



黄化茶树新梢色素和主要生化成分含量 变化特征及其相关性分析

刘声传¹, 魏 杰², 林开勤², 陈智雄¹, 徐 霖¹, 鄢东海^{2*}

(1 贵阳学院 生物与环境工程学院, 贵阳 550005; 2 贵州省农业科学院茶叶研究所, 贵阳 550006)

摘 要:以茶树黄化品种‘中黄3号’(‘ZH3’)和常绿品系‘苔茶15’(‘TC15’)为材料,检测其4、5、7、8月新梢(一芽二叶)色素和主要生化成分含量,探讨不同月份黄化茶树新梢色素和主要生化成分累积的特征以及它们之间的关系。结果表明:(1)新梢叶绿素a、总叶绿素含量在两种茶树中均随生育期先降低后上升,叶绿素b含量变化趋势不同,但均以8月份最高,‘ZH3’叶绿素b含量在4、5月份分别比‘TC15’低41.9%、54.9%,在7、8月份分别比‘TC15’高47.5%、22.1%;新梢类胡萝卜素含量在‘ZH3’中呈递减趋势,而在‘TC15’中表现为先下降后上升再下降;花青素含量在两种茶树中均先上升后下降,在4、5、8月份‘ZH3’略高于‘TC15’,在7月份‘ZH3’比‘TC15’低26.4%。(2)两种茶树新梢的花青素含量在总色素中占比均先增加后降低,总叶绿素含量占比则表现先降后升的变化趋势;类胡萝卜素含量占比在‘ZH3’中呈递减趋势,而在‘TC15’中先递减后小幅上升。(3)两种茶树新梢的游离氨基酸含量均先降低后上升并以4月份最高,茶多酚含量则均先升后降并以7月份最高,‘ZH3’水浸出物和咖啡碱含量在月份间变化不显著。(4)‘ZH3’新梢的游离氨基酸、水浸出物和咖啡碱含量与各色素含量相关均不显著,而其茶多酚含量与叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量均呈显著正相关关系,与类胡萝卜素含量呈显著负相关关系;‘TC15’新梢的水浸出物和茶多酚含量与花青素含量、游离氨基酸含量与总叶绿素含量、咖啡碱含量与叶绿素a以及总叶绿素和类胡萝卜素含量均呈显著正相关关系。研究发现,黄化茶树品种‘中黄3号’新梢颜色越黄,类胡萝卜素、游离氨基酸含量越高,叶绿素a、叶绿素b、茶多酚含量越低,叶绿素a/b值较高,花青素含量适中,茶树新梢色素含量与其主要生化成分含量关系密切。

关键词:黄化茶树;新梢;色素;生化成分;相关性

中图分类号:Q946.8; S571.1

文献标志码:A

Characteristics of Pigments and Main Biochemical Component Contents and Their Relationships in Young Shoot of Chlorophyll-deficient Tea Plant (*Camellia sinensis*)

LIU Shengchuan¹, WEI Jie², LIN Kaiqin², CHEN Zhixiong¹, XU Lin¹, YAN Donghai^{2*}

(1 School of Biological and Environmental Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China; 2 Tea Research Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

Abstract: The aim of this study is to uncover young shoot pigment changes of albino tea plant (*Camellia sinensis*) cultivar ‘Zhonghuang 3’ (‘ZH3’) and their correlation with main biochemical components accumulation. With the evergreen ‘Taicha 15’ (‘TC15’) strain as the control, we determined and analyzed the

收稿日期:2021-02-02;修改稿收到日期:2021-04-19

基金项目:国家自然科学基金(31760227);贵州省农业科技支撑计划(黔科合支撑[2018]2254);贵阳学院博士科研启动基金(0203033003014);贵州省教育厅青年科技人才成长(黔教合KY字[2019]097)

作者简介:刘声传(1981—),男,博士,副研究员,主要从事茶树育种栽培研究。E-mail:gtscliu@163.com

* 通信作者:鄢东海,研究员,主要从事茶树遗传育种研究。E-mail:donghaiy@126.com

dynamic changes of pigments and main biochemical components in young shoots (one bud and two leaves) from two resources sampled in April, May, July and August. The content of chlorophyll a and total chlorophyll in two resources initially increased and then decreased, while chlorophyll b content showed a different trend, and three physiological indicators reached its peak in August. Chlorophyll b content of 'ZH3' in April and May was 41.9% and 54.9%, respectively, lower than that of 'TC15', while that of 'ZH3' in July and August was 47.5% and 22.1%, respectively, higher than that of 'TC15'. Carotenoids content of 'ZH3' decreased gradually, while that of 'TC15' first decreased, then increased and subsequently decreased. Anthocyanin content in two resources initially increased and then decreased. In April, May and August, anthocyanin content of 'ZH3' was slightly higher than that of 'TC15', but 26.4% lower than that of 'TC15' in July. The proportion of anthocyanin in two resources increased first and then decreased, whereas the opposite trend was observed for that of total chlorophyll. The proportion of carotenoids in 'ZH3' showed a decreased trend, while that in 'TC15' decreased first and then increased slightly. Free amino acids content in two types of tea plants was the highest in April, and showed a trend of decreasing first and then increasing, while the content of tea polyphenols reached the maximum value in July, and showed the opposite trend. No significant changes of water extracts and caffeine contents in 'ZH3' among different months were observed. Free amino acids, water extract and caffeine content in 'ZH3' was not significantly correlated with pigments content. Tea polyphenols content in 'ZH3' was positively and significantly correlated with chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll content, respectively, while negatively and significantly correlated with carotenoid content. Positive significant correlations between anthocyanin content with water extract and tea polyphenol content were observed for 'TC15'. Free amino acid content in 'TC15' had positive correlations with total chlorophyll content. There were positive correlations between caffeine content with chlorophyll a, total chlorophyll and carotenoid content in 'TC15'. Our data suggested that the yellower young shoots color in 'ZH3' was the higher content of carotenoid and free amino acids, the lower content of chlorophyll a, chlorophyll b and tea polyphenols, the high chlorophyll a/b ratio, and the moderate anthocyanin content. There existed a very close relationship between pigments and biochemical components in young shoots of tea plant.

Key words: albino tea plant; young shoots; pigment; biochemical components; correlation

叶色突变的黄化茶树(*Camellia sinensis*)具有新梢色泽特异、高氨基酸等特征,且制成的绿茶品质好^[1]。高等植物(除了石竹目植物)叶片中的色素主要分为叶绿素、类胡萝卜素和花青素 3 大类^[2]。叶绿素、类胡萝卜素属于光合色素,存在于叶绿体中,花青素属于多酚类物质,均匀分布于液泡中。叶片细胞内 3 大类色素的含量、比例、分布决定叶片颜色,调控叶片光合作用^[3-4]。天线色素类胡萝卜素能将吸收的光能传递给叶绿素 a,具有光保护和清除自由基的作用^[5]。不少研究表明,花青素能过滤可见光和紫外线,减轻叶片中光氧化损伤^[6-7]。高含量花青素是紫化茶树的典型特征和茶叶苦涩的主要物质。目前,一些学者研究了紫化茶树‘紫娟’的色素累积特性,发现其叶色变化与花青素含量/叶绿素含量比值显著正相关,与类胡萝卜素含量变化关系不大,花青素积累量随叶片发育先增加后减少^[8-9]。王峰等^[10]研究发现 18 个茶树品种(系)干物质含量与光合色素含量显著正相关,叶绿素含量和类胡萝卜素含量显著正相关。7 月光照最强时,‘黄金芽’叶

色最黄,叶绿素含量最低^[11]。而氨基酸、花青素和叶绿素含量是导致绿茶品质季节间差异的主要生化因子^[12]。黄化茶树不同时期,叶色变化差异大,茶叶品质、产量不稳定,限制了其优势发挥^[13-14]。目前,有关黄化茶树色素积累规律与主要品质成分的相关性研究报道不多。为此,本试验以黄化茶树品种‘中黄 3 号’(‘ZH3’)为试验材料、常绿品系‘苔茶 15’(‘TC15’)为对照,研究不同月份‘ZH3’新梢(一芽二叶)叶绿素、类胡萝卜素、花青素和主要生化成分的含量变化,探讨这些指标间的相互关系,为揭示黄化茶树叶片色泽形成的生理生化机制及其更好开发利用提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 供试材料

本试验于贵州省茶叶研究所湄潭资源圃(107°29'22"E, 27°45'48"N, 海拔 778 m)进行。供试材料为黄化茶树品种‘中黄 3 号’(‘ZH3’)和常绿品系‘苔茶 15’(‘TC15’),树龄 4 年,无性系,双行双株

种植, 大行距 1.5 m, 小行距 40 cm, 穴距 33 cm。‘ZH3’和‘TC15’各种有 1 行, 长 10 m, 紧邻。茶园管理合理, 茶树生境一致, 生长环境良好, 长势优。分别于 2019 年 4 月 12 日、5 月 31 日、7 月 14 日、8 月 17 日采摘一芽二叶, 一部分立即液氮保存, 带回实验室于 -70 ℃ 保存备用; 另一部分, 及时杀青、烘干, 制作烘青绿茶品质成分检测样品。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 生化成分含量 由中国茶叶研究所茶叶质量标准与检测技术研究中心分别采用国家标准 GB/T 8305-2013、GB/T 8312-2013、GB/T 8313-2018 和 GB/T 8314-2013 检测水浸出物、咖啡碱、茶多酚和游离氨基酸含量, 3 次重复。

1.2.2 叶绿素和类胡萝卜素含量 叶绿素和类胡萝卜素含量测定参照《植物生理生化实验原理和技术方法测定》^[15] 方法, 略作修改, 3 次重复。取储存于 -70 ℃ 新梢, 液氮中迅速研磨至粉末, 加 95% 乙醇 10 mL, 混匀, 静置 5 min 后过滤, 用 95% 乙醇定容至 25 mL, 以 95% 乙醇为空白对照, 在波长 665 nm、649 nm 和 470 nm 下测定吸光度 A_{665} 、 A_{665} 和 A_{665} , 据此计算光合色素浓度和含量。

叶绿素 a 浓度(C_a) = $13.95A_{665} - 6.88A_{649}$

叶绿素 b 浓度(C_b) = $24.96A_{649} - 7.32A_{665}$

总叶绿素浓度(C_T) = $C_a + C_b$

类胡萝卜素浓度($C_{x,c}$) = $(1000A_{470} - 2.05 C_a - 114.8 C_b) / 245$

叶绿体色素含量(mg/g) = $(C \cdot V \cdot N) / m \cdot 1000$, 式中, C 为色素含量(mg/L); V 为提取液体积(mL); N 为稀释倍数, m 为样品质量(g)。

1.2.3 花青素含量 花青素含量测定参照王静等^[16] 方法, 略作修改, 3 次重复。取经液氮研磨的粉末样 2.0 g, 加沸水 10 mL, 于沸水浴中提取 30 min, 过滤后加冷沸水定容至 50 mL。吸取 2 mL 供试液置于刻度试管中, 加酸性乙醇溶液至 5 mL, 混匀, 静置 30 min, 以酸性乙醇为空白对照, 在波长 535 nm 下测定吸光度。

花青素质量浓度 (mg/mL) = 试液与对照液吸光度差 $\times 101.83 /$ 吸取溶液量(mL) $\times 10^{[17]}$

花青素含量(mg/g) = 花青素质量浓度 $\times V / m$, 式中, V 为提取液体积(mL), m 为样品质量(g)。

1.3 数据统计分析

数据采用 SPSS26.0 软件进行单因素方差分析、Pearson 相关性分析, 组间多重比较采用最小显著差异法(Least-significant difference, LSD)^[18]。

2 结果与分析

2.1 两种茶叶叶绿素含量在不同月份的变化特征

2.1.1 叶绿素 a 含量 图 1, A 显示, 从 4 至 8 月份, ‘ZH3’和‘TC15’叶绿素 a 含量均呈先下降后上升趋势, 均在 5 月份达到最低值, 在 8 月份达到最高值; 但‘ZH3’的含量始终低于同期的‘TC15’, 且变幅明显大于‘TC15’。‘ZH3’叶绿素 a 含量在 4、5 月份无显著变化, 随后逐月大幅显著上升; ‘TC15’叶绿素 a 含量在 4、5、7 月份均无显著变化, 仅在 8 月份才显著增加。‘ZH3’和‘TC15’叶绿素 a 含量在 5 月份分别为 0.513 和 0.990 mg/g, 在 8 月份分别为 1.067 和 1.159 mg/g。

2.1.2 叶绿素 b 含量 由图 1, B 可看出, ‘ZH3’和‘TC15’叶绿素 b 含量基本上呈现先降后升的趋势, 它们分别在 5 和 7 月份达到最低值, 均在 8 月份达到最大值; ‘ZH3’和‘TC15’叶绿素 b 含量均在 4、5 月份无显著变化, 但‘ZH3’分别比‘TC15’低 41.9%、54.9%; 在 7、8 月份, ‘ZH3’叶绿素 b 含量持续显著增加, 而‘TC15’先显著降低再显著升高, ‘ZH3’分别比同期‘TC15’高 47.5%、22.1%。‘ZH3’和‘TC15’叶绿素 b 含量最低值分别为 0.185 mg/g(5 月)和 0.265 mg/g(7 月), 最高值(8 月)分别为 0.635 和 0.520 mg/g。

2.1.3 总叶绿素含量 由图 1, C 可知, 两种茶叶总叶绿素含量表现出与叶绿素 a 相似的先降低后上升的变化趋势, 只是‘TC15’的最低值延迟至 7 月份, ‘ZH3’的变化幅度更大。‘ZH3’总叶绿素含量在 4、5、7 月份分别比‘TC15’低 42.7%、50.1%、13.5%, 而在 8 月份略高于‘TC15’; ‘ZH3’和‘TC15’总叶绿素含量最高值(8 月)分别为 1.701 和 1.679 mg/g, 最低值分别为 0.698 mg/g(5 月)和 1.335 mg/g(7 月)。

2.1.4 叶绿素 a/b 值 ‘ZH3’叶绿素 a/b 值呈先增加后递减趋势, 并在 5 月达到最大值, ‘TC15’叶绿素 a/b 值则呈先降低后上升再降低趋势, 并在 7 月份达到最大值, 两者均在 8 月达到最小值, 且‘TC15’的变幅更大。‘ZH3’叶绿素 a/b 值在 4 月份与‘TC15’接近, 在 5 月份(2.773)略高于‘TC15’(2.415), 在 7、8 月份分别比‘TC15’低 51.6%、24.7%(图 1, D)。

以上结果说明两种茶叶不同月份间叶绿素 a、总叶绿素含量的变化趋势大体相似, 但叶绿素 b 含量、叶绿素 a/b 变化趋势不一致, ‘ZH3’的叶绿素

a、叶绿素 b、总叶绿素含量变幅更大。两种茶树的高光合活性时期不同,总体上‘ZH3’的光合效率低于‘TC15’。

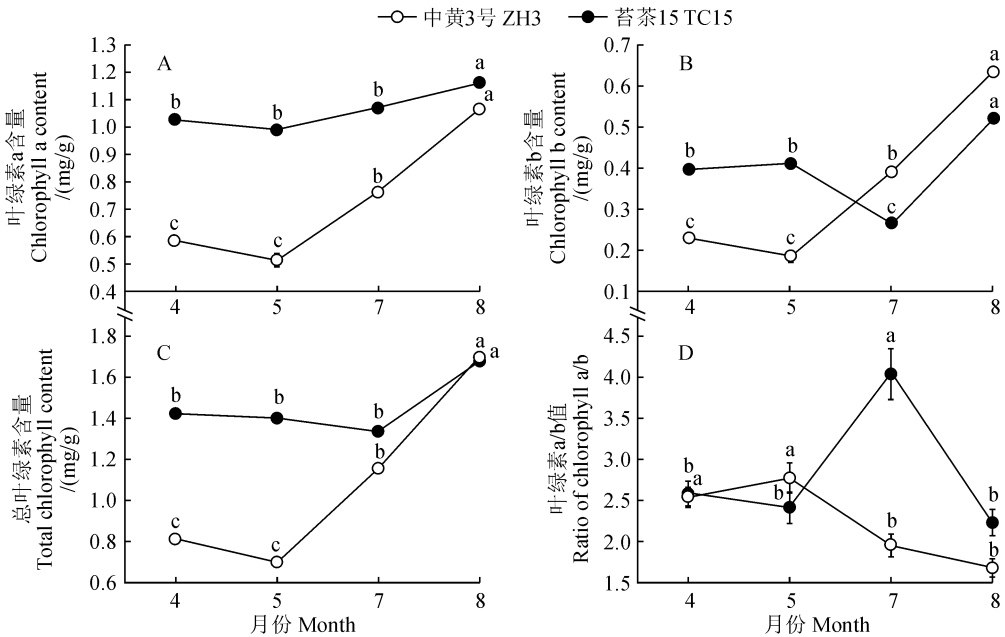
2.2 两种茶树类胡萝卜素和花青素含量在不同月份的变化特征

由图 2,A 可知,‘ZH3’类胡萝卜素含量随着生育期呈逐渐递减趋势,而‘TC15’类胡萝卜素含量则呈先降后升再降变化趋势;‘TC15’类胡萝卜素含量各月份均高于同期‘ZH3’,并在 5 月份接近,在 4、7、8 月份差异明显;4 至 8 月份‘ZH3’类胡萝卜素

含量的变幅明显大于‘TC15’。‘ZH3’和‘TC15’类胡萝卜素含量最高值(4 月)分别为 0.194 和 0.233 mg/g,最低值分别为 0.075 mg/g(8 月)和 0.185 mg/g(5 月)。

两种茶树花青素含量随着生育期均呈先上升后下降的变化趋势,且均在 7 月份达到最大值;除 7 月份外,‘ZH3’花青素含量均略高于同期‘TC15’(图 2,B)。

‘ZH3’和‘TC15’花青素含量在 4、5 月份均无显著变化;在 7 月份显著升高至最高值(分别为 1.31 和 1.78 mg/g),此时期‘ZH3’花青素含量比



线上同一品种(系)内不同小写字母表示月份间在 0.05 水平差异显著($P<0.05$);下同

图 1 ‘ZH3’和‘TC15’新梢叶绿素 a(A)、叶绿素 b(B)、总叶绿素(C)含量及叶绿素 a/b 值(D)在不同月份的变化

Different normal letters on the same line (cultivar) indicate significant difference among different months at 0.05 level ($P<0.05$). The same as below

Fig. 1 Changes of chlorophyll a (A), chlorophyll b (B), total chlorophyll (C) contents and chlorophyll a/b ratio (D) in young shoots of ‘ZH3’ and ‘TC15’ in different months

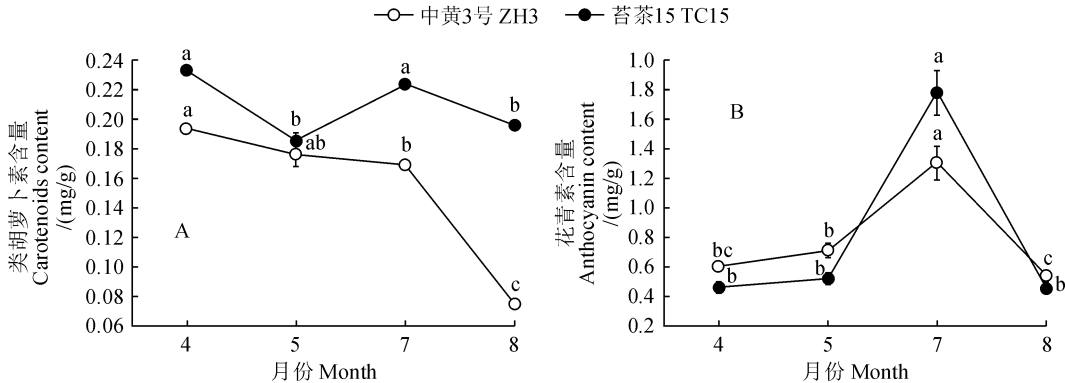


图 2 不同月份‘ZH3’和‘TC15’类胡萝卜素和花青素含量变化

Fig. 2 Changes of carotenoids and anthocyanin contents in young shoots of ‘ZH3’ and ‘TC15’ in different months

‘TC15’低 26.4%；随后，两者均显著降低至最低值，分别为 0.54 和 0.45 mg/g。以上结果初步表明 ‘ZH3’ 类胡萝卜素含量变幅更大，各时期 ‘TC15’ 的类胡萝卜素含量高于 ‘ZH3’，试验地 8 月份高温、强光抑制了茶树花青素合成。

2.3 两种茶树不同月份 3 种色素所占比例及其动态变化

图 3 显示，各月份两种茶树 3 种色素所占比例均表现为叶绿素>花青素>类胡萝卜素，表明两种茶树类胡萝卜素占比均较小。‘ZH3’和‘TC15’叶绿素比例均呈先降低后升高的变化趋势，并均在 7 月份最低(分别为 43.85 %和 39.99%)，在 8 月份达到最高值(分别为 73.45%和 72.22%)；‘ZH3’叶绿素比例在 4、5、7 月份差异不大，‘TC15’叶绿素比例在 4、5 月份差异不大。‘ZH3’类胡萝卜素比例呈递减趋势，‘TC15’类胡萝卜素比例先递减后小幅上升。两种茶树类胡萝卜素比例均在 4 月份最高且相近，分别达到 12.06%和 11.02%；‘ZH3’在 8 月份达到最低值 3.24%，远低于同期的‘TC15’ (8.43%)；‘TC15’在 7 月份达到最低值 6.68%，但仍稍高于同期的‘ZH3’ (6.42%)。‘ZH3’和‘TC15’的花青素比例均随着生育期均呈先升高后大幅下降的趋势，‘ZH3’在 4 至 5 月份大幅升高，而‘TC15’在 5 至 7 月份大幅升高，并均在 7 月份达到最大值(分别为 49.73%、53.33%)，在 8 月份达到最低值(分别为 23.32%、19.35%)；‘ZH3’的花青素占比在 4、5 月份明显高于‘TC15’，在 7、8 月比较接近。

2.4 两种茶树品质成分含量在不同月份的变化

如表 1 所示，两种茶树制作的烘青绿茶水浸出物含量接近，均约为 50%，且各时期之间无显著差异；‘ZH3’和‘TC15’的游离氨基酸含量随着月份均呈先降低后上升趋势，并均在 4 月达到最高值(分别

为 7.3%、3.8%)，均在 7 月达到最低值(分别为 2.6%、2.4%)，且各时期均表现为 ‘ZH3’ 高于 ‘TC15’，尤其是‘ZH3’游离氨基酸含量在 4 月份比 ‘TC15’高 92.1%；‘ZH3’的咖啡碱含量在月份间均无显著变化，‘TC15’咖啡碱含量在 5 月份显著低于其他 3 个月，其他月份间无显著差异；两种茶树的茶多酚含量变化趋势相似，均呈先上升后降低的趋势，并均在 4 月达到最低值，7 月达到最高值，且在 4、5、7 月份间均差异显著。可见，在 4 至 5 月份，‘ZH3’的游离氨基酸含量降幅显著，而‘ZH3’和‘TC15’的茶多酚含量均增幅显著。

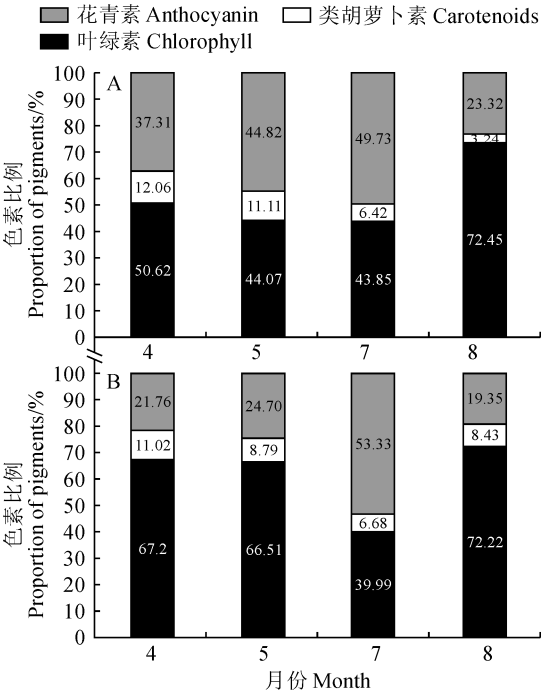


图 3 不同月份‘ZH3’(A)和‘TC15’(B)新梢色素比例的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of pigment proportion in young shoots of ‘ZH3’ (A) and ‘TC15’ (B) in different months

表 1 不同月份‘ZH3’和‘TC15’新梢生化成分含量

Table 1 Contents of biochemical components in young shoots of ‘ZH3’and ‘TC15’ in different months/%

月份 Month	ZH3				TC15			
	水浸出物 Water extracts	游离氨基酸 Free amino acids	咖啡碱 Caffeine	茶多酚 Tea polyphenols	水浸出物 Water extracts	游离氨基酸 Free amino acids	咖啡碱 Caffeine	茶多酚 Tea polyphenols
4	51.4±4.2a	7.3±0.6a	4.0±0.4a	9.2±0.9c	51.9±3.3a	3.8±0.3a	4.3±0.3a	14.7±0.9c
5	51.0±5.1a	3.5±0.3b	3.6±0.2a	18.6±1.7b	51.4±3.3a	3.5±0.2ab	3.4±0.2b	21.8±1.4b
7	51.0±4.6a	2.6±0.1c	4.0±0.3a	23.2±2.5a	52.9±3.4a	2.4±0.1c	4.2±0.3a	25.4±1.6a
8	49.8±4.1a	3.3±0.2bc	4.1±0.3a	20.0±1.9ab	49.4±3.2a	2.8±0.2bc	4.5±0.3a	19.8±1.2b

注：同列不同小写字母表示月份间在 0.05 水平差异显著 (P<0.05)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different months at 0.05 level (P<0.05)

表 2 ‘ZH3’和‘TC15’新梢色素含量与其主要品质成分含量的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between pigment contents and main biochemical component contents

指标 Indicator	‘ZH3’					‘TC5’				
	C_a	C_b	C_T	$C_{x,C}$	Ant	C_a	C_b	C_T	$C_{x,C}$	Ant
水浸出物 Water extracts	−0.107	−0.107	−0.107	0.232	0.199	0.121	−0.121	−0.030	0.333	0.515 *
游离氨基酸 Free amino acids	−0.409	−0.436	−0.421	0.460	−0.479	−0.137	0.260	0.443 *	0.137	−0.137
咖啡碱 Caffeine	0.469	0.462	0.466	−0.239	0.129	0.677 *	0.246	0.462 *	0.523 *	0.031
茶多酚 Tea polyphenols	0.631 *	0.644 *	0.637 *	−0.656 *	0.163	0.212	−0.091	−0.303	−0.061	0.788 **

注: C_a . 叶绿素 a; C_b . 叶绿素 b; C_T . 总叶绿素; $C_{x,C}$. 类胡萝卜素; Ant. 花青素。* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著

Note: C_a . Chlorophyll a; C_b . Chlorophyll b; C_T . Chlorophyll; $C_{x,C}$. Carotenoids; Ant. Anthocyanin. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively

2.5 两种茶树色素含量与其品质成分含量的相关性分析

表 2 显示,两种茶树的水浸出物含量与叶绿素 b、总叶绿素含量负相关,与类胡萝卜素含量和花青素含量均正相关,但仅与‘TC15’的花青素含量显著正相关($r=0.515^*$)。‘ZH3’的游离氨基酸含量与叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、花青素含量均呈负相关,与类胡萝卜素含量呈正相关,但均未达到显著水平;‘TC15’游离氨基酸含量与叶绿素 a、花青素含量负相关,与叶绿素 b、类胡萝卜素含量正相关,但仅与总叶绿素含量呈显著正相关($r=0.443^*$)。‘ZH3’咖啡碱含量与叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、花青素含量正相关,与类胡萝卜素含量负相关,但均未达到显著水平;‘TC15’咖啡碱含量与叶绿素 a($r=0.677^*$)、总叶绿素($r=0.462^*$)、类胡萝卜素($r=0.523^*$)含量均显著正相关,与叶绿素 b、花青素含量均呈不显著正相关。‘ZH3’茶多酚含量与叶绿素 a($r=0.631^*$)、叶绿素 b($r=0.644^*$)、总叶绿素($r=0.637^*$)含量呈显著正相关,与类胡萝卜素含量显著负相关($r=-0.656^*$),与花青素含量呈不显著正相关;‘TC15’茶多酚含量与叶绿素 a 呈不显著正相关,与花青素含量呈显著正相关($r=0.788^{**}$),与叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素含量呈不显著负相关。

3 讨 论

3.1 两种茶树新梢色素和主要生化成分的累积特征

茶树新梢中色素主要分为叶绿素、类胡萝卜素和花青素 3 大类。黄化品种‘ZH3’和常绿品系‘TC15’叶绿素 a、总叶绿素含量在 4 至 8 月份均呈

先下降再上升趋势,并在 8 月份达到最高,这与‘名山 213’、‘名山 131’和‘名山 311’的叶绿素 a 含量表现为秋季>春季>夏季^[19]的研究结果类似。两种茶树的叶绿素 b 含量变化趋势不同,但峰值都出现在 8 月份;‘ZH3’叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量在 4、5 月份远低于‘TC15’,而其叶绿素 b 含量在 7、8 月份略高于‘TC15’,致使其叶绿素含量与‘TC15’差异减小。其原因可能是本试验点位于西南地区,夏季取样时间处于梅雨季节、持续天阴有雨,而秋季气温高、光照强。试验地气温在 4、5 月份不高,植物叶绿体结构发育异常,减少了叶绿素酸酯 a 向叶绿素 b 的转化,致使叶绿素 b 减少了光能的酸酯吸收和传递,避免引起光系统Ⅱ反应中心受破坏而降低光合功能^[20];在 7 月下旬后,随着气温的升高,植物叶绿体结构恢复正常,叶绿素 a、叶绿素 b 含量增加。例如,白化茶树品种‘小雪芽’在 20℃和 25℃条件下叶绿体结构发育完整,在 20℃条件下叶绿体膜有损伤,在 15℃条件下叶肉细胞内无成熟叶绿体^[21];白榆白化芽叶绿素 b 合成在弱光下加快^[22]。另外,叶绿素 a/b 值可一定程度上反映光合能力强弱,叶绿素 a/b 值高,光活性和光合速率也高^[22]。‘ZH3’叶绿素 a/b 值峰值出现在 5 月,而‘TC15’叶绿素 a/b 值峰值出现在 7 月,表明两种茶树的高光合活性时期不同。

类胡萝卜素是对叶绿素捕获光能的补充,具有保护叶绿素不被光氧化的作用^[23]。黄化品种‘ZH3’类胡萝卜素含量呈递减趋势,与叶绿素 b 含量变化趋势总体上相反。表明 4、5 月‘ZH3’类胡萝卜素含量较高,对于光合产物的积累贡献较大,弥补叶绿素 b 含量不足。同时,常绿品系‘TC15’类胡萝卜素含量在各时期均高于‘ZH3’,而其叶绿素含量

在 4、5、7 月均远高于‘ZH3’，仅在 8 月与‘ZH3’非常接近，一定程度说明各时期‘TC15’的光合效率高 于‘ZH3’。

花青素具有过滤可见光和紫外线，减轻叶片受到 伤害的潜力^[24]。Burger 等^[25]研究发现在受到紫 外线胁迫时，高花青素的红叶受到的伤害显著低于 绿叶。本研究中茶树黄化品种‘ZH3’花青素含量在 4、5、8 月份略高于常绿品系‘TC15’，而在 7 月份比 ‘TC15’低 26.4%，表明叶绿体突变的黄化茶树新 梢更需花青素保护。两种茶树花青素含量峰值均出 现在 7 月份，这可能与该时期环境中光照较强、温度 较高有关。较强的光照和高温能诱导花青素含量增 加，致使茶树芽叶变为紫红色^[23]。而在 8 月份， ‘ZH3’和‘TC15’花青素含量均最低，这可能是该 时期温度过高所致。研究表明低温可诱导茶树中花 青素生物合成相关基因表达，促使花青素含量增加， 过高温则抑制基因表达，降低花青素积累^[26]。

叶片呈色是各种色素综合作用的结果，正常绿 色叶片中叶绿素含量高于其他色素含量，叶片呈绿 色^[27]。叶绿素含量降低，类胡萝卜素和花青素相对 含量升高，叶片呈现黄色或者红色^[28]。‘ZH3’新梢 4 月为黄色，5、7 月变为浅粉红色，8 月变为浅绿色。 ‘TC15’新梢 4、5 月为浅绿色，7 月变为绿紫色，8 月 变为浅绿色。大部分黄色变异的茶树属于光照敏感 型，新梢的黄化程度主要受光照影响，其黄化程度随 光照强度的增强而增加^[23,29-30]。温度敏感性的多为 白化变异茶树，新梢叶色受温度主导，新梢叶色除叶 脉外呈白色、奶白色或玉白，低于或超过温度范围则 出现返绿现象，返绿后叶色不可逆转^[23,29-30]。本研 究采样时间为 4、5、7、8 月，环境光照强度逐渐增强， 温度逐渐升高，且 8 月份光照最强、温度最高，而 ‘ZH3’的黄化程度随着月份逐渐减弱，于 8 月份返 绿。2019 年 10 月 17 日，观测采样地的‘ZH3’，其 新梢变为黄色。表明‘ZH3’既不属于光敏感型黄 化茶树品种，也不属于温度敏感性白化茶树品种。 低温、低光照有利于‘ZH3’新梢黄化，表明‘ZH3’可 能属于生态复合型黄化茶树品种，这有待进一步 研究。

本研究中两种茶树新梢水浸出物在月份间无显 著变化，品种(系)间也比较接近。‘ZH3’咖啡碱含 量在月份间无显著变化，而在‘TC15’中存在显著变

化。‘ZH3’和‘TC15’游离氨基酸含量变化分别为 2.6%~7.3%、2.4%~3.8%，茶多酚含量变化分别 为 9.2%~23.2%、14.7%~25.4%。‘ZH3’的游 离氨基酸含量在各时期均高于‘TC15’，其茶多酚含 量在 4、5、7 月份低于‘TC15’。这再次表明，相较于 常绿茶树，黄化茶树具有高氨基酸、品质成分含量变 幅大的特性^[13-14]。

3.2 两种茶树新梢色素含量与主要生化成分的关系

茶树新梢的色素含量、比例不仅反映光合效率 的强弱，而且与成茶品质密切相关^[23]。本研究表明 ‘ZH3’水浸出物和咖啡碱含量受色素含量影响小， 而‘TC15’受影响大。‘ZH3’、‘TC15’游离氨基酸 和茶多酚含量与新梢色素含量之间存在不同的、复 杂的正负相关性。这些结果表明受色素影响，两种 茶树新梢生化成分变化规律呈现多样性。本研究中， 黄化品种‘ZH3’游离氨基酸含量、茶多酚含量 分别与新梢类胡萝卜素含量正、负相关，表明黄化茶 树新梢类胡萝卜素含量升高有助于氮代谢、抑制碳 代谢。类胡萝卜素组分的差异是形成黄叶肉桂芽叶 黄色表型的重要因素^[31]。在一定环境条件下，黄化 茶树新梢叶色黄化明显，其氨基酸含量明显升高。 然而，冯琳^[32]推测黄化茶树新梢类胡萝卜素合成受 到抑制在代谢水平动态地促进了氨基酸合成，与本 研究结果不一致。常绿品系‘TC15’游离氨基酸含 量主要受叶绿素含量影响，茶多酚含量受花青素含 量显著影响。氮素供应充足时，常绿茶树‘龙井 43’ 叶绿素、氨基酸含量呈正相关^[33]。茶树中花青素可 在花青素还原酶作用下催化形成茶多酚的主要成分 儿茶素^[34]。一定程度解释了这一现象。其复杂的 代谢网络关系有待从代谢组等组学水平进一步 揭示。

综上所述，通过对不同时期黄化和常绿茶树新 梢色素、主要生化成分含量测定分析，研究不同月份 两种茶树新梢色素和生化成分的含量变化、积累规 律及其相互关系，初步认为黄化品种‘中黄 3 号’新 梢颜色越黄，类胡萝卜素、游离氨基酸含量越高，叶 绿素、茶多酚含量越低，叶绿素 a/b 值较高，花青素 含量适中，茶树新梢色素含量与其主要生化成分关 系密切。

参考文献:

[1] LU M Q, HAN J Y, ZHU B Y, *et al.* Significantly increased amino acid accumulation in a novel albino branch of the tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. *Planta*, 2019, **249** (2): 363-376.

[2] 刘关华, 杨 梅, 付建玉. 茶树胡萝卜素合成关键基因 *CsLCYb* 和 *CsLCYe* 的克隆与功能鉴定[J]. 茶叶科学, 2019, **39** (3): 257-266.

LIU G H, YANG M, FU J Y. Cloning and functional analysis of *CsLCYb* and *CsLCYe* for carotene biosynthesis in tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. *Journal of Tea Science*, 2019, **39** (3): 257-266.

[3] 张亚平, 金晓玲, 曾 艳, 等. 植物叶色呈色机理及化学物质的调控[J]. 北方园艺, 2017, (14): 180-184.

ZHANG Y P, JIN X L, ZENG Y, *et al.* Chemicals on plant leaf color regulations and research progress of leaf color [J]. *Northern Horticulture*, 2017, (14): 180-184.

[4] KATTENBORN T, SCHIEFER F, ZARCO-TEJADA P, *et al.* Advantages of retrieving pigment content [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] versus concentration [%] from canopy reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 230: 111 195.

[5] 高慧君, 明家琪, 张雅娟, 等. 园艺植物中类胡萝卜素合成与调控的研究进展[J]. 园艺学报, 2015, **42** (9): 1 633-1 648.

GAO H J, MING J Q, ZHANG Y J, *et al.* Regulation of carotenoids biosynthesis in horticultural crops [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, **42** (9): 1 633-1 648.

[6] NEILL S O, GOULD K S. Anthocyanins in leaves: light attenuators or antioxidants? [J]. *Functional Plant Biology*, 2003, **30** (8): 865-873.

[7] TATTINI M, LANDI M, BRUNETTI C, *et al.* Epidermal coumaroyl anthocyanins protect sweet basil against excess light stress: multiple consequences of light attenuation [J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, **152** (3): 585-598.

[8] 季鹏章, 梁名志, 宋维希, 等. 茶树珍稀品种“紫娟”的叶片色素含量与叶色变化的关系研究[J]. 西南农业学报, 2010, **23** (6): 1 860-1 862.

J I P Z, LIANG M Z, SONG W X, *et al.* Relationship between changes of pigments content and leaf color changing in ‘Zijuan’ (*Camellia sinensis* var. *assamica*) [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, **23** (6): 1 860-1 862.

[9] 蒋会兵, 孙云南, 李 梅, 等. 紫娟茶树叶片不同发育期花青素积累及合成相关基因的表达[J]. 茶叶科学, 2018, **38** (2): 174-182.

JIANG H B, SUN Y N, LI M, *et al.* Anthocyanin accumulation and expression of synthesis-related genes in leaves of different developmental stages in *Camellia sinensis* cv. Zijuan [J]. *Journal of Tea Science*, 2018, **38** (2): 174-182.

[10] 王 峰, 陈玉真, 王秀萍, 等. 不同品种茶树叶片功能性状及光合特性的比较[J]. 茶叶科学, 2016, **36** (3): 285-292.

WANG F, CHEN Y Z, WANG X P, *et al.* Comparison of leaf functional and photosynthetic characteristics in different tea cultivars [J]. *Journal of Tea Science*, 2016, **36** (3): 285-292.

[11] 田月月, 张丽霞, 侯 剑, 等. 泰安气候条件对‘黄金芽’茶树新梢呈色及生化成分的影响[J]. 山东农业科学, 2018, **50** (3): 45-49.

TIAN Y Y, ZHANG L X, HOU J, *et al.* Effects of climate condition in Taian on color and biochemical compounds of ‘Huangjinya’ tea fresh shoots [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, **50** (3): 45-49.

[12] 王新超, 马春雷, 姚明哲, 等. 影响绿茶季节间品质差异的生化因子探析[J]. 西北植物学报, 2011, **31** (6): 1 229-1 237.

WANG X C, MA C L, YAO M Z, *et al.* Biochemical components affected the seasonal differences of green tea quality [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, **31** (6): 1 229-1 237.

[13] DU Y Y, SHIN S, WANG K R, *et al.* Effect of temperature on the expression of genes related to the accumulation of chlorophylls and carotenoids in albino tea [J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2009, **84** (3): 365-369.

[14] ZHANG C Y, WANG M H, GAO X Z, *et al.* Multi-omics research in albino tea plants: past, present, and future [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 261: 108 943.

[15] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 131-133.

[16] 王 静, 王 瑾, 徐建峰, 等. 茶叶中花青素测定方法研究进展及分光光度测定法的优化 [J]. 中国茶叶加工, 2019, (3): 59-62.

WANG J, WANG J, XU J F, *et al.* Advance on detection of anthocyanins in tea and improvement of spectrophotometry [J]. *China Tea Processing*, 2019, (3): 59-62.

[17] 李 璐, 倪婷婷, 关文玉, 等. 基于响应面法提取‘紫娟’茶花青素最佳工艺的优化研究 [J]. 西南农业学报, 2014, **27** (4): 1 704-1 709.

LI L, NI T T, GUAN W Y, *et al.* Study on process of anthocyanins extraction from ‘Zijuan’ tea by response surface methodology [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, **27** (4): 1 704-1 709.

[18] 周鑫斌, 赵婷婷, 周紫嫣. SPSS25.0 在农业试验统计分析中的应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 36-91.

[19] 唐晓波, 刘晓军, 师大亮, 等. 茶叶中叶绿素含量的季节性差异研究 [J]. 浙江农业科学, 2009, **50** (3): 502-503.

- TANG X B, LIU X J, SHI D L, *et al.* Study on the seasonal differences in chlorophyll contents in tea leaves[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2009, **50**(3): 502-503.
- [20] 郭春爱, 刘芳, 许晓明. 叶绿素 b 缺失与植物的光合作用[J]. 植物生理学通讯, 2006, **42**(5): 967-973.
- GUO C A, LIU F, XU X M. Chlorophyll-b deficient and photosynthesis in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 2006, **42**(5): 967-973.
- [21] 杜颖颖. 新梢白化茶树品种白化机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [22] 王力源, 李文杰, 麻芸娇, 等. 白榆白化芽突变体光合特性及转录组分析[J]. 西北林学院学报, 2020, **35**(6): 10-16.
- WANG L Y, LI W J, MA Y J, *et al.* Photosynthetic characteristics and transcriptome analysis of albino mutant of *Ulmus pumila*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, **35**(6): 10-16.
- [23] 张向娜, 熊立瑰, 温贝贝, 等. 茶树叶色变异研究进展[J]. 植物生理学报, 2020, **56**(4): 643-653.
- ZHANG X N, XIONG L G, WEN B B, *et al.* Advances in leaf color variation of tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, **56**(4): 643-653.
- [24] SOLOVCHENKO A E, MERZLYAK M N. Screening of visible and UV radiation as a photoprotective mechanism in plants[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, **55**(6): 719-737.
- [25] BURGER J, EDWARDS G E. Photosynthetic efficiency, and photodamage by UV and visible radiation, in red versus green leaf *Coleus* varieties [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1996, **37**(3): 395-399.
- [26] 李智. 不同环境因子调控茶树紫色芽叶形成的分子机制研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.
- [27] NISHIO J N. Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2000, **23**(6): 539-548.
- [28] 魏媛, 闫伟, 杨瑞. 四种秋色叶树种转色期叶色变化的生理特性[J]. 现代园艺, 2014, (7): 17-19.
- WEI Y, YAN W, YANG R. Physiological characteristics in four fall-color trees during the color-changing period [J]. *Xiandai Horticulture*, 2014, (7): 17-19.
- [29] 卢翠, 沈程文. 茶树白化变异研究进展[J]. 茶叶科学, 2016, **36**(5): 445-451.
- LU C, SHEN C W. Research progress of albino tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. kuntze) [J]. *Journal of Tea Science*, 2016, **36**(5): 445-451.
- [30] 刘丁丁, 梅菊芬, 王君雅, 等. 茶树白化突变研究进展[J]. 中国茶叶, 2020, **42**(4): 24-35.
- LIU D D, MEI J F, WANG J Y, *et al.* Research progress on albino trait of tea plant[J]. *China Tea*, 2020, **42**(4): 24-35.
- [31] 林馨颖, 王鹏杰, 刘仕章, 等. 茶树黄化种——黄叶肉桂的类胡萝卜素组分分析[J]. 茶叶学报, 2020, **61**(3): 120-126.
- LIN X Y, WANG P J, LIU S Z, *et al.* Carotenoids in huangye Rougui tea plant [J]. *Acta Tea Sinica*, 2020, **61**(3): 120-126.
- [32] 冯琳. 茶树黄化品种的品质化学及黄化机理的分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.
- [33] 李海琳, 王丽鸳, 成浩, 等. 氮素水平对茶树重要农艺性状和化学成分含量的影响[J]. 茶叶科学, 2017, **37**(4): 383-391.
- LI H L, WANG L Y, CHENG H, *et al.* The effects of nitrogen supply on agronomic traits and chemical components of tea plant [J]. *Journal of Tea Science*, 2017, **37**(4): 383-391.
- [34] 庞丹丹, 张芬, 张亚真, 等. 茶叶花青素合成、调控及功能的研究进展[J]. 茶叶科学, 2018, **38**(6): 606-614.
- PANG D D, ZHANG F, ZHANG Y Z, *et al.* Research advance on biosynthesis, regulation and function of anthocyanins in tea plant [J]. *Journal of Tea Science*, 2018, **38**(6): 606-614.

(编辑: 裴阿卫)