

分类号:

学 号: 20222007059

密 级: 公 开

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



石榴皮有效成分提取及抑菌机制研究

学 位 申 请 人	武金钰
指 导 教 师	党艳艳 教授
申请学位门类级别	理学 硕士
学 科、专 业 名 称	化 学
研 究 方 向	农林废弃物资源化利用
所 在 学 院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2025年6月

分类号:
学 号: 20222007059

密 级: 公 开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



石榴皮有效成分提取及抑菌机制研究

学位申请人	武金钰
指 导 教 师	党艳艳 教授
申请学位门类级别	理学 硕士
学科、专业名称	化 学
研究方向	农林废弃物资源化利用
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子
2025年6月

**Study on the extraction of effective components from pomegranate
peel and its bacteriostatic mechanism**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Natural Science

By

Jinyu Wu

(Resource utilization of agricultural and forestry wastes)

Dissertation Supervisor: Prof. YanYan Dang

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：武金钰

时间：2025年5月29日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：武金钰

时间：2025年5月29日

导师签名：曹艳艳

时间：2025年5月29日

摘要

石榴皮是石榴加工的主要副产物，其中富含酚类、黄酮类和单宁类等生物活性成分，具有显著的抗氧化与抑菌潜力，在食品、农业和医疗等领域具有广阔的应用前景。然而，如何有效获取这些成分，并保持其高活性，是实现石榴皮高值化利用的关键。为此，本论文研究了干燥方式对石榴皮有效成分提取及生物活性的影响，并对其抑菌机制和应用进行了研究，主要研究内容如下：

(1) 研究了干燥方式对石榴皮有效成分含量及活性的影响。比较了自然干燥 (SD)、热风干燥 (HD)、真空干燥 (VD) 和真空冷冻干燥 (VFD) 等 4 种干燥方式对石榴皮品质、提取物有效成分含量及其生物活性的影响。结果表明，VFD 具有良好的外观品质和较高的有效成分含量 (总酚含量 86.78 mg/g、总黄酮含量 19.37 mg/g、总单宁含量 7.6 mg/g、总花青素含量 0.07 mg/g)，且提取物表现出突出的抗氧化能力和抑酶活性 (ABTS 清除能力 383.10 mg TE/g、·OH-RSA 清除能力 122.50 mg TE/g、 α -淀粉酶 IC₅₀ 为 5.18 mg/mL)，以及良好的抑菌活性，对细菌 *S. aureus* 和 *B. subtilis* 的抑菌圈分别为 (21.33±0.04) mm 和 (16.23±0.04) mm，对真菌链格孢霉 *A. tenuissima* 的抑制率为 83.89%。经综合评价分析，4 种干燥方式中 VFD 的效果最好，适用于高质量样品干燥，其次是 HD，能耗较低，性价比高，适合石榴皮的大规模干燥。

(2) 基于低共熔溶剂的石榴皮抑菌成分提取研究。采用 UPLC-Q-TOF/MS 分析 VFD 提取物组成，并结合分子对接筛选具有抗真菌作用的潜在成分，以此为目标物，通过 COSMO-RS 结合实验验证，筛选低共熔溶剂，并对溶剂体系和提取工艺进行优化。结果表明，安石榴苷、安石榴林、鞣花酸 4-O-木吡喃苷、芦丁、表没食子儿茶素没食子酸酯、1,3,6-三没食子酰葡萄糖为潜在抗真菌成分。当提取溶剂为甜菜碱/乙二醇低共熔溶剂 (摩尔比为 1:5，含水量 30%)、目数 140 目、料液比 1:43 g/mL、提取温度 55°C、提取时间 1 h 时，石榴皮总多酚和安石榴苷提取得率最高，分别为 249.27 mg/g 和 161.31 mg/g。

(3) 石榴皮提取物对真菌的抑制效果及机制研究。考察了石榴皮提取物 (PPE) 对 4 种常见植物病原真菌 (*P. crustosum*、*B. cinerea*、*A. tenuissima* 和 *F. oxysporum*) 的抑制效果。结果表明，PPE 对 *B. cinerea* 的抑制效果最好 (MIC=0.62 mg/mL)，主要与 PPE 会造成 *B. cinerea* 细胞膜损伤，诱导活性氧过量积累，降低 SOD、CAT 和琥珀酸脱氢酶 (SDH) 活性有关。转录组学分析表明，PPE 处理后 *B. cinerea* 的基因表达发生显著变化 (1317 个上调，1176 个下调)，PPE 促使 *B. cinerea* 上调细胞壁膜、能量代谢和致病力相关通路，增强了抗逆性，扰乱了能量代谢平衡；同时下调核糖体相关通路，使蛋白质翻译合成受阻，影响遗传信息传递，进而抑制了 *B. cinerea* 的生长发育。草莓保鲜实验结果表明，PPE 处理后不仅可以有效减缓 *B. cinerea* 侵染草莓的速度，也可以在草莓的常规贮藏过程中保持其良好的品质，在水果保鲜领域具有较好的应用价值。

关键词：石榴皮；干燥方式；低共熔溶剂；灰葡萄孢；抑菌机制

Abstract

Pomegranate peel is a major by-product of pomegranate processing, which is rich in bioactive components such as phenols, flavonoids, and tannins, possessing significant antioxidant and bacteriostatic potentials, and has broad application prospects in the fields of food, agriculture, and medicine. However, how to obtain these components effectively and maintain their high activity is the key to realizing the high-value utilization of pomegranate peel. In this connection, this thesis investigated the effect of drying method on the extraction and bioactivity of active components of pomegranate peel and studied its inhibitory mechanism and application. The main research contents are as follows:

(1) The effects of drying methods on the content and activity of active ingredients of pomegranate peel were studied. Four drying methods, namely, natural drying (SD), hot air drying (HD), vacuum drying (VD), and vacuum freeze drying (VFD), were compared for their effects on the quality of pomegranate peels, the content of active ingredients in the extracts and their bioactivities. The results showed that VFD had good appearance quality and high content of active components (total phenolic content 86.78 mg/g, total flavonoid content 19.37 mg/g, total tannin content 7.6 mg/g, total anthocyanin content 0.07 mg/g). Moreover, the extracts showed outstanding antioxidant and enzyme inhibitory activities (ABTS scavenging capacity of 383.10 mg TE/g, ·OH-RSA scavenging capacity of 122.50 mg TE/g, α -amylase IC_{50} of 5.18 mg/mL), as well as good bacteriostatic activity, with the circles of inhibition of bacteria *S. aureus* and *B. subtilis* of 21.33 ± 0.04 mm and 16.23 ± 0.04 mm, respectively, and *A. tenuissima* inhibition rate 83.89%. After comprehensive evaluation and analysis, among the four drying methods, VFD was the most effective and suitable for drying high-quality samples, followed by HD, which consumed less energy and was cost-effective and suitable for large-scale drying of pomegranate peel.

(2) Extraction study of antibacterial components of pomegranate peel based on low eutectic solvent. UPLC-Q-TOF/MS was used to analyze the composition of VFD extracts, and potential components with anti-fungal effects were screened in combination with molecular docking. With this as the target, low eutectic solvents were screened through the combination experiment of COSM-RS, and the solvent system and extraction process were optimized. The results showed that punicalagin, punicalin, ellagic acid 4-O-xylopyranoside, rutin, epigallocatechin gallate, and 1,3,6-trigalloylglucose were the potential antifungal components. When the extraction solvent was betaine/glycol low eutectic solvent (molar ratio of 1:5 and 30% water content), mesh number 140, material-liquid ratio 1:43 g/mL, extraction temperature 55°C, and extraction time 1 h, the highest extraction rate of pomegranate peel polyphenols and andrographolide was obtained, which was 249.27 mg/g and 161.31 mg/g, respectively.

(3) Inhibitory effect of pomegranate peel extracts on fungi and Mechanism study. The inhibitory effect of pomegranate peel extract (PPE) on four common plant pathogenic fungi (*P. crustosum*, *B. cinerea*, *A. tenuissima* and *F. oxysporum*) was investigated. The results showed that PPE had the best inhibitory effect on *B. cinerea* (MIC = 0.62 mg/mL), which was mainly related to the damage of cell membrane of *B. cinerea*, the induction of excessive accumulation of reactive oxygen species, and the decrease of SOD, CAT and SDH activities. Transcriptomic analysis showed that gene expression of *B. cinerea* was significantly changed after PPE treatment (1317 up-regulated and 1176 down-regulated), and PPE prompted *B. cinerea* to up-regulate cell wall membrane, energy metabolism, and virulence-related pathways, which enhanced resistance and disturbed energy metabolism homeostasis; at the same time, the down-regulation of ribosome-related pathways hindered the translation and synthesis of proteins, affected the transmission of genetic information, and inhibited the growth and development of *B. cinerea*. The results of strawberry preservation experiment showed that PPE treatment could not only effectively slow down the infection rate of *B. cinerea*, but also maintain the good quality of strawberries during regular storage, which has good application value in the field of fruit preservation.

Key words: pomegranate peel; drying method; low eutectic solvent; gray staphylococcus; inhibition mechanism

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
目 录.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 石榴皮概述.....	1
1.1.1 石榴皮中的有效成分及生物活性.....	2
1.1.2 石榴皮的利用现状.....	4
1.2 常用植物干燥方式以及石榴皮干燥研究进展.....	5
1.2.1 常用植物干燥方式.....	5
1.2.2 石榴皮干燥方式研究进展.....	7
1.3 低共熔溶剂在天然产物提取中的研究进展.....	8
1.3.1 低共熔溶剂概述.....	8
1.3.2 低共熔溶剂在天然产物提取中的应用.....	8
1.3.3 COSMO-RS 在低共熔溶剂筛选中的应用.....	9
1.4 植物提取物的抑菌效果及机制研究进展.....	9
1.4.1 植物提取物的抑菌效果及应用.....	9
1.4.2 植物提取物的抑菌机制.....	10
1.5 研究内容和意义.....	11
第 2 章 干燥方式对石榴皮有效成分含量及活性的影响.....	12
2.1 材料与仪器.....	12
2.1.1 实验材料.....	12
2.1.2 实验仪器与试剂.....	12
2.2 实验方法.....	13
2.2.1 石榴皮的干燥处理.....	13
2.2.2 石榴皮提取物的制备.....	14
2.2.3 石榴皮干燥物理特性分析.....	14
2.2.4 石榴皮有效成分含量测定.....	15
2.2.5 石榴皮提取物抗氧化活性测定.....	16
2.2.6 石榴皮提取物抑酶活性测定.....	16
2.2.7 石榴皮提取物抑菌活性测定.....	17

2.3 结果与讨论.....	17
2.3.1 干燥对石榴皮物理特性的影响.....	17
2.3.2 干燥对石榴皮提取物中有效成分含量的影响.....	19
2.3.3 干燥对石榴皮提取物抗氧化活性的影响.....	20
2.3.4 干燥对石榴皮提取物抑酶活性的影响.....	21
2.3.5 干燥对石榴皮提取物抑菌活性的影响.....	21
2.3.6 相关性分析.....	22
2.3.7 石榴皮品质 TOPSIS 分析.....	24
2.4 小结.....	25
第 3 章 基于低共熔溶剂的石榴皮抑菌成分提取研究.....	26
3.1 材料与仪器.....	26
3.2 实验方法.....	27
3.2.1 石榴皮多酚组成的 UPLC-Q-TOF/MS 分析.....	27
3.2.2 分子对接分析.....	27
3.2.3 建立数据库.....	28
3.2.4 COSMO-RS 理论筛选.....	29
3.2.5 制备低共熔溶剂.....	29
3.2.6 石榴皮多酚含量及安石榴苷 HPLC 定量分析.....	30
3.2.7 溶剂体系优化.....	30
3.2.8 低共熔溶剂结构表征.....	30
3.2.9 单因素实验.....	30
3.2.10 响应面优化.....	30
3.3 结果与讨论.....	31
3.3.1 石榴皮酚类成分鉴定及与抗真菌相关受体蛋白的分子对接.....	31
3.3.2 COSMO-RS 理论筛选结果.....	33
3.3.3 低共熔溶剂实验验证及体系优化.....	35
3.3.4 石榴皮中总多酚和安石榴苷提取影响因素考察.....	38
3.3.5 石榴皮中总多酚和安石榴苷提取工艺优化.....	39
3.4 小结.....	43
第 4 章 石榴皮提取物对真菌的抑制效果及机制研究.....	44
4.1 材料与仪器.....	44
4.2 实验方法.....	45
4.2.1 最低抑菌浓度 (MIC) 和最低杀菌浓度 (MFC) 测定.....	45
4.2.2 病原菌细胞膜完整性的测定.....	45

4.2.3 病原菌细胞膜通透性的影响	45
4.2.4 病原菌可溶性蛋白含量的测定	46
4.2.5 病原菌还原糖含量的测定	46
4.2.6 病原菌细胞核酸和蛋白质外渗量的测定	46
4.2.7 病原菌活性氧水平的测定	46
4.2.8 病原菌超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的测定	46
4.2.9 病原菌过氧化氢酶 (CAT) 活性的测定	47
4.2.10 病原菌琥珀酸脱氢酶 (SDH) 活性测定	47
4.2.11 病原菌转录组学分析	47
4.2.12 石榴皮提取物对草莓保鲜和灰葡萄孢侵染抑制效果的影响	47
4.3 结果与讨论	48
4.3.1 石榴皮提取物对植物病原真菌的抑制效果	48
4.3.2 石榴皮提取物对灰葡萄孢细胞膜及能量代谢的影响	49
4.3.3 石榴皮提取物对灰葡萄孢活性氧代谢的影响	52
4.3.4 转录组学 (RNA-seq) 分析	53
4.3.5 石榴皮提取物对草莓保鲜和灰葡萄孢侵染抑制效果的影响	57
4.4 小结	61
第 5 章 结论与展望	62
5.1 结论	62
5.2 展望	63
参考文献	64
致谢	77
作者简介	78

第 1 章 绪论

1.1 石榴皮概述

石榴 (*Punica granatum L.*) 是石榴科 (*Punicaceae*) 石榴属的植物, 为落叶灌木或小乔木, 高 3-10 米, 枝条多刺, 叶片对生、花大而红^[1], 兼具观赏价值。石榴原产于伊朗和土耳其等中东国家, 后经丝绸之路传入中国, 现在已经在世界许多地区广泛种植, 伊朗、印度、中国等八个国家在石榴生产和出口中占据主要地位 (图 1-1A^[2])。石榴果实 (图 1-1B^[3]) 一般呈圆球形, 大小和重量不一, 果皮多为红色或黄色, 外表十分美观, 果实内部的白色隔膜为内果皮, 值得注意的是, 石榴可食用部分并非传统意义上的果肉, 而是由种子外层发育形成的假种皮结构^[4]。石榴在我国种植历史悠久, 分布广泛, 目前我国主产区包括新疆和田、山东枣庄、云南蒙自、四川会理和陕西临潼等地, 其中新疆石榴因地理环境因素 (昼夜温差大、光照充足), 具有高糖、高酸、高花色苷的特点^[5]。我国现有石榴品种资源丰富, 可达 300 多个, 包括 50 多个新选育品种和 4 个国外新引进品种, 据统计, 2019 年, 全球石榴产量估计约为 400 万吨^[6], 2022 年, 我国石榴栽培面积约 8 万公顷^[7], 目前栽培面积超过 12 万公顷, 年产量 150 万吨^[8], 产量逐年增加。

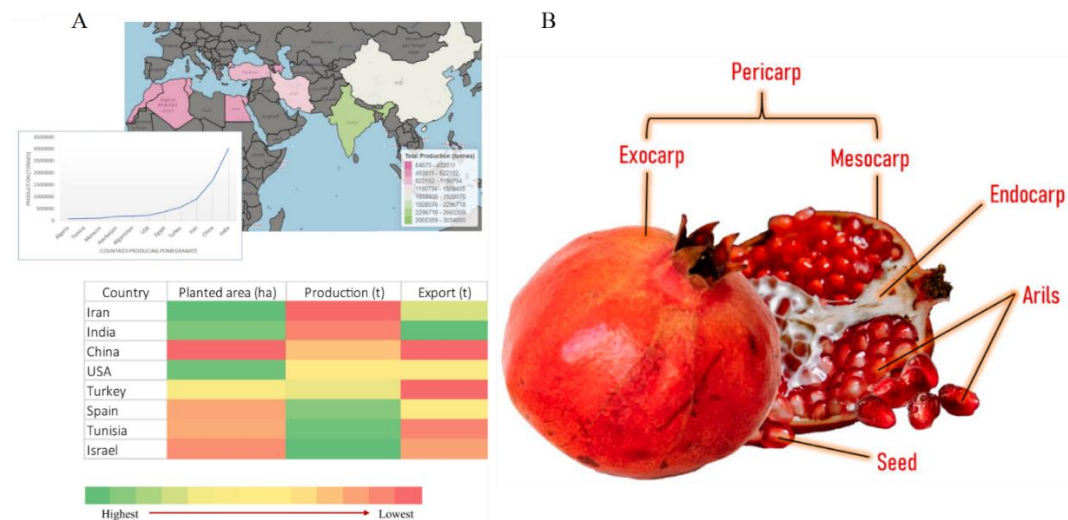


图 1-1 石榴结构^[2] (A) 及产量分布情况^[3] (B)

Fig. 1-1 Pomegranate structure^[2] (A) and yield distribution^[3] (B)

石榴果肉除直接食用外, 还经深加工成果酒、益生菌饮料等相关产品^[9], 在此过程中会产生大量副产物, 主要包括石榴皮和石榴籽, 其中石榴皮约占果实重量的 30% ~ 50%^[10,11], 富含膳食纤维、有机酸、糖类、蛋白质等多种营养物质^[12]。石榴皮生物活性

化合物含量显著高于果汁和种子^[13,14]，以多酚类化合物居多，单宁类（安石榴昔和鞣花酸等）和黄酮类物质（槲皮素等）为石榴皮多酚主要成分^[15]。此外，石榴皮还含有有机酸、萜类和生物碱类等化合物，具有抗炎抑菌、清除自由基、抗炎和抗癌等功效^[16]。目前，工业加工产生了大量的石榴皮和石榴籽，这些副产品往往用于动物饲料或者丢弃，只有少部分被开发用于染料和医药领域，经济价值较低，造成一定程度的资源浪费。因此，鉴于石榴皮中有效成分潜在的健康益处，合理开发石榴皮资源化利用十分有必要。

1.1.1 石榴皮中的有效成分及生物活性

近年来，作为食品加工副产物的石榴皮被广泛关注，因其含有丰富的多酚类、黄酮类、鞣质类、生物碱类和有机酸等生物活性化合物，这些成分促使其发挥多样化的生物活性。

(1) 多酚类化合物

目前关于石榴皮化学成分的研究中，以多酚类成分居多，包括安石榴昔，安石榴林、鞣花酸、没食子酸等。体外实验显示，石榴皮多酚对 DPPH 自由基的清除率优于合成抗氧化剂丁基羟基茴香醚^[17]；细胞实验发现，石榴皮多酚通过激活 caspase 3、7 和 9，诱导 HeLa 细胞的 DNA 损伤，表现出显著的抗癌活性^[18]。安石榴昔是石榴皮提取物（Pomegranate peel extract, PPE）生物活性的主要贡献者。它可以下调 FoxO3a 表达减弱 RAW264.7 巨噬细胞中脂多糖诱导的炎症反应^[19]，其分子中 16 个可解离的-OH 基团使得它可以显著减少食用油油炸过程中过氧化物的产生^[20]。安石榴昔会在特定条件下分解为安石榴林和鞣花酸，多种多酚类化合物共同作用将表现出更好的抗氧化活性^[21,22]。

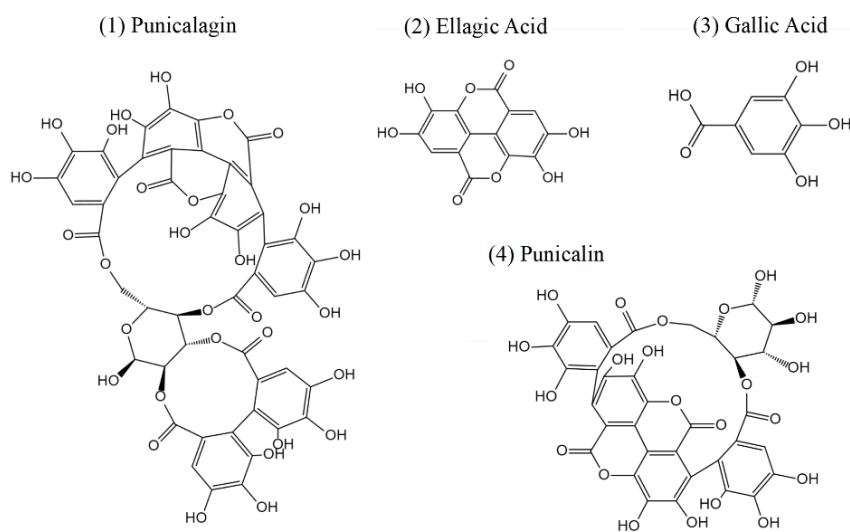


图 1-2 石榴皮中主要多酚类化合物结构

Fig. 1-2 Structure of main polyphenols in pomegranate peel

(2) 黄酮类化合物

黄酮类化合物是多酚中最普遍的类别，结构为 C₆-C₃-C₆ 骨架，根据核心杂环的氧化程度，黄酮类被分为六个亚类，包括黄烷酮、异黄酮、黄烷醇、黄酮醇、黄烷-3-醇和花青素^[23]。目前已经在石榴皮中鉴定出 29 种黄酮类化合物^[24]，主要包括槲皮素、芦丁、山柰酚和儿茶素等。研究发现，黄酮类成分在抗糖尿病中表现突出，来源于石榴皮的 4 种成分（芦丁、黄烷酮、槲皮素和芹黄素）可以非竞争性抑制人唾液 α-淀粉酶活性^[25]。此外，在石榴皮中发现的儿茶素被报道是石榴皮中抑制 UVB 诱导的皮肤光老化的最有效成分之一^[26]。

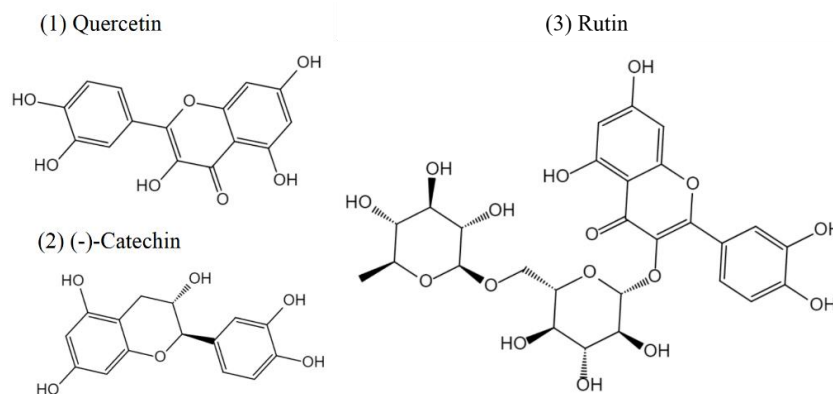


图 1-3 石榴皮中主要黄酮类化合物结构

Fig. 1-3 Structure of main flavonoids in pomegranate peel

(3) 生物碱类化合物

生物碱是一种碱性含氮有机化合物，具有镇痛、抗炎、免疫抑制等多种药理作用^[27]。目前对石榴皮中生物碱类化合物的研究相对较少，不过已发现石榴皮中主要包括石榴皮碱、伪石榴皮碱、异石榴皮碱、N-甲基异石榴皮碱等吡咯哌啶类和哌啶类生物碱^[28,29]。热阳古·阿布拉等^[30]采用超声波辅助法提取了甜石榴中的生物碱，最佳条件下得到了 2.35% 的生物碱，且该提取物具有良好的抗氧化活性（DPPH IC₅₀=0.368 mg/mL, ·OH-RSA IC₅₀ = 0.590 mg/mL）。Sun 等^[31]从石榴皮中分离出一种新型的吡咯烷类生物碱，并命名为 punicagranine (1)，这种骨架首次在天然产物中报道，作者根据其合成中间体来推测它可能具有抗炎活性，Wong 等^[32]还报道了 pelletierine 具有抗癌特性。

(4) 有机酸

石榴皮中含有多种有机酸，如苹果酸、柠檬酸和琥珀酸等，这些有机酸具有多种的生物活性，受到人们广泛关注，Dafny-Yalin 等人测定了 29 种石榴中的有机酸含量，发现柠檬酸在所有品种的果皮中的含量均显著高于其他有机酸^[33]。Pande 等^[34]研究了石榴果实不同部位的有机酸积累情况，发现果皮中的有机酸含量高于种子和叶片。

1.1.2 石榴皮的利用现状

(1) 石榴皮提取物在食品领域的应用

PPE 在食品领域中可作为天然添加剂发挥防腐保鲜、抗氧化的作用。Turgut 等将 PPE 加入到牛肉丸中，有效延缓了脂质和蛋白质氧化，在 4°C 下^[35]将牛肉丸保质期延长至 8 天，效果优于阳性对照 BHT 处理，紧接着在-18°C 下^[36]储存 6 个月后可以有效保持牛肉丸颜色，减少腐臭味。相比一些合成的抗微生物制品，绿色安全的 PPE 可作为果蔬保鲜领域的潜在真菌抑制剂^[37,38]，通过添加到可食用涂层中，调节果实内环境，延长保质期，比如作为番茄^[39]、甜樱桃^[40]和草莓^[41]的保鲜剂。除此之外，石榴皮含有丰富的膳食纤维和抗氧化剂，可以作为添加剂直接用于改善食品营养和口感，例如添加到营养棒^[42]和果酱^[43]中，符合现在年轻人对健康的追求。

(2) 石榴皮提取物在农业领域的应用

PPE 中丰富的生物活性成分使其在农业领域具有一定应用潜力。作为植物源农药，PPE 可减少化学农药的使用，促进农业可持续发展^[44]。Zaher 等^[44]研究表明，PPE 能够显著减少茴香植物猝倒病和根腐病，通过诱导抗性和抑制立枯病和根腐病等多种真菌病害的影响。PPE 还可以抑制蚜虫（*Macrosiphum rosaeformis*）的活性，处理 24 h 对蚜虫的毒性更大^[45]。PPE 作为天然添加剂加入到动物饲料中，不仅可以有效防止饲料发霉变质^[46]，还能够为畜禽（如肉鸡）生长发育提供营养^[47]，同时提高免疫球蛋白浓度，改善免疫力^[48]。此外，PPE 还可以作为植物调节剂，诱导宿主产生自然防御反应，这个结果在柑橘类水果上得到了证实^[49]。

(3) 石榴皮提取物在医疗保健领域的应用

目前研究结果表明，许多疾病是由自由基引起的或因自由基而恶化的^[50]，从生物活性机制层面分析，PPE 的核心作用源于其强大的自由基清除能力，展现出多重医疗价值（图 1-4^[51]）。Silla 等^[52]用 PPE 处理 HGECs 细胞，发现抗氧化活性和超氧化物歧化酶 1 表达显著增加，肿瘤坏死因子 α 和单核细胞趋化蛋白 1 的表达显著降低，还对两种口腔链球菌属具有显著抑制作用，证明其在减少口腔粘膜内的氧化应激、炎症和细菌增殖方面的潜力方面的潜力。此外，PPE 可以促进糖尿病大鼠的伤口愈合^[53]，造成 HeLa 和 HepG2 细胞 DNA 损伤^[54]，可渗透皮肤缓解与皮肤病相关的炎症和疼痛^[55]，治疗高血压^[56]等心血管疾病。

(4) 石榴皮提取物在化妆品领域的应用

PPE 可用于生产天然功效性产品，目前在抗衰老方面，已经有研究报道 PPE 中儿茶素抑制皮肤光老化的突出作用^[26]。Chang 等^[57]指出，酶解法提取的高鞣花酸含量提取物对 UVB 照射的 HaCaT 细胞显示出活性氧抑制作用。此外，Kanlayavattanukul 等^[58]研究

证实 PPE 可以抑制酪氨酸酶和 TRP-2 活性以显著降低黑色素生成，并且邀请志愿者测试顺利通过了双盲实验，表明其配制的面膜的安全有效性。

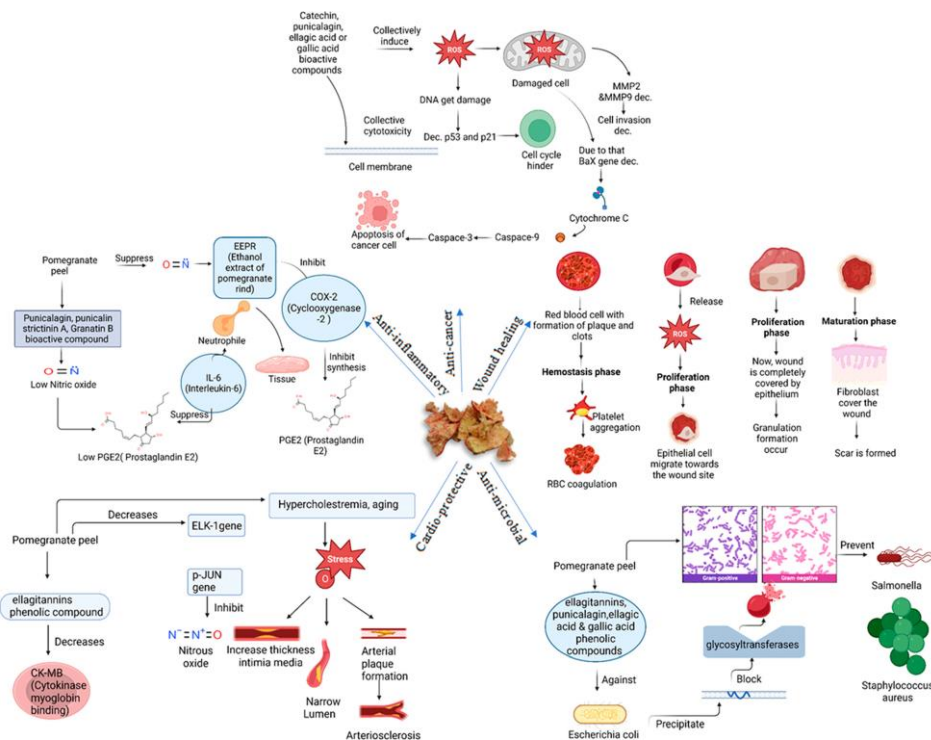


图 1-4 PPE 的多重药理活性^[51]

Fig. 1-4 Multiple pharmacological activities of PPE^[51]

虽然人们始终关注石榴皮再利用，并且已经发现了石榴皮在多方面的应用价值，但大多数石榴皮仍被浪费，其主要原因是新鲜果皮含有较高的水分含量，会使它在储运过程中易受到环境影响或被微生物侵染发生腐烂，造成有效成分损失。因此，如何避免上述问题是实现石榴皮资源化利用的关键。

1.2 常用植物干燥方式以及石榴皮干燥研究进展

1.2.1 常用植物干燥方式

新鲜的植物多具有季节性的特点，不易存放，而干燥是最为经济且普遍的用于延长保质期的方法。通过干燥处理可以抑制植物呼吸作用，减少营养成分的流失，避免微生物繁殖。目前自然干燥、热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥、微波干燥等常被用于植物干燥处理，以期保持良好的品质。不同干燥方式因存在工作原理、时效性和成本等方面的差异，对所干燥的样品品质会造成不同的影响。例如，Huang 等^[59]研究了酸枣的干燥，发现 VFD 得到的总黄酮含量最高，并且表现出最强的抗氧化活性，而 HAD 表现出最高的 TPC 是因为黄烷醇的降解；Hu 等^[60]发现 VFD 能最大程度地保留新鲜咖啡皮的

品质，但运行成本较高，最终选择了微波干燥。Zhao 等^[61]则发现槐花 (*Flos Sophorae Immaturus*) 中的酚类物质的含量在干燥过程中是动态变化的，会随干燥时间增加，但当超过一定时间，即使是冻干，一些成分（槲皮素、山奈酚和染料木素）的含量也会下降。因此，在植物干燥处理时，需针对植物的自身特性和目标品质选择合适的干燥工艺。

（1）自然干燥

传统的自然干燥是最节约成本的方式，利用环境条件（阳光、风力）去除植物水分，无需复杂设备，适合小规模或资源有限的地区。但自然干燥容易受到气候因素的制约，干燥时间长，产品易氧化变色，甚至具有微生物污染的风险。因此出于对干燥效率及干燥后样品品质的考虑，自然干燥并不适用于实际生产，转而被热风干燥、微波干燥、冷冻干燥等方式替代。

（2）热风干燥

热风干燥通过强制对流热空气来加速样品的水分蒸发，其干燥速率与温度、风速及物料铺层厚度密切相关。热风干燥设备简单、成本可控，适合规模化生产，但对挥发性成分（如精油类植物）保留能力较差，且可能因高温导致蛋白质变性或纤维结构收缩。赵雅婷等^[62]采用热风干燥处理香菇，相较于冷冻干燥，热风干燥后香菇外观、色泽和复水性等品质特性的表现并不突出。尹燕等^[63]则总结发现，采用恒温干燥兰州百合无法兼顾品质和效率。因此，在近几年的研究中，变温干燥以及复合干燥成为主流趋势。例如，Liu 等^[64]采用程序温控干燥香菇，与恒温干燥相比，显著地改善了干制品的风味、质构和营养保留。微波辅助热风干燥可使西兰花茎片^[65]的干燥过程具有更高的水分扩散速率，更短的干燥时间。

（3）真空干燥

真空干燥是利用低压的环境来降低水的沸点，使样品中的水分在低温下快速脱去。该技术适用于热敏性高、易氧化的植物材料（如富含多酚的果蔬），但设备投资较高，且对高水分物料的处理效率有限。目前真空干燥和热风干燥具有相似的发展趋势，均倾向于复合干燥提升干燥品质。例如，Bozkir 等^[66]干燥橘子皮时发现，真空微波干燥能够更好地保留维生素 C、总酚类物质等生物活性成分。Xu 等^[67]发现采用脉冲真空干燥苦橙片可有效提高干燥速度，减少品质下降。

（4）真空冷冻干燥

在进行真空冷冻干燥前，要先将样品冷冻成固态，然后样品中的水分会通过升华作用去除，能最大程度保留样品形态、色泽及生物活性成分。Wang 等发现^[68]真空冷冻干燥比热风干燥更有利于保留桑葚原有品质。真空冷冻干燥是高端功能性食品的首选工艺，但当前真空冷冻干燥面临运行成本高、干燥周期长等^[69]技术难点，复合干燥成为未来发