DOI:10.12441/spyswjs.20241108001 [文章编号] 1673-1689(2025)11-0132-11

做形与烘焙工艺对圆炒青绿茶抗氧化活性的影响

刘 均[1,2] 冯 巩[1,2] 谭 蓉[1,2] 黄伟红[3*]

(1. 中华全国供销合作总社杭州茶叶研究所,浙江 杭州 310016; 2. 浙江省茶资源跨界应用技术重点实验室,浙江 杭州 310016; 3. 浙江省农业技术推广中心,浙江 杭州 310020)

摘要:【目的】探究做形与烘焙工艺对圆炒青绿茶抗氧化活性的影响,为提升绿茶品质与优化加工技术提供理论支撑与实践参考。**【方法】**以圆炒青绿茶为对象,研究不同加工阶段及做形、烘焙等关键工序对其抗氧化活性的影响;采用斑马鱼模型(体内)以及DPPH自由基和$ABTS^+$自由基清除率、铁离子还原能力(体外)等多指标综合评价其抗氧化性能。**【结果】**做形与烘焙条件对绿茶抗氧化活性具有显著影响。在不同烘焙温度下,做形温度的作用表现各异,例如在烘焙温度75 ℃、烘焙时间20 min、烘焙2次的条件下,90 ℃做形处理的DPPH自由基清除率显著高于120 ℃和150 ℃做形处理;而在做形温度90 ℃、做形时间50 min的条件下,105 ℃烘焙处理的铁离子还原能力显著优于75 ℃烘焙处理。通过工艺优化,确定最佳组合为做形温度90 ℃、做形时间50 min、烘焙温度90 ℃、烘焙时间20 min、烘焙2次,该工艺下绿茶DPPH自由基清除率较工厂常规工艺提升了43.54%。**【结论】**优化做形与烘焙工艺可显著增强圆炒青绿茶的抗氧化活性,为绿茶精细化加工与品质提升提供了科学支撑。

关键词:绿茶;地域因素;做形温度;烘焙温度;抗氧化活性;加工过程

Effects of Shaping and Baking Processes on the Antioxidant Activity of Round Roasted Green Tea

LIU Jun[1,2] *FENG Gong*[1,2] *TAN Rong*[1,2] *HUANG Weihong*[3*]

(1. Hangzhou Tea Research Institute, CHINA COOP, Hangzhou 310016, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Transboundary Applied Technology for Tea Resources, Hangzhou 310016, China; 3. Zhejiang Provincial Agricultural Technology Extension Center, Hangzhou 310020, China)

Abstract: [**Objective**] This study investigated the effects of shaping and baking processes on the antioxidant activity of round roasted green tea, aiming to provide theoretical support and practical reference for improving the quality and optimizing the processing techniques of green tea. [**Method**] The influences of different processing stages and key procedures such as shaping and baking on the antioxidant activity of round roasted green tea were studied. A zebrafish model (*in vivo*) and multiple indexes including DPPH radical scavenging rate, $ABTS^+$ radical scavenging rate, and ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) were employed for comprehensive evaluation of the antioxidant activity. [**Result**] Shaping and baking conditions significantly affected the antioxidant activity of green tea. The effect of shaping temperature varied under different baking temperatures. For example, under baking at 75 ℃ for 20 min (twice), the DPPH radical scavenging rate of green tea shaped at 90 ℃ was significantly higher than that at 120 ℃ and 150 ℃. In the case of shaping at 90 ℃ for 50 min, the FRAP of green tea baked at 105 ℃ was significantly better than that baked at 75 ℃. Through process optimization, the best combination was determined as shaping at 90 ℃ for 50 min + baking at 90 ℃ for 20 min (twice), under which

基金项目:浙江省“三农九方”科技协作计划“揭榜挂帅”项目(2023SNJF022)。

通信作者:黄伟红(1970—),女,学士,高级农艺师,主要从事茶叶技术推广研究。E-mail:hnnytwh@163.com

收稿日期:2024-11-08 **修回日期:**2025-01-06

the DPPH radical scavenging rate increased by 43.54% compared with that of conventional factory processes. [**Conclusion**] Optimizing shaping and baking processes can significantly enhance the antioxidant activity of round roasted green tea. This study provides scientific support for the refined processing and quality improvement of green tea.

Keywords: green tea; geographical factor; shaping temperature; baking temperature; antioxidant activity; processing procedure

绿茶富含茶多酚、儿茶素等生物活性成分[1-3]，具有抗氧化、抗炎及潜在的抗癌等多重健康功效[4-6]，其生物活性不仅取决于茶叶品种与生长环境[7-8]，更与其加工过程的精细调控息息相关[9-11]。深入探究地域因素与加工过程对绿茶抗氧化活性的影响机制，对于提升绿茶品质、优化生产工艺、满足市场需求及推动绿茶产业的可持续发展具有深远的意义[12-13]。

当前，尽管国内外学者对绿茶的抗氧化特性进行了广泛研究，但多数研究仍局限于单一维度，未能全面考虑地域特色与加工技艺对绿茶抗氧化性能的综合影响。浙江作为中国绿茶的重要产区，其独特的地理环境、气候条件以及悠久的茶文化历史，共同孕育了丰富多样的绿茶品种与独特的地域风味。同时，绿茶从采摘到成品的加工过程中，萎凋、杀青、揉捻、干燥等每一道工序都微妙地影响着茶叶的化学成分、感官品质及健康潜力[9-11]。为填补这一研究空白，作者拟分析浙江不同茶区绿茶的抗氧化性能差异，并剖析加工链中关键环节对绿茶抗氧化活性的具体影响，以期揭示绿茶抗氧化性能与地域因素、加工工艺之间的内在联系，为提升绿茶整体品质、优化生产工艺、提高抗氧化效能提供坚实的理论支撑与实践指导。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

1.1.1　试验材料

市售一级绿茶（见表 1）：2024 年 3—6 月采自浙江各主产区正规茶叶企业；‘龙井 43’春茶鲜叶：一芽二三叶，绍兴御茶村茶叶有限公司。

1.1.2　化学试剂

5-氯-2-（2，4-二氯苯氧基）苯酚（三氯生）、2，7-二氯二氢荧光素二乙酸酯（DCFH-DA）、2，2-偶氮二（2-甲基丙基咪）二盐酸盐（AAPH）、谷胱甘肽（GSH）、磷酸盐缓冲溶液、2，4，6-三吡啶基三嗪（TPTZ）、氯化铁（$FeCl_3$）、1，1-二苯基-2-苦基肼自由基（DPPH，纯度≥97%）：上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

表 1　试验绿茶样品信息

Table 1　Information of green tea samples

茶区	产地	茶样名	样本编号
浙东茶区	绍兴新昌	‘大佛龙井’	A-1
	宁波宁海	‘望海茶’	A-2
	台州临海	‘临海蟠毫’	A-3
	台州临海	‘羊岩勾青’	A-4
	绍兴柯桥	‘平水日铸’	A-5
	舟山普陀	‘普陀山佛茶’	A-6
	台州天台山	‘葛玄绿茶’	A-7
浙南茶区	丽水景宁	‘金奖惠明’	B-1
	温州泰顺	‘三杯香’	B-2
	温州乐清	‘雁荡毛峰’	B-3
浙西北茶区	杭州余杭	‘径山茶’	C-1
	杭州淳安	‘千岛银针’	C-2
	湖州安吉	‘安吉白茶’	C-3
	杭州建德	‘建德苞茶’	C-4
	湖州长兴	‘顾渚紫笋’	C-5
浙中茶区	金华兰溪	‘兰溪毛峰’	D-1
	衢州开化	‘开化龙顶’	D-2
	金华武义	‘武阳春雨’	D-3

1.1.3　生物样本

斑马鱼 AB 系胚胎通过自然交配获得，在 14 h 光照/10 h 黑暗的光周期条件下，使用含 60 μg/mL 海盐的孵育液于 28.5 ℃环境下孵育，每 24 h 更换 1 次孵育液至 4 dpf，用于试验。

1.2　主要仪器与设备

酶标仪：Thermofisher Varioskan LUX 型，美国赛默飞世尔科技有限公司；电子天平：AL-204 型，梅特勒-托利多国际贸易（上海）有限公司；体视荧光显微镜：SMZ25 型，尼康仪器（上海）有限公司；离心机：3K1S 型，德国 Sigma 公司；高速分散机：

IKA T10型，艾卡（广州）仪器设备有限公司；揉捻机：6CR-55型，浙江春江茶叶机械有限公司；解块机：6CJ-40型，浙江春江茶叶机械有限公司；提香机：6CH-3型，浙江上洋机械股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 浙江主要茶区绿茶抗氧化活性差异分析

为系统比较浙江不同产区绿茶的抗氧化活性差异，取不同产地的绿茶样品（表1），经茶汤制备后，通过测定其ABTS$^+$自由基清除率、DPPH自由基清除率和铁离子还原能力（FRAP法）评价抗氧化活性。

茶汤储备液制备：称取2.0 g茶样，按料液比1 g∶50 mL加入80 ℃预热的纯净水，于80 ℃恒温水浴中浸提30 min，立即过滤；茶渣重复浸提一次，合并两次滤液，冷却至室温后定容至200 mL，于−20 ℃冷冻保存备用。用于抗氧化性能评估前，将茶汤解冻并根据试验需要用纯净水稀释。

1.3.2 加工过程对绿茶抗氧化活性的影响

采用斑马鱼模型评价加工过程中绿茶抗氧化活性的变化。根据圆炒青绿茶加工关键节点，选择鲜叶样（TEA 1）、萎凋叶样（TEA 2）、一次杀青样（TEA 3）、揉捻样（TEA 4）、二次杀青样（TEA 5）、一次曲毫样（TEA 6）、二次曲毫样（TEA 7）进行试验。按1.3.1的方法制备10 mg/mL（以干茶计）的茶汤储备液，用于斑马鱼体内抗氧化水平评估。

绿茶抗氧化活性评价参照文献[14]的方法并改进，具体为：将发育正常的4 dpf野生型AB系斑马鱼随机分为空白对照组（NC）、模型对照组（MC）、鲜叶样处理组（T-25 TEA 1）、萎凋叶样处理组（T-25 TEA 2）、一次杀青样处理组（T-25 TEA 3）、揉捻样处理组（T-25 TEA 4）、二次杀青样处理组（T-25 TEA 5）、一次曲毫样处理组（T-25 TEA 6）、二次曲毫样处理组（T-25 TEA 7）和阳性对照组（T-2.5 GSH），每组设3个重复，每个重复30条鱼。其中，空白对照组（NC）全程采用60 μg/mL海盐溶液孵育；模型对照组（MC）在处理阶段采用60 μg/mL海盐溶液孵育；处理组及阳性对照组（T-2.5 GSH）分别置于50 mL相应加工阶段的25 μg/mL（以干茶计）茶汤稀释液或2.5 μg/mL的谷胱甘肽（GSH）溶液+60 μg/mL海盐中，统一孵育48 h（隔24 h换液一次）。48 h孵育结束后，除空白组外，所有组均更换成400 μg/mL AAPH+60 μg/mL海盐溶液继续孵育5 h，结束后取样检测ROS荧光强度。

1.3.3 做形及烘焙条件对绿茶抗氧化活性的影响

以圆炒青绿茶加工工艺“鲜叶摊青→杀青→摊晾回潮→揉捻→解块→初烘→回潮→做形→烘焙提香”为参照，重点研究做形和烘焙工序的影响。具体方法：鲜叶采摘后摊青至水分质量分数为75%左右，于180 ℃杀青至叶水分质量分数为60%左右；摊晾回潮30~60 min；揉捻15~20 min；解块；于110 ℃热风下初烘8 min；回潮至水分质量分数为50%左右；按表2中工艺参数进行做形和烘焙加工，结束后取茶样冷冻保存，按1.3.1的方法制备10 mg/mL（以干茶计）的茶汤储备液，通过测定茶汤储备液的ABTS$^+$自由基清除率、DPPH自由基清除率和铁离子还原能力评价其抗氧化活性。

表2 做形与烘焙工艺试验设计

Table 2 Experimental design of shaping and baking processes

试验序号	参数设计	组别
1	做形温度90 ℃，做形时间50 min；烘焙温度75 ℃，烘焙时间20 min，烘焙2次	T-1
2	做形温度90 ℃，做形时间50 min；烘焙温度90 ℃，烘焙时间20 min，烘焙2次	T-2
3	做形温度90 ℃，做形时间50 min；烘焙温度105 ℃，烘焙时间20 min，烘焙2次	T-3
4	做形温度120 ℃，做形时间50 min；烘焙温度75 ℃，烘焙时间20 min，烘焙2次	T-4
5	做形温度120 ℃，做形时间50 min；烘焙温度90 ℃，烘焙时间20 min，烘焙2次	T-5
6	做形温度120 ℃，做形时间50 min；烘焙温度105 ℃，烘焙时间20 min，烘焙2次	T-6
7	做形温度150 ℃，做形时间50 min；烘焙温度75 ℃，烘焙时间20 min，烘焙2次	T-7
8	做形温度150 ℃，做形时间50 min；烘焙温度90 ℃，烘焙时间20 min，烘焙2次	T-8
9	做形温度150 ℃，做形时间50 min；烘焙温度105 ℃，烘焙时间20 min，烘焙2次	T-9
10	对照组（工厂常规工艺）	T-10

1.3.4　测定项目及方法

1）ABTS$^+$自由基清除率：参照文献[14]。

2）DPPH自由基清除率：参照文献[14]。

3）铁离子还原能力：参照文献[14]。

4）总抗氧化能力：为综合评价各茶样的抗氧化活性，各组茶样铁离子还原能力、DPPH自由基清除能力及ABTS$^+$自由基清除能力经归一化处理后按等加权系数相加求得总抗氧化能力。

5）茶多酚质量分数测定：按GB/T 8313—2018进行测定。

6）体内抗氧化活性评估：参照文献[14]的方法并略改进，斑马鱼诱导结束后，将孵育液更换成10 mL的2 μg/mL DCFH-DA溶液，于28.5 ℃下避光孵育1 h，结束后洗净，按每条斑马鱼添加200 μL的比例添加磷酸盐缓冲液，使用高速分散机匀浆30 s使鱼组织充分裂解，4 ℃、10 000 r/min离心10 min，取200 μL上清液，置于酶标仪中检测ROS荧光强度（激发波长488 nm，发射波长525 nm，带宽12 nm）。通过ROS荧光强度来评估体内抗氧化活性。

1.4　统计分析

试验结果均以算术平均数±标准偏差的形式表示，借助GraphPad Prism 8.0软件制图，运用SPSS Statistics 17.0软件进行“Duncan”多重比较。

2　结果与讨论

2.1　浙江主要茶区绿茶抗氧化活性比较

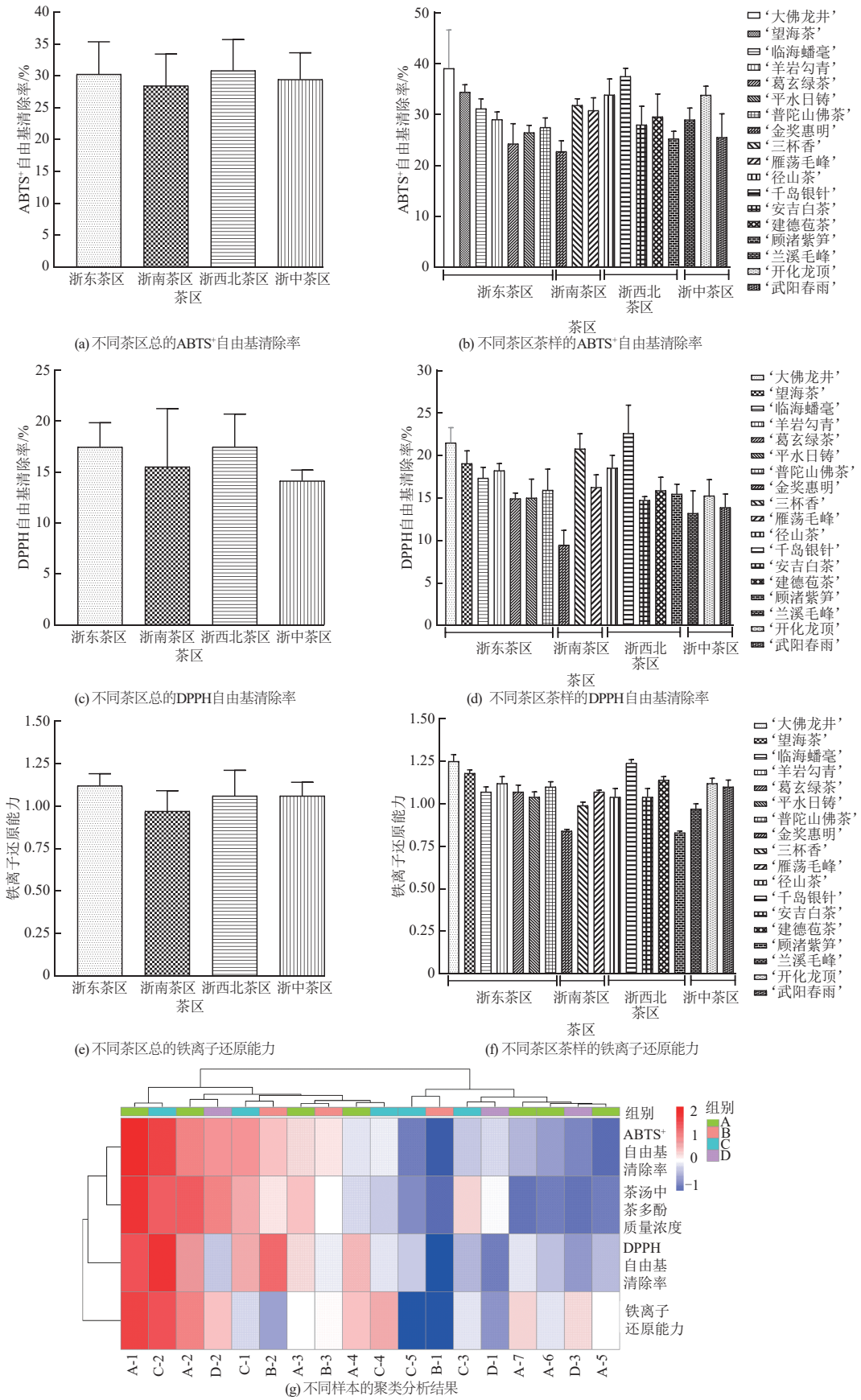
从图1可以看出，浙江四大茶区（浙东、浙南、浙西北、浙中）茶样的抗氧化活性显示出明显的地域性差异。在ABTS$^+$自由基清除率方面，浙西北与浙东茶区表现较优，浙南茶区相对较弱；DPPH自由基清除率亦有相似规律，浙西北与浙东领先，浙南与浙中略低；铁离子还原能力则以浙东茶区最强，浙西北与浙中居中，浙南最弱。然而，同一茶区内不同茶样间的抗氧化性能也存在明显差异，表明除地域因素外，加工工艺、品种特性等因素亦可能对茶叶抗氧化能力产生重要影响。

结合表3和表4分析发现，茶叶干样中茶多酚质量分数与抗氧化能力间相关性较弱，但茶汤中茶多酚质量浓度与ABTS$^+$自由基清除率、DPPH自由基清除率和铁离子还原能力均呈极显著正相关，尤其是与ABTS$^+$自由基清除率表现出较强的线性关系。本研究因样本覆盖范围及追溯信息（如品种、生长环境、采摘时间、加工工艺与等级、贮藏条件等）有限，未能深入探讨各因素对抗氧化活性的具体影响机制。然而，所选茶样均为浙江省内具有较高知名度的优质绿茶，其结果仍具有一定的代表性。研究发现，浙江四大茶区绿茶在抗氧化性能上存在明显地域差异，浙西北和浙东茶区表现尤为突出，其优越的抗氧化活性可能与当地特有的土壤特性、气候条件及海拔高度等自然因素密切相关[7-8,12]。此外，同一茶区内的样本差异也提示加工工艺、品种选育及生产管理等人为因素对茶叶品质形成具有重要调控作用。因此，后续的研究将重点探讨加工工艺对绿茶抗氧化活性的影响机制，以期为茶叶品质提升提供理论依据。

2.2　加工过程对圆炒青绿茶抗氧化活性的影响

从图2可以看出，与空白对照组相比，模型对照组斑马鱼体内ROS水平显著升高（P<0.05），而阳性对照组（2.5 μg/mL GSH）斑马鱼体内ROS水平较模型对照组的显著降低（P<0.05），表明该模型适用于茶叶抗氧化能力的评价。与模型对照组相比，各加工阶段的茶样均表现出显著的抗氧化能力（P<0.05），其活性强弱顺序依次为：一次曲毫样（TEA-6）>二次杀青样（TEA-5）>萎凋样（TEA-2）、一次杀青样（TEA-3）、二次曲毫样（TEA-7）>揉捻样（TEA-4）>鲜叶样（TEA-1）。这一排序反映出加工工艺对茶叶抗氧化能力的阶段性影响，其中做形（曲毫）和杀青等处理对提升茶叶抗氧化活性的作用尤为显著。

研究表明，绿茶加工中的做形、杀青、萎凋和烘焙等关键工序通过调控多酚、黄酮等生物活性成分的组成与转化，显著影响其抗氧化特性[13,15-16]。具体而言，适度萎凋虽可能导致部分儿茶素与酚酸降解，但也可以促进黄酮类等抗氧化成分的积累[13]。杀青过程通过高温钝化酶活性，有效抑制了多酚类物质的酶促转化，有利于保留抗氧化成分[15-16]。做形工序则通过机械与温度的协同作用，进一步调整茶叶内含成分的形态与溶出特性，从而影响最终产品的生物活性。与之相比，铁观音乌龙茶在烘焙过程中，尽管部分单体儿茶素因热降解而减少，导致抗



(a) 不同茶区总的ABTS⁺自由基清除率

(b) 不同茶区茶样的ABTS⁺自由基清除率

(c) 不同茶区总的DPPH自由基清除率

(d) 不同茶区茶样的DPPH自由基清除率

(e) 不同茶区总的铁离子还原能力

(f) 不同茶区茶样的铁离子还原能力

(g) 不同样本的聚类分析结果

图 1　不同茶区圆炒青绿茶的体外抗氧化活性比较

Fig. 1　Comparison of *in vitro* antioxidant activities of round roasted green tea from different regions

表 3　试验绿茶样本茶多酚水平

Table 3　Levels of polyphenols in green tea samples

样本编号	茶叶中茶多酚质量分数/%	茶汤中茶多酚质量浓度/（μg/mL）
A-1	18.71±0.14	1 520.15±35.72
A-2	17.56±0.27	1 445.15±15.51
A-3	13.10±0.19	1 279.08±23.81
A-4	13.62±0.52	1 158.67±4.33
A-5	21.12±0.47	1 019.39±0.82
A-6	16.60±0.08	996.17±33.55
A-7	16.41±0.14	1 017.60±17.68
B-1	17.01±0.11	977.04±2.89
B-2	13.28±0.49	1 230.36±62.41
B-3	17.61±0.26	1 199.23±23.45
C-1	17.43±0.27	1 321.68±21.29
C-2	18.72±0.12	1 441.58±9.02
C-3	16.70±0.09	1 243.88±4.33
C-4	17.60±0.07	1 136.22±6.49
C-5	17.66±0.17	1 030.61±15.87
D-1	16.73±0.14	1 183.93±0.36
D-2	16.86±0.15	1 371.94±9.38
D-3	16.99±0.15	997.70±10.46

氧化与抗菌能力有所下降，但美拉德反应产物及茶褐素的形成又赋予了茶叶独特的色泽和风味特征[17]。因此，在绿茶加工过程中需统筹不同工序的调控目标：低温萎凋有助于增强生物活性，而烘焙则需在提升风味与保留抗氧化成分之间寻求平衡，避免因过度热处理导致活性成分损失[18-19]。本研究结果进一步证实，做形作为圆炒青绿茶加工中的核心工序，其工艺参数对产品抗氧化活性具有重要影响，这为后续优化工艺提供了试验依据。

2.3　做形及烘焙温度对圆炒青绿茶抗氧化活性的影响

2.3.1　做形温度的影响

如图3所示，做形温度对绿茶抗氧化活性的影响因后续烘焙条件的不同而存在差异。在烘焙温度75 ℃、烘焙时间20 min、烘焙2次的条件下，不同温度做形的样本在抗氧化指标上表现不同：150 ℃做形的ABTS$^+$自由基清除率显著高于90 ℃和120 ℃（P<0.05）；90 ℃做形的DPPH自由基清除率显著高于120 ℃和150 ℃做形（P<0.05）；不同做形温度处理的铁离子还原能力无显著差异（P>0.05）。

在烘焙温度90 ℃、烘焙时间20 min、烘焙2次的条件下，做形温度对3种抗氧化指标的影响存在差异。具体而言：铁离子还原能力表现为：90 ℃做形组>150 ℃做形组>120 ℃做形组；DPPH自由基清除率表现为：90 ℃做形组>120 ℃做形组>150 ℃做形组；ABTS$^+$自由基清除率表现为：90 ℃做形组与150 ℃做形组无显著差异（P>0.05），但二者显著高于120 ℃做形组（P<0.05）。

在烘焙温度105 ℃、烘焙时间20 min、烘焙2次的条件下，不同温度做形样本的铁离子还原能力、DPPH自由基清除率及ABTS$^+$自由基清除率均未表现出显著性差异（P>0.05）。

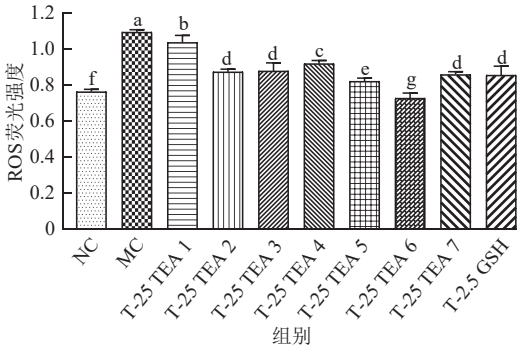
结合不同烘焙温度下的结果，做形温度对茶叶抗氧化性能的影响因烘焙条件而异。在较低烘焙温度（75 ℃）下，90 ℃做形有利于提升DPPH自由基清除能力，而150 ℃做形则增强了ABTS$^+$自由基清除能力；在适中烘焙温度（90 ℃）下，90 ℃做形能显著提高铁离子还原能力并保持较高的自由基清除能力；而当烘焙温度较高

表4　基于不同地域样本的茶多酚与抗氧化活性相关性分析

Table 4　Correlation analysis of tea polyphenols with antioxidant activity of the samples from different regions

指标	茶叶中茶多酚质量分数	茶汤中茶多酚质量浓度	ABTS$^+$自由基清除率	DPPH自由基清除率	铁离子还原能力
茶叶中茶多酚质量分数	1.000 0				
茶汤中茶多酚质量浓度	0.021 0	1.000 0			
ABTS$^+$自由基清除率	0.078 0	0.949 0^{**b}	1.000 0		
DPPH自由基清除率	−0.077 0	0.728 0**	0.829 0^{**a}	1.000 0	
铁离子还原能力	0.154 0	0.634 0**	0.713 0**	0.660 0**	1.000 0

注：“**”表示在0.01水平（双尾），相关性极显著；“a”表示符合线性强相关；“b”表示符合线性极强相关。



不同字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 2　不同加工阶段绿茶的体内抗氧化活性

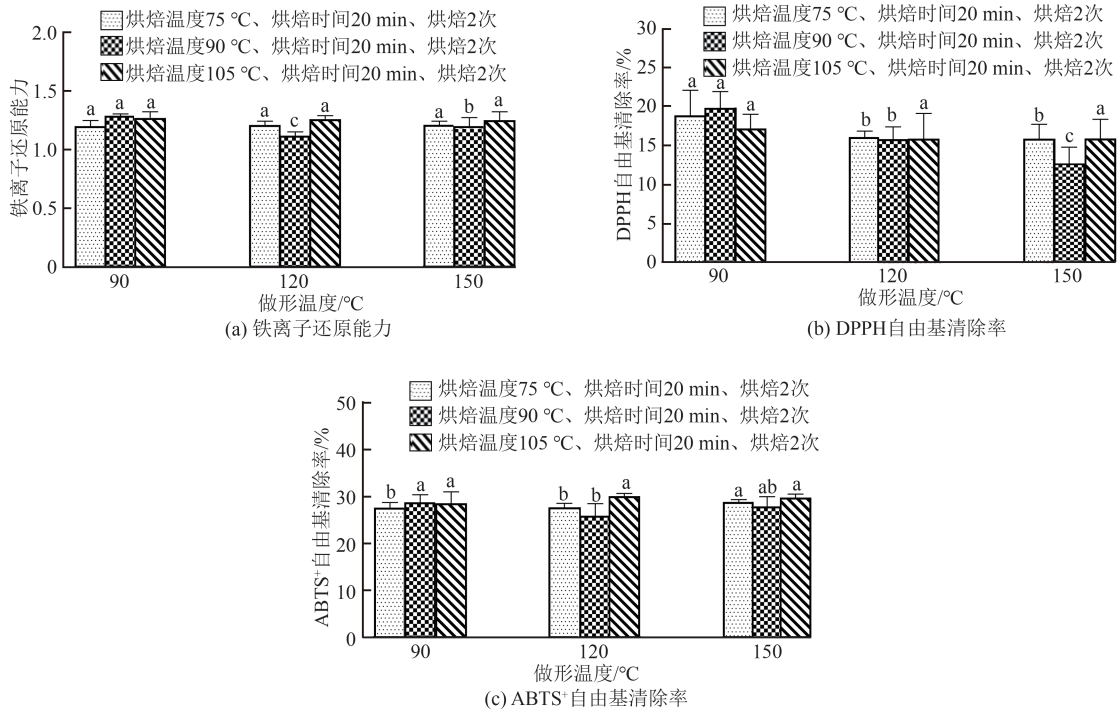
Fig. 2　*In vivo* antioxidant activity of green tea at different processing stages

（105 ℃）时，做形温度的影响减弱，各抗氧化指标无显著差异。这表明做形温度与烘焙温度之间存在交互作用，需协同调控以优化抗氧化活性。

2.3.2　烘焙温度的影响

如图4所示，烘焙温度对绿茶抗氧化活性的影响受前期做形温度的调控，结果因做形温度的不同而异。在做形温度90 ℃、做形时间50 min的条件下，铁离子还原能力表现为：105 ℃烘焙组>90 ℃烘焙组>75 ℃烘焙组，其中105 ℃烘焙组显著强于75 ℃烘焙组（P<0.05）；DPPH自由基清除率表现为：90 ℃烘焙组与75℃烘焙组无显著差异（P>0.05），但二者显著高于105 ℃烘焙组（P<0.05）；不同温度烘焙处理间的ABTS$^+$自由基清除率无显著差异（P>0.05）。

在做形温度120 ℃、做形时间50 min的条件下，各组样品的铁离子还原能力差异显著（P<0.05），其中90 ℃烘焙组最低；ABTS$^+$自由基清除率表现为：105 ℃烘焙组显著高于75 ℃和90 ℃烘焙组（P<0.05）；不同温度烘焙处理的DPPH自由基清除率无显著差异（P>0.05）。

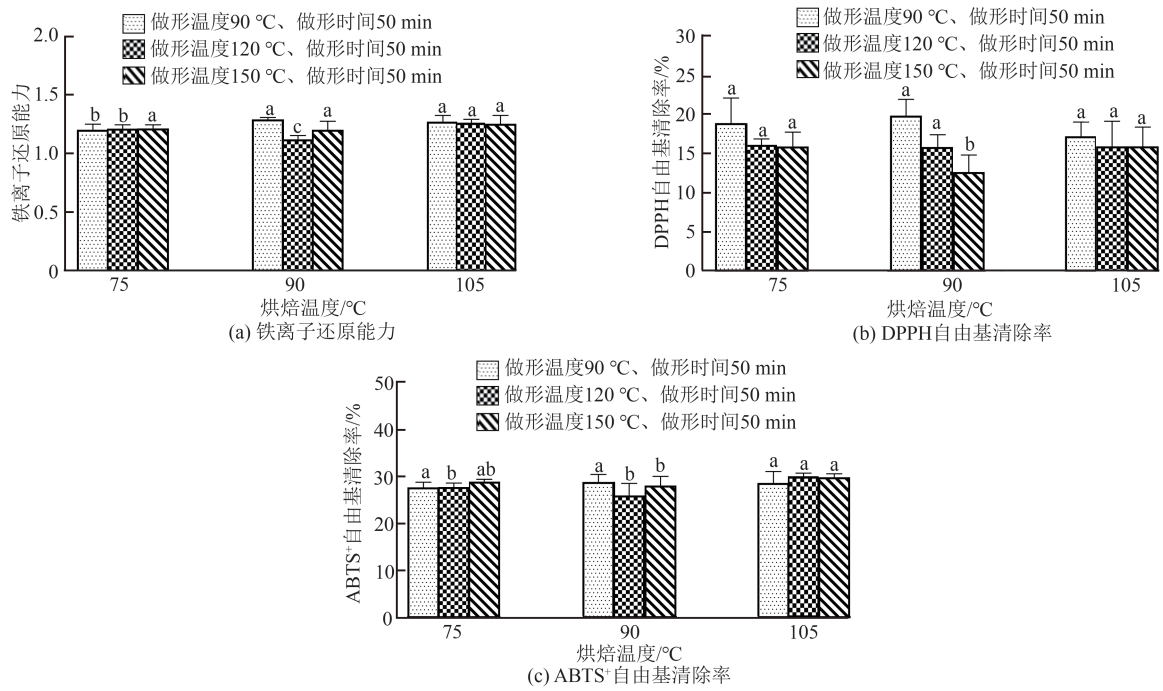


不同字母表示同一烘焙条件下不同做形温度之间差异显著（P<0.05）。

图 3　做形温度对绿茶抗氧化活性的影响

Fig. 3　Effect of shaping temperature on the antioxidant activity of green tea

在做形温度150 ℃、做形时间50 min的条件下，铁离子还原能力表现为：105 ℃烘焙组>75 ℃和90 ℃烘焙组，但3组间无显著差异（P>0.05）；DPPH自由基清除率表现为：105 ℃烘焙组和75 ℃烘焙组无显著差异（P>0.05），但二者显著高于90 ℃烘焙组（P<0.05）；ABTS$^+$自由基清除率表现为：105 ℃烘焙组>75 ℃烘焙组>90 ℃烘焙组，其中105 ℃烘焙组显著高于90 ℃烘焙组（P<0.05）。



不同字母表示组间差异显著（P<0.05）。

图 4　烘焙温度对绿茶抗氧化活性的影响

Fig. 4　Effect of baking temperature on the antioxidant activity of green tea

综合来看，烘焙温度对绿茶抗氧化活性的影响受做形温度的制约。低做形温度（90 ℃）时，采用 90 ℃烘焙可获得最佳 DPPH 自由基清除能力；高做形温度（≥120 ℃）时，采用 105 ℃烘焙更有利于增强铁离子还原能力与 $ABTS^+$ 自由基清除能力。这一结果提示，提升圆炒青绿茶抗氧化性能需根据做形温度灵活调整烘焙温度，以实现工艺参数的精准匹配。

2.3.3　做形及烘焙方式组合优化

由图 3~4 及表 2 可知，位居前 50% 的样本：铁离子还原能力依次为 T-2、T-3、T-6、T-9、T-10，DPPH 自由基清除率依次为 T-2、T-1、T-3、T-4、T-9，$ABTS^+$ 自由基清除率依次为 T-6、T-9、T-7、T-2、T-3。结果表明，仅采用单一指标难以准确衡量其抗氧化活性的强弱。为提升数据的直观表现力，对各种组合的抗氧化效能进行综合评价（图 5），位居前 50% 的样本涵盖 T-2、T-1、T-3、T-6、T-9。以 T-10（工厂常规工艺）为参照，最优工艺 T-2（做形温度 90 ℃，做形时间 50 min；烘焙温度 90 ℃，烘焙时间 20 min，烘焙 2 次）的 DPPH 自由基清除率提升了 43.54%；相较于试验设计组中的最差表现组（T-8），T-2 的 DPPH 自由基清除率增加了 57.18%。

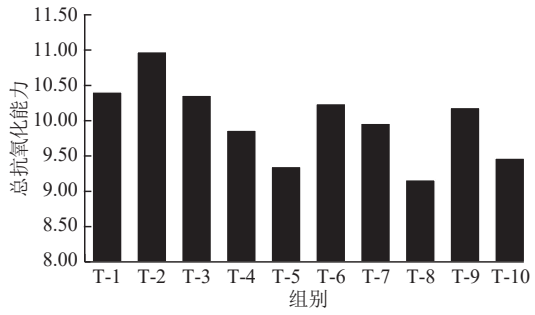


图 5　不同做形与烘焙工艺组合下绿茶的总抗氧化能力

Fig. 5　Total antioxidant capacity of green tea under different combinations of shaping and roasting processes

不同工艺绿茶中的茶多酚水平见表 5。相关性分析表明，茶汤中茶多酚质量浓度与 $ABTS^+$ 自由基清除率和铁离子还原能力显著相关（表 6），进一步证实了茶多酚溶出量与抗氧化活性的紧密联系。

在圆炒青绿茶制作中，做形与烘焙的温度调控对茶叶品质与抗氧化性能有重要影响。作者通过解析不同做形温度与烘焙方式的组合效应，明确了优化加工工艺对提升绿茶抗氧化活性的关键作用。这与文献[20-23]中关于温度对生物

表 5 做形及烘焙工艺对绿茶茶多酚的影响

Table 5 Effects of shaping and baking processes on polyphenols in green tea

组别	茶叶中茶多酚质量分数/%	茶汤中茶多酚质量浓度/（μg/mL）
T-1	14.66±0.26	1 277.30±15.51
T-2	14.63±0.30	1 315.05±45.82
T-3	14.08±0.21	1 367.35±84.42
T-4	13.50±0.27	1 261.22±23.09
T-5	13.74±0.28	1 205.10±111.12
T-6	14.17±0.24	1 394.13±29.22
T-7	15.36±0.28	1 349.49±85.86
T-8	16.94±0.19	1 350.00±14.43
T-9	17.35±0.36	1 402.55±23.81
T-10	17.47±0.50	1 306.63±14.43

活性影响的普遍认知相呼应，同时揭示了特定条件下的新规律：在适度做形温度（如 90 ℃）结合中低温烘焙（如 75~90 ℃）的条件下，茶叶抗氧化活性显著提升，而高温烘焙（如 105 ℃）则削弱了这一效应。王丽等[20-23]指出焙火程度增加（即提高烘焙温度或者延长烘焙时间）会导致茶叶抗氧化能力下降，这与本研究中做形温度对抗氧化活性影响的总体趋势一致。宋来辉等[24]与忻晓庭等[25]也强调了高温或过度干燥对抗氧化活性的不利影响，而关东等[26]与丁胜华等[27]的研究则表明，某些作物（如灰枣和橙皮）经适宜高温处理可增强抗氧化活性。因此，需针对具体物料特性和加工阶段，精细化调控温度参数，不可一概而论。

表 6 基于不同工艺样本的茶多酚与抗氧化活性相关性分析

Table 6 Correlation analysis of tea polyphenols with antioxidant activity of samples processed with different techniques

指标	茶叶中茶多酚质量分数	茶汤中茶多酚质量浓度	$ABTS^+$自由基清除率	DPPH 自由基清除率	铁离子还原能力
茶叶中茶多酚质量分数	1.000 0				
茶汤中茶多酚质量浓度	0.433 0	1.000 0			
$ABTS^+$自由基清除率	0.217 0	0.919 0^{**a}	1.000 0		
DPPH 自由基清除率	−0.550 0	−0.141 0	0.119 0	1.000 0	
铁离子还原能力	0.186 0	0.708 0*	0.773 0**	0.308 0	1.000 0

注：“**”表示在 0.01 水平（双尾），相关性极显著；“*”表示在 0.05 水平（双尾），相关性显著；“a”表示符合线性极强相关。

作者还揭示了茶多酚与抗氧化性能之间复杂的关系。茶叶中茶多酚质量分数与其整体抗氧化能力之间未呈现简单线性关系，而茶汤浸出液中茶多酚的质量浓度与 $ABTS^+$自由基清除率之间展现出了显著的线性正相关。然而，在 DPPH 自由基清除率和铁离子还原能力等指标评估上，这一相关性并未得到同等程度的验证，说明茶多酚的抗氧化效应具有明显的指标依赖性、多维性和复杂性。绿茶种类及其加工工艺显著影响茶多酚的组成与含量，该观点得到 Chen 等[18]和 Colon 等[19]的研究的支持。Chen 等[18]通过毛细管电泳技术进一步揭示，嫩叶中咖啡因、表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCg）与表儿茶素没食子酸酯（ECg）含量较高，而老叶茶氨酸、表没食子儿茶素（EGC）及表儿茶素（EC）更为丰富。Colon 等[19]评估了儿茶素与黄烷醇的抗氧化效能，发现没食子儿茶素没食子酸酯（GCG）与 EGCG 活性最高，且二者间存在显著的协同增效作用。这些发现从机制层面深化了对多酚物质构效关系的理解，也为解析加工过程中活性成分的动态变化提供了理论依据。

3 结论

作者系统探讨了做形与烘焙工艺对圆炒青绿茶抗氧化活性的显著影响。主要结论如下：1）浙江主要茶区绿茶抗氧化性能存在明显地域差异，而且同一茶区内茶样活性差异亦明显，表明加工工艺可能是影响其抗氧化能力的关键因素之一。2）做形与烘焙的温度组合对抗氧化活性具有重要调控作用。通过工艺优化，确定在 90 ℃下做形 50 min 并结合 90 ℃烘焙 2 次（每次 20 min）的条件下，绿茶 DPPH 自由基清除率显著提升，较工厂常规工艺提高了 43.54%，表明该工艺组合在提升抗氧化活性方面具有潜力。3）该研究结果与其他研究者[14-17]提出的低温利于保持抗氧化性的结论基本一致，但在 105 ℃烘焙条件下，做形温度的影响减弱，其背后机制尚不明确，仍需进一步研究。

4）该研究样本来源及类型尚未覆盖浙江全部茶区与品种，后续需扩大样本量，并结合茶多酚组成、黄酮含量以及其协同效应开展机制研究，为绿茶加工工艺的精准优化与品质提升提供更全面的理论依据。

参考文献

[1] 周红霞，于哲，刘飞，等. 茶叶或茶多酚基狗咬胶对犬口腔护理效果的影响[J]. 食品与生物技术学报，2024，43（8）：77-83，139.
ZHOU H X，YU Z，LIU F，et al. Effects of tea and tea polyphenols added chewing gum on oral health of dogs[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43（8）：77-83，139.（in Chinese）

[2] 乔小燕，陈栋，刘仲华. 茶叶儿茶素的癌症化学预防增效机制研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2021，40（2）：1-9.
QIAO X Y，CHEN D，LIU Z H. Advances in synergistic mechanism of tea catechins on cancer chemoprevention[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2021，40（2）：1-9.（in Chinese）

[3] 李丹，曹永，王华，等. 茶叶提取物体外抗氧化活性与其功能性成分含量的相关性研究[J]. 食品与机械，2018，34（6）：163-168
LI D，CAO Y，WANG H，et al. Study on the relationship between the composition of tea extracts and its *in vitro* antioxident activity[J]. Food & Machinery，2018，34（6）：163-168.（in Chinese）

[4] LIU J，LV Y J，PAN J X，et al. Effects of tea polyphenols and EGCG on glucose metabolism and intestinal flora in diabetic mice fed a cornstarch-based functional diet[J]. Food Science and Technology，2022，42：e50821.

[5] ZHANG H H，LIU J，LV Y J，et al. Changes in intestinal microbiota of type 2 diabetes in mice in response to dietary supplementation with instant tea or matcha[J]. Canadian Journal of Diabetes，2020，44（1）：44-52.

[6] LIU J，LI Q，TAN R. An exploratory to analysis the effects of the different roles of mathca on lipid metabolism and intestinal flora regulation between normal and diabetic mice fed a high-fat diet [J]. Food Science and Technology，2022，42：e25022.

[7] 陈薛，左欣欣，徐安安，等. 不同茶树品种鲜叶多糖的理化性质和抗氧化活性比较研究[J]. 茶叶科学，2022，42（6）：806-818.
CHEN X，ZUO X X，XU A A，et al. Comparative study on the physicochemical characteristics and antioxidant activities of polysaccharides in different tea cultivars[J]. Journal of Tea Science，2022，42（6）：806-818.（in Chinese）

[8] 黄媛，于娟，任玲，等. 不同品种白茶品质及抗氧化活性研究[J]. 食品科技，2023，48（7）：64-70.
HUANG Y，YU J，REN L，et al. Study on the quality and antioxidant activity of different varieties of white tea[J]. Food Science and Technology，2023，48（7）：64-70.（in Chinese）

[9] 曾愉，陈维，马成英，等. 干热后处理前后花香型乌龙茶的品质比较[J]. 现代食品科技，2023，39（3）：288-297.
ZENG Y，CHEN W，MA C Y，et al. Comparison of the quality of flower-scented oolong tea before and after the post-dry heat treatment[J]. Modern Food Science and Technology，2023，39（3）：288-297.（in Chinese）

[10] 吴荣梅，滑金杰，袁海波，等. 不同毛火程度绿茶的品质成分及感官风味比较[J]. 现代食品科技，2022，38（9）：298-307.
WU R M，HUA J J，YUAN H B，et al. Comparison of quality components and sensory flavor of green tea with different first-firing degrees[J]. Modern Food Science and Technology，2022，38（9）：298-307.（in Chinese）

[11] 姜业硕，张曼，胡娥，等. 做青程度对信阳茶品质及其抗氧化活性的影响[J]. 现代食品科技，2023，39（11）：205-214.（in Chinese）
JIANG Y S，ZHANG M，HU E，et al. Effect of the degree of tossing on the quality and antioxidant activity of Xinyang tea[J]. Modern Food Science and Technology，2023，39（11）：205-214.

[12] 余启明，张金华，黄泽强，等. 12种广西地区茶叶的水提物活性成分测定及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发，2021，42（17）：19-24.
YU Q M，ZHANG J H，HUANG Z Q，et al. Active components and antioxidant activities of aqueous extracts of twelve types of tea in Guangxi region[J]. Food Research and Development，2021，42（17）：19-24.（in Chinese）

[13] ZHOU B X，WANG Z H，YIN P，et al. Impact of prolonged withering on phenolic compounds and antioxidant capability in white tea using LC-MS-based metabolomics and HPLC analysis：comparison with green tea[J]. Food Chemistry，2022，368：130855.

[14] 刘均，冯巩，谭蓉. 扁形绿茶加工过程中不同工艺对其抗氧化生物活性的影响[J]. 现代食品科技，2025，41（4）：275-285.
LIU J，FENG G，TAN R. Effect of different processing processes on antioxidant activity of flat shaped green tea during processing [J]. Modern Food Science and Technology，2025，41（4）：275-285.（in Chinese）

[15] YU X L，LI Y C，HE C，et al. Nonvolatile metabolism in postharvest tea（*Camellia sinensis* L.）leaves：effects of different withering treatments on nonvolatile metabolites，

gene expression levels, and enzyme activity[J]. Food Chemistry,2020,327:126992.

[16] 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.

[17] GAO Y, CAO Q Q, CHEN Y H, et al. Effects of the baking process on the chemical composition, sensory quality, and bioactivity of Tieguanyin oolong tea[J]. Frontiers in Nutrition,2022,9:881865.

[18] CHEN C N, LIANG C M, LAI J R, et al. Capillary electrophoretic determination of theanine, caffeine, and catechins in fresh tea leaves and oolong tea and their effects on rat neurosphere adhesion and migration[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(25):7495-7503.

[19] COLON M, NERÍN C. Synergistic, antagonistic and additive interactions of green tea polyphenols[J]. European Food Research and Technology,2016,242(2):211-220.

[20] 王丽,张杨玲,林芷青,等. 不同焙火程度对武夷水仙品质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业,2021,42(2):179-182.
WANG L, ZHANG Y L, LIN Z Q, et al. Effect of different baking degree on antioxidant activity and quality of Wuyi Shuixian oolong tea[J]. The Food Industry, 2021,42(2):179-182.(in Chinese)

[21] 王丽,官小倩,余能煌,等. 不同焙火程度对武夷肉桂品质与抗氧化活性的影响[J]. 茶叶通讯,2020,47(2):282-286.
WANG L,GUAN X Q,YU N H,et al. Effect of different baking temperature on the quality and antioxidant activity of Wuyi Rougui oolong tea[J]. Journal of Tea Communication,2020,47(2):282-286.(in Chinese)

[22] 王丽,黄秀红,李卓毅,等. 不同焙火程度对黄观音生化成分和抗氧化活性的影响[J]. 保鲜与加工,2020,20(4):178-182.
WANG L,HUANG X H,LI Z Y,et al. Effect of different baking degrees on antioxidant activity and biochemical components of Huangguanyin tea[J]. Storage and Process,2020,20(4):178-182.(in Chinese)

[23] 王丽,官晓倩,余能煌,等. 不同焙火程度对武夷岩茶品质和抗氧化活性的影响[J]. 食品科技,2020,45(8):68-74.
WANG L,GUAN X Q,YU N H,et al. Effect of different baking degree on antioxidant activity and quality of Wuyi rock tea[J]. Food Science and Technology,2020,45(8):68-74.(in Chinese)

[24] 宋来辉,张睿,许天阳,等. 不同干燥方法和干燥温度对人参饮片化学成分含量及抗氧化活性影响[J]. 时珍国医国药,2023,34(10):2412-2418.
SONG L H, ZAHNG R, XU T Y, et al. Effects of different drying methods and temperatures on the content of chemical components and antioxidant activity of Ginseng decoction pieces[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2023, 34(10):2412-2418.(in Chinese)

[25] 忻晓庭,刘大群,郑美瑜,等. 热风干燥温度对冰菜干燥动力学、多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报,2020,20(11):148-156.
XIN X T, LIU D Q, ZHENG M Y, et al. Effects of hot air drying temperature on drying kinetics, polyphenol content and antioxidant activity of ice plant[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020,20(11):148-156.(in Chinese)

[26] 关东,陈丹,崔梦迪,等. 不同加热温度和处理方式对灰枣活性成分和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技,2022,43(20):113-121.
GUAN D,CHEN D,CUI M D,et al. Effect of different heating temperatures and treatment methods on the active compounds and antioxidant activities of *Ziziphus jujuba* cv. Huizao[J]. Science and Technology of Food Industry,2022,43(20):113-121.(in Chinese)

[27] 丁胜华,王蓉蓉,李高阳,等. 干燥温度对橙皮干燥动力学、酚类物质及抗氧化特性的影响[J]. 中国食品学报,2016,16(11):137-144.
DING S H,WANG R R,LI G Y,et al. Effects of drying temperature on the drying kinetics, phenolic acids, flavonoids, and antioxidant capacities of orange peels[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2016,16(11):137-144.(in Chinese)