

# 茶叶挥发性成分中关键呈香成分研究进展

王梦琪<sup>1,2</sup>, 朱 荫<sup>1</sup>, 张 悦<sup>1</sup>, 施 江<sup>1</sup>, 林 智<sup>1,\*</sup>, 吕海鹏<sup>1,\*</sup>

(1. 中国农业科学院茶叶研究所, 农业农村部茶树生物学与资源利用重点实验室, 浙江 杭州 310008;

2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

**摘 要:** 香气是决定茶叶品质的重要因子之一。研究表明, 茶叶挥发性成分中存在少量关键呈香成分, 对茶叶的香气品质具有重要影响, 具有重要的研究价值和研究意义。本文综述了近年来茶叶挥发性成分中这些关键呈香成分的研究进展, 包括关键呈香成分的分析鉴定方法和主要茶类(绿茶、红茶、乌龙茶、黑茶)以及其他再加工茶(主要为花茶)中已经鉴定出的关键呈香成分的汇总分析, 并探讨茶叶中关键呈香成分未来的研究方向。这些研究结果丰富了茶叶风味品质化学基础理论, 可为提升现代茶叶加工技术和开展茶叶香气品质定向调控等提供科学依据。

**关键词:** 茶叶; 香气; 关键呈香成分; 鉴定方法

## A Review of Recent Research on Key Aroma Compounds in Tea

WANG Mengqi<sup>1,2</sup>, ZHU Yin<sup>1</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>, SHI Jiang<sup>1</sup>, LIN Zhi<sup>1,\*</sup>, LÜ Haipeng<sup>1,\*</sup>

(1. Key Laboratory of Tea Biology and Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The aroma is one of the most important determinants of the quality of tea. Studies have shown that tea contains a small amount of key aroma compounds which are of significant interest to researchers because of their important contribution to tea aroma quality. In this paper, the recent progress in research on the key aroma compounds of tea is reviewed by summarizing the existing methods used to analyze and identify these compounds and the key aroma compounds identified from the major tea types (green tea, black tea, oolong tea and dark tea) and reprocessed tea (mainly refers to scented tea). Future research directions are discussed as well. The existing research outcomes enrich the basic chemical theory of tea flavor quality and provide a scientific basis for improving the modern tea processing technology and regulating the quality of tea aroma.

**Keywords:** tea; aroma; key aroma compounds; identification methods

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181015-132

中图分类号: S571.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 23-0341-09

引文格式:

王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. 茶叶挥发性成分中关键呈香成分研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 341-349. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181015-132. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Mengqi, ZHU Yin, ZHANG Yue, et al. A review of recent research on key aroma compounds in tea[J]. Food Science, 2019, 40(23): 341-349. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181015-132. <http://www.spkx.net.cn>

香气是决定茶叶品质的重要因子之一, 对茶叶风味、等级评定以及大众消费导向等都具有十分重要的作用。茶香实际上是不同的芳香物质通过不同浓度组合,

并对嗅觉神经综合作用所形成的茶叶特有的香型<sup>[1]</sup>, 例如绿茶呈现出的“清香”、“栗香”, 红茶呈现出的“甜香”、“果香”、“蜜香”, 乌龙茶呈现出的“花

收稿日期: 2018-10-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31470694); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23);

中国农业科学院创新工程项目(CAAS-ASTIP-2014-TRICAAS)

第一作者简介: 王梦琪(1995—)(ORCID: 0000-0003-2243-6967), 女, 硕士研究生, 研究方向为茶叶加工品质化学。

E-mail: lfwangmengqife@126.com

\*通信作者简介: 林智(1965—)(ORCID: 0000-0001-5976-1806), 男, 研究员, 博士, 研究方向为茶叶加工品质化学。

E-mail: linzhi@caas.cn

吕海鹏(1980—)(ORCID: 0000-0002-4644-4323), 男, 研究员, 博士, 研究方向为茶叶加工品质化学。

E-mail: lvhaipeng@tricas.com

香”，黑茶呈现出的“陈香”、“木香”等。随着研究的不断深入，迄今为止，人们从茶叶挥发性成分中鉴定出的香气物质已达700余种，主要包括醇类、醛类、酮类、酸类、酯类、酚类以及杂环类化合物等<sup>[2]</sup>，这些成分构成了茶叶呈香的重要化学物质基础。然而，并非所有香气物质都对茶叶香气品质具有贡献作用。长期的实践研究表明，茶叶挥发性成分中存在一些对呈香起到重要作用的关键香气成分，它们对茶叶的香气品质具有重要影响，一般是一些具有高香气强度值、高香气活度值（odor activity value, OAV）的香气化合物，具有重要的研究价值和研究意义。本文将以往文献报道中采用气相色谱在线嗅闻法（gas chromatography-olfactometry, GC-O）、OAV法以及重组与消减实验等方法鉴定出来的、涉及到感官嗅闻或化合物阈值，且能够对茶叶的香气品质产生重要影响的挥发性成分定义为茶叶中的关键呈香成分，综述了近年来茶叶挥发性成分中关键呈香成分的研究进展。

## 1 关键呈香成分的研究方法

目前，食品风味成分研究领域中对关键呈香成分的研究方法一般主要包括香气萃取、香气鉴定和香气重组等。常用的香气萃取方法主要有同时蒸馏萃取（simultaneous distillation extraction, SDE）、固相微萃取（solid phase microextraction, SPME）、搅拌棒吸附萃取（stir bar sorptive extraction, SBSE）、超临界流体萃取（supercritical fluid extraction, SFE）、减压蒸馏萃取（vacuum distillation extraction, VDE）等，不同萃取方法的优缺点如表1所示。关键呈香成分的分析方法一般包括GC-O、OAV、香气化合物重组与消减实验等。其中GC-O技术主要包括3种分析方法：香气提取稀释分析（aroma extract dilution analysis, AEDA）、直接强度法和检测频率分析。AEDA技术原理是嗅闻提取物经一系列稀释后的GC流出物，借用风味稀释因子来评价GC流出物的呈香贡献<sup>[3]</sup>；直接强度法则是通过嗅闻人员使用可变电阻器的移动来记录气味随时间变化的强度<sup>[4]</sup>；检测频率分析法是由嗅闻人员对分析样品中的每一特定保留时间上的香气成分呈香与否，进行感官判定并记录相应的比例<sup>[5]</sup>。OAV法是另一种应用于呈香成分分析的关键手段，该方法是通过理论值的计算来表征化合物气味贡献程度，OAV是指气味化合物浓度与其对应介质中气味阈值的比值，OAV值越大，说明该化合物对呈香越重要<sup>[6]</sup>。香气重组和消减实验则是将不同香气化合物添加到一定介质中，利用人的嗅觉判断特定香气化合物对物质整体呈香贡献，该方法已成为国际上应用十分普遍的关键呈香成分验证方法<sup>[7]</sup>。

表1 挥发性成分萃取方法  
Table 1 Extraction methods of volatile components

萃取方法	优点	缺点
SPME	分析样品量少，简单、快速、费用低 <sup>[8]</sup>	吸附量少 <sup>[9]</sup>
SDE	操作简单、所需样品量少 <sup>[10]</sup>	萃取率低、与实际茶香不符 <sup>[11]</sup>
SBSE	灵敏度高、检测限低、重现性好 <sup>[12]</sup>	萃取时间长 <sup>[13]</sup>
SFE	萃取速率快、提取率高、产品纯度高、流程简单、能耗低、无有机溶剂残留 <sup>[14]</sup>	对设备要求高 <sup>[15]</sup>
VDE	较好的还原茶汤香气 <sup>[16]</sup>	回收率低 <sup>[16]</sup> ；酯类物质吸附率低，需大量的试样和试剂 <sup>[17]</sup>

目前，果汁、调味品、烟草及酒类等领域对关键呈香成分的分析已有较好的研究进展。例如，周志等采用顶空-SPME（head space-SPME, HS-SPME）结合GC-O技术从野生刺梨汁中鉴定出丁酸乙酯、正己醇、正辛醇、苯乙醇、芳樟醇等8种可嗅闻香气成分<sup>[18]</sup>；Kaneko等采用AEDA法研究发现日本酱油的关键香气成分为3-甲硫基丙醛和3-羟基-4-5-二甲基-2-(5H)-呋喃酮<sup>[19]</sup>；高建宏采用GC-O强度法与AEDA法相结合，综合香气强度和香气稀释（flavor dilution, FD）因子发现3种不同类型烟叶（烤烟、白肋烟、香料烟）的关键呈香成分均包括 $\beta$ -大马酮和 $\beta$ -二氢大马酮<sup>[20]</sup>；范文来等采用计算OAV值法鉴定得到洋河绵柔型白酒中的关键风味物质为己酸乙酯（OAV>27 000）<sup>[6]</sup>；此外，Xiao Zuobing等采用GC-O技术、OAV值结合香气化合物的重组消减方法发现壬醛、己醛、芳樟醇和(R)-(+)-柠檬烯是Ponkan柑橘中的关键香气化合物<sup>[21]</sup>。

## 2 茶叶挥发性成分中关键呈香成分

近年来，茶叶挥发性成分中关键呈香成分的研究已有较多报道，关键呈香成分已成为茶叶香气品质化学研究领域的热点之一，相关研究结果为提升茶叶加工技术、定向调控茶叶香气品质提供了重要的科学依据。根据加工工艺的差异，茶叶可以分为绿茶、红茶、乌龙茶、黑茶、黄茶和白茶六大类，不同茶类的香气品质迥异，研究表明挥发性成分及其关键呈香成分一般也都有较大差异。以下主要根据茶类的差异，分别论述不同茶类中关键呈香成分的研究进展。

### 2.1 绿茶挥发性成分中关键呈香成分

绿茶的加工工艺一般为摊放、杀青、揉捻和干燥。绿茶香气清香怡人，代表性香型有清香、栗香和花香等。目前，国内外的科研工作者主要以龙井茶、碧螺春、日本煎茶等绿茶作为研究对象，已经在其挥发性成分中关键呈香成分的研究中取得了较好的进展。例如，2016年陈合兴通过GC-O结合AEDA与OAV方法对碧螺春进行香气重构，发现包括2,3-丁二酮、2-戊基呋喃在内

的29种物质是洞庭碧螺春茶的主要特征性香气成分<sup>[22]</sup>；2018年，Zhu Yin等采用全二维气相色谱-飞行时间质谱（comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry, GC×GC-TOF-MS）技术、GC-O法结合OAV法分析得到了决定绿茶“栗香”品质的8种关键呈香成分，分别是乙基苯、庚醛、苯甲醛、2-戊基呋喃、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、芳樟醇、(Z)-己酸-3-己烯酯和(E)- $\beta$ -紫罗兰酮<sup>[23]</sup>。

表2汇总了近年来绿茶挥发性成分中关键呈香成分的研究结果，绿茶中的关键呈香成分主要包括醇类、酮类、酯类、醛类以及杂环类化合物等。炒青绿茶（西湖龙井、碧螺春）挥发性成分中的关键呈香成分大都含有芳樟醇、香叶醇、 $\alpha$ -紫罗兰酮、 $\beta$ -紫罗兰酮、顺-茉莉酮（图1）和吡嗪类等化合物。芳樟醇表现出甜香、花香、木香和类似薰衣草的香气特征；香叶醇带有蔷薇香（水中阈值为0.007 5 mg/kg）<sup>[24]</sup>， $\alpha$ -紫罗兰酮带有木香、紫罗兰芬芳，阈值介于0.6~10  $\mu$ g/kg之间。 $\beta$ -紫罗兰酮（阈值为0.007~205  $\mu$ g/kg）则比 $\alpha$ -紫罗兰酮具有更多的果香和木香<sup>[25]</sup>；顺-茉莉酮表现为果香、花香和茉莉花的气味。吡嗪类化合物则生成于杀青、干燥高温过程中的美拉德等反应中，因此带有烘烤香，为绿茶栗香的主要特征成分。蒸青绿茶是日本绿茶的主要类型，其挥发性成分中的关键呈香成分主要为酮类、醇类以及醛类物质等，例如(Z)-1,5-辛二烯-3-酮（水中阈值为0.01 mg/kg<sup>[26]</sup>，带有天竺葵气味）、4-巯基-4-甲基-2-戊酮（阈值为0.000 1~0.005 0  $\mu$ g/kg，具有类似黑醋栗气味）、3-甲基壬烷-2,4-二酮（水中阈值为0.02 mg/kg，表现为果香、焦糖香）、香叶醇、癸醛（水中阈值为0.1~6.0  $\mu$ g/kg，表现为柑橘类气味）、(Z)-3-己烯醇（阈值为70  $\mu$ g/kg，表现为清香）<sup>[25]</sup>、 $\beta$ -紫罗兰酮等。研究表明，癸醛和(Z)-3-己烯醇增强了蒸青绿茶的清香， $\beta$ -紫罗兰酮则增强了日本绿茶的甜香<sup>[27]</sup>。此外，研究发现，在3类不同等级抹茶的香气成分中，均具有较高FD值的化合物共有8种，即表现出甜香的4-羟基-2,5-二甲基-3-(2H)-呋喃酮、香豆素，具有清香的3-甲基-2,4-壬二酮、(E,Z)-2,6-壬二烯醛，带有金属气味的反式-4-环氧-5-环氧(E)-2-癸醛、(Z)-1,5-辛二烯-3-酮以及带有花香的 $\alpha$ -紫罗兰酮和(E)-异丁香酚<sup>[28]</sup>。

不同文献报道中对同一类型绿茶产品中关键呈香成分的研究结果上也存在较大的差异性。例如，本文表2中所列的文献中关于西湖龙井茶样品的研究结果就存在较大的差异。究其原因，上述研究中所采用的西湖龙井茶样品，在原料来源、加工方法、香气萃取方法以及关键呈香成分的分析鉴定方法上都存在一定的差异。如表1所示，不同的香气萃取方法对关键呈香成分的分析有重要影响；此外，不同的分析方法，例如GC-O（实际嗅闻）

与OAV（主要为理论值计算）的不同也会影响关键呈香成分的判定结果。

在关键呈香成分的形成机理研究方面，韩卓满利用茶树新品种白桑茶制作成绿茶，经AEDA法结合OAV法检测发现其关键呈香成分为花香特征明显的 $\beta$ -紫罗兰酮、芳樟醇、芳樟醇氧化物I、芳樟醇氧化物III、香叶醇、环氧芳樟醇、癸醛、顺-茉莉酮；他们研究发现，在该品种茶树中，控制萜类物质合成的DXR、CMK基因以及控制芳樟醇和香叶醇合成的NES、GES基因表达水平较高，一定程度上促进了这些花香特征显著的化合物的形成<sup>[29]</sup>。

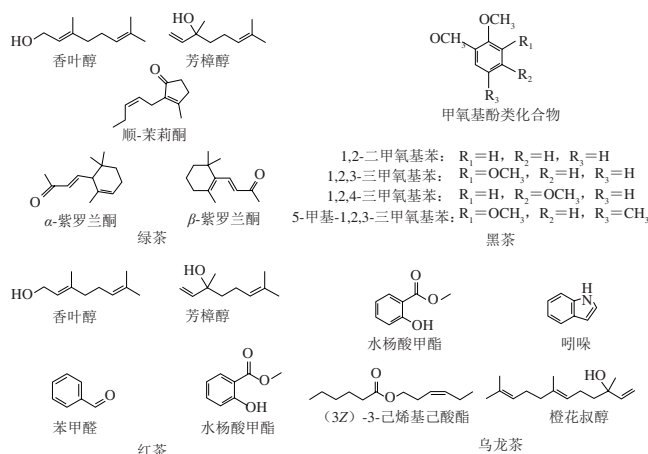


图1 主要茶类中挥发性成分的关键呈香成分

Fig. 1 Key aroma compounds of the main tea types

表2 不同类型绿茶中鉴定出的关键呈香成分

Table 2 Key aroma compounds identified in different kinds of green tea

绿茶	萃取方法	分析方法	关键呈香成分	参考文献
西湖龙井	动态顶空技术	GC-O	二甲基硫醚，2-甲硫基丙醛，3-乙基-2,5-二甲基吡啶，芳樟醇， $\alpha$ -松油醇，香叶醇和顺-茉莉酮	[30]
西湖龙井	HS-SDE	GC-O	橙花叔醇，二氢猕猴桃内酯，2-乙基吡啶，2-乙基呋喃，芳樟醇，1-乙基-2-甲硫基吡啶，环氧芳樟醇，水杨酸甲酯，苯甲醚，苯乙醇，吡嗪，2-乙基-3,5-二甲基吡啶， $\beta$ -紫罗兰酮，顺-茉莉酮，茉莉酮酸甲酯，香豆素	[31]
西湖龙井	HS-SPME	GC-O	3-甲基丁醛，(E)-3-戊烯-2-酮，乙苯，庚醛，苯甲醛，2-戊基呋喃，辛醛，苯乙醛，(E)-2-辛烯醛，(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮，芳樟醇，壬醛，(E)-2-壬烯醛，癸醛，(Z)-己酸-3-己烯酯，(E)- $\beta$ -紫罗兰酮，(E)-橙花叔醇	[23]
西湖龙井	HS-SPME	GC-O	二甲基硫醚，2,3-丁二酮，2-乙基-5-甲基吡啶，2-己基-3,6-二甲基吡啶，芳樟醇	[32]
龙井	HS-SPME	GC-O	香叶醇，环氧芳樟醇，(Z)-橙花叔醇，2-乙基-3,5-二甲基吡啶， $\beta$ -紫罗兰酮	[33]
龙井	SAFE	GC-O	香叶醇， $\alpha$ -紫罗兰酮，香叶醇，甲硫基硫醚，(Z)-1,5-辛二烯-3-酮，4-羟基-2,5-二甲基-3-(2H)-呋喃酮	[34]
大佛龙井	SPME	GC-O	2-甲基丁醛，己醛， $\beta$ -紫罗兰酮，二甲基硫醚，2-乙基-3,6-二甲基吡啶，芳樟醇	[35]
西湖龙井	HS-SPME	GC-O	(Z)-1,5-辛二烯-3-酮，甲硫基丙醛，香叶醇，香叶醇， $\alpha$ -紫罗兰酮，4-羟基-2,5-二甲基-3-(2H)-呋喃酮	[36]
龙井	SAFE	GC-O	4-羟基-2,5-二甲基-3-(2H)-呋喃酮，3-羟基-4,5-二甲基-2(5H)-呋喃酮，香豆素，香草醛，香叶醇，(E)-异丁香酚，2-甲氧基苯酚	[37]
龙井	SDE	AEDA	(Z)-1,5-辛二烯-3-酮，4-羟基-4-甲基-2-戊酮，甲硫基硫醚，(E,Z)-2,6-壬二烯醛和3-甲基壬烷-2,4-二酮	[38]



续表2

绿茶	萃取方法	分析方法	关键呈香成分	参考文献
碧螺春	HS-SDE	GC-O AEDA	2,3-丁二酮, (Z)-氧化芳樟醇, 1-辛烯-3-醇, (E)-氧化芳樟醇, 芳樟醇, 脱氢芳樟醇, $\alpha$ -紫罗兰酮, 苯乙醇, $\beta$ -紫罗兰酮, 顺-茉莉酮	[39]
碧螺春	顶空 蒸馏萃取	OAV AEDA	1-辛烯-3-醇, $\alpha$ -紫罗兰酮, $\beta$ -紫罗兰酮, 香叶醇, 二氢猕猴桃内酯, 顺-茉莉酮, 苯甲醇, 苯乙醇	[22]
碧螺春	SAFE	OAV AEDA	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮, 3-羟基-4,5-二甲基-2(5H)-呋喃酮, 香豆素, 香草醛, 香叶醇, (E)-异丁香酚和2-甲氧基苯酚	[37]
毛峰	SAFE	GC-O AEDA	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮, 3-羟基-4,5-二甲基-2(5H)-呋喃酮, 香豆素, 香草醛, 香叶醇, (E)-异丁香酚和2-甲氧基苯酚	[37]
日本绿茶	SDE	OASIS AEDA	(Z)-3-己烯醇、癸醛、 $\beta$ -紫罗兰酮	[40]
日本绿茶	SDE	气味同时 输入嗅口法 AEDA	(Z)-1,5-辛二烯-3-酮, 4-羟基-4-甲基-2-戊酮, 3-甲基-2,4-壬二酮, 香叶醇, 癸醛, (Z)-3-己烯醇, 2-乙酰基吡咯, 2-乙基-3,5-二甲基吡咯和2-乙酰基-1,3,5-二甲基吡咯, $\beta$ -紫罗兰酮	[27]
日本绿茶	SDE	AEDA	1-辛烯-3-醇, $\beta$ -马来酮, 香叶醇, $\beta$ -紫罗兰酮, (Z)-甲基茉莉酸甲酯, 吡嗪, 香豆素	[41]
日本煎茶	SDE	GC-O AEDA	4-甲氧基-2-甲基-2-丁硫醇, (Z)-1,5-辛二烯-3-酮, 4-羟基-4-甲基-2-戊酮, (E,E)-2,4-癸二烯醛, $\beta$ -大马酮, $\beta$ -大马士酮, (Z)-茉莉酸甲酯, 吡嗪	[42]
日本煎茶	SDE	AEDA	(Z)-1,5-辛二烯-3-酮, 4-羟基-4-甲基-2-戊酮, 甲硫氨酸, (E,Z)-2,6-壬二烯醛和3-甲基壬烷-2,4-二酮	[38]
日本煎茶	SAFE	AEDA	(Z)-1,5-辛二烯-3-酮, (E,Z)-2, 6-壬二烯醛, 3-甲基壬烷-2,4-二酮, $\beta$ -大马酮, 4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	[43]
康迈·达马茶	SDE	AEDA	(Z)-1,5-辛二烯-3-酮, 4-羟基-4-甲基-2-戊酮, 甲硫氨酸, (E,Z)-2,6-壬二烯醛和3-甲基壬烷-2,4-二酮	[38]
蒸青绿茶	SBSE	AEDA	2-乙基-3,5-二甲基吡咯, 2-乙基-3,6-二甲基吡咯, 香叶醇, 吡喃酮, (Z)-1,5-辛二烯-3-酮	[44]
福吉茶	SDE	AEDA	2-乙基-3,5-二甲基吡咯, 2-乙基-3, 6-二甲基吡咯	[45]
抹茶	SAFE	GC-O AEDA	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮, 香豆素, 3-甲基-2,4-壬二酮, (E,Z)-2,6-壬二烯醛, (E)-4-环氧-5-环氧(E)-2-癸醛, (Z)-1,5-辛二烯-3-酮, $\alpha$ -紫罗兰酮和(E)-异丁香酚	[28]
白桑茶	HS-SPME	AEDA OAV	$\beta$ -紫罗兰酮, 芳樟醇, 芳樟醇氧化物I, 芳樟醇氧化物III, 香叶醇, 环氧芳樟醇, 癸醛, 顺-茉莉酮	[29]
晒青毛茶	SAFE	GC-O	(Z)-3-己烯醇, 甲酯, (E)-2-庚烯醛, 辛酸, 苯乙醇, 香叶醇, (Z)-己酸-3-己烯醇, 长叶烯, 十三醇, $\beta$ -紫罗兰酮	[46]

注: SAFE.溶剂辅助蒸发 (solvent assisted flavor evaporation)。

2.2 红茶挥发性成分中关键呈香成分

红茶属于全发酵茶, 一般分为工夫红茶、小种红茶和红碎茶三大类, 具有“甜香”、“花香”以及“果香”等典型香型。红茶的加工工艺一般为萎凋、揉捻、发酵和干燥。

目前, 国内的科研工作者大多以祁红、滇红等工夫红茶以及金骏眉等小种红茶作为主要研究对象, 已经在其挥发性成分中关键呈香成分的研究中取得了较好的进展。在名优工夫红茶研究方面, Xiao Zuobing等采用HS-SPME、GC-O (AEDA) 结合PLSR模型对4种不同类型的中国工夫红茶 (滇红工夫、坦洋工夫、祁门工夫、宜兴工夫) 进行分析, 共检测出64种FD值介于4~4 096的挥发性成分, 其中滇红工夫中的反式-芳樟醇氧化物, 坦洋工夫、滇红工夫以及祁门工夫红茶中的香叶醇均具有最高的FD值 (4 096)<sup>[47]</sup>。该研究结果与以往香叶醇是祁门红茶的特征香气成分的研究结论<sup>[48]</sup>相似。香叶醇具有浓郁的玫瑰、蔷薇类花香, 香叶醇的高FD值以及揉捻和发酵过程中含量的大量增加<sup>[49]</sup>,

决定了祁门红茶的“祁门香”。Pang Xueli等采用吹扫/捕集-热脱附法、GC-O结合动态顶空稀释分析对滇红的香气成分进行分析, 发现滇红中具有最高的FD值 (3 125) 的化合物为2-甲基丁醛, 而后是2-甲基丙醛、芳樟醇、苯乙醛、香叶醇、3-甲基丁醛以及水杨酸甲酯<sup>[50]</sup>。该结果与Xiao Zuobing等的研究结果有所差别, 原因可能是HS-SPME方法无法很好地富集低回收率组分, 而采用吹扫/捕集-热脱附法过程产生的液、气两相的不平衡可使挥发性组分逸出更多, 从而可实现超痕量组分的分析。在新型红茶研究方面, 发现新品种安吉红茶中关键呈香成分为(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、脱氢芳樟醇、苯甲醛、橙花醇、芳樟醇、香叶醇、苯甲醇、苯乙醇, 这些成分的存在是形成安吉红茶“甜香”、“花香”明显的主要原因<sup>[51]</sup>。此外, 葛晓杰等<sup>[52]</sup>采用HS-SPME结合GC-O研究分析了“花香”和“甜香”型红茶的香气成分, 发现芳樟醇 (花香)、苯甲醛 (草药味)、(Z)-芳樟醇氧化物 (熟土豆味)、(E,E)-2,4-庚二烯醛 (辛臭味) 等6种成分具有显著的呈香效果, 是这两种香型红茶的关键呈香成分。但值得关注的是, 苯甲醛是红茶中重要的呈香成分之一, 文献[25]报道苯甲醛的呈香特性一般为典型的杏仁香、苦及樱桃气味, 它对红茶香气品质的贡献还有待进一步研究分析。

国外红茶香气关键呈香成分的研究主要以大吉岭红茶、斯里兰卡红茶为研究对象。通过对大吉岭红茶香气研究的汇总 (表3) 发现, 大吉岭红茶的关键呈香成分主要包括醇类、酮类、醛类以及壬二烯醛等化学物质; Kasuga等采用GC/氢火焰离子化检测器、GC-O以及GC×GC等分析技术对5种不同品牌的斯里兰卡红茶 (Nuwara Eliya、Uva、Dimbula、Kandy、Ruhuna) 进行香气化合物分析, 结果表明芳樟醇、4-羟基-2,5-二甲基-3(H)-呋喃酮、香叶醇、香豆素、(E)-2-己烯酸、3-甲基丁酸 (异戊酸) 和苯乙酸是这5种斯里兰卡红茶的关键呈香成分<sup>[53]</sup>。由表3可知, 不同研究中分析得到的红茶关键呈香成分也存在较大的差异, 这可能与研究所选用样品的原料不同、样品的加工工艺差异以及香气萃取所采用方法的差异有关。

由表3还可以发现, 采用不同香气富集方法分析得到的Kangra正统红茶中关键呈香成分为2-己烯醛、3-己烯醇、芳樟醇及其氧化物、 $\beta$ -紫罗兰酮以及二氢猕猴桃内酯; 其中通过SDE法得到的关键呈香成分中存在甲基吡嗪 (表现为烘烤香、坚果香), 推测该物质是在SDE法萃取香气成分时, 高温加热致使茶汤中挥发性成分降解而生成, 这在相关SDE方法研究中也有报道<sup>[54]</sup>。

**表3 不同类型红茶中鉴定出的关键呈香成分**  
**Table 3 Key aroma compounds identified in different kinds of black tea**

红茶	萃取方法	分析方法	关键呈香成分	参考文献
花香、甜香红茶	HS-SPME	GC-O	芳樟醇, 苯甲醛, (Z)-芳樟醇氧化物, (E,E)-2,4-庚二烯醛	[52]
祁门红茶	HS-SPME	OAV	香叶醇, 2-甲基丁醛, 苯乙醛, (E,E)-2,4-壬二烯醛, (E,E)-2,4-癸二烯醛, 大马士酮, $\beta$ -紫罗兰酮, 水杨酸甲酯	[55]
工夫红茶	HS-SPME	AEDA OAV	1-戊醇, 叶醇, 1-辛烯-3-醇, (E)-氧化芳樟醇, 芳樟醇, (Z)-6-壬烯醇, 香叶醇, 苯甲醇, 苯乙醇, 橙花叔醇, 戊醛, 己醛, (E)-2-己烯醛, 糠醛, (E,E)-2,4-庚二烯醛, 苯乙醛, (E,E)-2,4-癸二烯醛, 水杨酸甲酯, 丙位-壬内酯, 2,3-丁二酮, 2-庚酮, 香豆素	[56]
工夫红茶	HS-SPME	GC-O	芳樟醇, (E)-呋喃芳樟醇氧化物, (Z)-呋喃芳樟醇氧化物, 苯乙醇, $\beta$ -月桂烯, 水杨酸甲酯	[57]
大吉岭红茶		AEDA	芳樟醇, $\beta$ -紫罗兰酮, 4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮, 3-羟基-4,5-二甲基-2(5H)-呋喃酮, 苯乙酸, (E,E,Z)-2,4,6-壬三烯醛	[58]
大吉岭红茶	SAFE	AEDA	3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇, 2,3-二乙基-5-甲基吡嗪, 4-巯基-4-甲基-2-戊酮	[59]
大吉岭红茶	SDE	AEDA	3-甲基丁醛、甲硫基丙醛、 $\beta$ -大马酮、二甲基二硫化物, 2-甲氧基-4-乙基苯基酚	[60]
大吉岭红茶	SAFE	AEDA OAV	(R)-芳樟醇, 香叶醇, (E,E,Z)-2,4,6-壬三烯醛, (E)- $\beta$ -大马酮, 2-甲基丁醛, 2-甲基丙醛, 3-甲基丁醛, 3-甲基-2,4-壬二烯醇, (E,Z)-2,6-壬二烯醛, (E)-2,4-癸二烯醛, (Z)-4-庚烯醛, 苯乙醛, (Z)-3-己烯-1-醇, $\alpha$ -紫罗兰酮, 己醛, (E,E)-2,4-壬二烯醛	[61]
斯里兰卡红茶	SDE	GC-O	芳樟醇, 4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮, 香叶醇, 香豆素, (E)-2-己烯醛, 3-甲基丁醛(异戊酸), 苯乙酸	[53]
Kangra正续红茶	SFE	AEDA	2-己烯醛, 3-己烯醇, 橙花叔醇, (E)-香叶醇, (E)-芳樟醇氧化物, 芳樟醇, (Z)-芳樟醇氧化物, $\beta$ -紫罗兰酮, $\alpha$ -紫罗兰酮, 二氢猕猴桃内酯	[62]
Kangra正续红茶	SDE	GC-O AEDA	2-己烯醛, 3-己烯醇, 甲硫基丙醛, (Z)-芳樟醇氧化物, 芳樟醇, (E,Z)-2,6-壬二烯醛, 香叶醇, 苯乙醇, $\beta$ -紫罗兰酮, 脱氧芳樟醇和二氢猕猴桃内酯	[63]
顶普拉红茶	SAFE	AEDA	(Z)-4,5-环氧-(E)-2-癸烯, (E)-4,5-环氧-(E)-2-癸烯	[64]
滇红	吹扫捕集-热脱附	GC-O 动态顶空 稀释分析	2-甲基丁醛, 2-甲基丙醛, 芳樟醇, 苯乙醛, 香叶醇, 3-甲基丁醛, 水杨酸甲酯	[50]
安吉红茶	HS-SPME	GC-O	(E,E)-2,4-庚二烯醛, (E,E)-3,5-辛二烯-2-酮, 脱氢芳樟醇, 苯甲醛, 橙花醇, 芳樟醇, 香叶醇, 苯甲醇, 苯乙醇	[51]
红茶	静态顶空技术	GC-O AEDA	(Z)-3-己烯醛, 芳樟醇, (Z)-辛基-1,5-二烯-3-醇, 1-辛基-3-醇, (Z)-4-庚烯醛, 2,3-丁二酮, 2-甲基丙醛, 3-甲基丁醛, 3-甲基-2,4-壬二烯醇, (E)-2-壬烯醛, 辛醛, (E)-2-(E)-6-壬二烯醛, 己醛, (E,E)-2,4-壬二烯醛, $\alpha$ -蒎烯	[65]

### 2.3 乌龙茶挥发性成分中关键呈香成分

乌龙茶又称青茶, 属于半发酵茶, 香气类型丰富, 其代表性香型有花香、花果香等。乌龙茶的加工工艺一般为萎凋、摇青、杀青、揉捻、干燥等。目前, 有关乌龙茶挥发性成分中关键呈香成分的研究也取得了较好的进展(表4), 可以发现, 橙花叔醇、芳樟醇及其氧化物以及 $\alpha$ -法尼烯是普遍存在于乌龙茶中的关键呈香成分。有研究表明, 橙花叔醇是福建乌龙茶品种最主要的香气成分<sup>[66]</sup>, 具有花香及果香特征。

在不同发酵程度乌龙茶香气研究方面, Zhu Jiancai等采用GC-MS、GC-火焰光度检测、GC-O结合OAV值分析了冻顶乌龙(轻度发酵)、铁观音(中度发酵)以及大红袍(重度发酵)这3种不同发酵程度的乌龙茶, 结果表明2-甲基丙醛、3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、橙花叔醇、(E)-2-庚烯醛、己醛、辛醛、 $\beta$ -大马酮、吲哚、6-甲基-5-庚烯-2-酮、(R)-(-)-芳樟醇、二甲基硫醚等具有较高OAV值, 是对茶汤整体香气具有贡献作用的关键呈香

成分<sup>[67]</sup>。此外, Wang Lifei等<sup>[68]</sup>采用GC-O结合GC-MS技术对不同发酵程度的茶叶进行判别分析, 发现(E)-2-己烯醛和水杨酸甲酯可用于对乌龙茶与红茶的区分, 但这两种物质无法用于辨别发酵程度接近于红茶的东方美人茶与红茶之间的差别。

在不同品种乌龙茶香气研究方面, 苗爱清等采用HS-SPME结合GC-O技术分析了4种不同品种的乌龙茶(白叶单枞、金萱、铁观音、黄金桂)挥发性成分中的关键呈香成分, 研究表明, 白叶单枞的关键呈香成分为芳樟醇(玫瑰花香)及其氧化物I(淡花香); 金萱的关键呈香成分为吲哚(高浓度时表现出刺激气味, 低浓度时表现出花香); 铁观音的关键呈香成分为芳樟醇(玫瑰花香)、水杨酸甲酯(薄荷香味)、己酸-(Z)-3-己烯酯(花香)和 $\alpha$ -法尼烯(花香); 黄金桂的关键呈香成分为芳樟醇氧化物I(淡花香)、己酸-(Z)-3-己烯酯(花香)及 $\alpha$ -法尼烯(花香)<sup>[69]</sup>; 另外, 游铜锡等<sup>[70]</sup>研究发现, 由金萱品种制作的包种茶, 其关键呈香成分为带有牛奶味道的十一酸乙酯与丁酰乳酸丁酯, 金萱又称“台茶12号”, 为台湾的优良茶树品种。该品种加工的成茶带有奶香味, 推测品种的选择是包种茶“奶香”特征明显的重要影响因素。

**表4 不同类型乌龙茶中鉴定出的关键呈香成分**  
**Table 4 Key aroma compounds identified in different kinds of oolong tea**

乌龙茶	萃取方法	分析方法	关键呈香成分	参考文献
白叶单枞	HS-SPME	GC-O	芳樟醇及其氧化物I	[69]
铁观音	HS-SPME	GC-O	芳樟醇, 水杨酸甲酯, 己酸-(Z)-3-己烯酯, $\alpha$ -法尼烯	[69]
铁观音	SPME	GC-O OAV	2-甲基丙醛, 3-甲基丁醛, 2-甲基丁醛, 橙花叔醇, (E)-2-庚烯醛, 己醛, 辛醛, $\beta$ -大马酮, 吲哚, 6-甲基-5-庚烯-2-酮, (R)-(-)-芳樟醇, 二甲基硫醚	[67]
凤凰单枞	SAFE	GC-O	芳樟醇氧化物I, 橙花醇, 芳樟醇氧化物II, 橙花叔醇	[73]
凤凰单枞	SAFE	GC-O	乙基苯, 间二甲苯, 环己酮, 丁酸异戊酯, 苯甲醛, [4-甲基-3-戊烯基]环氧乙烷甲酯, (E)-芳樟醇氧化物(呋喃型), 芳樟醇, (E)-芳樟醇氧化物(吡喃型), 萘, 癸醛, 香叶基丙酮, $\gamma$ -戊内酯, 苯乙醇, 橙花叔醇	[74]
金萱乌龙	SPME/SDE	GC-O	乙酸异戊酯, 二氢甲基环戊吡喃, $\gamma$ -卡宾烯, 具有坚果香味的未识别化合物戊酮, (Z)-2-戊烯-1-醇, 3,5-辛二烯醇, (-)-(Z)-玫瑰氧化物, 一种具有泥土气味的未知化合物	[75]
金萱乌龙	HS-SPME	GC-O	吲哚	[69]
金萱乌龙	SDE	GC-O	戊醛, 二氢甲基环戊吡喃, 一种表现为坚果香的未知成分	[76]
黄金桂	HS-SPME	GC-O	芳樟醇氧化物I, (Z)-己酸-3-己烯酯, $\alpha$ -法尼烯	[69]
速溶乌龙茶	HS-SPME	OAV	$\beta$ -(E)-大马酮, 辛醇	[77]
速溶乌龙茶	HS-SPME	OAV	芳樟醇, (E)- $\beta$ -罗勒烯, (E)-芳樟醇氧化物, (Z)-芳樟醇氧化物	[78]
包种茶	VDE	GC-O AEDA	十一酸乙酯, 丁酰乳酸丁酯	[70]
乌龙茶		GC-O AEDA	吲哚, 茉莉酮酸甲酯, 茉莉内酯, $\beta$ -紫罗兰酮, 苯甲醇	[79]

与乌龙茶相比, 速溶乌龙茶的关键呈香成分表现出完全不同的分析结果, 其中辛醇、 $\beta$ -(E)-大马酮呈现花香; 而芳樟醇及其氧化物表现为花香和一定的陈旧气味, (E)- $\beta$ -罗勒烯表现为花香及草香, 推测在速溶茶粉加工过程中的加热、光照及干燥等处理导致了乌龙茶挥发性成分的改变<sup>[71]</sup>, 或是速溶茶粉原料及年份的差异导致了结果的不同。

另外，值得关注的是，在对乌龙茶挥发性成分的分析过程中，发现香气化合物之间存在协同效应以及掩蔽效应，亚阈值香气化合物同样可对乌龙茶香气产生影响<sup>[72]</sup>。出现这种现象的原因可能是由于某些香气化合物阈值较低，即使以较低浓度出现也可以影响茶叶整体的呈香特点。

2.4 黑茶挥发性成分中关键呈香成分研究进展

黑茶是我国特有茶类，属于后发酵茶，风味品质独特，主要包括普洱茶、茯砖茶、六堡茶、青砖茶、康砖茶等。黑茶的加工工艺比较特殊，一般采用黑毛茶作为加工原料，经过微生物参与的后发酵过程制作而成。目前，关于黑茶挥发性成分中关键呈香成分的研究也取得了较好的进展（表5）。

目前，关于普洱茶香气的研究比较深入。例如，李瑞利通过GC-MS结合GC-O技术对5种普洱茶的香气成分进行分析，共鉴定出37种香气物质，其中包括9种酮类（花果香、木香）、9种醛类（清香、焦香和花香）、8种醇类（蘑菇味和甜花香）、6种甲氧基化合物（陈香、木香和霉味）以及一些刺激性气味的萜、愈创木酚等物质<sup>[80]</sup>；此外，Xu Yongquan等研究发现普洱茶中香气成分的呈香特性及相对气味强度分别为：醇类（花香，33.01%）、甲氧基化合物（陈香和泥土气味，25.24%）、酮类（木香，11.17%）<sup>[81]</sup>。研究表明，普洱茶中的关键呈香成分主要包括1,2,3-三甲氧基苯、1,2,4-三甲氧基苯等带有陈香的杂氧类化合物。Lü Haipeng等<sup>[82]</sup>研究发现，普洱茶中含有丰富的杂氧类化合物，例如1,2,3-三甲氧基苯、1,2,4-三甲氧基苯等，这些成分是普洱茶重要的特色成分也是决定普洱茶独特香气品质的关键化合物成分，是在微生物、热降解双重作用条件下通过没食子酸的甲基化形成的；此外，Wang Kunbo等研究指出，1,2,3-三甲氧基苯、4-乙基-1,2-二甲氧基苯等对普洱茶呈香具有关键作用的物质是黑茶后发酵过程中儿茶素在微生物作用下降解与甲基化的结果<sup>[83]</sup>。另外，在普洱茶速溶茶的关键呈香成分的研究方面，徐咏全等采用HS-SPME-GC/MS结合GC-O分析检测了普洱茶粉以及普洱茶原料的香气成分，结果表明普洱茶粉中可嗅闻到27种气味物质，普洱茶中可嗅闻到33种气味物质，且普洱茶粉中果香、花香、木香与草药香总香气强度明显高于普洱茶原料，陈香、仓味总香气强度明显低于普洱茶原料<sup>[84]</sup>。在青砖茶研究方面，刘盼盼等发现β-紫罗兰酮、芳樟醇、(Z)-4-庚烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、癸醛、(E)-2-壬烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、α-紫罗兰酮、2-辛烯-1-醛、1-戊烯-3-酮的OAV值均大于1，是对青砖茶风味具有重要贡献的关键呈香成分<sup>[85]</sup>。

通过以上分析可知，近年来有关黑茶关键呈香成分的研究主要集中于普洱茶、青砖茶等黑茶产品（表5），

鲜有关于茯砖茶、六堡茶等其他类型黑茶关键呈香成分的研究，后续针对这些黑茶产品的研究亟待尽快开展。

表5 黑茶及其他茶类中鉴定出的关键呈香成分  
Table 5 Key aroma compounds identified in dark tea and other kinds of tea

黑茶及其他	萃取方法	分析方法	关键呈香成分	参考文献
普洱茶	HS-SPME	GC-O	1,2-二甲氧基苯, 1,2,3-三甲氧基苯, 1,2,4-三甲氧基苯, 1,3,5-三甲氧基-5-甲基苯, 4-乙基-1,2-二甲氧基苯, β-紫罗兰酮, β-芳樟醇, 芳樟醇氧化物, 癸醛	[82]
普洱茶	浸泡提取法	AEDA	普洱生茶: 苯乙酸, 芳樟醇, β-大马酮, 香芹酚, 4-乙烯基愈创木酚 普洱熟茶: 1,2,3-三甲氧基苯, 1,2,4-三甲氧基苯	[86]
青砖茶	HS-SPME	OAV	β-紫罗兰酮, 芳樟醇, (Z)-4-庚烯醛, (E,Z)-2,6-壬二烯醛, 癸醛, (E)-2-壬烯醛, (E,E)-2,4-庚二烯醛, 1-辛烯-3-醇, 壬醛, α-紫罗兰酮, 2-辛烯-1-醛, 1-戊烯-3-酮	[85]
茉莉红茶	HS-SPME	OAV	苯甲酸甲酯, 苯乙酸甲酯, 芳樟醇, 橙花叔醇, β-紫罗兰酮, (E)-2-(Z)-6-壬二烯醛, 癸醛, 庚醛, 正己醛, 水杨酸甲酯	[87]
茉莉绿茶	SDE	AEDA	芳樟醇, 邻氨基苯甲酸甲酯, 4-己烷内酯, 4-萘酚内酯, (E)-2-己烯己酸酯, 4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	[88]

2.5 其他茶类产品和花茶挥发性成分中关键呈香成分

目前，关于黄茶和白茶挥发性成分及其关键呈香成分的研究较少。

花茶属于再加工茶，外形优美，香气馥郁，受到众多消费者的青睐。目前，在花茶挥发性成分中关键呈香成分方面也有少量相关研究报道（表5），例如关于茉莉红茶和茉莉绿茶的研究<sup>[87-88]</sup>。

3 结 语

茶叶挥发性成分中的关键呈香成分具有重要研究价值和意义，其未来的研究方向可能主要为以下几个方面。

在茶叶挥发性成分的检测分析中，采用主流的GC-MS分析技术一般检测到的是含量相对高的化学成分；然而，由于香气化合物的阈值差异悬殊，茶叶挥发性成分中检测出的较高含量的香气化合物未必是关键呈香成分，而较低含量的化合物因其更低的阈值却很可能是关键呈香成分。因此，茶叶挥发性成分中关键呈香成分的分析对检测技术提出了更高的要求。GC×GC-TOF-MS分析技术是一种具有高灵敏度、高峰容量、高分辨率等优点的新型检测技术，在未来关键呈香成分的研究中有望发挥重要的作用。

茶叶中多数挥发性化合物都具有一个或多个立体中心，可能存在香气特征与香气阈值迥异的对映异构体，其不同组成比例的呈香效果差异对茶叶香气的形成可能有着重要的影响。例如，芳樟醇具有3R-(一)-芳樟醇和3S-(+)-芳樟醇两种旋光异构体，而它们有着完全不同的香气属性：3S-(+)-芳樟醇具有甜香、花香以及类似橙叶的香气特征，香气阈值为7.4 μg/kg；而3R-(一)-芳樟醇具有木香和类似薰衣草的香气特征，香气阈值为0.8 μg/kg。因



此,对茶叶挥发性成分中鉴定出来的关键呈香成分,后续还有必要深入开展它们对映异构体的分析(如果化合物存在手性中心),从更深层次确定它们的呈香特性。

茶叶挥发性成分中关键呈香成分的合成调控机制研究是未来重要的研究方向之一,具有重要的研究意义和研究价值。例如,安徽农业大学曾揭示了茶树芳樟醇和橙花叔醇生物合成调控新机制,为增进茶叶香气品质提供了新路径<sup>[89]</sup>;通过应用不同逆境信号物质,调节芳樟醇和橙花叔醇等关键呈香化合物的生物合成,从而达到改善茶叶香气品质的目的。随着近期茶树的全基因组信息破解,与茶叶风味相关的萜烯类物质合成酶基因的研究有深入开展的趋势,相关研究结果有望为关键呈香成分的合成调控和茶叶风味品质的提升等提供重要的科学依据。

关键呈香成分的研究技术类型众多又各存利弊,单一的分析研究技术存在其局限性,感官审评同样受环境条件及人为主观影响。因此,在未来的研究中,应融合使用多种仪器分析技术,同时保障实验人员的嗅闻水平,保障茶叶的香型判别及其关键呈香成分的可靠性等。此外,后续研究中针对鉴定出的关键呈香成分,需进行系统的香气重组实验来验证关键呈香成分的致香效果。

茶叶挥发性组分是微量成分,受影响的因素较多,即使是同一产品因加工过程中参数不同,也会产生较大的差异,甚至很难重复。这为茶叶中关键呈香成分的研究分析带来了更大的难度。因此,后续研究中,应综合考虑样品产地原料、加工工艺参数、萃取分析方法等多种因素,对相关数据进行科学地分析与评价。

#### 参考文献:

- [1] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 39.
- [2] 王秋霜, 陈栋, 许勇泉, 等. 中国名优红茶香气成分的比较研究[J]. 中国食品学报, 2013, 13(1): 195-200. DOI:10.16429/j.1009-7848.2013.01.030.
- [3] 孙琳, 李瑞利, 周雪芳, 等. 气相色谱-嗅觉测量技术及其在茶叶活性香气化合物检测中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 396-399; 404. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.16.032.
- [4] 宋焕禄. 食品风味分析技术研究进展[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2006, 24(1): 1-4. DOI:10.3969/j.issn.1671-1513.2006.01.001.
- [5] 叶国注, 何群仙, 李楚芳, 等. GC-O检测技术应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(4): 154-160. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2010.04.009.
- [6] 范文来, 聂庆庆, 徐岩. 洋河绵柔型白酒关键风味成分[J]. 食品科学, 2013, 34(4): 135-139.
- [7] MALL V, SCHIEBERLE P. Evaluation of key aroma compounds in processed prawns (whiteleg shrimp) by quantitation and aroma recombination[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(13): 2776-2783. DOI:10.1021/acs.jafc.7b00636.
- [8] 汪立平, 徐岩, 赵光鳌, 等. 顶空固相微萃取法快速测定苹果酒中的香味物质[J]. 无锡轻工大学学报, 2003, 22(1): 1-6; 20. DOI:10.3321/j.issn:1673-1689.2003.01.001.
- [9] MARSILI R. Flavor, fragrance, and odor analysis[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011: 56. DOI:10.3321/j.issn:1673-1689.2003.01.001.
- [10] 安红梅, 尹建军, 张晓磊, 等. 同时蒸馏萃取技术在食品分析中的应用[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(12): 216-220. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2011.12.063.
- [11] 张正竹, 陈玓玓. 茶叶香精油的同时蒸馏萃取(SDE)法提取效率分析[J]. 中国茶叶加工, 2003(1): 31-33. DOI:10.15905/j.cnki.33-1157/ts.2003.01.012.
- [12] 韩业慧, 范文来, 徐岩, 等. 搅拌棒吸附萃取技术与GC-MS联用测定苹果酒挥发性物质[J]. 分析试验室, 2008, 27(1): 34-37. DOI:10.3969/j.issn.1000-0720.2008.01.010.
- [13] 赵良雨, 冯志彪. 新型样品前处理: 搅拌棒吸附萃取技术及其在食品分析中的应用[J]. 饮料工业, 2008, 11(1): 8-11. DOI:10.3969/j.issn.1007-7871.2008.01.003.
- [14] 王国义. 超临界流体萃取技术及其应用[J]. 中国食品工业, 2006(9): 32-34. DOI:10.3969/j.issn.1006-6195.2006.09.012.
- [15] 李永菊. 茶叶香气的提取方法[J]. 茶叶科学技术, 2006(4): 15-16. DOI:10.3969/j.issn.1007-4872.2006.04.005.
- [16] 朱旗, 施兆鹏, 任春梅. 绿茶香气不同提取方法的研究[J]. 茶叶科学, 2001, 21(1): 38-43. DOI:10.3969/j.issn.1000-369X.2001.01.010.
- [17] 黄玉清, 陈艺欣, 田厚军. 植物香气成分提取方法的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(7): 245-247. DOI:10.3969/j.issn.1002-1302.2012.07.093.
- [18] 周志, 马琼, 朱玉昌, 等. GC-O-MS法分析野生刺梨汁游离态和O-糖苷键合态香气活性物质[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 80-84. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201522014.
- [19] KANEKO S, KUMAZAWA K, NISHIMURA O. Comparison of key aroma compounds in five different types of Japanese soy sauces by aroma extract dilution analysis (AEDA)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(15): 3831-3836. DOI:10.1021/jf300150d.
- [20] 高建宏. 不同香型烟叶中关键致香物质的GC-MS/O分析与鉴别[D]. 上海: 复旦大学, 2012: 57.
- [21] XIAO Zuobing, WU Quyang, NIU Yunwei, et al. Characterization of the key aroma compounds in five varieties of mandarins by gas chromatography-olfactometry, odor activity values, aroma recombination, and omission analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(38): 8392-8401. DOI:10.1021/acs.jafc.7b02703.
- [22] 陈合兴. 碧螺春茶特征香气成分研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2016: 51.
- [23] ZHU Yin, LÜ Haipeng, SHAO Chenyang, et al. Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas[J]. Food Research International, 2018, 108: 74-82. DOI:10.1016/j.foodres.2018.03.026.
- [24] RYCHLIK M, SCHIEBERLE P, GROSCH W. Compilation of odor thresholds, odor qualities and retention indices of key food odorants[R]. Institut für Lebensmittelchemie der Technischen Universität München und Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, 1998.
- [25] BURDOCK G A. Fenaroli's handbook of flavor ingredients[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016: 134; 848; 955.
- [26] 范海默特里奥. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 148.
- [27] HATTORI S, TAKAGAKI H, FUJIMORI T. Identification of volatile compounds which enhanced odor notes in Japanese green tea using the OASIS (original aroma simultaneously input to the sniffing port) method[J]. Food Science and Technology Research, 2005, 11(2): 171-174. DOI:10.3136/fstr.11.171.
- [28] BABA R, AMANO Y, WADA Y, et al. Characterization of the potent odorants contributing to the characteristic aroma of matcha by gas chromatography-olfactometry techniques[J]. Journal of Agricultural

- and Food Chemistry, 2017, 65(14): 2984-2989. DOI:10.3136/fstr.11.171.
- [29] 韩卓潇. 茶树新品系“白桑茶”特征性香气物质、儿茶素及咖啡因在加工过程中的变化[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016: 15.
- [30] 汪厚银, 李志, 张剑, 等. 基于气质联用/气相色谱-嗅觉测定技术的西湖龙井茶特征香气成分分析[J]. 食品科学, 2012, 33(8): 248-251.
- [31] 肖作兵, 陈合兴, 牛云蔚, 等. 顶空蒸馏萃取法结合GC-MS/GC-O技术分析龙井茶的特征香气成分[J]. 浙江大学学报(理学版), 2015, 42(6): 714-720. DOI:10.3785/j.issn.1008-9497.2015.06.014.
- [32] 舒畅. 龙井茶特征香气成分分析及鉴定研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2016: 32.
- [33] GONG Xiaowei, HAN Yi, ZHU Jiancai, et al. Identification of the aroma-active compounds in Longjing tea characterized by odor activity value, gas chromatography-olfactometry, and aroma recombination[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(Suppl 1): S1107-S1121. DOI:10.1080/10942912.2017.1336719.
- [34] 廖勇诚. 龙井绿茶饮料中香气化合物及其与基质的相互作用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008: 44-49.
- [35] 舒畅, 余远斌, 肖作兵, 等. 新、陈龙井茶关键香气成分的SPME/GC-MS/GC-O/OAV研究[J]. 食品工业, 2016, 37(9): 279-285.
- [36] CHENG Yong, HUYNH-BA T, BLANK I, et al. Temporal changes in aroma release of Longjing tea infusion: interaction of volatile and nonvolatile tea components and formation of 2-butyl-2-octenal upon aging[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(6): 2160-2169. DOI:10.1021/jf0731321.
- [37] BABA R, KUMAZAWA K. Characterization of the potent odorants contributing to the characteristic aroma of Chinese green tea infusions by aroma extract dilution analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(33): 8308-8313. DOI:10.1021/jf502308a.
- [38] KUMAZAWA K, MASUDA H. Identification of potent odorants in different green tea varieties using flavor dilution technique[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(20): 5660-5663. DOI:10.1021/jf020498j.
- [39] 韩熠, 洪鑫, 朱东来, 等. 应用GC-MS和GC-O鉴定不同等级洞庭碧螺春茶特征香气成分[J]. 香料香精化妆品, 2018, 3: 1-10. DOI:10.3969/j.issn.1000-4475.2018.03.001.
- [40] HATTORI S, TAKAGAKI H, FUJIMORI T. Evaluation of Japanese green tea extract using GC/O with original aroma simultaneously input to the sniffing port method (OASIS)[J]. Food Science and Technology Research, 2003, 9(4): 350-352. DOI:10.3136/fstr.9.350.
- [41] YUZO M, YUICHI Y. Identification of key odorants in withering-flavored green tea by aroma extract dilution analysis[J]. Research Report on Tea, 2009, 107: 81-84. DOI:10.5979/cha.2009.107\_81.
- [42] KUMAZAWA K, MASUDA H. Identification of potent odorants in Japanese green tea (Sen-cha)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(12): 5169-5172. DOI:10.1021/jf9906782.
- [43] MIZUKAMI Y. Key odorants in the headspace above infused Sencha and in the infusion[J]. Chagyo Kenkyu Hokoku (Tea Research Journal), 2013, 116: 15-21. DOI:10.5979/cha.2013.116\_15.
- [44] SASAKI T, KOSHI E, TAKE H, et al. Characterisation of odorants in roasted stem tea using gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry analysis[J]. Food Chemistry, 2017, 220: 177-183. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.09.208.
- [45] MIZUKAMI Y, SAWAI Y, YAMAGUCHI Y. Changes in the concentrations of acrylamide, selected odorants, and catechins caused by roasting of green tea[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(6): 2154-2159. DOI:10.1021/jf0731806.
- [46] 马超龙. 晒青毛茶加工过程中香气变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 29.
- [47] XIAO Zuobing, WANG Hongling, NIU Yunwei, et al. Characterization of aroma compositions in different Chinese congou black teas using GC-MS and GC-O combined with partial least squares regression[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2017, 32(4): 265-276. DOI:10.1002/ffj.3378.
- [48] 竹尾忠一, 刘宗福. 中国红茶的香气组成特征[J]. 茶叶通讯, 1984(1): 65-66.
- [49] 舒庆龄, 赵和涛. 祁门红茶香气成分的初步研究[J]. 植物学报(英文版), 1991, 33(3): 226-231.
- [50] PANG Xueli, QIN Zihan, ZHAO Lei, et al. Development of regression model to differentiate quality of black tea (Dianhong): correlate aroma properties with instrumental data using multiple linear regression analysis[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2012, 47(11): 2372-2379. DOI:10.1111/j.1365-2621.2012.03112.x.
- [51] 狄德荣. “安吉红茶”理化成分分析及呈香活性成分鉴定[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014: 39. DOI:10.7666/d.D570856.
- [52] 葛晓杰, 苏祝成, 狄德荣, 等. 基于顶空固相微萃取/气质联用的红茶特征香型呈香活性成分研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 304-310. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.23.048.
- [53] KASUGA H, YUICHIRO Y, BABA A, et al. Characteristic odorants of Sri Lankan black teas[J]. American Chemical Society, 2010, 1036: 21-31. DOI:10.1021/bk-2010-1036.ch002.
- [54] 陈悦娇, 王冬梅, 邓炜强, 等. SDRP和SDE法提取乌龙茶香气成分的比较研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(增刊1): 275-278. DOI:10.3321/j.issn:0529-6579.2005.z1.054.
- [55] 王红玲. 祁门红茶特征香气成分研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2017: 53.
- [56] 肖作兵, 王红玲, 牛云蔚, 等. 基于OAV和AEDA对工夫红茶的PLSR分析[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 242-249. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201810037.
- [57] MAO Shihong, LU Changqi, LI Meifeng, et al. Identification of key aromatic compounds in Congou black tea by PLSR with variable importance of projection scores and gas chromatography-mass spectrometry/gas chromatography-olfactometry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(14): 5278-5286. DOI:10.1002/jsfa.9066.
- [58] SCHIEBERLE P, SCHUH C. Aroma compounds in black tea powders of different origins-changes induced by preparation of the infusion[J]. Developments in Food Science, 2006, 43(6): 151-156. DOI:10.1016/S0167-4501(06)80036-1.
- [59] RYOKO B, MAKI N, KENJI K. Identification of the potent odorants contributing to the characteristic aroma of Darjeeling black tea infusion[J]. Japanese Society for Food Science and Technology, 2017, 6(64): 294-301. DOI:10.3136/nskkk.64.294.
- [60] KUMAZAWA K, MASUDA H. Change in the flavor of black tea drink during heat processing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(7): 3304-3309. DOI:10.1021/jf001323h.
- [61] SCHUH C, SCHIEBERLE P. Characterization of the key aroma compounds in the beverage prepared from Darjeeling black tea: quantitative differences between tea leaves and infusion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(3): 916-924. DOI:10.1021/jf052495n.
- [62] JOSHI R, BABU G D K, GULATI A. Effect of decaffeination conditions on quality parameters of Kangra orthodox black tea[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 693-703. DOI:10.1016/j.foodres.2012.12.050.
- [63] JOSHI R, GULATI A. Fractionation and identification of minor and aroma-active constituents in Kangra orthodox black tea[J]. Food Chemistry, 2015, 167: 290-298. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.06.112.



- [64] KUMAZAWA K, WADA Y, MASUDA H. Characterization of epoxydecenal isomers as potent odorants in black tea (Dimbula) infusion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(13): 4795-4801. DOI:10.1021/jf0603127.
- [65] GUTH H, GROSCH W. Identification of potent odourants in static headspace samples of green and black tea powders on the basis of aroma extract dilution analysis (AEDA)[J]. Flavour and Fragrance Journal, 1993, 8(4): 173-178. DOI:10.1002/ffj.2730080402.
- [66] 陈荣冰, 张方舟, 黄福平, 等. 丹桂与名优乌龙茶品种香气特征比较[J]. 茶叶科学, 1998, 18(2): 113-118.
- [67] ZHU Jiancai, CHEN Feng, WANG Lingying, et al. Comparison of aroma-active volatiles in Oolong tea infusions using GC-olfactometry, GC-FPD, and GC-MS[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(34): 7499-7510. DOI:10.1021/acs.jafc.5b02358.
- [68] WANG Lifei, LEE J, CHUNG J, et al. Discrimination of teas with different degrees of fermentation by SPME-GC analysis of the characteristic volatile flavour compounds[J]. Food Chemistry, 2008, 109(1): 196-206. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.12.054.
- [69] 苗爱清, 吕海鹏, 孙世利, 等. 乌龙茶香气的HS-SPME-GC-MS/GC-O研究[J]. 茶叶科学, 2010, 30(增刊1): 583-587. DOI:10.13305/j.cnki.jts.2010.s1.013.
- [70] 游铜锡, 蔡宏仁, 陈玉舜, 等. 以气相层析嗅觉品闻法分析包种茶之重要挥发性成分[C]//中国海峡两岸茶叶科技学术研讨会. 杭州: 中国茶叶学会, 2000: 158.
- [71] 罗龙新. 速溶茶和茶饮料生产中香气的损失及改善技术[J]. 中国茶叶, 2006, 28(6): 12-14. DOI:10.3969/j.issn.1000-3150.2006.06.002.
- [72] ZHU Jiancai, CHEN Feng, WANG Lingying, et al. Evaluation of the synergism among volatile compounds in Oolong tea infusion by odour threshold with sensory analysis and E-nose[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1484-1490. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.11.002.
- [73] 肖凌, 毛世红, 童华荣. 3种香型凤凰单丛茶挥发性成分分析[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 233-239. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201820034.
- [74] ZHAO Xiaoping. Identification of aroma active compounds in fenghuang dancong tea stalk by solvent assisted flavour evaporation combined gas chromatography-mass spectrometry/gas chromatography-olfactometry[J]. Hans Journal of Agricultural Sciences, 2017, 7(9): 636-647. DOI:10.12677/hjas.2017.79086.
- [75] SHEIBANI E, DUNCAN S E, KUHN D D, et al. SDE and SPME Analysis of flavor compounds in Jin Xuan Oolong tea[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(2): C348-C358. DOI:10.1111/1750-3841.13203.
- [76] SHEIBANI E, DUNCAN S E, KUHN D D, et al. Changes in flavor volatile composition of oolong tea after panning during tea processing[J]. Food Science and Nutrition, 2016, 4(3): 456-468. DOI:10.1002/fsn3.307.
- [77] ZHANG Liangzhen, NI Hui, ZHU Yanbing, et al. Characterization of aromas of instant oolong tea and its counterparts treated with two crude enzymes from *Aspergillus niger*[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(2): e13500. DOI:10.1111/jfpp.13500.
- [78] 靳巧丽, 姜泽东, 倪辉, 等. 速溶乌龙茶粉挥发性成分的分析[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 372-379. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.7.057.
- [79] KUBOTA K. potent odorants for discriminating oolong tea varieties[J]. International Conference on Tea Culture and Science, 2004, 2004: 234-235.
- [80] 李瑞利. 普洱茶活性香气化合物研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012: 38. DOI:10.7666/d.y2086866.
- [81] XU Yongquan, WANG Chao, LI Changwen, et al. Characterization of aroma-active compounds of Pu-erh tea by headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) and simultaneous distillation-extraction (SDE) coupled with GC-olfactometry and GC-MS[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(5): 1188-1198. DOI:10.1007/s12161-015-0303-7.
- [82] LÜ Haipeng, ZHONG Qiusheng, LIN Zhi, et al. Aroma characterisation of Pu-erh tea using headspace-solid phase microextraction combined with GC/MS and GC-olfactometry[J]. Food Chemistry, 2012, 130(4): 1074-1081. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.07.135.
- [83] WANG Kunbo, LIU Fang, LIU Zhonghua, et al. Comparison of catechins and volatile compounds among different types of tea using high performance liquid chromatograph and gas chromatograph mass spectrometer[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2011, 46(7): 1406-1412. DOI:10.1111/j.1365-2621.2011.02629.x.
- [84] 徐咏全, 张晨霞, 孔雅雯, 等. HS-SPME-GC-MS-GC-O分析普洱茶粉中的关键性香气组分[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(20): 152-159. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2017.20.032.
- [85] 刘盼盼, 郑鹏程, 王胜鹏, 等. 青砖茶初制、渥堆过程中挥发性风味成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(12): 176-183. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.014144.
- [86] BABA A. Aroma components in brewed Pu'er tea (ripened Pu'er and raw Pu'er)[C]//The 3<sup>rd</sup> International Conference on O-CHA(Tea) Culture and Science, 2007: 123.
- [87] 赵国飞. 茉莉红茶窈制工艺及其品质特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 96.
- [88] ITO Y, SUGIMOTO A, KAKUDA T, et al. Identification of potent odorants in Chinese Jasmine green tea scented with flowers of *Jasminum sambac*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(17): 4878-4884. DOI:10.1021/jf020282h.
- [89] LIU Guofeng, LIU Jingjing, HE Zhirong, et al. Implementation of CsLIS/NES in linalool biosynthesis involves transcript splicing regulation in *Camellia sinensis*[J]. Plant, Cell and Environment, 2018, 41(1): 176-186. DOI:10.1111/pce.13080.