

绿茶特征性香气研究进展

尹鹏^{1,2}, 王晶晶¹, 王子浩¹, 王晓³, 郭桂义¹, 王广铭^{1*}, 孙慕芳^{1*}

(1. 信阳农林学院茶学院, 河南省豫南茶树资源综合开发重点实验室, 信阳 464000; 2. 湖南农业大学园艺学院, 教育部茶学重点实验室, 长沙 410128; 3. 信阳市文新茶叶有限责任公司, 信阳 464000)

摘要: 香气是评价茶叶风味品质的重要因子之一, 形成茶叶香气的挥发性化合物种类多但含量低。与其他茶类相比, 绿茶香气成分数量少而且含量低。绿茶香气的特点表现为嫩香、清香、栗香或嫩栗香、花香等特征性香型。本文主要综述了近年来不同香型绿茶香气中的关键呈香成分及其形成途径, 以期为特色风味绿茶的精准定向加工和茶叶香气品质调控提供依据, 不断满足消费者对多元化绿茶的需求。

关键词: 绿茶; 关键呈香成分; 栗香; 清香; 花香

Progress research of the characteristic aroma for the green tea

YIN Peng^{1,2}, WANG Jing-Jing¹, WANG Zi-Hao¹, WANG Xiao³, GUO Gui-Yi¹,
WANG Guang-Ming^{1*}, SUN Mu-Fang^{1*}

(1. Henan Key Laboratory of Tea Plant Comprehensive Utilization in South Henan, College of Tea Science, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China; 2. Key Laboratory of Tea Science of Education of Ministry, College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. Xinyang Wenxin Tea Co., Ltd., Xinyang 464000, China)

ABSTRACT: Aroma is one of the important factors in evaluating the quality of tea flavor. The categories of volatile compounds to form the tea aroma are many but their concentrations are low. Compared to other kinds of tea, the quantity and content of aroma components in the green tea are low. Tender aroma, refreshing fragrance, (tender) chestnut-like aroma and flowery aroma are the characteristic aroma types for the green tea. This paper reviewed the key aroma compounds of green tea and their formation pathways. These results could provide the basis for the precise processing of characteristic flavor green tea and the regulation of tea aroma, so as to meet the consumer's demand for diversified tea products continuously.

KEY WORDS: green tea; key aroma compounds; chestnut-like aroma; refreshing fragrance; flowery aroma

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102110115、212102110117)、财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-23)、信阳农林学院科技创新团队项目(KJCXTD-202003)、信阳农林学院高水平科研孵化器建设基金资助项目(FCL202010)、信阳农林学院科研促进教学专项课题项目(kj-2021017)

Fund: Supported by the Science and Technology Project of Henan Province (212102110115, 212102110117), the China Agriculture Research System of Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Areas (CARS-23), the Innovative Research Team of Xinyang Agriculture and Forestry University (KJCXTD-202003), the Foundation of Central Laboratory of Xinyang Agriculture and Forestry University (FCL202010), and the Special Subject for Scientific Research Promoting Teaching of Xinyang Agriculture and Forestry University (kj-2021017)

*通信作者: 王广铭, 副教授, 主要研究方向为茶叶加工工程。E-mail: 13937682795@139.com

孙慕芳, 副教授, 主要研究方向为茶叶加工与质量控制。E-mail: xynzsmf@163.com

*Corresponding author: WANG Guang-Ming, Associate Professor, College of Tea Science, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China. E-mail: 13937682795@139.com

SUN Mu-Fang, Associate Professor, College of Tea Science, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China. E-mail: xynzsmf@163.com

0 引言

我国茶叶按加工工艺的不同分为绿茶、黄茶、黑茶、白茶、青茶和红茶, 其中绿茶的产量和消费量居六大茶类之首^[1]。绿茶是以茶树鲜叶为原料, 经杀青、揉捻、干燥等加工工艺制作而成, 一般可分为炒青绿茶、烘青绿茶、晒青绿茶和蒸青绿茶^[1]。茶叶的感官品质由其外形、汤色、香气、滋味和叶底综合评定, 其中滋味和香气是决定茶叶风味的主要因子^[2]。茶叶香气是不同芳香物质以不同浓度组合, 并对嗅觉神经综合作用所形成的茶叶特有的香型^[3]。茶叶中的芳香物质仅占干物质含量的 0.005%~0.02%^[4], 但 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》规定香气占茶叶感官审评得分的 25%~35%。茶树鲜叶中的挥发性物质约 80 余种, 主要是在茶树生长发育过程中合成的, 其生理功能主要是响应环境胁迫, 如(Z)-3-己烯醇防御茶尺蠖侵食、(E)-橙花叔醇防御茶小绿叶蝉等^[5-7]。绿茶香气成分数量少而且含量低^[8], 已分析鉴定的挥发性化合物有 260 余种^[4], 其中绝大部分是在加工过程中形成的。随着气相色谱和分子感官科学的发展和运用, 部分茶叶香型的特征化合物组成已得到明确, 并实现了量化分析^[9-13]。本文主要对绿茶特征性香气的关键呈香成分及其形成机制进行综述, 以期为特色风味绿茶的精准定向加工提供理论依据。

1 绿茶香气评价方法及标准中的绿茶香气

国家、行业或地方标准对茶叶的感官品质进行了规定和描述, 我国部分名优绿茶的香气描述如表 1 所示。由表 1 可知, 嫩香、清香、栗香或嫩栗香、花香或兰花香等是

绿茶的特征性香气, 并且高等级绿茶的香气表现出持久的特点^[14]。嫩香是指嫩茶所特有的愉悦细腻的香气, 清香意指香气清新纯净, 板栗香类似为熟栗子香气, 花香的描述语为类似鲜花的香气且新鲜悦鼻(GB/T 14487—2017《茶叶感官审评术语》)。茶叶香气感官审评是对其类型、浓度、纯度和持久性进行审评, 热嗅(杯温约 75 °C)、温嗅(杯温约 45 °C)和冷嗅(杯温接近室温)结合进行(GB/T 23776—2018)。热嗅主要辨别茶叶香气的纯异, 温嗅的主要作用在于确定香气类型, 而冷嗅是为了确定香气的持久性^[15]。总的来说, 绿茶香气品质以气味纯正、嗅闻后有愉悦感、表现持久为佳。

2 绿茶香气的关键呈香成分

前期研究认为相对含量高的挥发性化合物对茶叶香气的贡献大, 如绿茶中挥发性香气成分相对含量位居前 10 位的依次为香叶醇、芳樟醇、橙花叔醇、己酸-顺-3-己烯酯、壬醛、3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇、顺-2-己烯醛、叶绿醇、庚醛、顺-茉莉酮^[16-17]。近年来的研究表明, 香气化合物对食品感官的影响取决于其气味活性值(odour activity value, OAV), 即某香气成分的质量浓度与其阈值之比, 而不是其绝对浓度^[18]。一般认为, OAV > 1 的香气成分对总体风味有明显的贡献^[19]。风味稀释(flavor dilution, FD)因子指某一种提取的风味化合物按照一定的稀释度(R)稀释 P 倍之后所得到的值(R^P), 即这种风味化合物所能感知到的最后的一个稀释度, FD 因子越高对食品风味贡献越大^[20]。绿茶中具有高 OAV 或 FD 因子的挥发性成分如表 2 所示, 它们是绿茶香气的关键呈香成分。

表 1 标准中的绿茶香气描述
Table 1 Descriptions for green aroma in the standards

绿茶名称	香气描述	绿茶产品标准
信阳毛尖茶	嫩香持久、清香高长、栗香或清香、纯正	GB/T 22737—2008
黄山毛峰茶	嫩香馥郁持久、嫩香高长、嫩香、清香、清香、清香	GB/T 19460—2008
龙井茶	清香持久、清香尚持久、尚清香、纯正、平和	GB/T 18650—2008
洞庭(山)碧螺春茶	嫩香清鲜、嫩香清鲜、嫩爽清香、清香、纯正	GB/T 18957—2008
太平猴魁茶	兰花香持久、有兰花香、清高尚持久、清香	GB/T 19698—2008
庐山云雾茶	清香持久、清香、尚清香、纯正	GB/T 21003—2007
安吉白茶	嫩香持久、嫩香持久、清香、尚清香	GB/T 20354—2006
六安瓜片茶	花香高长、清香持久、清香尚持久、栗香持久、栗香尚持久	DB34/T 237—2017
岳西翠兰	嫩香清鲜、清香高爽、清香高长、清香纯正	DB34/T 430—2018
保靖黄金茶	嫩栗香持久、嫩栗香高、栗香高	DB43/T 863—2014
古丈毛尖	嫩香高锐持久、嫩香高长、栗香较高长	DB43/T 205—2012
峨眉山茶	清香高长、清香高长、清香较高长	DB511100/T 20—2010
径山茶	嫩香、尚嫩香、清香、尚清香	GH/T 1127—2016
武阳春雨茶	针形: 花香馥郁、清高有花香、尚高 卷曲形: 嫩香、清香、尚清高	GH/T 1234—2018
蒙顶甘露茶	毫香馥郁、嫩香高长、清高持久	GH/T 1232—2018
开化龙顶茶	芽形: 嫩香馥郁、嫩香持久、嫩香 条形: 鲜嫩香高持久、清香持久、清香	GH/T 1276—2019

表2 绿茶中的关键呈香成分
Table 2 Key aroma compounds in green tea

茶叶名称	萃取方法	分析方法	关键呈香成分(按 OAV 或 FD 值大小降序排列)	参考文献
绿茶	HS-SPME	GC-MS/OAV	芳樟醇 ^{ac} 、癸醛 ^b 、二甲硫 ^d 、 β -紫罗酮 ^a 、香叶醇 ^e 、壬醛 ^b 、庚醛 ^b 、(E)-2-壬烯醛 ^b 、(Z)-己酸-3-己烯酯 ^f	[21]
绿茶	HS-SPME	GC-MS/OAV	芳樟醇 ^{ac} 、氧化芳樟醇 ^c 、氧化芳樟醇 ^{II} 、癸醛 ^b 、壬醛 ^b 、香叶醇 ^e 、2-甲基丁醛 ^d 、1-辛烯-3-醇 ^b 、苯甲醛 ^e 、正庚醇 ^b 、涌溪火青: β -紫罗酮 ^a 、1-辛烯-3-酮 ^b 、癸醛 ^b 、壬醛 ^b 、 α -紫罗酮 ^a 、辛醛 ^b 、二甲硫 ^d 、2-甲基丁醛 ^d 、(E)-2-壬烯醛 ^b 、芳樟醇 ^{ac}	[22]
绿茶	HS-SPME	GC-MS/GC-O/OAV	绿宝石: β -紫罗酮 ^a 、1-辛烯-3-酮 ^b 、癸醛 ^b 、壬醛 ^b 、(E)-2-壬烯醛 ^b 、辛醛 ^b 、 α -紫罗酮 ^a 、(E)-癸烯醛 ^b 、庚醛 ^b 、平水日铸: β -紫罗酮 ^a 、癸醛 ^b 、壬醛 ^b 、(E)-2-壬烯醛 ^b 、辛醛 ^b 、 α -紫罗酮 ^a 、庚醛 ^b 、(Z)-茉莉酮 ^b 、1-辛烯-3-醇 ^b 、2-甲基丁醛 ^d	[23]
绿茶	SPME	GC \times GC-qMS/GC-O/OAV	二甲硫 ^d 、2-甲基丁酸乙酯 ^e 、己醛 ^b 、壬醛 ^b 、3-甲基丁醛 ^d 、辛醛 ^b 、2-甲基丁醛 ^d 、4-乙炔基愈创木酚 ^e 、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮 ^c 、(Z)-茉莉酮 ^b	[24]
栗香绿茶	HS-SPME	GC \times GC-TOF-MS/GC-O/OAV	反- β -紫罗酮 ^a 、1-甲基萘 ^f 、3-甲基丁醛 ^d 、壬醛 ^b 、苯乙醛 ^d 、癸醛 ^b 、芳樟醇 ^{ac} 、(E)-2-壬烯醛 ^b 、(E)-3-戊烯-2-酮 ^b 、正庚醛 ^b	[25]
栗香绿茶	HS-SPME	GC \times GC-TOF-MS/OAV	板栗香: β -紫罗酮 ^a 、1-辛烯-3-酮 ^b 、己醛 ^b 、芳樟醇 ^{ac} 、庚醛 ^b 、芳樟醇 ^b 、1-辛烯-3-醇 ^b 、壬醛 ^b 、异丁醛 ^d 、对伞花烃 ^f 、嫩栗香:1-辛烯-3-酮 ^b 、 β -紫罗酮 ^a 、己醛 ^b 、庚醛 ^b 、对伞花烃 ^f 、1-辛烯-3-醇 ^b 、芳樟醇 ^{ac} 、癸醛 ^b 、异丁醛 ^d 、壬醛 ^b	[26]
清香绿茶	SDE	GC \times GC-TOF-MS/GC-O/OAV	熟栗香:1-辛烯-3-酮 ^b 、 β -紫罗酮 ^a 、1-辛烯-3-醇 ^b 、己醛 ^b 、癸醛 ^b 、芳樟醇 ^{ac} 、异丁醛 ^d 、壬醛 ^b 、对伞花烃 ^f	[27]
大佛龙井(新茶)	HS-SPME	GC-MS/GC-O/OAV	β -紫罗酮 ^a 、2-甲基丁醛 ^d 、癸醛 ^b 、己醛 ^b 、2-甲基丙醛 ^d 、芳樟醇 ^{ac} 、1-辛烯-3-醇 ^b 、1-戊烯-3-酮 ^b 、丁酸 ^f 、壬醛 ^b	[28]
大佛龙井(陈茶)	SBSE	GC-MS/GC-O/OAV	β -紫罗酮 ^a 、2-甲基丁醛 ^d 、2-甲基丙醛 ^d 、癸醛 ^b 、己醛 ^b 、芳樟醇 ^{ac} 、壬醛 ^b 、丁酸 ^f 、乙酸乙酯 ^d 、2-乙基呋喃 ^d	[29]
龙井茶	SDE	GC-MS/GC-O/AEDA	β -紫罗酮 ^a 、1-甲基萘 ^f 、萘 ^f 、2,4-壬二烯醛 ^b 、(E)-2-壬烯醛 ^b 、癸醛 ^b 、1-辛烯-3-醇 ^b 、己醛 ^b 、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮 ^b 、2-甲基丁醛 ^d	[30]
毛峰茶	SAFE	GC-MS/GC-O/AEDA	2-乙酰-1-吡咯啉 ^d 、(Z)-1,5-辛二烯-3-酮 ^b 、2-乙基-3,5-二甲基吡啶 ^d 、4-壬内酯 ^f 、4-甲基-4-巯基-2-戊酮 ^d 、(E,Z)-2,6-壬二烯醛 ^b 、3-甲基壬烷-2,4-二酮 ^b 、2,3-二甲基壬烷-2,4-二酮 ^b 、2,3-二乙基-5-甲基吡啶 ^d 、2-乙酰基-2-噻唑啉 ^d 、甲硫基丙醛 ^d	[31]
碧螺春	SAFE	GC-MS/GC-O/AEDA	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮 ^c 、香叶醇 ^e 、2-甲氧基苯酚 ^e 、葫芦巴内酯 ^d 、(E)-异丁香酚 ^e 、香草醛 ^f 、香叶醇 ^e 、3-甲基壬烷-2,4-二酮 ^b 、苯乙酸 ^f 、丁香酚 ^e	[32]
径山茶	SAFE	GC-MS/GC-O/OAV /AEDA/SIDAS	2-甲氧基苯酚 ^e 、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮 ^c 、香叶醇 ^e 、香草醛 ^f 、丁香酚 ^e 、葫芦巴内酯 ^d 、(E)-丁香酚 ^e 、香叶醇 ^e 、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮 ^c 、香叶醇 ^e 、2-甲氧基苯酚 ^e 、香草醛 ^f 、(E)-异丁香酚 ^e 、香叶醇 ^e 、苯乙酸 ^f 、异丁香酚 ^e 、葫芦巴内酯 ^d 、吲哚 ^d	[32]

OAV: 二甲硫^d、(E,E)-2,4-庚二烯醛^b、1-己烯-3-酮^b、香叶醇^e、甲硫醇^d、(E,Z)-2,6-壬二烯醛^b、3-甲基壬烷-2,4-二酮^b、(Z)-1,5-辛二烯-3-酮^b、(Z)-4-庚烯醛^b、芳樟醇^{ac}、3-甲基丁醛^d

FD: 3-甲基-2,4-壬烷二酮^b、(Z)-1,5-辛二烯-3-酮^b、甲硫基丙醛^d、反-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛^b、吲哚^d、4-甲基-4-巯基-2-戊酮^d、2-甲氧基-3-异丁基吡啶^d、(E,E)-2,4-壬二烯醛^b、2-苯乙醇^d、香草醛^f

表 2(续)

茶叶名称	萃取方法	分析鉴定方法	关键呈香成分(按 OAV 或 FD 值大小降序排列)	参考文献
日本绿茶(Sen-cha)	SDE	GC-MS/GC-O/AEDA	吡啶 ^d 、4-甲基-4-硫基-2-戊酮 ^d 、4-甲氧基-2-甲基-2-丁硫醇 ^d 、(Z)-茉莉酸甲酯 ^b 、(E,E)-2,4-癸二烯醛 ^b 、β-大马酮 ^a 、β-大马烯醇 ^a 、(Z)-1,5-辛二烯-3-酮 ^b 、(E,Z)-2,6-壬二烯醛 ^b 、甲硫基丙醛 ^d 、1-辛烯-3-酮 ^b	[33]
日本绿茶(Sen-cha)			(Z)-1,5-辛二烯-3-酮 ^b 、4-甲基-4-硫基-2-戊酮 ^d 、甲硫基丙醛 ^d 、(E,Z)-2,6-壬二烯醛 ^b 、3-甲基壬烷-2,4-二酮 ^b 、(Z)-茉莉酸甲酯 ^b 、吡啶 ^d	
日本绿茶(Kamairi-cha)	SDE	GC-MS/GC-O/AEDA	2-乙酰-1-吡咯啉 ^d 、(Z)-1,5-辛二烯-3-酮 ^b 、甲硫基丙醛 ^d 、2-乙基-3,5-二甲基吡啶 ^d 、4-甲基-4-硫基-2-戊酮 ^d 、吡啶 ^d 、2-甲氧基-3-异丁基吡啶 ^d 、2,3-二乙基-5-甲基吡啶 ^d 、(E,Z)-2,6-壬二烯醛 ^b 、3-甲基壬烷-2,4-二酮 ^b 、2-乙酰基-2-噻唑啉 ^d 、甲硫基丙醛 ^d 、吡啶 ^d 、正己醇 ^b 、1-辛烯-3-醇 ^b 、茶香酮 ^a 、壬醛 ^b 、β-大马烯醇 ^a 、香豆素 ^c	[30]
日本绿茶(Matcha)	SAFE	GC-MS/GC-O/AEDA	壬醛 ^b 、甲硫基丙醛 ^d 、α-毕澄茄醇 ^f 、2-乙基-3,5-二甲基吡啶 ^d 、4-羧基-2,5-二甲基-3(2H)-咪喃酮 ^e 、吡啶 ^d 、顺-3-己烯醇 ^b 、甲硫基丙醛 ^d 、茶香酮 ^a 、β-大马烯醇 ^a 、反-2-己烯醛 ^b 、壬醛 ^b 、2-乙基己醇 ^f 、苯甲醇 ^e 、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	[34]
日本绿茶(Hojicha)			2,3-二乙基吡啶 ^d 、香草醛 ^f 、2,3-二乙基-5-甲基吡啶 ^d 、2-乙基-3,6-二甲基吡啶 ^d 、2-甲氧基苯酚 ^e 、反-2-甲基-6-(1-丙烯基)-吡啶 ^d 、对甲酚 ^e 、4-乙基-2-甲氧基苯酚 ^e 、3-甲基吡啶 ^f	
日本绿茶(Matcha)	SAFE	GC-MS/GC-O/AEDA	4-羧基-2,5-二甲基-3(2H)-咪喃酮 ^e 、(E)-异丁基香酚 ^e 、α-紫罗酮 ^a 、反-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛 ^b 、3-甲基-2,4-壬烷二酮 ^b 、(E,Z)-2,6-壬二烯醛 ^b 、(Z)-1,5-辛二烯-3-酮 ^b 、香豆素 ^c 、(E,E,Z)-2,4,6-壬三烯醛 ^b	[35]

注: 1): a 为类胡萝卜素氧化降解产物; b 为脂类化合物氧化降解产物; c 为由糖苷类化合物水解生成的挥发性成分; d 为美拉德反应或 Strecker 降解反应的衍生物; e 为苯酚衍生物; f 为其前体化合物文献中尚未见报道。2): 同时蒸馏萃取法(simultaneous solvent extraction, SDE); 固相微萃取法(solid phase microextraction, SPME); 搅拌棒吸附萃取法(stir bar sorptive extraction, SBSE); 溶剂辅助蒸馏法(solvent-assisted flavor evaporation, SAFE); 全二维气相色谱-飞行时间质谱法(comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry, GC×GC-TOF-MS); 气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS); 气相色谱在线嗅闻法(gas chromatography-olfactometry, GC-O); 香气提取物稀释分析(aroma extract dilution analysis, AEDA)。

类胡萝卜素的氧化降解、脂肪酸的氧化降解、糖苷类化合物水解和美拉德反应是茶叶香气成分形成的 4 条主要途径^[36]。由表 2 可知, 绿茶中类胡萝卜素氧化降解生成的香气成分主要有 β -紫罗酮、 α -紫罗酮、 β -大马烯酮、茶香酮、 β -大马酮等, 这些酮类化合物在绿茶中具有质量浓度低和 OAV 高的特点, 但 β -紫罗酮的含量相对较高。 β -紫罗酮和 β -大马烯酮分别主要由 β -胡萝卜素和新黄素在酶促氧化降解作用下形成^[37]。芳樟醇及其氧化产物、香叶醇、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮[2,5-dimethyl-4-hydroxy-3(2H)-furanone, DMHF]、香豆素、2-苯乙醇、苯甲醛等由糖苷类化合物水解生成的挥发性物质是构成绿茶香气的关键组分(图 1)。 β -樱草糖苷和 β -D-葡萄糖苷是芳樟醇及其氧化产物、香叶醇和 2-苯乙醇等的前体^[36]。DMHF- β -吡喃葡萄糖苷是 DMHF 形成的主要前体^[38-39], D 构型糖类(如 D-葡萄糖和 D-果糖)转化生成 D-果糖-1,6-二磷酸后被水解也可生成 DMHF, L 构型糖类则无法转化生成 DMHF^[40]。绿茶中脂肪酸衍生的关键呈香成分主要为 C₆~C₁₀ 脂肪酸醛、醇和酮类化合物, 其化学结构式见图 2。除顺-2-己烯醛(青草气, 阈值: 190 μ g/L)外, 其他由脂肪酸衍生的挥发性化合物阈值较低, 而其 OAV 高或 FD 因子大。

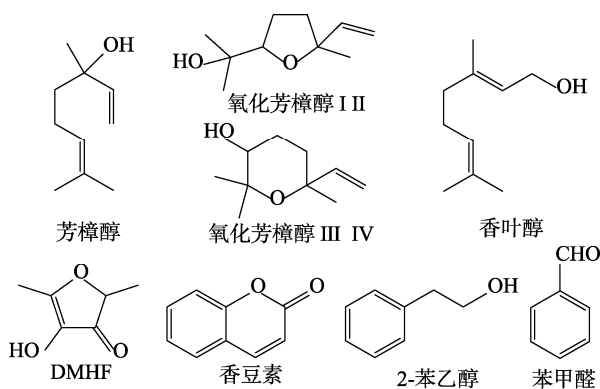


图 1 绿茶中由糖苷类化合物水解生成的关键呈香成分
Fig.1 Key aroma compounds in green tea produced by the hydrolysis of glycosides

绿茶关键呈香挥发性成分中通过 Strecker 降解形成的挥发性醛类有 2-甲基丙醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、甲硫基丙醛和苯乙醛, 它们的化学结构及其对应的氨基酸见图 3。吡咯类衍生物, 如 2-乙酰-1-吡咯啉、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪、2-乙酰基-2-噻唑啉、2-甲氧基-3-异丁基吡嗪、2,3-二乙基吡嗪、2-乙基-3,6-二甲基吡嗪等, 这些挥发性成分是通过美拉德反应生成的且具有烘烤香或坚果香, 对绿茶香型的形成具有积极的促进作用。绿茶中的挥发性酚类化合物主要为苯酚衍生物(如图 4 所示), 如 2-甲氧基苯酚(木香、烟熏香)、丁香酚(辛香、木香)和异丁香酚(花香、辛香)等, 它们是龙井茶、毛峰茶和碧螺春茶中的重要呈香成分^[31]。在糖苷酶的作用下, 松柏苷在绿茶加工

过程中的摊放和杀青初期水解生成不稳定的中间产物松柏醇, 在干燥阶段受到热化学作用后脱水还原生成异丁香酚和丁香酚^[31]。TATSU 等^[41]的研究表明 2-甲氧基苯酚和(E)-异丁香酚是日本去皮大麦茶呈现较强烟味的关键挥发性化合物。不同种类的关键呈香成分以不同比例进行组合可形成绿茶的特征性香型, 如栗香、清香、花香等。

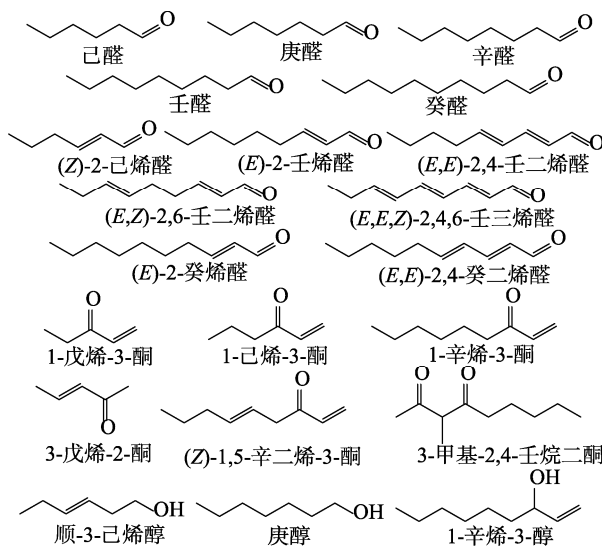


图 2 绿茶中由脂肪酸衍生的关键呈香成分

Fig.2 Key aroma compounds in green tea derived from fatty acids

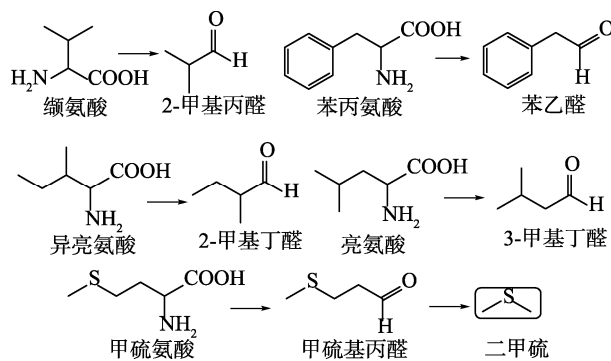


图 3 绿茶中的 Strecker 降解醛及其对应的氨基酸

Fig.3 Strecker aldehydes in green tea and their corresponding amino acids

3 栗香型绿茶的关键呈香成分

栗香型绿茶香气的形成与茶树品种、鲜叶原料、加工工艺等有关^[42-43]。叶国注等^[44]应用 Bayes 逐步判别法实现了以顺-茉莉酮和香叶基丙酮为变量的板栗香型和非板栗香型绿茶的有效判别。 β -紫罗酮、橙花叔醇、植醇、5,8,11,14-花生四烯酸乙酯、2,6-二叔丁基苯醌、1,4-二十烷二烯、2-甲基十五烷等在栗香型绿茶中的含量显著高于非栗香型绿茶^[45]。ZHU 等^[25]研究表明有 58 种香气成分共同存在于栗香型绿茶、

生板栗、煮板栗和炒板栗中, 采用 GC-O 结合 OAV 的方法鉴定出乙苯、庚醛、苯乙醛、2-戊基呋喃、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、芳樟醇、己酸-顺-3-己烯酯、反- β -紫罗酮是栗香型绿茶的关键呈香成分。根据栗香在类型、强度等感官表征上的差异, 可细分为嫩栗香、板栗香和熟栗香, 3 种不同栗香型绿茶的挥发性成分存在差异。气相色谱-质谱法结合多元统计分析表明, 茉莉酮、香叶醇、香叶基丙酮、2-甲基萜是嫩栗香型绿茶的特征性香气组分, 辛醛、(E)-9-甲基-2-十一碳烯醛、(E)-4,8-二甲基壬-1,3,7-三烯可作为板栗香型绿茶的特征性香气组分, 熟栗香型绿茶的特征性香气组分为癸醇、(Z,Z)-3-己烯酸-3-己烯酯、(Z)-正戊酸-3-己烯酯、(Z)-己酸-3-己烯酯、(E)-丁酸-3-己烯酯和 2-(3-甲基丁基)-3,5-二甲基吡嗪^[46]。张铭铭等^[26]采用 HS-SPME/GC×GC-TOF-MS 结合 OAV 法对不同栗香型绿茶的关键香气组分进行筛选, 香气重组实验表明, β -紫罗酮、1-辛烯-3-酮、己醛、芳樟醇、庚醛、癸醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、异丁醛和对伞花烃等 OAV 大于 1 的香气成分是不同的栗香型绿茶的关键呈香成分, 但这些关键呈香成分成的 OAV 在嫩栗香、板栗香和熟栗香型绿茶中存在差异。WANG 等^[47]比较了滚筒-热风-蒸汽、滚筒-热风、滚筒-蒸汽和滚筒 4 种杀青方式对栗香型绿茶香气成分的影响, 其中滚筒-热风杀青方法加工的绿茶栗香持久; 茶螺烷、芳樟醇、雪松醇、3-甲基丁醛、反- β -紫罗酮、 τ -杜松醇是形成绿茶栗香的关键挥发性化合物, 滚筒-热风杀青有利于茶螺烷、芳樟醇和 3-甲基丁醛的生成和转化。干燥方式影响绿茶栗香的形成, 研究结果表明箱式热风对流和滚筒辉干式传导方式有利于绿茶栗香的形成, 且采用箱式热风对流干燥后的绿茶栗香浓郁^[48]。在绿茶复烘前外源添加茶氨酸和蔗糖有助于绿茶栗香的形成, 当茶氨酸/干茶质量比例为 5% 时, 复烘 45 min 后水杨酸甲酯和 α -紫罗酮的含量达到最大值, 此时的绿茶栗香浓郁且综合品质得到提升^[49]。

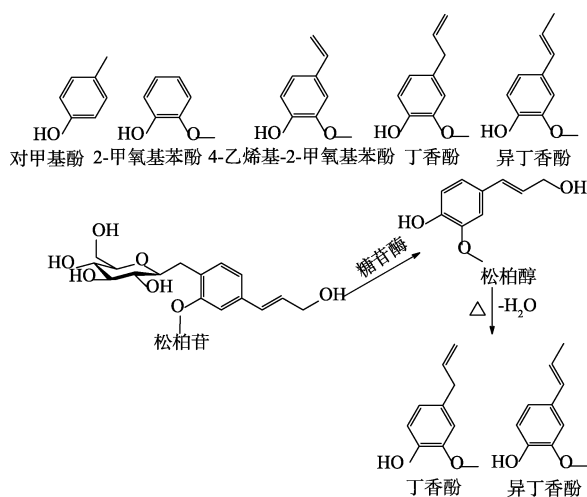


图 4 绿茶中的挥发性酚类化合物

Fig.4 Volatile phenolic compounds in green tea

4 清香型绿茶的关键呈香成分

清香是绿茶香气中典型的香型之一, 也是绿茶香气品质优异的关键感官评价因子^[27]。王梦琪等^[27]采用 SDE-GC×GC-TOF-MS 技术结合 GC-O-MS 和 OAV 对清香型绿茶的香气成分进行分析, 结果表明芳樟醇、壬醛、反- β -紫罗酮、己酸-顺-3-己烯酯、乙苯、萜和 2-正戊基呋喃 7 种挥发性化合物是清香型绿茶的关键呈香成分。香气重组实验表明 β -紫罗酮、1-甲基萜、萜、2,4-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛等 14 种挥发性化合物可成功模拟清香型绿茶的香气^[50]。清香型“平水日铸茶”的特征挥发性化合物是 (Z)-3-己烯丁酸酯、茉莉酸甲酯、己酸-顺-3-己烯酯和 1-庚醇, 清香带花香型“绿宝石茶”的特征香气成分是呋喃、1-辛烯-3-酮和 (E,E)-2,4-庚二烯醛^[23]。己酸-顺-3-己烯酯、 β -紫罗酮等 8 种香气成分在同一茶树品种加工而成的清香型和花香型绿茶中存在显著差异^[51]。不同香型绿茶挥发性成分和关键呈香成分存在差异, 其非挥发性成分也存在差异, 研究表明 L-蛋氨酸和隐绿原酸在清香型绿茶中含量较高, 而栗香型绿茶中含量较高的是 α -亚麻酸、棕榈油酸、香兰素、 γ -氨基丁酸和山萘酚-3-O-芸香糖苷等非挥发性成分^[52]。水浸出物、茶多酚、非酯型儿茶素和儿茶素总量在不同香型(嫩香、清香和栗香)“襄阳绿茶”中存在显著差异, 清香型绿茶中的氨基酸含量高于嫩香型和栗香型绿茶, 清香型绿茶的特征挥发性组分是 6-十一酮、香叶基丙酮和 δ -杜松烯^[53]。芳樟醇和二甲硫对清香型“黄山毛峰茶”香气的贡献分别为 76% 和 10%, 水质因子对其可产生影响, 实验结果表明 Ca^{2+} 对二甲硫有较明显的抑制作用, 而对芳樟醇有促进作用^[54]。香气重组实验确认二甲硫是“中黄 1 号”加工而成的绿茶的关键呈香成分, 其 OAV 高达 1195.21^[55]。FLAIG 等^[32]对“径山绿茶”香气成分的分析表明, 二甲硫的 OAV (458) 最高, 在摊放阶段显著增加, 而在干燥过程中低沸点 (37.3 °C) 的二甲硫会因高温作用挥发散失。二甲硫是绿茶清香和新茶香气的关键呈香成分, 其生成和转化途径如图 5 所示^[29,36,55-57]。

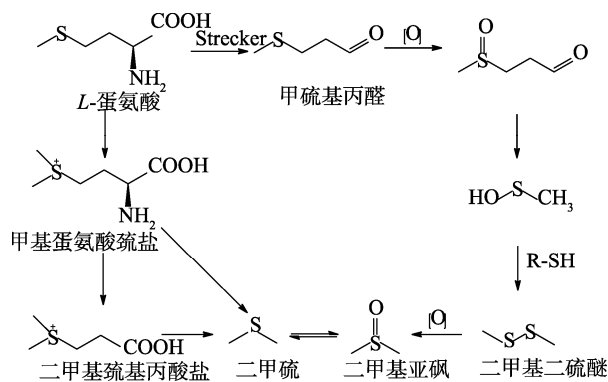


图 5 二甲硫的生成和转化途径

Fig.5 Formation and transformation of the dimethyl sulfide

5 花香型绿茶关键呈香成分

花香型绿茶可分 2 类, 一类为按照传统绿茶加工工艺制作的绿茶, 如“太平猴魁茶”、“舒城兰花茶”等具有天然的兰花香^[58-59]; 一类为新工艺花香型绿茶, 即在传统绿茶加工工艺中融合乌龙茶的摇青等工序而制作的绿茶, 旨在提高夏秋茶的香气和品质^[60-63]。绿茶兰花香的形成是由茶树品种和加工工艺共同决定的, 如采用“舒城特香早”鲜叶制作的绿茶具有浓郁的兰花香^[64]。傅冬和等^[65]发明了一种花香绿茶加工的方法, 其创新点主要是将摊放后的鲜叶进行微创激香, 采用此方法加工的绿茶中具花果香的橙花叔醇含量特别高。CHEN 等^[66]采用 SPME-GC×GC-TOF-MS 对 30 个“太平猴魁茶”(其中 15 个样品具有兰花香)的香气成分进行测定分析, 结果表明 15 个特征性挥发性化合物与“太平猴魁茶”的兰花香相关, 其中 1,3-二甲基茛苳满、4-戊烯基戊醚等 4 个挥发性成分在兰花香型“太平猴魁茶”中的检出率为 100%, 其余 11 种挥发性成分的检出率在 73%~93%之间。FENG 等^[67]利用 GC-MS/GC-O 技术结合 OAV、AEDA 等香气鉴定方法确定顺式表茉莉酸甲酯为兰花型绿茶(“太平猴魁”、“舒城兰花”、“黄山毛峰”、“信阳毛尖”)和蕙兰(*Cymbidium faberi* Rolfe)香气的主要贡献化合物, “太平猴魁茶”中顺式表茉莉酸甲酯的 OAV 和 FD 值分别为 5.6 和 4096。顺式表茉莉酸甲酯和顺式茉莉酸甲酯具有类似兰花的香气, 顺式表茉莉酸甲酯的气味阈值仅为非表型结构的 1/400^[68-69], 其生成和转化途径如图 6 所示^[36,67,70-71]。目前, 融合乌龙茶摇青工序的新工艺花香型绿茶的加工技术已日臻成熟, 但由于天然兰花香型绿茶的香气形成机制尚不明确, 其加工工艺尚需继续进一步探索。

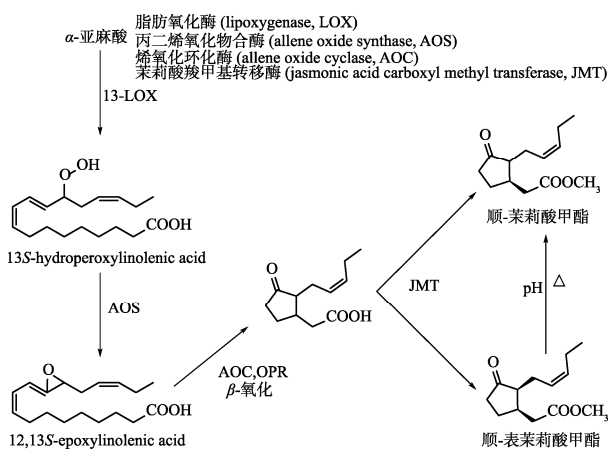


图 6 顺式表茉莉酸甲酯和顺式茉莉酸甲酯的生成和转化途径
Fig.6 Formation and transformation of the (Z)-methyl epijasmolate and (Z)-methyl jasmonate

6 结束语

茶叶香气品质特征主要是众多挥发性成分在互作效应下的综合体现, 该效应与挥发性成分的种类、含量、阈

值等密切相关。目前, 有关绿茶香气品质的研究集中在关键呈香成分的分析鉴定, 而缺少非挥发性成分对香气品质影响的研究。茶叶挥发性化合物的萃取方法和关键呈香成分的鉴定各具优缺点, 随着分析仪器设备的更新, 需要融合多种方式香气萃取方法(SDE、SPME、SBSE、SAFE 等)、多手段呈香成分鉴定方法(GC-O、OAV、AEDA 等)并结合重组与消减实验确定茶叶的关键呈香成分。栗香型绿茶的关键呈香成分、定向加工工艺和形成机制已取得阶段性研究成果, 并逐步从实验室水平向规模化生产推广应用, 但天然花香、嫩香和清香型绿茶的香气形成机制及其定向加工工艺的研究尚处在实验室研究阶段。随着消费者日益增长的对茶产品多元化的需求, 精准定向生产具有特色风味的茶叶, 有效提高茶产品的科技含量和附加值, 必将大大地提升茶叶产业的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 夏涛. 制茶学. 3 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
XIA T. Tea manufacturing. The 3rd edition [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2014.
- [2] ZHANG L, CAO QQ, GRANATO D, *et al.* Association between chemistry and taste of tea: A review [J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 101: 139-149.
- [3] 宛晓春. 茶叶生物化学. 3 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
WAN XC. Tea biochemistry. The 3rd edition [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007.
- [4] 宛晓春, 夏涛. 茶树次生代谢[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
WAN XC, XIA T. Secondary metabolism of tea plant [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [5] XIN ZJ, GE LG, CHEN SL, *et al.* Enhanced transcriptome responses in herbivore-infested tea plants by the green leaf volatile (Z)-3-hexenol [J]. J Plant Res, 2019, 132(2): 285-293.
- [6] CHEN SL, ZHANG LP, CAI XM, *et al.* (E)-Nerolidol is a volatile signal that induces defenses against insects and pathogens in tea plants [J]. Hortic Res, 2020, 7: 52.
- [7] 闫振, 王登良. 茶叶香气物质响应胁迫机制与功能研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 337-345.
YAN Z, WANG DL. Research progress of tea aroma compounds under stress response and its mechanism and function [J]. Food Sci, 2021, 42(15): 337-345.
- [8] FENG ZH, LI YF, LI M, *et al.* Tea aroma formation from six model manufacturing processes [J]. Food Chem, 2019, 285: 347-354.
- [9] SHI YL, WANG MQ, DONG ZB, *et al.* Volatile components and key odorants of Chinese yellow tea (*Camellia sinensis*) [J]. LWT Food Sci Technol, 2021, 146: 111512.
- [10] PANG XL, YU WS, CAO CD, *et al.* Comparison of potent odorants in raw and ripened Pu-erh tea infusions based on odor activity value calculation and multivariate analysis: Understanding the role of pile fermentation [J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(47): 13139-13149.
- [11] KANG SY, YAN H, ZHU Y, *et al.* Identification and quantification of key odorants in the world's four most famous black teas [J]. Food Res Int, 2019, 121: 73-83.
- [12] NIE CN, ZHONG XX, HE L, *et al.* Comparison of different aroma-active compounds of Sichuan dark brick tea (*Camellia sinensis*) and Sichuan Fuzhuan brick tea using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and aroma descriptive profile tests [J]. Eur Food Res Technol, 2019, 245(9): 1963-1979.
- [13] CHEN XH, SUN HY, QU D, *et al.* Identification and characterization of key aroma compounds in Chinese high altitude and northernmost black tea (*Camellia sinensis*) using distillation extraction and sensory analysis

- methods [J]. *Flav Fragrance J*, 2020, 35(6): 1–8.
- [14] 中国茶叶学会. 一杯茶中的科学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2020.
China Tea Science Society. The science in one cup of tea [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2020.
- [15] 施兆鹏. 茶叶审评与检验. 4 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
SHI ZP. Tea evaluation and inspectio. The 4th edition [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2010.
- [16] WANG KB, LIU F, LIU ZH, *et al.* Comparison of catechins and volatile compounds among different types of tea using high performance liquid chromatograph and gas chromatograph mass spectrometer [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2011, 46: 1406–1412.
- [17] ZHENG XQ, LI QS, XIANG LP, *et al.* Recent advances in volatiles of teas [J]. *Molecules*, 2016, 21(3): 338.
- [18] 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]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(3): 916–924.
- [19] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. *食品科学*, 2008, 29(7): 370–374.
LIU DY, ZHOU GH, XU XL. “ROAV” method: A new method for determining key odor compounds of rugao ham [J]. *Food Sci*, 2008, 29(7): 370–374.
- [20] 张青, 王锡昌, 刘源. GC-O 法在食品风味分析中的应用[J]. *食品科学*, 2009, 30(3): 283–286.
ZHANG Q, WANG XC, LIU Y. Applications of gas chromatography-olfactometry (GC-O) in food flavor analysis [J]. *Food Sci*, 2009, 30(3): 283–286.
- [21] MA LL, CAO D, LIU YL, *et al.* A comparative analysis of the volatile components of green tea produced from various tea cultivars in China [J]. *Turk J Agric For*, 2019, 43(5): 451–463.
- [22] 汪蓓, 舒娜, 陆安霞, 等. 不同杀青温度对绿茶香型形成的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(4): 197–203.
WANG B, SHU N, LU AX, *et al.* Aroma formation of green tea effected by different pan-fire temperatures [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(4): 197–203.
- [23] LIU PP, ZHENG PC, GONG ZM, *et al.* Comparing characteristic aroma components of bead-shaped green teas from different regions using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry combined with chemometrics [J]. *Eur Food Res Technol*, 2020, 246(9): 1703–1714.
- [24] ZHU JC, NIU YW, XIAO ZB. Characterization of the key aroma compounds in Laoshan green teas by application of odour activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC×GC-qMS) [J]. *Food Chem*, 2021, 339: 128136.
- [25] ZHU Y, LV HP, SHAO CY, *et al.* Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas [J]. *Food Res Int*, 2018, 108: 74–82.
- [26] 张铭铭, 尹洪旭, 邓余良, 等. 基于 HS-SPME/GC×GC-TOFMS/OAV 不同栗香特征绿茶关键香气组分分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(2): 244–252.
ZHANG MM, YIN HX, DENG YL, *et al.* Analysis of key odorants responsible for different chestnut-like aromas of green teas based on headspace solid-phase microextraction coupled with comprehensive two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry and odor activity value [J]. *Food Sci*, 2020, 41(2): 244–252.
- [27] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. “清香”绿茶的挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(22): 219–228.
WANG MQ, ZHU Y, ZHANG Y, *et al.* Analysis of volatile composition and key aroma compounds of green teas with fresh scent flavor [J]. *Food Sci*, 2019, 40(22): 219–228.
- [28] 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.
SHU C, SHE YB, XIAO ZB, *et al.* Investigations on the aroma active compounds in fresh and aged Longjing tea by SPME/GC-MS/GC-O/OAV [J]. *Food Ind*, 2016, 37(9): 279–285.
- [29] WANG MQ, MA WJ, SHI J, *et al.* Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination [J]. *Food Res Int*, 2020, 130: 108908.
- [30] KUMAZAWA K, MASUDA H. Identification of potent odorants in different green tea varieties using flavor dilution technique [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 50(20): 5660–5663.
- [31] 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]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(33): 8308–8313.
- [32] FLAIG M, QI S, WEI GD, *et al.* Characterization of the key odorants in a high-grade chinese green tea beverage (*Camellia sinensis*; Jingshan cha) by means of the sensomics approach and elucidation of odorant changes in tea leaves caused by the tea manufacturing process [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(18): 5168–5179.
- [33] KUMAZAWA K, MASUDA H. Identification of potent odorants in Japanese green tea (Sen-cha) [J]. *J Agric Food Chem*, 1999, 47(12): 5169–5172.
- [34] TAN HR, LAU H, LIU SQ, *et al.* Characterisation of key odourants in Japanese green tea using gas chromatography-olfactometry and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2019, 108: 221–232.
- [35] 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]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(14): 2984–2989.
- [36] HO CT, ZHENG X, LI S. Tea aroma formation [J]. *Food Sci Hum Well*, 2015, 4(1): 9–27.
- [37] SANDERSON GW, GRAHAMM HN. Formation of black tea aroma [J]. *J Agric Food Chem*, 1973, 21(4): 576–585.
- [38] WANG DM, YOSHIMURA T, KUBOTA K, *et al.* Analysis of glycosidically bound aroma precursors in tea leaves I qualitative and quantitative analyses of glycosides with aglycons as aroma compounds [J]. *J Agric Food Chem*, 2000, 48(11): 5411–5418.
- [39] CHEN Y, GUO X, GAO T, *et al.* UGT74AF3 enzymes specifically catalyze the glucosylation of 4-hydroxy-2,5-dimethylfuran-3(2H)-one, an important volatile compound in *Camellia sinensis* [J]. *Hortic Res*, 2020, 7: 25.
- [40] ROSCHER R, BRINGMANN G, SCHREIER P, *et al.* Radiotracer studies on the formation of 2,5-dimethyl-4-hydroxy-3(2H)-furanone in detached ripening strawberry fruits [J]. *J Agric Food Chem*, 1998, 46(4): 1488–1493.
- [41] TATSU S, MATSUYO Y, NAKAHARA K, *et al.* Key odorants in Japanese roasted barley tea (Mugi-Cha)-differences between roasted barley tea prepared from naked barley and roasted barley tea prepared from hulled barley [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(9): 2728–2737.
- [42] 张铭铭, 江用文, 袁海波, 等. 绿茶栗香的形成及工艺研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(2): 129–137.
ZHANG MM, JIANG YW, YUAN HB, *et al.* Chestnut-like aroma of green tea: Research progress of formation and technology [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2020, 36(2): 129–137.
- [43] 尹鹏, 肖智中, 于飞, 等. 栗香型绿茶研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(3): 219–224.
YIN P, XIAO ZZ, YU F, *et al.* Research progress of chestnut-like aroma quality of green tea [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(3): 219–224.
- [44] 叶国注, 袁海波, 江用文, 等. Bayes 逐步判别法在绿茶板栗香化学识别上的应用[J]. *茶叶科学*, 2009, 29(1): 27–33.
YE GZ, YUAN HB, JIANG YW, *et al.* Application of Bayes stepwise discrimination analysis on chemical recognition of green tea with chestnut-like aroma [J]. *J Tea Sci*, 2009, 29(1): 27–33.
- [45] 叶国注, 江用文, 尹军峰, 等. 板栗香型绿茶香气成分特征研究[J]. *茶叶科学*, 2009, 29(5): 385–394.
YE GZ, JIANG YW, YIN JF, *et al.* Study on the characteristic of aroma

- components in green tea with chestnut-like aroma [J]. *J Tea Sci*, 2009, 29(5): 385-394.
- [46] 尹洪旭, 杨艳芹, 姚月凤, 等. 基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析对不同栗香特征绿茶判别分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 202-208.
YIN HX, YANG YQ, YAO YF, *et al.* Discrimination of different characteristics of chestnut-like green tea based on gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical analysis [J]. *Food Sci*, 2019, 40(4): 202-208.
- [47] WANG HJ, HUA JJ, JIANG YW, *et al.* Influence of fixation methods on the chestnut-like aroma of green tea and dynamics of key aroma substances [J]. *Food Res Int*, 2020, 136: 109479.
- [48] 张铭铭, 江用文, 滑金杰, 等. 干燥方式对绿茶栗香的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(15): 115-123.
ZHANG MM, JIANG YW, HUA JJ, *et al.* The effect of drying methods on chestnut-like aroma green tea [J]. *Food Sci*, 2020, 41(15): 115-123.
- [49] ZHANG MM, YANG YQ, YUAN HB, *et al.* Contribution of addition theanine/sucrose on the formation of chestnut-like aroma of green tea [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2020, 129: 109512.
- [50] 王梦琪. 基于SBSE-GC-MS的“清香”绿茶挥发性成分及其关键呈香成分研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
WANG MQ. Study on volatiles and key aroma compounds of “fresh scent” green tea based on SBSE-GC-MS [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [51] 黄海涛, 敖存, 郭敏明, 等. 花香与清香绿茶的香气组分及品种相关性分析[J]. *浙江农业科学*, 2018, 59(5): 738-741, 771.
HUANG HT, AO C, GUO MM, *et al.* Correlation analysis of aroma components and varieties of flower-scented and faint-scented green tea [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2018, 59(5): 738-741, 771.
- [52] 王梦琪, 朱萌, 张悦, 等. “清香”与“栗香”绿茶中非挥发性化学成分的差异分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(14): 151-158.
WANG MQ, ZHU Y, ZHANG Y, *et al.* Analysis on the difference of non-volatile chemical compounds between “fresh scent” and “chestnut flavor” green tea [J]. *Food Sci*, 2021, 42(14): 151-158.
- [53] 郑琳, 刘盼盼, 龚自明, 等. 不同香型襄阳绿茶主要化学成分的差异分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(4): 252-258.
ZHENG L, LIU PP, GONG ZM, *et al.* Analysis on main chemical components of different aromatic green tea from Xiangyang [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(4): 252-258.
- [54] 刘盼盼, 许勇泉, 尹军峰, 等. 主要水质因子对清香型黄山毛峰茶挥发性成分的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(1): 245-257.
LIU PP, XU YQ, YIN JF, *et al.* Effect of main water quality factors on volatile components of Huangshan maofeng tea with faint scent [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2016, 16(1): 245-257.
- [55] LIAO XL, YAN JN, WANG B, *et al.* Identification of key odorants responsible for cooked corn-like aroma of green teas made by tea cultivar ‘Zhonghuang 1’ [J]. *Food Res Int*, 2020, 136: 109355.
- [56] TROSSAT C, NOLTE KD, HANSON AD. Evidence that the pathway of dimethylsulfoniopropionate biosynthesis begins in the cytosol and ends in the chloroplast [J]. *Plant Physiol*, 1996, 111(4): 965-973.
- [57] TOSHIKO K, TEI Y. Studies on the flavor of green tea-part IV. dimethyl sulfide and its precursor [J]. *Agric Biol Chem*, 1963, 27(1): 56-59.
- [58] 李贤葆, 袁先安. 舒城小兰花[J]. *中国茶叶*, 2010, 32(11): 20-22.
LI XB, YUAN XA. Shucheng lanhua tea [J]. *China tea*, 2010, 32(11): 20-22.
- [59] 李继平. 太平猴魁茶[J]. *中国茶叶*, 2005. DOI: CNKI:SUN: CAYA.0.2005-05-026
LI JP. Taiping Houkui tea [J]. *China Tea*, 2005. DOI: CNKI: SUN:CAYA.0.2005-05-026
- [60] 郭丽, 谭俊峰, 王力, 等. 花香型绿茶加工工艺的研究[J]. *浙江农业科学*, 2009, 5: 946-948.
GUO L, TAN JF, WANG L, *et al.* Study on processing technology of floral green tea [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2009, 5: 946-948.
- [61] 石旭平, 曹挥华, 聂樟清, 等. 花香型绿茶加工技术研究初报[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(10): 347-349.
SHI XP, CAO HH, NIE ZQ, *et al.* Preliminary study on processing technology of flower-scented green tea [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2015, 43(10): 347-349.
- [62] 何郁菲, 曹冰冰, 梁敏敏, 等. 花香绿茶加工过程中的香气变化研究[J]. *中国茶叶加工*, 2016, 2: 51-56.
HE YF, CAO BB, LIANG MM, *et al.* Research on the changes of aroma constituents in fragrant green tea during processing [J]. *China Tea Proc*, 2016, 2: 51-56.
- [63] 贺麟, 李宗琼, 张拓, 等. 夏季茶鲜叶加工花香型绿茶工艺技术研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(6): 195-200.
HE L, LI ZQ, ZHANG T, *et al.* Study on the processing of flower-scented green tea with fresh tea leaves in summer [J]. *Food Mach*, 2019, 35(6): 195-200.
- [64] 吴福广, 杨维时, 李昌春. 安徽高香茶树品种“特香早”选育初报[J]. *茶叶通报*, 2007, 3: 122.
WU FG, YANG WS, LI CC, *et al.* Preliminary report on the breeding of Anhui high fragrant tea variety “*Textiangzao*” [J]. *J Tea Busin*, 2007, 3: 122.
- [65] 傅冬和, 何郁菲, 刘仲华. 一种利用茶鲜叶单片加工花香绿茶的方法: 中国, CN104186735B[P]. 2016-04-06.
FU DH, HE YF, LIU ZH. A method of processing flower-scented green tea with single fresh tea leaf: China, CN104186735B [P]. 2016-04-06.
- [66] CHEN Q, GUO TY, WU Q, *et al.* Evaluation of orchid-like aroma between different grades of taiping houkui tea by solid-phase microextraction and comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with time-of-flight mass spectrometry [J]. *J AOAC Int*, 2019, 103(2): 433-438.
- [67] FENG ZH, LI M, LI YF, *et al.* Characterization of the orchid-like aroma contributors in selected premium tea leaves [J]. *Food Res Int*, 2020, 129: 108841.
- [68] ACREE TE, NISHIDA R, FUKAMI H. Odor thresholds of the stereoisomers of methyl jasmonate [J]. *J Agric Food Chem*, 1985, 33(3): 425-427.
- [69] WANG DM, KUBOTA K, KOBAYASHI A. Optical isomers of methyl jasmonate in tea aroma [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 1996, 60(3): 508-510.
- [70] CHEONG JJ, CHOI YD. Methyl jasmonate as a vital substance in plants [J]. *Trend Genet*, 2003, 19(7): 409-413.
- [71] YANG ZY, BALDERMANN S, WATANABE N. Recent studies of the volatile compounds in tea [J]. *Food Res Int*, 2013, 53(2): 585-599.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



尹鹏, 博士, 讲师, 主要研究方向为茶叶品质化学与质量安全。
E-mail: 52greentea@sina.com



王广铭, 副教授, 主要研究方向为茶叶加工工程。
E-mail: 13937682795@139.com



孙慕芳, 副教授, 主要研究方向为茶叶加工与质量控制。
E-mail: xynzsmf@163.com