

茶叶中挥发性香气物质研究进展

查旻昱, 吴 悠, 张 梁*

(安徽农业大学茶树生物学与资源利用国家重点实验室, 合肥 230036)

摘 要: 茶是 3 大非酒精饮料之一, 具有降血糖、抗氧化和抗炎等健康功能。近年来, 大量研究报道了茶叶的生物活性和健康功能, 而作为感官审评的重要指标, 茶叶的香气同样值得深入研究。按照香气物质的生源途径分类, 茶叶中香气物质可以分为类胡萝卜素、脂肪酸、糖苷类源香气前体物质以及加工过程中产生的美拉德反应产物。本综述对茶叶中香气物质的研究进展进行了归纳总结, 以期为茶叶风味品质化学的研究提供借鉴。

关键词: 茶叶; 香气物质; 类胡萝卜素; 脂肪酸; 糖苷前体; 美拉德反应

Research advances on volatile aroma compounds of tea

ZHA Min-Yu, WU You, ZHANG Liang*

(Anhui Agricultural University, State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Hefei 230036, China)

ABSTRACT: Tea is one of the 3 non-alcoholic beverages, which has the health functions such as hypoglycemic, antioxidant and anti-inflammatory. In recent years, a large number of studies have reported the biological activity and health function of tea. As an important indicator of sensory evaluation, the aroma of tea is also worthy of in-depth study. According to the pathway of aroma substances, aroma substances in tea can be divided into carotenoids, fatty acids, glycoside-derived aroma precursors and Maillard reaction products produced during processing. This review summarized the research progress of aroma substances in tea in order to provide reference for the research of tea flavor quality chemistry.

KEY WORDS: tea; aroma compounds; carotenoids; fatty acids; glycosidic precursors; Maillard reaction

1 引 言

茶叶的香气物质属于挥发性成分, 是茶叶中一类重要的感官品质成分。挥发性香气物质在茶叶中含量较低, 但却是决定茶叶风味品质、产品等级和品质优劣的一个重要指标。按照加工方式的不同, 茶被分为绿茶、黄茶、白茶、青茶、红茶和黑茶^[1]。各类茶叶的香气在有一定共性的同时, 也各自拥有着独特的风味特征。迄今为止, 已在茶叶中发现了 600 多种挥发性成分。这些挥发性成分大都具有独特的香味, 但它们对茶叶或茶汤整体香气的贡献与

其香气阈值和香气稀释倍数(flavor dilution, FD)的关系密切。香味阈值是这类化合物气味能被人的嗅觉闻到的最低浓度, 阈值低的挥发性成分只需低浓度就能使人闻到强烈的气味。在评价香气阈值过程中, 审评小组还会将香气物质按梯度倍数稀释直至闻不见, 香味稀释倍数即 FD 值越大说明阈值越低。因此, 茶叶中香气成分的阈值和 FD 值是描述其香气属性和对整体香气贡献的一个重要指标。除此之外, 相同的香气化合物在不同的植物体内的阈值和 FD 值也都不尽相同, 这使得关于茶叶香气化合物的研究更加复杂和有趣。

基金项目: 中国科协“青年人才托举工程”(2016QNRC001)

Fund: Supported by Young Elite Scientist Sponsorship Program by CAST (2016QNRC001)

***通讯作者:** 张梁, 博士, 副教授, 主要研究方向为茶叶化学。E-mail: zhli2091@sina.com

***Corresponding author:** ZHANG Liang, Ph.D, Associate Professor, State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Anhui Agricultural University, Hefei 230026, China. E-mail: zhli2091@sina.com

茶叶中有一部分香气物质与茶叶香型密切相关, 并且阈值极低, 属于某一特定香型的关键香气物质^[2-4]。这些挥发性成分有些来源于茶树生物体的酶促反应的产物, 例如 β -糖苷酶水解的糖苷结合型香气物质; 有些则源自制茶过程中发生的一系列化学反应, 例如茶叶烘焙过程中美拉德反应产物吡嗪类成分。然而, 茶叶中仍有许多挥发性香气成分的组成及其形成机制尚未明确, 这些香气物质的研究则有助于揭示茶叶风味品质机制。本文参考了近年来有关茶叶香气物质的文献, 并按照茶叶中香气物质的生源途径对挥发性香气组分进行分类阐述, 对茶叶中报道过的香气物质进行了一个简单的整理, 以期能在后续对茶叶香气更加深入和细致的研究中作为参考, 给茶叶香气相关的课题研究以及食品工业生产中茶饮料中的香气配方研究等工作提供思路和理论基础。

2 茶叶中主要香气物质及来源

2.1 类胡萝卜素源的香气物质

类胡萝卜素是一类由多个共轭双键组成的类异戊烯聚合物。茶叶中的类胡萝卜素物质主要包括 β -胡萝卜素和叶黄素。类胡萝卜素经过氧化降解可以产生一系列 13 碳原子的香气物质, 包括 β -紫罗酮、 β -大马酮、茶香螺酮及其氧化衍生物。这些香气化合物一般都具有花果香, 是乌龙茶和红茶关键的香气物质^[5,6]。

类胡萝卜素的氧化降解可以分为两类, 一类是酶促氧化降解^[7]; 另一类属于非酶促氧化降解, 包括热自氧化降解等^[8]。在类胡萝卜素的酶促氧化降解途径中, 双加氧酶促使不饱和键氧化断裂, 使类胡萝卜素反应为初级氧化产物, 例如 β -紫罗酮。 β -紫罗酮是茶叶中代表性的类胡萝卜素源香气物质, 香气阈值都极低, 仅有 0.12 ng/L^[9]。 β -紫罗酮可以继续氧化生成二氢猕猴桃内酯和三甲基环己酮等香气物质^[10,11]。此外, 类胡萝卜素等物质也可以通过光氧化、自氧化以及热降解等途径产生 5,6-环氧- β -紫罗酮等香气物质。在茶叶的加工过程中, 例如在酶促发酵和烘干等过程中, 类胡萝卜素都可以产生这些香气物质^[12]。

目前, 研究人员在 6 大茶类中都发现了 β -紫罗酮这一香气物质, 其 *FD* 值不完全相同。例如, 在烘焙过的茶中检测到 β -紫罗酮这一成分的 *FD* 值只有 16, 远低于吡嗪类物质^[13], 这表明烘焙过的茶中 β -紫罗酮对茶叶香气的贡献程度不如吡嗪类物质; 对于红茶而言, β -大马酮和 β -紫罗酮都是其香气组成的关键成分, β -紫罗酮的 *FD* 值为 256, 是红茶综合香气的重要因子^[14]。值得关注的是, β -紫罗酮的异构体 α -紫罗酮的香气类型和香味阈值与 β -紫罗酮不同。以同一感官审评组为对象, α -紫罗酮具有强烈的紫罗兰花香气, 而 β -紫罗酮则更多呈现出木香气, 且 α -紫罗酮在纯水中的嗅味阈值大约为 β -紫罗酮的 20 倍^[15]。 β -大马酮的 *FD* 值为 1000, 其香味类似花香、蜜香和甜香味, 且经过加热

之后, 其 *FD* 值由 1000 升高为 10000^[16]。综上, 加热可以显著提升类胡萝卜素源香气物质的香气强度。

除了紫罗酮和大马酮之外, 红茶的主要香气成分还有二氢猕猴桃内酯, 茶香螺酮, 橙花叔醇和藏花醛^[17,18]。

2.2 脂肪酸源香气物质

脂肪酸类物质也是茶叶青香气物质的主要前体物质^[18,19]。例如, 绿茶中主要青草香物质包括脂肪酸的 5 碳原子降解产物 1-戊烯-3-酮、顺-3-戊烯-1-酮、顺-3-戊烯-1-醇、1-戊烯-3-醇; 7 碳原子降解产物 *n*-庚酮、*n*-庚醇、(*E,E*)-2,4-庚二烯醛; 8 碳原子降解产物 1-辛烯-3-醇和 1-辛烯-3-酮; 以及 9 碳原子降解产物 *n*-壬醇、*n*-壬醛等^[20]。脂肪酸在酶促氧化或者非酶促氧化条件下都可以导致脂肪酸碳链的氧化断裂, 其氧化程度和速度与脂肪酸的不饱和度有关。

亚油酸和亚麻酸是人体必需的两种不饱和脂肪酸, 两者都含有 18 个碳原子, 分别含有 2 个和 3 个不饱和双键。脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)可以将不饱和双键的一个碳原子氧化, 并且在脂氢过氧化物裂解酶作用下, 碳链断裂产生 6 碳原子的香气物质, 例如顺/反式-己烯醛、己醛和己醇^[21]。这些香气物质一般都具有绿茶典型的青草气味, 它们的产生依赖于茶叶生物体内的脂氧合酶等的活性。

油酸和棕榈油酸则是正壬醛、正壬醇、正庚醛和正庚醇的前体物质。脂质的降解物也可以生成环状的香气分子, 如茉莉酮酸甲酯, 顺式茉莉酮和茉莉内酯等, 这些是在大花茉莉植物内发现的挥发性香气物质^[22,23], 它们在乌龙茶和某些绿茶里的浓度很高, 近期, 研究发现茉莉酮酸甲酯是日本绿茶(抹茶)和太平猴魁高档茶兰花香中的关键成分^[3,24]。

茉莉酮酸甲酯是由 α -亚油酸降解衍生而来。它具有两个同分异构体, (1*R*, 2*R*) 和 (1*R*, 2*S*), (1*R*, 2*R*) 相比于 (1*R*, 2*S*) 具有更低的嗅觉阈值。但在茶叶加工热力作用下, 前者可转化为后者, 这也是为什么加工过后的乌龙茶具有强烈的花香和甜香气^[21,25], 而储存不当的乌龙茶中这类香气则显著减轻。 α -亚油酸经过脂氧合酶的酶促反应生成 1,3,5-羟基亚油酸, 之后可以继续被丙二烯氧化合酶(allene oxide synthase, AOS)和丙二烯氧化环化酶(allene oxidation cyclase, AOC)催化生成 12-氧-植物二烯酸(12-oxygen-plant dienoic acid, OPDA), 再经过还原作用以及 OPDA 的连续 β -氧化作用后, 生成茉莉酸。茉莉酸生成茉莉酸衍生物, 其中主要发生羟基化作用、糖基化作用或是与氨基酸配对^[26]。也可更进一步被转化为顺式茉莉酮, 顺式茉莉酮是绿茶和乌龙茶的关键香气组分, 也可被茉莉酸甲基转移酶催化反应生成茉莉酮酸甲酯。

2.3 糖苷类香气前体物质

3 类香气物质生源途径见图 1。茶叶中含有大量的糖苷类物质, 主要包括黄酮醇苷、三萜皂苷类以及香气糖苷类成分。香气糖苷类前体物质, 如单萜醇糖苷和芳香醇糖

苷等,是茶叶中另一类香气物质的生源前体。这类香气前体物质本身无香气,但在加工过程中,受损的茶叶组织会释放酶到细胞壁或空腔中,将糖苷键水解后就会释放出挥发性香气组分^[27,28]。在春茶中糖苷酶浓度较高,活性较强^[29],它可以在加工过程中与香气糖苷前体反应,水解糖苷键并产生单萜醇和芳香族香气物质^[30]。

研究发现芳樟醇、香叶醇、苯甲醇和 2-苯乙醇等香气物质在 6 大茶类中都能检测到^[31]。芳樟醇和香叶醇的香叶焦磷酸糖苷前体在芳樟醇合成酶和香叶醇合成酶的作用下水解释放芳樟醇和香叶醇^[31,32]。此外,茶叶中还有其他类型的糖苷配基,例如葡萄糖苷、樱草糖苷等。日本学者对糖苷前体物质进行了大量研究,发现了芳樟醇、香叶醇、2-苯乙醇、苯甲醇、橙花叔醇、水杨酸甲酯等香气糖苷前体^[33]。

2.4 美拉德反应香气物质

美拉德反应普遍存在于食品加工过程中,很多杂环化合物,如呋喃、吡咯、噻吩等及其衍生物也主要源自美拉德反应。茶鲜叶中的氨基酸与羰基类化合物,在发酵的过程中发生斯特勒克(Strecker)降解反应生成特征性醛类香气物质,称为斯特勒克醛类(Strecker aldehydes),这个过程同样也可发生在蒸汽杀青和炒青阶段^[34],通常的反应机制是一个胺基与一个羰基发生亲核加成后产生一个不稳定的缩醛胺(半酰胺),该半酰胺失去一分子水之后形成薛夫碱基(Schiff base),又经过一个不可逆的脱羧反应后,形成一个亚胺两性离子,经过一分子水的加成后,得到的最终产物是一个不稳定的氨基醇,最终该氨基醇分解为一个 α -氨基酮和一个醛分子,该醛比其前体氨基酸少一个碳原子,即斯特勒克醛(Strecker aldehydes)^[35,36]。

茶叶加工过程的各个工序都有不同程度的加热条件,

见图 2。因此,茶叶中的游离氨基酸,特别是茶氨酸与其他还原糖参与的美拉德反应会产生大量美拉德反应香气物质。近期,研究发现茶氨酸与 *D*-葡萄糖共热反应可以生产 2,5-二甲基吡嗪类焦糖香物质^[4]。除此之外,有报道发现茶氨酸与 *D*-葡萄糖还会生产大量的 1-乙基-3, 4-脱氢吡咯烷酮和一些吡嗪和呋喃的衍生物,如: 1-乙基-5-甲基-吡咯-2-醛、1-乙基吡咯、乙基甲基吡咯、1-乙基-2-乙酰吡咯、2-乙酰吡咯、2, 5-二甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2-乙基吡嗪、5-甲基-2-糠醇、2-乙酰呋喃、5-甲基-2-糠醛(呋喃甲醛)、和 2-糠醛(呋喃甲醛)^[2]。其中,部分物质含有电正性的羰基,往往还会与儿茶素进一步缩合产生新的儿茶素衍生物^[37,38]。

2.5 茶叶加工对香气形成的影响

不同的加工方式对茶叶的特征性香气也有一定影响,在 6 大茶类中,绿茶和黄茶加工方式有一定的相似性,其中,绿茶的生产工序主要由杀青、揉捻、干燥组成。其中,杀青是绿茶加工过程中最重要的一个工序。杀青过程中的高温可以使小分子、低沸点、气味较为刺激的醛类物质等挥发,使具有花香的芳樟醇等的香气得以显露。除此之外,杀青可以钝化酶的活性,使原料在非酶促的条件下发生热化学作用,结合干燥过程中的美拉德反应,使芳香物质在含量和种类上都有所增加并呈现出“板栗香”等绿茶特殊香气^[39]。黄茶的加工方法由绿茶加工方法衍生而来,分为杀青、闷黄和干燥 3 个步骤,闷黄促使黄茶形成了“黄汤黄叶”这一品质特征。闷黄过程中的叶绿素被破坏,茶叶的汤色变黄;同时黄茶干燥过程中的高温促使糖与氨基酸发生美拉德反应,形成一系列杂环类焦糖香成分,2 者结合使得黄茶呈现出典型的黄汤色和焦糖香^[40,41]。

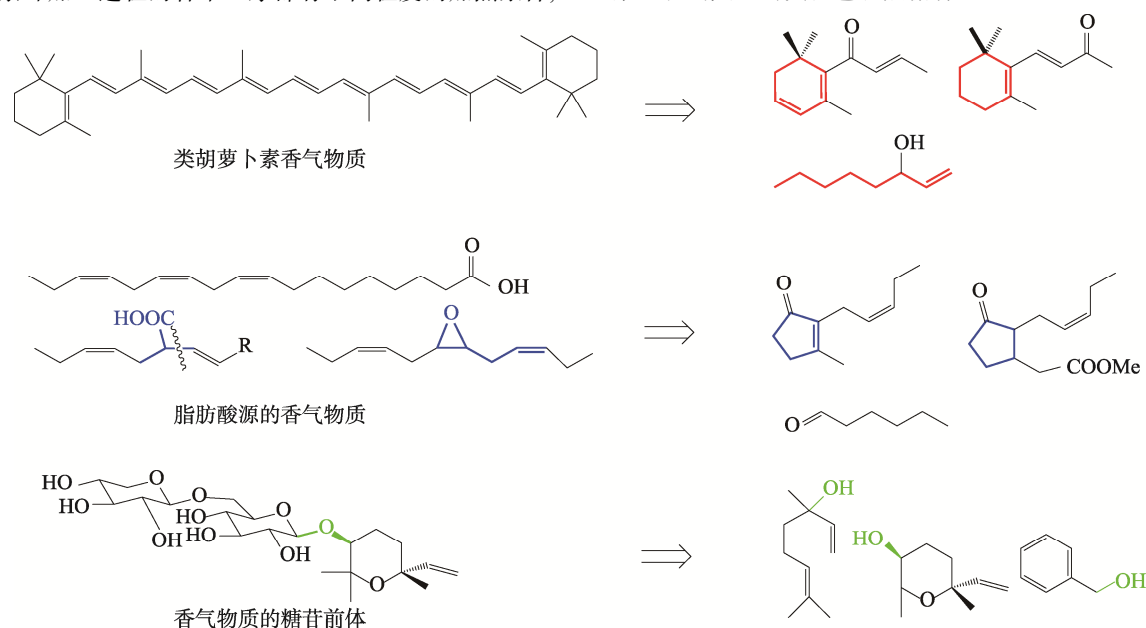


图 1 3 类香气物质生源途径

Fig.1 Formation mechanism of 3 types of aroma compounds

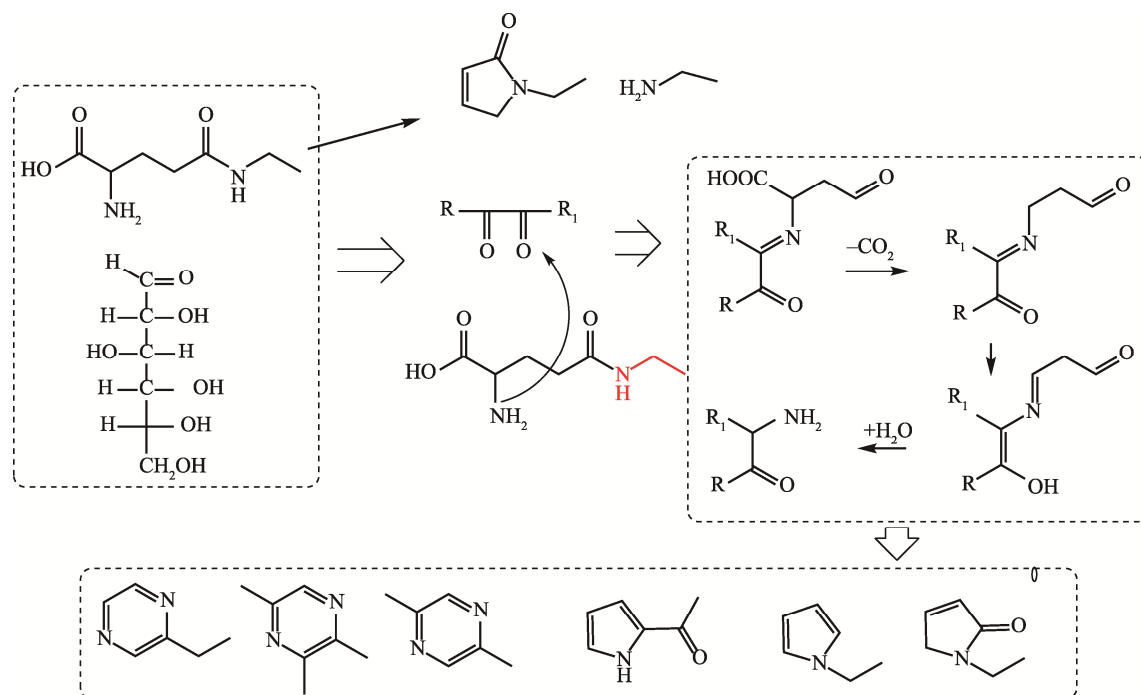


图 2 茶叶加工过程中茶氨酸参与的美拉德反应

Fig.2 Theanine via the Maillard reaction during tea processing

白茶因其加工工序较少, 俗称为“懒人茶”。其中, 萎凋是白茶加工过程中最重要的一个工序。鲜叶采摘之后在通风阴凉的环境下经过几十个小时的自然萎凋, 叶片内的水分逐渐蒸发, 细胞膜透性和酶活性提高, 使叶细胞在未受机械损伤的情况下, 在酶的作用下缓慢发生一系列的水解和氧化反应, 酶促反应放出的热量使得低沸点的具有青臭气的小分子物质得以挥发, 而非挥发性前体物质经水解酶作用转化为挥发性香气。在干燥阶段, 一些带青草气的低沸点醛醇类会因较高的温度而挥发, 或是异构化形成香气物质, 最终形成白茶的“毫香”^[42]。乌龙茶的初制工艺主要包括了萎凋、做青、揉捻和烘干等步骤, 与白茶一样, 萎凋是乌龙茶香气形成的前提, 该阶段相比于做青和炒青, 几乎没有挥发性物质的产生, 在做青过程中, 反式- β -罗勒烯、吲哚、橙花叔醇、苜蓿醇、茉莉酮等挥发性香气物质的含量显著增加, 之后的干燥过程实质上是终止叶片内的酶促氧化反应, 该过程中叶内水杨酸甲酯、香叶醇、芳樟醇等物质的含量显著降低^[43]。

红茶的加工过程中叶片内一直都在发生着丰富的生化反应, 在酶促反应和自然氧化的条件下, 茶叶内的糖苷类前体、类胡萝卜素、不饱和脂肪酸等的氧化降解而形成挥发性化合物, 其中 β -紫罗酮、芳樟醇、(E)-2-己烯醇、苯甲醇、甲基-5-庚烯-2-酮、水杨酸甲酯和吲哚的浓度比发酵前显著上升。红茶制作过程中, 通过氧化还原、环化、酯化、异构化等各种反应形成了具有果香、甜花香的特征香气^[44]。黑茶一般都拥有“渥堆”这一加工工序。经过“渥堆”

之后, 酯型儿茶素含量显著下降, 同时没食子酸含量显著增加, 多甲氧基苯类香气物质含量显著升高。渥堆过程中, 这类多甲氧基苯类香气物质可能与非挥发酯型儿茶素有关^[45]。此外, 茯砖茶在“发花”过程中(E)-2-戊烯醛、(E)-2-己烯醛、1-戊-3-醇、(E, E)-2,4-庚烯醛和(E, Z)-2,4-庚烯醛含量显著增加^[46]。也有研究发现, 利用冠突散囊菌发酵茶叶可以显著提高 β -紫罗酮和顺式茉莉酮的含量^[47]。

3 结 论

茶叶的香气物质来源于茶树生物合成途径和加工过程中酶促或非酶促反应。目前, 大量针对茶叶中香气物质的生物合成途径的研究基本揭示了部分关键香气物质的生源途径和合成基因。但是, 对茶叶加工过程中产生的香气物质的研究还较少, 特别是茶叶中主要儿茶素成分、黄酮醇类物质、咖啡碱以及茶氨酸参与香气反应的机制还不明确。茶加工过程中会产生大量的热反应产物, 这些物质存在着热降解、热聚合等各种类型的反应形式, 与香气的形成也紧密相关。此外, 目前茶叶原创性香气物质还较少, 大部分香气物质来源于食品工业、有机化学合成等已报道的成分, 那些茶叶中特有的原创性香气物质鉴定较为少见。究其原因, 主要是因为茶叶基础化学问题还欠缺深入研究。科研人员一般主要关注茶叶中主要多酚类物质的化学和健康功能等, 但是茶叶中新香气物质的分离纯化和结构鉴定研究尚待深入。一个香气物质的发现涉及多个学科的紧密合作, 但是关键化学结构的鉴定是其研究的核心。

本综述以茶叶香气研究为总结, 以期对茶风味化学的研究拓宽思路, 提供借鉴。

参考文献

- [1] Zhang L, Ho CT, Zhou J, *et al.* Chemistry and biological activities of processed *Camellia sinensis* teas: a comprehensive review [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2019, 18(5): 1474–1495.
- [2] Ho C, Zheng X, Li S. Tea aroma formation [J]. *Food Sci Human Well*, 2015, 4(1): 9–27.
- [3] Feng Z, Li M, Li Y, *et al.* Characterization of the orchid-like aroma contributors in selected premium tea leaves [J]. *Food Res Int*, 2020, 129(129): 108841.
- [4] Guo X, Song C, Ho C, *et al.* Contribution of l-theanine to the formation of 2, 5-dimethylpyrazine, a key roasted peanutty flavor in Oolong tea during manufacturing processes [J]. *Food Chem*, 2018, 263: 18–28.
- [5] Kawakami M, Kobayashi A. Carotenoid-derived aroma compounds in tea [J]. *Am Chem Soc*, 2001, 802(11): 145–159.
- [6] Ravichandran R. Carotenoid composition, distribution and degradation to flavour volatiles during black tea manufacture and the effect of carotenoid supplementation on tea quality and aroma [J]. *Food Chem*, 2002, 78(1): 23–28.
- [7] Huan FC, Horváth G, Molnár P, *et al.* Substrate promiscuity of RdCCD1, a carotenoid cleavage oxygenase from *Rosa damascena* [J]. *Phytochemistry*, 2009, 70(4): 457–464.
- [8] Glória MBA, Grulke EA, Gray JI. Effect of type of oxidation on beta-carotene loss and volatile products formation in model systems [J]. *Food Chem*, 1993, 46(4): 401–406.
- [9] Serr SA. Recent advances in the synthesis of carotenoid-derived flavours and fragrances [J]. *Molecules*, 2015, 20(7): 12817–12840.
- [10] Susanne B, Masaya K, Miwako K, *et al.* Functional characterization of a carotenoid cleavage dioxygenase 1 and its relation to the carotenoid accumulation and volatile emission during the floral development of *Osmanthus fragrans* Lour [J]. *J Exp Botany*, 2010, 61(11): 2967–2977.
- [11] Janeiro P, Oliveira BAM. Catechin electrochemical oxidation mechanisms [J]. *Anal Chim Acta*, 2004, 518(1): 109–115.
- [12] Kanasawud P, Crouzet JC. Mechanism of formation of volatile compounds by thermal degradation of carotenoids in aqueous medium beta-Carotene degradation [J]. *J Agric Food Chem*, 1990, 38: 237–243.
- [13] Sasaki T, Koshi EH, Take T. Characterisation of odorants in roasted stem tea using gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry analysis [J]. *Food Chem*, 2017, 220: 177–183.
- [14] Joshi R, Gulati A. Fractionation and identification of minor and aroma-active constituents in Kangra orthodox black tea [J]. *Food Chem*, 2015, 167: 290–298.
- [15] Plotto A, Barnes KW, Goodner KL. Specific anosmia observed for beta-ionone, but not for alpha-ionone: Significance for flavor research [J]. *J Food Sci*, 2006, 71(5): 24.
- [16] Kumazawa K, Masuda H. Change in the flavor of black tea drink during heat processing [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(7): 3304–3309.
- [17] Sanderson GW, Graham HN. Formation of black tea aroma [J]. *J Agric Food Chem*, 1973, 21(4): 576–585.
- [18] Coggon P, Romanczyk LJ, Sanderson GW. Extraction, purification, and partial characterization of a tea metalloprotein and its role in the formation of black tea aroma constituents [J]. *J Agric Food Chem*, 1977, 25(2): 278–283.
- [19] Takeo T, Tsushida T. Changes in lipoxygenase activity in relation to lipid degradation in plucked tea shoots [J]. *Phytochemistry*, 1980, 19(12): 2521–2522.
- [20] Wang K, Liu F, Liu Z, *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(7): 1406–1412.
- [21] Zheng X, Li Q, Xiang L, *et al.* Recent advances in volatiles of teas [J]. *Molecules*, 2016, 21(3): 338–338.
- [22] Mosblech A, Feussner I, Heilmann I. Oxylipins: Structurally diverse metabolites from fatty acid oxidation [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2009, 47(6): 511–517.
- [23] Wang D, Kubota K, Kobayashi A. Optical isomers of methyl jasmonate in tea aroma, bioscience [J]. *Biotechnol Biochem*, 1996, 60(3): 508–510.
- [24] Kumazawa K, Masuda H. Identification of potent odorants in Japanese green tea (sen-cha) [J]. *J Agric Food Chem*, 1999, 47(12): 5169–5172.
- [25] Liu P, Yin J, Chen G, *et al.* Flavor characteristics and chemical compositions of oolong tea processed using different semi-fermentation times [J]. *J Food Sci Technol-Mysore*, 2018, 55(3): 1185–1195.
- [26] Cheong J, Choi YD. Methyl jasmonate as a vital substance in plants [J]. *Trends Genetics*, 2003, 19(7): 409–413.
- [27] Su E, Xia T, Gao L, *et al.* Immobilization of beta-glucosidase and its aroma-increasing effect on tea beverage [J]. *Food Bioprod Process*, 2010, 88(2): 83–89.
- [28] Nishikitani M, Kubota K, Kobayashi A. Geranyl 6-O- α -L-Arabinopyranosyl- β -D-glucopyranoside isolated as an aroma precursor from leaves of a green tea cultivar [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 1996, 60(5): 929–931.
- [29] T Takeo. Production of linalol and geraniol by hydrolytic breakdown of bound forms in disrupted tea shoots [J]. *Phytochemistry*, 1981, 20(9): 2145–2147.
- [30] Takeo T. Variation in amounts of linalol and geraniol produced in tea shoots by mechanical injury [J]. *Phytochemistry*, 1981, 20(9): 2149–2151.
- [31] Guo W, Hosoi R, Sakata K, *et al.* (S)-linalyl, 2-phenylethyl, and benzyl disaccharide glycosides isolated as aroma precursors from oolong tea leaves [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 1994, 58(8): 1532–1534.
- [32] Guo W, Ogawa K, Yamauchi K, *et al.* Isolation and characterization of a beta-primeverosidase concerned with alcoholic aroma formation in tea leaves [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 1996, 60(11): 1810–1814.
- [33] Zhou Y, Dong F, Kunimasa A, *et al.* Occurrence of glycosidically conjugated 1-phenylethanol and its hydrolase beta-primeverosidase in tea (*Camellia sinensis*) flowers [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(32): 8042–8050.
- [34] Moldoveanu S. Pyrolysis-GC/MS data book of synthetic polymers. pyrograms, thermograms and ms of pyrolyzates [J]. *J Anal Appl Pyrolysis*, 2012, 96(jul.): 1.
- [35] Rizzi GP. The strecker degradation of amino acids: newer avenues for flavor formation [J]. *Food Rev Int*, 2008, 24(4): 416–435.
- [36] Vanderhaegen B, Neven H, Verachtert H, *et al.* The chemistry of beer aging—A critical review [J]. *Food Chem*, 2006, 95: 357–381.

- [37] Zhou J, Wu Y, Long P, *et al.* LC-MS-based metabolomics reveals the chemical changes of polyphenols during high-temperature roasting of large-leaf yellow tea [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(19): 5405–5412.
- [38] Wang W, Zhang L, Wang S, *et al.* 8-C N-ethyl-2-pyrrolidinone substituted flavan-3-ols as the marker compounds of Chinese dark teas formed in the post-fermentation process provide significant antioxidative activity [J]. *Food Chem*, 2014, 152: 539–545.
- [39] Bab 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.
- [40] Wang K, Liu F, Liu Z, *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(7): 1406–1412.
- [41] Guo X, Ho C, Schwab W. Aroma compositions of large-leaf yellow tea and potential effect of theanine on volatile formation in tea [J]. *Food Chem*, 2019, 280: 73–82.
- [42] Wang L, Cai LS C, Lin Zhi, *et al.* Analysis of aroma compounds in white tea using headspace solid-phase micro-extraction and GC-MS [J]. *J Tea Sci*, 2010, 30(2): 115–123.
- [43] Zhu J, Chen F, Wang L, *et al.* Comparison of aroma-active volatiles in oolong tea infusions using GC-olfactometry, GC-FPD, and GC-MS [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(34): 7499–7510.
- [44] V Kraujalytė, Pelvan E, Alasalvar C. Volatile compounds and sensory characteristics of various instant teas produced from black tea [J]. *Food Chem*, 2016, 194: 864–872.
- [45] Lv S, Wu Y, Li C, *et al.* Meng, comparative analysis of Pu-erh and fuzhuan teas by fully automatic headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and chemometric methods [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(8): 1810–1818.
- [46] Xu X, Mo H, Yan M, *et al.* Analysis of characteristic aroma of fungal fermented Fuzhuan brick-tea by gas chromatography/mass spectrophotometry [J]. *J Sci Food Agric*, 2007, 87(8): 1502–1504.
- [47] Cao L, Guo X, Liu G, *et al.* A comparative analysis for the volatile compounds of various Chinese dark teas using combinatory metabolomics and fungal solid-state fermentation [J]. *J Food Drug Anal*, 2017, 26(1): 112–123.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



查旻昱, 硕士研究生, 主要研究方向为茶叶化学。

E-mail: ahauzmy1227@126.com



张 梁, 博士, 副教授, 主要研究茶叶化学。

E-mail: zhli2091@sina.com