

普洱茶香气分析方法及香气活性物质研究进展

吕世懂¹, 孟庆雄^{1,*}, 徐咏全², 刘顺航²

(1.昆明理工大学生命科学与技术学院, 云南 昆明 650500;

2.云南天士力帝泊洱生物茶集团有限公司, 云南 普洱 665000)

摘 要: 普洱茶的香气是其品质的重要体现, 也是捕获和培养消费者忠诚度最重要的因素, 是目前市场上决定普洱茶价格的重要因子。普洱茶的香气成分十分复杂, 但是其中具有香气活性的物质并不多。本文对目前国内外关于普洱茶香气的研究报道、普洱茶香气的分析方法、香气成分中具有香气活性的物质进行了总结, 并指出了目前研究中存在的问题及今后研究的重点。

关键词: 普洱茶; 香气活性; 分析方法

Recent Progress in Aroma Analysis Methods and Aroma Active Compounds in Pu-erh Tea

LÜ Shi-dong¹, MENG Qing-xiong^{1,*}, XU Yong-quan², LIU Shun-hang²

(1.Faculty of Life Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2.Yunnan Tasly Deepure Biology Tea Technology Limited Incorporation, Puer 665000, China)

Abstract: Aroma is one of the most important parameters to indicate the character and quality of Pu-erh tea, and one of the most important factors in capturing and developing consumer loyalty and determining its price. Pu-erh tea aroma is very complex, but as far as we know, very few aroma active compounds have been identified from it. This paper reviews the aroma analysis methods and aroma active compounds in Pu-erh tea. Some problems existing in the current research and future research focuses are discussed.

Key words: Pu-erh tea; aroma active compounds; analysis methods

中图分类号: TS272

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2014) 11-0292-07

doi:10.7506/spkx1002-6630-201411058

普洱茶是我国的特种茶, 其生产历史悠久, 具有滋味醇厚回甘、香气带陈香的独特品质特点, 同时还具有减肥、降血糖、降血脂、防癌、抗氧化等众多保健功效^[1-2], 近几年随着研究的不断深入及人们对健康的追求, 逐渐被海内外消费者所接受和喜爱。随着普洱茶消费人群的增多, 它的市场需求也在不断扩大, 根据云南省农业厅及海关提供的数据^[3], 2010年云南省茶叶的种植面积高达37.34万 hm², 年产茶叶20.73万 t, 其中普洱茶的生产达到5.08万 t, 普洱茶共出口4 578 t, 出口金额为2 621万美元。微生物参与的后发酵过程是形成普洱茶独特品质特征最为关键的一步, 这可能与微生物所分泌的胞外酶的化学催化作用、微生物本身的次生代谢以及发酵过程中的湿热作用有关^[4]。

香气是茶叶品质的重要体现, 也是捕获和培养消费者忠诚度最重要的因素, 它对茶叶品质的贡献率达

25%~40%, 陈香是消费者追求普洱茶的主要品质特征之一, 也是决定普洱茶价格的重要因子^[5-6]。国内目前已有大量关于普洱茶香气成分的研究报道, 但因普洱茶产于我国, 地方特色较强, 国外的研究较少。由于茶叶香气成分含量低微, 组成十分复杂, 在提取过程中容易发生氧化、聚合、缩合、基团转移、光化学反应等复杂的化学反应^[7-8], 所以各种提取方法的定性和定量结果差别很大, 仅靠一种提取方法无法完全体现茶叶香气成分的真实信息, 总结普洱茶香气成分的提取方法及鉴定结果, 全面了解普洱茶中的香气成分就显得十分有必要。因此, 本文综合目前国内外对普洱茶香气成分的研究报道, 对普洱茶香气的分析方法, 香气成分中具有香气活性的物质进行了总结, 希望能较全面及准确的提供普洱茶中的香气成分信息, 为普洱茶的生产、质量控制及茶香浓郁的普洱茶新产品的研发提供理论基础及实践指导。

收稿日期: 2013-07-04

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (3100960); 云南省自然科学基金青年基金项目 (2010ZC054)

作者简介: 吕世懂 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为茶叶化学组学。E-mail: shidonglv@163.com

*通信作者: 孟庆雄 (1972—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为生物技术制药、茶叶化学组学及功效机制。E-mail: qxmeng@sina.com

1 普洱茶香气分析方法进展

目前对普洱茶香气的分析方法主要包括感官分析和仪器分析,随着社会的发展和人们生活质量的提高,对普洱茶的要求不仅仅是饮用上的需要,同时也需要它能提供感官上和心理上的愉快享受;而随着现代仪器分析技术的发展,对普洱茶中特征香气化合物的确认也取得了突破性的进步。香气的感官分析是香气研究的基础,与近代先进的仪器分析技术是互补互存、相互依赖的关系,应把它们完美结合用于普洱茶香气的研究工作中。

1.1 普洱茶香气的感官分析

1.1.1 感官审评法

感官审评法对普洱茶香气的描述主要是靠评审员的嗅觉来完成,通过泡茶使其内含芳香物质得到挥发,挥发性物质的气流刺激鼻腔内嗅觉神经,出现不同类型不同程度的茶香。通常用100℃的沸水冲泡茶叶,静置5 min,重复3次,密码审评茶叶的香气,通过评语与评分相结合的方法反映其香气特征^[9]。普洱茶香气的审评主要评高长、纯度和持久性,在审评结果中,主要采用陈香显露、纯陈、甜香略带酸、轻霉、醇和、陈香浓郁、略带粗老气等术语相互交叉来对其香气进行评价^[10-15]。从评价术语可以看出,陈香是普洱茶最大的香气特点,也是消费者喜欢普洱茶的主要原因之一。

尽管感官审评法具有快速、简单等优点而被广泛采用,但它毕竟是一项经验活动,评审结果很容易受到环境因素、评审人员的生理条件和阅历的影响,而且感官审评法对茶叶香气的评价还具有无量化的标准、无法进行在线监控、无法做到标准化和真正客观化等缺点^[16-18]。因此,针对以上不足,茶叶感官审评法还应往以下几个方面发展:1)结合近代先进的仪器来更准确的对普洱茶香气特征及品质进行评估;2)开展茶叶感官评价的方法学研究,建立和完善各类茶叶的评价指标体系;3)规范茶叶审评术语以及可操作的量化措施,控制茶叶感官审评的误差;4)感官审评与市场调研相结合,了解不同消费者对茶叶的不同品质需求,及时调整茶叶审评对产品质量控制的要求。

1.1.2 电子鼻

电子鼻(electronic nose)的工作原理与生物嗅觉相似,气味分子被人工嗅觉中的传感器阵列吸附,产生信号,信号经处理加工与传输,再经模式识别系统做出判断。数据的预处理及模式识别是研究电子鼻系统的重要内容,通过它们可以对茶叶进行识别与分类、建立茶叶等级模型、区分不同制作工艺的茶叶等,但它无法给出具体茶叶的香型信息,无法得到多组分混合香气的综合感觉^[19]。目前,电子鼻已被广泛应用在绿茶^[20-21]、乌龙茶^[22]及红茶^[23-24]的香气成分

研究中,但在普洱茶香气成分的研究中还未见报道。普洱茶的香气成分与茶山、茶树类型及发酵工艺等都有较大关系,因此利用电子鼻系统中的传感器阵列对不同来源的普洱茶的香气物质进行识别与吸附,然后产生信号,并将信号传送至数据处理分析系统进行预处理(滤波、变换、放大和特征提取等),再结合主成份分析(principal component analysis, PCA)、K近邻算法(K-nearest neighbor, KNN)和人工神经网络(artificial neural network, ANN)等模式识别方法,建立不同茶山、茶树来源和发酵工艺的普洱茶质量评价模型,从而为普洱茶的健康发展提供理论基础和实践依据。但总的来说,与国外相比,国内对电子鼻的研究还停留在实验室阶段,离商品化还有一定距离^[19]。

1.2 普洱茶香气的仪器分析

1.2.1 气相色谱-质谱联用技术

气相色谱-质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)主要是利用现代微量分析技术和仪器提取来分析普洱茶的特征香气成分,以客观反映普洱茶的品质。目前利用GC-MS技术已经从普洱茶中分离和鉴定了上百种化合物,对普洱茶显独特陈香的关键香气化合物的分离鉴定以及这些关键香气化合物的来源及产生机理进行了一些初步的探索,并认为普洱茶的独特陈香与其挥发性成分中所含的甲氧基苯类化合物有关,这类物质的产生与普洱茶后发酵过程中微生物的参与有较大的关系^[25-27]。利用GC-MS分析鉴定普洱茶的香气组分时,主要是样品前处理方法的不同,通常采用的提取方法有同时蒸馏萃取法(simultaneous distillation extraction, SDE)、减压蒸馏萃取法(vacuum distillation extraction, VDE)、顶空固相微萃取法(head space solid-phase microextractions, HS-SPME)、超声及微波萃取和树脂吸附法等,而GC-MS分析条件相差不大,定性主要采用标准谱库中质谱匹配度和化合物的保留指数等,定量主要采用内标法和峰面积归一化法^[28-29]。但对于普洱茶中一些极性的、热稳定性差的和不易挥发的化学物质,应结合液相色谱-质谱(liquid chromatograph-mass spectrometer, LC-MS)技术进行分析,将GC-MS和LC-MS获取的数据组成一个二维矩阵表,结合化学计量学方法,找出对普洱茶香气和滋味有特殊贡献的化合物,从而对普洱茶的品质进行较准确的评价。另外,高分辨率和高灵敏度的全二维气相色谱(gas chromatography-mass × gas chromatography-mass, GC×GC)等多维色谱结合质谱也应进一步用来对普洱茶香气成分进行研究。但GC-MS等色谱法得到的结果与人的感官感受之间还存在很大距离,其试样前处理、实验本身的耗时性又是许多场合所不允许的,必要时还需结合电子鼻及人类感官审评进行分析。

1.2.2 气相色谱-嗅觉测量技术

近几年来,已经从食品中检测出了相当多的挥发性成分,但大多数挥发性物质并不是香气呈现中有效贡献的成分,在众多的挥发性组分中,仅很少一部分化合物赋予食品特殊的香气属性,并在特殊香气的呈现中起主要贡献作用,这样的物质即被称为香气活性物质^[30-32]。因此,在普洱茶香气成分的分析中,如何在众多挥发性物质中区分出少数香气活性物质是研究的关键所在。对于香气化合物来说,大多数化学检测器都没有人鼻灵敏,所以就产生了通过鼻子闻气相色谱流出物中挥发性物质来区分样品中真正的致香活性物质,即气相色谱-嗅觉测量技术(gas chromatography-olfactometry, GC-O)。GC-O的检测器为鼻子,气相色谱系统将其柱流出物分为两个部分,一部分流向嗅闻口,另一部分流向检测器,利用氢火焰离子化检测器和质谱技术对挥发性化合物的检测和鉴别与评审员感知到气味的反应在同一时间结合起来^[33-34],主要采用芳香萃取物稀释分析(aroma extraction dilution analysis, AEDA)来对香气活性物质进行评价,结果用香气稀释因子值(flavour dilution factor, FD)来表示,它是气味化合物在最初提取物中的浓度与GC-O仍然能检测到的最大稀释度中浓度的比例^[35-36]。Lü Haipeng等^[25]利用顶空固相微萃取法提取普洱茶挥发性成分,然后利用GC-MS和GC-O进行分析,结果在普洱茶中鉴定出了66种挥发性成分,其中29种物质具有香气活性,但目前GC-O技术用于普洱茶香气成分的研究还较少,后期还应利用该技术在普洱茶致香化合物的寻找、气味活性物质阈值大小的判定等方面加大研究力度。GC-O技术也同时被用于分析绿茶^[37]、乌龙茶^[38]和红茶^[39-40]的特征香气成分,但这些研究基本上都是靠闻香人员对分离出来的挥发性物质进行气味上的识别与判定,相关的定量理论基础研究还不够深入。此外,该方法还需结合MS及保留指数等信息,对香气成分进行良好的定性和定量,从而在量化结果的重现性、稳定性和灵敏度等方面取得较好的突破。

2 普洱茶香气组分的研究进展

普洱茶的香型可能是由一种或几种香气成分起主导作用,其余起协调作用,是内含各种香气成分比例恰当的综合反映。在普洱茶中存在的众多挥发性物质中,有的物质是无气味的,但有的物质对普洱茶的整体香型有重要的贡献作用,也被广泛应用于香料与香精工业中。通常都认为普洱茶具有典型的陈香,但是在其检测出的众多具有香气活性的物质中,也不乏具有花果香、木香等香气组分,这些物质估计对普洱茶的陈香具有较好的协调作用,也是构成普洱茶香型不可或缺的因素。因

此,总结了近几年文献中鉴定出来的普洱茶的香气成分^[25-27,41-61],并结合香精香料辞典及相关资料^[62-64],把这些鉴定出来的挥发性化合物中具有香气活性的物质进行了总结与分类(表1),以便对普洱茶中的特征香气成分有一个更清楚的了解,为普洱茶的生产、新品研发及质量控制提供理论基础和指导。

表1 普洱茶香气成分中具有香气活性的化合物
Table1 Aroma active compounds of Pu-er tea

化合物名称 ^a	分子式	香气描述 ^b
醇类		
芳樟醇氧化物I (Linalool oxide I)	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	呈强的木香、花香、藜香、青香气
芳樟醇氧化物II (Linalool oxide II)	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	呈强的木香、花香、藜香、青香气
芳樟醇 (Linalool)	C ₁₀ H ₁₈ O	有柑橘、藜香、花香、甜的青香及木香,香气柔和、持久
芳樟醇氧化物III (Linalool oxide III)	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	呈强的木香、花香、藜香、青香气
芳樟醇氧化物IV (Linalool oxide IV)	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	呈强的木香、花香、藜香、青香气
苯乙醇 (Phenylethyl alcohol)	C ₈ H ₁₀ O	有甜花香,新鲜面包香气及玫瑰香的
α -松油醇 (α -Terpineol)	C ₁₀ H ₁₈ O	有树木的香味、新鲜而舒适、稳定的紫丁香香气
β -松油醇 (β -Terpineol)	C ₁₀ H ₁₈ O	具有壤香、木香香气,稍带刺激味
橙花醇 (Nerol)	C ₁₀ H ₁₈ O	有近似玫瑰的甜香气、胜过香叶醇,微带柠檬香
香叶醇 (Geraniol)	C ₁₀ H ₁₈ O	有愉快的玫瑰气味
橙花叔醇 (Nerolidol)	C ₁₅ H ₂₆ O	类似玫瑰和苹果的微弱花香,非常甜美、新鲜、持久的香气
β -紫罗兰醇 (β -Ionol)	C ₁₅ H ₂₆ O	带有果香、木香及紫罗兰的花香
雪松醇 (Cedrol)	C ₁₅ H ₂₆ O	有弱木香并带些藜香,持久性甚强
1-丁醇 (1-Butanol)	C ₄ H ₁₀ O	有酒味,用于配制香蕉、奶油、威士忌和干酪等食用香精
植醇 (Phytol)	C ₂₉ H ₅₈ O ₂	具有雅致的花香、青香韵
1-戊烯-3-醇 (1-Penten-3-ol)	C ₅ H ₁₀ O	具有蔬菜样青香和果香风味
叶醇 (cis-3-Hexen-1-ol)	C ₆ H ₁₂ O	具有强烈绿色嫩叶清香气味,香气清新浓郁自然
苯甲醇 (Benzyl alcohol)	C ₇ H ₈ O	特有的令人愉快的水果香气和强烈的熏烤味
龙脑 (Borneol)	C ₁₀ H ₁₈ O	有干樟脑样气息
异龙脑 (Isoborneol)	C ₁₀ H ₁₈ O	有近似樟脑的气味
己醇 (Hexyl alcohol)	C ₆ H ₁₄ O	有淡青的嫩枝叶气息,微带酒香、果香和脂肪气息
金合欢醇 (Farnesol)	C ₁₅ H ₂₆ O	具有弱的柑橘和白柠檬香气
4-萜品醇 (4-Terpineol)	C ₁₀ H ₁₈ O	具有浓郁的胡椒香、温和的壤香和霉木香气
异植醇 (Isophytol)	C ₂₉ H ₅₈ O ₂	呈细腻的干叶、茶香样气息,并略带焦糖的甜气
桉叶油醇 (Cineole)	C ₁₀ H ₁₈ O	有樟脑气息和清凉的草药味道
薄荷醇 (Menthol)	C ₁₀ H ₁₈ O	具有凉的、清新的、愉快的薄荷特征香气,带甜的尖刺气息
1-辛烯-3-醇 (1-Octen-3-ol)	C ₈ H ₁₆ O	有泥土的芳香、清香和油腻的、蔬菜、真菌香的
香茅醇 (Citronellol)	C ₁₀ H ₁₈ O	有新鲜玫瑰特殊香气,有苦味
二氢香芹醇 (Dihydrocarveol)	C ₁₀ H ₁₈ O	带有甜木香、樟脑及留兰香
脱氢芳樟醇 (Hotrienol)	C ₁₀ H ₁₆ O	具有典型的花果香味
醛类		
藏红花醛 (Safranal)	C ₁₀ H ₁₆ O	有特殊的番红花样的香气和味道
癸醛 (Decanal)	C ₁₀ H ₂₀ O	有显著的脂肪气息,甜香及柑橘香韵,稀释时有特殊的花香
β -环柠檬醛 (β -Cyclocitral)	C ₁₀ H ₁₆ O	具有杏仁、芒果等水果样的果香及青香
4-异丙基苯甲醛 (4-Isopropylbenzaldehyde)	C ₁₀ H ₁₂ O	有枯茗和桂皮似香气
柠檬醛 (Citral)	C ₁₀ H ₁₆ O	有强烈的柠檬样香气,特有的苦甜味道
戊醛 (Pentanal)	C ₅ H ₁₀ O	具有特殊香味的浸透性液体
己醛 (Hexanal)	C ₆ H ₁₂ O	呈生油脂和青草气及苹果味,低浓度时有水果样的特有香气
苯甲醛 (Benzaldehyde)	C ₇ H ₆ O	具有特殊的苦杏仁气味
苯乙醛 (Benzeneacetaldehyde)	C ₈ H ₈ O	呈强烈风信子香气,低浓度时有杏仁、樱桃香味
反,顺-2,6-壬二烯醛 (2,6-Nonadienal, (E,Z) -)	C ₉ H ₁₆ O	具有强烈的紫罗兰和黄瓜似香气
反-2-己烯醛 ((E)-2-Hexenal)	C ₆ H ₁₀ O	特有的青叶子气味,并带脂肪香、果香、木香及草药香
庚醛 (Heptanal)	C ₇ H ₁₄ O	具有强烈和不愉快的粗糙刺鼻的油脂气味
辛醛 (Octanal)	C ₈ H ₁₆ O	有醛香、蜡香、青果皮香及明显的脂肪和水果气味
反,反-2,4-庚二烯醛 ((E,E)-2,4-Heptadienal)	C ₇ H ₁₀ O	有青香、脂肪香、醛香及蔬菜香的
壬醛 (1-Nonanal)	C ₉ H ₁₈ O	有强烈的脂肪气息,稀释时具有橙子及玫瑰香调

续表1

化合物名称 ^a	分子式	香气描述 ^b
3-己烯醛 (3-Hexenal)	C ₈ H ₁₆ O	具有强烈而尖刺的叶样清香, 蔬菜茎样的香气
反-2-癸烯醛 ((E)-2-Decenal)	C ₁₀ H ₁₈ O	脂肪味、壤香及蜡香
反,反-2,4-癸二烯醛 ((E,E)-2,4-Decadienal)	C ₁₀ H ₁₈ O	有强烈的清香气味, 略有陈腐脂肪臭味的牛脂味
反-2-戊烯醛 ((E)-2-Pentenal)	C ₇ H ₁₂ O	有蜡香及果香味
香茅醛 (Citronellal)	C ₁₀ H ₁₈ O	具有柠檬、香茅和玫瑰香气
酮类		
α -紫罗兰酮 (α -Ionone)	C ₁₅ H ₂₄ O	特有的紫罗兰样的香气
β -紫罗兰酮 (β -Ionone)	C ₁₅ H ₂₄ O	有紫罗兰香气, 比 α -紫罗兰酮更显著的水果香和木香香气
香叶基丙酮 (Geranylacetone)	C ₁₅ H ₂₆ O	有玫瑰香、叶香、醛香、果香
异佛尔酮 (Isophorone)	C ₁₁ H ₂₀ O	有凉香、木香、清甜香气、果香、樟脑及霉香
香芹酮 (Carvone)	C ₁₀ H ₁₆ O	有留兰香凉气, 带有清鲜药草韵的清甜辛香
6-甲基-5-庚烯-2-酮 (6-Methyl-5-hepten-2-one)	C ₁₁ H ₂₀ O	有强烈的脂肪香和柑橘样香气
2-十一酮 (2-Undecanone)	C ₁₁ H ₂₂ O	呈柑橘类、油脂和芸香似香气
苯乙酮 (Acetyl benzene)	C ₈ H ₈ O	呈强烈金合欢似甜香气、霉味和水果味
法呢基丙酮 (Farnesylacetone)	C ₁₅ H ₂₆ O	有清甜香和玫瑰香
3-己酮 (3-Hexanone)	C ₆ H ₁₂ O	气味甜、果香、蜡香香气, 扩散性强
异薄荷酮 (Isomenthone)	C ₁₀ H ₁₈ O	薄荷香气
薄荷酮 (Menthone)	C ₁₀ H ₁₈ O	清凉的薄荷香气, 木香底蕴, 香气散发, 不甚持久
1-辛烯-3-酮 (1-Octen-3-one)	C ₈ H ₁₄ O	具有强烈的壤香、蘑菇香气及金属气
3-辛酮 (3-Octanone)	C ₈ H ₁₆ O	有霉香、酮香、果香及陈腐味
2-壬酮 (2-Nonanone)	C ₉ H ₁₈ O	特有的芸香香气、玫瑰和茶样的风味
反- β -大马士酮 (trans- β -Damascenone)	C ₁₅ H ₂₆ O	强烈的类似玫瑰的芳香
α -萘酮 (α -Irone)	C ₁₀ H ₁₆ O	有紫罗兰、木香、鸢尾、桂花的甜香
2-庚酮 (2-Heptanone)	C ₇ H ₁₄ O	特有的香蕉香气, 轻微的药香气味、干酪、果香
酯类		
2-乙基丁酸烯丙酯 (Allyl 2-ethylbutyrate)	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	呈醚香、油脂和水果似香气
丙酸乙酯 (Ethyl propanoate)	C ₅ H ₁₀ O ₂	呈菠萝和朗姆酒似特殊香气
水杨酸甲酯 (Methyl salicylate)	C ₈ H ₈ O ₃	呈冬青油草药香气
苯甲酸叶醇酯 (cis-3-Hexenyl benzoate)	C ₁₃ H ₂₀ O ₂	有温柔的草香、草药香、甜香和水果香气, 留香持久
甲酯芳樟酯 (Linalyl formate)	C ₁₁ H ₁₈ O ₂	有柑橘类植物的花香、蜡香、香柠檬样的药草香
十四酸异丙酯 (Isopropyl myristate)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	稍有极微的油脂气息, 但无愉快的气味
乙酸香茅酯 (Citronellyl acetate)	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	呈强烈玫瑰香气, 并带杏仁果香
丁酸甲酯 (Methyl butyrate)	C ₆ H ₁₂ O ₂	呈苹果和干酪香气, 浓度较低时具有香蕉和菠萝风味
丁酸-反-2-己烯酯 (trans-2-Hexenyl butyrate)	C ₁₄ H ₂₆ O ₂	熟果香气, 带有脂肪气息, 口感丰满圆润
乙酸薄荷酯 (Menthyl acetate)	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	具有薄荷和玫瑰似的清凉气味
乙酸乙烯酯 (Vinyl acetate)	C ₄ H ₆ O ₂	有甜的醚香味
甲氧基苯类		
1,2-二甲氧基苯 (1,2-Dimethoxybenzene)	C ₈ H ₁₀ O ₂	陈腐味、不新鲜气味
3,4-二甲氧基甲苯 (3,4-Dimethoxytoluene)	C ₉ H ₁₀ O ₂	霉味
1,2,3-三甲氧基苯 (1,2,3-Trimethoxybenzene)	C ₉ H ₁₀ O ₃	陈腐味、不新鲜气味
4-乙基-1,2-二甲氧基苯 (4-Ethyl-1,2-dimethoxybenzene)	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	陈腐味、不新鲜气味
1,2,4-三甲氧基苯 (1,2,4-Trimethoxybenzene)	C ₉ H ₁₀ O ₃	陈腐味、草药味
1,2,3-三甲氧基-5-甲基苯 (1,2,3-Trimethoxy-5-methyl-benzene)	C ₁₀ H ₁₄ O ₃	陈香味
1,2,3,4-四甲氧基苯 (1,2,3,4-Tetramethoxybenzene)	C ₁₀ H ₁₄ O ₄	草药味
2-甲氧基萘 (2-Methoxynaphthalene)	C ₁₁ H ₁₀ O	有橙花香味
萜烯化合物		
β -石竹烯 (β -Caryophyllene)	C ₁₅ H ₂₂	有留兰香、薄荷香、浓芳香、木香和醇味舌感的辛香
β -愈创木烯 (β -Guaiene)	C ₁₅ H ₂₄	有优雅の木香
α -雪松烯 (α -Cedrene)	C ₁₅ H ₂₄	有木香、柏木、类似檀香木并带花香、香水的韵调
α -法呢烯 (α -Farnesene)	C ₁₅ H ₂₄	有蒜香、清香、草香、木香带痕量花香的青蔬菜香韵
柠檬烯 (Cinene)	C ₁₀ H ₁₆	有柠檬香味, 甜、柑橘的果皮香韵
罗汉柏烯 (Thujopsene)	C ₁₀ H ₁₆	有青的木香、药草香、芒果和番石榴的热带果香
罗勒烯 (Ocimene)	C ₁₀ H ₁₆	有非常愉快香气的流动液体
顺式-2-红没药烯 (cis-2-Bisabolene)	C ₁₀ H ₁₆	有木香、柑橘、蜡香及热带水果香
α -蒎品烯 (α -Terpinene)	C ₁₀ H ₁₆	具有柑橘、木香、药味和樟脑香味
蒎烯 (Pinene)	C ₁₀ H ₁₆	具有松节油、树脂香气

续表1

化合物名称 ^a	分子式	香气描述 ^b
酚类		
2,6-二甲氧基苯酚 (2,6-Dimethoxyphenol)	C ₈ H ₁₀ O ₂	有木香及药香味
麦芽酚 (3-Hydroxy-2-methyl-4H-pyran-4-one)	C ₆ H ₆ O ₃	有似焦香奶油糖特殊香气, 稀溶液呈草莓香味
酸类		
棕榈酸 (Palmitic acid)	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	有特殊的香气和滋味
异戊酸 (Isovaleric acid)	C ₆ H ₁₂ O ₂	有强烈的不愉快气味和酸味, 高度稀释后有甜润的果香味
苯乙酸 (Phenylacetic acid)	C ₈ H ₈ O ₂	稀溶液中具有香叶和玫瑰样的香气
2-乙基丁酸 (2-Ethylbutyric acid)	C ₈ H ₁₆ O ₂	呈较淡的干酪和霉膻气味, 有酸味
内酯类		
二氢猕猴桃内酯 (Dihydroactinidiolide)	C ₁₁ H ₁₈ O ₂	有香豆素及麝香样气息
γ -丁内酯 (γ -Butyrolactone)	C ₄ H ₆ O ₂	具有微弱的好闻的淡奶油芳香香气
γ -戊内酯 (γ -Valerolactone)	C ₆ H ₁₀ O ₂	具有香兰素和椰子香味, 呈暖甜草药味
其他化合物		
吲哚 (Indole)	C ₈ H ₇ N	高浓度时有强烈不愉快臭气, 稀释后, 呈橙子和茉莉花香
2-戊基呋喃 (2-Pentyl furan)	C ₈ H ₁₀ O	有果香、青香、泥土味和霉臭味
苯并噻唑 (Benzothiazole)	C ₆ H ₄ NS	有硫磺气, 橡胶、蔬菜、牛肉的肉香, 类似于咖啡香的
二苌醚 (Benzyl ether)	C ₈ H ₁₀ O	具有较淡的杏仁香气和蘑菇香味及泥土味

注: a. 给出的化合物名称来源于普洱茶香气研究的相关文献^[25-27,41-61]; b. 相应的化合物对应的气味描述查阅于相关的文献及香料香料辞典^[25,62-64]。

2.1 醇类

醇类化合物通常带有特殊的花香和果香, 但是普洱茶经历了一个渥堆发酵的过程, 在这个过程中醇类化合物的含量和种类明显减少^[44], 这也是普洱茶香气特征有别于其他茶类(红茶、乌龙茶等)的原因之一。在绿茶^[65]、乌龙茶^[66]及红茶^[67]中, 芳樟醇、香叶醇等萜烯醇类物质含量较高, 但它们在普洱茶中含量并不高, 而普洱茶中芳樟醇氧化物的含量提高了, 这类物质有的是由糖苷水解生成, 有的是在渥堆的高湿热环境下, 芳樟醇自身的氧化还原反应以及生物转化形成^[48]; Liang Yuerong等^[52]认为芳樟醇氧化物II在普洱茶中含量较高, 并认为它与普洱茶的品质之间有较显著的相关关系。 α -松油醇在普洱茶中含量较普洱生茶中高, 这类物质的形成可能与普洱茶后发酵过程有很大的关系^[25]。另外, 除了有花果香外, 大多数醇类化合物(比如芳樟醇及其氧化物、松油醇和雪松醇等)还伴有木香味, 它们可能对普洱茶的香型有一个较好的协调作用, 能使普洱茶香味更加陈醇。

2.2 醛类

醛类化合物在普洱茶中检出含量普遍较低, 种类也较少, 主要是柠檬醛、 β -环柠檬醛、壬醛和癸醛等, 吕海鹏等^[26]发现壬醛和癸醛在陈香普洱茶中含量分别比其他普通普洱茶中提高了44.13%和19.06%, 癸醛由于香气强度较高, 可能对普洱茶香气贡献较大。另外, 3,4,5-三甲氧基苯甲醛和1-乙基-1*H*-吡咯-2-甲醛也在大多数普洱茶香气成分研究中被检出, 但它们的香气特征尚且未知, 因此, 它们对普洱茶香气的贡献还有待结合较先进的仪器进一步判定。醛类化合物整体上含量低, 种类少, 猜测对普洱茶香气贡献不大, 但王华夫等^[68]认为醛

类物质在安化黑茶中占有一定比例,并认为它们对安化黑茶的菌花香具有重要贡献。

2.3 酮类

酮类化合物在普洱茶中检出含量也不高, α -紫罗兰酮、 β -紫罗兰酮和香叶基丙酮是其中含量较丰富的成分,它们是类胡萝卜素的降解产物,可能在发酵过程中形成并积累^[45],其中尤以 β -紫罗兰酮含量最高,Kanani等^[69]发现其感官阈值较低(0.007 $\mu\text{g/L}$),这种物质可能对普洱茶香气贡献很大。吕才有等^[49]通过分析普洱茶加工过程中从原料到成品的香气成分变化情况,发现3-辛酮、 α -尾酮、2-壬酮仅在渥堆发酵的普洱茶中检出, β -紫罗兰酮在晒青毛茶中的含量很低(0.03%),而出堆样中含量为1.6%。另外,在绿茶^[70]及乌龙茶^[71]中普遍检出的呈优雅茉莉花香和芹菜籽香气的茉莉酮没有在普洱茶中发现,大多数研究者还在普洱茶中检出了一定含量的6,10,14-三甲基-2-十五烷酮,刘勤晋等^[72]认为其具有陈香味,但这种物质在其他茶类中也有检出,相关资料中也没有发现这种物质具体的香气特征及描述,因此暂不能推断其对普洱茶香型的贡献。

2.4 酯类

在普洱茶检出的酯类化合物中,对于一些酯类成分如: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,对茶叶香气贡献不大^[73]。普洱茶中检出的酯类物质和其他茶中差别较大,比如广泛存在乌龙茶中的茉莉酮酸甲酯、己酸己酯、反式己酸-2-己烯酯和己酸-3-己烯酯等^[74]具有典型花香味的物质没有在普洱茶中检出,而具有冬青油草药香味的水杨酸甲酯含量在普洱茶中检出含量相对较高,特别是年份较久的普洱茶中,吕海鹏等^[26]认为陈香普洱茶中水杨酸甲酯的含量比普通普洱茶样品中提高了103.85%,猜测酯类化合物的形成与茶叶的制作工艺关系较大,这些差别构成了不同茶各具特色的香气特征。

2.5 甲氧基苯类

很多研究都发现,甲氧基苯类化合物是普洱茶中含量最丰富的成分,也是普洱茶具有典型陈香味最主要的原因,其中尤以1,2,3-三甲氧基苯含量最高。刘通讯等^[58]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;Lü Haipeng等^[25]利用GC-O和质谱技术分析普洱茶中特征香气成分时,检出了较高含量的甲氧基苯类化合物,其中1,2,3-三甲氧基苯含量高达17.16%,并认为这类物质具有陈香味,估计对普洱茶典型陈香具有重要贡献;川上美智子等^[75]认为它们的生成是由于普洱茶中表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)在氧化过程中脱没食子酰基形成没食子酸,而没

食子酸的羟基($\text{OH}-$)的氢被甲基(CH_3-)取代实现甲基化而形成的;普遍认为,甲氧基苯类化合物的形成与普洱茶渥堆发酵中微生物的次生代谢及湿热作用关系极大,且含量随着年份的增加而增加^[44];但曹艳妮等^[51]在普洱生茶中也鉴定出7.35%~30.39%的甲氧基苯类化合物,并认为甲氧基苯类化合物的生成并不局限于渥堆后发酵阶段。因此,甲氧基苯类化合物的形成机理,在普洱茶各加工阶段的生成情况还有待进一步研究。

2.6 碳氢化合物

碳氢化合物在普洱茶中的检出数量是最多的,但其中大多数是饱和烃,饱和烃对茶香无多大贡献,不饱和烃则起着重要作用。和醇类化合物一样,普洱茶在渥堆过程中碳氢化合物含量也明显减少^[42],这可能是普洱茶香气由清香过渡为陈香的原因之一。张灵芝等^[44]认为 β -愈创木烯是当年生产的普洱茶中的特征性香气物质,赋予了普洱茶特有的木香,而反式石竹烯在贮藏年份较久的普洱茶中含量较高,并且认为反式石竹烯和罗汉柏烯与普洱茶类似松木香的独特陈香有关。另外,长叶烯、刺柏烯、葎草烯、榄香烯和环蒜头烯等香气尚未确定的烯类化合物也在普洱茶中有检出,这些倍半萜烯的形成机理及对普洱茶香气的贡献尚有待进一步的研究。

2.7 酚类、酸类、内酯和其他化合物

酚类化合物在普洱茶中检出种类和含量均较低,其中主要检出的是2,6-二甲氧基苯酚,这种甲氧基苯酚类化合物的产生是否和微生物的湿热作用有关仍需进一步判定。酸类组分,尤其是脂肪族羧酸,它们是植物的花、叶、果实里的酯类和脂肪的组成成分,但是大多数羧酸一般没有愉快的香气,估计对茶叶香气贡献不大,但它们对茶叶的滋味是否有贡献还需进一步研究。内酯化合物大都具有花香、果香、奶香,且留香时间长并有圆和增香作用,但在普洱茶中检出不多,其中二氢猕猴桃内酯含量较丰富,而在乌龙茶中含量较丰富的具有茉莉花香韵的茉莉内酯^[76]没有在普洱茶中检出。普洱茶中检出的含氮化合物主要有吲哚和咖啡因,但咖啡因和茶叶的滋味有关,对茶叶香气贡献不大^[77],吲哚含量检出也很低,这些物质估计对构成普洱茶典型香型也无多大贡献。

3 结 语

目前,国内外对普洱茶香气的分析方法主要包括感官审评法、电子鼻、GC-MS及GC-O等,各种方法都有其优缺点,侧重点也不一样,其中电子鼻及GC-O技术对普洱茶香气的研究较少,因此,应该同时结合这几种方法对普洱茶的香气成分进行研究。

通过对近几年来普洱茶香气研究的文献及结合相

关香精香料辞典对检出的普洱茶香气化合物进行总结,在普洱茶香气成分中共总结出具有香气活性的化合物110种,其中醇类化合物30种,醛类化合物20种,酮类化合物18种,酯类化合物11种,甲氧基苯类化合物8种,碳氢化合物10种,酚类化合物2种,酸类化合物4种,内酯类化合物3种,含氮化合物1种,其他化合物3种,涵盖了有机化学分类中的十余大类化合物。其中普遍认为从晒青毛茶到普洱茶出堆过程中,醇类和碳氢化合物的相对含量急剧减少而甲氧基苯类化合物含量持续增加,甲氧基苯类是普洱茶中含量最丰富的香气成分,也是构成普洱茶典型陈香最重要的香气成分,而其余成分起到协调支配作用,各种香气成分不同比例恰当的综合构成了普洱茶陈香浓郁的香气特征。当然,茶叶香气成分十分复杂,还有一些至今尚未分离鉴定的、一些本来具有香气活性但未被识别的、一些没有气味的挥发性成分或多或少对普洱茶的香型都具有一定的贡献,另外,文献报道中有一些挥发性成分可能也不是茶叶中真实存在的,这些因素在一定程度上都会对实验的结果造成一定的影响,因此,更好的茶叶香气成分的提取方法及香气活性检测设备以及高灵敏度及高分辨率的分离检测仪器还有待进一步开发来较全面和真实的反映普洱茶中的香气成分信息。

未来对普洱茶香气的研究还应往以下几个方面展开:1)茶叶香气是衡量茶叶品质的一个重要因素,但是茶叶香气成分容易受很多因素的影响,比如:产地、茶树品种、栽培条件、采摘季节及质量、制茶工艺及贮藏等的影响,采用传统感官审评法仍难以全面评价,急需建立一种客观的量化分析方法来对其进行评价;2)目前,对茶叶挥发性成分的代谢机制大多是参考其他植物中挥发性成分的代谢途径来进行推断,尽管它们有一些共同之处,但茶叶挥发性成分比较复杂,其合成途径可能会发生变化,后期应进一步研究普洱茶中相关酶类与香气形成及变化的关联性、香气关键影响因子的调控机制等;3)普洱茶的香气是其所内含香气组分含量及其配比不同的综合反映,并非所有挥发性物质对茶香都有贡献,是否会影响茶叶的滋味等还需进一步研究;而对于具有香气活性的挥发性物质而言,它们香气阈值的大小及茶叶整体香型与这些香气成分之间的数学关系仍有待结合较先进的仪器进一步研究;4)借鉴中药指纹图谱研究的经验,建立普洱茶生产中各环节香气成分的在线指纹图谱,模拟普洱茶生产过程中香气成分的变化情况,并用指纹图谱对普洱茶的品质进行评价;5)普洱茶香气的研究应从简单的致香物质的罗列转移到特征香气物质的寻找、香气物质的相互作用以及香气物质释放过程的研究;6)普洱茶的价格由于和储藏年份及茶树类型等都有密切的关系,因此,从感官审评和仪器分析入手,结

合化学计量学方法,对普洱茶的年限、茶树类型、原料来源等进行预测,为普洱茶的品质保真和地域判别确立一系列准确而实用的分析方法;7)普洱茶属于黑茶类,但和其他黑茶(比如安化黑茶、六堡茶等)在加工工艺上具有不同之处,经历典型后发酵的普洱茶是否和其他黑茶在香气成分上具有较大差异及发酵过程中微生物对各种黑茶内含成分的影响仍有待在后续工作中进一步研究;8)普洱生茶在加工过程中没有经过渥堆发酵这一工艺,但是贮藏时间较长的普洱生茶在长时间的陈化过程中其品质也会慢慢向普洱茶靠近。因此,随着时间的推移,这两种茶在香气成分和感官品质上的变化仍有待进一步研究;9)进一步探索春茶、夏茶及秋茶制成的普洱茶在香气成分及品质方面的变化情况,为普洱茶的生产提供一些参考意见。

参考文献:

- [1] MOK P, CHANG R C C, MINGFU W, et al. A review on the laboratory investigations and epidemiological studies of black and Pu-erh tea[J]. ACS Symposium Series, 2008, 987: 144-159.
- [2] HUANG Qianfei, CHEN Sihang, CHEN Hao, et al. Studies on the bioactivity of aqueous extract of Pu-erh tea and its fractions: *in vitro* antioxidant activity and α -glycosidase inhibitory property, and their effect on postprandial hyperglycemia in diabetic mice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 53(3): 75-83.
- [3] 中国茶叶流通协会. 2011年全国普洱茶市场产销形势分析报告[J]. 普洱, 2011(6): 20-25.
- [4] 王秋霜, 凌彩金, 柯乐芹, 等. 普洱茶香气研究进展[J]. 广东农业科学, 2009(12): 42-45.
- [5] 施梦南, 龚淑英. 茶叶香气研究进展[J]. 茶叶, 2012, 38(1): 19-23.
- [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, 2010, 31(15): 293-298.
- [7] 丁芳林, 董益生, 彭书练. SDE-GC-MS法测定茶叶中的挥发成分[J]. 中国酿造, 2009(4): 147-150.
- [8] 叶国注, 江用文, 尹军峰, 等. 绿茶香气HS-SPME提取方法研究[J]. 中国茶叶, 2009(10): 16-19.
- [9] 龚淑英, 周树红. 普洱茶贮藏过程中主要化学成分含量及感官品质变化的研究[J]. 茶叶科学, 2002, 22(1): 51-56.
- [10] 何青元, 罗琼仙. 云南普洱散茶的品质特征与感官审评[J]. 福建茶叶, 2007(2): 30-31.
- [11] CHEN Y S, LIU B L, CHANG Y N. Bioactivities and sensory evaluation of Pu-erh teas made from three tea leaves in an improved pile fermentation process[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2010, 109(6): 557-563.
- [12] 冯花, 郭雅玲. 茶叶感官审评方法及其新发展[J]. 福建茶叶, 2010(7): 28-31.
- [13] 周红杰, 郭红芳, 曾燕妮, 等. 陈香普洱茶品质特点分析[J]. 茶叶, 2001, 27(3): 31-34.
- [14] 杨巍. 普洱茶滋味成分及其与品质的关系[J]. 亚热带农业研究, 2007, 3(3): 225-230.
- [15] 何青元, 张亚萍, 王平盛. 云南普洱茶感官品质与内含成份关系研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(11): 38-41.
- [16] 傅志民. 茶叶感官审评存在的不足和改进建议[J]. 中国茶叶加工, 2005(1): 16-17.
- [17] VARNAMKHAHASTI M G, MOHTASEBI S S, SIADAT M. Biomimetic-based odor and taste sensing systems to food quality and safety characterization: an overview on basic principles and recent achievements[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 377-387.
- [18] TUDU B, JANA A, METLA A, et al. Electronic nose for black tea quality evaluation by an incremental RBF network[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 138(1): 90-95.
- [19] 赵杰文, 陈全胜. 茶叶质量与安全检测技术及分析方法[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011: 194-198.
- [20] YU Huichun, WANG Jun, XIAO Hong, et al. Quality grade identification of green tea using the eigenvalues of PCA based on the

- E-nose signals[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 140(2): 378-382.
- [21] 于慧春, 王俊, 张红梅, 等. 龙井茶叶品质的电子鼻检测方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 103-106.
- [22] 赵超艺, 王秋霜, 卓敏, 等. 乌龙茶审评方法研究概述[J]. 广东农业科学, 2009(12): 46-48.
- [23] BHATTACHARYA N, TUDU B, JANA A, et al. Preemptive identification of optimum fermentation time for black tea using electronic nose[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 131(1): 110-116.
- [24] DUTTA R, HINES E L, GARDNER J W, et al. Tea quality prediction using a tin oxide-based electronic nose: an artificial intelligence approach[J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2003, 94(2): 228-237.
- [25] LÜ Haipeng, ZHONG Qiusheng, LIN Zhi, et al. Aroma characterization of Pu-erh tea using headspace-solid phase microextraction combined with GC/MS and GC-olfactometry[J]. Food Chemistry, 2012, 130(4): 1074-1081.
- [26] 吕海鹏, 钟秋生, 林智. 陈香普洱茶的香气成分研究[J]. 茶叶科学, 2009, 29(3): 219-224.
- [27] DU Liping, WANG Chao, LI Jianxun, 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.
- [28] 李艳清, 付大友, 王蓉. 茶叶香气成分测定方法研究进展[J]. 茶叶科学技术, 2009(1): 8-10.
- [29] 吕连梅, 董尚胜. 茶叶香气的研究进展[J]. 茶叶, 2002, 28(4): 181-184.
- [30] 庞雪莉, 胡小松, 廖小军, 等. FD-GC-O和OAV方法鉴定哈密瓜香气活性成分研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(6): 174-182.
- [31] 范刚, 乔宇, 姚晓琳, 等. 柑橘加工制品中香气物质的研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4324-4332.
- [32] 任婧楠, 潘思轶, 王可兴, 等. 树莓及其加工制品中香气化合物的研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 363-368.
- [33] LE R M, CRONJE J C, BURGER B V, et al. Characterization of volatiles and aroma-active compounds in honeybush (*Cyclopia subternata*) by GC-MS and GC-O analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(10): 2657-2664.
- [34] 宋国新. 香气分析技术与实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 101-109.
- [35] PLUTOWSKA B, WARDENCKI W. Application of gas chromatography-olfactometry (GC-O) in analysis and quality assessment of alcoholic beverages: a review[J]. Food Chemistry, 2008, 107(1): 449-463.
- [36] FANG Y, QIAN M. Aroma compounds in Oregon Pinot Noir wine determined by aroma extract dilution analysis (AEDA) [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2005, 20(1): 22-29.
- [37] CHENG Y, 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.
- [38] 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]//海峡两岸茶叶科技学术研讨会论文集, 2000: 158.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 陈婷, 卓婧, 郭刚军, 等. 普洱茶香气成分的提取及其微胶囊化技术研究[J]. 云南农业大学学报, 2008, 23(6): 811-817.
- [42] 顾睿, 张兰兰, 周水平, 等. 利用气相色谱质谱技术对普洱茶香气成分的分析[J]. 天津药学, 2011, 23(2): 3-5.
- [43] 张灵枝, 陈维信, 王登良, 等. 不同干燥方式对普洱茶香气的影响研究[J]. 茶叶科学, 2007, 27(1): 71-75.
- [44] 张灵枝, 王登良, 陈维信, 等. 不同贮藏时间的普洱茶香气成分分析[J]. 园艺学报, 2007, 34(2): 504-506.
- [45] 卢红, 李庆龙, 王明凡, 等. 陈化普洱茶与原料绿茶的挥发性成分比较分析[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2006, 28(5): 820-824.
- [46] 吕海鹏, 钟秋生, 王力, 等. 普洱茶加工过程中香气成分的变化规律研究[J]. 茶叶科学, 2009, 29(2): 95-101.
- [47] 詹家芬, 陆舍铭, 曲国福, 等. UE/ME-GC-MS提取分析普洱茶的挥发和半挥发性成分[J]. 分析试验室, 2008, 27(10): 88-92.
- [48] 任洪涛, 周斌, 夏凯国, 等. 不同发酵程度普洱茶香气成分的比较分析[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(11): 23-26.
- [49] 吕才有, 单治国, 刘勤晋. 普洱茶后发酵中的香气成分变化分析[J]. 食品科学, 2009, 30(10): 252-256.
- [50] 林夏丹, 李中皓, 刘通讯, 等. 不同酶处理对普洱茶香气成分的影响研究[J]. 现代食品科技, 2008, 24(5): 420-423.
- [51] 曹艳妮, 刘通讯. 普洱茶和熟茶香气中萜烯类和甲氧基苯类成分分析[J]. 食品工业科技, 2012, 33(5): 128-130.
- [52] LIANG Yuerong, ZHANG Lingyun, LU Jianliang. A study on chemical estimation of Pu-erh tea quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(3): 381-390.
- [53] 罗发美, 詹家芬, 罗正刚, 等. SPME-GC-MS分析普洱茶的挥发性成分[J]. 林产化学与工业, 2010, 30(5): 95-98.
- [54] 侯冬岩, 回瑞华, 李铁纯, 等. 黑茶挥发性化学成分的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 550-552.
- [55] 谷勋刚, 张正竹, 宁井铭, 等. 普洱茶渥堆阶段游离态香气成分分析及含量变化[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(4): 161-164.
- [56] 倪倩, 佟玲, 李文博, 等. 气相色谱-质谱法测定普洱茶挥发油的化学成分[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(12): 7072-7073.
- [57] 洪涛, 黄遵锡, 李俊俊, 等. 普洱熟茶和生茶香气成分的提取和测定分析[J]. 茶叶科学, 2010, 30(5): 336-342.
- [58] 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, 2009, 25(8): 944-948.
- [59] 颜振敏, 吴艳兵, 冯俊旗, 等. 普洱茶挥发性成分的GC-MS分析[J]. 光谱实验室, 2012, 29(4): 2235-2237.
- [60] XU X, YAN M, ZHU Y. Influence of fungal fermentation on the development of volatile compounds in the Puer tea manufacturing process [J]. Engineering in Life Sciences, 2005, 5(4): 382-386.
- [61] 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.
- [62] 林翔云. 香料香精辞典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 15-466.
- [63] 黄致喜, 王慧辰. 萜类香料化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999: 6-397.
- [64] 易封萍, 毛海舫. 合成香料工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 18-278.
- [65] LIN Jie, DAI Yi, GUO Yanan, 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.
- [66] 钟秋生, 吕海鹏, 林智, 等. 东方美人茶和铁观音香气成分的比较研究[J]. 食品科学, 2009, 30(8): 182-186.
- [67] 王秋霜, 吴华玲, 陈栋, 等. 广东英德红茶代表产品的香气成分鉴定研究[J]. 茶叶科学, 2012, 32(5): 448-456.
- [68] 王华夫, 李名君, 刘仲华, 等. 茯砖茶在发花过程中的香气变化[J]. 茶叶科学, 1991, 11 (增刊1): 81-86.
- [69] KANANI D M, NIKHADE B P, BALAKRISHNAN P, et al. Recovery of valuable tea aroma components by pervaporation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(26): 6924-6932.
- [70] 霍权恭, 杨京, 刘钟栋, 等. 信阳毛尖茶叶挥发性成分GC/MS分析[J]. 中国农学通报, 2005, 21(7): 108-110.
- [71] 张凌云, 张燕忠, 叶汉钟. 采摘时期对重发酵单丛茶香气及理化品质影响研究[J]. 茶叶科学, 2007, 27(3): 236-242.
- [72] 刘勤晋, 龚正礼, 钟麒麟. 黑茶香味成分的分离鉴定[J]. 中国茶叶, 1992(4): 6-8.
- [73] 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, 2011, 37(2): 165-171.
- [74] 钟秋生, 陈常颂, 游小妹, 等. 不同做青环境对丹桂秋乌茶香气品质的影响[J]. 福建农业学报, 2010, 25(4): 468-474.
- [75] 川上美智子, 小林彰夫, 山西贞, 等. 堆积茶中国产砖茶比黑茶的香气特性[J]. 日本农芸化学会志, 1987, 61(4): 457-465.
- [76] 张翠香. 乌龙茶加工过程香气成分变化及形成机理的研究进展[J]. 福建茶叶, 2006(1): 7-8.
- [77] 马作江, 陈永波, 王尔惠, 等. SPME-GC/MS法分析“恩施玉露”茶的挥发成分[J]. 中国农学通报, 2012, 28(9): 249-253.