

不同虫茶及其植物原料的抗氧化作用效果比较

袁冬寅¹, 张芬¹, 陈家献¹, 欧淑琼¹, 彭靖茹¹, 张栩浩¹,
黄寿辉¹, 温立香^{1*}, 林玲^{2*}

(1. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 南宁 530001; 2. 四川农业大学园艺学院, 成都 611130)

摘要: **目的** 比较研究酸枣叶虫茶、茶叶虫茶及其植物原料的体外抗氧化能力。**方法** 采用高效液相色谱法及分光光度法等方法检测酸枣叶、茶叶、酸枣叶虫茶及茶叶虫茶中多酚、总黄酮、咖啡碱、游离氨基酸及可溶性糖含量, 并以自由基的清除能力及铁离子还原力作为抗氧化能力的评价指标。**结果** 茶叶中多酚含量最高, 显著高于酸枣叶及两种虫茶($P<0.05$); 酸枣叶中总黄酮、咖啡碱及可溶性糖的含量最高, 均显著高于茶叶及两种虫茶($P<0.05$), 且酸枣叶虫茶不含咖啡碱; 茶叶虫茶的游离氨基酸含量最高, 显著高于酸枣叶虫茶及植物原料($P<0.05$); 在抗氧化能力测定中, 茶叶对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基、羟自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基(superoxide anion radicals, $\cdot\text{O}_2^-$)、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]阳离子自由基的清除能力及铁还原能力最高, 均显著高于酸枣叶及两种虫茶($P<0.05$), 而茶叶虫茶的抗氧化活性最弱。Spearman 相关性分析表明, 4个样品的 DPPH 自由基、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 、ABTS 阳离子自由基清除能力、铁还原力及抗氧化效能综合指数均与多酚、可溶性糖、游离氨基酸含量的相关系数较高, 其与多酚、可溶性糖含量分别呈极显著、显著正相关($P<0.01$, $P<0.05$), 与游离氨基酸含量均呈显著负相关($P<0.05$)。**结论** 植物原料的抗氧化活性强于虫茶, 且酸枣叶虫茶强于茶叶虫茶, 多酚、可溶性糖是决定两种虫茶及其植物原料抗氧化活性的重要物质。

关键词: 虫茶; 植物原料; 活性物质; 抗氧化活性; 相关性

Comparison of antioxidant effects of different insect teas and their plant raw materials

YUAN Dong-Yin¹, ZHANG Fen¹, CHEN Jia-Xian¹, OU Shu-Qiong¹, PENG Jing-Ru¹,
ZHANG Xu-Hao¹, HUANG Shou-Hui¹, WEN Li-Xiang^{1*}, LIN Ling^{2*}

(1. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China; 2. College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdou 611130, China)

基金项目: 广西农业科学院基本科研业务专项项目(桂农科 2023YM12)、国家现代农业产业体系广西茶叶创新团队建设专项(nycytxgxcxt-d-18-06)、广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2021YT145)

Fund: Supported by the Special Project on Basic Research Operations of Guangxi Academy of Agricultural Sciences (GuiNongKe 2023YM12), the Special Funds for the Construction of Guangxi Tea Innovation Team of National Modern Agricultural Industrial System (nycytxgxcxt-d-18-06), and the Special Project for Basic Scientific Research Operations of Guangxi Academy of Agricultural Sciences (GuiNongKe 2021YT145)

***通信作者:** 温立香, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为茶叶加工与审评。E-mail: 864655377@qq.com

林玲, 博士, 讲师, 主要研究方向为茶叶加工及功能成分应用。E-mail: linling941106@sina.com

***Corresponding author:** WEN Li-Xiang, Master, Senior Engineer, Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China. E-mail: 864655377@qq.com

LIN Ling, Ph.D, Lecturer, Sichuan Agricultural University, Chengdou 611130, China. E-mail: linling941106@sina.com

ABSTRACT: Objective To compare and study the antioxidant capacity of *Choerospondias axillaris* insect tea, tea insect tea and their plant materials *in vitro*. **Methods** The content of polyphenols, total flavonoids, caffeine, free amino acids and soluble sugars in *Choerospondias axillaris* leaves, tea leaves, *Choerospondias axillaris* and tea leaves were detected by high performance liquid chromatography and spectrophotometry, and the scavenging ability of free radicals and reducing power of iron ions were used as evaluation indexes of antioxidant capacity. **Results** Tea leaves had the highest content of polyphenols, which was significantly higher than that of *Choerospondias axillaris* and 2 kinds of insect tea ($P<0.05$). *Choerospondias axillaris* leaves possess the highest content of total flavonoids, caffeine and soluble sugars, which was higher than those of other samples ($P<0.05$), whereas caffeine was not detected in the *Choerospondias axillaris* insect tea. However, the *Camellia sinensis* insect tea with the highest content of free amino acids was significantly higher than that of other samples ($P<0.05$). The scavenging capacity against 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical, hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$), superoxide anion radicals ($\cdot\text{O}_2^-$), 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt (ABTS) cation radical and ferric reducing antioxidant power of tea leaves were the highest, which were significantly higher than those in the *Choerospondias axillaris* and 2 kinds of insect teas ($P<0.05$), whereas *Camellia sinensis* insect tea had the weakest antioxidant activity. According to the results of Spearman correlation analysis, the scavenging ability of DPPH radical, $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}_2^-$, ABTS cation radical, ferric reducing antioxidant power and the antioxidant potency composite index of 4 samples were highly correlated with the content of polyphenols, soluble sugars and free amino acids, which showed highly significant and significant positive correlation with the contents of polyphenol and soluble sugars, respectively ($P<0.01$, $P<0.05$), and significant negative correlation with free amino acids content ($P<0.05$). **Conclusion** The antioxidant activity of plant raw materials is stronger than that of insect tea, and the *Choerospondias axillaris* insect tea is stronger than that of tea insect tea. Polyphenols and soluble sugars are important substances that determine the antioxidant activity of 2 kinds of insect teas and their plant raw materials.

KEY WORDS: insect tea; plant raw material; bioactive compounds; antioxidant activity; correlation

0 引言

虫茶是我国所特有的一种集营养和药用价值于一体的林业资源昆虫产品,由特种昆虫取食特殊植物原料后的排泄物经过筛分、灭菌等工艺加工而成。现发现虫茶的产茶昆虫有化香夜蛾、米缟螟、白条谷螟等,植物原料有南酸枣叶、化香树叶、苦丁茶、山楂叶、茶叶等^[1]。茶叶和南酸枣均属于药食同源资源,其中,茶叶作为世界上消费仅次于水的第二大非酒精饮料,因其独特的风味和保健功效而备受人们喜爱^[2]。南酸枣(*Choerospondias axillaris*)又名酸枣,是多用途的优良植物^[3]。

茶产品的抗氧化作用是衡量其营养及保健价值的主要因素之一,被认为是其抗癌最重要的机制^[4]。虫茶作为特殊的茶产品,产茶昆虫及寄生植物种类是影响虫茶营养价值与功能成分的主要因素^[1],由于产茶昆虫和植物种类的不同,产生的虫茶种类也不同,因此不同的虫茶产品其抗氧化活性也有一定差别。向玉勇等^[5]发现金银花尺蠖虫茶对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基、羟自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基(superoxide anion radicals, $\cdot\text{O}_2^-$)、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]阳离子自由基等及卵黄脂蛋白脂质过氧化均具有一定的清除能力与抑制作用;赵欣等^[6]比较研究虫茶及植物原料苦丁茶的抗氧化效果发现,虫茶比原料的作用效果更好。现研究发现茶叶与南酸枣叶(酸枣叶)均富含黄酮、酚类、多糖、生物碱等活性成分,为其具有多种功效提供了物质基础^[7-8]。目前,科研人员通过多种抗氧化活性评价方法已证明茶叶及酸枣叶均具有较强的抗氧化能力,且茶多酚是茶叶抗氧化能力的最主要影响因素之一^[3-4]。本课题组发现融安酸枣叶虫茶及茶叶虫茶的产茶昆虫均为双直巢螟(*Hypsopygia repetita*),是广西独有的一种产茶昆虫,且安全性毒理学研究发现其生产的虫茶是安全无毒性的^[9]。然而目前,产茶昆虫为双直巢螟的酸枣叶虫茶、茶叶虫茶是否比植物原料南酸枣叶(酸枣叶)、茶叶的抗氧化能力更好,以及不同植物原料对产茶昆虫为双直巢螟的虫茶抗氧化活性影响等科学问题仍有待探索。因此,本研究以产茶昆虫为双直巢螟的酸枣叶虫茶、茶叶虫茶及其植物原料酸枣叶、茶叶为实验对象,探究两种虫茶及其植物原料的体外抗氧化作用效果,并通过分析虫茶及植物原料活性成分含量与其抗氧化能力的相关性,

探讨两种虫茶及植物原料抗氧化活性物质的主要来源,为推动膳食营养干预多元化发展,促进虫茶深层次的利用及天然抗氧化药物的开发提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

植物原料酸枣叶与茶叶鲜叶于 5~6 月份采自融安车田茶叶合作社基地。酸枣叶虫茶、茶叶虫茶均为购买于融安车田茶叶合作社 5~6 月份收集的半成品。植物原料鲜叶及虫茶半成品均经 90℃热风干燥至含水量为 9%~10%,备用。

DPPH、2,4,6-三吡啶基三嗪(tripyridyltriazine, TPTZ)、水溶性维生素 E (Trolox)、ABTS(纯度 98%)、抗坏血酸(vitamin C, VC)(纯度 99%)、福林酚、焦性没食子酸(分析纯)(上海源叶生物科技有限公司);没食子酸、咖啡碱、谷氨酸、葡萄糖、芦丁等标准品(纯度≥99%,美国 Sigma 公司);甲醇(色谱纯,德国默克公司);蒽酮、磷酸氢二钠、邻苯三酚、氧化镁、盐酸、碳酸钠、硝酸铝、醋酸钾(分析纯,中国国药集团有限公司);乙酸钠缓冲液、Tris-HCl 缓冲液(分析纯,北京雷根生物技术有限公司);30%过氧化氢(分析纯,成都金山化学试剂有限公司);过二硫酸钾(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);茚三酮、甲醇、无水乙醇(分析纯,成都市科龙化工试剂厂);硫酸亚铁、水杨酸(分析纯,天津欧博凯化工有限公司);三氯化铁(分析纯,天津奥普升化工有限公司)。

1.2 仪器与设备

RE-5210A 型旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂);BSA223S 型电子天平(精度 0.001 g,德国赛多利斯公司);UV-1800PC 型紫外可见分光光度计(日本岛津公司);HWS-24 型恒温水浴锅(上海一恒科学仪器有限公司);TD4 型低速台式离心机(上海卢湘仪离心机仪器有限公司);Agilent 1260 型高效液相色谱仪(美国安捷伦公司);ALPHA1-2 LD plus 型冷冻干燥机(德国 CHRIST 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

称取酸枣叶、茶叶、酸枣叶虫茶及茶叶虫茶各 120.00 g,分别粉碎后,按茶水体积比 1:10 在沸水浴锅中浸提 30 min,重复浸提 1 次,过滤,合并茶汤,然后使用旋转蒸发器于 50℃下浓缩至固态物含量约 30%后,冷冻干燥分别得到干粉 34.15、35.39、22.20、17.59 g,密封袋收集干粉,置于冰箱保存待用。

1.3.2 虫茶及其植物原料的干粉品质成分检测

多酚检测采用 GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》;咖啡碱检测采用 GB/T 8312—2013《茶 咖啡碱测定》第一法高效液相色谱法;总

黄酮检测采用 SN/T 4592—2016《出口食品中总黄酮的测定》;游离氨基酸采用 GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量的测定》;可溶性糖采用蒽酮-硫酸法^[10]。

1.3.3 抗氧化活性检测

(1) DPPH 自由基清除能力测定

分别取 2.00 mL 质量浓度为 0.20、0.15、0.05、0.01 mg/mL、1.00 μL/mL 的虫茶及植物原料和 2.00 mL 0.20 mmol/L 的 DPPH 无水乙醇溶液混匀,在室温、避光条件下放置 30 min,于 517 nm 处测定吸光值(A_x)。同时测定 2.00 mL 样品溶液与 2.00 mL 无水乙醇的吸光值(A_{x0}),2.00 mL DPPH 溶液与 2.00 mL 蒸馏水的吸光值(A_0)^[11]。每组平行测定 3 次,根据公式(1)计算样品对 DPPH 自由基的清除率。

$$\text{清除率}/\%=[1-(A_x-A_{x0})/A_0]\times 100 \quad (1)$$

(2) $\cdot O_2$ 清除能力测定

取 3.00 mL Tris-HCl 缓冲液(pH 8.20, 0.05 mol/L)置于 25℃水浴中预热 20 min,分别加入 1.00 mL 质量浓度为 2.50、2.00、1.50、1.00、0.50 mg/mL 的虫茶及植物原料和 0.50 mL 30.00 mmol/L 的邻苯三酚溶液,混匀后于 25℃水浴中反应 6 min,再加入 1.00 mL 1.00 mol/L 的 HCl 终止反应,于 420 nm 处测定吸光值 A_1 ^[12]。空白组以同体积的蒸馏水代替样品,吸光值为 A_0 。为避免样品可能在 420 nm 处有吸收产生的误差,用同体积的盐酸代替邻苯三酚溶液,吸收值为 A_2 。根据公式(2)计算 $\cdot O_2$ 清除率。

$$\text{清除率}/\%=[1-(A_1-A_2)/A_0]\times 100 \quad (2)$$

(3) $\cdot OH$ 清除率测定

分别取 1.00 mL 质量浓度为 2.00、1.50、1.00、0.50、0.10 mg/mL 的虫茶及植物原料于试管中,再依次加入 2.00 mmol/L $FeSO_4$ 溶液 1.00 mL、2.00 mmol/L H_2O_2 溶液 1.00 mL,混匀,室温条件下反应 10 min,最后加入 2.00 mmol/L 水杨酸乙醇溶液 1.00 mL,37℃水浴加热 30 min,于 510 nm 测定吸光值。蒸馏水做空白对照^[13]。根据公式(3)计算 $\cdot OH$ 的清除率,式中, A_i 为加入样品溶液后的吸光值, A_0 为空白对照液的吸光值, A_{i0} 为乙醇代替水杨酸后的吸光值。

$$\text{清除率}/\%=[1-(A_i-A_{i0})/A_0]\times 100 \quad (3)$$

(4) ABTS 阳离子自由基清除率的测定

参照 YUE 等^[14]的方法,将 7.00 mmol/L ABTS 溶液与 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液按体积比 1:1 混匀避光放置 12 h,得到 ABTS 阳离子储备液。使用前用甲醇稀释,形成 734 nm 处吸光值为 0.70±0.02 的工作液。分别取 0.30 mL 质量浓度为 0.20、0.15、0.10、0.05、0.01 mg/mL 的虫茶及植物原料和 4.00 mL ABTS 阳离子工作液混匀、振荡 30 s,常温下避光反应 6 min,于 734 nm 测定吸光值(A_1)。0.30 mL 样品溶液与 4.00 mL 甲醇混合测定的吸光值为 A_2 ,0.30 mL 蒸馏水与 4.00 mL ABTS⁺工作液混合测定的吸光值为 A_0 。根据公式(4)计算 ABTS 阳离子自由基的清除率。

$$\text{清除率}/\%=[1-(A_1-A_2)/A_0]\times 100 \quad (4)$$

(5)铁离子还原能力的测定

将 pH 3.60 0.30 mol/L 醋酸缓冲液、10.00 mmol/L TPTZ 溶液、20.00 mmol/L FeCl₃ 溶液按体积比 10:1:1 混匀, 37°C 保温 30 min, 得铁离子还原/抗氧化能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)工作液。分别取 30.00 μL 质量浓度为 0.20、0.15、0.10、0.05、0.01 mg/mL 的虫茶及植物原料与 3.70 mL FRAP 工作液混匀, 置于 37°C 下反应 20 min, 测定 593 nm 处的吸光值^[15]。

以上 5 种检测抗氧化能力的方法, 均以 VC 的 DPPH 自由基、·O₂⁻及·OH 清除能力与 Trolox 的 ABTS 阳离子自由基清除能力及铁还原力能力制作标准曲线, 计算样品的半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC₅₀)和 VC 当量抗氧化能力(ascorbic acidequivalent antioxidant capacity, AEAC)或 Trolox 当量抗氧化能力(troloxequivalent antioxidant capacity, TETA)。

(6)抗氧化效能综合指数

参考 SEERAM 等^[16]的方法并作适当修改, 以 DPPH 自由基、·OH、·O₂⁻、ABTS 阳离子自由基的清除能力及铁离子还原力为基础, 赋予相同权重 0.20, 根据公式(5)计算抗氧化效能综合指数(antioxidant potency composite, APC), APC 指数越高, 说明抗氧化能力越强。

抗氧化效能综合指数/%=

$$\sum \left(\frac{\text{样品抗氧化能力值}}{\text{该方法下测定抗氧化最大值}} \right) \times \text{权重} \times 100 \quad (5)$$

1.4 数据处理

实验重复测定 3 次, 且所有数据均以平均值±标准偏差表示, 利用 SPSS 23.00 统计软件对数据进行分析; 两组间差异采用 *t* 检测, 多组间比较采用单因素方差分析, 比较各组间的统计学差异; 相关性分析采用 Spearman; 利用 Origin 2017 绘图。

2 结果与分析

2.1 酸枣叶虫茶、茶叶虫茶及其植物原料的干粉生化成分含量

寄生植物种类不同会导致虫茶的营养成分有所差异^[1]。同种产茶昆虫双直巢螟取食不同植物原料酸枣叶、

茶叶所得的虫茶物质成分如表 1 所示, 茶叶的多酚含量最高, 为 38.74%, 显著高于茶叶虫茶、酸枣叶虫茶及酸枣叶 ($P<0.05$); 酸枣叶的总黄酮、咖啡碱及可溶性糖含量最高, 分别为 6.03%、6.42%、13.93%, 显著高于茶叶及两种虫茶 ($P<0.05$), 而酸枣叶虫茶未检测出咖啡碱; 茶叶虫茶的游离氨基酸含量最高, 为 14.93%, 显著高于酸枣叶虫茶、茶叶及酸枣叶 ($P<0.05$); 植物原料酸枣叶、茶叶的多酚、总黄酮、咖啡碱及可溶性糖含量均显著高于酸枣叶虫茶及茶叶虫茶 ($P<0.05$), 而茶叶虫茶及酸枣叶虫茶的游离氨基酸含量均显著高于酸枣叶及茶叶 ($P<0.05$), 这可能是因为植物原料中的多酚、总黄酮、咖啡碱、可溶性糖经产茶昆虫新陈代谢后被分解转化成其他物质, 或被昆虫自身吸收利用, 从而导致虫茶中这些物质含量低于植物原料, 而游离氨基酸含量升高可能是因为植物原料中的蛋白质经产茶昆虫特殊的生理生化反应而被水解成氨基酸^[17]。其次, 植物原料茶叶的多酚含量显著高于酸枣叶 ($P<0.05$), 酸枣叶的总黄酮、咖啡碱含量显著高于茶叶 ($P<0.05$), 但是茶叶虫茶的多酚含量显著低于酸枣叶虫茶 ($P<0.05$), 酸枣叶虫茶的总黄酮、咖啡碱含量显著低于茶叶虫茶 ($P<0.05$), 这可能是因为不同的植物原料营养物质存在很大的差异, 会诱导昆虫肠道的微生物结构与多样性、消化吸收能力产生一定的差异, 从而导致产茶昆虫双直巢螟对茶叶及酸枣叶的营养成分消化吸收能力不同^[18]。

2.2 DPPH 自由基清除能力

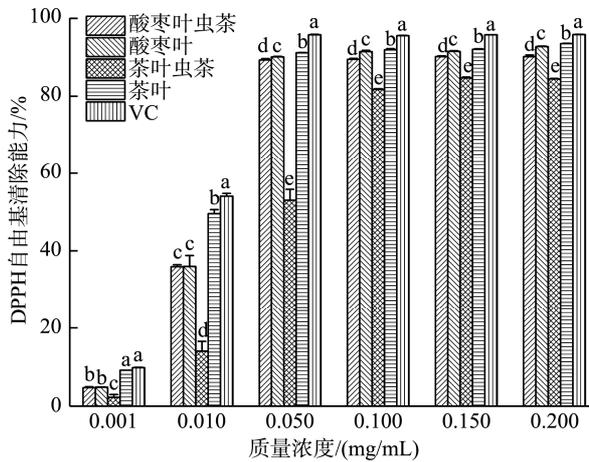
DPPH 自由基是一种稳定的氮中心自由基, 被广泛用于评价抗氧化剂的清除活性^[19]。由图 1 可知, 酸枣叶虫茶、茶叶虫茶及其植物原料、对照 VC 对 DPPH 自由基的清除能力均随着浓度的升高而先升后趋向于平稳。赵欣等^[6]进行苦丁茶虫茶的体外抗氧化实验发现, 苦丁茶虫茶对 DPPH 自由基具有清除能力, 且在一定的浓度范围内, 清除力与浓度存在剂量依赖性, 与本研究结果一致。当质量浓度为 0.150 mg/mL 时, 酸枣叶虫茶及茶叶虫茶的 DPPH 自由基清除率达到最高, 分别为 90.19%、84.68%; 质量浓度为 0.200 mg/mL 时, 酸枣叶、茶叶及对照 VC 的 DPPH 自由基清除率才达到最高, 分别为 92.72%、93.46%、95.82%。当质量浓度为 0.001~0.200 mg/mL 时, 酸枣叶虫

表 1 两种虫茶及其植物原料的干粉生化成分含量(%)

Table 1 Content of biochemical components in dry powder of 2 kinds of insect teas and their plant raw materials (%)

种类/成分	多酚	总黄酮	咖啡碱	游离氨基酸	可溶性糖
茶叶虫茶	12.50±0.01 ^d	2.37±0.04 ^c	1.36±0.06 ^c	14.93±0.19 ^a	3.29±0.10 ^d
酸枣叶虫茶	17.89±0.15 ^c	1.54±0.07 ^d	ND	11.83±0.08 ^b	6.78±0.13 ^c
酸枣叶	23.66±0.49 ^b	6.03±0.27 ^a	6.42±0.20 ^a	2.39±0.00 ^c	13.93±0.11 ^a
茶叶	38.74±1.20 ^a	5.39±0.17 ^b	5.89±0.27 ^b	2.52±0.01 ^c	11.88±0.22 ^b

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); ND 表示未检出, 下同。



注: 同浓度上标的不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图 1 两种虫茶及其植物原料的 DPPH 自由基清除能力
Fig.1 DPPH radical scavenging ability of 2 kinds of insect tea and their plant raw materials

茶及酸枣叶对 DPPH 自由基的清除能力均显著高于茶叶虫茶 ($P < 0.05$); 茶叶对 DPPH 自由基的清除能力均显著高于酸枣叶、茶叶虫茶及酸枣叶虫茶 ($P < 0.05$); 除质量浓度为 0.001 mg/mL 与 0.010 mg/mL 时, 酸枣叶与酸枣叶虫茶之间无显著差异之外 ($P > 0.05$), 酸枣叶在其他质量浓度之下对 DPPH 自由基的清除能力均显著高于酸枣叶虫茶 ($P < 0.05$)。经分析得, 酸枣叶虫茶及其植物原料酸枣叶、茶叶虫茶及其植物原料茶叶、VC 的 IC_{50} 分别为 15.00、14.00、40.00、9.00、7.00 $\mu\text{g/mL}$, 远低于苦丁茶虫茶水提取物清除 DPPH 自由基的 IC_{50} (0.26 mg/mL)^[6]。综上所述, 5 种物质清除 DPPH 自由基能力从高到低依次是 VC、茶叶、酸枣叶、酸枣叶虫茶、茶叶虫茶。

2.3 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力

$\cdot\text{O}_2^-$ 是生物体内主要的自由基之一。研究发现能有效抑制 $\cdot\text{O}_2^-$ 活性的物质显示其对机体有一定的抗氧化作用^[20]。由图 2 可知, 两种虫茶及其植物原料、VC 对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除能力存在剂量依赖性, 质量浓度越大, 其 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力则越强, 与向玉勇等^[5]研究发现金银花尺蠖幼虫粪便乙醇提取物对 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除率随浓度的上升而逐渐增加的实验结果一致。当质量浓度为 1.000 mg/mL 时, 茶叶虫茶的 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力显著强于酸枣叶虫茶 ($P < 0.05$), 而在其他浓度下, 两种虫茶的 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力差异均不显著 ($P > 0.05$)。在质量浓度为 0.500~2.000 mg/mL 之间时, 茶叶的 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力均显著高于酸枣叶 ($P < 0.05$), 但当质量浓度高达 2.500 mg/mL 时, 茶叶与酸枣叶清除 $\cdot\text{O}_2^-$ 能力无显著差异 ($P > 0.05$)。在质量浓度为 0.500~2.500 mg/mL 之间时, 酸枣叶与酸枣叶虫茶的 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力均无显著差异 ($P > 0.05$)。除质量浓度(0.500 mg/mL)较低时, 茶叶的 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力与茶叶虫茶无显著差异

($P > 0.05$)之外, 在质量浓度为 1.000~2.500 mg/mL 之间, 茶叶对 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力均显著高于茶叶虫茶 ($P < 0.05$)。经分析得, 酸枣叶虫茶、酸枣叶、茶叶虫茶、茶叶及 VC 的 IC_{50} 分别为 1.63、1.60、1.79、0.97、0.87 mg/mL, 说明清除 $\cdot\text{O}_2^-$ 的能力从高至低依次是 VC、茶叶、酸枣叶、酸枣叶虫茶、茶叶虫茶。

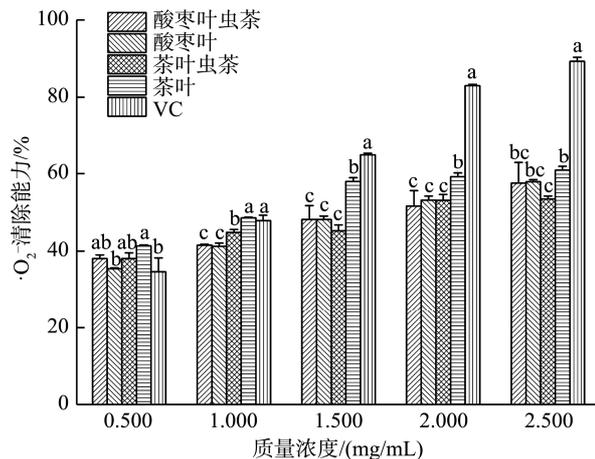


图 2 两种虫茶及其植物原料的 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除能力
Fig.2 The $\cdot\text{O}_2^-$ scavenging ability of 2 kinds of insect tea and their plant raw materials

2.4 $\cdot\text{OH}$ 清除能力

$\cdot\text{OH}$ 是生物系统中产生的自由基中最有害且最活泼的自由基, 可与活细胞中的任何分子发生反应而造成损害, 且反应速度很快^[19]。由图 3 可知, 酸枣叶虫茶、茶叶虫茶对 $\cdot\text{OH}$ 清除率均随着浓度的增加而升高, 而酸枣叶、茶叶与对照 VC 对 $\cdot\text{OH}$ 清除率均随着浓度的增加而先升高后趋向于平稳。在质量浓度为 1.000 mg/mL 时, 酸枣叶虫茶、酸枣叶、茶叶虫茶及茶叶对 $\cdot\text{OH}$ 清除率分别为 80.53%、93.84%、78.96%、99.90%, 远高于同质量浓度下苦丁茶虫茶水提取物对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率(59.30%)^[6]。当质量浓度为 2.000 mg/mL 时, 酸枣叶虫茶、酸枣叶、茶叶虫茶及茶叶对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率达到最大, 分别为 95.60%、96.49%、91.10%、99.95%, 这可能是因为虫茶及植物原料中多酚等活性成分具有酚羟基等给电子基团, 能与 $\cdot\text{OH}$ 充分发生氧化还原反应, 从而达到清除 $\cdot\text{OH}$ 的目的^[21]。此外, 两种虫茶及植物原料对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率存在一定的剂量依赖性, 与敖纯^[22]研究虫茶醇提取物对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率与其剂量呈正相关的实验结果一致。当质量浓度为 0.100、1.500、2.000 mg/mL 时, 酸枣叶虫茶的 $\cdot\text{OH}$ 清除率显著高于茶叶虫茶 ($P < 0.05$), 但当质量浓度为 0.500 mg/mL 时, 茶叶虫茶的 $\cdot\text{OH}$ 清除率显著高于酸枣叶虫茶 ($P < 0.05$)。茶叶在质量浓度为 0.100、1.000、1.500、2.000 mg/mL 时对 $\cdot\text{OH}$ 清除率均显著高于酸枣叶 ($P < 0.05$)。在质量浓度为 0.100~1.500 mg/mL 之间时, 植物原料酸枣叶对 $\cdot\text{OH}$ 清除率均显著高于酸枣叶虫茶 ($P < 0.05$)。

在质量浓度为 0.100~2.000 mg/mL 之间时, 植物原料茶叶对·OH 清除率显著高于茶叶虫茶($P<0.05$)。在质量浓度(0.100 mg/mL)较低时, 虫茶及植物原料对·OH 清除率均显著高于对照 VC ($P<0.05$)。经分析得, 酸枣叶虫茶、酸枣叶、茶叶虫茶、茶叶及对照 VC 的 IC_{50} 分别为 0.23、0.14、0.25、0.13、0.14 mg/mL。综上所述, 清除·OH 的能力依次是茶叶>VC、酸枣叶>酸枣叶虫茶>茶叶虫茶。

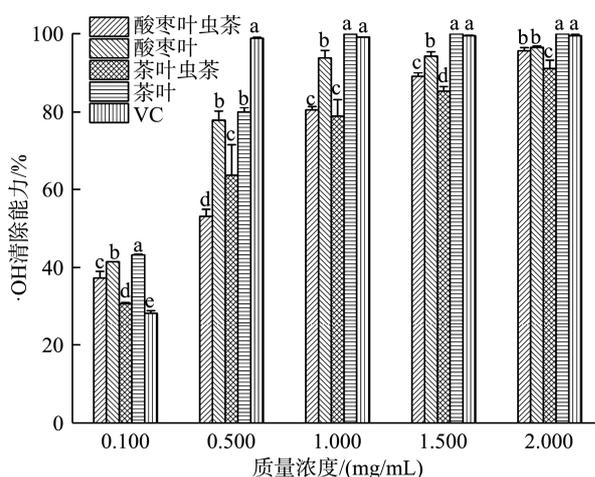


图 3 两种虫茶及其植物原料的·OH 清除能力
Fig.3 The ·OH scavenging ability of 2 kinds of insect tea and their plant raw materials

2.5 ABTS 阳离子自由基清除能力

ABTS 法与抗氧化剂的生物活性相关性高, 是一种快速、简单, 并广泛应用于物质体外总抗氧化能力的测定方法^[23]。由图 4 得, 酸枣叶虫茶、酸枣叶、茶叶虫茶、茶叶及对照 Trolox 的 ABTS 阳离子自由基清除率均随着浓度的增加而先上升后趋向于平稳。在质量浓度为 0.200 mg/mL 时, 酸枣叶虫茶、酸枣叶、茶叶虫茶及茶叶对 ABTS 阳离子自由基的清除率无显著差异($P>0.05$), 且均达到最高, 分别为 99.85%、99.71%、100.00%、100.00%, 这可能是因为在此浓度下, 两种虫茶及其植物原料中能与 ABTS 阳离子自由基反应的酚类等活性物质含量达到饱和, 充分反应。根据化学反应动力学原理, 在较低质量浓度范围内两种虫茶及其植物原料的 ABTS 阳离子自由基清除率与酚类等活性物质浓度呈正比, 反应增长速率较快。当质量浓度增加至 0.200 mg/mL 时, ABTS 阳离子自由基清除率的增长速率趋向于 0, 但此时最终的清除率也会高于低浓度下的清除率。在低质量浓度(0.010 mg/mL)下, 茶叶虫茶的 ABTS 阳离子自由基清除能力显著高于酸枣叶虫茶($P<0.05$); 在质量浓度为 0.050、0.100、0.150 mg/mL 时, 酸枣叶虫茶的 ABTS 阳离子自由基清除能力均显著高于茶叶虫茶($P<0.05$)。在质量浓度为 0.050、0.100 mg/mL 时, 茶叶的 ABTS 阳离子自由基清除能力显著高于酸枣叶

($P<0.05$)。在质量浓度为 0.010~0.100 mg/mL 之间时, 植物原料酸枣叶对 ABTS 阳离子自由基清除能力显著高于酸枣叶虫茶($P<0.05$)。植物原料茶叶在质量浓度为 0.050~0.150 mg/mL 之间时对 ABTS 阳离子自由基清除能力显著高于茶叶虫茶($P<0.05$)。经分析得, 酸枣叶虫茶、酸枣叶、茶叶虫茶、茶叶及对照 Trolox 的 IC_{50} 分别为 34.00、28.00、36.00、26.00、22.00 $\mu\text{g/mL}$ 。由此可得, 清除 ABTS 阳离子自由基的能力从高至低依次是 Trolox、茶叶、酸枣叶、酸枣叶虫茶、茶叶虫茶。

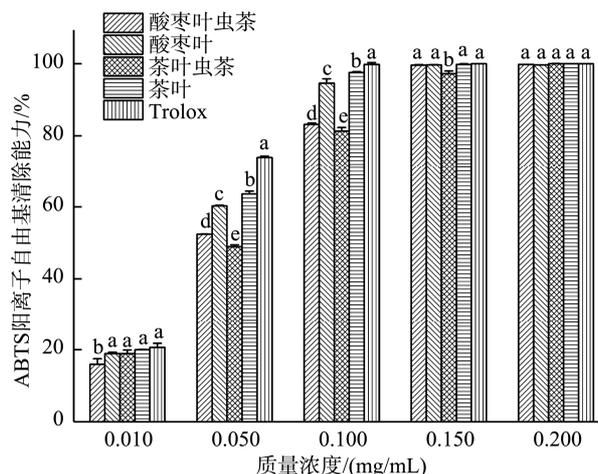


图 4 两种虫茶及其植物原料的 ABTS 阳离子自由基清除能力
Fig.4 ABTS cation radical scavenging ability of 2 kinds of insect tea and their plant raw materials

2.6 铁离子还原力

植物活性成分的还原力与抗氧化活性有着显著的相关性, 可作为其潜在抗氧化能力的重要信号^[24]。在测定物质的铁还原能力时, 吸光度越高表示其还原能力越强。由图 5 可知, 酸枣叶虫茶、酸枣叶、茶叶虫茶、茶叶及对照

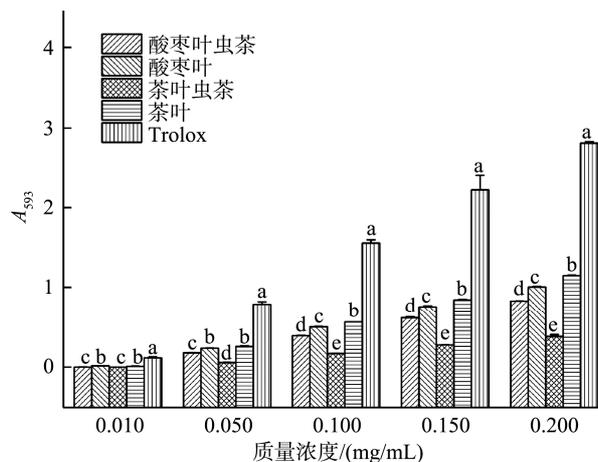


图 5 两种虫茶及其植物原料的铁离子还原力
Fig.5 FRAP of 2 kinds of insect tea and their plant raw materials

Trolox 的铁还原力均随浓度的增加而增加。酸枣叶虫茶的铁还原力在质量浓度为 0.050、0.100、0.150、0.200 mg/mL 时均显著高于茶叶虫茶 ($P<0.05$); 茶叶的铁还原力在质量浓度为 0.100、0.150、0.200 mg/mL 时均显著高于酸枣叶 ($P<0.05$); 植物原料酸枣叶、茶叶的铁还原力在质量浓度为 0.010~0.200 mg/mL 之间均显著高于酸枣叶虫茶及茶叶虫茶 ($P<0.05$), 但均显著低于对照 Trolox ($P<0.05$), 表明铁离子的还原能力从高至低依次是: Trolox、茶叶、酸枣叶、酸枣叶虫茶、茶叶虫茶。

2.7 酸枣叶虫茶、茶叶虫茶及其植物原料的体外抗氧化能力分析

用 VC 与 Trolox 当量表示酸枣叶虫茶、茶叶虫茶及其植物原料酸枣叶、茶叶的抗氧化活性, 结果如表 2 所示, 含较高含量多酚的茶叶对 DPPH 自由基、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 、ABTS 阳离子自由基清除能力、铁离子还原能力及 APC 指数均最高, 分别为 229.37、315.32、264.26 mg AEAC/g md、245.75、105.10 mg TETA/g md、81.52%, 且均显著高于酸枣叶及两种虫茶 ($P<0.05$), 与 TEJERO 等^[25]研究一致, 即含有较高酚类物质的绿茶水提取物清除自由基的能力高于红茶水提取物, 茶的抗氧化活性主要与儿茶素、没食子酸等酚类物质有关。因此推测多酚含量高可能是植物原料茶叶抗氧化活性最强, 茶叶虫茶最弱的主要原因。本研究发现植物原料茶叶、酸枣叶清除自由基能力及铁还原能力均显著强于茶叶虫茶及酸枣叶虫茶 ($P<0.05$), 与赵欣等^[6]研究发现虫茶的抗氧化能力高于植物原料苦丁茶的实验结果不一致, 这可能是因为不同的植物原料中生化成分存在较大的差异, 且不同产茶昆虫的肠道消化吸收系统及消化机能也存在明显的不同^[26]。本研究采用的产茶昆虫是双直巢螟, 其对植物原料酸枣叶及茶叶中具有强抗氧化能力的多酚等物质具有较强的消化吸收能力, 从而导致酸枣叶虫茶及茶叶虫茶中茶多酚、黄酮等物质相对于植物原料有显著的降低 ($P<0.05$)(表 1)。

对比不同抗氧化能力检测方法发现, 酸枣叶、茶叶对 $\cdot\text{OH}$ 的清除作用最强, 酸枣叶虫茶、茶叶虫茶对 ABTS 阳离子自由基的清除作用最强, 但均对铁离子的还原能力最弱。表 2 结果也证实 ABTS 法测定的结果高于 DPPH 法^[27]。

由于这 5 种方法都是基于紫外分光光度法, 其反应机制和条件均不同, 可能会造成检测结果不完全一致, 且不同的抗氧化剂存在不同的抗氧化机制, 因此只有通过多实验方法才能较准确、全面综合地评价样品的抗氧化能力^[28]。在本研究的抗氧化测定中, 酸枣叶、茶叶、酸枣叶虫茶、茶叶虫茶均表现出较好的抗氧化活性, 可为研发虫茶及其植物原料抗氧化活性产品提供理论基础。

2.8 酸枣叶虫茶、茶叶虫茶及其植物原料中活性物质含量与抗氧化能力的相关性分析

对两种植物原料及其虫茶中活性成分与抗氧化活性进行相关性分析, 结果如表 3 所示, 植物原料及其虫茶的抗氧化活性与多酚、游离氨基酸、可溶性糖的含量存在较大的相关性。其中 DPPH、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 、ABTS、FRAP 法测定的抗氧化能力及 APC 指数与多酚含量的相关性最高, 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 相关系数分别为 0.958、0.930、0.930、0.972、0.958、0.937, 与可溶性糖含量呈显著正相关 ($P<0.05$)。杨雪梅等^[29]研究发现不同年份普洱茶的体外抗氧化活性与茶多酚具有极显著的正相关性, 与本研究结果一致。而与游离氨基酸含量均呈显著负相关 ($P<0.05$), 与陈荷霞等^[30]研究发现单丛茶水提取物抗氧化活性与游离氨基酸呈负相关的结果一致。此外, 本研究结果显示, 总黄酮及咖啡碱的含量与 4 种样品的抗氧化活性存在一定程度的正相关, 其中, 总黄酮与 DPPH 值、ABTS 值呈显著正相关 ($P<0.05$), 相关系数分别为 0.601、0.602, 与罗冬兰等^[31]研究结果一致。这是因为黄酮的基本结构是 C6-C3-C6, 是以游离苷元形式及与不同糖结合形成的苷形式存在, 具有酚羟基等给电子基团, 能作为氢供体还原自由基^[32]。咖啡碱与 ABTS 值呈显著正相关 ($P<0.05$), 其可能原因是咖啡碱能与多酚类物质的修复再生关系发挥一定的协同氧化作用^[29]。表 3 结果显示, 影响 4 个样品茶汤抗氧化活性的抗氧化物质排序为多酚>可溶性糖>总黄酮>咖啡碱>游离氨基酸。

研究显示, 多酚物质是一种分子结构含有若干个酚性羟基的混合物, 包括儿茶素、酚酸、单宁类、花色苷类等^[33]。乐婷等^[34]研究表明红茶的多酚类物质及其衍生物(没食子酸等)是其抗氧化活性的主要贡献物质; LEE 等^[35]

表 2 两种虫茶及其植物原料的抗氧化能力分析

Table 2 Analysis of antioxidant capacity of 2 kinds of insect tea and their plant raw materials

种类	DPPH 自由基	$\cdot\text{OH}$	$\cdot\text{O}_2^-$	ABTS 阳离子自由基	FRAP	APC 指数/%
	/(mg AEAC/g md)			/(mg TETA/g md)		
酸枣叶虫茶	86.33±7.12 ^c	111.32±0.80 ^c	98.43±3.21 ^c	111.34±2.97 ^c	48.44±1.33 ^c	76.76±1.58 ^c
茶叶虫茶	25.52±2.10 ^d	82.05±0.59 ^d	70.69±2.31 ^d	92.91±2.48 ^d	18.26±0.46 ^d	70.60±0.49 ^d
酸枣叶	142.30±11.74 ^b	282.56±2.03 ^b	154.48±5.04 ^b	220.23±5.87 ^b	90.95±2.16 ^b	78.78±0.29 ^b
茶叶	229.37±18.92 ^a	315.32±2.27 ^a	264.26±8.63 ^a	245.75±6.55 ^a	105.10±2.91 ^a	81.52±0.30 ^a

表3 两种虫茶及其植物原料中活性物质含量与抗氧化能力的相关性

Table 3 Correlation between active components and antioxidant capacity of 2 kinds of insect tea and their plant raw materials

相关系数	DPPH	·OH	·O ₂ ⁻	ABTS	FRAP	APC 指数
多酚含量	0.958**	0.930**	0.930**	0.972**	0.958**	0.937**
总黄酮含量	0.601*	0.552	0.552	0.602*	0.567	0.538
咖啡碱含量	0.577	0.563	0.563	0.590*	0.577	0.577
游离氨基酸含量	-0.777*	-0.781*	-0.781*	-0.758*	-0.746*	-0.746*
可溶性糖	0.755*	0.755*	0.755*	0.761*	0.755*	0.734*

注: *表示显著相关($P<0.05$); **表示极显著相关($P<0.01$)。

研究发现多酚类物质儿茶素,尤其是酯型儿茶素的抗氧化能力要强于其他化学成分。GU等^[36]研究发现酚酸与ABTS、DPPH、FRAP之间具有显著的正相关性。此外,据报道,虽然酚酸的还原端数量比类黄酮少,但在抗氧化实验中,酚酸之间存在协同作用^[37]。因此推测,酸枣叶虫茶、茶叶虫茶及其植物原料中多酚物质是其抗氧化作用的主要活性物质,且抗氧化能力可能与黄酮类物质之外的儿茶素、酚酸、没食子酸等多酚物质有着重要的关系。研究表明,不同酚类物质由于官能团构型、数量和分布的不同导致其抗氧化能力也有所差异^[38]。因此,后续可进一步开展虫茶及其植物原料酚类物质的鉴定及其抗氧化活性的研究。

3 结 论

本研究通过测定茶叶虫茶、酸枣叶虫茶及其植物原料中多酚、总黄酮等物质含量,发现茶叶的多酚含量显著高于酸枣叶及两种虫茶($P<0.05$),酸枣叶的总黄酮、咖啡碱及可溶性糖含量显著高于茶叶及两种虫茶($P<0.05$),而茶叶虫茶的游离氨基酸含量显著高于酸枣叶虫茶、酸枣叶及茶叶($P<0.05$)。通过比较抗氧化效能综合指数发现,植物原料茶叶、酸枣叶的抗氧化能力强于茶叶虫茶及酸枣叶虫茶,且酸枣叶虫茶的抗氧化能力强于茶叶虫茶。Spearman相关性分析表明,植物原料酸枣叶、茶叶及其虫茶对DPPH自由基、·OH、·O₂⁻、ABTS阳离子自由基的清除能力、铁离子的还原能力及APC指数均与多酚、游离氨基酸、可溶性糖含量的相关系数较高。其中,与多酚、可溶性糖含量分别呈极显著、显著正相关($P<0.01$, $P<0.05$),而与游离氨基酸含量呈显著负相关($P<0.05$),表明多酚、可溶性糖是酸枣叶虫茶、茶叶虫茶及其植物原料抗氧化能力的重要活性成分。本研究揭示了虫茶及其植物原料的抗氧化物质与抗氧化活性之间的关系,为虫茶及其植物原料抗氧化机制研究奠定了数据基础。

参考文献

- [1] 袁冬寅,陈家献,张芬,等. 虫茶的研究现状及发展前景[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(9): 198-204.

- YUAN DY, CHEN JX, ZHANG F, *et al.* The current situation and prospect of insect tea [J]. Food Res Dev, 2021, 42(9): 198-204.
- [2] YUAN DY, LING L, PENG YQ, *et al.* Effects of black tea and black brick tea with fungal growth on lowering uric acid levels in hyperuricemic mice [J]. J Food Biochem, 2022, 46(7): e14140.
- [3] 杨观兰, 钟朝玲, 张强, 等. 响应面优化南酸枣叶总黄酮的提取及其抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(9): 133-137.
- YANG GL, ZHONG CL, ZHANG Q, *et al.* Optimization of extraction of total flavonoids from *Choerospondias axillaris* leaves by response surface methodology and analysis of antioxidant activity [J]. Cere Oils, 2022, 35(9): 133-137.
- [4] 冯拓, 单培, 张展开, 等. 16种市售茶叶抗氧化活性及抗氧化物质分析[J]. 中国食品学报, 2022, 22(10): 352-360.
- FENG T, SHAN P, ZHANG ZK, *et al.* Analysis of antioxidant activities and antioxidant substances of sixteen kinds of commercial tea [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2022, 22(10): 352-360.
- [5] 向玉勇, 刘冲, 王宗伟. 金银花尺蠖幼虫粪便乙醇提取物体外抗氧化活性[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30: 280-285.
- XIANG YY, LIU C, WANG ZW. Antioxidant activity of alcohol extracts of larva feces of honeysuckle geometrid, *Heterolochea jinyinhuphaga* *in vitro* [J]. Nat Prod Res Dev, 2018, 30(2): 280-285.
- [6] 赵欣, 李贵节. 虫茶及其原料茶苦丁茶水提物的体外抗氧化效果比较[J]. 食品工业, 2015, 36(6): 235-237.
- ZHAO X, LI GJ. Comparison of antioxidant effects of insect tea and its raw tea of Kudung tea [J]. Food Ind, 2015, 36(6): 235-237.
- [7] 张强, 韦婉珍, 罗小莉, 等. 响应面优化南酸枣叶多糖的提取工艺及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(22): 150-156.
- ZHANG Q, WEI WZ, LUO XL, *et al.* Response surface method-assisted extraction and antioxidant activities of polysaccharides from *Choerospondias axillaris* leaves [J]. Food Res Dev, 2021, 42(22): 150-156.
- [8] 林冬纯, 魏子淳, 谭艳婷, 等. 不同干燥温度对萎凋叶压制白茶饼品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 109-116.
- LIN DC, WEI ZC, TAN YP, *et al.* Effect of different drying temperature on the quality of white tea cake pressed with withered leaves [J]. Food Sci, 2022, 43(15): 109-116.
- [9] 温立香, 张芬, 袁冬寅, 等. 广西虫茶毒理学安全性评价研究[J]. 茶叶

- 通讯, 2022, 49(1): 102–107.
- WEN LX, ZHANG F, YUAN DY, *et al.* Study on toxicological safety evaluation of Guangxi insect tea [J]. *J Tea Common*, 2022, 49(1): 102–107.
- [10] 吕朝燕, 高智席, 马秀情, 等. 不同热风干燥温度对方竹笋品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(11): 23–29.
- LV CY, GAO ZX, MA XQ, *et al.* Effect of different hot air drying temperatures on quality of *Chimonobambusa quadrangularis* shoots [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(11): 23–29.
- [11] ZHANG SB, WANG Z, XU SY. Antioxidant and antithrombotic activities of rapeseed peptides [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, 85(6): 521–527.
- [12] 王炬, 张秀玲, 高宁, 等. 老山芹全株及其不同部位酚类物质含量及抗氧化能力分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(7): 54–59.
- WANG J, ZHANG XL, GAO N, *et al.* Analysis of antioxidant capacity and polyphenolic content of *Heracleum dissectum* [J]. *Food Sci*, 2019, 40(7): 54–59.
- [13] 夏晓月, 关丽萍, 纪丽丽, 等. 富锶茶多糖提取物的抗氧化活性及其对H₂O₂诱导LO₂细胞氧化损伤保护研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(22): 19–28.
- XIA XY, GUAN LP, JI LL, *et al.* Antioxidant activity of strontium-rich tea polysaccharide extract and its protection against H₂O₂-induced oxidative damage in LO₂ cells [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(22): 19–28.
- [14] YUE QL, WANG ZJ, YU FP, *et al.* Changes in metabolite profiles and antioxidant and hypoglycemic activities of *Laminaria japonica* after fermentation [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2022, 158: 113122.
- [15] PUDZIUVELYTE L, LIAUDANSKAS M, JEKABSONE A, *et al.* *Elsholtzia ciliata* (Thunb.) hyl. extracts from different plant parts: Phenolic composition, antioxidant, and anti-inflammatory activities [J]. *Molecules*, 2020, 25(5): 1153.
- [16] SEERAM NP, AVIRAM M, ZHANGYJ, *et al.* Comparison of antioxidant potency of commonly consumed polyphenol-rich beverages in the United States [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(4): 1415–1422.
- [17] 魏丹峰. 美国白蛾幼虫肠道消化酶活性和细菌多样性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- WEI DF. The digestive enzyme activities and bacterial diversity in the gut of *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) larvae [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [18] 魏丹峰, 王秀吉, 杨锦, 等. 取食不同食料的美国白蛾幼虫肠道细菌多样性及差异性研究[J]. *环境昆虫学报*, 2017, 39(3): 515–524.
- WEI DF, WANG XJ, YANG J, *et al.* Analysis of the diversity and difference of intestinal bacteria in larvae *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera: Arctiidae) on different diets [J]. *J Environ Entomol*, 2017, 39(3): 515–524.
- [19] ISLAM MA, ZAMAN S, BISWAS K, *et al.* Evaluation of cholinesterase inhibitory and antioxidant activity of *Wedelia chinensis* and isolation of apigenin as an active compound [J]. *BMC Complement Med*, 2021, 21(1): 204.
- [20] 莫开菊, 柳圣, 程超. 生姜黄酮的抗氧化活性研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(9): 110–115.
- MO KJ, LIU S, CHENG C. Study on antioxidant activity of the ginger flavonoid [J]. *Food Sci*, 2006, 27(9): 110–115.
- [21] 龙晓珊, 胡腾根, 邹宇晓, 等. 发酵和加工对桑椹抗氧化和降血糖作用的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(11): 116–123.
- LONG XS, HU TG, ZOU YX, *et al.* Effect of fermentation and processing on antioxidant and hypoglycemic activity of mulberry fruit [J]. *Food Sci*, 2019, 40(11): 116–123.
- [22] 敖纯. 虫茶醇提取物对超氧阴离子和羟基自由基的清除作用[J]. *肉类研究*, 2010, (4): 60–64.
- AO C. Scavenging effects of sandy-tea ethanol extract on superoxide anion and hydroxyl radical [J]. *Meat Res*, 2010, (4): 60–64.
- [23] BERG RVD, HAENEN GRMM, BERG HVD, *et al.* Applicability of an improved Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) assay for evaluation of antioxidant capacity measurements of mixtures [J]. *Food Chem*, 1999, 66(4): 511–517.
- [24] 罗磊, 郭晓园. 金银花提取液抗氧化活性研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(21): 63–65.
- LUO L, GUO XY. Antioxidant activity of honeysuckle extract [J]. *Food Sci*, 2009, 30(21): 63–65.
- [25] TEJERO J, GAYOSO S, CARO I, *et al.* Comparative analysis of the antioxidant and free-radical scavenging activities of different water-soluble extracts of green, black and oolong tea samples [J]. *Food Nutr Sci*, 2014, 5(22): 2157–2166.
- [26] 黄长礼. 茶尺蠖取食不同品种茶树的生理效应及其肠道真菌的研究[D]. 福建: 福建师范大学, 2015.
- HUANG CL. Study on physiological effects of feeding on different varieties of tea tree on *Ectropis oblique* proutand gut endogenic fungi of the caterpillar [D]. Fujian: Fujian Normal University, 2015.
- [27] FLOEGEL A, KIM DO, CHUNG SJ, *et al.* Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods [J]. *J Food Compos Anal*, 2011, 24(7): 1043–1048.
- [28] 师梦楠, 彭云, 张杰, 等. 云南大叶种茶树花生化成分及体外抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 243(16): 298–306.
- SHI MN, PENG Y, ZHANG J, *et al.* Biochemical components and in vitro antioxidant activities of large-leaf species tea flowers in Yunnan [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 243(16): 298–306.
- [29] 杨雪梅, 赵建锐, 刘莹亮, 等. 不同年份普洱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 of non-fermented Pu-erh tea samples with various years [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(5): 32–37.
- [30] 陈荷霞, 傅力, 李云. 不同贮藏年份蜜兰香型岭头单丛茶抗氧化成分及抗氧化活性[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(12): 49–54.

- CHEN HX, FU L, LI Y. Aging time on antioxidant components and activities of Milan aromatic variety single-clump tea from Lingtong [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(12): 49–54.
- [31] 罗冬兰, 黎晓燕, 曹森, 等. 贵州不同种类茶叶的几种抗氧化成分及其抗氧化能力分析[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(17): 35–40.
- LUO DL, LI XY, CAO S, *et al.* Comparison on several antioxidant components and activity for different kinds of Guizhou tea [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(17): 35–40.
- [32] 陆曦, 王磊, 魏红, 等. 黄酮类化合物抗氧化活性的构效关系[J]. *食品科学*, 2006, 27(12): 233–237.
- LU X, WANG L, WEI H, *et al.* Structure-activity relationship of flavonoids in antioxidant activity [J]. *Food Sci*, 2006, 27(12): 233–237.
- [33] ZHENG YZ, DENG G, ZHANG YC. Multiple free radical scavenging reactions of auronones [J]. *Phytochemistry*, 2021, 190: 112853.
- [34] 乐婷, 王伟伟, 王蔚, 等. 不同等级红茶的抗氧化活性及关键成分比较分析[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(8): 97–104.
- LE T, WANG WW, WANG W, *et al.* Antioxidant activity and key components of three grades of black tea [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(8): 97–104.
- [35] LEE LS, KIM SH, KIM YB, *et al.* Quantitative analysis of major constituents in green tea with different plucking periods and their antioxidant activity [J]. *Molecules*, 2014, 19(7): 9173–9186.
- [36] GU C, HOWELL K, DUNSHEA FRR, *et al.* LC-ESI-QTOF/MS characterisation of phenolic acids and flavonoids in polyphenol-rich fruits and vegetables and their potential antioxidant activities [J]. *Antioxidants*, 2019, 8(9): 405.
- [37] PALAFOX-CARLOS H, GIL-CHÁVEZ J, SOTELO-MUNDOR, *et al.* Antioxidant interactions between major phenolic compounds found in ‘Ataulfo’ mango pulp: Chlorogenic, gallic, protocatechuic and vanillic acids [J]. *Molecules*, 2012, 17: 12657–12664.
- [38] SÁNCHEZ-MORENO C, LARRAURI J, SAURA-CALIXTO F. Free radical scavenging capacity and inhibition of lipidoxidation of wines, grape juices and related polyphenolic constituents [J]. *Food Res Int*, 1999, 32(6): 407–412.

(责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

作者简介

袁冬寅, 硕士, 工程师, 主要研究方向为茶叶加工及功能成分应用。
E-mail: 1763715741@qq.com

温立香, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为茶叶加工与审评。
E-mail: 864655377@qq.com

林 玲, 博士, 讲师, 主要研究方向为茶叶加工及功能成分应用。
E-mail: linling941106@sina.com