

莫晓丽, 成晨, 曾雯, 等. 连续慢速做青过程中乌龙茶主要化学成分的变化 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 67-77. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120224

MO Xiaoli, CHENG Chen, ZENG Wen, et al. Changes in the Major Chemical Constituents of Oolong Tea under Continuous Low-Speed Green-making Process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 67-77. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120224

· 研究与探讨 ·

# 连续慢速做青过程中乌龙茶主要化学成分的变化

莫晓丽, 成晨, 曾雯, 黄亚辉\*  
(华南农业大学园艺学院, 广东广州 510642)

**摘要:**本研究采用一种新型全自动做青工艺, 通过缓慢、连续地滚动或振动对茶叶造成机械损伤, 使茶叶发生各种生化反应并逐渐形成其独特品质风味, 以期从源头解决做青工艺复杂、劳动强度大等问题, 测定五次传统做青(每次摇青 4 min, 晾青 1.5 h)及采用滚筒长径比为 1.5 m/0.7 m 的摇青机缓慢连续(1.84 r/min)进行摇青 7.5 h(每隔 1.5 h 取一次样品)的白叶单丛主要化学成分和品质差异。结果表明: 相同做青次数下, 连续慢速做青下乌龙茶感官品质优于传统做青; 水浸出物含量随做青次数增加而减少, 其在晒青后出现峰值 25.33%; 传统做青茶多酚含量先增加后减少, 其峰值出现在第四次做青(CT4), 为 19.71%, 连续慢速做青茶样则先减少后增加, 峰值为 17.92%, 出现在摇青 1.5 h(LX1); 传统做青游离氨基酸总量在第三次做青(CT3)达到峰值 2.42%, 而连续慢速做青下氨基酸峰值在做青 3 h(LX2), 为 2.61%; 两种工艺下儿茶素总量在晾青和摇青前期增加, 摇青后期降低; 两种工艺下乌龙茶香气物质有较大差异, 传统做青第一次做青(CT1)和第二次做青(CT2)萜烯醇类香气物质较高; 而连续慢速做青 6 h(LX4)茶样杂环类香气物质较高; 两种工艺下多酚氧化酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶相关基因的表达量呈现出不同的变化趋势, 6 个基因的表达量在连续慢速做青 6 h(LX4)最高。结合感官评价的结果, 表明连续慢速做青是一种适用于乌龙茶加工的新技术。

**关键词:** 乌龙茶, 连续慢速做青, 香气, 基因表达

中图分类号: S571.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)20-0067-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120224



本文网刊:

## Changes in the Major Chemical Constituents of Oolong Tea under Continuous Low-Speed Green-making Process

MO Xiaoli, CHENG Chen, ZENG Wen, HUANG Yahui\*

(College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of complicated greenening process and high labor intensity at source, a new fully automatic greenening process was adopted in this study, which caused mechanical damage to tea leaves by slowly and continuously rolling or vibrating the tea leaves at a low speed, resulting in various biochemical reactions and gradually forming its unique quality and flavor. We determined the major chemical constituents and quality differences of Baiye dancong from five traditional green-making sessions (4 min per rotating and 1.5 h of setting) and 7.5 h of low-speed green-making (1.84 r/min) using a rotating machine with a drum length/diameter ratio of 1.5 m/0.7 m (sampling every 1.5 h). The results showed that: In the same number of green-making, the sensory quality of oolong tea under low-speed green-making was better than that of CT. The peak of water extract content was 25.33%, it occurred after withering and decreased with the increasing of the number of green-making. During the traditional greenening process, the content of tea polyphenols increased

收稿日期: 2021-12-21

基金项目: 以农产品为单元的广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目(茶叶)(2021KJ120); 广东省英德市国家现代农业产业园。

作者简介: 莫晓丽(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶树育种与加工, E-mail: mxiaoli1997@163.com。

\* 通信作者: 黄亚辉(1969-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 茶叶加工新技术研究、茶叶深加工研究及新产品研发、特异茶树资源的研究与利用, E-mail: yahuihuangzz@126.com。

first and then decreased, with a peak of 19.71% at CT4. On the contrary, the peak occurred at LX1 with 17.92%. The free amino acid content of traditional greening reached a peak of 2.42% in CT3 and 2.61% in LX2. The total amount of catechin increased in the early stage of withering and shaking in both processes and decreases in the later stage of shaking. The aroma substances of oolong tea differed greatly under the two processes, with higher aroma substances of terpene alcohols in CT1 and CT2, while the heterocyclic aroma substances were higher in LX4 tea sample under the new process. The expression of PPO and  $\beta$ -G related genes showed different trends under the two processes, with the highest expression of six genes at LX4. Combined with the results of sensory evaluation, it showed that continuous low-speed green-making would be a new technology for oolong tea processing.

**Key words:** oolong tea; continuous slow green-making; volatile; genes expression

乌龙茶是我国六大茶类中的半发酵茶,按地区可分为广东乌龙、台湾乌龙、闽北乌龙和闽南乌龙,其中以凤凰单丛是广东乌龙茶中最受消费者青睐的,其以香气高扬且香型丰富著称。凤凰单丛品质形成需经过晒青、晾青、做青、杀青、揉捻、烘焙六个工序<sup>[1]</sup>。做青是凤凰单丛独特香气及风味形成的关键工艺,其包括摇青和晾青这两个交替进行的工序,摇青实质是形成机械损伤,时间较短;晾青时间长,主要是使蛋白质、多糖、茶多酚等物质发生缓慢的生化反应,经过这两个工序,茶叶中茶黄素等色素类物质及大量的香气物质形成。茶学工作者对做青过程中乌龙茶内含物质及相关酶活性的变化进行了大量研究<sup>[2-4]</sup>,研究表明机械损伤和低温等各种胁迫影响乌龙茶香气的形成<sup>[5]</sup>。传统做青机械化程度低,步骤复杂,劳动强度大,对人工要求较高。此外,做青强度和时间的需要根据茶青嫩度、天气情况等多种因素进行调整,要求制茶师傅有较丰富的经验,需要“看青做青”。针对以上问题,茶界前辈们不断探索和验证,提出了包括切细做青<sup>[6]</sup>、振动做青<sup>[7-8]</sup>、可控环境做青<sup>[9]</sup>、连续化做青<sup>[10]</sup>等思路 and 理念。

为了获得最适于乌龙茶品质形成的做青条件,研究者设定不同的温度湿度进行做青,研究表明不同温度对铁观音的香气有较大影响,中低温条件下铁观音中儿茶素含量显著高于高温条件下<sup>[11]</sup>。做青温度过高过低都不利于乌龙茶香气形成,中低温条件更有利于乌龙茶形成更丰富且组分含量较高的香气物质;温度一致的情况下,湿度适中的乌龙茶香气成分更为优异,中温中湿条件有利于岭头单丛形成高锐持久的花蜜香<sup>[12-15]</sup>。此外,乌龙茶品质形成的另一关键因素为做青强度,做青强度影响茶叶内酶的活性,适当做青下茶叶内源酶的活力提高,摇青过重超氧化物歧化酶活性降低,加快了脂质的过氧化反应,鲜叶中可溶性蛋白质及其可溶性组分迅速下降,影响香气形成<sup>[12-13]</sup>。摇青次数对于乌龙茶功能成分和香气物质形成有不同的影响,研究表明,摇青2次、4次和6次情况下,摇青次数越多,儿茶素减少量越多,茶红素、茶黄素和茶褐素的含量越高,茶汤滋味苦涩味降低,4次摇青下的游离氨基酸含量最高,咖啡碱差异不明显,6次摇青下的可溶性糖总量最低,而香气组分和精油总量最高<sup>[16-18]</sup>。

目前,乌龙茶做青工艺创新多集中于加工机械的改进,通过机械加工的乌龙茶品质及主要成分变化研究较少,本研究关注传统做青理念,首次提出连续慢速做青理论,通过缓慢、连续地使茶青在慢速滚动或振动下造成机械损伤,使茶叶发生各种生化反应并逐渐形成其独特品质风味,以期从源头解决做青工艺复杂、劳动强度大等问题。本研究测定了五次传统做青及采用滚筒摇青机连续缓慢进行摇青7.5 h(每隔1.5 h取一次样品)的白叶单丛的主要化学成分及相关酶基因表达量,并与传统的做青工艺进行比较,获得采用滚筒做青机连续慢速做青的新技术,以达到降低劳动强度,大量节省人工,且使茶叶品质更为稳定的目的。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

乌龙茶(白叶单丛)于2018年4月进行采摘,广东省潮州市茶园;碳酸钠、甲醇、福林酚、磷酸二氢钾、十二水磷酸氢二钠、茚三酮、氯化亚锡以上均为市售国产分析纯;可可碱标准品、咖啡碱标准品、茶叶碱标准品、苦茶碱标准品、儿茶素单体标准品(没食子儿茶素 GC、表没食子儿茶素 EGC、儿茶素 C、表没食子儿茶素没食子酸酯 EGCG、表儿茶素 EC、没食子儿茶素没食子酸酯 GCG、表儿茶素没食子酸酯 ECG、儿茶素没食子酸酯 CG)、异丙醇(AR级) Sigma-Aldrich Co.LLC;三氟乙酸(HPLC级)天津市科密欧化学试剂有限公司;甲醇(HPLC级)美国 Thermo Fisher;超快型植物 RNA 提取试剂盒 北京华越洋生物科技有限公司;M-MuLV 第一链 cDNA 合成试剂盒 生物合成(上海)股份有限公司;荧光染料 iTaq™ Universal SYBR Green Supermix 美国伯乐。

6CST-B40 滚筒式茶叶杀青机 浙江绿峰机械有限公司;6CR-30 茶叶揉捻机 浙江上洋机械有限公司;6CHM-901 型电式碧螺春烘干机 浙江省富阳茶叶机械总厂;AB204-N 型分析天平 梅特勒-托利多仪器有限公司;DZKW 电热恒温水浴锅 北京市永光明医疗仪器厂;SHZ-D(III)循环水式真空泵 河南省巩义市予华仪器有限责任公司;UV2450 紫外可见分光光度计 Shimadzu Corporation Assembled in China;DHG-101 电热鼓风恒温干燥箱 上海

跃进医疗器械厂;落地式高速冷冻离心机 美国 Thermo Fisher Scientific;超低温冰箱 美国 Thermo Electron Corporation;Agilent 1200 高效液相色谱仪 美国 Agilent 公司;LDZX-50KBS 立式压力蒸汽灭菌锅 上海申安医疗器械厂;凝胶成像仪 美国 Bio-Rad 公司;NanoDrop2000 超微量核酸定量仪 美国 Gene 公司;LightCycler 480 II 荧光定量 PCR 仪 瑞士 Roche。

## 1.2 实验方法

1.2.1 样品的采集与处理 将采摘后的鲜叶按照乌龙茶加工工序(图 1)进行晒青和晾青(样品编号分别为 S 和 W),晾青后的原料分别采用以下两种方法进行做青。

连续慢速做青:采用滚筒长径比为 1.5 m/0.7 m 的摇青机缓慢连续(1.84 r/min)进行摇青 7.5 h,每隔 1.5 h 取一次样品(样品编号为 LX1、LX2、LX3、LX4、LX5);摇青结束后晾青 1 h。

传统做青是不连续的,包括摇青(4 min)和晾青(1.5 h)两个工序,重复这两个工序五次,每次晾青结束取一次样(样品编号为 CT1、CT2、CT3、CT4、CT5)。

做青结束后采用杀青机进行杀青(200 °C, 3 min);揉捻 30 min 后分别用毛火(110 °C)、足火(90 °C)进行干燥。每次取样后立即用微波炉进行微波固定(中高火, 3 min),然后在 4 °C 下干燥和储存,用于下一步研究。

1.2.2 茶叶感官评价和理化成分测定 供试样品感官品质、含水率、水浸出物、茶多酚、游离氨基酸总量均按照国标法进行测定分析<sup>[19-23]</sup>。感官审评共 20 人参与(11 个男生, 9 个女生, 年龄 22~35 岁),以评分方式评定茶叶感官品质,包括外形(20%)、汤色(5%)、香气(30%)、滋味(35%)、叶底(10%)五个因素。

儿茶素、生物碱组分及含量采用高效液相色谱

测定,检测方法根据实验室之前的研究并已经有过方法验证<sup>[24]</sup>。色谱柱为 Agilent Eclipse XDB-C<sub>18</sub>(4.6 mm×150 nm, 5 μm),柱温 38 °C,进样量 10 μL,流动相 A、B 分别为 0.1% 的三氟乙酸水溶液和 HPLC 级甲醇,洗脱梯度见表 1。采用 278 nm 的波长检测儿茶素组分,测定时流速为 0.8 mL/min;生物碱组分的检测波长为 230 nm,采用 1 mL/min 的流速进行测定。

供试样品挥发性成分交由杭州农业部茶叶质量监督检验测试中心测定,样品前处理采用固相萃取方法。

1.2.3 qRT-PCR 引物设计与合成 筛选出与多酚氧化酶和 β-葡萄糖苷酶相关的 6 个基因,进行不同做青方式和做青程度茶叶鲜叶相关基因表达验证水平。采用 Primer Premier 5 软件进行引物的设计,内参基因选用茶叶 β-actin。委托上海生工生物工程技术服务有限公司合成设计所得引物,基因编号及引物序列见表 2,每个样品进行 3 次生物学重复。

1.2.4 做青叶总 RNA 提取及 cDNA 合成 取做青叶 0.5 g 于预冷研钵中加入液氮研磨,按照北京华越洋公司的超快型植物 RNA 提取试剂盒步骤提取样品的总 RNA,其完整度检测采用浓度为 1% 的琼脂糖凝胶电泳进行,而后用超微量核算检测仪测定 RNA 浓度及 OD<sub>260</sub>、OD<sub>280</sub>、OD<sub>230</sub> 比值,判断所提 RNA 浓度及质量,并选择符合试验结果的 RNA 用于后续试验。采用 M-MuLV 第一链 cDNA 合成试剂盒合成 cDNA 第一条链,转录体系组分如表 3。

将上表物质轻轻混合均匀后稍微离心后进行反转录反应,该过程采用 PCR 仪完成,程序如下:25 °C, 10 min; 42 °C, 40 min; 70 °C, 10 min,合成的 cDNA -20 °C 保存。

1.2.5 qRT-PCR 检测 反应结束后进行扩增曲线和溶解曲线分析,将每个 cDNA 样品稀释 12 倍,选用单内参方法进行荧光定量,qRT-PCR 扩增体系共

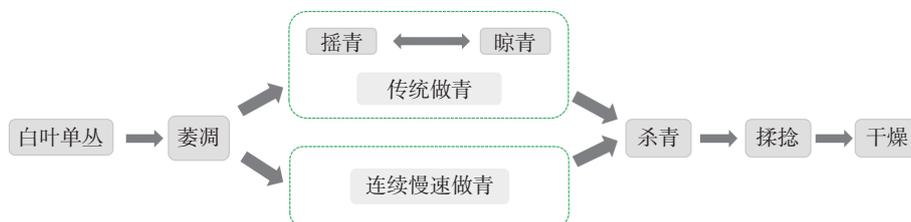


图 1 乌龙茶加工流程图

Fig.1 Processing flow chart of oolong tea

表 1 高效液相检测儿茶素、生物碱的洗脱梯度

Table 1 Elution gradient for the determination of catechins and alkaloids by HPLC

时间(min)	儿茶素		时间(min)	生物碱	
	A(%)	B(%)		A(%)	B(%)
0~30	70	30	0~20	90	10
30.1~40	20	80	20.1~30	80	20
40.1~40.5	90	10	30.1~35	20	80
			35~40	90	10

表2 qRT-PCR引物序列表  
Table 2 qRT-PCR primer sequence list

基因名称	引物序列(5'-3')	长度(bp)
P1	F: AAGAGTTTGGGTAGGCGGGATTTTA	25
	R: TTTTCAGCCATGGGATGTCCACGTC	25
P3	F: GATCCAGCGTTTGCAATTCCTTT	23
	R: CAACTTCTGCTTCTCTCATCGACA	25
P4	F: ACAGGTTCCGAGGCCTAAAAAATCT	25
	R: TTCCAGCAAACCTCAGTATTGTCCGG	25
G1	F: ACTGAACCTTATATAGTTGGCCA	23
	R: TCGATTCACCAAAAGACT	20
G2	F: GAACCTTATATAGTTGGCCACCA	23
	R: TCCCCACAAAGACTTCATGA	21
G3	F: ATGCACCTGGTCGATGTTCT	20
	R: CTGTGAAGTTGGGCAATCGA	20
<i>β-actin</i>	F: GCCATCTTTGATTGGAATGG	20
	R: GGTGCCACAACCTTGATCTT	20

表3 转录组分体系  
Table 3 Transcription system components

物质	用量(μL)
RNA溶液	2
随机引物	1
5×Reaction Buffer	4
RNase inhibitor(40 U/μL)	1
dNTP Mix(10 mmol/L)	2
M-MuLV RT(200 U/μL)	1
RNase Free ddH <sub>2</sub> O	9
Total volume	20

10 μL; SYBR qPCR MIX, 5 μL; 上下游引物各 0.25 μL; cDNA, 0.5 μL; RNase Free ddH<sub>2</sub>O, 4 μL。荧光染料采用 BIO-RAD iTaq™ Universal SYBR Green Supermix。qRT-PCR 反应参数: 95 ℃, 1 min; 95 ℃, 15 s, 55 ℃, 30 s, 72 ℃, 35 s, 40 个循环; 采用 qRT-PCR 仪采集的数据做熔解曲线, 熔解程序温度参数是 65~

95 ℃, 以 0.5 ℃ 为单位递增读板, 读板频率为 5 s/次。

### 1.3 数据处理

qRT-PCR 定量数据分析采用 2<sup>ΔCT</sup> 方法, 以连续第一次做青样品定量值为参照分析所有样品的表达量; 试验数据的基本统计分析及作图采用 Excel 2013 软件, 方差分析、因子分析和主成分分析等采用 SAS 9.4 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同做青方式和摇青次数的乌龙茶感官品质分析

感官评价结果如表 4 所示。10 个处理茶样中, 以 LX4 感官品质最佳, 其次是 LX5 号样以及 CT3, 其共同特征是花蜜香明显, 茶汤醇厚带花香; 而因香气品质稍差, 带青气熟闷味, CT4 和 CT1 感官品质最差。

单以摇青次数来看, 传统做青方式下的乌龙茶品质在一定范围内随着做青次数的增加而上升, CT3 品质最佳, 但当摇青达到适宜程度时再继续摇青, 品质会略微降低; 对于连续摇青方式而言, 在本次试验设置的范围内, 摇青时间越长, 乌龙茶感官品质越佳。就做青方式而言, 在相同做青时间下, 连续摇青方式下的乌龙茶品质皆优于传统做青。

### 2.2 不同做青方式和次数的乌龙茶理化成分分析

2.2.1 做青叶含水量变化 乌龙茶品质的形成与做青过程茶梢体内发生特殊的水分传输、扩散方式有关, 叶细胞膨压的多次消长, 是做青引起的特殊生理过程, 它可能对乌龙茶品质的形成的有关生化途径进行具有特殊意义<sup>[25]</sup>。由图 2 可知, 晒青后青叶经过晾青, 含水量有所回升; 而后的整个摇青过程中, 青叶含水率基本呈下降趋势; 不同做青阶段的含水率之间存在较大差异。

表4 茶样感官审评结果  
Table 4 sensory evaluation results

工艺	外形(20%)		汤色(5%)		滋味(35%)		香气(30%)		叶底(10%)		总分(分)	
	评语	评分(分)	评语	评分(分)	评语	评分(分)	评语	评分(分)	评语	评分(分)		
传统做青	CT1	色泽灰褐, 偏红, 条索粗松	88	金黄较明亮	87	滋味较涩, 带花香	86	清香略带青气	86	绿黄, 较柔软, 梗褐色, 无红边	87	86.15
	CT2	色泽灰褐, 条索粗松, 有黄片	86	金黄较亮	87	滋味涩, 平和, 有回甘	85	香气平和, 稍甜	88	绿黄柔软, 嫩叶略带红边	88	86.45
	CT3	黄褐, 较润, 条索粗松	88	黄明亮	88	滋味鲜醇, 花香明显	91	花香高长, 持久	91	绿黄, 柔软, 稍带红边	88	89.95
	CT4	黄褐, 条索稍紧实	87	橙黄较明亮	87	带闷熟味	84	甜香略带焦味	86	黄褐, 红边较明显	87	85.75
	CT5	色泽较乌褐, 条索粗, 紧实	90	橙黄较明亮	88	滋味浓涩	85	香气平淡	85	黄褐均匀, 红边明显	92	86.85
连续做青	LX1	色泽乌润, 条索较完整	89	橙黄明亮	88	滋味青涩, 带花香	88	有花蜜香	90	绿黄均匀, 有红边	89	89
	LX2	乌润, 细紧匀整	93	橙黄透亮	92	滋味较涩	85	花香略带青气	89	黄褐, 红边均匀, 叶底完整	90	88.85
	LX3	乌褐, 细紧弯曲	90	橙黄明亮	88	滋味醇和, 带蜜韵	91	香气平淡, 带闷熟味	88	黄褐色, 柔软有光泽, 红边明显	93	89.8
	LX4	乌褐, 紧实, 较匀整	90	橙红透亮	90	滋味醇厚, 蜜韵明显	92	花香浓郁持久	93	褐色, 叶底较软亮完整	86	91.25
	LX5	乌褐, 细短, 较匀整	91	橙红明亮	89	滋味平和, 有花香	89	花蜜香较高	92	深褐色, 略有断碎	86	90.15

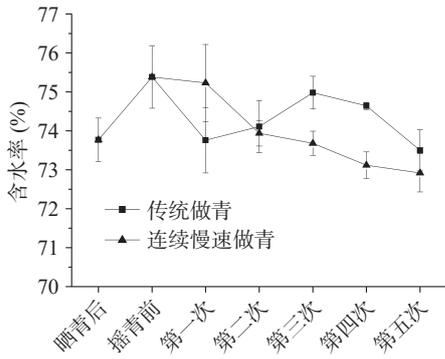


图 2 不同做青方式和次数青叶含水量变化

Fig.2 Change of water content in different ways and times

比较两种做青方式发现, 第一阶段做青结束时, 传统做青方式的青叶含水率(73.76%)低于连续低速摇青(75.23%); 但随着做青进程的深入, 从第二阶段摇青开始, 连续低速摇青方式的青叶含水率的下降幅度低于传统做青, 但其含水率一直低于传统摇青方式, 直至做青结束, 传统做青含水率为 73.50%, 连续慢速做青含水率为 72.92%。两种不同做青方式对青叶含水率的影响不存在显著性差异。说明做青能促进水分散失, 并且连续低速摇青相比于传统做青方式, 促进青叶失水的过程更加平缓均匀。

做青促使茶梢从生理失调状态转向有序的工艺状态, 其水势变化历程具有工艺节奏性, 传统做青方式中, 茶梢水势会随着摇青和晾青的交替呈升降变化并累进下降。本次试验发现, 两种做青方式下青叶含水率的总变化趋势类似, 随着做青次数的增加, 含水率呈波动式下降, 但传统做青方式的青叶相较于连续慢速做青单次变化幅度更大, 且做青后期, 传统做青青叶含水率高于连续慢速做青。潘玉华<sup>[26]</sup>研究发现, 摇青后茶青含水率上升, 推测其除梗叶水分重新分布外, 大分子物质分解及细胞呼吸作用生成水分导致含水率上升。传统做青方法摇青和晾青交替进行, 一摇至三摇含水率上升可能为梗叶水分重新分布及呼吸作用等水分增加量大于失水量。连续慢速做青下茶青一直处于慢速地摇青状态, 故其一直处于失水状态。

**2.2.2 水浸出物含量比较** 从做青开始到结束, 整个过程中两种做青方式对应的成品茶水浸出物的含量(图 3), 均在晒青后即出现峰值, 均为 25.33%, 而后水浸出物含量随做青次数的增加而逐步减少, 做青结束后传统做青的水浸出物含量为 23.08%, 连续慢速做青为 23.72%, 两种方式下水浸出物含量不存在显著性差异。

传统做青方式下, 水浸出物含量最高的为 CT1, 随后不断降低。CT5 与 CT1、CT2 存在极显著差异 ( $P<0.01$ ), 其他各处理间不存在显著性差异。

连续慢速做青方式下, 水浸出物含量在 LX2 达到最大值。随后摇青次数越多, 水浸出物含量越少。LX1 与其他连续摇青次数处理均存在极显著差异 ( $P<0.01$ )。

水浸出物是指茶叶内茶多酚、生物碱、氨基酸、茶色素、可溶性糖类和芳香物质等能溶于沸水的物质的总和, 一般占总含量的 45%。晏嫦好等<sup>[27]</sup>对广东凤凰单丛 43 个茶样进行主要品质成分分析发现, 凤凰单丛水浸出含量较高, 在 35.63%~49.41% 范围内。

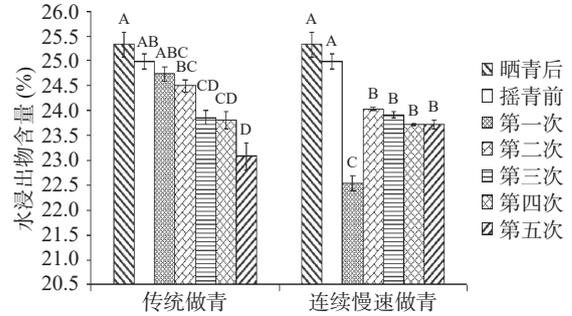


图 3 不同做青方式和次数乌龙茶水浸出物含量

Fig.3 Content of water extract in different ways and times  
注: 小写字母表示存在显著性差异,  $P<0.05$ ; 大写字母表示存在极显著差异,  $P<0.01$ ; 图 4~图 6 同。

**2.2.3 茶多酚含量比较** 如图 4 所示, 不同做青方式下茶多酚含量变化趋势有所不同, 随着做青次数增加, 传统做青下茶多酚呈先增后减的趋势, 而连续慢速做青呈先减后增趋势, 两种不同做青方式的成品茶茶多酚含量不存在显著性差异。

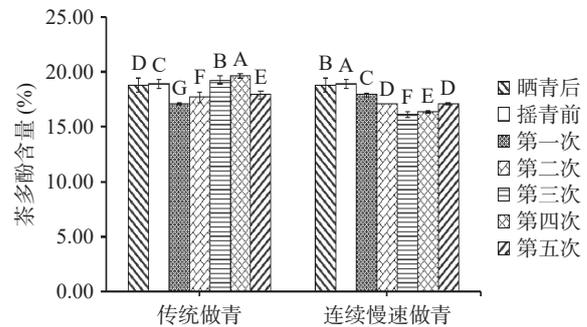


图 4 不同做青方式和次数乌龙茶茶多酚含量比较

Fig.4 Comparison of the polyphenol content in different ways and times

传统做青方式下, 萎凋后青叶经历第一次摇青后, 茶多酚含量下降, 随后的做青过程中, 茶多酚含量上升且在 CT4 达到最大值为 19.71%, 之后茶多酚含量下降。不同摇青次数处理间的成品茶的茶多酚含量存在极显著性差异。连续慢速做青方式下, LX1 茶多酚含量最高, 为 17.92%; 随着做青次数的增多, 茶多酚含量持续降低。除 LX2 与 LX5 存在显著性差异外 ( $P<0.05$ ), 各处理之间茶多酚含量存在极显著性差异 ( $P<0.01$ )。

利用高效液相色谱测得的儿茶素有 8 种, 其中 EGC 的含量在仪器检出限以下, 不纳入分析范围。由图 4 可知, 从儿茶素总量来看, 12 个茶样儿茶素总量处于 7.67%~14.16%, 并在晾青和摇青前期增加, 摇青后期降低, 因此做青次数对儿茶素总量影响较大。儿茶素是茶叶中多酚类物质的主体部分, 占茶叶

表 5 儿茶素组分及含量(%)  
Table 5 Catechin components and content (%)

样品	EGCG	EC	GCG	ECG	CG	GC	C	儿茶素总量
S	7.64	0.30	0.55	1.21	0.16	0.60	0.16	10.63
W	10.18	0.33	0.89	1.61	0.19	0.75	0.21	14.16
CT1	9.89	0.40	0.78	1.50	0.16	0.68	0.20	13.60
CT2	9.21	0.39	0.71	1.40	0.16	0.72	0.20	12.79
CT3	8.74	0.42	0.75	1.32	0.18	0.74	0.22	12.37
CT4	8.37	0.42	0.71	1.30	0.18	0.69	0.21	11.89
CT5	8.61	0.38	0.69	1.33	0.16	0.66	0.19	12.03
LX1	8.00	0.40	0.64	1.27	0.17	0.66	0.20	11.33
LX2	5.24	0.40	0.36	0.95	0.09	0.49	0.15	7.67
LX3	7.30	0.46	0.45	1.26	0.11	0.52	0.18	10.28
LX4	8.04	0.49	0.51	1.32	0.14	0.55	0.19	11.24
LX5	7.49	0.40	0.57	1.27	0.15	0.54	0.18	10.61

干重的 12%~24%<sup>[28]</sup>, 主要包括 EGCG、ECG、EGC 和 EC, 且以 EGCG 含量最为丰富。由表 5 可知, 在乌龙茶加工过程中, 儿茶素总量逐渐减少, 其中又以摇青工序减少最多; L-表没食子儿茶素 EGC 及其没食子酸酯 EGCG 的氧化还原势最低, 首先被氧化<sup>[28]</sup>, L-EGC、L-EGCG、L-ECG 为儿茶素中减幅最大的成分。本试验中, 从儿茶素单体来看, 晾青后的茶青 7 种儿茶素含量均上升, 其中 GCG 和 EGCG 变化幅度最大, 分别为 61.81% 和 33.24%。摇青开始后, 除 EC 外的 6 种儿茶素含量均呈下降趋势, 下降幅度较小。酯型儿茶素主要是造成茶汤的苦涩味, 而非酯型儿茶素则是甜味的主要贡献者<sup>[29-30]</sup>, 苦涩味不利于茶汤品质评定, 而甘甜是茶叶品质好的一个表现。与传统做青相比, 连续慢速做青拥有较低的酯型儿茶素的含量, 这可能是连续慢速做青茶样感官评价分数比传统做青分数高的原因。

2.2.4 游离氨基酸总量比较 氨基酸是茶叶中的主要成分之一, 其组分会直接影响茶叶的鲜爽度和相关香气成分。做青过程中, 蛋白质部分水解为氨基酸, 茶叶内氨基酸也会与其他物质结合形成部分香气物质, 因此氨基酸含量并不总是增加或减少。

由图 5 可知, 随着摇青次数的增加, 两种摇青做青方式下成品茶的氨基酸含量呈先减少后增加的趋势。传统做青方式下, 与萎凋叶相比, CT1 和 CT2 的氨基酸含量稍低, CT3 的氨基酸含量为 2.42%, 达到最大值; 随后含量不断降低。连续慢速做青方式下,

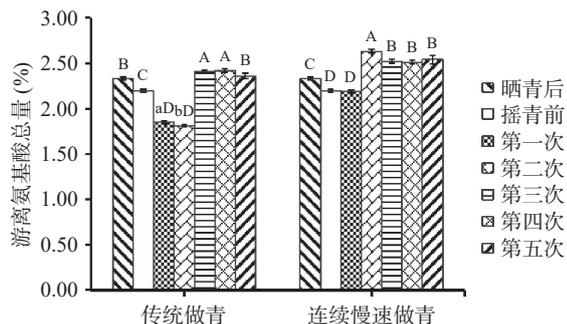


图 5 游离氨基酸总量变化  
Fig.5 Changes of free amino acid

LX1 下氨基酸含量最低, 随着摇青次数的增加, 氨基酸含量上升, 在 LX2 时达到峰值, 为 2.61%; 随后含量不断降低。本试验中氨基酸变化趋势与黄福平等<sup>[31]</sup> 研究结果相似。

2.2.5 生物碱组分及含量 研究发现咖啡碱是导致茶汤苦味的一个因素<sup>[32]</sup>; 然而, 咖啡碱也被证明可以增强茶氨酸的味觉强度<sup>[33]</sup>。从图 6 可以看出, 可可碱含量在晾青后有明显回升, 在摇青过程中其含量不断下降; 不同做青方式下, 咖啡碱变化趋势较为相似, 做青次数对咖啡碱含量有较大影响, 在第二次做青后, 咖啡碱含量下降最为明显; 嘌呤生物碱总量变化趋势与咖啡碱一致, 连续慢速做青下, 做青前后嘌呤生物碱总量不存在极显著差异。两种做青方式下, 随着做青次数增加, 可可碱含量减少, 咖啡碱含量出现先下降后上升趋势, 这与陈泉宾等<sup>[34]</sup> 的研究结果一致。研究表明, 摇青次数对咖啡碱含量有较大影响, 摇青 4 次烘焙温度 100 ℃、烘焙时长 2 h 最有利于提高咖啡碱含量<sup>[35]</sup>。目前, 关于咖啡碱的研究集中于其在鲜叶中的合成代谢, 在加工过程的变化机理尚未见报道。

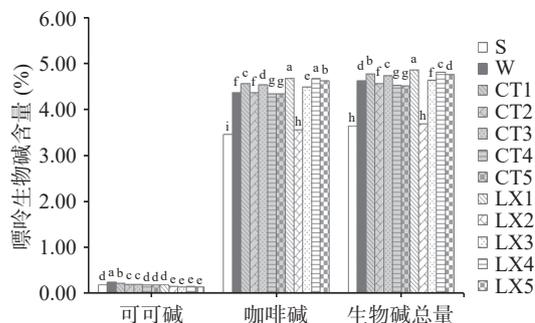


图 6 嘌呤生物碱组分及其含量  
Fig.6 Purine alkaloids components and content

2.2.6 不同做青方式和次数的乌龙茶香气主成分分析 乌龙茶的香气是区别于其他茶类的突出点, 在品质评定中的地位至关重要。乌龙茶中目前已检测鉴定的香气多达几百种, 本文主要以检测鉴定出的其中 40 种作为研究对象, 探讨做青方式和做青次数对

表 6 主分量贡献率及特征向量

Table 6 Principal component contribution rate and eigenvector

香气物质	主成分				
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
组分名称					
脱氢芳樟醇	-0.17	0.07	-0.19	-0.28	0.04
水杨酸甲酯	0.25	-0.07	0.14	0.00	-0.03
$\beta$ -芳樟醇	0.25	-0.10	0.06	-0.03	-0.09
香叶醇	0.17	-0.16	0.20	0.02	-0.06
2,6-二甲基-1,3,5,7-辛四烯	-0.25	0.03	-0.04	0.05	0.10
苯甲醛	0.24	-0.08	-0.03	-0.08	-0.04
4-萜烯醇	0.24	0.08	0.08	-0.07	-0.06
4-异丙烯基甲苯	-0.11	0.30	-0.01	-0.05	-0.07
柠檬烯	0.12	0.29	-0.09	0.10	0.02
$\beta$ -紫罗酮	-0.21	-0.11	0.20	-0.05	0.09
顺- $\beta$ -罗勒烯	0.06	0.31	-0.02	0.13	-0.02
橄榄醇	0.09	-0.05	-0.32	-0.03	0.14
$\tau$ -松油烯	0.23	0.02	0.06	-0.10	0.01
3,7-二甲基-2,6-二辛烯醛	0.15	-0.18	0.24	-0.03	0.16
$\beta$ -月桂烯	0.07	0.22	-0.23	0.08	0.18
脱氢紫罗烯	-0.12	0.24	0.17	-0.10	0.16
氧化芳樟醇 II (呋喃型)	-0.20	-0.06	0.02	-0.25	-0.04
反- $\beta$ -罗勒烯	0.00	0.14	0.30	0.22	0.01
$\alpha$ -萜品醇	0.19	-0.05	0.00	-0.33	-0.08
橙花叔醇	-0.14	-0.09	-0.03	0.34	-0.13
顺-茉莉酮	0.08	-0.21	0.11	0.16	0.21
吲哚	-0.22	0.03	-0.14	0.21	-0.05
香叶基丙酮	-0.10	-0.20	-0.05	-0.03	0.30
反-3,7-二甲基-2,6-丁二烯酸	-0.12	-0.15	0.27	0.01	-0.03
$\beta$ -水芹烯	0.24	0.12	-0.02	-0.05	0.06
1-乙基吡咯	0.10	0.31	-0.07	-0.01	0.00
3,5-辛二烯-2-酮	0.07	0.12	0.14	-0.06	-0.39
2-乙酰吡咯	-0.12	0.18	0.18	-0.05	0.02
茶香螺烷	-0.22	-0.07	0.08	-0.21	0.13
藏红花醛	-0.02	-0.06	-0.19	0.23	-0.40
顺-己酸-3-己烯酯	-0.18	-0.18	-0.04	-0.04	-0.04
顺-2,6-二甲基-2,5,7-三烯-4-酮	-0.01	0.19	0.11	0.18	0.41
二甲基戊酸甲酯	0.07	-0.18	-0.14	0.08	0.33
二甲硫	-0.04	-0.15	-0.24	0.11	-0.07
卡达烯	-0.07	-0.04	0.25	0.31	-0.11
$\alpha$ -紫罗酮	-0.15	-0.05	0.29	-0.03	-0.11
橙花醇	0.24	-0.05	0.04	0.00	0.15
5-甲基-2-糠醛	-0.12	0.25	0.09	-0.03	0.10
二氢- $\beta$ -紫罗酮	0.00	0.17	0.22	-0.15	0.05
香叶酸甲酯	0.13	0.02	0.07	0.38	0.13
贡献率	0.33	0.21	0.14	0.09	0.07
累积贡献率	0.33	0.54	0.68	0.77	0.84

乌龙茶香气品质的影响。通过对 40 种香气物质进行主成分分析,得到 5 个主成分,累积贡献率为 83.71%,每个主成分对香气的贡献依次递减(表 6)。第一主成分(Z1)中绝对值较高且为正值有  $\beta$ -芳樟醇、水杨酸甲酯、4-萜烯醇、苯甲醛、 $\beta$ -水芹烯和橙花醇,主要反映了萜类物质对香气成分的贡献;第二主成分(Z2)中绝对值较高且为正值有 1-乙基吡咯、4-异丙烯基甲苯、柠檬烯、5-甲基-2-糠醛,反映了杂环类物质对香气的贡献;第三主成分(Z3)中绝对值较大

且为正值有反- $\beta$ -罗勒烯、 $\alpha$ -紫罗酮、反-3,7-二甲基-2,6-丁二烯酸,反映了脂肪族类香气衍生物对香气成分的贡献;第四主成分(Z4)中绝对值较高且为正值成分包括香叶酸甲酯、橙花叔醇和卡达烯;第五主成分(Z5)中绝对值较高的有顺-2,6-二甲基-2,5,7-三烯-4-酮、二甲基戊酸甲酯和香叶基丙酮,反映了酮类物质对香气成分的贡献。

反式-橙花叔醇、吲哚等是乌龙茶香气不同于其他茶类的主要成分<sup>[36]</sup>,而构成岭头单丛花蜜香的主要

香气组分是橙花叔醇、芳樟醇及其氧化物、香叶醇、顺-茉莉酮、3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇、己醛、吲哚、(反)-2-己烯醛、(顺)-3-己烯基己酸酯等<sup>[37]</sup>。芳樟醇、香叶醇、橙花叔醇属于萜烯醇类,具有花香或果香,其中芳樟醇具有百合花或玉兰花香气,香叶醇具有玫瑰香气,橙花叔醇具有木香、花木香和水果百合香韵。

制乌龙茶过程中,随着摇青次数的增加,芳樟醇、吲哚类、己酸-顺-3-己烯酯、 $\beta$ -环柠檬醛、橙花叔醇、苯甲酸-3-己烯酯、法呢烯、植酮、植物醇等物质浓度大大增加<sup>[16]</sup>,随着做青强度的增加,己醛、正戊醇、芳樟醇氧化物 I 芳樟醇氧化物 II、香叶醇、 $\beta$ -紫罗酮、茉莉酮、橙花叔醇、吲哚等香气组分逐渐积累<sup>[38]</sup>。王尔茂等<sup>[39]</sup>研究发现,不同于手工做青,机械重做青会降低茶汤主体香气物质芳樟醇及其氧化物的含量,而增加特征呈香物质 3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-醇水杨酸甲酯、 $\alpha$ -紫罗酮降低,顺-己酸己烯酯、香叶醇和吲哚。而本文研究结果表明,摇青次数越多,2,6-二甲基-1,3,5,7-辛四烯、橙花叔醇、脱氢芳樟醇、2-乙酰吡咯橄榄醇、吲哚、顺-己酸-3-己烯酯、茶香螺烷含量越高;而水杨酸甲酯、 $\beta$ -芳樟醇、4-萜烯醇、 $\tau$ -松油烯、3,7-二甲基-2,6-二辛烯醛、 $\beta$ -水芹烯、 $\alpha$ -紫罗酮含量越低。

由表 7 可知,所有样品中五个主成分得分最高的分别为 CT1、LX4、LX3、CT2、LX1。从图 7 第

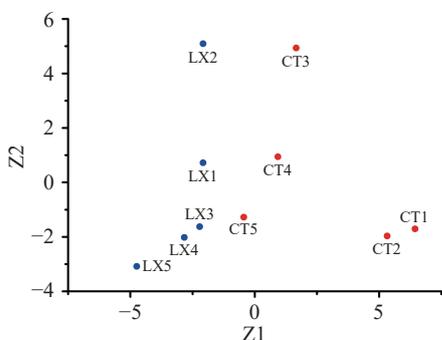


图 7 第一主成分得分对第二主成分得分散点图

Fig.7 First principal component score versus the second principal component's scatter point diagram

一、二主成分散点图观察可知,CT3、LX4 在第二主成分部分得分较高,LX5 在第一主成分和第二主成分得分皆最低,三者位置分布比较分散;剩下的样品可分为 2 部分,一部分包含 CT4、CT5 和 LX1、LX2、LX3,在两个主成分部分得分较均衡;一部分包含 CT1 和 CT2,在第一主成分得分最高。

### 2.3 不同做青方式和次数的乌龙茶相关酶基因表达量

利用荧光定量 PCR 检测了多酚氧化酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶相关 6 个基因在不同做青方式和做青次数青叶中的表达量情况。

由图 8 发现这 6 个基因在不同状态的青叶中均有较高表达量,不同做青方式下 6 个基因表达量呈现出不一样的变化趋势,6 个基因均在 LX4 有最高的表达量。

不同做青方式间,P1 基因的表达量变化趋势一致,随着做青次数的增加逐渐上升;P2 基因的表达量随着做青次数增加先上升,做青后期下降;P3 基因的表达量在做青过程中先升后降,整体的变化趋势为上升。

传统做青方式和连续慢速做青方式青叶的 G1 基因的表达量在第一次做青后皆呈下降趋势,随后发生小幅度波动,在第四次做青时达到峰值,做青结束时降低;G2 和 G3 基因表达量的变化与 G1 同步。

研究发现, $\beta$ -葡萄糖苷酶存在于细胞质基质、细胞壁以及液泡中,在乌龙茶做青过程中对香气物质形成有一定意义<sup>[4]</sup>。在完整细胞中,由于细胞壁、细胞膜等阻隔,反应底物无法与酶类充分接触发生生化反应<sup>[40]</sup>。LX4 样品中 6 个基因的表达量在所有处理中最高,其可能为在连续慢速做青过程中,叶片与滚筒持续缓慢发生摩擦,在 LX4 时最多细胞结构被破坏,细胞中原本被细胞膜、细胞壁阻隔的茶多酚等反应底物与酶类接触,从而使酶活性提高,相关的基因表达量也提高。

### 3 结论

本研究采用了两种不同的做青方式,其一是传统的乌龙茶做青方式,即摇青与晾青交替进行,并且在不同阶段摇青与晾青的时间长度与比例有差异;另

表 7 10 个样品在各主成分的得分值

Table 7 Score value of each principal component of 10 samples

样品	主成分				
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
CT1	6.44	-1.71	1.89	-2.25	-0.43
CT2	5.33	-1.97	0.16	2.64	1.06
CT3	1.66	4.94	1.61	1.15	-2.38
CT4	0.93	0.94	-5.54	-2.09	0.23
CT5	-0.44	-1.28	-1.61	-0.21	-0.64
LX3	-2.07	0.72	2.67	-1.90	1.83
LX4	-2.08	5.09	0.05	0.27	1.24
LX1	-2.21	-1.63	0.06	1.75	2.59
LX2	-2.83	-2.02	-1.13	2.06	-2.02
LX5	-4.74	-3.08	1.83	-1.42	-1.48

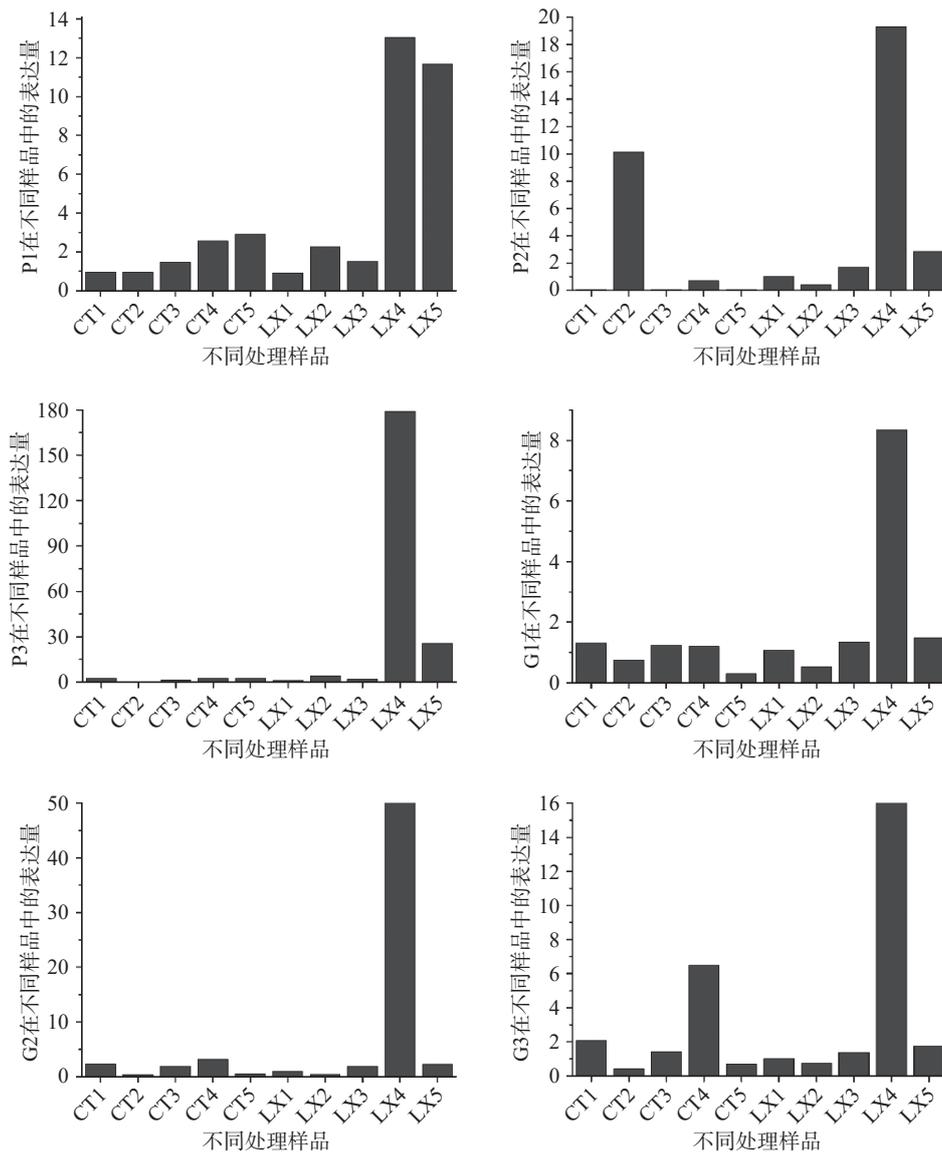


图 8 不同做青方式和做青次数 6 个基因的相对表达量

Fig.8 Relative expression levels of 6 genes in different ways and time

一种则是本研究的考察重点,连续做青,通过比较不同做青方式和做青次数乌龙茶物质成分与品质差,结果表明:传统做青和连续慢速做青在水浸出物、茶多酚、游离氨基酸、儿茶素和嘌呤生物碱方面表现出相似的总体变化趋势;但是,这些变化的程度不同。在做青过程中,连续慢速做青的香气化合物的变化范围小于传统做青。连续慢速做青乌龙茶的感官评价得分略高于传统做青。总体而言,连续慢速是一种适用于乌龙茶加工的新技术,具有良好的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 林凤雏. 凤凰单丛茶的品质形成[J]. *中国高新技术*, 2021(13): 126-128. [LIN F C. Quality formation of phoenix Dancong tea[J]. *China High-Tech*, 2021(13): 126-128.]
- [2] 赖幸菲, 黄亚辉, 赖榕辉, 等. 做青和烘焙对单丛茶品质及生化成分的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(2): 91-95. [LAI X F, HUANG Y H, LAI R H, et al. Effects of shaking and baking on quality and biochemical components of Dancong Oolong tea[J]. *Food Science*, 2014, 35(2): 91-95.]

- [3] 周子维, 游芳宁, 刘彬彬, 等. 摇青机械力对乌龙茶脂肪族类香气形成的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(13): 52-59. [ZHOU Z W, YOU F Ng, LIU B B, et al. Effect of mechanical force during turning-over on the formation of aliphatic aroma in Oolong tea[J]. *Food Science*, 2019, 40(13): 52-59.]
- [4] ZHOU Y, ZENG L, LIU X, et al. Formation of (E)-nerolidol in tea (*Camellia sinensis*) leaves exposed to multiple stresses during tea manufacturing[J]. *Food Chemistry*, 2017, 231: 78-86.
- [5] ZENG L T, ZHOU X C, SU X G, YANG Z Y. Chinese oolong tea: An aromatic beverage produced under multiple stresses[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 106: 242-253.
- [6] 叶林茶. 闽南乌龙茶采用“切细做青”工艺初探[J]. *福建茶叶*, 1981(1): 23-26. [YE L C. Preliminary study on the process of "Chopping Fine to Green-Making" in Oolong tea in Southern Fujian[J]. *Tea in Fujian*, 1981(1): 23-26.]
- [7] 郝志龙, 陈济斌, 金心怡, 等. 乌龙茶振捣做青设备研制与做青环境调控性能试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 269-277. [HAO Z L, CHEN J B, JIN X Y, et al. Development and performance test of fine manipulation environment control for Oolong tea

- vibrating fine manipulation equipment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 269-277. ]
- [ 8 ] 郝志龙, 林宏政, 金心怡, 等. 乌龙茶振动做青气流和摊叶厚度对青叶做青物理特性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(2): 147-153. [ HAO Z L, LIN H Z, JIN X Y, et al. Effects of airflow and spreading thickness of tealeaf on physical characteristics of Oolong tea during vibrating fine manipulation[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition), 2017, 46(2): 147-153. ]
- [ 9 ] 刘渊溱. 谈夏暑茶空调做青制茶技术[J]. 福建茶叶, 2001(4): 56. [ LIU Y D. Talking about the technology of tea Green-making with air-conditioning for summer tea[J]. Tea in Fujian, 2001(4): 56. ]
- [ 10 ] 陈孝照. 乌龙茶连续做青自动控制系统的的设计[J]. 福建农机, 2015(2): 33-36. [ CHE X Z. Design of automatic control system for continuous green-making of Oolong tea[J]. Fujian Agricultural Machinery, 2015(2): 33-36. ]
- [ 11 ] 邓慧莉, 李鑫磊, 毛贻帆, 等. 不同做青温度对乌龙茶滋味与香气品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(14): 5766-5771. [ DENG H L, LI X L, MAO Y F, LIU Z Z, NI Z X, ZHENG Y C, et al. Effect of different turning-over temperatures on the taste and aroma quality of Oolong tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(14): 5766-5771. ]
- [ 12 ] 孙云, 金心怡, 苏益平, 等. 乌龙茶不同温度冷做青工艺试验及机理探讨[J]. 福建农业大学学报, 2005(3): 309-312. [ SUN Y, JIN X Y, SU Y P, et al. Discussion of mechanism and experimentation of Oolong tea cold fine manipulation at different temperature [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition), 2005(3): 309-312. ]
- [ 13 ] 游小妹, 钟秋生, 陈常颂. ‘丹桂’乌龙茶不同做青环境主要生化成分的变化[J]. 中国农学通报, 2011, 27(11): 70-73. [ YOU X M, ZHONG Q S, CHEN C S. Effects of different environment of fine manipulation on the main biochemistry components of 'Dangui' Oolong tea[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(11): 70-73. ]
- [ 14 ] 王登良, 魏新林, 张灵枝. 做青温度对岭头单枞乌龙茶香气成分影响的研究[J]. 茶叶科学, 2002(1): 30-33. [ WANG D L, WEI X L, ZHANG L Zi. Effect of different Zuo-qing temperature on aromatic constituents in Lingtoudancong Oolong tea[J]. Journal of Tea Science, 2002(1): 30-33. ]
- [ 15 ] 魏新林, 王元凤, 王登良. 做青温湿度对岭头单枞乌龙茶香气成分的影响[J]. 无锡轻工大学学报, 2002(3): 224-229. [ WEI X L, WANG Y F, WANG D L. Effects of different green-making temperature & humidity on aromatic constituents in Lingtoudancong Oolong tea[J]. Journal of Wuxi Light Industry University, 2002(3): 224-229. ]
- [ 16 ] 陈力. 颗粒乌龙茶萎凋与摇青工艺的探讨[J]. 中国茶叶, 1993(3): 4-5. [ CHEN L. Discussion on withering and shaking of granular Oolong tea[J]. China Tea, 1993(3): 4-5. ]
- [ 17 ] 蒋丹, 杨清, 边金霖, 等. 四川乌龙茶做青程度对品质形成的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 66-71. [ JIANG D, YANG Q, BIAN J L, et al. Effects of tossing on quality formation of Sichuan Oolong tea[J]. Food Science, 2014, 35(11): 66-71. ]
- [ 18 ] 郑鹏程, 宁井铭, 赵常锐, 等. 不同摇青工艺对乌龙茶品质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36(1): 110-115. [ ZHENG P C, NING J M, Z HAO C R, et al. Effects of green tea leaf shaking technique on oolong tea quality[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2009, 36(1): 110-115. ]
- [ 19 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 23776-2018 茶叶感官审评方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [ General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 23776-2018 tea sensory evaluation method[S]. Beijing: China Standards Press, 2018. ]
- [ 20 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB 5009.3-2016 national food safety standard: Determination of moisture in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016. ]
- [ 21 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8305-2013 茶水浸出物测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. [ General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 8305-2013 Determination of water extract in tea[S]. Beijing: China Standards Press, 2013. ]
- [ 22 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8313-2018 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [ General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 8313-2018 Detection method of tea polyphenols and catechins in tea[S]. Beijing: China Standards Press, 2018. ]
- [ 23 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8314-2013 茶游离氨基酸总量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. [ General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 8314-2013 Determination of total free amino acids in tea[S]. Beijing: China Standards Press, 2013. ]
- [ 24 ] TENG J, YAN C, ZENG W, et al. Purification and characterization of theobromine synthase in a theobromine-enriched wild tea plant (*Camellia gymnogyne* Chang) from Dayao mountain, China [J]. Food Chemistry, 2020, 311(May1): 125875.1-125875.9.
- [ 25 ] 郭雅玲, 杜连胜, 林建民. 乌龙茶做青过程茶梢水势的变化[J]. 福建农业大学学报, 1994(2): 148-153. [ GUO Y L, DU L S, LIN J M. Changes of the water potential of Oolong tea shoots during fine manipulation[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University, 1994(2): 148-153. ]
- [ 26 ] 潘玉华. 乌龙茶做青叶水分变化初探[J]. 茶叶科学简报, 1989(1): 35-36. [ PAN Y H. A preliminary investigation of moisture changes in green-making leaves of oolong tea[J]. Acta Tea Sinica, 1989(1): 35-36. ]

- [27] 晏嫦好, 罗军武, 赵超艺, 等. 凤凰单丛主要品质成分比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2006(6): 628-631. [YAN C Y, LUO J W, ZHAO C Y, et al. A Comparison between the main quality components of Fenghuang Dancong[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences Edition), 2006(6): 628-631.]
- [28] 李元钦. 乌龙茶做青过程主要生化变化与成茶品质关系的研究 1. 水浸出物、茶多酚、茶黄素的变化与成茶品质关系[J]. 茶叶科学技术, 1990(2): 39-41. [LI Y Q. Study on the relationship between the main biochemical changes of and the quality of Oolong tea 1. The relationship between the changes of water extract, tea polyphenols and theaflavins and the quality of tea[J]. Acta Tea Sinica, 1990(2): 39-41.]
- [29] SANDERSON G W, RANADIVE A S, EISENBERG L S, et al. Contribution of polyphenolic compounds to the taste of tea[J]. ACS Symposium Series, 1976, 26: 14-46.
- [30] ZHANG Y N, YIN, J F, CHEN J X, et al. Improving the sweet aftertaste of green tea infusion with tannase. Food Chemistry, 2016, 192, 470-476.
- [31] 黄福平, 陈伟, 陈洪德, 等. 做青强度对乌龙茶做青叶生化成分含量的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002(2): 199-202. [HUANG F P, CHEN W, CHEN H D, et al. Effects of fine manipulation on biochemical constituent content in oolong tea[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition), 2002(2): 199-202.]
- [32] CHOO E, PICKET, B, DANDO R. Caffeine may reduce perceived sweet taste in humans, supporting evidence that adenosine receptors modulate taste[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(9), 2177-2182.
- [33] YIN J F, ZHANG Y N, DU Q Z, et al. Effect of  $Ca^{2+}$  concentration on the tastes from the main chemicals in green tea infusions[J]. Food Research International, 2014, 62: 941-946.
- [34] 陈泉宾, 孙威江, 谢少瑜, 等. 不同加工方法对武夷岩茶品质的影响[J]. 中国茶叶加工, 2007(1): 27-29. [CHEN Q B, SUN W J, XIE S Y, et al. The effect of different processing methods on the quality of Wuyi rock tea[J]. China Tea Processing, 2007(1): 27-29.]
- [35] 林馥茗, 何诗瑜. 不同摇青及烘焙工艺对单丛乌龙茶品质的影响[J]. 福建茶叶, 2021, 43(3): 21-24. [LIN F M, HE S Y. Effect of different shaking and roasting processes on the quality of Dancong oolong tea[J]. Tea in Fujian, 2021, 43(3): 21-24.]
- [36] 陈林, 陈键, 陈泉宾, 等. 不同工艺制法对茶叶风味品质化学轮廓的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(11): 2196-2203. [CHEN L, CHEN J, CHEN Q B, et al. Effects of different processing methods on chemical profiles of tea in relation to flavor quality[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(11): 2196-2203.]
- [37] 苗爱清, 江和源, 李家贤, 等. 做青对黄槎乌龙茶香气与醇系香气前体分布的影响[J]. 食品科学, 2008(4): 102-105. [MIAO A Q, JIANG H Y, LI J X, et al. Effects of fixation procedure on aroma compositions and alcoholic precursors distribution of Huangdan Oolong tea[J]. Food Science, 2008(4): 102-105.]
- [38] 黄福平, 陈荣冰, 梁月荣, 等. 乌龙茶做青过程中香气组成的动态变化及其与品质的关系[J]. 茶叶科学, 2003(1): 31-37. [HUANG F P, CHEN R B, LIANG Y Q, et al. Changes of aroma constituents during zuoqing procedure and its relation to oolong tea quality[J]. Journal of Tea Science, 2003(1): 31-37.]
- [39] 王尔茂, 阮志燕, 孙颖, 等. 轻重做青对凤凰单丛乌龙茶呈香物质的影响[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 23-26. [WANG E M, RUAN Z Y, SUN Y, et al. Effect of green-making technology on the aroma compounds of Fenghuangdancong Oolong tea[J]. Food & Machinery, 2009, 25(3): 23-26.]
- [40] MIZUTANI M. Cloning of beta-primeverosidase from tea leaves, a key enzyme in tea aroma formation[J]. Plant Physiology, 2002, 130(4): 2164-2176.