

郑淑琳, 石玉涛, 王飞权, 等. 乌龙茶种质资源矿质元素含量特征分析与评价 [J]. 福建农业学报, 2020, 35 (2): 150-160.

ZHENG S L, SHI Y T, WANG F Q, et al. Minerals in Oolong Tea Germplasms [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35 (2): 150-160.

乌龙茶种质资源矿质元素含量特征分析与评价

郑淑琳^{1,2}, 石玉涛^{2*}, 王飞权², 张 渤², 王 涵³, 林 立³, 石元值⁴, 叶乃兴^{1*}

(1. 福建农林大学园艺学院, 福建 福州 350002; 2. 武夷学院茶与食品学院/茶叶福建省高校工程研究中心, 福建 武夷山 354300; 3. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建 武夷山 354300; 4. 中国农业科学院茶叶研究所, 浙江 杭州 310008)

摘 要:【目的】探明不同乌龙茶种质资源中矿质元素含量特征, 明确乌龙茶种质资源的特征矿质元素, 筛选出矿质营养高效的种质, 为乌龙茶品种创新提供科学依据。【方法】以 34 份乌龙茶种质资源为试材, 测定 18 种主要矿质元素含量, 运用因子分析和聚类分析对矿质元素含量特征进行分析和评价。【结果】18 种矿质元素平均含量由高到低次序为 K>P>S>Mg>Ca>Mn>Al>Fe>Na>Zn>Ba>Cu>B>Ti>Ni>Cr>Co>Se, 变异系数在 15.75%~69.43%, 遗传多样性指数为 1.27~2.21。Shapiro-Wilk 检验表明 B、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、S、Se、Zn 等 10 种元素含量呈正态分布, Al、Ba、Ca、Co、Cr、Cu、Fe、Ti 等 8 种元素含量呈偏态分布。相关性分析表明各元素之间存在复杂的关联性。通过主成分分析, 将 18 种矿质元素综合为 5 个主成分, 代表了 18 种矿质元素 77.40% 的信息。聚类分析将 34 份乌龙茶种质资源分为 3 类。【结论】34 份乌龙茶种质资源中 18 种矿质元素的组成存在差异, 乌龙茶种质资源的特征元素是 Mn、Ca、Mg、Al、K、P、S, 可分为高 P、Zn, 低 Al、Ca、Mn、Mg 类型, 高 Al、Ca、Mn、Mg、K、S 类型和低 K、P、S、Zn 类型 3 类。矿质元素富集能力强、矿质营养高效的 5 份乌龙茶种质是芝兰香、本山、瑞香、铁观音、黄旦, 可作为推广栽培、新品种选育和产品开发的优良亲本材料。
关键词: 乌龙茶; 种质资源; 矿质元素; 聚类分析; 主成分分析

中图分类号: S 571.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2020) 02-0150-11

Minerals in Oolong Tea Germplasms

ZHENG Shu-lin^{1,2}, SHI Yu-tao^{2*}, WANG Fei-quan², ZHANG Bo², WANG Han³, LIN Li³, SHI Yuan-zhi⁴, YE Nai-xin^{1*}

(1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. College of Tea and Food Science, Wuyi University/Tea Engineering Research Center of Fujian Higher Education, Wuyishan, Fujian 354300, China; 3. College of Ecological and Resources Engineering, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China; 4. Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310008, China)

Abstract: 【Objective】Characteristics and contents of minerals in Oolong tea germplasms were studied to facilitate the classification, cultivar selection, and new variety breeding on tea plants. 【Method】Contents of 18 minerals in 34 Oolong tea germplasms were determined by ICP-OES, and classified using principal component and cluster analyses. 【Result】The average mineral contents in the specimens were found to be in the order of K>P>S>Mg>Ca>Mn>Al>Fe>Na>Zn>Ba>Cu>B>Ti>Ni>Cr>Co>Se. The coefficients of variation ranged from 15.75% on P to 69.43% on Ti. The average genetic diversity indices varied from 1.27 on Ti to 2.21 on Zn. The contents of B, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, S, Se, and Zn followed the normal distribution pattern, while those of Al, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, and Ti a skew distribution, according to a W test. The correlations among these minerals were complex. The principal component analysis classified the 18 minerals into 5

收稿日期: 2019-12-24 初稿; 2020-01-18 修改稿

作者简介: 郑淑琳 (1986-), 女, 实验师, 研究方向: 茶树栽培育种与品质化学 (E-mail: zhengsl2011@163.com)

* 通信作者: 石玉涛 (1984-), 男, 讲师, 研究方向: 茶树栽培育种与品质化学 (E-mail: ytshi@wuyiu.edu.cn); 叶乃兴 (1963-), 男, 教授, 研究方向: 茶树栽培育种与品质化学 (E-mail: ynxtea@126.com)

基金项目: 茶学福建省高校重点实验室开放课题项目 (KLTS2018003); 福建省中青年骨干教师教育科研项目 (JAT190800); 福建省第二批省级“2011 协同创新中心”项目 (闽教科 [2015]75 号); 福建省科技计划创新平台项目 (2018N2004)

groups that covered 77.40% of the total. By the cluster analysis, the 34 tea germplasms were grouped into 3 categories.

【Conclusion】 Mainly Mn, Ca, Mg, Al, K, P and S, the mineral compositions in the 34 Oolong tea germplasms differed. Based on their varied contents, the germplasms were classified into 3 types including (a) high P, Zn and low Al, Ca, Mn, Mg, (b) high Al, Ca, Mn, Mg, K, S, and (c) low K, P, S, Zn. Five Oolong teas with high mineral accumulation capacity and nutritional value were Zhilanxiang, Benshan, Ruixiang, Tieguanyin, and Huangdan, which were considered desirable cultivars for large scale cultivation and new variety breeding as well as product development for marketing.

Key words: Oolong tea; germplasm; minerals; cluster analysis; principal component analysis

0 引言

【研究意义】乌龙茶是我国六大茶类之一，以其独特的品质和良好的降血糖、抗氧化、抗突变等保健功效而受到消费者的青睐，在国内外市场享有很高声誉^[1]。矿质元素不仅是茶树生长发育和品质形成的物质基础，而且是茶叶营养价值的重要表现。矿质元素在人体中具有重要的生理功能，对维护人体健康具有重要作用^[2]。研究表明，乌龙茶中含有丰富的矿质元素，经常饮用乌龙茶可补充人体所需的矿物质和微量元素等^[3]。茶树种质资源是茶树品种选育创新、产品开发的重要物质基础，优异种质资源的筛选利用一直是茶树种质资源研究领域的重点^[4]。开展乌龙茶种质资源矿质元素含量的分析和评价，筛选矿质元素富集能力强的乌龙茶种质，对乌龙茶新品种的选育、产品开发和产业持续发展具有重要意义。【前人研究进展】目前，关于乌龙茶种质资源的农艺性状^[5]、主要生化成分^[6]、多糖提取工艺及活性^[7]、遗传多样性^[8]等方面已有较多研究，但在不同乌龙茶种质资源矿质元素富集特征、营养保健价值评价和筛选方面的系统研究还尚未见报道。研究显示，茶树新梢中的矿质元素除了与土壤养分和灌溉、施肥、降水量等立地条件相关外，还受茶树自身对矿质元素的选择性吸收、运转和分配等因素的影响，即与茶树的品种遗传特性有关。如时鹏涛等^[9]研究了湘波绿等7个茶树品种中Ca、Mg、Mn等9种矿质元素的含量及富集特性，结果表明不同品种的茶树对矿质元素的富集能力存在较大差异；金孝芳等^[10]研究结果显示湖北主栽茶树品种中矿质元素含量存在差异；李春华等^[11]研究发现9种元素在茶树品种间差异显著。因子分析是多指标综合评价中一种常用的多元统计方法，通过降维过程，将多个指标转化为少数几个相互独立的新指标，再根据各样品的因子得分进行综合评价，使得评价结果更加合理^[12]。近年来，因子分析已被广泛运用于不同品种苹果^[13]、锥栗^[14]、杧果^[15]等植物种质资源的矿质营养评价工作中。【本研究切入点】乌龙茶种

质资源丰富，武夷学院茶树种质资源圃已保存乌龙茶种质100余份，矿质元素分析评价工作亟待开展。本研究以34份乌龙茶种质资源为试材，以18种主要矿质元素为检测指标，采用因子分析和聚类分析方法对乌龙茶种质资源矿质元素含量和富集特征进行分析和综合评价。【拟解决的关键问题】旨在揭示乌龙茶种质资源中矿质元素的含量特征，明确乌龙茶种质资源的特征矿质元素，筛选出矿质元素富集能力强、矿质营养高效的材料，为乌龙茶育种目标性状的选择、乌龙茶种质资源的开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的34份乌龙茶种质资源材料采集自武夷学院茶树种质资源圃（27°44'20"N，117°59'51"E），每份种质资源种植小区长×宽为20 m×1.8 m，株数为150株，树龄为5年生，基本情况见表1。武夷学院茶树种质资源圃位于福建省武夷山市，属中亚热带季风湿润气候区，光照充足，雨量丰沛，温湿度适宜，适合茶树生长。年平均气温18.3℃，1月平均气温7.8℃，7月平均气温27.8℃，10℃以上的活动积温在5 000℃以上，年平均日照时数1 629.5 h，年平均降雨量1 926.9 mm，相对湿度在80%左右。圃内种质资源材料均由其来源地取无病虫害的枝梢进行扦插繁育，之后按照茶树种质资源圃的建设标准移植、编号、保存于武夷学院茶树种质资源圃，以相同条件进行管理。试验地立地条件和肥水管理一致。

1.2 主要仪器与试剂

iCAP 6000 Series等离子体发射光谱仪，美国Thermo Scientific公司；DigiBlock ED54电热消解仪，北京LabTech公司；Ca、Na等标准液，购自国家有色金属及电子材料分析测试中心；硝酸，优级纯；高氯酸，优级纯。

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集 于2018年4月采摘参试的34份乌龙茶种质资源春梢，采摘标准为一芽二叶。每份种

表 1 供试乌龙茶种质资源基本情况
Table 1 Basic information on Oolong tea germplasms

序号 No.	编号 Code	名称 Name	来源 Origin	序号 No.	编号 Code	名称 Name	来源 Origin
1	OTG01	梅占 Meizhan	福建 Fujian	18	OTG18	紫玫瑰 Zimeigui	福建 Fujian
2	OTG02	毛蟹 Maoxie	福建 Fujian	19	OTG19	大红袍 Dahongpao	福建 Fujian
3	OTG03	铁观音 Tieguanyin	福建 Fujian	20	OTG20	春闰 Chungui	福建 Fujian
4	OTG04	黄旦 Huangdan	福建 Fujian	21	OTG21	秋香 Qiuxiang	福建 Fujian
5	OTG05	福建水仙 Fujianshuixian	福建 Fujian	22	OTG22	矮脚乌龙 Aijiaowulong	福建 Fujian
6	OTG06	本山 Benshan	福建 Fujian	23	OTG23	白毛猴 Baimaohou	福建 Fujian
7	OTG07	大叶乌龙 Dayewulong	福建 Fujian	24	OTG24	赤叶奇兰 Chiyeqilan	福建 Fujian
8	OTG08	茗科1号 Mingkeyihao	福建 Fujian	25	OTG25	青心奇兰 Qingxinqilan	福建 Fujian
9	OTG09	黄观音 Huangguanyin	福建 Fujian	26	OTG26	城门 Chengmen	广东 Guangdong
10	OTG10	丹桂 Dangui	福建 Fujian	27	OTG27	探春香 Tanchunxiang	广东 Guangdong
11	OTG11	春兰 Chunlan	福建 Fujian	28	OTG28	芝兰香 Zhilanxiang	广东 Guangdong
12	OTG12	瑞香 Ruixiang	福建 Fujian	29	OTG29	棕榈香 Zongluxiang	广东 Guangdong
13	OTG13	金牡丹 Jinmudan	福建 Fujian	30	OTG30	软枝乌龙 Ruanzhiwulong	台湾 Taiwan
14	OTG14	黄玫瑰 Huangmeigui	福建 Fujian	31	OTG31	翠玉 Cuiyu	台湾 Taiwan
15	OTG15	肉桂 Rougui	福建 Fujian	32	OTG32	金萱 Jinxuan	台湾 Taiwan
16	OTG16	佛手 Foshou	福建 Fujian	33	OTG33	青心大有 Qingxindamao	台湾 Taiwan
17	OTG17	九龙袍 Jiulongpao	福建 Fujian	34	OTG34	青心乌龙 Qingxinwulong	台湾 Taiwan

质资源材料从种植小区中随机选择 60 株以上茶树，从树冠外围中部随机采摘一芽二叶新梢，重复 3 次。新梢采摘后微波杀青固样，烘干、粉碎后过 40 目筛，取筛下样，置于-20℃冰箱中保存备用。

1.3.2 样品预处理 准确称取 1.000 0 g 样品于消煮管中，加入防爆玻璃珠 5 个，加入 V（硝酸）：V（高氯酸）：氢氟酸（2：1：1）=10 mL，盖上盖子，放置 12 h 后进行消化。消煮炉缓慢升温（100℃ 30 min 以上，130℃ 30 min 以上，150℃ 30 min 以上，190℃ 7 h 以上），待红棕色气体散尽继续升温到 200℃~250℃，持续加热至白烟散尽，此时溶液接近无色，蒸近干，稍冷却，加约 5.0 mL 去离子水，再加热，蒸除余酸，冷却。用去离子水冲洗三角瓶及漏斗，将消化好的样品溶液转至 25 mL 容量瓶中，用 2% 硝酸定容至标线，摇匀，倒入到塑料方口瓶（50 mL）保存，待测。

1.3.3 仪器工作参数及标准曲线 将消解液稀释 10 倍后，采用 ICP-OES 测定 Al、B、Ba、Ca、Co、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、S、Se、Ti、Zn 等 18 种矿质元素。ICP-OES 工作参数为：射频功率 1150 W，辅助气流速 0.5 L·min⁻¹，雾化器流速 0.7 L·min⁻¹，采样高度 6.5 mm，泵稳定时间 5 s^[16]。

标准曲线绘制：用 1% 稀硝酸将 Ca、Na 标准贮备液逐级稀释为 0、5、50 μg·mL⁻¹ 的混合标准溶液，其他元素用 1% 稀硝酸逐级稀释为 0、5、10 μg·mL⁻¹ 的混合标准溶液。在 ICP-OES 的工作条件下采集空白溶液（1% HNO₃）和标准溶液系列，由仪器自动绘制标准曲线。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据整理和表格绘制，应用 IBM SPSS Statistics 20.0 统计软件进行单因素方差分析、聚类分析、主成分分析和相关性分析。组间多重比较采用 Duncan 法，聚类分析采用离差平方和法，遗传距离为欧氏距离。主成分分析采用 Factor 过程的主成分分析法，因子提取特征值大于 1 的主成分。以每个性状极差的 1/10 为间距将各性状分为 10 个等级，采用 Shannon-Wiener 指数法计算各矿质元素的遗传多样性指数（H'），计算公式为：多样性指数（H'）=-ΣPi lnPi，其中 Pi 为某性状第 i 个代码出现的频率^[17]。

2 结果与分析

2.1 乌龙茶种质资源矿质元素含量特征

34 份乌龙茶种质资源中 18 种主要矿质元素含量

的平均值、含量范围、变异系数和遗传多样指数见表 2。由表 2 可知，大量元素 Ca、K、Mg、P、S 及微量元素 Mn 的含量远远高于其他 12 种微量元素。方差分析结果表明，K、P、S、Mg、Ca、Mn 之间存在显著差异，大量元素除 Ca 与 Mg 外差异显著，微量元素 Mn 含量显著高于 Al、B、Ba 等其他 12 种微量元素。从大量元素看，5 种大量元素含量由大到小顺序为 K>P>S>Mg>Ca，其中 K、P、S 的含量超过 1 000 mg·kg⁻¹，Mg 和 Ca 的含量低于 1 000 mg·kg⁻¹。从微量元素看，13 种微量元素含量由高到低顺序为

Mn>Al>Fe>Na>Zn>Ba>Cu>B>Ti>Ni>Cr>Co>Se，其中 Mn、Al 的含量超过 100 mg·kg⁻¹，Fe、Na、Zn、Ba、Cu、B、Ti、Ni、Cr、Co、Se 的含量低于 100 mg·kg⁻¹，且 Ba、Cu、B、Ti、Ni、Cr 的含量低于 10 mg·kg⁻¹，Co、Se 的含量低于 1.0 mg·kg⁻¹。13 种微量元素中，Cr 是有害元素。国家农业行业标准《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(NY 659-2003)^[18]规定，茶叶中铬含量不超过 5 mg·kg⁻¹。从表 2 可看出供试的 34 份茶树种质资源材料中 Cr 元素含量均远低于国家标准。

表 2 乌龙茶种质资源矿质元素含量的基本统计参数和遗传多样性指数
Table 2 Statistic and diversity indices on minerals in Oolong tea germplasms

元素 Elements	平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	范围 Range/(mg·kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	遗传多样性指数 <i>H'</i>
K	9 254.86±1 709.11a	6 411.33~12 680.00	18.47	1.87
P	2 756.54±434.19b	1 531.52~3 495.52	15.75	1.99
S	1 422.59±271.97c	607.45~1 954.45	19.12	1.95
Mg	971.75±190.89d	643.71~1 537.05	19.64	1.99
Ca	955.77±230.80d	569.44~1 582.44	24.15	1.99
Mn	521.56±143.30e	294.84~882.09	27.48	2.05
Al	229.99±99.19f	79.62~558.02	43.13	1.85
Fe	54.96±31.51f	25.71~192.36	57.34	1.41
Na	23.73±6.67f	13.11~42.70	28.10	1.97
Zn	22.75±4.44f	13.40~30.39	19.53	2.21
Ba	6.72±2.80f	3.05~15.15	41.75	1.82
Cu	6.52±1.42f	4.02~10.05	21.79	1.92
B	5.13±1.35f	2.70~8.02	26.40	2.17
Ti	2.64±1.83f	0.88~11.51	69.43	1.27
Ni	1.88±0.59f	0.98~3.59	31.41	2.01
Cr	1.10±0.38f	0.58~2.39	34.48	1.76
Co	0.43±0.20f	0.21~1.01	46.22	1.93
Se	0.24±0.06f	0.09~0.39	28.87	2.19

注：同列数据后面标注不同小写字母表示差异达到显著水平 ($P<0.05$)。
Note: After the same column of data, different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$).

采用 IBM SPSS 20.0 软件计算 34 份乌龙茶种质资源材料中 18 种矿质元素含量的频数分布，经 Shapiro-Wilk 检验，结果表明，B、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、S、Se、Zn 等 10 种元素含量呈正态分布（经 Shapiro-Wilk 检验，双侧检验的概率值 $P>0.05$ ），说明这 10 种元素的含量在 34 份乌龙茶种质资源的大部分材料中处于平均水平，低于或高于平均含量的材料较少；Al、Ba、Ca、Co、Cr、Cu、Fe、Ti 等 8 种元素含量呈偏态分布（经 Shapiro-Wilk 检验，双侧检验的

概率值 $P\leq 0.05$ ），且均为正偏态函数，说明这 8 种元素的含量在 34 份乌龙茶种质资源的大部分材料中处于较低水平，低于平均含量。
18 种矿质元素含量的变异系数在 15.75%~69.43% 之间，Ti 的变异系数最大，达 69.43%，表明不同乌龙茶种质资源材料间 Ti 含量差异较大。Ti 含量最高的材料为大叶乌龙，含量最低的为佛手，最大值是最小值的 13 倍；P 的变异系数最小，为 15.75%，表明不同乌龙茶种质资源材料间 P 含量差异较小。变

异系数较大的元素为 Fe、Co、Al、Ba，变异系数分别为 57.34%、46.22%、43.13%、41.75%，其中，大叶乌龙（OTG07）中 Fe、Al 元素含量最高，铁观音（OTG03）中 Co 元素含量最高，棕榈香（OTG29）中 Ba 元素含量最高。由变异性分析得出，乌龙茶种质资源中矿质元素含量变异较为丰富，各种质资源材料间矿质元素含量具有差异性，有必要进行矿质元素含量分析与综合评价。

18 种矿质元素的遗传多样性指数为 1.27~2.21，平均遗传多样性指数为 1.91，表明 34 份乌龙茶种质资源中矿质元素含量的遗传多样性比较丰富。遗传多样性指数最大的是 Zn，为 2.21，最小的是 Ti，为 1.27。综合来看，18 种矿质元素在乌龙茶种质资源材料中存在较大的变异幅度和较为丰富的遗传多样性，可以从 34 份材料中筛选出较为理想的材料，并通过遗传改良培育市场消费需求的茶树品种材料。

2.2 乌龙茶种质资源矿质元素相关性分析

根据茶树种质资源材料中矿质元素含量，对 34

份材料矿质元素进行了相关性分析，结果如表 3 所示。Ca 与 Mg、Al、Ba、Cu、Mn、Se 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.738、0.498、0.736、0.438、0.692、0.439；K 与 P、S 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.480、0.582；Mg 与 S、Al、Ba、Cu、Mn 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.478、0.484、0.471、0.562、0.582；P 与 S、B、Zn 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.493、0.474、0.508；S 与 B 呈极显著正相关，相关系数为 0.481；Al 与 Cr、Fe、Mn、Ti 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.542、0.829、0.671、0.769；B 与 Cu、Mn、Se 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.621、0.479、0.556；Ba 与 Mn 呈极显著正相关，相关系数为 0.479；Co 与 Zn 呈显著负相关，相关系数为-0.418；Cr 与 Fe、Ti 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.590、0.622；Cu 与 Mn、Se 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.454、0.504；Fe 与 Ti 呈极显著正相关，相关系数为 0.948。相关性分析结果表明，34 份乌龙茶种质资源中各矿质元素含量之

表 3 乌龙茶种质资源矿质元素含量相关性
Table 3 Correlations among minerals in Oolong tea germplasms

元素 Elements	Ca	K	Mg	P	S	Al	B	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Na	Ni	Se	Ti	Zn
Ca	1																	
K	0.185	1																
Mg	0.738**	0.328	1															
P	-0.237	0.480**	-0.042	1														
S	0.277	0.582**	0.478**	0.493**	1													
Al	0.498**	-0.163	0.484**	-0.310	-0.009	1												
B	0.296	0.263	0.304	0.474**	0.481**	0.112	1											
Ba	0.736**	0.114	0.471**	-0.333	0.173	0.329	-0.076	1										
Co	0.237	-0.071	0.336	-0.311	0.175	0.333	-0.010	0.053	1									
Cr	0.295	-0.256	0.157	-0.320	-0.396*	0.542**	-0.086	0.284	-0.065	1								
Cu	0.438**	0.394*	0.562**	0.375*	0.399*	0.235	0.621**	0.303	-0.105	0.177	1							
Fe	0.297	-0.115	0.347*	-0.042	0.018	0.829**	0.153	0.088	0.104	0.590**	0.297	1						
Mn	0.692**	0.005	0.582**	-0.218	0.219	0.671**	0.479**	0.442**	0.419*	0.328	0.454**	0.429*	1					
Na	0.270	0.169	0.408*	0.137	0.313	0.225	0.191	0.241	-0.121	0.354*	0.356*	0.342*	0.117	1				
Ni	0.336	0.074	0.340*	0.019	0.005	0.196	0.253	0.218	0.019	0.224	0.391*	0.245	0.430*	-0.085	1			
Se	0.439**	0.362*	0.300	0.262	0.377*	0.235	0.556**	0.205	-0.083	0.127	0.504**	0.212	0.503**	0.137	0.321	1		
Ti	0.192	-0.202	0.208	-0.074	-0.089	0.769**	0.073	0.050	0.088	0.622**	0.201	0.948**	0.322	0.261	0.160	0.125	1	
Zn	-0.002	0.215	0.041	0.508**	0.242	-0.241	0.226	0.012	-0.418*	-0.181	0.246	-0.131	-0.190	0.106	0.187	0.227	-0.188	1

注：**表示在0.01水平（双侧）上显著相关，*表示在0.05水平（双侧）上显著相关。
Note: **and * mean significant difference at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

间存在着复杂的相互作用关系，具有进行主成分分析的基础。

2.3 乌龙茶种质资源矿质元素的主成分分析

34 份乌龙茶种质资源中 18 种矿质元素含量经标准化后进行因子分析，结果见表 4。公因子提取采用主成分分析法，以特征值 > 1 为标准提取主成分。前 5 个主成分累积方差贡献率达 77.399%，包含了 34 份乌龙茶种质资源 18 种矿质元素含量的主要信息。第 1 主成分方差贡献率最大，为 30.293%，主要受 Mn、Ca、Mg、Al 等 4 种元素的影响，其中 Mn 的影响最大，其次是 Ca；第 2 主成分贡献率为 20.262%，主要受 K、P、S 等 3 种元素的影响，其中 P 的影响最大，其次是 K；第 3 主成分贡献率分别为 11.247%，主要反映的是 Co、Fe、Ti 等 3 种元素的信息，其中 Co 的贡献最大，其次是 Ti，Co 的影响为负；第 4 主成分贡献率为 8.107%，主要受 Ba、Co 2 种元素的影

响，其中 Co 的贡献最大，Co 的影响为正，Ba 的影响为负；第 5 主成分贡献率为 1.489%，主要反映的是 Na、Ni 2 种元素的信息，其中 Na 的贡献最大，其次是 Ni，Ni 的影响为负。PC₁ 和 PC₂ 的累积方差贡献率（50.555%）大于 50%，因此认为 Mn、Ca、Mg、Al、K、P、S 是乌龙茶种质资源的特征元素^[13]。

以主成分载荷系数与其特征值算术平方根的比值得出对应的特征向量 e_j ，进而建立各主成分与矿质元素含量之间对应的函数关系。以 5 个主成分的方差贡献率与累积方差贡献率的比值为权重构建乌龙茶种质资源矿质元素含量评价模型 F_n ，建立 F_n 与各主成分 Y_i ($i=1\sim5$) 之间的线性组合，即 $F_n=0.391Y_1+0.262Y_2+0.145Y_3+0.105Y_4+0.097Y_5$ 。运用 F_n 对 34 份乌龙茶种质资源的矿质营养元素含量进行评价，如表 5 所示。综合得分为-1.612~2.781，排名前五位的乌龙茶种质依次为芝兰香（OTG28）、本山（OTG06）、

表 4 乌龙茶种质资源矿质元素的主成分分析
Table 4 Principal component analysis on Oolong tea germplasms

矿质元素 Mineral elements	主成分 Principal component				
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₅
Al (X_1)	0.322	-0.261	0.077	0.156	0.023
B (X_2)	0.209	0.287	0.110	0.229	-0.260
Ba (X_3)	0.230	-0.040	-0.315	-0.455	0.176
Ca (X_4)	0.340	0.003	-0.285	-0.208	0.033
Co (X_5)	0.101	-0.145	-0.393	0.495	-0.005
Cr (X_6)	0.206	-0.293	0.256	-0.276	0.034
Cu (X_7)	0.291	0.238	0.113	-0.086	-0.058
Fe (X_8)	0.290	-0.208	0.355	0.179	0.064
K (X_9)	0.089	0.360	-0.077	0.036	0.204
Mg (X_{10})	0.334	0.079	-0.216	0.012	0.186
Mn (X_{11})	0.351	-0.061	-0.193	0.109	-0.258
Na (X_{12})	0.189	0.060	0.190	-0.121	0.577
Ni (X_{13})	0.199	0.039	0.006	-0.21	-0.518
P (X_{14})	-0.012	0.403	0.327	0.169	0.013
S (X_{15})	0.158	0.358	-0.129	0.274	0.263
Se (X_{16})	0.247	0.213	0.056	-0.036	-0.264
Ti (X_{17})	0.242	-0.254	0.386	0.180	0.060
Zn (X_{18})	-0.002	0.310	0.204	-0.320	-0.071
特征值 Eigen value	5.453	3.647	2.025	1.459	1.348
方差贡献率 Variance contribution rate/%	30.293	20.262	11.247	8.107	7.489
累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	30.293	50.555	61.803	69.909	77.399

表 5 34 份乌龙茶种质资源矿质元素各主成分得分及排序
Table 5 Principal components, comprehensive scores and ranking of 34 Oolong tea germplasms

编号 Code	主成分 Principal Components					综合得分 Score	排序 Sorting
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5		
OTG01	-1.335	1.471	0.754	-0.233	-0.994	-0.148	20
OTG02	2.600	0.776	0.979	0.746	-1.263	1.318	6
OTG03	4.492	0.143	-3.152	2.636	-2.458	1.375	4
OTG04	1.658	1.912	0.459	0.193	1.127	1.345	5
OTG05	-0.571	1.411	0.171	0.700	-0.231	0.222	12
OTG06	4.201	1.941	1.352	-0.174	-1.176	2.215	2
OTG07	2.700	-6.115	3.753	2.372	1.163	0.360	10
OTG08	-3.770	-0.126	0.838	0.053	-1.262	-1.502	32
OTG09	-2.992	0.477	-0.675	0.172	0.292	-1.097	29
OTG10	-1.287	-0.436	0.519	-1.114	-1.040	-0.760	24
OTG11	-0.030	1.460	-0.863	0.229	-1.634	0.111	16
OTG12	1.300	3.176	0.226	0.646	0.177	1.458	3
OTG13	-1.312	0.703	0.433	0.168	1.167	-0.135	19
OTG14	0.183	1.099	-0.019	0.417	1.924	0.587	9
OTG15	-0.828	1.367	0.646	0.651	-0.709	0.128	15
OTG16	-3.042	0.537	-0.419	1.795	0.629	-0.860	26
OTG17	-2.730	0.352	0.516	0.083	-0.859	-0.975	28
OTG18	-3.610	-1.247	0.081	0.178	0.984	-1.612	34
OTG19	0.356	0.200	-2.149	0.885	2.000	0.167	14
OTG20	-1.538	0.749	-0.204	0.379	1.132	-0.285	21
OTG21	-3.591	-0.356	0.123	-1.233	0.475	-1.563	33
OTG22	0.112	-1.481	-1.943	1.200	-0.030	-0.503	22
OTG23	-2.655	-0.634	-0.331	0.530	-0.002	-1.197	31
OTG24	2.113	-0.307	2.215	-0.434	-0.508	0.972	7
OTG25	0.790	-3.906	1.642	-1.606	-1.507	-0.791	25
OTG26	0.979	-1.393	-2.495	-2.009	-0.482	-0.602	23
OTG27	1.002	-3.752	-2.901	-0.916	-0.001	-1.108	30
OTG28	5.153	2.200	0.367	-1.087	2.582	2.781	1
OTG29	2.531	-1.145	-1.137	-3.233	1.120	0.294	11
OTG30	-0.947	0.845	0.991	-0.722	0.299	-0.052	17
OTG31	0.950	0.737	0.545	0.618	0.328	0.740	8
OTG32	-0.280	1.399	0.395	-1.006	-0.068	0.202	13
OTG33	-0.334	-2.817	-1.362	0.786	0.304	-0.954	27
OTG34	-0.269	0.761	0.645	-1.671	-1.477	-0.131	18

瑞香 (OTG12)、铁观音 (OTG03)、黄旦 (OTG04)。

2.4 基于矿质元素含量的乌龙茶种质资源聚类分析

34 份乌龙茶种质资源聚类分析结果 (图 1) 显示, 在欧氏距离 15 处, 将 34 份乌龙茶种质资源分为 3 类。第一类群包括 21 份材料, OTG30、OTG32、OTG15、OTG01、OTG31、OTG04、OTG12、OTG11、OTG14、OTG20、OTG13、OTG05、OTG34 等 13 份材料为一个亚群, 另一个亚群包括 OTG08、OTG17、OTG23、OTG10、OTG09、OTG21、OTG18、OTG16 等 8 份材料; 第二类群包括 OTG02、OTG24、OTG06、OTG28、OTG03 等 5 份材料; 第三类群包括 8 份材料, 也可以分为两个亚群: OTG22、OTG33、OTG19、OTG26、OTG27、OTG29、OTG25 等 7 份材料为一个亚群, OTG07 为另一个亚群。根据类群间矿质元素含量方差分析结果可知 (表 6), 3 个类群之间除

了 Na 元素含量无显著差异之外, 其余 17 种元素含量均存在显著差异。其中, 第一类群 P、Zn 含量最高, 并显著高于第三类群, 与第二类群之间的差异不显著; 第二类群 Al、Ca、Mn、Mg 含量最高, 并显著高于第一类群, 与第三类群之间无显著差异; 第二类群 K、S 含量最高, 并显著高于第三类群, 与第一类群之间无显著差异。综合来看, 第一类群 P、Zn 含量高, Al、Ca、Mn、Mg 含量低, K、S 含量中等, 此类第二亚群包含的 8 份材料在主成分综合得分中排名 24~34 位, 矿质元素富集能力弱、矿质营养价值低。第二类群 Al、Ca、Mn、Mg、K、S 含量高, P、Zn 含量中等, 此类中包含的 5 份材料在主成分综合得分的前 7 位, 矿质元素富集能力强、矿质营养元素综合品质高; 第三类群 K、P、S、Zn 含量低, Al、Ca、Mn、Mg 含量中等。

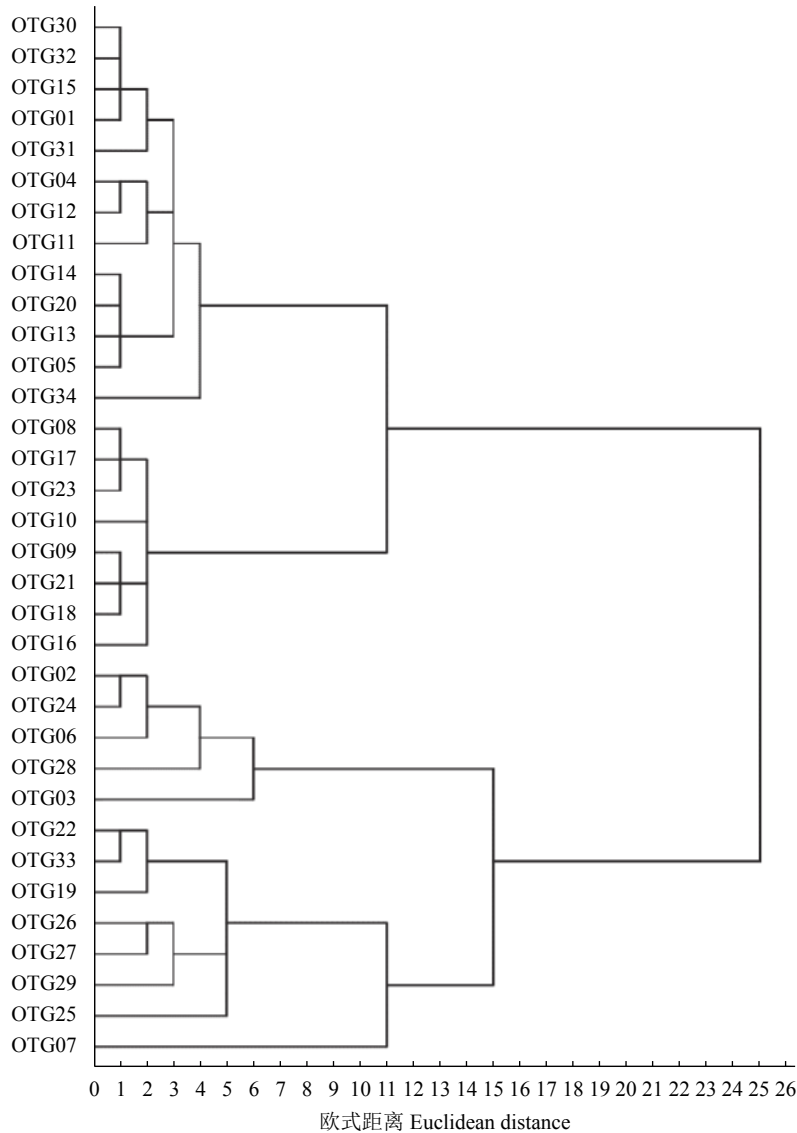


图 1 34 份乌龙茶种质资源基于 18 种矿质元素含量的聚类分析
Fig. 1 Clusters of 34 Oolong tea germplasm based on contents of 18 minerals

表 6 不同类群间矿质元素含量比较
Table 6 Mineral contents of 3 clusters of germplasms

元素 Elements	类群 I Cluster I		类群 II Cluster II		类群 III Cluster III	
	平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	变异系数 CV/%	平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	变异系数 CV/%
Al	177.37±55.55 b	31.32	316.63±35.69 a	11.28	313.97±122.93 a	39.16
B	5.07±1.18 b	23.30	7.05±0.68 a	9.68	4.10±0.72 b	17.78
Ba	5.56±1.78 b	32.05	7.82±2.12 ab	27.18	9.06±3.78 a	41.71
Ca	851.39±158.88 b	18.66	1 163.60±235.33 a	20.22	1 099.87±245.11 a	22.29
Co	0.37±0.10 b	27.39	0.46±0.32 ab	69.76	0.58±0.24 a	42.67
Cr	0.91±0.14 b	16.19	1.30±0.27 a	21.02	1.47±0.54 a	36.74
Cu	6.23±1.23 b	19.79	8.61±1.42 a	16.51	5.98±0.58 b	9.83
Fe	42.15±14.70 b	34.88	85.43±12.52 a	14.66	69.56±50.75 ab	72.96
K	9 521.81±1 577.45 a	16.57	10 473.09±1 867.10 a	17.83	7 792.72±975.74 b	12.52
Mg	892.23±145.00 b	16.25	1 176.11±233.01 a	19.81	1 052.77±156.18 ab	14.84
Mn	444.06±104.14 b	23.45	709.79±109.73 a	15.46	607.35±84.86 a	13.97
Na	22.58±6.08 a	26.94	27.91±10.67 a	38.23	24.15±4.73 a	19.58
Ni	1.74±0.54 b	31.43	2.63±0.36 a	13.82	1.81±0.51 b	28.16
P	2 939.82±303.62 a	10.33	2 864.28±293.65 a	10.25	2 208.10±351.09 b	15.90
S	1 428.96±203.89 ab	14.27	1 677.94±197.86 a	11.79	1 246.30±354.04 b	28.41
Se	0.23±0.06 b	26.90	0.32±0.05 a	15.34	0.21±0.06 b	28.41
Ti	1.91±0.49 b	25.63	4.17±0.73 a	17.61	3.59±3.25 a	90.55
Zn	24.11±4.14 a	17.21	22.36±5.56 ab	24.89	19.43±2.82 b	14.52

注：同行数据后面标注不同小写字母表示差异达到显著水平（ $P<0.05$ ）。
Note: After the same row of data, different lowercase letters indicate significant differences（ $P<0.05$ ）.

3 讨论与结论

不同矿质元素在乌龙茶种质资源中的含量存在差异。大量元素除 Ca 与 Mg 外含量差异显著，微量元素中除 Mn 以外含量差异不显著。大量元素 Ca、K、Mg、P、S 及微量元素 Mn 的含量远远大于其他 12 种微量元素。不同乌龙茶种质资源材料中矿质元素变异系数范围为 15.75%~69.43%，矿质元素含量变异丰富，不同种质资源间矿质元素含量具有差异性，这与时鹏涛^[9]、金孝芳^[10]、李春华^[11]等的研究结果一致。由于本研究所采集的乌龙茶种质资源样品均来自于同一资源圃，其土壤质地、立地条件、管理水平等均一致，因此，不同乌龙茶种质资源中矿质元素含量的差异与其遗传特性相关。遗传多样性指数是衡量物种种类的多少和物种之间分布是否均匀的一个综合指标，多样性指数越高，表明该物种的遗传多样性水平越高^[17]。本研究结果显示，18 种矿质元素的遗传多样性指数均达到 1.27 以上，表

明乌龙茶种质资源中矿质元素含量存在较为显著的遗传变异，具有较大的遗传改良潜力。

因子分析的基本思想是根据相关性的大小把变量进行分组，使同一组内的变量具有较高的相关性。故变量之间是否存在相关性是进行因子分析的前提^[19]。本研究中，Ca 与 Mg、Al、Ba、Cu、Mn、Se 之间，K 与 P、S 之间，P 与 S、B、Zn 之间，S 与 B 之间，Al 与 Cr、Fe、Mn、Ti 之间，Ba 与 Mn 之间，Cr 与 Fe、Ti 之间，Cu 与 Mn、Se 之间，Fe 与 Ti 之间分别呈极显著正相关关系，Co 与 Zn 呈显著负相关，表明乌龙茶种质资源中矿质元素之间存在复杂的关联性。

聚类分析是应用多元统计分析原理研究分类问题的一种数学方法，可同时对大量性状进行综合考察，已广泛应用于多样品、多指标的植物种质资源综合评价^[20]。本研究采用系统聚类法对 34 份乌龙茶种质资源进行分类，结果显示，不同类群间存在显著差异，表明对 34 份乌龙茶种质资源的分类结果科

学有效。

综上所述, 乌龙茶种质资源中 18 种矿质元素平均含量顺序为 $K > P > S > Mg > Ca > Mn > Al > Fe > Na > Zn > Ba > Cu > B > Ti > Ni > Cr > Co > Se$, Mn、Ca、Mg、Al、K、P、S 是乌龙茶种质资源的特征元素, 矿质元素综合评价得分前五位的种质依次为芝兰香、本山、瑞香、铁观音、黄旦, 乌龙茶种质资源中 18 种矿质元素组成存在差异, 可分为 3 类。研究结果可为进一步开展乌龙茶育种亲本选择和乌龙茶产品开发提供参考依据。

参考文献:

- [1] 蓝雪铭, 刘志彬, 倪莉. 乌龙茶保健功效的研究进展 [J]. 中国食品学报, 2014, 14 (2): 201–207.
LAN X M, LIU Z B, NI L. Research progress in health functions of oolong tea [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14 (2): 201–207. (in Chinese)
- [2] 吕海鹏, 林智, 张悦, 等. 普洱茶中主要矿质元素分析 [J]. 茶叶科学, 2013, 33 (5): 411–419.
LÜ H P, LIN Z, ZHANG Y, et al. Study on the content of the major mineral elements in Pu-erh tea [J]. *Journal of Tea Science*, 2013, 33 (5): 411–419. (in Chinese)
- [3] 严文滨, 郭雅玲, 江昕田, 等. 乌龙茶中的微量元素及其检测技术研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8 (4): 1312–1318.
YAN W B, GUO Y L, JIANG X T, et al. Research Progress of trace elements in Oolong tea and its detection technology [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2017, 8 (4): 1312–1318. (in Chinese)
- [4] 马建强, 姚明哲, 陈亮. 茶树种质资源研究进展 [J]. 茶叶科学, 2015, 35 (1): 11–16.
MA J Q, YAO M Z, CHEN L. Research progress on germplasms of tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. *Journal of Tea Science*, 2015, 35 (1): 11–16. (in Chinese)
- [5] 王飞权, 冯花, 罗盛财, 等. 武夷名丛茶树种质资源农艺性状多样性分析 [J]. 中国农业科技导报, 2019, 21 (6): 43–54.
WANG F Q, FENG H, LUO S C, et al. Diversity analysis of agronomic traits of Wuyi mingcong tea plant germplasm resources [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21 (6): 43–54. (in Chinese)
- [6] 王飞权, 冯花, 王芳, 等. 42份武夷名丛茶树资源生化成分多样性分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16 (3): 670–676.
WANG F Q, FENG H, WANG F, et al. Diversity analysis of biochemical components of 42 Wuyi mingcong tea germplasms [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16 (3): 670–676. (in Chinese)
- [7] 石玉涛, 郑超, 黄华娟, 等. 武夷名丛茶多糖清除羟基自由基活性研究 [J]. 中国农学通报, 2014, 30 (25): 184–188.
SHI Y T, ZHENG C, HUANG H J, et al. Study on antioxidant activity of Wuyi Ming Cong tea polysaccharides [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30 (25): 184–188. (in Chinese)
- [8] 黄福平, 梁月荣, 陆建良, 等. 乌龙茶种质资源种群遗传多样性 AFLP评价 [J]. 茶叶科学, 2004, 24 (3): 183–189.
HUANG F P, LIANG Y R, LU J L, et al. Evaluation of genetic diversity in Oolong tea germplasms by AFLP fingerprinting [J]. *Journal of Tea Science*, 2004, 24 (3): 183–189. (in Chinese)
- [9] 时鹏涛, 秦玉燕, 陆仲烟, 等. 不同茶树品种中9种矿质元素的含量及富集特性 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (10): 144–147.
SHI P T, QIN Y Y, LU Z Y, et al. Study on enrichment characteristics of 9 kinds of mineral elements in different tea cultivars [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47 (10): 144–147. (in Chinese)
- [10] 金孝芳, 贾尚智, 闵彩云, 等. 湖北主栽茶树品种矿质元素含量分析 [J]. 湖北农业科学, 2010, 49 (12): 3173–3175.
JIN X F, JIA S Z, MIN C Y, et al. Study on mineral elements in main tea cultivars from Hubei [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49 (12): 3173–3175. (in Chinese)
- [11] 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.
LI C H, WANG Y. Studies on mineral elements content of tea varieties [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21 (5): 1477–1479. (in Chinese)
- [12] 李清华. 34份菜用大豆品种主要农艺性状的主成分分析及遗传距离测定 [J]. 福建农业学报, 2018, 33 (2): 136–143.
LI Q H. Principal component analysis on major agronomic traits and determination of genetic distance of thirty-four vegetable soybean cultivars [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 33 (2): 136–143. (in Chinese)
- [13] 匡立学, 聂继云, 李志霞, 等. 不同苹果品种果实矿质元素含量的因子分析和聚类分析 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (14): 2807–2815.
KUANG L X, NIE J Y, LI Z X, et al. Factor analysis and cluster analysis of mineral elements contents in different apple varieties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (14): 2807–2815. (in Chinese)
- [14] 朱周俊, 袁德义, 邹锋, 等. 不同锥栗农家种仁中9种矿质元素含量的因子分析与聚类分析 [J]. 食品科学, 2019, 40 (2): 165–170.
ZHU Z J, YUAN D Y, ZOU F, et al. Factor analysis and cluster analysis of contents of 9 mineral elements in seed kernels of *Castanea henryi* from different varieties [J]. *Food Science*, 2019, 40 (2): 165–170. (in Chinese)
- [15] 马小卫, 马永利, 武红霞, 等. 基于因子分析和聚类分析的杧果种质矿质元素含量评价 [J]. 园艺学报, 2018, 45 (7): 1371–1381.
MA X W, MA Y L, WU H X, et al. Assessment of mineral elements contents at the mango germplasm level based on factor analysis and cluster analysis [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2018, 45 (7): 1371–1381. (in Chinese)
- [16] 王洁, 石元值, 张群峰, 等. 基于矿物元素指纹的龙井茶产地溯源 [J]. 核农学报, 2017, 31 (3): 547–558.
WANG J, SHI Y Z, ZHANG Q F, et al. Geographical origin discriminant of Longjing tea based on mineral element fingerprints [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31 (3): 547–558. (in Chinese)

- [17] 王新超, 陈亮, 杨亚军. 广西茶树资源生化成分多样性分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11 (3): 309–314, 319.
WANG X C, CHEN L, YANG Y J. Biochemical diversity analysis of tea germplasms in Guangxi [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11 (3): 309–314, 319. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国农业部. 茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量: NY 659-2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
Ministry of Agriculture, the People's Republic of China. Residue limits for Chromium, Cadmium, Mercury, Arsenic and fluoride in tea: NY 659-2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003. (in Chinese)
- [19] 林文磊, 吕美琴, 李明松, 等. 39份春大豆种质资源的主成分分析及其聚类分析 [J]. 福建农业学报, 2018, 33 (10): 1016–1022.
LIN W L, Lü M Q, LI M S, et al. Principal component analysis and cluster analysis of 39 spring soybean germplasm resources [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 33 (10): 1016–1022. (in Chinese)
- [20] 陈艺莹, 潘宏, 魏云华. 山茶花品种观赏性状的主成分分析与观赏价值综合评价 [J]. 福建农业学报, 2019, 34 (5): 551–559.
CHEN Y Q, PAN H, WEI Y H. Principal component analysis and comprehensive evaluation on ornamental value of varieties of Camellia [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34 (5): 551–559. (in Chinese)

(责任编辑: 吴宇琳)