

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

刘均, 冯巩, 谭蓉*

(中华全国供销合作总社杭州茶叶研究所, 浙江省茶资源跨界应用技术重点实验室, 浙江杭州 310016)

摘要: 为了解杀青、烘焙因素对扁形绿茶抗氧化生物活性的影响, 基于单因素分析, 发现保留绿茶的抗氧化活性杀青温度应控制在 190~210 ℃, 杀青时间 5~7 min; 烘焙时间 30~40 min。另有利于保留绿茶的抗氧化生物活性的最优工艺为: 190 ℃杀青 5~9 min, 并结合 150 ℃烘焙 30 min; 次优工艺为: 210 ℃杀青 5 或 9 min, 并结合 150 ℃烘焙 30 min; 230 ℃杀青 3.5 min 合 165 ℃作形 3.5 min, 并结合 150 ℃烘焙 30 min。经关联性分析发现, 绿茶溶液中茶多酚质量浓度水平与其体内外抗氧化生物活性间的相关性较低。然而, 通过绿茶溶液中茶多酚定向吸附清除实验、茶多酚及绿茶溶液中茶多酚梯度差异化重组实验的抗氧化生物活性表征的结果发现, 茶多酚质量浓度水平与其抗氧化活性水平呈极强显著相关, 因而推测可能存在其它干扰因素仍需继续研究。结果表明扁形绿茶的抗氧化生物活性受杀青温度、时间和烘焙时间等不同工艺的影响, 为保留绿茶活性应择优选择复合加工工艺。结果为绿茶加工工艺的优化提供科学依据。

关键词: 绿茶; 扁形绿茶; 杀青; 烘焙; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2025)04-275-285

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.4.0191

Effect of Different Processing Processeson Antioxidant Activity of Flat Shaped Green Tea during Processing

LIU Jun, FENG Gong, TAN Rong*

(Hangzhou Tea Research Institute, CHINA COOP, Zhejiang Key Laboratory of Transboundary Applied Technology for Tea Resources, Hangzhou 310016, China)

Abstract: To explore the effects of withering and baking factors on the antioxidant biological activity of flat green tea, based on single factor analysis, it was found that the withering temperature should be controlled at 190~210 ℃ and the withering time should be 5~7 minutes to preserve the antioxidant activity of green tea; Baking time is 30~40 minutes. Additionally moreover, the optimal process for preserving the antioxidant activity of green tea was as follow: fixing at 190 ℃ for 5~9 min, along with roasting at 150 ℃ for 30 min; the suboptimal process was: fixing at 210 ℃ for 5 or 9 min, along with roasting at 150 ℃ for 30 min; fixing at 230 ℃ for 3.5 min along with shaping at 165 ℃ for 3.5 min, followed by roasting at 150 ℃ for 30 min. Correlation analysis showed that the correlation between the mass concentration of tea polyphenols in green tea solution and its

引文格式:

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 Jun, FENG Gong, TAN Rong. Effect of different processing processeson antioxidant activity of flat shaped green tea during processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 275-285.

收稿日期: 2024-02-17

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

作者简介: 刘均(1990-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 茶及代用茶资源开发、应用及功能评价研究, E-mail: hcyliujun888@163.com

通讯作者: 谭蓉(1982-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 茶及代用茶资源综合利用与开发, E-mail: trfish211@126.com

in vitro and *in vivo* antioxidant activities was relatively low. However, the results of the antioxidant activity characterization via the targeted adsorption and removal of tea polyphenols in green tea solution, and the gradient differential recombination of tea polyphenols and the tea polyphenols in green tea solution showed that the mass concentration of tea polyphenols was extremely strong and significantly correlated with the tea's antioxidant activity. Therefore, it is speculated that there might be other interfering factors that still require further research. The results indicate that the antioxidant activity of flat shaped green tea is influenced by different processes such as fixation temperature and time, and roasting time, and combined processing processes should be preferentially selected in order to preserve the activity of green tea. The results provide scientific basis for the optimization of green tea processing technology.

Key words: green tea; flat green tea; fixing; baking; antioxidant

我国是茶的发源地,已有五千年的历史。茶被认为是一种有益健康的天然药物,具有许多健康属性,包括抗癌、抗氧化、降脂减肥和降糖等方面^[1-3]。喝茶不仅有助于抗衰老和保健,还能增强神经兴奋,促进消化和利尿。绿茶是一种受欢迎的饮料,以其丰富的抗氧化剂含量和潜在的健康益处而闻名^[4,5]。扁形绿茶是一种特殊的绿茶,因其独特的扁平形状而得名,如龙井绿茶、太平猴魁等。随着科学技术的发展,现代研究已经充分证实了绿茶的抗氧化活性与多种健康益处之间的关系,包括抗癌、抗皮肤老化等^[6,7],其抗氧化活性主要归功于其富含儿茶素的特性,儿茶素是一种强效的抗氧化剂,能够清除自由基,保护细胞免受氧化损伤^[8]。扁形绿茶的加工工艺包括采摘、摊放、杀青、干燥等。其中,杀青和干燥是绿茶加工步骤中最为关键的工艺,它们对绿茶的感官品质有着显著影响^[9-11],也会对其抗氧化活性产生影响^[12-14]。传统的扁形绿茶杀青工艺是使用炭火直接加热茶叶,这种工艺具有独特的风味和香气,但也会导致茶叶中儿茶素的氧化,降低其抗氧化活性^[15]。近年来,随着科学技术的进步,涌现出了新的杀青工艺,这些工艺能够在保证茶叶品质的同时,提高茶叶的抗氧化活性,如微波杀青工艺等^[12]。然而,目前我国绿茶加工工艺的优化主要基于感官品质评判分析法^[9-11],还没有进行系统性研究绿茶加工工艺变化与其健康品质与感官品质变化间的内在联动机制,也未能以此来提升和改进茶叶的加工工艺。本研究旨在通过比较茶叶的体内外抗氧化活性,考察不同加工工艺对扁形绿茶抗氧化活性的影响,并探讨杀青和烘焙工艺与扁形绿茶抗氧化活性之间的关系,以为扁形绿茶的加工工艺优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 试剂

5-氯-2-(2,4-二氯苯氧基)苯酚(三氯生)、2,2-偶氮二(2-甲基丙基咪)二盐酸盐(AAPH)、3-乙氧酰基苯胺甲磺酸盐(三卡因)、甲基纤维素、2,7-二氯二氢荧光素二乙酸酯(DCFH-DA)、二甲基亚砷(DMSO)、醋酸铅、谷胱甘肽(GSH)和磷酸盐缓冲溶液均购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

龙井43一芽两叶鲜叶原料,新昌县群星茶业有限公司。10 mg/mL绿茶储备液,称取2 g茶叶,按料液比1:50、浸提温度80℃、浸提时间30 min、浸提次数2次,浸提结束后过滤取上滤液定容至200 mL制备。

茶多酚为实验室自制(浙江省茶资源跨界应用重点实验室):5 mg/mL茶多酚储备液(以生药量计),称取0.5 g茶多酚用蒸馏水溶解定容至100 mL制备,保存于4℃冷藏备用。按照GB/T 8313-2018规定的检测方法检测,含83.70%茶多酚(质量分数)。

1.1.2 主要仪器

ThermoFisher Varioskan LUX酶标仪,赛默飞世尔科技有限公司;SMZ25体式荧光显微镜,尼康仪器(上海)有限公司;全自动智能型生化(霉菌)培养箱,天津市宏诺仪器有限公司;AL-204精密电子天平,梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司;IKA Test 10高速分散机,德国艾卡仪器设备有限公司;3K1S离心机,德国sigma离心机公司;水浴锅,上海精宏实验设备有限公司;LCWD-5茶叶萎凋

机, 福建省安溪佳友机械有限公司; 6CCB-78ZD 全自动扁形茶炒制机, 浙江银球机械有限公司; 6CMG-72 茶叶滚筒挥锅机, 浙江银球机械有限公司。

1.1.3 实验动物

斑马鱼实验胚胎通过自然交配获得, 产卵盒置于 28.5 ℃ 恒温培养箱中, 定时灯光刺激促进产卵。幼鱼获取需勤观察、勤动手, 清除粪便和死卵, 防止污染水质。其他控制条件包括: 光周期 14 h 光照、10 h 黑暗; 孵化温度 28.5 ℃; 培养介质为含 60 μg/mL 海盐的孵育液。

1.2 实验方法

1.2.1 不同工艺绿茶的制备

表 1 不同杀青 (作形) 工艺实验方案设计
Table 1 Experimental design for different green tea fixing (shaping)

样品 编号	杀青		作形		烘焙	
	温度/ ℃	时间/ min	温度/ ℃	时间/ min	温度/ ℃	时间/ min
T-1	190	2.5	190	2.5	150	30
T-2	190	3.5	190	3.5	150	30
T-3	190	4.5	190	4.5	150	30
T-4	210	2.5	210	2.5	150	30
T-5	210	3.5	210	3.5	150	30
T-6	210	4.5	210	4.5	150	30
T-7*	230	2.5	200	2.5	150	30
T-8*	230	3.5	165	3.5	150	30
T-9*	230	4.5	165	4.5	150	30

注: * 表示该组加工工艺根据实际生产进行了部分调整, 调整主要发生在作形环节, 具体表现为降低了作形温度。

表 2 不同烘焙提香工艺实验方案设计
Table 2 Experimental design for different green tea baking processes

样品 编号	杀青		作形		烘焙	
	温度/ ℃	时间/ min	温度/ ℃	时间/ min	温度/ ℃	时间/ min
T-10	230	3.5	165	3.5	150	30
T-11	230	3.5	165	3.5	150	40
T-12	230	3.5	165	3.5	150	50

以龙井绿茶为对象, 同时紧密结合生产现场实际情况和深入探讨各种因素对绿茶生物活性影响的变化规律。通过精心设计的单因素 [杀青 (作形) 温度: 190、210 和 230 ℃; 杀青 (作形) 时间: 5、

7 和 9 min; 烘焙时间: 30、40 和 50 min] 及多因素交叉结合实验, 着重分析了关键加工步骤—杀青 (作形) 和烘焙—如何作用于龙井绿茶的生物活性, 具体的实验设计细节见表 1、2。通过上述工艺制备获取不同工艺的绿茶样品。经感官审评发现成品茶叶的品质略有差异 (外形 87.50±0.80、汤色 90.00±1.21、香气 89.92±1.62、滋味 90.00±0.86、叶底 89.08±1.38、总分 89.26±0.59), 但其品质均满足绿茶的基本要求, 且品质差异在合理范围内, 而后将其用于抗氧化生物活性评估。值得注意的是, 在实际生产过程中, 当 230 ℃ 杀青 5 min 时, 茶叶产生轻微焦糊味。因此, 在坚持使用 230 ℃ 的杀青温度的同时, 根据茶叶加工的实践经验降低了后续的作形温度, 以确保茶叶品质。

1.2.2 不同工艺对绿茶抗氧化生物活性的影响

1.2.2.1 体内抗氧化活性评价

参考前人研究^[16-18]和改进, 将发育正常的 4 dpf 野生型 AB 系斑马鱼随机分为 11 组, 每组 3 个重复, 每个重复 30 条, 分别给予 50 mL 的 0、15 μg/mL 不同加工茶叶样本溶液孵育 24 h, 然后分别对应更换 0、15 μg/mL 不同加工茶叶样本溶液 +0.5 ng/mL 三氯生 +200 μg/mL AAPH+0.4 ng/mL 醋酸铅联合诱导 5 h, 分别记为实验组 MC、T1-T9, 另空白对照组 NC 仅换孵育液孵育。诱导结束后, 更换成 10 mL 的 2 μg/mL DCFH-DA 溶液于 28.5 ℃ 下暗孵育 1 h, 结束后洗净, 按定量定比 (鱼数 / 条: 缓冲液体积 / μL=1:200~400) 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, 于 4 ℃ 下以 10 000 r/min 离心 10 min, 结束后取上清 200 μL, 置于多功能酶标仪中检测荧光强度 (激发波长 488 nm, 发射波长 525 nm, 带宽 12 nm)。

计算公式为:

$$y = \frac{A_j - A_i}{A_j} \times 100\%$$
 (1)

式中:

y——ROS 清除率, %;

A_i——样本处理组 OD 值;

A_j——对照组荧光 OD 值。

1.2.2.2 体外抗氧化活性评价

铁离子还原能力: 将不同工艺绿茶储备液稀释 10 倍后取待测样本液 5 μL, 加入 180 μL FRAP 工作液, 37 ℃ 反应 5 min, 在波长 593 nm 处测定吸光度。最后, 将各茶样 OD₅₉₃ 值分别带入 GSH 标准

曲线，计算得出各茶样对应换算的 GSH 剂量当量的抗氧化能力，以 mmol/L GSH 表示。

DPPH 自由基清除能力：将不同工艺绿茶储备液稀释 20 倍后取待测样本液及不同浓度 GSH 工作液 4 μL，加入 196 μL DPPH 工作液，室温下反应 30 min，在波长 517 nm 处测定吸光度。最后，将各茶样 OD₅₁₇ 值分别带入 GSH 标准曲线，计算得出各茶样对应换算的 GSH 剂量当量的抗氧化能力，以 mmol/ GSH 表示。

计算公式为：

$$y=(1-\frac{A_i-A_j}{A_c})\times100\%$$
(2)

式中：

- y——清除率，%；
- A_c——4 μL 无水乙醇加 196 μL DPPH 溶液的吸光度；
- A_j——4 μL 测试样加 196 μL 无水乙醇的吸光度；
- A_i——4 μL 测试样加 196 μL DPPH 的吸光度。

ABTS⁺ 自由基清除能力：将不同工艺绿茶储备液稀释 25 倍后取待测样本液及不同浓度 GSH 工作液 4 μL，加入 196 μL ABTS 工作液，室温下反应 6 min，在波长 734 nm 处测定吸光度。最后，将各茶样 OD₇₃₄ 值分别带入 GSH 标准曲线，计算得出各茶样对应换算的 GSH 剂量当量的抗氧化能力，以 mmol/ GSH 表示。

计算公式为：

$$y=(1-\frac{A_i-A_j}{A_c})\times100\%$$
(3)

式中：

- y——清除率，%；

- A_c——4 μL 10 mmol/ 加 196 μL ABTS 工作液的吸光度；
- A_j——4 μL 测试样加 196 μL 磷酸盐缓冲液的吸光度；
- A_i——4 μL 测试样加 196 μL ABTS 工作液的吸光度。

1.2.3 茶多酚在绿茶抗氧化中的作用研究

1.2.3.1 茶多酚在绿茶体系的抗氧化作用研究

(1) 绿茶中茶多酚质量浓度水平及其抗氧化生物活性的相关性研究

以绿茶中的茶多酚为对象，参照国标 GB/T 8313-2008 规定的方法定量测定 1.2.1 部分所述的绿茶样本中茶多酚的质量浓度水平含量，然后评估其与抗氧化性能间的相关关系，揭示茶多酚在绿茶抗氧化方面的作用。

(2) 绿茶溶液中茶多酚质量浓度水平对其体外抗氧化能力贡献度的影响

采用不同剂量的 PVPP 对绿茶（T-1 样本，见表 1）溶液中的茶多酚进行定向清除以获得茶多酚不同程度清除后的绿茶溶液样本。随后，开展体外抗氧化活性评价。具体步骤为：将 10 mg/mL 绿茶储备液分成 3 组，每组 30 mL，分别加入 0、80 和 320 mg PVPP，在室温下振荡搅拌 30 min 后于 3 500 r/min 离心 20 min，取上清液备用，分别记为 Test 0、Test 1 和 Test 2。最后，开展体外抗氧化评价，方法同 1.2.2.2 部分一致。

1.2.3.2 茶多酚的抗氧化活性表征

以茶多酚为对象，参考不同工艺绿茶溶液体系中茶多酚的实际质量浓度水平（表 3），配制相近且不同质量浓度水平的茶多酚溶液（见表 4），按照 1.2.2.2 部分相同方案开展抗氧化活性评估。

表 3 不同溶液体系中茶多酚的质量浓度水平（μg/mL）

Table 3 Mass concentration levels of tea polyphenols in different solution systems (μg/mL)

指标	不同工艺绿茶溶液体系		茶多酚定向清除绿茶体系	
	茶多酚质量浓度范围	最大质量浓度差	茶多酚质量浓度范围	最大质量浓度差
铁离子还原能力	68.04~74.66	6.62	4.17~44.03	39.86
DPPH 自由基清除率	34.02~37.33	3.31	2.09~22.01	19.93
ABTS ⁺ 自由基清除率	27.22~29.86	2.65	2.09~22.01	19.93

表 4 茶多酚测试水平分布设计表（μg/mL）

Table 4 Design table for tea polyphenol test level distribution (μg/mL)

指标	铁离子还原能力测试组		DPPH 自由基清除率测试组		ABTS ⁺ 自由基清除率测试组	
	质量浓度范围	最大质量浓度差	质量浓度范围	最大质量浓度差	质量浓度范围	最大质量浓度差
高剂量范围	25~1 000	975	25~500	475	25~100	75
低剂量范围	68.0~74.5	6.5	34.0~37.5	3.5	27.0~31.0	4.0

注：表中茶多酚质量浓度水平均为配制样本。

1.2.3.3 绿茶溶液中茶多酚梯度差异化重组对体外抗氧化评价体系适用度的影响研究

采用同 1.2.3.1 (2) 部分所述相同方法制备获得茶多酚定向清除后的绿茶基液样本，将其稀释 30 倍，并向其中添加不同质量浓度梯度（5.0、10.0 μg/mL）的茶多酚以重组绿茶多酚结构（见表 5）。最后，将其稀释 10 倍后测定铁离子还原能力，稀释 20 倍后测定 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除率。具体评价方法同 1.2.2.2 部分一致。

表 5 绿茶基液中茶多酚梯度差异化重组（μg/mL）
Table 5 Gradient differentiation recombination of tea polyphenols in green tea base solution (μg/mL)

梯度差	质量浓度范围	具体质量浓度值
5.0	6.68~26.68	6.68、14.18、16.68、21.68、26.68
10.0	11.68~51.68	11.68、21.68、31.68、41.68、51.68
总	6.68~51.68	6.68、11.68、16.68、21.68、26.68、31.68、41.68、51.68

1.3 统计分析

文中所有数据均以平均值 ± 标准差呈现，绘图采用 Graphpad Prism 8.0 软件绘制，单因素方差分析（One-way ANOVA）和多个组间差异的“Duncan”多重比较采用 SPSS Statistics 17.0 软件分析，其中当 $P < 0.05$ 时表示组间差异有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 不同加工工艺对绿茶样本生物活性的影响

2.1.1 不同杀青（作形）温度对绿茶加工生物活性的影响

不同杀青（作形）温度对绿茶抗氧化活性的影响见表 6。表 6 显示，在杀青（作形）5 min 条件下，随着温度的增加，绿茶 ROS、DPPH 和 ABTS 自由基清除率均呈降低趋势，且随着温度的增加而显著降低（ $P < 0.05$ ）；但铁离子还原能力在各组间差异不显著（ $P > 0.05$ ）。

在杀青（作形）7 min 条件下，随着温度的增加，绿茶 ROS 清除率呈降低趋势，但各组间差异不显著（ $P > 0.05$ ）；铁离子还原能力有所降低，且 210 °C 杀青（作形）组的铁离子还原能力显著低于 190 和 230 °C 组（ $P < 0.05$ ）；DPPH 自由基清除率呈降低趋势，且 210 和 230 °C 杀青（作形）温度组的 DPPH 自由基清除率显著低于 190 °C 组（ $P < 0.05$ ）；ABTS⁺ 自由基清除率呈降低趋势，且依温度的增加而显著降低（ $P < 0.05$ ）（表 6）。

表 6 不同杀青（作形）温度对绿茶加工抗氧化的影响

Table 6 Effects of different fixing (shaping) temperatures on antioxidant bioactivity of green tea

组别		不同杀青（作形）温度/°C		
		190	210	230
杀青（作形） 5 min	ROS 清除率/%	22.10 ± 1.28 ^a	17.15 ± 2.28 ^b	12.84 ± 2.32 ^c
	铁离子还原能力/mmol/L FeSO ₄ ·7H ₂ O	2.26 ± 0.11 ^a	2.26 ± 0.10 ^a	2.30 ± 0.20 ^a
	DPPH 自由基清除率/%	44.67 ± 1.52 ^a	37.65 ± 1.36 ^b	32.69 ± 2.06 ^c
	ABTS ⁺ 自由基清除率/%	63.38 ± 1.76 ^a	59.23 ± 1.76 ^b	55.70 ± 1.61 ^c
杀青（作形） 7 min	ROS 清除率/%	15.47 ± 1.54 ^a	15.17 ± 2.03 ^a	13.83 ± 1.90 ^a
	铁离子还原能力/mmol/L FeSO ₄ ·7H ₂ O	2.37 ± 0.07 ^a	2.05 ± 0.12 ^b	2.37 ± 0.08 ^a
	DPPH 自由基清除率/%	50.07 ± 4.47 ^a	39.58 ± 1.22 ^b	37.28 ± 2.02 ^b
	ABTS ⁺ 自由基清除率/%	63.92 ± 1.73 ^a	59.50 ± 2.29 ^b	55.00 ± 3.45 ^c
杀青（作形） 9 min	ROS 清除率/%	16.68 ± 1.60 ^a	13.70 ± 3.03 ^b	14.57 ± 1.39 ^{ab}
	铁离子还原能力/mmol/L FeSO ₄ ·7H ₂ O	2.33 ± 0.14 ^a	2.10 ± 0.09 ^b	2.09 ± 0.11 ^b
	DPPH 自由基清除率/%	48.75 ± 1.57 ^a	40.57 ± 0.81 ^b	35.93 ± 3.59 ^c
	ABTS ⁺ 自由基清除率/%	62.88 ± 3.52 ^a	61.47 ± 1.69 ^{ab}	58.26 ± 2.96 ^b

注：由于 230 °C 杀青结束后作形时产生焦味，故在作形环节适度降低作形温度至 200 °C 或 165 °C，但作形时间不变；表上标字母不同表示组间差异显著（ $P < 0.05$ ），下同。

表 7 不同杀青（作形）时间对绿茶加工抗氧化生物活性的影响
Table 7 Effects of different fixing (shaping) time on antioxidant bioactivity of green tea

组别		不同杀青（作形）时间/min		
		5	7	9
190℃杀青 （作形）	ROS 清除率/%	22.10 ± 1.28 ^a	15.47 ± 1.54 ^b	16.68 ± 1.60 ^b
	铁离子还原能力/mmol/L FeSO ₄ ·7H ₂ O	2.26 ± 0.11 ^a	2.37 ± 0.07 ^a	2.33 ± 0.14 ^a
	DPPH 自由基清除率/%	44.67 ± 1.52 ^a	41.42 ± 2.57 ^b	40.58 ± 0.90 ^b
	ABTS ⁺ 自由基清除率/%	63.38 ± 1.76 ^a	63.92 ± 1.73 ^a	62.88 ± 3.52 ^a
210℃杀青 （作形）	ROS 清除率/%	17.15 ± 2.28 ^a	15.17 ± 2.03 ^{ab}	13.70 ± 3.03 ^b
	铁离子还原能力/mmol/L FeSO ₄ ·7H ₂ O	2.26 ± 0.10 ^a	2.05 ± 0.12 ^b	2.10 ± 0.09 ^b
	DPPH 自由基清除率/%	37.65 ± 1.36 ^a	34.82 ± 0.70 ^b	35.44 ± 0.47 ^b
	ABTS ⁺ 自由基清除率/%	59.23 ± 1.76 ^a	59.50 ± 2.29 ^a	61.47 ± 1.69 ^a
230℃杀青 （作形）	ROS 清除率/%	12.84 ± 2.32 ^a	13.83 ± 1.90 ^a	14.57 ± 1.39 ^a
	铁离子还原能力/mmol/L FeSO ₄ ·7H ₂ O	2.30 ± 0.20 ^a	2.37 ± 0.08 ^a	2.09 ± 0.11 ^b
	DPPH 自由基清除率/%	32.69 ± 2.06 ^a	33.37 ± 1.16 ^a	32.52 ± 2.06 ^a
	ABTS ⁺ 自由基清除率/%	55.70 ± 1.61 ^a	55.00 ± 3.45 ^a	58.26 ± 2.96 ^a

在杀青（作形）9 min 条件下，随着温度的增加，绿茶 ROS 清除率呈降低趋势，且 210℃杀青（作形）组的 ROS 清除率显著低于 190℃组（ $P<0.05$ ）；铁离子还原能力呈降低趋势，且 210 和 230℃杀青（作形）温度组的铁离子还原能力显著低于 190℃组（ $P<0.05$ ）；DPPH 自由基清除率呈降低趋势，且依温度的增加而显著降低（ $P<0.05$ ）；ABTS⁺ 自由基清除率呈降低趋势，且 230℃杀青（作形）组的 ABTS⁺ 自由基清除率显著低于 190℃组（ $P<0.05$ ），同时也低于 210℃组（ $P>0.05$ ）（表 6）。

上述结果表明，因此，杀青（作形）温度不宜过高，较高温度下绿茶的生物活性有所降低。综合来说在杀青（作形）5~9 min 的情况下，以 190~210℃为佳。

2.1.2 不同杀青（作形）时间对绿茶加工生物活性的影响

不同杀青（作形）时间对绿茶抗氧化生物活性的影响见表 7。表 7 显示，在 190℃杀青（作形）温度条件下，随着时间的增加，绿茶 ROS 清除率和 DPPH 自由基清除率均呈降低趋势，且 7 和 9 min 杀青（作形）组的 ROS 清除率和 DPPH 自由基清除率均显著低于 5 min 组（ $P<0.05$ ）；铁离子还原能力和 ABTS⁺ 自由基清除率在各组间差异不显著（ $P>0.05$ ）。

在 210℃杀青（作形）温度条件下，随着时间的增加，绿茶 ROS 清除率、铁离子还原能力和 DPPH 自由基清除率均呈降低趋势，且 7 和 9 min

杀青（作形）组的 ROS 清除率、铁离子还原能力和 DPPH 自由基清除率均显著低于 5 min 组（ $P<0.05$ ）；ABTS⁺ 自由基清除率在各组间差异不显著（ $P>0.05$ ）（表 7）。

在 230℃杀青（作形）温度条件下，随着时间的增加，绿茶 ROS 清除率、DPPH 自由基清除率和 ABTS⁺ 自由基清除率均在各组间差异不显著（ $P>0.05$ ）；铁离子还原能力以 9 min 杀青（作形）组最低，且显著低于 5 和 7 min 组（ $P<0.05$ ）（表 7）。

综合来看，在 190~230℃杀青（作形）温度条件下，随着杀青（作形）时间的增加其抗氧化生物活性在降低。因此，杀青（作形）时间也不宜过长，宜以 5~7 min 为佳，具体还需结合不同的杀青（作形）温度而定，若设置较长时间杀青（作形）则可结合较低温度。

2.1.3 不同烘焙时间对绿茶加工绿茶生物活性的影响

在 230℃杀青 3.5 min 与 165℃作形 3.5 min 条件下，随着烘焙时间的增加，绿茶 ROS 清除率呈降低趋势，且 50 min 烘焙组的 ROS 清除率显著低于 30 min 组（ $P<0.05$ ）（图 1a）；铁离子还原能力和 DPPH 自由基清除率均呈降低趋势，且 40 min 和 50 min 组的铁离子还原能力和 DPPH 自由基清除率均显著低于 30 min 组（ $P<0.05$ ）（图 1b、1c）；ABTS⁺ 自由基清除率在各组间差异不显著（ $P>0.05$ ）（图 1d）。综合来看，烘焙时间过长绿茶的抗氧化水平有所下降，宜以 30~40 min 为宜。

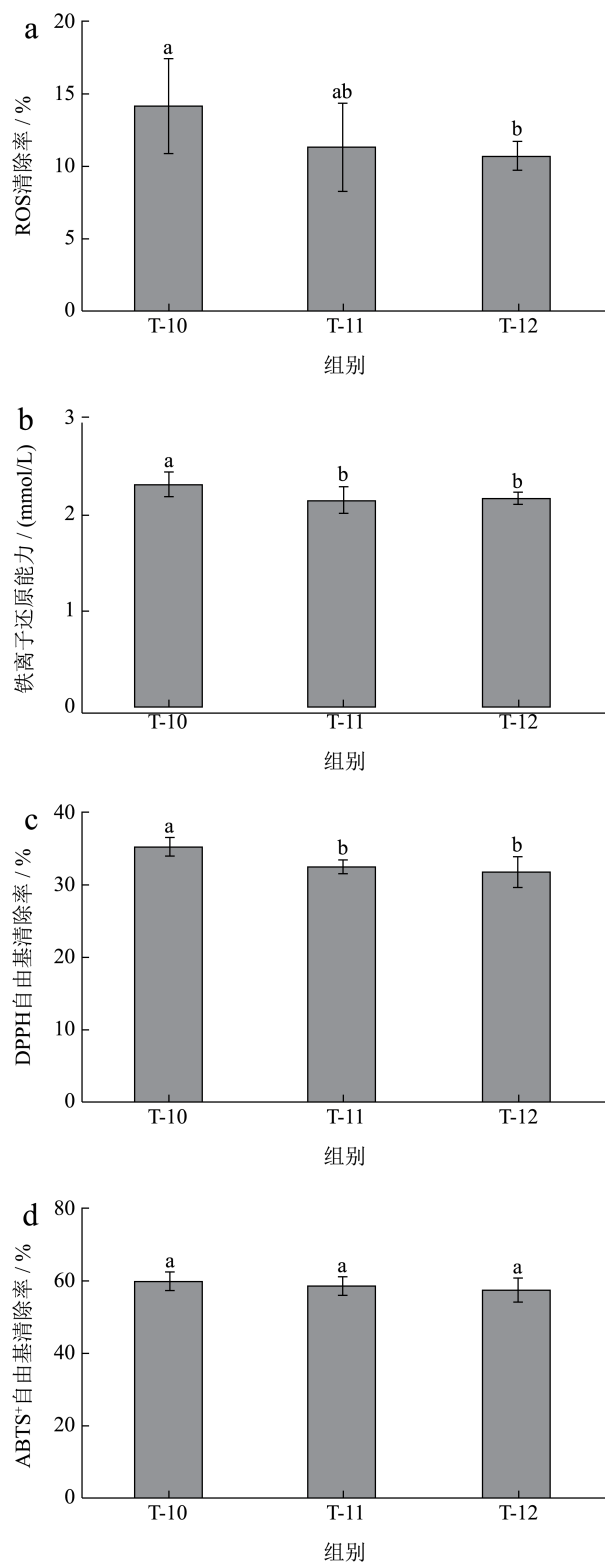


图1 不同烘焙工艺对绿茶抗氧化生物活性的影响

Fig.1 Effects of different baking processes on the antioxidant bioactivity of green tea

注：图中上标字母不同表示组间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

2.1.4 不同作形及烘焙方式组合对扁形型绿茶加工生物活性的影响

不同杀青（作形）工艺及烘焙组合对绿茶抗氧化生物活性的影响见图2。图2显示，不同杀青（作形）及烘焙工艺组合对绿茶的生物活性存在明显不同影响，且不同指标评价结果间存在明显差异性。从各分指标看，抗氧化能力处于最优（前25%）和次优（25%~50%）水平的样本依次分别为：ROS清除率（最优：T-1、T-4、T-3；次优：T-2、T-5、T-9）、铁离子还原能力（最优：T-8、T-2、T-3；次优：T-10、T-7、T-1）、DPPH自由基清除率（最优：T-1、T-2、T-3；次优：T-4、T-6、T-10）、ABTS自由基清除率（最优：T-2、T-1、T-3；次优：T-6、T-10、T-5）。因而，仅使用单一指标无法直接评价其抗氧化生物活性的强弱。

经等系数加权赋分，在总抗氧化能力水平上，处于最优（前25%）和次优（25%~50%）水平的分别是：T-1、T-2、T-3；T-6、T-10、T-4，影响权重系数分别为最优：0.0903、0.0903、0.0887；次优：0.0858、0.0840、0.0831。结合表1，处于最优水平的加工工艺为：190℃杀青（作形）5~9 min，并结合150℃30 min的烘焙工序。处于次优水平的加工工艺为：210℃杀青（作形）5或9 min，并结合150℃30 min的烘焙工序；230℃杀青3.5 min合165℃作形3.5 min，并结合150℃30 min的烘焙工序。

温度对作物的生物活性具有显著影响，已有大量研究证实了这一点。例如，王丽等^[19]发现，随着烘焙程度的增加，茶叶的抗氧化能力（DPPH自由基清除能力）逐渐降低，中火和中轻火是最佳的烘焙选择，可以最大限度地保留茶叶的抗氧化能力。类似的研究结果也适用于肉桂茶、黄观音岩茶和武夷岩茶^[20-22]。此外，在人参饮片加工和冰菜加工中也观察到了类似的趋势。宋来辉等^[23]研究了不同干燥温度（40~80℃）对人参饮片抗氧化活性的影响，发现随着温度升高，抗氧化活性降低。忻晓庭等^[24]研究了不同热风干燥温度（40~120℃）对冰菜的影响，发现总酚、总黄酮和抗氧化活性先升后降，在80℃左右达到峰值。因而，烘焙程度是影响温度的一个关键因素，优化烘焙程度可以最大限度地保留作物的生物活性，最佳温度可以对作物的有效成分产生积极影响。

然而，研究灰枣和橙皮的加工处理方式与生物活性之间的关系时，发现了不同的结果。关东^[25]比较了不同加热温度对灰枣活性成分和抗氧化活性的影响。结果表明，在 110~140 ℃ 的烘烤处理中，灰枣的活性成分含量和抗氧化活性均随着温度升高而增加。丁胜华等^[26]探讨了不同热风干燥温度（50~100 ℃）对橙皮抗氧化能力的影响。随着干燥温度升高，橙皮对 DPPH 自由基的清除能力逐渐增强。因此，对于不同的作物，其适宜的加工方式（包括关键因素温度）需要根据研究对象进行工艺优化处理，以保留最强的生物活性，从而提高其饮用或食用价值。

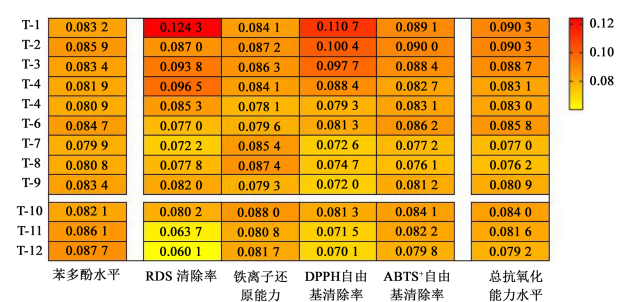


图 2 不同杀青（作形）工艺及烘焙组合对绿茶抗氧化生物活性的影响

Fig.2 Effects of different green tea Fixing (Shaping) and baking combinations on antioxidant bioactivity

注：表示各组茶样测试液中茶多酚质量浓度水平（μg/mL）以及各茶样对应的 ROS 清除率、铁离子还原能力、DPPH 自由基清除率及 ABTS⁺ 自由基清除率变化经归一化处理后各指标影响权重，另总抗氧化能力水平由 ROS

清除率、铁离子还原能力、DPPH 自由基清除率及 ABTS⁺ 自由基清除率四个指标按等加权系数相加计算得出，且图中颜色（红色）越深表示其质量浓度水平越高或清除率越高。

2.2 茶多酚在绿茶抗氧化中的作用研究

2.2.1 茶多酚在绿茶体系中的抗氧化作用研究

表 8 显示，茶多酚质量浓度水平与 ROS 清除率、铁离子还原能力、ABTS⁺ 自由基清除率和 DPPH 自由基清除率之间的相关性较弱。同时关联分析发现，ROS 清除率与 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率间分别呈极显著（ $P<0.01$ ）和显著（ $P<0.05$ ）相关；DPPH 与 ABTS⁺ 自由基清除率呈显著相关（ $P<0.05$ ）。

茶多酚是茶叶中最重要的抗氧化活性成分之一，其抗氧化作用已得到广泛报道。然而，绿茶中茶多酚的质量浓度水平与其抗氧化性能的相关性尚存在争议。刘倩葶等^[27]研究了紫娟绿茶化学成分与抗氧化活性相关性，发现茶花青素中的 Pt、Pg、黄酮类中的 My 和 Qu，以及可溶性糖和没食子酸等与总抗氧化能力、超氧阴离子清除率、DPPH 自由基清除率和羟基自由基清除率等抗氧化活性呈正相关。茶多酚与总抗氧化能力呈极显著正相关，但与超氧阴离子清除率呈极显著负相关。郭红梅等^[28]研究了干燥方式对桑叶绿茶活性物质及其抗氧化活性的影响，发现 DPPH 自由基清除率和还原力均与总酚、总多糖和 GABA 含量呈显著或极显著相关。这表明以总酚、总多糖和 GABA 作为重要的抗氧化活性成分，可以评价桑叶茶的体外抗氧化能力。

表 8 绿茶茶多酚质量浓度水平与抗氧化生物活性间的Pearson相关关系分析					
Table 8 Pearson correlation analysis between green tea polyphenols mass concentration level and antioxidant bioactivity					
指标	皮尔逊相关系数 R^2				
	茶多酚质量浓度水平	ROS 清除率	铁离子还原能力	DPPH 自由基清除率	ABTS ⁺ 自由基清除率
茶多酚质量浓度水平	1	-0.294 0	-0.208 0	0.024 0	0.347 0
ROS 清除率	-0.294 0	1	0.229 0	0.872 0**	0.606 0*
铁离子还原能力	-0.208 0	0.229 0	1	0.412 0	0.083 0
DPPH 自由基清除率	0.024 0	0.872 0**	0.412 0	1	0.840 0**
ABTS ⁺ 自由基清除率	0.347 0	0.606 0*	0.083 0	0.840 0**	1

注：茶多酚质量浓度水平为：μg/mL；ROS 清除测试时茶多酚实际给药质量浓度水平：1.02~1.12 μg/mL；铁离子还原能力、DPPH 自由基清除率和 ABTS⁺ 自由基清除率测试时茶多酚实际剂量分别为：68.04~74.66、34.02~37.33、27.22~29.86 μg/mL；0.0< R^2 ≤0.2 表示极弱相关或无相关；0.2< R^2 ≤0.4 表示弱相关；0.4< R^2 ≤0.6 表示中等程度相关；0.6< R^2 ≤0.8 表示强相关；0.8< R^2 ≤1.0 表示极强相关。* 表示相关性显著（ $P<0.05$ ）；** 表示相关性极显著（ $P<0.01$ ）。

表 9 绿茶溶液茶多酚质量浓度水平的抗氧化生物活性表征

Table 9 Antioxidant bioactivity characterization of green tea solution tea polyphenol mass concentration levels				
指标	Test 0	Test 1	Test 2	回归方程及相关系数
茶多酚质量浓度水平/(μg/mL)	459.92 ± 27.78	280.28 ± 5.44	45.22 ± 4.95	/
茶多酚清除率/%	/	38.98 ± 2.50	90.18 ± 0.48	/
铁离子还原能力/(mmol/L)	0.70 ± 0.04 ^a	0.45 ± 0.03 ^b	0.10 ± 0.02 ^c	$y=0.014\ 99x+0.035\ 05\ (R^2=0.999\ 8)$
DPPH 自由基清除率/%	37.06 ± 0.86 ^a	22.55 ± 0.80 ^b	3.77 ± 0.48 ^c	$y=1.666x+0.071\ 78\ (R^2=0.999\ 2)$
ABTS ⁺ 自由基清除率/%	57.91 ± 3.56 ^a	32.90 ± 0.84 ^b	5.90 ± 0.35 ^c	$y=2.589x-0.482\ 0\ (R^2=0.993\ 6)$

注: y 表示铁离子还原能力 (mmol/L) 或 DPPH 或 ABTS⁺ 自由基清除率 (%), x 表示测定时茶多酚的质量浓度水平 (μg/mL)。表中字母不同表示组间差异显著 (P<0.05)。

表 10 茶多酚单组分体外抗氧化生物活性水平表征

Table 10 Characterization of the <i>in vitro</i> antioxidant bioactivity of tea polyphenol single components			
类别	指标	范围一	范围二
铁离子还原能力测试组	茶多酚质量浓度范围	25~1 000	68.0~74.5
	茶多酚最大质量浓度差	975	6.5
	回归方程及系数	$y=0.002\ 980x+0.171\ 7\ (R^2=0.990\ 2)$	$y=0.001\ 863x+0.198\ 6\ (R^2=0.976\ 9)$
DPPH 自由基清除率测试组	茶多酚质量浓度范围	25~500	34.0~37.5
	茶多酚最大质量浓度差	475	3.5
	回归方程及系数	$y=0.171\ 1x+12.01\ (R^2=0.990\ 8)$	$y=0.687\ 0x-8.104\ (R^2=0.983\ 1)$
ABTS ⁺ 自由基清除率测试组	茶多酚质量浓度范围	25~100	27.0~31.0
	茶多酚最大质量浓度差	75	4.0
	回归方程及系数	$y=0.702\ 7x+2.061\ (R^2=0.995\ 8)$	$y=2.244x-46.28\ (R^2=0.938\ 8)$

注: y 表示铁离子还原能力 (mmol/L) 或 DPPH 或 ABTS⁺ 自由基清除率 (%), x 表示测定时茶多酚的质量浓度水平 (μg/mL)。

表 11 绿茶基液中茶多酚梯度差异化重组对其抗氧化生物活性的影响

Table 11 Effects of gradient differentiation recombination of tea polyphenols in green tea base solution on its antioxidant bioactivity			
茶多酚/(μg/mL)		回归方程及相关系数 R ²	
梯度差	质量浓度范围	铁离子还原能力/mmol/L	DPPH 自由基清除率/%
5.0	6.68~26.68	$y=0.004\ 161x+0.024\ 29\ (R^2=0.999\ 1)$	$y=0.143\ 0x+5.362\ (R^2=0.908\ 4)$
10.0	11.68~51.68	$y=0.003\ 806x+0.031\ 27\ (R^2=0.997\ 2)$	$y=0.825\ 1x+8.115\ (R^2=0.991\ 9)$
总	6.68~51.68	$y=0.003\ 871x+0.029\ 04\ (R^2=0.992\ 6)$	$y=0.213\ 5x+4.331\ (R^2=0.532)$

注: x 为茶多酚质量浓度水平 (μg/mL); y 为铁离子还原能力 (mmol/L GSH) 或 DPPH 自由基清除率 (%) 或 ABTS⁺ 自由基清除率 (%)。

然而, 一些研究结果并不完全一致。郭子豪等^[29]研究了五种台湾特色茶种(绿茶、包种茶、红茶、佳叶龙茶)的不同加工方法对抗氧化活性的影响。他们发现, 总儿茶素和总酯型儿茶素与抗氧化活性之间没有显著的正相关性。这表明, 茶汤中的抗氧化物质可能不完全由儿茶素决定, 其他多元酚也可能共同发挥作用。综上所述, 测定茶多酚质量浓度水平是否能代表绿茶的抗氧化水平仍存在争议, 需要进一步的研究。在后续研究中, 将深入探讨茶多酚在不同体系中的抗氧化作用和价值。

2.2.2 绿茶溶液中茶多酚质量浓度水平对其体外抗氧化能力贡献度的影响

表 9 显示, Test 1 和 Test 2 组茶多酚的质量浓度水平分别显著降低了 38.98% 和 90.18%。经体外抗氧化能力测试, 与对照组 (Test 0) 相比, Test 1 和 Test 2 组绿茶的体外铁离子还原能力、DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除率均显著降低。结果表明, 绿茶溶液中茶多酚的质量浓度水平与其抗氧化能力显著相关 (表 9)。综上, 茶多酚在绿茶体系中发挥了重要的抗氧化作用, 且表现出明显的量效关系。这有

力地支持了茶多酚具有显著抗氧化活性的观点。

2.2.3 茶多酚的抗氧化作用研究

表 10 显示, 茶多酚的质量浓度与其铁离子还原能力、DPPH 自由基清除率和 ABTS⁺ 自由基清除率均与剂量呈极强线性正相关。结果表明, 茶多酚具有极强的抗氧化能力, 并且其抗氧化生物活性的量效关系十分明确。

2.2.4 绿茶溶液中茶多酚梯度差异化重组对体外抗氧化评价体系适用度的影响研究

表 11 显示, 通过对绿茶溶液中的茶多酚的质量浓度进行梯度调整后发现, 茶多酚的质量浓度与其铁离子还原能力、DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除率均表现出强烈的线性回归相关性。结果表明, 在相同的绿茶基液中, 茶多酚的质量浓度与抗氧化生物活性水平呈正相关, 且茶多酚浓度的差异对体外抗氧化评价体系适用度的影响较小。

茶多酚的单一成分、定向吸附清除绿茶中的茶多酚以及茶多酚梯度化重组绿茶的抗氧化生物活性与茶多酚的实际质量浓度水平密切相关。然而, 仅以茶多酚总量为观测对象的研究所得出的结论无法解释不同工艺绿茶中茶多酚含量与抗氧化活性表现之间的关联性较差的问题。原因可能在于, 茶多酚是一种复杂的成分^[30-32], 包含多种儿茶素单体。研究表明, 不同的儿茶素单体均具有抗氧化作用, 如没食子儿茶素没食子酸酯 (EGCG)、表没食子儿茶素 (EGC)、表儿茶素没食子酸酯 (ECG) 等, 且与 DPPH 自由基清除能力间呈极显著相关性^[33-35]。另外, 研究也表明茶叶中富集的 Theanine、Theophylline、EGC、EGCG、(-)-Epiafzelechin gallate、Procyanidin dimer、4-Galloylquinic acid、5-Caffeoylquinic acid、3-Galloylquinic acid、ECG、5-Galloylquinic acid、Dihydrokaempferol 对茶叶的抗氧化能力具有显著影响作用^[35]。不同工艺绿茶中, 儿茶素含量及其他成分组成存在明显差异^[34-36]。而实验中使用的茶多酚结构组成相对简单且固定, 可能存在其他干扰因素影响抗氧化活性^[36-38]。王昱筱等^[36]研究发现绿茶、红茶和普洱熟茶均有较好的体外抗氧化作用, 但表明不同茶类体外抗氧化作用不同, 在试验冲泡浓度范围内, 绿茶有较强清除 DPPH 自由基的能力, 红茶有较弱的羟自由基清除能力, 普洱熟茶清除超氧阴离子自由基能力较强, 表明不同类型茶基础溶液的抗氧化性能表现可能存在一定的差异性。因此, 需要进一步深入研究, 以确定影响不同

工艺绿茶中茶多酚含量与抗氧化活性表现之间相关性的其他因素。

3 结论

研究了扁形绿茶杀青温度、时间和烘焙时间对绿茶抗氧化生物活性的影响。单因素分析表明, 为保留绿茶的抗氧化活性, 杀青温度应控制在 190~210 ℃, 杀青时间应控制在 5~7 min。在 230 ℃杀青 3.5 min 合 165 ℃作形 3.5 min 的条件下, 烘焙时间不宜过长, 应控制在 30~40 min。为保留绿茶抗氧化生物活性, 绿茶的最佳复合加工工艺为: 190 ℃杀青 5~9 min, 并结合 150 ℃烘焙 30 min; 次优加工工艺为 210 ℃杀青 5 或 9 min, 并结合 150 ℃烘焙 30 min; 230 ℃杀青 3.5 min 合 165 ℃作形 3.5 min, 并结合 150 ℃烘焙 30 min。关联性分析表明, 绿茶溶液中茶多酚质量浓度水平与其体内外抗氧化生物活性之间的相关性较低。然而, 通过绿茶溶液中茶多酚定向吸附清除实验、茶多酚及绿茶溶液中茶多酚梯度差异化重组实验的抗氧化生物活性表征的结果表明, 茶多酚质量浓度水平与其抗氧化活性水平呈极强显著相关。因此, 推测不同工艺绿茶溶液中可能存在干扰抗氧化评测的因素, 需要进一步开展研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ZHANG H H, LIU J, LV Y J, et al. Changes in the intestinal microbiota of type 2 diabetes mice in response to dietary supplementation with instant tea or matcha [J]. Canadian Journal of Diabetes, 2020, 44: 44-52.
- [3] LIU J, LI Q, TAN R. An exploratory study to analyse the effects of the different roles of matcha 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.
- [4] 谭蓉, 刘均, 李强. 基于斑马鱼模型的茶多酚及其儿茶素单体降糖作用研究[J]. 中国茶叶加工, 2022, 1: 71-78.
- [5] 韩莎莎. 六大茶类挥发性组分抗癌、抗炎功能特性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [6] 刘均, 李强, 谭蓉. 基于斑马鱼模型评价白茶的降糖作用[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 45-54.
- [7] 李兴太, 张春英, 仲伟利, 等. 活性氧的生成与健康 and 疾病关系研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(13): 257-270.

- [8] CHEN Z M, LI Z. Tea and human health: biomedical functions of tea active components and current issues [J]. Journal of Zhejiang University-Science B (Biomedicine & Biotechnology), 2015, 2: 87-102.
- [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.
- [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.
- [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.
- [12] 叶禹彤,艾仄宜,李荣林,等.杀青方式对秋季黄金芽绿茶品质的影响[J].现代食品科技,2022, 38(9):245-253.
- [13] 周天山,米晓玲,王衍成,等.不同加工工艺对‘陕茶1号’绿茶品质的影响[J].食品科学,2017,38(3):148-154.
- [14] 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.
- [15] 陈志云,李杰,冯雨,等.茶多酚生物活性及作用机制研究进展[J].食品工业科技,2024,45(13):333-341.
- [16] 马鹏程.环境剂量三氯生对斑马鱼甲状腺轴及氧化应激毒性影响研究[D].锦州:锦州医科大学,2018.
- [17] 王胜男,付晓婷,许加超,等.羊栖菜褐藻糖胶对AAPH诱导的斑马鱼氧化应激模型的保护作用[J].食品工业科技,2021,42(18):356-365.
- [18] 韩玉龙.斑马鱼氧化应激模型优化及药根碱抗LPS介导的氧化应激机制研究[D].重庆:西南大学,2018.
- [19] 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,2021,2:179-182.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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,2020,8:68-74.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 刘倩葶,念波,石兴云,等.紫娟绿茶化学成分与抗氧化活性相关性研究[J].中国茶叶,2019,41(9):40-45,49.
- [28] 郭红梅,梁唯,刘志刚,等.干燥方式对桑叶绿茶活性物质及其抗氧化活性的影响[J].保鲜与加工,2021,21(7):52-58.
- [29] 郭子豪,李世杰.不同加工方式对台湾特色茶种主要儿茶素含量与抗氧化活性变化之影响[C]//中国茶叶学会,台湾茶协会.第六届海峡两岸茶业学术研讨会论文集(摘要).大叶大学分子生物科技学系;大叶大学生物产业科技学系;2010:2.
- [30] 崔宏春,余继忠,张建勇,等.加工工艺对绿茶儿茶素组分和茶多酚保留率的影响[J].江苏农业科学,2014,42(4): 209-212.
- [31] 陈璐瑶,李琴,尹杰,等.不同加工工艺对贵州绿茶干茶色泽及品质成分的影响分析[J].有机化学研究,2023, 11(1): 26-35.
- [32] 敖存,唐德松,张俊,等.不同杀青工艺对秋茶香气品质的影响[J].食品工业科技,2011,32(5):309-311.
- [33] 吴航,许婧.茶多酚的生物学功能及其在动物生产中的应用[J].饲料研究,2024,47(6):165-168.
- [34] 林清霞,王丽丽,杨军国,等.基于DPPH法的茶叶儿茶素类抗氧化谱效关系研究[J].福建农业学报,2020,35(2):210-216.
- [35] 马国为.基于多变量分析的茶叶抗氧化及其作用机理解析[D].北京:北京工商大学,2019.
- [36] 王昱筱,周才琼.红茶、绿茶和普洱熟茶体外抗氧化作用比较研究[J].食品工业,2016,37(4):64-68.
- [37] 王万方,张怀令,陈丽,等.不同加工形式茶叶茶多酚含量及抗氧化活性比较研究[J].大理学院学报,2014,13(10): 18-21.
- [38] 侯粲,林隼,郝彬秀,等.不同品种乌龙茶烘焙前后化学成分差异及体外活性[J].现代食品科技,2024,40(5):102-110.