

柚皮功能性成分的应用研究进展

任文彬¹, 杨榕琳¹, 郑文雄¹, 黄德仙², 汪薇^{1*}

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广州 510000; 2. 广东十记果业有限公司, 广州 510000)

摘要: 柚子皮是柚子加工的副产品, 不但具有食用功能, 还有一定实用价值。因此, 对柚子皮进行深入研究, 充分利用柚皮资源, 有利于环境改善和资源回收利用, 符合我国“绿水青山就是金山银山”的主题。本文重点介绍了柚皮中的柠檬苦素类似物、黄酮类化合物、膳食纤维以及天然色素等几种主要功能活性成分的功效, 以及各活性物质提取工艺和工艺条件, 总结了柚子皮在食品、工业、医药保健的应用, 为柚子皮资源综合利用提供借鉴和参考。

关键词: 柚皮价值; 活性成分; 提取方法; 生产应用

Research progress on functional components of pomelo peel

REN Wen-Bin¹, YANG Rong-Lin¹, ZHENG Wen-Xiong¹, HUANG De-Xian², WANG Wei^{1*}

(1. School of Light Industry and Food, Zhongkai College of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510000, China;
2. Guangdong Shiji Citrus Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

ABSTRACT: Pomelo peel is a by-product of pomelo processing. It not only has an edible function, but also has a certain practical value. Therefore, in-depth study on pomelo peel and making full use of pomelo peel resources are conducive to environmental improvement and resource recycling and utilization, in line with the theme of "clear water and green mountains are gold and silver mountains" in China. This paper mainly introduced the effect of the limonin analogues, flavonoids, dietary fiber, natural pigment and other several kinds of main functional activity of pomelo peel and the extraction process and technological conditions of active substances, as well as summarized the application of pomelo peel in food, industry, medical health care, to provide reference for the comprehensive utilization of pomelo peel resources

KEY WORDS: pomelo peel value; active ingredients; extraction method; production and application

0 引言

柚子(*Citrus grandis*), 又名朱栾、文旦、内紫等, 是芸香科植物柚的成熟果实, 多产于我国福建、湖南、浙江、四川、广东、广西等地, 有很高的营养和药用价值^[1]。柚子清香、酸甜、凉润, 是人们最为喜爱的水果之一, 也是

公认的具有食疗效果的水果^[2]。其中, 柚子皮富含多种活性成分, 一直是科学界研究的热点^[3]。

柚子皮不仅具有食用价值, 还有一定的实用功效, 可用来防蚊虫、去除异味、治疗冻疮等^[4]。前人研究发现, 柚子皮中含有柠檬苦素类似物、黄酮类化合物、果胶、膳食纤维、香精油、天然色素等多种对人体有益的活性物质, 具

基金项目: 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室(2021B1212040013)、乡村振兴柚子产业服务团队项目(KA200194310)

Fund: Supported by the Guangdong Key Laboratory of Science and Technology of Lingnan Specialty Food (2021B1212040013), and the Rural Revitalization Grapefruit Industry Service Team (KA200194310)

*通信作者: 汪薇, 博士, 副教授, 主要研究方向为生物催化与转化、天然香料、食品加工。E-mail: wei0117@163.com

*Corresponding author: WANG Wei, Ph.D, Associate Professor, College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, No. 388, Guangxin Road, Zhongluotan Town, Baiyun District, Guangzhou City, Guangdong Province 510000, China. E-mail: wei0117@163.com

有抗氧化^[5]、抗癌、抑菌^[6]及降血糖等功效和作用。充分利用其活性物质, 可实现柚子果皮的废物回收, 既减少了环境污染, 又提高了柚子生产的经济效益^[7-8]。

柚子果皮中的生理活性物质被提取纯化后, 可运用于食品医药工业^[9]。柚子皮中含有丰富的粗蛋白和矿物质。张任豹等^[10]利用电感耦合等离子体发射光谱仪测定微量元素含量, 结果表明, 柚皮的常规成分含量为: 干物质 87%左右、粗蛋白 8%左右、粗脂肪 3%左右、粗灰分 4%左右、钙 0.3%~0.6%、磷 1%左右、粗纤维 17%左右、氨基酸总量为 5%~6%、体外蛋白可消化率为 10%~13%。由此可得, 柚子皮中粗蛋白、氨基酸含量较丰富, 营养价值较高。此外, 柚皮中的矿物质元素也较为丰富, 柚子皮中含有铜 5~8 mg/kg、铁 157~150 mg/kg、锰 11~12 mg/kg、锌 11~12 mg/kg。

近年来, 国内开始重视环境的保护及资源的可持续利用, 不少专家开始对柚子皮的活性物质以及其提取方法等进行深入研究, 并开发了柚皮相关的加工产品, 如药物、饮料、蛋糕等。本文通过对柚子皮活性物质及相关产品的综合叙述, 以期为提高产品附加值和柚子皮的进一步开发应用提供参考。

1 柚子皮功能性活性成分及功效

人们对柚子皮利用较少, 但事实上, 柚子皮浑身是宝, 它有清凉、解毒、抗炎、败火等功效。柚子皮中含有各种各样功能性活性成分, 例如柠檬苦素类似物、黄酮类化合物、果胶、膳食纤维、天然色素等, 对人类的身体健康大有裨益。

1.1 柠檬苦素类似物

柠檬苦素类似物是一类芸香科植物中特有的具有呋喃环的三萜内酯化合物, 存在于芸香科植物楝科和 Cneoraceae 科植物中^[11], 其在柑橘属果树中含量较为丰富, 是柚子产生苦味的来源之一。黄春霞等^[12]采用高效液相色谱法, 测出在沙田柚柚皮的苦素类似物在 0.8~1.3 mg/g 的范围内。经研究证明, 柠檬苦素具有抗癌、抑菌、消炎镇痛、抗氧化活性的作用^[13], 在医药与农业领域有着广阔的开发前景。

1.1.1 抗癌作用

国内外学者经过研究, 发现柠檬苦素可以抑制如口腔舌鳞癌^[14]、食管癌^[15]等多种癌症, 并通过了进一步的研究, 发现了类柠檬苦素抗癌机理。ANGELINA 等^[16]研究发现, 柠檬苦素可抑制乳腺癌细胞的增殖、粘附、迁移和侵袭。另外, 周玉付等^[17]研究得出其抗癌机制为清除自由基、激发谷胱甘肽转移酶活性、抑制致癌物质活性、遏制癌细胞的增殖。类柠檬苦素是一种天然物质, 毒性低、副作用小、安全性高, 在预防和治疗癌症方面具有潜在的经济性和广泛的应用前景, 但国内对于其在临床应用方面有待进

一步加深研究。

1.1.2 抑菌作用

类柠檬苦素也具有较好的抑菌效果。王世明^[18]研究可知: 柠檬苦素通过破坏根霉的细胞壁和细胞膜的完整性, 从而抑制根霉生长。张贝等^[19]实验得出柠檬苦素能较好地抑制枯草芽孢杆菌、大肠杆菌等微生物生长。因此, 类柠檬苦素可以作为一种天然的杀菌剂和防腐剂, 应用于食品领域, 以延长食品的货架期, 防止食品被微生物侵染, 保障食品的安全。

1.1.3 消炎镇痛作用

类柠檬苦素可消除炎症, 舒缓疼痛的功效。温靖等^[20]通过小鼠福尔马林实验和扭体实验以及小鼠耳廓肿胀模型和角叉菜胶致大鼠足肿胀模型, 证明了柠檬苦素具有消炎镇痛作用。所以, 柠檬苦素可作为有效成分, 应用于镇痛抗炎的药物中, 在医学药学上具有的潜在的开发价值。

1.1.4 抗衰老抗氧化作用

李林子等^[21]以衰老大鼠为模型, 发现柠檬苦素能够提高脑组织的抗氧化能力、延缓脑衰老。汪开拓等^[22]对柠檬苦素进行功能性研究时, 发现柠檬苦素能有效地清除自由基, 抑制亚油酸氧化。所以, 类柠檬苦素可作为生物功能性成分, 添加于老年人保健品中, 有助于老年人抵抗衰老, 延年益寿。

1.2 黄酮类化合物

柚子皮中含有丰富的黄酮类化合物, 含量约占 1%~6%^[4], 主要种类为二氢黄酮类化合物, 如柚皮苷、新橙皮苷等。其中柚皮苷含量最多, 是柚子皮中主要的黄酮类物质, 亦是柚子产生苦味的来源物质之一。黄酮类化合物具有抗氧化功效, 可以清除一定量 DPPH 和·OH 自由基。此外, 还具有抗癌抗肿瘤、抗心脑血管疾病、抗细菌、抗辐射等多种功能, 根据研究发现, 提高黄酮类化合物的摄入量可使乳腺癌和前列腺癌的发病率大大降低^[23-24], 对人们的疾病预防及身体健康有重要意义。

1.2.1 抗癌抗肿瘤

朱文振等^[25]研究表明黄酮类化合物通过抑制癌细胞增殖、清除过量的活性氧等机制, 达到抗癌抗肿瘤的功效; ZHOU 等^[26]发现柚皮苷对甲状腺癌细胞具有抗肿瘤作用, 通过调控细胞增殖和凋亡相关基因的表达及 PI3K/AKT 通路的激活, 抑制甲状腺癌细胞增殖, 诱导细胞凋亡。在预防和治疗癌症肿瘤方面, 与传统药物相对, 对人体造成的损伤小、风险低、天然无害、具有研究的价值。但是抗癌机理和临床应用有待深入研究。

1.2.2 抗心脑血管疾病

SUI 等^[27]通过研究发现柚皮苷治疗显著降低小鼠脂肪体重、肝重量、肝总胆固醇浓度、肝甘油三酯浓度、血浆低密度脂蛋白胆固醇水平。有人以高脂血症大鼠为研究对象, 发现黄酮类化合物可降血脂, 从而抗心脑血管疾

病^[28]。近年来, 中老年人的心脑血管发病率越来越高, 市场上对于抗心脑血管疾病的相关保健产品需求也不断上升。所以, 柚皮苷的研究与应用, 有较大的价值和意义。

1.2.3 抗菌抗病毒

吴泽钰^[29]研究发现, 柚皮苷可以抑制致龋细菌生长、产酸等生理过程; 另外, 卢锦澜^[30]通过实验证明柚皮中的总黄酮可以很好地抑制革兰氏阴性菌和阳性菌。由于柚皮苷的抑菌效果很强, 亦可作为天然的抑菌剂。与人工合成的添加剂相比, 柚皮苷的安全性更高, 在未来食品保藏方面也有发展的潜力。

1.2.4 抗辐射作用

研究发现, 柚皮苷可以通过调节辐射诱导的 NIH-3T3 细胞中 PPAR- γ 的表达来降低氧化损伤和炎症反应^[31]。抗辐射机制主要有: 促进因辐射损伤的造血系统的恢复; 保护 DNA 不受辐射损伤; 对人体的免疫系统进行保护^[32]。辐射可以导致细胞突变, 从而诱发癌症。所以, 柚皮中的柚皮苷也可以作为防辐射的功能性成分, 减轻辐射给人们带来的危害, 提高人们的健康指数, 具有开发价值。

1.3 膳食纤维

柚子皮中含有的膳食纤维含量比麦麸还要高, 堪称是优质的膳食纤维来源。它带有柚子独特的香气, 具有降低胆固醇、降低血糖、改善肠道菌群、助消化等生理功能, 可作为一种新型的食品添加剂, 广泛添加于饼干、面包、糕点等食品中, 改善产品的感官品质及质构, 增加产品的营养价值。同时, 膳食纤维会使人具有饱腹感, 可以作为如代餐粉等减肥瘦身产品的有效成分之一。膳食纤维亦可调节血糖, 预防糖尿病^[33]。

1.3.1 改善肠道环境

彭林等^[34]用去势雌性大鼠做研究, 证明柚子皮中所含的膳食纤维改善了其肠道环境, 抑制肠道有害菌群, 对人们的肠道吸收消化功能起着积极的作用。柚子皮纤维对于减肥瘦身方面有一定的效果, 可应用于减肥瘦身的食品中(如代餐粉), 不但没有副作用, 对身体不造成任何损伤, 反而有助于预防肠胃疾病, 维护肠胃健康。

1.3.2 降血糖

王强等^[35]通过比较经不同改性处理的膳食纤维对大鼠组织及血液中糖原水平的影响, 证明了柚皮中的纤维素具有调节血糖和胰岛素含量的功效。此功能可预防高血糖、糖尿病的发生。因此, 柚皮中的膳食纤维可以添加在高血糖、糖尿病这些特定人群的食品中, 对他们维持血糖平衡, 缓解病症有所裨益。

1.3.3 降血脂、降固醇

经测定, 柚皮中的膳食纤维可脱除猪油中的胆固醇, 且脱除率 $>80\%$ ^[36]; 另外, 王强等^[37]通过对比有无摄入膳食纤维的日摄高脂饲料大鼠的总胆固醇、甘油三脂等指标对比, 证明柚皮中的膳食纤维能降血脂固醇。以上研究表

明, 柚皮中膳食纤维具有降血脂、降固醇的功效, 亦可以作为功能性成分添加在老年人食品或保健品中, 减少高血脂的发病率, 从而降低心脑血管疾病发病的可能。

1.4 天然色素

为了使食品具有好的感官性状, 人们常常会向食品中添加色素。天然色素的颜色虽不如人工色素鲜艳、稳定, 却比人工色素安全^[38]。而柚子皮中富含天然色素, 柚子皮中的天然色素主要有黄酮类化合物和类胡萝卜素(包括 α -、 β -、 γ -胡萝卜素和番茄红素), 由于上文已经对黄酮类化合物进行了详细介绍, 此处着重叙述类胡萝卜素功能及应用。类胡萝卜素有抗癌、预防心脑血管疾病和抗骨质疏松作用, LIM 等^[39]研究发现类胡萝卜素可以预防肿瘤。它可被添加到保健食品中, 也可以作为食品的着色剂, 提高食品外观色泽和营养价值。

1.4.1 抗癌作用

类胡萝卜素具有显著的抗癌功效, 其中番茄红素可以破坏癌细胞骨架的形成, 抑制癌细胞增殖^[40], 而 β -胡萝卜素能够阻止癌细胞分裂^[41]。此外 LENKA 等^[42]实验证明胡萝卜素可以使肿瘤细胞对抗癌常规治疗增敏。因此, 类胡萝卜素也成为公认的抗癌物质之一。

1.4.2 预防心脑血管疾病

柚子皮中的色素具有预防心脑血管疾病的功能。 β -胡萝卜素和番茄红素可减少 ROS 和硝基酪氨酸的形成, 维持氧化还原平衡, 从而预防心血管疾病^[43]。另外, 柚皮中的番茄红素可以降低血液中甘油三酯含量, 抑制低密度脂蛋白氧化, 使血管柔韧性增强^[44]。

1.4.3 抗骨质疏松

有人通过美国国家健康和营养调查的 2005—2010 年的 24 h 膳食回顾数据、问卷调查及体格检查数据等多方面数据分析可得: 摄入类胡萝卜素能预防骨质疏松^[45]。杨胜等^[46]研究类胡萝卜素对成骨细胞代谢调控, 发现类胡萝卜素可以促进成骨细胞的 DNA 复制, 减少自由基对 DNA 损伤, 从而达到预防骨质疏松的功效。

2 柚皮中各类活性物质的提取

柚子皮中含有丰富的有效活性物质, 如果可以对柚皮进行合理利用, 采取最佳工艺条件对其进行加工, 则可以提高柚子皮的提取率, 从而变废为宝。柚子皮中的活性成分为有机物, 提取方法一般为有机溶剂提出法、酶取法、超声波提取法、回流法等。柠檬苦素类似物常用回流法、索氏提取法以及超声波提取法进行提取; 黄酮类化合物可采取乙醇提取法、微波辅助提取法、超声波提取法、大孔树脂吸附法等; 膳食纤维常用的提取方法有: 碱浸法、超声波辅助酶法、酶取法等; 天然色素可采用浸提法、微波萃取法、超临界二氧化碳萃取法、有机溶剂提取法等等。柚子皮中相关活性物质的提取方法与条件见表 1。

表 1 柚皮中活性物质的提取方法及条件
Table 1 Extraction methods and conditions of active substances in pomelo peel

提取物质	提取方法	最佳条件	参考文献
柠檬苦素类似物	回流法	二氯甲烷为提取剂, 提取温度: 50 °C, 两次回流	[47-48]
	索氏提取法	90%的乙醇, 提取时间 2.2 h, 液料比 40:1 (mL/g)	[49]
	超声波提取法	65%的乙醇溶液, 料液比 1:30 (g/mL), 60 °C, 超声 18 min	[50]
黄酮类化合物	乙醇-硫酸铵双水相萃取法	30%硫酸铵与 35%的乙醇, 液料比为: 36:1 (mL/g), 萃取温度为: 50 °C, 萃取时间为 1.6 h	[51]
	微波辅助提取法	80%的乙醇溶液, 固液比 1:15 (g/mL), pH=11, 微波功率: 595 W, 处理时间: 20 s	[52]
	超声辅助离子液体提取法	料液比 1:20 (g/mL), 超声功率 200 W, 超声时间 50 min	[53]
膳食纤维	大孔树脂吸附法	用 DM-301 树脂吸附, 吸附时间: 3 h, 吸附浓度: 214.65 μg/mL	[54]
	碱浸法	料液比为: 1:8 (g/mL), NaOH 浓度: 0.4~0.5 mol/L, 浸泡温度: 40~45 °C, 浸泡时间: 70 min	[55-56]
	超声波辅助酶法	超声波前处理: 30 min, 料液比 1:55 (g/mL), 纤维素酶添加量: 3%, 作用温度: 50 °C, 作用时间: 90 min	[57]
天然色素	酶取法	提取温度: 54 °C, 胰蛋白酶用量: 160 mg/g, 胰蛋白酶提取时间: 90 min, 淀粉酶提取时间: 132 min	[58]
	浸提法	提取剂: 95%的乙醇; pH=2, 回流提取: 2 h	[59]
	微波萃取法	微波功率: 200 W, 料液比为 1:2 (g/mL), 浸提时间 80 s, 浸提 2 次	[60]
	超临界二氧化碳萃取法	35 °C, 25 Mpa, 萃取时间: 2 h, 其中夹带剂(95%乙醇)与原料的比(V:m)为 3:1	[61]
	有机溶剂提取法	提取剂: 乙醇-石油醚, 浸取时间: 24 h	[62]

3 柚子皮的应用

柚子皮中含有柠檬苦素类似物、黄酮类化合物、膳食纤维、天然色素等活性物质, 可作为功能性原料在食品、工业、医药保健等多个领域广泛应用。若柚子皮可以被合理利用, 不仅可以变废为宝, 还能减少污染、保护环境。

3.1 在食品上的应用

柚子皮中含有香精等活性物质, 会赋予食物特殊风味, 同时提高食品的营养价值。柚子皮中含有各种天然色素, 也可以对食品进行着色。在食品制作生产中, 它作为一种天然的食品辅料被添加其中。比如可以将柚子皮制成果脯, 作为一种休闲零食^[63], 使柚子皮的附加值利用率增加; 还可以将柚子皮磨成粉添加在蛋糕中, 研制出一种新型口味的柚子蛋糕, 营养价值远高于原味蛋糕^[64]。柚子皮粉也可以添加在面包中, 增加面包的硬度、咀嚼性、弹性、胶着性等性质^[65]。同时, 可以将柚子皮与绿茶等调配成复合饮料, 做出一种健康、可口的饮品^[66]。

3.2 在工业上的应用

柚子皮在工业上也可以用于废水处理。经研究表明, 柚子皮中有大量的纤维物质, 比表面积较大, 微孔细道多, 可以制备成生物活性炭, 吸附废水中的重金属离

子(如六价铬, 砷^[67], 铅^[68], 锰^[69])及化学染料(如碱性品红)等杂质^[70], 对污水净化有很大作用。同时, 经测定发现, 柚子皮具有较大的发酵产沼气潜力, 可作为良好的沼气发酵原料^[71]。

3.3 在医药保健上的应用

中医认为柚子皮可入药, 能化痰、消食、下气。主治咳喘、气郁胸闷、脘腹冷痛、食滞、疝气。现代医学研究表明: 柚子皮提取物具有防癌、抗氧化、降血脂、降血糖、抗炎镇痛等生物活性^[72]。柚子皮中的类柠檬苦素具有镇疼消炎的效果, 可以作为镇疼药成分; 同时柚子皮中的黄酮类化合物具有抗癌抗氧化的功效, 有利于美容养颜、延缓衰老。柚子皮在各个领域的应用见表 2。

表 2 柚皮在各个领域的应用
Table 2 Application of grapefruit peel in various fields

应用方面	应用内容	功效成分	相关产品
食品	作为食品原料或辅料	天然色素、香精	柚子蛋糕、果脯、柚子面包
工业	废水处理; 沼气发酵原料	纤维、淀粉和糖类	生物活性炭
医药保健	可入药, 也可作为保健品成分	黄酮类化合物、类柠檬苦素	镇痛药、消炎药、中药成分

4 结束语

我国是柚类种质资源较为丰富的国家,充分利用柚类资源,可以提高柚子产品的附加值,从而实现产品生产的利益最大化。但也由于传统的柚子产品生产不能有效地利用柚子皮中的活性成分,造成了资源浪费及污染环境等问题^[4]。因此如果能够通过各种新技术来提高柚子皮的利用率,对柚子皮的活性成分及其功能性应用进行研究、分析与总结,将有利于科研工作者进一步开展相关研究,未来有望在食品加工、工业生产、医药研制领域取得较大突破,以实现柚子皮资源综合利用,为柚子皮的加工应用提供借鉴和参考。

参考文献

- [1] 李靓,朱涵彬,李长滨,等. 柚子营养成分及保健功能研究[J]. 现代食品, 2020, (24): 45-47.
LI L, ZHU HB, LI CB, *et al.* Study on the nutrition and health function of pomelo [J]. Mod Food, 2020, 0(24): 45-47.
- [2] 张军强,李随勤. 柚子皮的利用研究[J]. 西部皮革, 2016, 38(8): 282.
ZHANG JQ, LI SQ. Study on utilization of pomelo peel [J]. West Leath, 2016, 38(8): 282.
- [3] 李俊儒. 柚子皮黄酮类化合物及其应用研究进展[J]. 产业与科技论坛, 2016, 15(20): 40-41.
LI JR. Research progress on flavonoids from pomelo peel and their application [J]. Ind Technol Forum, 2016, 15(20): 40-41.
- [4] 曾小峰,曾顺德,尹旭敏,等. 柚子皮有效成分提取方法研究进展[J]. 南方农业, 2016, 10(34): 67-70.
ZENG XF, ZENG SD, YIN XM, *et al.* Research progress on extraction methods of active components from pomelo peel [J]. South Agric, 2016, 10(34): 67-70.
- [5] YANG CP, LIU MH, ZOU W, *et al.* Toxicokinetics of naringin and its metabolite naringenin after 180-day repeated oral administration in beagle dogs assayed by a rapid resolution liquid chromatography/tandem mass spectrometric method [J]. J Asian Nat Prod Res, 2012, 14(1): 68-75.
- [6] MUHAMMUD MK, MUEEN I, MUHAMMUD AH, *et al.* Antioxidant and antipathogenic activities of citrus peel oils [J]. J Essent Oil Bear Plants, 2012, 15(6): 972-979.
- [7] 杨宁. 柚子全果综合利用及生物活性研究进展[J]. 广州化工, 2015, 43(5): 9-11.
YANG N. Research progress of comprehensive utilization and biological activity of grapefruit fruit [J]. Guangzhou Chem Ind, 2015, 43(5): 9-11.
- [8] TIAN XJ, LIU Y, FENG X, *et al.* The effects of alcohol fermentation on the extraction of antioxidant compounds and flavonoids of pomelo peel [J]. Food Sci Technol, 2017, (2): 763-769.
- [9] 谢婧,宋新辉,许少丹. 柚子活性成分的研究进展[J]. 广州化工, 2013, 41(7): 14-16.
XIE J, SONG XH, XU SD. Research progress of active components of grapefruit [J]. Guangzhou Chem Ind, 2013, 41(7): 14-16.
- [10] 张任豹,林英庭,朱风华. 柚子皮营养成分分析与评价[J]. 天津农业科学, 2020, 26(6): 76-78, 84.
ZHANG RB, LIN YT, ZHU FH. Analysis and evaluation of nutritional components of pomelo peel [J]. Tianjin Agric Sci, 2020, 26(6): 76-78, 84.
- [11] 贾冬英,姚开,谭敏,等. 柚果皮中生理活性成分研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2001, (11): 74-78.
JIA DY, YAO K, TAN M, *et al.* Advances in the study of physiological active components in pomelo peel [J]. Food Ferment Ind, 2001, (11): 74-78.
- [12] 黄春霞,刘萍,邓光宙,等. 采用高效液相色谱法测定沙田柚果实主要苦味物质的研究[J]. 中国南方果树, 2014, 43(6): 57-59.
HUANG CX, LIU P, DENG GZ, *et al.* Study on the determination of main bitter substances in fruit of Shatian pomelo by high performance liquid chromatography [J]. South China Fruits, 2014, 43(6): 57-59.
- [13] 张贝,冯卫华,曾晓房,等. 柠檬苦素的性质及其生物活性研究进展[J]. 农产品加工, 2017, (18): 69-71.
ZHANG B, FENG WH, ZENG XF, *et al.* Research progress on the properties and biological activities of limonin [J]. Agric Prod Process, 2017, (18): 69-71.
- [14] YANG GS, LI Z, CHEN L. Limonin suppresses the progression of oral tongue squamous cell carcinoma via inhibiting YAP transcriptional regulatory activity [J]. Tissue Cell, 2020, 65(6): 101346.
- [15] LI J, LI F, ZHOU ZG, *et al.* Limonoid compounds from *Xylocarpus granatum* and their anticancer activity against esophageal cancer cells [J]. Thorac Cancer, 2020, 11(7): 1817-1826.
- [16] ANGELINA MF, JÚLIO CCF, AMANDA BB, *et al.* Effects of limonoid cedrelone on MDA-MB-231 breast tumor cells *in vitro* [J]. Anti-Cancer Agent Med Chem, 2013, 13(10): 1645-1653.
- [17] 周玉付,沈媛媛,周志钦,等. 柑橘类柠檬苦素抗癌活性研究进展[J]. 中国细胞生物学学报, 2011, 33(5): 548-553.
ZHOU YF, SHEN YY, ZHOU ZQ, *et al.* Advances in anticancer activity of citrus limonin [J]. Chin J Cell Biol, 2011, 33(5): 548-553.
- [18] 王世明. 柠檬苦素通过破坏根霉细胞壁和细胞膜的完整性起抑菌作用[J]. 中国果业信息, 2019, 36(5): 65-66.
WANG SM. The bacteriostasis of limonin by destroying the integrity of rhizopus cell wall and cell membrane [J]. China Fruit Ind Inform, 2019, 36(5): 65-66.
- [19] 张贝,白卫东,冯卫华,等. 柠檬皮中柠檬苦素的提取及其抑菌稳定性研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(10): 150-152.
ZHANG B, BAI WD, FENG WH, *et al.* Extraction of limonin from lemon peel and its antibacterial stability [J]. J Anhui Agric Sci, 2018, 46(10): 150-152.
- [20] 温靖,施英,徐玉娟,等. 柑桔果实中柠檬苦素抗炎镇痛作用的研究[J]. 食品科学, 2007, (11): 515-518.
WEN J, SHI Y, XU YJ, *et al.* Studies on the anti-inflammatory and analgesic effects of limonin in citrus fruits [J]. Food Sci, 2007, (11): 515-518.
- [21] 李林子,胡文敏,唐靓,等. 柠檬苦素对自然衰老大鼠抗氧化和学习记忆能力的影响[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(1): 22-27.
LI LZ, HU WM, TANG L, *et al.* Effects of limonin on antioxidant and learning and memory abilities of natural aging rats [J]. Chin J Food Hyg, 2016, 28(1): 22-27.
- [22] 汪开拓,蒋永波,王富敏,等. 柠檬籽粒中柠檬苦素离子液体双水相提取体系的优化与抗氧化活性分析[J]. 核农学报, 2020, 34(11): 2507-2518.
WANG KT, JIANG YB, WANG FM, *et al.* Optimization and antioxidant activity analysis of limonin ionic liquid two-phase extraction system from lemon seeds [J]. J Nucl Agric Sci, 2020, 34(11): 2507-2518.
- [23] MARCHAND LL. Cancer preventive effects of flavonoids-A review [J]. Biomed Pharm, 2002, 56(6): 296-301.
- [24] 郑文雄,麦晓怡,张宇翠,等. 金花茶天然抗氧化五谷代餐粉加工工艺[J]. 食品工业, 2021, 42(2): 87-91.
ZHENG WX, MAI XY, ZHANG YC, *et al.* Processing technology of natural antioxidant grain meal substitute powder of *Camellia sinensis* [J]. Food Ind, 2021, 42(2): 87-91.

- [25] 朱文振, 马龙, 李国荣. 黄酮类化合物的抗癌作用及作用机制[J]. 生命科学, 2012, 24(05): 444-449.
ZHU WZ, MA L, LI GR. Anticancer action and mechanism of flavonoids [J]. Chin Bull Life Sci, 2012, 24(5): 444-449.
- [26] ZHOU J, XIA L, ZHANG Y. Naringin inhibits thyroid cancer cell proliferation and induces cell apoptosis through repressing PI3K/AKT pathway [J]. Pathol Res Pract, 2019, 215(12): 152707.
- [27] SUI GG, XIAO HB, LU XY, *et al.* Naringin activates AMPK resulting in altered expression of SREBPs, PCSK9, and LDLR to reduce body weight in obese C57BL/6J mice [J]. J Agric Food Chem, 2018. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b02696
- [28] JIANG J, SHAN L, CHEN Z, *et al.* Evaluation of antioxidant-associated efficacy of flavonoid extracts from a traditional Chinese medicine Hua Ju Hong (peels of *Citrus grandis* (L.) Osbeck) [J]. J Ethnopharm, 2014, 158: 325-330.
- [29] 吴泽钰. 柚皮苷对主要致龋细菌及生物膜作用的实验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2020.
WU ZY. The effect of naringin on caries causing bacteria and biofilms [D]. Urumchi: Xinjiang Medical University, 2020.
- [30] 卢锦澜. 中国 10 产地文旦柚果皮化学成分及生物活性研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2020.
LU JL. Study on chemical composition and biological activity of pomelo peel from 10 producing areas in China [D]. Beijing: Minzu University of China, 2020.
- [31] DAS RN, BALUPILLAI A, DAVID E, *et al.* Naringin, a natural flavonoid, modulates ultraviolet-B radiation induced DNA damage and photoaging through modulates NER repair and MMPs expression in mouse embryonic fibrobl [J]. J Environ Pathol Toxicol Oncol, 2020, 39(2): 191-199.
- [32] 易文实. 黄酮类化合物的生物活性研究进展[J]. 广州化工, 2012, 40(2): 47-50.
YI WS. Research progress on bioactivity of flavonoids [J]. Guangzhou Chem Ind, 2012, 40(2): 47-50.
- [33] 孙海燕, 杨梦凡, 郝丹青, 等. 膳食纤维的研究现状[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(6): 238-242.
SUN HY, YANG MF, HAO DQ, *et al.* Research status of dietary fiber [J]. Storage Process, 2019, 19(6): 238-242.
- [34] 彭林, 桂余, 任文瑾, 等. 柚皮膳食纤维对去势雌性大鼠肠道发酵的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 342-347.
PENG L, GUI Y, REN WJ, *et al.* Effects of dietary fiber from pomelo peel on intestinal fermentation in castrated female rats [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(15): 342-347.
- [35] 王强, 王睿, 李贵节, 等. 改性柚皮膳食纤维对大鼠肌肉及血糖水平的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(8): 54-61.
WANG Q, WANG R, LI GJ, *et al.* Effects of modified pomelo peel dietary fiber on muscle and blood glucose levels in rats [J]. Chin J Food Sci, 2014, 14(8): 54-61.
- [36] 屈景年, 聂雪, 李俊华, 等. 柚皮膳食纤维脱除猪油中胆固醇的研究[J]. 衡阳师范学院学报, 2013, 34(3): 45-47.
QU JN, NIE X, LI JH, *et al.* Removal of cholesterol from lard by dietary fiber from pomelo peel [J]. J Hengyang Norm Univ, 2013, 34(3): 45-47.
- [37] 王强, 赵欣. 柚皮膳食纤维对高脂日粮大鼠血脂调节的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(15): 277-280.
WANG Q, ZHAO X. Effects of dietary fiber from pomelo peel on lipid regulation in rats fed a high-fat diet [J]. Food Sci, 2013, 34(15): 277-280.
- [38] 邓桂兰, 魏强华, 刘冬梅. 柚子皮的综合利用研究[J]. 食品工业, 2013, 34(9): 180-184.
DENG GL, WEI QH, LIU DM. Study on comprehensive utilization of pomelo peel [J]. Food Ind, 2013, 34(9): 180-184.
- [39] LIM JY, WANG XD. Mechanistic understanding of β -cryptoxanthin and lycopene in cancer prevention in animal models [J]. Biochim Biophys Acta-Molecul Cell Biol Lipids, 2020, 1865(11): 158652.
- [40] 朱原, 张永英, 朱海波, 等. 番茄红素生物学功能研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(18): 202-207.
ZHU Y, ZHANG YY, ZHU HB, *et al.* Research progress on the biological function of lycopene [J]. Food Res Dev, 2020, 41(18): 202-207.
- [41] NIRANJANA R, GAYATHRI R, MOL SN, *et al.* Carotenoids modulate the hallmarks of cancer cells [J]. J Funct Food, 2015, 18: 968-985.
- [42] LENKA K, ALENA L, MAREK S, *et al.* Carotenoids in cancer apoptosis-The road from bench to bedside and back [J]. Cancers, 2020, 12(9): 2425.
- [43] 惠俊楠, 李若楠, 李玲茜, 等. 类胡萝卜素应用的研究进展[J]. 畜牧与兽医, 2020, 52(4): 143-147.
HUI JN, LI RN, LI LX, *et al.* Advances in the application of carotenoids [J]. Anim Hus Vet Med, 2020, 52(4): 143-147.
- [44] 李佳, 闫唯, 刘钰华, 等. 番茄红素保健功能及其应用研究进展[J]. 农业与技术, 2016, 36(15): 5-6.
LI J, YAN W, LIU YH, *et al.* Progress in research on health function and application of lycopene [J]. Agric Technol, 2016, 36(15): 5-6.
- [45] 李璐. 胡萝卜素摄入与骨质疏松的关联性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
LI L. Association between carotene intake and osteoporosis [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [46] 杨胜, 刘俊. 类胡萝卜素与骨密度关系的观察性研究进展[J]. 健康教育与健康促进, 2020, 15(2): 123-126.
YANG S, LIU J. Research progress on the relationship between carotenoids and bone mineral density [J]. Health Edu Health Promot, 2020, 15(2): 123-126.
- [47] 李彪, 施蕊, 熊智, 等. 柚皮柠檬苦素的提取及其杀虫活性研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 284-288.
LI B, SHI R, XIONG Z, *et al.* Studies on the extraction and insecticidal activity of limonin from naringin [J]. Chin Agric Sci Bull, 2012, 28(1): 284-288.
- [48] 李彪, 施蕊, 熊智, 等. 柚子皮中柠檬苦素提取工艺及其抑菌活性研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(5): 198-200.
LI B, SHI R, XIONG Z, *et al.* Studies on the extraction technology and antibacterial activity of limonin from grapefruit peel [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(5): 198-200.
- [49] 张早明, 李化强, 吴菲菲, 等. 索氏法提取柚籽中柠檬苦素工艺优化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(24): 8331-8336.
ZHANG ZM, LI HQ, WU FF, *et al.* Optimization of extraction process of limonin from pomelo seeds by Soxhlet method [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(24): 8331-8336.
- [50] 秦秀凤, 蒲彪, 王建鹏. 超声波提取橘皮中柠檬苦素化合物的工艺研究[J]. 食品科技, 2011, 36(9): 257-261.
QIN XF, PU B, WANG JP. Study on ultrasonic extraction of limonin compounds from orange peel [J]. Food Sci Technol, 2011, 36(9): 257-261.
- [51] 韩秋菊, 王晨, 李薇, 等. 乙醇-硫酸铵双水相萃取柚子皮中黄酮类化合物的研究[J]. 应用化工, 2020, 49(9): 2275-2278.
HAN QJ, WANG C, LI W, *et al.* Extraction of flavonoids from grapefruit peel by ethanol-ammonium sulfate aqueous two-phase extraction [J]. Appl Chem Ind, 2020, 49(9): 2275-2278.
- [52] 蒋玲艳, 王林果, 郑华忠. 微波法提取柚皮中黄酮类化合物的工艺研究[J]. 玉林师范学院学报, 2008, 29(5): 80-83.
JIANG LY, WANG LG, ZHENG HZ. Study on the extraction process of flavonoids from pomelo peel by microwave [J]. J Yulin Norm Univ, 2008, 29(5): 80-83.

- [53] 李国峰, 陈海芳, 杜文迪, 等. 超声辅助离子液体提取柚子皮总黄酮及其抗氧化研究[J]. 江西中医药大学学报, 2021, 33(1): 84-88.
LI GF, CHEN HF, DU WD, *et al.* Ultrasonic-assisted extraction of total flavonoids from grapefruit peel by ionic liquid and its antioxidant activity [J]. *J Jiangxi Univ Chin Med*, 2021, 33(1): 84-88.
- [54] 杨尉. 柚子皮黄酮提取与抗氧化性能研究[J]. 山东化工, 2019, 48(20): 48-50.
YANG W. Study on extraction and antioxidant activity of grapefruit skin [J]. *Shandong Chem Ind*, 2019, 48(20): 48-50.
- [55] 徐坤范, 乔凤霞, 王家栋. 柚子皮中膳食纤维的提取条件研究[J]. 现代农业科技, 2018, (22): 254, 258.
XU KF, QIAO FX, WANG JD. Study on extraction conditions of dietary fiber from grapefruit peel [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2018, (22): 254, 258.
- [56] 张君. 柚子皮中膳食纤维的提取条件研究[J]. 新农业, 2018, (11): 4-7.
ZHANG J. Study on extraction conditions of dietary fiber from grapefruit peel [J]. *New Agric*, 2018, (11): 4-7.
- [57] 薛山, 肖夏, 谢建山. 超声波辅助酶法提取涪陵柚皮海绵层水溶性抗氧化膳食纤维工艺优化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 197-203, 210.
XUE S, XIAO X, XIE JS. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction of water-soluble antioxidant dietary fiber from pomelo peel sponge layer [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(1): 197-203, 210.
- [58] 范道春, 朱昊伟, 刘垒, 等. 酶法提取柚子皮中水不溶性膳食纤维的研究[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 165-168.
FAN DC, ZHU HW, LIU L, *et al.* Enzymatic extraction of water-insoluble dietary fiber from pomelo peel [J]. *Food Ind*, 2019, 40(2): 165-168.
- [59] 曹艳萍, 霍文兰. 柚子皮黄色素的提取及稳定性研究[J]. 温州师范学院学报(自然科学版), 2002, (6): 6-8.
CAO YP, HUO WL. Study on the extraction and stability of yellow pigment from pomelo [J]. *J Wenzhou Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2002, (6): 6-8.
- [60] 李巧玲. 微波萃取技术在天然食用色素提取上的应用[J]. 食品科技, 2003, (10): 60-61, 64.
LI QL. Application of microwave extraction in the extraction of natural food pigment [J]. *Food Sci Technol*, 2003, (10): 60-61, 64.
- [61] 时海香, 仲山民, 吴峰华. 超临界 CO₂ 萃取常山胡柚天然色素工艺[J]. 林业科技开发, 2008, (1): 20-23.
SHI HX, ZHONG SM, WU FH. Study on the technology of supercritical CO₂ extraction of natural pigment from citrus Changshan [J]. *J Forestry Eng*, 2008, (1): 20-23.
- [62] 林春绵, 王忠杰, 茅惠忠. 柚皮色素的提取及其稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 1996, (4): 50-53.
LIN CM, WANG ZJ, MAO HZ. Studies on the extraction and stability of pomelo peel pigment [J]. *Food Ferment Ind*, 1996, (4): 50-53.
- [63] 李靓, 朱涵彬, 李长滨, 等. 柚子加工产品应用研究进展[J]. 饮料工业, 2020, 23(5): 70-73.
LI L, ZHU HB, LI CB, *et al.* Research progress on grapefruit processing products [J]. *Beverage Ind*, 2020, 23(5): 70-73.
- [64] 陈宝宏, 石雪萍. 柚子皮粉风味蛋糕配方的研制[J]. 食品工业, 2014, 35(1): 28-30.
CHEN BH, SHI XP. Development of grapefruit peel cake formula [J]. *Food Ind*, 2014, 35(1): 28-30.
- [65] 罗文珊, 谢文佩. 柚皮粉膳食纤维面包的加工工艺及品质影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(9): 112-118.
LUO WS, XIE WP. Effects of processing technology and quality of dietary fiber bread with pomelo peel powder [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(9): 112-118.
- [66] 迟恩忠, 李润仪, 赵雅婷, 等. 柚子皮绿茶复合饮料的研制[J]. 农产品加工, 2020, (13): 1-4.
CHI EZ, LI RY, ZHAO YT, *et al.* Development of grapefruit peel green tea compound beverage [J]. *Agric Prod Process*, 2020, (13): 1-4.
- [67] 王琼, 黄丽媛, 古黄玲, 等. 生物质废弃物柚子皮作为潜在吸附剂用于废水处理[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(6): 89-94.
WANG Q, HUANG LY, GU HL, *et al.* Biomass waste pomelo peel as a potential adsorbent for wastewater treatment [J]. *J Hunan Univ Technol*, 2019, 33(6): 89-94.
- [68] 刘书畅, 黄应平, 熊彪, 等. 不同热解温度制备柚子皮生物炭对 Pb(II) 的吸附机理[J]. 武汉大学学报(理学版), 2020, 66(4): 361-368.
LIU SC, HUANG YP, XIONG B, *et al.* Adsorption mechanism of Pb (II) from grapefruit peel biochar prepared at different pyrolysis temperatures [J]. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 66(4): 361-368.
- [69] 安强, 朱胜, 缪乐, 等. 碱改柚子皮生物炭对水体中 Mn(II) 的动态吸附研究 [J/OL]. 重庆大学学报: 1-14. [2021-05-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20200319.1621.002.html>.
AN Q, ZHU S, MIAO L, *et al.* Study on dynamic adsorption of Mn (II) from water by alkali-modified grapefruit peel biochar [J/OL]. *J Chongqing Univ*: 1-14. [2021-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20200319.1621.002.html>.
- [70] 郑苗苗, 张梅, 陆伟琼, 等. 改性柚子皮对碱性品红的吸附研究[J]. 唐山师范学院学报, 2018, 40(6): 31-33.
ZHENG MM, ZHANG M, LU WQ, *et al.* Study on the adsorption of basic fuchsia by modified grapefruit peel [J]. *J Tangshan Norm Univ*, 2018, 40(6): 31-33.
- [71] 张少朋, 陈玉保, 肖庆超, 等. 柚子皮发酵产沼气潜力的试验研究[J]. 中国沼气, 2016, 34(5): 47-49.
ZHANG SP, CHEN YB, XIAO QC, *et al.* Experimental study on biogas production potential of pomelo peel fermentation [J]. *China Biogas*, 2016, 34(5): 47-49.
- [72] 孙慧慧, 余元善, 吴继军, 等. 沙田柚的加工和综合利用研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(6): 209-214.
SUN HH, YU YS, WU JJ, *et al.* Study on the processing and comprehensive utilization of Shatian pomelo [J]. *Food Res Dev*, 2018, 39(6): 209-214.

(责任编辑: 张晓寒)

作者简介



任文彬, 博士, 副教授, 主要研究方向为生物防腐特性与机理研究、岭南特色食品风味与副产物深加工研究。
E-mail: 55909537@qq.com



汪薇, 博士, 副教授, 主要研究方向为生物催化与转化、天然香料、食品加工。
E-mail: wei0117@163.com