DOI:10.12441/spyswjs.20250605001 [文章编号] 1673-1689(2026)01-0075-13

不同萎凋方式对“雨水青”武夷岩茶品质的影响

魏成江[1,2] 孙威江[1,2] 韩喆辰[1,2] 张 鹏[1] 吴伟伟[1] 王 涛[1,2]
陈青兰[1,2] 林 琦[1] 徐 杰[2,4] 林馥茗[2,3*]

(1. 福建农林大学园艺学院,福建 福州 350002;2. 福建武夷山岩茶科技小院,福建 南平 354300;3. 福建农林大学安溪茶学院,福建 泉州 362400;4. 武夷星茶业有限公司,福建 武夷山 354301)

摘要:【目的】探究不同萎凋方式对“雨水青”武夷岩茶品质的影响。【方法】以“雨水青”武夷水仙茶为研究对象,采用综合做青机萎凋、自然萎凋和自动化萎凋设备萎凋3种方式制作武夷岩茶。通过感官审评、生化成分检测、顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用等方法对比分析其风味物质。【结果】自动化萎凋设备所制样品(PW)综合品质最佳,具有花果香浓郁、滋味浓醇爽口等特点。结合聚类分析与正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squaresdiscrimination analysis,OPLS-DA)的变量重要性投影(VIP),筛选出6种对茶汤有显著贡献的呈味物质。其中,PW的水浸出物、茶多酚、游离氨基酸等的质量分数均较高。根据VIP>1且气味活度值(odor activity value,OAV)>1,筛选出15种影响香气的关键差异化合物,其中,吲哚、α-法尼烯、6-甲基-5-庚烯-2-酮等的质量分数在PW中较高,对花果香具有突出贡献。自然萎凋所制样品(SW)香气化合物总质量分数适中;综合做青机萎凋所制样品(CK)香气化合物总质量分数及关键香气化合物质量分数较低,且具有青草气的正己醛质量分数较高,呈现明显闷青味。【结论】自动化萎凋设备显著提升了“雨水青”武夷岩茶的品质,为“雨水青”武夷岩茶的质量控制及该新式萎凋设备的推广应用提供了理论依据。

关键词:武夷岩茶;雨水青;优化萎凋;品质差异

Influences of Different Withering Methods on the Quality of Wuyi Rock Tea Produced from Rain-soaked Leaves

WEI Chengjiang[1,2] *SUN Weijiang*[1,2] *HAN Zhechen*[1,2] *ZHANG Peng*[1] *WU Weiwei*[1]
WANG Tao[1,2] *CHEN Qinglan*[1,2] *LIN Qi*[1] *XU Jie*[2,4] *LIN Fuming*[2,3*]

(1. College of Horticulture,Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Fujian Wuyishan Wuyi Rock Tea Science and Technology Backyard, Nanping 354300, China; 3. Anxi College of Tea Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Quanzhou 362400, China; 4. Wuyi Star Tea Industrial Co. Ltd., Wuyishan 354301, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the effects of different withering methods on the quality of Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves. [**Method**] The rain-soaked leaves of Wuyi Shuixian (*Camellia sinensis*) were treated with three withering methods: comprehensive withering in a fermentation machine, natural withering, and withering in an automated withering equipment. Sensory evaluation, biochemical component detection, and headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry were employed to comparatively analyze the flavor compounds. [**Result**] The tea samples processed by the automated withering equipment (PW) exhibited the highest overall quality, characterized by a rich floral and fruity aroma, as well as a mellow, brisk, and refreshing taste. Cluster analysis combined with the variable importance in projection

基金项目:福建省科技计划项目(2021N3010,2022L3064);福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金项目(FJZTF01)。
通信作者:林馥茗(1986—),女,博士,讲师,硕士研究生导师,主要从事茶叶加工工程、茶叶品质及标准化研究。E-mail:497147822@qq.com
收稿日期:2025-06-05 **修回日期:**2025-07-30

(VIP) of orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) identified six key flavor compounds significantly contributing to the tea infusion. The PW showed higher mass fractions of water extracts, tea polyphenols, and free amino acids. Additionally, 15 key aroma compounds with VIP>1 and odor activity value (OAV)>1 were identified as critical differential aroma compounds. Compounds such as indole, α-farnesene, and 6-methyl-5-hepten-2-one had high mass fractions in the PW, contributing significantly to their floral and fruity aroma. The naturally withered samples (SW) exhibited an intermediate total mass fraction of aroma compounds, while the comprehensively withered samples (CK) had lower total mass fraction of aroma compounds and mass fractions of key aroma compounds, along with higher mass fraction of hexanal (imparting a grassy odor), demonstrating a distinct dull green taste. [**Conclusion**] The study demonstrates that automated withering equipment significantly enhances the quality of Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves, providing a theoretical basis for the quality control and the broader application of this novel withering technology.

Keywords: Wuyi rock tea; rain-soaked leaf; withering optimization; quality difference

茶（*Camellia sinensis*（L.）O.Kuntze）是中国的传统饮品，也是全球广泛消费的饮料之一，在世界三大饮品中仅次于水[1]。武夷岩茶属于闽北乌龙茶之一，具有“三红七绿”的品质特征[2]。它原产于福建省北部的武夷山市，是中国十大名茶之一，以“岩骨花香”的独特品质闻名已久[3]。凭借醇厚的滋味和持久的花香，武夷岩茶深受消费者青睐[4]，是闽北乌龙茶的优秀代表[5]。

茶叶品质由鲜叶质量与加工工艺共同决定，其中鲜叶质量奠定品质基础，加工工艺主导品质形成。萎凋是武夷岩茶加工的核心工序之一，对其品质形成具有关键作用。该过程中，高温和光照条件促使鲜叶中内含成分发生水解与氧化，激活风味代谢途径相关基因的表达并提升酶活性，从而促进风味物质的合成[6]。武夷岩茶生产季节降雨频繁，鲜叶采摘后叶面水分普遍偏高。适宜日光萎凋的晴天数不足全年加工期的30%[7]。“雨水青”（鲜叶表面携带一定水分）的水分质量分数显著高于正常茶青，传统萎凋通常在室内环境（温度22~28 ℃，相对湿度75%~85%）中进行约3 h。但高湿环境和鲜叶水分过高阻碍了鲜叶在加工过程中内含成分的正常转化，导致成品茶香气不足、品质低劣[8]。Wu等[9]研究指出，六安瓜片茶在谷雨期每延迟3~4 d采摘，香气特征即发生显著变化。“雨水青”不仅制约着高品质茶叶的生产，若过度延期处理，将会进一步加剧茶叶品质的劣变。因此，优化萎凋方式对提升“雨水青”武夷岩茶的品质至关重要。

已有研究表明，环境温度、通风速率和相对湿度等因素对萎凋过程中的物质转化有显著影响[10]。Tan等[11]通过优化萎凋环境温度（40 ℃）、相对湿度（97%）和时间（6 h），促使了成茶香气化合物及呈味物质质量分数显著增加。通风有利于茶叶中低沸点青草气类物质的散失，同时提升橙花醇、芳樟醇、水杨酸甲酯等具有花果香的物质的质量分数，不通风时则会造成己酸、萘和正戊酸等具有不愉悦气味的物质过度积累[12]。优化摊叶厚度至12 cm，能促使馥郁花果香的物质质量分数显著提升[13]。然而，现阶段萎凋过度依赖人工经验，生产效益与品质稳定性较差。采用机械化能有效调控萎凋环境参数、降低环境干扰、改善萎凋效果，以确保茶叶品质稳定[14]。

目前，关于机械化调控萎凋以改善“雨水青”所制茶叶品质方面的研究鲜见报道，这在一定程度上限制了武夷岩茶的品质提升与市场推广。为进一步探究自动化萎凋方式的改善效果，以“雨水青”武夷水仙茶为试验材料，设置3种萎凋方式进行加工处理，基于定量描述分析（QDA）构建茶叶风味剖面图，对所制茶样滋味成分及香气化合物进行检测，结合味觉活性值（taste activity value，TAV）、OAV等多元统计分析方法，筛选关键风味物质，明确不同萎凋方式对武夷岩茶品质特征的影响，为“雨水青”武夷岩茶品质改善和自动化萎凋发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

茶青（武夷水仙茶）：福建省武夷星茶业有限公司旗下九龙山茶园，于2024年5月27日雨后

1.0 h内采摘，采摘标准为中开面3~4叶“雨水青”（水质量分数为82.24%）。

生物碱类化合物标准品、茶黄素类化合物标准品、儿茶素类化合物标准品、癸酸乙酯：色谱纯，美国Sigma-Aldrich公司；甲醇、乙酸、乙腈：色谱纯，德国默克公司；福林酚、茚三酮：分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；氯化亚锡、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、硫酸、无水乙醇、碳酸钠：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；植物可溶性糖检测试剂盒：南京建成生物工程研究所有限公司。

1.2　仪器与设备

电子天平：MA150型，德国Sartorius公司；台式多管架离心机：TDZ5B-WS型，上海卢湘仪离心机仪器有限公司；高效液相色谱仪：e2695型，美国Waters公司；萃取头：65 μm PDMS/DVB型，美国Supeclo公司；气质联用仪：GC-2030型，日本岛津公司；多功能酶标仪：Infinite M200 PRO型，奥地利Tecan公司；萎凋机：6CWD-150型（14.5 m×2.0 m×3.0 m，产能900 kg/h）：长沙湘丰智能装备股份有限公司；综合做青机：6CZ-110B型，福建省武夷山市永兴机械制造有限公司。

1.3　样品制备

将“雨水青”平均分为3份，按照萎凋→做青→杀青→揉捻→干燥的流程制作样品。PW制备：设置自动化萎凋设备参数，萎凋温度42 ℃、摊叶厚度14.0 cm、叶面通风速度2.1 m/s，萎凋0.5 h后转入综合做青机继续萎凋3.0 h，结束后进行后续处理；SW制备：自然萎凋0.5 h后转入综合做青机继续萎凋3.0 h，结束后进行后续处理；CK制备：全程使用综合做青机萎凋3.5 h，结束后进行后续处理。萎凋处理后进行做青。除萎凋方式外，其余加工参数均一致（做青9.5 h、270 ℃滚筒杀青5.0 min、揉捻机加压热揉5.5 min、120 ℃干燥2.0 h）。上述试验均重复3次，具体加工参数见图1。

1.4　方法

1.4.1　感官审评与定量描述分析

参照GB/T 23776—2018进行感官审评，由7位高级评茶员及以上专业审评人员（3位男士和4位女士）对“雨水青”武夷岩茶进行审评。针对“雨水青”武夷岩茶的茶叶品质特征，选取7个香气属性（花香、果香、甜香、清香、木质香、青草气、水闷气）及6个滋味属性（醇味、厚味、鲜味、甜味、苦味、涩味）进行定量描述。参照文献[15]，使用0~7分制强度评价体系（0为无感知，1为极弱，2为弱，3为较弱，4为一般，5为较强，6为强，7为极强）对所制样品进行3次随机重复测评，最后采用加权评分法计算平均分。

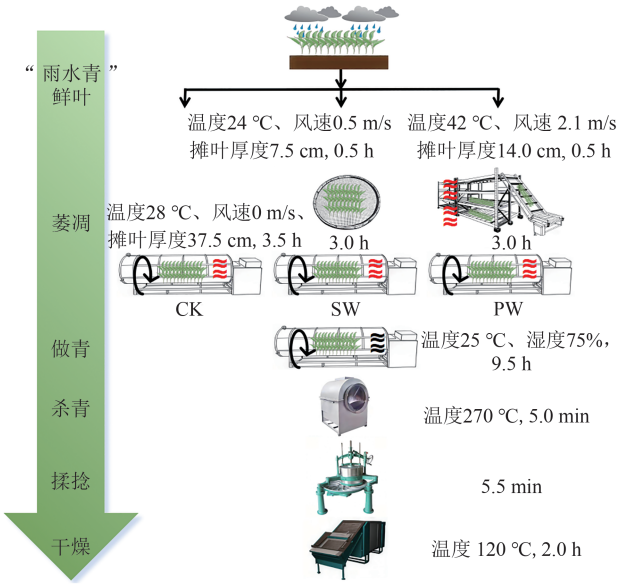


图1　不同萎凋方式制作“雨水青”武夷岩茶的加工工艺

Fig. 1　Processing technology of Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

1.4.2　生化成分测定

参照GB/T 8305—2013测定水浸出物质量分数；参照GB/T 8314—2013测定游离氨基酸质量分数；参照植物可溶性糖检测试剂盒说明书测定可溶性糖质量分数；参照文献[16]中的三氯化铝比色法测定总黄酮质量分数；参照GB/T 8313—2018测定茶多酚及儿茶素组分质量分数；参照文献[17]中高效液相色谱法测定生物碱类质量分数；参照GB/T 30483—2013测定茶黄素组分质量分数。

1.4.3　香气化合物水平的测定

参照Liang等[15]的方法并进行调整。称取1.0 g茶粉置于20 mL顶空瓶中，加入3 mL沸水和10 μL质量分数0.008 63 μg/kg的癸酸乙酯内标。振荡均匀后于70 ℃加热平衡15 min，将萃取头旋转推入，悬空吸附30 min，然后进行热脱附5 min。

GC条件：色谱柱DB-5MS（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为氦气（纯度>99.999%），采用不分流模式进样，载气恒定流量1 mL/min，进样口温度

250 ℃，进样量 10 μL。初始温度 50 ℃，保持 5 min；以 5 ℃/min 升至 210 ℃，保持 3 min；再以 15 ℃/min 升至 250 ℃，保持 5 min。

MS 条件：离子源 EI，离子源和接口温度 230 ℃，电离能量 70 eV，全扫描模式，质量扫描范围 m/z 40~500。

1.4.4 香气化合物定性定量测定

1）定性测定：基于武夷岩茶样本香气化合物的总离子色谱图，经 IST 20.0 标准质谱库进行串联匹配。同时，依据保留指数及保留时间，参考相关文献，通过人工解析对香气化合物进行定性。

2）定量测定：根据式（1）以癸酸乙酯为内标对各香气化合物进行定量。

$$W_B=\frac{W_e\times S_B}{S_e} \tag{1}$$

式中：

W_B——香气化合物的质量分数，μg/kg；

W_e——内标的质量分数，μg/kg；

S_B——香气化合物的峰面积；

S_e——内标的峰面积。

1.4.5 TAV 及 OAV 计算

TAV 表示滋味成分对茶汤品质的影响权重，根据式（2）计算；OAV 表示香气化合物对茶叶香气的影响权重，根据式（3）计算。

$$V_{TA}=\frac{\omega_C}{T} \tag{2}$$

式中：

V_{TA}——滋味成分的 TAV；

ω_C——滋味成分的质量分数，mg/g；

T——儿茶素组分的阈值，mg/g。

$$V_{OA}=\frac{\omega_V}{\omega_T} \tag{3}$$

式中：

V_{OA}——香气化合物的 OAV；

ω_V——香气化合物的质量分数，μg/kg；

ω_T——香气化合物的阈值，μg/kg。

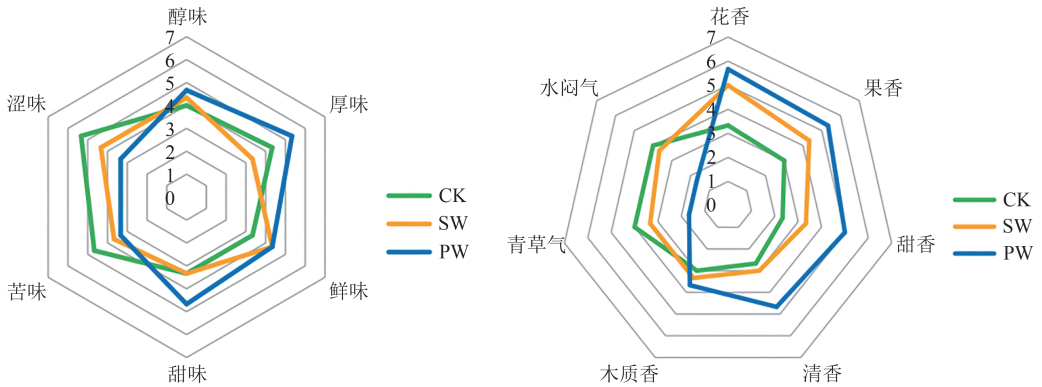
1.5 数据处理

采用 Excel 2019 绘制风味雷达图，采用 Origin 2022 绘制柱形图，采用 TBtools 绘制聚类热图。采用 SPSS 23 检验相关性，采用 SIMCA14.1 进行 OPLS-DA。通过在线网站（https://cloud.metware.cn/）绘制散点热图和相关性网络图。

2 结果与讨论

2.1 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的感官品质特征分析

感官审评结果见图 2，各茶样之间风味特征差异明显。整体感官上 PW 品质最优，其次为 SW，CK 品质相对较差。PW 在醇味、厚味、鲜味、甜味的滋味属性及花香、果香、甜香、清香的香气属性上明显优于 SW 和 CK，且在苦味、涩味、水闷气、青草气的感官强度最低；SW 整体感官得分适中；CK 中滋味属性上过高的苦味与涩味以及香气属性上较明显的水闷气和青草气影响了整体感官风味，因而品质较差。结果表明，自动化萎凋设备处理有效降低了雨水对武夷岩茶品质的负面影响。



(a) 滋味雷达图　　(b) 香气雷达图

图 2 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的风味雷达图

Fig. 2 Flavor radar map of Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

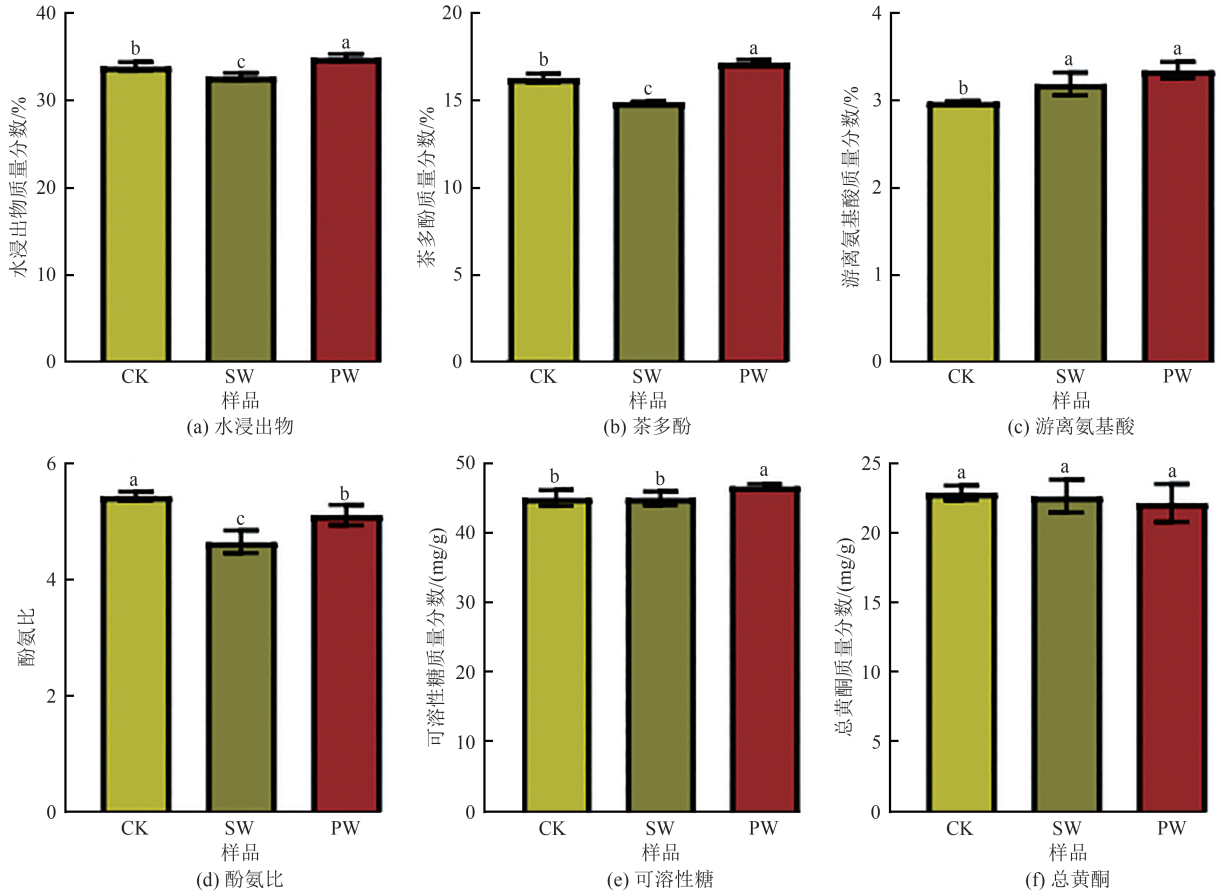
2.2　不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶成分差异分析

2.2.1　不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的主要生化成分差异分析

不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶主要生化成分的检测结果见图3。PW的水浸出物、茶多酚、游离氨基酸等物质的质量分数明显较高。PW的水浸出物质量分数（34.89%）较高，与CK、SW均存在显著差异（$P<0.05$），这表明降低叶面水分促进了水浸出物的积累，而自然萎凋不利于水浸出物的积累[18]。茶多酚作为茶汤的主要呈味物质之一，对茶汤浓厚度具有突出贡献，PW的茶多酚质量分数（17.12%）显著高于CK、SW（$P<0.05$）。游离氨基酸与茶叶的鲜味密切相关[19]，CK的游离氨基酸质量分数（2.99%）显著低于SW、PW（$P<0.05$），导致茶叶苦涩味上升。酚氨比（茶多酚质量分数与游离氨基酸质量分数的比值）是衡量茶叶风味的关键指标之一，样品酚氨比大小排序为：CK>PW>SW。有研究表明，当乌龙茶中酚氨比较高时，茶的口感会趋于浓厚且苦涩味较强；反之则口感较鲜爽、甘甜[20]。PW的滋味（醇味、厚味、鲜味、甜味）属性高，这与感官审评结果相符。可溶性糖对茶汤的甜味具有重要贡献，PW的可溶性糖质量分数（46.99 mg/g）与CK、SW存在显著差异（$P<0.05$），这会强化其甜味品质。总黄酮对茶汤色泽的形成具有重要作用，同时也是茶汤苦涩味形成的重要成分[21]，CK的总黄酮质量分数较高（22.84 mg/g），与其他样品无显著差异。由此可知，不同萎凋方式影响了“雨水青”武夷岩茶中成分的转化。

2.2.2　不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶生物碱、茶黄素及儿茶素组分差异分析

生物碱是茶叶中苦味的主要表征物质，3种萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶中，PW的咖啡碱（CAF）、可可碱（TB）、茶碱（TP）质量分数较高（见表1）。相关研究表明，CAF与茶叶品质呈正



不同小写字母表示样品间差异显著（$P<0.05$）。

图3　不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶主要生化成分的比较

Fig. 3　Comparison of major biochemical components in Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

表 1 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的生物碱及茶黄素组分质量分数

Table 1 Mass fractions of alkaloids and theaflavins components of Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

单位：mg/g

组别	生物碱质量分数			茶黄素质量分数			
	CAF	TB	TP	TF	TF-3-G	TF-3’-G	TFDG
CK	25.85±0.78^{b}	0.96±0.07^{bc}	0.21±0.04^{b}	4.21±0.15^{b}	1.47±0.04^{bc}	2.08±0.06^{b}	1.77±0.01^{a}
SW	27.27±0.60^{a}	0.91±0.02^{c}	0.30±0.01^{a}	4.11±0.16^{bc}	1.53±0.04^{b}	2.05±0.03^{b}	1.76±0.02^{a}
PW	27.16±0.68^{ab}	1.33±0.09^{a}	0.31±0.03^{a}	4.96±0.11^{a}	1.65±0.06^{a}	2.24±0.02^{a}	1.77±0.01^{a}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

相关[22]，其质量分数受茶树品种和加工工艺的影响，这说明PW品质较优。茶黄素能提升茶汤色泽并增强滋味品质，对茶叶品质具有正向调节作用[23]，PW的茶黄素（TF）、茶黄素-3-没食子酸酯（TF-3-G）、茶黄素-3’-没食子酸酯（TF-3’-G）和茶黄素-3，3’-双没食子酸酯（TFDG）质量分数较高，推测这些物质对武夷岩茶滋味品质的形成具有重要贡献。

儿茶素占茶叶多酚总质量分数的70%~80%，其质量分数和组成与茶叶品质密切相关[24]。酯型儿茶素中表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）、没食子儿茶素没食子酸酯（GCG）、表儿茶素没食子酸酯（ECG）与收敛性、苦涩感高度正相关[25]。由表2可知，CK的GCG、ECG质量分数较高，与PW、SW存在显著差异（P<0.05）。非酯型儿茶素具有苦味协同作用，其中PW的儿茶素（C）和没食子儿茶素（GC）质量分数较高；CK的表儿茶素（EC）和表没食子儿茶素（EGC）质量分数较高。

表2 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的儿茶素组分及TAV

Table 2 Catechin components and TAV of Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

组别	酯型儿茶素质量分数/（mg/g）			非酯型儿茶素质量分数/（mg/g）			
	EGCG	GCG	ECG	GC	EGC	C	EC
CK	61.95±0.74^{b}	7.37±0.03^{a}	12.32±1.09^{a}	0.91±0.03^{c}	34.45±1.23^{a}	0.60±0.04^{b}	11.52±0.41^{a}
SW	54.68±1.54^{c}	7.10±0.09^{b}	10.79±0.53^{b}	2.28±0.36^{b}	24.02±0.70^{b}	0.66±0.03^{b}	10.36±0.38^{b}
PW	65.71±0.21^{a}	7.02±0.01^{b}	10.94±0.36^{b}	3.51±0.52^{a}	33.60±0.54^{a}	0.96±0.02^{a}	10.66±0.80^{ab}
组别	酯型儿茶素TAV			非酯型儿茶素TAV			
	EGCG	GCG	ECG	GC	EGC	C	EC
CK	688.35	61.44	68.45	—	215.34	4.6	42.65
SW	607.58	59.13	59.95	—	150.12	5.04	38.36
PW	730.14	58.51	60.79	—	210.01	7.38	39.48

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）；“—”表示未查询到。

茶汤中各组分间的组成结构是其滋味属性的关键。TAV常用于评价特征呈味物质对茶叶整体风味的贡献程度[26]。通过查阅相关文献中各儿茶素组分的阈值[27]，并计算其在样品中的TAV，结果见表2。EGCG、GCG、ECG、EC、C、EGC的TAV>1，表明这6种儿茶素组分对3种萎凋方式所制茶样的滋味贡献较高。其中，PW中EGCG、C的TAV较高，与CK、SW存在明显差异，CK中GCG、ECG、EGC、EC的TAV较高，SW在上述物质中TAV多数较低。感官审评中PW的茶汤滋味强度较高，CK略低，这与生化成分检测结果相符，表明采用自动化萎凋设备处理能有效促进茶叶内含成分转化，增加茶汤呈味物质总质量分数，进而提升茶汤整体感官强度。

2.2.3 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶关键滋味成分的挖掘

为明确不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的主要生化成分、儿茶素、生物碱及茶黄素组分之间的差异，对3种萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的20种品质参数构建OPLS-DA模型。所得模型拟合指数R^2及预测指数Q^2均大于0.5（R^2_X=0.898、R^2_Y=0.977、Q^2=0.956），表示拟合效果较好，

可用于3种萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的判别分析。由图4(a)可知，SW与PW聚集在下半区，CK分布在上半区，其第一主成分(75.10%)与第二主成分(14.70%)的总方差达到89.80%，说明在叶面水分状态相同的情况下，PW在滋味成分配比上与CK的差距较大，同SW的差距较小，体现了不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶样品间滋味成分的差异性。如图4(b)所示，经200次置换检验，所得模型的Q^2(−0.784)与纵轴相交点的值<0，未出现过拟合现象，可用于3种萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶滋味成分的判别分析。

当VIP>1时，表示该变量对各样品区分有较大贡献[28]。VIP越大则该物质在不同萎凋方式制作的武夷岩茶样品中的差异就越大。由图4(c)可知，造成不同萎凋方式所制“雨水青”武夷岩茶样品间滋味差异的关键变量共有6种物质，并可作为区分不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的标志物，分别是水浸出物、茶多酚、EGC、EGCG、游离氨基酸、GC。其中PW的水浸出物、茶多酚、游离氨基酸、EGCG、GC的质量分数明显较高。这与自动化萎凋设备较高的萎凋温度及间歇性翻转密不可分。较高的萎凋温度及翻

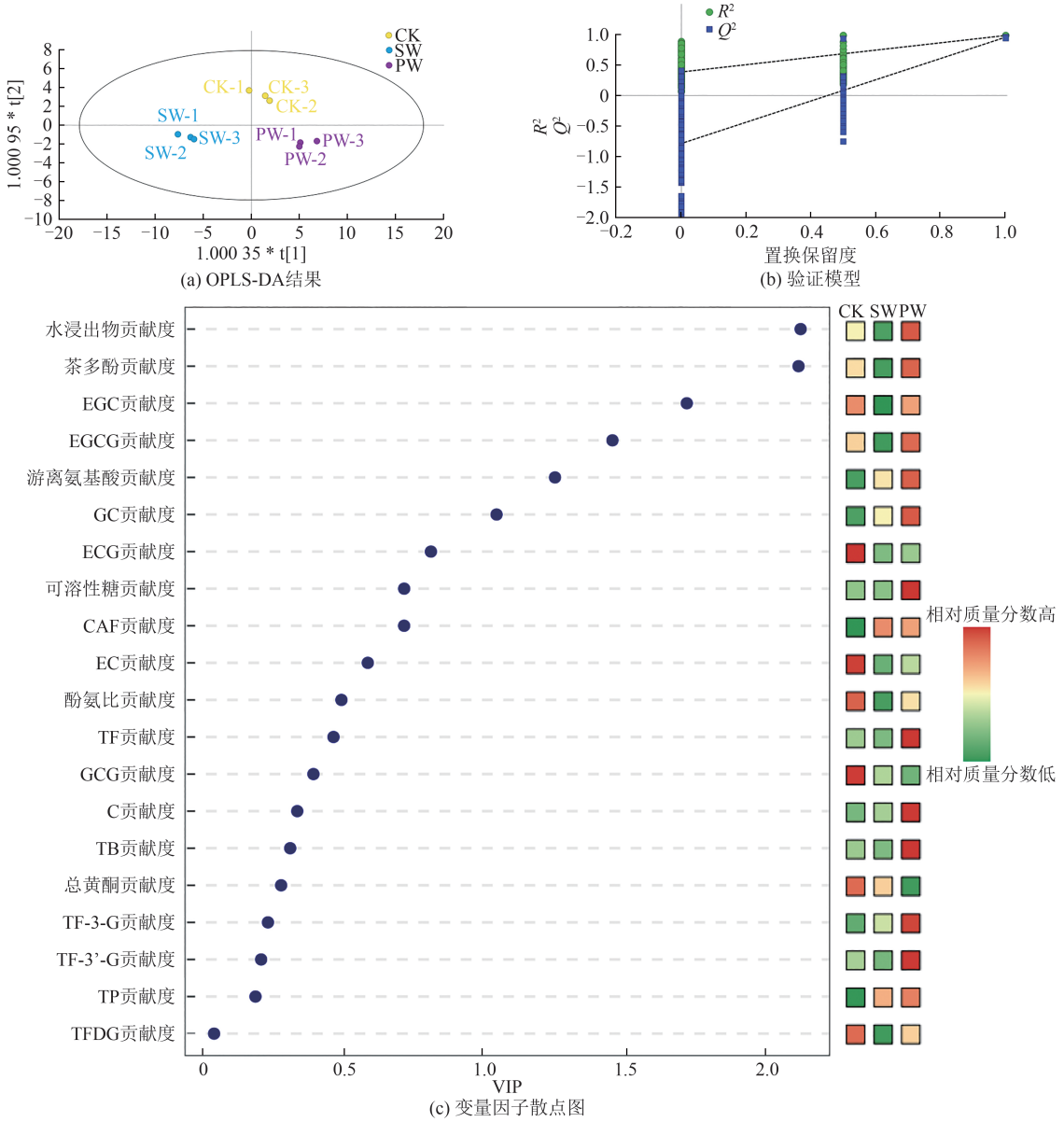


图4　不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶儿茶素、生物碱及茶黄素组分OPLS-DA得分图及散点图

Fig. 4　OPLS-DA score plot and scatter plot of catechins, alkaloids, and theaflavins components of Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

转会造成茶叶损伤，使得茶叶细胞内相关水解酶活性增强，部分大分子物质被水解成小分子物质参与后续物质转化[29]。SW 的整体物质质量分数较低，因而滋味强度及苦涩感不显著。CK 表现出较强的苦涩感，这与游离氨基酸、可溶性糖质量分数明显较低且部分儿茶素类化合物质量分数、酚氨比均较高有关，此类收敛性物质与生物碱的协同作用将加剧苦涩感[30]，这表明 CK 中苦涩味的感官强度主要受到游离氨基酸、可溶性糖及儿茶素类化合物质量分数的影响。综上所述，PW 的茶多酚、游离氨基酸及可溶性糖等质量分数较高可能是其滋味品质更优异的主要原因。

2.3 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的香气化合物差异分析

2.3.1 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶香气化合物定量分析

3 种萎凋方式制作的武夷岩茶中共检出 108 种香气化合物，其中 PW 香气化合物总质量分数较高（11 302.18 μg/kg）、SW 居中（11 135.79 μg/kg）、CK 较低（7 565.37 μg/kg）。将 108 种香气化合物分为 7 类，见图 5（a），包括酯类 20 种、杂环类 4 种、萜类 11 种、酮类 16 种、醛类 26 种、醇类 17 种、其他类 14 种。不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶中香气化合物均以醇类、醛类、酮类为主。PW 中酯类、杂环类、萜类、酮类、醛类香气化合物质量分数较高，SW 中醇类、其他类香气化合物较高，CK 中各类香气化合物均较低。对不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶样品中香气化合物进行聚类分析，结果见图 5（b），PW 单独聚为一类，SW、CK 聚为一类，CK 茶样的香气化合物总质量分数较低，PW 与 SW 的香气化合物总质量分数较高且在不同种类香气化合物质量分数上存在差异，推测这些香气化合物在 PW 中的质量分数较高，是其香气特征区别于采用其他萎凋方式制作的茶样的关键。

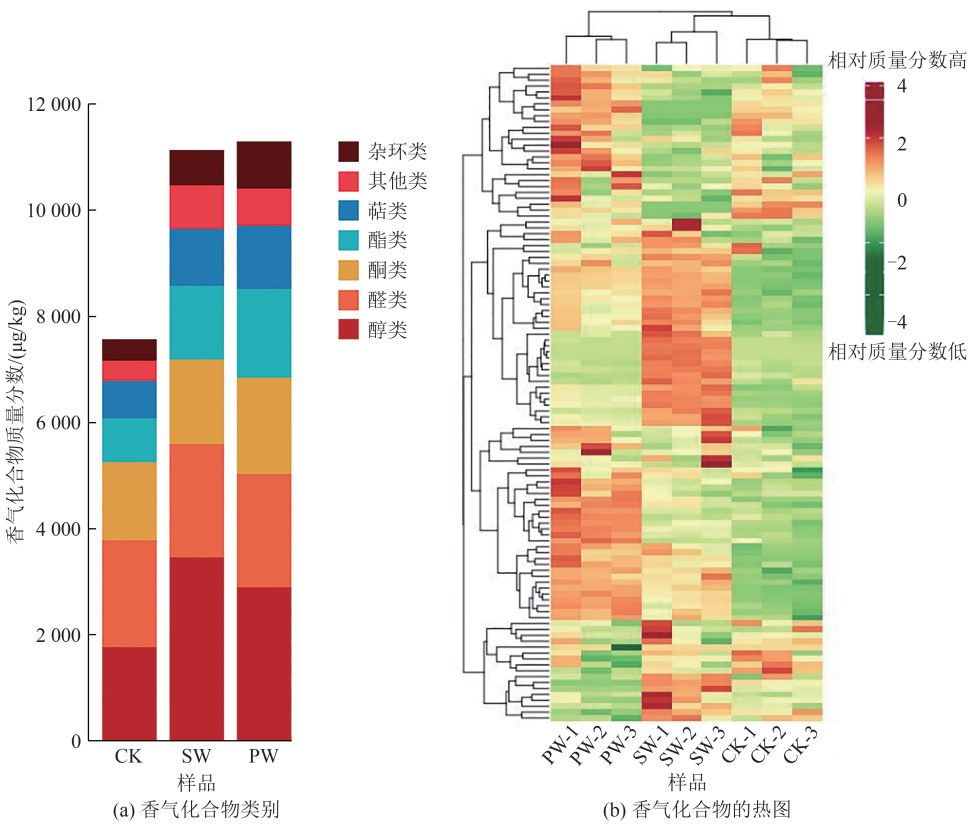
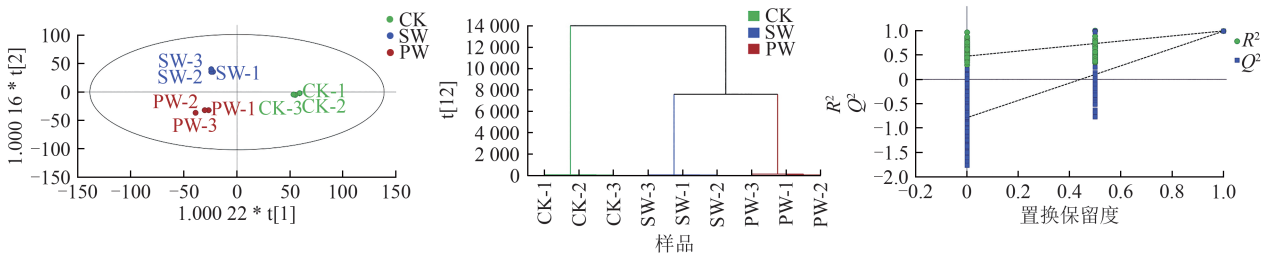


图 5 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶香气化合物的质量分数和热图

Fig. 5 Mass fractions and heatmap of aroma components in Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

2.3.2　不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶香气化合物的OPLS-DA

为进一步明确不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶香气化合物的组成差异，采用108种香气化合物质量分数构建OPLS-DA得分图，所得模型（R^2_X=0.859、R^2_Y=0.994、Q^2=0.987）拟合效果较好。由图6（a）可知，SW与PW聚集在左半区，CK分布在右半区，第一主成分（56.00%）和第二主成分（30.00%）总方差达到86.00%，体现了不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶中香气化合物的差异性。对基于OPLS-DA得分图提取得到的主成分进行HCA分析，如图6（b）所示，不同萎凋方式制作的武夷岩茶分为2个组别，CK中香气化合物总质量分数较低，单独聚为一类，位于左侧，SW位于中间并与PW聚为一类，CK与PW差异较大，这与OPLS-DA得出的结果一致。如图6（c）所示，经200次置换检验，所得模型R^2=0.476、Q^2=−0.788，与纵轴相交点的值<0，表示模型不存在过度拟合现象，故模型可靠并能用于不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶样品香气化合物的判别分析。此外，共鉴定出26种VIP>1的关键香气化合物，见表3。



(a) OPLS-DA结果　(b) HCA树状图　(c) 验证模型

图6　不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶香气化合物OPLS-DA得分图

Fig. 6　OPLS-DA score plot of aroma components in Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

2.3.3　不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶关键香气化合物差异分析

茶叶香气特征由其挥发性风味物质质量分数与气味阈值共同决定。有研究表明，OAV>1的香气化合物对茶叶整体香气形成具有贡献作用[31]。通过查阅相关文献中各香气化合物的阈值[32]，结合不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的香气化合物质量分数，在筛选的26种VIP>1的关键香气化合物的基础上计算OAV。OAV>1的香气化合物共有15种，见表3，其中反式-橙花叔醇、吲哚、α-法尼烯、苯乙醇、苯乙腈、芳樟醇、辛醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、苯乙醛、香叶醇、顺-3-己烯基己酸酯、正己醛、苯甲醛、叶醇、异戊酸己酯是导致3种萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶香气特征差异的关键香气化合物。

15种香气化合物（VIP>1且OAV>1）中，PW中共含10种质量分数明显较高的香气化合物，SW含4种，CK仅含1种。其中吲哚作为乌龙茶标志性香气化合物，可通过激活萜类代谢途径对风味构成产生关键影响[33]，表现出优质花香，在PW中的OAV较高；具有果香特征的6-甲基-5-庚烯-2-酮在所有样品中OAV均大于10，对岩茶果香的形成具有突出贡献[34]；香叶醇的形成与鲜叶损伤增强香叶醇合酶活性密切相关[35]，自动化萎凋设备通过调控温度及间歇性机械翻转等，可诱导与香气化合物相关的蛋白质表达上调[36]，促进植物挥发性风味物质的形成和释放，强化了花香和果香的香气属性，这进一步提升了岩茶的品质特征。此类香气化合物在PW中质量分数较高，共同构成了其花香、果香、清香的风味特征，同时有效降低了青草气及水闷气的劣质属性。自然萎凋的关键香气化合物质量分数居中，其中反式-橙花叔醇、芳樟醇、苯乙醇质量分数较高，主要表现出花香、果香及木质香，是水仙的特征香气化合物[37]，但自然萎凋由于低温水分散失速率慢，非生物胁迫作用有限[38]，改善效果相较自动化萎凋设备较低。综合做青机萎凋所制茶样的关键香气化合物质量分数显著较低，同时具有青草气及水闷气等令人不愉悦的绿叶挥发性风味物质正己醛的质量分数较高[39]，这与感官评价中表现出明显青草气高度吻合，严重影响

表 3 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶的关键香气化合物及香气特征

Table 3 Odor characteristics of key aroma compounds in Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

序号	CAS编号	化合物	VIP	阈值/(μg/kg)	OAV			香气描述
					CK	SW	PW	
1	40716-66-3	反式-橙花叔醇	3.33	250.00	1.35	3.74	2.04	花香、柑橘香、木质香
2	120-72-9	吲哚	2.69	40.00	6.74	10.15	17.12	花香
3	29957-43-5	二氢芳樟醇	2.64	—	—	—	—	发霉味
4	502-61-4	α-法尼烯	2.53	87.00	2.96	5.92	7.67	果香、草本香
5	60-12-8	苯乙醇	2.10	0.75	37.83	396.24	321.50	玫瑰花香
6	140-29-4	苯乙腈	2.04	60.00	2.71	6.80	6.55	芳香
7	78-70-6	芳樟醇	1.97	0.22	1 100.41	2 188.15	1 771.00	花香、柑橘香、木质香
8	6378-65-0	己酸己酯	1.87	6 400.00	0.01	0.04	0.04	果香
9	111-87-5	辛醇	1.74	2.70	109.22	139.79	179.91	清香、果香
10	110-93-0	6-甲基-5-庚烯-2-酮	1.72	50.00	10.10	12.09	13.86	柑橘香、果味
11	122-78-1	苯乙醛	1.67	4.00	71.43	91.42	114.43	甜花香、果香
12	53398-86-0	己酸反-2-己烯酯	1.66	—	—	—	—	蜡味
13	106-24-1	香叶醇	1.53	6.60	17.85	22.63	37.75	甜花香、柑橘香
14	31501-11-8	顺-3-己烯基己酸酯	1.51	16.00	11.56	16.20	20.84	果香
15	66-25-1	正己醛	1.47	4.50	75.79	69.30	47.64	青草味
16	4313-03-5	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛	1.43	10 000.00	0.04	0.03	0.02	脂肪味、青香
17	111-27-3	正己醇	1.31	1 000.00	0.03	0.05	0.12	甜香、草药香
19	2167-14-8	茶吡咯	1.21	—	—	—	—	烘焙香
18	100-52-7	苯甲醛	1.20	3.50	31.09	54.14	58.44	坚果香
20	928-96-1	叶醇	1.16	70.00	0.57	0.51	1.53	清香
21	4411-89-6	α-亚乙基-苯乙醛	1.16	—	—	—	—	甜香、蜜香
22	10032-15-2	异戊酸己酯	1.09	22.00	3.44	5.94	7.07	果香
23	16491-36-4	顺-3-己烯基丁酯	1.09	—	—	—	—	鲜苹果香
24	6125-24-2	(2-硝基)苯乙烷	1.05	—	—	—	—	芳香、花香
25	71-41-0	正戊醇	1.04	—	—	—	—	发酵味
26	34995-77-2	芳樟醇氧化物II	1.00	190.00	0.29	0.63	0.48	花香

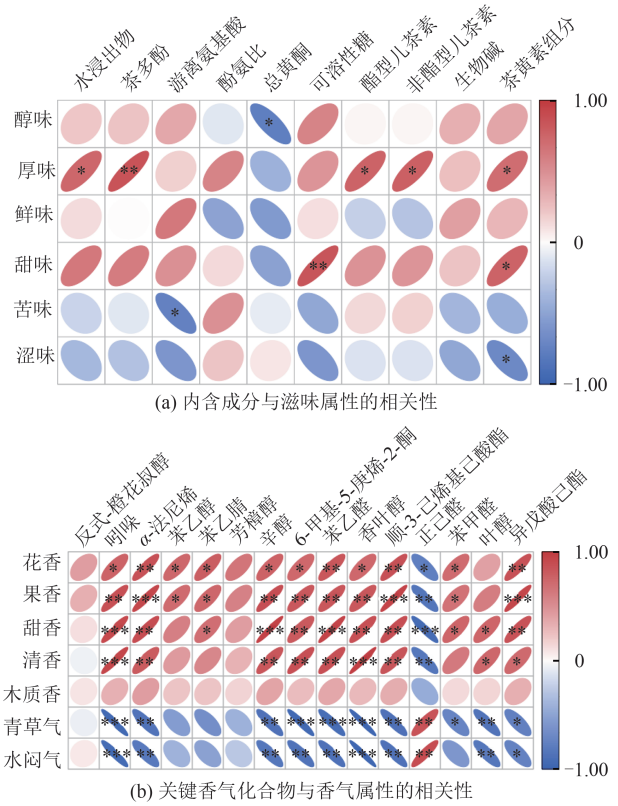
注:“—”表示未查询到。

了茶叶品质。这可能是由于采用综合做青机萎凋时空气流通较差,且叶面水质量分数较高,鲜叶酶促氧化反应失衡,局部温差较大[40],从而造成了一定的负面影响。

2.4 不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶滋味成分、香气化合物与感官属性的相关性分析

不同萎凋方式制作的“雨水青”武夷岩茶风味特征与内含成分的相关性分析见图7(a)。滋味属性上,水浸出物、茶多酚、儿茶素组分等与厚味呈显著正相关[41];游离氨基酸与苦味呈显著负相关;可溶性糖、茶黄素组分与甜味呈显著正相关[42];总黄酮与醇味呈显著负相关。茶汤醇味、厚味的滋味属性是指感官表征的收敛性较高并伴有浓稠感,这与茶叶中的水浸出物质量分数高度相关[43]。游离氨基酸对茶叶品质的形成具有积极影响,可提升茶汤的鲜爽度,且游离氨基酸与可溶性糖协同作用,可有效缓解酚类及碱类物质赋予茶汤的苦味和收敛性[44]。

15种关键香气化合物(VIP>1且OAV>1)与感官属性的相关性分析见图7(b)。香气化合物间往往存在混合效应,其中吲哚、α-法尼烯、6-甲基-5-庚烯-2-酮等与花香、果香、清香、甜香呈正相关,与青草气、水闷气呈显著负相关,表现为令人愉悦的香气属性。结合香气化合物质量分数进行分析,吲哚、α-法尼烯、6-甲基-5-庚烯-2-酮等对PW香气品质的形成具有关键作用。正己醛与青草气、水闷气呈显著正相关,与花香、果香、清香、甜香呈显著负相关,表现



(a) 内含成分与滋味属性的相关性

(b) 关键香气化合物与香气属性的相关性

*—P<0.05；**—P<0.01；***—P<0.001。

图 7　不同萎凋方式对“雨水青”武夷岩茶的影响因素的相关性分析

Fig. 7　Correlation analysis of influencing factors of Wuyi rock tea produced from rain-soaked leaves with different withering methods

为令人不愉悦的香气属性。有研究表明，大多数萜类物质与花香和果香呈正相关；醇类物质与甜味和果香相关；酯类物质与花香、果香和焦糖香相关[45]，这与本研究结果相符。研究表明，萎凋方式对“雨水青”武夷岩茶品质的形成具有显著影响，通过自动化萎凋设备处理后优化了这些物质的组成结构。

3　结论

雨天限制着高品质武夷岩茶的生产，为改善“雨水青”武夷岩茶的品质，本研究以3种萎凋方式所制“雨水青”武夷岩茶为试验材料，感官评定结合生化检测分析结果表明，自动化萎凋设备所制武夷岩茶浓醇爽口、花果香馥郁，滋味成分与香气化合物质量分数均显著提升。此外，检测出的20种滋味成分及108种香气化合物中，共筛选出6种关键呈味物质和15种关键香气化合物（VIP>1且OAV>1）。化学计量学检测发现，萎凋方式不同导致的物质基础上的差异是导致其感官风味不同的关键因素。其中自动化萎凋设备所制样品的水浸出物、茶多酚、游离氨基酸等质量分数显著较高，是其滋味更优异的主要原因；而综合做青机萎凋所制样品表现出较强苦涩感，这主要受到游离氨基酸、可溶性糖及儿茶素类质量分数的影响。结合不同物质的香气特征结果进行分析，发现吲哚、香叶醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮等对其花香、果香的形成具有关键作用，这与自动化萎凋适度升温和机械损伤促进相关酶活性提升密切相关[46]。综合做青机萎凋时不良的萎凋环境导致富含青草气的正己醛累积，以及表征武夷岩茶的关键香气化合物总质量分数较低，是其表现出较强闷青味的关键。研究表明，自动化萎凋设备能够显著提升“雨水青”武夷岩茶品质，为“雨水青”生产的武夷岩茶质量控制及该新式萎凋设备的推广应用提供了理论依据。

武夷岩茶独特花果香品质的形成是鲜叶内源物质与加工工艺协同作用的结果。其中，酶促反应阶段及焙火工艺是塑造其典型风味特征的核心环节。本研究基于“雨水青”鲜叶持水性强这一特性，结合茶叶加工过程中的动态品质调控理念，通过优化自动化萎凋设备工艺参数以改善茶叶品质，系统探究了不同萎凋方式对“雨水青”武夷岩茶关键风味成分形成的影响。未来研究将结合香气重组、添加试验模拟以及GC-O等技术，进一步探究在雨水青制作武夷岩茶过程中关键风味物质的合成途径及其影响机制。

参考文献

[1] ZHANG L Z，DAI H M，ZHANG J L，et al. A study on origin traceability of white tea（white peony）based on near-infrared spectroscopy and machine learning algorithms [J]. Foods，2023，12(3)：499.

[2] HAO M J，LAI X F，LI Q H，et al. Widely targeted metabolomic analysis reveals metabolite changes induced by incorporating black tea fermentation techniques in oolong tea processing for quality improvement[J]. Food Chemistry，2024，459：140433.

[3] LU Y，SUN Y Q，NI L，et al. Sensory and molecular insights into the bitterness of Wuyi rock tea[J]. Food Bioscience，2024，59：103966.

[4] 梁轶琳，张灵枝，戴浩民，等. HS-SPME-GC-MS分析武夷岩茶呈香挥发性物质[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(5)：110-121.
LIANG Y L，ZHANG L Z，DAI H M，et al. Analysis of aroma volatile compounds in Wuyi rock tea based on HS-SPME-GC-MS [J]. Journal of Food Science and

Biotechnology，2024，43(5)：110-121.(in Chinese)
[5] WANG S Z，ZENG T，ZHAO S，et al. Multifunctional health-promoting effects of oolong tea and its products[J]. Food Science and Human Wellness，2022，11(3)：512-523.
[6] ZHU C，ZHANG S T，ZHOU C Z，et al. Integrated transcriptome，microRNA，and phytochemical analyses reveal roles of phytohormone signal transduction and ABC transporters in flavor formation of oolong tea（*Camellia sinensis*）during solar withering[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2020，68(45)：12749-12767.
[7] JIA X L，ZHANG Q，CHEN M H，et al. Analysis of the effect of different withering methods on tea quality based on transcriptomics and metabolomics[J]. Frontiers in Plant Science，2023，14：1235687.
[8] 金敬军，周继法. 雨水叶不同处理与茶叶品质的关系[J]. 茶叶，2004，30(1)：56-57，59.
JIN J J，ZHOU J F. Relationship between various treatments of rained leaves and tea quality[J]. Journal of Tea，2004，30(1)：56-57，59.(in Chinese)
[9] WU Y D，LI T H，HUANG W J，et al. Investigation of the quality of Lu'an Guapian tea during Grain Rain period by sensory evaluation，objective quantitative indexes and metabolomics[J]. Food Chemistry：X，2024，23：101595.
[10] WANG Y，ZHENG P C，LIU P P，et al. Novel insight into the role of withering process in characteristic flavor formation of teas using transcriptome analysis and metabolite profiling[J]. Food Chemistry，2019，272：313-322.
[11] TAN J Y，FANG Z，TIAN C Y，et al. Improving flavor of Wuyi rock tea processed from rain-soaked leaves by optimizing withering conditions[J]. Food Chemistry，2025，471：142762.
[12] 林冬纯. 白茶 6CW-600 萎凋设备试验研究及萎凋在线反馈参数探讨[D]. 福州：福建农林大学，2022.
[13] 魏子淳，庄加耘，孙志琳，等. 不同摊叶厚度晾青对武夷岩茶品质的影响[J]. 食品工业科技，2023，44(7)：97-106.
WEI Z C，ZHUANG J Y，SUN Z L，et al. Effects on the quality of Wuyi rock tea with different airing thicknesses[J]. Science and Technology of Food Industry，2023，44(7)：97-106.(in Chinese)
[14] QI D D，SHI Y L，LU M，et al. Effect of withering/spreading on the physical and chemical properties of tea：a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2024，23(5)：e70010.
[15] LIANG Y L，WANG Z H，ZHANG L Z，et al. Characterization of volatile compounds and identification of key aroma compounds in different aroma types of Rougui Wuyi rock tea[J]. Food Chemistry，2024，455：139931.
[16] WANG Z H，LIANG Y L，GAO C X，et al. The flavor characteristics and antioxidant capability of aged Jinhua white tea and the mechanisms of its dynamic evolution during long-term aging[J]. Food Chemistry，2024，436：137705.
[17] 黄艳，商虎，朱嘉威，等. 加工工艺对茶树花品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学，2020，41(11)：165-170.
HUANG Y，SHANG H，ZHU J W，et al. Effects of processing treatments on quality and antioxidant activity of tea plant flower[J]. Food Science，2020，41(11)：165-170.(in Chinese)
[18] 王婷婷，陈寿松，俞少娟，等. LED 光萎凋对乌龙茶雨水青的光响应及对其品质的影响[J]. 热带作物学报，2016，37(1)：47-52.
WANG T T，CHEN S S，YU S J，et al. Effect of LED light withering on light response and quality of oolong tea rain leaves[J]. Chinese Journal of Tropical Crops，2016，37(1)：47-52.(in Chinese)
[19] 俞铮，葛小通，张佳汇，等. 食品中鲜味的来源及其评价方法[J]. 食品科学，2022，43(19)：338-347.
YU Z，GE X T，ZHANG J H，et al. Sources and evaluation methods of umami taste in foods[J]. Food Science，2022，43(19)：338-347.(in Chinese)
[20] 毛世红. 基于风味组学的工夫红茶品质分析与控制研究[D]. 重庆：西南大学，2018.
[21] WANG H J，SHEN S，WANG J J，et al. Novel insight into the effect of fermentation time on quality of Yunnan Congou black tea[J]. LWT-Food Science and Technology，2022，155：112939.
[22] 尚卫琼，陈春林，孙承冕，等. 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，et al. Effects of polyphenols and caffeine from Yunnan Dayezhong tea on quality of black tea[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2021，49(1)：155-159.(in Chinese)
[23] 王伟伟，乐婷，杨刘艳，等. 骏眉工艺红茶化学成分及其抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报，2022，13(10)：3320-3327.
WANG W W，LE T，YANG L Y，et al. Study on the chemical constituents and antioxidant activity of black tea with Junmei technology[J]. Journal of Food Safety and Quality，2022，13(10)：3320-3327.(in Chinese)
[24] FANG Z T，YANG W T，LI C Y，et al. Accumulation pattern of catechins and flavonol glycosides in different varieties and cultivars of tea plant in China[J]. Journal of Food Composition and Analysis，2021，97：103772.
[25] 魏沙沙，彭静，陈志丹，等. 尤溪苦茶苦味相关物质检测及与苦味的关联分析[J]. 茶叶科学，2021，41(3)：337-349.
WEI S S，PENG J，CHEN Z D，et al. Detection of bitterness-related substances in Youxi bitter tea and correlation analysis with bitterness[J]. Journal of Tea Science，2021，41(3)：337-349.(in Chinese)

[26] 陆佳欣，任唯兆，任婧楠，等. 复热方式对预制胡萝卜玉米排骨汤品质的影响[J]. 食品科学，2025，46(2)：193-203.
LU J X，REN W Z，REN J N，et al. Effects of reheating methods on the quality of prepared pork rib soup with carrot and corn[J]. Food Science，2025，46(2)：193-203.(in Chinese)

[27] 周晶晶，张雯萍，李光发，等. 九龙大白茶白茶风味品质的分析[J]. 食品科学，2025，46(6)：201-210.
ZHOU J J，ZHANG W P，LI G F，et al. Analysis of flavor quality of Jiulong dabaicha white tea[J]. Food Science，2025，46(6)：201-210.(in Chinese)

[28] 尹洪旭，杨艳芹，姚月凤，等. 基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析对不同栗香特征绿茶判别分析[J]. 食品科学，2019，40(4)：192-198.
YIN H X，YANG Y Q，YAO Y F，et al. Discrimination of different characteristics of chestnut-like green tea based on gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical data analysis[J]. Food Science，2019，40(4)：192-198.(in Chinese)

[29] ZHENG Y C，OU X X，LI Q M，et al. Genome-wide epigenetic dynamics of tea leaves under mechanical wounding stress during oolong tea postharvest processing[J]. Food Research International，2024，194：114939.

[30] ZHAO F，LIN H T，ZHANG S，et al. Simultaneous determination of caffeine and some selected polyphenols in Wuyi rock tea by high-performance liquid chromatography[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2014，62(13)：2772-2781.

[31] 张鹏，黄艳，魏成江，等. 基于HS-SPME-GC-MS与分子对接技术的3种香型红茶挥发性成分研究[J]. 茶叶科学，2025，45(2)：318-332.
ZHANG P，HUANG Y，WEI C J，et al. The study of volatile components in three scented types of black tea based on HS-SPME-GC-MS and molecular docking technology[J]. Journal of Tea Science，2025，45(2)：318-332.(in Chinese)

[32] GUO X Y，SCHWAB W，HO C T，et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry，2022，376：131933.

[33] ZENG L T，ZHOU Y，GUI J D，et al. Formation of volatile tea constituent indole during the oolong tea manufacturing process[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2016，64(24)：5011-5019.

[34] DUAN Y，YU M G，RAZA J，et al. Effect of roasting time on aroma quality of Shuixian Wuyi rock tea (*Camellia sinensis*)[J]. Journal of Food Composition and Analysis，2024，135：106662.

[35] ZHOU Y，LIU X Y，YANG Z Y. Characterization of terpene synthase from tea green leafhopper being involved in formation of geraniol in tea (*Camellia sinensis*) leaves and potential effect of geraniol on insect-derived endobacteria[J]. Biomolecules，2019，9(12)：808.

[36] WANG Y J，HUANG L F，DENG G J，et al. The shaking and standing processing improve the aroma quality of summer black tea[J]. Food Chemistry，2024，454：139772.

[37] YE J H，WANG Y H，LIN S X，et al. Effect of processing on aroma intensity and odor characteristic of Shuixian (*Camellia sinensis*) tea[J]. Food Chemistry：X，2023，17：100616.

[38] WANG X H，CAO J J，CHENG X，et al. UV-B application during the aeration process improves the aroma characteristics of oolong tea[J]. Food Chemistry，2024，435：137585.

[39] TAWFIK M M，YAMATO K T，KOHCHI T，et al. *N*-Hexanal and (*Z*)-3-hexenal are generated from arachidonic acid and linolenic acid by a lipoxygenase in *Marchantia polymorpha* L.[J]. Bioscience，Biotechnology，and Biochemistry，2017，81(6)：1148-1155.

[40] GUO X Y，LV Y Q，YE Y，et al. Polyphenol oxidase dominates the conversions of flavonol glycosides in tea leaves[J]. Food Chemistry，2021，339：128088.

[41] CAO Q Q，ZOU C，ZHANG Y H，et al. Improving the taste of autumn green tea with tannase[J]. Food Chemistry，2019，277：432-437.

[42] PENG Z，ZHOU H L，ZHAO Z J，et al. Enzymatic quality enhancement of oolong tea based on grade difference analysis[J]. Food Bioscience，2024，61：104804.

[43] 陈义，张永瑞，张禄焕，等. 不同嫩度茶树新梢主要滋味物质分布规律研究[J]. 食品研究与开发，2020，41(22)：7-11.
CHEN Y，ZHANG Y R，ZHANG L H，et al. Study on distribution of main flavor substances in new shoots of tea trees with different tenderness[J]. Food Research and Development，2020，41(22)：7-11.(in Chinese)

[44] 李琴，戴宇樵，冉乾松，等. 茶鲜叶萎凋时期乙烯利溶液对游离氨基酸组分的影响[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(9)：85-92.
LI Q，DAI Y Q，RAN Q S，et al. Effect of ethephon solution on dynamic changes of free amino acid components in fresh leaves of withered tea[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(9)：85-92.(in Chinese)

[45] WANG D L，LIU Z B，LAN X Y，et al. Unveiling the aromatic intricacies of Wuyi rock tea：a comparative study on sensory attributes and odor-active compounds of Rougui and Shuixian varieties[J]. Food Chemistry，2024，435：137470.

[46] MEI X，LIU X Y，ZHOU Y，et al. Formation and emission of linalool in tea (*Camellia sinensis*) leaves infested by tea green leafhopper (*Empoasca* (Matsumurasca) *onukii* Matsuda)[J]. Food Chemistry，2017，237：356-363.