

茶多糖结构特征及其护肝效应研究进展

吴平¹, 孔平燕¹, 胡淳莉², 朱沛楠³, 赵进^{1*}, 祁尚雄⁴, 顾大江⁴

(1. 中国计量大学生命科学学院食品营养与质量安全研究所, 浙江杭州 310018)(2. 淳安县食品药品检验检测中心, 浙江杭州 311700) (3. 杭州千岛湖纯浙农业开发有限公司, 浙江杭州 311700) (4. 易晓食品(衢州)有限公司, 浙江衢州 324300)

摘要: 茶叶是山茶科常绿灌木或乔木植物的嫩叶或芽, 通过特定加工工艺加工制成的天然饮品, 现已被认为全球消费地域最广的植物源性饮品。茶多糖是茶叶的主要活性成分之一, 是由多种单糖经糖苷键聚合形成的高分子复合物, 具有抗氧化、抗炎、调节脂质代谢、调控肠道菌群等多种生物功能, 并且其生物活性特征与其结构表征之间存在着密切的构效关系, 已成为茶叶近年来开发和应用研究的热点之一。研究表明, 茶多糖可通过多种机制改善肝脏损伤, 包括抗氧化、抗炎作用、调控脂质代谢平衡以及调节肠道微生物群落等, 对酒精性肝病和非酒精性脂肪肝均表现良好的保护作用。该文综述了近年来国内外对各种茶多糖的提取纯化、结构特征及其护肝功效的研究进展, 同时还总结了茶多糖改善肝损伤的多种途径如减轻氧化应激、调控免疫-炎症轴稳态、调节机体脂质代谢紊乱、调节肠道微生物群等, 旨在为茶多糖的深入研究及其在食品工业的创新应用提供理论支撑和实践基础。

关键词: 茶多糖; 结构特征; 作用途径; 护肝功效

文章编号: 1673-9078(2026)7-352-362 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0621

Advances in the Structural Characterization of Tea Polysaccharides and Their Hepatoprotective Effects

WU Ping¹, KONG Pingyan¹, HU Chunli², ZHU Peinan³, ZHAO Jin^{1*}, QI Shangxiong⁴, GU Dajiang⁴

(1.Institute of Food Nutrition and Quality Safety, College of Life Sciences, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China) (2.Chun'an County Food and Drug Inspection and Testing Center, Hangzhou 311700, China) (3.Hangzhou Qiandao Lake Chunzhe Agricultural Development Co. Ltd., Hangzhou 311700, China) (4.Yixiao Food (Quzhou) Co. Ltd., Quzhou 324300, China)

Abstract: Tea is a natural beverage produced from fresh young leaves or buds of evergreen shrubs or trees in the Theaceae family through specific processing techniques, and it is now recognized as the most widely consumed plant-derived beverage worldwide. Tea polysaccharide (TPS) is one of the main active ingredients in tea, and is a polymer complex formed by the polymerization of multiple monosaccharides via glycosidic bonding. TPS has been found to exhibit multiple biological functions, including antioxidant and anti-inflammatory activities, regulation of lipid metabolism, and modulation of gut microbiota, with a close structure-activity relationship between its bioactivity and structural characteristics. Therefore, TPS is currently a key focus of

引文格式:

吴平,孔平燕,胡淳莉,等.茶多糖结构特征及其护肝效应研究进展[J].现代食品科技,2026,42(7):352-362.

WU Ping, KONG Pingyan, HU Chunli, et al. Advances in the structural characterization of tea polysaccharides and their hepatoprotective effects [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 352-362.

收稿日期: 2025-05-06 ; 修回日期: 2025-07-16 ; 接受日期: 2025-07-20
基金项目: 衢州市科技强农竞争性项目 (2023k098); 浙江省团队科技特派员项目 (开化茶产业提升, 2025TDT001); 浙江省个人科技特派员项目 (SKT20241106), 杭州市科技发展计划项目 (淳安特别生态 功能区科研项目, 2025-04)
作者简介: 吴平 (2002-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 药食同源植物活性成分与健康, E-mail: P24091055062@cjlu.edu.cn
通讯作者: 赵进 (1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与质量安全研究, E-mail: zhaojin@cjlu.edu.cn

tea development and applied research. Recent studies have shown that TPS can ameliorate liver injury through various mechanisms, including antioxidant activity, anti-inflammatory effects, regulation of lipid metabolism, and modulation of gut microbiota, with significant protective effects against both alcoholic and non-alcoholic fatty liver diseases. This paper reviews recent advances in domestic and international research on the extraction and purification of various TPS, their structural characteristics, and their hepatoprotective effects. Additionally, the paper summarizes the various pathways by which TPS improve liver injury, including alleviating oxidative stress, modulating the immune-inflammatory axis, and regulating lipid metabolism and gut microbiota. This study aimed to provide theoretical support and a practical foundation for the in-depth research on TPS and their innovative applications in the food industry.

Key words: tea polysaccharide; structural characteristics; pathway of action; hepatoprotective effect

茶树 [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] 为山茶科山茶属常绿木本植物，古称“茗”“檟”“荈”。茶叶由茶树的嫩叶及芽经过杀青、揉制、生物发酵和烘干等加工工艺制得。目前在全球超过 60 个国家和地区实现茶树规模化种植。茶树原产于中国西南部，主产地覆盖江南、华南、西南和江北四大茶区，广泛分布于云南、四川、福建、浙江等 20 多个省份。茶叶在中国、日本和印度在内的亚洲国家一直被用于饮食和药用，是目前在世界上消费最广的非酒精性饮料^[1,2]。根据发酵程度不同和工艺差异，中国茶叶可分成：绿茶、白茶、黄茶、乌龙茶、红茶和黑茶等六大基础类型^[3,4]。茶叶含有丰富的生物活性成分，主要包括茶多酚、茶多糖、茶氨酸和维生素等^[5,6]。

茶多糖 (Tea Polysaccharides, TPS) 是一类由茶叶中分离得到的天然高分子化合物，集中存在于茶叶的老叶和茎梗中。其通常由阿拉伯糖、半乳糖、木糖等单糖组成，并与蛋白质结合形成糖蛋白复合物。目前，相关研究主要聚焦于茶叶中低分子量活性成分，特别是儿茶素和多酚类物质的理化性质和生物活性^[7,8]。近年来，茶多糖因其药理作用参与多种新陈代谢过程并展现出多种生物学功能，近年来受到广泛关注^[9]。越来越多的研究报道，茶多糖具备良好的免疫调节、降脂降糖、抗氧化和抗衰老等药理作用^[10,11]。

肝损伤现已成为急需应对的全球性医疗保健挑战，其病理表现主要是从早期脂肪变性到晚期组织病变，包括肝脂质沉积、纤维化、肝硬化，甚至是肝细胞癌。预防与治疗肝脏损伤的重要性和有效性越来越受研究人员关注^[12]。因此，本文综述了近年来国内外茶多糖的结构表征及其改善肝损伤功效及其作用途径研究，以期茶多糖的深入研究和改善肝病应用提供理论参考，以推动茶叶开发与应用。

1 茶多糖提取、分离与纯化

1.1 粗多糖提取

茶多糖主要源于成熟叶片及茎部。目前，国内外研究表明茶多糖的提取方法众多，例如热水和热碱溶液提取多糖^[13]。水提法成本低、操作简便、不容易破坏多糖的生物活性，其作为一种经典的多糖提取方法有一定的局限性，存在提取效率低、时间长和温度高等条件限制^[14]。因此，研究人员开发了各种辅助提取方法：酶提取、超声萃取法和微波提取法^[15]。茶多糖提取方法和特点进行归纳如表 1 所示。复合法可显著提高茶多糖的提取率并降低成本，优化策略通常采用以超声提取为主、热水提取为辅的方式，以实现更高效的多糖获取^[16,17]。

表 1 茶多糖提取方法原理与特点
Table 1 Principles and characteristics of TPS extraction methods

提取方法	提取原理	优点	缺点	参考文献
水提法	热水溶解茶多糖（相似相溶）	成本低、操作简单、安全性高	高温、耗时、杂质多	[16,17]
酶法提取	酶解细胞壁	条件温和、选择性高、杂质少	成本高、工艺复杂、易失活	[16]
微波法提取	微波能瞬间加热，破坏细胞壁加速溶出	时间极短、得率高、溶剂用量少	局部过热导致多糖焦化、控温难度大	[16]
超声萃取法	超声波空化效应击破细胞结构	时间短、保留多糖活性	长时间超声使多糖链断裂、噪音污染	[16,17]
超临界萃取法	超临界 CO ₂ 溶解成分	无溶剂残留	对高极性茶多糖几乎无效、设备极度昂贵、得率极低	[16]

1.2 分离与纯化

初提的茶多糖中含有蛋白质、茶氨酸、咖啡因、儿茶素、多酚等低分子量化合物,需采用乙醇沉淀结合 Seville 法除蛋白、 H_2O_2 脱色处理,后续采用透析、色谱柱纯化等一系列技术进行分离纯化茶多糖^[17-20]。茶多糖的制备流程如图 1 所示。

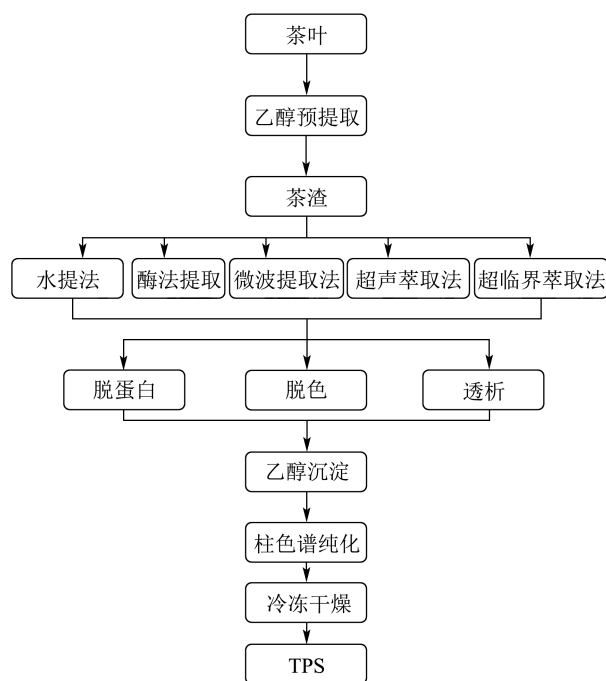


图 1 茶多糖的提取与纯化流程

Fig.1 Extraction and purification process of TPS

2 茶多糖结构特征与其护肝功效的构效关系

2.1 茶多糖的结构特征

茶多糖的结构复杂,通常对于其结构表征分析主要包括相对分子质量测定、单糖的组成分析、糖苷键及其构型分析等,通过查阅系列研究文献简要归纳如表 2 所示。

2.1.1 茶多糖的相对分子质量

从茶叶中分离纯化得到的多糖相对分子质量的大小范围为 $10^4 \sim 10^5$ 数量级。不同种类茶多糖的相对分子质量大小有差异。绿茶未经发酵,多糖结构相对完整,分子质量分布较广,其相对分子质量范围 $1.0 \times 10^4 \sim 20.0 \times 10^4$ ^[19]。Liu 等^[21]从天山绿茶样品中分离纯化得到多糖,利用配备有 Shodex OHpak SB-806 色谱柱的高效凝胶渗透色谱进行测定,发现其相对分子质量为 1.949×10^4 。Li 等^[22]采用水提法从英山云雾茶中分离纯化得到绿茶多糖,采用配备有系列 SHODEX KS-804 和 KS-802 色谱柱和折射率检测器的高效凝胶

渗透色谱测得其分子量为 9.69×10^4 。Yin 等^[23]利用高效凝胶渗透色谱测得从低档绿茶中分离纯化得到多糖的相对分子质量为 20.0×10^4 。Wang 等^[24]从五峰绿茶叶中分离纯化得到阿拉伯半乳糖利用高效凝胶渗透色谱测得其分子量为 7.1×10^4 。黑茶多糖分子质量范围为 $1.1 \times 10^4 \sim 135.6 \times 10^4$ 。Liu 等^[25]从黑砖茶中分离得到的黑茶多糖,测得其分子质量为 1.180×10^4 ; Liu 等^[28]从多种茯砖茶中分离纯化得到黑茶多糖,通过高效凝胶渗透色谱测得其分子质量为 $74.1 \times 10^4 \sim 82.8 \times 10^4$ 不等,这可能是由于发酵程度不同所致。黑茶比绿茶具有更明显的降脂作用,这可能因为黑茶经过发酵过程改造了多糖结构,产生了很多高分子量组分。乌龙茶多糖相对分子质量大小介于黑茶和绿茶之间。Wu 等^[29]从武夷岩茶中分离得到乌龙茶多糖,根据高效凝胶渗透色谱测得其分子质量为 3.9×10^4 。黄茶多糖分子质量介于乌龙茶和绿茶之间。徐珊等^[32]以霍山黄大茶为原材料分离纯化得到黄大茶多糖通过高效凝胶渗透色谱测得其分子质量为 12.5×10^4 。Wang 等^[38]从白茶中分离纯化得到杂多糖测得其分子质量为 11.4×10^4 。

2.1.2 茶多糖的单糖组成

茶多糖呈现高度异质性的单糖组成特征,其主要结构单元包括鼠李糖、核糖、岩藻糖、木糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖等中性单糖,和葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸两种酸性单糖,通过 α/β 型糖苷键在 C1-C6 不同位点形成多重连接方式,连接成高分子量的聚合物。Liu 等^[21]通过高效液相色谱系统分析天山绿茶多糖单糖组成表明其主要由甘露糖、核糖、鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖组成。Li 等^[22]通过配备 Hp-5 毛细管柱的气相色谱系统测定在英山云雾茶提取得到的绿茶多糖的单糖组成和摩尔比,结果表明其主要由鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖组成,摩尔比为 11.4:26.1:1.9:3.0:30.7:26.8。Liu 等^[25]使用高效液相色谱对黑砖茶单糖组成进行检测显示其单糖组成为葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖、鼠李糖和半乳糖,摩尔比为 35.5:30.4:25.4:5.1:3.6。Wu 等^[29]采用离子光谱仪、色谱柱和电化学检测器测定武夷岩茶多糖单糖组成,结果显示主要由阿拉伯糖、半乳糖、鼠李糖和葡萄糖组成,摩尔比为 0.124:0.143:0.086:0.02。Lin 等^[30]从两种不同风味的凤凰乌龙茶样品中分离得到乌龙茶多糖,通过离子色谱法测定其单糖组成发现这两种多糖均由大量的半乳糖醛酸和少量的岩藻糖、阿拉伯糖和半乳糖组成,摩尔比分别为 51.7:31.6:7.3:9.3 和 27.2:66.5:2.9:3.4。Huang 等^[33]从大黄叶茶叶中提取到茶多糖,用配有 Agilent

1260 二极管阵列检测器的高效液相色谱进行单糖组成分析测得其单糖组成为阿拉伯糖、鼠李糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖，摩尔比为 0.17:0.26:0.46:1.00:1.39。Xiang 等^[36]利用色谱柱分析得出红茶多糖由甘露糖、鼠李糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、葡萄糖、阿拉伯糖和岩藻糖组成。红茶多糖与黑茶多糖相较于未发酵多糖具有更明显的降糖降脂作用，很可能与其结构中增加了酸性单糖和分支结构的原因。

表 2 茶多糖结构特征信息

Table 2 Structural characteristics information of TPS

茶多糖来源		相对分子质量/kDa	单糖组成	主链结构	文献
绿茶	天山绿茶	19.49	Man-Rib-Rha-Clca-Cala-Clc-Cla-Ara-Fuc	—	[21]
	英山云雾茶	96.9	Rha-Ara-Xyl-Man-Clc-Cla	β -Glc	[22]
	低档绿茶	200	—	α -D-Glc	[23]
	五峰绿茶	71	Ara-Cla	1,3-Cal, 1,6-Cal	[24]
黑茶	黑砖茶	11.80	Clc-Cla-Ara-Rha-Cala	$\rightarrow$ 4)- α -D-Glcp-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 5)- α -L-Araf-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 6)- β -D-Galp-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 2)- α -L-Araf-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3)- β -D-Galp-(1 $\rightarrow$	[25]
	六堡茶	48.29	Gala-Gal-Ara-Rha-Glc-Man	$\rightarrow$ 5)- α -L-Ara-(1 $\rightarrow$ 5, 3)- α -L-Ara-(1 $\rightarrow$ 3)- β -D-Gal-(1 $\rightarrow$ 3, 6)- β -D-Galp-(1 $\rightarrow$	[26]
	青砖茶	1 355~204	Ara-Gala-Gal	—	[27]
	茯砖茶	741~828	Man-Rha-GalA-Glc-Gal-Ara	—	[28]
乌龙茶	武夷岩茶	39.28	Ara-Cla-Rha-Glc	$\rightarrow$ 4)-Galp-(1 $\rightarrow$	[29]
	凤凰乌龙茶	—	Cala-Fuc-Ara-Gla	β -Glc	[30]
	凤凰乌龙茶	—	Cala-Fuc-Ara-Gla	β -Glc	[30]
	乌龙茶	10~80	Rha-Rib-Fuc-Ara-Xyl-Man-Glc-Gla	—	[31]
黄茶	黄大茶	125	Ara-Rha-Gla-Glc-Man-Gala-Glca	—	[32]
	霍山黄茶	10.2	Ara-Rha-Man-Glc-Gla	β -Glc	[33]
	大黄茶	28.6	Rha-Ara-Gla-Glc-Gala	$\rightarrow$ 4)- α -D-GalpA-6-OMe-(1 $\rightarrow$, β -D-GalpA-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4)- β -D-Galp-($\rightarrow$ 1, $\rightarrow$ β -D-Galp-(1 $\rightarrow$	[34]
	红茶	—	Rha-Rib-Ara-Xyl-Man-Glc-Gla	—	[35]
红茶	红茶	—	Man-Rha-Glca-Gala-Glc-Gla-Ara-Fuc	—	[36]
	红茶	—	—	(1-3)- β -Galp, (1 $\rightarrow$ 4)- β -Xylp	[37]
白茶	寿眉白茶	114	Gla-Ara-Rha-Glc	3,6)- β -Galp-(1 $\rightarrow$,3)- α -Galp-(1 $\rightarrow$,5)- α -Araf-(1 $\rightarrow$ and3)- α -Glcp-UA-(1 $\rightarrow$	[38]

注: Man- 甘露糖; Rib- 核糖; Fuc- 岩藻糖; Rha- 鼠李糖; Glc- 葡萄糖; Gal- 半乳糖; Ara- 阿拉伯糖; Xyl- 木糖; Glca- 葡萄糖醛酸; Gala- 半乳糖醛酸

2.1.3 茶多糖糖链结构

现阶段，茶多糖的结构表征主要聚焦于对其糖苷键类型、连接位点及其单糖残基构型等一级结构解析，而对其高级结构特征如完整的重复单位结构的相关解析相对缺乏。Wang 等^[24]从五峰绿茶中分离纯化得到阿拉伯半乳聚糖通过甲基化分析、部分水解和核磁共振等方法对其进行了表征分析，发现绿茶多糖的主链由 1,3-Cla 和 1,6-Cla 组成，支链由 -L-Araf-(1→和 5)-α-L-Araf-(1 组成，支链分别连接在 1,6- 半乳糖基的 O-3 和 1,3- 半乳糖基的 O-4 和 O-6 上。Liu 等^[25]通过动态光散射、原子力显微镜、扫描电镜、傅里叶变换红外、甲基化分析、核磁共振等方法对黑砖茶多糖结构进行分析，结果表明其主链由 →4)-α-D-Glcp-(1→，→5)-α-L-Araf-(1→，→6)-β-D-Galp-(1→，→2)-α-L-Araf-(1→和 →3)-β-D-Galp-(1→残基组成，支链为 →4, 6) -β-D-Glcp- (1→残基组成，以 →1) -β-D-Galp- (1→为末端。Wei 等^[26]从六堡茶中分离纯化了一种果胶型酸性多糖，通过甲基化和核磁共振分析显示其主链由 →2,4)-α-L-Rhap-(1)→4)-α-D-GalAp-(1)→组成，支链由 →5)-α-L-Ara-(1→5, 3)-α-L-Ara-(1→3)-β-D-Gal-(1→3 和 6)-β-D-Galp-(1)→组成。黑茶多糖形成了三维网状结构，具有更明显的促进胆汁酸排泄作用。Wang 等^[34]从大黄茶中提取得到一种新型均相多糖，利用甲基化和核磁共振分析表明其主链由 →4)-α-D-GalpA-6-OMe-(1→，β-D-GalpA-(1→，→4)-β-D-Galp-(→1, 和 →β-D-Galp-(1→残基组成，支链由 α-L-Araf-(→1, →5)-α-L-Araf-(1→，→2,4)-β-L-Rhap-(1→，→2)-β-L-Rhap-(1→，和 →4)-β-D-Glcp-(1→残基组成。Scoparo 等^[37]从红茶中提取出可溶性和不可溶性多糖，利用核磁共振对其进行表征分析发现可溶性红茶多糖主链是 (1-3)-β-Galp，侧链为 α-Araf，末端为 α-Araf，α-Fucp 和 α-Rhap，不可溶红茶多糖主链为 (1-4)-β-Xylp。红茶多糖结构中包括 β-(1→3)-Galp，形成三重螺旋，可以增强多糖与肠道免疫受体结合，表现出更强的降糖作用。Xiang 等^[36]从寿眉白茶中分离得到白茶多糖利用甲基化分析和核磁共振分析研究发现白茶多糖主链为 →3,6)-β-Galp-(1→，→3)-α-Galp-(1→，→5)-α-Araf-(1→和 →3)-α-Glcp-UA-(1→残基组成，支链包括 α-Araf- (1→和 β-Rhap- (1→，分别连接在主链 →3, 6) -β-Galp- (1→的 C3 和 C6 位。

2.2 茶多糖护肝功效

肝脏是一个重要器官，肝损伤涉及氧化应激和脂质变性，进而发展为慢性肝炎、肝纤维化，最终可能引发肝硬化甚至肝癌^[39,40]。大量研究证明茶水提取物

有改善肝损伤功效^[40-42]，且对肝损伤造成常见的肝病有明显的改善作用^[43]。Cai 等^[44]研究表明普洱茶活性成分对高脂膳食模型小鼠代谢紊乱具有明显改善作用，其作用机制与调控肝组织 IL-6 介导的 STAT3 信号转导途径密切相关。Chen 等^[45]发现从藤茶中分离得到的水提物可以通过 AMPK-LXRα 信号调控减缓高脂饲料诱发的非酒精性脂肪性肝。

茶多糖与黄酮类化合物相比，更容易浸泡到茶汤中，具有显著的生物活性，例如：降糖降脂、免疫调节、抗辐射、抗凝血、抗氧化、抗癌等^[46-48]。Lu 等^[49]研究通过诱导小鼠氧急性肝损伤模型研究发现绿茶多糖对肝损伤有良好的保护作用。Wang 等^[50]通过茶多糖干预 CCl₄ 诱导的急性肝炎研究发现，紫阳绿茶多糖对急性氧化性肝损伤具有明显改善作用。Sun 等^[51]发现祁门红茶水溶性多糖对 CCl₄ 诱导的肝氧化性损伤有显著的缓解作用。Zhai 等^[52]研究探究茶多糖对体内高糖诱导的肝损伤的改善作用发现茶多糖有显著缓解血脂异常、肝脂肪变性、氧化应激和血管内皮功能障碍作用。此外，Yang 等^[53]通过建立了油酸诱导的 HepG2 细胞模型，发现茯苓砖茶多糖具有良好的抗氧化能力，可以显著降低甘油三酯和总胆固醇水平，减轻 HepG2 细胞内脂质积聚，激活 AMPK 降低与脂肪酸合成相关的 SREBP-1C 和 FAS 蛋白表达，从而发挥减轻肝细胞损伤作用。

表 3 茶多糖结构特征与其护肝功效的构效关系

Table 3 The structure-activity relationship between the structural characteristics of TPS and their hepatoprotective effects

茶类	结构特征	生物活性	护肝功效 关联机制	参考文献
绿茶	糖醛酸含量低， 分支度中等	抗氧化、降糖	减轻氧化应激	[21-24]
黑茶	分子量大、含 糖醛酸含量高	抗氧化、降脂、 免疫调节	调节肠道菌群、 抑制炎症	[25-28]
乌龙茶	糖醛酸含量高	抗氧化、降糖	调节脂代谢、 菌群调节	[29-31]
黄茶	分支密集	降脂	调控胆汁酸代谢	[32-34]
红茶	主链特殊	抗氧化、降糖	减轻氧化应激、 菌群调节	[35-37]
白茶	含葡萄糖醛酸、 支链简单	抗肿瘤	调节脂质代谢	[37]

2.3 茶多糖结构特征与其护肝功效的构效关系

茶多糖的结构特征与其护肝功效密切关联，如表 3 所示。分子量高的茶多糖护肝作用通常与肠道菌群调节以及胆汁酸代谢调控相关。同时，富含糖醛酸的茶多糖具有更明显的抗氧化活性、免疫调节及降糖降脂作用。此外，β-(1→3) 键等糖苷键可能会形成特

定的空间构象, 利于与免疫受体结合, 通过免疫调节作用达到护肝功效, 且分支度高的茶多糖可能更容易与靶点相互作用发挥护肝作用。

3 茶多糖护肝作用的分子机制

目前, 相关研究表明茶多糖护肝分子机制主要包括减轻氧化应激、调控免疫-炎症轴稳态、调节机体脂质代谢紊乱、调节肠道微生物群等方面, 如图 2 所示。

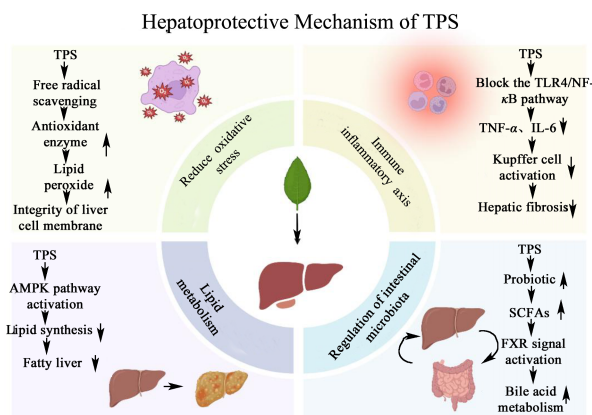


图 2 茶多糖护肝机制

Fig.2 Hepatoprotective mechanism of tea polysaccharides

3.1 减轻氧化应激

目前有越来越多研究发现茶多糖可以通过清除自由基来阻断活性氧诱导的氧化损伤, 具备明显的体内外抗氧化活性^[54], 具体路线如图 2 所示。Liu 等^[21]建立了 LO2 和 HepG2 细胞的抗氧化模型, 发现茶多糖明显保护细胞免受过氧化氢诱导的凋亡, 并显著降低细胞内活性氧水平。Li 等^[22]研究发现英山云雾茶多糖剂量依赖性消除 DPPH 自由基、超氧阴离子、羟基自由基, 同时还增强铁还原能力。Guo 等^[55]从碧螺春果胶多糖中分离得到的酸性多糖并进行体外清除自由基能力测定, 结果发现酸性茶多糖具有较强的抗氧化能力。Li 等^[27]从青砖茶中分离纯化得到的分子量大小不同的茶多糖, 发现大分子量的茶多糖的抗氧化活性高, 这归因于其有的酚类和茶褐素含量, 茶褐素在固态发酵过程中可与多糖、蛋白质和咖啡因形成偶联物使得其由于酚类化合物的存在而具有抗氧化活性^[56]。Guo 等^[48]研究 12 种茶多糖抗氧化活性, 发现均具有显著的清除自由基能力, 并且黑茶多糖和红茶多糖的抗氧化活性最高, 而黄茶多糖的抗氧化活性最低。Wei 等^[26]研究发现从六堡茶中分离得到的茶多糖在体外具备全面的抗氧化功能。Lu 等^[49]研究表明茶多糖显著抑制肝组织脂质过氧化产生的丙二醛, 上调肝谷胱甘肽和超氧化物歧化酶的抗氧化能力, 从而缓解肝功能损

伤。总之, 目前研究表明茶多糖能够显著提高血清中超氧化物歧化酶活性, 降低丙二醛含量, 从而减轻肝细胞的氧化损伤。

3.2 免疫-炎症轴稳态调控

炎症反应是引起肝病的关键原因之一。炎症主要通过细胞中 NF- κ B 信号通路的活化, 促使 Kupffer 细胞形成并释放炎症因子如 TNF- α 、IL-1 β 、IL-6, 增加机体炎症水平, 最后造成肝细胞功能损害^[57]。肝细胞的损伤和死亡会释放大量炎症介质, 进一步激活炎症细胞, 导致更多的炎症因子释放, 形成恶性循环^[58]。这种反复的炎症反应会导致肝纤维化, 直至发展成为肝硬化。研究表明, 茶多糖能够显著降低血清中促炎症细胞因子的水平, 平衡免疫细胞功能, 同时上调抗炎细胞因子的表达, 从而达到抗炎作用^[59], 如图 2 所示。Zeng 等^[60]研究通过建立体内实验发现茯苓砖茶多糖抗炎作用过程中发现茶多糖通过减少小鼠血清中炎症细胞因子的表达, 并且可以使小鼠结肠组织中炎症相关 mRNA 的表达降低, 从而表现出较强的抗炎作用。Liu 等^[61]发现崂山绿茶果胶多糖以剂量依赖性方式抑制 NO、TNF- α 和 IL-6 的产生, 从而发挥减轻脂多糖诱导的 RAW 264.7 炎症细胞模型的炎症反应的作用。Zhang 等^[62]发现茶多糖可以显著降低炎症细胞因子过表达和脂多糖诱导的细胞损伤, 并且可以通过触发下游 AKT/MAPK/NF- κ B 信号蛋白的去磷酸化, 抑制 p-NF- κ B 的核转移, 从而通过活性氧清除调节脂多糖诱导细胞中炎症因子的形成和释放达到抗炎效果。Chen 等^[63]研究发现茶多糖可以增加巨噬细胞的吞噬作用, 促进 NO 和炎症细胞因子的分泌, 包括 TNF- α 、IL-1 β 和 IL-6, 表现出明显的免疫增强活性。Li 等^[64]研究发现膳食茶多糖给药可以显著降低 TLR4/NF- κ B 炎症信号通路的表达, 减轻长期热应激诱导的肝脏炎症。Huang 等^[65]茉莉花茶多糖通过激活 TLR6/NF- κ B 信号通路显著增强巨噬细胞的吞噬活性, 并促进 NO、TNF- α 及 IL-4 的分泌, 进而发挥免疫刺激和抗炎作用。

3.3 脂质代谢通路调控

代谢紊乱和脂质累积是造成肝损伤的重要因素, 肝脏脂肪堆积与脂肪酸代谢紊乱密切相关^[66]。脂肪酸进入肝脏后会以三酰甘油的形式在肝细胞内积累, 当肝细胞不能将游离的脂肪酸转化为甘油三酯或超过细胞氧化能力时, 会导致代谢紊乱^[67]。Kuang 等^[68]通过建立动物模型实验研究发现茶多糖可以通过抑制脂肪生成和通过 AMPK-SIRT1-FoxO1 信号通路促进脂肪

分解,从而减少肝脏脂质累积。Huang 等^[33]建立高脂饲料诱导的非酒精性脂肪肝动物模型探究茶多糖对肝脏脂质累积影响,结果发现茶多糖能够显著调节胆汁酸代谢,改善肝脏代谢紊乱,通过激活肠肝循环中的 FXR-FGF15 信号通路,促使胆汁酸的形成与排泄,缓解肝脏脂质堆积。Chen 等^[69]研究发现铁观音乌龙茶多糖可以通过 AMP 活化蛋白激酶介导的信号通路的保肝作用。此外, Wu 等^[70]通过体内实验研究发现调节脂肪代谢途径中的关键基因,这种调节影响与 AMPK 信号通路相关的蛋白表达,从而表现显著调控机体脂类代谢作用。

3.4 肠道微生物群调节

研究表明肠道菌群产生物短链脂肪酸 (SCFAs) 对肝脏代谢功能有重要调节作用:茶多糖在肠道中经过肠道菌群发酵产生短链脂肪酸(如乙酸、丙酸和丁酸),短链脂肪酸通过门静脉或者循环系统进入肝脏,通过激活肝脏信号分子和抑制糖异生酶改善肝脏脂质代谢,同时可能通过加固肠道屏障来减轻肝脏炎症水平^[71,72]。茶多糖可以通过调节肠道微生物多样性和丰度,有效缓解肝组织炎症和损伤^[33]。Chen 等^[73]研究发现茯砖茶多糖干预可增加微生物群系统发育多样性,并降低丹毒丝菌科、肠杆菌科和链球菌科的相对丰度从而减轻高脂饮食诱导小鼠代谢综合征。Wu 等^[29]研究发现武夷岩茶多糖干预可以使小鼠肠道种乳酸杆菌和双歧杆菌等有益菌的相对丰度提高进而缓解脂质代谢紊乱。Deng 等^[74]研究发现茶多糖干预可以富集阿克曼菌、拟杆菌属等有益菌,减少链球菌属等有害菌,从而达到减缓肝组织炎症反应。Sun 等^[75]茶多糖补充可显著缓解环磷酰胺诱导的肠道菌群紊乱,通过增加有益菌群(如乳酸菌)及产短链脂肪酸菌群(如毛螺菌科、瘤胃球菌科)的相对丰度,同时抑制脱硫弧菌科、幽门螺杆菌科等潜在致病菌的生长,从而改善肠道微生态平衡。Liu 等^[76]研究发现茶多糖可以调节肠道菌群,包括降低厚壁菌门/拟杆菌门的比例,促进拟杆菌门的生长,改善氨基酸代谢途径,从而调节肝脏脂质代谢。Tang 等^[77]研究证实茯砖茶多糖通过重塑肠道菌群结构并维持肝脏代谢物稳态,在缓解高脂饮食诱导的非酒精性脂肪肝方面表现出良好效果。此外,有研究表明胆汁酸与肠道菌群之间的互动在肝病相关代谢紊乱的发生与发展中具有核心调控作用^[78]。Huang 等^[33]采用粪便菌群移植试验研究黄茶多糖对肠道菌群和胆汁酸代谢的调节作用,结果表明黄茶多糖调节胆盐水解酶相关的微生物属以

激活替代的胆汁酸合成途径,从而发挥改善非酒精性脂肪肝效果。

3.5 其他

目前,研究表明肝脏中胰岛素受体底物 (IRS) 磷酸化异常可激活 Akt/mTORC1 信号通路,促进脂质从头合成,同时增强外周脂肪组织的分解作用,导致大量游离脂肪酸进入肝脏,进而诱发脂肪肝的形成^[79]。Kuang 等^[80]研究发现茶多糖显著下调甘油三酯合成标志物和 ApoB 脂化标志物的表达,同时上调 ApoB 降解标志物和低密度脂蛋白清除相关蛋白的表达,从而抑制胰岛素抵抗状态下 ApoE^{-/-}小鼠和 HepG2 细胞中低密度脂蛋白的过度生成。此外,胰岛素底物介导的 PI3K-AKT-mTORC1/FoxO1 胰岛素信号转导级联通路是调节低密度脂蛋白生成的核心通路,如图 3 所示。因此,揭示茶多糖通过上述信号通路发挥调控作用,从而抑制肝脏低密度脂蛋白的异常生成。

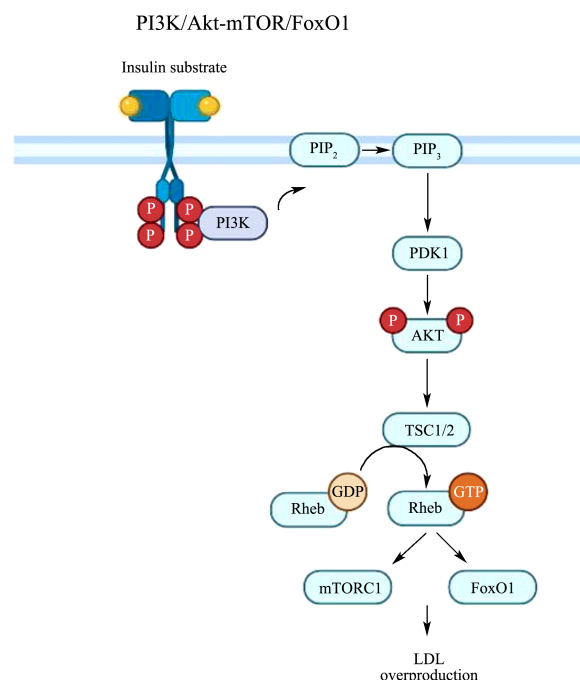


图 3 胰岛素底物介导 PI3K-AKT-mTORC1/FoxO1 调节低密度脂蛋白生成核心通路

Fig.3 Insulin substrate mediates the PI3K-AKT-mTORC1/FoxO1 regulation of the core pathway for low-density lipoprotein production

综上所述,茶多糖通过多种途径改善肝损伤,如减轻氧化应激、调控免疫-炎症轴稳态、调节机体脂质代谢紊乱、调节肠道微生物群等,然而不同茶类或不同来源茶多糖生物活性存在显著差异,本文对不同茶类多糖护肝活性研究进行归纳总结如表 4 所示。

表 4 不同茶类多糖护肝活性比较

Table 4 Comparison of hepatoprotective activities of polysaccharides from different tea types

茶类	代表多糖	作用机制	核心机制	局限性	参考文献
绿茶	天山绿茶	Nrf2/ARE 通路激活	减轻氧化应激	肠道调控作用弱	[21]
黑茶	茯砖茶	TLR4/NF-κB 抑制、SCFAs 增多	免疫 - 炎症轴稳态调控、菌群调节	分子量大, 吸收率低	[59]
乌龙茶	武夷岩茶	AMPK/ACC 磷酸化	胰岛素抵抗、菌群调节	单糖组成差异大	[29]
红茶	祁门红茶	自由基直接清除	减轻氧化应激	糖醛酸易被消化酶水解	[51]
黄茶	霍山黄茶	FXR-FGF15 通路激活	脂质代谢通路调控	抗氧化活性最低	[33]
白茶	寿眉白茶	PPARα 介导的 β-氧化	脂质代谢通路调控	—	[38]

4 展望

茶多糖是一类复杂的复合型多糖，其组成单元主要包括 8 种中性单糖、2 种糖醛酸，以及少量的蛋白质和氨基酸等。其相对分子质量范围较广，从不同种类的茶叶中提取得到的多糖分子质量存在显著差异，这可能和茶叶发酵过程中茶多糖含量变化有关。茶多糖糖苷键以 β-(1→3)、β-(1→4)、α-(1→6) 为主，且在 C3 和 C6 位广泛存在分支结构。目前尽管已有较多关于其一级结构的研究，但针对茶多糖多维高级结构的阐述仍显不足，未来可通过引入功能分子设计与活性验证等新方法，进一步揭示其结构与功能之间的关系。茶多糖是茶叶的主要活性成分，其在改善肝损伤方面具有显著的潜力，本文归纳总结了目前关于茶多糖护肝机制主要包括减轻氧化应激、免疫 - 炎症轴稳态调控、代谢通路调控和肠道菌群调节四个方面。然而，虽然有大量研究表明肠道菌群对茶多糖的护肝功能有调节作用，但大多数研究忽略了肠道菌群代谢物的变化，目前主要研究焦点定位于肠道微生物系统的生物多样性及种群分布，将来需进一步探索茶多糖对肠道特征菌群及其代谢产物的调控，以更全面明确其改善肝损伤的分子机制。今后关于茶多糖研究应更加聚焦于茶多糖结构与护肝功效之间的联系解析，例如：使用化学或物理方法对茶多糖进行靶向结构修饰，旨在探究基团引入或高级结构改变其水溶性、稳定性、肠道吸收特性及关键护肝有关生物活性。同时，深入探究茶多糖在胃肠道的消化特性、肠道菌群多样性及其关键代谢物调节作用等，并阐明这些关键效应物如何通过肠 - 肝轴介导信号通路达到护肝效应。

参考文献

[1] LUO Q, LUO L, ZHAO J, et al. Biological potential and mechanisms of tea's bioactive compounds: an updated review [J]. Journal of Advanced Research, 2024, 65: 345-363.

[2] MOREIRA J, ARYAL J, GUIDRY L, et al. Tea quality: an overview of the analytical methods and sensory analyses used in the most

recent studies [J]. Foods, 2024, 13(22): 3580.

[3] JAKUBCZYK K, KUPNICKA P, MELKIS K, et al. Effects of fermentation time and type of tea on the content of micronutrients in kombucha fermented tea [J]. Nutrients, 2022, 14(22): 4828.

[4] 龚兴鑫,严毅鹏,吕敏,等.非靶向代谢组学揭示南昆山毛茶叶绿茶和红茶的独特化学成分组成[J].食品科学,2024,45(19):112-122.

[5] 王宇晴,徐晓涵,朱明慧,等.茶叶渣抗氧化肽的分离纯化 鉴定及其活性测定[J].食品科学,2025,46(5):142-150.

[6] TANG G Y, MENG X, GAN R Y, et al. Health functions and related molecular mechanisms of tea components: an update review [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(24): 6196.

[7] CHEN X, DU Y, WU L, et al. Effects of tea-polysaccharide conjugates and metal ions on precipitate formation by epigallocatechin gallate and caffeine, the key components of green tea infusion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(13): 3744-3751.

[8] HU X, WANG Y, ZHANG L, et al. Construction of self-assembled polyelectrolyte complex hydrogel based on oppositely charged polysaccharides for sustained delivery of green tea polyphenols [J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125632.

[9] 柏雪,陈燕燕,马婉婷,等.天然植物多糖的动物免疫调节功能研究进展[J].西南民族大学学报(自然科学版),2024,50(4):367-375.

[10] HUANG S, CHEN H, TENG J, et al. Antihyperlipidemic effect and increased antioxidant enzyme levels of aqueous extracts from Liupao tea and green tea *in vivo* [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(9): 4203-4220.

[11] 凌娜,田海燕,高铭泽,等.沙棘多糖的制备、结构表征与药理活性研究进展[J].中国药杂志,2024,59(9):757-767.

[12] LAZARUS J V, MARK H E, ANSTEE Q M, et al. Advancing the global public health agenda for NAFLD: a consensus statement [J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2022, 19(1): 60-78.

[13] HUANG R, YU H. Extraction methods, chemical compositions, molecular structure, health functions, and potential applications of tea polysaccharides as a promising biomaterial: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277(3): 134150.

[14] WEI Y, PANG Y, MA P, et al. Green preparation, safety control and intelligent processing of high-quality tea extract [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(31): 11468-11492.

[15] CHEN X, YANG J, SHEN M, et al. Structure, function and advance application of microwave-treated polysaccharide: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 198-209.

- [16] FAN Y, ZHOU X, HUANG G. Preparation, structure, and properties of tea polysaccharide [J]. Chemical Biology & Drug Design, 2022, 99(1): 75-82.
- [17] HUANG G, CHEN F, YANG W, et al. Preparation, deproteinization and comparison of bioactive polysaccharides [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 564-568.
- [18] XIA B, LIU Q, SUN D, et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of polysaccharides from Anji white tea: characterization and comparison with the conventional method [J]. Foods, 2023, 12(3): 588.
- [19] 周敏, 韩青, 李彩凤. 菊苣根多糖酶法辅助双水相提取工艺优化及其降脂活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2025, 37(2): 283-292.
- [20] CHEN G, YUAN Q, SAEEDUDDIN M, et al. Recent advances in tea polysaccharides: extraction, purification, physicochemical characterization and bioactivities [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 153: 663-678.
- [21] LIU J, LIN J, HUANG Z, et al. Chemical characterization of Tianshan green tea polysaccharides and its protective effects on cell oxidative injury [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(1): e14000.
- [22] LI X, CHEN S, LI J E, et al. Chemical composition and antioxidant activities of polysaccharides from Yingshan cloud mist tea [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2019, 2019(1): 1915967.
- [23] YIN L, FU S, WU R, et al. A neutral polysaccharide from green tea: structure, effect on α -amylase activity and hydrolysis property [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2020, 687: 108369.
- [24] WANG H, SHI S, BAO B, et al. Structure characterization of an arabinogalactan from green tea and its anti-diabetic effect [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 124: 98-108.
- [25] LIU M, GONG Z, LIU H, et al. Structural characterization and anti-tumor activity *in vitro* of a water-soluble polysaccharide from dark brick tea [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 205: 615-625.
- [26] WEI L, HUANG L, DU L, et al. Structural characterization and *in vitro* antioxidant, hypoglycemic and hypolipemic activities of a natural polysaccharide from Liupao tea [J]. Foods, 2023, 12(11): 2226.
- [27] LI Q, ZHAO T, SHI J, et al. Physicochemical characterization, emulsifying and antioxidant properties of the polysaccharide conjugates from Chin brick tea (*Camellia sinensis*) [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133625.
- [28] LIU R, WU B, ZHANG T, et al. Fu brick tea polysaccharides: a state-of-the-art mini-review on extraction, purification, characteristics, bioactivities and applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 136135.
- [29] WU Z, ZENG W, ZHANG X, et al. Characterization of acidic tea polysaccharides from yellow leaves of wuyi rock tea and their hypoglycemic activity via intestinal flora regulation in rats [J]. Foods, 2022, 11(4): 617.
- [30] LIN J, LIN Q, ZHU L, et al. Structural properties of Phoenix oolong tea polysaccharide conjugates and the interfacial stability in nanoemulsions[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(10): 5145-5155.
- [31] WANG J, LIU W, CHEN Z, et al. Physicochemical characterization of the oolong tea polysaccharides with high molecular weight and their synergistic effects in combination with polyphenols on hepatocellular carcinoma [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2017, 90: 160-170.
- [32] 徐珊, 谢海, 李敏妮, 等. 黄大茶多糖的结构表征及其对3T3-L1脂肪细胞分化的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 67-75.
- [33] HUANG Y, CHEN H, CHEN J, et al. Yellow tea polysaccharides protect against non-alcoholic fatty liver disease via regulation of gut microbiota and bile acid metabolism in mice [J]. Phytomedicine, 2024, 133: 155919.
- [34] WANG H, WANG L, CHENG H, et al. Large yellow tea polysaccharides ameliorate obesity-associated metabolic syndrome by promoting M2 polarization of adipose tissue macrophages [J]. Food & Function, 2023, 14(20): 9337-9349.
- [35] XU L, CHEN Y, CHEN Z, et al. Ultrafiltration isolation, physicochemical characterization, and antidiabetic activities analysis of polysaccharides from green tea, oolong tea, and black tea [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(11): 4025-4032.
- [36] XIANG G, SUN H, CHEN Y, et al. Antioxidant and hypoglycemic activity of tea polysaccharides with different degrees of fermentation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 228: 224-233.
- [37] SCOPARO C T, SOUZA L M, DARTORA N, et al. Chemical characterization of heteropolysaccharides from green and black teas (*Camellia sinensis*) and their anti-ulcer effect [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 86: 772-781.
- [38] WANG P, ZHAO B, YIN Z, et al. Structure elucidation and anticancer activity of a heteropolysaccharide from white tea [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 333: 121976.
- [39] ZHAO W, LIU J, WANG S, et al. Varespladib mitigates acute liver injury via suppression of excessive mitophagy on *Naja atra* envenomed mice by inhibiting PLA2 [J]. Toxicon, 2024, 242: 107694.
- [40] 郁静雯, 杜雨桥, 季旭明, 等. 中医药治疗2型糖尿病并发肝损伤相关机制研究进展[J]. 中草药, 2025, 56(6): 2214-2223.
- [41] WANG Y, JIAN S, LI W, et al. Epigallocatechin-3-gallate ameliorates liver injury secondary to *pseudomonas aeruginosa* pneumonia [J]. International Immunopharmacology, 2022, 112: 109239.
- [42] INOUE H, ARAKAWA K, TANAKA M, et al. Upregulation and stabilization of senescence marker protein-30 by epigallocatechin gallate against tert-butyl hydroperoxide-induced liver injury *in vitro* and *in vivo* [J]. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 2021, 68(1): 51-57.
- [43] YANG M, YAN R, SHA R, et al. Epigallocatechin gallate alleviates non-alcoholic fatty liver disease through the inhibition of the expression and activity of dipeptide kinase 4 [J]. Clinical Nutrition, 2024, 43(8): 1769-1780.
- [44] CAI X, FANG C, HAYASHI S, et al. Pu-erh tea extract ameliorates high-fat diet-induced nonalcoholic steatohepatitis and insulin resistance by modulating hepatic IL-6/STAT3 signaling in mice [J]. Journal of Gastroenterology, 2016, 51: 819-829.
- [45] CHEN Y, SONG H, ZHANG Z, et al. Extracts of vine tea improve

- diet-induced non-alcoholic steatohepatitis through AMPK-LXR α signaling [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2021, 12: 711763.
- [46] LI D, CHENG Y, ZENG X, et al. Polysaccharide from ziyang selenium-enriched green tea prevents obesity and promotes adipose thermogenesis via modulating the gut microbiota [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(36): 13363-13375.
- [47] FENG X, CHEN M, SONG H, et al. A systemic review on Liubao tea: a time-honored dark tea with distinctive raw materials, process techniques, chemical profiles, and biological activities [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(6): 5063-5085.
- [48] GUO H, FU M X, WU D T, et al. Structural characteristics of crude polysaccharides from 12 selected Chinese teas, and their antioxidant and anti-diabetic activities [J]. *Antioxidants*, 2021, 10(10): 1562.
- [49] LU X, ZHAO Y, SUN Y, et al. Characterisation of polysaccharides from green tea of Huangshan Maofeng with antioxidant and hepatoprotective effects [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(4): 3415-3423.
- [50] WANG D, ZHAO Y, SUN Y, et al. Protective effects of Ziyang tea polysaccharides on CCl₄-induced oxidative liver damage in mice [J]. *Food Chemistry*, 2014, 143: 371-378.
- [51] SUN Y, YANG X, LU X, et al. Protective effects of Keemun black tea polysaccharides on acute carbon tetrachloride-caused oxidative hepatotoxicity in mice [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2013, 58: 184-192.
- [52] ZHAI X, REN D, LUO Y, et al. Chemical characteristics of an Ilex Kuding tea polysaccharide and its protective effects against high fructose-induced liver injury and vascular endothelial dysfunction in mice [J]. *Food & Function*, 2017, 8(7): 2536-2547.
- [53] YANG W, CHENG S, LIU M, et al. Lipid-lowering effects of a novel polysaccharide obtained from Fuzhuan brick tea *in vitro* [J]. *Foods*, 2023, 12(18): 3428.
- [54] HU T, WU P, ZHAN J, et al. Influencing factors on the physicochemical characteristics of tea polysaccharides [J]. *Molecules*, 2021, 26(11): 3457.
- [55] GUO R, LIU X, LI X, et al. Pectic polysaccharides from Biluochun tea: a comparative study in macromolecular characteristics, fine structures and radical scavenging activities *in vitro* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 195: 598-608.
- [56] ZHU M, LI N A, ZHOU F, et al. Microbial bioconversion of the chemical components in dark tea [J]. *Food Chemistry*, 2020, 312: 126043.
- [57] SCHUSTER S, CABRERA D, ARRESE M, et al. Triggering and resolution of inflammation in NASH [J]. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 2018, 15(6): 349-364.
- [58] TSUCHIDA T, LEE Y A, FUJIWARA N, et al. A simple diet-and chemical-induced murine NASH model with rapid progression of steatohepatitis, fibrosis and liver cancer [J]. *Journal of Hepatology*, 2018, 69(2): 385-395.
- [59] CHEN G, WANG M, ZENG Z, et al. Fuzhuan brick tea polysaccharides serve as a promising candidate for remodeling the gut microbiota from colitis subjects *in vitro*: fermentation characteristic and anti-inflammatory activity [J]. *Food Chemistry*, 2022, 391: 133203.
- [60] ZENG Z, XIE Z, CHEN G, et al. Anti-inflammatory and gut microbiota modulatory effects of polysaccharides from Fuzhuan brick tea on colitis in mice induced by dextran sulfate sodium [J]. *Food & Function*, 2022, 13(2): 649-663.
- [61] LIU F, WANG R, CHEN Y, et al. Structural characterization of a pectic polysaccharide from laoshan green tea and its inhibitory effects on the production of NO, TNF- α and IL-6 [J]. *Natural Product Research*, 2023, 37(11): 1797-1805.
- [62] ZHANG M, QIN H, XIANG L, et al. Camellia sinensis polysaccharide attenuates inflammatory responses via the ROS-mediated pathway by endocytosis [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 267: 131674.
- [63] CHEN G, BAI Y, ZENG Z, et al. Structural characterization and immunostimulatory activity of heteropolysaccharides from Fuzhuan brick tea [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(4): 1368-1378.
- [64] LI F, XU J, XIE M, et al. Regulatory effects of tea polysaccharides on hepatic inflammation, gut microbiota dysbiosis, and serum metabolomic signatures in beef cattle under heat stress [J]. *Frontiers in Physiology*, 2024, 15: 1460414.
- [65] HUANG H, YANG X, LI W, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of an arabinogalactan from *Jasminum sambac* (L.) aiton tea processing waste [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 235: 123816.
- [66] GUO X, YIN X, LIU Z, et al. Non-alcoholic fatty liver disease (NAFLD) pathogenesis and natural products for prevention and treatment [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(24): 15489.
- [67] FRIEDMAN S L, NEUSCHWANDER-TETRI B A, RINELLA M, et al. Mechanisms of NAFLD development and therapeutic strategies [J]. *Nature Medicine*, 2018, 24(7): 908-922.
- [68] KUANG D D, LI X Y, QIAN X P, et al. Tea polysaccharide ameliorates high-fat diet-induced renal tubular ectopic lipid deposition via regulating the dynamic balance of lipogenesis and lipolysis [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(22): 12582-12595.
- [69] CHEN Y, HUANG Y, GAN Q, et al. Characterization of tea polysaccharides from Tieguanyin oolong tea and their hepatoprotective effects via AMP - activated protein kinase-mediated signaling pathways [J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(12): 10064-10078.
- [70] WU T, GUO Y, LIU R, et al. Black tea polyphenols and polysaccharides improve body composition, increase fecal fatty acid, and regulate fat metabolism in high-fat diet-induced obese rats [J]. *Food & Function*, 2016, 7(5): 2469-2478.
- [71] JIN C, ZHOU T, DUAN Z, et al. Effect of chin brick tea [*Camellia sinensis* (L.) Kuntze] on lipid metabolism and inflammation by modulating intestinal flora and bile acids in mice with non-alcoholic fatty liver disease [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2024, 318: 116950.
- [72] TANG G, XU Y, ZHANG C, et al. Green tea and epigallocatechin gallate (EGCG) for the management of nonalcoholic fatty liver

- diseases (NAFLD): Insights into the role of oxidative stress and antioxidant mechanism [J]. *Antioxidants*, 2021, 10(7): 1076.
- [73] CHEN G, XIE M, WAN P, et al. Fuzhuan brick tea polysaccharides attenuate metabolic syndrome in high-fat diet induced mice in association with modulation in the gut microbiota [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(11): 2783-2795.
- [74] DENG Q, WANG W, ZHANG L, et al. Gougunao tea polysaccharides ameliorate high-fat diet-induced hyperlipidemia and modulate gut microbiota [J]. *Food & Function*, 2023, 14(2): 703-719.
- [75] SUN Y, WANG F, LIU Y, et al. Comparison of water-and alkali-extracted polysaccharides from Fuzhuan brick tea and their immunomodulatory effects *in vitro* and *in vivo* [J]. *Food & Function*, 2022, 13(2): 806-824.
- [76] LIU Y, LEI S, HOU R, et al. Tea polysaccharides from Taiping Houkui may serve as a potential candidate for regulation of lipid metabolism: roles of gut microbiota and metabolite *in vitro* [J]. *Journal of Functional Foods*, 2023, 102: 105469.
- [77] TANG Y, CHEN B, HUANG X, et al. Fu brick tea alleviates high fat induced non-alcoholic fatty liver disease by remodeling the gut microbiota and liver metabolism [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1062323.
- [78] YU L, LIU Y, WANG S, et al. Cholestasis: Exploring the triangular relationship of gut microbiota-bile acid-cholestasis and the potential probiotic strategies [J]. *Gut Microbes*, 2023, 15(1): 2181930.
- [79] ZHANG Y, LEI L, SI S, et al. ASGR1 promotes atherosclerosis in western diet-fed ApoE^{-/-} mice by increasing VLDL production and decreasing cholesterol efflux [J]. *Atherosclerosis*, 2024, 395: 118429.
- [80] KUANG D D, ZHANG T, GUO X Y, et al. Tea polysaccharide ameliorates atherosclerosis by inhibiting insulin resistance-mediated hepatic VLDL overproduction [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2025, 73(15): 8959-8977.