

代谢组学在乌龙茶品质形成过程中的研究进展

吴晴阳^{1,2}, 周子维^{1,2,3}, 倪子鑫^{1,2}, 杨云^{1,2}, 胡清财^{1,2}, 黄慧清^{1,2}, 赖钟雄², 孙云^{1*}

(1. 福建农林大学园艺学院/茶学福建省高校重点实验室, 福州 350002; 2. 福建农林大学园艺植物生物工程研究所, 福州 350002; 3. 宁德师范学院生命科学学院, 宁德 352000)

摘要: 代谢组学是一门新兴的系统研究生命体内所有代谢产物的变化规律的学科, 旨在研究生物体系内源性的代谢物及其代谢水平差异, 目前已经被运用到多个领域。茶作为世界性的饮品, 受到广大消费者的喜爱, 并成为仅次于纯水的第二大消费饮料。基于代谢组学的理论与技术手段, 近年来在茶树代谢领域的研究已经逐渐深入并取得一定的成果, 广泛涉及茶树栽培、茶树育种、茶叶加工、成品茶精制等方面, 有关乌龙茶品质与影响因素的代谢组学研究更是成为研究热点。本文概括了近年来国内外运用代谢组学技术, 基于乌龙茶鲜叶原料、加工工艺及成品茶等方面的研究进展, 旨在为乌龙茶加工工艺的改良和产品品质的提升提供理论依据, 也对代谢组学在未来茶树研究中的应用进展作出展望, 为其深入应用提供参考。

关键词: 代谢组学; 乌龙茶; 加工工艺; 品质

Application of metabolomics in Oolong tea quality formation

WU Qing-Yang^{1,2}, ZHOU Zi-Wei^{1,2,3}, NI Zi-Xin^{1,2}, YANG Yun^{1,2}, HU Qing-Cai^{1,2},
HUANG Hui-Qing^{1,2}, LAI Zhong-Xiong², SUN Yun^{1*}

(1. College of Horticulture Key Laboratory of Tea Science in Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of Horticultural Biotechnology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. College of Life Science, Ningde Normal University, Ningde 352000, China)

ABSTRACT: Metabolomics is a rapidly developing and widely applied subject, which aims to study all metabolites in life comprehensively and detects the content of endogenous metabolites as well as their differences. Tea is consumed globally, acting as the second drink all over the world. Based on the theory and technology of metabolomics, researches on tea plants' metabolites become increasingly thorough and has achieved certain success, especially about the planting, breeding, processing, post-processing and simultaneously, the Oolong tea quality as well as its interfering factors, all attract high attention. In this article, several studies came from home and abroad, which using metabolomics theory and technology on the substances and quality of pre-process, post-process, well-processed Oolong tea have been concluded, for the purpose of supporting Oolong tea manufacturing process methods improvement and quality advance. Some references for further study were also provided for better application of metabolomics to tea in the future.

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业(茶叶)产业技术体系建设专项(CARS-19)、福建农林大学科技创新基金项目(CXZX2017178)、福建农林大学科技创新专项(CXZX2018076); 福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金项目(FJZTF01)

Fund: Supported by the China Agriculture Research System of Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Areas (CARS-19), the Science and Technology Innovation Fund Project of Fujian Agriculture and Forestry University (CXZX2017178), the Science and Technology Innovation Project of Fujian Agriculture and Forestry University (CXZX2018076), and the Fujian Zhang Tianfu Tea Development Foundation Science and Technology Innovation Fund (FJZTF01)

***通信作者:** 孙云, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与品质。E-mail: sunyun1125@126.com

***Corresponding author:** SUN Yun, Ph.D, Professor, College of Horticulture Key Laboratory of Tea Science in Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University, No.15, Shangxiadian Road, Jianxin District, Fuzhou 350002, China. E-mail: sunyun1125@126.com

KEY WORDS: metabolomics; Oolong tea; manufacturing process; quality

0 引言

代谢组学(metabolomics 或 metabonomics)是近年来系统生物学研究领域中的一门新兴的学科,继基因组学、转录组学和蛋白组学之后,通过对生物体内源性的代谢物定性定量的检测,研究其在不同环境下的变化差异和调节机制^[1],且目前在植物学^[2-3]、食品科学^[4-6]、环境科学^[7-8]、医学^[9-10]等领域,代谢组学都得到了广泛应用。

植物的代谢产物繁多,目前已知的植物代谢物就超过 10 万种^[11]。代谢物检出有赖于代谢组学技术的改进与分析平台的发展。作为最先运用的代谢组学技术,气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)和液相色谱-质谱法(liquid chromatograph-mass spectrometry, LC-MS)是目前应用最广泛的代谢分析平台,二者都具有重现性好、灵敏度高、分辨率高的特点,其中气相色谱-质谱法可用于分析低沸点、低极性的挥发性代谢物或者非挥发性代谢物,而液相色谱-质谱法则更适用于高沸点、热稳定性差的代谢物分析,同时,二者对样品的前处理都有一定要求(图 1)。后期的高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)与超高效液相色谱法(ultra performance liquid chromatography, UPLC)在灵敏度上提高,实现更多的复杂化合物的检出,效率也更加优化。同样的,针对离子型物质的检测,毛细管电泳-质谱法(capillary electrophoresis mass spectrometry, CE-MS)应运而生,核磁共振技术(nuclear magnetic resonance, NMR)亦可实现对活体的分析。近年来,代谢

组学为茶树研究提供了许多崭新思路与技术支持,相关的应用也越来越受关注。代谢组学在茶叶研究中的主要技术包括气相色谱-质谱法、液相色谱-质谱法、核磁共振、傅里叶变换红外光谱(Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR)等手段,可实现从分子层面研究贯穿茶树栽培到加工过程乃至品饮全过程的内含物质变化规律。不同萃取技术以及检测技术也会影响茶叶品质相关代谢物的检出。相比传统的成分研究技术,代谢组学技术更加快速简便、灵敏精确,且各种技术手段也可实现功能互补、相互支撑等目的,如利用 LC-MS 等技术实现对茶叶中农药残留的检测^[12-14]、利用 GC-MS 实现香气物质的定性定量检测^[15-17],以及依据茶叶香气指纹图谱实现较准确鉴别茶叶品质^[18-20]。如今,代谢组技术结合多组学技术成为热门,如与基因组学及转录组学相结合筛选与茶氨酸^[21]、类黄酮^[22]等滋味物质和脂肪族类^[23]、萜烯类^[24]等香气物质合成相关的转录因子。

茶起源于中国,作为世界仅次于净水的第二大饮料,倍受大众喜欢。乌龙茶是我国特有的茶类,主产于福建、广东和台湾,因其具有浓郁的花果香、醇厚回甘的滋味等优异风味品质而闻名于世。目前,代谢组学在乌龙茶品质形成的影响研究主要集中于茶树品种、栽培管理、原料采摘、加工过程等因素对乌龙茶成分和品质的影响。

本文基于前人研究进展,从鲜叶原料、加工工艺、成品茶差异等角度对乌龙茶品质形成机制进行了梳理和归纳,旨在为优异种质资源的推广、生产加工技术的改良以及乌龙茶品质的提升提供理论科学依据。



图 1 代谢组学技术 GC-MS 和 LC-MS 检测流程
Fig.1 Detection process of metabolomics technology GC-MS and LC-MS

1 鲜叶原料对乌龙茶品质的影响

茶树鲜叶是影响茶叶品质的根本因素, 从原料层面利用代谢组学能够更好地认知乌龙茶生长发育过程中初级代谢物的组成与含量差异, 也为明确后期加工过程中乌龙茶次生代谢物合成与积累提供参考, 对进一步探究乌龙茶产地与品质之间的联系提供佐证。CHEN 等^[25]利用超高效液相色谱-四极杆-飞行时间质谱法(ultra performance liquid chromatography-quadrupole mass spectrometry, UPLC-QTOF-MS)和超高效液相色谱-三重四极杆串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry, UPLC-QqQ-MS)结合主成分分析、聚类分析等数据分析方法对 14 个武夷岩茶品种鲜叶的代谢物进行检测, 主要检测到 49 种共有代谢物, 其中差异代谢物如儿茶素、山奈酚、槲皮素的衍生物可作为品种鉴定的重要依据之一, 茶氨酸、黄酮苷类等功能物质亦可为进一步探索利用武夷岩茶的营养功能与提升感官品质提供参考。LI 等^[26]研究了不同产地对铁观音鲜叶中脂肪酸含量的影响, 实验结果发现安溪县的铁观音鲜叶脂肪酸含量较高, 不饱和脂肪酸总含量较饱和脂肪酸高, 这也为探究安溪铁观音独特香气形成提供理论参考。土壤与海拔也可能是影响鲜叶代谢物的重要因素。周志等^[27]运用 UPLC-QTOF-MS 技术检测来自武夷茶区 3 个不同产地(正岩、半岩、洲茶)的茶树鲜叶代谢物, 结果表明来自 3 个不同产地的茶树鲜叶的代谢物组成具有明显差异, 这为探明武夷岩茶“岩骨花香”的特点提供一定的原理依据。

同样的, 乌龙茶最终呈现的“味浓香高”的特点也要求原料需选用较老的叶片和中开面的茶青。CHEN 等^[28]利用 UPLC-QTOF-MS 技术, 对铁观音茶树包括花、根等在内的 6 个部位的组织的代谢物进行检测, 研究发现, 简单儿茶素多位于茶树体较高部位的组织, 而复合儿茶素则多位于茶树体较低部位的组织, 这与乌龙茶生产上需采摘较为成熟的叶片相符合。XU 等^[29]以铁观音不同叶位的鲜叶为研究对象, 利用高效液相色谱-固相微萃取法(high performance liquid chromatography-solid phase micro extraction, HPLC-SPME)结合 GC-MS 技术手段检测发现随着发酵程度由第一叶位向第四、五叶位递减, 成茶品质也受到影响, 由第二叶、第三叶所制成的铁观音具有更高的氨基酸含量

及较高含量的芳樟醇、橙花叔醇和苯乙醛等赋香物质, 结合相应的感官品质审评发现, 由第二叶、第三叶所制成的乌龙茶得分也相较第一叶、第四叶所制成的乌龙茶得分高。这些研究在一定程度上说明了较老的茶树鲜叶中富含更多的代谢物, 这些代谢物含量与变化将在后期加工过程中成为乌龙茶滋味和香气等品质的影响因素。

中国是乌龙茶主要的产区, 拥有适宜茶树生长的自然条件与丰富的茶树品种。以代谢组学相关知识与技术为手段, 结合茶树鲜叶中的初级代谢物检测, 可达到较准确地辨别乌龙茶产地等目的, 也为加工过程前期把控茶青品质、后期探索加工过程中茶叶次生代谢物的形成与变化奠定基础。

2 加工工艺对乌龙茶品质的影响

2.1 萎凋工艺对乌龙茶品质的影响

萎凋, 亦称晒青, 是实际生产中乌龙茶、白茶和红茶等多种茶类广泛运用的初始工序。作为乌龙茶初制环节的首道工序, 探明萎凋过程中代谢组分的形成和变化规律, 是揭示乌龙茶风味品质形成机制的重要基础。与乌龙茶萎凋工艺有关的品质变化比较, 详见表 1。

2.2 做青工艺对乌龙茶品质的影响

做青是乌龙茶加工的独特工艺, 也是形成乌龙茶风味的重要环节。代谢组学技术的应用与创新为探明乌龙茶做青过程中香气、滋味等品质相关的代谢物变化提供了技术支持, 具体相关应用技术与乌龙茶品质变化见表 2。

相比其他茶类的加工, 乌龙茶的加工步骤较为复杂。GC-MS 等技术灵敏快捷, 广泛应用于乌龙茶加工过程中香气检测分析, 而在制叶香气的转变在生产中也是萎凋适度或者做青适度的重要判断依据之一, 也是对成品茶品质的初步判断标准。乌龙茶在做青过程中呈现的香气特征, 主要是由青草气逐渐转化为以 α -法呢烯、橙花叔醇、吲哚、己酸己酯等为主要成分的花果香、清香, 而与此类香气相关的代谢物, 也是代谢组学发现的关键差异代谢物。但是, 由于鲜叶品种、产地、前期萎凋程度和做青强度等差异, 在最终香气代谢物检测结果中呈现出含量与组分的差别。同时, LC-MS 及 HPLC 等技术则为检测乌龙茶滋味物质的含量与变化提

表 1 代谢组学在乌龙茶萎凋过程中的应用及品质特征对比

Table 1 Application of metabolomics in the withering process of Oolong tea and comparison of quality characteristics			
乌龙茶原料	应用技术	品质特征	参考文献
茗科 1 号	GC-MS	加工促进赋香物质增加, 不愉悦的青草气物质减少, 仅结合“单次摇青”则无法促成特有香气品质	[30]
铁观音	HS-SPME	补光萎凋可促进鲜爽滋味的形成, 以及 α -法呢烯、橙花叔醇的积累	[31]
铁观音	UPLC-QTOF-MS GC-MS	短时日光萎凋有利于花果香气味的形成与积累, 并降低苦涩相关的滋味成分	[32]

注: 顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)。

表 2 代谢组学在乌龙茶做青过程中的应用及品质特征对比

Table 2 Application of metabolomics in the green making process of Oolong tea and comparison of quality characteristics

乌龙茶原料	应用技术	应用阶段	品质特征	参考文献
肉桂	GC-MS	做青(晒青、摇青、凉青)	做青强度诱导特征香气组分显现, 并有利于毛茶品质的提高	[33]
黄金茶 1 号	SPME/GC-MS	摇青	α -法呢烯、反式- β -法呢烯、芳樟醇是主要赋香物质。成品茶以清花香为主要特征, 且滋味醇和	[34]
凤凰单丛	SAFE/GC-MS	摇青	二摇、三摇时, 香气物质含量达峰值, 并有 10 种新的赋香物质产生。以 α -法呢烯、橙花叔醇、芳樟醇、吲哚、脱氢芳樟醇等典型花果香赋香物质为主	[35]
毛蟹	GC-MS	摇青	脂肪族类香气物质在摇青过程的变化中, C6 醛类含量明显降低, 而与清香相关的 C6 醇类和叶醇酯类衍生物相对含量增多	[36]
铁观音	GC-MS HPLC	做青(摇青、摊晾)	低温做青, 有利于橙花叔醇、吲哚、芳樟醇、芳樟醇氧化物、己酸叶醇酯等形成, 儿茶素及氨基酸组分含量均较高, 毛茶滋味鲜爽醇	[37]
铁观音	UPLC-QTOF-MS GC-TOF-MS	摇青、摊青	摇青与摊青造成的多重胁迫改变了与乌龙茶滋味与香气相关的代谢物, 丰富了乌龙茶风味	[38]
龙井 43	SDE/GC-MS	摊青、碰青	紫外摊青组中芳樟醇、反式氧化芳樟醇、 α -甲基-苯甲醇、橙花叔醇等含量较高; 阳光碰青组中芳樟醇、顺/反式氧化芳樟醇、香叶醇等含量较高。光源照射有利于具有花香或者清香的芳香化合物的转化与积累	[39]

注: 溶剂辅助风味蒸发法(solvent-assisted flavorevaporation, SAFE); 同时蒸馏萃取法(simultaneous distillation and extraction, SDE)。

供技术支持, 儿茶素、氨基酸等呈味物质最终关联到对乌龙茶的品质评判, 也由于产区与做青工艺等因素, 最终各品类乌龙茶之间也存在滋味成分的差异。因此, 做青是对乌龙茶代谢物产生关键影响的工艺之一, 并对最终乌龙茶品质产生重要影响。通过对做青叶在制品中代谢组分的检测与分析, 一方面能更好理解乌龙茶品质形成的机制与规律, 另一方面也为乌龙茶工艺技术的改良与提升提供参考。

2.3 烘焙工艺对乌龙茶品质的影响

烘焙工艺在一定程度上会改变乌龙茶在做青阶段形成的品质特点, 在实际生产中则可达到进一步提升品质或

弥补做青过程中的不足等目的。利用代谢组学技术研究发现, 经过烘焙的乌龙茶香型与滋味有所转变, 其中, β -紫罗兰酮等酮类化合物及苯乙腈、邻甲基苯甲腈等含氮化合物, 成为与乌龙茶烘焙过后呈现木质香、烘烤香等香型相关的关键代谢物质, 咖啡碱、氨基酸等滋味物质含量变化也对乌龙茶品质具有指示作用, 详见表 3。研究发现, 乌龙茶萎凋、摇青等工艺中的酶促反应引起叶片中非挥发性成分和蛋白的动态变化, 非酶促反应如烘焙工艺亦有助于乌龙茶风味物质的形成与巩固, 达到为乌龙茶提香增味、去除苦涩的效果^[46]。

表 3 代谢组学在乌龙茶烘焙过程中的应用及品质特征对比

Table 3 Application of metabolomics in the baking process of Oolong tea and comparison of quality characteristics

乌龙茶原料	应用技术	品质特征	参考文献
九龙袍	HS-HPME GC-MS	清香、花果香的挥发性成分也随烘焙温度提高而减少, “烘烤香”则愈加明显	[40]
丹桂	GC-MS	成茶经过烘焙工艺除杂、转化、提香, 呈现出花果香显、火香较足及滋味醇厚鲜爽等特点	[41]
水仙、肉桂等闽北乌龙茶	GC-MS	复焙工艺对闽北乌龙茶的脂肪酸存在降解作用; 经过烘焙的武夷岩茶在香气上呈现更浓郁的花果香、烘烤香和木质香	[42–43]
水仙、奇种、肉桂和大红袍	HS-SPME GC-MS	烘焙程度不同, 茶汤中可溶性固形物、多酚类、黄酮类等物质并没有明显差异, 仅咖啡因、蛋白质、茶黄素含量有所变化	[44]
肉桂	UPLC-QqQ-MS	轻火烘焙的高等级武夷肉桂茶内含物质更加丰富, 而处于同一等级但不同烘焙程度的肉桂茶咖啡碱含量差异并不显著	[45]

对烘焙过程中香气与滋味代谢物的检测与分析,为乌龙茶品质鉴定提供一定的参考依据。

综上,乌龙茶加工过程中代谢物的形成与变化是其香气、滋味的重要来源。代谢组学技术深入运用到乌龙茶制作过程中,不仅聚焦萎凋过程中光质、失水等因素对次生代谢物的影响、摇青过程各类赋香物质的积累转换,也探究烘焙对乌龙茶的品质风味影响,其更新优化也将为未来充分挖掘乌龙茶加工过程中的代谢物变化机制提供科学保障。

3 成品乌龙茶之间的品质差异

3.1 不同区域所产乌龙茶品质比较

吕世懂等^[47]运用 HS-SPME 结合 GC-MS 检测来自 5 种来自福建、广东、台湾的乌龙茶香气成分,虽然 5 种茶样共有的香气成分有 53 种,但由于各种乌龙茶香气成分的比例、阈值不同,进而形成独具特色的香气特征。另有研究发现凤凰单丛共有的呈香物质为芳樟醇及其衍生物、D-柠檬烯、橙花叔醇等成分,但在不同香型的凤凰单丛乌龙茶中呈香物质的相对含量与组成比例并不相同^[48],2,2,4,6-五甲基庚烷、脱氢芳樟醇和橙花叔醇等不仅可作为鉴别凤凰单丛茶树龄^[49]与香型^[50]的关键化合物,亦可作为区分不同海拔所产凤凰单丛茶的依据之一,有实验发现中高海拔所产的八仙单丛茶拥有比低海拔所产的八仙单丛茶更高含量的脱氢芳樟醇、橙花醇、 α -雪松醇、 α -蒎烯等赋香物质^[51]。MENG 等^[52]搜集了来自不同产区的铁观音茶样,利用 ¹H NMR (proton nuclear magnetic resonance) 技术结合近红外光谱技术(near-infrared spectroscopy, NIR)可达到较准确辨别产区的目的;同时实验结果发现,相比单一使用 ¹H NMR 技术或者 NIR 技术,¹H NMR 技术结合 NIR 技术准确率较高,能够为判断茶叶产地及乌龙茶品质调控提供更高效的技术手段。因此,区域间乌龙茶比较代谢组学的分析,为乌龙茶产地的溯源提供了新思路。

3.2 乌龙茶与其他茶类的品质比较

相比起绿茶、红茶,乌龙茶中总挥发性物质、脂肪族、芳香族和萜类化合物的含量随发酵程度的增大而增加,其中以由茶小绿叶蝉侵染过的茶鲜叶所制成的东方美人成茶中挥发性物质较多^[53],其主要香气成分为 2-甲基丁醛、异戊醛、芳樟醇及氧化芳樟醇等物质^[54]。同时也有研究发现,与其他主要呈现花果香、清香台式乌龙茶如发酵程度较轻的文山包种和发酵程度适中的冻顶乌龙相比,发酵程度较重的东方美人茶香气更类似于红茶香气^[55]。JIANG 等^[56]率先以 UPLC 技术结合聚酰胺柱色谱法对比传统 HPLC 技术对 8 种茶样中黄酮苷进行检测(包括 3 种绿茶、2 种乌龙茶、3 种红茶),结果表明,3 种茶类中黄酮苷的含量不存在明显差异,但乌龙茶中含有更高的槲皮素和糖苷类物质。

黄彪等^[57]利用 HPLC 分析比较了以福鼎大白茶树品种加工过程的乌龙茶、白茶和红茶中茶黄素的含量,结果表明乌龙茶中茶黄素类物质以茶黄素-3,3'-没食子酸酯为主,茶黄素类物质则在红茶中含量最高。类似的,李鑫磊等^[58]以福云六号和黄旦茶树鲜叶加工为绿茶、白茶、乌龙茶和红茶,并使用 UPLC-QqQ-MS 测定包括鲜叶在内的主要代谢物,发现乌龙茶相比其他茶类拥有含量较高的苯丙氨酸、谷氨酰胺和色氨酸及较低含量的芦丁与咖啡碱。李建华等^[59]利用高效液相色谱-二极管阵列检测法(high performance liquid chromatography-diode array detection, HPLC-DAD)检测四川当地所产的乌龙茶、绿茶和黄茶等茶样中的(-)-表没食子儿茶素-3-O(3-O-甲基)没食子酸酯,即甲基化儿茶素(3''-methyl-epigallocatechin gallate, EGCG3''Me),结果发现当地所产的乌龙茶含有较高的 EGCG3''Me 且具有抗过敏的保健功效。

3.3 贮藏条件对乌龙茶品质的影响

乌龙茶在贮藏过程中内含化学成分发生氧化,亦有研究致力于明确其变化规律。前人研究发现,乌龙茶花果香、清香的赋香物质如橙花叔醇、 β -紫罗兰酮、己醛、壬醛、癸醛等,多为缓慢释放的香气成分;而具有不愉快气味且释放迅速的物质如己酸,则在第一次沸水浸提时全部释放,此香气释放规律一定程度上解释了乌龙茶耐储藏、耐冲泡的原理^[60]。石玉涛等^[61]以 3 种武夷岩茶为研究对象,探究贮藏时间对茶叶品质的影响,实验结果发现,随着贮藏时间的增加,3 种武夷岩茶中与滋味相关的游离氨基酸含量降低,大红袍与水仙的酚氨比随贮藏时间的增加而上升,肉桂中茶多酚、黄酮类含量和酚氨比则呈现先升高后降低的趋势。黄毅彪等^[62]发现室温贮藏(3~30℃左右)条件处理的武夷岩茶品质优于冷藏贮藏处理的武夷岩茶,实际生活中选择室温贮藏也将更加节省贮藏成本。

大至产区差异,小至贮藏条件,都是影响乌龙茶最终品质的众多条件之一,其中原理也都离不开代谢组学理论和工具的支持与辅助。日新月异的代谢组学知识与手段也将在乌龙茶品质提升当中发挥更大的作用。

4 总结与展望

4.1 总结

近年来,茶树研究的快速进步离不开代谢组学的改进,茶叶品质的提升及其机制也有赖于代谢组学提供技术支持。研究者们利用代谢组学技术鉴别并分析乌龙茶中的主要香气成分以及呈味物质等关键差异代谢物,以此作为乌龙茶品质判断依据之一。代谢组学深入乌龙茶的品质研究,从品种、产区、土壤与海拔等源头因素探究茶树鲜叶中初生代谢物的差异。其次,代谢组学亦明确了在乌龙茶加工过程中初生代谢物含量变化、次生代谢物的形成,此

部分研究多聚焦于加工工艺,如做青等环节对赋香物质、呈味物质含量与组分的改变,这与提升乌龙茶最终品质息息相关,但加工环节的茶样香气、滋味等代谢物的含量高低,并不能直接代表乌龙茶最终的品质。并且,多数研究聚焦于萎凋与做青环节,对乌龙茶揉捻与杀青环节重视不足,相关非酶促变化有待研究。也由于各乌龙茶产区所选用的茶树品种不同、加工工艺参数与步骤有差异,以及后期样品制备、检测技术与分析平台不同,造成最终与乌龙茶品质相关的代谢物检测结果有所差别。最后,代谢组学技术也为乌龙茶与其他茶类的品质对比、茶类工艺之间的借鉴等方面提供了参考与支持。

4.2 展 望

科技创新是中国茶产业发展的核心动力。代谢组学作为一门多方面、广覆盖的学科,在将新兴技术运用到有关茶的科学领域时,所涉及到的茶树栽培、加工和品质控制等方面内容更能让人们在追求茶叶品质的同时获得更基础、全面、准确的知识。在未来,通过代谢组学与其他组学(转录组学、基因组学、蛋白质组学)、分子感官技术、大数据关联性分析等手段的创新联动,将会在茶树生长发育、茶树生物及非生物胁迫、茶叶特色风味关键组分的形成机制乃至茶叶药用活性成分研究等方面带来更加全面的认知与理解。

参考文献

- [1] 曾超珍,刘仲华,刘志祥,等.代谢组学在茶树研究中的应用进展[J].植物生理学报,2017,53(9):1591-1597.
ZENG CZ, LIU ZH, LIU ZX, *et al.* Advances in application of metabolomics to *Camellia sinensis* research [J]. Plant Physiol J, 2017, 53(9): 1591-1597.
- [2] 董登峰.代谢组学方法及其在植物学研究中的应用[J].广西植物,2007,(5):765-769,691.
DONG DF. Metabolomics approaches and their application in botany [J]. Guihaia, 2007, (5): 765-769, 691.
- [3] 尹恒,李曙光,白雪芳,等.植物代谢组学的研究方法及其应用[J].植物学通报,2005,(5):22-30.
YI H, LI SG, BAI XF, *et al.* Research advances in plant metabolomics [J]. Chin Bull Botany, 2005, (5): 22-30.
- [4] 李思源,李培瑜,刘弈彤,等.代谢组学在食品科学中的应用进展[J].食品与发酵工业,2021,47(5):252-258.
LI SY, LI PY, LIU YT, *et al.* Application progress of metabolomics in food science [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(5): 252-258.
- [5] 赵丹,杜仁鹏,刘鹏,等.代谢组学技术在植物源性食品研究中的应用研究进展[J].食品科学,2015,36(3):212-216.
ZHAO D, DU RP, LIU P, *et al.* A review of applications of metabolomics techniques in plant-derived food research [J]. Food Sci, 2015, 36(3): 212-216.
- [6] 王龔,许文涛,赵维薇,等.组学技术及其在食品科学中应用的研究进展[J].生物技术通报,2011,232(11):26-32.
WANG Y, XU WT, ZHAO WW, *et al.* Advances in omics technology and application in food science research [J]. Biotechnol Bull, 2011, 232(11): 26-32.
- [7] 梁宇杰,伍一军.代谢组学方法在生态毒理学中的应用进展[J].生态毒理学报,2011,6(5):459-465.
LIANG YJ, WU YJ. Progress in application of metabonomic approaches in ecotoxicology [J]. Asian J Ecotoxic, 2011, 6(5): 459-465.
- [8] 赵丹,刘鹏飞,潘超,等.生态代谢组学研究进展[J].生态学报,2015,35(15):4958-4967.
ZHAO D, LIU PF, PAN C, *et al.* Advances in ecometabolomics [J]. Acta Ecol Sin, 2015, 35(15): 4958-4967.
- [9] 张志新,高晓燕.药物代谢组学研究现状[J].中国中药杂志,2018,43(6):1093-1098.
ZHANG ZX, GAO XY. Research on pharmacometabolomics [J]. China J Chin Mater Med, 2018, 43(6): 1093-1098.
- [10] 刘荣华,俞洪华,殷茜茜,等.LC-MS在中药代谢组学中的应用进展[J].亚太传统医药,2021,17(9):183-191.
LIU RH, YU HH, YIN XX, *et al.* Application and progress of LC-MS in metabolomics of traditional Chinese medicine [J]. Asia-Pacific Tradit Med, 2021, 17(9): 183-191.
- [11] 王丹.基于代谢组学策略的植物挥发性成分研究[D].杭州:浙江工业大学,2012.
WANG D. Study on plant volatile constituents by using metabolomics strategy [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [12] 程群,林碧芬,黄萍,等.LC-MS/MS测定茶叶中吡虫啉和啉虫脒残留量[J].福建轻纺,2009,(10):49-51.
CHENG Q, LIN BF, HUANG P, *et al.* Determination of imidacloprid and acetamiprid residues in tea by LC-MS/MS [J]. Light Textile Ind Fujian, 2009, (10): 49-51.
- [13] 叶芳挺,江铮,马乐,等.Transcend™在线净化LC-MS-MS系统分析茶叶基质中30种农药残留[J].食品安全导刊,2011,(10):76-77.
YE FT, JIANG Z, MA L, *et al.* Analysis of 30 pesticide residues in tea matrix by transcendtm on-line purification LC-MS-MS system [J]. Chin Food Saf Magaz, 2011, (10): 76-77.
- [14] 曾艳,郎红,杨巧慧,等.固相萃取-GC/LC-MS/MS测定茶叶中79种农药残留[J].茶叶科学,2019,39(5):576-586.
ZENG Y, LANG H, YANG QH, *et al.* Determination of 79 pesticide residues in tea by solid phase extraction with GC-MS/MS and LC-MS/MS [J]. Tea Sci, 2019, 39(5): 576-586.
- [15] 孙慕芳,郭桂义.著名信阳毛尖产地茶叶香气成分的GC-MS分析[J].江苏农业科学,2014,42(7):319-321.
SUN MF, GUO GY. GC-MS analysis of aroma components of tea from famous Maojian producing area in Xinyang [J]. Jiangsu Agric Sci, 2014, 42(7): 319-321.
- [16] 杨靖.超临界流体萃取茶叶香气成分的研究[J].食品科技,2008,(6):83-85.
YANG J. Study on flavor components of tea by supercritical fluid extraction [J]. Food Sci Technol, 2008, (6): 83-85.
- [17] 杨晓红,刘海波,江科.湖北长阳绿茶挥发油成分的GC/MS分析[J].武汉化工学院学报,2002,(3):23-26.
YANG XH, LIU HB, JIANG K. The GC/MS analysis of the chemical constituents of volatile oil from Hubei Changyang green tea [J]. J Wuhan Inst Chem Technol, 2002, (3): 23-26.
- [18] WIPAWEE P, TAKSEHI B, TSUTOMU Y, *et al.* Quality prediction of Japanese green tea using pyrolyzer coupled GC/MS based metabolic fingerprinting [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56: 744-750.

- [19] 欧阳石光. 茶叶香气指纹图谱及特征识别的初步研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- OUYANG SG. Preliminary studies on the chromatographic fingerprint and feature recognition of tea aroma [D]. Taian: Shandong Agriculture University, 2011.
- [20] 孔维婷. 信阳毛尖香气特征及其成分 GC-MS 指纹图谱的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- KONG WT. Study on Xingyang Maojian aroma characters and its composition GC-MS chromatographic fingerprint [D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [21] SHI CY, YANG H, WEI CL *et al.* Deep sequencing of the *Camellia sinensis* transcriptome revealed candidate genes for major metabolic pathways of tea-specific compounds [J]. BMC Genom, 2011, 12(1): 131: 1471–2164.
- [22] WU HL, CHEN D, LI JX, *et al.* De novo characterization of leaf transcriptome using 454 sequencing and development of EST-SSR markers in tea (*Camellia sinensis*) [J]. Plant Mol Biol Rep, 2013, 31(3): 524–538.
- [23] 周子维, 刘宝顺, 武清扬, 等. 基于 LOX-HPL 途径的武夷肉桂加工中香气物质的形成与调控[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(1): 100–111.
- ZHOU ZW, LIU BS, WU QY, *et al.* Formation and regulation of aroma-related volatiles during the manufacturing process of Wuyi Rougui tea via LOX-HPL pathway [J]. J Food Sci Biotechnol, 2021, 40(1): 100–111.
- [24] 吴晴阳, 周子维, 武清扬, 等. 乌龙茶加工过程中 α -法呢烯的形成关键调控基因的筛选与表达分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 135–142.
- WU QY, ZHOU ZW, WU QY, *et al.* Screening and expression analysis of key regulator gene associated with α -farnesene formation during manufacturing process of Oolong tea [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(15): 135–142.
- [25] CHEN S, LI MH, ZHENG GY, *et al.* Metabolite profiling of 14 Wuyi Rock tea cultivars using UPLC-QTOF MS and UPLC-QqQ MS combined with chemometrics [J]. Molecules, 2018, 23(2): 104.
- [26] LI G, DU ZH, WANG N, *et al.* Location affects fatty acid composition in *Camellia sinensis* cv tieguanyin fresh leaves [J]. J Food Sci Technol Ind, 2020, 57(34): 96–101.
- [27] 周志, 薛俊鹏, 卓座品, 等. 一方水土养一方茶: 产地影响武夷岩茶品质的代谢组基础[J]. 中国科学: 生命科学, 2019, 49(8): 1013–1023.
- ZHOU Z, XUE JP, ZHUO ZP, *et al.* Unique region produces special tea: Metabolomic basis of the influence of production region on the quality of Wuyi rock tea [J]. Sci Sin Vitae Life Sci, 2019, 49(8): 1013–1023.
- [28] CHEN S, LIN J, LIN HH, *et al.* Insights into tissue-specific specialized metabolism in Tieguanyin tea cultivar by untargeted metabolomics [J]. Molecules, 2018, 23(7): 1817–1839.
- [29] XU YQ, LIU PP, JOHN S, *et al.* Quality development and main chemical components of Tieguanyin Oolong teas processed from different parts of fresh shoots [J]. Food Chem, 2018, 30(249): 176–183.
- [30] 陈林, 陈键, 陈泉宾, 等. 做青工艺对乌龙茶香气组成化学模式的影响[J]. 茶叶科学, 2014, 34(4): 387–395.
- CHEN L, CHEN J, CHEN QB, *et al.* Effects of green-making technique on aroma pattern of Oolong tea [J]. Tea Sci, 2014, 34(4): 387–395.
- [31] 陈寿松, 金心怡, 林宏政, 等. 乌龙茶 LED 补光萎凋品质特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 282–289.
- CHEN SS, JIN XY, LIN HZ, *et al.* Research on quality characteristic using LED as supplementary lighting during withering process in Oolong tea [J]. Tran Chin Soc Agric Mach, 2016, 47(7): 282–289.
- [32] 游芳宁, 陈寿松, 周子维, 等. 不同的光照萎凋时间对铁观音风味组分影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(9): 1856–1862.
- YOU FN, CHEN SS, ZHOU ZW, *et al.* Effect of flavor components on different illumination time during withering process in Tieguanyin tea [J]. Chin J Trop Crops, 2018, 39(9): 1856–1862.
- [33] 黄福平, 陈荣冰, 梁月荣, 等. 乌龙茶做青过程中香气组成的动态变化及其与品质的关系[J]. 茶叶科学, 2003, (1): 31–37.
- HUANG FP, CHEN RB, LIANG YR, *et al.* Changes of aroma constituents during Zuoqing procedure and its relation to Oolong tea quality [J]. Tea Sci, 2003, (1): 31–37.
- [34] 何加兴, 欧伊伶, 宋加艳, 等. 黄金茶 1 号夏秋乌龙茶加工过程化学成分变化与品质形成分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 223–230.
- HE JX, OU YL, SONG JY, *et al.* Analysis of chemical components changes and quality formation of Huangjinchai 1 summer Oolong tea during processing [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(18): 223–230.
- [35] 路欣. 凤凰单丛加工过程中香气及糖苷类香气前体变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- LU X. Research on the change of aroma and glycosidically aroma precursors during processing of Fenghuang Dancong. [D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [36] 周子维, 游芳宁, 刘彬彬, 等. 摇青机械力对乌龙茶脂肪族类香气形成的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 52–59.
- ZHOU ZW, YOU FN, LIU BB, *et al.* Effect of mechanical force during turning-over on the formation of aliphatic aroma in Oolong Tea [J]. Food Sci, 2019, 40(13): 52–59.
- [37] 邓慧莉, 李鑫磊, 毛贻帆, 等. 不同做青温度对乌龙茶滋味与香气品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(14): 5766–5771.
- DENG HL, LI XL, MAO YF, *et al.* Effect of different turning-over temperatures on the taste and aroma [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(14): 5766–5771.
- [38] CHEN S, LIU HH, ZHAO XM, *et al.* Non-targeted metabolomics analysis reveals dynamic changes of volatile and non-volatile metabolites during Oolong tea manufacture [J]. Food Res Int, 2020, 128: 108778.
- [39] 李小娟, 郑国建, 陈积霞, 等. 不同光源照射与碰青处理对摊青叶香气的影响[J]. 中国茶叶加工, 2011, (2): 13–18.
- LI XJ, ZHENG GJ, CHEN JX, *et al.* Effect of different light resources and Peng-qing treatment on the aroma components of fresh tea leaves after spreading [J]. China Tea Process, 2011, (2): 13–18.
- [40] 钟秋生, 林郑和, 陈常颂, 等. 烘焙温度对九龙袍品种乌龙茶生化品质的影响[J]. 茶叶科学, 2014, 34(1): 9–20.
- ZHONG QS, LIN ZH, CHEN CS, *et al.* Effects of baking temperature on quality and chemical components of Jiulongpao Oolong tea [J]. Tea Sci, 2014, 34(1): 9–20.
- [41] 孙君, 朱留刚, 林志坤, 等. 变温烘焙技术对丹桂乌龙茶香气品质的影响[J]. 茶叶科学, 2017, 37(3): 266–272.
- SUN J, ZHU LG, LIN ZK, *et al.* Effects of changeable baking techniques on aroma quality of Danguai Oolong tea [J]. Tea Sci, 2017, 37(3): 266–272.
- [42] 郭丽, 吕海鹏, 陈明杰, 等. 福建乌龙茶脂肪酸含量及差异性分析[J]. 茶叶科学, 2019, 39(5): 611–618.
- GUO L, LV HP, CHEN MJ, *et al.* Analysis of fatty acid compositions and contents in Oolong tea from Fujian Province [J]. Tea Sci, 2019, 39(5): 611–618.

- [43] GUO XY, HO CT, WAN XC, *et al.* Changes of volatile compounds and odor profiles in Wuyi Rock tea during processing [J]. Food Chem, 2021, 341: 128230.
- [44] LIU XB, LIU YW, LI P, *et al.* Chemical characterization of Wuyi Rock tea with different roasting degrees and their discrimination based on volatile profiles [J]. Royal Soc Chem Adv, 2021, 11(20): 12074–12085.
- [45] 徐邢燕, 陈思, 俞晓敏, 等. 不同烘焙程度与等级武夷肉桂茶品质差异分析[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 22–28.
- XU XY, CHEN S, YU XM, *et al.* Quality differences of different grades of Wuyi Rougui tea with different baking degrees [J]. Food Sci, 2020, 41(13): 22–28.
- [46] WU LY, HUANG XJ, LIU SR, *et al.* Understanding the formation mechanism of Oolong tea characteristic non-volatile chemical constituents during manufacturing processes by using integrated widely-targeted metabolome and DIA proteome analysis [J]. Food Chem, 2020, 310: 125941.
- [47] 吕世懂, 吴远双, 姜玉芳, 等. 不同产区乌龙茶香气特征及差异分析[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 146–153.
- LV SD, WU YS, JIANG YF, *et al.* Comparative analysis of aroma characteristics of Oolong tea from different geographical regions [J]. Food Sci, 2014, 35(2): 146–153.
- [48] 史敬芳, 陈栋, 黄文洁, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 技术对凤凰单丛乌龙茶香气成分比较分析[J]. 食品科学, 2016, 37(24): 111–117.
- SHI JF, CHEN D, HUANG WJ, *et al.* Analysis of flavor components in fenghuang dancong Oolong teas using HS-SPME-GC-MS [J]. Food Sci, 2016, 37(24): 111–117.
- [49] 李张伟. 凤凰单丛茶老枞茶树和新枞茶树茶叶的香气和生化成分比较[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 224–230.
- LI ZW. Comparison of aroma chemical components between old and new tea trees of Fenghuang Dancong tea [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(5): 224–230.
- [50] LI ZW, WANG JH. Identification and similarity analysis of aroma substances in main types of Fenghuang Dancong tea [J]. PLoS One, 2020, 15(12): e0244224.
- [51] 唐颖, 唐劲驰, 操君喜, 等. 凤凰单丛茶品质的海拔区间差异分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(34): 143–151.
- TANG H, TANG JC, CAO JX, *et al.* Analysis of quality differences among Fenghuang Dancong tea in different altitude ranges [J]. Chin Agric Sci Bull, 2015, 31(34): 143–151.
- [52] MENG WJ, XU XN, CHENG KK, *et al.* Geographical origin discrimination of Oolong tea (*Tieguanyin*, *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) Using proton nuclear magnetic resonance spectroscopy and bear-infrared spectroscopy [J]. Food Anal Method, 2017, 10(11): 3508–3522.
- [53] BALDERMANN S, YANG Z, KATSUNO T, *et al.* Discrimination of green, Oolong, and black teas by GC-MS analysis of characteristic volatile flavor compounds [J]. Am Anal Chem, 2014, 5(9): 620–632.
- [54] 蔡泳龙, 郑灿芬. GCMSD-FID 法分析台湾东方美人茶挥发性成分[J]. 饮料工业, 2019, 22(4): 51–56.
- CAI YL, ZHENG CF. Analysis of volatile components in Taiwan Oriental Beauty tea by GCMSD-FID [J]. Bever Ind, 2019, 22(4): 51–56.
- [55] 廉明, 吕世懂, 吴远双, 等. 三种不同发酵程度的台湾乌龙茶香气成分对比研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(3): 297–302.
- LIAN M, LV SD, WU YS, *et al.* Comparative analysis of aroma characteristics of three kinds of Taiwan Oolong tea from different fermentation degree [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 36(3): 297–302.
- [56] JIANG HY, ULRICH HE, CLAUDIA T, *et al.* Determination of flavonol glycosides in green tea, Oolong tea and black tea by UHPLC compared to HPLC [J]. Food Chem, 2015, 183(15): 30–35.
- [57] 黄彪, 刘文静, 吴建鸿. “福鼎大白”不同工艺茶类茶黄素含量的高效液相色谱分析[J]. 福建茶叶, 2019, 41(7): 9–10.
- HUANG B, LIU WJ, WU JH. Analysis of theaflavin content in “Fuding Dabai” tea by HPLC [J]. Tea Fujian, 2019, 41(7): 9–10.
- [58] 李鑫磊, 俞晓敏, 龚智宏, 等. 绿茶、红茶、乌龙茶和白茶中主要代谢产物的差异[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(5): 559–566.
- LI XL, YU XM, GONG ZH, *et al.* Difference in main metabolites contents in green tea, black tea, Oolong tea and white tea [J]. J Fujian Agric Forest Univ (Nat Sci Ed), 2019, 48(5): 559–566.
- [59] 李建华, 郭浩, 李小兵, 等. 高效液相色谱-二极管阵列法检测四川绿茶、黄茶、黑茶、红茶和青茶中甲基化儿茶素含量[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 261–267.
- LI JH, GUO H, LI XB, *et al.* Determination of methylated catechins in Sichuan green tea, yellow tea, dark tea, black tea and green tea by high performance liquid chromatography-diode array detection method [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 39(5): 261–267.
- [60] 王彩楠, 何理琴, 陈福城, 等. 武夷岩茶挥发性香气组成及沸水浸提下的释放规律[J]. 中国食品学报, 2018, 18(12): 309–318.
- WANG CN, HE LQ, CHEN FC, *et al.* Volatile aroma components of Wuyi Rock tea and their release pattern under multiple times of boiling water infusing [J]. J Chin Instit Food Sci Technol, 2018, 18(12): 309–318.
- [61] 石玉涛, 郑淑琳, 李小燕, 等. 贮藏时间对武夷岩茶品质成分和抗氧化活性的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(6): 46–51.
- SHI YT, ZHENG SL, LI XY, *et al.* Influence of storage time on quality components and antioxidant activity of Wuyi Rock essence tea [J]. Food Sci Technol, 2020, 45(6): 46–51.
- [62] 黄毅彪, 林燕萍, 张见明, 等. 贮藏方式对武夷岩茶梅占生化成分及感官品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(12): 102–107.
- HUANG YB, LIN YP, ZHANG JM, *et al.* Effects of storage methods on biochemical components and sensory quality of Wuyi Rock tea meizhan [J]. Food Res Dev, 2020, 41(12): 102–107.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



吴晴阳, 硕士研究生, 主要研究方向为茶叶加工与品质。

E-mail: doris1831036881@126.com

孙云, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与品质。

E-mail: sunyun1125@126.com