果 树 学 报 2021,38(3):344-351
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20200363

# ‘贡柑’果实成熟期矿质元素的积累与分配特征

胡伟芳,何兆桓,杨苞梅,周昌敏,李国良*

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所•农业农村部南方植物营养与肥料重点实验室•
广东省养分循环利用与耕地保育重点实验室,广州 510640)

**摘 要:【目的】**明确‘贡柑’果实成熟期树干物质和养分分配特征、养分需求参数,为其养分管理策略研究提供基础数据。**【方法】**采用树体挖掘解剖的方法,测定‘贡柑’树不同器官的矿质元素。**【结果】**‘贡柑’单株果实产量为74.97 kg,占全株生物量的60.7%。叶片和果实生物量的质量比为1∶3.61。N、P、K、Ca、Mg、S、Cu和B均表现为叶片含量最高,Fe和Zn为根系含量最高,Mn为叶片和根系含量最高。大部分大量元素主要累积在果实中,而大部分微量元素主要累积在根系中。以生产50 kg果实计,收获果实带走的N、P、K、Ca、Mg、S、Fe、Mn、Cu、Zn、B和Mo养分量分别占全株树体各养分总量的29.6%、40.8%、43.5%、11.1%、34.7%、18.0%、5.5%、3.3%、21.4%、5.8%、17.6%和23.9%。**【结论】**贡柑植株具有较高养分吸收能力和建成果实产量的养分利用率,树体对N、K、Ca、Fe和B养分需求较多。

**关键词:**‘贡柑’;生物量;养分需求;矿质元素

**中图分类号:**S666.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2021)03-0344-08

## Accumulation and distribution characteristics of mineral nutrients at mature stage of *Citrus reticulata* ‘Gonggan’

HU Weifang, HE Zhaohuan, YANG Baomei, ZHOU Changmin, LI Guoliang*

(*Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, Guangdong, China*)

**Abstract:**【Objectives】This work aimed to study the distribution characteristics of dry matters and nutrients at mature stage of ‘Gonggan’ (*Citrus reticulata*) and the parameters of nutrient need, and to provide basic data for nutrient management strategy of ‘Gonggan’. 【Methods】The biological characteristics of three 6-year-old plants were investigated at harvest in the main production areas of Gunagdong province, and then they were excavated. The characteristics of accumulation and distribution of biomass and nutrient were studied by measuring the biomass and nutrients in different plant organs, including nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S), iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu), zinc (Zn), boron (B), and molybdenum (Mo). 【Results】The fresh mass of the whole tree was 123.47 kg with a yield of 74.97 kg per tree, which accounted for 60.7% of the biomass of the whole plant. The biomass ratio of leaf to fruit was 1∶3.61. The biomass of leaves, trunks, roots, and fruit accounted for 8.4%, 34.3%, 26.9%, and 30.4% of the plant, respectively, while the biomass of the pericarp, pulp, and core accounted for 32%, 64%, and 4% of the total biomass of fruit, respectively. N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, and B contents were the highest in the leaves; the highest content of Fe and Zn contents were found in the roots; and the highest contents of Mn were observed in the leaves and roots. In fruit, the highest content of N, P, K, Mg, S, Cu, and Zn were found in the core, and the highest content of Ca, Fe, and B were observed in the peel. The lowest macro nutrient and micronutrient were S

收稿日期:2020-09-02 接受日期:2020-11-13

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0202000);广东省省级农业科技创新及推广(2019KJ108,2020KJ108);广东省农业科学院院长基金(201623);广东省重大科技计划专项(2014B020203003);广东省科技计划(2014A070713018,2013B090700007)

作者简介:胡伟芳,女,助理研究员,主要从事植物营养与施肥、果树栽培与生理研究。Tel:020-85161473,E-mail:weifanghyx@163.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:020-85161473,E-mail:guoliang8006@sina.com.cn

and Mo in fruit tissues, respectively. Except for the significantly lower Ca and Mo in the leaves and significantly higher P and B in the fruit, the distribution rates of N, P, Ca, B, and Mo were similar in different organs. However, the distribution rates of K, Zn, Mg, S, and Cu were different. The accumulation of K was in a descending order of fruit > roots > leaves ≈ trunk, while that of Zn occurred in a descending order of roots > trunk > leaves ≈ fruit. A significantly higher accumulation of Mg was found in the fruit than that in the trunk and roots. Significantly higher accumulation of S, Fe, and Mn were found the roots compared with the fruit and the trunk, and a relatively higher accumulation of Cu was observed in the trunk and roots than that in the fruit and leaves. Generally, most of the macro nutrients mainly accumulated in the fruit, while most of the micronutrients mainly accumulated in the root. There was considerable difference in the accumulation of mineral nutrients among different tissues in the fruit. Expect for a higher accumulation of Ca in the pericarp, the highest distribution rate of macro nutrients was found in the pulp, and distribution rate of all mineral nutrients was lowest in the core. In addition, the production of 50 kg fruit requires removal of 208.0 g of N, 17.4 g P, 103.1 g of K, 176.6 g of Ca, 14.2 g of Mg, 12.8 g of S, 1.05 g of Fe, 0.26 g of Mn, 0.05 g of Cu, 0.21 g of Zn, 0.48 g of B, and 1.2 mg of Mo from the aboveground. And 85.5 g of N, 8.9 g of P, 61.5 g of K, 25.7 g of Ca, 6.1 g of Mg, 3.6 g of S, 0.25 g of Fe, 0.03 g of Mn, 0.01 g of Cu, 0.04 g of Zn, 0.11 g of B, and 0.4 mg of Mo were carried away with 50 kg of fruit harvested, which accounted for 29.6%, 40.8%, 43.5%, 11.1%, 34.7%, 18.0%, 5.5%, 3.3%, 21.4%, 5.8%, 17.6% and 23.9% of total N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, and Mo accumulated in the whole trees, respectively.【Conclusion】There is relatively high nutrient absorption capacity, nutrient utilization ratio for yield, as well as nutrient demands for N, K, Ca, Fe, and B in ‘Gonggan’. Due to approximately one third of the macro nutrients in the tree removed from fruit harvest, mineral elements should be supplemented in time, and pruned branches should be effectively recycled to maintain soil fertility.

**Key words:** *Citrus reticulata* ‘Gonggan’; Biomass; Nutrient requirement; Mineral element

柑橘（*Citrus*）是全球重要的水果作物，种植历史4000 a（年）以上，广泛种植于世界上140多个国家[1]。广东省是我国柑橘的主产省份之一，2018年广东省柑橘种植面积为全国第五（23.11万$hm^2$），产量为全国第四（437.2万t）[2]。监测土壤养分和植株的养分分配是保障植物健康生长、促进养分高效利用和高产稳产的有效途径[3]。矿质元素在柑橘生产过程发挥着重要作用，包括大量元素N、P、K、Ca、Mg、S和微量元素Fe、Mn、Cu、Zn、B、Mo，元素缺乏及过量均会引发植株的生理性病害和生长障碍[4]。在早期，已有研究通过测定植株地上部分的矿质元素来分析柑橘的养分消耗[5-7]，但这些数据并不能完全反映植物的年养分需求；随后，有研究对完整树体（包括根系、树干、叶片和果实）进行破坏性取样，用以确定柑橘树体的总养分吸收量及其在不同器官的养分分配[8-14]。不同器官的生物量和养分累积可以侧面反映出植株的养分需求[9]，了解柑橘树体不同器官的养分分配可以为施肥提供依据，减少资源浪费。

‘贡柑’（*Citrus reticulata* ‘gonggan’）是橙与橘的自然杂交种，因其果肉品质和外观优良的特性，近年来成为广东柑橘新植区和复种区的主要栽培品种。尽管‘贡柑’在我国种植历史悠久，但由于其植株为多年生乔木，树体高大，使得研究其不同器官养分需求特征存在一定难度。目前，有关‘贡柑’树体的养分研究主要集中在叶片的矿质养分分布特征及其与土壤养分之间的关系[15]、叶片矿质养分对果实品质的影响[16]等方面。然而，有关‘贡柑’树体的养分累积特性尚缺乏研究。一方面，2017—2018年广东柑橘园土壤养分肥力和投入产出情况调查（数据未发表）表明，广东柑橘园土壤养分肥力区域差异性较大，土壤养分不均衡问题尤为突出，这意味着广东柑橘在总产和单产上仍具有较大的提升潜力。另一方面，在‘贡柑’的生产过程中，盲目施肥的现象仍普遍存在，导致果树的生长受到养分限制，造成果树长势变差、果实品质良莠不齐和产量不稳定，这在一定程度上制约了广东省柑橘生产的可持续发展。基于

此，笔者以广东柑橘主产区的‘贡柑’为研究对象，采用树体挖掘解剖的方法对挂果期完整树体的生物学基本性状、养分分配、养分累积与需求进行研究。研究结果可为贡柑可持续生产的养分管理策略研究提供基础数据，为合理制定化肥减施与提质增效、促使其丰产与稳产和保证其优良品质提供可靠的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况和样品采集

于2017年在广东省韶关市仁化县闻韶镇暖水村的‘贡柑’园采集样品。试验‘贡柑’园的土壤为赤红壤，质地为砂土。供试‘贡柑’树为嫁接苗，砧木为枳壳[*Poncirus trifoliata*(L.)Raf.]，树龄均为6 a，种植密度为950株•$hm^{-2}$。供试果园管理水平较高，基本没有裂果现象，为中高产水平‘贡柑’园。果园的当年养分总投入状况为：N 466.0 kg·$hm^{-2}$、$P_2O_5$ 275.1 kg·$hm^{-2}$、$K_2O$ 537.7 kg·$hm^{-2}$、MgO 28.5 kg·$hm^{-2}$和$SiO_2$ 47.5 kg·$hm^{-2}$；供试肥料为硫酸钾（含$K_2O$ 50%）、钙镁磷肥（含$P_2O_5$ 15%、CaO 45%、MgO 12%和$SiO_2$ 20%）、复合肥（15-15-15和12-12-21）和福邦有机肥（含N 2.32%、$P_2O_5$ 0.98%和$K_2O$ 1.84%）。

在果实成熟期，选取3株6 a生‘贡柑’植株进行树体参数调查。3株植株的树冠弧长平均为5.9 m，树冠投影直径平均为3.1 m。在‘贡柑’树滴水线外约20 cm处用土钻采集8个50 cm深的土柱，充分混匀后作为该株‘贡柑’树立地土壤样本。将采集后的土壤装入自封袋内，立即带回实验室。剔除土壤中的石块与动植物残体等杂质，在室内风干后磨碎，分别过10目（2 mm）和100目（0.15 mm）筛，用于分析土壤农化性质。

对所选的3株‘贡柑’树进行破坏性取样。挖取完整植株后，对不同植物器官进行分类，并按分类进行称重，包括根系（主根和侧根）、叶片、树干和果实。将各植物器官充分混合均匀后，分别对不同植物器官的样本随机取4份样品，装入自封袋内，立即带回实验室。在实验室内，用量杯随机选取100个果实，剥开果实后将其分为果皮、果肉和果核，并称取各部分的鲜质量。各植物器官样本经冲洗、杀青和烘干后记录干质量，并计算各器官的含水率和干质量。将样品粉碎后，用于测定矿质元素含量。

### 1.2 土壤样品的测定方法与果园养分状况

土壤有机质（SOM）采用重铬酸钾容量法—外加热法测定。采用pH计（ECS005348，梅特勒-托利多，美国）测定土壤pH（土水比为1:2.5）[17]。土壤养分采用标准的土壤农业化学分析方法测定[18]，土壤碱解N含量采用0.25 mol·$L^{-1}$ NaOH碱解扩散法测定。土壤速效P含量采用0.5 mol·$L^{-1}$ $NaHCO_3$浸提–钼锑抗比色法，使用分光光度计（V-5100，元析，中国）测定。土壤速效K含量采用0.25 mol·$L^{-1}$ $NH_4OAc$浸提，使用火焰光度计测定。土壤有效Ca和有效Mg采用0.25 mol·$L^{-1}$ $NH_4OAc$交换法测定。土壤有效Fe、有效Mn、有效Cu和有效Zn含量利用DTPA-$CaCl_2$-TEA浸提剂提取后，采用ICP-AES法测定。土壤有效S采用磷酸盐–乙酸浸提–硫酸钡比浊法。土壤有效B含量利用沸水浸提，采用姜黄素比色法测定。土壤有效Mo含量利用草酸–草酸铵浸提后，采用硫氰酸钾比色法测定。

经检测，果园的土壤pH为4.93，土壤呈酸性。根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准评价，果园的有效P（*w*，后同）（87.0 mg·$kg^{-1}$）、速效K（185.0 mg·$kg^{-1}$）、有效S（54.59 mg·$kg^{-1}$）、有效Fe（89.9 mg·$kg^{-1}$）、有效Mn（22.7 mg·$kg^{-1}$）、有效Zn（7.0 mg·$kg^{-1}$）和有效Cu（1.1 mg·$kg^{-1}$）丰富，有效Ca（804.0 mg·$kg^{-1}$）处于中上水平，有效Mg（112.8 mg·$kg^{-1}$）处于中等水平，SOM（17.7 g·$kg^{-1}$）和碱解N（79.0 mg·$kg^{-1}$）处于中下水平，有效B（0.3 mg·$kg^{-1}$）和有效Mo（0.12 mg·$kg^{-1}$）缺乏。总体上，果园土壤养分肥力处于中上水平。

### 1.3 植物样品的测定方法

植物的矿质元素含量采用标准的农业化学分析方法测定[18]，植物Ca、Mg、Fe、Mn、Cu和Zn含量经过$HNO_3$-$HClO_4$消煮后，采用原子吸收分光光度法（LY/T 1270—1999），利用原子吸收分光光度计（ZA3300，日立，日本）测定。植物B含量采用姜黄素比色法（LY/T 1273—1999），利用分光光度计测定（V-5100，元析，中国）。植物Mo含量采用极谱（催化波）法测定。植物N含量采用$H_2SO_4$–$H_2O_2$消煮—凯氏定氮法测定。植物P含量采用$H_2SO_4$–$H_2O_2$消煮—硫酸钼锑抗比色法测定。植物K含量采用$H_2SO_4$–$H_2O_2$消煮—火焰光度法测定。植物S含量采用$HNO_3$–$HClO_4$消煮—硫酸钡比浊法测定。植物B含量采用干灰化—甲亚胺比色法测定。植物Mo含量采用极谱（催化波）法测定。所有项目均用标准物质GBW07603和GB07408控制测试质量。

### 1.4　统计及分析

为阐明‘贡柑’的养分累积特性，笔者计算了生产目标产量（本研究设为每株50 kg）树体需要吸收累积的养分量。采用以下公式计算‘贡柑’树体的养分累积量和目标产量的养分吸收总量：

$$MAI_i = M \times Nur_i, \quad (1)$$

$$RIE_i = P_i / MF \times 50。 \quad (2)$$

式中，$MAI_i$为树体$i$养分的累积量（g），$M$为树体生物量（kg），$Nur_i$为树体$i$养分含量（$g \cdot kg^{-1}$）。$RIE_i$为$i$养分在目标产量为50 kg•株$^{-1}$时的养分吸收总量（kg•株$^{-1}$），$MF$为果实产量（kg•株$^{-1}$），$P_i$为植株地上部分（叶片+树干+果实）的养分吸收总量（kg•株$^{-1}$）。

采用Microsoft Excel 2019和IBM SPSS Statistics 25.0软件进行数据处理、分析与制图。采用配对样本$T$检测比较不同器官的生物量和干物质的差异，采用单因素方差分析比较不同养分在不同植物器官的含量和累积量的差异，当$p < 0.05$时，视为达到显著性水平。

## 2　结果与分析

### 2.1　植株鲜质量与生物量的分配特征

‘贡柑’的果实产量处于68.9~80.6 kg，属于高产水平。植株鲜质量平均值的大小顺序为：果实（75.0 kg）>树干（20.7 kg）≈根系（19.3 kg）>叶片（8.5 kg），它们分别占全株鲜质量的60.7%、16.8%、15.6%和6.9%（表1）。果实以果肉为主，果肉、果皮和果核分别占果实总质量的79.6%、18.8%和1.6%（表1）。植株的总生物量平均为23.5 kg•株$^{-1}$，树干、果实和根系是生物量主要积累部位，各器官占植株总生物量的大小顺序为：树干（34.3%）≈果实（30.4%）≈根系（26.9%）>叶片（8.4%）；果实各部分占果实总生物量的大小顺序为：果肉（64%）>果皮（32%）>果核（32%）。叶片和果实生物量的质量比为1∶3.61（图1）。

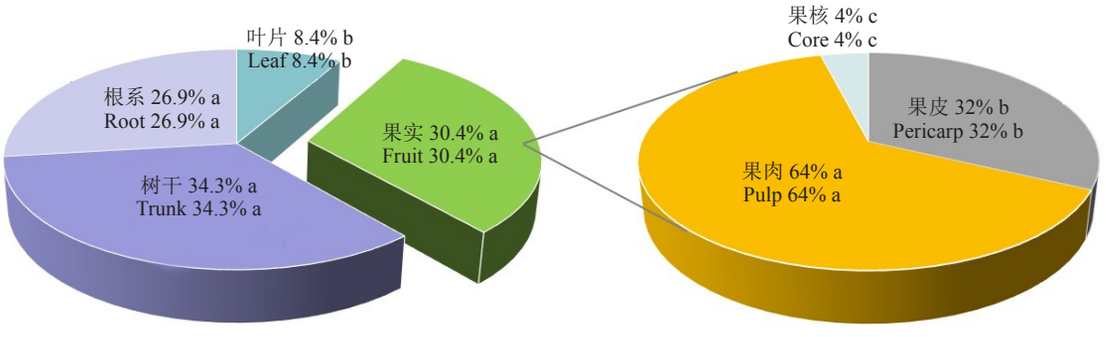
**表1　‘贡柑’不同植物器官的鲜质量及其百分比**

**Table 1　The fresh mass and percentage of various organs in *Citrus reticulata* ‘Gonggan’**

| 器官 Organ | 最大值 Minimum/kg | 最小值 Maximum/kg | 均值 Mean/kg | 标准差 Standard deviation | 百分比 Percentage/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 叶片 Leaf | 10.5 | 4.7 | 8.5 c | 3.3 | 6.9 |
| 树干 Trunk | 22.9 | 19.7 | 20.7 b | 1.8 | 16.8 |
| 根系 Root | 21.5 | 15.9 | 19.3 b | 3.0 | 15.6 |
| 果实 Fruit | 80.6 | 68.9 | 75.0 a | 5.8 | 60.7 |
| 果皮 Pericarp | 15.0 | 13.2 | 14.1 b | 0.9 | 11.4 |
| 果肉 Pulp | 64.5 | 54.8 | 59.7 a | 4.8 | 48.4 |
| 果核 Core | 1.5 | 0.9 | 1.2 c | 0.3 | 0.9 |

注：不同小写字母代表不同植物器官（叶片、树干、根系和果实）之间的养分差异达到显著水平（$p < 0.05$）；不同小写字母代表不同果实部分（果皮、果肉和果核）之间的养分差异达到显著水平（$p < 0.05$）。下同。

Note：Small letters denote a significant difference among different organs (leaf, trunk, root, and fruit) of plants ($p < 0.05$), while small letters denote a significant difference among different parts (pericarp, pulp, and core) of fruits ($p < 0.05$). The same below.




不同小写字母代表不同植物器官之间的养分差异达到显著水平（$p < 0.05$）。

Small letters denote a significant difference among different organs of plants ($p < 0.05$).

**图1　‘贡柑’植株各器官生物量分布**

**Fig. 1　Biomass accumulation in different organs of *Citrus reticulata* ‘Gonggan’**

### 2.2 不同器官的养分含量

除了Mo外，其他矿质元素含量在不同的植物器官与果实部分均具有显著差异（表2）。所有的大量元素（N、P、K、Ca、Mg和S）和部分微量元素（Cu和B）均为叶片含量最高，Fe和Zn含量为根系最高，Mn含量为叶片和根系中最高（$p < 0.05$）。在不同的植物器官，大量元量Ca含量（$w$，后同）最高的是叶片（38.2 ± 2.1 g·kg$^{-1}$）和树干（9.5 ± 0.3 g·kg$^{-1}$），N含量最高的是根系（12.6 ± 1.1 g·kg$^{-1}$）和果实（12.0 ± 0.8 g·kg$^{-1}$）。叶片、树干、根系和果实均为微量元素Fe含量最高，含量最低的是微量元素B。在果实中，N、P、K、Mg、S、Cu和Zn含量均为果核的最高，Ca、Fe和B含量为果皮最高，较高的Mn含量出现在果核和果皮中（$p < 0.05$）。果皮、果肉和果核的大量和微量元素含量最高的分别为N和Fe，含量最低分别为S和Mo。

表2 成熟期‘贡柑’的不同植物器官的养分含量

Table 2 Nutrient contents in various organs of *Citrus reticulata* ‘Gonggan’ trees at mature stage

| 养分 Nutrient | 叶片 Leaf | 树干 Trunk | 根系 Root | 果实 Fruit | 果皮 Pericarp | 果肉 Pulp | 果核 Core |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $w$(N)/(g·kg$^{-1}$) | 28.3 ± 0.8 a | 8.2 ± 0.1 c | 12.6 ± 1.1 b | 12.0 ± 0.8 b | 11.9 ± 0.6 b | 11.3 ± 1.2 b | 24.6 ± 0.9 a |
| $w$(P)/(g·kg$^{-1}$) | 1.7 ± 0.2 a | 0.6 ± 0.0 c | 0.7 ± 0.1 c | 1.3 ± 0.1 b | 0.7 ± 0.1 c | 1.4 ± 0.1 b | 3.0 ± 0.2 a |
| $w$(K)/(g·kg$^{-1}$) | 10.8 ± 1.0 a | 2.5 ± 0.2 d | 6.1 ± 0.2 c | 8.7 ± 1.0 b | 7.7 ± 0.5 b | 9.2 ± 1.4 ab | 9.4 ± 0.1 a |
| $w$(Ca)/(g·kg$^{-1}$) | 38.2 ± 2.1 a | 9.5 ± 0.3 b | 8.7 ± 0.6 b | 3.6 ± 0.5 c | 6.7 ± 0.6 a | 2.0 ± 0.5 c | 5.3 ± 0.3 b |
| $w$(Mg)/(g·kg$^{-1}$) | 2.2 ± 0.1 a | 0.5 ± 0.1 c | 0.5 ± 0.0 c | 0.9 ± 0.0 b | 0.7 ± 0.0 c | 0.9 ± 0.0 b | 1.6 ± 0.0 a |
| $w$(S)/(g·kg$^{-1}$) | 2.6 ± 0.4 a | 0.5 ± 0.0 c | 1.1 ± 0.1 b | 0.5 ± 0.1 c | 0.6 ± 0.0 b | 0.5 ± 0.1 b | 0.9 ± 0.1 a |
| $w$(Fe)/(mg·kg$^{-1}$) | 100.7 ± 12.7 b | 75.4 ± 8.9 b | 556.5 ± 131.3 a | 35.2 ± 7.1 b | 51.0 ± 7.7 a | 27.2 ± 8.0 b | 41.0 ± 7.3 ab |
| $w$(Mn)/(mg·kg$^{-1}$) | 82.3 ± 4.8 a | 8.0 ± 1.5 b | 109.8 ± 54.9 a | 4.3 ± 0.1 b | 9.1 ± 0.2 a | 1.7 ± 0.1 b | 8.2 ± 0.8 a |
| $w$(Cu)/(mg·kg$^{-1}$) | 5.7 ± 0.7 a | 2.5 ± 0.1 c | 3.5 ± 0.4 b | 2.0 ± 0.2 c | 1.5 ± 0.2 b | 2.0 ± 0.3 b | 5.7 ± 0.7 a |
| $w$(Zn)/(mg·kg$^{-1}$) | 23.8 ± 3.6 b | 15.5 ± 3.1 c | 63.9 ± 7.2 a | 5.0 ± 0.6 d | 7.0 ± 1.7 b | 3.3 ± 0.1 c | 15.3 ± 2.0 a |
| $w$(B)/(mg·kg$^{-1}$) | 131.2 ± 3.7 a | 14.0 ± 1.8 c | 21.5 ± 1.3 b | 15.3 ± 0.1 c | 25.2 ± 1.3 a | 10.2 ± 0.6 c | 18.4 ± 0.8 b |
| $w$(Mo)/(mg·kg$^{-1}$) | 0.09 ± 0.01 a | 0.08 ± 0.00 a | 0.09 ± 0.06 a | 0.10 ± 0.00 a | 0.07 ± 0.01 a | 0.05 ± 0.00 a | 0.13 ± 0.01 a |

### 2.3 不同器官的养分分配

从养分累积量来看，不同矿质元素的分配模式存在较大差别（图2）。除叶片Ca和Mo显著较低、果实P和B显著较高外（$p < 0.05$），N、P、Ca、B和Mo累积量在不同器官的分配率相似（$p > 0.05$）。不同器官的K、Zn、Mg、S和Cu分配率具有显著差异（$p < 0.05$）。K的累积量大小为：果实（43.92%）>根系（26.96%）>叶片（14.77%）≈树干（14.35%），Zn的累积量大小为：根系（66.03%）>树干（20.66%）>叶片（7.46%）≈果实（5.84%）。果实Mg累积量显著高于树干和根系，根系的S、Fe和Mn累积量显著高于树干和果实，树干和根系的Cu累积量显著高于叶片和果实（$p < 0.05$）。总体上，大部分大量元素主要累积在果实中，而大部分微量元素主要累积在根系中。

在果实中的矿质元素在不同部分具有显著差异（图2）。除果皮中的Ca累积量最高外，其他大量元素分配率最高的均为果肉，所有矿质元素的最低分配率均为果核。其中，N、P、K、Mg、S和Mo累积量均为果肉>果皮>果核，Ca和Mn累积量均为果皮>果肉>果核，Zn、Fe和B累积量为果皮≈果肉>果核，而Cu累积量为果肉>果皮≈果核。

以生产50 kg果实计，‘贡柑’地上部树体需要累积N 208.0 g、P 17.4 g、K 103.1 g、Ca 176.6 g、Mg 14.2 g、S 12.8 g、Fe 1.05 g、Mn 0.26 g、Cu 0.05 g、Zn 0.21 g、B 0.48 g和Mo 1.2 mg（表3），大量元素N、P、K、Ca、Mg、S的养分累积质量比为1.00∶0.08∶0.50∶0.85∶0.07∶0.06，微量元素Fe、Cu、Zn、Mn、B、Mo的养分累积质量比为1.00∶0.04∶0.19∶0.25∶0.46∶0.001。收获50 kg贡柑果实带走养分量为N 85.5 g、P 8.9 g、K 61.5 g、Ca 25.7 g、Mg 6.1 g、S 3.6 g、Fe 251.2 mg、Mn 30.7 mg、Cu 14.4 mg、Zn 35.1 mg、B 109.0 mg和Mo 0.4 mg。

## 3 讨 论

叶片是植物进行光合作用最主要的器官，也是养分累积与消耗的重要器官，而果实是光合产物的分配器官，叶片与果实生物量的比值是果树修剪的重要参数[19]。在本试验条件下，贡柑叶片和果实的生物量比值为1∶3.6，这一比值低于大部分柑橘品种

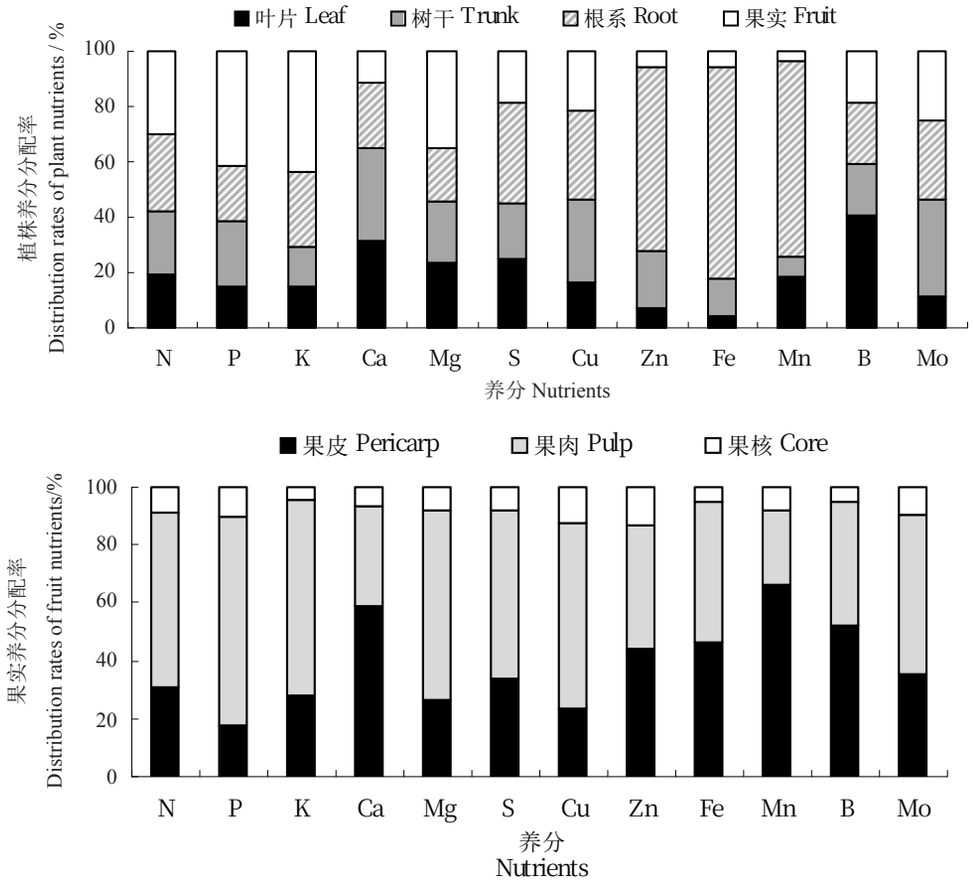



**图 2　‘贡柑’植株各器官的养分分配**

**Fig. 2　Distribution rates of nutrients in different organs of *Citrus reticulata* ‘Gonggan’**

**表 3　生产 50 kg 果实‘贡柑’树体需要累积的养分量**

**Table 3　The accumulations of nutrients needed for yielding 50 kg of fruit in *Citrus reticulata* ‘Gonggan’**

| 养分 Nutrient | 叶片 Leaf | 树干 Trunk | 根系 Root | 果实 Fruit | 合计 Total |
|---|---|---|---|---|---|
| N/g | 56.3 ± 22.9 a | 66.2 ± 5.7 a | 80.5 ± 21.4 a | 85.5 ± 7.2 a | 288.5 ± 47.7 |
| P/g | 3.3 ± 1.2 b | 5.1 ± 0.7 b | 4.4 ± 1.5 b | 8.9 ± 0.5 a | 21.8 ± 2.9 |
| K/g | 21.4 ± 8.9 c | 20.2 ± 2.7 c | 38.4 ± 8.1 b | 61.5 ± 0.7 a | 141.5 ± 17.8 |
| Ca/g | 74.5 ± 26.2 a | 76.4 ± 5.2 a | 55.6 ± 13.2 a | 25.7 ± 4.6 b | 232.2 ± 36.7 |
| Mg/g | 4.3 ± 1.7 ab | 3.8 ± 0.5 b | 3.4 ± 0.7 b | 6.1 ± 0.6 a | 17.6 ± 2.6 |
| S/g | 5.2 ± 2.5 ab | 3.9 ± 0.4 b | 7.3 ± 1.8 a | 3.6 ± 0.1 b | 20.1 ± 4.7 |
| Fe/mg | 193.1 ± 60.0 b | 606.6 ± 66.2 b | 3 507.9 ± 1 018.8 a | 251.2 ± 58.2 b | 4 558.8 ± 971.1 |
| Mn/mg | 164.2 ± 65.4 b | 64.1 ± 7.9 b | 679.3 ± 355.1 a | 30.7 ± 3.2 b | 938.3 ± 393.5 |
| Cu/mg | 11.2 ± 4.7 b | 20.0 ± 1.7 bc | 21.8 ± 3.5 a | 14.4 ± 2.0 c | 67.3 ± 8.5 |
| Zn/mg | 45.2 ± 12.8 c | 123.8 ± 19.9 b | 399.4 ± 50.9 a | 35.1 ± 1.0 c | 603.6 ± 51.8 |
| B/mg | 260.0 ± 103.9 a | 112.2 ± 8.6 b | 136.5 ± 32.3 b | 109.0 ± 12.7 b | 617.6 ± 137.1 |
| Mo/mg | 0.2 ± 0.1 b | 0.6 ± 0.1 a | 0.5 ± 0.4 ab | 0.4 ± 0.0 ab | 1.8 ± 0.5 |

注：数值为平均值±标准差。在同一养分中，不同小写字母代表不同植物器官（叶片、树干、根系和果实）之间的养分差异达到显著水平（$p < 0.05$）。

Note: Values are mean ± standard deviation. In the same nutrient, lowercase letters denote a significant difference among different organs (leaf, trunk, root, and fruit) of plants ($p < 0.05$).

（1∶1.3~1∶3.1）[12-14]和其他果树，如苹果（1∶2.3）、粉蕉（1∶2.8）、核桃（1∶1.47）和骏枣（1∶2.4~1∶3.1）[19-22]。这意味着‘贡柑’具有较高的光合经济产出率。

植株养分吸收累积是生物量累积和作物产量形成的基础[23]，矿质元素累积分配特性是指导果树合理施肥的重要参数[19]。在本试验条件下，每生产 50 kg

贡柑，地上部分吸收大量元素N、P、K、Ca、Mg、S总量比为1.00∶0.08∶0.50∶0.85∶0.07∶0.06，树体对N、K和Ca养分需求较多，且主要累积在叶片；地上部分吸收微量元素Fe、Cu、Zn、Mn、B、Mo总量比为1.00∶0.04∶0.19∶0.25∶0.46∶0.001，Fe和B元素吸收与累积较多，二者分别累积在根系和叶片。从收获50 kg果实带走的养分量来看，N、P、K、Mn、Cu、Zn、B和Mo的养分量与‘甜橙’相似[12-13]。然而，本研究的所有矿质元素被‘贡柑’果实收获带走的养分总量均比‘砂糖橘’低，但‘贡柑’果实养分量占树体养分总量的比例高于‘砂糖橘’[11]。这些对比研究结果表明，‘贡柑’植株的养分吸收能力和建成果实产量的养分利用率与‘甜橙’相似，但比‘砂糖橘’的养分利用率和果实收获带走的养分比例高。由于果实收获带走的N、P、K、Ca和Mg约为全株养分累积量的1/3，生长季枝叶修剪也带走一部分养分，特别是N、K、Ca和B在叶片的累积量较高，为了维持‘贡柑’园土壤养分肥力和保障树体生长发育和高产，建议及时施用足量的N、P、K、Ca和Mg肥料以补充收获及修剪带走的养分，并对修剪的枝叶进行还田，促进养分的回收利用。此外，由于果实收获和果树修剪带走的各种养分量通常与养分施用量不相等，还需考虑植株的养分利用率和土壤的供肥保肥能力。今后需要系统研究‘贡柑’对矿质养分元素的吸收利用能力及其土壤养分吸附特性，为‘贡柑’养分管理提供更为精确的数据支持。

柑橘叶片和土壤的分析与养分诊断能有效的评价植株的养分状况，常应用于指导合理施肥[4,24]。一般认为，N、P和K肥会影响柑橘树体的生长发育、产量和果实品质[25]，树体的Mg含量会影响果实的品质[16]。从柑橘叶片养分诊断来看[26]，本研究‘贡柑’树体的K、Ca、S、Fe和Mn养分含量处于适中水平，N、P和B养分含量偏高，而Mg、Zn、Cu和Mo养分含量偏低。柑橘叶片和土壤的K、Ca、S、Fe和Mn和Mo的养分诊断结果是一致的。然而，本研究的土壤有效Zn和有效Cu较为丰富，有效P和有效Mg处于中等水平，而碱解N和有效B较为缺乏，这些结果与叶片养分诊断相矛盾，这可能与柑橘树本身的元素吸收和累积有关。与其他柑橘品种相比，‘贡柑’叶片N和P含量高于‘砂糖橘’（N：25.9 g·kg$^{-1}$和P：1.4 g·kg$^{-1}$）、‘椪柑’（N：27.7 g·kg$^{-1}$和P：1.5 g·kg$^{-1}$）、‘脐橙’（P：1.4 g·kg$^{-1}$）和‘蜜柑’（N：25.0 g·kg$^{-1}$和P：1.6 g·kg$^{-1}$）的叶片，而‘贡柑’叶片的Mg含量低于‘椪柑’（4.4 g·kg$^{-1}$）‘脐橙’（3.2 g·kg$^{-1}$）和‘蜜柑’（3.2 g·kg$^{-1}$）的叶片[11,27]。同时，每生产50 kg‘贡柑’，地上部分对Mg、Zn、Cu的吸收总量低于‘砂糖橘’[11]。‘贡柑’叶片可能易于累积N、P和B元素而较少累积Mg、Zn、Cu元素。因此，制定针对‘贡柑’叶片营养诊断的标准十分有必要。在未来的生产中，应采取测土配方施肥方案，合理施用矿质元素，保障‘贡柑’树体的生长发育。此外，由于果树营养生长期、开花期、果实发育期对矿质营养的积累和养分需求存在较大差异，在今后的研究中，建议围绕不同发育期、高产和低产树养分差异等科学问题进行研究。

## 4 结 论

‘贡柑’植株具有较高的光合经济产出率。在本试验条件下，每生产50 kg‘贡柑’，地上部分吸收大量元素N、P、K、Ca、Mg、S的总量比为1.00∶0.08∶0.50∶0.85∶0.07∶0.06，微量元素Fe、Cu、Zn、Mn、B、Mo的总量比为1.00∶0.04∶0.19∶0.25∶0.46∶0.001，树体对N、K、Ca、Fe和B养分需求较多。‘贡柑’植株的养分吸收能力、建成果实产量的养分利用率较高，为了维持土壤养分肥力与保障树体生长发育，建议修剪枝条后及时施用足量的肥料并对修剪的枝叶进行还田。此外，‘贡柑’叶片和土壤的K、Ca、S、Fe和Mn和Mo的养分诊断结果是一致的，但‘贡柑’叶片可能易于累积N、P和B元素而较少累积Mg、Zn、Cu元素。因此，制定针对‘贡柑’叶片营养诊断的标准十分有必要。在今后的研究中，应深入研究‘贡柑’不同发育期矿质养分的吸收利用能力和土壤养分吸附特性，制定针对‘贡柑’叶片营养诊断的标准，采取测土配方施肥方案，为‘贡柑’养分管理提供科学依据。

**参考文献 References：**

[1] XU J，ZHANG Y，ZHANG P，TRIVEDI P，……，WANG N. The structure and function of the global citrus rhizosphere microbiome[J]. Nature Communications，2018，9(1): 1-10.

[2] 中华人民共和国国家统计局 . 国家数据：2019 年年度数据[EB/OL].2019. http://data.stats.gov.cn/index.htm.
National Bureau of Statistics，PRC. National data: Annual data for 2019[EB/OL]. 2019. http://data.stats. gov.cn/index.htm.

[3] BOM F V D，MAGID J，JENSEN L S. Long-term fertilisation strategies and form affect nutrient budgets and soil test values，soil carbon retention and crop yield resilience[J]. Plant and Soil，2019，434(1/2): 47-64.

[4] SRIVASTAVA A. Nutrient deficiency symptomology in citrus:

An effective diagnostic tool or just an aid for post‐mortem analysis[J]. Agricultural Advances，2013，2(6): 177-194.

[5] BARNETTE R，DEBUSK E，HESTER J，JONES W. The mineral analysis of a nineteen year old Marsh seedless grapefruit tree [J]. Citrus Industry，1931，12(3): 5-6.

[6] CAMERON S H. The distribution of total nitrogen in the orange tree[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science，1933，30: 341-348.

[7] KELLY W，CUMMINS A B. Composition of normal and mottled citrus leaves[R]. Washington：Biodiversity Heritage Library, 1920.

[8] MARTíNEZ-ALCáNTARA B，QUIñONES A，PRIMO-MILLO E，LEGAZ F. Nitrogen remobilization response to current supply in young citrus trees[J]. Plant and Soil，2011，342(1/2): 433-443.

[9] QUIñONES A，MARTíNEZ-ALCáNTARA B，PRIMO-MILLO E，LEGAZ F. Fertigation: Concept and application in citrus[M]// SRIVASTAVA A K. Advances in citrus nutrition. Springer，2012: 281-301.

[10] CAMERON H. The mineral nutrition of citrus[M]//In: REUTHER W，BATCHELOR L D，WEBBER H J (eds). The citrus industry，Anatomy，physiology，genetics，and reproduction. Vol 2. University of California，Division of Agricultural Sciences，Berkeley，1968: 127-289.

[11] 李国良，周昌敏，杨苞梅，何兆桓，徐培智，杨少海，姚丽贤，涂仕华 . ‘砂糖橘’养分累积分布特性研究[J]. 热带作物学报，2015，36(12)：2166-2170.
LI Guoliang，ZHOU Changmin，YANG Baomei，HE Zhaohuan，XU Peizhi，YANG Shaohai，YAO Lixian，TU Shihua. The accumulation and distribution characteristics of mineral uutrients in ‘Shatangju’ mandarin[J]. Chinese Journal of Tropical Crops，2015，36(12): 2166-2170.

[12] MATTOS D，D，GRAETZ D A，ALVA A K. Nutrient content of biomass components of Hamlin sweet orange trees[J]. Scientia Agricola，2003，60(1): 155-160.

[13] KADYAMPAKENI D M，MORGAN K T，SCHUMANN A W. Biomass，nutrient accumulation and tree size relationships for drip-and microsprinkler-irrigated orange tree[J]. Journal of Plant Nutrition，2016，39(5): 589-599.

[14] ROCCUZZO G，ZANOTELLI D，ALLEGRA M，GIUFFRIDA A，TORRISI B F，LEONARDI A，QUIñONES A，INTRIGLIOLO F，TAGLIAVINI M. Assessing nutrient uptake by field-grown orange trees[J]. European Journal of Agronomy，2012，41: 73-80.

[15] 郭雁君，吉前华，蒋惠，郭丽英，周希琴，胡亚平 . 地方柑橘良种(贡柑)新建果园土壤和树体养分分布特征[J]. 中国园艺文摘，2014，30(4)：7-10.
GUO Yanjun，JI Qianhua，JIANG Hui，GUO Liying，ZHOU Xiqin，HU Yaping. Investigation and analysis on nutrient status and distribution of soil and leaves in new orchards of a Zhaoqing local Citrus cultivars (*Citrus nobilis* Lour. Gonggan)[J]. Chinese Horticulture Abstracts，2014，30(4): 7-10.

[16] 吉前华，郭雁君，姚金明，何锦洪 . 贡柑叶片的矿质营养及其对果实品质影响的研究[J]. 西南农业学报，2010，23(3)：786-790.
JI Qianhua，GUO Yanjun，YAO Jinming，HE Jinhong. Study on leaf mineral nutrient and its effect on fruit quality of Gonggan (*Citrus reticulata* Blanco var. gonggan) [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2010，23(3): 786-790.

[17] CHEN H S，HUANG Q Y，LIU L N，CAI P，WEI L，MING L. Poultry manure compost alleviates the phytotoxicity of soil cadmium: influence on growth of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Pedosphere，2010，20(1): 63-70.

[18] 鲁如坤 . 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科学技术出版社，1999.
LU Rukun. Analysis method in soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press，1999.

[19] 梁智，周勃，邹耀湘 . 核桃树体生物量构成及矿质营养元素累积特性研究[J]. 果树学报，2012，29(1)：139-142.
LIANG Zhi，ZHOU Bo，ZOU Yaoxiang，Compositional analysis of biomass and accumulation properties of mineral elements in Walnut[J]. Journal of Fruit Science，2012，29(1): 139-142.

[20] 杨苞梅，姚丽贤，李国良，周昌敏，何兆桓，涂仕华 . 粉蕉矿质元素吸收积累与分配特征[J]. 植物营养与肥料学报，2013，19(6)：1471-1476.
YANG Baomei，YAO Lixian，LI Guoliang，ZHOU Changmin，HE Zhaohuan，TU Shihua. Absorption，accumulation and distribution of mineral elements in plantain banana[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2013，19(6): 1471-1476.

[21] 王泽，盛建东，陈波浪，李建贵 . 矮密栽培红枣树生物量及养分积累动态研究[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18(1): 169-175.
WANG Ze，SHENG Jiandong，CHEN Bolang，LI Jiangui. Study on biomass and nutrient accumulation of *Zizyphus jujube* tree under dwarfing and high density culture[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2012，18(1): 169-175.

[22] 梁智，张计峰 . 两种枣树矿质营养元素累积特性研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(3)：688-692.
LIANG Zhi，ZHANG Jifeng. Accumulation properties of mineral elements in two types of Chinese jujube[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2011，17(3): 688-692.

[23] 赵营，同延安，赵护兵 . 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2006，12(5)：622-627.
ZHAO Ying，TONG Yan’an，ZHAO Hubing. Effects of different N rates on nutrients accumulation ，transformation and yield of summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2006，12(5): 622-627.

[24] 庄伊美 . 柑桔营养与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社，1994.
ZHUANG Yimei. Citrus nutrition and fertilization[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press，1994.

[25] 鲁剑巍，陈防，王运华，刘冬碧，万运帆，余常兵 . 氮磷钾肥对红壤地区幼龄柑橘生长发育和果实产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10(4)：413-418.
LU Jianwei，CHEN Fang，WANG Yunhua，LIU Dongbi，WAN Yunfan，YU Changbing. Effect of N，P，K fertilization on young citrus tree growth，fruit yield and quality in area of red soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2004，10(4): 413-418.

[26] SRIVASTAVA A K. Advances in citrus nutrition[M]. New York：Springer，2012.

[27] 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.
LU Jianwei. Study on soil and plant nutrition status and balanced fertilization techniques of the citrus orchards in Hubei[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2003.