

高良姜中 4 种黄酮化合物的体外抗氧化能力及抑菌活性研究

Study on the antioxidant and antimicrobial activities of four flavonol compounds from *Alpinia officinarum* Hance rhizome in vitro

汪光华¹ 唐树平² 彭名军³ 马广智¹

WANG Guang-hua¹ TANG Shu-ping² PENG Ming-jun³ MA Guang-zhi¹

吴佩君¹ 杨喆¹ 王静辉¹ 黄儒强¹

WU Pei-jun¹ YANG Zhe¹ WANG Jing-hua¹ HANG Ru-qiang¹

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广东 广州 510631; 2. 上海玖旭化妆品有限公司, 上海 201613;
3. 广州市食品检验所, 广东 广州 510410)

(1. College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China;
2. Shanghai Joies Cosmetics Co., Ltd, Shanghai 201613, China;
3. Guangzhou Institute for Food Control, Guangzhou, Guangdong 510410, China)

摘要:从高良姜中提取纯化得到高良姜素、山奈素、山奈酚和槲皮素,以该 4 种黄酮化合物为原料,对比分析其抗氧化活性,及其对 6 种食源性腐败菌的抑制作用。结果表明,在抗氧化方面,槲皮素表现出较好的抗氧化活性,山奈酚和山奈素次之,高良姜素最低,但高良姜素在 ABTS 自由基清除试验中活性与山奈酚和山奈素相似。在抑菌方面,金黄色葡萄球菌对 4 种黄酮化合物较为敏感,其中枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌对槲皮素较为敏感(MIC 值分别为 1.25、2.50 mg/mL, MBC 值均为 2.5 mg/mL);大肠杆菌、白色念珠菌、黑曲霉和绿脓杆菌对 4 种化合物敏感性低,抑菌活性均不明显。

关键词:高良姜;黄酮;抗氧化;抑菌活性;构效关系

Abstract: The in vitro antioxidant and the antimicrobial activities of four flavonol compounds (Galangin, Kaempferide, Kaempferol and Quercetin) extracted and separated of *Alpinia officinarum* Hance rhizome were studied. The results showed that quercetin had most significant antioxidant activity among the four flavonoids. Moreover, the antioxidant activity of the other three flavonol compounds in order, Kaempferol (highest), Kaempferide, Galangin (lowest). How-

基金项目: 华南师范大学研究生创新基金项目(编号:2015lkxm24); 广州市产学研协同创新重大专项(编号:201604020068); 广州市科技计划项目(编号:201707010372); 广东省林业科技创新项目(编号:2016KJJC008)

作者简介: 汪光华,男,华南师范大学在读硕士研究生。

通信作者: 黄儒强(1968—),男,华南师范大学教授级高级工程师,博士。E-mail: qiangdoctor@126.com

收稿日期: 2017-01-09

ever the ABTS radical scavenging experiment results showed that the antioxidant activities of the three compounds were the same. The further antimicrobial experiment results showed that four flavonol compounds had antimicrobial activity to *Staphylococcus aureus*. *S. aureus* and *Bacillus subtilis* were two of the most sensitive among all the test strains to quercetin, and the MIC and MBC were detected to be 1.25 and 2.5 mg/mL, and 2.5 and 2.5 mg/mL respectively. However, all the four compounds showed very weak resistance against *Escherichia coli*, *P. aeruginosa*, *Aspergillus niger* and *Monilia albican*.

Keywords: Galangin; Flavonol; Antioxidant activity; Correlation between the structure and activity; antimicrobial activity

高良姜(Rhizoma *Alpinia officinarum*)为姜科山姜属(*Alpinia*)植物高良姜的干燥根茎(*Alpinia officinarum* Hance),别名:高凉姜、良姜、佛手根,主要分布于海南、广东、广西和云南,是著名的十大南药之一。高良姜是卫生部认定的药食同源药材之一,作为常用天然调味香料也被大量用作食品调味料、咖喱粉、卷烟加香等。从高良姜中提取的精油,其主要成分为高良姜素,可用于制造驱风油、万金油、高级香水、香皂、食用调料等^[1]。高良姜含有多种活性成分,其中主要的活性物质为:高良姜素、山奈素、山奈酚和槲皮素等化合物(图 1)^[2]。

许多来自植物中的黄酮类化合物具有良好的抗氧化活性和抑菌作用^[3-6]。高良姜活性成分的抗氧化和抑菌等作用已被大量研究,其已知主要化合物高良姜素、山奈素、山奈

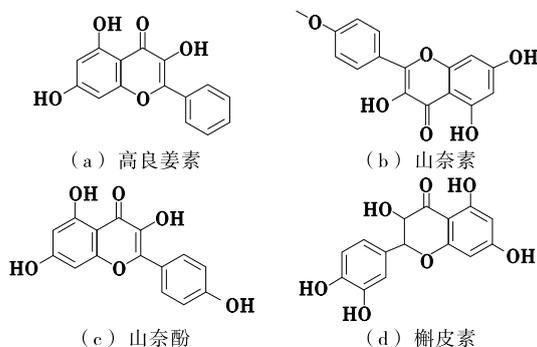


图1 高良姜中4种黄酮化合物的结构示意图

Figure 1 Chemical structure of Galangin, Kaempferide, Kaempferol, Quercetin

酚和槲皮素皆为黄酮醇化合物,结构相似,均是母核结构为2-苯基色原酮(2-phenyl-chromone)的多酚类化合物^{[7]427-430}。当前也有涉及这些化合物的相关药理活性研究^[8-10],但针对某一植物的主要化合物的活性分析,去间接评价该植物的生理药理活性的研究相对较少。

目前,关于高良姜中主要化合物活性之间的相关研究存在针对性、综合性不强的问题,这些研究只是单纯地采用某一两种分析方法对高良姜化合物进行活性评价,或简单地对高良姜中化合物进行研究,并没有针对哪一类化合物、其含量主次、结构性质等方面进行研究,达到间接评价高良姜的应用能力的目的^{[7]515-516[11-13]}。因此,本试验针对从高良姜中分离纯化的主要活性化合物(高良姜素、山奈素、山奈酚和槲皮素4种化合物)的抗氧化活性和对常见的几种食源性腐败菌的抑制作用进行研究,采用5种不同的分析方法综合研究高良姜中4种化合物的体外抗氧化活性。同时初步分析不同的评价方法及化合物结构,对各化合物活性存在的影响;通过对高良姜中4种化合物对6种常见食源性腐败菌(包括细菌、真菌)的抑制作用进行研究,间接评价高良姜防腐保鲜的应用价值。通过上述研究,以期高良姜在食品、化妆品、保健品以及药品等领域的深加工提供理论依据。

1 材料与方

1.1 材料

1.1.1 材料与主要试剂

高良姜素、山奈素、山奈酚和槲皮素:纯度98.0%以上,本实验室从高良姜中提取纯化所得;

1, 1-二苯基-2-苦肼基(DPPH):纯度96%,美国Sigma-Aldrich GmbH公司;

菲啰嗦:纯度97%,美国Sigma-Aldrich GmbH公司;

乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS):纯度98%,美国Sigma-Aldrich GmbH公司;

亚油酸:纯度99%,美国Sigma-Aldrich GmbH公司;

FeCl₃、FeCl₂:痕量金属总含量<0.01%,美国Sigma-Aldrich GmbH公司;

甲醇、二甲基亚砜(DMSO):色谱纯,麦克林公司;

其他所有试剂均为分析纯;

刃天青(7-羟基-3-羧基-10-氧化-三氢吩恶嗪钠盐):

90%,美国Sigma-Aldrich GmbH公司;

灭菌96孔板:costar 3599,美国Corning公司;

营养肉汤、琼脂粉、麦芽汁:广东环凯微生物科技有限公司;

金黄色葡萄球菌 *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538)、大肠杆菌 *Escherichia coli* (ATCC8739)、枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis* (ATCC6633)、绿脓杆菌 *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC27853)、白色念珠菌 *Candida albicans* (ATCC 10231)、黑曲霉 *Aspergillus niger* (ATCC 16404);广东省微生物菌种保藏中心。

1.1.2 仪器与设备

紫外分光光度仪:Shimadzu UV-2450/2550型,日本岛津公司;

电子分析天平:TE124S型,德国Sartorius公司;

双人单面净化工作台:SW-CJ-2FD型,苏州净化设备有限公司;

立式压力蒸汽灭菌器:YXQ-LS-50S11型,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;

电热恒温振荡水浴锅:DKZ-2型,上海精宏实验设备有限公司。

1.2 抗氧化活性测定

1.2.1 DPPH 自由基清除能力 根据文献^[14],修改如下:移取各化合物甲醇标准溶液(0.003~1.000 mg/mL)0.1 mL加入到含有3.9 mL新配制的DPPH甲醇溶液(57.65 μmol/L)试管中,立即将其放入紫外分光光度计中进行检测,直至吸光值稳定;取DPPH浓度梯度(1.78~57.65 mmol/L)按上述方法得其线性回归方程。反应液中DPPH浓度(X_{DPPH})通过线性回归方程得到,其DPPH清除率由式(1)计算:

$$S = \frac{A_0 - A_T}{A_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

S——DPPH自由基清除率,%;

A_T ——反应稳定时,反应液吸光度;

A_0 ——反应开始瞬间,反应液吸光度。

1.2.2 总抗氧化活性测定(FTC法) 根据文献^[15],修改如下:取2.5 mL各样品DMSO溶液加入2.5 mL亚油酸乳浊液中,其中2.5 mL亚油酸乳浊液由磷酸钾缓冲液(0.04 mol/L,pH 7.0)、8.75 μg吐温-20和7.75 μL亚油酸组成,反应液37℃水浴;对照组由2.5 mL亚油酸乳浊液和2.5 mL DMSO溶液组成。在水浴过程中,每隔5 h取出反应液0.1 mL,加入FeCl₂ 0.1 mL(20 mmol/L)反应10 min,再加入0.1 mL硫氰酸铵(30%)后在500 nm处检测其吸光度,当对照组达到最高吸光值时,停止检测。脂质过氧化抑制率按式(2)计算:

$$C = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

C——脂质过氧化抑制率,%;

A_0 ——空白对照组吸光度;

A_1 ——试验组吸光度。

1.2.3 总还原能力的测定 根据文献[16],修改如下:在 1 mL 不同浓度的样品甲醇溶液(7.5~500.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$)中加入磷酸钾缓冲液(0.2 mol/L, pH 6.6)和 1%的 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 溶液各 2.5 mL,反应液 50 $^\circ\text{C}$ 水浴 20 min。在反应液中加入三氯乙酸水溶液(2.5 mL, 10%),离心(10 min, 1 000 r/min)。取 2.5 mL 上清液、0.5 mL FeCl_3 (0.1 g/100 mL)和 2.5 mL 甲醇混合,在 700 nm 处测定吸光值。吸光值越大表示还原能力越强。

1.2.4 ABTS 自由基阳离子清除能力测定 根据文献[17],修改如下:将 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 溶液(7 mmol/L, 10 mL)和过硫酸钾(2.45 mmol/L, 10 mL)混合反应,储存于室温黑暗处 12 h。使用之前, $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 溶液用磷酸钾缓冲液(0.1 mol/L, pH 7.4)稀释,使之在 734 nm 处吸光值为 0.700 ± 0.025 备用。然后取 1 mL $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 溶液添加到 3 mL 不同浓度样品甲醇溶液中,室温反应 30 min,在 734 nm 处测其吸光度;取备用 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 溶液 0.031 25~1.000 00 mL 配成 1 mL 各梯度浓度溶液,按上述方法得其线性回归方程。通过线性回归方程得到反应液中 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 的浓度 $[\text{ABTS}^{\cdot+}]$,按式(3)计算样品的 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 清除能力:

$$R = \frac{A_{\text{Control}} - A_{\text{Sample}}}{A_{\text{Control}}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

R —— $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 清除率, %;

A_{Control} —— $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 起始浓度时的吸光值;

A_{Sample} ——样品存在时的吸光值。

1.2.5 金属离子清除能力测定 根据文献[18],修改如下:取样品 0.5 mL 加入 0.1 mL FeCl_3 (0.1 mol/L), 30 min 后,添加 0.1 mL 菲罗嗪(1 mmol/L),最后加入甲醇至总体积为 4 mL。将反应液置于 562 nm 处检测。

1.3 抑菌活性测定

1.3.1 菌种的活化 按文献[19]方法活化各保藏菌种,放进冰箱备用。

配置马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基(黑曲霉)、麦芽汁培养基(白色念珠菌)和牛肉膏培养基(细菌)。按照文献[20]配置各种菌液,并将 4 种细菌和 2 种真菌制成浓度约为 10^8 CFU/mL 和 10^6 CFU/mL 的菌悬液。

1.3.2 抑菌活性测定 据文献[21]所述平板琼脂打孔法测定各化合物对白色念珠菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的抑菌活性,以 DMSO 溶液作为空白对照。每组做 3 个平行,算出抑菌圈直径平均值。

据文献[22]所述方法测定各化合物对黑曲霉的抑制活性,以 DMSO 溶液作为空白对照。每组做 3 个平行,算出抑菌圈直径平均值。

上述试验操作均遵守无菌操作规程。

1.3.3 最低抑菌浓度(MIC 值)的测定 采用刃天青显色法[23]。

1.3.4 最低杀菌浓度(MBC)的测定 采用平板画线法[24],

在 MIC 值的基础上测定各化合物的最低杀菌浓度(MBC)。

1.4 数据处理与分析

利用 Originpro 8.0 软件对试验数据进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 抗氧化活性测定

2.1.1 DPPH 自由基清除能力 高良姜素、山奈素、山奈酚及槲皮素的抗氧化活性见图 2。各化合物的 DPPH 自由基清除能力由式(1)和(4)求得。由图 2 可知,槲皮素的 DPPH 自由基清除能力最强,其他依次是山奈酚、山奈素、高良姜素。可能与 4 种化合物所含的活泼氢数量密切相关,活泼氢数量越多其抗氧化活性越强[25]。

$$A_{517} = 0.020\ 74 \times X_{\text{DPPH}} + 0.003\ 83 (r^2 = 0.999\ 57)。 \quad (4)$$

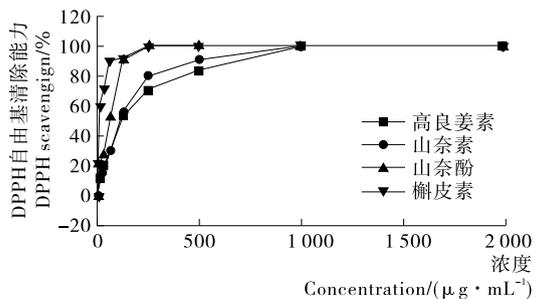
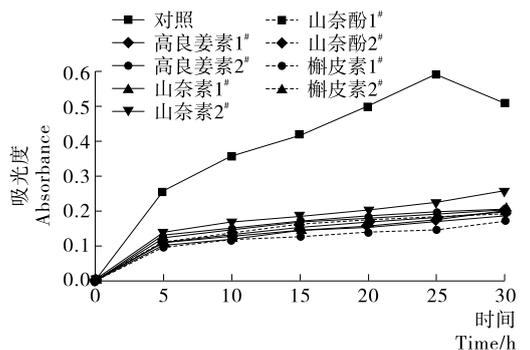


图 2 各黄酮化合物的 DPPH 自由基清除能力

Figure 2 DPPH radical scavenging potential of different concentrations of Galangin, Kaempferide, Kaempferol, Quercetin

2.1.2 脂质过氧化抑制试验(FTC 法) 由图 3 可知,槲皮素具有较强的抗脂质过氧化活性,4 种化合物之间的脂质过氧化抑制活性大小为:槲皮素 > 山奈酚 > 高良姜素 ≈ 山奈素。一般来说,黄酮类化合物所含活泼氢的数量越多其抗脂质过氧化能力越强,但是结果中高良姜素(B 环无羟基)与山奈素(-O-)的活性相似,可能与山奈素 B 环结构尚无法增强其活性,也可能与测试方法的原理、适用条件等因素有关[26]。

2.1.3 总还原能力的测定 由图 4 可知,4 种化合物都表现出高效的还原能力,其还原能力随吸光度的增加而增加,表



各试验组 1# 用量为 0.125 mg, 2# 用量为 0.062 5 mg

图 3 各黄酮化合物对脂质过氧化的影响

Figure 3 The effects of various concentrations of Galangin-Kaempferide on peroxidation of linoleic acid emulsion

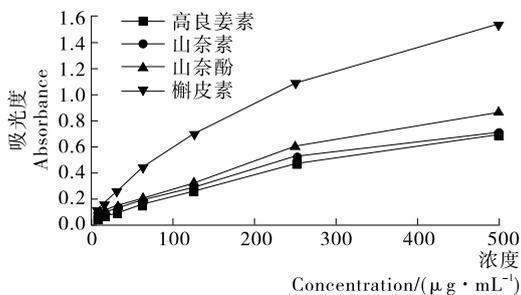


图4 不同浓度黄酮化合物的总还原能力

Figure 4 Total reductive potential of different concentrations of Galangin

明其还原能力随着质量浓度的增加而不断提高,具有量效关系。其中槲皮素的还原能力最强,因其黄酮结构B环中含有2个相邻的活泼羟基,可能与羟基氧原子的p-π共轭效应有强烈的斥电子作用,使与活性自由基反应生成的黄酮自由基更加稳定,生成的自由基越稳定。其他3种化合物的还原能力大小顺序:山奈酚>山奈素>高良姜素。可能与4种化合物所含活泼氢密切相关,活泼氢数量越多其抗氧化活性越强。

2.1.4 ABTS阳离子自由基清除能力测定 图5显示,各化合物的ABTS·⁺清除活性随其浓度的增大而升高,其中槲皮素自由基清除活性相较于另外3种化合物表现得很强,在浓度为0.4 μg/mL时,ABTS·⁺清除能力升高的较为显著,其他3种化合物的ABTS·⁺清除能力相似,可能是槲皮素结构中B环含有2个活泼羟基,另外3个化合物活泼羟基数量有限;该测试方法适用条件不同、敏感性不足,或与测试方法适用范围、原理有关,不能有效评价该3种化合物ABTS自由基清除能力。

$$A = 0.158\ 09 \times [ABTS \cdot ^+] - 0.004\ 04 (R^2 = 0.999\ 9) \quad (5)$$

2.1.5 金属离子清除能力测定 由图6可知,4种化合物的金属离子清除能力与其浓度具有量效关系,随其浓度的增加升高(15~500 μg/mL),各化合物金属离子清除能力的顺序为:槲皮素>山奈酚>山奈素>高良姜素。与4种化合物所含活泼氢密切相关,活泼氢数量越多其抗氧化活性越强。

2.2 化合物的抑菌活性

2.2.1 化合物的抑菌作用 由表1可知,在抑制细菌方面,浓度均为10 mg/mL的4种黄酮类化合物对金黄色葡萄球菌都具有一定的抑制效果,它们的抑菌能力依次是槲皮素>高良姜素>山奈素>山奈酚;大肠杆菌敏感性低,4种化合

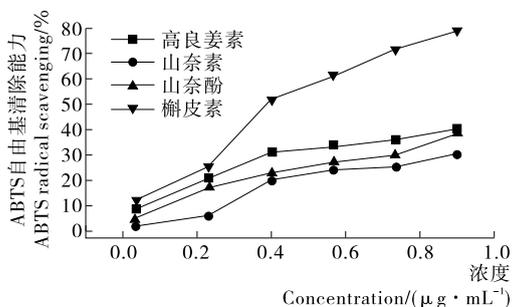


图5 不同浓度黄酮化合物的ABTS·⁺清除能力

Figure 5 ABTS radical scavenging of different concentrations of Galangin, Kaempferide, Kaempferol, Quercetin

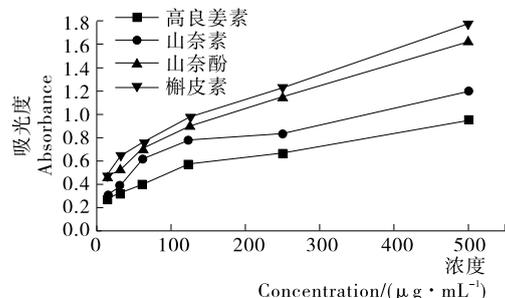


图6 不同浓度黄酮化合物的金属离子清除能力

Figure 6 Metal ionscavenging of different concentrations of Galangin, Kaempferide, Kaempferol, Quercetin

物对其抑制作用不明显;槲皮素对枯草芽孢杆菌具有较强的抑制作用(抑菌圈16.59 mm),另外3种化合物抑菌效果不明显;几种化合物对绿脓杆菌抑制效果不明显。

在真菌方面,高良姜素对黑曲霉具有一定的抑制效果,抑菌圈为8.16 mm,抑菌作用较弱,其他3种化合物抑菌效果不明显;高良姜素、槲皮素对白色念珠菌具有抑制效果。

2.2.2 化合物的最低抑菌浓度(MIC值)和最低杀菌浓度(MBC值) 在96孔板中采用二倍稀释法和平板划线法分别测定了4种黄酮化合物对供试菌的MIC值和MBC值,结果见表2。由表2可知,4种黄酮化合物对各菌种的抑制和杀菌能力各不相同。在抑制真菌方面,各黄酮化合物对黑曲霉的抑制效果较佳,槲皮素展现了一定的抑制效果,其MIC值与MBC值均为1.25 mg/mL;同时在白色念珠菌中,高良姜素(MIC值与MBC值分别为1.25,2.50 mg/mL)表现出了一定的抑制作用。在对细菌的抑制研究中,以金黄色葡萄球菌的敏感性最强,各黄酮化合物对其均有较好的抑制活性,其中高良姜素和槲皮素的(MIC值与MBC值分别为1.25,

表1 高良姜4种黄酮化合物对6种普通食源性腐败菌的抑制作用

Table 1 Inhibition zone diameters of four flavonol compounds from *Alpinia officinarum* Hance rhizome against 6 common foodborne pathogenic

化合物	抑菌圈直径/mm					
	金黄色葡萄球菌	大肠杆菌	枯草芽孢杆菌	绿脓杆菌	黑曲霉菌	白色念珠菌
高良姜素	10.11	—	—	—	8.16	9.082
山奈素	8.56	—	—	—	—	—
山奈酚	8.01	—	—	7.126	—	—
槲皮素	16.09	—	16.59	—	—	9.160

表 2 高良姜中 4 种黄酮化合物对 6 种普通食源性腐败菌的 MIC 值和 MBC 值
Table 2 The MIC and MBC of four flavonol compounds from *Alpinia officinarum* Hance rhizome against 6 common foodborne pathogenic mg/mL

供试样品	金黄色葡萄球菌		大肠杆菌		枯草芽孢杆菌		绿脓杆菌		黑曲霉菌		白色念珠菌	
	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC
高良姜素	1.25	2.50	5.00	5.00	2.50	2.50	1.25	1.25	1.25	2.50	1.25	2.50
山奈素	2.50	2.50	5.00	10.00	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	5.00	5.00
山奈酚	5.00	10.00	10.00	10.00	5.00	5.00	5.00	10.00	2.50	2.50	5.00	5.00
槲皮素	1.25	2.50	5.00	5.00	2.50	2.50	5.00	5.00	1.25	1.25	10.00	10.00

2.50 mg/mL)较好;对枯草芽孢杆菌抑制作用中,各化合物的抑制作用一般;绿脓杆菌和大肠杆菌的敏感性较弱,各化合物的 MIC 值与 MBC 值较高,抑制活性均较弱。该结果与抑菌圈直径的结果基本一致。

3 结论

本试验从抗氧化和抑菌作用两方面,测定高良姜提取物中 4 种主要化合物的相关活性,对比分析其抗氧化活性和对 6 种食源性腐败菌的抑制作用。分析表明:

(1) 4 种化合物的抗氧化能力大小顺序具有一定的规律性和构效关系,其中槲皮素在各评价方法中均表现出较好的抗氧化活性;各种分析方法对各化合物活性的测定结果也存在一定的影响。

(2) 不同化合物对菌种的抑制作用具有选择性和差异性,其中 4 种黄酮类化合物对金黄色葡萄球菌抑制作用较高;槲皮素对枯草芽孢杆菌的抑制作用较为敏感。

综合分析各化合物相关活性,为以后高良姜相关活性部位的筛选及其应用研究提供参考。此外,由于本试验的局限性,后续试验可对高良姜主要活性物质抗癌、体内抗氧化、抗血脂、抗衰老作用及其相关作用机制进行研究。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 北京:中国医药科技出版社, 2010: 270.

[2] 卜宪章, 肖桂武, 古练权, 等. 高良姜化学成分研究[J]. 中药材, 2000, 23(2): 84.

[3] 赵炯, 吕玮, 段宏泉, 等. 高良姜中的抗白念珠菌化学成分[J]. 山西医科大学学报, 2007, 38(7): 604-607.

[4] CUSHNIE T P, LAMB A J. Assessment of the antibacterial activity of galangin against 4-quinolone resistant strains of *Staphylococcus aureus* [J]. *Phytomedicine*, 2006, 13(3): 187-191.

[5] 沈健, 张虎翼, 徐波, 等. 高良姜中的抗氧化有效成分[J]. 天然产物研究与开发, 1997, 10(2): 33-36.

[6] LEE S E, HWANG H J, HA J S, et al. Screening of medicinal plant extracts for antioxidant activity [J]. *Life Science*, 2003, 73: 167-179.

[7] SARKER S D, NAHAR Lutfun. Natural Products Isolation [M]. Totowa: Humana Press, 1998.

[8] ILHAMI Gulcin, DALI Berashvili, AKCAHAN Gepdiremen. Antiradical and antioxidant activity of total anthocyanins from *Perilla pankinensis* decne [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2005, 101: 287-293.

[9] MATHEW S, ABRAHAM T E. Studies on the antioxidant activities of cinnamon (*Cinnamomum verum*) bark extracts, through various in vitro models [J]. *Food Chemistry*, 2006, 94: 520-528.

[10] 范琪. 厚朴抗氧化活性成分的提取分离及其抗氧化活性测试研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 1-2.

[11] 黄赛金, 尹爱武, 罗紫英, 等. 高良姜挥发油抑菌及抗氧化作用研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(19): 112-115.

[12] 沈健, 张虎翼, 徐波, 等. 高良姜中的抗氧化有效成分[J]. 天然产物研究与开发, 1998 10(2): 33-36.

[13] 赵晓娟. 高良姜质量控制方法和抗菌活性研究[D]. 沈阳: 沈阳药科大学, 2009: 1-2.

[14] 申迎宾, 张友维, 黄才欢, 等. 提取溶剂对青稞提取物总酚、黄酮含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 133-136.

[15] MITSUDA H, YUASUMOTO K, IWAMI K. Antioxidation action of indole compounds during the autoxidation of linoleic acid [J]. *Eiyo to Shokuryo*, 1996, 19: 210-214.

[16] ILHAMI Gulcin I, GUNGOR Sat, SUKRU Beydemir. Comparison of antioxidant activity of clove (*Eugenia caryophyllata* Thunb) buds and lavender (*Lavandula stoechas* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2004, 87: 393-400.

[17] 肖星凝, 徐雯慧, 左丹, 等. 6 种黄酮协同抗氧化作用及构效关系研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 17-21.

[18] LURDES Miram. TEREZA Fernandez, MARTA Santos. Interactions of Flavonoids with Iron and Copper Ions; A Mechanism for their Antioxidant Activity [J]. *Free Radical Research*, 2002, 36(11): 1 199-1 208.

[19] 吴少辉, 叶伟娟, 赵婷, 等. 南五味子乙醇提取物对食品腐败细菌的抑菌活性研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(8): 104-109.

[20] 高洁, 董文宾, 王勇, 等. 山皂荚多糖的提取工艺及抑菌活性[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 145-149.

[21] 邵金华, 何福林, 陈霞, 等. 梓树根皮总黄酮分离纯化及其抑菌活性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 140-144.

[22] 钟业俊, 徐欣源, 刘成梅, 等. 茶树油、丁香酚和柠檬醛对荔枝黑曲霉的抑制作用[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 21-24.

[23] 钟美, 江丹, 黄亮, 等. 对改良的三种最小抑菌浓度测试方法的探讨[J]. 中国洗涤用品工业, 2016(2): 75-79.

[24] 王秋红, 曹琦, 李斌, 等. 不同发酵时间对西瓜霜抗菌活性的影响及其有效部位筛选[J]. 中草药, 2015(13): 1 950-1 953.

[25] HUSAIN S R, CILLIARD J, CILLARD P. Hydroxyl radical scavenging activity of flavonoids [J]. *Phytochemistry*, 1987, 26(9): 2 487-2 491.

[26] 曾维才, 石碧. 天然产物抗氧化活性的常见评价方法[J]. 化工进展, 2013, 32(6): 1 205-1 213.