网络出版时间:2025-11-26 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2026.05.006

LED红光萎凋对红茶关键酶活性、理化性质及挥发性物质的影响

杨涵越[1],李永焜[1],谢侗[1],王龙华[1],付佳音[1],曲东[1,2],习林杰[1,2],燕飞[1,2,3,4]
(1 陕西理工大学 生物科学与工程学院,陕西 汉中 723000;2 陕西省资源生物重点实验室,陕西 汉中 723000;3 陕南秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心,陕西 汉中 723000;4 陕西省"四主体一联合"茶产业校企联合研究中心,陕西 汉中 723000)

[摘 要] 【目的】研究LED红光对红茶萎凋过程中关键酶活性、理化性质及挥发性物质动态变化的调控作用,为优质红茶的萎凋加工提供参考。【方法】以室内自然萎凋为对照(CK),设置LED红光(650 nm,2 000 lx)萎凋处理组(RL),分别在萎凋处理后0,2,4,6,8和10 h取样,测定多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)、β-葡萄糖苷酶(β-GC)活性及茶多酚、游离氨基酸、可溶性糖、总黄酮含量,结合GC-IMS技术分析挥发性物质组成,并通过主成分分析明确不同萎凋阶段的品质差异。【结果】红光萎凋8 h时茶叶中的PPO活性最高,为15.65 U/g,较CK提升8.70%;萎凋10 h时茶叶中的POD活性达16.26 U/g,较CK提升25.08%;萎凋4 h时茶叶中的β-GC活性达到最高,为4.58 U/g;红光萎凋下,茶多酚含量在2,4和8 h时极显著减少($P<0.01$),黄酮含量在8和10 h时极显著下降($P<0.01$),而可溶性糖和游离氨基酸含量分别在红光萎凋10 h和8~10 h时极显著增加($P<0.01$);红光萎凋10 h时,游离氨基酸含量为3.58%,较CK提升20.95%。通过GC-IMS共鉴定出85种挥发性物质,在红光萎凋4 h时,加速青味物质(如水杨酸甲酯、(Z)-4-庚烯醇)减少,果香物质(如柠檬烯、α-松油烯)增加,较CK提前2 h完成。红光萎凋后期(6~10 h)果香、酒香类物质(2-己酮、3-甲基丁醇)显著增加,酸味物质(乙二醇单丁醚)减少,内含物及香气种类在10 h最丰富。主成分分析表明,红光萎凋8和10 h时样品主成分差异显著(累计解释率为68.9%)。【结论】LED红光萎凋通过激活β-葡萄糖苷酶及调控氧化酶活性,显著促进糖苷类前体物质水解和果香物质生成,其中萎凋4 h为香气转化的关键节点。红光萎凋10 h时游离氨基酸和可溶性糖等内含物和挥发性物质种类、含量最丰富。

[关键词] 红茶;LED红光萎凋;关键酶活性;气相-离子迁移谱(GC-IMS)技术
[中图分类号] TS272.52 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)05-0052-14

Effects of LED red light withering on key enzyme activities, physicochemical properties and volatile compounds of black tea

YANG Hanyue[1], LI Yongkun[1], XIE Tong[1], WANG Longhua[1], FU Jiayin[1], QU Dong[1,2], XI Linjie[1,2], YAN Fei[1,2,3,4]
(1 *College of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi* 723000, *China*; 2 *Shaanxi Bio-Resources Key Laboratory, Hanzhong, Shaanxi* 723000, *China*; 3 *Coordination and Innovation Center for Comprehensive Development of Qinba Biological Resources, Hanzhong, Shaanxi* 723000, *China*; 4 *Shaanxi Province Four Subjects and One Joint Tea University & Enterprise Alliance Research Center, Hanzhong, Shaanxi* 723000, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aimed to explore the role of LED red light in regulating the dynamic changes of key enzyme activities, physicochemical properties and volatile compounds during the withering pro-

[收稿日期] 2025-02-24 [修回日期] 2025-04-09
[基金项目] 陕西省重点研发计划项目(2024NC-YBXM-038);陕西理工大学研究生创新基金项目(SLGYCX2532)
[作者简介] 杨涵越(2000—),女,四川达州人,在读硕士,主要从事茶叶种植及加工研究。E-mail:yhy09029968@163.com
[通信作者] 燕飞(1982—),男,山西长治人,副教授,硕士生导师,主要从事茶叶种植及加工研究。E-mail:yanfei@snut.edu.cn

cess of black tea, providing a reference for the withering processing of high-quality black tea.【Method】Natural indoor withering was used as the control (CK), with an LED red light (650 nm, 2 000 lx) withering treatment group (RL) established for comparison. Samples were collected at 0, 2, 4, 6, 8, and 10 h, respectively, to determine the activities of polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD), and β-glucosidase (β-GC), along with the contents of tea polyphenols, free amino acids, soluble sugars, and flavonoids. Volatile compounds were analyzed using the GC-IMS technology, and principal component analysis was performed to clarify the quality differences between different withering stages.【Result】During red-light withering, PPO activity in tea leaves peaked at 8 h, reaching 15.65 U/g, an 8.70% increase compared to CK. POD activity reached its maximum at 10 h, reaching 16.26 U/g, a 25.08% increase of compared to CK. β-GC activity in tea leaves reached its peak of 4.58 U/g at 4 h. Under red light withering, tea polyphenols content decreased significantly at 2, 4, and 8 h ($P<0.01$). Flavonoid content decreased significantly at 8 and 10 h ($P<0.01$). Soluble sugar and free amino acid contents significantly increased at 10 h and 8－10 h of red light withering ($P<0.01$). After 10 h of red light withering treatment, free amino acid content rose to 3.58%, representing a 20.95% increase compared to CK. GC-IMS identified 85 volatile compounds. At 4 h of red light withering, the reduction of green-tasting substances (e.g., methyl salicylate and (*Z*)-4-heptenol) accelerated, while fruit-scented substances (such as limonene and α-pinene) increased, completing the process 2 hours earlier than CK. During the late withering stage (6 to 10 h), fruit and wine-like substances (e.g., 2-hexanone and 3-methylbutanol) significantly increased, whereas acidic substances (ethylene glycol monobutyl ether) decreased. The content and variety of constituents and aromas were most abundant at 10 h. Principal component analysis (PCA) showed that there were significant differences in the principal components of the samples at 8 h and 10 h, with a cumulative explanatory power of 68.9%.【Conclusion】LED red light withering significantly promoted glycosidic precursor hydrolysis and the generation of fruity aroma compounds by activating β-glucosidase and modulating oxidative enzymes, with the 4 h identified as the key node for aroma transformation. At 10 h of red light withering, the variety and content of free amino acids, soluble sugars, other constituents, and volatile compounds were most abundant.

Key words: black tea; LED red light withering; key enzyme activities; GC-IMS technology

萎凋是红茶加工的第一道工序，对红茶滋味和香气的形成至关重要[1]。萎凋过程中叶片失水逐渐萎缩，叶质由硬变软，细胞内物质的浓度提高，诱导鲜叶中某些酶活性增强，从而大分子物质和糖苷类等香气前体物质发生酶促降解，促使多酚类化合物氧化和芳香物质的形成，为后续工序的生化变化奠定了丰富的物质基础[2]。在红茶萎凋过程中涉及多种酶的催化作用，其中多酚氧化酶、过氧化物酶、β-葡萄糖苷酶对红茶品质形成起到关键作用。

随着消费者对茶叶口感要求的提高，萎凋工艺进行了冷冻萎凋[3]、热风萎凋[4]、光照萎凋[5]等多种工艺革新，取得了很好的效果。有研究表明，光照萎凋处理后茶叶的茶多酚、氨基酸等理化成分含量发生了变化，为茶叶品质的提高奠定了基础[6]。但不同光照对茶叶的影响具有差异性，如LED蓝光萎凋能提高茶叶的净光合速率，促进可溶性糖含量的积累，降低酚氨比；而黄光、橙光萎凋则可以改善茶叶的香气和滋味，赋予茶叶甜美的滋味和清新醇厚的滋味[7-9]。红光作为植物生长发育所必需的光质和植物吸收最多的光质，对植物的光合作用、形态建成及叶绿素、类胡萝卜素、可溶性糖等物质的积累具有重要意义，在茶叶的生长及加工补光过程中也得到了广泛应用[10]。王加真等[11]将红光应用于茶树的夜间补光，发现红光补光有利于茶树芽叶质量、茶多酚含量的增加，促进了茶树对糖类物质的积累；黄藩等[12]研究发现，红光和黄光萎凋都可以提高白茶的氨基酸、茶多酚、酯型儿茶素和儿茶素总量，且红光效果最优；林家正等[13]研究发现，随着红光萎凋强度增加，茶叶挥发性物质中酯类物质增多。

香气是衡量茶叶品质的重要评价标准之一，受茶树品种、生长环境和加工技术等多种因素的影响[14-16]。β-葡萄糖苷酶(β-glucosidase，β-GC)可水解糖苷类香气前体物质形成挥发性萜烯醇类、芳樟醇类等物质，释放出大量的香叶醇、芳樟醇挥发性物质，形成红茶的特征香气，产生独特的甜花香

味[1]。气相-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectroscopy,GC-IMS)技术具有无需样品前处理、灵敏度高、检测速度快等优点,可对挥发性化合物进行可视化分析,并对食品及其加工过程样品的香气品质进行判断[17-18]。近年来,GC-IMS在茶叶方面应用广泛,如品种鉴定、风味研究、安全性检测等。罗玉琴等[19]利用GC-IMS技术对福建白茶进行产地判别。JIN等[20]使用GC-IMS技术建立闽北3个小产区大红袍产地判别模型。

传统的茶叶萎凋要视天气情况而定,不同季节的天气会使太阳光波长和光照强度产生差异,从而影响自然萎凋的可控性,导致茶叶品质不稳定。目前,关于人工光源对茶叶萎凋的研究多为萎凋后制成的成品茶中指标的检测,而萎凋过程中生化成分及挥发性物质的动态变化尚未开展系统性研究,因而限制了红茶萎凋技术的开发与创新。

本研究以室内自然萎凋为对照,在传统红茶加工工艺中,用LED红光萎凋工艺替代传统室内自然萎凋工艺,从关键酶活性和理化成分变化以及香气品质成分角度,系统比较了LED红光萎凋对红茶萎凋叶的影响,以期为高品质红茶的萎凋加工提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

本研究所用茶树品种为陕茶1号。2023年4月20日上午08:00—10:00按一芽二叶的采摘标准,采摘于陕西省汉中市南郑区曹家坝镇汉中农科所茶叶种植资源圃。

试剂:儿茶素(Catechin,C)标准品,纯度≥98%,上海源叶生物科技有限公司;标准品*L*-茶氨酸(*L*-Theanine),纯度≥99%,北京百灵威科技有限公司;茚三酮(分析纯),天津市大茂化学试剂厂;正构酮:2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮和2-壬酮(分析纯),阿拉丁公司;99.999%氮气,山东海能科学仪器有限公司。

仪器和设备:照射光源为LNDF-100G型LED光源,波长650 nm,功率100 W,电压180~240 V;低温保存箱,青岛海尔生物医疗股份有限公司;高速台式冷冻离心机,湘潭湘仪仪器有限公司;UV-3200S型紫外分光光度计,上海MAPADA仪器有限公司;Agilent 1260高效液相色谱仪,美国Agilent公司;FlavourSpec®气相离子迁移谱,G.A.S.公司(德国,Dortmund)。

1.2 试验方法

茶叶萎凋过程在陕西理工大学秦巴红茶研究所自制的光照萎凋架中进行。将采收的鲜叶放置于萎凋槽中,用LED红光(650 nm)照射萎凋10 h。室内自然光萎凋强度为800 lx,LED红光光照强度为2 000 lx,光源萎凋距离为45 cm,光照初始温度为25 ℃,相对湿度为25.0%~28.0%。以室内自然萎凋为对照,萎凋初始温度为25 ℃,相对湿度25.0%~32.5%。萎凋结束后萎凋叶含水率为58%~60%。对照组(CK)和LED红光萎凋处理组(RL)茶叶质量均为3 kg,摊叶厚度为3 cm。每隔2 h翻叶1次并分别在0,2,4,6,8和10 h取样,标记后密封,用液氮冷冻后转移至-80 ℃冰箱留存备用。试验采用当天同一批茶鲜叶在不同萎凋架进行室内自然萎凋和LED红光萎凋的平行样品制备。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 *酶活性测定* 多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase,POD)活性测定均采用曹建康等[21]的方法。β-葡萄糖苷酶(β-glucosidase,β-GC)活性测定参照刘泽玉等[22]的方法进行。

1.3.2 *理化指标测定* 茶多酚含量测定参照GB/T 8313—2018[23]的方法;游离氨基酸含量测定参照GB/T 8314—2013[24]的方法;黄酮含量测定参照王丽丽等[25]的改良方法;可溶性糖含量测定参照张正竹[26]的方法。

1.3.3 *挥发性物质含量测定* 精确称取1.0 g样品,置于20 mL顶空瓶中密封后进样。顶空孵育温度80 ℃,孵育时间15 min,载气为高纯度N_2(纯度≥99.999%),不分流模式。采用MXT-5色谱柱(15 m×0.53 mm×1 μm),分析时间20 min;色谱柱温度60 ℃;IMS温度45 ℃;进样体积300 μL;孵育时间15 min;孵育温度80 ℃;进样针温度85 ℃;孵化转速500 r/min。

通过比较保留时间和迁移时间,使用正构酮C4~C9作为外标,参考计算每种化合物的保留指数,通过GC-IMS设备内置的NIST数据库和IMS数据库对样品气味成分进行定性分析。以2-辛醇为内标进行半定量,根据化合物与2-辛醇峰体积比值计算各挥发性成分的含量。数据的可视化采用GC-IMS设备自带仪器分析软件Vocal插件Gallery plot提取二维地形图谱,使用Reporter对3D地形图

谱进行提取。仪器检测条件参考罗玉琴等[19]的方法并稍作修改，初始漂移气体流速EPC1为150 mL/min，载气流速EPC2为2 mL/min，运行10 min后EPC1维持150 mL/min，EPC2流速爬升至10 mL/min，运行20 min时EPC1为150 mL/min，EPC2为100 mL/min，在20 min时结束运行程序。每个样品检测3次。

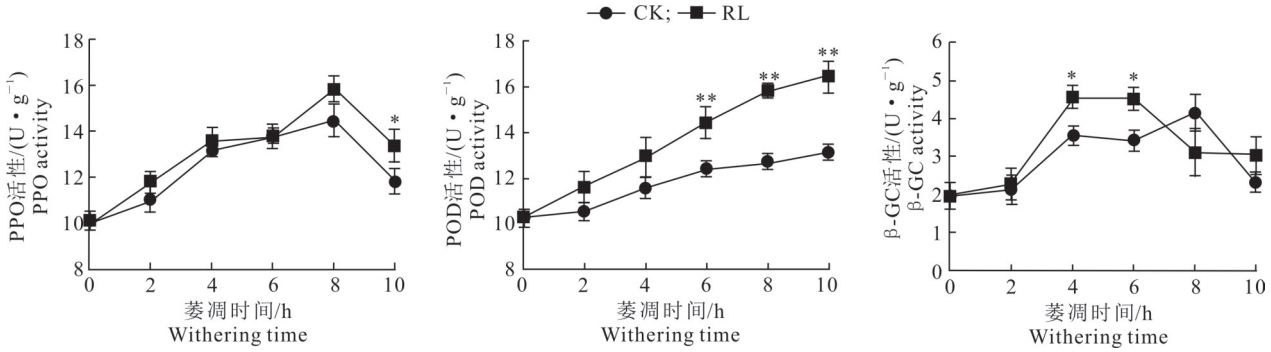
1.4　数据统计分析

每个试验重复测定3次，测定结果以“平均值±标准差”表示。利用Excel 2019（Microsoft，USA）进行数据处理，试验数据结果采用Graphpad Pism 9.5进行统计处理并绘图，主成分分析使用Origin 2018绘制。软件IBM SPSS 19.0进行多重比较分析，采用单因素方差分析（ANOVA）和Bonferroni检验（$P>0.05$，差异不显著；$P<0.05$，差异显著；$P<0.01$，差异极显著）。

2　结果与分析

2.1　LED红光对红茶萎凋过程中关键酶活性的影响

多酚氧化酶、过氧化物酶和β-葡萄糖苷酶是红茶加工中影响红茶色、香、味品质形成的3种关键酶[27]。LED红光萎凋过程中红茶酶活性的变化见图1。



*表示差异显著（$P<0.05$）；**表示差异极显著（$P<0.01$）。图2同。

* indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates highly significant difference ($P<0.01$). The same as in Fig. 2.

图1　LED红光萎凋过程中红茶酶活性的变化

Fig. 1　Changes in enzyme activities of black tea during withering under LED red light

由图1可以看出，在LED红光萎凋处理下，随着萎凋处理时间延长，茶叶中的多酚氧化酶活性呈先增大后降低的趋势，且在LED红光萎凋8 h时多酚氧化酶活性最高，为15.65 U/g，较自然萎凋增加8.70%；在萎凋10 h时过氧化物酶活性显著高于对照组（$P<0.05$）。在LED红光萎凋处理下，随萎凋时间延长，茶叶中的过氧化物酶活性逐步增强。红光萎凋6 h后茶叶中的过氧化物酶活性均极显著高于对照组（$P<0.01$），萎凋10 h时过氧化物酶活性最大，为16.26 U/g，较对照组增加25.08%。在LED红光萎凋处理后2 h茶叶中的β-葡萄糖苷酶活性和对照组无差异，在LED红光萎凋2 h之后β-葡萄糖苷酶活性先升高后降低，在萎凋4 h时β-葡萄糖苷酶活性达到最高，为4.58 U/g；在萎凋4～6 h时β-葡萄糖苷酶活性较对照显著增加（$P<0.05$）。

2.2　LED红光对红茶萎凋过程中理化成分的影响

多酚类是茶汤中苦涩味的主体成分，可溶性糖和氨基酸分别是茶汤中甜味和鲜爽味的主体成分。LED红光萎凋过程中红茶理化成分含量的变化如图2所示。由图2可以看出，在LED红光萎凋处理下，随萎凋处理时间延长，茶叶中的茶多酚含量呈逐渐降低趋势，在萎凋2，4和8 h时茶叶中的茶多酚含量较对照极显著降低（$P<0.01$），而在萎凋6和10 h时无显著差异（$P>0.05$）。在LED红光萎凋过程中，茶叶中的黄酮含量呈逐渐降低趋势，在萎凋8和10 h时黄酮含量较对照极显著降低（$P<0.01$）。在LED红光萎凋0和2 h时茶叶中的可溶性糖含量与对照变化趋势一致，且无显著差异（$P>0.05$）；而LED红光萎凋处理6和10 h时可溶性糖含量较对照显著或极显著增加。随LED红光萎凋处理时间延长，茶叶中的游离氨基酸含量升高，在萎凋0～2 h时游离氨基酸含量变化不大，在萎凋处理4，8和10 h时游离氨基酸含量较对照显著或极显著增加，其中萎凋10 h时游离氨基酸含量为3.58%，较对照提高了20.95%。

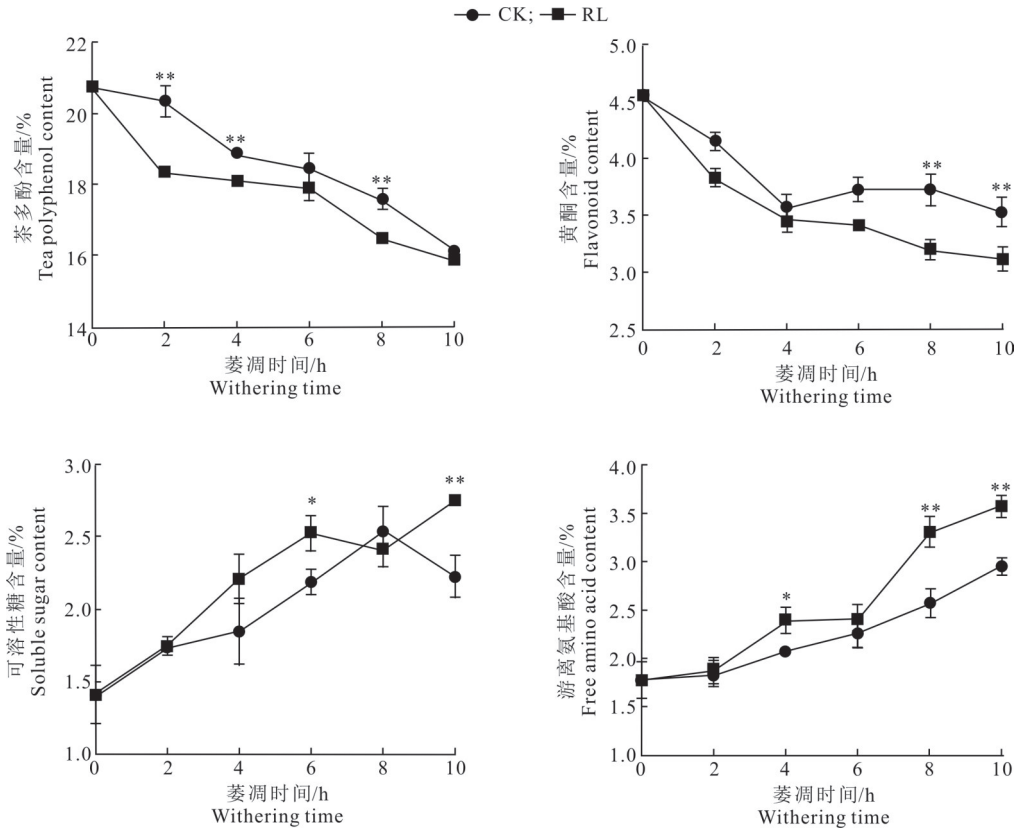


图2 LED红光萎凋过程中红茶理化成分含量的变化

Fig. 2 Changes of physicochemical constituents in black tea during LED red light withering

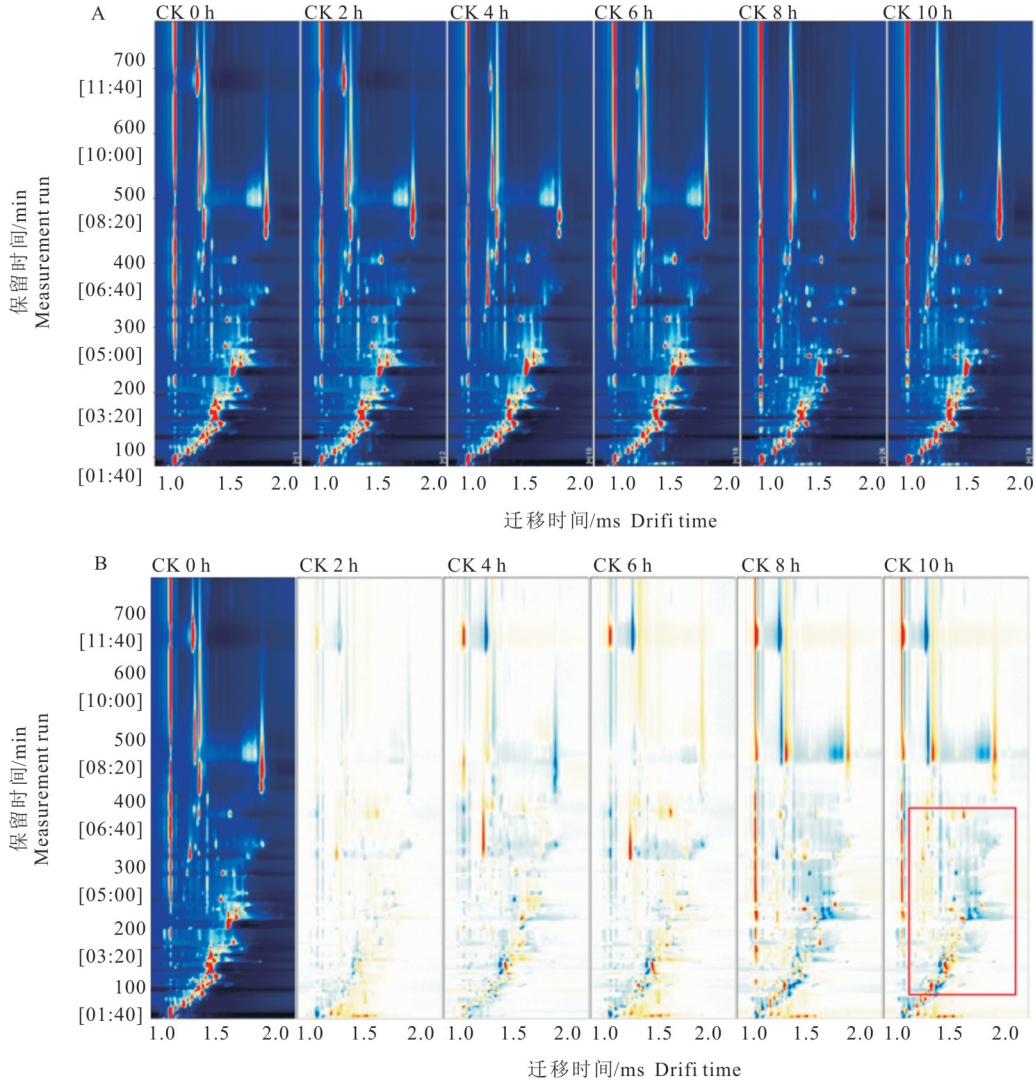
2.3 LED红光萎凋过程中的GC-IMS分析

室内自然萎凋和LED红光萎凋过程中的GC-IMS二维谱图如图3和图4所示。由图3和图4可知,茶叶萎凋过程中挥发性成分大多在Rt(0~400 s)内出峰。在CK 2 h和RL 2 h中,整个背景接近于白色,表明萎凋2 h时,CK 2 h和RL 2 h样品与茶鲜叶还有较高的重合度,此时香气物质未产生较明显变化。萎凋至4 h时,大部分区域开始变蓝,大量鲜茶叶中特有的香气物质开始减少,红色部分逐渐增多,在萎凋过程中一些香气物质相对含量逐渐升高并产生新的化合物。与CK 4 h相比,RL 4 h蓝色部分明显增多,表明在LED红光萎凋4 h时鲜茶叶中大量挥发性物质开始转化。在萎凋10 h时与鲜叶中的香气物质差异最大,可能是红光能量较高,使得叶片水分快速散失,从而促进了萎凋茶叶中的代谢活动,包括细胞结构的破坏和前体物质的消耗,改变了香气物质的转化和合成,进而提升茶叶的香气品质[13]。

为了阐明LED红光萎凋过程中红茶挥发性成分的变化,通过GC-IMS设备内置气相保留指数数据库与迁移时间数据库资料,对0,2,4,6,8和10 h挥发性风味物质进行定性分析,针对已定性的挥发性物质,基于峰体积值计算各组分的相对含量。结果表明,茶鲜叶及萎凋叶中含有挥发性化合物超过90种,其中有85种挥发性物质可进行定性分析,包括酯类化合物13种,醛类化合物25种,酮类化合物17种,醇类化合物13种,呋喃类化合物4种,其他类化合物4种,烯萜类化合物6种,吡嗪类化合物3种,详见表1。醛类和酮类化合物是主要的挥发性物质,整体特征与金文刚等[18]对汉中不同产地茶叶气味指纹的研究结果类似,原因可能是红光促进了茶叶萎凋过程中脂肪酸代谢路径的香气合成,即红光照射有利于萎凋中后期醛类物质的形成和积累。

如表1所示,共鉴定出85种物质,其中9种化合物均检出了单体和二聚体的形式,故共检出已知挥发物组分76种。GC-IMS定性出的物质共包括8类化合物,其中以醇类、酮类、醛类和酯类为主。室内自然萎凋和LED红光萎凋挥发性的差异化合物主要集中于萎凋8和10 h。醇类差异显著的化合物有6种,分别为芳樟醇、(*E*)-氧化芳樟醇、(*E*)-2-己烯-1-

醇1、2-己醇、异丁醇和1-戊烯-3-醇；酯类差异显著的化合物有3种，分别为水杨酸甲酯、醋酸甲酯和乙酸丙酯；酮类差异显著的化合物有6种，分别为甲基-5-庚烯-2-酮、3-羟基-2-丁酮、丙酮、2-丁酮、3-戊酮和(*E*)-3-戊烯-2-酮；醛类差异显著的化合物有7种，分别为苯乙醛、辛醛、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛、庚醛、(*E*)-2-己烯醛、(*E*,*E*)-2,4-辛二醛和(*E*)-2-戊烯醛；烯萜类、呋喃类和吡嗪类差异显著的化合物仅各有1种，依次为苯乙烯、2-乙酰基呋喃和3-甲基-2-异丁基吡嗪。



A. GC-IMS二维图；B. 差异对比图。每个点代表样品中的一种挥发性成分，物质浓度越高则对应的颜色越深，红色较高，蓝色较低。采用差异对比模式进行分析，以萎凋0 h作为参比（茶鲜叶），从中扣除其GC-IMS谱图，原始背景色退为白色，红色点表示挥发性成分的含量显著高于参照样品，蓝色点则表示低于参比样品。相比不同位置的红色点即是其差异化合物的直观体现。图4同。

A. GC-IMS 2D plot; B. Difference comparison plot. Each point represents a volatile compound in the sample. The higher the concentration of the substance, the darker the corresponding color; red indicates higher concentration, and blue indicates lower concentration. Analysis employed a comparison mode, using 0 h withered leaves (tea fresh leaves) as the reference, from which the GC-IMS spectrum was deducted. The original background color appeared white. Red dots indicate that the content of volatile compounds is significantly higher than that of the reference sample, while blue dots indicate that it is lower than that of the reference sample. The red dots at different positions serve as an intuitive visual representation of the differential compounds. The same as in Fig. 4.

图3　室内自然萎凋过程中红茶挥发性香气物质的GC-IMS谱图

Fig. 3　GC-IMS spectra of volatile aroma substances in black tea during indoor natural withering

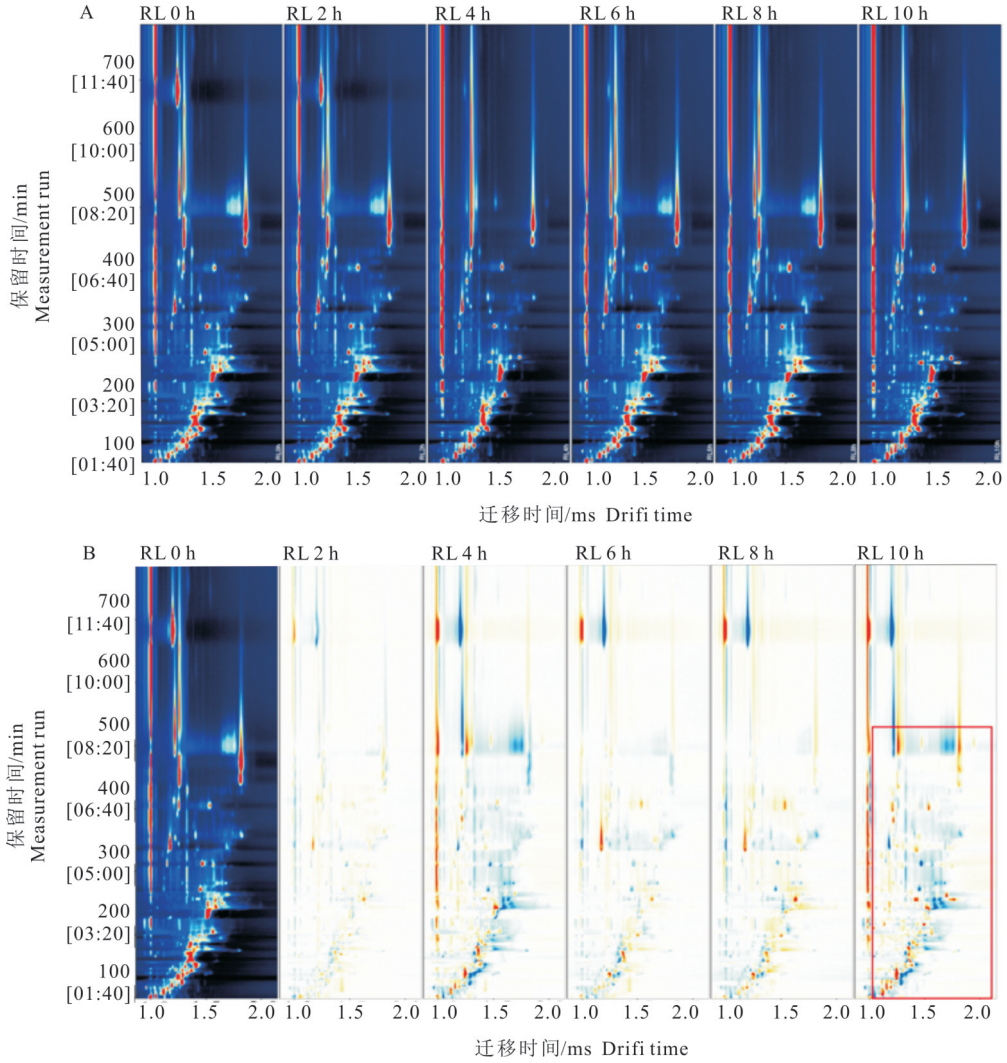


图 4 LED 红光萎凋过程中红茶挥发性香气物质的 GC-IMS 谱图

Fig. 4 GC-IMS spectra of volatile aroma substances in black tea during LED red light withering

表 1 LED 红光萎凋过程中红茶挥发性物质的变化

Table 1 Changes of volatile compounds in black tea during LED red light withering

挥发性成分 Volatile compounds	相对含量 Relative content										
	0 h	2 h		4 h		6 h		8 h		10 h	
	CK (PL)	CK	RL	CK	RL	CK	RL	CK	RL	CK	RL
醇类 Alcohols											
芳樟醇-M Linalool-M	6.26	5.94	6.87	7.21	8.88	6.45	7.83	6.52	0.53	6.72	0.59
芳樟醇-D Linalool-D	3.87	3.56	4.12	3.75	4.94	3.72	4.51	3.68	0.69	3.71	0.64
(*E*)-氧化芳樟醇(*E*)-Linalool oxide	9.50	10.41	8.83	8.23	6.39	9.41	7.66	9.38	13.51	9.02	12.70
(*Z*)-氧化芳樟醇(*Z*)-Linalool oxide	2.79	3.47	2.68	2.20	2.06	2.84	2.38	2.85	3.53	2.63	3.43
己醇 Hexanol	0.14	0.09	0.19	0.11	0.17	0.11	0.17	0.10	0.18	0.11	0.17
3-呋喃甲醇 3-Furanmethanol	0.14	0.17	0.14	0.17	0.14	0.17	0.14	0.17	0.38	0.17	0.30
1-辛烯-3-醇-M 1-Octen-3-ol-M	0.28	0.33	0.34	0.39	0.32	0.33	0.33	0.35	0.19	0.35	0.30
1-辛烯-3-醇-D 1-Octen-3-ol-D	0.25	0.26	0.25	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.36	0.25	0.29
(*E*)-2-己烯-1-醇(*E*)-2-Hexen-1-ol	4.50	4.36	4.31	4.91	6.68	4.58	5.45	4.61	7.06	4.70	6.49
2-己醇 2-Hexanol	0.72	0.82	0.65	0.82	0.89	0.79	0.77	0.81	2.06	0.80	0.89
3-甲基丁醇 3-Methylbutanol	0.42	0.65	0.54	0.72	0.82	0.60	0.67	0.65	0.39	0.66	0.74
异丁醇 Isobutyl alcohol	0.83	0.79	0.86	0.90	1.07	0.84	0.96	0.84	0.32	0.86	0.60
1-戊烯-3-醇 1-Penten-3-ol	0.62	0.36	0.54	0.31	0.36	0.43	0.45	0.37	0.92	0.37	0.41

表 1（续） Table 1(continued)

挥发性成分 Volatile compounds	相对含量 Relative content										
	0 h	2 h		4 h		6 h		8 h		10 h	
	CK（PL）	CK	RL	CK	RL	CK	RL	CK	RL	CK	RL
酯类 Esters											
水杨酸甲酯 Methyl salicylate	18.02	13.52	14.79	7.25	7.85	13.02	11.46	11.34	0.69	10.58	0.72
己酸甲酯-M Methyl caproate-M	0.20	0.09	0.10	0.15	0.04	0.15	0.07	0.13	0.02	0.14	0.02
己酸甲酯-D Methyl caproate-D	0.14	0.09	0.09	0.11	0.06	0.11	0.07	0.10	0.09	0.11	0.07
乙酸己酯-M Hexyl acetate-M	0.22	0.26	0.24	0.14	0.19	0.20	0.22	0.07	0.22	0.06	0.07
乙酸己酯-D Hexyl acetate-D	0.07	0.11	0.09	0.07	0.07	0.09	0.08	0.06	0.08	0.04	0.08
乙酸戊酯 Amyl acetate	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.36	0.07	0.17
乙酸糠酯 Furfuryl acetate	0.25	0.18	0.19	0.11	0.20	0.18	0.19	0.16	0.93	0.15	0.46
2-甲基乙酸丁酯 2-Butylmethyl acetate	0.07	0.06	0.07	0.07	0.05	0.07	0.06	0.07	0.02	0.07	0.03
乙酸异戊酯 Isoamyl acetate	0.11	0.12	0.14	0.14	0.07	0.12	0.11	0.13	0.03	0.13	0.06
醋酸甲酯 Methyl acetate	1.50	1.49	1.54	2.11	1.99	1.69	2.29	1.76	2.29	1.85	3.18
乙酸乙酯 Ethyl acetate	0.89	0.52	0.78	0.47	0.68	0.63	0.73	0.54	0.20	0.54	0.35
异戊酸甲酯 Methyl isovalerate	0.22	0.22	0.26	0.28	0.22	0.24	0.24	0.25	0.21	0.25	0.21
乙酸丙酯 Propyl acetate	0.01	0.27	0.01	0.07	0.03	0.12	0.02	0.16	0.02	0.12	0.01
酮类 Ketones											
甲基-5-庚烯-2-酮 Methyl-5-hepten-2-one	4.51	7.11	6.45	11.49	8.22	7.64	7.30	8.69	1.90	9.24	5.79
4-羟基-4-甲基-2-戊酮-M 4-Hydroxy-4-methyl-2-pentanone-M	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.27	0.03	0.16
4-羟基-4-甲基-2-戊酮-D 4-Hydroxy-4-methyl-2-pentanone-D	0.09	0.11	0.10	0.13	0.13	0.11	0.11	0.11	0.29	0.12	0.35
2-庚酮-M 2-Heptanone-M	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02
2-庚酮-D 2-Heptanone-D	0.04	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.10
1-辛烯-3-酮 1-Octen-3-one	0.12	0.15	0.14	0.19	0.13	0.15	0.14	0.16	0.15	0.17	0.19
苯乙酮-M Acetophenone-M	0.09	0.13	0.11	0.22	0.23	0.15	0.17	0.17	0.12	0.18	0.15
苯乙酮-D Acetophenone-D	0.03	0.10	0.17	0.22	0.2	0.15	0.21	0.17	0.11	0.18	0.15
2-己酮 2-Hexanone	0.28	0.70	0.41	0.86	0.59	0.61	0.49	0.72	0.10	0.73	0.43
3-羟基-2-丁酮 3-Hydroxy-2-butanone	0.90	0.24	0.66	0.20	0.20	0.45	0.44	0.29	0.63	0.31	0.15
丙酮 Acetone	3.49	3.14	3.32	3.34	3.97	3.32	3.63	3.26	7.53	3.31	6.41
2-丁酮 2-Butanone	2.97	3.50	2.96	4.63	3.48	3.68	3.21	3.92	6.60	4.07	7.45
3-辛酮-M 3-Octanone-M	0.18	0.27	0.20	0.31	0.25	0.25	0.22	0.27	0.33	0.28	0.40
3-辛酮-D 3-Octanone-D	0.12	0.07	0.08	0.07	0.07	0.09	0.07	0.07	0.24	0.08	0.06
2-戊酮 2-Pentanone	1.95	2.42	2.21	2.63	2.72	2.33	2.45	2.46	2.04	2.47	2.78
3-戊酮 3-Pentanone	3.57	3.88	3.84	4.57	5.17	4.00	4.48	4.14	4.39	4.23	5.85
(*E*)-3-戊烯-2-酮(*E*)-3-Penten-2-one	0.61	0.74	0.63	0.72	0.66	0.69	0.64	0.71	1.06	0.71	1.42
醛类 Aldehydes											
苯乙醛-M Phenyl acetaldehyde-M	1.68	1.73	1.77	1.65	2.19	1.69	1.97	1.69	1.77	1.67	1.55
苯乙醛-D Phenyl acetaldehyde-D	1.34	1.78	1.86	1.78	1.84	1.63	1.85	1.73	2.52	1.71	3.23
苯甲醛-M Benzaldehyde-M	0.62	0.58	0.58	0.55	0.74	0.58	0.65	0.57	1.03	0.57	0.70
苯甲醛-D Benzaldehyde-D	1.49	1.18	1.30	1.27	1.78	1.31	1.53	1.25	1.20	1.28	1.05
辛醛-M Octanal-M	0.60	0.51	0.52	0.28	0.38	0.47	0.45	0.42	0.71	0.39	0.46
辛醛-D Octanal-D	0.63	0.44	0.41	0.13	0.20	0.41	0.31	0.33	1.06	0.29	0.57
(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*E*,*E*)-2,4-Heptadienal	0.08	0.59	0.13	0.09	0.13	0.26	0.13	0.32	0.09	0.22	0.09
(*E*)-2-辛烯醛(*E*)-2-Octenal	0.90	0.77	0.86	0.73	0.68	0.80	0.77	0.77	0.74	0.77	0.52
庚醛 Heptanal	0.62	0.53	0.47	0.48	0.53	0.54	0.50	0.52	1.96	0.51	1.12
(*E*)-2-己烯醛(*E*)-2-Hexenal	6.89	7.24	6.33	6.73	6.75	6.99	6.65	8.05	6.57	7.43	6.65
香柠檬醛 Citraldehyde	0.08	0.13	0.11	0.29	0.42	0.17	0.26	0.19	0.12	0.22	0.13
壬醛-M Nonanal-M	0.17	0.16	0.18	0.16	0.18	0.16	0.18	0.16	0.55	0.16	0.44
壬醛-D Nonanal-D	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.18	0.05	0.13
2-甲基-2-戊烯醛 2-Methyl-2-pentenal	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
(*E*)-2-庚烯醛-M (*E*)-2-heptenal-M	0.16	0.16	0.17	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.25	0.16	0.28
(*E*)-2-庚烯醛-D (*E*)-2-heptenal-D	0.29	0.22	0.29	0.27	0.20	0.26	0.25	0.25	0.28	0.26	0.27
(*Z*)-4-庚烯醛(*Z*)-4-Heptenal	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04

表1(续) Table 1(continued)

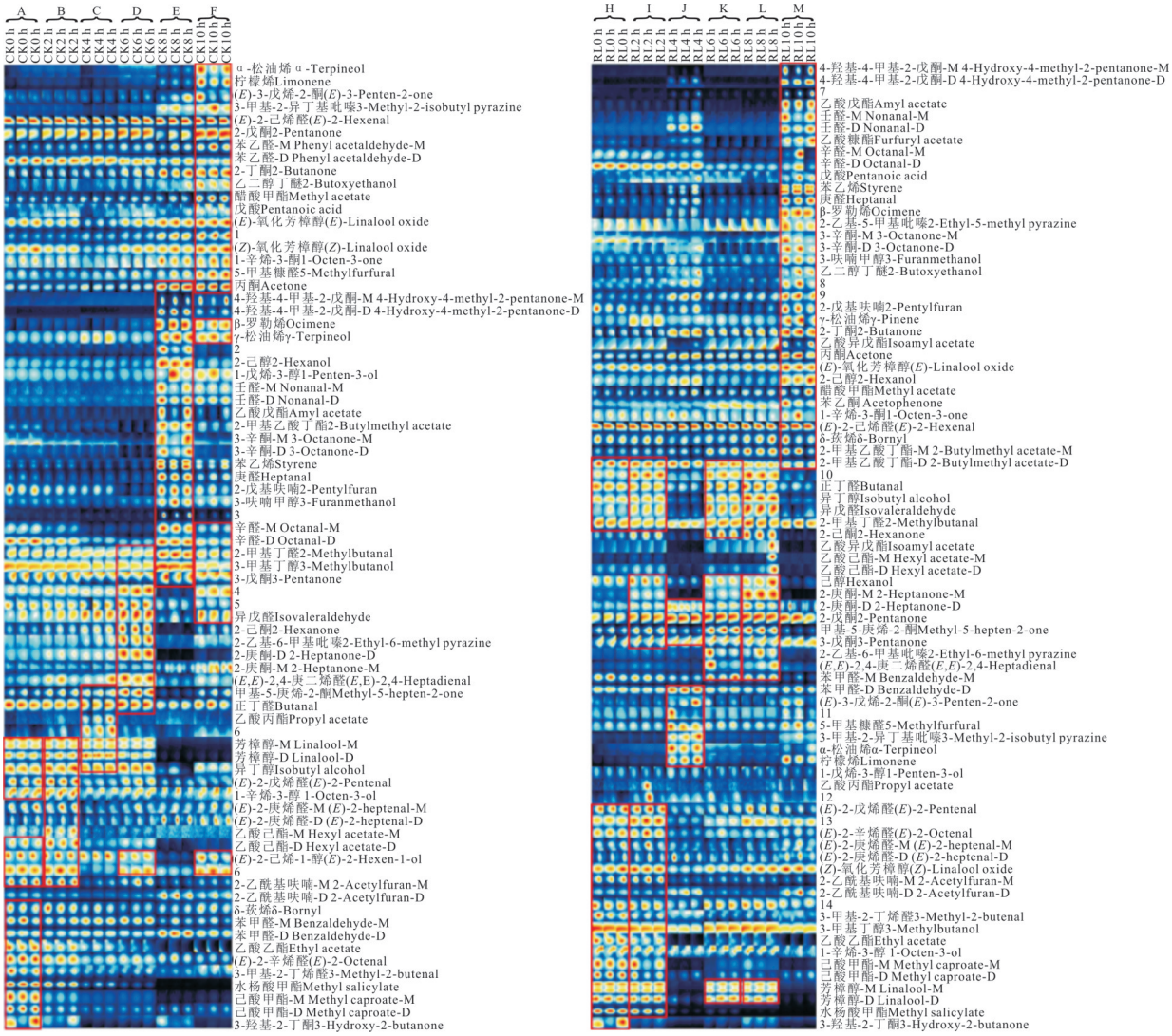
挥发性成分 Volatile compounds	相对含量 Relative content										
	0 h	2 h		4 h		6 h		8 h		10 h	
	CK(PL)	CK	RL	CK	RL	CK	RL	CK	RL	CK	RL
(*E*,*E*)-2,4-辛二醛(*E*,*E*)-2,4-Octanedialdehyde	0.23	0.21	0.28	0.34	0.28	0.26	0.28	0.27	1.51	0.29	1.21
5-甲基糠醛 5-Methylfurfural	0.07	0.09	0.06	0.08	0.09	0.08	0.07	0.08	0.13	0.08	0.13
(*E*)-2-戊烯醛(*E*)-2-Pentenal	1.84	1.91	2.25	2.29	1.57	2.01	1.92	2.06	1.13	2.12	1.59
正丁醛 Butanal	2.32	2.01	2.34	2.25	2.52	2.19	2.43	2.15	1.93	2.20	2.09
2-甲基丁醛 2-Methylbutanal	1.17	1.05	1.15	1.15	1.17	1.12	1.16	1.11	1.68	1.13	1.27
异戊醛 Isovaleraldehyde	0.55	0.63	0.56	0.64	0.69	0.60	0.62	0.62	0.94	0.62	0.48
3-甲基-2-丁烯醛 3-Methyl-2-butenal	0.30	0.33	0.29	0.26	0.26	0.29	0.27	0.29	0.15	0.28	0.35
戊醛 Pentanal	0.04	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.10	0.06	0.15
烯萜类 Olefinaceous terpenes											
δ-茨烯 δ-Bornyl	0.40	0.37	0.47	0.37	0.40	0.38	0.44	0.37	0.42	0.38	0.41
苯乙烯 Styrene	0.47	0.42	0.50	0.48	0.38	0.46	0.44	0.45	1.99	0.46	1.16
柠檬烯 Limonene	0.05	0.09	0.07	0.08	0.05	0.08	0.06	0.08	0.22	0.08	0.47
α-松油烯 α-Terpineol	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03	0.11
γ-松油烯 γ-Terpineol	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.08	0.03	0.10
β-罗勒烯 Ocimene	0.09	0.13	0.11	0.13	0.08	0.12	0.10	0.12	0.56	0.12	0.41
呋喃类 Furans											
2-乙酰基呋喃-M 2-Acetylfuran-M	1.39	1.33	1.45	1.41	0.66	1.37	1.07	1.37	0.65	1.39	0.75
2-乙酰基呋喃-D 2-Acetylfuran-D	0.12	0.13	0.13	0.08	0.08	0.10	0.10	0.61	0.64	0.21	0.19
2-戊基呋喃 2-Pentylfuran	0.35	0.18	0.30	0.09	0.27	0.21	0.29	0.16	0.45	0.15	0.32
2-甲氧基呋喃 2-Methoxyfuran	0.30	0.21	0.24	0.16	0.18	0.22	0.21	0.20	0.48	0.19	0.45
吡嗪类 Pyrazines											
2-乙基-6-甲基吡嗪 2-Ethyl-6-methyl pyrazine	0.12	0.35	0.17	0.24	0.23	0.24	0.20	0.27	0.08	0.25	0.18
2-乙基-5-甲基吡嗪 2-Ethyl-5-methyl pyrazine	0.04	0.05	0.06	0.07	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.06	0.05
3-甲基-2-异丁基吡嗪 3-Methyl-2-isobutyl pyrazine	0.21	0.24	0.22	0.21	0.21	0.22	0.21	0.23	0.90	0.22	0.83
其他类 Other categories											
戊酸 Pentanoic acid	0.05	0.05	0.06	0.04	0.03	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.07
乙二醇丁醚 2-Butoxyethanol	0.06	0.08	0.07	0.07	0.05	0.07	0.06	0.07	0.09	0.07	0.09
2-甲基丁酸 2-Methylbutyric acid	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
对二甲苯 Paraxylene	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

注:风味物质后缀D、M分别为二聚体、单体。

Note: Suffixes D and M denote dimers and monomers of flavor compounds, respectively.

由图5可以看出,室内自然萎凋和LED红光萎凋过程中挥发性物质组成具有明显差异。从挥发性物质变化规律来看可分为2个时期,即萎凋前期(0~4 h)、萎凋后期(6~10 h)。萎凋4 h后鲜茶叶中的挥发性化合物逐渐减少,如(*Z*)-4-庚烯醛(油脂味)、(*E*)-2-庚烯醛(绿色蔬菜味)、水杨酸甲酯(冬绿薄荷味)等。在室内自然萎凋6 h时挥发性化合物显著升高,如甲基庚烯酮(柑橘味、果味)、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(脂肪醛味)、正丁醛(辛辣味)、2-己酮(果味)和2-庚酮(果味、草本木香味)等。E、F区域表示在室内自然萎凋8 h后挥发性化合物增加明显。E区域的挥发性化合物主要为异戊醛(桃子味)、正辛醛(脂肪橙气味)、3-呋喃甲醇、2-正戊基呋喃(果味)、庚醛(醛脂肪气味)、2-庚酮(果味、甜、草本木香)、3-辛酮(果香)、乙酸糠酯(甜味、香蕉味)、乙酸戊酯(温和的香蕉味)、2-己醇(酒味、果味),其中具有果味的2-庚酮和2-己醇相对含量显著增加。F区域的挥发性化合物主要为正己醇(温和的甜味)、2-戊酮(甜果香、酒香、木质香)、苯乙醛(风信子的气味)、乙酸甲酯(微甘、香)、5-甲糠基醛(香料味)等。E、F区域挥发性成分主要以果味和甜味为主,其中罗勒烯(柑橘味)、异戊醛(桃子味)在自然萎凋8和10 h阶段持续上升,乙二醇单丁醚(温和的酸味)在自然萎凋10 h中相对含量高,LED红光萎凋10 h中明显下降,这有助于改善茶叶的风味。H、I区域中(*Z*)-4-庚烯醇(青草味)、3-羟基-2-丁酮(奶油、香脂气味)、己酸甲酯(果香味)、水杨酸甲酯(冬绿薄荷味)等相对含量较高,这些成分在LED红光萎凋4 h

后其相对含量明显下降。J区域中柠檬烯（柠檬香味）、α-松油烯（柠檬、药用柑橘气味）、5-甲基糠醛（香料味）等相对含量在萎凋4 h时较高；K、L区域中2-己酮（果味）、2-甲基丁醛（发酵烘培味）、3-甲基丁醇（轻微酒精气味）、异丁醇（清新的酒味）等在萎凋6和8 h时相对含量显著高于其他样品；M区域中2-己醇（果味）、丙酮（令人愉悦的芳香味）、2-丁酮（甜味）等多种香气物质在萎凋10 h时相对含量较高，与PCA图中的分组规律一致：说明茶叶中的香气物质在萎凋4，6和10 h时发生显著变化。同时红光萎凋10 h时茶叶中挥发性物质的种类及其相对含量均多于其他萎凋时间段，表明红光萎凋对茶叶的香气和风味变化具有重要作用。在茶叶萎凋过程中发现，2-戊酮（甜果香、酒香）、(*E*)-2-己烯醛（奶酪味）等相对含量无较大变化，表明茶叶中这部分挥发性物质较为稳定，其含量不受萎凋工艺影响。



使用Gallery Plot插件绘制了6个时间段挥发性物质的指纹谱图，每个样品3个平行，图上方为样品名称，右侧为挥发性物质定性结果。红色代表浓度较高，黑色代表浓度较低。将指纹谱图分为A、B、C、D、E、F（室内自然萎凋），H、I、J、K、L、M（LED红光萎凋）12个区域，用红框标注出变化明显的挥发性化合物。

Fingerprint spectra of volatile compounds in six time periods were plotted using the Gallery Plot plug-in. Each sample 3 each parallel. Sample names are shown above each plot. Volatile compound identifications are displayed on the right. Red represents higher concentration and black represents lower concentration. The fingerprint profiles were categorized into 12 zones A，B，C，D，E，F（natural indoor withering），H，I，J，K，L，M（LED red light withering），with red rectangles highlighting volatiles exhibiting significant changes.

图5　室内自然萎凋和LED红光萎凋过程中红茶挥发性物质的GC-IMS指纹谱图

Fig. 5　GC-IMS fingerprints of black tea volatiles during indoor natural and LED red light withering

2.4 萎凋过程中茶叶挥发性物质的主成分分析

为了更好地区分室内自然萎凋和LED红光萎凋过程中挥发性化合物的差异,采用PCA对6个阶段的茶叶样品进行分析,结果如图6所示。由图6可以看出,室内自然萎凋PC1的贡献率为44.3%,PC2的贡献率为19.2%,累计贡献率为63.5%;而LED红光萎凋PC1的贡献率为48.5%,PC2的贡献率为20.4%,累计贡献率为68.9%。相同时间段的样品聚在一起,而不同时间段的样品则表现出较大差异。从主成分分析结果可以看出,CK 0 h、CK 2 h、CK 4 h样品间距离较小,说明在自然萎凋前4 h样品之间挥发性物质变化不大。RL 4 h与RL 0 h、RL 2 h样品间分离较远,而与RL 6 h靠近,说明RL 4 h和RL 6 h之间组分更接近,LED红光萎凋可加速挥发性物质的变化。

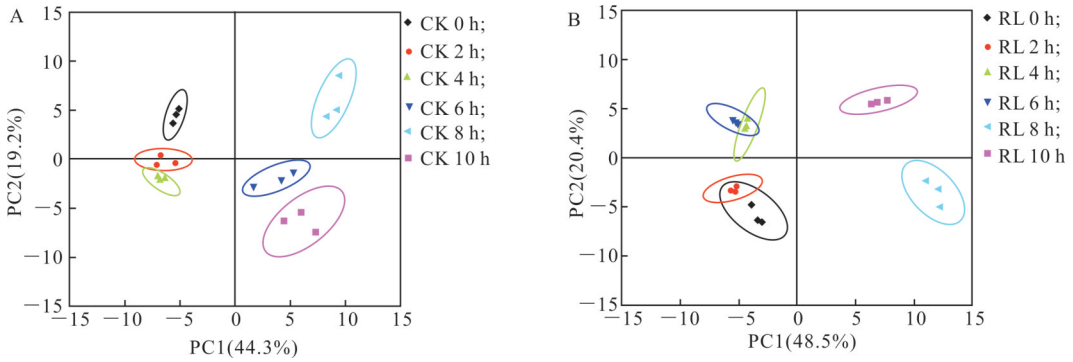


图6 室内自然萎凋和LED红光萎凋过程中红茶挥发性物质的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of black tea volatiles during indoor natural and LED red light withering

由图6可知,在萎凋后期(6~10 h)不同时间段样品之间呈现了明显的分离,说明在萎凋后期挥发性物质发生了很大变化。LED红光萎凋对茶叶萎凋后期挥发性组分的变化产生了显著影响,并加速了挥发性物质转化,对红茶的香气和风味变化具有重要作用,这与理化成分研究结果一致。

3 讨论与结论

光是影响植物光合生理的重要因子,鲜茶叶采摘后一段时间内仍存在活跃的生命活动。在鲜茶叶萎凋过程中,光照处理能促进茶叶品质的提升。LED红光萎凋工艺除了能够蒸发鲜茶叶水分外,也伴随着一系列的生物化学反应,体现为酶活性逐渐提高,蛋白质、碳水化合物水解,小分子物质增加,同时挥发性物质显著增加,对香气的形成具有积极作用。同时萎凋过程的变化规律也可以为红茶优良品质的形成提供科学依据。

本研究通过对比LED红光萎凋与室内自然萎凋对红茶品质的影响,揭示了红光处理在调控红茶酶活性、理化性质及挥发性物质转化中的独特作用。红光波长(650 nm)与植物光敏色素吸收谱高度匹配,可能通过光信号调控诱导酶活性变化。本试验结果表明,茶叶中的多酚氧化酶活性在红光萎凋8 h时达最高(15.65 U/g),较自然萎凋增加8.70%,表明红光通过增强胁迫响应提升了抗氧化酶活性,有效缓解了萎凋过程中的膜脂过氧化损伤,这与滑金杰等[2]提出的光调控抗氧化防御机制一致,进一步证实红光在维持萎凋叶细胞稳态中的重要作用。本研究中,茶叶中的过氧化物酶活性在红光萎凋10 h时达到最高(16.26 U/g),较自然萎凋提高25.08%。罗玲娜等[28]用不同光质萎凋白茶,也发现了类似的结果。本研究中,红光处理显著降低了茶叶中的茶多酚和黄酮类物质,减轻了苦涩味,这可能与多酚类物质在多酚氧化酶和过氧化物酶作用下发生酶促氧化反应,从而生成茶黄素类和茶红素类等物质有关。本研究中,LED红光萎凋10 h时茶叶中的可溶性糖含量提高了1.42%,这可能是由于红光萎凋增大了萎凋后期失水胁迫,使呼吸速率增强,而糖类物质作为呼吸代谢中的重要参与物质,使得多糖类物质分解为单糖,故红光萎凋下可溶性糖含量显著增加。本研究中,LED红光萎凋10 h时茶叶中的游离氨基酸含量较对照提高了20.95%。游离氨基酸含量的增加与蛋白质的水解有关[29],红光光源萎凋促进了蛋白质的水解,并诱导光敏色素对糖代谢的调控,提高了与糖代谢有关的酶活性[30],说明LED红光萎凋可促进茶叶中可溶性糖、游离氨基酸等活性成分的积累,为茶汤甜味和鲜爽度奠定基础,同时加快失水胁迫,使细胞液浓度增大,过氧化物酶活性增强。研究发现,β-葡萄糖苷酶与红茶的特征香气有关,β-葡萄糖苷酶活性

升高会引起挥发性物质总量中醇、醛类物质含量的提高。β-葡萄糖苷酶在萎凋 4 h时活性达到峰值（4.58 U/g），较对照组提升 38%；红光萎凋过程中β-葡萄糖苷酶活性先增大后降低，尤其在红光萎凋4 h时加速了糖苷类香气前体物质的水解，促进果香类挥发性物质的生成；此时萎凋叶中青味物质（水杨酸甲酯、(Z)-4-庚烯醇）明显下降，果香和甜香类物质逐渐增加，如柠檬烯、α-松油烯、5-甲基糠醛等，这些成分在红光萎凋 4 h时其相对含量明显升高，可能是β-葡萄糖苷酶作用下发生酶促氧化、聚合缩合反应，引起挥发性物质由茶叶的青草味向果香味转变。王婷婷[29]用不同光质萎凋铁观音也发现了相似的结果，LED蓝光能迅速提高β-葡萄糖苷酶活性，促进红茶花香物质的释放，这可能与光照萎凋过程中水分散失[30]有关，水分散失速率加快，细胞液浓度增大，酶活性增强。

关键香气物质是对茶叶香气品质有重要影响的挥发性物质，例如芳樟醇、α-法尼烯、苯甲醇、水杨酸甲酯等，都会影响茶叶品质[31-32]。研究表明，汉中茶叶中的关键香气类化合物主要包括苯乙醛、芳樟醇及芳樟醇的各类氧化物等[33-34]，其加工过程中的变化情况对茶叶品质有重要影响，其中苯乙醛是茶叶中蜜香气的主要来源，而芳樟醇及其氧化物不仅是茶叶中花香气的主要来源，也是红茶中含量最高的香气物质[35]，可作为特定红茶的特征物质。在鲜茶叶及萎凋初期茶叶中芳樟醇含量最高，而在红光萎凋 10 h时含量大量减少，这可能是萎凋末期茶叶中的含水量大幅下降，使得 β-葡萄糖苷酶的酶促水解受到抑制，从而导致芳樟醇含量急剧下降[36]。在红光萎凋 10 h时芳樟醇氧化物含量达到最高，成为萎凋末期茶叶中花香及清香的主要来源，对茶叶品质及茶汤气味具有重要影响，与李玉川等[37]的研究结果一致。

利用GC-IMS技术对LED红光萎凋过程中挥发性物质进行检测分析，发现室内自然萎凋和LED红光萎凋 6 个时间段样品之间得到了较好的分离，且存在显著差异。本研究共鉴定出 85 种可定性的香气化合物，包括酯类化合物 13 种，醛类化合物 25 种，酮类化合物 17 种，醇类化合物 13 种，呋喃类化合物 4 种，其他类化合物 4 种，烯萜类化合物 6 种，吡嗪类化合物 3 种。红光萎凋 4 h时青味物质转化加快，而室内自然萎凋 6 h时才开始转变，如水杨酸甲酯、(*E*)-2-庚烯醛、(*Z*)-4-庚烯醛等，同时果香物质增多，如 2-正戊基呋喃、2-庚酮、3-辛酮、乙酸糠酯、乙酸戊酯、2-己醇等。主成分分析显示，红光萎凋 8 和 10 h样品差异最大，表明红光对香气形成的时序调控具有特异性，与金文刚等[18]对汉中茶叶香气的研究相呼应。本研究结果表明，红光萎凋处理 4 h可缩短萎凋周期并提升香气品质，处理 10 h可最大化内含物积累，明确 4 和 10 h为关键调控节点，可视化呈现了茶叶在红光萎凋下不同阶段中的特征风味物质，为优质红茶的萎凋加工提供参考，未来可进一步探究红光与多光质协同效应，以开发兼具效率与风味的红茶萎凋新工艺。

[参考文献]

[1] LIU S J, LIU Y, WANG T Y, et al. The effects of different light storage conditions on volatile flavor compounds and sensory properties of melon fruit[J]. Food Bioscience, 2022, 48: 101826.

[2] 滑金杰，袁海波，江用文，等. 萎凋过程鲜叶理化特性变化及其调控技术研究进展[J]. 茶叶科学，2013，33(5)：465-472.
HUA J J, YUAN H B, JIANG Y W, et al. A review on the regulation technique of withering process and the change in physical and chemical properties of leaves[J]. Journal of Tea Science, 2013, 33(5): 465-472.

[3] 夏益民，王近近，袁海波. 不同冷冻和摇青工艺的红茶品质比较分析[J]. 现代食品科技，2023，39(2)：280-289.
XIA Y M, WANG J J, YUAN H B. Comparison on the quality of black tea prepared by different freezing and shaking processes [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 280-289.

[4] 张湘琳，凌智辉，胡维霞，等. 不同温度热风萎凋对红茶萎凋叶及成茶品质的影响[J]. 茶叶科学，2024，44(3)：483-492.
ZHANG X L, LING Z H, HU W X, et al. Effects of different temperature hot air withering on withered leaves and tea quality of black tea[J]. Journal of Tea Science, 2024, 44(3): 483-492.

[5] 王登良，张灵枝，毛明辉，等. 不同光波晒青对单枞茶品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2006，25(2)：56-59.
WANG D L, ZHANG L Z, MAO M H, et al. Effects of withered with different light-wave bands on qualities of Dancong tea [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2006, 25(2): 56-59.

[6] 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 J J, YUAN H B, JIANG Y W, et al. Effect of withering light intensity on physical characteristics and respiration of tea fresh leaves[J]. Journal of Tea Science, 2014, 34(3): 288-296.

[7] AI Z Y, ZHANG B B, CHEN Y Q, et al. Impact of light irradiation on black tea quality during withering[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(5): 1212-1227.

[8] 王婷婷，陈寿松，俞少娟，等. LED光萎凋对乌龙茶雨水青的光响应及对其品质的影响[J]. 热带作物学报，2016，37(1)：

47-52.
WANG T T, CHEN S S, YU S J, et al. Effect of LED light withering on light response and quality of oolong tea rain leaves [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(1): 47-52.

[9] 陈寿松,金心怡,游芳宁,等. 多次间歇LED光照射对铁观音风味组分的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(2):308-314.
CHEN S S, JIN X Y, YOU F N, et al. Influence of multi intermittence radiation by LED on flavor components in Tieguanyin tea[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 308-314.

[10] 王加真,金星,冯梅,等. 不同红蓝光配比对茶树生长及生物化学成分的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(10):159-161,172.
WANG J Z, JIN X, FENG M, et al. Effects of different red/blue LED light qualities on growth and biochemical components of tea plants[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(10): 159-161, 172.

[11] 王加真,张昕昱,金星,等. 红蓝光源茶园夜间补光对春茶产量、品质的影响[J]. 福建农业学报,2019,34(1):46-52.
WANG J Z, ZHANG X Y, JIN X, et al. Effects of red and blue LED light at night on growth and leaf quality of tea plants [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(1): 46-52.

[12] 黄藩,张厅,尧渝,等. 红光和黄光萎凋对白毫银针及寿眉白茶品质的影响研究[J]. 中国茶叶加工,2021(3):17-23.
HUANG F, ZHANG T, YAO Y, et al. Effect of red light withering and yellow light withering on the quality of Baihao Yinzhen and Shoumei white tea [J]. China Tea Processing, 2021(3): 17-23.

[13] 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 J Z, TU Z, CHEN L, et al. The effect of red light withering on the volatile components of tea leaves and the quality of black tea product [J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(3): 393-405.

[14] YANG Z Y, KOBAYASHI E, KATSUNO T, et al. Characterisation of volatile and non-volatile metabolites in etiolated leaves of tea (*Camellia sinensis*) plants in the dark[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2268-2276.

[15] ZENG L T, WATANABE N, YANG Z Y. Understanding the biosyntheses and stress response mechanisms of aroma compounds in tea (*Camellia sinensis*) to safely and effectively improve tea aroma[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(14): 2321-2334.

[16] 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.

[17] 朱荫,邵晨阳,张悦,等. 不同茶树品种龙井茶香气成分差异分析[J]. 食品工业科技,2018,39(23):241-246, 254.
ZHU Y, SHAO C Y, ZHANG Y, et al. Comparison of differences in aroma constituents of Longjing tea produced from different tea germplasms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(23): 241-246, 254.

[18] 金文刚,陈小华,耿敬章,等. 基于气相-离子迁移谱分析不同产地"汉中仙毫"气味指纹差异[J]. 食品与发酵工业,2021,47(5):231-237.
JIN W G, CHEN X H, GENG J Z, et al. Analysis of 'Hanzhong Xianhao' odor finger prints from different places based on GC-IMS[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(5): 231-237.

[19] 罗玉琴,韦燕菊,林琳,等. 基于GC-IMS技术的福建白茶产地判别[J]. 农业工程学报,2021,37(6):264-273.
LUO Y Q, WEI Y J, LIN L, et al. Origin discrimination of Fujian white tea using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(6): 264-273.

[20] JIN J Y, ZHAO M Y, ZHANG N, et al. Stable isotope signatures versus gas chromatography-ion mobility spectrometry to determine the geographical origin of Fujian Oolong tea (*Camellia sinensis*) samples [J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(5): 955-964.

[21] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社,2017.
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2017.

[22] 刘泽玉,苏柘僮,杨明,等. 马蓝叶中β-葡萄糖苷酶的提取及酶学性质的研究[J]. 中草药,2010,41(9):1461-1464.
LIU Z Y, SU Z B, YANG M, et al. Extraction and enzymatic characterization of β-glucosidase from *Indigofera tinctoria* leaves[J]. Chinese Herbal Medicine, 2010, 41(9): 1461-1464.

[23] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法:GB/T 8313—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of total polyphenols and catechins content in tea: GB/T 8313—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[24] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 茶:游离氨基酸总量的测定:GB/T 8314—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Tea: determination of free amino acids content: GB/T 8314—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

[25] 王丽丽,林清霞,宋振硕,等. 分光光度法测定茶叶中总黄酮含量[J]. 茶叶学报,2021,62(1):1-6.
WANG L L, LIN Q X, SONG Z S, et al. Spectrophotometric determination of total flavonoids in tea[J]. Acta Tea Sinica, 2021, 62(1): 1-6.

[26] 张正竹. 茶叶生物化学实验教程[M]. 北京:中国农业出版社,2009.
ZHANG Z Z. Tea biochemistry experiment course[M]. Bei-

jing：China Agriculture Press，2009.

[27] 萧伟祥．制茶发酵理论与制茶实践[J]．福建茶叶，1987，9(3)：2-6.
XIAO W X. Theory and practice of tea fermentation[J]. Tea in Fujian，1987，9(3)：2-6.

[28] 罗玲娜，林永胜，周子维，等．不同LED光质萎凋对白茶品质的影响[J]．福建农林大学学报(自然科学版)，2016，45(3)：262-268.
LUO L N，LIN Y S，ZHOU Z W，et al. Effects of different LED light quality withering on white tea quality[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)，2016，45(3)：262-268.

[29] 王婷婷．LED光对铁观音萎凋过程酶活性及品质影响研究[D]．福州：福建农林大学，2016.
WANG T T. Effect of LED light on enzyme activity and quality of Tieguanyin during withering[D]. Fuzhou：Fujian Agriculture and Forestry University，2016.

[30] 黄藩．工夫红茶光补偿萎凋技术工艺研究[D]．北京：中国农业科学院，2015.
HUANG F. Study on the technology of light compensation withering of Gongfu black tea[D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2015.

[31] LI Y C，HE C，YU X L，et al. Study on improving aroma quality of summer-autumn black tea by red-light irradiation during withering[J]. LWT，2022，154：112597.

[32] 杨明容，马燕，杨四润，等．气质联用分析云南老树茶香气成分[J]．中国农学通报，2012，28(24)：261-269.
YANG M R，MA Y，YANG S R，et al. The analysis of aroma compositions in the old plant tea by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2012，28(24)：261-269.

[33] 张晨．汉中红茶和绿茶中风味物质研究[D]．陕西汉中：陕西理工大学，2019.
ZHANG C. Study on flavor substances in Hanzhong black tea and green tea[D]. Hanzhong，Shaanxi：Shaanxi University of Technology，2019.

[34] 刘珍珍，苏莹，李会宁，等．汉中炒青绿茶香气成分及香气特征分析[J]．湖南农业科学，2019(9)：78-84.
LIU Z Z，SU Y，LI H N，et al. Analysis of aroma components and characteristics of Hanzhong roasted green tea[J]. Hunan Agricultural Sciences，2019(9)：78-84.

[35] 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.

[36] 丁其欢，武珊珊，熊昌云，等．工夫红茶研究进展[J]．热带农业科学，2021，41(4)：110-116.
DING Q H，WU S S，XIONG C Y，et al. Research progress in congou black tea[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture，2021，41(4)：110-116.

[37] 李玉川，陈玉琼，秦慕雪，等．不同光质对夏秋红茶萎凋叶挥发性成分的影响[J]．食品安全质量检测学报，2022，13(14)：4415-4422.
LI Y C，CHEN Y Q，QIN M X，et al. Effects of different light on the volatile components of withering leaves of summer-autumn black tea[J]. Journal of Food Safety and Quality，2022，13(14)：4415-4422.

（责任编辑：屈李纯）