

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241009006

引用格式: 彭心雨, 邵陈禹, 李鑫, 等. 干旱协同遮阴对红茶和白茶滋味香气的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 275–283.

PENG XY, SHAO CY, LI X, *et al.* Effects of drought synergistic shading on the flavor and aroma of black tea and white tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 275–283. (in Chinese with English abstract).

干旱协同遮阴对红茶和白茶滋味香气的影响

彭心雨¹, 邵陈禹^{1,2}, 李鑫¹, 陈子琪¹, 李游¹, 刘俊杰¹, 刘婕^{1,2}, 沈程文^{1*}

(1. 湖南农业大学茶学教育部重点实验室, 国家植物功能成分利用工程技术研究中心, 植物功能成分利用省部共建协同创新中心, 农业农村部园艺作物基因资源评价利用重点实验室, 长沙 410128; 2. 湖南省彩云谷茶叶有限公司, 益阳 413506)

摘要: **目的** 探究遮阴协同干旱对夏秋季红茶和白茶品质的影响。**方法** 本研究通过对遮阴、干旱和遮阴加干旱的多组实验设置, 加工得轻发酵的白茶与重发酵的红茶。本研究分别对 4 组红茶、白茶茶样进行感官品质评价, 利用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)对品质成分和滋味组分进行比较分析。**结果** 遮阴协同干旱处理提升了水浸出物、游离氨基酸、鲜味氨基酸如茶氨酸、甜味氨基酸如苏氨酸、醇类等的含量, 从而显著提升了茶叶的鲜爽味($P<0.05$)。同时, 在红茶中, 降低了缬氨酸等苦味氨基酸, 茶多酚、儿茶素的含量, 显著降低了夏秋茶的苦涩味($P<0.05$)。香气检测中发现, 在红茶中共检测到 98 个物质, 其中醇类含量最高, 遮阴加干旱组显著高于干旱组($P<0.05$)。在白茶中共检测到 85 个物质, 其中醇类占比最高。**结论** 本研究结果为夏秋季极端天气条件下生产红茶与白茶提供了新思路, 不仅有效改善夏秋茶的苦涩味, 还可以提升鲜叶利用率, 对茶园生产管理也具有重要指导意义。

关键词: 茶叶; 干旱; 遮阴; 品质; 香气

Effects of drought synergistic shading on the flavor and aroma of black tea and white tea

PENG Xin-Yu¹, SHAO Chen-Yu^{1,2}, LI Xin¹, CHEN Zi-Qi¹, LI You¹, LIU Jun-Jie¹, LIU Jie^{1,2}, SHEN Cheng-Wen^{1*}

(1. Key Laboratory of Tea Science of Ministry of Education, Hunan Agricultural University, National Research Center of Engineering & Technology for Utilization of Functional Ingredients from Botanicals, Co-innovation Center of Education Ministry for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Key Laboratory for Evaluation and Utilization of Gene Resources of Horticultural Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Changsha 410128, China;
2. Hunan Caiyungu Tea Co., Ltd., Yiyang 413506, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of shading and drought on the quality of black tea and white tea

收稿日期: 2024-10-09

基金项目: 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设专项(2022SFQ48); 国家重点研发计划项目(2022YFD1600801); 湖南省科技创新重大项目(2021NK1020); 湖南省现代农业产业技术体系项目(湘农函[2024]98号)

第一作者: 彭心雨(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为茶叶品质化学与加工方向研究。E-mail: pengxinyu@stu.hunau.edu.cn

*通信作者: 沈程文(1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶生物学、品质化学与加工方向研究。E-mail: shencw@hunau.edu.cn

in summer and autumn. **Methods** Light fermented white tea and heavy fermented black tea were processed through multiple experimental settings of shade, drought, and a combination of shade and drought. The 4 groups of black tea and white tea samples were evaluated for sensory quality. Additionally, high performance liquid chromatography (HPLC) and headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) technologies were employed to conduct a comparative analysis of quality components and taste components. **Results** Shading combined with drought treatment increased the levels of water extracts, free amino acids, umami amino acids such as theanine, sweet amino acids like threonine, alcohols, thereby significantly enhanced the fresh taste of the tea ($P<0.05$). Concurrently, in black tea, the concentrations of bitter amino acids such as valine, tea polyphenols, catechins were reduced, leading to a marked decrease in the bitterness and astringency of summer and autumn tea ($P<0.05$). Aroma testing revealed a total of 98 substances in black tea, with alcohols being the most prevalent. The concentration in the shade plus drought group was significantly higher than the drought group ($P<0.05$). In white tea, 85 substances were identified, with alcohols comprising the largest proportion. **Conclusion** The findings of this study offer new insights for the production of black and white tea under extreme summer and autumn weather conditions. This approach not only effectively mitigates the bitterness of summer and autumn tea but also enhances the utilization rate of fresh leaves, providing crucial guidance for tea garden production management.

KEY WORDS: tea; drought; shade; quality; aroma

0 引言

茶是世界上最重要的饮料作物之一,是世界上仅次于水的最受欢迎的饮料^[1]。在全球气候变暖的情况下,夏季极端高温和干旱等灾害性天气频繁发生,严重影响茶树的生长发育,致使茶叶品质和产量下降,甚至最终使茶树死亡^[2]。夏秋茶产量较高,占茶叶总产量一半以上^[3],但夏秋茶品质差、经济效益低,且大部分夏秋茶不能被有效利用。因此夏秋茶的有效利用是一个亟待解决的问题,可以提高茶产业的整体效益,从而推动整体领域的稳定发展。如何在极端天气下提高夏秋茶的品质也成为一个问题,研究者分别在茶叶种植阶段和茶叶加工阶段提升茶叶品质,包括采前措施:选育优良品种^[4-6]、施肥^[7-8]、遮光^[9-10]、气候变化^[11-12]、修剪^[13]以及采后措施:加工工艺^[14-15]。

遮阴是一种茶叶农艺措施技术,通过在茶园中搭建遮阳棚或种植遮阴树木来减少茶树的日照时间。有研究者认为随着遮光度的增加,茶树鲜叶中的丙氨酸、天冬酰胺、天冬氨酸、异亮氨酸、苏氨酸、亮氨酸和缬氨酸的水平显著升高^[16]。有研究发现夏秋季的茶树进行 55%、75%、90% 遮光后的效果不同。遮光率越高,茶园生态环境的温湿度的改善越大,叶绿素含量显著增加,氨基酸含量上升,而儿茶素(DL-catechin, DL-C)含量减少^[17-18]。因此,本研究对夏季茶树采取遮阴、干旱以及遮阴加干旱处理,通过生理生化、气相色谱-质谱联用法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)等研究手段,探究遮阴、干旱多重处理对茶叶滋味、香气物质的影响,旨在提升夏秋茶

品质,为茶园管理提供一定的科学理论基础。

1 材料与方法

1.1 茶样制备

以多年生茶树品种‘楮叶齐’为实验材料,鲜叶于 2023 年 9 月采自湖南长沙云游茶业有限公司,采前遮阴组(S 组与 D+S 组)通过覆盖 80%遮阳网、采前非干旱组(CK 组与 S 组)利用灌溉装置进行 10 d 一次持续 15 min 的喷灌、D 组不做任何处理,进行为期 3 个月的实验处理,分别是 CK(对照组)、D(干旱组)、S(遮阴组)、D+S(遮阴+干旱组),分别采摘一芽二叶鲜叶经萎凋、揉捻、发酵、干燥制成红茶,部分鲜叶经过萎凋 70 h 制成白茶,每种茶样重复 3 次。

1.2 试剂与仪器

N,N-二甲基甲酰胺(色谱纯)、乙腈(色谱纯)、乙酸、甲醇(色谱纯)、氯化钠、碳酸钠、福林酚、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、茚三酮、三氯化铝、蒽酮、无水葡萄糖(纯度大于 98%)(上海医药集团试剂有限公司);表儿茶素(epicatechin, EC)、没食子儿茶素、DL-C、表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)、儿茶素没食子酸酯、表儿茶素没食子酸酯(epicatechin gallate, ECG)、天冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、组氨酸、精氨酸、苏氨酸、丙氨酸、脯氨酸、茶氨酸、半胱氨酸、酪氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、赖氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸标准品(纯度 98%)(北方伟业计量技术研究院);癸酸乙酯(纯度 99%)(上海阿拉丁生化科技有限公司)。

HPLC1620LC 液相色谱仪、ACCQTagTM 色谱柱(3.9 mm×150 mm, 5 μm)(美国安捷伦科技有限公司);GC-MS-

QP2010 气相色谱-质谱仪、UV-1750 紫外可见分光光度计(日本岛津科技有限公司); HP5-MS 色谱柱(60 m × 0.25 mm, 0.25 μm)、SPME 固相微萃取进样手柄(美国 Supelco 公司); 45 μm PDM/DVB 固相微萃取头(上海安普科技股份有限公司); Alpha 1-4/LSC Plus 真空冷冻干燥机(湖南长沙博仪科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 感官审评

参照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》, 由 5 位具有高级职称茶叶加工研究专家进行。评分采用百分制, 品质审评包括外形占 25%、香气占 25%、汤色占 10%、滋味占 30%和叶底占 10%。

1.3.2 生化成分测定

水浸出物、游离氨基酸、茶多酚、可溶性糖、黄酮分别参照 GB/T 8305—2013《茶叶水浸出物测定》、GB/T 8314—2013《茶游离氨基酸总量的测定》、GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚含量的检测方法》、硫酸-萘酚比色法和氯化铝溶液稀释法。

1.3.3 儿茶素、氨基酸组分和香气物质测定

DL-C 和氨基酸组分用 HPLC 进行含量测定。香气物质成分采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)对萃取的香气成分进行定性、定量分析。

1.4 数据处理

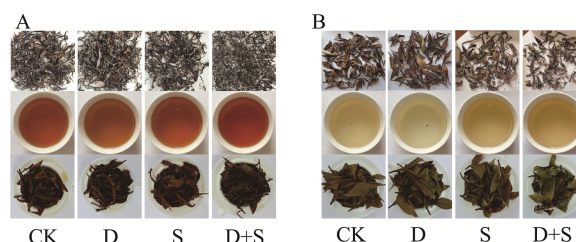
本次实验数据均由 3 次独立重复的实验获得, 利用 SPSS 27.0 统计软件进行方差分析, 实验数据以平均数据±相对标准偏差表示; 利用 Origin 2021 软件绘制聚类热图;

利用 SIMCA 14.1 软件绘制主成分分析图(principal components analysis, PCA)、偏最小二乘法判别分析图(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)和置换验证图。

2 结果与分析

2.1 感官品质

如图 1 及表 1 所示, D+S 组与 S 组的红茶外形条索紧结、金毫明显, 汤色橙红明亮, 滋味鲜爽醇厚, 香气带有花香, 嫩芽肥重; 而 D 组茶叶条索较紧结, 汤色尚红明亮, 滋味鲜醇尚农, 嫩芽少, 两组区别明显。与红茶相比, D+S 组的白茶表现也优于 D 组, 外形芽毫肥壮、白毫显露明显、匀净, 汤色嫩黄明亮, 嫩香, 鲜爽醇厚, 叶底软嫩匀齐; D 组外形嫩芽瘦小且不匀, 汤色尚绿黄明亮, 清香, 醇厚较鲜爽, 叶底尚软嫩匀齐。对其进行加权评分后发现, 白茶总分排名 D+S 组>S 组>CK 组>D 组, 红茶总分排名 D+S 组=S 组>CK 组>D 组。



注: A. 红茶; B. 白茶。

图 1 4 组不同处理成品茶感官品质审评图片
Fig.1 Image review for sensory quality of the 4 groups of different treatment into tea

表 1 茶叶感官审评结果
Table 1 Results of sensory evaluation of tea

品种	茶样	外形		汤色		香气		滋味		叶底		总分
		描述	分数	描述	分数	描述	分数	描述	分数	描述	分数	
红茶	CK	条索紧结有金毫	90.2±0.2	橙红明亮	90.9±0.3	嫩甜香	91.2±0.3	鲜醇	92.4±0.3	肥嫩	91.2±0.3	91.2±0.2
	D	条索较紧结	84.8±0.3	尚红明亮	88.6±0.4	甜纯	89.1±0.4	鲜醇尚浓	90.3±0.3	嫩软	88.6±0.4	88.3±0.3
	S	条索紧结显金毫	92.5±0.3	橙红明亮	92.1±0.3	甜香	90.2±0.4	鲜醇	92.7±0.3	肥嫩多芽	91.6±0.2	91.8±0.3
	D+S	条索紧结显金毫	92.4±0.3	橙红明亮	92.7±0.2	花香、嫩香	91.8±0.2	鲜醇带花香	93.4±0.4	嫩软	88.9±0.2	91.8±0.2
白茶	CK	芽较瘦小匀净	91.3±0.2	尚绿黄明亮	90.8±0.3	嫩香	91.7±0.1	醇厚较鲜爽	90.6±0.1	尚软嫩匀齐	89.4±0.2	90.8±0.2
	D	芽较瘦小尚匀净	88.7±0.3	尚绿黄明亮	90.4±0.2	清香	89.4±0.4	醇厚较鲜爽	90.2±0.3	尚软嫩匀齐	90.3±0.2	89.8±0.3
	S	芽毫肥壮白毫显匀净	94.9±0.1	嫩黄明亮	94.2±0.3	清香	90.1±0.4	鲜爽醇厚	91.9±0.3	软嫩匀齐	91.3±0.2	92.5±0.3
	D+S	芽毫肥壮白毫显匀净	94.4±0.2	嫩黄明亮	92.7±0.3	嫩香	92.3±0.2	鲜爽醇厚	91.6±0.3	软嫩匀齐	91.9±0.2	92.6±0.2

2.2 生化成分

2.2.1 常规理化分析

本研究分别对‘楮叶齐’一芽二叶红茶、白茶的水浸出物、游离氨基酸、茶多酚、生物碱、DL-C 等生化成分进行测定。由表 2 可知, 红茶 D+S 组的水浸出率为(45.28±0.23)% 显著高于 D 组(40.42±0.34)%、CK 组(41.85±0.42)% ($P<0.05$); 游离氨基酸在 D 组含量为(17.17±0.39) mg/g, 而 D+S 组含量显著上升为(26.03±0.40) mg/g ($P<0.05$); 茶多酚含量 D+S 组含量(127.63±3.31) mg/g 显著低于 CK 组(165.32±3.62) mg/g ($P<0.05$); 可可碱、茶碱、咖啡碱在 D+S 组中含量均高于 D 组; 红茶没食子酸在干旱处理后含量下降, 而通过遮阴处理可以使之提升。另外, 水浸出物、游离氨基酸、生物碱在白茶的 D+S 组与 D 组的区别与红茶类似。以上结果表明遮阴加干旱处理可以丰富茶叶的滋味强度, 提升茶叶的鲜爽味。

茶叶中的 DL-C 主要分为酯型儿茶素、非酯型儿茶素。红茶 D+S 组儿茶素总量为(19.44±0.47) mg/g 显著低于 CK 组(23.47±0.55) mg/g ($P<0.05$); 酯型儿茶素(EGC、EGCG、ECG) 在 D+S 组中分别是(2.23±0.01)、(3.07±0.09)、(3.82±0.12) mg/g 低于 D 组, 分别是(2.34±0.05)、(7.22±0.11)、(7.09±0.11) mg/g; 白茶 D+S 组的非酯型儿茶素 EC 含量(0.20±0.00) mg/g 低于 D 组(1.07±0.01) mg/g, 酯型儿茶素(EGC、ECG) 在 D+S 组中分别是(4.77±0.02) mg/g、(14.69±0.10) mg/g 显著低于 D 组($P<0.05$), 分别是(5.10±0.02) mg/g、(15.54±0.12) mg/g。以上数据表明遮阴与 DL-C 的下降程度呈正相关, 因此遮阴可以缓解 DL-C 带来的苦涩味, 增加茶叶的滋味强度,

从而提升茶叶品质。

2.2.2 氨基酸组分分析

在茶样中检测到 18 种氨基酸, 如表 3 所示, 总氨基酸含量在遮阴后含量显著上升($P<0.05$), D+S 组的红茶为(2.412±0.097) mg/g、白茶为(3.674±0.098) mg/g, 其中鲜味氨基酸包括天冬氨酸、谷氨酸、茶氨酸在红茶 D+S 组中分别是(0.215±0.003)、(0.201±0.004)、(1.401±0.087) mg/g; 而天冬氨酸和茶氨酸在白茶 D+S 组中是(0.215±0.001) mg/g、(1.753±0.102) mg/g, 均显著高于 D 组($P<0.05$)。甜味氨基酸包括苏氨酸、丝氨酸、丙氨酸、甲硫氨酸、半胱氨酸、脯氨酸、甘氨酸, 红茶中苏氨酸、丝氨酸、丙氨酸、脯氨酸的含量在遮阴协同干旱处理后显著上升, 白茶中苏氨酸、丙氨酸与脯氨酸的含量在遮阴协同干旱处理后也显著上升($P<0.05$)。苦味氨基酸包括缬氨酸、赖氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、组氨酸、精氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸, 其中缬氨酸在红茶 D+S 组[(0.013±0.001) mg/g]显著低于 D 组[(0.029±0.002) mg/g] ($P<0.05$); 赖氨酸、异亮氨酸在白茶 D+S 组的含量分别是(0.040±0.004) mg/g、(0.047±0.003) mg/g 也显著低于 D 组($P<0.05$)。上述表明, 遮阴可以提升氨基酸含量尤其是增加甜味、鲜味氨基酸, 苦味氨基酸含量下降, 降低茶叶的苦涩味、提升茶叶的鲜爽味。

采用聚类热图能清晰地发现各非挥发性成分在 4 组之间的分布规律, 该图将生化成分、DL-C 组分和氨基酸组分进行聚类分析。图 2 中颜色越红表示含量越高, 颜色越绿表示含量越低。如图 2 所示, 将白茶聚类为两部分包括遮阴组

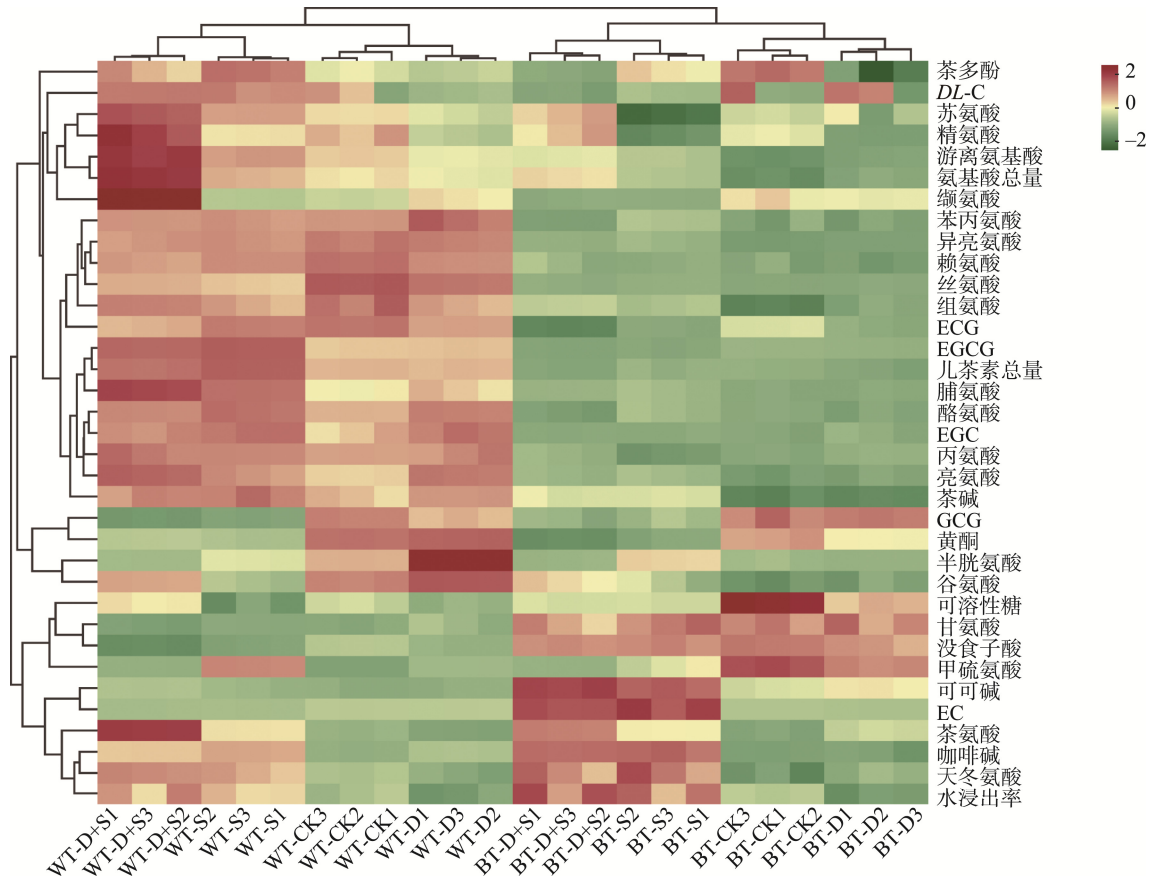
表 2 茶叶生化成分含量
Table 2 Content of biochemical components in tea

生化成分	红茶				白茶			
	CK	D	S	D+S	CK	D	S	D+S
水浸出率/%	41.85±0.42 ^c	40.42±0.34 ^d	44.65±0.47 ^b	45.28±0.23 ^a	41.59±0.37 ^c	40.54±0.49 ^d	43.35±0.37 ^b	44.06±0.26 ^a
游离氨基酸/(mg/g)	14.50±0.46 ^d	17.17±0.39 ^c	22.10±0.24 ^b	26.03±0.40 ^a	30.23±0.35 ^c	26.53±0.28 ^d	34.50±0.32 ^b	45.07±0.33 ^a
茶多酚/(mg/g)	165.32±3.62 ^a	115.13±4.23 ^d	147.57±3.84 ^b	127.63±3.31 ^c	142.24±3.74 ^c	136.96±3.86 ^d	164.88±4.38 ^a	154.48±4.37 ^b
可溶性糖/(mg/g)	55.03±0.52 ^a	46.93±0.42 ^b	43.23±0.39 ^c	43.40±0.31 ^c	43.00±0.41 ^b	40.50±0.42 ^c	38.43±0.45 ^d	45.17±0.33 ^a
黄酮/(mg/g)	7.38±0.10 ^a	6.28±0.13 ^b	4.69±0.06 ^c	4.07±0.06 ^d	8.11±0.10 ^b	8.36±0.14 ^a	5.27±0.07 ^d	5.46±0.02 ^c
可可碱/(mg/g)	0.52±0.02 ^d	0.67±0.02 ^c	1.22±0.02 ^b	1.37±0.02 ^a	0.23±0.02 ^d	0.25±0.02 ^c	0.29±0.02 ^b	0.37±0.02 ^a
没食子酸/(mg/g)	2.18±0.02 ^a	1.98±0.02 ^c	2.08±0.03 ^b	2.05±0.02 ^b	1.28±0.03 ^a	1.11±0.04 ^b	0.98±0.03 ^c	0.78±0.02 ^d
茶碱/(mg/g)	0.06±0.01 ^b	0.06±0.01 ^b	0.12±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.14±0.02 ^c	0.15±0.01 ^{bc}	0.17±0.01 ^a	0.16±0.01 ^{ab}
咖啡碱/(mg/g)	26.24±0.52 ^b	25.98±0.37 ^c	41.28±0.43 ^a	41.09±0.68 ^a	27.80±0.45 ^d	29.49±0.44 ^c	37.28±0.42 ^a	35.40±0.59 ^b
EGC/(mg/g)	2.16±0.05 ^{bc}	2.34±0.05 ^a	2.24±0.07 ^{ab}	2.23±0.01 ^{ab}	4.11±0.01 ^d	5.10±0.02 ^{ab}	5.18±0.02 ^a	4.77±0.02 ^c
DL-C/(mg/g)	1.03±0.00 ^b	1.25±0.01 ^a	0.76±0.01 ^c	0.56±0.01 ^d	1.14±0.01 ^c	0.74±0.01 ^d	1.58±0.01 ^b	1.67±0.01 ^a
EC/(mg/g)	0.68±0.01 ^c	0.45±0.01 ^d	10.20±0.01 ^a	9.61±0.01 ^b	1.04±0.01 ^b	1.07±0.01 ^a	0.25±0.01 ^c	0.20±0.00 ^d
EGCG/(mg/g)	8.15±0.13 ^a	7.22±0.11 ^b	3.96±0.10 ^c	3.07±0.09 ^d	30.80±0.11 ^d	32.03±0.09 ^c	52.53±0.11 ^a	50.37±0.11 ^b
GCG/(mg/g)	0.65±0.00 ^a	0.66±0.00 ^a	0.20±0.01 ^b	0.15±0.00 ^c	0.64±0.01 ^a	0.50±0.00 ^b	0.10±0.01 ^c	0.05±0.00 ^d
ECG/(mg/g)	10.81±0.11 ^a	7.09±0.11 ^b	6.77±0.11 ^c	3.82±0.12 ^d	17.96±0.13 ^a	15.54±0.12 ^c	17.40±0.11 ^b	14.69±0.10 ^d
儿茶素总量/(mg/g)	23.47±0.55 ^{ab}	19.01±0.48 ^{cd}	24.14±0.44 ^a	19.44±0.47 ^c	55.68±0.53 ^c	54.99±0.43 ^{cd}	77.04±0.41 ^a	71.75±0.40 ^b

注: 表没食子酸酯儿茶素(epigallocatechin gallate, EGC); 没食子儿茶素没食子酸酯(gallocatechin gallate, GCG)。不同字母表示不同组之间有差异显著性($P<0.05$), 下同。

表 3 氨基酸组分含量(mg/g)
Table 3 Content of amino acid composition (mg/g)

氨基酸组分	红茶				白茶			
	CK	D	S	D+S	CK	D	S	D+S
天冬氨酸	0.125±0.008 ^c	0.144±0.006 ^d	0.224±0.002 ^a	0.215±0.003 ^b	0.154±0.007 ^c	0.138±0.008 ^d	0.201±0.004 ^b	0.215±0.001 ^a
丝氨酸	0.045±0.001 ^d	0.051±0.003 ^c	0.069±0.002 ^a	0.063±0.004 ^{ab}	0.463±0.012 ^a	0.406±0.011 ^b	0.269±0.015 ^d	0.308±0.018 ^c
谷氨酸	0.131±0.005 ^d	0.141±0.008 ^c	0.168±0.003 ^b	0.201±0.004 ^a	0.236±0.011 ^b	0.260±0.013 ^a	0.163±0.010 ^d	0.221±0.008 ^c
甘氨酸	0.030±0.001 ^c	0.031±0.001 ^b	0.032±0.002 ^a	0.028±0.001 ^d	0.013±0.002 ^b	0.015±0.001 ^a	0.013±0.001 ^b	0.012±0.001 ^c
组氨酸	0.039±0.003 ^d	0.062±0.002 ^c	0.077±0.002 ^b	0.085±0.002 ^a	0.148±0.002 ^a	0.125±0.001 ^c	0.124±0.003 ^c	0.140±0.002 ^b
精氨酸	0.164±0.010 ^b	0.103±0.008 ^c	0.087±0.009 ^d	0.194±0.008 ^a	0.203±0.012 ^b	0.140±0.011 ^d	0.178±0.015 ^c	0.273±0.017 ^a
苏氨酸	0.019±0.001 ^b	0.018±0.002 ^b	0.010±0.002 ^c	0.025±0.001 ^a	0.023±0.001 ^c	0.020±0.002 ^d	0.026±0.001 ^b	0.031±0.001 ^a
丙氨酸	0.034±0.003 ^b	0.041±0.004 ^a	0.024±0.004 ^c	0.043±0.002 ^a	0.106±0.008 ^c	0.117±0.007 ^b	0.116±0.006 ^b	0.124±0.009 ^a
脯氨酸	0.040±0.004 ^c	0.040±0.002 ^c	0.058±0.007 ^a	0.052±0.003 ^b	0.106±0.002 ^d	0.127±0.001 ^c	0.183±0.003 ^b	0.214±0.004 ^a
茶氨酸	0.503±0.021 ^d	0.806±0.043 ^c	0.975±0.055 ^b	1.401±0.087 ^a	0.607±0.053 ^c	0.496±0.047 ^d	1.018±0.087 ^b	1.753±0.102 ^a
半胱氨酸	0.001±0.000 ^b	0.001±0.000 ^b	0.003±0.000 ^a	0.001±0.000 ^b	0.004±0.000 ^b	0.008±0.000 ^a	0.002±0.000 ^c	0.001±0.000 ^d
酪氨酸	0.039±0.003 ^b	0.034±0.002 ^c	0.051±0.004 ^a	0.030±0.002 ^d	0.107±0.008 ^c	0.130±0.011 ^b	0.138±0.013 ^a	0.125±0.012 ^{bc}
甲硫氨酸	0.028±0.003 ^a	0.023±0.002 ^b	0.014±0.001 ^c	0.008±0.001 ^d	0.006±0.001 ^c	0.009±0.001 ^b	0.023±0.002 ^a	0.008±0.001 ^b
缬氨酸	0.033±0.002 ^a	0.029±0.002 ^b	0.014±0.001 ^c	0.013±0.001 ^c	0.024±0.001 ^c	0.033±0.001 ^b	0.021±0.002 ^d	0.071±0.005 ^a
赖氨酸	0.011±0.001 ^c	0.009±0.001 ^d	0.013±0.001 ^b	0.016±0.001 ^a	0.048±0.003 ^a	0.042±0.004 ^b	0.043±0.004 ^b	0.040±0.004 ^c
异亮氨酸	0.002±0.001 ^d	0.004±0.001 ^c	0.011±0.001 ^a	0.009±0.001 ^b	0.054±0.002 ^a	0.052±0.003 ^b	0.048±0.002 ^c	0.047±0.003 ^d
亮氨酸	0.007±0.001 ^d	0.009±0.001 ^c	0.014±0.001 ^a	0.013±0.001 ^b	0.029±0.002 ^d	0.042±0.004 ^b	0.037±0.003 ^c	0.045±0.003 ^a
苯丙氨酸	0.017±0.001 ^b	0.016±0.001 ^c	0.024±0.002 ^a	0.016±0.001 ^c	0.046±0.003 ^b	0.053±0.005 ^a	0.046±0.004 ^b	0.046±0.004 ^b
总量	1.268±0.068 ^d	1.560±0.074 ^c	1.869±0.054 ^b	2.412±0.097 ^a	2.378±0.084 ^c	2.212±0.108 ^d	2.650±0.112 ^b	3.674±0.098 ^a



注: WT: 白茶; BT: 红茶。

图 2 非挥发性成分的分布情况

Fig.2 Distribution of non-volatile components

和未遮阴组,其中苏氨酸、精氨酸、缬氨酸、甲硫氨酸、天冬氨酸、茶氨酸、脯氨酸、氨基酸总量、水浸出率、游离氨基酸、可溶性糖、DL-C、EGCG 等主要聚类在 D+S 组,而苯丙氨酸、异亮氨酸、赖氨酸、丝氨酸、GCG、黄酮等主要聚类在 D 组;在红茶中茶多酚、DL-C、ECG、GCG、黄酮、甲硫氨酸、甘氨酸等主要聚类在 D 组,而苏氨酸、精氨酸、半胱氨酸、可可碱、茶碱、咖啡碱、水浸出率、游离氨基酸、EC 等主要聚类在 D+S 组聚类结果与审评结果、生化成分分析结果有很大的相似度,更加证实了遮阴协同干旱处理会提升夏秋茶的滋味品质。

2.3 香气分析

对 4 个处理的红茶与白茶进行了 GC-MS 香气物质检测,在红茶中共检测到 98 个物质,包括 9 大类(醇类 23 种、酯类 27 种、酚类 3 种、醛类 6 种、酮类 7 种、烯类 20 种、杂环类 4 种、芳烃类 3 种、其他 5 种)(表 4),其中醇类含量最高,D+S 组为(271.13±5.67) $\mu\text{g/L}$ 显著高于 D 组(177.38±6.48) $\mu\text{g/L}$ ($P<0.05$);酯类 D+S 组为(71.74±1.12) $\mu\text{g/L}$ 、D 组为(56.66±1.27) $\mu\text{g/L}$;醛类 D+S 组(43.59±0.77) $\mu\text{g/L}$ 、D 组为(16.84±0.62) $\mu\text{g/L}$;杂环类 D+S 组(20.05±2.00) $\mu\text{g/L}$ 、D 组(8.56±0.73) $\mu\text{g/L}$,而烯类与芳烃类在遮阴处理后含量下降。在白茶中共检测到 85 个物质,包括 8 大类(醇类 25 种、酯类 25 种、酚类 1 种、

醛类 9 种、酮类 7 种、烯类 11 种、杂环类 3 种、其他 4 种),其中醇类占比最高。D+S 组醇类含量为(190.59±4.76) $\mu\text{g/L}$ 、D 组为(135.62±3.95) $\mu\text{g/L}$;酯类 D+S 组(95.45±2.97) $\mu\text{g/L}$ 、D 组(37.04±1.03) $\mu\text{g/L}$;酮类 D+S 组(34.58±2.07) $\mu\text{g/L}$ 、D 组(20.15±1.12) $\mu\text{g/L}$;杂环类 D+S 组(15.82±1.47) $\mu\text{g/L}$ 、D 组(3.26±0.44) $\mu\text{g/L}$,4 类香气物质含量均有显著差异 ($P<0.05$)。

2.4 滋味品质分析

本研究对 4 组白茶、红茶的非挥发性成分做了 PCA 分析,包括常规成分、DL-C 类、氨基酸类,由图 3 可知,红茶第一主成分贡献率 PCA1=59.2%、第二主成分贡献率 PCA2=20.2%,白茶第一主成分贡献率 PCA1=60.4%、第二主成分贡献率 PCA2=19.2%。由此可知 4 个处理组之间有明显差异,同一茶样组内关系更近。为了更直接地分析主要滋味成分上不同处理组茶样的差异,采用 PLS-DA 分析方法对主要滋味物质的检测结果进行进一步分析,建立了一个 PLS-DA 模型(红茶: $R^2X=0.593$, $R^2Y=0.363$, $Q^2=0.473$;白茶: $R^2X=0.603$, $R^2Y=0.192$, $Q^2=0.511$,未出现过拟合)。由 PLS-DA 验证模型可见(图 4),进行 200 次交叉验证, R^2 与 Y 轴截距小于 0.5, Q^2 与 Y 轴截距小于 0,说明该模型可靠,未出现过拟合。

表 4 香气物质类别含量($\mu\text{g/L}$)
Table 4 Category content of aroma substances ($\mu\text{g/L}$)

茶样	处理	醇类	烯类	酯类	酮类	醛类	酚类	芳烃类	杂环类	其他
红茶	CK	255.66±5.28 ^{bc}	90.01±1.28 ^a	87.07±1.72 ^a	21.99±0.85 ^a	24.01±0.73 ^c	6.97±0.51 ^b	4.15±0.57 ^a	16.40±1.57 ^c	18.32±1.25 ^d
	D	177.38±6.48 ^d	58.51±1.02 ^b	56.66±1.27 ^d	15.37±0.94 ^c	16.84±0.62 ^d	5.70±0.63 ^c	2.79±0.42 ^c	8.56±0.73 ^d	26.80±2.03 ^c
	S	258.90±8.02 ^b	54.28±1.17 ^{cd}	73.90±1.07 ^b	21.13±0.80 ^{ab}	34.76±0.71 ^b	14.14±0.66 ^a	2.05±0.33 ^d	30.37±2.07 ^a	31.39±2.71 ^b
	D+S	271.13±5.67 ^a	55.92±1.18 ^c	71.74±1.12 ^c	15.91±0.84 ^c	43.59±0.77 ^a	5.62±0.43 ^c	3.83±0.30 ^b	20.05±2.00 ^b	38.20±2.93 ^a
白茶	CK	189.40±4.28 ^b	36.98±1.74 ^a	55.46±1.12 ^c	29.98±1.07 ^c	29.14±1.73 ^b	7.65±0.97 ^b	0.001±0.00 ^a	13.20±1.07 ^b	6.58±0.62 ^b
	D	135.62±3.95 ^c	29.55±1.03 ^b	37.04±1.03 ^d	20.15±1.12 ^d	28.22±0.89 ^c	5.74±0.790 ^c	0.001±0.00 ^a	3.26±0.44 ^d	3.87±0.71 ^c
	S	198.01±5.07 ^a	26.89±1.23 ^c	67.44±2.06 ^b	30.41±1.67 ^b	32.66±1.34 ^a	6.00±0.94 ^c	0.001±0.00 ^a	10.59±1.07 ^c	6.06±0.38 ^b
	D+S	190.59±4.76 ^b	23.80±1.67 ^d	95.45±2.97 ^a	34.58±2.07 ^a	25.49±1.07 ^d	8.35±0.97 ^a	0.001±0.00 ^a	15.82±1.47 ^a	8.15±0.18 ^a

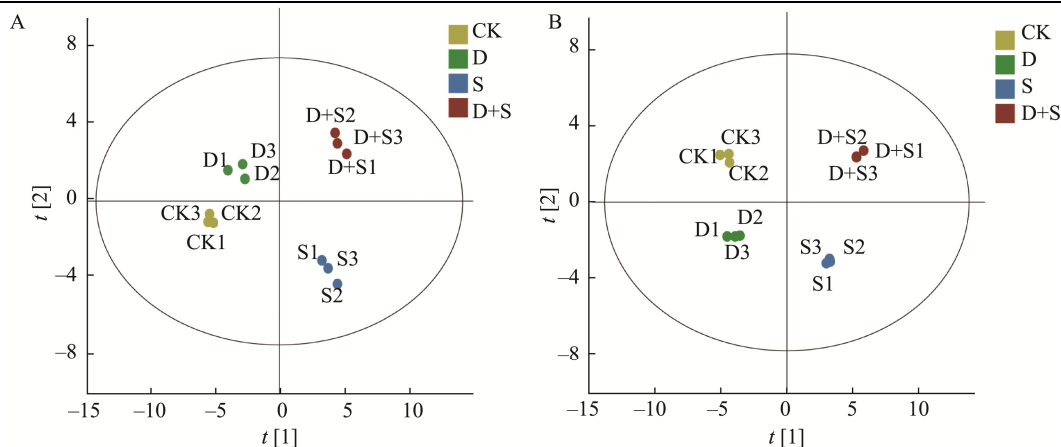


图 3 不同处理组红茶(A)、白茶(B)的滋味组分 PCA 得分图

Fig.3 PCA scores of taste components for different treatment groups of black tea (A) and white tea (B)

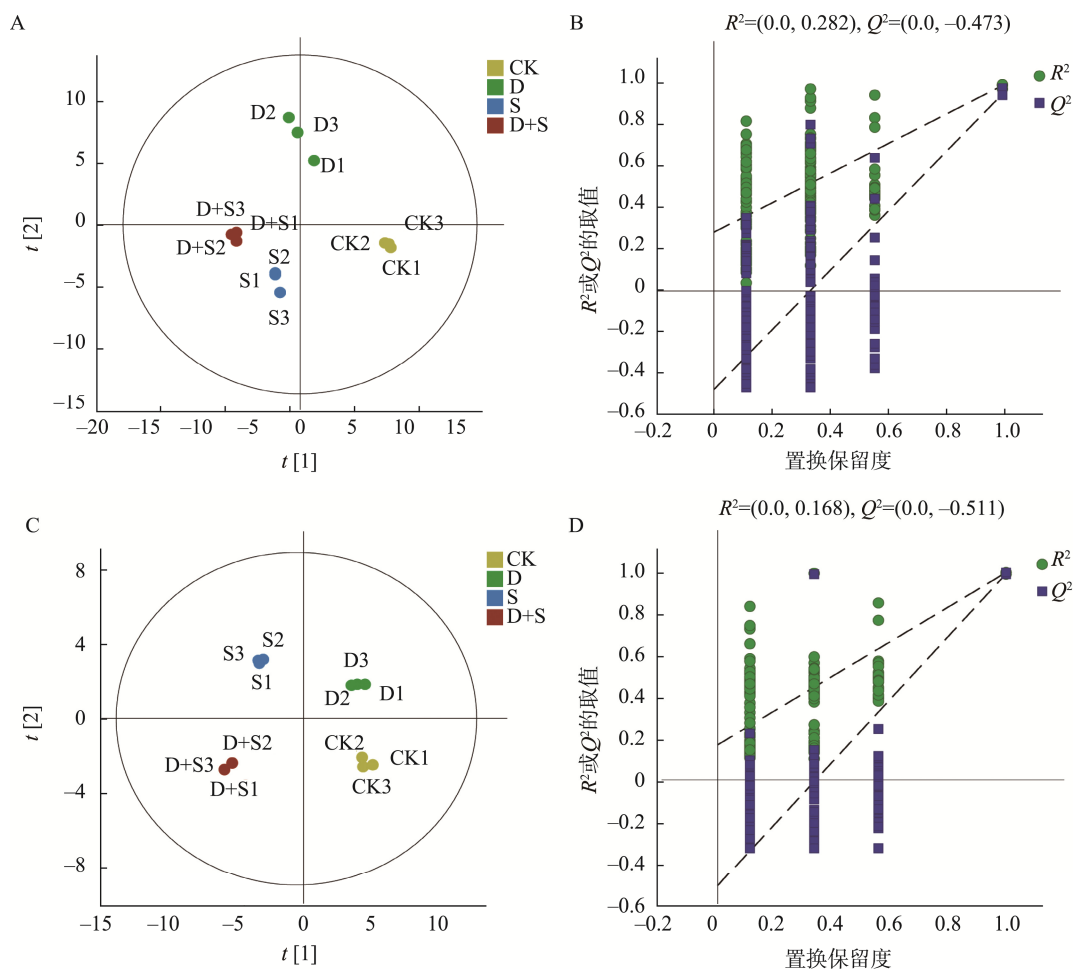


图 4 不同处理组红茶(A、B)、白茶(C、D)的滋味组分 PLS-DA 得分图及置换验证图

Fig.4 PLS-DA score and displacement verification chart of taste components for different treatment groups of black tea (A, B) and white tea (C, D)

本研究利用 SIMCA 14.1 分析软件对红茶、白茶 4 组茶样内含化合物进行 PCA、PLS-DA 等分析发现, 遮阴加干旱组与干旱组的茶叶滋味品质化学组分含量存在明显差异, 同一处理后加工的茶样表现出更紧密的关系。在白茶中共筛选出 13 种不同处理间差异相关滋味组分并存在显著性差异($VIP>1$, $P<0.05$), 主要包括亮氨酸、缬氨酸、精氨酸、可溶性糖、甲硫氨酸、酪氨酸、EGC、谷氨酸、苯丙氨酸、半胱氨酸、组氨酸、赖氨酸、ECG。其中前 4 种物质在 D+S 组含量高; 甲硫氨酸、酪氨酸、EGC 在 S 组含量最高; 最后 3 种物质在 CK 组含量高。在红茶中共筛选出 9 种不同处理间差异相关滋味组分并存在显著性差异($VIP>1$, $P<0.05$), 主要包括水浸出率、游离氨基酸、咖啡碱、EC、儿茶素总量、茶多酚、可溶性糖、ECG、EGCG。其中前 2 种物质在 D+S 组含量高; 咖啡碱、EC、儿茶素总量在 S 组含量最高; 后 4 种物质在 CK 组含量高。综上所述, 遮阴后可以提升水浸出率增加物质总量, 提升茶叶滋味, 降低多酚类、黄酮类、儿茶素类物质的含量, 减少苦

涩味, 增加氨基酸类含量, 提升鲜爽味。

3 结论与讨论

本研究在感官审评与内含成分的测定基础上, 结合 PCA 与聚类分析对 4 组处理红茶与白茶滋味品质进行综合评价。结果表明, 在 4 种处理下, 遮阴处理与遮阴协同干旱处理条件下制成的红茶与白茶在滋味、香气、汤色均高于干旱处理下的红茶与白茶。因此, 遮阴处理可以改善高温干旱天气给茶叶带来的不良影响, 而且优于对茶园直接进行喷灌处理, 使芽软嫩增多, 改善了茶叶的滋味品质。水浸出物可以反映出茶汤的滋味浓淡, 是茶叶滋味成分的重要指标, 与茶汤苦味、涩味和鲜味呈显著正相关^[19]。茶多酚是检验茶汤苦涩味的一个重要物质, 含量的高低可以清楚地反映出茶汤的滋味强度^[20]。在进行遮阴协同干旱处理后红茶 EGCG、ECG 以及儿茶素总量都大幅下降, 而 EGCG、ECG 呈苦味、涩味, 这表明 DL-C 与遮阴呈负相关, 这可能是由于遮阴后查尔酮合成酶基因表达受到抑制导致夏秋

季遮阴后 DL-C 含量下降^[21]。

氨基酸是茶叶鲜爽味的主要成分,而夏秋季遮阴有助于茶叶新梢氨基酸的积累^[21]。部分鲜味氨基酸、甜味氨基酸在遮阴协同干旱处理后含量增加,且游离氨基酸在遮阴处理后含量增加,这表明遮阴会显著提升氨基酸含量,这可能是因为遮阴有利于嫩叶中茶氨酸合成酶基因的表达^[21]。

遮阴后香气各种类的含量明显增加,在自然条件下红茶与白茶均是醇类含量最高,其次是酯类和烯类等^[22]。在高温干旱条件下醇类、酯类、烯类等种类含量均大幅降低。在此基础上进行遮阴处理,则可以增加香气物质含量。有研究认为遮阴后壬醇、香叶醇含量增加^[23]。也有研究表明遮阴后 2-戊烯-1-醇、3-己烯醇乙酯、壬醛、壬醇、辛醇等挥发性脂肪酸衍生物及苯甲醛、水杨酸甲酯等含量显著提升^[24]。

夏秋茶占我国茶叶产量的 60%左右,但由于夏、秋季天气炎热,导致夏秋茶粗老且香气淡薄、滋味苦涩,茶叶品质低于春茶。这也造成了茶农和茶企生产积极性低、采摘量少,夏秋茶的利用率较低以及资源浪费等系列问题^[25]。在一定程度上,遮阴能提高夏秋茶的产量和品质^[26]。本研究表明,遮阴协同干旱处理丰富了茶叶的滋味强度,提升了茶叶的鲜爽味,同时可以缓解 DL-C 带来的苦涩味,增加茶叶的滋味强度,从而提升茶叶品质^[27]。同时,有研究表明,在遮光条件下,夏茶鲜叶中茶多酚的含量会显著降低^[28]。遮阴有助于增加水浸出物含量^[29],有效降低茶叶中咖啡碱、茶多酚^[30]等涩味成分,有效增加氨基酸含量^[31]。因此,遮阴可以通过改善氨基酸、茶多酚、儿茶素等含量来提高茶叶的品质,从而增强夏秋茶市场经济效益。本研究为丰富夏秋茶的多种适制茶类、减轻极端天气给茶园带来的不良影响和茶园节能栽培管理提供了一定的新思路。

参考文献

- 唐梦婷,廖献盛,吴先寿,等.金牡丹不同茶类夏秋茶香气品质差异分析[J/OL].食品科学,1-14.[2024-09-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20240830.1546.002.html>
TANG MT, LIAO XS, WU XS, et al. Analysis of differences in aroma quality of summer and autumn tea of different tea types of golden peony [J]. Food Science, 1-14. [2024-09-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20240830.1546.002.html>
- 肖黄巧,邵明宇,石玉玲,等.高温干旱条件下生长调节剂对茶叶生长的影响[J/OL].分子植物育种,1-13.[2023-06-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230626.1635.014.html>
XIAO HQ, SHAO MY, SHI YL, et al. Effects of growth regulators on tea growth under high temperature and drought conditions [J]. Molecular Plant Breeding, 1-13. [2023-06-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230626.1635.014.html>
- JI HG, LEE YR, LEE MS, et al. Diverse metabolite variations in tea (*Camellia sinensis* L.) leaves grown under various shade conditions revisited: a metabolomics study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(8): 1889-1897.
- 丽鸳,赵容波,成浩,等.叶色特异茶树品种选育现状[J].中国茶叶,2020,2(1):15-19.
LI Y, ZHAO RB, CHENG H, et al. Breeding status of tea varieties with specific leaf color [J]. China Tea, 2020, 2(1): 15-19.
- 农玉琴,巫虹颖,翁小婷,等.干旱胁迫对不同品种茶树幼苗生理特性的影响[J].安徽农业科学,2024,52(16):96-100.
NONG YQ, WU HY, WENG XT, et al. Effect of drought stress on physiological characteristics of different varieties of tea seedlings [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(16): 96-100.
- 王云,罗凡,李春华,等.高抗优质绿茶新品种天府 28 号的选育及配套技术[J].中国茶叶,2020,42(3):5-7,12.
WANG Y, LUO F, LI CH, et al. Breeding and supporting technology of tianfu 28, a new green tea variety with high resistance and high quality [J]. China Tea, 2020, 42(3): 5-7, 12.
- 冯德建,王智,尹虹又,等.国内外茶叶中农药残留限量标准比对与对我国的建议[J].食品安全质量检测学报,2023,14(24):207-219.
FENG DJ, WANG Z, YIN HY, et al. Comparison of pesticide residue limit standards in tea at home and abroad and suggestions for China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(24): 207-219.
- 秦丽娟,李云飞,田双红,等.不同原料和工艺对岩茯茶中真菌群落的影响[J].食品安全质量检测学报,2024,15(13):288-297.
QIN LJ, LI YF, TIAN SH, et al. Effects of different raw materials and processes on fungal communities in Yanfu tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(13): 288-297.
- ZHANG QW, BI GH, LI TY, et al. Color shade nets affect plant growth and seasonal leaf quality of camellia sinensis grown in mississippi, the United States [J]. Frontiers in Nutrition, 2022: 786421. DOI: 10.3389/FNUT.2022.786421
- 王叶.不同生境茶叶产量与品质形成的光合生理生态机制[D].长沙:湖南农业大学,2018.
WANG Y. Photosynthetic physiological and ecological mechanism of tea yield and quality in different habitats [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.
- 吴艳,梁万里,孙永明,等.遮阴高度和遮光率对抹茶园生态环境和抹茶品质的影响[J].华北农学报,2023,38(S1):237-244.
WU Y, LIANG WL, SUN YM, et al. Effects of shading height and shading rate on ecological environment and quality of matcha tea garden [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023, 38(S1): 237-244.
- SHAO CY, DENG ZY, LIU J, et al. Effects of preharvest shading on dynamic changes in metabolites, gene expression, and enzyme activity of three tea types during processing [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(45). DOI: 10.1021/ACS.JAFC.2C05456
- 王淑腾,朱奥婕,张又月,等.不同冲泡条件对青砖茶茶汤品质的影响[J].食品安全质量检测学报,2024,15(14):170-177.
WANG ST, ZHU AOJ, ZHANG YY, et al. Effect of different brewing conditions on the quality of tea soup of green brick tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(14): 170-177.
- 黄静,黄怀生,龚乐,等.轻揉捻轻发酵条件下茶树品种‘湘波绿’与‘楮叶齐’红茶品质分析[J].茶叶通讯,2024,51(2):202-209.
HUANG J, HUANG HS, GONG L, et al. Quality analysis of black tea produced from tea cultivars ‘xiangbolv’ and ‘zhuyeqi’ under light rolling and fermentation condition [J]. Journal of Tea Communications, 2024,

- 51(2): 202–209.
- [15] 阮舒铃, 杨梓煜, 周子维. 花果香型工夫红茶工艺与品质研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 248–257.
RUAN SL, YANG ZY, ZHOU ZW. Research Progress on technology and quality of flower and fruit aroma gongfu black tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(13): 248–257.
- [16] 刘婕. 夏秋季遮阴影响不同茶类品质的机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
LIU J. Study on the mechanism of shading in summer and autumn on the quality of different teas [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022.
- [17] 王雪萍, 马林龙, 刘盼盼, 等. 夏秋季茶园覆盖遮阴的综合效应[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 106–110.
WANG XP, MA LL, LIU PP, *et al.* Comprehensive effect of mulching and shading in tea gardens in summer and autumn [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(22): 106–110.
- [18] WANG YQ, YE JJ, YANG HZY, *et al.* Shading-dependent greening process of the leaves in the light-sensitive albino tea plant ‘huangjinya’: Possible involvement of the light-harvesting complex ii subunit of photosystem ii in the phenotypic characteristic [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(12). DOI: 10.3390/IJMS241210314
- [19] 朱尧, 王晶晶, 张苗, 等. 不同遮阴时间对薮北种茶树主要化学成分含量的影响[J]. 现代农业科技, 2023(13): 5–8.
ZHU Y, WANG JJ, ZHANG M, *et al.* Effects of different shading time on the content of main chemical components of tea plants in serbal plantation [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(13): 5–8.
- [20] 刘伟, 樊吉君, 谭吉慧, 等. 高温期间遮阴处理对汝城白毛茶幼龄茶树生长的影响[J]. 中国茶叶, 2023, 45(7): 57–59.
LIU W, FAN JJ, TAN JH, *et al.* Effects of shading treatment on the growth of young tea trees of rucheng baimao tea during high temperature [J]. China Tea, 2023, 45(7): 57–59.
- [21] 邵陈禹. 夏秋季遮阴影响茶叶品质的机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
SHAO CY. Study on the mechanism of shading in summer and autumn on tea quality [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022.
- [22] 梁子钧, 俞滢, 张磊, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析茶树新品系‘白云 0492’白茶香气特征成分[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 313–321.
LIANG ZJ, YU Y, ZHANG L, *et al.* Analysis of aroma characteristic components of white tea of new tea strain ‘Baiyun 0492’ based on HS-SPME-GC-MS [J]. Food Science, 2023, 44(22): 313–321.
- [23] WEI YM, ZHANG JX, LI TH, *et al.* GC-MS, GC-O, and sensomics analysis reveals the key odorants underlying the improvement of yellow tea aroma after optimized yellowing [J]. Food Chemistry, 2023, 4(31): 137139.
- [24] FANG X, LIU YN, XIAO JI, *et al.* GC-MS and LC-MS/MS metabolomics revealed dynamic changes of volatile and non-volatile compounds during withering process of black tea [J]. Food Chemistry, 2023, 4(10): 135396.
- [25] 许金萍, 王丹丹, 刘琨. 安吉白茶干旱气象指数保险的实践与思考——以 2022 年极端高温干旱为例[J]. 江西农业学报, 2023, 35(12): 125–131.
XU JP, WANG DD, LIU K. Practice and thinking of drought meteorological index insurance of anji white tea: A case study of extreme high temperature and drought in 2022 [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023, 35(12): 125–131.
- [26] 陈家铭, 吴淑华, 曾兰亭, 等. 遮阴对茶叶品质和产量影响研究进展[J]. 中国茶叶, 2021, 43(5): 1–10.
CHEN JM, WU SH, ZENG LT, *et al.* Research progress on the effect of shading on tea quality and yield [J]. China Tea, 2021, 43(5): 1–10.
- [27] XIE JL, WANG LL, DENG YL, *et al.* Characterization of the key odorants in floral aroma green tea based on GC-E-Nose, GC-IMS, GC-MS and aroma recombination and investigation of the dynamic changes and aroma formation during processing [J]. Food Chemistry, 2023, 136641. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2023.136641
- [28] SANO T, HORIE H, MATSUNAGA A, *et al.* Effect of shading intensity on color, chemical composition, and sensory evaluation of green tea (*Camelia sinensis var Assamica*). [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 98(15): 5666–5676.
- [29] FU XM, CHEN JM, LI JL, *et al.* Mechanism underlying the carotenoid accumulation in shaded tea leaves [J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100323.
- [30] 曹诗雨, 吴转容, 廖凯丽, 等. 日光萎凋对不同鲜叶嫩度与茶树品种加工红茶品质的影响[J/OL]. 华中农业大学学报, 1-12. [2024-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1181.S.20240621.0945.002.html>
CAO SY, WU ZR, LIAO KL, *et al.* Effect of solar withering on different fresh leaf tenderness and processed black tea quality of tea varieties [J/OL]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1-12. [2024-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1181.S.20240621.0945.002.html>
- [31] 林家正, 涂政, 陈琳, 等. 红光萎凋对茶叶挥发性成分及其成品红茶品质的影响[J]. 茶叶科学, 2021, 41(3): 393–405.
LIN JZ, TU Z, CHEN L, *et al.* Effects of red light withering on volatile components of tea and quality of finished black tea [J]. Tea Science, 2021, 41(3): 393–405.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)