

红茶发酵影响因素及品质调控技术研究进展

刘亚兵¹, 冉乾松², 蒲璐璐¹, 段学艺¹, 王敏¹, 戴宇樵¹,
张拓¹, 刘忠英¹, 潘科^{1*}

(1. 贵州省农业科学院茶叶研究所, 贵阳 550025; 2. 贵州农业职业学院, 贵阳 551400)

摘要: 红茶是我国主要的消费茶类之一, 其加工步骤为萎凋、揉捻、发酵和干燥, 其中发酵是红茶品质特征形成的关键环节。关于红茶发酵过程中影响因素及品质调控技术, 已有文献表明, 多酚类物质含量及组成比例、酶种类及其活性、温度、湿度、pH, 以及发酵过程中微生物等内部及环境因素均会影响红茶品质特征化合物的形成, 从而影响其品质。目前常用的品质调控技术主要包括新发酵技术、冷冻萎凋技术、外源酶技术以及光质。未来研究重点将是优化红茶适制品种培育、环境因子间的交互作用机制、微生物对红茶发酵品质的影响机制和加工设备智能化等方面, 因此本文通过对红茶发酵影响因素及品质调控技术的研究进展进行综述, 以期提升红茶的滋味品质和推进红茶新研究进展提供借鉴与参考。

关键词: 红茶; 滋味; 影响因子; 品质调控; 光质; 微生物

Research progress on influencing factors and quality control technology of black tea fermentation

LIU Ya-Bing¹, RAN Qian-Song², PU Lu-Lu¹, DUAN Xue-Yi¹, WANG Min¹,
DAI Yu-Qiao¹, ZHANG Tuo¹, LIU Zhong-Ying¹, PAN Ke^{1*}

(1. Tea Research Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550025, China;
2. Guizhou Vocational College of Agriculture, Guiyang 551400, China)

ABSTRACT: Black tea is one of the main consumer teas in China, and its processing steps include withering, rolling, fermentation, and drying. Among them, fermentation is the key link in forming the quality characteristics of black tea. Regarding the influencing factors and quality control techniques in the fermentation process of black tea, literature has shown that the content and composition ratio of polyphenols, enzyme types and activities, temperature, humidity, pH, as well as internal and environmental factors such as microorganisms during the fermentation process, can all affect the formation of characteristic compounds in black tea quality, thereby affecting its quality. The commonly used quality control techniques currently include new fermentation techniques, freeze-thaw adjustment techniques, exogenous enzyme techniques, and light quality. The future research focus will be on optimizing the

基金项目: 贵州省科技厅科技计划支撑项目(黔科合支撑[2022]一般 144)、贵州省农业科学院科技创新项目(黔农科科技创新[2023]12号)、贵州省科技厅科技计划支撑项目(黔科合中引地[2023]023)

Fund: Supported by the Science and Technology Plan Support Project of Guizhou Science and Technology Department (Guizhou Science and Technology Support [2022] General 144), the Science and Technology Innovation Project of Guizhou Academy of Agricultural Sciences (Guizhou Agricultural Science and Technology Innovation [2023] No.12), and the Science and Technology Plan Support Project of Guizhou Science and Technology Department (Guizhou Science and Technology Integration in China [2023]023)

*通信作者: 潘科, 博士, 研究员, 主要研究方向为茶叶精深加工。E-mail: 148450502@qq.com

*Corresponding author: PAN Ke, Ph.D, Professor, Tea Research Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550025, China. E-mail: 148450502@qq.com

cultivation of suitable varieties of black tea, the interaction mechanism between environmental factors, the influence mechanism of microorganisms on the fermentation quality of black tea, and the intelligence of processing equipment. Therefore, this article reviewed the research progress of influencing factors of black tea fermentation and quality control technology, in order to provide reference and guidance for improving the taste and quality of black tea and promoting new research progress in black tea.

KEY WORDS: black tea; taste; influencing factor; quality control; light quality; microorganism

0 引言

红茶是一种全球性饮料^[1], 因其顺滑的甜味、清澈的汤色、花香和果香以及抗氧化特性和调节血脂等健康益处而受到消费者喜爱^[2-4]。作为一种发酵茶, 红茶通常要经过 4 个主要步骤: 萎凋、揉捻、发酵和干燥。在这 4 个步骤中, 发酵是红茶品质特征形成的关键环节, 它关系到红茶的特征色泽、香气和滋味^[5]。红茶发酵机制主要是酶驱动的多酚类物质氧化聚合反应, 从根本上说, 酶促氧化程度, 也就是茶色素种类的生成和积累的过程, 决定了最终产品品质特性^[6]。因此, 多酚类含量及组成比例、酶种类及其活性是影响红茶发酵的关键因素, 而温度、湿度、pH 等外在环境因子直接影响茶叶中多酚类物质的消耗和酶活性^[7-8]。尽管酶促发酵被认为是红茶品质形成的主要原因, 但在红茶的揉捻和发酵过程中的物理化学条件可以为微生物的生长提供良好的环境。近年来, 研究人员一直在研究微生物在茶叶中的作用, 尤其是在红茶品质形成中的作用。尽管微生物在发酵过程中对红茶风味的形成起着至关重要的作用, 但关于红茶发酵过程中微生物群落的组成及其在红茶加工中的潜在功能, 现有信息有限。因此, 明晰红茶发酵影响因子和微生物与茶汤品质贡献物质的互作机制, 对于实现红茶高效发酵十分必要。基于此, 本文就红茶发酵影响因素、微生物作用对红茶品质的影响以及红茶发酵调控技术等方面的研究进展进行总结, 以期对红茶高效发酵的探索、红茶饮料滋味的精准调控以及茶资源的高值化利用提供参考。

1 内部因素

1.1 多酚类物质含量及组成比例

茶色素是红茶品质形成的重要物质基础, 其含量多少对红茶茶汤滋味和汤色起决定性作用^[9-10]。儿茶素是形成茶色素的主要物质基础, 其组成、含量均会使茶色素生成量及种类产生差异^[11]。施莉婷等^[12]、FAN 等^[13]在表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)体系中加入多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)进行催化反应, 仅形成脱氢聚酯型儿茶素 A (dehydrotheasinensin A, DTSA)、没食子酸等产物, 而在反应液中添加表儿茶素(epicatechin, EC)后, 会形成茶黄素-3-没食子酸酯(theaflavin-3-gallate, TF-3-G),

且该体系生成物量随添加量增加而增加^[14], 但当 EGCG 与 EC 等浓度时, TF-3-G 形成量最大^[15]; 而茶黄素(theaflavin, TF)、茶黄素-3'-没食子酸酯(theaflavin-3'-O-gallate, TF-3'-G)和茶黄素-3,3'-双没食子酸酯(theaflavin-3,3'-digallate, TF-3,3'-MG)则是由 EC 与表没食子儿茶素(epigallocatechin, EGC)、表儿茶素没食子酸酯(epicatechin gallate, ECG)与 EGC、EGC 与 EGCG 偶联形成^[16]。因此儿茶素组分组成比是影响茶色素生成和积累的关键影响因子, 一般来说, 儿茶素浓度越高合成的茶色素量也越多, 但过高或过低浓度的儿茶素均会导致茶黄素生成量下降。研究表明, 在茶多酚氧化反应体系中, 在一定浓度范围内随着茶多酚浓度提高, 茶黄素生成量随之增加, 当茶多酚浓度为 2% 时, 是茶黄素生成效果最佳浓度, 此时随着茶多酚浓度增高茶黄素生成量呈现出下降趋势^[17]。总体来看, 底物(多酚类)对茶黄素的形成影响较大, 选择合适的原料能提高茶黄素的得率, 从而提高红茶品质。而品种是导致儿茶素组分含量及其比例不同的基础^[18], 因此在茶叶品种的培育中若能增加一定非酯型儿茶素含量, 将使茶黄素形成量增加, 改善红茶品质。这不仅说明底物浓度对茶黄素总量的影响, 而且也表明儿茶素单体间不同比例对茶黄素总量也有极大的影响^[11]。

1.2 酶的种类及其活性

酶作为一种天然、绿色、高效的生物催化剂, 具有专一性、催化高效性、作用条件温和、活性可调节性等良好的功能特性^[19]。茶叶在制作过程中, 经酶处理后, 会增加游离氨基酸、茶黄素和茶红素等有利品质指标成分含量^[20]。PPO 或过氧化物酶(peroxidase, POD)对茶叶的氧化作用是形成不同茶叶类型的关键^[21-22], 不同的酶在红茶加工中的作用效果不同, PPO 仅能将儿茶素酶促合成简单二聚体和 TFs, 但在此基础上, POD 会继续将简单二聚体和 TFs 酶促合成复杂二聚体和茶红素, 并能快速地将茶黄素继续氧化成聚合物, 削弱 PPO 氧化能力^[23]。同时酶浓度影响茶黄素生成量, 研究表明, 当红茶发酵体系中酶浓度高于 140.82 g/500 mL 时, 茶黄素生成量开始出现下降^[24], 而鲜叶原料是影响酶活性及酶浓度差异的主要因素^[25], 因此在实际生产过程中, 需要针对不同的鲜叶原料, 采用不同发酵方式, 适时调整发酵程度。

综上, 茶树鲜叶中底物浓度、组成、比例和酶源、酶浓度以及不同季节、不同等级的茶树鲜叶均是影响红茶发酵酶促氧化生成茶黄素得率的因素, 由此也可得出茶树品种是影响红茶发酵的内部因素。

2 外部因素

影响红茶发酵的环境因素主要包括发酵温度、通氧量、时间、湿度、pH 等。

2.1 温度

红茶发酵温度包括环境温度和叶温。叶温主要受环境温度、发酵叶摊放厚度以及发酵方式等因子制约, 对茶色素的生成具有直接影响。温度通过影响酶活性, 进而影响茶色素生成^[26]。研究表明, 温度过高过低均不利于茶色素的生成和积累, 温度低时酶活性弱, 多酚类氧化速度慢、耗时长; 发酵温度高时酶活性高, 多酚类氧化速度快, 聚合产物的转化快, 不利于茶黄素积累, 因此需要对不同茶树品种鲜叶, 控制适宜的发酵温度, 或者找到平衡点的固定温度发酵, 充分使酶发生酶促氧化作用, 从而抑制高级聚合物的形成, 使茶黄素生成量较多^[27]。研究表明, PPO 和 POD 在较低温度(20°C 和 25°C)下稳定性较高, 有利于 TFs 和 TRSI (TRs 组分)的持续形成, 且茶叶的亮度和 TF/TR 比均达到最大值, 从而获得更好的 LB 和汤色^[28]。温度升高导致酶不稳定, 较高温度(30、35 和 40°C)下导致 POD 活性升高, 儿茶素的氧化耗竭率升高, TRSII (TRs 部分)和茶褐素(theabrownins, TBs)过量产生; 此外, 低温发酵条件下能增加外形亮度、黄度, 汤色黄度和红度, 而高温有利于外形红度和汤色透亮度的增加^[29]。

2.2 通氧量

儿茶素酶促氧化反应需要氧气的参与, 一般情况下, 提高酶促氧化反应体系中的氧气浓度有利于茶黄素的形成, 缺氧条件下则会影响 EC 和 ECG 的氧化, 导致茶黄素的合成受阻, 反而快速氧化聚合成茶红素等大分子化合物。一般茶黄素生成量随氧气含量增加而增加^[30], 因此采取通氧发酵不仅能够加快发酵进程, 还能促进 TFs 和 TRs 的形成和积累, 改善样品的颜色和亮度^[31-32]。由此可见, 将该机制应用于红茶加工过程中, 可以提高红茶中茶黄素含量, 从而提高红茶的品质。研究表明, 通氧发酵不仅使茶黄素生成量增加, 同时可增加部分氨基酸含量, 且降低儿茶素、类黄酮苷和酚酸等含量, 进而降低涩味和苦味, 增强鲜味^[33], 此外, 通氧发酵体系中儿茶素加速氧化反过来又加速氨基酸降解, 形成挥发性醛, 使茶叶发酵体系中挥发性化合物含量和种类均增加^[34]。

2.3 时间

红茶发酵过程中, 随着时间的延长, 茶黄素和茶红素

的浓度增加, 达到最佳水平, 然后随着发酵时间的延长而降解。因此发酵时间的控制对于茶色素和红茶风味品质形成非常重要。发酵时间较短的情况下, 茶红素、茶褐素类物质形成量较少, 红茶汤色红艳程度不足、滋味不浓醇、带青气, 相反, 发酵时间过长则易造成茶多酚过度氧化聚合, 形成较多茶褐素等高聚物, 易造成红茶汤色发暗、香气不纯, 不利于提高汤色亮度, 导致大量 TRs 和 TBs 的产生^[35]。不同茶色素开始生成所需时间及最高生成量所需时间均不同^[35]。RAHNAN 等^[36]研究孟加拉国红茶加工不同阶段的生化变化, 表明 TF/TR 值随发酵时间的延长而增加, 发酵 50 min 时最高, 为 1:8.4, 最终比值为 1:10。发酵 50 min 后制成的茶叶品质指标与市售红茶相当或更好。而 WANG 等^[37]认为发酵时间 3 h 是保留几种简单儿茶素的最佳发酵时间, 可以形成 TFs 和 TRs, 且促进糖的形成和转化以及类黄酮苷的降解, 进而增强甜味和鲜味的综合感官强度。

2.4 其他因素

发酵湿度也是影响红茶酶促氧化的主要影响因子之一。因此红茶发酵过程中酶促氧化生成茶色素必须有水分参与, 适当的水分有利于多酚类物质氧化形成茶色素, 进而形成红茶固有感官风味^[38]。发酵体系中湿度过低, 茶叶内部多酚类物质与酶类不易溶出, 导致酶促氧化反应不充分, 而湿度过高则易导致发酵体系通气性能变差, 氧气供应不足, 抑制酶活性, 不利于产生酶促氧化反应, 因此需要合理控制发酵湿度^[39]。

pH 不仅影响氧化酶活性, 还影响儿茶素和茶黄素组分稳定性, 从而影响酶促氧化中底物和产物的量。研究表明, pH=6 和中性条件下儿茶素酶促氧化生成 TSs 量高于 TFs 生成量, 而 pH=5 水平下则相反^[40]。pH 不仅影响茶黄素的生成量, 还影响茶黄素种类。陈以义等^[41]比较 pH (5.6、7.0) 对儿茶素单体 (EGC、EGCG) 及其混合体 (ECG+EGC、ECG+EGCG、EGC+EC、EGCG+EC、EGCG+EGC) 体外酶促氧化产物组分的影响, 结果表明酸性条件有利于 TFDG 的合成和积累, 中性条件则有利于 TF、TF-3-G、TF-3'-G、TSA、TSB、TSC 的形成。红茶发酵过程中 pH 过高或过低, 都对品质的形成不利, 在实际生产中需要根据鲜叶原料的不同控制 pH 在一定合理范围内。

目前对于红茶“发酵”的研究主要集中在不同发酵条件下形成的红茶品质特点及相关理化成分和香气物质之间的联系, 从而探讨发酵对红茶品质的影响机制。然而, 发酵对红茶品质的影响是复杂的, 当前红茶加工方式依然以传统生产为主, 尚未实现智能化生产, 因此难以形成对发酵条件的精确控制。需结合当前红茶生产过程中对环境因素的具体要求, 利用数学模型来对发酵过程中的温度、湿度、时间等信息进行采集和优化。通过对影响红茶发酵的各项因素进行科学建模, 从而对红茶发酵环境因子进行调整。

3 红茶品质调控技术

传统红茶发酵技术相对成熟,但由于红茶发酵体系较复杂,目前无法准确、快速获取客观数据。随着科技的不断创新,如酶技术、光质的应用、冷冻技术等,在一定程度上弥补了传统红茶发酵影响因子难以调控的缺点。因此,研究者将这些调控手段应用于红茶发酵研究(表 1),进一步发展了红茶发酵过程中品质化学研究,对红茶发酵品质调控起着至关重要的作用。

3.1 新兴发酵技术

变温发酵实质是通过调整不同温度以控制酶活性,从而改变不同时间段酶促氧化速度,使之有利于红茶品质成分高效积累。在实际生产过程中,常采取发酵前期高温,快速激活酶活性,后期通过适当低温保持酶活性,促进茶黄素高效积累,来提高红茶品质^[41]。谢念祠等^[42]探究不同发酵方式对保靖黄金茶 1 号夏季红茶品质影响,指出变温发酵优于恒温发酵和自然发酵,变温发酵具有香气持久、甜香带花香、滋味甜醇回甘的特点,俞露婷等^[51]开展超高压红茶发酵研究,亦获得较好品质红茶;谭俊峰^[52]在红茶发酵前引入挤压膨化技术处理,使所制红茶获得滋味甜醇的品质,而未进行挤压膨化所制红茶茶汤滋味淡薄。虽然这些新型发酵方式在一定程度上提高了红茶发酵质量,但目前主要采用的发酵方法是静态堆积发酵,通氧效果不佳,且这种发酵方法难以控制,导致发酵不均匀、汤色淡、口感苦。而动态发酵技术一定程度上代替了传统静态发酵,HUA 等^[43]使用新型滚筒式发酵装置,采取动态发酵方式发酵红茶,此发酵方式不仅能控温控湿外,还能使发酵叶与空气充分接触,改变以往需要人工进行翻动充氧方式,同时降低苦涩味茶多酚、EGCG、ECG 含量,提高茶黄素、茶红素、氨基酸、可溶性糖、咖啡因含量,提升红茶品质。近年来,随着各类茶叶加工技术的完善,研究者开始采取工艺技术联用方式用于红茶发酵,以提高红茶品质质量。郑红发等^[53]为了开发出高茶黄素含量红茶,采用发酵和渥

堆联用新技术进行红茶加工,发现通过适度短时(2.5 h)发酵后,再通过汽蒸渥堆处理 20 h,红茶产品中茶黄素含量比传统提高 25%以上,滋味品质显著提高。

3.2 冷冻萎凋技术

冷冻萎凋增加了细胞膜的透性,可以促进多酚类物质酶促氧化,加快红茶发酵进程,保留较多的茶黄素,提升红茶品质^[8,54]。张雁飞等^[44]指出经冷冻处理样后的红茶感官品质特征优于传统红茶,而香气低于传统红茶。该方法强调了通过冷冻技术缩短萎凋和发酵时间的效果,而忽视了自然萎凋过程中充分使酯型儿茶素、蛋白质、多糖发生水解提高茶叶品质的突出作用。聂占一等^[45]提出先经过自然萎凋后,再进行冷冻处理后,所制红茶氨基酸和茶黄素含量明显高于不冷冻茶样。而以上研究方法均是采取冰箱冷冻方式,且冷冻时间较长,在一定程度上降低了生产效率,为了缩短冷冻时间,侯炳豪等^[55]探讨冰箱冷冻和液氮冷冻两种冷冻处理分别对茶鲜叶和萎凋叶细胞破损率的影响,发现液氮冷冻处理细胞破损率较冰箱冷冻处理高,萎凋叶冷冻比鲜叶冷冻效果好。然而,以上冷冻技术在实际生产过程中,无法实现大量生产,且生产成本较高,因此,牛小军等^[46]探究以“倒春寒”发生时茶树实际受冻害和模拟冻害的新梢所制红茶品质差异,结果发现模拟冻害的鲜叶外形接近实际受冻情况,随着冷冻时间的增加,鲜叶中 PPO 活性呈现先升高后降低趋势,POD 活性整体趋于稳定,而 β -GC 酶的活性整体呈现降低趋势。此外,在冷冻过程中鲜叶茶黄素含量显著增加,酯型儿茶素含量显著降低。

3.3 外源酶技术

外源酶具有分布广泛、高效、低成本、环保等特点,利用外源 PPO 促合成 TFs 和 TSs 是实现规模化生产的有效途径,合适的酶源、酶浓度是提高红茶茶黄素得率的关键因素之一^[56]。红茶发酵过程中影响因素较多,在发酵设备相对落后情况下,难以满足高茶黄素红茶的生产需求,而添加外

表 1 品质调控技术在红茶发酵中应用的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of quality control technology applied in black tea fermentation

分类依据	主要措施	优点	局限性	参考文献
新兴发酵技术	静态变温发酵	操作简单,快速提升酶活性,	难控制,易受其他因素影响	[41–42]
	动态发酵	控温控湿,通气性良好	难以保证相对稳定的湿度	[43]
冷冻萎凋技术	冰箱冷冻	操作方便,设备成本低	耗时长,低效,难实现机械化	[44–45]
	液氮冷冻技术	快速,高效,效果佳	成本高,难以实现量产以及机械化	[46]
外源酶技术	添加氧化酶	酶促氧化更充分、快速,成本低,操作简单	易受温度、湿度、pH 等环境影响,与茶叶内源酶互作机制相互影响	[47]
	添加水解酶	水解反应更充分、快速,成本低,操作简单	易受温度、湿度、pH 等环境影响,与茶叶内源酶互作机制相互影响	[48–49]
光质	光源照射	成本低,可控性强,还能调节环境因子	对空间环境需求高,受空间湿度影响	[50]

源 PPO 可缩短发酵时间,提高茶黄素和茶红素的得率,改善茶的色泽和香气^[47],因此,研究者们试图通过添加外源酶提高红茶中茶黄素含量,并取得了一定效果。叶飞等^[48]、全佳音等^[49]向揉捻叶中添加 PPO 等酶,发现氨基酸、茶黄素和可溶性糖等的含量都有不同程度的提高,增强了茶汤甜度和鲜度,降低茶多酚和儿茶素含量,削弱红茶苦涩强度,同时增加部分香气成分含量,改善了红茶的品质^[57]。添加外源酶本质上是增加红茶发酵体系中氧化酶浓度,增强酶促氧化效果。总之,添加外源酶和提高底物浓度能提高红茶中茶黄素的得率,改善红茶品质。但添加外源酶与茶叶内源酶相互作用机制,还有待进一步研究。

3.4 光质在红茶发酵中的应用

在茶叶加工过程中,研究者利用不同光源处理茶树鲜叶,以期提高茶叶品质^[58-59]。研究表明,茶树鲜叶通过光照处理能显著提高 PPO 和 POD 的活性^[60-61],促进红茶发酵阶段茶黄素的形成,提高苯丙氨酸和色氨酸合成基因上调表达以及肽酶活性诱导蛋白质氨基酸含量增加,抑制儿茶素合成中关键基因的下调,增加部分儿茶素(EGC 和 GCG)的含量^[62],同时,显著上调萜类合成相关基因的表达,并进一步促进挥发性萜类化合物(芳樟醇和 α -法尼烯)的合成^[63]。除此之外,光照处理能综合影响茶树的转录,调控脂质和类黄酮代谢^[64]。MA 等^[65]利用高通量测序技术结合液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)分析了白光和红光补充条件下黄金芽嫩茎的转录组和代谢物含量的变化,结果表明苯丙酸代谢相关基因和 5 个谷胱甘肽 S-转移酶基因(CsGSTs)表达不同。其中,甜味和鲜味氨基酸增加,苦味氨基酸减少,说明红光辅助处理对氨基酸代谢有调节作用。在萎凋方面,红、橙、黄等高波长 LED 光对茶鲜叶的光响应更加敏感和高效,随着光照强度增加,会显著提高萎凋叶中水解酶活性,促进酯类和酮类等化合物的形成,使红茶呈现甜花香^[66-68]。目前也有研究者将目光转向红茶发酵方面,研究光质对红茶发酵过程化学物质的动态变化。如俞露婷等^[50]分别设置不同光照强度处理福鼎大白茶一芽二叶鲜叶。结果表明,随着发酵时间的延长,不同光照处理样茶多酚、儿茶素总量均呈现下降的趋势,黄酮、游离氨基酸和可溶性糖呈现上升的趋势,可溶性蛋白质总量和茶黄素总量呈现先升后降的趋势,拐点在发酵 120 min 左右。不同光照强度处理比较分析得出,15000 lx 强光照处理会促进茶多酚和儿茶素组分含量的下降及黄酮、游离氨基酸总量的积累;9000 lx 处理样的可溶性蛋白质和可溶性糖含量最高;3000 lx 处理样的茶黄素组分总量和茶氨酸比重最高。说明光波在一定程度上对茶叶中的代谢物能起到调节作用,但茶树鲜叶从下树到发酵结束,经过长时间的水分、物理、温度等胁迫是否存在基因表达,还有待研究。

目前对于红茶发酵的调控技术大多是从调节酶活性和代谢物途径来减少多酚类化合物含量,以及提高呈鲜、甜滋味氨基酸和茶黄素的含量,然而这些调控手段仍然受到环境因子干扰,针对红茶发酵过程中调控方法有待进一步深入探究。

4 微生物对红茶发酵的影响

自然发酵是确保茶叶质量的一个关键过程,其中酶促反应对于改变红茶的味道、风味和颜色是必要的^[69]。酶发酵被认为是红茶品质形成的主要原因,这一过程的研究通常没有考虑茶叶中微生物的潜在参与。然而红茶发酵过程中的物理化学条件为微生物的生长创造了有利的环境^[70],能显著增加茶叶发酵过程中呼吸所需相关酶^[71]。近年来,研究人员一直在研究微生物在红茶发酵中的作用,尤其是对红茶品质形成中的作用。据报道,Cyberlindera 属、曲霉属、克雷伯氏菌属和乳杆菌属参与了红茶质量特征的形成^[72-74]。LIU 等^[75]和 TONG 等^[76]也表明,金色杆菌(*Chrysobacterium*)、甲基杆菌属、根瘤菌和鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas*)及 *Pleosporales* 真菌主导了红茶的整个发酵过程,且糖酵解相关酶、丙酮酸脱氢酶和三羧酸循环相关酶数量在发酵阶段显著升高,其中甲基杆菌和根瘤菌是红茶加工过程中的主要菌群^[77]。

在红茶的发酵过程中,存在着一个复杂的微生物群,微生物群发挥着多种功能,通过改变包括氨基酸、碳水化合物、核苷酸和脂肪酸的运输和代谢、辅酶的运输和新陈代谢,以及次级代谢产物的生物合成、运输和分解^[78-79],因而微生物的变化可以改变红茶发酵中多酚类和多糖类化合物的分布,导致代谢产物含量的进一步变化,从而影响红茶的酚类化合物^[80]。基于它们的活性及与酚类化合物的结合,已经发现一些细菌属与茶的酚类化合物相关。例如厚壁菌门细菌的丰度已被发现与儿茶素(C)和 EGCG 高度相关,而细菌门、放线菌门和蓝细菌门与 GA 的形成密切相关^[78,81]。NURMILAH 等^[82]利用宏基因组技术评估红茶生产过程中酚类化合物的特征,指出甲基杆菌属和 *Devosia* 属与没食子酸和槲皮素代谢相关。同时,鞘氨醇单胞菌属、*Chrysobacterium* 属和 *Aurimonas* 属与山奈酚、茶黄素、茶红素和茶布朗宁相关。由此发现,红茶品质特征的形成可能是微生物参与下酶促作用的结果。

5 结束语

红茶发酵品质受茶树品种、环境因子、加工工艺等多方面因素影响,各因素间相互制约、相互促进,合理调控各个因素是提升红茶滋味品质的关键。目前研究主要停留在研究环境因素对茶色素生成量的影响,然而红茶酶促氧化产物包括次级产物和中间产物,这些产物对茶黄

素生成是否构成竞争性等尚不明确,且环境因子相互作用关系以及微生物间交互效应均不明确,因此,如何针对环境因子采取更加精进发酵技术和更加科学的调控技术还有待进一步改进。

红茶发酵调控技术的发展方向为:(1)加强组学技术、分子标记技术、色谱技术等的应用,推进精准化、功能化育种,培育高活性氧化酶、适宜的儿茶素比例的茶树品种;(2)加强环境因子间的交互作用研究,构建环境因子与品质成分关联模型;(3)加强微生物对红茶发酵品质的影响研究,探明微生物与环境因子互作关系;(4)将各种智能仿生技术整合到特定加工设备中,加强设备智能化,强化设备对环境因子综合控制能力。

参考文献

- [1] YOHANNES MF, MATSUDA T. Weather effects on household demand for coffee and tea in Japan [J]. *Agribusiness*, 2016, 32(1): 33–44.
- [2] XU J, LI M, ZHANG Y, *et al.* Huangjinya black tea alleviates obesity and insulin resistance via modulating fecal metabolome in high-fat diet-fed mice [J]. *Food Res*, 2020, 64(22): 2000353.
- [3] CHEN Q, ZHU Y, LIU Y, *et al.* Black tea aroma formation during the fermentation period [J]. *Food Chem*, 2022, 374: 131640.
- [4] TANAKA T, YASUMATSU M, HIROTANI M, *et al.* New degradation mechanism of black tea pigment theaflavin involving condensation with epigallocatechin-3-O-gallate [J]. *Food Chem*, 2022, 370: 131326.
- [5] HUA J, WANG H, YUAN H, *et al.* New insights into the effect of fermentation temperature and duration on catechins conversion and formation of tea pigments and theasinensins in black tea [J]. *J Sci Food Agric*, 2022, 102(7): 2750–2760.
- [6] ZHU YF, CHEN JJ, JI XM, *et al.* Changes of major tea polyphenols and production of four new B-ring fission metabolites of catechins from post-fermented Jing-Wei Fu brick tea [J]. *Food Chem*, 2015, 170: 110–117.
- [7] JIN G, WANG Y, LI M, *et al.* Rapid and real-time detection of black tea fermentation quality by using an inexpensive data fusion system [J]. *Food Chem*, 2021, 358: 129815.
- [8] 曾议霆, 吴雪莉, 杨春梅, 等. 基于非靶向代谢组学比较不同发酵方式红茶滋味物质差异[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(16): 5288–5296.
- ZENG YT, WU XL, YANG CM, *et al.* Comparison of taste substances of black tea by different fermentation methods based on non-targeted metabolomics [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(16): 5288–5296.
- [9] 熊昌云, 彭远菊. 红茶色素与红茶品质关系及其生物学活性研究进展[J]. *茶业通报*, 2006, (4): 155–157.
- XIONG CY, PENG YJ. Research progress on the relationship between black tea pigment and black tea quality and its biological activity [J]. *Tea Ind Bullet*, 2006, (4): 155–157.
- [10] 江和源, 程启坤, 杜琪珍, 等. 红茶中的茶黄素[J]. *中国茶叶*, 1998, (3): 18–20.
- JIANG HY, CHENG QK, DU QZ, *et al.* Theaflavins in black tea [J]. *China Tea*, 1998, (3): 18–20.
- [11] 张建勇, 江和源, 崔宏春, 等. 儿茶素组成对化学氧化形成茶黄素的影响机理[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(12): 85–89, 92.
- ZHANG JY, JIANG HY, CUI HC, *et al.* Effect of catechin composition on theaflutin formation by chemical oxidation [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2011, 32(12): 85–89, 92.
- [12] 施莉婷, 江和源, 张建勇, 等. EGCG 与 EC 酶促氧化产物及其形成途径分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(22): 1–7.
- SHI LT, JIANG HY, ZHANG JY, *et al.* Analysis of enzymatic oxidation products of EGCG and EC and their formation pathways [J]. *Food Sci*, 2018, 39(22): 1–7.
- [13] FAN FY, SHI M, NIE Y, *et al.* Differential behaviors of tea catechins under thermal processing: Formation of non-enzymatic oligomers [J]. *Food Chem*, 2016, 196: 347–354.
- [14] LEI S, XIE M, HU B, *et al.* Effective synthesis of theaflavin-3,3'-digallate with epigallocatechin-3-O-gallate and epicatechin gallate as substrates by using immobilized pear polyphenol oxidase [J]. *Int J Biological Macromolecul*, 2017, 94: 709–718.
- [15] OPIE SC, CLIFFORD MN, ROBERTSON A. The role of (-)-epicatechin and polyphenol oxidase in the coupled oxidative breakdown of theaflavins [J]. *J Sci Food Agric*, 1993, 63(4): 435–438.
- [16] ABUDURREHEMAN B, YU X, FANG D, *et al.* Enzymatic oxidation of tea catechins and its mechanism [J]. *Molecules*, 2022, 27(3): 942.
- [17] 萧伟祥, 宛晓春, 胡耀武, 等. 茶儿茶素体外氧化产物分析[J]. *茶叶科学*, 1999, (2): 145–149.
- XIAO WX, WAN XC, HU YW, *et al.* Analysis of extracellular oxidation products of tea catechins [J]. *Tea Sci*, 1999, (2): 145–149.
- [18] 江用文, 滑金杰, 袁海波, 等. 不同茶树品种悬浮发酵对茶黄素形成的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(20): 71–77.
- JIANG YW, HUA JJ, YUAN HB, *et al.* Effects of suspension fermentation of different tea cultivars on theaflavins formation [J]. *Food Sci*, 2018, 39(20): 71–77.
- [19] 杨丽娟, 王伟伟, 许勇泉, 等. 外源酶在红茶加工中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050093
- YANG LJ, WANG WW, XU YQ, *et al.* Application of exogenous enzymes in the processing of black tea [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050093
- [20] CHIANG SH, YANG KM, WANG SY, *et al.* Enzymatic treatment in black tea manufacturing processing: Impact on bioactive compounds, quality, and bioactivities of black tea [J]. *LWT*, 2022, 163: 113560.
- [21] 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, 1474–1495.
- [22] BORA P, BORA LC. Microbial antagonists and botanicals mediated disease management in tea, *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze: An overview [J]. *Crop Prot*, 2021, 148: 105711.
- [23] MILLIN DJ, SWAINE D. Fermentation of tea in aqueous suspension [J]. *J*

- Sci Food Agric, 1981, 32(9): 905–919.
- [24] 谷记平, 刘仲华, 黄建安, 等. 酶性氧化合成茶黄素条件优化的研究[J]. 茶叶科学, 2006, 26(4): 285–290.
- GU JP, LIU ZH, HUANG JAN, *et al.* Study on optimization of conditions for synthesis of theaflavins by enzymatic oxidation [J]. Tea Sci, 2006, 26(4): 285–290.
- [25] 龚志华, 陈栋, 朱盛尧, 等. 酶促合成茶黄素的茶鲜叶酶源筛选[J]. 茶叶科学, 2013, 33(1): 34–39.
- GONG ZH, CHEN D, ZHU SY, *et al.* Screening of enzyme sources for enzymatic synthesis of theaflavins from fresh tea leaves [J]. Tea Sci, 2013, 33(1): 34–39.
- [26] 滑金杰, 袁海波, 姚月凤, 等. 温度对茶发酵叶色泽及茶色素含量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 300–308.
- HUA JJ, YUAN HB, YAO YF, *et al.* Effects of Temperature on color and pigment content of fermented tea leaves [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2018, 34(12): 300–308.
- [27] 夏涛. 试析茶叶红变原理及红茶色泽形成的调控[J]. 福建茶叶, 1996, (4): 15–18.
- XIA T. Study on the principle of tea redness and regulation of black tea color formation [J]. Fujian Tea, 1996, (4): 15–18.
- [28] HUA J, WANG H, YUAN H, *et al.* New insights into the effect of fermentation temperature and duration on catechins conversion and formation of tea pigments and theasinensins in black tea [J]. J Sci Food Agric, 2022, 102(7): 2750–2760.
- [29] SAMANTA T, CHEENI V, DDA S, *et al.* Assessing biochemical changes during standardization of fermentation time and temperature for manufacturing quality black tea [J]. J Food Sci Technol, 2015, 52: 2387–2393.
- [30] 张建勇, 江和源, 崔宏春, 等. 氧气对茶多酚化学氧化合成茶黄素的影响[J]. 食品与发酵业, 2011, 37(4): 58–63.
- ZHANG JY, JIANG HY, CUI HC, *et al.* Effect of oxygen on synthesis of theaflavins by chemical oxidation of tea polyphenols [J]. Food Ferment Ind, 2011, 37(4): 58–63.
- [31] 董春旺, 叶阳, 江用文, 等. 工夫红茶可视化富氧发酵机设计及试验研究[J]. 茶叶科学, 2015, 35(4): 370–376.
- DONG CW, YE Y, JIANG YW, *et al.* Design and experimental study of visual oxygen-enriched fermentation machine for Congou black tea [J]. Tea Sci, 2015, 35(4): 370–376.
- [32] 潘科, 沈强, 申东, 等. 红茶通氧发酵过程中发酵叶相变化分析[J]. 食品科学, 2014, 35(15): 198–201.
- PAN K, SHEN Q, SHEN D, *et al.* Analysis of leaf phase change during oxygenated fermentation of black tea [J]. Food Sci, 2014, 35(15): 198–201.
- [33] CHEN L, LIU F, YANG Y, *et al.* Oxygen-enriched fermentation improves the taste of black tea by reducing the bitter and astringent metabolites [J]. Food Res Int, 2021, 148: 110613.
- [34] 杨云飞, 王玉婉, 林家正, 等. 发酵中氧对红茶品质的影响及富氧发酵工艺优化[J]. 食品工业科技, 2023. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306-2022100312
- YANG YF, WANG YW, LIN JZ, *et al.* Effect of oxygen in fermentation on quality of black tea and optimization of oxygen-enriched fermentation process [J]. Sci Technol Food Ind, 2023. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100312
- [35] KONG X, XU W, ZHANG K, *et al.* Effects of reaction temperature, pH and duration on conversion of tea catechins and formation of theaflavins and theasinensins [J]. Food Biosci, 2023, 54: 102911.
- [36] RAHNAN MM, HOSSAIN MM, DAS R, *et al.* Changes in phytochemicals and determination of optimum fermentation time during black tea manufacturing [J]. J Sci Res, 2020, 12(4): 657–664.
- [37] WANG H, SHEN S, WANG J, *et al.* Novel insight into the effect of fermentation time on quality of Yunnan Congou black tea [J]. LWT, 2022, 155: 112939.
- [38] JOLVIS PKR. Fermentation: The key step in the processing of black tea [J]. J Biosyst Eng, 2016, 41(2): 85–92.
- [39] 崔宏春, 张建勇, 赵芸, 等. 发酵条件对红茶茶色素形成的影响研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(8): 227–233.
- CUI HC, ZHANG JY, ZHAO Y, *et al.* Research progress on the effect of fermentation conditions on the formation of tea pigment in black tea [J]. Food Mach, 2022, 38(8): 227–233.
- [40] 徐斌, 江和源, 张建勇, 等. 不同pH条件下TSs的形成机理及其与TFs的竞争形成研究[J]. 茶叶科学, 2015, 35(3): 281–289.
- XU B, JIANG HY, ZHANG JY, *et al.* Study on the formation mechanism of TSs and its competitive formation with TFs under different pH conditions [J]. Tea Sci, 2015, 35(3): 281–289.
- [41] 陈以义, 江光辉. 红茶变温发酵理论探讨[J]. 茶叶科学, 1993, 13(2): 81–86.
- CHEN YY, JIANG GH. Discussion on the theory of tea fermentation at varying temperature [J]. Tea Sci, 1993, 13(2): 81–86.
- [42] 谢念祠, 周浩, 周品谦, 等. 变温发酵对保靖黄金茶1号夏季鲜叶制成工夫红茶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 220–226.
- XIE NC, ZHOU H, ZHOU PQ, *et al.* Effect of variable temperature fermentation on the quality of Congou black tea made from Baojing golden tea No.1 fresh leaves in summer [J]. Food Ferment Ind, 2022, 48(8): 220–226.
- [43] HUA JJ, XU Q, YUAN HB, *et al.* Effects of novel fermentation method on the biochemical components change and quality formation of Congou black tea [J]. J Food Compos Anal, 2021, 96: 103751.
- [44] 张雁飞, 李立祥, 张小福, 等. 冷冻对红茶品质的影响[J]. 茶叶科学, 2013, 33(4): 370–376.
- ZHANG YF, LI LX, ZHANG XF, *et al.* Effect of freezing on quality of black tea [J]. Tea Sci, 2013, 33(4): 370–376.
- [45] 聂占一, 严星, 龙维民, 等. 冷冻技术在红茶加工中的应用[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(9): 82–85.
- NIE ZY, YAN X, LONG WM, *et al.* Effect of freezing withering on quality of Gongfu black tea [J]. Hubei Agric Sci, 2018, 57(9): 82–85.
- [46] 牛小军, 黄海涛, 李红莉, 等. 不同冷冻胁迫时间对茶鲜叶中酶活性和

- 营养成分的影响[J]. 中国茶叶, 2023, 45(9): 37–42.
- NIU XJ, HAUNG HT, LI HL, *et al.* Effects of different freezing stress time on enzyme activities and nutrients in fresh tea leaves [J]. *China Tea*, 2023, 45(9): 37–42.
- [47] YABUKI C, YAGI K, NANJO F. Highly efficient synthesis of theaflavins by tyrosinase from mushroom and its application to theaflavin related compounds [J]. *Proc Biochem*, 2017, 55: 61–69.
- [48] 叶飞, 高士伟, 郑鹏程, 等. 利用砂梨多酚氧化酶减少夏秋红茶苦涩味研究[J]. 湖北农业科学, 2012, (24): 5685–5689, 5699.
- YE F, GAO SW, ZHENG PC, *et al.* Study on reducing bitter taste of summer and autumn black tea by pear polyphenol oxidase [J]. *Hubei Agric Sci*, 2012, (24): 5685–5689, 5699.
- [49] 仝佳音, 杨毅坚, 杨方慧, 等. 添加多酚氧化酶和纤维素酶对大叶种红茶品质的影响[J]. 陕西农业科学, 2020, 66(5): 50–53.
- TONG JY, YANG YJ, YANG FH, *et al.* Effects of polyphenol oxidase and cellulase on the quality of large leaf black tea [J]. *Shaanxi Agric Sci*, 2020, 66(5): 50–53.
- [50] 俞露婷, 袁海波, 王伟伟, 等. 光照强度对发酵叶主要生化成分动态变化的影响[J]. 茶叶科学, 2016, 36(2): 149–159.
- YU LT, YUAN HB, WANG WW, *et al.* Effects of light intensity on dynamic changes of main biochemical components in fermented leaves [J]. *Tea Sci*, 2016, 36(2): 149–159.
- [51] 俞露婷, 袁海波, 王伟伟, 等. 红茶发酵过程生理生化变化及调控技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(22): 263–269.
- YU LT, YUAN HB, WANG WW, *et al.* Research progress on physiological and biochemical changes and regulation techniques of black tea fermentation [J]. *Chin Agric Sci Bulletin*, 2015, 31(22): 263–269.
- [52] 谭俊峰. 超高压对茶叶主要品质成分含量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- TAN JF. Effect of ultra-high pressure on the content of main quality components in tea [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [53] 郑红发, 赵熙, 黄浩, 等. 发酵和渥堆联用技术对红茶品质的影响研究[J]. 茶叶通讯, 2017, 44(1): 33–36
- ZHEN HF, ZHAO Y, HUANG H, *et al.* Study on effects of combined fermentation and stacking technology on quality of black tea [J]. *Tea Commun*, 2017, 44(1): 33–36.
- [54] 黄建琴, 王文杰, 丁勇, 等. 冷冻萎凋对工夫红茶品质的影响[J]. 中国茶叶, 2005, (2): 18–19.
- HUANG JQ, WANG WJ, DING Y, *et al.* Effect of freezing withering on quality of Gongfu black tea [J]. *China Tea*, 2005, (2): 18–19.
- [55] 侯炳豪, 陈佳豪, 黄浩, 等. 冷冻处理对茶鲜叶与萎凋叶细胞破损率及红茶茶黄素含量影响研究[J]. 茶叶通讯, 2020, 47(3): 421–426.
- HOU BH, CHEN JH, HUANG H, *et al.* Effect of freezing treatment on cell damage rate of fresh and wilted leaves and theaflavin content of black tea [J]. *Tea Bulletin*, 2020, 47(3): 421–426.
- [56] MISHRA BB, GAUTAM S, SHARMA A. Free phenolics and polyphenol oxidase (PPO): The factors affecting post-cut browning in eggplant (*Solanum melongena*) [J]. *Food Chem*, 2013, 139: 105–114.
- [57] 艾仄宜, 李荣林, 叶禹彤, 等. 草莓粗酶液促进发酵改善秋季红茶的理化品质[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 184–191, 219.
- AI ZY, LI RL, YE YT, *et al.* Strawberry crude enzyme liquid promotes fermentation to improve physicochemical quality of autumn black tea [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2021, 37(8): 184–191, 219.
- [58] 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 different light withering time on flavor components of Tieguanyin [J]. *J Trop Crop*, 2018, 39(9): 1856–1862.
- [59] 刘建军, 张金玉, 彭叶, 等. 不同光质摊青对夏秋茶树鲜叶挥发性物质及其绿茶品质影响研究[J]. 茶叶科学, 2022, (4): 42.
- LIU JJ, ZHANG JY, PENG Y, *et al.* Study on effects of different light quality on volatiles and green tea quality in fresh leaves of summer and autumn tea trees [J]. *Tea Sci*, 2022, (4): 42.
- [60] 滑金杰, 袁海波, 江用文, 等. 萎凋光照强度对鲜叶物理特性及呼吸特性影响的研究[J]. 茶叶科学, 2014, 34(3): 288–296.
- HUA JJ, YUAN HB, JIANG YW, *et al.* Study on effects of withering light intensity on physical and respiratory characteristics of fresh leaves [J]. *Tea Sci*, 2014, 34(3): 288–296.
- [61] 周琳, 陈周一琪, 王玉花, 等. 光质对茶树愈伤组织中茶多酚及抗氧化酶活性的影响[J]. 茶叶科学, 2012, 32(3): 210–216.
- ZHOU L, CHEN ZYQ, WANG YH, *et al.* Effects of light quality on the activities of tea polyphenols and antioxidant enzymes in tea callus [J]. *Tea Sci*, 2012, 32(3): 210–216.
- [62] LI Y, HE C, YU X, *et al.* Effects of red-light withering on the taste of black tea as revealed by non-targeted metabolomics and transcriptomics analysis [J]. *LWT*, 2021, 147: 111620.
- [63] LI Y, HE C, YU X, *et al.* Study on improving aroma quality of summer-autumn black tea by red-light irradiation during withering [J]. *LWT*, 2022, 154: 112597.
- [64] WANG P, CHEN S, GU M, *et al.* Exploration of the effects of different blue LED light intensities on flavonoid and lipid metabolism in tea plants via transcriptomics and metabolomics [J]. *Int J Molecul Sci*, 2020, 21(13): 4606.
- [65] MA Q, SONG L, NIU Z, *et al.* Red light regulates the metabolite biosynthesis in the leaves of “Huangjinya” through amino acid and phenylpropanoid metabolisms [J]. *Front Plant Sci*, 2021, 12: 810888.
- [66] 项丽慧, 林馥茗, 孙威江, 等. LED 黄光对工夫红茶萎凋过程香气相关酶基因表达及活性影响[J]. 茶叶科学, 2015, 35(6): 559–566.
- XIANG LH, LIN FM, SUN WJ, *et al.* Effect of LED yellow light on gene expression and activity of flavor-related enzymes during Fusou black tea withering [J]. *Tea Sci*, 2015, 35(6): 559–566.
- [67] 陈寿松. LED 对乌龙茶萎凋光响应及其理化品质的影响研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- CHEN SS. Effect of LED on wilting light response and physicochemical quality of Oolong tea [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry

- University, 2014.
- [68] 林家正, 涂政, 陈琳, 等. 红光萎凋对茶叶挥发性成分及其成品红茶品质的影响[J]. 茶叶科学, 2021, 41(3): 393–405.
- LIN JZ, TU Z, CHEN L, *et al.* Effects of red light withering on volatile components of tea and quality of finished black tea [J]. *Tea Sci*, 2021, 41(3): 393–405.
- [69] ZHANG XB, DU XF. Effects of exogenous enzymatic treatment during processing on the sensory quality of summer Tieguanyin Oolong tea from the Chinese Anxi County [J]. *Food Technol Biotechnol*, 2015, 53(2): 180–189.
- [70] LI Q, LI Y, LUO Y, *et al.* Shifts in diversity and function of the bacterial community during the manufacture of Fu brick tea [J]. *Food Microbiol*, 2019, 80: 70–76.
- [71] JIA W, ZHAO Y, LIAO S, *et al.* Dynamic changes in the diversity and function of bacterial community during black tea processing [J]. *Food Res Int*, 2022, 161: 111856.
- [72] LI Q, CHAI S, LI Y, *et al.* Biochemical components associated with microbial community shift during the pile-fermentation of primary dark tea [J]. *Front Microbiol*, 2018, 9: 1509.
- [73] QI D, MIMA A, CHEN W, *et al.* Characterization of the volatile compounds profile of the innovative broken oolong-black tea in comparison with broken oolong and broken black tea [J]. *Food Control*, 2021, 129: 108197.
- [74] SHARMA C, BHARDWAJ NK. Biotransformation of fermented black tea into bacterial nanocellulose via symbiotic interplay of microorganisms [J]. *Int J Biol Macromolecul*, 2019, 132: 166–177.
- [75] LIU C, LIN H, WANG K, *et al.* Study on the trend in microbial changes during the fermentation of black tea and its effect on the quality [J]. *Foods*, 2023, 12(10): 1944.
- [76] TONG W, YU J, WU Q, *et al.* Black tea quality is highly affected during processing by its leaf surface microbiome [J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(25): 7115–7126.
- [77] XIANG M, CHU J, CAI W, *et al.* Microbial succession and interactions during the manufacture of Fu brick tea [J]. *Front Microbiol*, 2022, 13: 892437.
- [78] JIN G, WANG Y, LI M, *et al.* Rapid and real-time detection of black tea fermentation quality by using an inexpensive data fusion system [J]. *Food Chem*, 2021, 358: 129815.
- [79] BAG S, MONDAL A, BANIK A. Exploring tea (*Camellia sinensis*) microbiome: Insights into the functional characteristics and their impact on tea growth promotion [J]. *Microbiol Res*, 2022, 254: 126890.
- [80] ZHAO M, SU XQ, NIAN B, *et al.* Integrated meta-omics approaches to understand the microbiome of spontaneous fermentation of traditional Chinese Pu-erh tea [J]. *Msystems*, 2019. DOI: 10.1128/mSystems.00680-19
- [81] MA Y, DUAN S, ZHANG D, *et al.* Microbial succession and the dynamics of chemical compounds during the solid-state fermentation of Pu-erh tea [J]. *Applied Sci*, 2017, 7(2): 166.
- [82] NURMILAH S, CAHYANA Y, UTAMA GL. Metagenomics analysis of the polymeric and monomeric phenolic dynamic changes related to the indigenous bacteria of black tea spontaneous fermentation [J]. *Biotechnol Report*, 2022, 36: e00774.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介

刘亚兵, 硕士, 主要研究方向为茶叶加工。
E-mail: lybgz628@163.com

潘科, 博士, 研究员, 主要研究方向为茶叶精深加工。
E-mail: 148450502@qq.com