

# 脐橙叶片矿质营养元素含量的分区分布特征

刘桂东, 胡萍, 曾钰, 曾紫君, 管冠, 姚锋先, 周高峰\*

(赣南师范大学生命科学学院, 国家脐橙工程技术研究中心, 江西赣州 341000)

**摘要:** 为揭示矿质营养元素在脐橙叶中分区分布特征, 以枳砧和枳橙砧组荷尔脐橙为对象, 测定新叶和老叶的叶尖、叶缘、中部、叶基和翼叶等 5 个分区中 10 种元素 (N、P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 和 B) 的含量, 并分析各分区离子组成的差异。主成分分析显示, 第一主成分 (PC1) 和第二主成分 (PC2) 分别解释了总变量的 43.4% 和 21.1%, 明确区分了新叶和老叶, 大致区分了叶不同分区, 发现新叶翼叶与其他分区具有明显差异, 而老叶本叶各分区的离散程度明显大于新叶本叶各分区。两种砧木脐橙新叶中钾含量分布表现为翼叶 > 叶基 > 中部 > 叶缘 ≈ 叶尖, 镁含量表现为叶尖 ≈ 叶缘 > 中部 > 叶基 > 翼叶; 两种砧木脐橙老叶中锰含量表现为叶尖 ≈ 叶缘 > 中部 > 叶基 > 翼叶, 硼含量表现为叶尖 > 叶缘 > 中部 > 叶基 > 翼叶。N、P、B 在新叶本叶各分区以及 P、Ca 在老叶本叶各分区间含量都没有显著差异。枳砧脐橙新叶翼叶 Mn、Cu 和 Zn 的含量与叶片其他分区没有显著差异, 而枳橙砧脐橙新叶翼叶 Mn、Cu 和 Zn 的含量都分别显著低于叶片其他分区。结果表明, 不同元素叶片分区分布特征存在明显差异, 翼叶的元素含量和离子组成与叶片其他分区差异明显。

**关键词:** 柑橘; 翼叶; 大量元素; 微量元素; 叶片分区

**中图分类号:** S 666

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2019) 01-0047-10

## Mineral Nutrients Distribution in Leaf Different Parts in Navel Orange Plant

LIU Guidong, HU Ping, ZENG Yu, ZENG Zijun, GUAN Guan, YAO Fengxian, and ZHOU Gaofeng\*

(National Navel Orange Engineering Research Center, College of Life Sciences, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

**Abstract:** To explore the leaf partitioning of essential mineral elements in Newhall navel orange plants grafted on trifoliate orange and citrange, ten elements (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn and B) in leaf tip, leaf margin, leaf middle, leaf base, and winged petiole of the new leaves and old leaves were determined by ICP-MS and Kjeldahl apparatus, and analyzed using multivariate analysis and principal component analysis (PCA). The PCA results showed that the first two principal components could explain 43.4% and 21.1% of the total variables, respectively. The first component separated new leaves from old leaves, the second component generally discriminated the different leaf parts, especially the winged petiole of new leaves from other leaf parts. For the new leaves, in both rootstock, showed a steep gradient in the K concentrations (winged petiole > leaf base > leaf middle > leaf margin ≈ leaf tip) and Mg concentrations (leaf tip ≈ leaf margin > leaf middle > leaf base > winged petiole); and the old

**收稿日期:** 2018-10-19; **修回日期:** 2019-01-02

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (31701871, 31501717); 江西省教育厅项目 (GJJ160957)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: zhougaofoeng428@163.com)

leaves showed a steep gradient in the Mn concentrations (leaf tip  $\approx$  leaf margin > leaf middle > leaf base > winged petiole) and B concentrations (leaf tip > leaf margin > leaf middle > leaf base > winged petiole). There was no significant difference in the contents of N, P and B among the different leaf parts of the new leaf blade and the contents of P and Ca among the different leaf parts of the old leaf blade. The contents of Mn, Cu and Zn in the new leaf petiole wing of Newhall navel orange plants grafted on trifoliolate orange were not significantly different from those of the other new leaf parts, while the contents of Mn, Cu and Zn in the new leaf petiole wing of Newhall navel orange plants grafted on citrange were significantly lower than those of the other new leaf parts. These results suggest that there are obvious differences in the element distribution characteristics of leaf partitioning, and the element concentrations and ion composition in the leaf petiole wing are very different from other leaf parts.

**Keywords:** citrus; leaf petiole wing; macro-element; micro-element; leaf partitioning

矿质元素对柑橘的生长发育、果实产量和品质等都具有重要的影响(刘桂东等, 2010), 合理施肥是柑橘栽培管理措施的重要内容之一。元素的移动性和分配规律是制定施肥措施的参考依据, 而同一种矿质元素在不同作物中的吸收分配具有明显的差异(Marschner, 2012), 因此研究矿质元素在叶片中的分配特征对于脐橙的养分管理具有一定的参考意义。

有研究表明叶片不同部位相对叶绿素含量(SPAD 值)存在明显差异, 牧草同一叶片上 SPAD 值表现出叶尖部 > 叶中部 > 叶基部的特点(陈琴等, 2014), 高粱则表现为叶中部 > 叶尖部 > 叶基部(张一中等, 2017)。同一叶片不同部位光合能力也存在明显差异, 有的植物叶片边缘光合能力明显低于叶片其他部位, 而有的植物从叶柄到叶片基部到叶片中部再到叶片边缘, 光合能力逐渐减弱(贺立红等, 2006)。其他生理指标, 包括可溶性蛋白、抗坏血酸、抗氧化系统保护酶, 以及全氮、全磷和全钾含量在叶片的不同部位也都表现出明显差异(潘泠等, 2010)。赵光伟等(2007)对烟草叶片下、中、上部位中锰、锌、铜含量的变化进行了研究, 发现 3 个部位之间锌含量差异极显著, 锰和铜含量差异不显著。Deljanin 等(2016)将落叶树叶片用不同的浸提剂浸提, 测定了叶片表面、蜡质组分和叶组织中微量元素分配规律, 发现铜、锌、铝等元素有大于 40% 的量存在于叶表面和蜡质组分中。Callahan 等(2016)和 Vogel-Mikuš 等(2008)利用元素分区分布特征研究, 揭示了重金属超积累植物对不同金属元素的储存及运输机制存在明显差异。

矿质元素缺乏或过量往往会在叶片上表现出特定的症状, 比如柑橘缺钾和硼过量都会导致叶尖焦枯(Liu et al., 2011; Marschner, 2012), 而缺镁则在叶基部表现“八”形绿色区域(李健等, 2011)。由此产生一个问题, 特定部位的症状是否与元素在叶片不同部位的分配规律有关? 叶片常作为营养诊断的主要器官, 脐橙的叶有翼叶结构, 翼叶是柑橘类植物分类研究中的一个重要指标(Ballve et al., 1997), 其在养分的吸收分配方面与本叶是否有差异? 基于上述考虑, 本研究中以两种不同砧木组荷尔脐橙为材料, 对新叶和老叶进行分区离子组成测定, 揭示不同矿质元素在脐橙叶中的积累特点, 为脐橙的营养诊断及合理养分管理提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验材料为大田条件下种植的 8 年生组荷尔脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck 'Newhall'), 砧木分

别为枳 [*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.] 和枳橙 [*C. sinensis* (L.) Osb. × *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.]。

## 1.2 试验地概况

试验地位于江西省赣州市潭东镇, 属于典型的亚热带季风气候, 年平均气温 20 °C 左右, 年降雨量约 1 320 mm; 土壤类型为红壤, 0 ~ 20 cm 土壤有机质含量 15.5 g · kg<sup>-1</sup>, 全氮 0.76 g · kg<sup>-1</sup>, 速效磷 22.5 mg · kg<sup>-1</sup>, 速效钾 141 mg · kg<sup>-1</sup>, pH 5.39。

## 1.3 样品采集与处理

随机选取两种砧木组荷尔脐橙长势正常结果树各 15 株 (包括 3 次重复, 每重复 5 株), 于 2016 年 4 月 18 日分别采集当年生春梢营养枝叶片 (定义为新叶) 和越冬老叶。在每株取样树的树冠外围东、南、西、北、中 5 个方位 1.5 ~ 2.0 m 高度, 定株采摘春梢营养枝完整无病虫的第 3 片叶以及越冬老叶, 每株采 20 片叶, 每重复 100 片。

将采集的叶样装入有孔的干净塑料袋, 并放入用铅笔标记的标签, 留出通风透气孔, 放于有冰块的泡沫保温箱中, 2 h 内带回实验室, 用去离子水快速冲洗 3 遍, 待清洗的叶片晾干后, 用干净的剪刀按图 1 所示将同一叶片分为叶尖、叶缘、中部、叶基和翼叶 5 个部分, 称鲜重后放入通风干燥烘箱, 先在 105 °C 下杀酶 30 min, 然后于 75 °C 烘干至恒重, 称干质量。

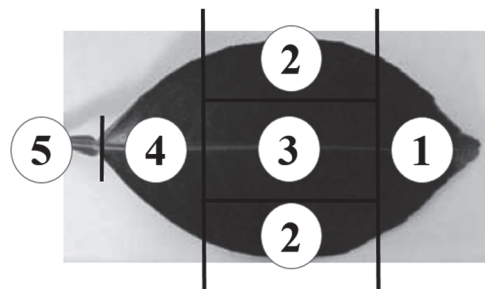


图 1 脐橙叶片分区示意图

1: 叶尖; 2: 叶缘; 3: 中部; 4: 叶基; 5: 翼叶。

Fig. 1 Diagrammatic sketch of leaf partitioning in navel orange plants

1: Leaf tip; 2: Leaf margin; 3: Leaf middle; 4: Leaf base; 5: Petiole wing.

## 1.4 元素含量测定

将烘干样品粉碎, 贮藏于密封袋备用。每份粉碎干样称取 0.30 g 左右, 先在电炉上碳化直至无黑烟, 随后放入马弗炉中 500 °C 灰化 6 h, 用 10 mL 5% HNO<sub>3</sub> 溶解, 用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 7900, USA) 测定 P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、B 等矿质营养元素的含量。N 含量采用硫酸-双氧水消化, 凯氏定氮仪 (K1302, 上海晟声) 测定。

## 1.5 数据处理与统计分析

所有数据均用 SAS9.4 (SAS Institute, Cary, NC, USA) 软件进行统计分析。叶片不同部位元素含量的比较用 One-way ANOVA 过程的 Tukey 进行检验, 显著水平为  $P < 0.05$ 。应用主成分分析程序 (PCA), 基于叶片 10 种元素含量相关矩阵对叶片离子组进行降维分析, 提取前两个主成分进行得分图和载荷图的绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶片不同部位矿质元素的主成分分析

将脐橙新叶和老叶不同部位离子组成数据进行主成分分析，发现叶不同部位离子的组成成分有较明显差异。PCA 结果显示，第一主成分（PC1）和第二主成分（PC2）的累积贡献率为 64.5%，其中 PC1 能够解释总体数据 43.4% 的变异，明确区分了脐橙的新叶和老叶；PC2 解释了总体数据变异的 21.1%，大致区分叶的不同部位，同时发现新叶翼叶与其他部位具有明显差异，而老叶本叶各分区的离散程度明显大于新叶（图 2）。

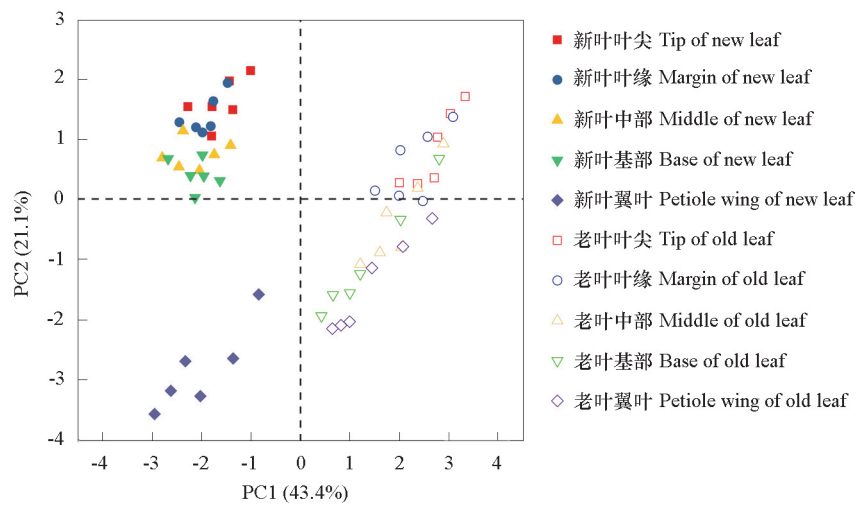


图 2 叶片不同部位 10 种元素主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis (PCA) of 10 elements in different leaf parts

结合主成分载荷图（图 3），10 种元素中，对 PC1 贡献较大的元素是 P、Ca 和 Fe；对 PC2 贡献较大的元素有 K、N 和 Mg。

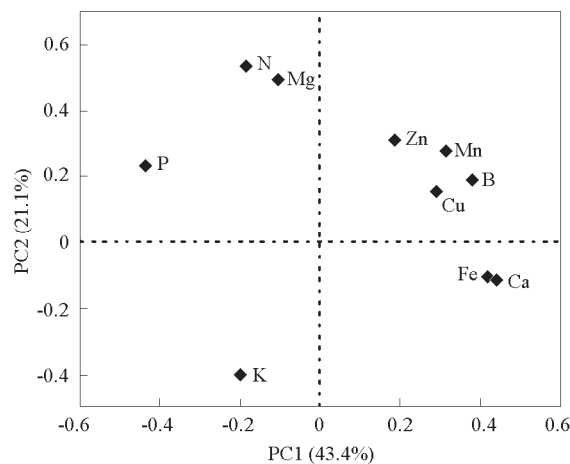


图 3 叶片不同部位 10 种元素主成分分析载荷图

Fig. 3 PCA loading scatter plot of 10 elements in different leaf parts

另外, PC1 将元素分为两类, 一类是正值的 Ca、Fe、Mn、Cu、Zn 和 B, 一类是负值的 N、P、K 和 Mg, 而后一类的这几种元素是公认的在植物中移动性比较强的, 说明第一主成分区分的新叶和老叶一定程度上反映了元素在其中的移动性强弱。

## 2.2 脐橙叶片中大量元素 (N、P、K、Ca、Mg) 的分区分布特征

两种砧木纽荷尔脐橙叶片不同分区大量元素含量见表 1。

氮 (N): 枳砧纽荷尔脐橙新叶本叶各分区氮含量没有显著差异, 但翼叶氮含量显著低于本叶各分区; 而老叶中氮含量表现为叶尖  $\approx$  叶缘  $\approx$  中部  $>$  叶基  $>$  翼叶; 总体来讲, 新叶各分区氮含量高于老叶相应各分区。枳橙砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中氮含量的分区规律与枳砧纽荷尔脐橙一致, 说明氮的分区分布没有受到砧木影响。

磷 (P): 枳砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中磷的分区分布规律一致, 即本叶的叶尖、叶缘、中部和叶基各分区之间磷含量没有显著差异, 但翼叶磷含量显著低于本叶各分区。枳橙砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中磷含量的分区规律与枳砧纽荷尔脐橙一致, 说明磷的分区分布没有受到砧木影响。

表 1 两种砧木纽荷尔脐橙叶片不同分区大量元素含量

元素 Element	叶片分区 Leaf part	纽荷尔脐橙/枳砧 Newhall navel orange grafted on trifoliate orange		纽荷尔脐橙/枳橙砧 Newhall navel orange grafted on citrange	
		新叶 New leaf	老叶 Old leaf	新叶 New leaf	老叶 Old leaf
		N	叶尖 Leaf tip	2.62 ± 0.10 a	2.41 ± 0.05 a
	叶缘 Leaf margin	2.84 ± 0.11 a	2.44 ± 0.05 a	2.62 ± 0.23 a	2.33 ± 0.18 a
	中部 Leaf middle	2.67 ± 0.05 a	2.45 ± 0.09 a	2.80 ± 0.19 a	2.20 ± 0.05 a
	叶基 Leaf base	2.69 ± 0.11 a	2.22 ± 0.06 b	2.87 ± 0.23 a	1.96 ± 0.09 b
	翼叶 Petiole wing	1.84 ± 0.11 b	1.37 ± 0.05 c	1.81 ± 0.05 b	1.33 ± 0.04 c
P	叶尖 Leaf tip	0.268 ± 0.004 a	0.128 ± 0.003 a	0.288 ± 0.005 a	0.132 ± 0.002 a
	叶缘 Leaf margin	0.273 ± 0.001 a	0.127 ± 0.004 a	0.278 ± 0.01 a	0.131 ± 0.003 a
	中部 Leaf middle	0.261 ± 0.007 a	0.122 ± 0.005 a	0.290 ± 0.02 a	0.121 ± 0.002 a
	叶基 Leaf base	0.269 ± 0.008 a	0.122 ± 0.013 a	0.276 ± 0.005 a	0.118 ± 0.009 a
	翼叶 Petiole wing	0.232 ± 0.009 b	0.089 ± 0.007 b	0.247 ± 0.002 b	0.090 ± 0.003 b
K	叶尖 Leaf tip	1.53 ± 0.09 d	1.64 ± 0.09 ab	1.43 ± 0.07 d	1.60 ± 0.09 ab
	叶缘 Leaf margin	1.61 ± 0.10 d	1.57 ± 0.09 ab	1.49 ± 0.10 d	1.53 ± 0.08 ab
	中部 Leaf middle	1.86 ± 0.10 c	1.80 ± 0.11 a	1.73 ± 0.09 c	1.70 ± 0.10 a
	叶基 Leaf base	2.21 ± 0.13 b	1.77 ± 0.08 a	1.99 ± 0.12 b	1.67 ± 0.11 a
	翼叶 Petiole wing	2.94 ± 0.15 a	1.47 ± 0.07 b	2.57 ± 0.14 a	1.38 ± 0.13 b
Ca	叶尖 Leaf tip	0.80 ± 0.03 a	1.87 ± 0.09 b	0.80 ± 0.02 a	2.03 ± 0.08 b
	叶缘 Leaf margin	0.79 ± 0.01 a	1.94 ± 0.11 b	0.74 ± 0.01 b	2.18 ± 0.12 b
	中部 Leaf middle	0.81 ± 0.02 a	2.01 ± 0.10 b	0.76 ± 0.02 ab	2.19 ± 0.10 b
	叶基 Leaf base	0.72 ± 0.02 b	2.04 ± 0.12 b	0.69 ± 0.02 c	2.16 ± 0.09 b
	翼叶 Petiole wing	0.60 ± 0.04 c	2.47 ± 0.13 a	0.54 ± 0.03 d	2.38 ± 0.06 a
Mg	叶尖 Leaf tip	0.541 ± 0.005 a	0.423 ± 0.012 a	0.589 ± 0.044 a	0.454 ± 0.019 a
	叶缘 Leaf margin	0.532 ± 0.012 a	0.417 ± 0.017 a	0.588 ± 0.026 a	0.456 ± 0.024 a
	中部 Leaf middle	0.468 ± 0.024 b	0.321 ± 0.003 b	0.522 ± 0.014 b	0.408 ± 0.018 b
	叶基 Leaf base	0.416 ± 0.024 c	0.331 ± 0.023 b	0.465 ± 0.027 c	0.412 ± 0.007 b
	翼叶 Petiole wing	0.210 ± 0.014 d	0.453 ± 0.038 a	0.228 ± 0.002 d	0.469 ± 0.027 a

注: 同一元素同一列数据后不同字母表示 5%水平上差异显著。

Note: Values followed by different letters in the same column mean significant difference at 5% level.

钾 (K): 枳砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中钾的分布规律不一致, 新叶的翼叶钾含量显著高于其他分区, 总体趋势表现为翼叶 > 叶基 > 中部 > 叶缘  $\approx$  叶尖, 而老叶的翼叶显著低于叶片中部和叶基, 与叶尖和叶缘没有显著差异。枳橙砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中钾含量的分区规律与枳砧纽荷尔脐橙一致, 说明钾的分区分布没有受到砧木影响。

钙 (Ca): 枳砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中钙的分布规律不一致, 新叶的翼叶钙含量显著低于本叶其他分区, 而老叶的翼叶显著高于其他分区, 老叶本叶各分区之间没有显著差异; 新叶各分区钙含量显著低于老叶相应各分区。枳橙砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中钙含量的分区规律与枳砧纽荷尔脐橙基本一致, 仅新叶叶缘稍有差异。

镁 (Mg): 枳砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中镁的分布规律不一致, 新叶中镁含量的分布规律为叶尖  $\approx$  叶缘 > 中部 > 叶基 > 翼叶, 而老叶中为翼叶  $\approx$  叶尖  $\approx$  叶缘 > 中部  $\approx$  叶基。翼叶镁含量表现为新叶显著低于老叶, 而本叶其他分区都表现为新叶显著高于老叶。枳橙砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中镁含量的分区规律与枳砧纽荷尔脐橙一致, 说明镁的分区分布没有受到砧木影响。

### 2.3 脐橙叶片中微量元素 (Fe、Mn、Cu、Zn、B) 的分区分布特征

两种砧木纽荷尔脐橙叶片不同分区微量元素含量见表 2。

铁 (Fe): 砧木对铁在脐橙叶中的分布影响较大。枳砧纽荷尔脐橙新叶中翼叶铁含量是叶各分区中最高的, 而在枳橙砧脐橙新叶中没有表现出相似的规律。另外, 枳橙砧脐橙老叶各部位铁含量都显著高于枳砧脐橙老叶相应部位。两种砧木脐橙老叶中翼叶铁含量都是各部位中含量最低的。两种砧木脐橙老叶各部分铁含量都显著高于新叶相应各部分的铁含量。

锰 (Mn): 枳砧纽荷尔脐橙新叶中翼叶锰含量和叶片其他各分区锰含量没有显著差异, 而枳橙砧脐橙新叶中翼叶锰含量显著低于叶片其他各分区。锰在两种砧木脐橙老叶中含量变化表现出相似的规律, 即叶尖  $\approx$  叶缘 > 中部 > 叶基 > 翼叶。另外, 枳砧脐橙新叶和老叶各部分锰含量都显著高于枳橙砧脐橙相应各部分。

铜 (Cu): 枳砧纽荷尔脐橙新叶中翼叶铜含量和叶片其他各分区铜含量没有显著差异, 而枳橙砧脐橙新叶中翼叶铜含量显著低于叶片其他各分区。铜在两种砧木脐橙老叶各分区中含量分布规律也不一致, 枳砧脐橙老叶叶基部分含量最高, 而枳橙砧脐橙老叶叶尖部分含量最高。

锌 (Zn): 枳砧纽荷尔脐橙新叶和老叶各分区锌含量之间都没有显著差异, 说明锌的分布比较均匀; 而枳橙砧脐橙新叶中翼叶锌含量显著低于叶片其他各分区, 老叶各分区锌含量也有明显差异。

硼 (B): 枳砧纽荷尔脐橙新叶叶尖、叶缘、中部和叶基中硼含量都没有显著差异, 而翼叶中的硼含量是新叶所有分区中含量最低的部分; 老叶中硼含量的趋势表现为叶尖 > 叶缘 > 中部 > 叶基 > 翼叶。枳橙砧纽荷尔脐橙新叶和老叶中硼含量的分区规律与枳砧纽荷尔脐橙中的一致, 即硼的分区分布规律没有受到砧木影响, 但硼含量存在显著差异。

表 2 两种砧木纽荷尔脐橙叶片不同分区微量元素含量

Table 2 Micro-element concentrations in different leaf parts in Newhall navel orange plants grafted on two rootstocks mg · kg<sup>-1</sup>

元素 Element	叶片分区 Leaf part	纽荷尔脐橙/枳砧 Newhall navel orange grafted on trifoliate orange		纽荷尔脐橙/枳橙砧 Newhall navel orange grafted on citrange	
		新叶 New leaf	老叶 Old leaf	新叶 New leaf	老叶 Old leaf
		Fe	叶尖 Leaf tip	43.5 ± 4.9 bc	119.0 ± 0.9 a
	叶缘 Leaf margin	44.9 ± 1.3 b	118.5 ± 4.7 a	39.6 ± 0.3 ab	164.2 ± 7.5 a
	中部 Leaf middle	36.9 ± 0.7 c	120.6 ± 7.2 a	35.3 ± 2.3 b	170.6 ± 9.5 a
	叶基 Leaf base	38.7 ± 0.4 bc	111.1 ± 9.4 a	33.5 ± 0.4 b	128.9 ± 0.6 c
	翼叶 Petiole wing	68.3 ± 2.5 a	76.4 ± 2.1 b	35.3 ± 3.0 b	97.8 ± 2.7 d
Mn	叶尖 Leaf tip	12.8 ± 0.9 a	25.4 ± 1.1 a	9.7 ± 0.8 a	18.7 ± 0.7 a
	叶缘 Leaf margin	12.2 ± 0.5 a	22.6 ± 1.0 ab	8.8 ± 0.4 a	18.0 ± 1.0 a
	中部 Leaf middle	13.7 ± 0.7 a	19.3 ± 2.0 b	9.3 ± 0.5 a	14.3 ± 0.6 b
	叶基 Leaf base	13.7 ± 0.7 a	14.3 ± 1.6 c	8.5 ± 0.5 a	10.3 ± 0.5 c
	翼叶 Petiole wing	12.7 ± 2.5 a	8.1 ± 1.6 d	6.4 ± 0.5 b	5.3 ± 0.1 d
Cu	叶尖 Leaf tip	12.2 ± 0.9 a	14.1 ± 0.9 c	12.5 ± 1.0 a	13.2 ± 0.7 a
	叶缘 Leaf margin	11.3 ± 0.7 a	15.0 ± 0.9 bc	11.7 ± 0.8 ab	11.5 ± 0.8 bc
	中部 Leaf middle	10.7 ± 0.9 a	14.2 ± 1.2 c	10.2 ± 0.7 bc	10.2 ± 0.6 c
	叶基 Leaf base	11.2 ± 0.6 a	19.4 ± 0.7 a	12.9 ± 0.7 a	10.4 ± 0.7 bc
	翼叶 Petiole wing	11.0 ± 1.2 a	18.0 ± 1.8 ab	9.3 ± 0.8 c	11.9 ± 0.3 ab
Zn	叶尖 Leaf tip	25.2 ± 2.8 a	26.3 ± 1.9 a	23.2 ± 2.5 a	21.0 ± 1.4 ab
	叶缘 Leaf margin	24.8 ± 1.8 a	25.8 ± 1.9 a	21.4 ± 1.7 a	21.9 ± 0.6 a
	中部 Leaf middle	22.8 ± 1.7 a	28.1 ± 2.7 a	20.2 ± 1.2 a	21.2 ± 1.5 ab
	叶基 Leaf base	23.3 ± 1.4 a	25.4 ± 4.5 a	22.1 ± 1.7 a	18.0 ± 1.4 b
	翼叶 Petiole wing	25.3 ± 4.4 a	28.4 ± 2.6 a	17.1 ± 1.8 b	19.3 ± 0.9 ab
B	叶尖 Leaf tip	48.5 ± 5.3 a	173.1 ± 5.7 a	42.9 ± 3.4 a	142.6 ± 3.1 a
	叶缘 Leaf margin	42.6 ± 3.6 a	125.6 ± 5.2 b	39.1 ± 0.6 ab	94.9 ± 4.6 b
	中部 Leaf middle	48.8 ± 1.5 a	111.0 ± 5.1 c	38.4 ± 2.6 ab	83.4 ± 1.4 c
	叶基 Leaf base	45.1 ± 1.1 a	61.3 ± 1.0 d	37.2 ± 0.4 ab	53.6 ± 3.8 d
	翼叶 Petiole wing	34.6 ± 2.8 b	50.4 ± 8.0 e	33.6 ± 2.3 b	38.2 ± 0.1 e

注：同一元素同一列数据后不同字母表示 5%水平上差异显著。

Note: Values followed by different letters in the same column mean significant difference at 5% level.

### 3 讨论

#### 3.1 脐橙翼叶与本叶的元素含量差异

翼叶可以看作“变态的叶柄”，是芸香科柑橘属植物普遍具有的一种叶结构，其在柑橘分类研究中具有重要的作用 (Ballve et al., 1997)。本研究中两种砧木脐橙新叶中 N、P、Ca、Mg、B 的含量都表现为翼叶显著低于本叶，K 的含量都表现为翼叶显著高于本叶；而两种砧木脐橙老叶中 N、P、K、Fe、Mn、B 的含量都表现为翼叶显著低于本叶，Ca 和 Mg 的含量都表现为翼叶显著高于本叶。与报道的葡萄果实生长期叶片和叶柄矿质元素含量存在明显差异的结果 (毋永龙 等, 2015) 是一致的。主成分分析结果也显示新叶翼叶与其他部位离子组成及含量具有明显差异。出现这种差异现象的原因之一可能是翼叶和本叶的生物学结构不同 (王涛 等, 2014)。根系吸收的养分通过木质部或韧皮部的长距离运输到达叶片，而翼叶直接与枝条和本叶相连，是本叶通过木质部和韧皮部获得养分的一个过渡结构。从这个角度来说，本叶是矿质元素的功能区，翼叶则是矿质元素的临时储藏库，推测翼叶在调控叶片某些元素含量方面具有重要的作用。在葡萄和一些蔬菜作物中，叶柄常作为营养诊断的器官 (王西娜 等, 2005; 毋永龙 等, 2015)，那么在脐橙中某种元素缺乏后，其在翼叶和

叶片中的含量会如何变化，翼叶能不能作为营养诊断的器官，需要进一步研究。

### 3.2 脐橙叶片元素分区分布的影响因素及生理意义

假设矿质元素仅通过木质部运输，那么它在地上部的分配应该与蒸腾速率和蒸腾持续时间有关 (Marschner, 2012)。有报道，同一植株同一叶龄条件下，蒸腾速率高的光照叶片单位干物质中锰含量高于蒸腾速率低的遮光叶片 (McCain & Markley, 1989)。Mn 在脐橙老叶中的含量表现出叶尖 > 中部 > 叶基的规律，沿叶片主脉蒸腾的方向逐渐增加，与上述报道结果一致，说明锰在脐橙中的分配受到蒸腾作用的影响且属于难移动元素。硼的分布也与地上部器官的蒸腾作用大小有关。地上部器官中蒸腾速率的变化依次是叶片 > 果荚 > 种子，这与硼的分布梯度相符。在某一特定叶片中，硼也会在叶片不同部位产生梯度，其硼含量依次为叶柄 < 叶片中部 < 叶尖 (Oertli & Roth, 1969)。硼含量在两种砧木纽荷尔脐橙老叶中都表现为叶尖 > 叶缘 > 中部 > 叶基 > 翼叶，与蒸腾的方向完全一致，这也解释了叶片硼毒害的症状表现为老叶叶尖首先出现焦枯现象 (Liu et al., 2011)。

钙在地上部的分布与地上部器官的蒸腾速率有明显关系。在同一植株中，低蒸腾速率的果实干物质中钙含量 (< 0.3%) 比叶片中 (3%~5%) 低得多 (Marschner, 2012)。然而，本研究中虽然脐橙老叶钙含量显著高于新叶，但新叶和老叶中的钙分区分布结果表明钙在脐橙叶片中并没有像硼和锰一样表现出随蒸腾拉力的方向而增加的趋势，相反老叶的翼叶是钙含量最高的部位，说明钙在脐橙叶片中的分布除受蒸腾作用的影响外还可能受到内部未知机制的调控 (Fink, 1991; Franceschi & Nakata, 2005)。相对钙而言，蒸腾对钾的作用则可忽略不计。钾在脐橙新叶中含量分布表现为叶尖 < 中部 < 叶基 < 翼叶，与蒸腾拉力的方向正好相反。有报道指出，大麦叶片木质部汁液中钾的含量由叶基部的  $18.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  降低为叶尖部的  $8.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Wolf et al., 1990)。推测这样的分布规律更有利于钾的再利用，因为叶基和翼叶离枝条更近，有利于钾的再利用。镁是叶绿素的中心原子，镁在脐橙新叶和老叶叶片中含量整体都表现为叶尖和叶缘高于中部和叶基，有研究报道叶绿素相对含量叶尖部显著高于叶基部 (陈琴 等, 2014)，因此镁的分布可能与其生理功能密切相关。上述结果说明蒸腾速率对矿质元素在脐橙叶片中的分布与其在韧皮部中的移动性以及元素的营养功能有关。

在新叶中蒸腾作用对矿质元素的分区分布影响较小，因为新叶在形成过程中经历由“库”到“源”的转变，在这个转变过程中，矿质元素一方面经韧皮部转运而来，一方面经木质部通过根压的作用转运而来。矿质元素在植物体内的生理作用主要是生物大分子物质的结构成分和代谢反应中酶的活化剂，新叶本叶中矿质元素的平均分配保证了新叶的快速形成。

### 3.3 砧木对脐橙叶片元素分布特征的影响

柑橘砧木对接穗的矿质营养代谢具有显著的影响 (Sharma et al., 2016; Kumar et al., 2018)。本研究结果表明，枳砧与脐橙砧对纽荷尔脐橙大量元素 (N、P、K、Ca、Mg) 的含量及叶片分区分布特征没有显著影响，而对微量元素 (Fe、Mn、Cu、Zn、B) 的含量及分区分布特征有较大的影响。枳砧脐橙老叶中的硼含量显著高于脐橙砧脐橙，与前期报道的枳砧脐橙比脐橙砧脐橙需硼量高的结果 (Liu et al., 2011) 是一致的。有研究表明枳比脐橙苗更耐缺铁胁迫 (姚宇洁和姜存仓, 2017)。本研究中枳砧脐橙新叶中翼叶铁含量显著高于其他各部位，而脐橙砧脐橙新叶中翼叶铁含量与其他各部位 (除叶尖) 没有显著差异，且脐橙砧脐橙老叶铁含量显著高于枳砧老叶，推测翼叶较高的铁含量是枳砧脐橙更耐缺铁胁迫的一个重要机制。两种砧木脐橙新叶中 Mn、Cu 和 Zn 的分配也有差



异, 枳砧脐橙新叶中翼叶 Mn、Cu 和 Zn 的含量与叶片其他部位没有显著差异, 而枳橙砧脐橙新叶翼叶 Mn、Cu 和 Zn 的含量都分别显著低于叶片其他部位。现已明确, 枳砧与枳橙砧纽荷尔脐橙在耐缺硼、耐缺锌和耐缺铁能力方面存在显著差异 (Liu et al., 2011; 刘桂东 等, 2011; 姚宇洁和姜存仓, 2017)。综合上述微量元素的叶片分区分布特征差异, 推测脐橙叶片中矿质元素的分配模式可能是影响其耐养分胁迫能力的机制之一。

## References

- Ballve R M L, Medina-Filho H P, Bordignon R. 1997. Identification of reciprocal hybrids in citrus by the broadness of the leaf petiole wing. *Genetics & Molecular Biology*, 20 (4): 697 - 702.
- Callahan D L, Hare D J, Bishop D P, Doble P A, Roessner U. 2016. Elemental imaging of leaves from the metal hyperaccumulating plant *Nocca caerulea* shows different spatial distribution of Ni, Zn and Cd. *RSC Advances*, 6: 2337.
- Chen Qin, Chen Li-min, Zheng Qun-ying, Xiao Bing-xue, Zhang Chang-bing, Zhang Hong-xuan, Liu Gang, Yang Man-ye. 2014. SPAD value of different parts in 5 forage grass leaves. *Pratacultural Science*, 31 (7): 1318 - 1322. (in Chinese)
- 陈 琴, 陈莉敏, 郑群英, 肖冰雪, 张昌兵, 张洪轩, 刘 刚, 杨满业. 2014. 5 种牧草叶片上不同部位的 SPAD 值比较. *草业科学*, 31 (7): 1318 - 1322.
- Deljanin I, Antanasijević D, Bjelajac A, Urošević M A, Nikolić M, Perić-Grujić A, Ristić M. 2016. Chemometrics in biomonitoring: distribution and correlation of trace elements in tree leaves. *Science of the Total Environment*, (545 - 546): 361 - 371.
- Fink S. 1991. Comparative microscopical studies on the patterns of calcium oxalate distribution in the needles of various conifer species. *Botanica Acta*, 104: 306 - 315.
- Franceschi V R, Nakata P A. 2005. Calcium oxalate in plants: formation and function. *Annual Review in Plant Biology*, 56: 41 - 71.
- He Li-hong, He Li-jing, Gu Qun, Liang Hong. 2006. Studies on the chlorophyll fluorescence characteristics of different sites of same leaf in ginkgo (*Ginkgo biloba* L.). *Northern Horticulture*, (6): 27 - 29. (in Chinese)
- 贺立红, 贺立静, 顾 群, 梁 红. 2006. 银杏同一叶片不同部位叶绿素荧光特性的研究. *北方园艺*, (6): 27 - 29.
- Kumar S, Awasthi O P, Dubey A K, Pandey R, Sharma V K, Mishra A K, Sharma R M. 2018. Root morphology and the effect of rootstocks on leaf nutrient acquisition of Kinnow mandarin (*Citrus nobilis* Loureiro × *Citrus reticulata* Blanco). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 93 (1): 100 - 106.
- Li Jian, Xie Zhong-chen, Xie Wen-long, Wu Xing-ming, Shi Qing. 2011. Relationship between leaf vein splitting and mineral nutrition of citrus. *Acta Horticulturae Sinica*, 38 (3): 425 - 433. (in Chinese)
- 李 健, 谢钟琛, 谢文龙, 吴兴明, 施 清. 2011. 柑橘叶脉开裂症与矿质营养的关系. *园艺学报*, 38 (3): 425 - 433.
- Liu G D, Jiang C C, Wang Y H. 2011. Distribution of boron and its forms in young "Newhall" navel orange (*Citrus sinensis* Osb.) plants grafted on two rootstocks in response to deficient and excessive boron. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57: 93 - 104.
- Liu Gui-dong, Jiang Cun-cang, Wang Yun-hua, Peng Shu-ang, Lu Jian-wei. 2010. A review on effects of mineral nutrients on citrus. *Chinese Journal of Soil Science*, 41 (6): 1547 - 1552. (in Chinese)
- 刘桂东, 姜存仓, 王运华, 彭抒昂, 鲁剑巍. 2010. 柑橘对不同矿质营养元素效应的研究进展. *土壤通报*, 41 (6): 1547 - 1552.
- Liu Gui-dong, Jiang Cun-cang, Wang Yun-hua, Peng Shu-ang, Zhong Ba-lian, Zeng Qing-luan, Yuan Shui-xiu. 2011. Changes in mineral element contents of 'Newhall' navel orange (*Citrus sinensis* Osb.) grafted on two different rootstocks under boron deficiency. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 17 (1): 180 - 185. (in Chinese)
- 刘桂东, 姜存仓, 王运华, 彭抒昂, 钟八莲, 曾庆鑫, 袁水秀. 2011. 缺硼条件下两种不同砧木 '纽荷尔' 脐橙矿质元素含量变化的比较. *植物营养与肥料学报*, 17 (1): 180 - 185.
- Marschner P. 2012. Mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. Beijing: Science Press: 53 - 57.
- McCain D C, Markley J L. 1989. More manganese accumulates in maple sun leaves than in shade leaves. *Plant Physiology*, 90: 1417 - 1421.
- Oertli J J, Roth J A. 1969. Boron supply of sugar beet, cotton and soybean. *Agronomy Journal*, 61: 191 - 195.
- Pan Ling, Fan Rui-ping, Zhou Qin, Jiang Hai-dong. 2010. Study on physiological and biochemical characteristics at different leaf positions in

- Festuca arundinacea* during the over-wintering period. *Pratacultural Science*, 27 (7): 5 - 9. (in Chinese)
- 潘 冷, 樊瑞萍, 周 琴, 江海东. 2010. 高羊茅越冬期叶片不同部位生理生化特性研究. *草业科学*, 27 (7): 5 - 9.
- Sharma R M, Dubey A K, Awasthi O P, Kaur C. 2016. Growth, yield, fruit quality and leaf nutrient status of grapefruit (*Citrus paradisi* Macf.): Variation from rootstocks. *Scientia Horticulturae*, 210: 41 - 48.
- Vogel-Mikuš K, Simcic J, Pelicon P, Budnar M, Kump P, Necemer M, Mesjasz-Przybylowicz J, Przybylowicz W J, Regvar M. 2008. Comparison of essential and non-essential element distribution in leaves of the Cd/Zn hyperaccumulator *Thlaspi praecox* as revealed by micro-PIXE. *Plant, Cell and Environment*, 31: 1484 - 1496.
- Wang Tao, Liu Shi-yong, Wang Long, Wang Hong-yu, Zhang Li. 2014. Anatomical characteristics of laminae and petioles of 11 species of *Salvia* and their taxonomic significance. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 39 (14): 2629 - 2634. (in Chinese)
- 王 涛, 刘世勇, 王 龙, 王红玉, 张 利. 2014. 11 种鼠尾草属叶片和叶柄解剖特征及其分类学意义. *中国中药杂志*, 39 (14): 2629 - 2634.
- Wang Xi-na, Wang Zhao-hui, Chen Bao-ming, Li Sheng-xiu. 2005. Nitrate accumulation in petiole and blade of different spinach cultivars and its relation to plant growth. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 11 (5): 675 - 681. (in Chinese)
- 王西娜, 王朝辉, 陈宝明, 李生秀. 2005. 不同品种菠菜叶柄和叶片的硝态氮含量及其与植株生长的关系. *植物营养与肥料学报*, 11 (5): 675 - 681.
- Wolf O, Munns R, Tonnet M L, Jeschke W D. 1990. Concentrations and transport of solutes in xylem and phloem along the leaf axis of NaCl-treated *Hordeum vulgare*. *Journal of Experimental Botany*, 41: 1133 - 1141.
- Wu Yong-long, Li Ming-qiang, Li Hai-fei, Li Jing, Xu Guo-feng, Nie Ji-yun, Wang Hai-bo. 2015. Dynamic changes of nutrient in leaves and petioles of Hongdiqu grape during fruit growing period. *China Fruits*, (3): 20 - 23. (in Chinese)
- 毋永龙, 李明强, 李海飞, 李 静, 许国锋, 聂继云, 王海波. 2015. 红地球葡萄果实生长期叶片和叶柄的养分动态变化. *中国果树*, (3): 20 - 23.
- Yao Yu-jie, Jiang Cun-cang. 2017. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of citrus rootstocks under iron deficiency stress. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 23 (5): 1345 - 1351. (in Chinese)
- 姚宇洁, 姜存仓. 2017. 缺铁胁迫柑橘砧木幼苗的光合特性和叶绿体超微结构. *植物营养与肥料学报*, 23 (5): 1345 - 1351.
- Zhang Yi-zhong, Zhou Fu-ping, Zhang Xiao-juan, Fan Xi-qi, Zhao Wen-bo, Liu Qing-shan, Du Wei-jun. 2017. Comparison of SPAD value of different parts in ten *Sorghum* cultivars leaves. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 45 (5): 703 - 706. (in Chinese)
- 张一中, 周福平, 张晓娟, 范昕琦, 赵文博, 柳青山, 杜维俊. 2017. 10 个高粱品系叶片不同部位 SPAD 值的比较分析. *山西农业科学*, 45 (5): 703 - 706.
- Zhao Guang-wei, Yan Xiu-feng, Sun Guang-yu, Liu De-yu. 2007. Variation of manganese, zinc, and copper contents in different leaf position of flue-cured tobacco in Heilongjiang. *Chinese Tobacco Science*, 28 (4): 11 - 13. (in Chinese)
- 赵光伟, 阎秀峰, 孙广玉, 刘德玉. 2007. 黑龙江烤烟不同部位叶片锰锌铜含量的变化. *中国烟草科学*, 28 (4): 11 - 13.