

## 29个品种树莓茎活性物质测定及其 抗氧化能力与抑菌活性

陆龙波<sup>1</sup>, 包怡红<sup>1</sup>, 王金玲<sup>1,2\*</sup>

(1. 东北林业大学 生命科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省森林食品资源利用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为实现树莓茎中活性物质的高值化利用, 以东北29个品种树莓茎为研究对象, 通过超声波辅助提取法制备了树莓茎提取液, 测定了其总酚、总黄酮、酚类化合物含量以及抗氧化能力、抑菌活性, 并进行了相关性分析。结果表明, 29个品种树莓茎总酚含量为1.10~3.27 g/100 g干树莓茎, 总黄酮含量为0.69~1.32 g/100 g干树莓茎, 其中“北京32”树莓茎总酚含量最高, “北京21”树莓茎总黄酮含量最高; 29个品种树莓茎中鉴定出10种酚酸和7种黄酮类化合物, 主要以绿原酸、熊果苷、隐绿原酸和鞣花酸为主, 绿原酸含量为2.51~11.38 mg/g干树莓茎; 29个品种树莓茎提取液对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基的半抑制质量浓度(IC<sub>50</sub>)为2.22~5.79 g/L, 对2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐自由基的IC<sub>50</sub>为1.22~4.32 g/L, 铁离子还原能力为0.50~1.09 mmol/g干树莓茎; 29个品种树莓茎提取液对4种食源性致病菌(金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌和铜绿假单胞菌)均具有抑制作用, 对铜绿假单胞菌表现出较强的抑菌活性, 其最低抑菌质量浓度和最小杀菌质量浓度分别为3.12和6.25 g/L; 29个品种树莓茎提取液多酚含量越高, 其抗氧化能力、抑菌活性越强。

**关键词:** 树莓茎; 多酚; 黄酮; 酚类化合物; 抗氧化能力; 抑菌活性; 中药现代化技术

中图分类号: TQ460.1; TS209 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214(2024)11-2456-08

## Active substances, antioxidant capacity and antibacterial activity in stems of 29 varieties of raspberry

LU Longbo<sup>1</sup>, BAO Yihong<sup>1</sup>, WANG Jinling<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Life Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. Key Laboratory of Forest Food Resources Utilization of Heilongjiang Province, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In order to achieve the high-value utilization of active substances in raspberry stems, the extracts from 29 varieties of raspberry stems in Northeast China were prepared by ultrasonic-assisted extraction method, with the contents of total phenols, total flavonoids, phenolic compounds, antioxidant capacity and antibacterial activity measured and correlation analysis conducted. The results indicated that the total phenols content in raspberry stems were 1.10~3.27 g/100 g dried raspberry stem, and total flavonoids content were 0.69~1.32 g/100 g dried raspberry stem, with "Beijing 32" showing the highest total phenols content, and "Beijing 21" the highest total flavonoids content. Ten phenolic acid derivatives and seven flavonols were identified from 29 varieties of raspberry stems, mainly chlorogenic acid, arbutin, cryptochlorogenic acid and ellagic acid, with chlorogenic acid content ranging of 2.51~11.38 mg/g dried raspberry stems. The half inhibitory mass concentration (IC<sub>50</sub>) of 1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine free radicals and 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate) free radicals for 29 varieties of raspberry stem extracts were 2.22~5.79 and 1.22~4.32 g/L, respectively, and the iron ion reducing capacities ranged of 0.50~1.09 mmol/g dried raspberry stems. The 29 varieties of raspberry stem extracts showed inhibitory effects on four foodborne pathogens (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* and *pseudomonas aeruginosa*), and exhibited the strongest antibacterial ability against

收稿日期: 2023-11-23; 定用日期: 2024-01-02; DOI: 10.13550/j.jxhg.20231005

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1600500); 中央高校基本科研业务费专项(2572022DX05)

作者简介: 陆龙波(1997—), 男, 硕士生, E-mail: 1905917885@qq.com. 联系人: 王金玲(1975—), 女, 教授, E-mail: wangjinling08@163.com.

*pseudomonas aeruginosa*, with a minimum inhibitory concentration and minimum bactericidal concentration of 3.12 and 6.25 g/L, respectively. The higher polyphenol content in 29 varieties of raspberry stem extracts, the stronger antioxidant capacity and antibacterial activity.

**Key words:** raspberry stem; polyphenols; flavonoids; phenolic compounds; antioxidant capacity; antibacterial activity; modernization technology of traditional Chinese medicines

树莓(*Rubus idaeus* L.)属蔷薇科悬钩子属植物, 又称覆盆子、托盘等, 为药食同源植物, 主要分布于亚洲、欧洲、北美洲及非洲东部和南部<sup>[1-2]</sup>。树莓果实因具有良好的风味、诱人的色彩而深受消费者喜爱, 果实内丰富的生物活性化合物被证实具有良好的抗氧化、抗癌、抗炎等作用<sup>[3-4]</sup>。树莓生命力旺盛, 需定期修剪枝叶, 但修剪后的枝叶通常被丢弃, 造成资源浪费。立陶宛民间医学中, 树莓的果实、叶子和茎常用于治疗普通感冒和流感<sup>[5]</sup>。此外, 《本草纲目》也记载了树莓茎的药用价值, 具有补肝明目, 助阳固精功效<sup>[6]</sup>。研究显示, 树莓茎和叶的多酚提取液均具有良好的抗氧化能力<sup>[7-8]</sup>。

植物中的天然产物一直是开发新型药物的重要来源, 原因在于其含有多种化学成分, 可作用于生物系统中特定分子靶点以达到治疗或控制某种疾病的效果<sup>[9]</sup>。多酚作为植物体内重要的次生代谢产物, 因具有多种药理特性, 如抗氧化、抗炎和抗增殖活性等, 而得到医学界的广泛认可。多项研究发现, 多酚为良好的天然抗氧化剂, 其在生物系统中有着非常重要的作用, 可以抵制一些导致人类疾病的氧化应激, 包括糖尿病、慢性炎症和某些类型的癌症等<sup>[10-11]</sup>。食源性致病菌对人类健康构成了严重威胁, 而抗生素治疗会对人体及环境产生诸多不利影响, 因此, 寻求天然、绿色与健康的抗生素替代品已成为新趋势。来自植物茎、叶、根中的多酚、萜烯等活性物质相继被证实具有良好的抗菌作用, 且比合成抗生素更安全<sup>[12-13]</sup>。研究发现, 枸杞茎多酚提取液对多种食源性致病菌表现出良好的抑制作用, 如大肠杆菌、铜绿假单胞菌和粪肠球菌等<sup>[14]</sup>; 蜂斗菜茎多酚提取液对金黄色葡萄球菌和蜡样芽孢杆菌具有较强的抑制活性<sup>[15]</sup>。目前, 对树莓茎的研究主要集中于多酚、化学成分、抗氧化活性及药用开发上<sup>[5,8,16]</sup>, 鲜见关于树莓茎抑菌活性的报道。

本文拟对东北 29 个品种树莓茎进行多酚、黄酮的提取, 并研究树莓茎中的多酚、黄酮与抗氧化、抑菌活性之间的相关性, 以期后续树莓茎应用于医药、食品等领域提供理论依据。

## 1 实验部分

### 1.1 原料、试剂与仪器

“北京 9”、“北京 10”、“北京 19”、“北京 21”、“北

京 32”、“DNS1”、“DNS4”、“DNS5”、“DNS9”、“秋福”、“秋萍”、“红玉”、“红孩”、“杨 1 号”、“杨 2 号”、“布格斯克 (Bulgaskc)”、“绍普斯卡 (Schopska)”、“美特”、“HL1 黄树莓”、“威拉米特”、“无刺”、“费尔杜德”、“来味里”、“布尔卡”、“哈瑞太兹”、“欧洲红”、“托拉米”、“美 22”和“努卡”这 29 个树莓品种的茎, 于 2022 年 5 月 28 日采自黑龙江省农业科学院园艺分院。

抗坏血酸 (批号: 20221011), 天津市博迪化工股份有限公司; 阿莫西林 (批号: 4230022), 广州白云山医药集团股份有限公司; 庆大霉素 (批号: 210604), 修正药业集团长春高新制药有限公司; 蛋白胨、酵母浸粉、牛肉膏、琼脂粉, 北京奥博星生物技术有限责任公司; 熊果苷、没食子酸、芦丁、新绿原酸、表儿茶素、绿原酸、咖啡酸、丁香酸、隐绿原酸、对香豆酸、阿魏酸、香豆酸、鞣花酸、槲皮苷、槲皮素、木犀草素、异甘草素, GC, 上海叶源生物科技有限公司; 无水乙醇、无水甲醇、葡萄糖、氯化钠、碳酸钠、氢氧化钠、亚硝酸钠、硫酸亚铁、氯化铁、硝酸铝, AR, 天津市光复科技发展有限公司。

KQ-300DE 型数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; YP-B5002 型液晶电子天平, 上海马头电子有限公司; DHGA-9240A 型电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; 721G 型紫外-可见分光光度计, 上海佑科仪器有限公司; TGL-16C 型台式离心机, 上海安亭科学仪器厂; Infinite M200-PRO 型酶标仪, 瑞士 Tecan 公司; RE-2000A 型旋转蒸发器, 河南省巩义市予华仪器有限公司; SHZ-82 型气浴恒温振荡器, 常州市金坛区指前镇旭日实验仪器厂; 1260-Infinity 型高效液相色谱仪, 美国 Agilent 公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 树莓茎提取液的制备

采用超声波辅助提取法制备树莓茎提取液, 具体步骤为: 称取 5 g 树莓鲜茎并研磨捣碎, 以体积分数 56% 的乙醇水溶液为提取溶剂, 按液料比 (mL : g) 9.6 : 1 加入提取溶剂, 置于数控超声波清洗器中, 设置超声功率和频率分别为 240 W 和 40 kHz, 在提取温度为 53 °C 下提取 50 min。提取结束后, 过滤残渣并收集滤液, 将滤液放入离心机中, 于

20 °C下以 2500 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 即得到树莓茎提取液。

### 1.2.2 总酚、总黄酮含量测定

采用福林酚法<sup>[17]</sup>测定样品中总酚含量, 结果表示为每 100 g 干树莓茎 (DW) 中没食子酸质量 (g/100 g DW)。采用硝酸铝比色法<sup>[18]</sup>测定样品中总黄酮含量, 结果表示为每 100 g 干树莓茎中芦丁的质量 (g/100 g DW)。干树莓茎的总酚、总黄酮含量通过树莓茎的含水率进行折算。

### 1.2.3 酚类化合物测定

采用高效液相色谱法测定树莓茎提取液的成分<sup>[19]</sup>。将熊果苷、没食子酸、新绿原酸、表儿茶素、绿原酸、咖啡酸、丁香酸、隐绿原酸、对香豆酸、阿魏酸、香豆酸、芦丁、鞣花酸、槲皮苷、槲皮素、木犀草素和异甘草素标准品各自配制成梯度质量浓度的标准溶液, 经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后进行 HPLC 分析, 得到峰面积和活性成分质量浓度的回归方程及相关系数 ( $R^2$ ), 通过对树莓茎提取液峰面积与标准品进行比较并定量, 结果表示为 mg/g DW。

### 1.2.4 体外抗氧化能力测定

参照 HE 等<sup>[19]</sup>的方法, 测定树莓茎提取液对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基 ( $\bullet$ DPPH)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐自由基 ( $\bullet$ ABTS<sup>+</sup>) 清除能力, 结果以清除半数自由基所需质量浓度 [半抑制质量浓度 ( $IC_{50}$ ), g/L] 表示。Fe<sup>3+</sup>还原能力 (FRAP) 参考 ASLANHAN 等<sup>[20]</sup>的方法进行测定, 结果表示为 mmol/g DW。以抗坏血酸作为阳性对照。

### 1.2.5 抑菌活性测定

牛肉膏蛋白胨液体培养基: 葡萄糖 20.0 g、蛋白胨 15.0 g、氯化钠 5.0 g、牛肉膏 0.5 g、用蒸馏水定容至 1.0 L; LB 液体培养基: 蛋白胨 10.0 g、酵母粉 5.0 g、氯化钠 10.0 g, 加蒸馏水定容至 1.0 L。

枯草芽孢杆菌用牛肉膏蛋白胨培养基培养。金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、铜绿假单胞菌用 LB 培养基培养。将上述受试菌种接种于斜面, 置于 37 °C 恒温培养箱中培养 24 h 活化, 将活化好的各菌种分别挑取一环, 用生理盐水稀释成初试菌悬液菌落浓度至  $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$  CFU/mL, 备用。采用二倍连续稀释法<sup>[21]</sup>测定最低抑菌质量浓度 (MIC) 与最小杀菌质量浓度 (MBC), 树莓茎提取液测试溶液的质量浓度分别为 1.56、3.12、6.25、12.5、25、50、100 g/L。以无菌水作为阴性对照, 阿莫西林、庆大霉素作为阳性对照, 在 37 °C 培养 24 h 后, 观察菌落, 最高稀释平板中无菌落形成者的质量浓度即为树莓茎提取液的 MIC。在 MIC 基础上, 将平板置于 37 °C 培养箱中继续培养 24 h, 最高稀释平板中无菌落形成者的质量浓度即为 MBC。

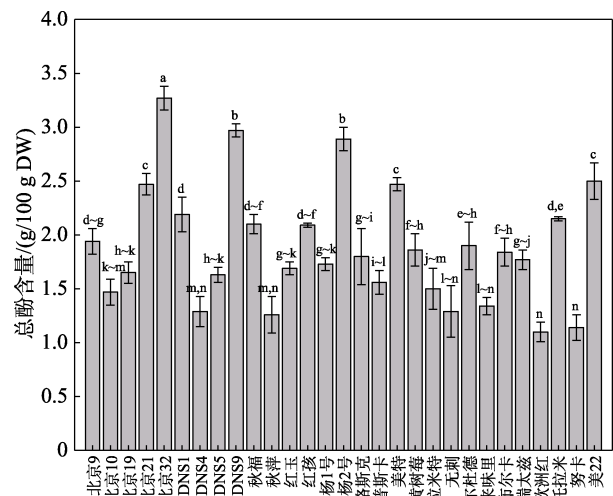
## 1.3 数据处理

实验测定重复 3 次, 结果以“平均值±标准差”表示 (讨论时均使用平均值); 使用 SPSS 20.0 进行多重比较检验和单因素方差分析, 以确定品种之间的显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 使用 Origin 2021 进行图形绘制; 相关性分析采用 Origin 中的 Pearson 相关分析得出相关系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 总酚、总黄酮含量分析

图 1 为不同品种树莓茎中总酚含量测定结果。



不同小写字母表示组间差异性显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

图 1 不同品种树莓茎中总酚含量

Fig. 1 Total phenols content in stems of different varieties of raspberry

由图 1 可以看出, 树莓茎中总酚含量因品种不同而有所差异。29 个树莓茎的总酚含量范围为 1.10~3.27 g/100 g DW。其中, “北京 32” 的树莓茎总酚含量最高, 为 3.27 g/100 g DW, 并显著 ( $P < 0.05$ ) 高于其他品种树莓茎。其次是“DNS9”、“杨 2 号”, 分别为 2.97 和 2.89 g/100 g DW; “欧洲红” 树莓茎总酚含量最低, 为 1.10 g/100 g DW, 其次是“努卡”、“秋萍”、“DNS4”、“无刺”、“来味里”, 分别为 1.14、1.26、1.29、1.30 和 1.34 g/100 g DW, 且与“欧洲红” 树莓茎的总酚含量无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。29 个品种的树莓茎总酚含量相对低于陈青青等<sup>[8]</sup>测定的华东树莓品种 (4.05 g/100 g DW), 这种差异可能是提取方法、提取液料比的不同所致<sup>[22-23]</sup>, 与样品采收的季节、品种、地区气候等因素也有很大关系。SU 等<sup>[24]</sup>测定的浙江千岛湖品种树莓果实的总酚含量为 1.24 g/100 g DW, 与东北地区 29 个品种树莓茎相比, 其总酚含量仅高于“欧洲红”和“努卡” 树莓茎, 低于其余 27 个品种树莓茎; YU 等<sup>[25]</sup>测定东北地区种植的 24 个树莓品种果实的总酚含量为

0.77~1.19 g/100 g DW, 其中“DNS1”品种树莓果实总酚含量最高, 为 1.19 g/100 g DW, 但同样也仅高于“欧洲红”和“努卡”树莓茎。对比发现, 树莓茎中酚类物质含量相较于树莓果实更为丰富<sup>[24-25]</sup>。

图 2 为不同品种树莓茎总黄酮含量测定结果。

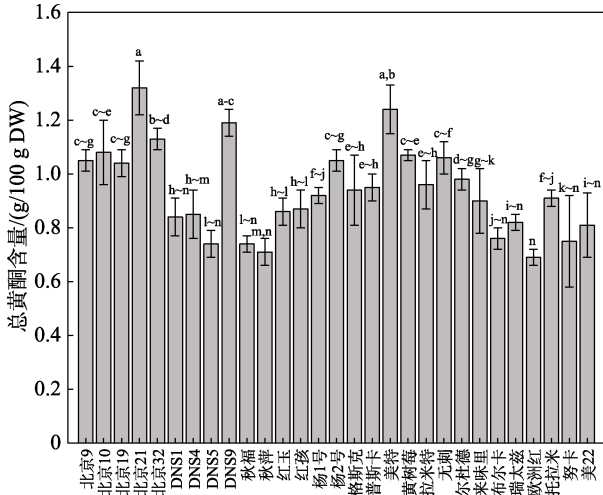


图 2 不同品种树莓茎中总黄酮含量

Fig. 2 Total flavonoids content in stems of different varieties of raspberry

由图 2 可以看出, 29 个树莓茎的总黄酮含量范围为 0.69~1.32 g/100 g DW。其中, “北京 21” 树莓茎的总黄酮含量最高, 为 1.32 g/100 g DW。其次是“美特”、“DNS9”树莓茎, 分别为 1.24 和 1.19 g/100 g DW, 且其总黄酮含量与“北京 21” 品种无显著性差异 ( $P>0.05$ ); “欧洲红”、“秋萍”、“秋福”、“DNS5”、“努卡”和“布尔卡”树莓茎的总黄酮含量较低, 均低于 0.80 g/100 g DW, 且品种间无显著性差异 ( $P>0.05$ )。范青等<sup>[26]</sup>测定了河北邢台地区 8 月份采收的“秋福”树莓叶不同部位(上部、中部和下部)的总黄酮含量, 结果为 1.29~1.35 g/100 g DW, 高于本实验所测东北地区“秋福”树莓茎的总黄酮含量 (0.74 g/100 g DW), 可能是树莓植株中不同的部位导致的差异, 也可能是其采收时间晚, 积累了更多黄酮类物质。

29 个品种树莓茎中均测出较高的总酚与总黄酮含量, 但不同品种树莓茎总酚、总黄酮含量之间存在一定差异, 这可能与不同品种树莓之间基因型的差异性有关。ILHAN 等<sup>[27]</sup>测定 10 种不同基因型沙棘的总酚含量为 0.41~0.62 g/100 g, 总酚含量的差异是因为不同品种沙棘具有不同的形态、生化和物候学特征, 这些特征因基因型而异, 致使其总酚含量存在一定的差异。PATHIRAJA 等<sup>[28]</sup>对不同基因型扁豆的研究中也出现此类情况, 研究显示, 7 种不同基因型扁豆总酚含量为 1.52~6.50 mg/g, 说明来自同一地区种植的扁豆其总酚含量因基因型不同而差异较大。

## 2.2 酚类化合物种类及含量分析

图 3 为 29 个树莓茎提取液中酚类化合物种类及其含量测定结果。

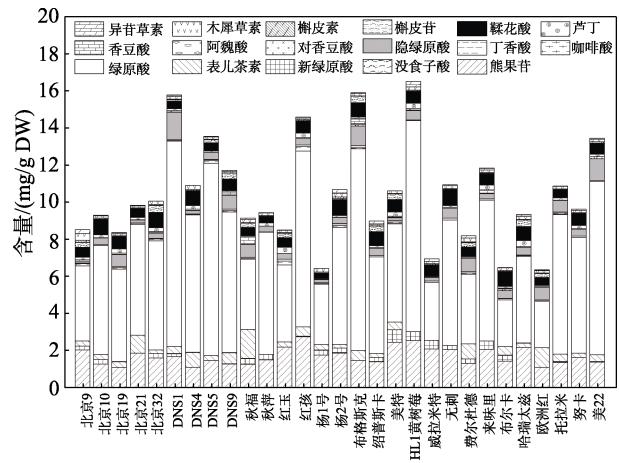


图 3 不同品种树莓茎酚类化合物堆积柱形图

Fig. 3 Phenolic compounds accumulation column in stems of different varieties of raspberry

由图 3 可以看出, 树莓茎提取液中酚类化合物的种类和含量因品种不同而有所差异, 29 个树莓茎提液物中均检测出熊果苷、绿原酸、丁香酸、隐绿原酸、芦丁、鞣花酸、槲皮素、木犀草素和异甘草素, 且以绿原酸、熊果苷、隐绿原酸和鞣花酸为主, 含量分别为 2.51~11.38、1.09~2.97、0.10~1.47 和 0.30~0.88 mg/g DW。树莓果实中含有黄酮醇、鞣花单宁、花青素和酚酸类等酚类化合物<sup>[29]</sup>。与树莓茎相比, 两者均有较高含量的黄酮醇和酚酸类化合物, 但 29 个品种树莓茎提取液中均未鉴定出花青素类化合物, 可能是由于树莓茎中花青素类化合物含量较低, 导致其无法量化或检出。WU 等<sup>[30]</sup>对 4 个不同生长时期的“哈瑞太兹”、“托拉米”、“澳洲红”及“来味里”树莓叶进行酚类化合物的鉴定与定量, 共鉴定出 7 种黄酮醇、3 种黄烷-3-醇和 8 种酚酸, 主要以槲皮素-3-葡萄糖苷、原花青素 B1、山奈酚-3-O-芸香糖苷和绿原酸为主, 其树莓叶中的绿原酸含量为 0.14~1.37 mg/g DW, 低于本实验所测 29 个品种树莓茎的绿原酸含量。

植物中的酚类物质主要由苯丙烷途径合成, 其合成的酚酸和黄酮化合物如对香豆酸、咖啡酸和阿魏酸等, 都具有较好的抗氧化、抗菌活性<sup>[31]</sup>。29 个品种树莓茎中鉴定出的 17 种酚类化合物, 包括 10 种酚酸和 7 种黄酮类化合物。其中, “HL1 黄树莓”、“DNS1”和“布格斯克”树莓茎具有较高的酚类化合物含量, 且同时都有高含量的绿原酸。绿原酸属于酚酸类化合物, 具有抑菌、杀菌及清除自由基能力<sup>[32-33]</sup>。研究发现, 绿原酸可作为良好的保鲜剂应用于果实采后的保鲜, 桃果实经绿原酸浸泡处理后

接种扩展青霉菌，能有效降低在 25 °C 贮藏期间桃果实的病斑直径和腐烂指数，提高果实品质<sup>[34]</sup>。树莓茎中的槲皮素、木犀草素等黄酮类化合物为抗癌物质，可通过抑制或灭活致癌物质，充当抗癌剂来保护 DNA 免受氧化应激相关损伤的酶<sup>[35]</sup>；酚类物质具有多种药理特性，但在生理系统中溶解度低且结构不稳定，限制了其临床应用。多酚复合材料的合成可以有效解决这一问题，并已有用于疾病治疗及药物合成等方面的研究<sup>[36]</sup>。DIAN 等<sup>[37]</sup>开发了一种纳米胶束递送系统，使槲皮素在水介质中溶解，达到临床相关浓度，并在可控条件下递送槲皮素，可克服癌细胞的多重耐药，增强抗癌作用；包裹白藜芦

醇和表儿茶素的壳聚糖水凝胶体系可用于治疗阴道感染，且对细胞毒性较小、体外药效释放时间长<sup>[38]</sup>。

### 2.3 抗氧化能力分析

表 1 为不同品种树莓茎提取液抗氧化能力、抑菌活性测定结果。

由表 1 可以看出，29 个品种树莓茎提取液清除 •DPPH 的 IC<sub>50</sub> 范围为 2.22~5.79 g/L，“北京 32”、“北京 9”和“北京 21”树莓茎提取液的 IC<sub>50</sub> 较低，表明其对 •DPPH 清除能力较好。不同品种树莓茎提取液清除 •ABTS<sup>+</sup> 的 IC<sub>50</sub> 范围为 1.22~4.32 g/L，“DNS9”和“红孩”显著强于 (*P*<0.05) 其他品种的清除能力，其 IC<sub>50</sub> 分别为 1.22、1.53 g/L。

表 1 不同品种树莓茎提取液的抗氧化能力和抑菌活性  
Table 1 Antioxidant and antibacterial activities of stem extracts of different varieties of raspberry

品种	抗氧化能力			抑菌活性/(g/L)							
	IC <sub>50</sub> (•DPPH)/ (g/L)	IC <sub>50</sub> (•ABTS <sup>+</sup> )/ (g/L)	FRAP/ (mmol/g DW)	金黄色葡萄球菌		枯草芽孢杆菌		大肠杆菌		铜绿假单胞菌	
				MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC
北京 9	2.37±0.15 <sup>a,b</sup>	1.99±0.07 <sup>c-e</sup>	0.79±0.02 <sup>g-j</sup>	6.25	6.25	12.5	12.5	6.25	12.5	3.12	6.25
北京 10	3.22±0.13 <sup>e-j</sup>	3.21±0.43 <sup>j</sup>	0.61±0.01 <sup>o,p</sup>	6.25	12.5	12.5	25	12.5	12.5	6.25	12.5
北京 19	2.78±0.08 <sup>b-f</sup>	3.90±0.10 <sup>k-m</sup>	0.81±0.01 <sup>f-i</sup>	6.25	12.5	12.5	25	6.25	12.5	3.12	6.25
北京 21	2.40±0.09 <sup>a,b</sup>	1.99±0.09 <sup>c-e</sup>	0.82±0.01 <sup>e-h</sup>	12.5	12.5	6.25	12.5	6.25	12.5	3.12	6.25
北京 32	2.22±0.14 <sup>a</sup>	1.76±0.06 <sup>b-d</sup>	1.09±0.02 <sup>a</sup>	6.25	6.25	6.25	12.5	6.25	6.25	3.12	6.25
DNS1	3.32±0.36 <sup>b-k</sup>	2.29±0.10 <sup>e-h</sup>	0.76±0.03 <sup>j,k</sup>	6.25	12.5	6.25	12.5	6.25	12.5	6.25	6.25
DNS4	3.40±0.37 <sup>b-k</sup>	2.73±0.19 <sup>i</sup>	0.70±0.00 <sup>l,m</sup>	6.25	12.5	12.5	25	12.5	12.5	6.25	12.5
DNS5	3.78±0.27 <sup>k</sup>	4.21±0.21 <sup>l,m</sup>	0.82±0.02 <sup>e-g</sup>	12.5	12.5	12.5	25	6.25	12.5	6.25	12.5
DNS9	2.48±0.07 <sup>a-c</sup>	1.22±0.16 <sup>a</sup>	0.84±0.03 <sup>d-f</sup>	6.25	6.25	6.25	12.5	6.25	6.25	3.12	6.25
秋福	3.09±0.08 <sup>d-i</sup>	4.32±0.20 <sup>m</sup>	1.09±0.03 <sup>a</sup>	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	6.25	12.5
秋萍	5.79±0.72 <sup>m</sup>	4.30±0.07 <sup>m</sup>	0.67±0.02 <sup>m,n</sup>	12.5	12.5	12.5	25	12.5	25	12.5	12.5
红玉	3.35±0.06 <sup>b-k</sup>	1.92±0.19 <sup>b-c</sup>	0.78±0.03 <sup>g-j</sup>	6.25	12.5	12.5	25	12.5	12.5	6.25	6.25
红孩	2.40±0.29 <sup>a,b</sup>	1.53±0.32 <sup>a,b</sup>	0.86±0.02 <sup>d,e</sup>	3.12	6.25	12.5	12.5	6.25	12.5	6.25	6.25
杨 1 号	2.81±0.17 <sup>b-g</sup>	2.67±0.34 <sup>h,i</sup>	0.73±0.05 <sup>k,l</sup>	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	6.25	6.25
杨 2 号	2.44±0.14 <sup>a,b</sup>	1.70±0.07 <sup>b,c</sup>	0.81±0.01 <sup>f-i</sup>	6.25	6.25	6.25	12.5	6.25	12.5	3.12	6.25
布格斯克	3.65±0.15 <sup>j,k</sup>	3.69±0.29 <sup>k</sup>	1.00±0.02 <sup>b</sup>	12.5	12.5	6.25	12.5	6.25	12.5	3.12	6.25
绍普斯卡	2.74±0.31 <sup>b-e</sup>	2.16±0.18 <sup>d-g</sup>	0.77±0.02 <sup>i-k</sup>	6.25	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	6.25	6.25
美特	3.29±0.25 <sup>g-k</sup>	1.97±0.26 <sup>c-e</sup>	0.66±0.02 <sup>m,n</sup>	6.25	6.25	6.25	12.5	6.25	6.25	6.25	6.25
HL1 黄树莓	2.72±0.09 <sup>a-d</sup>	1.96±0.20 <sup>b-c</sup>	1.02±0.01 <sup>b</sup>	6.25	12.5	12.5	12.5	6.25	12.5	6.25	6.25
威拉米特	2.94±0.08 <sup>c-g</sup>	3.82±0.03 <sup>k,l</sup>	0.79±0.04 <sup>g-j</sup>	12.5	12.5	12.5	25	12.5	12.5	3.12	6.25
无刺	3.45±0.14 <sup>i-k</sup>	3.73±0.39 <sup>k</sup>	0.69±0.02 <sup>l,m</sup>	6.25	12.5	12.5	12.5	12.5	25	6.25	6.25
费尔杜德	3.68±0.15 <sup>j,k</sup>	4.16±0.11 <sup>l,m</sup>	0.76±0.03 <sup>j,k</sup>	6.25	12.5	6.25	12.5	12.5	12.5	6.25	6.25
来味里	3.24±0.10 <sup>f-j</sup>	4.06±0.05 <sup>k-m</sup>	0.87±0.01 <sup>c,d</sup>	6.25	12.5	12.5	25	12.5	12.5	6.25	12.5
布尔卡	4.59±0.07 <sup>l</sup>	3.17±0.36 <sup>j</sup>	0.50±0.02 <sup>q</sup>	12.5	12.5	6.25	12.5	6.25	12.5	6.25	12.5
哈瑞太兹	3.60±0.49 <sup>j,k</sup>	2.57±0.07 <sup>g-i</sup>	0.80±0.02 <sup>f-j</sup>	6.25	12.5	12.5	12.5	6.25	12.5	6.25	6.25
欧洲红	3.36±0.10 <sup>b-k</sup>	2.70±0.11 <sup>h,i</sup>	0.59±0.01 <sup>p</sup>	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	25	6.25	12.5
托拉米	2.40±0.19 <sup>a,b</sup>	2.10±0.19 <sup>c-f</sup>	0.77±0.01 <sup>h-j</sup>	6.25	12.5	6.25	12.5	6.25	12.5	6.25	6.25
努卡	5.41±0.09 <sup>m</sup>	2.79±0.09 <sup>j</sup>	0.64±0.02 <sup>n,o</sup>	12.5	25	12.5	25	12.5	12.5	6.25	12.5
美 22	2.67±0.22 <sup>a-d</sup>	2.47±0.09 <sup>f,i</sup>	0.92±0.02 <sup>c</sup>	6.25	6.25	6.25	12.5	6.25	12.5	3.12	6.25
抗坏血酸	0.011±0.00	0.028±0.00	24.61±0.09	—	—	—	—	—	—	—	—
阿莫西林	—	—	—	<1.56	<1.56	<1.56	<1.56	<1.56	<1.56	—	—
庆大霉素	—	—	—	<1.56	<1.56	—	—	<1.56	<1.56	<1.56	<1.56

注：“—”表示不适用或未检出；同列不同小写字母表示组间差异显著 (*P*<0.05)。

树莓茎提取液中的抗氧化物质可将  $Fe^{3+}$ -三吡啶三嗪复合物还原成深蓝色的  $Fe^{2+}$ -三吡啶三嗪复合物, 该复合物在 593 nm 处有最大吸光度, 可以通过测量样品还原  $Fe^{3+}$ -三吡啶三嗪的能力来评估样品的抗氧化活性强弱<sup>[39]</sup>。由表 1 可以看出, 不同品种树莓茎提取液均表现出一定的  $Fe^{3+}$ 还原能力, 29 个树莓茎提取液的 FRAP 范围为 0.50~1.09 mmol/g DW。其中, “北京 32”、“秋福”和“HL1 黄树莓”树莓茎提取液具有较强的  $Fe^{3+}$ 还原能力, 而“布尔卡”、“欧洲红”和“北京 10”树莓茎提取液则表现出较差的  $Fe^{3+}$ 还原能力。

树莓茎提取液中鉴定出的多种酚类化合物, 是其具有抗氧化特性的重要原因。酚类物质作为典型的抗氧化剂, 主要通过氢原子转移 (HAT)、单电子转移 (SET) 和过渡金属螯合 (TMC) 3 种机制与自由基发生反应, 从而保护基因免受自由基攻击, 以避免氧化应激给人体带来的各种潜在疾病<sup>[40]</sup>; 此外, 通过纯化植物提取液中的酚类物质, 将其与天然多肽纳米纤维等材料制备成复合保鲜膜, 可使抗氧化效果得到极大的提升, 能通过延缓食品成分的氧化反应速率来延长食品的保质期<sup>[41]</sup>。目前, 已有多项关于植物提取液及其纯化后的酚类物质应用于功能性食品和食品保鲜方面的研究。马婷婷<sup>[42]</sup>以红葡萄酒作为基酒, 黄参茎叶多酚提取液为膳食补充剂, 研制出一款口感优良的功能性露酒, 该露酒比普通葡萄酒具有更高的抗氧化活性。刘毅等<sup>[43]</sup>以香芹酚为抗氧化剂, 采用静电纺丝法制备的香芹酚/明胶/聚乙烯醇纤维膜可有效降低橄榄油的过氧化值, 延长橄榄油的货架期。

### 2.4 抑菌活性分析

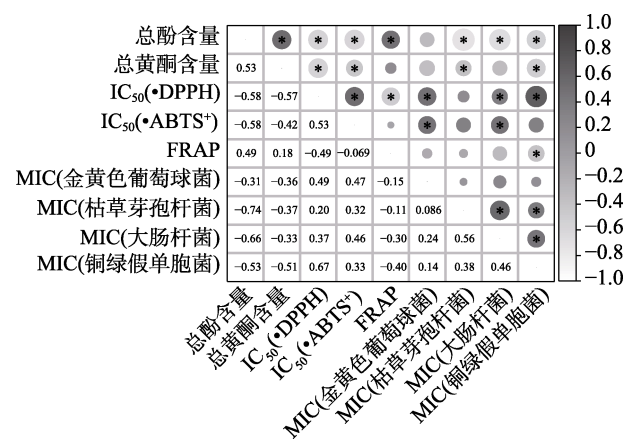
从表 1 中 29 个树莓茎提取液 MIC 与 MBC 结果可以看出, 在抑制 2 种革兰氏阳性菌 (金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌) 的测定中, 树莓茎提取液对金黄色葡萄球菌的抑制能力强于枯草芽孢杆菌。“红孩”树莓茎提取液对金黄色葡萄球菌的抑菌能力最强, 其 MIC 为 3.12 g/L, MBC 为 6.25 g/L; “北京 21”、“北京 32”、“DNS1”等 11 个树莓茎提取液对枯草芽孢杆菌表现出较强的抑菌效果, 其 MIC 和 MBC 均为 6.25 和 12.5 g/L。在抑制 2 种革兰氏阴性菌 (铜绿假单胞菌、大肠杆菌) 的测定中, 树莓茎提取液对铜绿假单胞菌的抑制能力强于大肠杆菌。“北京 9”、“北京 19”、“北京 21”等 9 个树莓茎提取液对铜绿假单胞菌的抑菌能力较强, 其 MIC 和 MBC 均为 3.12 和 6.25 g/L; “北京 32”、“DNS9”和“美特”树莓茎提取液对大肠杆菌表现出更强的抑菌能力, 其 MIC 和 MBC 均为 6.25 g/L。植物多酚具有广谱抗菌特性, 可以与细菌细胞膜结合, 破坏

细菌的膜蛋白, 导致细菌代谢紊乱, 从而抑制或杀死细菌<sup>[44]</sup>, 常被用于食品的保鲜与防腐。NGUYEN 等<sup>[45]</sup>制备了海桑叶多酚提取物与壳聚糖的复合膜, 其具备良好的抑菌活性、水蒸气阻隔性能和光阻隔性能, 将其涂于香蕉上能延缓香蕉的腐败, 延长贮藏期; 李颖畅等<sup>[46]</sup>制备的蓝莓叶多酚和壳聚糖复合保鲜剂, 具有抑制微生物生长繁殖的作用, 对冷藏鱿鱼鱼丸起到很好的保鲜效果。

29 个树莓茎提取液功能活性实验结果显示, 树莓茎提取液表现出良好的抗氧化能力和抑菌活性, 但因品种的不同而略有差异。尽管“HL1 黄树莓”、“DNS1”树莓茎含有较高含量的绿原酸和熊果苷, 但其抗氧化与抑菌活性却弱于“北京 32”, 这可能与样品中含有酚类化合物种类的多样性和含量的差异性有关, 不同酚类化合物在相同剂量下的抑制活性也有所差别, 而提取液中未鉴定出的酚类化合物也是影响其功能活性差异的因素之一<sup>[47-49]</sup>。此外, 树莓茎提取液中的其他活性成分, 如多糖、有机酸等也可能展现出一定的抗氧化、抑菌能力, 不同生物活性分子之间的协同作用可能伴随着抑制活性的增强或削弱<sup>[50-52]</sup>。

### 2.5 相关性分析

图 4 为树莓茎提取液多酚与其抗氧化能力、抑菌活性的相关性分析结果。



\*表示相关性显著 ( $P < 0.05$ )

图 4 树莓茎多酚与其抗氧化能力、抑菌活性相关性分析  
Fig. 4 Correlation analysis of raspberry stems polyphenols with its antioxidant and antibacterial activities

由图 4 可以看出, 总酚、总黄酮含量与  $\bullet$ DPPH、 $\bullet$ ABTS<sup>+</sup>清除能力的 IC<sub>50</sub> 呈显著的负相关 ( $P < 0.05$ ), 与 FRAP 呈正相关性, 说明树莓茎总酚、总黄酮含量越高, 其抗氧化能力越强。树莓茎总酚含量与 MIC 具有一定的负相关性, 其中总酚含量显著 ( $P < 0.05$ ) 影响其对枯草芽孢杆菌、大肠杆菌和铜绿假单胞菌的抑菌效果, 总黄酮含量显著 ( $P < 0.05$ ) 影响其对

枯草芽孢杆菌和铜绿假单胞菌的抑菌效果,表明树莓茎中的多酚含量越高,其对食源性致病菌的抑菌效果越好。总的来说,树莓茎中的总酚、总黄酮含量与抗氧化、抑菌活性之间具有良好的相关性,树莓茎中的总酚、总黄酮含量越高,其抗氧化能力、抑菌活性越强。

### 3 结论

(1) 采用超声波辅助提取法对 29 个品种树莓茎中的活性物质进行提取,测定其总酚、总黄酮含量分别为 1.10~3.27 g/100 g DW、0.69~1.32 g/100 g DW。不同品种树莓茎多酚含量存在一定差异,“北京 32”、“DNS9”和“杨 2 号”树莓茎含有较高的总酚含量,分别为 3.27、2.97 和 2.89 g/100 g DW;“北京 21”、“美特”和“DNS9”树莓茎含有较高的总黄酮含量,分别为 1.32、1.24 和 1.19 g/100 g DW。

(2) 通过高效液相色谱法鉴定并量化出树莓茎中含有 17 种酚类化合物,包括 10 种酚酸和 7 种黄酮类化合物,其中绿原酸含量最丰富,为 2.51~11.38 mg/g DW。

(3) 通过体外抗氧化实验测定不同品种树莓茎•DPPH 清除能力、•ABTS<sup>+</sup>清除能力和 FRAP。“北京 32”树莓茎具有较强的•DPPH 清除能力(IC<sub>50</sub> 为 2.22 g/L)和 FRAP,FRAP 为 1.09 mmol/g DW,“DNS9”树莓茎具有较强的•ABTS<sup>+</sup>清除能力,IC<sub>50</sub> 为 1.22 g/L。

(4) 抑菌实验结果表明,29 个品种树莓茎提取液对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌和铜绿假单胞菌有抑制作用,树莓茎提取液对铜绿假单胞菌表现出更强的抑制作用。相关性分析显示,树莓茎中的多酚含量与抗氧化能力、抑菌活性呈正相关性。

本文可为树莓茎资源的高值化利用,尤其是应用于生物医药、功能性食品与食品保鲜等领域提供数据参考。

### 参考文献:

- VELJKOVIĆ B, ŠOŠTARIĆ I, DAJIĆ-STEVAHOVIĆ Z, *et al.* Genetic structure of wild raspberry populations in the Central Balkans depends on their location and on their relationship to commercial cultivars[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 256: 108606.
- SHI C (师聪), CHEN X H (陈学红), LI R (李茹), *et al.* Effects of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on antioxidant components and activity of raspberry[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology (中国食品学报)*, 2023, 23(2): 83-90.
- SI X, CHEN Q Q, BI J F, *et al.* Comparison of different drying methods on the physical properties, bioactive compounds and antioxidant activity of raspberry powders[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(6): 2055-2062.
- SZYMANOWSKA U, BARANIAK B, BOGUĆKA-KOCKA A. Antioxidant, anti-inflammatory, and postulated cytotoxic activity of phenolic and anthocyanin-rich fractions from polana raspberry (*Rubus idaeus* L.) fruit and juice *in vitro* study[J]. *Molecules*, 2018, 23(7): 1812.
- GARJONYTE R, BUDIENE J, LABANAUSKAS L, *et al.* *In vitro* antioxidant and prooxidant activities of red raspberry (*Rubus idaeus* L.) stem extracts[J]. *Molecules*, 2022, 27(13): 4073.
- WANG Y H (王妍惠). Extraction, purification and antioxidant activity of polyphenol from red raspberry leaves[D]. Jinzhou: Bohai University (渤海大学), 2021.
- PAVLOVIĆ A V, PAPETTI A, ZAGORAC D D, *et al.* Phenolics composition of leaf extracts of raspberry and blackberry cultivars grown in Serbia[J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 87: 304-314.
- CHEN Q Q (陈青青), LI K (李柯), TANG X Q (唐晓清), *et al.* Analysis of phenolic composition and antioxidant activities in fruits, stems and leaves of *Rubus chingii* Hu[J]. *Food Science (食品科学)*, 2020, 41(24): 209-215.
- RAINA J, FIRDOUS A, SINGH G, *et al.* Role of polyphenols in the management of diabetic complications[J]. *Phytomedicine*, 2024, 122: 155155.
- PALLIYAGE G H, SINGH S, ASHBY C R, *et al.* Pharmaceutical topical delivery of poorly soluble polyphenols: Potential role in prevention and treatment of melanoma[J]. *Aaps Pharmscitech*, 2019, 20(6): 250.
- TOSHIMA S, HIRANO T, KUNITAKE H. Comparison of anthocyanins, polyphenols, and antioxidant capacities among raspberry, blackberry, and Japanese wild *Rubus* species[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 285: 110204.
- FARID N, WAHEED A, MOTWANI S. Synthetic and natural antimicrobials as a control against food borne pathogens: A review[J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e17021.
- LI S, JIANG S X, JIA W T, *et al.* Natural antimicrobials from plants: Recent advances and future prospects[J]. *Food Chemistry*, 2024, 432: 137231.
- PIRES T C S P, DIAS M I, BARROS L, *et al.* Phenolic compounds profile, nutritional compounds and bioactive properties of *Lycium barbarum* L.: A comparative study with stems and fruits[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 122: 574-581.
- GÜNDÜZ M, ÇIÇEK K, TOPUZ S. Extraction and optimization of phenolic compounds from butterbur plant (*Petasites hybridus*) by ultrasound-assisted extraction and determination of antioxidant and antimicrobial activity of butterbur extracts[J]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2023, 35: 100491.
- LIU H D (刘慧多). Effect of raspberry stem on the expression of HMGB1, TLR4, NF-Kappa B protein in liver tissue of mice with drug-induced liver injury[D]. Harbin: Heilongjiang University of Chinese Medicine (黑龙江中医药大学), 2017.
- RAMBARAN T F, BOWEN-FORBES C S. Chemical and sensory characterisation of two *Rubus rosifolius* (red raspberry) varieties[J]. *International Journal of Food Science*, 2020, 2020(4): 1-8.
- DONG J F, ZHANG M, LU L, *et al.* Nitric oxide fumigation stimulates flavonoid and phenolic accumulation and enhances antioxidant activity of mushroom[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(3): 1220-1225.
- HE H Y, YAN Y C, DONG D, *et al.* Effect of *Issatchenkia terricola* WJL-G4 on deacidification characteristics and antioxidant activities of red raspberry wine processing[J]. *Journal of Fungi*, 2022, 8(1): 17.
- ASLANHAN Ö, KALAY E, TOKALI F S, *et al.* Design, synthesis, antioxidant and anticholinesterase activities of novel isonicotinic hydrazide-hydrazone derivatives[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2023, 1279: 135037.
- ZHANG G W, HU M M, HE L, *et al.* Optimization of microwave-assisted enzymatic extraction of polyphenols from waste peanut shells and evaluation of its antioxidant and antibacterial activities *in vitro*[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2013, 91(2): 158-168.

- [22] LIU Y Y (刘瑶瑶), ZHONG S Y (钟赛意), LI H P (李会鹏), *et al.* Comparison of antioxidant activity and carbohydrate digesting enzymes inhibitory activity of polyphenols from different cultivars of *Cinnamomum cassia* Presl[J]. Journal of Food Science and Technology (食品科学技术学报), 2022, 40(4): 116-126.
- [23] CHEN X Q (陈小强), LIU L L (刘玲玲), SUN T T (孙彤彤), *et al.* Optimization of extraction of total phenolics and total flavonoids from *Phellodendron amurense* fruit by response surface method and their antioxidant activities[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2020, 37(2): 300-308.
- [24] SU J J, YANG R W, LIANG Y, *et al.* Comparative studies on selection of high polyphenolic containing Chinese raspberry for evaluation of antioxidant and cytotoxic potentials[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 12: 100603.
- [25] YU Y P, YANG G, SUN L Y, *et al.* Comprehensive evaluation of 24 red raspberry varieties in Northeast China based on nutrition and taste[J]. Foods, 2022, 11(20): 3232.
- [26] FAN Q (范青), LI M (李明), ZHANG X M (张雪梅), *et al.* Analysis of phenolic compounds and antioxidant enzyme activity during the growth and metabolism of red raspberry leaves[J]. Food Science (食品科学), 2023, 44(8): 238-246.
- [27] ILHAN G, GUNDOGDU M, KARLOVIC K, *et al.* Main agro-morphological and biochemical berry characteristics of wild-grown sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L. sp. *caucasica* Rousi) genotypes in turkey[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1198.
- [28] PATHIRAJA D, WANASUNDARA J, ELESSAWY F, *et al.* Water-soluble phenolic compounds and their putative antioxidant activities in the seed coats from different lentil (*Lens culinaris*) genotypes[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135145.
- [29] SCHULZ M, CHIM J F. Nutritional and bioactive value of *Rubus* berries[J]. Food Bioscience, 2019, 31: 100438.
- [30] WU L Y, YANG J, WANG C Y, *et al.* Chemical compositions of raspberry leaves influenced by growth season, cultivars and leaf position[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 304: 11349.
- [31] MADDOX C E, LAUR L M, TIAN L. Antibacterial activity of phenolic compounds against the phytopathogen *Xylella fastidiosa*[J]. Current Microbiology, 2010, 60(1): 53-58.
- [32] KABIR F, KATAYAMA S, TANJI N, *et al.* Antimicrobial effects of chlorogenic acid and related compounds[J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2014, 57(3): 359-365.
- [33] GONÇALVES A, SAMPAIO C I, ŠEVČOVIČOVÁ A, *et al.* Cynaropicrin- and chlorogenic acid-rich extracts easily prepared from *Cynara cardunculus* var. *scolymus*: Antioxidant and antigenotoxic properties[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2023, 52: 102808.
- [34] JIAO W X, LI X X, WANG X M, *et al.* Chlorogenic acid induces resistance against *Penicillium expansum* in peach fruit by activating the salicylic acid signaling pathway[J]. Food Chemistry, 2018, 260: 274-282.
- [35] KHAN H, ULLAH H, MARTORELL M, *et al.* Flavonoids nanoparticles in cancer: Treatment, prevention and clinical prospects[J]. Seminars in Cancer Biology, 2021, 69: 200-211.
- [36] QURESHI W A, ZHAO R, WANG H, *et al.* Co-delivery of doxorubicin and quercetin via mPEG-PLGA copolymer assembly for synergistic anti-tumor efficacy and reducing cardio-toxicity[J]. Science Bulletin, 2016, 61(21): 1689-1698.
- [37] DIAN L H, YU E J, CHEN X N, *et al.* Enhancing oral bioavailability of quercetin using novel soluplus polymeric micelles[J]. Nanoscale Research Letters, 2014, 9: 684.
- [38] JIANG N (姜楠), YAO W R (姚卫蓉), GAO Y (高媛), *et al.* Recent progress in the types and applications of polyphenol-based composite materials[J]. Food Science (食品科学), 2021, 42(13): 300-308.
- [39] YIMER A, FORSIDO S F, ADDIS G, *et al.* Phytochemical profile and antioxidant capacity of some wild edible plants consumed in Southwest Ethiopia[J]. Heliyon, 2023, 9(4): e15331.
- [40] LANG Y X, GAO N X, ZANG Z H, *et al.* Classification and antioxidant assays of polyphenols: A review[J]. Journal of Future Foods, 2024, 4(3): 193-204.
- [41] ZHAO Y X, GUO G P, XU B, *et al.* Electrospun natural polypeptides based nanofabrics enriched with antioxidant polyphenols for active food preservation[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134991.
- [42] MA T T (马婷婷). Chemical composition and biological activity of polyphenols extracted from the stems and leaves of *Sphallerocarpus gracilis*[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University (陕西师范大学), 2017.
- [43] LIU Y (刘毅), LI B L (李柏良), GAO B S (高宝善), *et al.* Fabrication and antioxidant properties of carvacrol/gelatin/polyvinyl alcohol fibrous membranes[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2023, 40(9): 1910-1918.
- [44] QIN F L, YAO L, LU C R, *et al.* Phenolic composition, antioxidant and antibacterial properties, and *in vitro* anti-HepG2 cell activities of wild apricot (*Armeniaca Sibirica* L. Lam) kernel skins[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 129: 354-364.
- [45] NGUYEN T T, DAO U T T, BUI Q P T, *et al.* Enhanced antimicrobial activities and physicochemical properties of edible film based on chitosan incorporated with *Sonneratia caseolaris* (L.) Engl. leaf extract[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 140: 105487.
- [46] LI Y C (李颖畅), WANG Y L (王亚丽), LI J R (励建荣). Effects of polyphenol of blueberry leaves and chitosan on the preservation of peru squid fish balls[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology (中国食品学报), 2016, 16(5): 103-108.
- [47] ABDELOUHAB K, GUEMMAZ T, KARAMAĆ M, *et al.* Phenolic composition and correlation with antioxidant properties of various organic fractions from *Hertia cheirifolia* extracts[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2023, 235: 115673.
- [48] SINGH J P, KAUR A, SINGH N, *et al.* *In vitro* antioxidant and antimicrobial properties of jambolan (*Syzygium cumini*) fruit polyphenols[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 1025-1030.
- [49] YEMIŞ G P, YEMIŞ O, DROVER J C G, *et al.* Antibacterial activity of a polyphenol-rich haskap (*Lonicera caerulea* L.) extract and tannic acid against *Cronobacter* spp.[J]. Food Control, 2022, 140: 109120.
- [50] BELHAOUES S, AMRI S, BENSOUILAH M. Major phenolic compounds, antioxidant and antibacterial activities of *Anthemis praecox* Link aerial parts[J]. South African Journal of Botany, 2020, 131: 200-205.
- [51] WANG Z C, ZHOU X Y, LIANG X N, *et al.* Antioxidant and antibacterial activities of a polysaccharide produced by *Chaetomium globosum* CGMCC 6882[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123628.
- [52] CHEN L L, LIU Z, SHI J P, *et al.* Preparation and antibacterial properties of chitosan/polyvinyl alcohol nanofibrous mats using different organic acids as solvents[J]. Process Biochemistry, 2022, 122: 13-28.