且均为正值; 还

有 Fe (-0.420)等。通过与其他元素的间接作用对固酸比影响较大的元素依次为 P (0.477)、B (0.417)、Ca (0.337)、Cu (-0.326)、Fe (-0.316)等。综合直接影响和间接影响结果, 分析对固酸比影响较大的矿质元素因子为 B、Fe、Ca、Mn、Cu。

果实矿质元素与果实硬度的通径分析见表 9, 直接影响 ‘芙蓉李’ 果实硬度的矿质元素因子主要为 P (0.610)、Zn (-0.418)、K (-0.414)、N (-0.406)、Fe (0.364)、Ca (0.344)等。间接通径系数表明, 对果实硬度间接影响最大的因子为 P (-0.543), 其次为 Mg (0.368)、N (-0.321)、K、Ca、Fe、Zn、Mn、Cu、B 等的间接影响较小。由此分析对果实硬度影响较大的矿质元素因子有 N、Mg、K、Fe 等。

表 7 果实矿质元素与可滴定酸含量的通径分析
Table 7 Path analysis between mineral elements and titratable acid

作用因子	直接通径系数	间接通径系数										总间接通径系数
		通过 x_1	通过 x_2	通过 x_3	通过 x_4	通过 x_5	通过 x_6	通过 x_7	通过 x_8	通过 x_9	通过 x_{10}	
N (x_1)	-0.069		0.005	-0.003	0.062	-0.253	0.039	0.019	-0.191	0.000	0.048	-0.275
P (x_2)	0.033	-0.011		-0.061	0.062	0.019	-0.058	-0.297	-0.180	-0.001	-0.084	-0.611
K (x_3)	-0.145	-0.002	0.014		0.078	-0.060	0.006	-0.263	0.079	-0.002	-0.004	-0.153
Ca (x_4)	-0.287	0.015	-0.007	0.039		-0.169	-0.028	0.037	-0.059	0.000	-0.142	-0.314
Fe (x_5)	0.587	0.030	0.001	0.015	0.083		-0.012	-0.091	0.052	0.001	0.087	0.165
Mg (x_6)	-0.105	0.026	0.018	0.009	-0.078	0.066		-0.245	-0.149	0.000	-0.060	-0.413
Zn (x_7)	-0.437	0.003	0.022	-0.087	0.024	0.122	-0.059		-0.184	-0.001	-0.042	-0.202
Mn (x_8)	-0.468	-0.028	0.013	0.024	-0.036	-0.065	-0.033	-0.172		0.000	-0.100	-0.397
Cu (x_9)	0.004	-0.008	-0.007	0.065	0.006	0.156	-0.003	0.144	-0.010		0.067	0.409
B (x_{10})	-0.336	0.010	0.008	-0.002	-0.121	-0.151	-0.019	-0.054	-0.139	-0.001		-0.469

表 8 果实矿质元素与固酸比的通径分析
Table 8 Path analysis between mineral elements and SS/TA

作用因子	直接通径系数	间接通径系数										总间接通径系数
		通过 x_1	通过 x_2	通过 x_3	通过 x_4	通过 x_5	通过 x_6	通过 x_7	通过 x_8	通过 x_9	通过 x_{10}	
N (x_1)	-0.054		-0.040	0.006	-0.071	0.181	0.027	-0.007	0.235	-0.028	-0.061	0.243
P (x_2)	-0.265	-0.008		0.118	-0.072	-0.013	-0.041	0.116	0.221	0.048	0.107	0.477
K (x_3)	0.281	-0.001	-0.111		-0.090	0.043	0.004	0.103	-0.097	0.102	0.005	-0.043
Ca (x_4)	0.332	0.012	0.057	-0.076		0.121	-0.020	-0.014	0.072	0.005	0.180	0.337
Fe (x_5)	-0.420	0.023	-0.008	-0.029	-0.096		-0.008	0.035	-0.063	-0.060	-0.110	-0.316
Mg (x_6)	-0.073	0.020	-0.147	-0.017	0.090	-0.047		0.096	0.183	-0.007	0.077	0.247
Zn (x_7)	0.171	0.002	-0.180	0.169	-0.028	-0.087	-0.041		0.226	0.075	0.053	0.189
Mn (x_8)	0.575	-0.022	-0.102	-0.047	0.042	0.046	-0.023	0.067		-0.005	0.127	0.082
Cu (x_9)	-0.226	-0.007	0.057	-0.127	-0.007	-0.112	-0.002	-0.056	0.013		-0.086	-0.326
B (x_{10})	0.427	0.008	-0.067	0.003	0.140	0.108	-0.013	0.021	0.171	0.045		0.417

表 9 果实矿质元素与硬度的通径分析
Table 9 Path analysis between mineral elements and fruit firmness

作用因子	直接通径系数	间接通径系数										总间接通径系数
		通过 x_1	通过 x_2	通过 x_3	通过 x_4	通过 x_5	通过 x_6	通过 x_7	通过 x_8	通过 x_9	通过 x_{10}	
N (x_1)	-0.406		0.093	-0.009	-0.074	-0.157	-0.103	0.018	-0.100	0.028	-0.017	-0.321
P (x_2)	0.610	-0.062		-0.174	-0.074	0.012	0.152	-0.284	-0.094	-0.050	0.030	-0.543
K (x_3)	-0.414	-0.009	0.256		-0.094	-0.037	-0.016	-0.251	0.041	-0.105	0.001	-0.214
Ca (x_4)	0.344	0.087	-0.132	0.113		-0.105	0.074	0.035	-0.031	-0.005	0.051	0.088
Fe (x_5)	0.364	0.175	0.019	0.042	-0.099		0.031	-0.087	0.027	0.062	-0.031	0.139
Mg (x_6)	0.274	0.152	0.339	0.024	0.093	0.041		-0.234	-0.078	0.007	0.022	0.368
Zn (x_7)	-0.418	0.017	0.414	-0.249	-0.029	0.076	0.154		-0.096	-0.077	0.015	0.226
Mn (x_8)	-0.244	-0.166	0.235	0.070	0.043	-0.040	0.087	-0.164		0.005	0.036	0.106
Cu (x_9)	0.232	-0.049	-0.131	0.187	-0.007	0.097	0.009	0.138	-0.005		-0.024	0.213
B (x_{10})	0.121	0.058	0.153	-0.004	0.145	-0.094	0.049	-0.052	-0.073	-0.046		0.136

由表 10 可知, 各矿质元素对色泽因子 L^* 的直接影响中, Zn 的直接作用最大(0.903), 作用值为正, 其对色泽因子 L^* 的增加具有重要作用; 其他元素对色泽因子 L^* 的直接作用均较小, 作用值小于 0.2。各矿质元素与其他元素相互作用对色泽因子 L^* 的总间接途径系数绝对值大小依次为 P (0.693)>Mg (0.666)>K (0.635)>Mn (0.438)>Cu (-0.249)>Fe (0.247)>Zn (0.143)>B (0.113)>N (-0.070)>Ca (0.052), 间接影响较大的 P、Mg、K、Mn 均为正值。从以上分析中看出, 对色泽因子 L^* 影响较大的因子主要为 Zn、P、Mg、Mn 等。

由表 11 可知, 各矿质元素对色泽因子 a^* 的直接影响中, Zn 的直接作用最大(-0.706), 但作用值为负, 其对红色色泽的增加具有反作用; 其他元素的直接作用较大的为 N (0.387)、B (-0.364)。各矿质元素对色泽因子 a^* 的总间接途径系数绝对值大小依次为 Mg (-0.737)>P (-0.663)>K (-0.578)>Zn (-0.437)>Cu (0.403)>Mn (-0.290)>Fe (-0.227)>B

(-0.151)>N (0.123)>Ca (-0.061), 间接影响较大的 Mg、P、K 均为负值, Cu 为正值。各矿质元素对色泽因子 a^* 的作用大小和规律与色泽因子 L^* 有较大的相似之处, 但作用方向相反。综合分析, 对色泽因子 a^* 影响较大的因子主要为 Zn、P、Mg、K 等。

各矿质元素对色泽因子 b^* 的通路分析见表 12, 由结果可知, 直接影响中 Fe (-0.556)、Ca (0.517) 的作用最大, 但 Fe 的作用值为负, Ca 的作用值为正, 其对黄色色泽的增加具有相反的作用; 直接作用较大的为 Cu (0.333)、Zn (-0.229); 其他元素的直接作用均较小。各矿质元素对色泽因子 b^* 的总间接途径系数绝对值大小依次为 P (-0.462)>Zn (-0.363)>K (-0.351)>B (0.241)>N (0.180)>Ca (0.096)>Mg (-0.094)>Fe (-0.067)>Mn (0.028)>Cu (-0.013), 间接影响较大的 P、Zn、K 均为负值。综合分析可见, 对色泽因子 b^* 影响较大的因子主要为 Fe、Ca、Zn 等。

表 10 果实矿质元素与亮度 L^* 的通路分析
Table 10 Path analysis between mineral elements and L^*

作用因子	直接途径系数	间接途径系数										总间接途径系数
		通过 x_1	通过 x_2	通过 x_3	通过 x_4	通过 x_5	通过 x_6	通过 x_7	通过 x_8	通过 x_9	通过 x_{10}	
N (x_1)	-0.118		0.020	-0.004	0.035	-0.054	-0.033	-0.038	0.036	-0.007	-0.026	-0.070
P (x_2)	0.134	-0.018		-0.082	0.035	0.004	0.048	0.613	0.034	0.012	0.046	0.693
K (x_3)	-0.196	-0.003	0.056		0.044	-0.013	-0.005	0.542	-0.015	0.026	0.002	0.635
Ca (x_4)	-0.163	0.025	-0.029	0.053		-0.036	0.024	-0.076	0.011	0.001	0.078	0.052
Fe (x_5)	0.124	0.051	0.004	0.020	0.047		0.010	0.187	-0.010	-0.015	-0.047	0.247
Mg (x_6)	0.087	0.044	0.075	0.012	-0.044	0.014		0.506	0.028	-0.002	0.033	0.666
Zn (x_7)	0.903	0.005	0.091	-0.118	0.014	0.026	0.049		0.035	0.019	0.023	0.143
Mn (x_8)	0.089	-0.048	0.052	0.033	-0.020	-0.014	0.028	0.354		-0.001	0.055	0.438
Cu (x_9)	-0.057	-0.014	-0.029	0.088	0.003	0.033	0.003	-0.298	0.002		-0.037	-0.249
B (x_{10})	0.184	0.017	0.034	-0.002	-0.069	-0.032	0.016	0.112	0.026	0.011		0.113

表 11 果实矿质元素与红色因子 a^* 的通路分析
Table 11 Path analysis between mineral elements and a^*

作用因子	直接途径系数	间接途径系数										总间接途径系数
		通过 x_1	通过 x_2	通过 x_3	通过 x_4	通过 x_5	通过 x_6	通过 x_7	通过 x_8	通过 x_9	通过 x_{10}	
N (x_1)	0.387		-0.039	-0.002	-0.026	0.082	0.026	0.030	-0.012	0.013	0.052	0.123
P (x_2)	-0.255	0.059		-0.047	-0.026	-0.006	-0.038	-0.480	-0.012	-0.023	-0.091	-0.663
K (x_3)	-0.113	0.009	-0.107		-0.032	0.019	0.004	-0.424	0.005	-0.048	-0.004	-0.578
Ca (x_4)	0.119	-0.083	0.055	0.031		0.055	-0.018	0.059	-0.004	-0.002	-0.154	-0.061
Fe (x_5)	-0.190	-0.167	-0.008	0.012	-0.034		-0.008	-0.146	0.003	0.028	0.094	-0.227
Mg (x_6)	-0.068	-0.145	-0.142	0.007	0.032	-0.021		-0.396	-0.010	0.003	-0.065	-0.737
Zn (x_7)	-0.706	-0.016	-0.173	-0.068	-0.010	-0.039	-0.038		-0.012	-0.035	-0.045	-0.437
Mn (x_8)	-0.030	0.158	-0.098	0.019	0.015	0.021	-0.022	-0.277		0.002	-0.108	-0.290
Cu (x_9)	0.106	0.047	0.055	0.051	-0.002	-0.050	-0.002	0.233	-0.001		0.073	0.403
B (x_{10})	-0.364	-0.055	-0.064	-0.001	0.050	0.049	-0.012	-0.088	-0.009	-0.021		-0.151

表 12 果实矿质元素与黄色因子 b^* 的通路分析
Table 12 Path analysis between mineral elements and b^*

作用因子	直接途径系数	间接途径系数										总间接途径系数
		通过 x_1	通过 x_2	通过 x_3	通过 x_4	通过 x_5	通过 x_6	通过 x_7	通过 x_8	通过 x_9	通过 x_{10}	
N (x_1)	0.043		0.003	-0.002	-0.111	0.240	0.005	0.010	-0.029	0.041	0.024	0.180
P (x_2)	0.020	0.007		-0.034	-0.112	-0.018	-0.007	-0.156	-0.028	-0.071	-0.043	-0.462
K (x_3)	-0.081	0.001	0.008		-0.141	0.057	0.001	-0.138	0.012	-0.150	-0.002	-0.351
Ca (x_4)	0.517	-0.009	-0.004	0.022		0.160	-0.004	0.019	-0.009	-0.007	-0.072	0.096
Fe (x_5)	-0.556	-0.019	0.001	0.008	-0.149		-0.001	-0.048	0.008	0.088	0.044	-0.067

表 12(续)

作用因子	直接通径系数	间接通径系数										总间接通径系数
		通过 x_1	通过 x_2	通过 x_3	通过 x_4	通过 x_5	通过 x_6	通过 x_7	通过 x_8	通过 x_9	通过 x_{10}	
Mg (x_6)	-0.013	-0.016	0.011	0.005	0.140	-0.062		-0.128	-0.023	0.011	-0.031	-0.094
Zn (x_7)	-0.229	-0.002	0.014	-0.049	-0.044	-0.115	-0.007		-0.028	-0.110	-0.021	-0.363
Mn (x_8)	-0.072	0.018	0.008	0.014	0.065	0.061	-0.004	-0.090		0.007	-0.051	0.028
Cu (x_9)	0.333	0.005	-0.004	0.037	-0.011	-0.148	0.000	0.076	-0.002		0.034	-0.013
B (x_{10})	-0.171	-0.006	0.005	-0.001	0.218	0.143	-0.002	-0.028	-0.021	-0.067		0.241

3 结论与讨论

‘芙蓉李’是福建省重要的落叶果树主栽品种,在农村经济发展中起着重要作用,是部分县市的农业支柱产业。近年来随着鲜食李的发展,果园精准化施肥技术越来越受到重视,有学者认为,应用果实矿质元素分析可准确预测果实品质^[19],因此从果实品质出发,研究科学、精准的施肥技术,对实现节约生产成本和保持果业健康发展具有重大意义。已有学者对水果果实品质与矿质元素的相关性进行了探讨,研究结果差异较大。卯新蕊等^[20]研究了不同地区、不同桃品种果实中主要矿质元素含量与品质指标的关系,发现钾(K)显著影响桃果实的品质,并与桃果实中的有机酸显著正相关;位杰等^[21]在对库尔勒香梨果实矿质元素与品质的关系研究中指出,Ca对FM、FF和SSC具有最大的正直接作用,N对可溶性糖、TAC和维生素C具有最大的正直接作用,P对SS/TA具有最大的正直接作用;Cu对FF、SSC具有最大的负直接作用,Fe对TAC和VC具有最大的负直接作用,Zn对可溶性糖具有最大的负直接作用,N对FF和SS/TA具有最大的负直接作用。宋少华等^[10]对‘阳丰’甜柿果实矿质元素与品质指标的研究指出,N、P、K、Zn和Mn是影响果实品质最主要的矿质元素。张强等^[22]研究了‘富士’苹果品质与果实矿质元素的关系,指出果实N含量与果实SSC、SS/TA和着色面积呈极显著的负相关,且氮和铁对果实综合品质性状影响较大。周先艳等^[23]考察了云南冰糖橙果皮和果肉矿质元素含量与果实品质的关系,认为影响果实FM的主要为Mn,SSC主要与N、K、Ca和Mg含量关系密切,TAC含量与N、K、P、Zn等密切相关。HUANG等^[24]在研究枇杷品质与矿质元素的关系中指出,果实中N、P、K、Mg含量对枇杷SSC、TAC和SSC/TAC的贡献相对较大。此外,也有研究指出苹果果实中N、K、Fe和Cu与果肉硬度呈显著负相关,Cu与SSC呈显著负相关^[25];N和P与果实硬度、可溶性固形物呈负相关等。此外,还有很多学者对果实品质与矿质元素的关系进行了探讨,不同树种均有不同的结论^[26-28]。本研究结果与其他学者的研究结果也有差异,可能与品种之间的品质效应不同有关。

也有学者对矿质元素对果实品质的影响机理进行了研究,如N、P、Ca和B对苹果品质和生理病害影响较大,K可提高苹果的大小、酸含量和色泽,但降低硬度;Zn、B、Mg等可协调作物的生理机能,有利于光合产物的合成与运输,对单果重、产量等有利;Mn、Zn含量过高会使果实

肉质疏松,硬度降低;Ca有利于维持细胞壁的刚性和完整性,提高硬度和耐贮性;Zn与碳水化合物有密切关系,参与叶绿素的合成、促进光合作用,施用Zn肥可使总糖等含量增加;Mg在植物碳、氮代谢中起着重要作用^[19,29]。可见,果实品质形成均受多种矿质元素的共同影响,矿质元素在品质形成过程中发挥着重要作用。

已有研究指出,矿质营养与果实品质之间的关系,除与光、温、水、气、土等环境生态因子相关外,还与果树种类、砧木类型、品种差异、土壤质地、土肥水条件和栽培管理技术等因素密切相关^[21,25],本研究表明,不同生态条件下的‘芙蓉李’品质也存在明显差异;各矿质营养对品质指标的影响亦存在一定差异,对不同品质指标直接贡献的元素和作用大小各不相同。典型相关分析结果表明,N含量与‘芙蓉李’单果重呈显著正相关;Mg含量与单果重呈显著负相关;Zn含量与色泽亮度因子 L^* 呈极显著正相关、与色泽红色因子 a^* 呈显著负相关,P含量与色泽亮度因子 L^* 也呈显著正相关;Ca含量与色泽黄色因子 b^* 呈显著正相关、而Fe含量与色泽黄色因子 b^* 呈显著负相关。通径分析中对‘芙蓉李’单果重直接影响直接贡献大小依次为N>Mn>P>Mg>B;对可溶性固形物的直接影响顺序为Zn>Fe>P>N>Mn;对可滴定酸的直接影响顺序为Fe>Mn>Zn>B;对固酸比的直接影响顺序为Mn>B>Fe>Ca;对果实硬度的影响顺序为P>Zn>K>N>Fe;对色泽因子 L^* 的直接影响顺序为Zn>K>B>Ca>P;对色泽因子 a^* 的直接影响顺序为Zn>N>B>P>Fe;对色泽因子 b^* 的直接影响顺序为Fe>Ca>Cu>Zn>B。通径分析中综合矿质元素对品质指标的直接作用及与其他元素对品质指标的间接作用,影响单果重的矿质元素主要为Mg、N、Zn,影响可溶性固形物的矿质元素主要为Fe、N、Mn,影响可滴定酸的矿质元素主要为Mn、B、Fe,影响固酸比的矿质元素主要为B、Fe、Ca,影响果实硬度的矿质元素主要为N、Mg、K,影响色泽因子 L^* 的矿质元素主要为Zn、P、Mg,影响色泽因子 a^* 的矿质元素主要为Zn、P、Mg,影响色泽因子 b^* 的矿质元素主要为Fe、Ca、Zn。由此可见,直接影响大的矿质元素在考虑与其他元素对品质指标的相互作用后,并不一定产生较大的总效应值,‘芙蓉李’果实品质的形成受到各种矿质元素的协同调控。通径分析的结果与典型相关分析结果一致且更全面。此外,从分析结果可知,元素对品质指标的影响有正向和负向,生产实践中应在注意土壤中矿质元素的含量和比例的基础上,合理调控各种矿质元素的施肥配比,从而实现李果的优质高效栽培。

参考文献

- [1] YAMANE T, HAYAMA H, MITANI N, *et al.* Contribution of several fruit quality factors and mineral elements to water-soaked brown flesh disorder in peaches [J]. *Sci Hort*, 2020, 272: 109523.
- [2] CHATER JM, GARNER LC. Foliar nutrient applications to 'Wonderful' pomegranate (*Punica granatum* L.). I. Effects on fruit mineral nutrient concentrations and internal quality [J]. *Sci Hort*, 2019, 244: 421–427.
- [3] KARAGIANNIS E, MICHAILIDIS M, SKODRA C, *et al.* Silicon influenced ripening metabolism and improved fruit quality traits in apples [J]. *Plant Physiol Bioch*, 2021, 166: 270–277.
- [4] TEKAYA M, MECHRI B, CHEHEB H, *et al.* Changes in the profiles of mineral elements, phenols, tocopherols and soluble carbohydrates of olive fruit following foliar nutrient fertilization [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 59(2, Part 1): 1047–1053.
- [5] DENG B, SHI H, LIU H, *et al.* Soaking with an essential mineral (Fe, Zn, Cu, Mn and Se) mixture delays senescence and improves nutrient accumulation in postharvest fruit of *Ziziphus jujuba* [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2020, 166: 111186.
- [6] ROUPHAEL Y, COLLA G, GIORDANO M, *et al.* Foliar applications of a legume-derived protein hydrolysate elicit dose-dependent increases of growth, leaf mineral composition, yield and fruit quality in two greenhouse tomato cultivars [J]. *Sci Hort*, 2017, 226: 353–360.
- [7] SANTONI F, PAOLINI J, BARBONI T, *et al.* Relationships between the leaf and fruit mineral compositions of *Actinidia deliciosa* var. Hayward according to nitrogen and potassium fertilization [J]. *Food Chem*, 2014, 147: 269–271.
- [8] 陈艳秋, 曲柏宏, 牛广才, 等. 苹果果实矿质元素含量及其品质效应的研究[J]. *东北农业科学*, 2000, 25(6): 44–48.
- [9] CHEN YQ, QU BH, NIU GC, *et al.* Study on seasonal variation of mineral elements content in Pingguoli pear fruits [J]. *J Jilin Agric Sci*, 2000, 25(6): 44–48.
- [10] 张红艳, 丽娟, 宋文化, 等. 稀归地区 6 个夏橙品种果实主要矿质元素含量和糖酸等营养品质的比较[J]. *华中农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(4): 522–526.
- [11] ZHANG HY, YUAN LJ, SONG WH, *et al.* Analysis of main mineral elements, nutrition contents in the fruit of 6 different valencia orange cultivars [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] [J]. *J Huazhong Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, 27(4): 522–526.
- [12] 宋少华, 刘勤, 李曼, 等. 甜柿果实矿质元素与品质指标的相关性及通径分析[J]. *果树学报*, 2016, 33(2): 202–209.
- [13] SONG SH, LIU Q, LI M, *et al.* Correlation and path analysis between mineral elements and quality parameters in non-astringent persimmon [J]. *J Fruit Sci*, 2016, 33(2): 202–209.
- [14] 赵树堂. 李果实发育过程中糖、酸、VC 及矿质元素含量变化[D]. 保定: 河北农业大学, 2003.
- [15] ZHAO ST. Changes of sugar, acid, VC and mineral elements content during plum fruit development [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2003.
- [16] 潘芝梅, 徐金钢, 卢刚, 等. 李果实发育期矿质元素和果皮花青素含量的变化规律及相关性分析[J]. *浙江林业科技*, 2009, 29(4): 21–24.
- [17] PAN ZM, XU JG, LU G, *et al.* Variation and relative analysis on mineral element and anthocyanidin content during fruit growth [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2009, 29(4): 21–24.
- [18] 刘新社. 不同施肥组合对美国杏李生长发育及产量和品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(33): 14657–14658.
- [19] LIU XS. Effects of different fertilizer combinations on growth, development, yield and character of American apricot [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2008, 36(33): 14657–14658.
- [20] 王炳华, 陈丽楠, 刘秀春. 优化配方施肥对桃、李、杏产量和品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(8): 152–154.
- [21] WANG BH, CHEN LN, LIU XC. Effect of optimized fertilization on yield and quality of peach, plum and apricot [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2014, 42(8): 152–154.
- [22] HENDRICKS D, HOFFMAN E, LÖTZE E. Improving fruit quality and tree health of *Prunus persica* cv. 'Sandvliet' through combined mineral and salicylic acid foliar applications [J]. *Sci Hort*, 2015, 187: 65–71.
- [23] 欧毅, 王进, 谢永红, 等. 生长调节剂对青脆李光合效应与生长结果的影响[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(4): 659–662.
- [24] OU Y, WANG J, XIE YH, *et al.* The effects of growth regulators on photosynthesis and tree's growth and fruiting of plum [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2006, 19(4): 659–662.
- [25] OZTURK B, KUCUKER E, KARAMAN S, *et al.* Effect of aminoethoxyvinylglycine and methyl jasmonate on individual phenolics and post-harvest fruit quality of three different Japanese plums (*Prunus alicina* Lindell) [J]. *Int J Food Eng*, 2013, 9(4): 421–432.
- [26] 张小雪, 巫伟峰, 傅振星, 等. '芙蓉李' 焦叶症与矿质元素含量的关联性[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2020, 49(6): 759–765.
- [27] ZHANG XX, WU WF, FU ZX, *et al.* Correlation analysis between leaf scorch and mineral element contents in plum fruit cv. 'Furongli' [J]. *J Fujian Agric For Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 49(6): 759–765.
- [28] 朴哲虎, 石岩, 程金良, 等. 苹果果实矿质元素含量与品质的相关性分析[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(20): 159–161.
- [29] PU ZH, SHI Y, CHENG JL, *et al.* Analysis of the correlation between the content of mineral elements and the quality of apple pear fruit [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2018, 46(20): 159–161.
- [30] 卯新蕊, 李吴聪, 申志慧, 等. 桃果实矿质元素与糖酸指标的相关性分析[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(1): 164–171.
- [31] MAO XR, LI HC, SHEN ZH, *et al.* Correlation analysis of mineral elements and sugar and acid contents in peach fruit [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2020, 36(1): 164–171.
- [32] 位杰, 蒋媛, 林彩霞, 等. 6 个库尔勒香梨品种果实矿质元素与品质的相关性和通径分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 259–265.
- [33] WEI J, JIANG Y, LIN CX, *et al.* Correlation and path analysis between fruit quality and mineral elements of 6 varieties of koala fragrant pear [J]. *Food Sci*, 2019, 40(4): 259–265.
- [34] 张强, 李兴亮, 李民吉, 等. '富士' 苹果品质与果实矿质元素含量的关联性分析[J]. *果树学报*, 2016, 33(11): 1388–1395.
- [35] ZHANG Q, LI XL, LI MJ, *et al.* Correlation analysis of 'Fuji' apple quality and fruit mineral element content [J]. *J Fruit Sci*, 2016, 33(11): 1388–1395.
- [36] 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.
- [37] ZHOU XY, ZHU CH, LI JX, *et al.* The relationship between fruit mineral nutrients and fruit quality and yield of bingtang sweet orange in Yunnan province [J]. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 44(4): 382–387.
- [38] HUANG X, WANG H, LUO W, *et al.* Prediction of loquat soluble solids and titratable acid content using fruit mineral elements by artificial neural network and multiple linear regression [J]. *Sci Hort*, 2021, 278: 109873.
- [39] 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.
- [40] XU H, CHEN XX, WANG YZ, *et al.* Correlation and path analysis between mineral element and quality indicators of 'Fuji' apple fruits [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, 30(25): 116–121.
- [41] 黄丽萍, 陈双建, 张静. 不同桃品种果实矿质元素含量的因子分析与综合评价[J]. *安徽农业通报*, 2020, 26(21): 42–44.
- [42] HUANG LP, CHEN SJ, ZHANG J. Factor analysis and synthetical evaluation of mineral elements contents in different peach varieties [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2020, 26(21): 42–44.
- [43] 李秀丽, 戴志刚, 陈志伟, 等. 矿质元素对猕猴桃养分效应的研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2020, 16: 5–10, 16.
- [44] LI XL, DAI ZG, CHEN ZW, *et al.* Research progress on nutrient effect of mineral elements on kiwifruit [J]. *Hubei Agric Sci*, 2020, 16: 5–10, 16.
- [45] 魏丽红, 翟秋喜. 软枣猕猴桃叶片矿质元素变化与果实品质的关系[J]. *北方园艺*, 2019, (2): 60–64.
- [46] WEI LH, ZHAI QX. Relationships between leaf mineral elements changes and fruit quality of *Actinidia arguta* [J]. *Northern Hort*, 2019, (2): 60–64.
- [47] 苗玲. 五种矿质元素配比施肥对红富士苹果产量和品质的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009.
- [48] MIAO L. The effect of fertilization of five mineral elements on the yield and quality of Fuji apple [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2009.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



周丹蓉, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为水果品质、功能成分与采后处理研究。
E-mail: zhoudanrong@126.com

叶新福, 博士, 研究员, 主要研究方向为作物遗传育种。
E-mail: yexinfu@126.com