

# 海南大叶种红茶品质地域分异特征及其气候响应

庄辉发<sup>1</sup>, 苏凡<sup>1</sup>, 黄鑫<sup>2</sup>, 潘梦妮<sup>2</sup>, 王辉<sup>1\*</sup>

1. 中国热带农业科学院香料饮料研究所/农业农村部香辛饮料作物遗传资源利用重点实验室/海南省热带香辛饮料作物遗传改良与品质调控重点实验室, 海南万宁 571533; 2. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000

**摘要:** 本研究以海南大叶种和云南大叶种红茶为研究对象, 通过对五指山、万宁和白沙 3 个产区的茶叶样品进行多组分分析与香气特征测定, 系统探讨品种与气候条件对红茶品质的影响。结果显示: 海南大叶种在万宁和五指山产区表现出显著的光合特性优势, 净光合速率 ( $P_n$ ) 最高达  $7.28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 且积累了丰富的氨基酸 (最高为  $93.50 \mu\text{mol}/\text{g}$ ) 和适中的咖啡碱 ( $3.93\% \sim 4.31\%$ ), 形成独特的“高氨基酸-适中苦涩”风味特征。香气成分分析结果表明, 海南大叶种呈现明显的产区差异, 万宁产区以苯乙醛 ( $14.51\%$ ) 为主的果香特征显著, 白沙产区则以芳樟醇 ( $31.18\%$ ) 为主的花香特征突出。气候适应性分析结果发现, 万宁高温气候 (年平均温度为  $24.40^\circ\text{C}$ ) 促进茶多酚和儿茶素合成, 而白沙凉爽气候 (年平均温度为  $22.30^\circ\text{C}$ ) 更利于茶黄素形成和芳香物质积累。与云南大叶种相比, 海南大叶种在光合效率、氨基酸积累和香气物质组成方面均表现出明显优势。本研究为海南红茶产区的优化布局和特色产品开发提供理论依据, 对提升海南红茶的市场竞争力具有重要指导意义。

**关键词:** 海南红茶; 光合特性; 香气成分; 气候适应性; 品质特征

中图分类号: S37; Q945.6 文献标志码: A

## Geographical Variation in Quality and Climatic Response of Hainan Large-leaf Black Tea

ZHUANG Huifa<sup>1</sup>, SU Fan<sup>1</sup>, HUANG Xin<sup>2</sup>, PAN Mengni<sup>2</sup>, WANG Hui<sup>1\*</sup>

1. Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Genetic Resource Utilization of Spice and Beverage Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Hainan Key Laboratory of Genetic Improvement and Quality Regulation for Tropical Spice and Beverage Crops, Wanning, Hainan 571533, China; 2. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665000, China

**Abstract:** This study investigated the quality variation and climatic adaptation mechanisms of Hainan large-leaf and Yunnan large-leaf black tea through multi-component analysis and aroma characterization of tea samples from Wuzhishan, Wanning, and Baisha. The results demonstrated that Hainan large-leaf tea exhibited superior photosynthetic performance in Wanning and Wuzhishan, with maximum net photosynthetic rate reaching  $7.28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , accompanied by high amino acid content (up to  $93.50 \mu\text{mol}/\text{g}$ ) and moderate caffeine levels ( $3.93\% \sim 4.31\%$ ), forming a distinctive “high amino acid-moderate astringency” flavor profile. Aroma component analysis revealed significant regional differences in Hainan large-leaf tea, with Wanning characterized by benzaldehyde ( $14.51\%$ )-dominant fruity notes and Baisha featuring linalool ( $31.18\%$ )-rich floral aroma. Climatic adaptability analysis indicated that higher temperatures in Wanning (annual average  $24.40^\circ\text{C}$ ) promoted the synthesis of tea polyphenols and catechins, while the cooler climate of Baisha (annual average  $22.30^\circ\text{C}$ ) was more conducive to theaflavins formation and aroma compound accumulation. Compared with Yunnan large-leaf tea, Hainan large-leaf tea showed significant advantages in photosynthetic efficiency, amino acid accumulation, and aroma composition. The findings would provide theoretical support for optimizing production regions and developing characteristic products of Hainan black tea, with important implications for enhancing

收稿日期 2025-09-02; 接受日期 2025-10-30

基金项目 五指山市生态科技特派员专项 (No. WZSKTPXM202201); 海南省自然科学基金青年基金项目 (No. 323QN274)。

作者简介 庄辉发 (1978—), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 作物高产高效生理。\*通信作者 (Corresponding author): 王辉 (WANG Hui), E-mail: wanghui\_gz@163.com。

its market competitiveness.

**Keywords:** Hainan black tea; photosynthetic characteristics; aroma components; climatic adaptation; quality characteristics

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.02.023

红茶以其甘甜醇厚的滋味、红艳明亮的汤色和高长优雅的香气深受全球消费者青睐，全球销量占比高达 80%<sup>[1]</sup>。其健康功效，如抗氧化、调节肠道菌群和改善心脑血管健康等，也日益受到关注<sup>[2-5]</sup>。作为茶叶原产国，中国拥有众多风格迥异的红茶产品，如祁红的“祁门香”、滇红的“蜜糖香”等，这些独特品质的形成是品种遗传特性、产区地理环境与加工工艺共同作用的结果<sup>[6]</sup>。海南作为我国唯一的热带岛屿茶产区，凭借其高温多湿、云雾缭绕的独特生态环境，孕育出了“浓强鲜爽”的海南红茶。然而，与国内知名产区相比，海南红茶产业仍面临生产规模化不足、加工技术落后及产品标准化缺失等发展瓶颈。从根本上讲，这些瓶颈源于对海南热带气候条件下红茶品质形成规律的认识不足，特别是缺乏针对“环境-生理-品质”内在关联的系统性理论支撑。

从植物生理学角度而言，茶树 90%~95%的干物质来源于光合作用<sup>[7-8]</sup>，为茶叶风味物质（如氨基酸、茶多酚、儿茶素等）的合成提供了初始底物<sup>[9-12]</sup>。红茶的香气则是发酵过程中多酚氧化聚合与糖苷类物质水解等一系列生化反应的最终产物<sup>[13]</sup>。尽管前人研究已明确了环境对茶叶品质的宏观影响，但针对海南大叶种，以下关键科学问题仍待揭示：光合作用作为物质基础的“源”，其碳同化效率与产物分配如何响应热带气候，并最

终塑造其“高氨基酸-适中苦涩”的独特风味轮廓？在相同的加工工艺下，驱动不同产区（如高温的万宁与凉爽的白沙）形成迥异香气风格（如果香与花香）的关键代谢通路及其气候调控机制是什么？目前，相关研究多停留在不同产区茶叶生化成分与香气组成的差异性描述层面，未能深入阐明气候因子调控茶树光合生理与次生代谢通路的内在机理。这一“因果机制”的缺失，限制了海南红茶品质潜力的充分发挥与产区的精准优化。本研究旨在通过相关性比较，系统解析海南大叶种红茶品质形成的气候适应机理。通过同步测定 3 个典型产区茶树的光合特性、关键生化成分及香气挥发性物质，并结合关键生理生态因子的监测，阐明热带不同气候条件对茶树光合功能及光合产物分配的调控作用，揭示气候因子通过影响香气代谢，进而决定红茶香气品质地域分异的内在规律，为海南红茶的特色化、优质化和标准化生产提供坚实的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料分别来自 3 个不同茶产区（五指山市水满乡、万宁市长丰镇和白沙县牙叉镇）的海南大叶种和云南大叶种茶树鲜叶，鲜叶嫩度为一芽二叶。不同茶产区的地理和气候情况见表 1。

表 1 不同茶产区地理和气候情况  
Tab. 1 Geographical and climatic factors in different regions

| 地点<br>Location | 纬度<br>Latitude | 经度<br>Longitude | 海拔<br>Altitude/m | 年平均气温<br>Mean annual temperature/℃ | 空气湿度<br>Air humidity/% | 年平均降水量<br>Mean annual precipitation/mm | 年日照时数<br>Annual sunshine hours/h |
|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| 五指山            | 18°46'N        | 109°32'E        | 635              | 20.5                               | 84                     | 2400                                   | 2000                             |
| 万宁             | 18°46'N        | 110°20'E        | 39.9             | 24.4                               | 75                     | 1800                                   | 1800                             |
| 白沙             | 19°23'N        | 109°44'E        | 152              | 22.3                               | 85                     | 1725                                   | 2056                             |

1.2 方法

1.2.1 试验设计 茶叶试验测定地点设在中国热带农业科学院香料饮料研究所特色茶研究中心试验示范基地，鲜叶经过萎凋、揉捻、解块、发酵、干燥等工序制成毛茶茶样。分别表示为：W<sub>1</sub>（五

指山海南大叶种）、W<sub>2</sub>（五指山云南大叶种）、N<sub>1</sub>（万宁海南大叶种）、N<sub>2</sub>（万宁云南大叶种）、B<sub>1</sub>（白沙海南大叶种）、B<sub>2</sub>（白沙云南大叶种）。采用方差分析及显著性检验对茶样的生理、生化指标进行分析比较，每个茶样进行 3 次重复。

1.2.2 指标测定 (1) 光合特性测定。于 9:00—11:00 晴朗无云的天气条件, 随机选取大叶茶向阳面的倒数第 2~3 片成熟叶片, 用 LI-6400 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)测定净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )等光合特性指标。 $CO_2$  浓度设定为  $400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、叶室流速为  $500\ \mu\text{mol}/\text{s}$ <sup>[14]</sup>。每个处理随机取 3 片叶片进行测定, 待数据稳定后记录 5 次数据用于分析。

(2) 叶绿素含量测定。使用手持式 SPAD-502Plus 随机选取大叶茶向阳面的第 2~3 片成熟叶片, 取叶片 3 片, 设 3 次重复, 计算平均值作为叶绿素含量的数值。

(3) 茶多酚含量测定。采用福林酚法测定茶多酚含量。

(4) 儿茶素含量测定。参照 GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》测定儿茶素含量。

(5) 游离氨基酸总量测定。使用氨基酸含量试剂盒测定游离氨基酸总量。

(6) 茶色素含量测定。采用系统分析法, 称取红茶粉末样品于三角瓶中, 加入一定量沸水, 在沸水浴中浸提一定时间, 期间定时摇匀。浸提完成后迅速冷却, 并定容至刻度。取部分茶汤进行过滤, 收集滤液作为待测液。吸取一定体积的待测液于分液漏斗中, 加入等体积的乙酸乙酯, 充分振荡萃取。静置分层后, 茶黄素(TFs)和茶红素(TRs)被萃取至乙酸乙酯相, 而茶褐素(TBs)则留在下层水相。分别取出液体在特定波长下测定吸光度值, 通过公式计算出含量。

(7) 可溶性糖含量测定。使用可溶性糖含量

试剂盒测定可溶性糖含量。

(8) 水浸出物含量测定。参照 GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》测定水浸出物含量。

(9) 香气成分测定。采用顶空固相微萃取(HS-SPME)结合气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)测定香气成分。

1.3 数据处理

使用 Excel 软件进行数据整理、作图, 使用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行方差及显著性分析, 使用 LSD、沃勒-邓肯法进行单因素方差分析和多重比较, 判断差异显著性。

2 结果与分析

2.1 叶绿素含量

由表 2 可知, 云南大叶种在五指山( $W_2$ )和万宁( $N_2$ )产区表现突出, 叶绿素含量分别为 75.63 和 73.44, 显著高于其他处理组( $P<0.05$ ), 表明该品种在热带气候下具有较强的叶绿素合成能力。在海南大叶种中, 万宁( $N_1$ )和白沙( $B_2$ )产区的叶绿素含量次之, 分别为 68.63 和 69.67, 而五指山海南大叶种( $W_1$ )叶绿素含量最低。这一差异可能与品种遗传特性及环境适应性有关, 云南大叶种的叶绿素积累效率普遍更高, 而海南大叶种在万宁和白沙产区的表现优于五指山, 可能与万宁较高的年平均气温( $24.4\ ^\circ\text{C}$ )和白沙适中的海拔( $152\ \text{m}$ )更利于光合色素的生物合成有关。此外, 同一产区内的品种间差异(如  $W_1$  与  $W_2$ )进一步表明遗传因素对叶绿素含量的主导作用。综上所述, 叶绿素总量受到品种遗传背景与产区环境条件的共同影响, 云南大叶种在万宁、白沙产区的环境条件更有利于叶绿素的积累。

表 2 不同产区大叶种茶的光合生理特性  
Tab. 2 Photosynthetic traits of large-leaf tea across regions

| 品种编号<br>Variety number | 叶绿素含量 (SPAD)<br>Total chlorophyll content (SPAD) | 净光合速率<br>$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | 气孔导度<br>$G_s/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | 胞间 $CO_2$ 浓度<br>$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$ | 蒸腾速率<br>$T_r/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $W_1$                  | $55.04\pm3.42^c$                                 | $3.50\pm0.07^c$                                                    | $0.01\pm0.01^b$                                                | $329.91\pm26.44^a$                                        | $0.9\pm0.12^a$                                                    |
| $W_2$                  | $75.63\pm3.35^a$                                 | $6.15\pm0.29^b$                                                    | $0.07\pm0.01^a$                                                | $220.60\pm12.85^a$                                        | $1.87\pm0.15^a$                                                   |
| $N_1$                  | $68.63\pm4.44^b$                                 | $4.35\pm0.65^b$                                                    | $0.02\pm0.01^a$                                                | $45.81\pm17.57^c$                                         | $1.13\pm0.23^a$                                                   |
| $N_2$                  | $73.44\pm3.55^a$                                 | $3.19\pm0.28^c$                                                    | $0.02\pm0.00^b$                                                | $107.29\pm14.86^b$                                        | $0.82\pm0.04^b$                                                   |
| $B_1$                  | $63.88\pm5.61^b$                                 | $7.28\pm0.20^a$                                                    | $0.01\pm0.00^c$                                                | $122.49\pm43.61^b$                                        | $0.04\pm0.02^b$                                                   |
| $B_2$                  | $69.67\pm3.07^b$                                 | $7.54\pm0.06^a$                                                    | $0.01\pm0.01^c$                                                | $173.67\pm46.49^a$                                        | $0.28\pm0.15^c$                                                   |

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。  
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ( $P<0.05$ ).

## 2.2 净光合速率

由表 2 可知, 白沙产区的海南大叶种 ( $B_1$ ) 和云南大叶种 ( $B_2$ ) 的光合性能表现最优, 其  $P_n$  值分别为  $7.28$ 、 $7.54 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 显著高于其他处理组 ( $P < 0.05$ ), 表明白沙产区较为凉爽的气候条件可能更有利于茶树光合作用的进行。云南大叶种在五指山 ( $W_2$ ) 及海南大叶种在万宁 ( $N_1$ ) 的  $P_n$  值处于中等水平, 分别为  $6.15$ 、 $4.35 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 而五指山海南大叶种 ( $W_1$ ) 与万宁云南大叶种 ( $N_2$ ) 的  $P_n$  值最低, 分别为  $3.50$ 、 $3.19 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。同一产区不同品种间  $P_n$  值存在显著差异, 例如白沙产区的  $B_1$  与  $B_2$  均显著高于其他产区, 万宁产区中  $N_1$  显著高于  $N_2$ , 表明品种遗传特性对光合效率具有重要影响。结合环境因素分析, 白沙产区较低的日平均温度和较高的空气湿度可能有助于提高叶片气孔导度和  $\text{CO}_2$  同化效率, 进而促进净光合速率的提升。以上结果说明, 茶树的光合能力不仅受遗传背景的调控, 也与产区气候条件密切相关。

## 2.3 气孔导度

由表 2 可知, 云南大叶种在五指山产区 ( $W_2$ ) 的  $G_s$  表现最高, 达  $0.07 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 显著高于其他处理组 ( $P < 0.05$ ), 表明该品种在该产区具有较强的气体交换能力。海南大叶种在万宁 ( $N_1$ ) 和云南大叶种在万宁 ( $N_2$ ) 的气孔导度处于中等水平, 而五指山海南大叶种 ( $W_1$ )、白沙海南大叶种 ( $B_1$ ) 及云南大叶种 ( $B_2$ ) 的气孔导度相对较低。这一差异可能源于品种特性与环境因子之间的交互作用, 云南大叶种在五指山产区较高的海拔和适宜的湿度条件下表现出更大的气孔开放程度, 从而有利于  $\text{CO}_2$  的吸收与光合效率的提升; 尽管白沙产区空气湿度较高, 但其相对较低的年平均气温可能在一定程度上抑制了气孔的开放。此外, 同一产区不同品种间的显著差异 (如  $W_2$  显著高于  $W_1$ ) 进一步证实遗传背景对气孔调节具有重要作用。综上所述, 气孔导度受品种遗传特性与产区气候条件的共同调控, 云南大叶种在五指山的高湿环境中表现出最优的气体交换能力。

## 2.4 胞间 $\text{CO}_2$ 浓度

由表 2 可知, 五指山产区的海南大叶种 ( $W_1$ ) 和云南大叶种 ( $W_2$ ) 的  $C_i$  值表现较高, 分别为  $329.91$ 、 $220.60 \mu\text{mol}/\text{mol}$ , 表明这 2 个品种在该环境中可能气孔限制较小, 或光合碳同化能力相对较弱。相比之下, 万宁产区的海南大叶种 ( $N_1$ )

$C_i$  值最低, 提示其可能具有较高的光合效率或较强的气孔调节能力。云南大叶种在万宁 ( $N_2$ ) 和白沙 ( $B_2$ ) 的  $C_i$  值处于中等水平, 而白沙海南大叶种 ( $B_1$ ) 的  $C_i$  值与万宁大叶种 ( $N_2$ ) 无显著差异。值得注意的是,  $C_i$  值与  $P_n$  呈现一定的负相关关系, 例如  $P_n$  最高的白沙产区样品 ( $B_1$  和  $B_2$ ) 其  $C_i$  值处于中等范围, 而  $P_n$  最低的万宁云南大叶种 ( $N_2$ ) 却具有较高的  $C_i$  值。这一现象可能反映了不同产区环境条件对叶片光合性能与气孔行为的复合调控效应。结合环境因子分析, 万宁较高的年平均气温可能增强了海南大叶种的光合酶活性, 促进  $\text{CO}_2$  消耗, 从而降低  $C_i$  值; 而五指山相对较低的气温和较高海拔可能抑制了光合碳同化效率, 导致胞间  $\text{CO}_2$  积累。以上结果表明, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度不仅受气孔导度影响, 也与叶片本身的光合能力密切相关。

## 2.5 蒸腾速率

由表 2 可知, 云南大叶种在五指山产区 ( $W_2$ )  $T_r$  表现最高, 为  $1.87 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 显著高于其他处理组 ( $P < 0.05$ ), 表明该品种在该环境条件下具有较强的水分运输与蒸腾作用能力。海南大叶种在万宁 ( $N_1$ ) 和五指山 ( $W_1$ ) 的蒸腾速率处于中等水平, 而云南大叶种在万宁 ( $N_2$ ) 的蒸腾速率显著较低。值得注意的是, 白沙产区的 2 个品种 ( $B_1$  和  $B_2$ ) 蒸腾速率最低, 这可能与该产区较低的年平均气温和较高的空气湿度共同引起的气孔关闭效应有关。从品种特性来看, 云南大叶种在五指山的高蒸腾特性 ( $W_2$ ) 与其在该产区较高的气孔导度 ( $G_s$ ) 相一致, 反映了该品种在特定生境中独特的水分利用策略; 而海南大叶种在万宁 ( $N_1$ ) 相对较高的蒸腾速率可能与其较高的净光合速率 ( $P_n$ ) 相耦合, 以协同维持光合碳同化过程的正常进行。上述结果综合表明, 茶树的蒸腾作用既受到遗传背景的调控, 也显著受到产区气候条件, 尤其是温度与湿度因子的共同影响。

## 2.6 茶多酚含量

茶多酚是决定茶叶汤色与滋味品质的关键成分, 其含量与红茶的整体品质显著相关<sup>[15]</sup>。表 3 结果显示, 不同品种及产区间茶多酚含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。在海南大叶种中, 万宁产区茶多酚含量最高 ( $18.47\%$ ), 显著高于白沙产区 ( $13.97\%$ ), 五指山产区居于中间水平 ( $17.57\%$ )。相比之下, 云南大叶种在相同产区中普遍表现出更高的茶多酚含量, 尤其在万宁产区达到  $21.15\%$ ,

显著高于其他处理 ( $P<0.05$ )。值得注意的是,海南大叶种在万宁与五指山产区之间的含量差异不显著,但二者均显著高于白沙产区。这一地理分布特征可能与气候因子的区域差异有关,万宁产区较高的年均温 ( $24.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和适中海拔 ( $39.9\text{ m}$ )

可能更有利于茶多酚的积累;而白沙产区相对较低的年降水量 ( $1725\text{ mm}$ ) 则可能在一定程度上限制了茶多酚的合成。上述结果为进一步理解海南大叶种红茶品质形成的地域性特征提供重要依据。

表 3 不同产区红茶生化成分含量  
Tab. 3 Biochemical content of black tea in different regions

| 品种编号<br>Variety number | 含量 Content               |                                                          |                          |                           |                        |
|------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|
|                        | 茶多酚<br>Tea polyphenols/% | 氨基酸<br>Amino acids/( $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 儿茶素<br>Catechins/%       | 咖啡碱<br>Purine alkaloids/% | 黄酮类<br>Flavonoids/%    |
| W <sub>1</sub>         | 17.57±0.54 <sup>b</sup>  | 86.73±0.99 <sup>a</sup>                                  | 12.48±1.33 <sup>bc</sup> | 4.31±0.23 <sup>a</sup>    | 5.72±0.05 <sup>d</sup> |
| W <sub>2</sub>         | 18.24±0.75 <sup>b</sup>  | 38.00±5.12 <sup>c</sup>                                  | 14.35±0.45 <sup>a</sup>  | 3.40±0.08 <sup>c</sup>    | 8.40±0.14 <sup>a</sup> |
| N <sub>1</sub>         | 18.47±0.84 <sup>b</sup>  | 93.50±5.55 <sup>a</sup>                                  | 13.98±0.98 <sup>ab</sup> | 3.94±0.24 <sup>abc</sup>  | 5.67±0.06 <sup>d</sup> |
| N <sub>2</sub>         | 21.15±0.82 <sup>a</sup>  | 51.38±2.54 <sup>b</sup>                                  | 11.23±1.19 <sup>cd</sup> | 3.59±0.52 <sup>bc</sup>   | 7.20±0.04 <sup>b</sup> |
| B <sub>1</sub>         | 13.97±1.48 <sup>c</sup>  | 51.95±3.90 <sup>b</sup>                                  | 10.60±0.25 <sup>d</sup>  | 3.93±0.17 <sup>abc</sup>  | 6.84±0.13 <sup>c</sup> |
| B <sub>2</sub>         | 15.25±0.52 <sup>c</sup>  | 93.16±5.74 <sup>a</sup>                                  | 8.26±0.24 <sup>e</sup>   | 4.11±0.08 <sup>ab</sup>   | 7.34±0.10 <sup>b</sup> |

| 品种编号<br>Variety number | 含量 Content             |                         |                        |                          |                           |
|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
|                        | 茶黄素<br>TFs/%           | 茶红素<br>TRs/%            | 茶褐素<br>TBs/%           | 可溶性糖<br>Soluble sugars/% | 水浸出物<br>Water extract/%   |
| W <sub>1</sub>         | 0.18±0 <sup>c</sup>    | 2.22±0.16 <sup>a</sup>  | 2.89±0.17 <sup>b</sup> | 14.92±2.20 <sup>cd</sup> | 40.40±2.08 <sup>bc</sup>  |
| W <sub>2</sub>         | 0.19±0 <sup>b</sup>    | 1.92±0.01 <sup>bc</sup> | 3.07±0.01 <sup>b</sup> | 20.89±0.83 <sup>a</sup>  | 44.08±1.65 <sup>ab</sup>  |
| N <sub>1</sub>         | 0.10±0.01 <sup>c</sup> | 1.73±0.04 <sup>d</sup>  | 3.54±0.02 <sup>a</sup> | 12.24±0.94 <sup>d</sup>  | 42.97±1.57 <sup>abc</sup> |
| N <sub>2</sub>         | 0.14±0 <sup>d</sup>    | 1.81±0.04 <sup>cd</sup> | 2.42±0.06 <sup>c</sup> | 15.97±1.68 <sup>bc</sup> | 39.54±1.21 <sup>c</sup>   |
| B <sub>1</sub>         | 0.24±0.01 <sup>a</sup> | 1.86±0.04 <sup>cd</sup> | 2.20±0.08 <sup>d</sup> | 19.26±1.11 <sup>ab</sup> | 45.43±2.30 <sup>a</sup>   |
| B <sub>2</sub>         | 0.24±0 <sup>a</sup>    | 2.05±0.07 <sup>b</sup>  | 2.40±0.08 <sup>c</sup> | 20.19±2.64 <sup>a</sup>  | 43.96±2.08 <sup>ab</sup>  |

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。  
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ( $P<0.05$ ).

2.7 氨基酸含量

氨基酸是决定茶叶品质的关键成分,对茶汤的滋味、香气及汤色等感官特性具有重要影响,其含量与茶叶综合品质呈显著正相关<sup>[16]</sup>。根据表 3 结果,不同品种及产区间氨基酸含量存在显著差异 ( $P<0.05$ )。在海南大叶种中,万宁产区的氨基酸含量最高 ( $93.50\text{ }\mu\text{mol/g}$ ),显著高于白沙产区 ( $51.95\text{ }\mu\text{mol/g}$ ),五指山产区居于中间水平 ( $86.73\text{ }\mu\text{mol/g}$ )。万宁与五指山产区之间差异不显著,但二者均显著高于白沙产区。云南大叶种的氨基酸含量则呈现不同的分布特征,其中白沙产区含量最高 ( $93.16\text{ }\mu\text{mol/g}$ ),显著高于五指山 ( $38.00\text{ }\mu\text{mol/g}$ ) 和万宁 ( $51.38\text{ }\mu\text{mol/g}$ ) 产区。这一差异可能源于品种遗传特性与环境因子的交互作用,海南大叶种在万宁和五指山等海拔相对较高产区表现出更强的氨基酸积累能力,而云南大叶种在白沙等特定生态条件下更具优势。尤其

值得注意的是,在多数产区中,海南大叶种的氨基酸含量均显著高于同产区的云南大叶种 ( $P<0.05$ ),这一特性可能是构成海南红茶独特鲜爽风味的重要生化基础。

2.8 儿茶素含量

儿茶素是红茶发酵过程中的关键前体物质,其含量直接影响茶黄素、茶红素等色素物质的形成,进而决定红茶的汤色品质<sup>[17]</sup>。由表 3 可知,海南大叶种的儿茶素含量存在显著的产区差异 ( $P<0.05$ )。其中万宁产区的儿茶素含量最高,为 13.98%,显著高于白沙产区 (10.60%),五指山产区居于中间水平 (12.48%)。尽管五指山与万宁产区之间的差异未达到显著水平,但二者均显著高于白沙产区。这一地理分布特征可能与气候因子的区域差异有关,万宁产区较高的年平均气温 ( $24.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 可能更有利于儿茶素的生物合成,而白沙产区相对较低的年平均降水量 ( $1725\text{ mm}$ )

则可能在一定程度上限制了相关代谢活动。

从品种间比较来看,海南大叶种与云南大叶种表现出不同的儿茶素积累模式。云南大叶种在五指山产区含量最高(14.35%),显著高于其他产区;而海南大叶种则在万宁产区表现出最优积累能力。特别值得注意的是,在相同产区条件下,海南大叶种的儿茶素转化效率显著高于云南大叶种( $P<0.05$ ),这一特性可能为海南红茶形成独特“金圈”汤色提供重要的物质基础。

## 2.9 咖啡碱含量

咖啡碱是茶叶的特征性品质成分,也是构成茶汤苦味的关键物质基础<sup>[18]</sup>。研究表明,咖啡碱含量与茶叶品质之间呈非线性关系,通常为2%~4%,其含量与品质呈正相关,但超过一定阈值后则可能对品质产生不利影响<sup>[19]</sup>。由表3可知,海南大叶种在不同产区的咖啡碱含量变异相对较小,介于3.93%~4.31%之间。其中,五指山产区的咖啡碱含量最高(4.31%),白沙产区最低(3.93%),万宁产区居于中间水平(3.94%),但组间差异未达到显著水平( $P>0.05$ )。这一相对稳定的含量特征表明,海南大叶种可能具备较为稳定的咖啡碱代谢调控机制。相比之下,云南大叶种的咖啡碱含量在不同产区之间差异显著( $P<0.05$ ),其中白沙产区最高(4.11%),而五指山产区最低(3.40%)。值得注意的是,在相同白沙产区条件下,海南大叶种的咖啡碱含量(3.93%)显著低于云南大叶种(4.11%)( $P<0.05$ )。这种相对适中的含量水平可能有助于形成海南红茶苦味协调、口感柔和的风味特点。结合前期氨基酸含量分析结果,海南大叶种呈现出“高氨基酸-适中咖啡碱”的独特品质组合,这一特征为开发具有海南地域特色的优质红茶产品提供重要的科学依据。

## 2.10 黄酮类含量

黄酮类物质是影响红茶感官品质的重要成分,在茶汤涩味形成与色泽呈现中发挥关键作用<sup>[20]</sup>。由表3可知,海南大叶种黄酮类含量存在显著的产区差异( $P<0.05$ ),其中白沙产区含量最高(6.84%),显著高于万宁(5.67%)和五指山产区(5.72%)。与云南大叶种相比,海南大叶种黄酮类含量总体较低,但表现出更好的产区适应性与含量稳定性。尤其在白沙产区,海南大叶种黄酮类含量(6.84%)与云南大叶种(7.34%)最为接近,结合其较高的氨基酸积累,共同构成了涩感协调、苦味适中的独特风味特征。这一相

对适中的黄酮类含量水平,在维持茶汤饱满度的同时避免了过度涩感的产生,成为海南红茶感官品质优势的重要化学基础。

## 2.11 茶色素含量

茶色素是决定红茶品质的关键指标,其中茶黄素(theaflavins, TFs)和茶红素(thearubigins, TRs)共同赋予茶汤明亮的色泽与醇厚口感,而茶褐素(theabrownins, TBs)含量过高则易导致汤色偏暗<sup>[21]</sup>。由表3可知,海南大叶种茶色素的组成存在明显的产区差异( $P<0.05$ )。白沙产区的TFs含量最高(0.24%),显著高于其他产区;五指山产区的TRs含量最高(2.22%);而万宁产区的TBs含量最高(3.54%)。这一地理分布特征表明,相对凉爽的白沙气候条件可能更有利于TFs的生成,而五指山的生态条件则更适于TRs的积累。在不同品种的比较中,海南大叶种与云南大叶种在相同产区表现出相似的茶色素变化趋势,但海南大叶种在TFs/TRs与TFs/TBs的比值方面更具优势。尤其在白沙产区,海南大叶种不仅TFs含量达到最高(0.24%),同时保持了较低的TBs含量(2.20%)。这一优良的茶色素组成配比,为其形成明亮汤色与醇厚口感奠定重要的物质基础。

## 2.12 可溶性糖含量

研究表明,可溶性糖是构成红茶醇和滋味与醇厚口感的重要成分,其含量与茶汤甜度呈显著正相关,并能够有效缓解儿茶素类物质所带来的苦涩感<sup>[22]</sup>。由表3可知,在不同产区的海南大叶种茶树中,白沙产区的可溶性糖含量最高(19.26%),显著高于万宁产区(12.24%)和五指山产区(含量居中),而万宁与五指山产区之间差异不显著。对于云南大叶种,五指山产区的可溶性糖含量最高(20.89%),与白沙产区(含量居中)无显著差异,但二者均显著高于万宁产区(15.97%)。以上结果表明,茶树品种与产区环境均对茶叶中可溶性糖的积累具有显著影响。

## 2.13 水浸出物含量

水浸出物含量是评价茶叶品质的关键指标,其水平直接影响茶汤的厚度与滋味强度<sup>[23-25]</sup>。根据表3结果,不同产区之间的水浸出物含量存在显著差异。对于海南大叶种,白沙产区的水浸出物含量最高(45.43%),显著高于五指山产区(40.40%),但与万宁产区差异不显著;云南大叶种则在五指山产区表现最优(44.08%),与白沙产区无显著差异,但二者均显著高于万宁产区

(39.54%)。这一现象表明,五指山和白沙产区的环境条件更有利于茶叶内含物质的溶出,而万宁产区可能受特定环境因子的影响,导致水浸出物含量相对较低。值得注意的是,云南大叶种在五指山产区的水浸出物含量较高,进一步印证了该品种具有较强的物质积累与浸出能力。上述发现可为茶叶产区的优化布局与品种选择提供科学依据。

2.14 香气成分

由表 4 可知,不同产区及品种的茶叶在香气成分组成上存在显著差异。万宁产区“果香型”特征的标志是苯乙醛(14.51%),苯乙醛来源于苯丙氨酸的降解代谢。万宁的高温(年平均气温 24.4℃)和相对较低的年平均降水量(1800 mm)

可能构成了环境胁迫信号,激发了茶树的苯丙烷代谢通路,导致苯乙醛等醛类物质大量积累。同时,该样本中酯类物质总量较低,暗示在高温环境下,醇类物质向酯类的转化可能受到抑制,或底物被更多地引导至醛类合成路径。白沙产区“花香型”特征的核心是芳樟醇(22.94%)含量高,芳樟醇属于单萜类化合物(萜烯类代谢通路)。白沙产区相对凉爽的气候(年平均气温 22.3℃)和较高的空气湿度(85%)更有利于萜烯类物质的合成与积累。凉爽环境可能降低了此类挥发性物质的蒸发损耗,同时,特定的温湿度组合可能上调了单萜合成酶等相关基因的表达。此外,B<sub>1</sub>中具有清甜花香的水杨酸甲酯(5.00%)含量也较高,进一步强化了其花香、草本香的风格。

表 4 香气成分含量  
Tab. 4 Aroma compound content

| 序号<br>No. | 种类<br>Type | 名称<br>Name                   | 含量 Content/%       |                    |                    |                    |                    |                    |
|-----------|------------|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|           |            |                              | W <sub>1</sub>     | W <sub>2</sub>     | N <sub>1</sub>     | N <sub>2</sub>     | B <sub>1</sub>     | B <sub>2</sub>     |
| 1         | 醇类         | 芳樟醇                          | 18.72 <sup>c</sup> | 18.62 <sup>c</sup> | 19.75 <sup>c</sup> | 26.27 <sup>b</sup> | 22.94 <sup>b</sup> | 31.18 <sup>a</sup> |
| 2         |            | 苯乙醇                          | 4.47 <sup>b</sup>  | —                  | 4.59 <sup>b</sup>  | —                  | —                  | 5.67 <sup>a</sup>  |
| 3         |            | 香叶醇                          | 4.61 <sup>a</sup>  | —                  | 2.35 <sup>b</sup>  | —                  | 1.44 <sup>c</sup>  | 2.19 <sup>b</sup>  |
| 4         |            | 橙花醇                          | 10.61 <sup>a</sup> | 3.61 <sup>c</sup>  | 5.26 <sup>b</sup>  | 2.97 <sup>cd</sup> | 6.40 <sup>b</sup>  | 1.33 <sup>d</sup>  |
| 5         |            | 反式-2-癸烯醇                     | —                  | 0.18 <sup>b</sup>  | —                  | —                  | —                  | 0.44 <sup>a</sup>  |
| 6         |            | 2-十四烷醇                       | —                  | 0.76 <sup>a</sup>  | 0.30 <sup>c</sup>  | 0.79 <sup>a</sup>  | —                  | 0.52 <sup>b</sup>  |
| 7         |            | 1-十六烷醇                       | —                  | 0.67 <sup>a</sup>  | —                  | 0.40 <sup>b</sup>  | —                  | —                  |
| 8         |            | 二氢芳樟醇                        | —                  | —                  | 8.66               | —                  | —                  | —                  |
| 9         |            | 1-壬醇                         | —                  | —                  | 0.22               | —                  | —                  | —                  |
| 10        |            | 反式-橙花叔醇                      | —                  | —                  | —                  | —                  | —                  | 0.30               |
| 11        |            | (S)-氧化芳樟醇                    | —                  | —                  | 1.89               | —                  | —                  | —                  |
| 12        |            | 2,2,6-三甲基-6-乙 烯基四氢-2H-呋喃-3-醇 | 0.61 <sup>b</sup>  | 0.36 <sup>c</sup>  | 0.48 <sup>bc</sup> | 0.37 <sup>c</sup>  | 0.13 <sup>d</sup>  | 1.55 <sup>a</sup>  |
| 13        | 醛类         | 苯甲醛                          | —                  | —                  | —                  | —                  | 1.314              | —                  |
| 14        |            | 苯乙醛                          | 4.67 <sup>cd</sup> | 1.12 <sup>d</sup>  | 14.51 <sup>a</sup> | 5.63 <sup>c</sup>  | 8.83 <sup>b</sup>  | 5.67 <sup>c</sup>  |
| 15        |            | 癸醛                           | 1.94 <sup>a</sup>  | —                  | 0.41 <sup>c</sup>  | —                  | 1.33 <sup>b</sup>  | —                  |
| 16        |            | 2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛         | 0.67 <sup>a</sup>  | —                  | —                  | —                  | 0.32 <sup>b</sup>  | 0.61 <sup>a</sup>  |
| 17        |            | (Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛         | 0.52               | —                  | —                  | —                  | —                  | —                  |
| 18        |            | 柠檬醛                          | 3.56 <sup>a</sup>  | —                  | —                  | 1.47 <sup>b</sup>  | —                  | —                  |
| 19        |            | 2-苯基巴豆醛                      | —                  | —                  | 0.29               | —                  | —                  | —                  |
| 20        |            | 3-羟基-4-甲氧基苯甲醛                | —                  | —                  | 0.24 <sup>b</sup>  | 0.54 <sup>a</sup>  | —                  | —                  |
| 21        |            | 2,4-二甲基苯甲醛                   | —                  | —                  | —                  | —                  | —                  | 0.68               |
| 22        |            | 2,6,6-三甲基-1-环己烯基乙醛           | —                  | —                  | —                  | —                  | —                  | 0.24               |
| 23        |            | 十二醛                          | —                  | —                  | 0.22 <sup>bc</sup> | 0.58 <sup>a</sup>  | 0.36 <sup>b</sup>  | —                  |
| 24        |            | 顺-7-十四烯醛                     | 0.25               | —                  | —                  | —                  | —                  | 0.69               |

续表 4 香气成分含量  
Tab. 4 Aroma compound content (continued)

| 序号<br>No. | 种类<br>Type  | 名称<br>Name         | 含量 Content/%       |                    |                    |                    |                    |                   |
|-----------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
|           |             |                    | W <sub>1</sub>     | W <sub>2</sub>     | N <sub>1</sub>     | N <sub>2</sub>     | B <sub>1</sub>     | B <sub>2</sub>    |
| 25        | 酯类          | 辛酸甲酯               | 2.84 <sup>bc</sup> | 3.98 <sup>b</sup>  | 2.00 <sup>bc</sup> | 15.14 <sup>a</sup> | 2.35 <sup>bc</sup> | —                 |
| 26        |             | 辛酸丙酯               | —                  | —                  | —                  | —                  | 0.13               | —                 |
| 27        |             | 辛酸乙酯               | 16.09              | —                  | —                  | —                  | —                  | —                 |
| 28        |             | 辛酸己酯               | —                  | —                  | 10.96              | —                  | —                  | —                 |
| 29        |             | 癸酸甲酯               | —                  | —                  | —                  | 1.10               | —                  | —                 |
| 30        |             | 癸酸乙酯               | —                  | 1.39 <sup>a</sup>  | 1.19 <sup>b</sup>  | —                  | 0.81 <sup>c</sup>  | —                 |
| 31        |             | 辛酸辛酯               | —                  | —                  | 3.28               | —                  | —                  | —                 |
| 32        |             | 水杨酸甲酯              | 2.16 <sup>cd</sup> | 2.44 <sup>cd</sup> | 2.58 <sup>cd</sup> | 3.37 <sup>c</sup>  | 5.00 <sup>b</sup>  | 7.97 <sup>a</sup> |
| 33        |             | 辛酸 3-甲基丁酯          | —                  | 2.04 <sup>a</sup>  | 0.74 <sup>b</sup>  | —                  | 1.91 <sup>a</sup>  | —                 |
| 34        |             | 苯甲酸苄酯              | —                  | 0.25 <sup>c</sup>  | 0.68 <sup>a</sup>  | 0.43 <sup>b</sup>  | —                  | —                 |
| 35        |             | 肉豆蔻酸异丙酯            | —                  | 1.59 <sup>a</sup>  | 0.22 <sup>c</sup>  | —                  | —                  | 0.59 <sup>b</sup> |
| 36        |             | 邻苯二甲酸二异丁酯          | —                  | 0.57 <sup>b</sup>  | —                  | 3.53 <sup>a</sup>  | —                  | —                 |
| 37        |             | 邻苯二甲酸二丁酯           | —                  | —                  | 0.70 <sup>b</sup>  | 2.86 <sup>a</sup>  | —                  | —                 |
| 38        |             | 棕榈酸异丙酯             | —                  | 0.33 <sup>a</sup>  | —                  | —                  | 0.19 <sup>b</sup>  | 0.36 <sup>a</sup> |
| 39        |             | 甲苯-2,4-二异氰酸酯       | —                  | —                  | —                  | —                  | —                  | 0.53              |
| 40        |             | 正辛酸异丁酯             | —                  | 0.51 <sup>a</sup>  | —                  | —                  | 0.21 <sup>b</sup>  | —                 |
| 41        | 酮类          | β-紫罗兰酮             | 0.73 <sup>a</sup>  | —                  | —                  | —                  | 0.11 <sup>b</sup>  | —                 |
| 42        |             | β-紫罗酮              | 2.88 <sup>a</sup>  | 0.32 <sup>b</sup>  | —                  | —                  | 0.22 <sup>b</sup>  | —                 |
| 43        |             | 茉莉酮                | —                  | 0.36               | —                  | —                  | —                  | —                 |
| 44        |             | 香叶基丙酮              | —                  | 0.58 <sup>a</sup>  | —                  | —                  | 0.52 <sup>b</sup>  | —                 |
| 45        |             | 2-十四酮              | —                  | —                  | —                  | 0.34               | —                  | —                 |
| 46        | 烯<br>烃<br>类 | 顺-1-甲基双环癸烷-2,10-二酮 | 0.38 <sup>b</sup>  | 0.44 <sup>a</sup>  | —                  | —                  | —                  | —                 |
| 47        |             | β-石竹烯              | 1.69               | —                  | —                  | —                  | —                  | —                 |
| 48        |             | 2-蒾烯               | 0.29 <sup>b</sup>  | 0.71 <sup>a</sup>  | —                  | —                  | —                  | —                 |
| 49        |             | 柠檬烯                | 6.39 <sup>a</sup>  | —                  | 0.60 <sup>b</sup>  | 0.37 <sup>b</sup>  | 0.24 <sup>b</sup>  | —                 |
| 50        | 酸类          | 7-十四碳烯             | —                  | —                  | 0.36 <sup>b</sup>  | 0.33 <sup>b</sup>  | —                  | 0.42 <sup>a</sup> |
| 51        |             | 月桂酸                | —                  | —                  | —                  | —                  | 0.18               | —                 |
| 52        |             | 硬脂酸                | —                  | —                  | 0.28               | —                  | —                  | —                 |
| 53        |             | 苯甲酸                | —                  | —                  | 0.86               | —                  | —                  | —                 |
| 54        |             | 肉豆蔻酸               | —                  | 0.68 <sup>b</sup>  | 0.27 <sup>c</sup>  | 0.55 <sup>b</sup>  | 6.64 <sup>a</sup>  | 0.65 <sup>b</sup> |
| 55        | 烷<br>烃<br>类 | 棕榈酸                | 0.64 <sup>c</sup>  | 1.29 <sup>b</sup>  | 0.69 <sup>c</sup>  | 1.05 <sup>b</sup>  | 3.39 <sup>ab</sup> | 4.39 <sup>a</sup> |
| 56        |             | 十一烷                | —                  | —                  | —                  | —                  | 1.56               | —                 |
| 57        |             | 正十三烷               | —                  | —                  | —                  | —                  | 2.14               | —                 |
| 58        |             | 十四烷                | —                  | —                  | —                  | —                  | 0.14               | —                 |
| 59        |             | 十五烷                | 0.25 <sup>b</sup>  | 0.45 <sup>a</sup>  | 0.24 <sup>b</sup>  | —                  | —                  | 0.25 <sup>b</sup> |
| 60        |             | 十七烷                | —                  | 0.21 <sup>a</sup>  | —                  | —                  | 0.17 <sup>b</sup>  | —                 |
| 61        |             | 十九烷                | —                  | 0.42 <sup>b</sup>  | 0.22 <sup>c</sup>  | —                  | —                  | 0.72 <sup>a</sup> |
| 62        |             | 二十烷                | 0.65 <sup>b</sup>  | 0.20 <sup>c</sup>  | 0.29 <sup>c</sup>  | —                  | 2.85 <sup>a</sup>  | 0.57 <sup>b</sup> |
| 63        |             | 二十一烷               | 6.12               | —                  | —                  | —                  | —                  | —                 |

续表 4 香气成分含量  
Tab. 4 Aroma compound content (continued)

| 序号<br>No. | 种类<br>Type  | 名称<br>Name   | 含量 Content/%      |                   |                    |                   |                    |                   |
|-----------|-------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|           |             |              | W <sub>1</sub>    | W <sub>2</sub>    | N <sub>1</sub>     | N <sub>2</sub>    | B <sub>1</sub>     | B <sub>2</sub>    |
| 64        | 烷<br>烃<br>类 | 二十四烷         | —                 | 0.66 <sup>b</sup> | 0.88 <sup>a</sup>  | 0.40 <sup>c</sup> | —                  | 0.41 <sup>c</sup> |
| 65        |             | 二十六烷         | —                 | 1.01 <sup>a</sup> | 0.24 <sup>c</sup>  | 0.65 <sup>b</sup> | —                  | —                 |
| 66        |             | 环十二烷         | —                 | 1.02 <sup>a</sup> | 0.48 <sup>b</sup>  | 0.51 <sup>b</sup> | —                  | —                 |
| 67        |             | 十六甲基庚烷       | —                 | —                 | 2.77               | —                 | —                  | —                 |
| 68        | 其他          | 1,2-环氧十六烷    | —                 | 0.41              | —                  | —                 | —                  | —                 |
| 69        |             | 2,4-二叔丁基苯酚   | —                 | 0.98 <sup>a</sup> | 0.50 <sup>b</sup>  | 0.45 <sup>b</sup> | 0.87 <sup>ab</sup> | 0.99 <sup>a</sup> |
| 70        |             | 2-甲氧基-5-甲基苯胺 | —                 | 4.48              | —                  | —                 | —                  | —                 |
| 71        |             | 3,4-环氧四氢呋喃   | —                 | 0.44 <sup>b</sup> | 0.72 <sup>a</sup>  | 0.49 <sup>b</sup> | —                  | —                 |
| 72        |             | 乙酸铵          | —                 | —                 | 0.27               | —                 | —                  | —                 |
| 73        |             | 双酚 A         | 2.22 <sup>a</sup> | 1.16 <sup>c</sup> | 1.13 <sup>c</sup>  | 1.61 <sup>b</sup> | 0.42 <sup>d</sup>  | 0.42 <sup>d</sup> |
| 74        |             | 咖啡因          | 2.70 <sup>a</sup> | 0.83 <sup>c</sup> | 2.22 <sup>ab</sup> | 1.84 <sup>b</sup> | 0.94 <sup>c</sup>  | 0.90 <sup>c</sup> |

注：同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）；—表示无或可忽略不计。  
Note: Different lowercase letters after the same row of data indicate significant difference among treatments ( $P<0.05$ ); — Indicates none or negligible.

在万宁，海南大叶种以苯乙醛为主导，而云南大叶种虽也以苯乙醛为主，但含量（5.63%）远低于海南大叶种，且出现了高比例的辛酸甲酯（15.14%），这赋予了其潜在的果香兼脂肪香。表明即使在相同环境下，2 个品种对香气前体的利用和转化效率存在根本差异。在白沙，云南大叶种将品种特性与凉爽气候的效应叠加，其芳樟醇含量达到了所有样本中最高，为 31.18%，显著高于同产区的海南大叶种（22.94%）。这表明云南大叶种可能具备更强的萜烯类物质合成遗传潜力，在适宜环境下能得到极致表达。

五指山样本的香气组成更为复杂，未形成单一主导优势，海南大叶种同时拥有较高含量的橙花醇（10.61%，花香）、柠檬烯（6.39%，柑橘香）和辛酸乙酯（16.09%，果香-酒香），这可能与其高海拔带来的昼夜温差大、云雾多等复杂气候条件有关，导致多种代谢通路被同时激活。部分样本中检测到较高含量的长链脂肪酸（如棕榈酸）和烷烃，这些物质阈值较高，对主体香气贡献微弱，但其过量存在可能与特定土壤环境或品种的代谢背景有关，在后续研究中需关注其是否对香气纯净度产生潜在影响。

本研究证实，在标准化加工前提下，红茶香气的地域分异本质上是品种的遗传代谢蓝图在特定气候条件下的具体表达。海南大叶种表现出高度的气候敏感性，其香气代谢在万宁偏向于苯丙烷通路（果香），在白沙偏向于萜烯类通路（花香）。

而云南大叶种则显示出在凉爽地区强化萜烯合成的巨大潜力。这为通过“品种-气候”精准匹配来定向塑造海南红茶香气风格提供坚实的代谢组学依据。

### 2.15 红茶营养成分的相关性分析

红茶生化成分相关分析表明，茶多酚与儿茶素含量呈显著正相关，共同构成了茶汤强度的核心及苦涩感的来源；然而，它们与游离氨基酸总量普遍呈现负相关关系，揭示了茶树代谢中碳架偏向于酚类物质合成与偏向于氨基酸合成的竞争性分配机制。值得注意的是，氨基酸与可溶性糖之间表现出显著的协同积累趋势，二者通过贡献鲜爽与甘甜滋味，并能有效中和儿茶素尤其是酯型儿茶素带来的强烈涩感，共同奠定了茶汤醇和饱满的滋味基础。在香气与色泽的形成层面，具有花果香的醇、醛类物质（如芳樟醇、苯乙醛）与其相应的糖苷前体含量以及多酚氧化程度密切相关，而茶黄素的形成则与特定儿茶素组分的氧化聚合效率呈正相关。这种复杂的相关性网络清晰地表明，红茶的卓越品质并非由单一组分主导，而是依赖于以“适宜的酚氨比”为核心的，多种呈味、呈色及呈香物质之间精妙的动态平衡与协同作用。

### 3 讨论

本研究解析了品种与气候因子对海南大叶种红茶品质形成的协同调控机理，研究结果显示，

海南大叶种在光合效率、氨基酸积累及香气物质组成上相较于云南大叶种具有明显优势,且这些优势的表达强烈依赖于产区的气候条件。

### 3.1 气候条件通过调控光合碳同化主导初级代谢产物的分配

本研究揭示了海南大叶种的光合特性地域分异,白沙产区的海南大叶种表现出最高的净光合速率,同时伴随着较低的胞间  $\text{CO}_2$  浓度,这表明其光合机构在高湿环境下保持了极高的碳同化效率,而非单纯受气孔限制<sup>[7, 14]</sup>。这种高效的光合作用为后续代谢提供了丰富的碳骨架和能量。不同的气候条件引导了光合产物的差异化分配:在温度较高的万宁产区,光合产物更多地流向茶多酚和儿茶素的合成路径,这符合高温促进聚酯类代谢的普遍规律;而在相对凉爽的白沙产区,碳流则倾向于氨基酸和可溶性糖的积累,这种“碳分配偏向”直接塑造了海南大叶种“高氨基酸-适中茶多酚”的独特滋味物质基础,其中万宁、五指山产区的高氨基酸特性尤为突出,有效中和了由适中水平咖啡碱和儿茶素带来的潜在苦涩感,形成了其“鲜爽醇和”的核心风味<sup>[16, 19]</sup>。

### 3.2 气候因子是驱动香气代谢通路分异与风格形成的关键外在驱动力

在统一的加工工艺下,海南大叶种呈现出鲜明的产区特异性香气风格,这强有力地证明了气候是调控香气前体合成与转化的关键环境信号。香气成分数据揭示了其内在的代谢通路调控机制:万宁产区的高温环境显著激活了苯丙烷类代谢通路,促使关键香气前体苯乙醛大量积累,赋予了红茶典型的果香与甜香特征<sup>[13]</sup>;相反,白沙产区的凉爽条件更利于萜烯类物质的合成与保存,其中芳樟醇及其氧化物作为花香型化合物的显著富集,构成了该产区红茶清雅花香风格的主体。此外,白沙产区海南大叶种在拥有最高净光合速率的同时,也形成了最高的茶黄素含量,这暗示其凉爽气候不仅有利于花香物质的积累,也通过影响发酵过程中儿茶素的氧化聚合效率,优化了茶汤的亮度和强度<sup>[21]</sup>。这种香气与色泽物质在相同气候条件下的协同形成规律,为通过生态选址定向调控红茶品质风格提供理论依据。

### 3.3 品种的遗传特性决定了其对气候响应的效率与品质潜力

尽管气候效应显著,但品种间的固有差异决定了其品质的上限。研究发现,即使在相同万宁

产区,海南大叶种的氨基酸含量也极显著高于云南大叶种,说明海南大叶种可能具备更高效的氮代谢与氨基酸合成遗传基础。同样,在光合效率上,海南大叶种在白沙和万宁的表现均优于或等同于同产区的云南大叶种,表明其对海南热带气候具有更优的生理适应性。因此,海南大叶种“高氨基酸、适中苦涩”的品质特征,是其优异遗传背景与海南独特气候生态互作的必然结果。

## 4 结论

本研究为海南红茶生产的精准调控提供了明确的实践路径。海南大叶种在白沙等凉爽高湿产区表现出最优的综合品质,推荐作为高端红茶的核心发展区域,其高光合效率奠定了物质基础,易于形成“花香浓郁、滋味鲜爽醇和”的典型风格。万宁等高温产区则更适于开发“果香显、滋味浓强”的特色产品。品种选择上,应优先推广海南大叶种,因其具备“高氨基酸、适中咖啡碱”的优异遗传基础,能天然形成协调性更好的风味。栽培与加工上,在白沙产区应注重保护与促进糖苷类香气前体的积累与水解,以强化花香;在万宁产区则可适度提高发酵强度,促进儿茶素向茶黄素转化及果香型醛类物质的形成。综上所述,实施“白沙产区做高端醇爽花香茶,万宁产区做特色浓强果香茶,优先选用海南大叶种”的差异化产区与品种布局策略,是系统性提升海南红茶品质特色与市场竞争力的关键。

## 参考文献

- [1] 孙洪,王新宇,刘成玉,陈岗,陈岚,杨群,徐书豪,李大祥,练学燕,王立磊,陈贵杰,杨天元. 红茶健康功效及其作用机制研究进展[J]. 中国茶叶, 2025, 47(6): 1-15.  
SUN H, WANG X Y, LIU C Y, CHEN G, CHEN L, YANG Q, XU S H, LI D X, LIAN X Y, WANG L L, CHEN G J, YANG T Y. Research progress on health benefits and mechanisms of black tea[J]. China Tea, 2025, 47(6): 1-15. (in Chinese)
- [2] LUO T, JIANG J G. Anticancer effects and molecular target of theaflavins from black tea fermentation *in vitro* and *in vivo*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(50): 15052-15065.
- [3] NASIR N F, MOHAMAD N E, ALITHEEN N B. Fermented black tea and its relationship with gut microbiota and obesity: a mini review[J]. Fermentation, 2022, 8(11): 603.

- [4] MHATRE S, SRIVASTAVA T, NAIK S, PATRAVALE V. Antiviral activity of green tea and black tea polyphenols in prophylaxis and treatment of COVID-19: a review[J]. *Phytomedicine*, 2021, 85: 153286.
- [5] MA C, ZHENG X H, YANG Y. The effect of black tea supplementation on blood pressure: a systematic review and dose-response meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Food & Function*, 2021, 12(1): 41-56.
- [6] 刘盼盼, 郑鹏程, 龚自明, 叶飞, 冯琳, 高士伟, 王雪萍, 王胜鹏, 腾靖, 郑琳, 桂安辉. 工夫红茶品质分析与综合评价[J]. *食品科学*, 2021, 42(12): 195-205.
- LIU P P, ZHENG P C, GONG Z M, YE F, FENG L, GAO S W, WANG X P, WANG S P, TENG J, ZHENG L, GUI A H. Quality analysis and comprehensive evaluation of Chinese congou black tea[J]. *Food Science*, 2021, 42(12): 195-205. (in Chinese)
- [7] 王强, 王馨, 王清. 茶树生长发育对环境条件的要求[J]. *四川农业科技*, 2011, 12: 28-29.
- WANG Q, WANG X, WANG Q. Environmental requirements for tea plant growth and development[J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2011, 12: 28-29. (in Chinese)
- [8] 刘东娜, 龚雪蛟, 李兰英, 黄藩, 尧渝, 胥亚琼, 高远, 罗凡. 黄化茶树叶片光合及荧光特性分析[J]. *茶叶科学*, 2023, 43(6): 757-768.
- LIU D N, GONG X J, LI L Y, HUANG F, YAO Y, XU Y Q, GAO Y, LUO F. Analysis of photosynthetic and fluorescence characteristics of albino tea plants[J]. *Journal of Tea Science*, 2023, 43(6): 757-768. (in Chinese)
- [9] ZHANG H H, LI Y L, LYU Y J, JIANG Y L, PAN J X, DUAN Y W, ZHU Y J, ZHANG S K. Influence of brewing conditions on taste components in Fuding white tea infusions[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(9): 2826-2833.
- [10] LIU P P, YIN J F, Chen G S, WANG F, XU Y Q. Flavor characteristics and chemical compositions of oolong tea processed using different semi-fermentation times[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(3): 1185-1195.
- [11] SCHARBERT S, HOFMANN T. Molecular definition of black tea taste by means of quantitative studies, taste reconstitution, and omission experiments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(13): 5377-5384.
- [12] WANG K B, RUAN J. Analysis of chemical components in green tea in relation with perceived quality, a case study with Longjing teas[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2009, 44(12): 2476-2484.
- [13] 赵丹, 吕才有. 红茶香气研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(23): 45-46, 83.
- ZHAO D, LYU C Y. Research progress of the aroma of black tea[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(23): 45-46, 83. (in Chinese)
- [14] 杨丽冉, 杨广容, 马会杰, 李家华, 吕才有, 文勤枢. 云南茶树品种光合特性及其影响因素的研究[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(1): 19-26.
- YAN L R, YANG G R, MA H J, LI J H, LYU C Y, WEN Q S. Photosynthetic characteristics and its influential factors of tea cultivars in Yunnan province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(1): 19-26. (in Chinese)
- [15] 尚卫琼, 陈春林, 孙承冕, 唐一春, 段志芬, 杨盛美, 孙雪梅, 刘本英. 云南大叶种茶多酚和咖啡碱对红茶品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(1): 155-159.
- SHANG W Q, CHEN C L, SUN C M, TANG Y C, DUAN Z F, YANG S M, SUN X M, LIU B Y. Effects of polyphenols and caffeine in yunnan large-leaf tea on black tea quality[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(1): 155-159. (in Chinese)
- [16] 范仕胜, 肖一璇, 范乔. 茶叶中氨基酸含量及其检测方法研究进展[J]. *农技服务*, 2023, 40(1): 41-44.
- FAN S S, XIAO Y X, FAN Q. Research progress on amino acid content and detection methods in tea[J]. *Agricultural Technology Service*, 2023, 40(1): 41-44. (in Chinese)
- [17] 李燕, 密孝增, 张小琴, 乔大河, 代新龙, 陈正武. 普安古茶树种质资源茶叶生化成分多样性分析[J]. *江苏农业学报*, 2025, 41(5): 984-995.
- LI Y, MI X Z, ZHANG X Q, QIAO D H, DAI X L, CHEN Z W. Diversity analysis of biochemical components of ancient tea germplasm re-sources in Pu'an[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 41(5): 984-995. (in Chinese)
- [18] 梁思慧, 郭维, 杨春, 郭燕. 贵州姑普古茶树种质资源的生化成分特征分析与评价[J]. *贵州农业科学*, 2025, 53(4): 94-103.
- LIANG S H, GUO W, YANG C, GUO Y. Analysis and evaluation of biochemical component characteristics of guizhou ancient tea tree germplasm resources in Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2025, 53(4): 94-103. (in Chinese)
- [19] 龚雪, 周顺珍, 陈娟, 杨春, 郭燕, 陈正武. 不同茶树品种(品系)绿茶与红茶咖啡碱含量的比较分析[J]. *茶叶通讯*, 2018, 45(1): 34-37.
- GONG X, ZHOU S Z, CHEN J, YANG C, GUO Y, CHEN Z W. The comparative study on caffeine content in green tea and black tea made of different tea cultivars or strains[J]. *Journal of Tea Communication*, 2018, 45(1): 34-37. (in Chinese)
- [20] 龚雪蛟, 秦琳, 黄颖博, 张翔, 叶玉龙, 李兰英, 尧渝, 王迎春, 罗凡. 茶园施肥模式对茶叶黄酮类及糖苷类代谢物

- 含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1867-1883.
- GONG X J, QIN L, HUANG Y B, ZHANG X, YE Y L, LI L Y, YAO Y, WANG Y C, LUO F. Effects of fertilization patterns on flavonoids and glycoside metabolites in tea[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(10): 1867-1883. (in Chinese)
- [21] 杨延, 杨邴婷, 查银娟. 红茶茶色素的提取、功效及应用研究进展[J]. 广东蚕业, 2021, 55(1): 69-70.
- YANG Y, YANG L T, ZHA Y J. Research progress on extraction, efficacy and application of theapigments in black tea[J]. Guangdong Sericulture, 2021, 55(1): 69-70. (in Chinese)
- [22] 张娅楠. 黄金茶 1 号夏秋红茶加工技术及香味品质形成机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
- ZHANG Y N. Study on the processing technology andforming mechanism of aroma and taste quality of black tea of Hunanjin 1 tea madingin summer and autumn[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [23] 雷鑫, 陈秋月, 李春莲, 段红星, 马燕, 李成华, 赵明. 临沧茶区晒青茶滋味特征性组分分析[J]. 中国茶叶加工, 2025(2): 31-38.
- LEI X, CHEN Q Y, LI C L, DUAN H X, MA Y, LI C H, ZHAO M. Analysis of the characteristic taste components of sun-dried green tea of tea area from lincang tea area[J]. China Tea Processing, 2025(2): 31-38. (in Chinese)
- [24] 何渺源, 王成杰, 张见明, 徐军, 黄艳, 曾绍校. 竹香型白茶加工工艺优化及品质研究[J]. 食品科技, 2025, 50(5): 95-104.
- HE M Y, WANG C J, ZHANG J M, XU J, HUANG Y, ZENG S J. Optimization of processing technology and quality of bamboo-scented white tea[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(5): 95-104. (in Chinese)
- [25] 史田斌, 王多锋, 张露荷, 尉秋实, 张洋军, 殷德怀, 李学敏. 陇南地区 8 个茶品种品质评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(6): 309-317.
- SHI T B, WANG D F, ZHANG L H, YU Q S, ZHANG Y J, YIN D H, LI X M. Quality assessment of eight tea varieties in Longnan region[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(6): 309-317. (in Chinese)