

# 光质对茶叶香气代谢物的影响研究进展

岳翠男<sup>1,2</sup>, 王治会<sup>1,2</sup>, 石旭平<sup>1,2</sup>, 江新凤<sup>1,2</sup>, 李延升<sup>1,2</sup>, 杨普香<sup>1,2,\*</sup>

(1.江西省蚕桑茶叶研究所, 江西 南昌 330043; 2.江西省茶叶质量与安全控制重点实验室, 江西 南昌 330043)

**摘要:** 茶叶香气是影响茶叶品质的重要因素之一, 也是茶树在进化过程中对环境反应而形成的生化生理特征。光对植物生长发育的调控已被广泛研究, 光质对茶树次生代谢产物的影响也逐渐被关注。研究茶叶加工过程中不同光源对茶叶制品挥发性香气物质调控的机理, 将有助于改善或提高茶叶品质。本文详细介绍了茶树响应光信号的色素以及光对茶叶香气物质的影响, 重点综述了不同光质条件下, 不同种类香气物质的代谢特征, 并对光质在茶叶生产中的应用进行展望。

**关键词:** 光质; 茶叶香气物质; 萜类; 苯丙烷类/苯环型化合物; 脂肪酸衍生物; 糖苷结合型香气化合物

## Effects of Light Quality on Aroma Metabolites in Tea: A Review of Recent Literature

YUE Cuinan<sup>1,2</sup>, WANG Zhihui<sup>1,2</sup>, SHI Xuping<sup>1,2</sup>, JIANG Xinfeng<sup>1,2</sup>, LI Yansheng<sup>1,2</sup>, YANG Puxiang<sup>1,2,\*</sup>

(1. Jiangxi Sericulture and Tea Research Institute, Nanchang 330043, China;

2. Jiangxi Key Laboratory of Tea Quality and Safety Control, Nanchang 330043, China)

**Abstract:** Tea aroma is one of the important factors affecting tea quality, and is also a biochemical and physiological characteristic of tea trees in response to the environmental in the process of evolution. The regulation of light on plant growth and development has been widely studied, and the influence of light wave on secondary metabolites of tea trees has been a topic of increasing interest. Studies on the regulatory mechanism of different light sources on the formation of volatile aroma compounds during tea processing will contribute to tea quality improvement. In this paper, the pigments that occur in tea trees in response to light signals, and the effect of light on aroma compounds of tea are elaborated. Emphasis is put on the metabolic characteristics of various aroma substances under different light quality conditions, and future prospects for the application of light quality in tea processing are discussed.

**Keywords:** light quality; aroma metabolites in tea; terpenes; phenylpropanoids/benzenoids; volatile fatty acid derivatives; glycosidically bound volatile compounds

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190217-076

中图分类号: TS272.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2020)05-0299-07

引文格式:

岳翠男, 王治会, 石旭平, 等. 光质对茶叶香气代谢物的影响研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(5): 299-305. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190217-076. <http://www.spkx.net.cn>

YUE Cuinan, WANG Zhihui, SHI Xuping, et al. Effects of light quality on aroma metabolites in tea: a review of recent literature[J]. Food Science, 2020, 41(5): 299-305. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190217-076. <http://www.spkx.net.cn>

光是调控植物生长发育的关键环境因素, 光不仅是植物必不可少的能源, 而且是影响植物从黄化状态向去

黄化状态转变的重要信号, 其主要通过光周期、光强和光质的形式参与调控植物, 是植物生长发育、形态建成

收稿日期: 2019-02-17

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-19); 江西省现代农业产业技术体系建设专项(JXARS-02);

江西茶树种质资源遗传多样性鉴定与创新利用(20143ACF60006);

江西省茶叶质量与安全控制重点实验室茶叶加工课题(20192BCD40007)

第一作者简介: 岳翠男(1990—)(ORCID: 0000-0002-3697-2982), 女, 硕士研究生, 研究方向为茶叶生物化学。

E-mail: 1207199622@qq.com

\*通信作者简介: 杨普香(1965—)(ORCID: 0000-0002-5420-1727), 女, 研究员, 学士, 研究方向为茶产业生产技术与推广。

E-mail: 1185812469@qq.com

和生理代谢过程、细胞成分生物合成和植物全生命周期基因表达的刺激因子,尤其是光质对植物的光合作用、生长、品质和产量等均有较大的影响<sup>[1-3]</sup>。红光/远红光、蓝光、UV-A (320~500 nm) 或UV-B (280~320 nm) 和激素信号通路的整合、质量、持续时间和强度密切相关,通过触发生理反应和控制植物生长发育,对植物产生深远的影响。红光对光合系统的发育很重要,其可以通过抑制光合作用易位,从而增加植物的淀粉积累;蓝光对叶绿体发育、叶绿素形成和气孔开放有重要作用<sup>[4-5]</sup>。不同波段的灯光处理可以影响茶叶风味物质次级代谢的路径,从而影响茶叶品质<sup>[6]</sup>。当前,国内外均有相关的文献报道,本文就当前关于光质对茶叶香气代谢物的影响进行综述,主要包括以下几个方面:1) 茶树体内响应光信号的色素;2) 光质对光敏色素的调控;3) 光质对茶叶在制品香气物质的影响;并讨论了光质在实际生产和应用中对茶叶香气的影响。

## 1 茶树体内的主要光敏色素

植物响应光信号的发育可塑性是由专门的信息转导光感受器赋予的。高等植物的主要光感受器有5个植物色素、两个隐花色素、一个向光素、一个超色素<sup>[7-9]</sup>;高等植物含有多种光敏色素,其脂蛋白是由一个发散的基因家族编码的<sup>[10]</sup>,光敏色素的存在形式为:1) 红光( $\lambda_{\max}=660\text{ nm}$ )吸收型(phytochrome red-light, Pr);2) 远红光( $\lambda_{\max}=730\text{ nm}$ )吸收型(phytochrome far red-light, Pfr)<sup>[11]</sup>。茶树等被子植物中有3种主要的光敏色素,分别被基因*phy A*、*B*、*C*所编码;双子叶植物中还存在附加的*phy D*和*phy E*两种光敏色素,可能是由于基因复制事件导致这种现象的出现<sup>[12]</sup>;光不稳定型的*phy A*主要存在于黄化组织中部位,光稳定型的*phy B*和*C*主要存在光照组织部位。许多植物响应低红光/远红光比信号,茎和叶柄的伸长、生长速率迅速而显著的增加常常以抑制叶和贮藏器官的发育为代价。除了叶绿素含量降低外,在接收到低红光/远红光比比信号的植物中经常观察到叶子厚度减少<sup>[13]</sup>。这些结构上的改变伴随着叶角增大(下垂)和顶端优势增加,导致双子叶的分枝和分蘖减少<sup>[14]</sup>,这种反应统称为避光综合症,这种现象可一定程度上影响茶树的农艺性状,进而影响茶叶品质,有助于将叶子抬高到未经过滤的白光区域,并为快速增长的种群提供基本的生存策略;光敏色素被环境信号所修饰,尤其是温度的上升,对光敏色素的调控影响较大。

## 2 光质对光敏色素的调控

自然光环境中的近距离感知是通过多个信号的融合来实现的<sup>[15]</sup>。光敏色素信号转导是发生在多个事件中

的一个高度复杂的网络;光敏色素光学特性的物质基础是脱辅基多肽链和生色团以及它们之间相互作用所产生的衍生效应,*phy*以Pr形式被合成,*phy*吸收红光后,生色团的构型被改变,从而导致脱辅基蛋白的构型和吸收光谱发生改变,Pr转化为对大多数反应起活性作用的形式——Pfr,Pfr接受远红光照射回到无活性状态<sup>[11]</sup>。在红光或者白光诱导下,单子叶植物的*phy A*转录产物的稳定性降低;双子叶植物在短暂红光照射下,其转录产物含量不会明显降低,但连续白光照射可使其降低;*phy B*、*phy C*在单子叶植物和双子叶植物中的表达量不受光照影响;*phy A*主要在极低辐射和远红光下的高辐射反应中发挥作用,*phy B*、*phy C*低辐射和红光与远红光的转变中起作用<sup>[11,16-19]</sup>。光合色素、叶绿素、类胡萝卜素可以吸收大部分的可见光,但绿光会被反射和转换<sup>[20]</sup>。叶绿素发育受光信号调控影响,单一蓝光诱导叶片合成叶绿素的能力较混合光弱,在不同光质下,叶绿素a/叶绿素b的比值不同,黄光和蓝光有利于叶绿素b的合成,红光可促进叶绿素a的形成<sup>[21]</sup>;胡萝卜素和叶绿素是进行光合作用的组分,在植物生物学中起着关键作用,包括采光、光氧化猝灭、植物着色,其中,类胡萝卜素在茶树光合作用中起辅助色素的作用,与其他萜烯类有生源性紧密联系,而且是茶叶加工过程中形成茶香的重要组成部分<sup>[17,22]</sup>。

光通过光敏色素对茶树挥发性代谢物的影响主要体现在3个方面:1) 为二级代谢进行提供必要的先质;2) 促进植物的应激响应,从而合成或释放挥发性物质;3) 对温度效应起调控作用,直接影响酶的活性变化。不同的大气条件下(光照强度、温度、降雨量),茶树的生命体征和代谢通路不同,继而形成不同基质的茶鲜叶原料;茶树鲜叶在离体后,未经过杀青工艺时,仍具有一定的生理活性,其光敏色素和酶可以在不同光质条件下响应应激反应<sup>[23]</sup>,因此,在茶叶加工过程中,尤其在摊青和萎凋两个阶段,采用不同波段的光辅助,有助于茶叶香气的代谢和释放。

## 3 光质对不同代谢类型香气物质的影响

### 3.1 茶叶香气物质的分类

以代谢途径为分类依据,茶叶香气物质可分为萜类、苯丙烷类/苯环型化合物、脂肪酸衍生物、糖苷结合型香气化合物,第1类中大部分的挥发性物质是通过异戊二烯途径合成的,包括胞浆甲戊酸盐和胞浆甲基赤藓醇磷酸途径;第2类普遍存在的挥发性物质是包括一个芳香环的挥发性醇类化合物,此类化合物大部分是通过苯丙氨酸解氨酶的莽草酸途径形成的;第3类是通过氧化裂解和脱羧形成的酮、醛的短链挥发性物质;第4类主要是通过糖苷酶水解形成<sup>[23-25]</sup>。植物香气物质释放的4种途径:

1) 细胞内的运输; 2) 通过质膜输出, 然后通过细胞壁运输; 3) 通过角质层的转移; 4) 角质层表面的蒸发<sup>[2]</sup>。因此, 下面以光质对不同类别的香气物质代谢影响为基础进行评述, 以期对特定香型茶类的制作提供理论依据。

### 3.2 光质对茶叶萜类香气物质的影响

在植物次生代谢中, 萜类结构是最多样化的一类, 萜类物质的主要生物合成途径是以C5为前体(糖酵解产物)的异戊二烯二磷酸及其烯丙基异构体二甲烯丙基二磷酸<sup>[26]</sup>; 挥发性萜类物质对茶叶的香气和香味有重要影响, 其中, 对茶叶品质贡献较大的萜类物质有香叶醇、芳樟醇、芳樟醇氧化物的非对映异构体、 $\beta$ -紫罗酮、大马烯酮、松油醇、 $\gamma$ -萜品烯、 $\beta$ -月桂烯、柠檬烯、 $\beta$ -罗勒烯、香叶醛、橙花醛、橙花叔醇庚烯等, 其还是红茶、乌龙茶花果香的主要呈香物质<sup>[27-29]</sup>。茶园管理和生产的过程中, 常通过改变光质提高茶叶品质。日本最好的绿茶(玉露和碾茶)关键生产工艺之一就是即将开采的茶园进行遮阴处理, 改善光源, 提高茶叶风味<sup>[30]</sup>。

灯光处理可以增加采摘前茶树鲜叶内生萜类香气物质的含量(表1), Fu Xiumin等<sup>[24]</sup>用蓝光和红光处理茶树未离体鲜叶3 d, 其内源性萜类物质含量明显增加(以黑暗处理为对照), 而萜类合成的前体物质香叶基二磷酸的含量并没有明显增加, 其机理可能是由于蓝光和红光可以上调萜烯合成酶(terpene synthetase, TPS)的表达水平(以黑暗处理和白光处理为对照)、激活影响萜类合成的关键基因。Jang等<sup>[31]</sup>在乌龙茶萎凋过程中, 用UV-B(波长280~320 nm)照射, 茶叶会表现出响应紫外光的应激反应, 释放香气物质, 其中, 萜类物质的释放种类和浓度与照射时间密切相关, 紫外照射毛蟹萎凋叶2 h后, 顺式-芳樟醇氧化物、 $\alpha$ -法呢烯、反式-芳樟醇、香叶醇、茉莉酮、橙花叔醇、邻苯二甲酸二异丁酯含量均显著增加(以黑暗处理2 h的萎凋样为对照), 其中 $\alpha$ -法呢烯、香叶醇、茉莉酮是新合成的产物; 当紫外光照射6 h后, 顺式-罗勒烯、顺式-芳樟醇氧化物、 $\alpha$ -紫罗酮(新增)、茉莉酮(新增)、橙花叔醇(新增)均显著增加(以黑暗处理6 h的萎凋样为对照), 而反式-芳樟醇氧化物I、香叶醇(未检测到)显著降低,  $\alpha$ -法呢烯、反式-芳樟醇和邻苯二甲酸二异丁酯未发生明显变化, 其研究表明, 随着紫外光照射时间的延长, 样品的关键萜类香气物质的合成量呈增加趋势, 只有香叶醇和顺式-芳樟醇的含量减少, 证实了紫外光照可以促进挥发性萜类物质的合成和释放。Ai Zeyi等<sup>[32]</sup>用不同波长的单色光(紫外光: 280~320 nm、紫光: 390~410 nm、蓝光: 410~430 nm、黄光: 585~590 nm、橙光: 590~600 nm、红光: 630~640 nm、青光: 515~525 nm、绿光: 555~565 nm、白光: 380~710 nm)照射白茶萎凋样品, 其结果表明, 不同

单色光对茶叶香气种类的影响不同, 橙光和红光(分先后顺序)的调控效果均优于白光, 同时还可以促进茶叶整体品质的改善, 其处理最终样品的感官得分也明显高于白光处理。茶叶中的类胡萝卜素在茶树光合作用中起辅助色素的作用, 还与萜类香气物质形成有生源性紧密联系, 类胡萝卜素具有共轭双键结构, 可以在紫外光的作用下发生氧化降解, 其初级产物有 $\beta$ -紫罗酮、二氢猕猴桃内酯、3,3-二甲基-2,7-辛二酮、2-羟基-2,6,6-三甲基环己酮、5,6-环氧- $\beta$ -紫罗酮、萜烯醛、萜烯酮等, 番茄红素光氧化降解可产生香叶基丙酮、芳樟醇、橙花叔醇及其水解产物 $\alpha$ -法呢烯等愉悦的挥发性萜类物质<sup>[33-34]</sup>, 李小娟等<sup>[35]</sup>采用中波紫外灯和近红外照射摊青叶的结果也表明, 单色光有助于类胡萝卜素的萜类衍生物形成和释放。此外, 胡萝卜素衍生物的挥发性物质形成受季节变化影响, 春秋季相关酶的磷酸化状态发生变化, 引起酶活性及类胡萝卜素含量的变化, 而季节的变化主要是光、温度和降雨等气象因子的改变, 类胡萝卜素的氧化和降解与光和热密切相关。光是植物光合作用的重要元素, 当茶树受到光胁迫时, 呼吸作用和光合作用失调, 导致糖酵解产物的总量发生改变, 进而调控萜类香气物质的种类和含量, 因此, 在茶树鲜叶离体后(酶未失活阶段), 可采用不同类型单色光辅助茶叶加工, 促进有利的萜类香气物质的转化和释放, 为花果茶类的制作提供生化基础, 进而提升茶叶品质。

### 3.3 光质对茶叶苯丙烷类/苯环型化合物香气物质的影响

苯丙烷类/苯环型化合物(volatile phenylpropanoids/benzenoids, VPBs)是莽草酸途径(shikimate pathway)的重要产物, 其中L-苯丙氨酸是关键的反应中间产物和底物, 它在苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)的作用下分别形成苯丙环类和苯环类化合物, 主要有苯乙醇、苯乙醛、苯甲醇、苯甲醛和香豆素等, 是一类影响茶叶香气的结构多样的挥发性化合物, 其主要呈现出植物的果香和花香<sup>[25]</sup>, 是绿茶、白茶、黄茶甜花香的关键物质<sup>[36-41]</sup>。此外, 茶树体内源性酪氨酸可在酪氨酸解氨酶(tyrosine ammonia-lyase, TAL)的作用下参与莽草酸途径形成具有甜香和樟脑气味的香豆素, 是中国绿茶和日本绿茶中特有的香气物质<sup>[25,42]</sup>。茶树对蓝紫光和红橙光的吸收较大, 其中蓝紫光与茶树生理代谢的氮代谢有较大的相关性, 进而影响茶叶中的氨基酸和含氮类香气物质的种类和含量<sup>[43]</sup>。

茶树叶片在黑暗处理下, 挥发性物质含量的变化与其上游的次生代谢相关; 苯丙氨酸是VPBs的关键前体物质, 其在黑暗处理的叶片中大量积累<sup>[30]</sup>。Fu Xiumin等<sup>[24]</sup>的实验表明, 用蓝光和红光照射采摘前的茶树新梢, 苯丙氨酸含量显著降低, 而苯甲醇、苯乙醇、苯甲醛含量显著增加, 其机理可能是由于蓝光和红光可以通过上

调PAL、苯乙醛合成酶(phenylacetaldehyde synthase, PAAS)、苯乙醛还原酶I和II(phenylacetaldehyde reductase I, II, PARI, II)的表达水平进而显著增加采摘前茶树鲜叶中内生挥发性VPBs的含量(以黑暗处理为对照,  $P \leq 0.05$ )。茶树鲜叶离体后, 分别用白光和紫外光照射, VPBs的变化特征基本一致, 增加紫外或者延长白光的照射时间, 苯甲醇、苯乙醇、苯甲醛和苯乙醛的含量均增加, 其中后3种物质含量显著增加(黑暗处理为对照), 且紫外光的优势较显著<sup>[31]</sup>; 红茶萎凋叶在不同光质(七色光、紫外和黑暗)处理下, VPBs类香气物质变化趋势不同: 苯乙醇在绿光、紫光和蓝光处理下释放的最多, 在紫外光和白光下萎凋, 含量最低; 苯甲醛含量在橙光、黑暗、紫光处理下最高, 在白光和青(靛)光下最低; 苯乙醛含量在橙光、黄光、紫外下最高, 在白光下最低; 3种物质的最高含量比最低含量分别多241.7%、100.0%、89.9%, 其中苯乙醇具有玫瑰花香, 是红茶的重要的香气物质<sup>[32]</sup>(表1)。茶树在遮阴无光的条件下, 鲜叶黄化并失去活力, 挥发性物质含量显著增加, 尤其是苯环类香气物质<sup>[30]</sup>; 茶树氨基酸等含氮物质代谢与光照、温度密切相关, 低温和漫射光条件可以促进氮代谢, 茶叶滋味鲜爽、香气馥郁(“高山云雾出好茶”的理论支撑), 而高温和高光强下, 茶叶滋味苦涩、香低气短, 影响茶叶品质; 因此在农业生产上可以用不同颜色的遮阴网覆盖茶园, 有目的地改变光质, 为名优茶的生产提供本源性条件。

### 3.4 光质对茶叶脂肪酸衍生物香气物质的影响

茶叶中的挥发性脂肪酸衍生物(volatile fatty acid derivatives, VFADs)是通过氧化裂解、脱羧、还原和异构形成的酮、醛和醇的短链, 主要来源是C18类不饱和脂肪酸(亚麻酸和亚油酸)通过脂肪氧合酶(lipoxygenase, LOX)途径形成<sup>[44]</sup>。不饱和C6和C9的醛和醇如顺-己烯醇、己醛、壬醛、青叶醇、茉莉酸甲酯等, 带有水果和蔬菜的甜香、清香和青味, 一般在春茶中含量比较高, 是新茶香的代表物质, 也是茶叶清香和甜香的关键物质, 其中普洱生茶清香、甜木香的形成和转化与此类物质密切相关<sup>[45-46]</sup>。茶叶VFADs的种类和含量受采摘时间和加工工艺的影响<sup>[47]</sup>, 不同采摘时间下的茶鲜叶所受的环境胁迫不同, 尤其是光照条件; 光可以调控基因表达量, 影响LOX途径中相关酶基因的表达, 继而影响VFADs的合成和释放<sup>[48]</sup>(表1)。

不饱和脂肪酸是茶叶挥发性短链脂肪醇、醛、酮的前体物质, 其在一系列酶促作用(类酯水解酶、LOX、过氧化物酶、乙醇脱氢酶)下形成香气物质<sup>[2]</sup>, 用蓝光和红照射采摘前的茶树鲜叶可以激活9/13-LOX, 促使VFADs的合成和释放<sup>[48]</sup>。茶叶中的VFADs种类丰富、变化趋势不一, 在红茶萎凋过程中, 用不同的单一光源处

理萎凋叶后, 1-辛烯-3醇含量在绿光和白光处理下最高, 在其他光处理下未检测到; 1-戊烯-3-醇在蓝光、遮阴、紫外条件下含量最高, 在白光、橙光、绿光下未检测出; 己醛、2-己烯醛含量均在紫光和橙光下最高, 壬醛含量的变化不显著, 这3种物质均为高VFADs含量, 有研究表明, 醛类物质是红茶香气的重要组成<sup>[43]</sup>; 在不同单一光源处理下, 十一醛、2,4-壬二烯醛等物质含量的波动均较小<sup>[24,32,49]</sup>。Jang等<sup>[31]</sup>研究表明, VFADs的合成与释放还受光照射时间的影响, 在毛蟹和安徽9号茶鲜叶摊放过程中, 己烯醛、己醇、顺-3-己烯醇、反-2-己烯醇和茉莉酸甲酯等含量均会随着照射光质和时间的变化而增加或减少。植物内生不饱和脂肪酸的含量与光周期和光强度呈正相关<sup>[50]</sup>。关于不同光质(光波段范围)对茶树内源性不饱和脂肪酸合成的影响有待证实, 尤其是光质对适合制作绿茶的茶树品种的不饱和脂肪酸合成的调控机理, 以及促进不饱和脂肪酸的合成和降解, 释放更多有利的挥发性脂肪醇类的香气物质, 其可作为今后的研究方向之一。

### 3.5 光质对茶叶糖苷结合型香气化合物的影响

在植物细胞中, 许多芳香醇类物质(如: 苯甲醇、2-苯乙醇、芳樟醇和香叶醇等)作为糖苷前体物储存于叶肉细胞中; 由于糖基化挥发性化合物比其游离苷元化合物水溶性强、反应活性弱, 因此许多芳香化合物作为糖苷前体存在于植物细胞中, 并且它们以这种形式更容易储存<sup>[25,51-52]</sup>; 糖基化将改变化合物的结构及其在细胞内的移动趋势, 稳定化合物的结构, 防止其降解<sup>[2]</sup>。糖苷酶活性在嫩叶中较高, 且随着叶龄的增加而降低; 糖苷酶的活性在萎凋阶段最高, 揉捻后降低, 说明糖苷水解可能发生在揉捻阶段<sup>[53]</sup>。茶叶加工过程中糖苷的合成、水解既与茶树生长期有关, 又和糖苷酶的活性强弱相关<sup>[23]</sup>; 国内外学者研究表明, 遮阴或者改变光波组成可以调节茶树的生长发育, 影响其生物量的积累, 改变茶树碳代谢和氮代谢方向, 影响糖苷前体物质(glycosidically bound volatiles, GBVs)的合成和释放, 调控茶叶的风味<sup>[48,54]</sup>(表1)。

对 $\beta$ -樱草糖苷酶和 $\beta$ -葡萄糖苷酶的基因表达量检测分析结果表明, 紫外照射2 h, 表达量上调, 照射6 h后表达量下调, 在刚采摘下来的新鲜嫩枝阶段, 基因的表达处于较弱的状态<sup>[31]</sup>。日光萎凋可以产生光热效应, 通过可见光诱导以及紫外线、红外线辐射作用, 不仅促进了鲜叶水分散失、叶片萎软、青气散发, 葡萄糖苷和樱草糖苷的含量增加, 且达到整个乌龙茶加工过程的最高水平, 并且促进在制叶的糖苷态香气前体物质发生酶促氧化形成香气, 提高乌龙茶萜烯类香气品质指数<sup>[55]</sup>。在生化成分空间分布上, GBVs位于细胞壁间隙, 而糖苷类化合物位于液泡内<sup>[56]</sup>。绿茶、乌龙茶、黄茶加工过程中,

杀青在前、揉捻在后, GBVs与相应的酶结合率较低, 使其水解受阻, 抑制糖苷类挥发性物质的释放, 因此, 糖苷类水解途径可能并不是某些茶类香气物质的形成的优先途径。在红茶等没有杀青工艺的茶类中, 茶叶叶片的GBVs可响应损伤应激反应, 释放糖苷类香气物质, 所以, 可以采用不同波段的LED光源辅助发酵, 促进红茶GBVs的水解和释放<sup>[57]</sup>, 积累有效的红茶香气物质。

**表 1 光质对茶叶在制品香气代谢物的调控**  
**Table 1 Regulation of light quality on aroma metabolites in tea**

代谢物类型	样品阶段	光质条件	对代谢物的影响	参考文献
萜类	采摘前茶树鲜叶	蓝光和红光照射3 d	上调TPS的表达水平, 激活影响萜类合成的关键基因	[24]
	乌龙茶萎凋	紫外光照射2 h	顺式-芳樟醇氧化物、 $\alpha$ -法呢烯(新增)、反式-芳樟醇、香叶醇(新增)、茉莉酮(新增)、橙花叔醇、邻苯二甲酸二异丁酯含量均显著增加	[31]
	乌龙茶萎凋	紫外光照射6 h	可以上调大部分萜类物质的表达量, 只有反式-芳樟醇氧化物和香叶醇的含量降低, 因此认为紫光可以作为乌龙茶加工的优势光源	[31]
	白茶萎凋	紫外光、紫光、蓝光、黄光、橙光、红光、青光、绿光	橙光和红光为白茶加工过程中优势光源, 可以促进白茶花果类物质的释放	[32-34]
	采摘前茶树鲜叶	蓝光和红光照射3 d	苯丙氨酸的含量显著降低, 而苯甲醇、苯乙醇、苯甲醛的含量显著增加	[24,30]
苯丙烷类/苯环型化合物	茶树鲜叶离体后	白光和紫外光照射(2 h和6 h)	采用紫外光处理离体后的茶树鲜叶, 可以增加部分甜花香类物质(苯乙醇、苯甲醇)的含量	[31]
	红茶萎凋	七色光、紫外和黑暗	在相同的光谱下, 苯乙醇和苯乙醛的调控趋势不同, 整体来讲, 紫光可以作为红茶萎凋的优势光源	[32]
	采摘前茶树鲜叶	蓝光和红光照射	可以激活9/13-LOX, 促使VFADs的合成和释放	[48]
脂肪酸衍生物	红茶萎凋	白光、绿光、蓝光、紫外光、橙光	红茶的香气特征较为复杂, VFADs中的醛类是其关键挥发性物质, 该类物质响应光调控时的变化趋势较为复杂	[24,32,43,49]
	鲜叶摊青	白光和紫外光照射(2 h和6 h)	延长光照时间有利于提升茶叶在制品的优势香气物质	[31]
糖苷结合型香气化合物	乌龙茶萎凋	日光	日光可以上调糖苷态香气前体物质发生酶促氧化反应, 进而提高乌龙茶的香气指数	[35]

#### 4 结 语

植物不仅可以感受到光的存在, 而且还可以检测到光的方向、强度以及色泽(波长)。光有调控植物挥发性小分子物质的潜在能力, 蓝光和红光可以激活采摘前茶树鲜叶挥发性物质的关键基因。在我国, 采用日光萎凋加工乌龙茶、红茶、白茶提高茶叶香气, 降低茶叶的苦味<sup>[32]</sup>。在茶树生长期, 遮阴是一个比较常见的管理光质的方式, 适时、适当的遮阴处理能使茶树新梢叶绿素总量增加, 叶绿素a/叶绿素b值下降。较低的叶绿素a/叶绿素b值能提高植物对远红光的吸收, 因而在弱光下, 具有较低的叶绿素a/叶绿素b值也具有较高的光合活性使得茶树适应遮阴的逆境生长<sup>[58]</sup>, 促进蓝紫光的吸收, 改善茶叶品质, 还可以提高类胡萝卜素和叶黄素的合成, 保护茶树的叶绿体和类囊体免受强光的破坏。延长遮阴

时间会加速茶树的生长发育, 可能导致茶树生物量的减少, 可以选择不同色泽遮阴网改变日光组成, 调控茶树的生长发育且不改变其农艺性状。茶叶加工期间, 我国南方多出现阴雨天, 不利于乌龙茶、白茶日光萎凋, 致使茶叶品质下降, 因此可以借助LED萎凋(LED是一种冷光源, 具有中心波长选择性强、光谱半波宽度窄等优点, 较荧光灯节能83%, 较白炽灯节能54%<sup>[59]</sup>)保障茶叶优良风味。

茶叶香气物质的含量与其品质有密切关系, 一般而言, 品质越高、挥发性香气物质的种类和含量更多<sup>[60]</sup>。茶树鲜叶中仅含有80多种芳香物质, 而六大茶类中, 香气物质组成最简单的绿茶也有100多种芳香物质, 这表明茶鲜叶离体后, 其二级代谢仍在持续。当前茶树的香气合成和释放机理并不十分清晰, 关于光质对茶叶香气物质代谢通路的调控机理还有待证实, 以植物同源性的特征为导向, 今后可借助现代分子技术、同位素标记技术、细胞定位技术等, 研究茶树生长发育和茶鲜叶加工过程中香气物质的释放途径和时空特点, 探究光质调控茶叶香气物质释放的最佳模式并将其应用到生产实践中。

#### 参考文献:

- [1] LI Qian, KUBOTA C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1): 59-64. DOI:10.1016/j.envexpbot.2009.06.011.
- [2] OSBOURN A E, LANZOTTI V. Plant-derived natural products[M]. New York: Springer, 2009: 22. DOI:10.1007/978-0-387-85498-4.
- [3] BRIGGS W R, BECK C F, CASHMORE A R, et al. The phototropin family of photoreceptors[J]. Plant Cell, 2001, 13(5): 993-997.
- [4] SÆBØ A. Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets *in vitro*[J]. Plant Cell Tissue & Organ Culture, 1995, 41(2): 177-185. DOI:10.1007/BF00051588.
- [5] SENGER H. The effect of blue light on plants and microorganisms[J]. Photochemistry & Photobiology, 2008, 35(6): 911-920. DOI:10.1111/j.1751-1097.1982.tb02668.x.
- [6] LEE L S, CHOI J H, SON N, et al. Metabolomic analysis of the effect of shade treatment on the nutritional and sensory qualities of green tea[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(2): 332-338. DOI:10.1021/jf304161y.
- [7] CARABELLI M, SESSA G, BAIMA S, et al. The Arabidopsis *Atb2* and *-4* genes are strongly induced by far-red-rich light[J]. The Plant Journal, 2010, 4(3): 469-479. DOI:10.1046/j.1365-3113X.1993.04030469.x.
- [8] BRIGGS W R, HUALA E. Blue-light photoreceptors in higher plants[J]. Annual Review of Cell & Developmental Biology, 1999, 15(1): 33-62. DOI:10.1146/annurev.cellbio.15.1.33.
- [9] BRIGGS W R, OLNEY M A. Photoreceptors in plant photomorphogenesis to date. five phytochromes, two cryptochromes, one phototropin, and one superchrome[J]. Plant Physiology, 2001, 125(1): 85-88. DOI:10.1104/pp.125.1.85.
- [10] QUAIL P H. Phytochrome genes and their expression[M]. Dordrecht: Springer, 1994: 16. DOI:10.1007/978-94-011-1884-2\_5.
- [11] 顾雪松, 陈章良, 朱玉贤. 光敏色素与光调控[J]. Acta Botanica Sinica, 1997(7): 675-681.

- [12] MATHEWS S, SHARROCK R A. Phytochrome gene diversity[J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 20(6): 666-671. DOI:10.1046/j.1365-3040.1997.d01-117.x.
- [13] SMITH H. The function of phytochrome in the natural environment[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1997, 25(6): 61-67. DOI:10.1111/j.1751-1097.1977.tb09127.x.
- [14] CASAL J J, SANCHEZ R A, DEREGIBUS V A. The effect of plant density on tillering: the involvement of R/FR ratio and the proportion of radiation intercepted per plant[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 1986, 26(4): 365-371. DOI:10.1016/0098-8472(86)90024-9.
- [15] MØLLER S G, INGLES P J, WHITELAM G C. The cell biology of phytochrome signalling[J]. *New Phytologist*, 2002, 154(3): 553-590. DOI:10.1046/j.1469-8137.2002.00419.x.
- [16] 张芳, 张晓枫, 王进征, 等. 植物光敏色素PHYA、PHYB研究进展[J]. *生物学通报*, 2011, 46(1): 11-14.
- [17] KONG Y, STASIAK M, DIXON M A, et al. Blue light associated with low phytochrome activity can promote elongation growth as shade-avoidance response: a comparison with red light in four bedding plant species[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 155: 345-359. DOI:10.1016/j.envexpbot.2018.07.021.
- [18] PARK E, KIM Y, CHOI G. Phytochrome B requires PIF degradation and sequestration to induce light responses across a wide range of light conditions[J]. *The Plant Cell*, 2018, 30(6): 1277-1292. DOI:10.1105/tpc.17.00913.
- [19] KRESLAVSKI V D, SHMAREV A N, LYUBIMO V Y, et al. Response of photosynthetic apparatus in *Arabidopsis thaliana* L. mutant deficient in phytochrome A and B to UV-B[J]. *Photosynthetica*, 2018, 56(1): 418-426. DOI:10.1007/s11099-017-0754-8.
- [20] FRANKLIN K A, WHITELAM G C. Phytochromes and shade-avoidance responses in plants[J]. *Annals of Botany*, 2005, 96(2): 169-175. DOI:10.1093/aob/mci165.
- [21] 周波, 李玉花. 植物的光敏色素与光信号转导[J]. *植物生理学通讯*, 2006(1): 134-140. DOI:10.13592/j.cnki.ppj.2006.01.049.
- [22] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2008: 132-138.
- [23] WANG D, KUBOTA K, KOBAYASHI A, et al. Analysis of glycosidically bound aroma precursors in tea leaves. 3. change in the glycoside content of tea leaves during the Oolong tea manufacturing process[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(4): 5391-5396. DOI:10.1021/jf010235.
- [24] FU Xiumin, CHEN Yiyong, MEI Xin, et al. Regulation of formation of volatile compounds of tea (*Camellia sinensis*) leaves by single light wavelength[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 1-11. DOI:10.1038/srep16858.
- [25] YANG Z, BALDERMANN S, WATANABE N. Recent studies of the volatile compounds in tea[J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 585-599. DOI:10.1016/j.foodres.2013.02.011.
- [26] CHENG A X, LOU Y G, MAO Y B, et al. Plant terpenoids: biosynthesis and ecological functions[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(2): 179-186. DOI:10.1111/j.1672-9072.2006.00395.x.
- [27] ZHU J, CHEN F, WANG L, et al. Comparison of aroma-active volatiles in oolong tea infusions using C-olfactometry, GC-FPD, and GC-MS[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(34): 7499-7510. DOI:10.1021/acs.jafc.5b02358.
- [28] 肖凌. 十种香型凤凰单丛茶香气成分分析[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 6-7.
- [29] MAO S H, LU C Q, LI M F, et al. Identification of key aromatic compounds in Congou black tea by partial least-square regression with variable importance of projection scores and gas chromatography-mass spectrometry/gas chromatography-olfactometry[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(14): 5278-5286. DOI:10.1002/jsfa.9066.
- [30] YANG Z, 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.07.066.
- [31] JANG J, YANG Y C, ZHANG G H, et al. Effect of ultra-violet B on release of volatiles in tea leaf[J]. *International Journal of Food Properties*, 2010, 13(3): 608-617. DOI:10.1080/10942910902716976.
- [32] AI Zeyi, ZHANG Beibei, CHEN Yuqiong, et al. Impact of light irradiation on black tea quality during withering[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(5): 1212-1227. DOI:10.1007/s13197-017-2558-z.
- [33] HO C T, ZHENG X, LI S. Tea aroma formation[J]. *Food Science & Human Wellness*, 2015, 4(1): 9-27. DOI:10.1016/j.fshw.2015.04.001.
- [34] KAWAKAMI M, KOBAYASHI A. Carotenoid-derived aroma compounds in tea[M]. Washington, D C: American Chemical Society, 2002: 147-150.
- [35] 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. DOI:10.15905/j.cnki.33-1157/ts.2011.02.011.
- [36] LEE J, CHAMBERS D, CHAMBERS E, et al. Volatile aroma compounds in various brewed green teas[J]. *Molecules*, 2013, 18(8): 10024-10041. DOI:10.3390/molecules180810024.
- [37] QI D, MIAO A, CAO J, et al. Study on the effects of rapid aging technology on the aroma quality of white tea using GC-MS combined with chemometrics: in comparison with natural aged and fresh white tea[J]. *Food Chemistry*, 2018, 265: 189-199. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.05.080.
- [38] CHEN Q, ZHU Y, DAI W, et al. Aroma formation and dynamic changes during white tea processing[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 915-924. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.09.072.
- [39] 王力, 蔡良绥, 林智, 等. 顶空固相微萃取-气质联用法分析白茶的香气成分[J]. *茶叶科学*, 2010(2): 115-123.
- [40] 李瑾. 不同黄茶产品香气特征差异性分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016: 5-6.
- [41] 刘晓慧, 张丽霞, 王日为, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析黄茶香气成分[J]. *食品科学*, 2010, 31(16): 239-243.
- [42] FELFE C, SCHEMAINDA M, BALDERMANN S, et al. Metabolism of carotenoid degradation in leaves of *Camellia sinensis*: functional and biochemical modifications[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(6): 821-825.
- [43] 宛晓春, 夏涛. 茶树次生代谢[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 24-25.
- [44] RAVICHANDRAN R, PARTHIBAN R. Lipid occurrence, distribution and degradation to avour volatiles during tea processing[J]. *Food Chemistry*, 2000, 68(1): 7-13. DOI:10.1016/S0308-8146(99)00143-0.
- [45] HE C, GUO X, YANG Y, et al. Characterization of the aromatic profile in “Zijuan” and “Pu-erh” green teas by headspace solid-phase microextraction coupled with GC-O and GC-MS[J]. *Analytical Methods*, 2016, 8(23): 4727-4735. DOI:10.1039/C6AY00700G.
- [46] 刘玲. 普洱茶特征风味成分分析[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 44-45.
- [47] OKAL A W, OWUOR P O, KAMAU D M, et al. Effects of production locations and plucking intervals on clonal tea fatty acids levels in the Kenya Highlands[J]. *Food Science and Technology Research*, 2012, 18(3): 351-356. DOI:10.3136/fstr.18.351.
- [48] 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, 2018, 59: 1-14. DOI:10.1080/10408398.2018.1506907.
- [49] RAVICHANDRAN R, PARTHIBAN R. The impact of processing techniques on tea volatiles[J]. Food Chemistry, 1998, 62(3): 347-353. DOI:10.1016/S0308-8146(97)00229-X.
- [50] UEMURA M, STEPONKUS P L. Cold acclimation in plants: relationship between the lipid composition and the cryostability of the plasma membrane[J]. Journal of Plant Research, 1999, 112(2): 245-254. DOI:10.1007/pl00013882.
- [51] WINTERHALTER P, SKOUROUMOUNIS G K. Glycoconjugated aroma compounds: occurrence, role and biotechnological transformation[J]. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 1997, 55: 73-105. DOI:10.1007/BFb0102063.
- [52] CUI Jilai, KATSUNO T, TOTSUKA K, et al. Characteristic fluctuations in glycosidically bound volatiles during tea processing and identification of their unstable derivatives[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(5): 1151-1157. DOI:10.1021/acs.jafc.5b05072.
- [53] OGAWA K, MOON J H, GUO W, et al. A study on tea aroma formation mechanism: alcoholic aroma precursor amounts and glycosidase activity in parts of the tea plant[J]. Zeitschrift für Naturforschung C Journal of Biosciences, 1995, 50(7/8): 493-498.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] MIZUTANI M, NAKANISHI H, EMA J, et al. Cloning of beta-primeverosidase from tea leaves, a key enzyme in tea aroma formation[J]. Plant Physiology, 2002, 130(4): 2164-2176. DOI:10.2307/4280852.
- [57] DONG F, ZENG L T, YU Z M, et al. Differential accumulation of aroma compounds in normal green and albino-induced yellow tea (*Camellia sinensis*) leaves[J]. Molecules, 2018, 23(10): 2677. DOI:10.3390/molecules23102677.
- [58] 舒华. 遮荫对茶树新梢叶绿素积累的影响及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 20-21.
- [59] 陈寿松, 林宏政, 孙云, 等. 乌龙茶萜类物质及其代谢调控研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(5): 72-80. DOI:10.13304/j.nykjdb.2016.057.
- [60] 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. DOI:10.1021/jf301498p.