

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240731006

不同蒸压工艺下普洱茶抗氧化活性差异比较

苏菁晶^{1,2#}, 包 宁^{1,2#}, 陶 忠¹, 赵远艳³, 崔廷宏³, 单治国^{1*}, 张春花^{1*}

(1. 普洱学院茶叶咖啡学院, 普洱 665000; 2. 安徽农业大学茶与食品科技学院, 合肥 230000;
3. 普洱市茶叶科学研究所, 普洱 665000)

摘 要: **目的** 探究不同蒸压工艺对普洱茶抗氧化活性的影响。**方法** 本研究在普洱茶压制环节中设置不蒸压的原始样、蒸汽样、湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样 5 种处理, 采用分光光度法检测不同蒸压工艺下普洱茶总抗氧化能力、羟自由基清除能力、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除率、超氧阴离子自由基清除能力并分析其差异。**结果** 生茶总抗氧化能力压饼烘干样最大, 显著高于湿闷样 0.02 mol/L; 生茶羟自由基清除能力湿闷样最高, 显著高于原始样 69.05 U/mL; 生茶 DPPH 自由基清除率湿闷样最高, 显著高于压饼打散样 15.75%; 生茶超氧阴离子自由基清除能力湿闷样最高, 显著高于压饼打散样 763.49 U/L。熟茶总抗氧化能力压饼烘干样最高, 显著高于原始样 0.07 mol/L; 熟茶羟自由基清除能力湿闷样最高, 显著高于原始样 57.72 U/mL; 熟茶 DPPH 自由基清除率湿闷样最高, 显著高于原始样 34.45%; 熟茶超氧阴离子自由基清除能力压饼烘干样最高, 显著高于压饼打散样 1065.65 U/L。**结论** 经过蒸压工艺中的压饼打散处理后, 普洱生茶、普洱熟茶抗氧化活性降低, 蒸汽、湿闷、压饼后烘干处理有利于其抗氧化活性提高, 为普洱茶蒸压工艺的改进和抗氧化活性的提升提供理论基础。

关键词: 普洱生茶; 普洱熟茶; 蒸压; 抗氧化活性

Comparison of antioxidant activity of Pu-erh tea under different autoclaved processes

SU Jing-Jing^{1,2#}, BAO Ning^{1,2#}, TAO Zhong¹, ZHAO Yuan-Yan³, CUI Ting-Hong³,
SHAN Zhi-Guo^{1*}, ZHANG Chun-Hua^{1*}

基金项目: 国家自然科学基金项目(32360771)、云南省科技厅科技计划项目(202101BA070001-239)、云南省高校普洱茶加工工程研究中心, 普洱学院重点科研专项规划项目(2020XJGH08)、普洱茶科技研发创新团队项目(CXTD020)、普洱学院拔尖创新团队项目(2023PEXYCXTD001)、一流本科课程项目(2023YLKCZX004、2023YLKCZX005)、云南省教育厅项目(2024J1099)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32360771), the Science and Technology Program of Yunnan Provincial Department of Science and Technology (202101BA070001-239), the Pu-erh Tea Processing Engineering Research Center of Yunnan Provincial Universities, Key Scientific Research Special Planning Project of Puer University (2020XJGH08), the Pu-erh Tea Science and Technology Research and Development and Innovation Team (CXTD020), the Puer College Top-notch Innovation Team (2023PEXYCXTD001), the First-class Undergraduate Course (2023YLKCZX004, 2023YLKCZX005), and the Yunnan Ministry of Education Project (2024J1099)

#苏菁晶、包宁为共同第一作者

#SU Jing-Jing and BAO Ning are Co-first Authors

*通信作者: 单治国, 教授, 主要研究方向为茶叶生产与质量安全。E-mail: 353879230@qq.com

张春花, 副教授, 主要研究方向为普洱茶加工关键技术与品质形成。E-mail: 190888358@qq.com

*Corresponding author: SHAN Zhi-Guo, Professor, Pu-erh University and Tea and Coffee Academy, No.6, Xueyuan Road, Simao District, Pu-erh 665000, China. E-mail: 353879230@qq.com

ZHANG Chun-Hua, Associate Professor, Pu-erh University and Tea and Coffee Academy, No.6, Xueyuan Road, Simao District, Pu-erh 665000, China. E-mail: 190888358@qq.com

(1. Pu'er University and Tea and Coffee Academy, Pu'er 665000, China; 2. College of tea and food science and technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230000, China; 3. Tea Research Institute, Pu'er 665000, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of various autoclaving processes on the antioxidant activity of Pu-erh tea. **Methods** The 5 kinds of treatments were employed during the pressing process of Pu-erh tea: the original sample, steam sample, wet and stuffy sample, pressed cake scattering sample, and pressed cake drying sample. The total antioxidant capacity, hydroxyl radical scavenging capacity, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radical scavenging rate, and superoxide anion free radical scavenging capacity of Pu-erh tea under different autoclaving processes were measured using spectrophotometry, and the differences were analyzed. **Results** The total antioxidant capacity of the raw tea was greatest in the pressed cake drying sample, significantly higher than that of the wet and stuffy sample by 0.02 mol/L. The hydroxyl radical scavenging ability of the raw tea was the highest, significantly exceeding that of the original sample (69.05 U/mL). The DPPH free radical scavenging rate of the raw tea was highest in the wet and stuffy sample, significantly greater than that of the pressed cake scattering sample by 15.75%. The superoxide anion radical scavenging ability of the raw tea was also the highest, significantly exceeding that of the pressed cake sample (763.49 U/L). For the cooked tea, the total antioxidant capacity was highest in the cake-dried sample, significantly greater than that of the original sample by 0.07 mol/L. The hydroxyl radical scavenging ability of the cooked tea was highest in the wet sample, significantly exceeding that of the original sample (57.72 U/mL). The DPPH free radical scavenging rate of the ripe tea was highest in the wet sample, significantly greater than that of the original sample by 34.45%. Lastly, the superoxide anion radical scavenging ability of the cooked tea was highest in the pressed cake drying sample, significantly exceeding that of the pressed cake scattering sample (1065.65 U/L). **Conclusion** The antioxidant activity of both raw and ripe Pu-erh tea diminishes following cake pressing and scattering treatment during the autoclaving process. Conversely, the antioxidant activity is enhanced by steam treatment, wet stuffiness, and post-cake pressing drying. This finding offers a theoretical foundation for improving the autoclaving process and enhancing the antioxidant activity of Pu-erh tea.

KEY WORDS: Pu-erh raw tea; Pu-erh ripe tea; autoclave; antioxidant activity

0 引言

普洱茶是以地理标志保护范围内的云南大叶种晒青茶为原料,采用特定的加工工艺制成,具有独特品质特征的普洱茶生茶和熟茶。普洱茶具有抗癌、抗氧化、降脂、降血糖、防辐射、防治心血管疾病等^[1]功效,其主要原因是茶叶中的多酚类、黄酮类、花青素、多糖、生物碱及维生素等内含物质都具有抗氧化活性,可清除自由基^[2]。随着对普洱茶中生化成分^[3]和保健作用^[4]的进一步深入研究,证实茶叶里化学成分所表现出来的抗氧化活性都不相同,特别是普洱茶的抗氧化能力就是各种内含物共同作用的结果^[5]。目前,对茶多酚体外抗氧化活性的研究较为多见,作为普洱茶中一种重要的抗氧化成分,茶多酚可以抑制活性氧的生成^[6],有效地清除体内自由基,对机体发挥多种生理效应^[7]。针对茶叶化学成分与抗氧化活性的相关性研究已经有一定的结果^[8],但在压制工艺对普洱茶抗氧化活性的影响这方面缺乏研究。

近年来,我国对绿茶、红茶的抗氧化活性及其作用机制进行了深入的研究^[9],针对普洱茶的研究^[10]主要集中在

茶树种植、加工、香气成分^[11]、化学成分^[5]及保健功效^[6]等方面,而关于蒸压工艺对普洱茶抗氧化活性的研究报道较少,亟需开展蒸压工艺对普洱茶抗氧化活性影响的研究。东方等^[12]综述了普洱茶抗氧化活性的相关研究进展,揭示普洱茶化学品质形成的重要环节与机制是今后普洱茶品质的重点研究方向,徐阳等^[13]对普洱茶压饼机械现存的问题与技术创新进行了探讨,阐述了压饼机械对普洱茶饼质量的影响,而不同蒸压工艺处理对普洱茶保健功效的影响值得研究。郑际雄对普洱生茶^[14]和普洱熟茶^[15]蒸压时间和干燥时间、温度的调控进行了探讨。

抗氧化能力已经成为评定茶叶产品质量和保健^[16]功效的一项重要指标^[17]。例如总抗氧化能力^[18-19]、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力^[20-21]、羟自由基清除能力^[22],超氧阴离子自由基清除能力^[23-24]已经开展了深入的研究。张丹等^[25]研究表明,蒸压中的湿热处理有利于白茶抗氧化活性的提高,对提升贡眉寿眉茶的质量具有重要作用。如何有效地借鉴和利用白茶的蒸压加工工艺^[26],深入研究蒸压工艺对普洱茶抗氧化活性的影响,为普洱茶保健功效的提升提供参考

依据,是该实验的研究方向。因此本研究在普洱茶压制环节中设置 5 种不同的蒸压处理(蒸压的原始样、蒸汽样、湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样),检测不同蒸压工艺下普洱茶抗氧化活性的变化规律及差异,以期筛选出最适的蒸压处理,为普洱茶的加工工艺提供一定的理论支撑和技术参考,为普洱茶品质的提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

茶叶样品由云南省高校普洱茶加工工程研究中心提供,包含一芽二叶的云南大叶种晒青毛茶及一芽二叶的普洱熟茶散茶。

总抗氧化能力测试盒、DPPH 自由基清除能力试剂盒、羟自由基测定试剂盒、抑制与产生超氧阴离子自由基测定试剂盒(南京建成生物工程研究所)。

1.2 仪器与设备

HTY-200g 高速多功能粉碎机(浙江省永康市松青五金厂); HW3-26 电热恒温水浴锅(上海一恒科学仪器有限公司); FA3204C 电子天平精度(精度 0.0001 g, 上海天美天平仪器有限公司); U-3010 紫外可见分光光度计(精度 0.001 g, 上海奥析科学仪器有限公司); Multiskan EX 酶标仪[精度 0.001, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司]。

1.3 实验方法

1.3.1 普洱茶蒸压流程及实验方案

在普洱茶压制环节中设置不蒸压的原始样、蒸汽样、湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样 5 种蒸压处理。普洱茶蒸汽压制工艺流程见图 1, 具体实验方案见表 1。

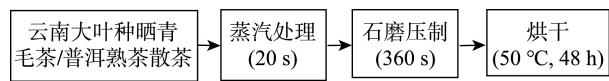


图 1 普洱茶蒸压工艺流程
Fig.1 Autoclave process of Pu-erh tea

表 1 普洱茶蒸压实验方案
Table 1 Autoclave test scheme of Pu-erh tea

茶样	处理与参数
原始样(普洱生茶、普洱熟茶)	原料重量 100 g, 热风固样 (120 °C, 1 h)
蒸汽样(普洱生茶、普洱熟茶)	蒸汽 20 s, 热风固样 (120 °C, 1 h)
湿闷样(普洱生茶、普洱熟茶)	蒸汽 20 s, 湿闷 360 s, 热风固样 (120 °C, 1 h)
压饼打散样(普洱生茶、普洱熟茶)	蒸汽 20 s, 石磨压制 360 s, 热风固样 (120 °C, 1 h)
压饼烘干样(普洱生茶、普洱熟茶)	蒸汽 20 s, 石磨压制 360 s, 烘干 (50 °C, 48 h)

1.3.2 不同蒸压工艺普洱茶抗氧化活性的测定

(1)普洱茶水提物的制备

用电子分析天平称取粉碎茶样 1 g(准确至 0.001 g), 加入 80 mL 沸腾的蒸馏水, 立刻放入沸水中, 浸提 45 min(每隔 10 min 摇瓶一次)。浸提完毕后趁热减压过滤, 滤液移入 100 mL 容量瓶中, 冷却后用蒸馏水定容至刻度, 摇匀备用(当天实验须用当天制备的茶汤)。

(2)总抗氧化能力的测定

采用 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐 [2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]方法进行总抗氧化能力的测定, 具体操作根据总体抗氧化能力测试盒说明书严格进行。

(3)DPPH 自由基清除能力的测定

具体操作根据 DPPH 自由基清除能力试剂盒说明书严格进行。

(4)羟自由基清除率的测定

具体操作根据羟自由基测定试剂盒说明书严格进行。

(5)超氧阴离子自由基清除能力的测定

用维生素 C (vitamin C, VC)作为标准, 当含有抑制剂时, 对照管的吸光度会高于测定管的吸光度, 计算样本对超氧阴离子自由基的清除能力。具体操作根据抑制与产生超氧阴离子自由基测定试剂盒说明书严格进行。

1.3.3 不同蒸压工艺普洱茶生化成分的测定

干物质的测定按照 GB/T 8303—2013《茶 磨碎试验的制备及其干物质含量测定》中 120 °C烘干法测定; 茶多酚测定按照 GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素含量的检测方法》规定方法测定; 氨基酸测定按照 GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量的测定》规定方法测定; 茶红素、茶黄素、茶褐素采用萃取分离分光光度法测定; 水浸出物测定按照 GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》规定方法测定; 黄酮测定按照三氯化铝比色法测定^[27]。

1.4 数据处理

运用 Microsoft Excel 2019 进行数据的整理计算, 实验均重复 3 次, 数据以平均数±标准偏差表示, 使用 SPSS 26.0 进行方差分析($P<0.05$ 表示差异显著)。

2 结果与分析

2.1 不同蒸压工艺对普洱茶抗氧化活性的影响

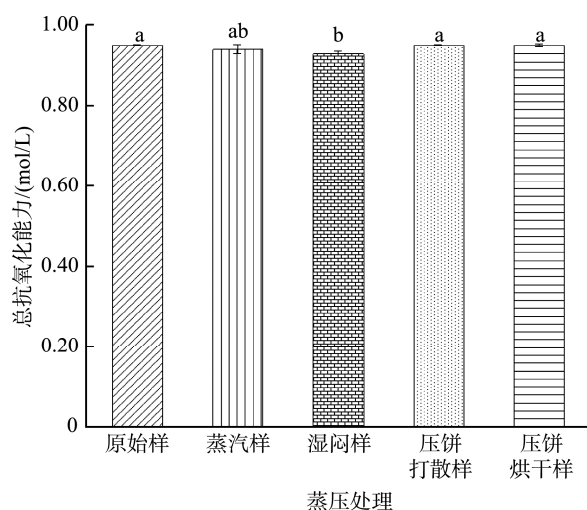
本研究在普洱茶压制环节中设置不蒸压的原始样、蒸汽样、湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样 5 种蒸压处理, 通过对不同蒸压处理普洱茶的总抗氧化能力、羟自由基清除能力、DPPH 自由基清除率和超氧阴离子自由基清除能力进行比较, 探究不同蒸压工艺对普洱茶抗氧化活性的影响。

2.1.1 不同蒸压工艺对普洱茶总抗氧化能力的影响

由图 2 可知, 普洱生茶总抗氧化能力压饼烘干样最高,

为 0.95 mol/L, 显著高于湿闷样 0.02 mol/L。原始样、压饼打散样和压饼烘干样的总抗氧化能力显著高于湿闷样的总抗氧化能力, 但相互之间差异不明显, 但又略高于蒸汽样。普洱生茶总抗氧化能力从大到小的顺序是: 压饼烘干样>原始样>压饼打散样>蒸汽样>湿闷样。

由图 3 可知, 普洱熟茶压饼烘干样的总抗氧化能力最大, 达到 0.57 mol/L, 显著高于原始样、湿闷样、压饼打散样的总抗氧化能力, 高于原始样 0.07 mol/L。压饼烘干样的总抗氧化能力显著高于原始样、湿闷样和压饼打散样的总抗氧化能力, 略高于蒸汽样。普洱熟茶总抗氧化能力从大到小的顺序是: 压饼烘干样>蒸汽样>湿闷样>压饼打散样>原始样。



注: 不同英文字母表示差异显著($P<0.05$), 图 3~9 同。

图 2 不同蒸压工艺普洱生茶总抗氧化能力

Fig.2 Total antioxidant capacity of Pu-erh raw tea under different autoclaved processes

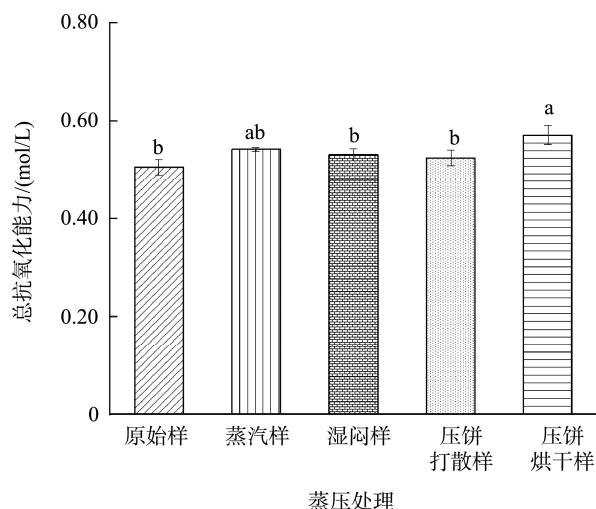


图 3 不同蒸压工艺普洱熟茶总抗氧化能力

Fig.3 Total antioxidant capacity of Pu-erh ripe tea under different autoclaved processes

2.1.2 不同蒸压工艺对普洱茶羟自由基清除能力的影响

由图 4 可知, 普洱生茶羟自由基清除能力湿闷样最高, 显著高于原始样 69.05 U/mL。蒸汽样、湿闷样、压饼烘干样的羟自由基清除能力显著高于原始样的羟自由基清除能力, 但相互之间差异不明显, 但又略高于压饼打散样。普洱生茶羟自由基清除能力从大到小的顺序是: 湿闷样>蒸汽样>压饼烘干样>压饼打散样>原始样。

由图 5 可知, 普洱熟茶羟自由基清除能力湿闷样最高, 显著高于原始样 57.72 U/mL。湿闷样、压饼打散样和压饼烘干样的羟自由基清除能力显著高于原始样和蒸汽样的羟自由基清除能力, 但相互之间差异不明显。湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样、蒸汽样的羟自由基清除能力显著高于原始样的羟自由基清除能力。普洱熟茶羟自由基清除能力从大到小的顺序是: 湿闷样>压饼烘干样>压饼打散样>蒸汽样>原始样。

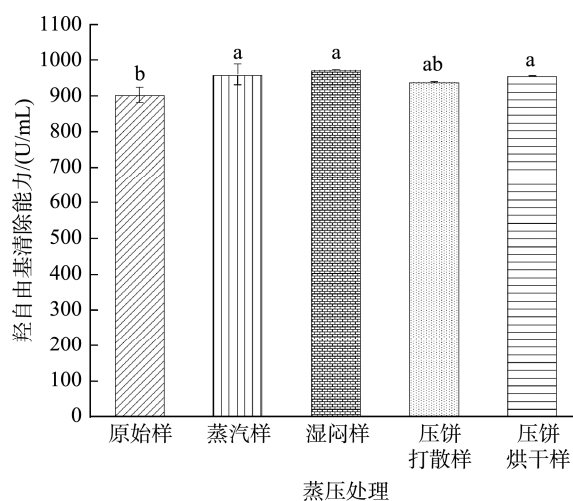


图 4 不同蒸压工艺普洱生茶羟自由基清除能力

Fig.4 Hydroxyl radical scavenging ability of Pu-erh raw tea under different autoclaved processes

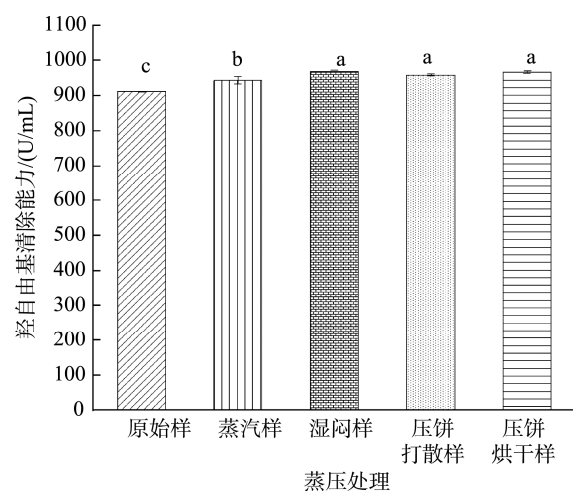


图 5 不同蒸压工艺普洱熟茶羟自由基清除能力

Fig.5 Hydroxyl radical scavenging ability of Pu-erh ripe tea under different autoclaved processes

2.1.3 不同蒸压工艺对普洱茶 DPPH 自由基清除率的影响

如图 6 所示, 普洱生茶湿闷样 DPPH 自由基清除率最大, 显著高于原始样、蒸汽样、压饼打散样、压饼烘干样, 高于压饼打散样 15.75%。压饼打散样 DPPH 自由基清除率最小, 显著低于原始样、蒸汽样、湿闷样、压饼烘干样。普洱生茶 DPPH 自由基清除率从大到小的顺序是: 湿闷样>压饼烘干样>蒸汽样>原始样>压饼打散样。

由图 7 可知, 普洱熟茶原始样 DPPH 自由基清除率最小, 显著低于蒸汽样、湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样。湿闷样 DPPH 自由基清除率最大, 显著高于原始样、蒸汽样、压饼打散样, 显著高于原始样 34.45%。压饼打散样与原始样、湿闷样、压饼烘干样差异显著, 与蒸汽样差异不显著。普洱熟茶 DPPH 自由基清除率从大到小的顺序是: 湿闷样>压饼烘干样>蒸汽样>压饼打散样>原始样。

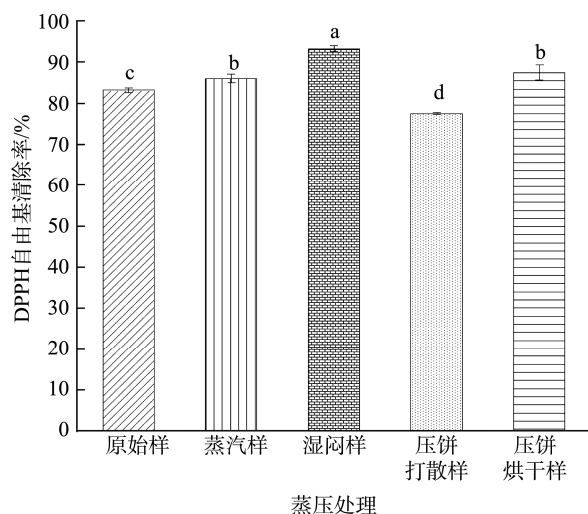


图6 不同蒸压工艺普洱生茶DPPH自由基清除率

Fig.6 DPPH free radical scavenging rate of Pu-erh raw tea by different autoclaved processes

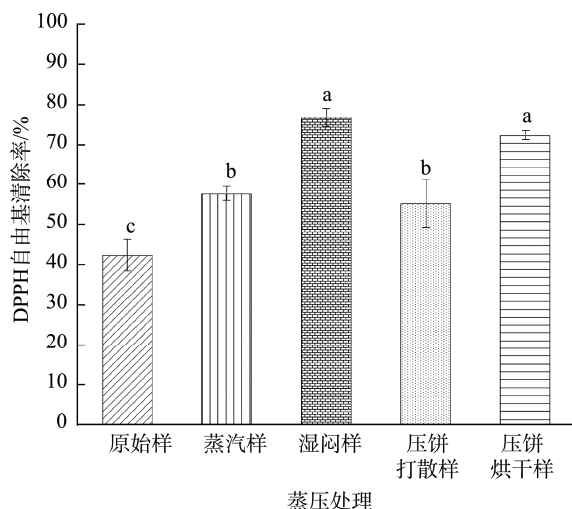


图7 不同蒸压工艺普洱熟茶DPPH自由基清除率

Fig.7 DPPH free radical scavenging rate of Pu-erh ripe tea by different autoclaved processes

2.1.4 不同蒸压工艺对普洱茶超氧阴离子自由基清除能力的影响

由图 8 可知, 普洱生茶超氧阴离子自由基清除能力湿闷样最高, 显著高于压饼打散样 763.49 U/L。蒸汽样、湿闷样、压饼烘干样的超氧阴离子自由基清除能力显著高于压饼打散样的超氧阴离子自由基清除能力, 但相互之间差异不明显, 但又略高于原始样。普洱生茶超氧阴离子自由基清除能力从大到小的顺序是: 湿闷样>压饼烘干样>蒸汽样>原始样>压饼打散样。

由图 9 可知, 普洱熟茶压饼烘干样超氧阴离子自由基清除能力最大, 为 6226.62 U/L, 显著高于压饼打散样 1065.65 U/L。压饼烘干样的超氧阴离子自由基清除能力显著高于原始样、蒸汽样、湿闷样和压饼打散样的超氧阴离子自由基清除能力, 但相互之间差异不明显。普洱熟茶

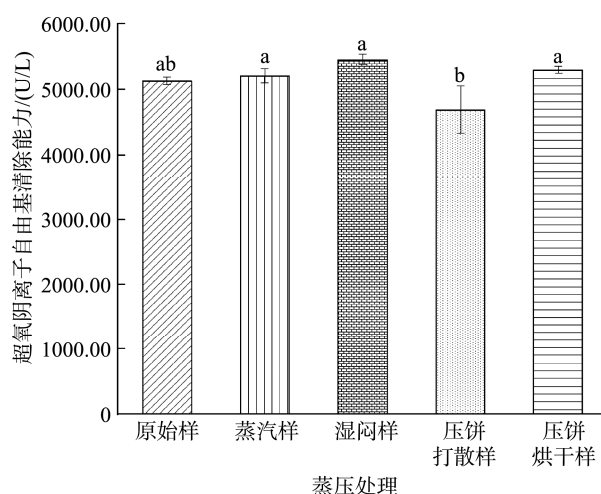


图8 不同蒸压工艺普洱生茶超氧阴离子自由基清除能力

Fig.8 Superoxide anion radical scavenging ability of Pu-erh raw tea under different autoclaved processes

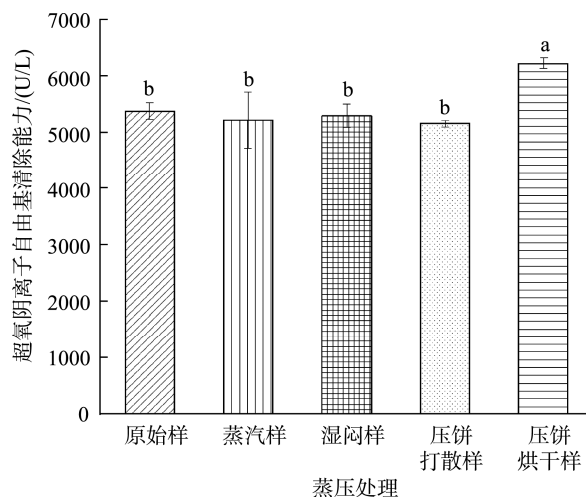


图9 不同蒸压工艺普洱熟茶超氧阴离子自由基清除能力

Fig.9 Superoxide anion radical scavenging ability of Pu-erh ripe tea under different autoclaved processes

超氧阴离子自由基清除能力从大到小的顺序是：压饼烘干样>原始样>湿闷样>蒸汽样>压饼打散样。

2.2 不同蒸压工艺对普洱茶内含成分含量的影响

由表 2 可知，生茶茶多酚含量原始样最高，压饼烘干最低，压饼打散样显著高于湿闷样和蒸汽样，生茶氨基酸含量原始样显著高于湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样和蒸汽样，湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样显著高于蒸汽样；茶黄素含量压饼烘干样最高，原始样最低，湿闷样、压饼打散样和压饼烘干样显著高于原始样和蒸汽样；茶红素含量原始样最高，压饼烘干样最低，原始样显著高于蒸汽样、湿闷样、压饼打散样和压饼烘干样，原始样、蒸汽样、湿闷样显著高于压饼打散样和压饼烘干样；茶褐素含量湿闷样最高，原始样最低，蒸汽样、湿闷样、压饼打散样显著高于原始样和压饼烘干样；水浸出物含量蒸汽样最高，原始样最低，蒸汽样、湿闷样显著高于原始样、压饼打散样、压饼烘干样，压饼打散样、压饼烘干样显著高于原始样；黄酮含量压饼烘干样最高，蒸汽样最低，原始样、压饼打散样、压饼烘干样显著高于蒸汽样和湿闷样。

熟茶茶多酚含量原始样最高，压饼打散样、压饼烘干样、蒸汽样、湿闷样差异不显著；氨基酸含量压饼烘干样最高，蒸汽样最低，压饼烘干样显著高于原始样、蒸汽样、湿闷样、压饼打散样；茶黄素含量蒸汽样最高，压饼烘干样最低，原始样、蒸汽样显著高于湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样；茶红素含量蒸汽样最高，压饼打散样最低，蒸汽样显著高于原始样、湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样，蒸汽样、原始样、湿闷样显著高于压饼打散样、压饼烘干样；茶褐素含量压饼烘干样最高，原始样最低，压饼烘干样显著高于原始样、蒸汽样、湿闷样、

压饼打散样；水浸出物含量湿闷样最高，压饼烘干样最低，湿闷样显著高于原始样、蒸汽样、压饼打散样、压饼烘干样，原始样、蒸汽样、湿闷样、压饼打散样显著高于压饼烘干样；黄酮含量原始样最高，压饼打散样最低，原始样、湿闷样显著高于蒸汽样、压饼打散样、压饼烘干样。

2.3 不同蒸压工艺普洱茶生化成分与抗氧化活性的相关性分析

为了探究普洱茶抗氧化活性与生化成分之间的相关性，测定不同蒸压工艺普洱生茶、普洱熟茶的茶多酚含量、氨基酸含量、茶黄素含量、茶褐素含量、含水量、水浸出物含量和总黄酮含量，对不同蒸压工艺普洱茶生化成分与抗氧化活性进行相关性分析^[28]。

由表 3 可知，普洱生茶中，DPPH 自由基清除率与茶多酚含量的相关系数为 0.880，具有显著相关性。超氧阴离子自由基清除能力与茶多酚含量的相关系数为 0.883，具有显著相关性。表明普洱生茶的抗氧化能力与茶多酚含量相关性更强，茶多酚是普洱生茶中的一种重要的抗氧化成分，具有抑制活性氧的生成和清除自由基的作用。

由表 4 可知，普洱熟茶抗氧化活性与茶多酚含量、氨基酸含量、茶褐素含量呈正相关。普洱熟茶中，总抗氧化能力与茶褐素含量的相关系数为 0.938，具有显著相关性。超氧阴离子自由基清除能力与茶多酚含量的相关系数为 0.991，具有极显著相关性($P<0.01$)；与氨基酸含量的相关系数为 0.983，有极显著相关性($P<0.01$)；与茶褐素含量的相关系数为 0.950，具有显著相关性。说明茶多酚含量、氨基酸含量、茶褐素含量对普洱熟茶的抗氧化性有较多贡献。

表 2 不同蒸压工艺普洱茶内含成分差异分析
Table 2 Analysis of different components of Pu-erh tea under different autoclave processes

茶样	蒸压处理	茶多酚/%	氨基酸/%	茶黄素/%	茶红素/%	茶褐素/%	水浸出物/%	黄酮/%
生茶	原始样	24.777±0.539 ^a	4.895±0.221 ^a	0.150±0.105 ^b	9.089±1.919 ^a	1.665±0.358 ^b	45.389±14.429 ^c	0.405±0.044 ^a
	蒸汽样	20.212±2.823 ^b	4.019±0.767 ^c	0.167±0.047 ^b	6.992±1.350 ^b	2.789±0.307 ^a	51.701±1.589 ^a	0.308±0.079 ^b
	湿闷样	21.296±1.861 ^b	4.566±0.013 ^b	0.405±0.259 ^a	7.837±1.223 ^b	3.078±0.260 ^a	50.258±2.127 ^a	0.375±0.031 ^b
	压饼打散样	24.515±0.875 ^a	4.542±0.022 ^b	0.452±0.148 ^a	5.685±2.062 ^b	2.564±0.251 ^a	49.681±0.855 ^b	0.413±0.068 ^a
	压饼烘干样	18.317±2.089 ^c	4.506±0.013 ^b	0.456±0.240 ^a	4.404±0.424 ^c	2.065±0.894 ^b	49.042±1.163 ^b	0.416±0.050 ^a
熟茶	原始样	24.177±0.158 ^a	4.486±0.051 ^b	0.862±0.125 ^a	1.152±0.982 ^b	5.729±0.820 ^b	40.210±2.984 ^b	0.549±0.073 ^a
	蒸汽样	18.075±1.001 ^b	4.402±0.172 ^b	0.918±0.076 ^a	1.805±0.591 ^a	6.414±0.902 ^b	39.230±2.947 ^b	0.460±0.056 ^b
	湿闷样	19.011±1.708 ^b	4.469±0.008 ^b	0.244±0.044 ^b	0.905±1.264 ^b	6.800±0.130 ^b	43.934±8.955 ^a	0.544±0.112 ^a
	压饼打散样	18.031±1.562 ^b	4.471±0.007 ^b	0.296±0.339 ^b	0.204±1.977 ^c	5.958±1.420 ^b	40.489±2.179 ^b	0.395±0.058 ^b
	压饼烘干样	18.624±1.746 ^b	4.895±0.408 ^a	0.203±0.681 ^b	0.224±1.420 ^c	10.151±1.313 ^a	37.600±1.233 ^c	0.452±0.043 ^b

注：不同字母表示组内具有显著差异($P<0.05$)。

表 3 不同蒸压工艺普洱生茶生化成分与抗氧化活性相关性分析

Table 3 Correlation analysis of biochemical components and antioxidant activities of Pu-erh raw tea under different autoclaved processes

指标	总抗氧化能力/(mol/L)	羟自由基清除能力/(U/mL)	DPPH 自由基清除率/%	超氧阴离子自由基清除能力/(U/L)
茶多酚	0.435	0.449	0.880*	0.883*
氨基酸	0.326	-0.661	-0.135	-0.092
茶黄素	0.002	0.469	0.054	-0.114
茶红素	-0.346	-0.432	0.166	0.210
茶褐素	-0.813	0.822	0.398	0.179
水浸出物	-0.543	0.875	0.262	0.108
黄酮	0.571	-0.431	-0.313	-0.309

注: 表中数值为正值, 表示具有正相关性; 表中数值为负值, 表示具有负相关性。**在 0.01 级别(双尾)相关性显著, *在 0.05 级别(双尾)相关性显著。表 4 同。

表 4 不同蒸压工艺普洱熟茶生化成分与抗氧化活性相关性分析

Table 4 Correlation analysis of biochemical components and antioxidant activities of Pu-erh ripe tea under different autoclaved processes

指标	总抗氧化能力/(mol/L)	羟自由基清除能力/(U/mL)	DPPH 自由基清除率/%	超氧阴离子自由基清除能力/(U/L)
茶多酚	0.849	0.404	0.523	0.991**
氨基酸	0.793	0.371	0.436	0.983**
茶黄素	-0.399	-0.844	-0.731	-0.408
茶红素	-0.336	-0.526	-0.339	-0.553
茶褐素	0.938*	0.543	0.645	0.950*
水浸出物	-0.553	0.168	0.237	-0.605
黄酮	-0.306	-0.396	-0.009	-0.065

2.4 不同蒸压工艺普洱茶抗氧化指标的主成分分析

对生茶不同蒸压工艺样品的 4 个共有峰的相对峰面积进行主成分分析(图 10)。生茶前 2 个主成分 PC1 特征值为 2.62, 方差贡献率为 65.6%, PC2 特征值为 0.83, 方差贡献率为 20.7%, 累积方差贡献率为 86.3%, 说明 PC1 和 PC2 这两个主成分已含样本的大部分信息^[29]。图 11 为不同蒸压工艺普洱生茶抗氧化活性的主成分分析得分图, 压饼烘干样、湿闷样和蒸汽样均在 PC1 的正向区间(第一象限和第四象限), 说明这些样品的抗氧化能力较强; 原始样、压饼打散样均在 PC1 的负向区间(第二象限和第三象限), 说明这些样本抗氧化活性较低。

对熟茶不同蒸压工艺样品的 4 个共有峰的相对峰面积进行主成分分析(图 12)。熟茶前 2 个主成分 PC1 特征值为 2.57, 方差贡献率为 64.2%, PC2 特征值为 1.01, 方差贡献率 25.4%。累积方差贡献率为 89.6%, 说明 PC1 和 PC2 这两个主成分已含样本的大部分信息^[24]。图 13 为不同蒸压工艺普洱熟茶抗氧化活性的主成分分析得分图, 压饼烘干样和湿闷样均在 PC1 的正向区间(第一象限和第四象限), 说明这些样品的抗氧化能力较强; 原始样、蒸汽样、压饼打散样均在 PC1 的负向区间(第二象限和第三象限), 说明这些样本抗氧化活性较低。

2.5 不同蒸压工艺普洱茶抗氧化指标的系统聚类分析

采用 SPSS 26 统计软件对 5 个不同蒸压工艺的普洱生茶进行系统聚类分析, 由图 14 可知, 在欧氏距离为 10 处分为两大类, 各类群间抗氧化活性差异明显。第 I 类包含蒸汽样、压饼烘干样、原始样、湿闷样 4 个样本; 第 II 类包含压饼打散样。蒸汽样、压饼烘干样、原始样的综合评分靠前, 说明这 3 种处理能有效地评价普洱生茶的抗氧化活性。

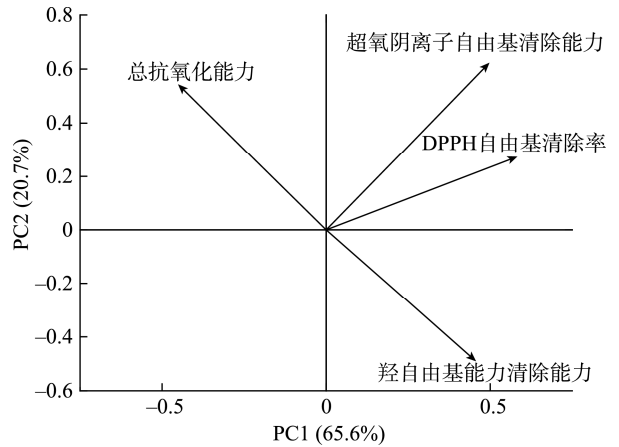


图 10 不同蒸压工艺普洱生茶抗氧化指标的主成分分析载荷图

Fig.10 Load diagram of principal component analysis for antioxidant indexes of Pu-erh raw tea under different autoclaved processes

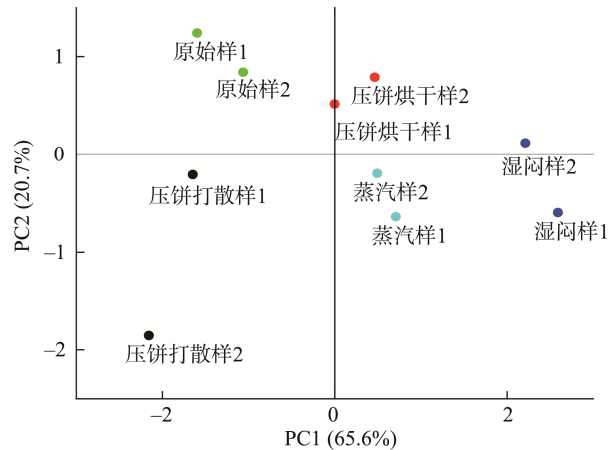


图11 不同蒸压工艺普洱生茶抗氧化指标的主成分分析得分图
Fig.11 Principal component analysis score chart of antioxidant indexes of Pu-erh raw tea under different autoclaved processes

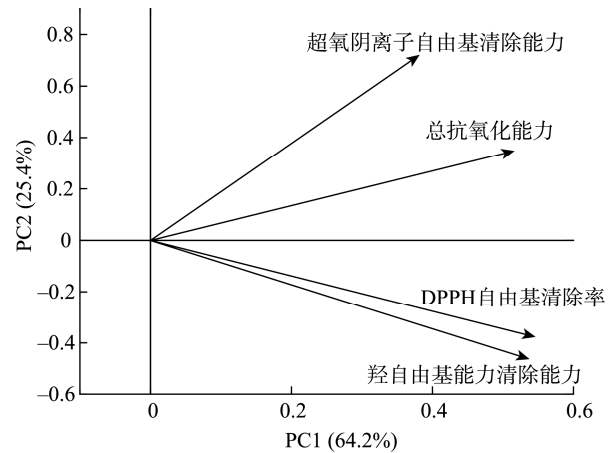


图12 不同蒸压工艺普洱熟茶抗氧化指标的主成分分析载荷图
Fig.12 Load diagram of principal component analysis for antioxidant indexes of Pu-erh ripe tea under different autoclaved processes

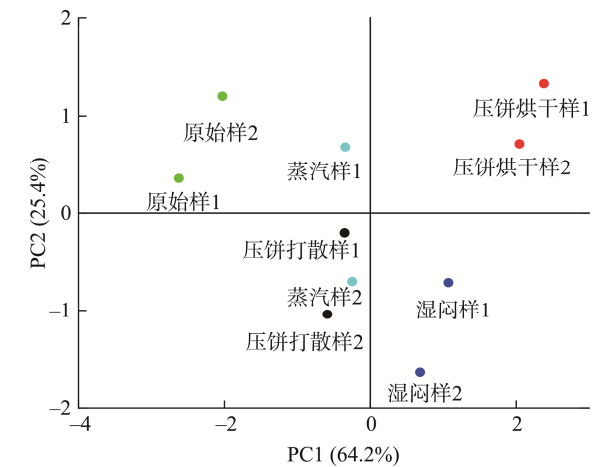


图13 不同蒸压工艺普洱熟茶抗氧化指标的主成分分析得分图
Fig.13 Principal component analysis scores of antioxidant indexes of Pu-erh ripe tea under different autoclaved processes

采用 SPSS 26 统计软件对 5 个不同蒸压工艺的普洱熟茶进行系统聚类分析, 由图 15 可知, 在欧氏距离为 10 处分为两大类, 各类群间抗氧化活性差异明显。第I类包含蒸汽样、压饼烘干样、原始样、湿闷样 4 个样本; 第II类包含压饼打散样。蒸汽样、压饼打散样、原始样、湿闷样的综合评分靠前, 说明这 4 种处理能有效地评价普洱熟茶的抗氧化活性。

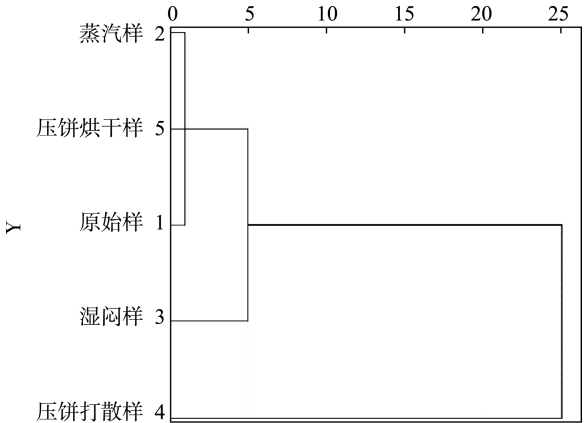


图14 不同蒸压工艺普洱生茶系统聚类分析树状图
Fig.14 Tree diagram of cluster analysis of Pu-erh raw tea system under different autoclaved processes

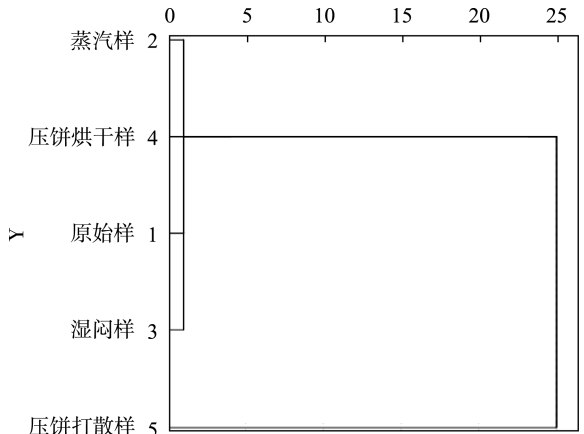


图15 不同蒸压工艺普洱熟茶系统聚类分析树状图
Fig.15 Tree diagram of cluster analysis of Pu-erh ripe tea system under different autoclaved processes

3 讨论

本研究对不同蒸压工艺处理的普洱茶抗氧化活性进行研究, 实验结果表明, 不同蒸压工艺处理的普洱茶的总抗氧化能力、羟自由基清除能力、DPPH 自由基清除率和超氧阴离子自由基清除能力存在差异。其中生茶总抗氧化能力压饼烘干样最大, 显著高于湿闷样 0.02 mol/L; 生茶羟自由基清除能力湿闷样最高, 显著高于原始样 69.05 U/mL;

生茶 DPPH 自由基清除率湿闷样最高,显著高于压饼打散样 15.75%;生茶超氧阴离子自由基清除能力湿闷样最高,显著高于压饼打散样 763.49 U/L。熟茶总抗氧化能力压饼烘干样最高,显著高于原始样 0.07 mol/L;熟茶羟自由基清除能力湿闷样最高,显著高于原始样 57.72 U/mL;熟茶 DPPH 自由基清除率湿闷样最高,显著高于原始样 34.45%;熟茶超氧阴离子自由基清除能力压饼烘干样最高,显著高于压饼打散样 1065.65 U/L。

与原始样相比,蒸汽样、湿闷样、压饼烘干样 3 种处理后的普洱茶抗氧化活性有所提高,湿闷样抗氧化能力最强。蒸汽处理主要是为了使叶片变软,从而有利于后期的压制,同时减小由于压力作用造成的茶叶断碎,对叶片的外观和内部质量产生一定的影响。实验结果表明,经过蒸汽作用处理后,普洱茶抗氧化活性有所提高,猜测是高温潮湿的过程对普洱茶的内含成分产生影响^[25],从而导致其抗氧化活性的增加。湿闷样是模拟压制工艺中除去压力的湿热作用,对样品的抗氧化能力有一定的改善,这与张丹等^[25]的研究结果一致,猜测是因为短暂的湿闷工艺会增加茶叶中的黄酮和茶多酚含量,有利于抗氧化活性的提高。由于压饼后长期的干燥和固定,普洱茶压饼烘干样的抗氧化性能比压饼打散处理有明显的提高,并且与原始样品比较,也有一定程度的提高,因此压饼后的长时间烘干是提高普洱茶抗氧化活性的重要因素。压饼打散样是将经过机械力挤压而成的饼茶重新散开,释放出饼茶中的热量,从而探索压制过程中的压力的影响。结果表明,与原始样相比,压饼打散样的普洱茶抗氧化能力下降,生茶压饼打散样 DPPH 自由基清除率下降了 5.65%,生茶超氧阴离子自由基清除能力下降了 439.75 U/L,熟茶超氧阴离子自由基清除能力下降了 218.52 U/L。

对不同蒸压工艺普洱茶生化成分与抗氧化活性进行相关性分析,结论表明普洱生茶的抗氧化能力与茶多酚含量相关性更强。杨雪梅等^[28]的研究表明,普洱生茶抗氧化活性与其生化成分呈现正相关性,其中与茶多酚和氨基酸含量呈极显著正相关,表明茶叶中茶多酚具有良好的抗氧化性能,这与本研究结果一致。不同蒸压工艺普洱熟茶的抗氧化能力与茶多酚含量、氨基酸含量、茶褐素含量相关性较强。值得注意的是,茶褐素作为普洱熟茶中重要的品质化学成分,在本研究中发现该成分与普洱茶 4 种化学分析法检测的抗氧化活性之间呈现正相关,这与杨高等^[30]的研究结果不一致,猜测是因为蒸压工艺能够提升普洱熟茶茶褐素清除自由基的能力,从而提高抗氧化活性。

对不同蒸压工艺普洱茶抗氧化活性进行主成分分析,结果表明普洱生茶压饼烘干样、湿闷样和蒸汽样具有更好的抗氧化活性;原始样、压饼打散样抗氧化活性较低。普洱熟茶压饼烘干样和湿闷样抗氧化能力较强,品质较优;原始样、蒸汽样、压饼打散样本抗氧化活性较低。

对不同蒸压工艺普洱茶抗氧化活性进行聚类分析,结果表明普洱生茶蒸压工艺中的蒸汽样、压饼烘干样、原始样的综合评分比较靠前,表明这 3 个品质指标对普洱生茶抗氧化活性影响效果较大。普洱熟茶蒸压工艺中蒸汽样、压饼打散样、原始样、湿闷样的综合评分靠前,说明这 4 种处理能有效地评价普洱熟茶的抗氧化活性。

4 结 论

本研究在普洱茶压制环节中设置不蒸压的原始样、蒸汽样、湿闷样、压饼打散样、压饼烘干样 5 种处理,初步探索了蒸压工艺对普洱茶抗氧化活性的影响,结果表明原始样和压饼打散样抗氧化活性较低,蒸汽样、湿闷样、压饼烘干样抗氧化活性较高,湿闷样抗氧化活性最高。蒸压工艺中的压饼打散处理降低普洱生茶、普洱熟茶抗氧化活性,蒸汽、湿闷、压饼后烘干处理有利于其抗氧化活性提高。普洱茶压饼是一个复杂的生物化学过程,如何有效地改进普洱茶的蒸压工艺,提高普洱茶的保健功效,是今后普洱茶压制加工研究的重要发展方向。

参考文献

- [1] ZHANG L, SHAO WF, YUAN LF, *et al.* Decreasing proinflammatory cytokine and reversing the immunosenescence with extracts of Pu-erh tea in senescence accelerated mouse (SAM) [J]. *Food Chem*, 2012, 135(4): 2222–2228.
- [2] 揭国良. 普洱茶抗氧化作用及减肥作用的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
JIE GL. Study on antioxidant effect and weight loss effect of Pu-erh tea [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [3] 王锐, 李勇. 普洱茶的化学成分及生物活性[J]. *广东化工*, 2016, 43(22): 108–109, 119.
WANG R, LI Y. Chemical composition and biological activity of Pu-erh tea [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2016, 43(22): 108–109, 119.
- [4] 苏涛, 毛永杨, 李智高. 普洱茶保健功效及其特征物质研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2019(19): 63–65.
SU T, MAO YY, LI ZG. Research progress of health care efficacy and characteristic substances of Pu-erh tea [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2019(19): 63–65.
- [5] 郑瑛珠. 茶叶的主要化学成分及其营养价值[J]. *福建茶叶*, 2020, 42(11): 21–22.
ZHENG YZ. The main chemical constituents of tea and its nutritional value [J]. *Fujian Tea*, 2020, 42(11): 21–22.
- [6] 马冰淞, 王佳莱, 徐成成, 等. 不同仓储期普洱茶(生茶)中酚类成分差异及其对体外抗氧化能力的影响[J]. *茶叶科学*, 2022, 42(1): 51–62.
MA BZ, WANG JC, XU CC, *et al.* Differences of phenolic components in Pu-erh tea (raw tea) with different storage periods and their effects on antioxidant capacity *in vitro* [J]. *Tea Sci*, 2022, 42(1): 51–62.

- [7] CARLONI P, TIANO L, PADELLA L, *et al.* Antioxidant activity of white green and black tea obtained from the same tea cultivar [J]. *Food Res Int*, 2013, 53(2): 900–908.
- [8] 姜业硕, 曹孟飞, 班秋艳, 等. 茶叶抗氧化 CNKI 文献计量及研究热点分析[J]. *茶叶*, 2022, 48(2): 69–74.
- JIANG YS, CAO MF, BAN QY, *et al.* Bibliometrics of tea antioxidant CNKI and analysis of research hotspots [J]. *Tea*, 2022, 48(2): 69–74.
- [9] 陈挺强, 刘淑敏, 黄惠华. 绿茶与红茶浸提液功能性成分含量和抗氧化能力的差异研究[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(10): 141–146, 193.
- CHEN TQ, LIU SM, HUANG HH. Study on the difference of functional component content and antioxidant capacity of green tea and black tea extract [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(10): 141–146, 193.
- [10] 刘学艳, 何鲁南, 吕才有. 普洱茶国内外研究进展及展望[J]. *中国茶叶*, 2020, 42(9): 1–7.
- LIU XY, HE LN, LV YC. Research progress and prospect of Pu-erh tea at home and abroad [J]. *China Tea*, 2020, 42(9): 1–7.
- [11] 孙振杰, 王梦馨, 崔林. 普洱茶香气成分研究进展[J]. *茶叶通讯*, 2020, 47(1): 13–19.
- SUN ZJ, WANG MX, CUI L. Research progress on aroma components of Pu-erh tea [J]. *Tea Commun*, 2020, 47(1): 13–19.
- [12] 东方, 何普明, 林智. 普洱茶的抗氧化活性研究进展[J]. *食品科学*, 2007(5): 363–365.
- DONG F, HE PM, LIN Z. Research progress on antioxidant activity of Pu-erh tea [J]. *Food Sci*, 2007(5): 363–365.
- [13] 徐阳, 郑俊, 朱云. 关于普洱茶压饼机械现存的问题与技术创新的探讨[J]. *农业机械*, 2015(15): 121–124.
- XU Y, ZHENG J, ZHU Y. Discussion on the existing problems and technological innovation of Pu-erh tea cake pressing machinery [J]. *Agric Mach*, 2015(15): 121–124.
- [14] 郑际雄. 普洱茶(生茶)紧压茶加工技术[J]. *中国茶叶*, 2017, 39(12): 32–33.
- ZHENG JX. Processing technology of pressed tea of Pu-erh tea (raw tea) [J]. *China Tea*, 2017, 39(12): 32–33.
- [15] 郑际雄. 普洱茶(熟茶)精制加工与压制过程控制因素分析[J]. *中国茶叶*, 2018, 40(1): 60–63.
- ZHENG JX. Analysis of controlling factors in the refining processing and pressing process of Pu-erh tea (ripe tea) [J]. *China Tea*, 2018, 40(1): 60–63.
- [16] 王海娟, 倪琳, 宋平顺, 等. 不同产地党参体外抗氧化活性研究[J]. *中国现代中药*, 2024, 26(6): 997–1004.
- WANG HJ, NI L, SONG PS, *et al.* *In vitro* antioxidant activity of codonopsis pilosula from different habitats [J]. *Chin Mod Med*, 2024, 26(6): 997–1004.
- [17] JAMIR T, AJUNGLA T. Seasonal variations in antioxidant capacities and phenolic contents of tea leaf extracts [J]. *Asian J Pharm Clinic Res*, 2020. DOI: 10.22159/ajpcr.2020.v13i4.36866
- [18] 吴子聪, 高嘉敏, 王飞, 等. 连艾煎的体外抗氧化活性研究[J]. *中国民族民间医药*, 2019, 28(5): 14–18, 47.
- WU ZC, GAO JM, WANG YF, *et al.* Study on the *in vitro* antioxidant activity of Lian Ai decoction [J]. *Chin Ethnic Folk Med*, 2019, 28(5): 14–18, 47.
- [19] 曲军霞, 于翠翠, 徐宏楠. 蓝莓保健食品的研发及其抗氧化活性研究[J]. *现代食品*, 2023, 29(24): 128–130.
- QU JX, YU CC, XU HN. Research and development of blueberry dietary supplement and its antioxidant activity [J]. *Mod Food*, 2023, 29(24): 128–130.
- [20] 周金伟, 陈雪, 易有金, 等. 不同类型茶叶体外抗氧化能力的比较分析[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(8): 262–269.
- ZHOU JW, CHEN X, YI YJ, *et al.* Comparative analysis of antioxidant capacity of different types of tea *in vitro* [J]. *Chin J Food*, 2014, 14(8): 262–269.
- [21] 周森. 小龙虾壳酶解液功能特性及其休闲食品开发[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- ZHOU M. Functional properties of enzymatic hydrolysate of crayfish shell and its development of snack food [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [22] 陈道国, 张国昀, 张彤, 等. 沙棘浆果中酚类物质含量与自由基清除能力相关分析[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(5): 27–33.
- CHEN DG, ZHANG GY, ZHANG T, *et al.* Correlation analysis between phenolic content and free radical scavenging ability in sea buckthorn berries [J]. *Forest Sci Res*, 2019, 32(5): 27–33.
- [23] 苏博, 付春情, 韩旺旺, 等. 乳酸菌发酵对六安瓜片茶抗氧化活性的影响[J]. *宿州学院学报*, 2020, 35(8): 63–67.
- SU B, FU CQ, HAN WW, *et al.* Effect of lactic acid bacteria fermentation on antioxidant activity of Lu'an melon slice tea [J]. *J Suzhou Univ*, 2020, 35(8): 63–67.
- [24] VO QV, HOA NT, THONG NM, *et al.* The hydroperoxyl and superoxide anion radical scavenging activity of anthocyanidins in physiological environments: Theoretical insights into mechanisms and kinetics [J]. *Phytochemistry*, 2021, 192: 112968.
- [25] 张丹, 任亨, 李博. 压饼及湿热工艺对白茶品质和抗氧化活性的影响[J]. *茶叶*, 2017, 43(1): 19–23.
- ZHANG D, REN Y, LI B. Effect of cake pressing and damp heat process on the quality and antioxidant activity of white tea [J]. *Tea*, 2017, 43(1): 19–23.
- [26] 李鑫磊, 林宏政, 郝志龙. 白茶压饼过程理化指标与感官品质的动态变化[J]. *福建农业学报*, 2017, 32(12): 1365–1369.
- LI XL, LIN HZ, HAO ZL. Dynamic changes of physicochemical indexes and sensory quality in the process of white tea cake pressing [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2017, 32(12): 1365–1369.
- [27] 李远华. 茶学综合实验[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2018.
- LI YH. Comprehensive experiment of tea science [M]. Beijing: China

Light Industry Press, 2018.

- [28] 杨雪梅, 赵建锐, 刘莹亮, 等. 不同年份普洱生茶体外抗氧化活性与生化成分相关性分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(5): 32–37.

YANG XM, ZHAO JR, LIU YL, *et al.* Correlation analysis of antioxidant activity and biochemical components *in vitro* of Pu-erh raw tea in different years [J]. Food Res Dev, 2021, 42(5): 32–37.

- [29] 谭佳威, 白洁, 田湾湾, 等. 白芍药材的质量属性研究及产地评价[J]. 天津中医药, 2019, 36(5): 504–510.

TAN JW, BAI J, TIAN WW, *et al.* Studies on quality attributes of *Paeonia lactiflora* and evaluation of its producing area [J]. Tianjin Tradit Chin Med, 2019, 36(5): 504–510.

- [30] 杨高中, 马士成, 张悦, 等. 陈化六堡茶的主要品质化学成分及其抗氧化活性分析[J]. 山西农业科学, 2022, 50(11): 1519–1526.

YANG GZ, MA SC, ZHANG Y, *et al.* Analysis of main quality chemical components and antioxidant activity of aged Liubao tea [J]. Shanxi Agric Sci, 2022, 50(11): 1519–1526.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)

作者简介



苏菁晶, 硕士研究生, 主要研究方向为茶叶生产与质量安全研究。

E-mail: 2464091470@qq.com



包 宁, 硕士研究生, 主要研究方向为茶叶生产与质量安全研究。

E-mail: 3090929671@qq.com



单治国, 教授, 主要研究方向为茶叶生产与质量安全。

E-mail: 353879230@qq.com



张春花, 副教授, 主要研究方向为普洱茶加工关键技术与品质形成。

E-mail: 190888358@qq.com