

## 不同品种油茶叶片矿质元素含量特征及差异分析

曹永庆<sup>1</sup>, 任华东<sup>1</sup>, 王开良<sup>1</sup>, 徐文才<sup>2</sup>, 周庆<sup>2</sup>, 姚小华<sup>1\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400; 2. 浙江省江山市林业局, 江山 324100)

**摘要:** 为分析不同品种油茶叶片矿质元素含量特征, 以广泛栽培的油茶良种‘长林40号’、‘长林23号’和‘长林53号’为研究对象, 测定了2个试验点的正常生长林分叶片中17种矿质元素的含量, 采用相关性分析、主成分分析、聚类分析和判别分析方法进行解析。结果表明: 油茶叶片N元素平均含量为14.45 g·kg<sup>-1</sup>, Ca、K和Al元素的平均含量为3.12~6.79 g·kg<sup>-1</sup>, P、S、Mg和Mn元素的平均含量为0.79~1.68 g·kg<sup>-1</sup>; Fe、Ba和Na元素平均含量为45.54~71.94 mg·kg<sup>-1</sup>, Sr和B元素平均含量分别为21.10和14.73 mg·kg<sup>-1</sup>, Zn、Cu、Ni和Ti元素平均含量为1.43~9.52 mg·kg<sup>-1</sup>。除Mg以外, 各矿质元素含量在供试品种间差异显著。各矿质元素单株间的变异系数在8.01%~48.26%之间, 品种间的变异系数在6.32%~58.85%之间, 品种间和品种内单株间变异系数呈显著正相关关系 ( $R^2=0.8052$ ,  $P<0.05$ ), N、P、S、Al、K、Cu、Fe、Na、Ti和Mg元素变异系数较小, Ca、Zn、Sr、B和Ni元素变异系数居中, Mn和Ba元素的变异系数最高; K元素含量与其他各元素含量间均呈现负相关关系, 而N、P和S, Fe、Mn和Al, B和Fe, Zn和Na, Cu和Ni, Ti和Ca, Ti和Fe 7组元素间存在强正相关关系 ( $r>0.7$ ,  $P<0.01$ ); N、P、S、Ca、Ba、Ti、B、Sr和Na元素在提取的4个主成分上具有较高荷载, 利用该9种元素对供试3个品种判别分析的正确率达96.70%。该研究结果为解析油茶树体矿质营养吸收利用机制和科学营养管理提供了参考。

**关键词:** 油茶; 矿质元素; 变异系数; 相关性; 判别分析

中图分类号: S794.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2022)03-0374-07

### Analysis on the characteristics and difference of mineral elements content in leaves from different varieties of *Camellia oleifera* Abel.

CAO Yongqing<sup>1</sup>, REN Huadong<sup>1</sup>, WANG Kailiang<sup>1</sup>, XU Wencai<sup>2</sup>, ZHOU Qing<sup>2</sup>, YAO Xiaohua<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400;

2. Forestry Bureau of Jiangshan City, Zhejiang Province, Jiangshan 324100)

**Abstract:** To clarify the characteristics of mineral elements content in leaves from different varieties of oil-tea *Camellia*, 17 mineral elements in leaves of three national varieties ‘Changlin 40’, ‘Changlin 23’ and ‘Changlin 53’ grown in two sites with different soil conditions were determined and analyzed by correlation analysis, PCA, hierarchical cluster analysis and discriminant analysis methods. The results showed that: the average content of N in leaves of *Camellia oleifera* was 14.45 g·kg<sup>-1</sup>, the average content of Ca, K and Al were 3.12 - 6.79 g·kg<sup>-1</sup>, and the average content of P, S, Mg and Mn were 0.79 - 1.68 g·kg<sup>-1</sup>; the average content of Fe, Ba and Na were 45.54 - 71.94 mg·kg<sup>-1</sup>, the average content of Sr and B were 21.10 mg·kg<sup>-1</sup> and 14.73 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, and the average content of Zn, Cu, Ni and Ti were 1.43 - 9.52 mg·kg<sup>-1</sup>. The contents of mineral elements were significantly different among the varieties except Mg. The C.V. of mineral elements content among individual trees and different varieties were 8.01% - 48.26% and 6.32% - 58.85%, respectively, and a significant positive correlation was found between them ( $R^2=0.8052$ ,  $P<0.05$ ). The C.V. of mineral elements N, P, S, Al, K, Cu, Fe, Na, Ti and Mg were lower, followed by Ca, Zn, Sr, B, Ni, and the C.V. of mineral elements Mn and Ba were higher. The content of K was negatively related with other mineral elements, and significantly strong positive relations were found among the elements in seven groups including: N, P, S; Fe, Mn, Al; B, Fe; Zn, Na; Cu, Ni; Ti, Ca and

收稿日期: 2021-09-06

基金项目: 中国林业科学院基金重点项目 (CAFYBB2017ZA004-1) 和国家重点研发计划 (2019YFD1001602) 共同资助。

作者简介: 曹永庆, 博士, 副研究员, E-mail: caoyq1981@163.com

\* 通信作者: 姚小华, 研究员, 博士生导师, E-mail: yaohx168@163.com

Ti, Fe ( $r > 0.7$ ,  $P < 0.01$ ). The elements of N, P, S, Ca, Ba, Ti, B, Sr and Na had higher load of 4 extracted principal components. The discriminant accuracy of the tested three varieties achieved 96.70% using nine mineral elements above as discrimination variables. This research provides references for the further study on mineral elements absorption, utilization and scientific nutrition management in *C. oleifera*.

**Key words:** *Camellia oleifera*; mineral elements; coefficient of variation; correlation; discriminant analysis

油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 是我国南方重要的木本油料树种, 具有综合利用价值高、生态效益好的优点<sup>[1-2]</sup>, 目前全国种植面积已达 400 多万  $\text{hm}^2$ , 在脱贫攻坚、乡村振兴等国家战略中发挥着重要作用。根据国家林草局 2020 年《油茶产业发展指南》, 至 2025 年, 全国油茶发展面积将达 600 万  $\text{hm}^2$ , 发展潜力大, 前景广阔。

环境和基因影响植物对养分的吸收和利用, 植物的养分生理状态则反映了其对环境的适应性<sup>[3]</sup>。油茶遗传多样性丰富<sup>[4]</sup>, 栽培品种繁多<sup>[5]</sup>, 而且不同品种的适应性差异较大<sup>[6]</sup>, 叶片矿质元素的含量受品种、立地条件、林分年龄、管理措施等多个因素的影响, 研究树体矿质营养特征, 是开展科学营养管理和新品种培育等工作的基础。目前, 关于油茶矿质营养特征等方面的研究, 多集中在单个或几个品种的 N、P、K、Ca、Mg、Mn、Al 等大中量元素上, 如主要矿质元素的吸收利用规律<sup>[7-10]</sup>、铝和锰元素的超积累和利用特征<sup>[11-13]</sup>、磷的高效吸收<sup>[14]</sup>等, 而对 Fe、Ba、Na、Sr、B、Zn、Cu 等微量元

素的分析研究相对较少, 对油茶叶片矿质元素的含量特征认识仍然较为局限。基于此, 本研究以广泛栽培的‘长林 40 号’、‘长林 23 号’和‘长林 53 号’3 个‘长林’系列油茶良种为研究对象, 对不同土壤条件下正常生长林分叶片中 17 种矿质元素的含量进行测定和分析, 解析油茶叶片的矿质元素含量特征及其在品种间的差异性, 以期为进一步开展油茶树体矿质营养吸收利用机制研究和科学营养管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于浙江省江山市清湖镇 (试验点 1) 和青田县船寮镇 (试验点 2) 油茶采穗圃, 属低山丘陵区, 具有典型亚热带季风季候, 土壤以红黄壤为主, 江山市清湖镇基地海拔 100 m, 年平均气温 17  $^{\circ}\text{C}$ , 年降水量 1 850 mm, 土壤有机质含量 25.3  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 青田县船寮镇基地海拔 300 m, 年平均气温 17  $^{\circ}\text{C}$ , 年降水量 1 700 mm, 土壤有机质含量 11.9  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。两个试验点的土壤矿质元素含量特征见表 1。

表 1 两个试验点的土壤矿质元素含量

Table 1 The contents of mineral elements in soil of the two tested sites

地点	水解性氮 N( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有效磷 P( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾 K( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	钙 Ca( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	镁 Mg( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	铜 Cu( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有效铁 Fe( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	锌 Zn( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
江山	82.1	14.0	129	1.55	2.08	18.2	21.7	50.3
青田	55.2	10.9	39.3	0.876	1.64	35.6	18.4	45.1
地点	锰 Mn( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	镍 Ni( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	交换性铝 Al( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	钡 Ba( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	钠 Na( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	锶 Sr( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	硼 B( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	钛 Ti( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
江山	2.89	24.3	158	406	15.4	208	21.7	4.34
青田	2.46	30.4	206	342	28.2	179	16.4	5.68

基地主要油茶良种为‘长林 40 号’、‘长林 53 号’、‘长林 18 号’、‘长林 23 号’、‘长林 4 号’等“长林”系列国家审定油茶良种, 2010 年种植, 株行距 2 m  $\times$  3 m, 正常管理。

### 1.2 试验方法

2020 年 7 月, 分别在两个试验点随机选取正常生长的‘长林 40 号’(CL40)、‘长林 53 号’(CL53)和‘长林 23 号’(CL23)植株各 10 株, 分单株进行取样和测定。在树冠中部东、西、南、北 4 个方向, 采取正常的当年生春梢中部叶片 (顶叶往下第

3、第 4 片叶) 30~50 片, 进行矿质元素含量分析。

### 1.3 测定方法

叶片样品用电阻率为 18  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$  超纯水清洗 3 遍, 105  $^{\circ}\text{C}$  杀青 30 min, 70~80  $^{\circ}\text{C}$  下烘干至恒质量并粉碎, 用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  湿灰化, 凯氏定氮法测定氮元素含量, 钼锑抗比色法测定磷元素含量, 硫酸钡比浊法测定硫元素的含量, 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 法测定 K、Ca、Mg、Zn、Cu、Fe、Mn、Al、Ba、Na、Sr、B、Ni 和 Ti 元素的含量。所有测定工作在国家林业和草原局经济林产品质量

检验检测中心（杭州）完成。

#### 1.4 数据分析

数据采用 SPSS18.0 和 Microsoft Excel 2003 软件进行统计分析并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同品种油茶品种叶片矿质元素含量特征分析

由表 2 可知，油茶叶片各大中量矿质元素中，N 元素的含量最高，平均含量为 14.45 g·kg<sup>-1</sup>，其次为 Ca、

K 和 Al 元素，平均含量为 3.12 ~ 6.79 g·kg<sup>-1</sup>，P、S、Mg 和 Mn 元素平均含量较低，为 0.79 ~ 1.68 g·kg<sup>-1</sup>；微量元素部分，Fe、Ba 和 Na 元素的含量较高，平均含量为 45.54 ~ 71.94 mg·kg<sup>-1</sup>，其次为 Sr 和 B 元素，平均含量分别为 21.10 和 14.73 mg·kg<sup>-1</sup>，Zn、Cu、Ni 和 Ti 元素含量最低，平均在 1.43 ~ 9.52 mg·kg<sup>-1</sup> 之间；油茶叶片矿质元素含量高低顺序为 N>Ca、K、Al>P、S、Mg、Mn>Fe、Ba、Na>Sr、B>Zn、Cu、Ni、Ti。

表 2 不同品种油茶叶片矿质元素含量多重比较

Table 2 Multiple comparison of mineral element contents in leaves from different varieties of *C. oleifera*

元素	品种	含量		元素	品种	含量	
		试验点 1	试验点 2			试验点 1	试验点 2
N/ (g·kg <sup>-1</sup> )	CL40	16.21±1.09 <sup>a</sup>	14.23±2.56 <sup>b</sup>	Cu/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CL40	5.56±0.68 <sup>a</sup>	3.48±0.46 <sup>a</sup>
	CL53	15.02±1.04 <sup>b</sup>	16.65±1.43 <sup>a</sup>		CL53	4.52±0.47 <sup>b</sup>	3.81±0.34 <sup>a</sup>
	CL23	10.65±0.81 <sup>c</sup>	13.95±0.95 <sup>b</sup>		CL23	3.26±0.33 <sup>c</sup>	3.95±0.99 <sup>a</sup>
	平均值	14.45 ± 2.38			平均值	4.10 ± 0.95	
Ca/ (g·kg <sup>-1</sup> )	CL40	7.96±1.12 <sup>a</sup>	6.63±1.60 <sup>a</sup>	Zn/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CL40	9.89±1.57 <sup>a</sup>	10.37±2.44 <sup>a</sup>
	CL53	8.16±0.86 <sup>a</sup>	6.96±2.34 <sup>a</sup>		CL53	8.74±1.50 <sup>ab</sup>	11.24±4.57 <sup>a</sup>
	CL23	5.92±0.60 <sup>b</sup>	5.12±1.28 <sup>b</sup>		CL23	7.56±1.06 <sup>b</sup>	7.37±0.75 <sup>b</sup>
	平均值	6.79 ± 1.72			平均值	9.53 ± 4.11	
K/ (g·kg <sup>-1</sup> )	CL40	4.45±0.71 <sup>c</sup>	5.59±0.98 <sup>a</sup>	Al/ (g·kg <sup>-1</sup> )	CL40	3.54±0.23 <sup>a</sup>	2.97±0.34 <sup>a</sup>
	CL53	5.25±0.67 <sup>b</sup>	6.26±1.30 <sup>a</sup>		CL53	3.54±0.29 <sup>a</sup>	3.09±0.34 <sup>a</sup>
	CL23	7.71±0.82 <sup>a</sup>	5.94±1.01 <sup>a</sup>		CL23	2.67±0.24 <sup>b</sup>	2.91±0.25 <sup>a</sup>
	平均值	5.87 ± 1.34			平均值	3.12 ± 0.42	
P/ (g·kg <sup>-1</sup> )	CL40	0.86±0.05 <sup>a</sup>	0.83±0.11 <sup>b</sup>	Ba/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CL40	106.41±28.11 <sup>a</sup>	117.24±69.10 <sup>a</sup>
	CL53	0.83±0.06 <sup>a</sup>	0.93±0.08 <sup>a</sup>		CL53	86.28±35.25 <sup>a</sup>	55.17±41.50 <sup>b</sup>
	CL23	0.56±0.04 <sup>c</sup>	0.75±0.05 <sup>b</sup>		CL23	17.40±5.89 <sup>b</sup>	49.16±26.66 <sup>b</sup>
	平均值	0.79 ± 0.13			平均值	71.94 ± 50.94	
S/ (g·kg <sup>-1</sup> )	CL40	1.18±0.08 <sup>a</sup>	1.00±0.20 <sup>ab</sup>	Na/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CL40	54.19±5.20 <sup>a</sup>	51.21±9.66 <sup>a</sup>
	CL53	0.99±0.06 <sup>b</sup>	1.06±0.08 <sup>a</sup>		CL53	48.68±6.07 <sup>bc</sup>	55.47±14.13 <sup>a</sup>
	CL23	0.74±0.05 <sup>c</sup>	0.94±0.09 <sup>b</sup>		CL23	45.33±4.96 <sup>c</sup>	46.93±3.60 <sup>a</sup>
	平均值	0.98 ± 0.17			平均值	51.90 ± 13.01	
Mg/ (g·kg <sup>-1</sup> )	CL40	1.87±0.19 <sup>a</sup>	1.55±0.35 <sup>a</sup>	Ni/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CL40	3.67±0.81 <sup>a</sup>	1.90±0.50 <sup>a</sup>
	CL53	1.80±0.26 <sup>a</sup>	1.43±0.32 <sup>a</sup>		CL53	1.99±0.39 <sup>b</sup>	1.77±0.56 <sup>a</sup>
	CL23	1.71±0.20 <sup>a</sup>	1.69±0.36 <sup>a</sup>		CL23	1.36±0.19 <sup>c</sup>	1.95±0.66 <sup>a</sup>
	平均值	1.68 ± 0.31			平均值	2.11 ± 0.90	
Mn/ (g·kg <sup>-1</sup> )	CL40	1.68±0.59 <sup>b</sup>	1.04±0.65 <sup>a</sup>	Sr/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CL40	16.88±5.00 <sup>a</sup>	35.50±15.11 <sup>a</sup>
	CL53	2.28±0.56 <sup>a</sup>	0.66±0.34 <sup>ab</sup>		CL53	16.09±5.12 <sup>a</sup>	26.38±9.66 <sup>b</sup>
	CL23	0.14±0.03 <sup>c</sup>	0.54±0.19 <sup>b</sup>		CL23	11.33±1.66 <sup>b</sup>	20.44±6.09 <sup>b</sup>
	平均值	1.06 ± 0.84			平均值	21.10 ± 11.15	
B/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CL40	29.43±5.89 <sup>a</sup>	4.68±2.72 <sup>b</sup>	Ti/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CL40	1.61±0.14 <sup>a</sup>	1.42±0.25 <sup>a</sup>
	CL53	25.81±1.43 <sup>b</sup>	8.97±3.14 <sup>a</sup>		CL53	1.66±0.30 <sup>a</sup>	1.41±0.22 <sup>a</sup>
	CL23	14.56±2.87 <sup>c</sup>	4.96±2.04 <sup>b</sup>		CL23	1.30±0.10 <sup>b</sup>	1.20±0.11 <sup>b</sup>
	平均值	14.73 ± 10.23			平均值	1.43 ± 0.27	
Fe/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CL40	63.73±10.13 <sup>a</sup>	40.15±10.87 <sup>a</sup>				
	CL53	61.78±10.38 <sup>a</sup>	41.34±4.89 <sup>a</sup>				
	CL23	33.00±6.85 <sup>b</sup>	33.26±4.78 <sup>b</sup>				
	平均值	45.54 ± 14.89					

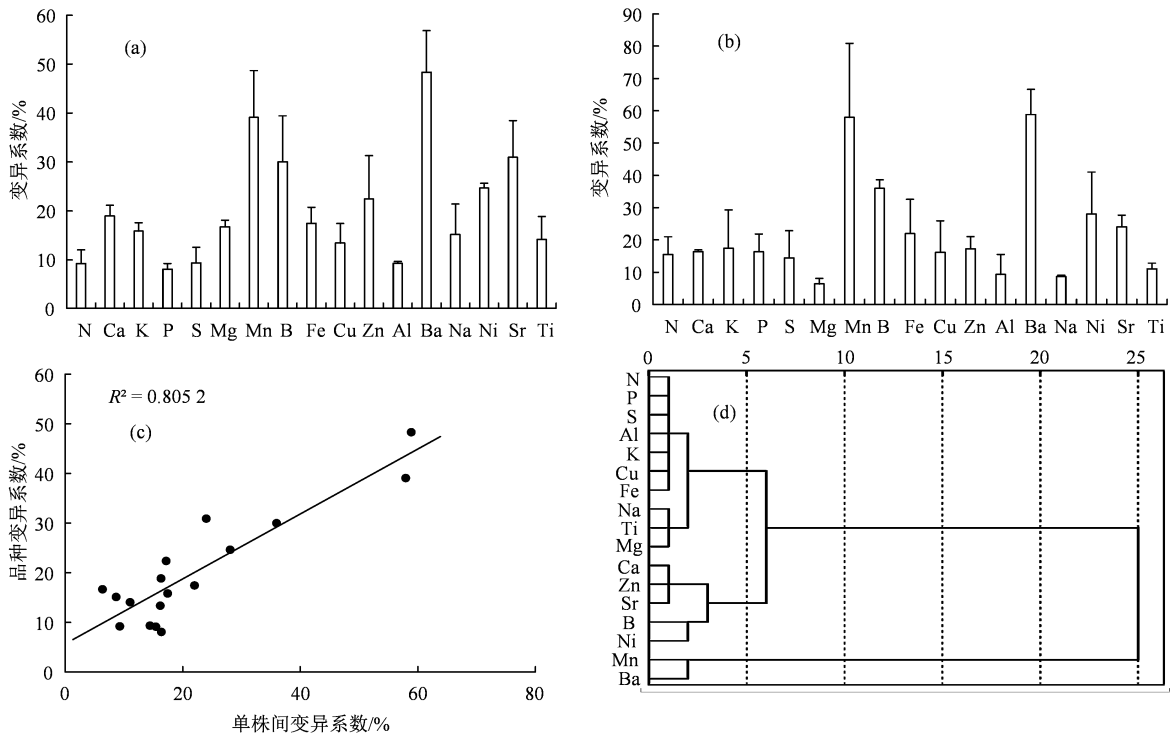
注：采用 LSD 法进行多重比较，小写字母表示 0.05 水平上的显著差异性。

各矿质元素含量在供试 3 个品种间差异显著，并且在不同立地条件下表现不同。如江山试验点

‘长林 40 号’、‘长林 53 号’和‘长林 23 号’叶片 K 元素含量分别为 4.45、5.25 和 7.71 g·kg<sup>-1</sup>，差异

显著, 而青田试验点 3 个品种叶片的 K 元素含量分别为 5.59、6.26 和 5.94 g·kg<sup>-1</sup>, 无显著差异。总体来看, 供试品种叶片 K、Cu、Al、Na 和 Ni 元素含量仅在一个试验点呈现出显著性差异, 而 N、Ca、

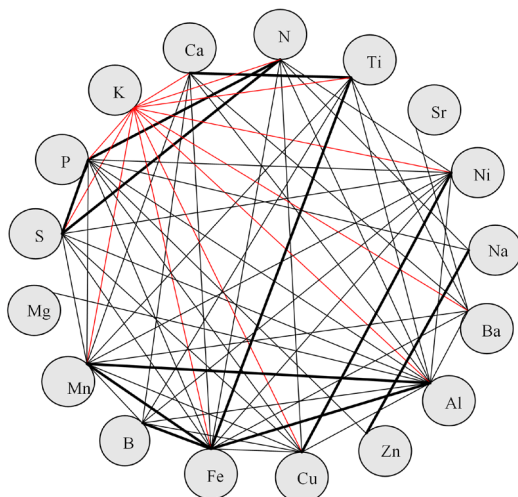
P、S、Mn、B、Fe、Zn、Ba、Sr 和 Ti 元素含量在两个试验点均呈现出显著性差异, Mg 元素含量则在两个试验点均无显著性差异。这可能与各品种对矿质元素的吸收利用特性差异有关。



(a) 单株间各矿质元素的变异系数; (b) 不同品种间各矿质元素的变异系数; (c) 单株间矿质元素的变异系数与不同品种间矿质元素的变异系数相关性; (d) 各矿质元素变异系数聚类分析。

图 1 油茶叶片各矿质元素含量的变异系数

Figure 1 Coefficient of variation of mineral element contents in leaves of *C. oleifera*



仅对相关系数  $r > 0.4$  ( $P < 0.05$ ) 进行标示, 其中黑色线条表示正相关, 红色线条表示负相关, 粗线条表示相关系数  $r > 0.7$ , 细线条表示  $0.4 \leq r \leq 0.7$ 。

图 2 矿质元素间的相关性

Figure 2 The correlations among different mineral elements

## 2.2 各矿质元素的变异系数分析

分别对品种间以及品种内单株间各矿质元素含

量的变异系数进行了分析, 结果 (图 1) 表明, 各矿质元素在单株间的变异系数在 8.01%~48.26%之间, 品种间的变异系数在 6.32%~58.85%之间; N、Ca、K、P、S、Mg、Cu、Al、Na 和 Ti 元素含量在品种间和品种内单株间的变异系数较低, 均在 20% 以下; Mn 和 Ba 元素含量的变异系数较高, Ni、Sr 和 B 元素含量的变异系数居中。相关性分析表明, 各矿质元素含量的品种间和品种内变异系数呈显著正相关关系 ( $R^2 = 0.8052$ ,  $P < 0.05$ )。本研究两个试验点范围内, N、P 和 S 3 种元素在品种间的变异系数均显著高于品种内单株间的变异系数。聚类分析表明, 根据变异系数的大小, 可将 17 种矿质元素分为 3 组: N、P、S、Al、K、Cu、Fe、Na、Ti 和 Mg 元素为一组, 变异系数相对较小; Ca、Zn、Sr、B 和 Ni 元素为一组, 变异系数居中; Mn 和 Ba 元素的变异系数最高。

## 2.3 油茶叶片各矿质元素含量间的相关性

如表 3 所示, 油茶叶片各矿质元素间存在复杂的相互关系, N、P 和 S, Fe、Mn 和 Al, B 和 Fe,

Zn 和 Na, Cu 和 Ni, Ti 和 Ca, Ti 和 Fe 7 组元素间存在显著强正相关关系, 其中 N 和 P、S 元素间的相关系数分别为 0.916 和 0.907, Mn 和 Fe、Al 元素间的相关系数分别为 0.810 和 0.759, B 和 Fe, Zn 和 Na, Fe 和 Ti, Cu 和 Ni 以及 Ca 和 Ti 元素含量间的相关关系分别为 0.741、0.783、0.734、0.794 和 0.776; K 元素含量则与其他各元素含量间均呈现负相关关系; 从中度相关或强相关元素的数量来看 (图 2), K、Mn、Fe、Al 均与 11 种及以上矿质元素存在显著相关关系, 而与 Mg、Zn、Na 和 Sr 显著相关的元素数量最少。

## 2.4 油茶叶片特征矿质元素分析

鉴于各矿质元素间存在显著相关性, 对 3 个品种间具有显著差异的 16 种矿质元素 (Mg 元素除外) 进行主成分分析。结果显示前 4 个主成分的累积贡献率为 78.685%, 其中第 1 主成分特征值为 4.153, 贡献率 25.956%, Ca、Ba 和 Ti 元素具有较高荷载; 第 2 主成分特征值为 3.646, 贡献率 22.790%, N、P 和 S 元素具有较高荷载; 第 3 主成分特征值为 2.996, 贡献率为 18.727%, B 和 Sr 元素具有较高荷载; 第 4 主成分特征值为 1.794, 贡献率 11.212%, Na 元素具有较高荷载 (表 4)。

表 3 矿质元素间双变量相关性分析 ( $n = 60$ )

Table 3 Mineral correlation analysis ( $n = 60$ )

元素	N	Ca	K	P	S	Mg	Mn	B	Fe	Cu
N	1.000	0.179	-0.424**	<b>0.916**</b>	<b>0.907**</b>	-0.265*	0.378*	0.189	0.499**	0.550**
Ca		1.000	-0.537**	0.257*	0.208	0.278*	0.582**	0.534**	0.546**	0.362**
K			1.000	-0.468**	-0.451**	-0.324*	-0.502**	-0.334**	-0.477**	-0.571**
P				1.000	<b>0.839**</b>	-0.186	0.413**	0.109	0.495**	0.491**
S					1.000	-0.190	0.420**	0.290*	0.566**	0.631**
Mg						1.000	0.275**	0.348**	0.256**	0.333**
Mn							1.000	0.621**	<b>0.810**</b>	0.562**
B								1.000	<b>0.741**</b>	0.657**
Fe									1.000	0.691**
Cu										1.000
Zn										
Al										
Ba										
Na										
Ni										
Sr										
Ti										

元素	Zn	Al	Ba	Na	Ni	Sr	Ti
N	0.357**	0.467**	0.267*	0.415*	0.508**	0.191	0.180
Ca	0.133	0.620**	0.568**	0.173	0.234	0.223	<b>0.776**</b>
K	-0.157	-0.561**	-0.523**	-0.056	-0.486**	-0.092	-0.423**
P	0.444**	0.502**	0.399**	0.433**	0.420**	0.379**	0.273**
S	0.336**	0.464**	0.336**	0.376**	0.658**	0.183	0.228
Mg	-0.245	0.445**	0.199	-0.315*	0.174	-0.162	0.249
Mn	0.158	<b>0.759**</b>	0.622**	0.085	0.462**	0.090	0.642**
B	0.041	0.572**	0.206	0.007	0.514**	-0.382**	0.507**
Fe	0.170	<b>0.784**</b>	0.489**	0.031	0.622**	-0.027	<b>0.734**</b>
Cu	0.179	0.645**	0.314*	0.138	<b>0.794**</b>	-0.221	0.390**
Zn	1.000	0.144	0.258*	<b>0.783**</b>	0.249	0.355**	0.138
Al		1.000	0.489**	0.059	0.496**	0.064	0.561**
Ba			1.000	0.182	0.370**	0.596**	0.560**
Na				1.000	0.186	0.362**	0.090
Ni					1.000	-0.151	0.360**
Sr						1.000	0.158
Ti							1.000

注: 采用 Pearson 法进行相关性分析, \*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上的显著性。

表 4 主成分分析结果

Table 4 Results of principal component analysis

元素	主成分			
	1	2	3	4
N	0.073	<b>0.951</b>	0.131	0.133
Ca	<b>0.872</b>	0.069	0.132	0.001
K	-0.489	-0.344	-0.264	-0.278
P	0.203	<b>0.892</b>	-0.025	0.272
S	0.110	<b>0.899</b>	0.230	0.202
Mn	0.718	0.249	0.384	0.168
B	0.447	0.042	<b>0.780</b>	-0.005
Fe	0.631	0.403	0.542	0.051
Cu	0.264	0.476	0.705	0.198
Zn	0.095	0.323	-0.170	0.601
Al	0.634	0.360	0.422	0.133
Ba	<b>0.760</b>	0.203	-0.150	0.400
Na	-0.100	-0.029	0.175	<b>0.897</b>
Ni	0.178	0.446	0.616	0.343
Sr	0.399	0.283	<b>-0.780</b>	0.229
Ti	<b>0.850</b>	0.090	0.210	-0.010
特征值	4.153	3.646	2.996	1.794
贡献率/%	25.956	22.790	18.727	11.212
累积贡献率/%	25.956	48.746	67.473	78.685

表 5 品种判别分析分类结果

Table 5 The result of discriminant analysis on varieties

项目	品种	预测组成员			合计
		CL23	CL40	CL53	
计数	CL23	20	0	0	20
	CL40	1	19	0	20
	CL53	0	1	19	20
百分比/%	CL23	100.0	0.0	0.0	100.0
	CL40	5.0	95.0	0.0	100.0
	CL53	0.0	5.0	95.0	100.0

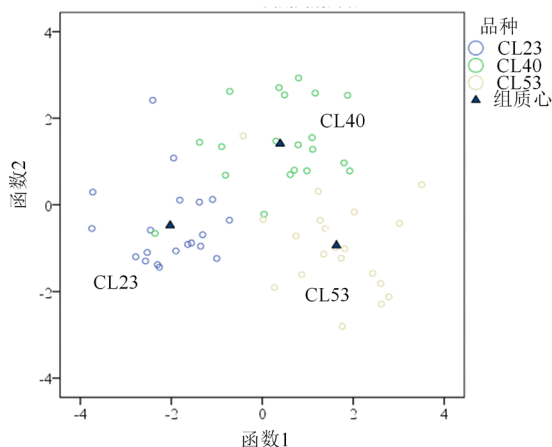


图 3 品种判别函数

Figure 3 Variety discrimination function

以各成分上荷载较高的 N、P、S、Ca、Ba、Ti、B、Sr 和 Na 元素为变量, 对两个试验点的 3 个品种进行判别分析, 其中函数 1 的各矿质元素系数分别为

0.204、14.146、-0.679、0.298、-0.268、347.595、45.872、6.512 和 1.889, 常量为 -10.752; 函数 2 的各矿质元素系数则分别为 0.646、-4.491、13.926、-0.159、19.742、-565.708、-6.347、9.359 和 3.705, 常量为 -0.613。判别正确率达 96.70%(图 3 和表 5), ‘长林 40 号’、‘长林 53 号’和 ‘长林 23 号’ 3 个品种的组质心分别为(0.395, 1.410)、(1.631, -0.934)和 (-2.026, -0.477), 区分效果较为理想。

### 3 讨论与结论

作为我国南方亚热带地区生长的多年生灌木或灌乔木树种, 油茶与一年生的蔬菜作物相比, 叶片 Fe、P、K 元素含量较低, Al、Mn、Cu 元素含量较高<sup>[15]</sup>; 与柑橘类常绿果树相比, 叶片中的 N、P、K、Ca、Mg、S 等大中量元素含量较低, Fe、Zn、Cu 等微量元素含量类似<sup>[16]</sup>, Al、Mn 元素含量较高; 与同一科属的茶叶相比, 油茶叶片 Al 元素的含量更高, 约为茶叶 5~10 倍<sup>[17]</sup>。可见, 油茶树是典型的铝锰富集植物, 其对 Al 元素的富集能力更强<sup>[12, 18]</sup>; 此外, 不同品种油茶叶片矿质元素的含量高低相对一致。本研究中 ‘长林 40 号’、‘长林 23 号’、‘长林 53 号’ 与前期在 ‘长林 4 号’<sup>[7-8]</sup> 以及其他品种或类型<sup>[10, 19-20]</sup> 上的研究结果相一致。可见, 油茶叶片矿质元素含量高低顺序 (N>Ca、K、Al>P、S、Mg、Mn>Fe、Ba、Na>Sr、B>Zn、Cu、Ni、Ti) 具有普遍意义。

不同油茶品种间叶片矿质元素含量存在差异, 如前期研究也发现 ‘长林 53 号’ 叶片 N、P、K 矿质元素的平均含量显著高于 ‘长林 4 号’<sup>[7]</sup>, 这可能跟基因型的差异有关。此外, 油茶叶片矿质元素的含量并非稳定不变的, 在同一地点, 相同品种单株间不同矿质元素含量的变异系数在 8.01%~48.26% 之间, 品种间的变异系数在 6.32%~58.85% 之间 (图 1), 差异较大。矿质元素含量的变异系数一方面体现了树体对特定环境条件的适应性, 另一方面也体现了基因型在营养利用特征方面的差异。本研究明确了各矿质元素含量的变异系数, 为进一步开展油茶叶片矿质元素的分析和开展营养高效利用品种的筛选研究提供了参考。

植物矿质离子间存在复杂的相互作用关系<sup>[21]</sup>, 而且在不同植物或树种间表现不同<sup>[22-24]</sup>。本研究分析了典型的铝锰富集油茶叶片的矿质离子间的相互关系, 其中, N、P 和 S 3 种元素间表现出显著强正相关关系, 这与其他植物的研究结果相一致<sup>[25]</sup>; K 元素含量则与其他各元素含量间均呈现负相关关

系,这可能与 $K^+$ 与N、Ca、P等矿质元素间易形成拮抗作用有关;Fe、Mn和Al 3种元素间呈显著强正相关,表明三者存在较强的协同吸收关系,Al元素的平衡供给一定程度上有利于油茶对Fe和Mn元素的吸收,从而促进植物的正常生长<sup>[26]</sup>,这为解析油茶铝利用机制提供了参考;此外,K、Mn、Fe、Al均与11种及以上矿质元素存在显著中度相关或强相关关系(图2),可见在油茶的营养利用和管理中,除N、P、K、Ca、Mg和S元素外,还需注意Fe、Mn和Al营养协同吸收关系和平衡。

植物矿质元素指纹特征不仅用于产地追溯研究<sup>[27]</sup>,而且也用来进行品种判别和评价分析<sup>[28-30]</sup>,但在油茶相关研究中,基于品种特性的矿质元素含量特征和判别分析还鲜见相关报道。本研究中,以各主成分上荷载较高的N、P、S、Ca、Ba、Ti、B、Sr和Na元素为变量对江山和青田两个试验点的‘长林40号’、‘长林23号’和‘长林53号’3个品种进行判别分析,判别正确率分别达到了95%、95%和100%,总体正确率达96.70%(表5)。可见,‘长林40号’、‘长林23号’和‘长林53号’3个品种矿质元素含量特征差异较大,是3个不同的矿质营养利用类型,N、P、S、Ca、Ba、Ti、B、Sr和Na元素可作为该3个品种的特征元素用于品种的判别分析,这为进一步利用矿质元素指纹开展不同品种营养利用特征分析提供了思路。

## 参考文献:

- [1] 庄瑞林. 中国油茶[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2008: 3-4
- [2] MA J L, YE H, RUI Y K, et al. Fatty acid composition of *Camellia oleifera* oil[J]. J Für Verbraucherschutz Und Lebensmittelsicherheit, 2011, 6(1): 9-12.
- [3] BAXTER I. Ionomics: The functional genomics of elements[J]. Brief Funct Genomics, 2010, 9(2): 149-156.
- [4] 姚小华, 任华东. 中国油茶遗传资源[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [5] 姚小华. 中国油茶品种志[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [6] 张平安, 孙凡, 姚小华, 等. 油茶高产无性系生长特性及稳定性分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 12-17.
- [7] 曹永庆, 任华东, 林萍, 等. 油茶树体对氮磷钾元素年吸收和积累规律的研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(4): 442-448.
- [8] 曹永庆, 王开良, 任华东, 等. 油茶树体对钙镁硫元素年吸收和积累规律研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(10): 58-62, 68.
- [9] 王增, 蒋仲龙, 刘海英, 等. 油茶不同器官氮、磷、钾化学计量特征随年龄的变化[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(2): 264-270.
- [10] 严江勤, 曹永庆, 姚小华, 等. 油茶春梢发育期叶片和果实中氮磷钾元素的动态变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(2): 50-55.
- [11] 曹永庆, 任华东, 王开良, 等. 油茶树体锰元素含量和积累量的变化规律[J]. 经济林研究, 2012, 30(1): 19-22, 39.
- [12] ZENG Q L, CHEN R F, ZHAO X Q, et al. Aluminium uptake and accumulation in the hyperaccumulator *Camellia oleifera* Abel[J]. Pedosphere, 2011, 21(3): 358-364.
- [13] 渠心静, 冯学瑞, 张泽莲, 等. 油茶根尖铝累积及其对酚代谢和抗氧化相关指标的影响[J]. 植物生理学报, 2019, 55(9): 1365-1374.
- [14] 王金路, 陈永忠, 张党权, 等. 不同磷源对油茶幼苗生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(5): 47-50.
- [15] WATANABE T, MAEJIMA E, YOSHIMURA T, et al. The ionic study of vegetable crops[J]. PLoS One, 2016, 11(8): e0160273.
- [16] 刁莉华. 柑橘叶片营养元素含量的季节变化[D]. 重庆: 西南大学, 2013
- [17] 李春华, 王云. 茶树不同品种矿质元素含量研究[J]. 西南农业学报, 2008, 21(5): 1477-1479.
- [18] YU F M, LIU K H, YE P H, et al. Manganese tolerance and accumulation characteristics of a woody accumulator *Camellia oleifera*[J]. Environ Sci Pollut Res, 2019, 26(21): 21329-21339.
- [19] 谢胤, 曹永庆, 余祖华, 等. 腾冲红花油茶营养器官主要矿质元素含量年内变化分析[J]. 西部林业科学, 2019, 48(3): 97-103.
- [20] 段玉林, 杨双花, 徐强, 等. ICP-MS法测定油茶植物不同组织中的28种元素[J]. 作物研究, 2013, 27(4): 359-364.
- [21] 彭德乾, 闫超, 吴友根, 等. ICP-MS法同时测定海南油茶不同部位的24种矿质营养元素含量及富集作用[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8): 202-204.
- [22] BAXTER I, HERMANS C, LAHNER B, et al. Biodiversity of mineral nutrient and trace element accumulation in *Arabidopsis thaliana*[J]. PLoS One, 2012, 7(4): e35121.
- [23] WEBSTER R E, DEAN A P, PITTMAN J K. An assessment of ionic changes in *Chlamydomonas reinhardtii* during phosphorus deficiency and cadmium stress[J]. Comp Biochem Physiol Part A: Mol Integr Physiol, 2009, 153(2): S187-S188.
- [24] QUADIR Q F, WATANABE T, CHEN Z, et al. Ionic response of *Lotus japonicus* to different root-zone temperatures[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2011, 57(2): 221-232.
- [25] WU D, SHEN Q, CAI S, et al. Ionic responses and correlations between elements and metabolites under salt stress in wild and cultivated barley[J]. Plant Cell Physiol, 2013, 54(12): 1976-1988.
- [26] 张德山, 何文寿. 植物营养元素之间的相互关系及其机理[J]. 宁夏农学院学报, 1993, 14(2): 75-81.
- [27] 曾其龙. 铝对油茶生长的影响以及在油茶体内运输研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [28] 陈秋生, 张强, 刘烨潼, 等. 矿质元素指纹技术在植源性特色农产品产地溯源中的应用研究进展[J]. 天津农业科学, 2014, 20(6): 4-8.
- [29] 康海宁, 杨妙峰, 陈波, 等. 利用矿质元素的测定数据判别茶叶的产地和品种[J]. 岩矿测试, 2006, 25(1): 22-26.
- [30] 史天赐, 杨景雯, 骆小瑞, 等. 酿酒葡萄果实中主要矿质元素的品种特性[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 133-140.