



申迎宾,邓玮亮,陈小乐,等.沙棘酚类化合物化学组成及其生物活性研究进展[J].轻工学报,2026,41(2):1-20.
SHEN Y B, DENG W L, CHEN X L, et al. Research progress on chemical composition and bioactivity of *Hippophae rhamnoides* L. phenolic compounds[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(2): 1-20.
DOI: 10. 12187/2026. 02. 001

沙棘酚类化合物化学组成及其生物活性研究进展

申迎宾¹, 邓玮亮¹, 陈小乐¹, 陈坤锥¹, 李勇², 张永², 张磊³

1. 广州大学 生命科学学院, 广东 广州 510006;
2. 喀什慕峰酒业有限责任公司 科研部, 新疆 喀什 844100;
3. 新疆农业大学 林学与风景园林学院, 新疆 乌鲁木齐 830052

摘要:沙棘为药食同源植物,其功能活性主要源于富含沙棘酚类化合物(*Hippophae rhamnoides* L. Phenolic Compounds, HRPC)。基于HRPC的结构特征,梳理了164种HRPC的化学组成及其在不同品系、不同植株部位的分布规律,并阐述了其8种主要生物活性作用机制。HRPC以黄酮类、酚酸类和单宁类化合物为主,其中黄酮类化合物数量多达117种,具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤、抗动脉粥样硬化、护胃、抗肺纤维化、抑制肥胖、调节肠道微生物群等多重生物活性。基于HRPC种类与含量、分布情况、生物活性机制和生物利用度现状,未来研究可聚焦在生物活性机制深度挖掘、加工方法革新、包裹体系优化等方面,以实现HRPC的高值化开发与沙棘产业升级。

关键词:沙棘;酚类化合物;化学组成;生物活性

中图分类号:TS201.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)02-0001-20

0 引言

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)又名酸醋柳、黑刺、酸刺等,是胡颓子科沙棘属的落叶小乔木,在我国主要分布在华北、西北、东北、西南等地,具有较强的耐旱、耐盐、耐风沙等特性,被广泛用于荒漠绿化、防风固沙、水土保持等生态治理领域^[1-3]。早在唐朝,藏医经典著作《四部医典》便详尽叙述了沙棘具有利肺、养胃等功效^[4]。1977年,沙棘被正式列

入《中国药典》,并被认定为药食两用植物^[5]。现代研究^[6-7]证实,沙棘富含多糖类、甾醇类、有机酸类、萜类、黄酮类、多酚类、维生素等多种生理活性物质,其中沙棘酚类化合物(*Hippophae rhamnoides* L. Phenolic Compounds, HRPC)是抗炎、抗肿瘤、抗氧化、抑制肥胖、抗心血管疾病等功效的重要物质基础。然而,当前有关HRPC的研究仍相对较少,缺乏对其化学组成、生物活性机制和生物利用度的系统梳理。鉴于此,本文将从上述三方面进行归纳评

收稿日期:2025-03-26;修回日期:2025-08-14;出版日期:2026-04-15

基金项目:新疆维吾尔自治区乡村振兴产业发展科技行动项目(2024NC008);广东省科学技术协会项目(KPXD20241105)

作者简介:申迎宾(1981—),男,河北省保定市人,广州大学副教授,博士,主要研究方向为精准营养与健康。E-mail:shenybin@gzhu.edu.cn

通信作者:张磊(1983—),男,甘肃省武威市人,新疆农业大学高级实验师,硕士,主要研究方向为加工废弃物综合利用。E-mail:zl@xjau.edu.cn

述,概括其研究现状与发展瓶颈,并提出提升生物利用度的潜在策略,以期为沙棘资源高值化开发提供参考。

1 HRPC 的化学组成与结构

HRPC 可粗分为黄酮类和非黄酮类两大系,前者主要包括黄酮、黄酮醇、二氢黄酮等化合物,后者以酚酸类和单宁类化合物为主。

1.1 黄酮类化合物

黄酮类化合物广泛存在于草本植物中,是一类由中央三碳连接 2 个含有酚羟基的苯环(A-环与 B-环)而形成的植物次生代谢产物^[8],在沙棘中多以黄酮苷或黄酮苷元的形式存在,已鉴定 117 种,可分为 7 类:黄酮类、黄酮醇类、二氢黄酮及二氢黄酮醇类、黄烷醇类、查尔酮类、双黄酮类和异黄酮类。

1.1.1 黄酮类 沙棘中黄酮类化合物共有 10 种,种类较少,主要分布于茎叶中。其中单体苷元类较多,少数能与糖以 C 原子相连的形式形成糖苷,分别为芹菜素-6-C-葡萄糖苷-8-C-木糖苷、苜蓿素、紫罗兰素、刺槐黄素、木犀草素、芹菜素、忍冬苷、异夏佛塔苷、木犀草素-7-O-葡萄糖苷和牧荆苷^[9-11]。

1.1.2 黄酮醇类 黄酮醇类化合物是沙棘中主要的酚类化合物,平均每千克新鲜沙棘果中含有 311.5 mg^[12],绝大多数为槲皮素、山柰酚、异鼠李素及其衍生物,含量较低的则包括槲柳黄素、山柰素、杨梅素、丁香亭及其衍生物。黄酮醇类化合物主要由黄酮苷元与糖基组成,葡萄糖、鼠李糖、芸香糖、槐糖等多以糖苷键形式与苷元相连,大部分为 3-O-糖苷,少数为 7-O-糖苷。不同沙棘品种的黄酮醇类化合物在组成及含量上存在明显差异,通过对同一部位中几种常见的黄酮醇化合物进行定量分析,可构建特异性强、重现性好的指纹图谱用于沙棘品种鉴定^[13]。目前文献报道的沙棘中黄酮醇及其苷类化合物已达 80 种^[14-25]。

1.1.3 二氢黄酮及二氢黄酮醇类 目前在沙棘中共发现 14 种二氢黄酮及二氢黄酮醇类化合物,分别为松属素^[10]、柚皮素^[10]、橙皮素^[10]、圣草酚^[10]、二

氢杨梅素^[10]、二氢槲皮素^[10]、二氢异鼠李素^[9]、二氢山柰酚^[26]、柚皮苷^[22]、橙皮苷^[20]、圣草酚-7-O-葡萄糖苷^[24]、hippophandine A^[27]、hippophandine B^[27]和 hippophandine C^[27]。其中 hippophandine A、hippophandine B 和 hippophandine C 这 3 种化合物由丁金^[27]采用传统柱色谱结合二维液相色谱法首次从沙棘籽粕中分离得到,与其余 11 种同类化合物相比,这 3 种化合物具有相对分子质量大、糖基连接数量多且结构复杂的特点。

1.1.4 黄烷醇类 沙棘含有(+)-儿茶素^[20]、(-)-表儿茶素^[14-15]、(+)-没食子儿茶素^[14-15]、(-)-表没食子儿茶素^[14-15]、(-)-表儿茶素没食子酸酯^[15]、(-)-没食子儿茶素没食子酸酯^[15]、(-)-表没食子儿茶素没食子酸酯^[28]和儿茶素-3-O- α -L-鼠李糖苷^[29]共计 8 种黄烷醇类化合物。其中,儿茶素类化合物是最早从沙棘中分离得到的成分,多以苷元形式存在。

1.1.5 查尔酮类 目前在沙棘中仅发现 3 种查尔酮类化合物,分别为柚皮素查尔酮^[14]、2"-O-甲基异甘草苷元^[15]和根皮素^[14]。该类化合物呈开环结构,稳定性较差,糖基取代多发生于 4 位和 4' 位,且易与葡萄糖成苷。

1.1.6 双黄酮类 现有文献关于沙棘中双黄酮类化合物的报道较少,邢津津^[20]采用超高液相色谱-质谱联用(UPLC-MS/MS)法从西藏林芝沙棘品系中检测出扁柏双黄酮,由 1 个芹菜素单元的 C-4' 位通过氧原子与另 1 个芹菜素单元的 C-6" 位相连,因此也被称为 4',6"-O-双芹菜素^[29]。

1.1.7 异黄酮类 迄今为止,沙棘中仅发现一种异黄酮类化合物——鸢尾黄素,该化合物不与糖成苷,由亓金钗等^[23]采用“干法+湿法”联用技术从西藏沙棘干燥果实中分离得到。

1.2 非黄酮类化合物

HRPC 中的非黄酮类化合物主要包含酚酸类、单宁类、木酚素类和芪类,其中酚酸类化合物 23 种、单宁类化合物 21 种、木酚素类化合物 1 种、芪类化合物 2 种。

1.2.1 酚酸类 沙棘中酚酸类化合物主要分为两类,一类是具有 C₆-C₁骨架的羟基苯甲酸及其衍生

物,包括原儿茶酸^[14]、没食子酸^[11]、焦儿茶酸^[30]、水杨酸^[15]、丁香酸^[15]、香草酸^[15]、龙胆酸^[30]、对羟基苯甲酸^[15]、没食子酸甲酯^[14]和对羟基苯甲酸丁酯^[15];另一类是具有 C₆—C₃ 骨架的羟基肉桂酸及其衍生物,包括咖啡酸^[11]、芥子酸^[15]、阿魏酸^[11]、肉桂酸^[15]、对香豆酸^[15]、对羟基苯丙酸^[30]、咖啡酸苯乙酯^[14]、咖啡碱奎宁酸^[14]、绿原酸^[14]、新绿原酸^[14]、隐绿原酸^[14]和 1-阿魏酰-β-D-吡喃葡萄糖苷^[15];焦性没食子酸^[14]则属于不具有以上 2 种骨架的其他酚酸类化合物。

沙棘中的酚酸类化合物以结合态为主,在每千克干燥沙棘果中,与糖苷结合的酚酸类化合物含量约为 2 020.8~2 506.2 mg,与酯类结合的含量约为 1 135.6~1 868.8 mg,而游离态的仅有约 51.9~99.2 mg^[30-31]。沙棘浆果中水杨酸含量(21~47 mg/kg)较高,是主要的游离态酚酸类化合物^[32];没食子酸在沙棘叶片中含量为 19.1~79.1 mg/kg,在浆果中含量为 7.9~15.9 mg/kg,也是含量较高的酚酸类化合物^[33]。综上,水杨酸和没食子酸是沙棘中主要的酚酸类化合物。

1.2.2 单宁类 沙棘中的单宁类化合物主要集中在叶片,每克干燥沙棘叶中单宁类化合物含量可达 42.5~109.1 mg^[34]。根据化学结构,单宁类化合物可分为可水解单宁和缩合单宁两大类。

可水解单宁的结构特征为以碳水化合物为核心,碳水化合物的羟基与没食子酸基团、六羟基二苯酸基团(Hexahydroxydiphenic, HDDP)通过酯键结合^[35],该酯键可被水解生成糖苷和一些小分子化合物。沙棘中已鉴定的可水解单宁化合物有木麻黄鞣亭^[15]、Stachyurin^[19]、赤芍素^[19]、木麻黄素^[15]、特里马素 I^[15]、Isostrictinin^[34]、金丝桃苷^[31]、1,2,6-三-O-没食子酰葡萄糖^[36]、栗木鞣花素^[34]、栎木鞣花素^[34]、木麻黄鞣宁^[34]、Pterocarinin A^[34]、Elaeagnatin A^[34]、沙棘素 A^[15]、沙棘素 B^[19]、沙棘素 C^[34]、鞣花酸^[36]和棉酚^[15]。其中,木麻黄鞣宁和 Stachyurin 是沙棘叶中含量较高的单宁类化合物^[19],分别占总单宁含量的 25.8%~44.6%和 19.2%~45.4%;其次为沙棘素 B(2.3%~14.0%)、沙棘素 C(2.5%~9.8%)和赤芍素(0%~10.3%)。可水解单宁是多种植物

的主要抗糖尿病活性成分(如石榴花^[37]),鉴于沙棘富含此类成分,可能具有降血糖活性。

缩合单宁也称原花青素,通常由两个或以上(+)-儿茶素、(-)-儿茶素等黄烷-3-醇或黄烷-3,4-二醇通过 4,8-或 4,6-碳碳双键连接聚合而成^[15],不易水解。H. Kallio 等^[38]采用反相液相色谱(RP-HPLC)、正相超高效液相色谱(NP-UPLC)和亲水相互作用液相色谱(HILIC)法对沙棘浆果中的原花青素进行分析,鉴定出 60 余种由儿茶素和没食子儿茶素组成的原花青素二聚体或三聚体,且均为 B 族寡聚体,但因缺乏参考物且组分复杂,未能确定各组分比例,已明确鉴定的有原花青素 B1^[31]、原花青素 B2^[31]和原花青素 C1^[39]。

1.2.3 其他 木酚素类和芪类化合物也是植物中常见的酚类化合物。木酚素类化合物以 C₆—C₃—C₆ 为特征骨架,可视为由两个苯丙素单元偶联而成;芪类化合物则以 C₆—C₂—C₆ 为特征骨架^[35]。在沙棘浆果中已检出属于木酚素类的松脂醇-4-O-β-D-吡喃葡萄糖苷^[14],属于芪类的顺式白藜芦醇和反式白藜芦醇^[31],但目前相关文献报道较少。

2 HRPC 种类与含量的影响因素

2.1 不同品系沙棘中 HRPC 含量差异

按照中国沙棘植物学家廉永善的最新分类法^[40],沙棘属植物分为 6 个种、12 个亚种,其中在中国分布有 6 个种、8 个亚种。由于同一品种可在全国多地野生分布或人工种植,不同品种及同品种但不同产地的沙棘中 HRPC 含量通常存在差异。如表 1 所示,中国沙棘和云南沙棘的总黄酮和总多酚含量高于其他品系,这或许是其大规模种植和应用的主要原因;而其余品种的研究多集中于系统发育或育种,果质资源研究相对匮乏。

HRPC 各组分含量在不同品系间也存在差异。以没食子酸含量为例,张欣^[41]测得中国沙棘、阜杂 1 号和杂优 54 号这 3 个品种沙棘叶片中没食子酸含量分别为 2 363.3 μg/g、877.2 μg/g 和 1 603.9 μg/g;而丁金等^[42]报道的青海产地中国沙棘叶片中没食子酸含量为 32~110 μg/g;赵鑫丹等^[43]测得蒙古沙

表1 不同品系沙棘及其不同部位中总黄酮醇和总多酚含量
Table 1 Contents of total flavonols and total polyphenols in different parts of different strains of *Hippophae rhamnoides* L.

种	亚种	部位 (干/鲜)	产地	总黄酮含量/ (mg·g ⁻¹)	总多酚含量/ (mg·g ⁻¹)	文献来源
鼠李沙棘	中国沙棘	果实(干)	山西	51.45±0.85	38.74±1.31	[8]
		果实(干)	甘肃	28.1~43.9	—	[45]
		果实(鲜)	辽宁	1.59~11.07	5.07~10.74	[46]
		果实(鲜)	青海	0.574	—	[47]
		枝(鲜)	青海	0.184	—	[47]
		叶(鲜)	青海	2.096	—	[47]
		叶(干)	辽宁	11.834~29.050	13.521~20.767	[48]
		籽(鲜)	青海	0.126	—	[47]
	籽(干)	甘肃	37.4~66.4	—	[45]	
	云南沙棘	果实(干)	西藏	47.72±3.63	33.17±2.05	[8]
		果实(干)	西藏	68.5~87.7	—	[45]
		籽(干)	西藏	26.9~36.8	—	[45]
	中亚沙棘	果实(干)	新疆	34.88±1.22	27.64±1.92	[8]
		果实(干)	西藏	24.1~31.6	—	[45]
		果实(干)	新疆	10.8~46.9	—	[45]
		籽(干)	西藏	36.6~48.3	—	[45]
		籽(干)	新疆	40.4~70.7	—	[45]
	蒙古沙棘	果实(干)	青海	44.38±3.19	30.94±2.37	[8]
		果实(干)	新疆	23.0~25.5	—	[45]
		果实(鲜)	甘肃	1.42~2.01	—	[49]
		叶片(干)	黑龙江	4.17~7.50	—	[50]
		叶片(干)	辽宁	7.006~35.748	6.798~20.051	[48]
		籽(干)	新疆	32.0~40.5	—	[45]
	中蒙杂交沙棘	叶片(干)	黑龙江	3.74~7.14	—	[50]
叶片(干)		辽宁	8.266~27.136	11.129~19.880	[48]	
果实(鲜)		辽宁	1.41~3.53	—	[48]	
果实(鲜)		黑龙江	0.52~1.68	—	[51]	
柳叶沙棘	果实(干)	西藏	79.2	—	[45]	
	籽(干)	西藏	56.7	—	[45]	
西藏沙棘	果实(干)	西藏	25.8~33.3	—	[45]	
	籽(干)	西藏	9.9~10.8	—	[45]	
江孜沙棘	果实(干)	西藏	25.9~46.0	—	[45]	
	籽(干)	西藏	31.6~58.2	—	[45]	
肋果沙棘	肋果沙棘	果实(干)	青海	23.3~25.5	—	[45]
		籽(干)	青海	35.1	—	[45]
	肋果沙棘	叶片(干)	青海	5.139 3~8.434 5	—	[52]
		叶片(干)	四川	5.421 1~8.833 1	—	[52]

注:空白表示无具体分类;—表示无具体值。

棘、中蒙杂交沙棘、中国沙棘等 11 个品种中没食子酸含量为 87.7~1 085.0 μg/g。黄酮苷元组分亦因品种而异,陈维^[44]对多个品种沙棘中槲皮素、山柰酚和异鼠李素含量进行测定,发现柳叶沙棘果实中槲皮素的含量最高(1.17~1.46 mg/g),山柰酚次之

(0.43~0.62 mg/g),几乎不含异鼠李素;中国沙棘、云南沙棘及近缘的理塘沙棘和棱果沙棘果实中 3 种黄酮苷元含量由高到低依次为异鼠李素(0.95~6.08 mg/g)、槲皮素(0.56~3.32 mg/g)、山柰酚(0.24~1.39 mg/g);而江孜沙棘、密毛肋果沙棘、肋

果沙棘和西藏沙棘以山柰酚(0.22~1.77 mg/g)为主,槲皮素(0.31~1.03 mg/g)次之,异鼠李素含量最低(0.08~1.03 mg/g)。郭瑞雪^[8]采用 RP-HPLC 法测定 4 个品系沙棘中游离态酚类化合物含量,发现异鼠李素在 4 个品系黄酮类化合物中含量均最高(每 100 g 干燥沙棘果中含有 10.30~15.14 mg),在酚酸类化合物中,中国沙棘的没食子酸含量最高(每 100 g 干燥沙棘果中含有 20.11 mg),其余 3 个品系则以原儿茶酸(每 100 g 干燥沙棘果中含有 29.25~64.55 mg)为主。

2.2 沙棘不同部位 HRPC 含量差异

HRPC 在沙棘不同部位的差异主要体现在种类和含量两个方面。如表 1 所示,同一品系和产地的沙棘,不同部位的总黄酮和总多酚含量有明显差异。唐克^[50]对蒙古沙棘和中蒙杂交沙棘的研究表明,叶片、果实和种子的总黄酮含量排序均为叶片>果实>种子。谭亮等^[47]对青海玉树中国沙棘各部位总黄酮含量进行测定,结果为叶片>果实>枝干>籽。然而,赵文娟等^[53]对吴起沙棘各部位总黄酮含量的测定结果为果实>叶片>枝干。牟丹等^[54]测定青海产地沙棘的根、茎、叶的总多酚含量,排序为根>叶>茎。综上,同种沙棘不同部位的总黄酮和总多酚含量排序并不固定,这可能与沙棘的产地生长环境、测量方法等有关。此外,沙棘的根、花、茎的总黄酮和总多酚含量通常较低,相关研究较少。

除了总黄酮和总多酚含量的差异,HRPC 各组分在沙棘不同部位的分布亦存在明显差异。郑文惠等^[55]采用超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱联用(UPLC-Q-TOF-MS)技术分析沙棘果实、叶片和枝干,鉴定出 8 个鞣质类和 22 个黄酮类成分,其中叶片中未检出原儿茶酸,果实中未检出没食子酰基-六羟基联苯甲酰基-葡萄糖、槲皮素-3,7-二-O-葡萄糖苷、hippophaenin B 和木犀黄鞣亭,枝干中未检出 hippophaenin B。蔡爽等^[56]采用液相色谱-质谱联用(LC-MS)法检测同一沙棘样本的叶片、果肉和种子中 8 种黄酮类化合物(芦丁、山柰酚、槲皮素、异鼠李素、表没食子儿茶素、没食子儿茶素没食子酸酯、木犀草素和柚皮苷),发现果肉中不含山柰酚,且仅部分样本检出没食子儿茶素没食子酸酯;

大部分种子样品不含山柰酚和木犀草素。而赵鑫丹等^[43]的研究中,叶片和果实均检出上述 8 种黄酮类化合物,同时还检测到水杨酸、对羟基苯甲酸、肉桂酸、原儿茶酸、丁香酸、对香豆酸、香草酸、没食子酸、咖啡酸和阿魏酸 10 种酚酸类化合物;这 10 种酚酸类化合物在叶片中全部检出,而水杨酸、对羟基苯甲酸、肉桂酸和香草酸在大部分果实样品中未检出。此外,同一组分在不同部位含量也存在差异,例如芦丁在叶片、果肉、种子中的含量分别为 33.806~195.783 $\mu\text{g/g}$ 、12.510~136.558 $\mu\text{g/g}$ 、3.306~55.204 $\mu\text{g/g}$,呈递减趋势。因此,HRPC 的种类和含量因品种、产地、部位不同而存在差异。总体而言,沙棘 HRPC 以芦丁、槲皮素、异鼠李素、阿魏酸、香草酸、对香豆酸和没食子酸为主要成分。

3 HRPC 的生物活性

HRPC 以异鼠李素、槲皮素、芦丁、阿魏酸、香草酸、对香豆酸和没食子酸为主要组分,尽管山柰酚、木犀草素等组分含量较低,但因其显著的生物活性,在功能性产品开发中具有潜在的应用价值。例如,山柰酚在 12.5~25.0 $\mu\text{g/mL}$ 质量浓度下可有效减轻心脏成纤维细胞炎症,且在 40 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下能诱导乳腺癌细胞凋亡^[57];木犀草素在 20~40 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下能显著抑制肺癌细胞 A549 转移,并以 $IC_{50} = 9.8 \mu\text{mol/L}$ 抑制前列腺癌细胞(PC-3)增殖^[58]。

3.1 抗氧化作用

糖尿病、退行性神经疾病、心血管疾病、风湿性关节炎等疾病的发生都与人体内氧化与抗氧化水平失衡及自由基水平升高而导致的机体氧化应激有关^[59]。人体内存在两大抗氧化防御系统,即非酶促抗氧化系统与酶促抗氧化系统。非酶促抗氧化系统主要依靠维生素 C、维生素 E、谷胱甘肽、 α -硫辛酸、多酚等多种非酶促抗氧化剂直接与活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)等自由基反应并将其还原,又可作为酶底物,在自由基清除中发挥重要作用。酚类化合物的抗氧化活性与其环状结构、共轭双键及环上官能团有关,经消化道吸收后,部分酚类化合物以完整苷元形式进入循环系统^[60],可能通过氢原子转移、质子转移、顺序质子损失电子

转移等机制,并辅以过渡金属螯合作用,在人体内发挥抗氧化作用^[61]。多酚的抗氧化性能与酚羟基的数量和位置直接相关,酚羟基数量越多,且存在邻位或对位取代时,自由基清除能力通常越强。例如,含3个酚羟基的没食子酸的DPPH·清除率显著高于含2个酚羟基的原儿茶酸;具有邻位酚羟基的焦儿茶酸、原儿茶酸及具有对位酚羟基的龙胆酸,比 α -间苯二酸、 β -间苯二酸具有更高的抗氧化活性,就DPPH·的 IC_{50} 而言,没食子酸为 $(2.42 \pm 0.08) \mu\text{mol/L}$,原儿茶酸为 $(5.24 \pm 0.95) \mu\text{mol/L}$,焦儿茶酸为 $(5.86 \pm 0.64) \mu\text{mol/L}$,龙胆酸为 $(4.99 \pm 0.79) \mu\text{mol/L}$, α -间苯二酸 $>1000 \mu\text{mol/L}$, β -间苯二酸 $>120\ 000 \mu\text{mol/L}$ ^[62]。付依依等^[63]研究表明,沙棘黄酮清除DPPH·和ABTS·⁺的能力(其 IC_{50} 分别为 $9.014 \mu\text{g/mL}$ 、 $136.86 \mu\text{g/mL}$)与等质量浓度维生素C无显著差异,证实沙棘黄酮是一种良好的天然抗氧化剂。

酶促抗氧化系统依赖超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione Peroxidase,

GPx)、谷胱甘肽S 移换酶(Glutathione S-Transferase, GST)、NAD(P)H 醌脱氢酶1(NAD(P)H: Quinone Oxidoreductase 1, NQO1)、血红素加氧酶1(Heme Oxygenase 1, HO-1)等多种抗氧化酶参与催化,其作用机制如图1所示。核因子E2相关因子2(Nuclear Factor Erythroid 2-Related Factor 2, Nrf2)是调节抗氧化酶表达的关键转录因子,在生理条件下,其转录活性受负调节因子Kelch样ECH相关蛋白1(Kelch-like ECH-associated Protein 1, Keap1)抑制;在氧化应激时,Nrf2易位到细胞核与抗氧化反应元件(Anti-Oxidative Response Element, ARE)结合,进而提高非酶促抗氧化剂水平并促进抗氧化酶表达^[64]。S. Chowdhury等^[65]证实,50 mg/kg的阿魏酸可显著减少糖尿病大鼠自由基产生,降低细胞内ROS水平,并上调SOD、CAT活性以缓解氧化应激。芦丁(50 mg/kg)和槲皮素(50 mg/kg)通过上调Nrf2表达,提高GPx、GST、SOD活性,从而缓解阿霉素诱导的肝氧化应激损伤^[66]。没食子酸(25 mg/kg或50 mg/kg)通过降低ROS水平和介导Nrf2/HO-1通路来缓解乙醛酸酯诱导的肾氧化应激损伤^[67]。

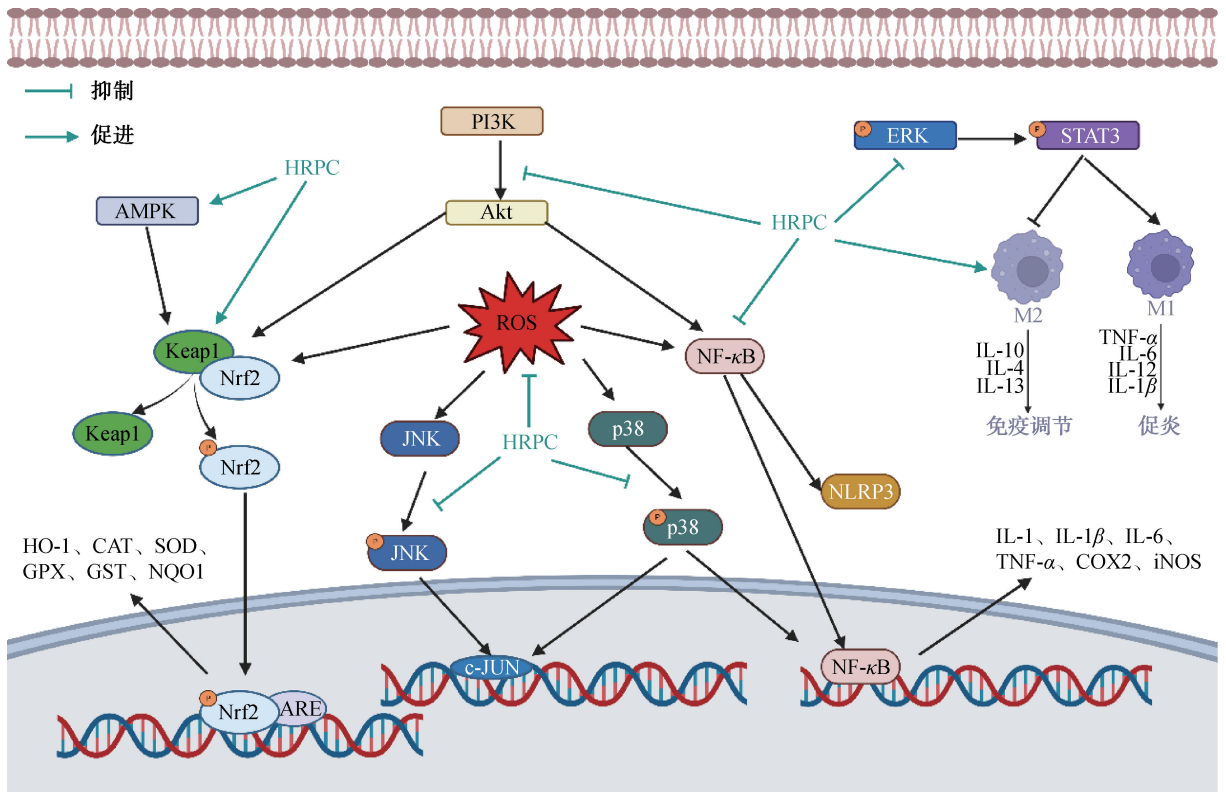


图1 HRPC抗氧化和抗炎机制

Fig. 1 Antioxidative and anti-inflammatory mechanisms of HRPC

HRPC 除直接促进 Nrf2 磷酸化外,还可通过激活单磷酸腺苷活化蛋白激酶(Adenosine 5'-Monophosphate (AMP)-Activated Protein Kinase, AMPK)来调控 Keap1/Nrf2 通路,进而发挥抗氧化作用。沙棘原花青素(25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、100 $\mu\text{g}/\text{mL}$)通过激活 AMPK 磷酸化驱动 Nrf2 介导的 HO-1、SOD 表达,减轻 H_2O_2 诱导的细胞氧化应激损伤^[68-69]。C. Y. Lee 等^[70]证实,山柰酚(5 mg/kg、10 mg/kg)可通过 AMPK/Nrf2 信号通路保护肝脏,缓解 CCl_4 诱导的氧化应激损伤。因此,HRPC 能通过直接调控 Nrf2 通路、降低 ROS 水平或通过激活 AMPK 来间接调控 Nrf2 通路发挥抗氧化作用。

3.2 抗炎作用

HRPC 能通过多靶点调控免疫稳态发挥抗炎作用,其免疫调节功能则依赖关键炎症信号通路的调控和炎症介质表达来实现^[71]。核因子- κB (Nuclear Factor Kappa-B, NF- κB)通常以非活性形式存在于细胞质中,附着在 NF- κB 抑制蛋白(Inhibitor of NF- κB , I κB)上,当受到刺激时,I κB 会发生磷酸化和降解,使 NF- κB 进入细胞核并附着在特定 DNA 序列上,增强免疫防御、炎症反应及细胞存活相关靶基因的转录。丝裂原活化蛋白激酶(Mitogen-Activated Protein Kinase, MAPK)是主要的炎症信号,参与调节多种炎症基因的表达,c-Jun 氨基末端激酶(c-Jun N-Terminal Kinase, JNK)、p38 MAPK 和细胞外调节蛋白激酶(Extracellular Regulated Protein Kinases, ERK)是该通路中的主要子通路。A. Mulati 等^[72]研究发现,沙棘黄酮(100 mg/kg、500 mg/kg)可显著抑制 NF- κB 和 p38 MAPK 激活,减少诱导型一氧化氮合酶(Inducible Nitric Oxide Synthase, iNOS)、白细胞介素-1 β (Interleukin-1 β , IL-1 β)、环氧酶-2(Cyclooxygenase-2, COX-2)表达,改善高脂高果糖饮食诱导肥胖小鼠的神经炎症。A. Mulati 等^[73]的另一项研究发现,异鼠李素(50 mg/kg、100 mg/kg)能显著抑制 JNK、p38 MAPK、NF- κB 激活及肿瘤坏死因子- α (Tumour Necrosis Factor- α , TNF- α)、COX2、iNOS、白细胞介素-1(Interleukin-1, IL-1)、IL-1 β 、白细胞介素-6(Interleukin-6, IL-6)表达,通过双重阻断 MAPK 和 NF- κB 通路减轻神经炎症。X. R. Kong

等^[74]进一步发现,异鼠李素(175 mg/kg)能显著抑制磷脂酰肌醇-3 激酶(Phosphatidylinositol 3-Kinase, PI3K)和蛋白激酶 B(Protein Kinase B, Akt/PKB)磷酸化及 NF- κB p65 亚基表达,降低促炎细胞因子水平,进而减轻小鼠肾脏炎症。槲皮素(50 $\mu\text{mol}/\text{L}$)能通过抑制 ERK/信号传导及转录激活蛋白(Signal Transducer and Activator of Transcription, STAT3)通路来抑制小胶质细胞向 M1 表型极化,降低 IL-1 β 、IL-6、TNF- α 和 iNOS 表达,同时促进细胞向抗炎 M2 表型极化,促进抗炎因子表达^[75]。A. M. Mahmoud 等^[76]证实,阿魏酸(25 mg/kg、50 mg/kg)通过上调 Nrf2 信号传导,抑制 ROS 过度产生,进而阻断氨甲蝶呤诱导的大鼠肾脏中 NF- κB /NOD 样受体热蛋白结构域相关蛋白 3(NOD-like Receptor Thermal Protein Domain Associated Protein 3, NLRP3)炎症小体轴和细胞凋亡。Q. C. Ren 等^[77]发现,沙棘黄酮以剂量依赖性方式同时抑制 ERK、Akt 和蛋白激酶 C- α (Protein Kinase C- α , PKC- α)激活,降低脂多糖刺激的支气管上皮细胞中 IL-1 β 、IL-6、CXC 基序趋化因子配体 1(C-X-C Motif Chemokine Ligand 1, CXCL1)和黏蛋白 5AC(Mucin 5AC, MUC5AC)表达,并通过抑制 COX-2/前列腺素 E2(Prostaglandin E2, PGE2)途径调控炎症微环境;分子对接结果显示,槲皮素和异鼠李素与 MAPK1 的结合能为 -7.859 ~ -7.280 kcal/mol,与磷脂酰肌醇 4,5-二磷酸 3-激酶催化亚基 γ (Phosphatidylinositol-4,5-Bisphosphate 3-Kinase Catalytic Subunit Gamma Gene, PIK3CG)的结合能分别为 -8.427 kcal/mol 和 -9.415 kcal/mol(负滑动 G 分数越低,结合能力越强),且异鼠李素是这 2 个靶标的最佳对接配体。如图 1 所示,HRPC 的抗炎作用涉及 NF- κB 、JNK/p38 MAPK、NLRP3 炎症小体、巨噬细胞极化等多条通路的调控,进而实现“促炎-抗炎”的动态平衡,最终减轻过度炎症对组织的损伤。

3.3 抗肿瘤作用

HRPC 具有广泛且良好的抗肿瘤作用,对胃癌细胞 MKN-45、肝癌细胞 SK-HEP-1、乳腺癌细胞 Bcap-37 和 MDA-MB-231、结肠癌细胞 HCT-116 等多种癌细胞表现出明显抑制作用。M. E. Olsson 等^[78]

研究表明,相较于玫瑰果、蓝莓、黑醋栗等常见浆果酚类化合物,沙棘果酚类化合物在 0.5% 质量分数下对结肠癌细胞 HT29 和乳腺癌细胞 MCF-7 具有更强的抑制效果。

细胞凋亡经由内源性线粒体途径或外源性死亡受体途径启动,两条途径均依赖天冬氨酸特异性半胱氨酸蛋白酶 (Cysteinyl Aspartate Specific Proteinase, Caspase) 家族的级联激活,导致细胞程序性死亡。郭瑞雪^[8] 研究表明,异鼠李素与山柰酚联合处理 (6.25 mg/kg+12.5 mg/kg, 12.5 mg/kg+25 mg/kg, 25 mg/kg+50 mg/kg) 可显著下调乳腺癌细胞 MDA-MB-231 在裸鼠皮下构建的肿瘤中增殖细胞核抗原 (Proliferating Cell Nuclear Antigen, PCNA)、B 细胞淋巴瘤-2 (B-cell lymphoma-2, Bcl-2)、Akt 及 p-Akt 表达,同时上调 Bcl-2 相关 X 蛋白 (Bcl-2 associated X protein, Bax)、p38、肿瘤蛋白 p53 和 Caspase-9 基因表达,并下调基质金属蛋白酶 2 (Matrix Metalloproteinase-2, MMP-2)、MMP-9 及 PI3K 表达。该联合方案通过抑制 PI3K/Akt 信号通路活化及激活 p38 MAPK 信号通路抑制移植瘤生长,并进一步激活内源性线粒体细胞凋亡途径。而 C. H. Li 等^[79] 研究发现,10 $\mu\text{mol/L}$ 异鼠李素可特异性抑制 PI3K/AKT/哺乳动物雷帕霉素靶蛋白 (Mammalian Target of Rapamycin, mTOR) 通路活性,通过靶向抑制 PI3K α 磷酸化阻断 mTOR 依赖性自噬,破坏线粒体膜电位稳定性并上调细胞色素 c (Cytochrome c, Cyt c)/Caspase-9/Caspase-3 表达,从而逆转缺氧微环境诱导的胃癌细胞适应性自噬并促进其凋亡。HRPC 核心成分山柰酚 (50 $\mu\text{mol/L}$ 、75 $\mu\text{mol/L}$ 、100 $\mu\text{mol/L}$) 可显著上调 AMPK α (Thr172) 磷酸化,抑制 AKT (Ser473) 及 mTOR 磷酸化,通过激活 AMPK 通路和抑制 AKT/mTOR 负调控轴,诱导微管相关蛋白轻链 3-II (Microtubule-Associated-Proteinlight-Chain-3, LC3-II) 剪切及提高自噬相关 5 蛋白 (Autophagy Related 5 Gene, ATG5)、ATG7、ATG12 和 beclin1 水平,促进自噬体形成及溶酶体依赖性降解^[80];在结直肠癌细胞中通过提高 ROS 水平和 p53 蛋白表达,激活 p38 MAPK 磷酸化,进而导致 Caspase 级联反应和细胞凋亡^[81]。J. Michaud-Levesque 等^[82] 研究表明,槲

皮素是 T98 G 和 U87 胶质母细胞瘤细胞中 IL-6 诱导 STAT3 信号通路的有效抑制剂,可减少 Janus 激酶 1 (Janus Kinase 1, JAK1) 和 STAT3 激活,并调控细胞周期蛋白 D1 和 MMP-2 表达,从而抑制胶质母细胞瘤细胞增殖和迁移。F. X. Pang 等^[83] 研究表明,没食子酸 (150 $\mu\text{mol/L}$) 可通过 *H19* 基因介导的 Wntless/Int-1 (Wnt)/ β -catenin 信号调节轴在骨肉瘤细胞中抑制肿瘤发生和转移。

代谢重塑是肿瘤细胞恶性特征之一,干预关键代谢途径是抗癌治疗的有效策略。沙棘果结合态多酚 (120 $\mu\text{g/mL}$) 通过 miR-339-5p/聚嘧啶束结合蛋白 1 (Polypyrimidine Tract Binding Protein 1, PTBP1)/肌肉丙酮酸激酶同工酶 2 (Pyruvate Kinase Isozyme TypeM2, PKM2) 信号通路抑制结肠癌细胞糖酵解,下调 PKM2 表达以逆转瓦博格效应 (Warburg Effect),同时激活 Caspase 家族及促凋亡相关蛋白 Bax,下调抗凋亡蛋白 Bcl-2,诱导细胞凋亡^[84]。沙棘原花青素通过靶向抑制脂肪酸合酶 (Fatty Acid Synthase, FAS) 调控乳腺癌 MDA-MB-231 细胞脂代谢 ($IC_{50} = 0.087 \mu\text{g/mL}$),显著降低细胞活力并诱导外源性棕榈酸依赖性凋亡^[85]。lncRNA 的异常表达和功能在调节肿瘤糖代谢重塑中起关键作用,K. L. Cui 等^[86] 研究发现,阿魏酸与对香豆酸联合 (60 $\mu\text{g/mL}$ 、120 $\mu\text{g/mL}$ 、180 $\mu\text{g/mL}$),可通过 lncRNA 495810/PKM2 轴阻断结直肠癌细胞的有氧糖酵解。

在细胞周期调控上,H. L. Wu 等^[87] 研究指出,50 mg/kg 的沙棘果结合态酚类化合物通过上调 miR-195-5p/miR-497-5p 抑制 Cyclin D/E 及 Bcl-2 表达,同时下调促癌 miR-1247-3p 以解除对 Caspase-2 的转录抑制,从而诱导结肠癌细胞 G1 期阻滞及线粒体/死亡受体依赖性凋亡。山柰酚 (100 $\mu\text{mol/L}$) 可特异性下调周期蛋白依赖性激酶 1 (Cyclin-Dependent Kinases, CDK1)/cyclin B 复合物表达,引发肝癌细胞 SK-HEP-1 的 G2/M 期阻滞^[80],且该过程独立于经典凋亡通路 (无 DNA 片段化及 Caspase-3 激活),这与 H. L. Wu 等^[87] 的研究形成时空互补。在转移抑制和血管生成机制中,西藏沙棘黄酮 ($IC_{50} = 64.75 \mu\text{g/mL}$) 通过抑制 MMP-2/MMP-9 及转化生长

因子-β(Transforming Growth Factor-β, TGF-β) 信号通路,上调 E 钙粘着蛋白(E-cadherin) 并阻断转录因子 TWIST1/SNAIL 介导的上皮间质转化(Epithelial-Mesenchymal Transition, EMT) 进程,显著抑制肺癌细胞 A549 侵袭潜能^[88]。L. Wang 等^[89]证实,槲皮素可抑制 COX-2 介导的缺氧诱导因子 1α(Hypoxia Inducible Factor 1 Subunit α)/血管内皮生长因子(Vascular Endothelial Growth Factor, VEGF) 信号通路,减弱腹主动脉瘤发展中的新生血管形成。

图 2 为 HRPC 的抗肿瘤作用,其中 LRP 表示低密度脂蛋白受体相关蛋白, Fizzled 表示 Fizzled 连接子, IGF-1R 表示胰岛素样生长因子 1 受体, VEGFR 表示血管内皮生长因子受体, FAS 表示肿瘤坏死因子受体超家族成员 6, MKK3/6 表示 P38 MAPK 激酶, Ras 表示 Ras 蛋白, Raf 表示丝裂原活化蛋白激酶, MEK1/2 表示丝裂原活化蛋白激酶, Bid 表示 BH3 相互作用域死亡激动因子, Apaf-1 表示凋亡酶激活因子-1, 主要涉及细胞凋亡诱导、肿瘤代谢调

控、细胞周期阻滞、抗血管生成、转移抑制机制等多维度机制的协同作用。

构效关系研究^[90]表明,槲皮素及其单甲基化衍生物(MQs) 的抗结直肠癌(Colorectal Cancer, CRC) 活性与其分子结构中羟基位置及甲基化修饰密切相关。槲皮素母核中 A 环 7 位羟基(C₇-OH) 是维持抗增殖活性的关键基团,其甲基化(7-O-MQ) 会导致活性完全丧失(IC₅₀>400 μmol/L)。而 C 环 3 位羟基(C₃-OH) 的甲基化(3-O-MQ) 则显著增强活性,在测试的 CRC 细胞系中表现出最强的抗增殖效果(IC₅₀ 低至 14. 59 μmol/L),其机制涉及诱导 G₂/M 期阻滞和线粒体途径凋亡。B 环 3'或 4'位羟基甲基化(3'-O-MQ 和 4'-O-MQ) 也可提升活性,但弱于 3-O-MQ,且 4'-O-MQ 可通过抑制 SRC/JAK2/STAT3 通路阻滞细胞周期。此外,缺失 C₅-OH 的黄酮醇(如非瑟酮, IC₅₀ 为 22. 56~51. 30 μmol/L) 或缺失 C₃-OH 的黄酮(如木犀草素, IC₅₀ 为 17. 83~62. 50 μmol/L) 活性均优于槲皮素(IC₅₀ 为 25. 84~

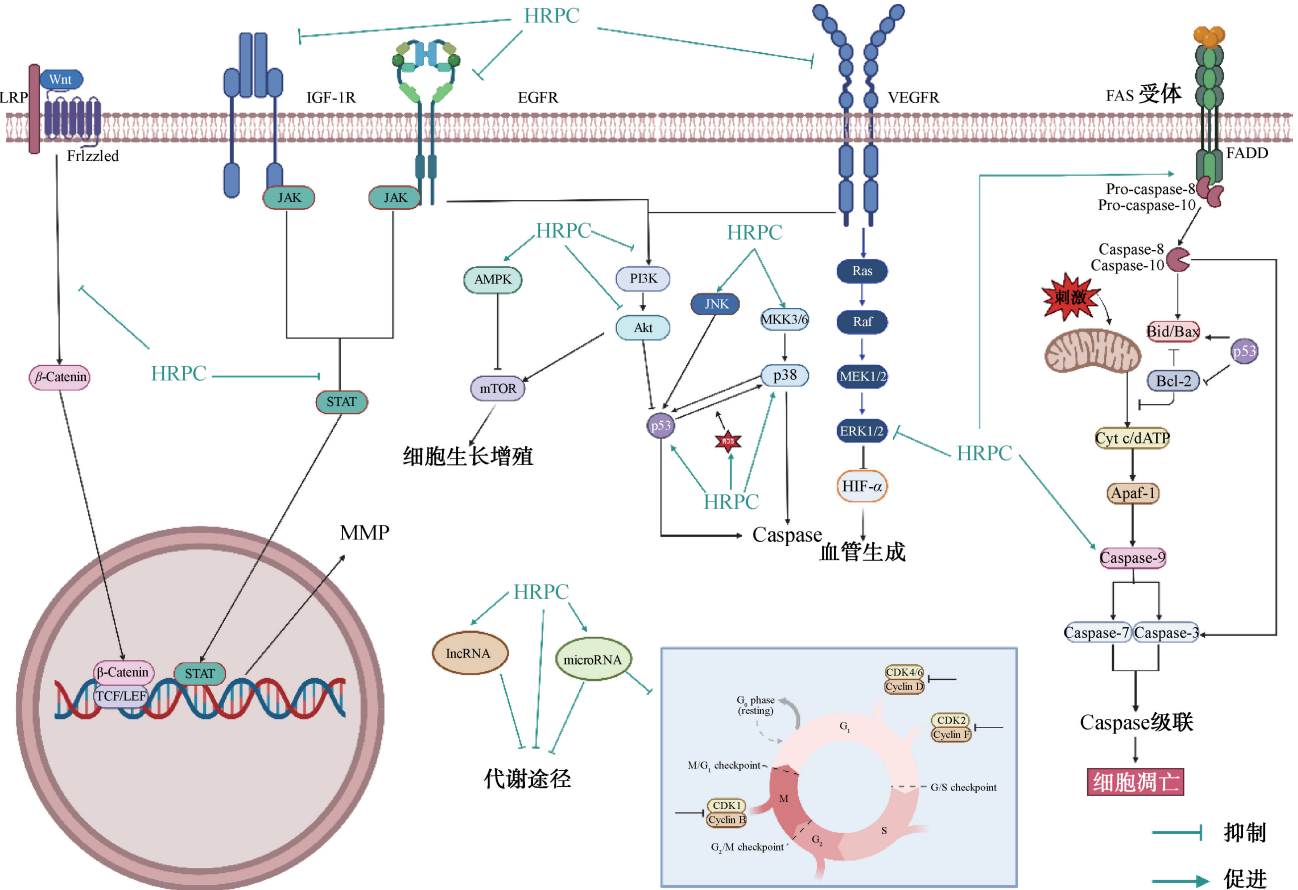


图 2 HRPC 的抗肿瘤作用
Fig. 2 Anti-tumor effect of HRPC

76.31 $\mu\text{mol/L}$),进一步证实了 C3 位修饰(甲基化或缺失)可优化抗肿瘤活性。综上,槲皮素的构效关系表现为 C₇-OH 是活性必需基团,C₃-OH 甲基化可最大化抗肿瘤效能,而 B 环修饰(C3'/C4')则可提供中等活性增益。

3.4 抗动脉粥样硬化作用

动脉粥样硬化是全球致死率居高的心血管疾病之一,其本质为动脉壁的慢性炎症性疾病,发病与血小板活化有关^[91-93]。活化血小板会黏附于血管内皮,导致白细胞被招募于该结合位点形成泡沫细胞,并在血管内膜上发生凋亡而形成血栓或促炎坏死核心,最终损伤血管内皮细胞^[93-94]。沙棘果酚类化合物(0.5~50 $\mu\text{g/mL}$)具有一定的抗血小板黏附活性,可抑制血小板表面整合素 $\alpha\text{IIb}\beta_3$ 活化,降低人源血小板与胶原蛋白及纤维蛋白原的黏附效率,其抗聚集机制与调控花生四烯酸代谢途径中抑制 COX 和血栓烷 A₂(TXA₂)的合成密切相关^[95]。在巨噬细胞层面,沙棘黄酮(75 mg/kg、200 mg/kg)通过上调补体 C1q/肿瘤坏死因子相关蛋白 6(C1q/TNF-related Protein 6,CTRP6)表达,显著抑制氧化低密度脂蛋白(ox-LDL)诱导的泡沫细胞形成;同时下调 TGF- β 信号通路关键蛋白 Smad3 的磷酸化水平,减少纤维化进程并调节 CD4⁺/CD8⁺T 淋巴细胞亚群平衡,协同降低血清总胆固醇(Total Cholesterol, TC)及低密度脂蛋白胆固醇(Low Density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C)水平,有效缓解主动脉内膜损伤^[96-97]。此外,HRPC 还能通过调控氧化应激关键节点和炎症途径发挥保护作用。沙棘黄酮(100 $\mu\text{g/mL}$)一方面可下调内皮型一氧化氮合酶(Endothelial Nitric Oxide Synthase, eNOS)表达并抑制凝集素样低密度脂蛋白受体-1(Lectin-Like Oxidized Low-Density Lipoprotein Receptor-1, LOX-1)过度激活,从而减轻 ox-LDL 诱导的内皮细胞线粒体功能障碍及氧化损伤^[98];另一方面,其活性成分异鼠李素(20 mg/kg)通过激活 PI3K/AKT 信号通路,促进 Nrf2 核转位并诱导 HO-1 表达,显著降低 ROS 水平及 Caspase-3 活性,进而抑制巨噬细胞凋亡及动脉斑块形成^[99]。阿魏酸、原儿茶酸及其联合应用(单独用量为 50 mg/kg,联合用量为 25 mg/kg+25 mg/kg)

通过促进血管周围脂肪组织和棕色脂肪组织中解偶联蛋白 1(Uncoupling Protein 1, UCP1)表达及抑制 NLRP3-IL-1 β 炎症信号通路来缓解动脉粥样硬化^[100]。另外,HRPC 的核心成分槲皮素(50 mg/kg、100 mg/kg)可抑制通道蛋白 Piezo1 介导的 NF κ B/IL-1 β 和 NLRP3/Caspase1/IL-1 β 信号轴,从而抑制炎症反应,缓解高脂饮食诱导的动脉粥样硬化^[101]。综上所述,HRPC 通过整合抗血栓形成、调节脂质代谢、抑制炎症反应、增强抗氧化防御等机制,系统干预动脉粥样硬化的病理进程。然而,目前关于 HRPC 在动脉粥样硬化等心血管疾病上的深入且系统性的分子作用机制研究仍较缺乏,有待进一步探索。

3.5 护胃作用

HRPC 通过离子通道调控、炎症通路抑制、自噬/凋亡平衡调节、致癌信号阻断等机制发挥护胃作用。山柰酚(40 mg/kg、80 mg/kg、160 mg/kg)通过抑制中性粒细胞浸润(降低 MPO 活性)、调节炎症因子(降低 TNF- α 、IL-1 β 水平,上调 IL-6 水平)及增加 NO 生成,减轻乙醇诱导的胃黏膜损伤^[102]。在大鼠模型中,槲皮素(25 mg/kg)通过抑制干扰素调节因子 8/ γ 干扰素(Interferon Regulatory Factor 8/Interferon- γ , IRF8/IFN- γ)信号轴,减轻幽门螺杆菌感染所致的慢性萎缩性胃炎并改善胃分泌功能^[103]。槲皮素(40 $\mu\text{mol/L}$)与芹菜素(4 $\mu\text{mol/L}$)联用、杨梅素(10 mg/kg、20 mg/kg)可通过降低 MDA 含量,提高 GSH 含量及增强 CAT、SOD 活性,抑制 TNF- α 与 IL-1 β 等炎症因子表达和抑制细胞凋亡,从而发挥护胃作用^[104-105]。没食子酸(200 mg/kg 自组装水凝胶)通过抑制 NF- κ B 核易位及 STAT3 磷酸化,下调 TNF- α 、IL-1 β 和 IL-6 水平,缓解乙醇诱导的急性胃黏膜损伤^[106]。在细胞凋亡调控方面,异鼠李素通过线粒体依赖性途径升高 Bax 与 Bcl-2 比值并激活 Caspase-3,促进胃癌细胞 MKN-45 凋亡^[79],阿魏酸(50~100 mg/kg)则通过抑制 Wnt/ β -catenin 通路,降低幽门螺杆菌定植率至 67%,从而减轻胃黏膜炎症^[107]。构效关系研究^[108-109]表明,槲皮素(B 环 3',4'-二羟基)与幽门螺杆菌脲酶活性位点(His314、Ala169)形成氢键,其 IC₅₀ 为 15.3 $\mu\text{mol/L}$,

而山柰酚(B环4'-单羟基)和异鼠李素(B环3'-甲氧基-4'-羟基)因氢键形成能力减弱, IC_{50} 分别增至25.7 $\mu\text{mol/L}$ 和38.2 $\mu\text{mol/L}$,而电生理实验证实,槲皮素(10 $\mu\text{mol/L}$)可抑制Kir6.1通道电流达(72 \pm 5)%,而芦丁(槲皮素-3-O-芸香糖苷)因空间位阻导致同等浓度下无抑制作用。多酚羟基的特定排布是实现自组装及维持活性的关键。没食子酸通过 π - π 堆积及氢键形成水凝胶,而原儿茶酸(3,4-二羟基苯甲酸)和焦性没食子酸(1,2,3-三羟基苯)因羟基位置差异无法自组装^[106]。剂量优化可增强协同效应,如槲皮素与芹菜素以浓度比为10:1配伍时,可使GES-1细胞凋亡率降低29.5%^[104]。

3.6 抗肺纤维化作用

博来霉素(BLM)作为广谱抗肿瘤药物,常与其他药物联合使用,但也会引发多种副作用,其中肺毒性最为严重,可逐渐发展为肺纤维化。多种黄酮类化合物可通过不同分子机制减轻BLM诱导的肺纤维化。槲皮素(75 mg/kg)联合没食子酸(200 mg/kg)通过协同增强肺组织CAT活性,降低羟脯氨酸和TNF- α 水平,显著逆转纤维化病理改变,其联合用药效果优于单药治疗^[110]。山柰酚(50~200 mg/kg)则依赖过氧化物酶体增植物激活受体 γ /肌腱蛋白C(peroxisome proliferator activated receptor gamma/Tenascin C,PPARG/TNC)信号轴调控细胞外基质(Extracellular Matrix,ECM)受体相互作用通路,剂量依赖性地抑制胶原沉积;分子对接显示其与PPARG结合能达-8.6 kcal/mol^[111]。芦丁(100~200 mg/kg)通过上调miR-9-5p抑制NF- κ B信号,降低下游炎症因子IL-18、IFN- γ 及COX-2表达,其中高剂量(200 mg/kg)对白细胞浸润的抑制效果显著优于低剂量^[112]。异鼠李素(10~30 mg/kg)能靶向内质网应激(ERS)通路,抑制蛋白激酶R样内质网激酶/真核翻译起始因子2 α (Protein Kinase R-Like Endoplasmic Reticulum Kinase/Eukaryotic Translation Initiation Factor 2 Alpha,PERK/eIF2 α)磷酸化及EMT转化,降低肺组织葡萄糖调节蛋白78/C/EBP同源蛋白(Glucose-Regulated Protein 78/C/EBP-Homologous Protein,GRP78/CHOP)表达;体外实验证实,异鼠李素(25~100 $\mu\text{mol/L}$)可逆转TGF- β 1诱

导的E-cadherin丢失^[113]。综上所述,HRPC通过抗氧化、抗炎、调控纤维化通路、细胞应激响应等多途径发挥抗肺纤维化作用。

3.7 抑制肥胖作用

肥胖已成为全球性的健康问题,与多种疾病的发生密切相关,其主要特征是脂肪组织的异常扩张和功能紊乱。P. T. Xiao等^[114]利用网络药理学和分子对接技术结合HPLC分析证实,沙棘黄酮的主要成分(异鼠李素、槲皮素、儿茶素和橙皮苷)能有效减少脂滴累积。异鼠李素(10 $\mu\text{mol/L}$ 、20 $\mu\text{mol/L}$)可激活过氧化物酶体增植物激活受体 γ /肝X受体 α /胆固醇7 α -羟化酶(Peroxisome Proliferator-Activated Receptor Gamma/Liver X Receptor Alpha/Cholesterol 7-Alpha Hydroxylase,PPAR- γ /LXR α /CYP7A1)轴,促进线粒体脂肪酸 β -氧化,降低肝脏甘油三酯水平,并加速胆固醇转化为胆汁酸;槲皮素(20 $\mu\text{mol/L}$ 、40 $\mu\text{mol/L}$)、橙皮苷(20 $\mu\text{mol/L}$ 、40 $\mu\text{mol/L}$)和儿茶素(20 $\mu\text{mol/L}$ 、40 $\mu\text{mol/L}$)可诱导基因LXR α 、ABCA1、APOA1和ABCG5/8表达,促进胆固醇外流;4种成分协同可抑制固醇调节元件结合蛋白(Sterol Regulatory Element-Binding Protein,SREBP-2)及其靶基因LDLR表达,阻断胆固醇合成;儿茶素和橙皮苷可上调基因CPT1A,加速脂肪酸氧化。在肥胖个体中,脂肪组织会分泌大量促炎细胞因子并招募巨噬细胞,诱发慢性炎症,进而引发胰岛素抵抗、糖尿病等代谢紊乱疾病,甚至增加某些癌症风险^[115]。沙棘黄酮能抑制巨噬细胞向脂肪组织浸润,下调TNF- α 、IL-6等促炎因子水平,还可通过降低抵抗素和瘦素水平,改善胰岛素信号通路中基因IRS2表达^[116-117],从而打破“脂肪扩张-慢性炎症-胰岛素抵抗”的恶性循环。

除直接分子调控外,HRPC还可通过调节肠道菌群及其代谢产物(如短链脂肪酸、脂多糖、胆汁酸、支链氨基酸等)间接抑制肥胖。该机制影响宿主对脂质和胆固醇的吸收与代谢,并增加粪便胆固醇及甘油三酯排泄,实现跨器官代谢调控^[118-119]。例如,槲皮素(100 mg/kg)可通过调整小鼠肠道菌群结构,显著提升有益共生菌嗜黏蛋白阿克曼菌丰度并促进其代谢产物吲哚-3-乳酸生成,进而介导

胆汁酸代谢调控以缓解高脂肪饮食诱导的肥胖^[120]。综上,HRPC通过整合PPAR α / γ -LXR α 途径、AMPK-SREBP途径及肠道菌群调节,实现促进脂质氧化、抑制脂肪生成和缓解炎症的协同作用,为肥胖及相关代谢紊乱提供了基于天然成分的防治策略。

3.8 调节肠道微生物群作用

肠道微生物群是人体肠道黏膜屏障形成的重要影响因素之一,其失衡与多种肠道疾病、自身免疫病和神经疾病的发生密切相关^[121]。受年龄、遗传、环境、饮食等因素影响,不同个体肠道微生物群组成存在差异,但大致可分为放线菌门、变形菌门、梭杆菌门等6个主要细菌门^[122]。多酚类化合物与肠道微生物群之间存在双向调节机制:一方面,多酚可作为益生元调节肠道微生物群组成和活性,促进有益菌生长;另一方面,肠道微生物可将多酚代谢为具有生物活性的小分子,启动与疾病预防相关的生理代谢过程^[123-124]。

HRPC可通过调节肠道微生物群发挥健康效应。S. Attri等^[125]研究发现,沙棘果多酚可显著增加乳酸菌、拟杆菌、普雷沃氏菌和双歧杆菌的多样性;C. X. Xia等^[126]进一步证实,沙棘黄酮可通过调节肠道微生物群缓解小鼠抑郁症状,其机制可能与降低乳酸菌科丰度和增加毛螺菌科丰度有关。槲皮素(50 mg/kg)主要在结肠内被肠道菌群代谢,可显著富集产短链脂肪酸的异杆菌属、改善代谢的阿克曼氏菌属、增强屏障功能的粪球菌属等有益菌属,同时抑制肥胖相关菌属 *Adlercreutzia* 的增殖,进而参与肠道屏障功能修复和肥胖代谢紊乱改善^[127]。

4 HRPC的生物利用度

生物利用度是指摄入的营养物质或化合物在体内被吸收入入血液循环,并到达特定部位发挥有益生物效应的比例^[128],对HRPC而言,其生物利用度主要受其结构种类、食物基质、加工方法、肠道微生物群等因素影响。HRPC是酚类化合物的子集,其生物利用度机制可基于多酚的通用规律进行类推,但需结合HRPC的组成(如高含量的异鼠李素、槲皮素)和沙棘基质特性进行特异性分析。

与多数多酚类似,HRPC中游离苷元(如槲皮素、异鼠李素)可直接被小肠上皮细胞吸收;而以糖苷、酯或聚合物形式存在的成分(如芦丁、异鼠李素-3-O-葡萄糖苷),则需经肠道酶或结肠微生物群落水解后方可吸收。糖苷形式的HRPC在小肠的吸收主要通过2种机制^[129]:一是在肠细胞表面被水解后形成苷元和糖配体,其中亲脂性苷元通过被动扩散进入细胞;二是通过钠依赖性葡萄糖转运蛋白跨膜转运进入肠道细胞,随后被胞内的 β -葡萄糖苷酶水解除去糖原。进入细胞后的多酚苷元大部分会经过II期代谢,形成葡糖醛酸化、硫酸化或甲基化衍生物,这些衍生物可以通过肠细胞两侧的转运蛋白进入血液循环并经尿液排出。不易被小肠吸收的如HRPC的原花青素则转移到结肠,由肠道微生物群代谢降解成更简单的小分子代谢物。因此,HRPC的结构种类对其生物利用度具有决定性影响。另外,如3.8所述,HRPC还可以通过充当益生元来调节肠道微生物群的组成和活性,而其大部分的吸收转化也都离不开肠道微生物群,二者的相互作用对机体健康有重要意义。

HRPC经过一系列加工(如酶解、发酵、高压等)后,其生物利用度能得到显著提高,主要因为相应反应会使其结构、组分、含量及食物基质发生改变,从而促进多酚释放。以发酵为例,HRPC的结构变化趋势主要是在微生物水解作用下从原花青素、类黄酮苷、鞣花单宁等大分子多酚转变成糖苷配基、鞣花酸、儿茶素等小分子多酚。体外模拟消化前,沙棘果汁食物基质完整,呈晶体形态;经胃、小肠消化后,基质结构被破坏,细胞间隙增多,总多酚含量分别提升至消化前的1.64倍(胃)和2.20倍(小肠),表明成分得以释放。模拟结肠发酵36h后,槲皮素和咖啡酸含量显著升高;至发酵后期,槲皮素转化为其他代谢物而含量降低,咖啡酸含量则基本维持稳定^[125]。

为最大限度发挥HRPC的健康益处,还需提高其稳定性、靶向递送、控释性能和生物利用度。目前研发的递送系统包括乳液、脂质体、微胶囊、纳米颗粒等,包埋方法包括 β -环糊精、自乳化等^[130]。例如,异鼠李素水溶性极差($<3.5 \mu\text{g/mL}$),生物利用

度低, Y. K. Pan 等^[131]构建的异鼠李素-木质素纳米颗粒(ISO@LNP)的 ISO 负载效率达 27.68%, 溶解度提高了 88 倍, 抗晕动病活性能维持 12 h, 明显优于游离 ISO 的 6 h。此外, 将 HRPC 与其他酚类化合物、益生菌或肠道细菌结合的供给药技术也可提高其生物利用度并可能产生协同效应^[132]。

5 结论与展望

本文综述了 HRPC 的化学组成及分布、8 种生物活性机制及生物利用度调控策略。HRPC 共计 164 种, 可分为黄酮类(117 种)和非黄酮类(47 种)两大类, 是沙棘发挥多种功效的核心活性物质。沙棘品系及植株部位显著影响 HRPC 种类与含量, 进而影响其生物活性与生物利用度, 最终决定其功效水平。HRPC 具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤、抗动脉粥样硬化、护胃、抗肺纤维化、抑制肥胖、调节肠道微生物群等多重生物活性, 在功能食品与药物开发方面具有广阔应用前景。基于 HRPC 种类与含量及分布差异, 可借助遗传改良和分子育种技术, 筛选培育富含高异鼠李素、高槲皮素等特定酚类化合物的优良品种, 提升不同品系沙棘的药用价值; 针对叶、果渣等废弃物, 可通过发酵、酶解等加工技术提高 HRPC 提取效率, 开发高附加值产品, 实现资源循环利用与可持续发展。然而, 因 HRPC 组成复杂、食物基质协同效应显著、生物个体差异大及生物利用度研究复杂, 现有研究基本仍停留在体外与动物实验阶段, 临床研究相对匮乏, 这限制了临床医药的开发; 对 HRPC 结构-活性关系、肠道微生物互作机制及跨器官代谢调控网络缺乏系统性解析。未来研究应整合代谢组学、食品组学、宏基因组学、高分辨质谱技术, 结合纳米递送、共给药系统等提升生物利用度策略, 深入探索 HRPC 精细结构与构效关系、HRPC 消化吸收动力学与肠道微生物群的双向调控机制、与其他生物大分子(蛋白质、多糖)的协同作用等, 从而全面揭示 HRPC 的活性本质, 推动其从传统应用向精准营养与靶向治疗的现代化转型。

参考文献:

[1] 崔立柱, 付依依, 刘士伟, 等. 沙棘营养价值及产业发

展概况[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(11): 218-224.

CUI L Z, FU Y Y, LIU S W, et al. Nutritional value and industry development of sea buckthorn[J]. Food Research and Development, 2021, 42(11): 218-224.

[2] 王宁宁, 郑文惠, 张凯雪, 等. 沙棘的化学成分、药理作用研究进展及其质量标志物的预测分析[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(21): 5522-5532.

WANG N N, ZHENG W H, ZHANG K X, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of sea buckthorn and prediction of its Q-markers [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(21): 5522-5532.

[3] 王晓琴, 徐僮, 刘悦, 等. 沙棘属药用植物亲缘学研究进展[J]. 世界中医药, 2021, 16(15): 2217-2227.

WANG X Q, XU T, LIU Y, et al. Research progress on the relative theory of medicinal plants of *Hippophae* L [J]. World Chinese Medicine, 2021, 16(15): 2217-2227.

[4] 宇爱·云丹贡布. 四部医典: 藏文版[M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 1982: 65.

YUTHOK Y D G B. Four medical tantras: Tibetan version [M]. Lhasa: Tibet People's Publishing House, 1982: 65.

[5] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 二部[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1977: 303.

National Pharmacopoeia Committee. Pharmacopoeia of the people's republic of China: II [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1977: 303.

[6] ZULFIQAR R, FATIMA K, HAQ I U, et al. The miracle Berry: Unveiling the therapeutic attributes of sea buckthorn; A review [J]. Human Nutrition & Metabolism, 2025, 41: 200321.

[7] SINGH B, OBEROI S, KAUR A. Phenolic compounds in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) and their health-promoting activities: A review [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(9): 6642-58.

[8] 郭瑞雪. 沙棘酚类物质生物活性、生物利用度及其体内外抑制乳腺癌细胞增殖的机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

GUO R X. Bioactivities and bioavailability of *Hippophae rhamnoides* L. phenolics and their anticancer mechanism towards human breast cancer cells both in *vitro* and in *vivo* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[9] 丁丽娜, 邱亦亦, 束彤, 等. 超高效液相色谱-质谱联用技术解析沙棘果超临界 CO₂ 萃取物中黄酮类天然产物结构[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 273-280.

DING L N, QIU Y Y, SHU T, et al. Determination of flavonoids in the supercritical CO₂ extract of sea buckthorn fruit by using ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2019, 40(18): 273-280.

- [10] 孙燕,冯峰,黄特辉,等.基于UPLC-Q-Exactive技术结合OTCML数据库快速分析沙棘的功效成分[J].天然产物研究与开发,2019,31(7):1192-1202.
SUN Y, FENG F, HUANG T H, et al. Rapid analysis of functional components of *Hippophae rhamnoides* by UPLC-Q-Exactive and OTCML database [J]. Natural Product Research and Development, 2019, 31(7): 1192-1202.
- [11] CRISTE A, URCAN A C, BUNEA A, et al. Phytochemical composition and biological activity of berries and leaves from four Romanian Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) varieties [J]. Molecules, 2020, 25(5): 1170.
- [12] OLAS B. Sea buckthorn as a source of important bioactive compounds in cardiovascular diseases [J]. Food and Chemical Toxicology, 2016, 97: 199-204.
- [13] POP R M, SOCACIU C, PINTEA A, et al. UHPLC/PDA-ESI/MS analysis of the main berry and leaf flavonol glycosides from different carpathian *Hippophae rhamnoides* L. varieties [J]. Phytochemical Analysis, 2013, 24(5): 484-492.
- [14] 孙燕.沙棘中功效成分液相色谱-高分辨质谱精准检测鉴定技术研究[D].北京:北京中医药大学,2019.
SUN Y. Study on accurate detection and identification techniques for bioactive components in *Hippophae rhamnoides* L. using liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry [D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2019.
- [15] JI M Y, GONG X, LI X, et al. Advanced research on the antioxidant activity and mechanism of polyphenols from *Hippophae* species: A review [J]. Molecules, 2020, 25(4): 917.
- [16] CIESAROVÁ Z, MURKOVIC M, CEJPEK K, et al. Why is sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) so exceptional? A review [J]. Food Research International, 2020, 133: 109170.
- [17] TKACZ K, WOJDYŁO A, TURKIEWICZ I P, et al. UPLC-PDA-Q/TOF-MS profiling of phenolic and carotenoid compounds and their influence on anticholinergic potential for AChE and BuChE inhibition and on-line antioxidant activity of selected *Hippophae rhamnoides* L. cultivars [J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125766.
- [18] FANG R, VEITCH N C, KITE G C, et al. Enhanced profiling of flavonol glycosides in the fruits of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(16): 3868-3875.
- [19] MA X Y, MOILANEN J, LAAKSONEN O, et al. Phenolic compounds and antioxidant activities of tea-type infusions processed from sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) leaves [J]. Food Chemistry, 2019, 272: 1-11.
- [20] 邢津津.西藏林芝沙棘成分分析、黄酮提取优化及抗氧化性研究[D].林芝:西藏农牧学院,2021.
XING J J. Analysis of components and flavonoids of *Hippophae rhamnoides* Linzhi from Tibet Study on extraction optimization and antioxidant activity [D]. Nyingchi: Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, 2021.
- [21] 吴斯琴毕力格,包勒朝鲁,那生桑.沙棘药理作用研究进展[J].中国药业,2015,24(1):95-97.
Wusiqinbilige, Baolechaolu, Nashengsang. Research progress on pharmacological effects of *Hippophae rhamnoides* [J]. China Pharmaceuticals, 2015, 24(1): 95-97.
- [22] 冉贝贝,李卫东.沙棘果与沙棘叶化学成分及其差异的研究进展[J].中国中药杂志,2019,44(9):1767-1773.
RAN B B, LI W D. Research progress on chemical constituents and their differences between sea buckthorn berries and leaves [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2019, 44(9): 1767-1773.
- [23] 亓金钗,陈静,李文,等.基于“干法+湿法”联用技术探究西藏沙棘抗氧化质量标志物[J].中国中药杂志,2021,46(11):2699-2709.
QI J C, CHEN J, LI W, et al. Explore antioxidant quality markers of *Hippophae tibetana* based on “dry-method + wet-method” technology [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(11): 2699-2709.
- [24] 王琬宁.沙棘果实中黄酮类物质的分析[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.
WANG W N. Analysis of flavonoids in sea buckthorn fruits [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [25] GUTZEIT D, WRAY V, WINTERHALTER P, et al. Preparative isolation and purification of flavonoids and protocatechuic acid from sea buckthorn juice concentrate (*Hippophae rhamnoides* L. ssp. *rhamnoides*) by high-speed counter-current chromatography [J]. Chromatographia, 2007, 65(1/2): 1-7.
- [26] 郭建峰,郟浩然,王芳,等.沙棘叶黄酮的提取纯化及组成分析[J].现代食品科技,2022,38(5):189-198.
GUO J F, QIE H R, WANG F, et al. Extraction, purification and composition analysis of flavonoids from sea buckthorn leaves [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 189-198.
- [27] 丁金.沙棘活性成分分离制备及抗多柔比星致心肌细胞损伤的研究[D].烟台:烟台大学,2020.
DING J. Preparation of active components from *Hippophae rhamnoides* Linn. and study on doxorubicin-induced H9c2 myocardial injury [D]. Yantai: Yantai University, 2020.
- [28] 郑文惠.沙棘不同部位的代谢组学分析及抗炎活性研究[D].兰州:兰州大学,2020.
ZHENG W H. Metabolomics research and anti-inflammatory study of different parts of *Hippophae rhamnoides* L. [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [29] GOOSSENS J F, GOOSSENS L, BAILLY C. Hinokiflavone and related C—O—C-type biflavonoids as anti-cancer

- compounds: properties and mechanism of action [J]. *Natural Products and Bioprospecting*, 2021, 11 (4): 365-77.
- [30] JASTRZAB A, SKRZYDLEWSKA E. Composition and biomedical relevance of sea buckthorn [J]. *Acta Poloniae Pharmaceutica-Drug Research*, 2019, 76 (6): 959-969.
- [31] GHENDOV-MOSANU A, CRISTEA E, PATRAS A, et al. Potential application of *Hippophae rhamnoides* in wheat bread production [J]. *Molecules*, 2020, 25 (6): 1272.
- [32] DANIELSKI R, SHAHIDI F. Phenolic composition and bioactivities of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) fruit and seeds: An unconventional source of natural antioxidants in North America [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104 (9): 5553-5564.
- [33] BITTOVÁ M, KREJZOVÁ E, ROBLOVÁ V, et al. Monitoring of HPLC profiles of selected polyphenolic compounds in sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) plant parts during annual growth cycle and estimation of their antioxidant potential [J]. *Open Chemistry*, 2014, 12 (11): 1152-1161.
- [34] SUVANTO J, TÄHTINEN P, VALKAMAA S, et al. Variability in foliar ellagitannins of *Hippophaë rhamnoides* L. and identification of a new ellagitannin, hippophaenin C [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66 (3): 613-620.
- [35] CHIORCEA-PAQUIM A M, ENACHE T A, DE SOUZA GIL E, et al. Natural phenolic antioxidants electrochemistry: Towards a new food science methodology [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19 (4): 1680-1726.
- [36] ZHENG W H, BAI H Y, HAN S, et al. Analysis on the constituents of branches, berries, and leaves of *Hippophae rhamnoides* L. by UHPLC-ESI-QTOF-MS and their anti-inflammatory activities [J]. *Natural Product Communications*, 2019, 14 (8): 1934578X19871404.
- [37] AIROUYUWA J O, MOSTAFA H, RIAZ A, et al. Natural deep eutectic solvents and microwave-assisted green extraction for efficient recovery of bioactive compounds from by-products of date fruit (*Phoenix dactylifera* L.) processing: Modeling, optimization, and phenolic characterization [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16 (4): 824-843.
- [38] KALLIO H, YANG W, LIU P Z, et al. Proanthocyanidins in wild sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides*) berries analyzed by reversed-phase, normal-phase, and hydrophilic interaction liquid chromatography with UV and MS detection [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62 (31): 7721-7729.
- [39] WANG Y Q, SHAN Q, JIA Y P, et al. Ultrasound-assisted acidic natural deep eutectic solvent as a new strategy for extracting seabuckthorn leaf phenolics: Process optimization, compositional identification, and metabolic enzyme inhibition capacity [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2024, 17 (11): 3670-3692.
- [40] 廉永善, 卢顺光. 沙棘属植物生物学和化学 [M]. 甘肃: 甘肃科技出版社, 2001.
- LIAN Y S, LU S G. *Biology and chemistry of plants of the genus Hippophae* [M]. Gansu: Gansu Science and Technology Press, 2001.
- [41] 张欣. 沙棘叶提取物对结直肠癌细胞 HCT116 的抑制作用 [D]. 太原: 山西大学, 2020.
- ZHANG X. Inhibitory effect of anti-cancer extract of seabuckthorn leaves on HCT116 cells [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [42] 丁金, 铁芳芳, 王洪伦. HPLC 快速测定沙棘叶中的苯丙素与黄酮类成分 [J]. *华西药学杂志*, 2023, 38 (5): 548-551.
- DING J, TIE F F, WANG H L. Rapid determination of phenylpropanoids and flavonoids components in the leaves of *Hippophae rhamnoides* by HPLC [J]. *West China Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2023, 38 (5): 548-551.
- [43] 赵鑫丹, 张东为, 姜鑫, 等. 不同品种沙棘叶片和果实中酚酸类及黄酮类成分的比较 [J]. *经济林研究*, 2024, 42 (4): 247-256.
- ZHAO X D, ZHANG D W, JIANG X, et al. Comparison of phenolic acids and flavonoids in leaves and berries of different varieties of seabuckthorn [J]. *Non-wood Forest Research*, 2024, 42 (4): 247-256.
- [44] 陈维. 青藏高原沙棘属植物资源与品质评价 [D]. 成都: 四川大学, 2007.
- CHEN C. Resources and quality evaluation of genus *Hippophae* on the Qinghai-Tibetan Plateau [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [45] 胡建忠, 张滨, 高岩. 我国主要野生沙棘果实的黄酮含量分析 [J]. *青海农林科技*, 2021 (4): 8-12.
- HU J Z, ZHANG B, GAO Y. Analysis on total flavonoids of fruits from main natural seabuckthorn resources in China [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2021 (4): 8-12.
- [46] 张东为, 赵鑫丹, 戈素芬, 等. 沙棘果实品质的主成分分析及综合评价 [J]. *经济林研究*, 2023, 41 (2): 1-10.
- ZHANG D W, ZHAO X D, GE S F, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation of sea buckthorn berry quality [J]. *Non-wood Forest Research*, 2023, 41 (2): 1-10.
- [47] 谭亮, 赵静, 马家麟, 等. 青海玉树沙棘不同部位营养成分分析与营养价值评价 [J]. *天然产物研究与开发*, 2018, 30 (5): 807-816, 899.
- TAN L, ZHAO J, MA J L, et al. Analysis of nutritional compositions and nutritional quality evaluation in different parts of Yushu *Hippophae* (*Hippophae rhamnoides* L.

- subsp. *sinensis*) [J]. *Natural Product Research and Development*, 2018, 30(5): 807–816, 899.
- [48] 戈素芬, 张东为, 赵鑫丹, 等. 5个杂交沙棘品种果实营养成分比较分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(22): 328–335.
- GE S F, ZHANG D W, ZHAO X D, et al. Analysis of nutrient compositions in five hybrid sea buckthorn varieties berries [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(22): 328–335.
- [49] 闫晓玲, 郝莹, 扈桂琪, 等. 黄土高原沟壑区引进和杂交两类沙棘果实营养成分含量分析[J]. *中国水土保持*, 2025(3): 56–58.
- YAN X L, HAO Y, HU G Q, et al. Study on nutritional content of two types of introduced and hybrid sea buckthorn fruits in the loess hilly and Gully Region [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2025(3): 56–58.
- [50] 唐克. 沙棘不同部位总黄酮含量比较[J]. *黑龙江农业科学*, 2022(3): 64–67.
- TANG K. Comparison of total flavonoids content in different parts of seabuckthorn [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2022(3): 64–67.
- [51] 唐克, 吴雨蹊, 王蕊, 等. 东北黑土区沙棘杂交品种(系)果实性状及营养成分比较[J]. *经济林研究*, 2023, 41(3): 286–295.
- TANG K, WU Y X, WANG R, et al. Comparison of fruit characters and nutrient components of seabuckthorn hybrids (lines) in the black soil region of Northeast China [J]. *Non-wood Forest Research*, 2023, 41(3): 286–295.
- [52] 张宏涛. 肋果沙棘叶片黄酮类化合物含量与环境因子关系的研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.
- ZHANG H T. Study on the relationship between leaf flavonoids concentration of *Hippophae neurocarpa* and environmental factors [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2015.
- [53] 赵文娟, 马齐, 陈卫锋, 等. 吴起野生沙棘不同部位总黄酮含量测定[J]. *河北林果研究*, 2010, 25(3): 252–254.
- ZHAO W J, MA Q, CHEN W F, et al. Determination of total flavonoids in different parts of Wuqi wild *Hippophae rhamnoides* L [J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2010, 25(3): 252–254.
- [54] 牟丹, 唐楠, 黄原林, 等. 沙棘、青海云杉、祁连圆柏总多酚含量的比较研究[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(11): 2879–2881.
- MOU D, TANG N, HUANG Y L, et al. Comparison of the total polyphenol content of *Hippophae rhamnoides*, *Picea crassifolia* and *Sabina przewalskii* [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(11): 2879–2881.
- [55] 郑文惠, 白海英, 王丽瑶, 等. UPLC-QTOF-MS 法分析沙棘果实、叶和枝的成分[J]. *中成药*, 2020, 42(11): 2940–2947.
- ZHENG W H, BAI H Y, WANG L Y, et al. Analysis of constituents in the fruit, leaf and twig of *Hippophae rhamnoides* by UHPL-QTOF-MS [J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2020, 42(11): 2940–2947.
- [56] 蔡爽, 阮成江, 杜维, 等. 沙棘叶片、果肉和种子中黄酮类成分的差异[J]. *植物资源与环境学报*, 2019, 28(4): 58–67.
- CAI S, RUAN C J, DU W, et al. Difference in flavonoid constituents in leaf, pulp, and seed of *Hippophae rhamnoides* [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2019, 28(4): 58–67.
- [57] ALRUMAIHI F, ALMATROODI S A, ALHARBI H O A, et al. Pharmacological potential of kaempferol, a flavonoid in the management of pathogenesis via modulation of inflammation and other biological activities [J]. *Molecules*, 2024, 29(9): 2007.
- [58] ZHU M T, SUN Y P, SU Y, et al. Luteolin: A promising multifunctional natural flavonoid for human diseases [J]. *Phytotherapy Research*, 2024, 38(7): 3417–3443.
- [59] PISOSCHI A M, POP A, IORDACHE F, et al. Oxidative stress mitigation by antioxidants—An overview on their chemistry and influences on health status [J]. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 2021, 209: 112891.
- [60] LAVEFVE L, HOWARD L R, CARBONERO F. Berry polyphenols metabolism and impact on human gut microbiota and health [J]. *Food & Function*, 2020, 11(1): 45–65.
- [61] ZEB A. Concept, mechanism, and applications of phenolic antioxidants in foods [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(9): e13394.
- [62] KALINOWSKA M, GOLEBIEWSKA E, ŚWIDERSKI G, et al. Plant-derived and dietary hydroxybenzoic acids—a comprehensive study of structural, anti-/pro-oxidant, lipophilic, antimicrobial, and cytotoxic activity in MDA-MB-231 and MCF-7 cell lines [J]. *Nutrients*, 2021, 13(9): 3107.
- [63] 付依依, 王永霞, 李月, 等. 大果沙棘中黄酮的体外抗炎及抗氧化活性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(10): 67–74.
- FU Y Y, WANG Y X, LI Y, et al. Study on *in vitro* anti-inflammatory and antioxidant activities of flavonoids from sea buckthorn [J]. *China Food Additives*, 2021, 32(10): 67–74.
- [64] XIANG Z D, GUAN H D, ZHAO X, et al. Dietary gallic acid as an antioxidant: A review of its food industry applications, health benefits, bioavailability, nano-delivery systems, and drug interactions [J]. *Food Research International*, 2024, 180: 114068.
- [65] CHOWDHURY S, GHOSH S, DAS A K, et al. Ferulic acid protects hyperglycemia-induced kidney damage by regulating oxidative insult, inflammation and autophagy [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2019, 10: 27.

- [66] AHMED O M, ELKOMY M H, FAHIM H I, et al. Rutin and quercetin counter doxorubicin-induced liver toxicity in wistar rats *via* their modulatory effects on inflammation, oxidative stress, apoptosis, and Nrf2 [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2022, 2022: 2710607.
- [67] ZHOU D H, WU Y, YAN H, et al. Gallic acid ameliorates calcium oxalate crystal-induced renal injury *via* upregulation of Nrf2/HO-1 in the mouse model of stone formation [J]. *Phytomedicine*, 2022, 106: 154429.
- [68] LIU X Y, XING Y, YUEN M, et al. Anti-aging effect and mechanism of proanthocyanidins extracted from sea buckthorn on hydrogen peroxide-induced aging human skin fibroblasts [J]. *Antioxidants*, 2022, 11 (10): 1900.
- [69] LIU K S, LI W X, YUEN M, et al. Sea buckthorn proanthocyanidins are the protective agent of mitochondrial function in macrophages under oxidative stress [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 914146.
- [70] LEE C Y, YOON S, MOON J O. Kaempferol suppresses carbon tetrachloride-induced liver damage in rats *via* the MAPKs/NF- κ B and AMPK/Nrf2 signaling pathways [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24 (8): 6900.
- [71] YAHFOUFI N, ALSADI N, JAMBI M, et al. The immunomodulatory and anti-inflammatory role of polyphenols [J]. *Nutrients*, 2018, 10 (11): 1618.
- [72] MULATI A, MA S B, ZHANG H B, et al. Sea-buckthorn flavonoids alleviate high-fat and high-fructose diet-induced cognitive impairment by inhibiting insulin resistance and neuroinflammation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68 (21): 5835–5846.
- [73] MULATI A, ZHANG X, ZHAO T, et al. Isorhamnetin attenuates high-fat and high-fructose diet induced cognitive impairments and neuroinflammation by mediating MAPK and NF κ B signaling pathways [J]. *Food & Function*, 2021, 12 (19): 9261–9272.
- [74] KONG X R, ZHAO L, HUANG H, et al. Isorhamnetin ameliorates hyperuricemia by regulating uric acid metabolism and alleviates renal inflammation through the PI3K/AKT/NF- κ B signaling pathway [J]. *Food & Function*, 2025, 16 (7): 2840–2856.
- [75] ZOU Y, JIANG J L, LI Y Q, et al. Quercetin regulates microglia M1/M2 polarization and alleviates retinal inflammation *via* ERK/STAT3 pathway [J]. *Inflammation*, 2024, 47 (5): 1616–1633.
- [76] MAHMOUD A M, HUSSEIN O E, ABD EL-TWAB S M, et al. Ferulic acid protects against methotrexate nephrotoxicity *via* activation of Nrf2/ARE/HO-1 signaling and PPAR γ , and suppression of NF- κ B/NLRP3 inflammasome axis [J]. *Food & Function*, 2019, 10 (8): 4593–4607.
- [77] REN Q C, LI X H, LI Q Y, et al. Total flavonoids from sea buckthorn ameliorates lipopolysaccharide/cigarette smoke-induced airway inflammation [J]. *Phytotherapy Research*, 2019, 33 (8): 2102–2117.
- [78] OLSSON M E, GUSTAVSSON K E, ANDERSSON S, et al. Inhibition of cancer cell proliferation *in vitro* by fruit and berry extracts and correlations with antioxidant levels [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52 (24): 7264–7271.
- [79] LI C H, LI J W, LI Y, et al. Isorhamnetin promotes MKN-45 gastric cancer cell apoptosis by inhibiting PI3K-mediated adaptive autophagy in a hypoxic environment [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69 (29): 8130–8143.
- [80] HUANG W W, TSAI S C, PENG S F, et al. Kaempferol induces autophagy through AMPK and AKT signaling molecules and causes G2/M arrest *via* downregulation of CDK1/cyclin B in SK-HEP-1 human hepatic cancer cells [J]. *International Journal of Oncology*, 2013, 42 (6): 2069–2077.
- [81] CHOI J B, KIM J H, LEE H, et al. Reactive oxygen species and p53 mediated activation of p38 and caspases is critically involved in kaempferol induced apoptosis in colorectal cancer cells [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66 (38): 9960–9967.
- [82] MICHAUD-LEVESQUE J, BOUSQUET-GAGNON N, BÉLIVEAU R. Quercetin abrogates IL-6/STAT3 signaling and inhibits glioblastoma cell line growth and migration [J]. *Experimental Cell Research*, 2012, 318 (8): 925–935.
- [83] PANG F X, DING S C, LI N, et al. Gallic acid mediates tumor-suppressive effects on osteosarcoma through the H19-Wnt/ β -catenin regulatory axis [J]. *Journal of Orthopaedic Translation*, 2023, 39: 34–42.
- [84] 崔米米. 沙棘果结合态多酚抗结肠癌效应的活性成分及分子机制 [D]. 太原: 山西大学, 2020.
- CUI M M. The anti-colon cancer active components and molecular mechanism of bound polyphenols from seabuckthorn berries [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [85] WANG Y, NIE F Y, OUYANG J, et al. Inhibitory effects of sea buckthorn procyanidins on fatty acid synthase and MDA-MB-231 cells [J]. *Tumour Biology*, 2014, 35 (10): 9563–9569.
- [86] CUI K L, WU H L, FAN J M, et al. The mixture of ferulic acid and P-coumaric acid suppresses colorectal cancer through lncRNA 495810/PKM2 mediated aerobic glycolysis [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23 (20): 12106.
- [87] WU H L, LI C L, CUI M M, et al. Polyphenols from *Hippophae rhamnoides* suppressed colon cancer growth by regulating miRNA-mediated cell cycle arrest and apoptosis *in vitro* and *in vivo* [J]. *Journal of Functional Foods*,

- 2021,87:104780.
- [88] 贾丛,杜亚蓉,孙坤.沙棘总黄酮抑制肺癌 A549 增殖和迁移作用及机理[J].天然产物研究与开发,2020,32(6):937-945,952.
- JIA C,DU Y R,SUN K. Study on effect and mechanism of total flavonoids of *Hippophae* in inhibiting proliferation and migration of lung cancer A549 cells[J]. Natural Product Research and Development,2020,32(6):937-945,952.
- [89] WANG L, WU H W, XIONG L, et al. Quercetin downregulates cyclooxygenase-2 expression and HIF-1 α /VEGF signaling-related angiogenesis in a mouse model of abdominal aortic aneurysm [J]. BioMed Research International,2020,2020(1):9485398.
- [90] HAN S, YI Y W, KIM H, et al. Structure-activity relationship analysis of mono-methylated quercetins by comprehensive MS/MS analysis and anti-proliferative efficacy in human colorectal cancer cells[J].
- [91] KOUPENOVA M, CLANCY L, CORKREY H A, et al. Circulating platelets as mediators of immunity, inflammation, and thrombosis[J]. Circulation Research,2018,122(2):337-351.
- [92] KOUPENOVA M, KEHREL B E, CORKREY H A, et al. Thrombosis and platelets: An update[J]. European Heart Journal,2017,38(11):785-791.
- [93] RONDINA M T, WEYRICH A S, ZIMMERMAN G A. Platelets as cellular effectors of inflammation in vascular diseases [J]. Circulation Research, 2013, 112 (11) : 1506-1519.
- [94] COCHAIN C, ZERNECKE A. Macrophages in vascular inflammation and atherosclerosis [J]. Pflügers Archiv-European Journal of Physiology,2017,469(3):485-499.
- [95] OLAS B, KONTEK B, MALINOWSKA P, et al. *Hippophae rhamnoides* L. fruits reduce the oxidative stress in human blood platelets and plasma [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity,2016,2016:4692486.
- [96] 焦艳,谢世静,李喆.沙棘黄酮对大鼠动脉粥样硬化斑块的影响及作用机制[J].中国老年学杂志,2022,42(6):1472-1475.
- JIAO Y, XIE S J, LI Z. Effect and mechanism of flavonoids from *Hippophae rhamnoides* on atherosclerotic plaque in rats[J]. Chinese Journal of Gerontology,2022,42(6):1472-1475.
- [97] ZHUO X Z, TIAN Y L, WEI Y D, et al. Flavone of *Hippophae* (H-flavone) lowers atherosclerotic risk factors via upregulation of the adipokine C1q/tumor necrosis factor-related protein 6 (CTRP6) in macrophages [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2019, 83 (11) : 2000-2007.
- [98] BAO M H, LOU Y J. Flavonoids from seabuckthorn protect endothelial cells (EA.hy926) from oxidized low-density lipoprotein induced injuries via regulation of LOX-1 and *ENOS* expression [J]. Journal of Cardiovascular Pharmacology,2006,48(1):834-841.
- [99] LUO Y, SUN G B, DONG X, et al. Isorhamnetin attenuates atherosclerosis by inhibiting macrophage apoptosis via PI3K/AKT activation and HO-1 induction [J]. PLoS One,2015,10(3):e0120259.
- [100] HONG K X, WANG J T, KANG X P, et al. Ferulic acid and protocatechuic acid alleviate atherosclerosis by promoting UCP1 expression to inhibit the NLRP3-IL-1 β signaling pathway [J]. Food & Function,2025,16(1):40-53.
- [101] WANG Y M, CHU T J, WAN R T, et al. Quercetin ameliorates atherosclerosis by inhibiting inflammation of vascular endothelial cells via Piezo1 channels [J]. Phytomedicine,2024,132:155865.
- [102] LI Q, HU X, XUAN Y, et al. Kaempferol protects ethanol-induced gastric ulcers in mice via pro-inflammatory cytokines and NO [J]. Acta Biochimica et Biophysica Sinica,2018,50(3):246-53.
- [103] 喻春红,卢霞洪,李玲玲,等.槲皮素介导 IRF8/IFN- γ 改善 Hp 感染诱导慢性萎缩性胃炎的机制研究[J].中华医院感染学杂志,2022,32(20):3073-3077.
- YU C H, LU X Y, LI L L, et al. Mechanisms of quercetin-mediated IRF8/IFN- γ in improving chronic atrophic gastritis induced by Hp infection [J]. Chinese Journal of Nosocomiology,2022,32(20):3073-3077.
- [104] 周志华,李耀伟,王志琪,等.槲皮素配伍芹菜素对顺铂诱导人胃上皮细胞损伤作用的研究[J].湖南中医药大学学报,2022,42(5):772-778.
- ZHOU Z H, LI Y W, WANG Z Q, et al. Effect of quercetin and apigenin on cisplatin-induced injury of human gastric epithelial cells [J]. Journal of Hunan University of Chinese Medicine,2022,42(5):772-778.
- [105] ANSARI M N, MISHRA R, AIER S, et al. Myricetin alleviates indomethacin-induced gastric ulcers in rats via antioxidant, anti-inflammatory and antiapoptotic mechanisms [J]. Inflammopharmacology,2025,33(12):7535-47.
- [106] 黄海波.没食子酸水凝胶构建及保护胃肠黏膜功能作用机理[D].大连:大连工业大学,2023.
- HUANG H B. Construction of gallic acid hydrogel and protective mechanism of gastrointestinal mucosa function [D]. Dalian:Dalian Polytechnic University,2023.
- [107] 贾子琴,朱瑞瑞,田连起,等.阿魏酸对幽门螺杆菌致胃炎小鼠胃黏膜 Wnt/ β -catenin 信号通路的影响[J].药物评价研究,2024,47(1):109-114.
- JIA Z Q, ZHU R R, TIAN L Q, et al. Effect of ferulic acid on Wnt/ β -catenin signal pathway in mice with gastritis induced by *Helicobacter pylori* [J]. Drug Evaluation Research,2024,47(1):109-114.
- [108] ASADI G S, ABDIZADEH R, ABDIZADEH T.

- Investigation of a set of flavonoid compounds as *Helicobacter pylori* urease inhibitors: Insights from in silico studies[J]. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 2025, 43(5):2366–2388.
- [109] PETTINI F, SPIGA O, FURINI S, et al. Electrophysiology, molecular modelling, and functional analysis of the effects of dietary quercetin and flavonoid analogues on $K_{ir}6.1$ channels in rat stomach fundus smooth muscle [J]. *Biochemical Pharmacology*, 2024, 220:115969.
- [110] MEHRZADI S, HOSSEINI P, MEHRABANI M, et al. Attenuation of bleomycin-induced pulmonary fibrosis in wistar rats by combination treatment of two natural phenolic compounds: quercetin and gallic acid [J]. *Nutrition and Cancer*, 2021, 73(10):2039–2049.
- [111] ZHANG X X, XIE Y Z, CAI Y, et al. RNA-seq analysis and *in vivo* experiments identified the protective effect of kaempferol on idiopathic pulmonary fibrosis by regulating the PPARG/TNC signaling pathway to reduce ECM deposition [J]. *Food & Function*, 2024, 15(24):12193–12209.
- [112] ALATAWI F S, OMRAN A M E, RASHAD E, et al. Rutin attenuates bleomycin-induced acute lung injury *via* miR-9-5p mediated NF- κ B signaling inhibition; Network pharmacology analysis and experimental evidence [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2025, 16:1522690.
- [113] ZHENG Q, TONG M, OU B Q, et al. Isorhamnetin protects against bleomycin-induced pulmonary fibrosis by inhibiting endoplasmic reticulum stress and epithelial-mesenchymal transition [J]. *International Journal of Molecular Medicine*, 2019, 43(1):117–126.
- [114] XIAO P T, LIU S Y, KUANG Y J, et al. Network pharmacology analysis and experimental validation to explore the mechanism of sea buckthorn flavonoids on hyperlipidemia [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, 264:113380.
- [115] ZATTERALE F, LONGO M, NADERI J, et al. Chronic adipose tissue inflammation linking obesity to insulin resistance and type 2 diabetes [J]. *Frontiers in Physiology*, 2020, 10:1607.
- [116] KWON E Y, LEE J, JIN Y, et al. Seabuckthorn leaves extract and flavonoid glycosides extract from seabuckthorn leaves ameliorates adiposity, hepatic steatosis, insulin resistance, and inflammation in diet-induced obesity [J]. *Nutrients*, 2017, 9(6):569.
- [117] YANG X, WANG Q, PANG Z R, et al. Flavonoid-enriched extract from *Hippophae rhamnoides* seed reduces high fat diet induced obesity, hypertriglyceridemia, and hepatic triglyceride accumulation in C57BL/6 mice [J]. *Pharmaceutical Biology*, 2017, 55(1):1207–1214.
- [118] BAOTHMAN O A, ZAMZAMI M A, TAHER I, et al. The role of gut microbiota in the development of obesity and diabetes [J]. *Lipids in Health and Disease*, 2016, 15:108.
- [119] LIU J H, HE Z Y, MA N, et al. Beneficial effects of dietary polyphenols on high-fat diet-induced obesity linking with modulation of gut microbiota [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(1):33–47.
- [120] LIU J Q, LIU Y H, HUANG C Q, et al. Quercetin-driven *Akkermansia Muciniphila* alleviates obesity by modulating bile acid metabolism *via* an ILA/m6A/CYP8B1 signaling [J]. *Advanced Science*, 2025, 12(12):2412865.
- [121] DOMÍNGUEZ-AVILA J A, VILLA-RODRIGUEZ J A, MONTEL-HERRERA M, et al. Phenolic compounds promote diversity of gut microbiota and maintain colonic health [J]. *Digestive Diseases and Sciences*, 2021, 66(10):3270–3289.
- [122] LUO C H, WEI X C, SONG J, et al. Interactions between gut microbiota and polyphenols: New insights into the treatment of fatigue [J]. *Molecules*, 2022, 27(21):7377.
- [123] PLAMADA D, VODNAR D C. Polyphenols-gut microbiota interrelationship: A transition to a new generation of prebiotics [J]. *Nutrients*, 2021, 14(1):137.
- [124] WANG K W, XU Z Z, LIAO X J. Bioactive compounds, health benefits and functional food products of sea buckthorn: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(24):6761–6782.
- [125] ATTRI S, SHARMA K, RAIGOND P, et al. Colonic fermentation of polyphenolics from Seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides*) berries: Assessment of effects on microbial diversity by principal component analysis [J]. *Food Research International*, 2018, 105:324–332.
- [126] XIA C X, GAO A X, ZHU Y, et al. Flavonoids from Seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) restore CUMS-induced depressive disorder and regulate the gut microbiota in mice [J]. *Food & Function*, 2023, 14(16):7426–7438.
- [127] SU L J, ZENG Y P, LI G K, et al. Quercetin improves high-fat diet-induced obesity by modulating gut microbiota and metabolites in C57BL/6J mice [J]. *Phytotherapy Research*, 2022, 36(12):4558–4572.
- [128] PORRINI M, RISO P. Factors influencing the bioavailability of antioxidants in foods: A critical appraisal [J]. *Nutrition, Metabolism, and Cardiovascular Diseases*, 2008, 18(10):647–650.
- [129] TANG F H, WEI B Y, QIN C, et al. Enhancing the inhibitory activities of polyphenols in passion fruit peel on α -Amylase and α -Glucosidase *via* β -Glucosidase-producing *Lactobacillus* fermentation [J]. *Food Bioscience*,

2024,62;105005.

- [130] SHEN Z Y, DAI J, YANG X Y, et al. Comparison of sea buckthorn fruit oil nanoemulsions stabilized by protein-polysaccharide conjugates prepared using β -glucan from various sources[J]. *Food Chemistry*, 2024, 457:140098.
- [131] PAN Y K, LI R, JING N N, et al. Isorhamnetin-lignin nanoparticles: Green preparation, characterization,

remarkable bioavailability and long-lasting bioactivity *in vivo*[J]. *Food Bioscience*, 2025, 69:106931.

- [132] POLIA F, PASTOR-BELDA M, MARTÍNEZ-BLÁZQUEZ A, et al. Technological and biotechnological processes to enhance the bioavailability of dietary (poly)phenols in humans[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(7):2092–2107.

Research progress on chemical composition and bioactivity of *Hippophae rhamnoides* L. phenolic compounds

SHEN Yingbin¹, DENG Weiliang¹, CHEN Xiaole¹, CHEN Kunzhui¹, LI Yong², ZHANG Yong², ZHANG Lei³

1. College of Life Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Scientific Research Department, Kashgar Mufeng Liquor Industry Co., Ltd., Kashgar 844100, China;

3. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

Abstract: *Hippophae rhamnoides* L. is a medicine-and-food homologous plant, and its functional activities mainly stem from its abundant phenolic compounds (HRPC). Based on the structural characteristics of HRPC, this review summarizes the chemical composition of 164 types of HRPCs and their distribution in different strains and plant parts, while highlighting the elucidation of their eight major bioactivity mechanisms. HRPCs are dominated by flavonoids, phenolic acids, and tannins. Among these, flavonoids constitute the main component with 117 identified types, which possess multiple bioactivities such as antioxidation, anti-inflammation, anti-tumorigenesis, anti-atherosclerosis, gastroprotection, anti-pulmonary fibrosis, anti-obesity, and gut microbiota modulation. Given the current status of HRPC species, content, distribution, bioactivity mechanisms, and bioavailability, future studies are recommended to focus on the in-depth exploration of bioactivity mechanisms, innovation of processing method, and optimization of encapsulation systems, thereby realizing the high-value utilization of HRPCs and the upgrading of the *Hippophae rhamnoides* L. industry.

Key words: *Hippophae rhamnoides* L.; phenolic compounds; chemical composition; bioactivity

[责任编辑:王晓波]