

· 综 述 ·

茶叶挥发性成分形成机制的研究进展

廉 明, 吕世懂, 吴远双, 贺宜龙, 周降生, 孟庆雄*

(昆明理工大学 生命科学与技术学院, 中国云南 昆明 650500)

摘 要: 茶叶的挥发性成分是决定茶叶品质的重要因子, 它不仅是区分不同茶类品质特征的重要指标, 同时也是捕获和培养消费者忠诚度最重要的因素。目前对茶叶中的挥发性成分的研究大多数都是停留在挥发性成分的分 离鉴定上, 对其可能的形成机制及影响因素则没有系统性的研究和全面的总结。从萜烯醇类的生物合成、胡萝卜素类和脂肪酸的氧化降解、微生物的作用等几个方面对茶叶挥发性成分的形成机制进行了综述。

关键词: 茶叶; 挥发性成分; 形成机制

中图分类号: TS272

文献标识码: A

文章编号: 1007-7847(2014)06-0550-07

Progresses on the Formation Mechanism of the Volatile Component in Tea

LIAN Ming, LÜ Shi-dong, WU Yuan-shuang, HE Yi-long,
ZHOU Jiang-sheng, MENG Qing-xiong*

(Faculty of Life Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: Volatile components of tea are important factors in the determination of tea quality, which is not only an important indicator to distinguish with different quality characteristics, but also the most important factors to capture and cultivate consumer loyalty. Current researches on volatile components of tea were mostly remained in the isolation and identification of volatile components, while the possible mechanism of its formation and influencing factors have not been systematically reported and comprehensively summarized yet. The formation mechanism of volatile components in tea were summed up from the aspects of terpene biosynthesis, carotenoids and fatty acid oxidation degradation, microorganisms etc.

Key words: tea; volatile components; formation mechanism

(*Life Science Research*, 2014, 18(6): 550~556)

茶叶的挥发性成分是茶叶中所存在的化学物质综合配比的结果, 它对茶叶品质的贡献率高达 25%~40%^[1]。由于制作工艺的不同, 茶叶中各种成分的配比也不相同, 因此形成了具有不同类别和香型的茶叶。随着现代仪器分析技术的不断发展, 已经从茶叶中分离鉴定出数百种化合物, 这些香气化合物在不同类型的茶叶之间差别很大, 这主要受到不同的加工工艺、自然环境与栽培条

件、茶树品种、外源诱导等诸多因素的影响^[2-5]。目前文献中对茶叶挥发性成分的研究, 大多数都是停留在挥发性成分的分 离及鉴定上, 因此对不同类型的茶叶(绿茶、乌龙茶和红茶等)的具体香气成分已有一个大致的了解, 但是对这些挥发性成分的形成机制及影响因素则很少有全面的研究。由于影响茶叶挥发性成分的变量很多, 即便是同一类型的茶叶在香型及香气组成上都会有较大的

收稿日期: 2013-12-26; 修回日期: 2014-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(3100960); 云南省自然科学基金资助项目(2010ZC054)

作者简介: 廉明 (1987-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事茶叶功效机制研究, E-mail: 18314405761@163.com; * 通讯作者: 孟庆雄(1972-), 男, 湖北荆门人, 昆明理工大学副教授, 博士, 主要从事生物制药技术及茶叶化学组学研究, E-mail: qxmeng@sina.com.

差异,因此,全面总结各种影响因素对茶叶挥发性成分的影响是十分困难的,但是茶叶中一些非常重要的挥发性成分的生物合成途径以及形成机制是一致的。因此,本文从萜烯醇类物质的生物合成途径、胡萝卜素类和脂肪酸的氧化降解和微生物在后发酵过程中的作用等方面入手,总结和这些影响因素相关联的茶叶挥发性成分的形成机制,为稳定茶叶品质、进一步开发茶叶深加工饮品及保健作用提供理论基础和实践指导。

1 茶叶挥发性成分的形成机制

茶叶的挥发性成分是茶叶中各种挥发性物质以不同的比例所构成的,它少部分存在于茶鲜叶中,大部分是通过不同的加工工艺形成的。茶叶挥发性成分虽然含量低微,只占茶叶总干质量的0.01%~0.05%,但它的种类却多达500种,是决定茶叶品质的重要因子之一^[6]。目前,从茶叶中鉴定出的挥发性成分涵盖了有机化学分类中的醇类、碳氢化合物、醛类、酮类、酯类、甲氧基苯类、酚类、酸类、内酯和含氮化合物等。在这些化合物中,构成茶鲜叶的芳香物质约有100种,这些物质是茶叶中的固有香气,是茶树体内自身生物合成的香气物质,其他的为转化型香气,是茶叶中的香气前体物质和制茶过程中各种不同的生产工艺所决定的。本文通过对茶叶香气形成机制的探讨和总结,能够为茶叶深加工产品的香气淡薄及质量不稳定等问题提供一些参考,从而提高茶叶等级,稳定茶叶产品的质量。

1.1 萜烯醇类物质的生物合成与茶叶香气

挥发性的单萜和倍半萜是茶叶中重要的香气成分,主要为芳樟醇、脱氢芳樟醇、香叶醇、芳樟醇氧化物、 α -萜品醇、法尼醇、橙花醇和雪松醇等^[7]。这些物质通常带有浓郁的甜香、花香和木质香,广泛存在于不同类型的茶叶中^[8]。它们在茶树体内通常以葡萄糖苷形式存在,这些糖苷挥发性较差,因此,茶鲜叶基本没有香味^[9]。这些重要的萜烯醇类物质是茶叶加工过程中由葡萄糖苷水解酶水解形成^[10]。Takeo等^[11]向酶失活的茶叶组织中加入葡萄糖苷酶后,这些茶叶组织能够释放出芳樟醇和香叶醇等香气物质,但是加入这种酶的抑制剂 Hg^{2+} 后这两种香气物质的生成停止了,说明这些香气物质的前体为葡萄糖苷。樱草糖苷酶也是一个参与糖苷态香气前体释放的重要的酶,它通过水解樱草糖苷释放香气苷元,同时樱草糖苷是茶鲜叶中

重要的醇系香气前体物质,含量高于葡萄糖苷^[12-13]。另外,一些自然环境和加工工艺也会造成茶叶中这些糖苷及其酶类物质的变化,从而导致不同类型的茶叶中这些香气化合物之间的差异^[14]。特别是在制茶的萎凋过程中,经揉捻、发酵以结合态形式存在的芳樟醇葡萄糖苷因细胞破碎而产生酶解反应,水解产生大量的芳樟醇,因此,在一些红茶^[15]和乌龙茶^[16]的香气成分中也检出了较高含量的芳樟醇,而后发酵的黑茶中芳樟醇的含量却比较低^[17]。一些研究证明植物体内的萜类物质来源于异戊烯基焦磷酸(isopentenylpyrophosphate, IPP)及其异构物二甲烯丙基焦磷酸(dimethylallylpyrophosphate, DMAPP),它们通过质体中的2-C-甲基-D-赤藓糖醇-4-磷酸等途径合成,具体的生物合成途径如图1所示^[18]。而芳樟醇的4种氧化物(I、II、III和IV)则是芳樟醇先氧化形成芳樟醇-6,7-环氧化物之后进一步转化形成的^[19],如图2所示。总之,这些挥发性萜烯醇类物质具有宜人的花果香味,同时它们的活性阈值也比较低,即使在茶叶中含量非常低微,但却是茶叶中不可或缺的重要香气成分,对茶叶的品质贡献非常大。

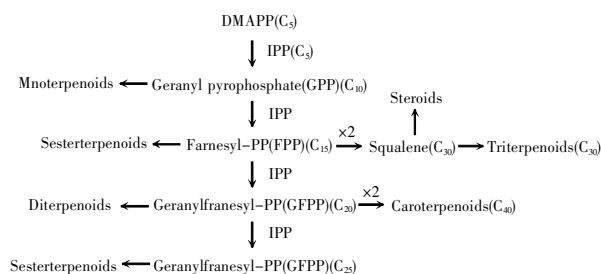


图1 萜类化合物的生物合成途径

Fig.1 The biosynthetic pathway of terpenoids

1.2 苯丙酸类和苯环型化合物

苯丙酸类和苯环型化合物主要是以苯丙酸为起点,经过一系列复杂的生物合成途径形成的,形成的物质大多数不具有挥发性,通常只有在 C_6 位上发生酰基化或甲基化,才会有芳香气味^[20]。通常这些化合物主要包括具有苦杏仁气味的苯甲醛和风信子气味的苯乙醛^[21-22];具有玫瑰花香味的苯甲醇和苯乙醇、具微弱玫瑰香味的2-苯基乙醇、有类似香草精的愉快香味的香豆素等,其中2-苯基乙醇主要是苯丙酸通过丙酮酸和苯乙醛进一步形成的^[19]。这些化合物在各种茶叶中均有检出,它们的具体生物合成途径及形成机制还有待进一步研究。

1.3 胡萝卜素的氧化降解

胡萝卜素类氧化降解来源的香气化合物也是

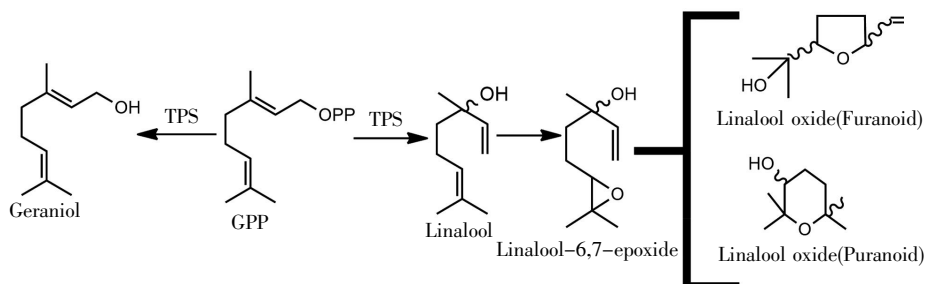


图2 芳樟醇及其氧化物的合成途径

Fig.2 The synthesis pathway of linalool and linalool oxides

茶叶中一类非常重要的香气物质,这类物质通常具有典型的花果香及木质香味,对茶叶香气的贡献很大。这些物质主要包括6-甲基-5-庚烯-2-酮、 α -紫罗酮、 β -紫罗酮、香叶基丙酮、茶螺烯酮、5,6-环氧- β -紫罗酮、 β -大马士酮、 β -环柠檬醛和二氢猕猴桃内酯等,它们在不同类型的茶叶中均有检出,尤其在红茶中含量最高。 β -紫罗酮具有典型的紫罗兰香味和木质香味, Kanani 等^[23]发现其感官阈值较低(0.007 $\mu\text{g/L}$),估计对茶叶香气贡献非常大。Schuh 等^[24]利用气相色谱-嗅觉测定法(GC-O)和香味抽提物稀释分析法(AEDA)分析大吉岭红茶的特征香气成分时,认为 β -大马士酮是大吉岭红茶中一种非常重要的香气化合物,其香

气活性值低至 0.004 $\mu\text{g/L}$ 。特别是在红茶的发酵过程中,强烈的酶性氧化,使胡萝卜素大量降解形成这些致香化合物,同时形成了红茶独特的花果香。胡萝卜素的氧化降解是很多植物中挥发性成分的主要形成途径^[25, 26],如图3所示,这些降解形成的挥发性成分对都是各种植物中非常重要的香气化合物。

1.4 脂肪酸的衍生物

脂肪酸衍生物的合成途径主要是通过多烯脂肪酸类氧化(oxidized polyenoic fatty acid)脂肪氧合酶途径形成的。这些脂肪酸类的衍生物大多数为醛类和酯类化合物,其中具有青草香气的反-2-庚烯醛由亚油酸自动氧化形成;具有油臭气及粗

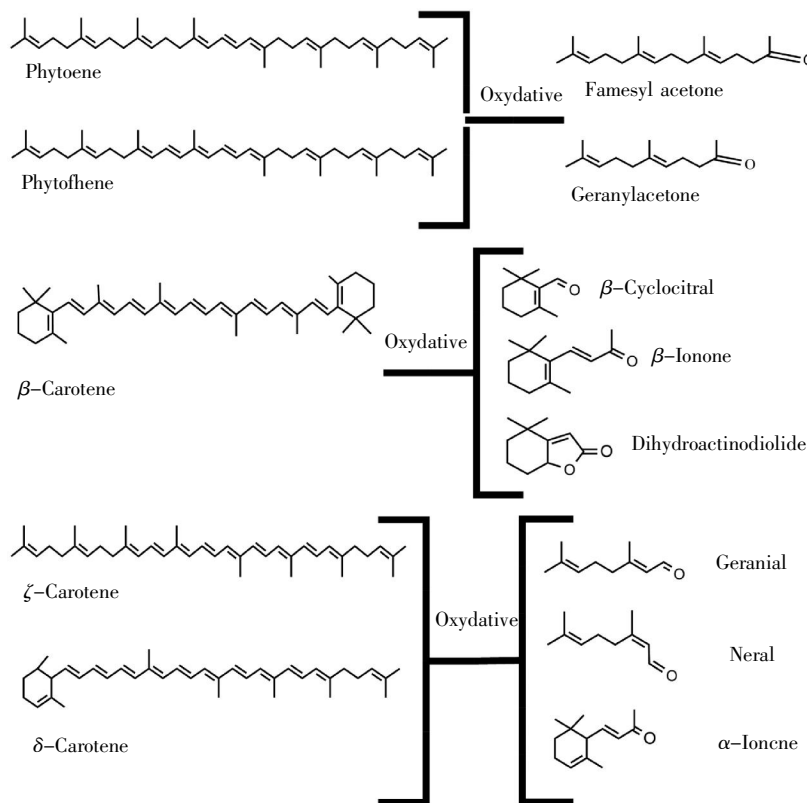


图3 胡萝卜素(左)在植物体内降解可能形成的一些挥发性成分(右)

Fig.3 Carotenoids (left) are possible degraded into some volatile compounds (right) in plant

老气的(E, Z)-2, 4-庚二烯醛和(E, E)-2, 4-庚二烯醛由亚麻酸自动氧化形成; 反-2-己烯醛是亚麻酸经酶解作用形成顺-3-己烯醛和反-3-己烯醛后异构化的产物; 己醛则是亚油酸经酶解形成的, 茶叶加工时发酵和干燥阶段大量形成^[27]。一些酯类成分如: 十六烷酸甲酯、亚油酸甲酯、亚麻酸甲酯等, 它们是由一些高级脂肪酸和低级醇脱水缩合而成, 这些化合物挥发性差且无气味^[28]。其他的一些酯类成分如: 茉莉酮酸甲酯、水杨酸甲酯和乙酸苜酯等, 这些成分在乌龙茶中含量较高, 是乌龙茶中重要的香气成分, 这些物质是脂肪酸在制茶过程中与醇类物质发生化学反应形成的^[19]。另外, 具有嫩叶的鲜爽和清香气味的顺-3-己烯-1-醇是茶叶中亚麻酸酶解及自动氧化后的降解产物; 具有淡青的嫩枝叶气息的己醇则是由茶叶中的亚油酸经酶解后生成己醛, 己醛再经醇脱氢酶作用而还原成己醇。

1.5 微生物的作用

在我国六大基本茶类中, 只有黑茶的生产涉及微生物的参与, 这个工序称为渥堆后发酵过程。在这个过程中微生物胞外酶的催化和湿热作用, 使茶叶内含成分种类和含量发生了极为复杂的变化, 从而形成了黑茶特有的色泽黑润、滋味醇和、香气纯正、汤色黄浓明亮的品质特征^[29]。目前, 微生物对黑茶香气的影晌主要是导致其产生了大量的甲氧基苯类化合物, 特别是在普洱茶中。甲氧基苯类化合物的含量非常高, 而在其他类型的茶叶(绿茶、乌龙茶、红茶)中几乎未检出^[30-32]。甲氧基苯类化合物同时是普洱茶具有典型陈香味最主要

的原因, 其中主要为1, 2, 3-三甲氧基苯、1, 2, 4-三甲氧基苯、3, 4-二甲氧基甲苯、1, 2, 3-三甲氧基-5-甲基苯等^[33, 34]。刘通讯等^[35]认为, 甲氧基苯类及其衍生物能够有效改善茶叶的粗老味, 使普洱茶香味陈醇, 是普洱茶陈香的重要特征香气之一。这种物质的形成和后发酵过程中微生物的活动有较大的关系, 这些甲氧基苯类化合物可能是微生物酶氧化降解单宁酸(Tannic acid, TA)和表没食子儿茶素没食子酸酯(Epigallocatechin gallate, EGCG)形成的^[36], 其可能形成途径如图4所示。另外, 一些研究也证明, 仅仅是普洱茶中检出较高含量的甲氧基苯类化合物, 而在其他黑茶(如湖南茯砖茶)中并未检出此类化合物, 检出的都是一些具有典型菌花香味的物质。这可能与后发酵过程中不同的微生物种类有关, 研究证明普洱茶的微生物主要是黑曲霉, 而茯砖茶中的微生物主要是冠突散囊菌^[37, 38], 其他黑茶(六堡茶、雅安藏茶和青砖茶)中的微生物种类及其对其香气的影响有待进一步研究。普洱茶随着储藏时间的增加而不断陈化, 特别是普洱生茶, 经过数年至几十年的陈化, 其香气和滋味感受逐渐接近普洱熟茶。近年来, 普洱茶随着陈化时间的增长, 价格一路上涨, 我们猜测这可能是缓慢氧化与微生物的活动及相关酶促反应共同作用的结果, 但其陈化的分子机制及其香气成分的变化还有待进行系统的研究。

1.6 其他一些重要化合物的形成机制

在茶叶的挥发性成分中, 一些酚类化合物, 如具有烟味的4-甲基愈创木酚和4-乙基愈创木酚, 具有丁香和康乃馨香气的异丁子香酚和4-乙

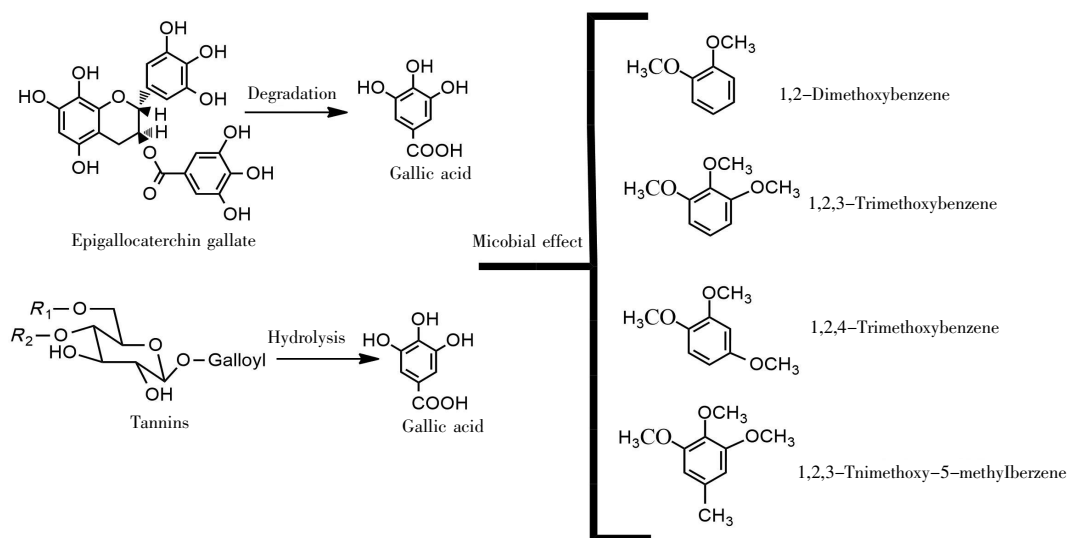


图4 甲氧基苯类化合物的可能形成途径

Fig.4 The possible formation pathway of methoxy-benzene compounds in tea

基苯酚等,前3种物质主要由阿魏酸经微生物和相关酶降解生成,而4-乙基苯酚主要存在于后发酵茶中,是在微生物作用下由香豆酸经脱羧反应和双键加氢反应生成,是构成日本腌制茶特征香气的主要成分之一^[39]。酸类组分,大部分来自于茶鲜叶,是茶树物质代谢过程中的中间产物,尤其是脂肪族羧酸,它们是植物的花、茎、叶、果实里的酯类和脂肪的组成成分,这些物质沸点较高,挥发性比较差,对茶叶香气的贡献不大。含氮化合物主要为咖啡因、吡嗪和吡咯类化合物,其中咖啡因是茶叶中重要的功效性成分^[40],对茶叶香气贡献不大。其他的成分如2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪和2-乙酰基吡咯等,这些物质在炒青的绿茶中含量比较高,是高温条件下,氨基酸和糖加热后形成,能使茶叶具有典型的焦糖香^[41]。

2 不同类型茶叶中一些重要挥发性成分的总结

目前,对茶叶香气成分的提取主要有同时蒸

馏萃取(simultaneous distillation extraction, SDE)和顶空固相微萃取(headspace solid-phase microextraction, HS-SPME),SDE法在萃取过程中需要大量的有机溶剂,且需要在高温下进行,次生反应比较激烈,所萃取出来的香气成分在一定程度上不能真实地反映茶叶的原始香气情况,而HS-SPME法则不需要任何的有机溶剂,它集采样、加热、萃取和解吸过程为一体,是一种比较理想的茶叶香气成分分析技术^[30]。因此,我们对文献中用HS-SPME法对不同类型茶叶的香气成分的研究进行了总结^[32,42-47],找出不同类型茶叶对应的一些重要香气成分的分布比重情况,为进一步探索茶叶香气成分的形成机理提供理论基础。这些重要的挥发性化合物的相对含量检出范围如表1所示。

通过表1我们可以看出,绿茶和红茶中主要以高含量的萜烯醇类物质为主(芳樟醇和香叶醇等),但红茶中花果香味的酮类物质含量较绿茶高;乌龙茶中主要以橙花叔醇、吲哚、茉莉内酯和 α -法呢烯等具有典型茉莉花香味的物质作为其

表1 不同类型茶叶中一些重要的挥发性成分的总结

Table 1 Summary of some important volatile components in different types of tea

| Number | Compound name | Green tea | Oolong tea | Black tea | Pu'er tea |
|--------|-------------------------------------|------------|------------|-------------|------------|
| 1 | Benzaldehyde | - | 0.06~0.22 | 0.27~0.30 | 0~0.36 |
| 2 | 1-Octen-3-ol | 0.10~0.68 | 0.08~0.10 | 0.06~0.12 | 0~0.14 |
| 3 | Benzenecetaldehyde | - | 0.16~0.55 | 0.41~0.80 | 0.05~0.07 |
| 4 | Linalool | 4.65~22.45 | 0.32~2.26 | 12.53~12.95 | 0.30~2.43 |
| 5 | Naphthalene | 0.11~0.91 | 0.06~0.27 | 0.10~5.61 | 0~3.05 |
| 6 | Safranal | 0.12~1.05 | 0.10~0.23 | 0.15~0.20 | 0~0.34 |
| 7 | Decanal | 0.33~0.69 | 0.07~0.09 | 0.23~2.13 | 0~0.68 |
| 8 | Geraniol | 3.77~10.91 | 0.53~2.89 | 4.32~8.12 | 0.13~0.98 |
| 9 | 1, 2, 3-Trimethoxybenzene | - | - | 0.18~0.39 | 7.25~27.43 |
| 10 | 1, 2, 4-Trimethoxybenzene | - | - | 1.87~3.32 | 2.14~11.79 |
| 11 | Jasmone | 0.83~2.72 | 0.43~2.26 | 0.41~0.72 | 0~0.64 |
| 12 | Tetradecane | 0.77~2.56 | 0.17~1.09 | 0.32~0.41 | 0.21~0.56 |
| 13 | alpha-Ionone | - | 0.11~2.18 | 0.32~0.45 | 0.35~0.97 |
| 14 | beta-Ionone | - | 0.66~17.66 | 2.41~2.56 | 1.73~3.37 |
| 15 | Pentadecane | 0.46~0.93 | 0.57~1.11 | 0.42~0.43 | 0.35~0.98 |
| 16 | Dihydroactinidiolide | - | 0.11~4.85 | 2.63~2.86 | 2.27~6.51 |
| 17 | Cedrol | - | 0.29~0.87 | 2.60~0.31 | 0.41~0.66 |
| 18 | Hexadecane | 0.45~1.18 | 0.42~1.13 | 0.70~1.17 | 0.86~2.57 |
| 19 | Heptadecane | 0.05~0.15 | 0.27~0.75 | 0.51~0.80 | 0.40~3.29 |
| 20 | Phenanthrene | - | 0.09~0.57 | 0.46~0.84 | 0.30~0.57 |
| 21 | Octadecane | 0.02~0.07 | 0.07~0.33 | 0.55~1.27 | 0.35~3.60 |
| 22 | Caffeine | 0.32~2.90 | 1.72~8.57 | 4.28~7.87 | 0.83~8.07 |
| 23 | 6, 10, 14-Trimethyl-2-Pentadecanone | - | - | 2.34~6.37 | 2.15~8.25 |
| 24 | Hexadecanoic acid | - | 0.29~1.44 | 4.51~11.77 | 3.91~16.92 |
| 25 | Phytol | - | 0.15~7.83 | 8.20~9.32 | 0.82~6.99 |
| 26 | Nerolidol | 0.88~3.38 | 1.68~28.12 | 0.92~3.17 | 0~2.86 |
| 27 | Indole | 0.35~1.61 | 0.28~10.67 | - | - |
| 28 | alpha-Farnesene | - | 0.35~23.50 | 0~0.52 | - |
| 29 | Jasmine lactone | - | 0.48~9.49 | 0.11~0.16 | - |

注:“-”表示未检出。

Note:“-” means not detected.

特征性香气成分;而具有陈香味的甲氧基苯类化合物则是普洱茶中含量最高的化合物,这些差异主要和不同的茶树品种、加工工艺和环境条件等有关。

3 结论与展望

通过对不同类别的茶叶挥发性成分的形成机制进行总结后发现,萜烯醇类物质的形成与葡萄糖苷水解茶树体内的葡萄糖苷有关;大多数酮类化合物的形成与胡萝卜素的氧化降解有关;大量存在于普洱茶中的甲氧基苯类化合物的形成可能与微生物酶氧化降解丹宁酸和表没食子儿茶素没食子酸酯形成有关等。再者,茶叶的香型可能是由一种或几种香气成分起主导作用,其余起协调支配作用,是内含各种香气成分比例恰当的综合反映。茶叶的香气成分受到栽培措施、栽培环境、茶树种植及加工工艺等的影响。目前,已有很多文献对不同加工工艺对茶叶品质造成的影响进行了总结,但是对茶叶香气成分的合成途径及一些关键化合物的形成机制的报道较少,对茶叶挥发性成分的一些功效机制的总结也是空白。因此,全面对茶叶挥发性成分的形成机制进行了解,对稳定茶叶质量、增加茶叶附加值具有重要意义。

同时,未来对茶叶挥发性成分的研究还应朝以下几个方面展开:

1) 目前,对茶叶挥发性成分的生物合成途径大多是参考其他植物中挥发性成分的合成途径来进行推断的,尽管它们有一些相同之处,但茶叶挥发性成分十分复杂,影响其变化的因素非常多,因此其合成途径可能会发生变化,后期应进一步研究茶叶中相关酶类与挥发性成分形成及其变化的关联性研究;

2) 在茶叶的挥发性的生物合成途径及形成过程中,一些关键酶的形成、鉴定、释放以及与底物的相互作用等动力学过程还有待进一步研究;

3) 茶叶挥发性成分可能的功效机制及其对人类健康的益处还需进一步探索和挖掘;

4) 茶叶挥发性成分随季节、土壤等的变化而变化的分子机制研究;

5) 利用代谢组学和多元统计学等研究手段,结合茶叶挥发性成分,对不同类型、产地、发酵程度和年份的茶叶进行区分和预测,为建立茶叶的质量评估体系奠定理论基础。

通过本文的总结,希望有更多的学者能对茶叶

挥发性成分的形成机制进行进一步的探索,为茶产业的健康发展奠定理论基础和提供实践指导。

参考文献(References):

- [1] 刘晓慧,张丽霞,王日为,等.顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析黄茶香气成分[J].食品科学(LIU Xiao-hui, ZHANG Li-xia, WANG Ri-wei, et al. Analysis of volatile components of yellow tea by HS-SPME/GC-MS[J]. Food Science), 2010, 31(16): 239-243.
- [2] 廖书娟,童华荣.不同茶树品种脂肪酸和糖苷类香气前体分析[J].西南大学学报(自然科学版)(LIAO Shu-juan, TONG Hua-rong. Studies on the fatty acid and glycoside aroma precursors of different tea varieties[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)), 2008, 30(8): 62-66.
- [3] 张正竹,宛晓春,施兆鹏,等.茶鲜叶在不同季节及绿茶加工贮藏过程中糖苷类香气前体含量变化研究[J].食品与发酵工业(ZHANG Zheng-zhu, WAN Xiao-chun, SHI Zhao-peng, et al. Studies on the content of glycosidic tea aroma precursors in leaves of zhuye during different seasons, green tea processing and storage[J]. Food and Fermentation Industries), 2003, 29(3): 1-4.
- [4] 朱旺升,倪德江.加工工艺与名优绿茶香气形成的相关性研究进展[J].蚕桑茶叶通讯(ZHU Wang-sheng, NI De-jiang. Progress in the correlation of processing technology and high quality green tea aroma formation[J]. Newsletter of Sericulture and Tea), 2005, (1): 28-29.
- [5] 董迹芬,边金霖,朱全武,等.茶叶香气与产地土壤条件的关系[J].浙江大学学报(农业与生命科学版)(DONG Ji-fen, BIAN Jin-jin, ZHU Quan-wu, et al. Relationship between tea aroma and soil conditions[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)), 2013, 39(3): 309-317.
- [6] 王力,林智,吕海鹏,等.茶叶香气影响因子的研究进展[J].食品科学(WANG Li, LIN Zhi, LÜ Hai-peng, et al. Research progress in affecting factors of tea aroma[J]. Food Science), 2010, 31(15): 293-298.
- [7] 吴勇.萜烯类化合物与茶叶香气[J].化学工程与装备(WU Yong. Terpenes and tea aroma[J]. Chemical Engineering & Equipment), 2009, (11): 123-125.
- [8] 张正竹,施兆鹏,宛晓春.萜类物质与茶叶香气[J].安徽农业大学学报(ZHANG Zheng-zhu, SHI Zhao-peng, WAN Xiao-chun. Terpenes and tea aroma[J]. Journal of Anhui Agricultural University), 2000, 27(1): 51-54.
- [9] 王华夫,游小清.祁门红茶单萜烯醇形态转变的研究[J].中国茶叶(WANG Hua-fu, YOU Xiao-qing. Studies on the change of Keemun single terpenol's morphology[J]. China Tea), 1996, (6): 22-23.
- [10] JANG J, YANG Y C, ZHANG G H, et al. Effect of ultra-violet B on release of volatiles in tea leaf[J]. International Journal of Food Properties, 2010, 13(3): 608-617.
- [11] TAKEO T. Production of linalool and geraniol by hydrolytic breakdown of bound forms in disrupted tea shoots[J]. Phytochemistry, 1981, 120(9): 2145-2147.
- [12] 赵芹,童启庆.茶叶香气水解酶研究动态[J].福建茶叶(ZHAO Qin, TONG Qi-qing. Research progress of tea aroma hydrolase[J]. Tea in Fujian), 1999, (1): 5-8.
- [13] MIZUTANI M, NAKANISHI H, EMA J, et al. Cloning of β -primeverosidase from tea leaves, a key enzyme in tea aroma formation[J]. Plant Physiology, 2002, 130(4): 2164-2176.
- [14] 魏志文,李大祥,张华艳,等.红绿茶加工工艺对茶鲜叶香气和糖苷类香气前体的影响[J].中国农学通报(WEI Zhi-wen, LI Da-xiang, ZHANG Hua-yan, et al. Effects of processing techniques on aroma and glycosidic aroma precursors in fresh tea leaves[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin), 2007, 23(11): 109-113.
- [15] PANG X, QIN Z, ZHAO L, 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 & Technology, 2012, 47(11): 2372-2379.

- [16] LIN J, ZHANG P, PAN Z, *et al.* Discrimination of oolong tea (*Camellia sinensis*) varieties based on feature extraction and selection from aromatic profiles analyzed by HS-SPME/GC-MS[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(1): 259-265.
- [17] 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]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(7): 1406-1412.
- [18] 贺志荣, 项威, 徐燕, 等. 茶树挥发性萜类物质及其糖苷化合物生物合成的研究进展[J]. 茶叶科学(HE Zhi-rong, XI-ANG Wei, XU Yan, *et al.* Progress in the research of biosynthesis of volatile terpenoids and their glycosides in tea plant[J]. *Journal of Tea Science*), 2012, 32(1): 1-8.
- [19] YANG Z, BALDERMANN S, WATANABE N. Recent studies of the volatile compounds in tea[J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 585-599.
- [20] 樊荣辉, 黄敏玲, 钟淮钦, 等. 花香的生物合成、调控及基因工程研究进展[J]. 中国细胞生物学学报(FAN Rong-hui, HUANG Min-ling, ZHONG Huai-qin, *et al.* Advances in biosynthesis, regulation and genetic engineering of floral scent[J]. *Chinese Journal of Cell Biology*), 2011, 33(9): 1028-1036.
- [21] YANG Z, KINOSHITA T, TANIDA A, *et al.* Analysis of coumarin and its glycosidically bound precursor in Japanese green tea having sweet-herbaceous odour[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(1): 289-294.
- [22] HIRATA H, OHNISHI T, ISHIDA H, *et al.* Functional characterization of aromatic amino acid aminotransferase involved in 2-phenylethanol biosynthesis in isolated rose petal protoplasts[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(5): 444-451.
- [23] DHARMESH M K, BHAURAO P N, PADMA B, *et al.* Recovery of valuable tea aroma components by pervaporation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(26): 6924-6932.
- [24] 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.
- [25] LEWINSOHN E, SITRIT Y, BAR E, *et al.* Carotenoid pigmentation affects the volatile composition of tomato and watermelon fruits, as revealed by comparative genetic analyses[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(8): 3142-3148.
- [26] WACHE Y, BOSSER D A, LHUGUENOT J C, *et al.* Effect of cis/trans isomerism of β -carotene on the ratios of volatile compounds produced during oxidative degradation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(7): 1984-1987.
- [27] HATANAKA A, KAJIWARA T, SEKIYA J. Biosynthesis of trans-2-hexanal in chloroplasts from *Thea sinensis*[J]. *Phytochemistry*, 1976, 15: 1125-1126.
- [28] 陈常颂, 张应根, 钟秋生, 等. 同时蒸馏萃取法分析4种台式乌龙茶香气成分[J]. 食品与发酵工业(CHEN Chang-song, ZHANG Ying-gen, ZHONG Qiu-sheng, *et al.* Analysis of aroma compounds on four Taiwan oolong tea using simultaneous distillation extraction[J]. *Food and Fermentation Industries*), 2011, 37(2): 165-171.
- [29] XU A, WANG Y, WEN J, *et al.* Fungal community associated with fermentation and storage of Fuzhuan brick-tea[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2011, 146(1): 14-22.
- [30] 姜东华, 吕世懂, 陈保, 等. 全自动顶空固相微萃取法分析紫娟茶香气成分[J]. 食品工业科技(JIANG Dong-hua, LÜ Shi-dong, CHEN Bao, *et al.* Analysis of Zijuan tea aroma components of fully automatic HS-SPME[J]. *Science and Technology of Food Industry*), 2013, 34(20): 156-162.
- [31] SERESHTI H, SAMADI S, JALALI H M. Determination of volatile components of green, black, oolong and white tea by optimized ultrasound-assisted extraction-dispersive liquid-liquid microextraction coupled with gas chromatography [J]. *Journal of Chromatography A*, 2013, 1280: 1-8.
- [32] 吕世懂, 姜东华, 刘川, 等. 特种“紫娟”红茶与滇红茶香气成分的比较[J]. 食品与生物技术学报(LV Shi-dong, JIANG Dong-hua, LIU Chuan, *et al.* Comparison of aroma components between special “Zijuan” black tea and Dianhong tea[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*), 2013, 32(7): 734-742.
- [33] DU L, WANG C, LI J, *et al.* Optimization of headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography mass spectrometry for detecting methoxyphenolic compounds in pu-erh tea[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(3): 561-568.
- [34] LÜ H P, ZHONG Q S, LIN Z, *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.
- [35] 刘通讯, 王婧, 曹艳妮. 臭氧处理对普洱茶香气成分的影响研究[J]. 现代食品科技(LIU Tong-xun, WANG Jing, CAO Yan-ni. Effects of ozone treatments on the aromatic characteristic of pu-erh tea[J]. *Modern Food and Technology*), 2009, 25(8): 944-948.
- [36] LÜ H P, ZHANG Y J, LIN Z, *et al.* Processing and chemical constituents of Pu-erh tea: A review[J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 608-618.
- [37] XU X Q, MO H Z, YAN M C, *et al.* Analysis of characteristic aroma of fungal fermented Fuzhuan brick-tea by gas chromatography/mass spectrophotometry[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87: 1502-1504.
- [38] ZHANG L, ZHANG Z Z, ZHOU Y B, *et al.* Chinese dark teas: Postfermentation, chemistry and biological activities[J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 600-607.
- [39] 陈宗懋. 中国茶叶大辞典[M]. 北京: 中国轻工业出版社(CHEN Zong-mao. *Chinese Tea Dictionary*[M]. Beijing: China Light Industry Press), 2000. 357-358.
- [40] BHATTI S K, OKEEFE J H, LAVIE C J. Coffee and tea: perks for health and longevity?[J]. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 2013, 16(6): 688-697.
- [41] ALASALVAR C, TOPAL B, SERPEN A, *et al.* Flavor characteristics of seven grades of black tea produced in Turkey[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(25): 6323-6332.
- [42] LÜ S D, WU Y S, ZHOU J S, *et al.* Analysis of aroma components of dark teas from five different production regions by fully automatic headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2014, 6(1): 246-253.
- [43] 吕世懂, 姜东华, 杨凡, 等. 顶空固相微萃取/GC-MS分析普洱熟茶与安化黑茶香气成分[J]. 热带作物学报(LÜ Shi-dong, JIANG Dong-hua, YANG Fan, *et al.* Analysis of aroma components between pu-erh ripe tea and Anhua dark tea by headspace solid-phase microextraction and GC-MS[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*), 2013, 34(8): 1583-1591.
- [44] LÜ S D, WU Y S, LI C W, *et al.* 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]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(8): 1810-1818.
- [45] LIN J, DAI Y, GUO Y N, *et al.* Volatile profile analysis and quality prediction of Longjing tea (*Camellia sinensis*) by HS-SPME/GC-MS[J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2012, 13(12): 972-980.
- [46] 刘拉平, 史亚歌, 张瑞明, 等. 午子绿茶香气物质固相微萃取 GC-MS 分析[J]. 西北植物学报(LIU La-ping, SHI Ya-ge, ZHANG Rui-min, *et al.* Analysis of aromatic components in wuzi green tea by SPME/GC/MS[J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*), 2007, 27(2): 0371-0376.
- [47] 王秋霜, 陈栋, 许勇泉, 等. 广东红茶香气成分的比较研究[J]. 茶叶科学(WANG Qiu-shuang, CHEN Dong, XU Yong-quan, *et al.* Investigation and comparison of the Aroma components in Guangdong black tea[J]. *Journal of Tea Science*), 2012, 32(1): 9-16.