食品工业科技
SCIENCE AND TECHNOLOGY OF FOOD INDUSTRY
半月刊 ISSN 1002-0306 CN 11-1759/TS

☑ EI
☑ Scopus
☑ DOAJ
☑ EBSCO
☑ CA
☑ FSTA
☑ JST

☑ 中国科技期刊卓越行动计划项目资助期刊
☑ 北大核心期刊
☑ 中国精品科技期刊
☑ 中国科技核心期刊CSTPCD
☑ 中国核心学术期刊RCCSE A+
☑ 世界期刊影响力指数（WJCI）报告
☑ 食品科学与工程领域高质量科技期刊分级目录第一方阵T1

茶黄素的生物活性、作用机制和应用研究进展

张 睿，张艺华，周家萍

Research Progress on the Bioactivity, Mechanisms, and Applications of Theaflavins

ZHANG Rui, ZHANG Yihua, and ZHOU Jiaping

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060192

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

关注微信公众号，获得更多资讯信息

张睿，张艺华，周家萍. 茶黄素的生物活性、作用机制和应用研究进展 [J]. 食品工业科技，2025，46(10)：408−417. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060192

ZHANG Rui, ZHANG Yihua, ZHOU Jiaping. Research Progress on the Bioactivity, Mechanisms, and Applications of Theaflavins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 408−417. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060192

· 专题综述 ·

茶黄素的生物活性、作用机制和应用研究进展

张　睿[1]，张艺华[1,+]，周家萍[2,*]

（1.天津科技大学食品科学与工程学院，天津 300457；
2.天津科技大学现代分析技术研究中心，天津 300457）

摘　要：茶黄素（Theaflavins，TFs）是一种发酵茶在加工过程中形成的天然水溶性茶色素，具有多个羟基或酚羟基的苯并卓酚酮结构，是发酵茶品质优劣的决定因素之一。近年来，茶黄素因其多种生物学活性而受到广泛关注，其中包括抗炎、降血糖、预防心脑血管疾病、抗病毒、抗肿瘤、抑菌、保护精神健康和保护器官等功效。随着茶黄素的研究不断深入，其生物活性作用机制和临床应用前景逐渐被阐明，有望在多个领域发挥更大的作用。该文综述了茶黄素的生物活性、作用机制以及在生物医药、食品保健、美妆日用、农林养殖等领域的应用现状和研发方向，旨在为茶黄素未来的开发方向和应用前景提出展望。

关键词：发酵茶，茶黄素，生物活性，作用机制，应用现状

中图分类号：TS273；R282.71　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002−0306(2025)10−0408−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060192

本文网刊：

Research Progress on the Bioactivity, Mechanisms, and Applications of Theaflavins

ZHANG Rui[1]，ZHANG Yihua[1,+]，ZHOU Jiaping[2,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China；
2.Research Centre of Modern Analytical Technology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China）

Abstract: Theaflavins (TFs) is natural water-soluble tea pigments formed during the processing of fermented tea, possess multiple hydroxyl or phenolic hydroxyl groups within their benzodrol phenol ketone structure, which is one of the determinants of the quality of fermented tea. In recent years, TFs have garnered widespread attention due to their diverse biological activities, including anti-inflammatory, hypoglycemic, prevention of cardiovascular, antiviral, antitumor, antibacterial, protective of mental health, and organ protection effects. As research on TFs continues to deepen, their mechanisms of biological activity and clinical application prospects have been gradually clarified, and they are expected to play a greater role in various fields. This paper reviews the biological activities and mechanisms of action of TFs, as well as their application status and research directions in fields such as biomedicine, food health, beauty and daily necessities, and agriculture and animal husbandry, aiming to provide an outlook for the future development and application prospects of TFs.

Key words: fermented tea; theaflavins; biological activity; mechanism of action; application status

收稿日期：2024−06−13　　+并列第一作者

基金项目：天津市科技计划项目（22JCQNJC01480）。

作者简介：张睿（1998−），女，硕士研究生，研究方向：茶黄素的制备及功能研究，E-mail: zhangruir@tust.edu.cn。
张艺华（2002−），女，本科，研究方向：茶叶功能成分研究，E-mail: zhangyihua@mail.tust.edu.cn。

*** 通信作者：**周家萍（1987−），女，硕士，高级实验师，研究方向：茶叶功能成分及作用机制，E-mail: zhoujiaping@tust.edu.cn。

红茶是一种经过完全发酵的茶叶，以其红艳的汤色，醇厚的滋味和独特的香气深受广大消费者喜爱，且具有悠久的饮用历史[1]。红茶中具有多种有益于人体健康的功能成分，包括茶多酚（如儿茶素、茶黄素）、氨基酸、咖啡碱、茶多糖等。其中，茶黄素（Theaflavins）是一种在红茶加工过程中形成的金黄色色素，占红茶干重的 0.5%~3%，不仅是衡量红茶品质的重要因素，也是红茶发挥保健功效的重要物质基础之一[2]。近年来的研究发现，茶黄素具有抗炎[3]、预防心脑血管疾病[4]、降血糖[5]、抗病毒[3]、抑菌[6]、抗肿瘤[7]、保护精神健康和保护器官[8] 等多种生物活性，是目前关于茶叶功能成分的研究热点之一。

目前茶黄素的应用涉及医药、食品保健品、美妆日用品和农林养殖业等多个行业。然而，茶黄素产业现阶段仍存在单体制备困难、分离纯化不易、创新匮乏、产业化效率低、生产成本高和终端应用产品缺乏等问题[9]，有关茶黄素单体的具体应用技术有待科学考究与系统验证[10−11]。该文综述了天然产物茶黄素的生物活性和作用机制，总结了茶黄素的应用现状和实际应用中遇到的瓶颈及问题，旨在为茶黄素的深度开发及在食品、医药等领域的创新应用提供科学依据和实践指导，以推动茶黄素相关产业的高效发展。

1　茶黄素的理化性质

茶黄素单体为橙黄色针状结晶，熔点 237~240 ℃，易溶于水、甲醇、乙醇、丙酮、正丁醇和乙酸乙酯，难溶于乙醚，不溶于三氯甲烷和苯[12]，水溶液的 pH 约为 5.7。茶黄素的理化性质与儿茶素相近，具有较强的抗氧化能力，但稳定性较差，易受环境因素影响而发生降解或进一步氧化[13]。紫外分光光度法测定显示茶黄素在波长 280、380 和 460 nm 处均有吸收峰，其中在 280 nm 处有最大吸收峰[14]。茶黄素类物质主要是由儿茶素及其衍生物在多酚氧化酶（Polyphenol oxidase, PPO）的催化作用下氧化缩合而成具有苯骈卓酚酮结构的一类化合物的总称[15]。

目前，红茶中发现的茶黄素组分有 28 种（表 1），其中含量最多的是茶黄素（Theaflavin, TF1）、茶黄素-3-没食子酸酯（Theaflavin-3-gallate, TF2a）、茶黄素-3'-没食子酸酯（Theaflavin-3'- gallate, TF2b）和茶黄素双没食子酸酯（Theaflavin-3,3'-digallate, TF3）[18]，具体的结构如图 1 所示。

表 1　茶黄素前体及茶黄素种类[16−17]

Table 1　Theaflavins and their precursors[16−17]

序号	茶黄素前体	茶黄素种类	相对分子质量(g/mol)
1	ECG+EC	茶黄素 Theaflavin(TF)	564.5
2	EGCG+EC	茶黄素-3'-没食子酸酯 Theaflavin-3'-gallate	704.6
3	ECG+EGC	茶黄素-3'-没食子酸酯 Theaflavin-3'-gallate	704.6
4	GC+ECG	异茶黄素-3'-没食子酸酯 Isotheaflavin-3'-gallate	716.6
5	EGC+C	新茶黄素 Neotheaflavin	564.5
6	EGCG+C	新茶黄素-3-没食子酸酯 Neotheaflavin-3-gallate	716.6
7	GC+EC	异茶黄素 Isotheaflavin	564.5
8	EGCG+ECG	茶黄素-3-3'-双没食子酸 Theaflavin-3,3'-gallate	716.6
9	EC+GA	表茶黄酸 Epitheaflavic acid	428.4
10	ECG+Pyrogallol	表茶黄酸-3-没食子酸酯 Epitheaflavic acid-3-gallate	580.4
11	C+Pyrogallol	茶黄酸 theaflavic acid	428.4
12	EGC+Pyrogallol	表茶黄棓灵 Epitheaflagallin	552.5
13	EGCG+Catechol	表茶黄棓灵-3-没食子酸酯 Epitheaflagallin-3-gallate	458.4
14	GC+Catechol	茶黄棓灵 theaflagallin	552.4
15	EGC+ECG	未命名	704.6
16	EGCG+EC	未命名	704.6
17	ECG+C	茶烷典酸酯 A Theaflavate A	852.7
18	ECG+EC	茶烷典酸酯 B Theaflavate B	852.7
19	EGCG+C	新茶烷典酸酯 B Neotheaflavate B	716.6
20	Theaflavin-3-gallate+EC	双苯骈卓酚酮环茶黄素 A Theadibenzotropolone A	973.0
21	Theaflavin-3-gallate+C	双苯骈卓酚酮环茶黄素 B Theadibenzotropolone B	973.0
22	Neotheaflavin-3-gallate+EC	双苯骈卓酚酮环茶黄素 C Theadibenzotropolone C	974.8
23	Theaflavin-3, 3'-gallate+2EC	三苯骈卓酚酮环茶黄素 Theatribenzotropolone A	973.0
24	Theaflavin+Theaflavin	双茶黄素 B Bistheaflavin B	875.0
25	Theaflavin+Theaflavin	双茶黄素 A Bistheaflavin A	875.0
26	GA+Catechol	未命名	–
27	Pyrogallol	红紫精 Purpurogallin	220.2
28	GA+GA(Pyrogallol)	红紫精酸 Purpurogallin carboxylic acid	264.2

注：pyrogallol，连苯三酚；catechol，邻苯二酚；GA，没食子酸（gallic acid）；C，儿茶素（catechin）；GC，没食子儿茶素（gallocatechin）；Epi-，表；Neo-，新；Iso-，异；Theaflavin-3'-gallate，茶黄素-3'-单没食子酸酯；Theaflavin-3,3'-digallate，茶黄素双没食子酸酯。

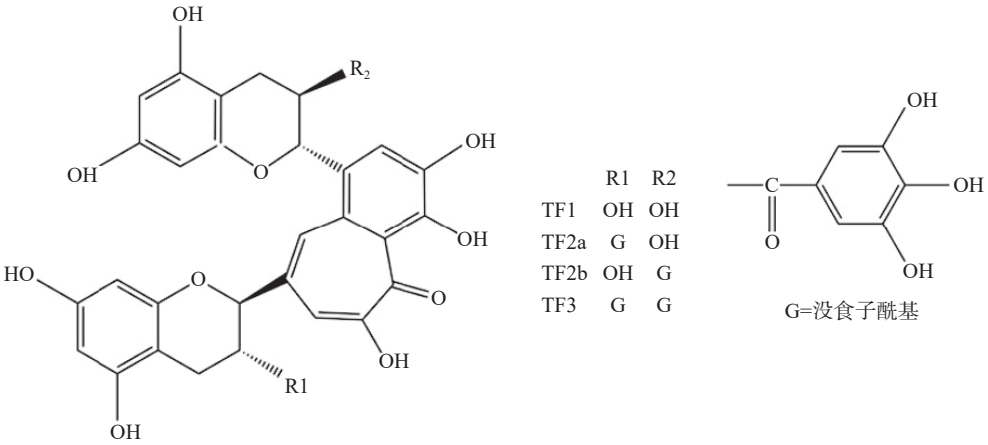

图 1　茶黄素 4 种主要成分的化学结构式

Fig.1　Chemical structural formulae of the four main components of theaflavins

2　茶黄素生物活性及作用机制

近年来，饮茶对健康有益处已成为消费者的普遍共识，茶黄素作为红茶中的天然活性成分，逐渐成为功能食品和药物研发的热点。本章节综述了茶黄素的抗炎、降血糖、预防心脑血管疾病、抗病毒、抗肿瘤、抑菌、保护精神健康和保护器官等方面的生物活性及作用机制，内容可参考图 2。

图 2　茶黄素的生物活性及其功效

Fig.2　Bioactive and effects of theaflavins

2.1　抗炎症活性及作用机制

目前茶黄素的抗炎活性已被广泛报道，并随着研究的深入，其抗炎症的作用机制也逐渐清晰[19]。ZHANG 等[20] 分别通过小鼠实验证实了 TF3 具有减轻炎症和控制自噬促进抗炎 M2 巨噬细胞极化来防止胶原诱导的关节炎，说明了 TF3 具有的抗炎活性，在未来有希望用于类风湿性关节炎等疾病的治疗。张晨[21] 通过荧光定量 PCR 实验（Quantitative Real-time Polymerase Chain Reaction，qRT-PCR）检测茶多酚（Tea Polyphenols，TPs）和 TFs 对脂多糖（Lipopolysaccharide，LPS）诱导的 RAW264.7 细胞炎症因子 mRNA 表达量的影响，在经 LPS 诱导后的 RAW264.7 细胞里加入不同浓度的 TPs 和 TFs 后发现高浓度的 TPs 和 TFs 可以使 LPS 诱导的 RAW264.7 炎症胞中肿瘤坏死因子-α（Tumor Necrosis Factor-α，TNF-α）、白介素-1β（Interleukin-1β，IL-1β）、白介素-6（Interleukin-6，IL-6）mRNA 的表达下调（$P<0.05$），揭示了 TPs 和 TFs 可以抑制 LPS 诱导的 RAW264.7细胞分泌炎症因子；转录组测序分析结果显示，TPs 组与免疫有关的显著富集途径分别是抗原处理和呈递，单纯疱疹病毒 1 感染等，TFs 组与免疫有关的显著富集途径有用于 lgA 生产的肠道免疫网络和类风湿性关节炎。GAO 等[22] 通过显微 CT 发现 TF3显著增加了卵巢切除术（OVX）小鼠的骨量，与 OVX小鼠相比 TF3 降低了促炎细胞因子的释放；在体外实验显示 TF3 能够促进炎症环境下成骨细胞的形成，增强其矿化能力，保护软骨细胞免受衰老和凋亡，改善小鼠骨关节炎，说明了 TF3 可以通过减少促炎细胞因子的释放起到抗炎的作用。陆铭淏[23] 利用白介素 1-β（IL-1β）干预大鼠软骨细胞构建了体外骨关节炎环境，并用半月板内侧胫副韧带切除术诱导大鼠体内骨关节炎模型；发现 TF3 通过抑制 PI3K/AKT/NF-κB 途径，激活 Nrf2/HO-1 途径增强软骨细胞的抗炎与抗氧化能力，从而保护软骨细胞，说明了 TF3 所具有的抗炎活性可以对早期骨关节炎起到保护作用。茶黄素通过抑制炎症因子、调节炎症相关的信号通路、抗氧化等方式起到抗炎的功效，预期在未来可以作为一种新型药物运用到具体的生产实践中。

2.2　降血糖活性及作用机制

当前临床上常用的口服降糖药普遍存在一定程度的副作用，因此，开发高效且无副作用的天然降糖剂具有重要意义。研究表明，茶黄素作为一种天然产物，展现出良好的降血糖活性，为糖尿病的安全治疗提供了新的可能。SARKAR 等[24] 采用富含茶黄素的红茶提取物（BTE-TF）治疗链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠 12 周，结果表明 BTE-TF 可以治疗动物的血糖水平，改善氧化应激、炎症和细胞凋亡对糖尿病诱导的肾损伤，通过动物实验证明了 BTE-TF 具有的降血糖活性并且可以改善由糖尿病导致的肾损伤。

LI 等[25] 以自发性糖尿病 Torii（SDT）大鼠为研究对象，观察了茶黄素在大鼠体内降血糖作用，发现茶黄素可以通过改善受损的胰岛素分泌来发挥抗糖尿病前期和抗糖尿病的作用，实验证明了茶黄素可以通过改善胰岛素的敏感性起到降血糖的作用。WANG 等[26] 研究了茶黄素对高脂饮食诱导的糖尿病小鼠的影响，采用不同浓度的茶黄素对糖尿病小鼠进行灌胃处理，并评估其对血糖、血脂及肠道菌群的调节作用。结果表明，茶黄素干预能够调节肠道微生物组结构，通过促进与糖尿病相关的有益菌生长、抑制不利菌群，从而显著改善糖尿病小鼠的高血糖和高血脂状态；此外，茶黄素对糖代谢和脂代谢的调控作用间接降低了血糖水平。朱樱等[27] 研究茶黄素对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用并通过分子对接分析其分子机制，比较了 4 种茶黄素单体对 α-葡萄糖苷酶的抑制活性，结果表明 TF3的抑制效果最为显著，其 IC_{50} 值为 0.05 mg/mL。该研究为茶黄素在降血糖领域的应用提供了实验数据支持，并进一步验证了其可通过调控糖代谢相关酶发挥降血糖作用。江晶晶[28] 探究茶黄素对Ⅱ型糖尿病（Type2 Diabetes Mellitus，T2DM）小鼠血糖和血脂的改善作用，研究发现茶黄素能够显著降低 T2DM 小鼠的空腹血糖、血浆胰岛素含量、显著改善口服葡萄糖耐量、胰岛素抵抗和胰岛素敏感性，改善血糖血脂异常，起到降血糖的作用。目前研究发现茶黄素主要通过改善胰岛素敏感性、抑菌、调节肠道微生物组和调节糖代谢相关酶等作用机制调节血糖，为茶黄素未来应用在糖尿病方面的治疗提供了参考。

2.3　预防心脑血管疾病及作用机制

茶黄素在保护心肌、调血脂、舒张血管和抗动脉粥样硬化的作用方面表现出显著作用（图 3）[29]。其作为一种潜在的心脑血管疾病预防和治疗候选物，主要通过抗氧化、抗炎、降血压、降血脂及抑制血小板聚集等多重机制发挥作用[30]。石萌萌等[31] 通过建立泡沫细胞模型探究茶黄素对氧化型低密度脂蛋白（oxLDL）诱导的 THP-1 巨噬细胞泡沫化和氧化应激的影响及其机制，茶黄素可以显著抑制 THP-1 巨噬细胞泡沫化，抑制 oxLDL 诱导的 THP-1 巨噬细胞炎症并通过 NRF2/HO-1 信号通路减缓了氧化应激，对治疗动脉粥样硬化具有重要意义，该研究证明了茶黄素在心血管疾病防治中的潜在应用价值。邓志慧[32] 采用体外和体内实验模型发现 TF3 膳食干预可有效减轻糖尿病大鼠血管内皮损伤，维护血管内皮功能稳定，减轻内皮细胞氧化应激损伤和炎症反应，动物实验证明 TF3 能够显著提高血管内皮细胞活力。韩旭等[33] 探讨茶黄素对新生大鼠心肌缺血保护作用的机制研究，发现茶黄素可减轻异丙肾上腺素诱导组新生大鼠心肌缺血，其机制可能与调节 Nrf2/HO-1/NQO1 信号通路、减轻细胞凋亡和氧化应激有关，动物实验证实了 TF3 具有的心肌缺血保护作用。周辉[34] 采用血管紧张素 II（Angiotensin II，ANGII）诱导 H9c2 大鼠心肌细胞建立病理性心肌肥厚（Pathological cardiac Hypertrophy，PCH）模型，探究了 TF3 对 PCH 的预防作用及分子机制，结果表明 TF3 通过抑制钙调神经磷酸酶-活化 T 细胞核因子（Calcineurin-Nuclear Factor of Activated T cells，Ca N-NFAT）信号预防由血管紧张素 II 诱导 H9c2 细胞发生 PCH，并同时改善细胞氧化应激水平，动物研究证实了茶黄素具有的舒张血管的作用，降低心血管疾病的发生率，该研究为临床应用 TF3 预防心肌病变提供了理论依据。目前的研究成果证明茶黄素可以通过抗动脉粥样硬化、维护血管内皮功能稳定、减轻内皮细胞氧化应激损伤、抗炎、保护心肌等作用机制预防心脑血管疾病的发生，有望在未来的临床治疗中进行使用。

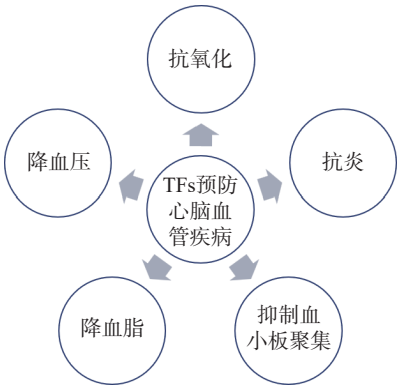

图 3　茶黄素的预防心脑血管疾病的方式

Fig.3　Ways of preventing cardiovascular diseases of theaflavins

2.4　抗病毒活性及作用机制

茶黄素在抗病毒活性方面也表现优异。司马明威[35] 在研究四种主要茶黄素 TF1、TF2a、TF2b 和 TF3 的抗病毒活性中观察到 TF1 和 TF2b 在细胞水平上具有抑制流感病毒 H1N1-UI182 的作用，而 TF2b 可抑制流感病毒感染引起的致死性肺炎，降低流感感染小鼠肺部病毒载量，缓解小鼠因感染导致的体重下降，降低其死亡率。该研究为茶黄素在天然抗流感病毒药物的开发提供了科学依据，并进一步拓展了其在抗病毒领域的应用潜力。DENG 等[36] 研究了四种主要 TFs 的抗寨卡病毒（Zika Virus，ZIKV）活性，发现 TF1 和 TF2b 通过抑制 ZIKV 的复制和释放，抑制了 ZIKV/Z16006 毒株在 BHK 和 Vero 细胞中的复制；体内实验中发现 TF2b 提高了感染小鼠的生存率，表明 TF2b 具有很强的抗病毒作用，可作为治疗 ZIKV 感染的潜在候选药物。块状皮肤病病毒（LSDV）对全球养牛业构成严重威胁，WANG 等[37] 构建了重组荧光 LSDV（LSDV-ΔTK/EGFP），为抗病毒药物的高通量筛选提供了新的工具，在筛选中发现茶黄素在病毒进入细胞和复制阶段均表现出显著的

抑制作用，这为 LSDV 的抗病毒药物开发提供了新的研究方向。目前的研究结果显示茶黄素可以通过直接抑制病毒的复制和释放、抑制流感病毒细胞上清中炎症因子 IL-6 表达等作用机制起到抗病毒的作用，并且对于一些顽固病毒例如 ZIKV 病毒、LSDV 病毒等有很好的治疗能力。然而，关于茶黄素不同单体的具体抗病毒机制及其作用效果尚不明确，仍需进一步深入研究，以揭示其分子作用机制，并推动其在抗病毒药物开发中的应用。

2.5 抗肿瘤活性及作用机制

癌症是目前威胁人类健康的重大隐患之一，研发新型抗肿瘤抑癌的药物迫在眉睫。田朋等[38] 在研究茶黄素促进小鼠乳腺肿瘤细胞凋亡的作用机制的实验中发现随着茶黄素浓度的增大，茶黄素促进 C-127 细胞凋亡的作用逐渐增强，茶黄素通过 PI3K/Akt 信号通路调控促凋亡基因和抗凋亡基因表达，这表明茶黄素可能在抗肿瘤治疗中具有一定的潜力。SUR 等[39] 评估了表没食子酸没食子酸酯（Epigallocatechin Gallate, EGCG）/茶黄素对 CCl_4 /N-nitosodiethylamine 诱导的小鼠肝癌发生过程中 Wnt 和 Hedgehog（Hh）通路自我更新的化学预防和治疗效果，发现 EGCG/茶黄素的治疗显著减少了肝细胞的增殖并增加了凋亡率，特别是通过调节 Wnt 和 Hh 的信号通路减少肝癌细胞数目的增殖，证明了茶黄素在防治肝癌方面具有很大的应用潜力。王专等[40] 探究 TF1 对人肝癌 Bel-7402 细胞的影响，发现不同剂量的 TF1 均可抑制肝癌 Bel-7402 细胞的增殖和迁移，促进其凋亡，并且存在剂量依赖性，剂量越大，抑制作用越强（$P<0.05$），证明了 TF1 可能通过信号通路相关蛋白 TGF-β 抑制肝癌 Bel-7402 细胞的增殖、迁移，且促进其凋亡。这一发现表明，TF1 在抗肿瘤领域具有潜在的应用价值，未来可作为新型抗肝癌药物进行深入研究和开发。综上，茶黄素可以通过抑制癌细胞的生长、转移和突变等方式、促进癌细胞凋亡、抗染色体断裂等途径起到抗肿瘤活性作用[41]，茶黄素类与药物的联合使用还可显著降低药物的毒副作用，在癌症的治疗方面具有广阔的应用前景。

2.6 抑菌活性及作用机制

茶黄素具有广谱抑菌活性，能够有效抑制多种革兰氏阳性菌和阴性菌的生长，其抑菌机制主要涉及细胞膜破坏、蛋白质功能干扰和氧化应激诱导等方面[42]。谭怡青[43] 在实验中发现茶黄素对猪链球菌 S19 在体外有直接抑制作用，提高了感染 SC19 的小鼠存活率，通过动物实验证明了茶黄素对猪链球菌 S19 有直接抑制作用，有望在未来作为新型复方抗菌药物产品的候选材料。WANG 等[44] 通过场发射扫描电子显微镜观察发现 TF3 在体外对变链菌 UA159 具有抑制作用，可以显著抑制变形链球菌生物膜的形成和致癌能力。SATO 等[45] 研究茶黄素和儿茶素对凝结芽孢杆菌的抑菌作用及其抑菌机理，结果显示细胞膜磷脂酰甘油（PG）双分子层对茶黄素衍生物有很强的亲和力，与其杀菌活性相关，表明茶黄素可以通过降低细胞膜流动性有效抑制凝结芽孢杆菌，表现出很强的抑菌活性。茶黄素可以通过破坏致病微生物细胞膜（壁）的完整性，与致病微生物受体结构螯合和抑制基因复制/转录等方式进行抑菌，说明茶黄素在与人类相关的多种致病菌干预方面具有潜在的应用价值。目前的研究结果显示茶黄素可以直接抑制多种细菌、并且具有协同抗生素、抑制细菌毒力等作用，是一种极具开发潜力的功能化合物。

2.7 保护精神健康及作用机制

研究表明，茶黄素还在减缓焦虑、抗抑郁、抗阿尔茨海默病以及神经保护等方面展现出潜在的精神健康保护作用。其作用机制主要涉及抗氧化抗炎、神经递质调节、肠道-脑轴调控及脑神经保护等多种生物学过程[46]。ANO 等[47] 通过 Y-迷宫实验和尾悬吊试验发现口服茶黄素可以防止小鼠伴随的记忆损伤和抑郁样行为，具有良好的保护精神健康的作用。覃玉娜等[48] 在 EPM 测试实验中啮齿动物在迷宫开阔臂的时间延长表明焦虑减少。这表明红茶中的茶黄素可能有助于减少日常生活中的焦虑情况。EWA 等[49] 发现茶叶的多酚类可以缓解阿尔茨海默氏症的症状，其作用机制是使纤溶酶原激活物抑制剂-1（PAI-1）失活，TF3 可以抑制 PAI-1 且可能在减缓由 PAI-1 引起的阿尔茨海默氏症或肥胖中发挥作用。基于茶黄素具有保护体内氧化应激、防止记忆损伤、抗抑郁、减少焦虑等功效，未来茶黄素有望作为一种新型治疗精神健康的药物，打开精神健康市场新的大门。

2.8 保护器官方面的研究及作用机制

近年来，已有相应的研究成果证明，茶黄素在保护肝脏、心脏、胰腺、肾脏和骨骼肌肉健康方面具有一定的功效，在未来可以作为一种保护器官的药物投入使用，具体如表 2 所示。

2.9 茶黄素的抗衰老和抗肥胖活性及其作用机制

下丘脑神经干细胞（htNSCs）的年龄依赖性丧失对于衰老的病理后果很重要，而一种长的非编码 RNA Hnscr 的耗竭会导致小鼠下丘脑神经干细胞呈现衰老和衰老样表型；XIAO 等[56] 通过分子对接发现 TF2a 可以模拟 Hnscr 的活性，降低了 htNSCs 的衰老，同时改善了衰老的相关症状。LI 等[57] 的研究结果揭示了茶黄素通过微生物群-肠道-大脑轴在减轻衰老驱动的认知功能障碍方面的潜在作用，茶黄素的摄入作为一种新的饮食干预方法，对衰老引起的认知能力下降具有一定的改善作用，证明了茶黄素具有的抗衰老生物活性，未来可以转化为一种新的饮食干预方法，以对抗衰老引起的认知衰退。CAI 等[58] 通

表 2　茶黄素在保护器官方面的研究

Table 2　Studies of theaflavins in organ protection

研究功效	研究成果	参考文献
治疗非酒精性脂肪性肝病	通过使用TF3治疗具有NAFLD症状的瘦素缺乏型肥胖(ob/ob)小鼠，发现TF3防止了体重和腰围增加，减少了脂质积累，减轻了肝功能损伤，并降低了ob/ob小鼠肝脏中的血清脂质水平和TG水平，没有观察到副作用	ZHOU等[50]
减轻高脂饮食诱导的肝脏损伤	以高脂饮食诱导小鼠肝损伤为实验模型，观察TF3膳食干预对肝功指标、组织细胞形态和炎症反应的影响，发现TF3可有效减轻高脂饮食诱导的肝脏损伤及炎症反应	张淦等[51]
减轻慢性高尿酸血症，保护心肺的作用	建立新慢性高尿酸血症小鼠实验模型，发现喂食高浓度的茶黄素特制饲料对高尿酸血症小鼠有显著降低尿酸含量的作用，同时还能显著降低血清AST、ADA、TG含量，起到保护小鼠心、肺的作用	刘妍等[52]
茶黄素对II型糖尿病小鼠肾脏的保护作用	对Ⅱ型糖尿病T2DM小鼠进行不同浓度的茶黄素管饲治疗10周，发现茶黄素抑制了(晚期糖基化终产物)AGEs的形成，从而抑制了MAPK/NF-κB信号通路的激活，来改善糖尿病肾病	WANG等[53]
茶黄素单体和提取物(BTE)诱导大鼠肝肾损伤的保护作用	研究了BTE对CCl4诱导的大鼠肝肾损伤的保护作用及其分子机制，发现富含茶黄素的BTE通过TGF-β/Smad/ERK信号通路阻止大鼠肝纤维化，通过抑制TGF-β和促炎细胞因子在大鼠肾脏的表达阻止肾脏损伤	ZHAN等[54]
防止骨骼流失，增强肌肉性能，保护骨骼健康	研究发现茶黄素通过调节TLR4/MyD88/NF-κB信号通路来降低炎症因子(IL-1β、IL-6 和 TNF-α)的表达，从而减轻肌肉炎，促进炎症损伤后肌肉的恢复	LIU等[55]

过果蝇自然喂养动物实验发现将茶黄素作为膳食补充剂可以延长果蝇的寿命，动物实验说明了茶黄素在抗衰老方面具有的发展潜力。茶黄素所具有的抗衰老功效在未来可以运用到保健食品和美容等市场发展，具有很大的发展前景。

在抗肥胖方面，UCHIYAMA 等[59] 在体外研究了红茶提取物对胰脂肪酶活性的影响，发现红茶提取物可抑制体重增加，通过抑制肠道脂质吸收来预防饮食引起的肥胖。SHI 等[60] 总结并更新了茶黄素的生物利用度，以及茶黄素在体外和体内对代谢异常功能的可用信号通路和分子证据，为未来利用茶黄素预防代谢综合症提供了有希望的机会。CAI 等[61] 探讨不同单体的茶黄素对高脂饮食(HFD)诱导的肥胖小鼠糖脂代谢的影响及其机制。证明 TF1、TF2a 和 TF3 改善了喂食 HFD 小鼠的糖脂代谢，并通过激活 SIRT6/AMPK/SREBP-1/FASN 信号通路抑制肝脏中脂质的合成和积累来改善喂食 HFD 的小鼠肥胖。这些发现证明 TFs、TF1、TF2a 和 TF3 可能被用作改善糖脂代谢和改善肥胖的食品添加剂。随着“健康中国 2030”规划纲要的提出，茶黄素所具有的减肥功效在未来应用于保健食品的可能性将会大大提升。

3　茶黄素的应用现状

茶黄素作为茶叶的重要天然活性成分之一，颇具开发潜力。茶黄素具有抗炎、抗病毒、预防心脑血管疾病、抗病毒、抗肿瘤、抑菌、保护精神健康和保护器官等生物学活性。目前茶黄素已凭借其良好的生物活性已应用于生物医药、食品保健、美妆日用、农林养殖等领域，见表 3。

茶黄素目前的应用并没有形成一条完整的产业链，许多潜在的应用还待开发中。由于红茶中茶黄素含量较低，茶黄素的实际利用受到很大限制，探索新的茶黄素制备途径迫在眉睫。目前茶黄素的制备方法可分为两类：一是从红茶种直接提取分离；二是利用儿茶素体外制备拟氧化制备。方法一操作简单但是存在产品纯率低，环境污染的问题，方法二根据反应类型可以分为化学氧化和酶促氧化两种，化学氧化的可控性较强，但是成本较高，污染比较严重，不适合产业化生产。酶法制备可大幅度提高产品中茶黄素的浓度，降低生产的成本，但是此法目前还在研究开发阶段[78]。茶黄素的纯化过程相对复杂，成本较高，这可能会影响其在大规模生产中的应用。如何开发出高效的、环保的、低耗能的、高提取率的茶黄素提取和纯化加工工艺是未来需要解决的问题之一。

目前茶黄素的研究仍以混合物为主，关于茶黄素单体的动物实验及临床实验数据较为有限。在医药领域，茶黄素具有较高的应用价值和市场潜力，但其研发周期长、技术难度大，限制了其进一步推广应用[79]。此外，茶黄素的化学性质不稳定，生物利用度较低，吸收代谢途径尚未完全明确，因此提升其生物利用度是未来研究的重要方向[80]。目前，茶黄素的实际应用仍存在诸多局限性(图 4)，相关研究大多停留在实验室开发和专利申请阶段[81]。相比于已实现产业化应用的儿茶素，茶黄素的市场转化仍处于初级阶段。因此，借鉴儿茶素的开发经验，推动茶黄素产品的规模化生产和产业化应用将成为未来的重要发展方向。

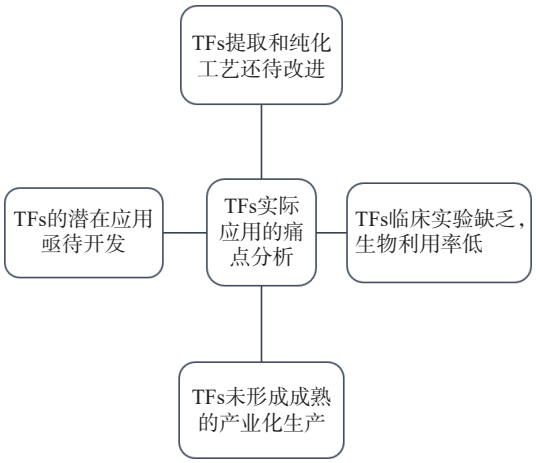

图 4　茶黄素(TFs)实际应用目前面临的瓶颈和问题

Fig.4　Current bottlenecks and problems encountered in the practical application of theaflavins

表 3 茶黄素的实际应用

Table 3 Practical applications of theaflavins

应用领域	应用举例	具体作用	参考文献
生物医药方面	茶黄素单体改善酒精性肝损伤中的应用	四种主要茶黄素单体TF1、TF2a、TF2b和TF3均可以保护HepG2细胞免受酒精诱导的损伤，改善由酒精引起的各项指标失衡，其中TF3表现出更强的抗氧化活性，抑制酒精氧化应激的效果更好。	张盛等[62]
	一种增强骨骼肌运动特性的含茶黄素的红茶提取物	有效抑制骨骼肌炎症反应中炎症因子的IL-6, IL-1, TNF-α表达，对炎症作用下肌肉机械特性的变化具有积极的保护作用。	刘子龙等[63]
	促进伤口愈合的茶黄素组合物	提高药物分子的稳定性，增加药物分子的生物利用度，改善传统药物溶解不良、治疗效率低等优点。	徐燕等[64]
	卵巢功能保护药物的应用	作为新型药物在修复卵巢损伤和/或对抗延缓卵巢衰老和/或重建卵巢功能方面发挥重要作用。	王世宣等[65]
食品保健品方面	茶黄素应用于大黄鱼以及其干制品的品质保鲜	有效地延缓蛋白质和脂肪氧化，并具有一定的抑菌作用，还可以改善大黄鱼营养成分和风味物质。	毛俊龙等[66]
	将茶黄素转移到富含蛋白质的食物当中	在茶蛋产品中用于染色蛋清，以及开发功能性食品中富含蛋白质的载体。	WU等[67]
	一种稳态化茶黄素肉制品护色抗氧化剂	针对加工肉制品的护色及抗氧化效果更为显著，可较好保持肉品包装时的原有色泽品质，且能显著抑制脂质氧化酸败可延长调理肉制品货架期15~20 d以上。	左小博等[68]
	将茶黄素作为茶色素应用于饮料行业	具有保健功效的茶黄素为饮料行业茶色素生产提供了更多的选择。	LONG等[69]
美妆日用品方面	一种抗糖化美白的茶黄素组合物	抗糖化美白的茶黄素组合物，将其添加至保健品中，无糖，易于被人体吸收，能够改善由糖化、氧化和黑色素所引起的皮肤泛黄、暗沉的色泽问题。	任雪音等[70]
	一种有祛痘消炎作用的茶黄素组合物	一种有祛痘消炎作用的茶黄素组合物，不仅增加了消炎的作用，而且提高了祛痘的效果，明显改善肌肤，且易于被人体充分吸收。	刘德和等[71]
	一种含茶黄素的护肤品应用	将茶黄素应用在护肤品制备中，使护肤品中含有茶黄素，达到美白祛斑的功效，在护肤品中茶黄素表现良好的颜色稳定性。	梁慧玲等[72]
	一种含有茶黄素提取物的口腔护理组合物	用于治疗和缓解人类和动物的口臭和相关口腔健康问题，包括巨症、龋齿、牙周病、牙齿脱敏和维持口腔中微生物的平衡。	LI等[73]
	一种包载化茶黄素超分子体的抗氧化保鲜水凝胶	包载化茶黄素超分子体的抗氧化保鲜水凝胶应用于肉制品具有显著的的抗氧化保鲜作用，还有保持水分、抑制典型肉品腐败菌。	左小博等[74]
农林养殖业方面	一种快速疏通肠道的淡水鱼饲料	有利于黏膜细胞的营养，促进淡水鱼黏膜细胞的增殖和黏膜损伤的修复，有利于淡水鱼肠道结构指数提高，提升其肠道的蠕动功能，方便疏通。	陆裕肖等[75]
	一种含茶黄素的害虫引诱剂组合物	用于吸引害虫的用途和用于捕获有害生物的诱捕器，其包含该组合物。	BRAIMAH等[76]
	茶黄素在制备抗禽致病菌药物中的应用	茶黄素具有抑制和杀死鸭源鸡杆菌、禽巴氏杆菌的作用，在食品加工、医药、养殖业领域具有广阔的应用前景和开发价值。	卢琴等[77]

4 结论与展望

茶文化与健康意识的融合在现代社会中备受关注，这一趋势不仅改变了人们的生活方式，还强调了茶的营养价值和健康益处。该文综述了茶黄素在生物活性、作用机制、应用现状的研究进展。概述了茶黄素具有的抗炎、降血糖、预防心脑血管疾病、抗病毒、抗肿瘤、抑菌、保护精神健康和保护器官等生物活性及其作用机制，并总结茶黄素在生物医药、食品保健、美妆日用、农林养殖等领域的应用现状。目前关于茶黄素等天然产物的开发应用已经成为研究热点之一，关于茶黄素的实际应用逐渐出现在各个领域。由于茶黄素涉及多种信号通路，还需要更多的研究便于深入了解茶黄素在多组学整合中的有益作用，具体的研究需要未来进一步通过高通量测序技术、酶技术和临床研究等细节，明确各类茶黄素单体的具体功效和实际应用中的作用。目前，关于茶黄素生物学活性的研究仍主要集中在细胞实验和动物模型层面，而针对临床应用的研究仍较为有限，缺乏系统性报道。尽管已有研究揭示了茶黄素在抗氧化、降血糖、抗炎、抗肿瘤及神经保护等方面的潜在作用，但其具体的作用机制、药代动力学特性及临床有效性仍需进一步深入探究，以评估其在人体健康管理和疾病预防中的应用价值。未来，需要通过大规模临床试验来验证其生物学效应，并明确其安全性、有效剂量及长期影响，从而为茶黄素的功能性食品开发和药物研发提供科学依据。

目前，茶黄素的实际应用仍面临诸多挑战，主要受提取与制备难度的限制。由于茶黄素的分子结构较为复杂，其单体分离纯化及大规模生产较为困难，直接影响其生物活性研究和实际应用的推进。此外，茶黄素化学性质不稳定，在水溶液中易发生异构化、氧化、酯水解及配位反应，导致其稳定性降低，进一步限制了其在食品、医药等领域的开发。为提升茶黄素的生产效率与稳定性，酶工程、固定化酶技术、水-不混溶溶剂-水双相系统及重组酶技术等策略逐渐受到关注，有望在未来改善茶黄素的工业生产工艺。现阶段，茶黄素的应用开发仍主要处于产品研发及专利申请阶段，市场上流通的相关产品较为有限，其产业化仍需进一步突破。未来，随着提取与合成技术的优化，以茶黄素为功能核心的茶系列健康食品及医药产品有望成为重要的研发方向，并在功能食品、保健品及新型药物领域展现广阔应用前景。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 骆亚飞. 近代长江中下游地区红茶研究[D]. 武汉：湖北省社

会科学院, 2022: 1−3. [LUO Y F. Study on black tea in the middle and lower reaches of the Yangtze River in modern times[D]. Wuhan: Hubei Academy of Social Sciences, 2022: 1−3.]

[2] 刘昌伟, 张梓莹, 王俊懿, 等. 茶黄素生物学活性研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 318−329. [LIU C W, ZHANG Z Y, WANG J Y, et al. Progress in the study of biological activities of theaflavins[J]. Food Science, 2022, 43(19): 318−329.]

[3] ZU M, YANG F, ZHOU W L, et al. *In vitro* anti-influenza virus and anti-inflammatory activities of theaflavin derivatives[J]. Antiviral Research, 2012, 94(3): 217−224.

[4] WONJUNE L, TOMOKO T, WENQIAN J, et al. Theaflavin indicates protection on vascular endothelium via hydrogen sulfide production[J]. Molecular & Cellular Toxicology, 2023, 20(3): 473−482.

[5] WANG Z, GAO J J, ZHAO Y N, et al. High-throughput screening, "protein–metabolite" interaction, and hypoglycemic effect investigations of α-amylase inhibitors in teas using an affinity selection-mass spectrometry method[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 203: 116392.

[6] CUI X, XU L, QI K Z, et al. Effects of tea polyphenols and Theaflavins on three oral cariogenic bacteria[J]. Molecules, 2023, 28(16): 6034.

[7] 张雪, 尹君丽, 王稼祥, 等. 茶黄素类天然产物抗肿瘤机制的研究进展[J]. 肿瘤防治研究, 2022, 49(8): 820−826. [ZHANG X, YIN J L, WANG J X, et al. Progress of anti-tumor mechanism of theaflavins[J]. Tumor Control Research, 2022, 49(8): 820−826.]

[8] ARSLAN A, FARHANA N, UMAIR M A, et al. Isolation and antioxidant characterization of theaflavin for neuroprotective effect in mice model[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(6): 3485−3496.

[9] WANG L, YAN T, ZHANG K X, et al. A sensitive UPLC-MS/MS method for simultaneous determination of polyphenols and theaflavins in rat plasma: Application to a pharmacokinetic study of Da Hong Pao tea[J]. Biomedical Chromatography: BMC, 2018, 33(4): e4470.

[10] ZHOU J H, LIU C W, ZHAO S M, et al. Improved yield of theaflavin-3, 3'-digallate from *Bacillus megaterium* tyrosinase via directed evolution[J]. Food Chemistry, 2021, 375: 131848.

[11] 徐燕, 朱创, 邰玲玲, 等. 红茶化学成分及生理活性的研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(5): 687−696. [XU Y, ZHU C, TAI L L, et al. Research progress on chemical composition and physiological activity of black tea[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(5): 687−696.]

[12] 左小博, 孔俊豪, 宋鹏鹏, 等. 茶黄素活性功效、应用现状及对策研究[J]. 中国茶叶加工, 2023(4): 57−64. [ZUO X B, KONG J H, SONG P P, et al. Research on the active efficacy, application status and countermeasures of theaflavins[J]. China Tea Processing, 2023(4): 57−64.]

[13] 丁其欢, 宇成庭, 周增志, 等. 茶黄素的理化性质提取分离及生物活性研究进展[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(11): 85−87. [DING Q H, ZHI C T, ZHOU Z Z, et al. Research progress on the physicochemical properties extraction separation and biological activity of theaflavins[J]. Anhui Agricultural Science, 2017, 45(11): 85−87.]

[14] 张海红, 田洪芸, 毕婷婷, 等. 分光光度法检测食品添加剂茶黄素含量[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(4): 761−766. [ZHANG H H, TIAN H Y, BI T T, et al. Determination of theaflavins in food additives by spectrophotometric method[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(4): 761−766.]

[15] TAKEMOTO M, TAKEMOTO H. Synthesis of theaflavins and their functions[J]. Molecules, 2018, 23(4): 918.

[16] 杨子银. 茶(红茶)与茶(Camellia sinensis)花多酚类物质的分离鉴定及其抗氧化机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. [YANG Z Y. Separation and identification of tea (black tea) and tea (*Camellia sinensis*) flower polyphenols and their antioxidant mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.]

[17] 屠幼英, 杨子银, 东方. 红茶中多酚类物质的抗氧化机制及其构效关系[J]. 中草药, 2007, 38(10): 1581−1585. [TU Y Y, YANG Z Y, DONG F. Antioxidant mechanism of polyphenols in black tea and their constitutive relationship[J]. Chinese Herbal Medicine, 2007, 38(10): 1581−1585.]

[18] GIRARDI D M, PACÍFICO J P M, AMORIM F, et al. Immunotherapy and targeted therapy for hepatocellular carcinoma: A literature review and treatment perspectives[J]. Pharmaceuticals, 2020, 14(1): 28−38.

[19] 罗奕凡, 禹双双, 陈勤操, 等. 茶黄素的生理功效研究进展[J]. 茶叶通讯, 2015, 42(4): 3−8. [LUO Y F, YU S S, CHEN Q C, et al. Research progress on physiological efficacy of theaflavins[J]. Tea Communication, 2015, 42(4): 3−8.]

[20] ZHANG L, LI W, HOU Z Y, et al. Theaflavin-3, 3-digallate ameliorates collagen-induced arthritis through regulation of autophagy and macrophage polarization[J]. Journal of Inflammation Research, 2023, 2023: 109−126.

[21] 张晨. 茶多酚和茶黄素抑制 RAW264.7 细胞炎症因子表达的机制研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023. [ZHANG C. Mechanism study of tea polyphenols and theaflavins inhibiting the expression of inflammatory factors in RAW264.7 cells[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023.]

[22] GAO G R, YANG S, HOU Z Y, et al. Theaflavin-3, 3′-Digallate promotes the formation of osteoblasts under inflammatory environment and increases the bone mass of ovariectomized mice[J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 648969.

[23] 陆铭淏. 茶黄素-3, 3'-双没食子酸酯对骨关节炎的保护作用及机制研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2021. [LU M. H. Protective effect and mechanism of theaflavin-3, 3'-bis-gallate on osteoarthritis[D]. Suzhou, Soochow University, 2021.]

[24] SARKAR D, BOSE K S, ROY S, et al. Theaflavin enriched black tea extract alleviates diabetic nephropathy by suppressing hyperglycaemia-mediated oxidative stress and inflammation in streptozotocin-induced rats[J]. The Natural Products Journal, 2021, 11(4): 512−521.

[25] LI B R, FU L, RUCHIA K, et al. Theaflavins prevent the onset of diabetes through ameliorating glucose tolerance mediated by promoted incretin secretion in spontaneous diabetic Torii rats[J]. Journal of Functional Foods, 2021, 86: 104702.

[26] WANG J, QIN Y, JIANG J J, et al. The effect of theaflavins on the gut microbiome and metabolites in diabetic mice[J]. Foods, 2023, 12(20): 3865.

[27] 朱樱, 蔡为荣, 李晶晶. 茶黄素的分离纯化及降糖活性研究[J]. 安徽工程大学学报, 2022, 37(5): 14−22. [ZHU Y, CAI W R, LI J J. Study on the isolation and purification of theaflavins and hypoglycaemic activity[J]. Journal of Anhui University of Engineering, 2022, 37(5): 14−22.]

[28] 江晶晶. 茶黄素对糖尿病小鼠肾脏损伤及肠道菌群紊乱的作用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023. [JIANG J J. Study on the effects of theaflavins on kidney injury and intestinal flora disorders in diabetic mice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.]

[29] 周启蒙, 赵晓悦, 王海港, 等. 茶黄素降低高尿酸血症小鼠血

清尿酸的作用与机制探究[J]. 中国新药杂志, 2018, 27(14): 1631−1638. [ZHOU Q M, ZHAO X Y, WANG H B, et al. Exploration of the role and mechanism of theaflavin in lowering serum uric acid in hyperuricemic mice[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2018, 27(14): 1631−1638.]

[30] 刘如意, 叶俭慧, 石萌. 茶色素用于心脑血管疾病药物开发可能性的探讨[J]. 茶叶, 2022, 48(3): 158−163. [LIU R Y, YE J H, SHI M. Exploration of the possibility of tea pigments for drug development in cardiovascular diseases[J]. Tea, 2022, 48(3): 158−163.]

[31] 石萌萌, 黄锐, 黄子乐, 等. 茶黄素对 oxLDL 诱导的 THP-1 巨噬细胞泡沫化和氧化应激的影响[J]. 中国动脉硬化杂志, 2024, 32(9): 747−755. [SHI M M, HUANG R, HUANG Z L, et al. Effects of theaflavins on oxLDL-induced THP-1 macrophage foaming and oxidative stress[J]. Chinese Journal of Atherosclerosis, 2024, 32(9): 747−755.]

[32] 邓志慧. 茶黄素双没食子酸酯对高糖诱导的血管内皮损伤及炎症反应的保护作用及机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022. [DENG Z H. Protective effect and mechanism of theaflavin bisgallate on high glucose-induced vascular endothelial injury and inflammatory response[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.]

[33] 韩旭, 朱萍, 柳旋, 等. 茶黄素对新生大鼠心肌缺血保护作用的机制研究[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2023, 21(19): 3521−3526−3539. [HAN X, ZHU P, LIU N, et al. Mechanism study on the protective effect of theaflavins on myocardial ischaemia in neonatal rats[J]. Journal of Integrated Cardiovascular and Cerebrovascular Diseases of Chinese and Western Medicine, 2023, 21(19): 3521−3526−3539.]

[34] 周辉. 茶黄素双没食子酸酯对 H9c2 细胞病理性心肌肥厚的预防作用及分子机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. [ZHOU H. Preventive effect and molecular mechanism of theaflavin bis-gallate on pathological cardiac hypertrophy in H9c2 cells[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.]

[35] 司马明威. 茶黄素-3'-没食子酸酯(TF2b)抗甲型 H1N1 流感病毒活性及其作用机制研究[D]. 长春: 长春中医药大学, 2023. [SIMA M W. Study on the anti-influenza A (H1N1) virus activity of theaflavin-3'-gallate (TF2b) and its mechanism of action[D]. Changchun: Changchun University of Traditional Chinese Medicine, 2023.]

[36] DENG X W, LÜ C X, WANG T C, et al. Antiviral activity of theaflavins against Zika virus *in vivo* and *in vitro*[J]. Journal of Infection and Chemotherapy: Official Journal of the Japan Society of Chemotherapy, 2023, 30(6): 571−578.

[37] WANG J Y, JI J Z, ZHONG Y C, et al. Construction of recombinant fluorescent LSDV for high-throughput screening of antiviral drugs[J]. Veterinary Research, 2024, 55(1): 33.

[38] 田朋, 谢维娜, 丁红研, 等. 茶黄素通过磷脂酰肌醇 3-激酶/蛋白激酶 B 信号通路促进小鼠乳腺肿瘤细胞凋亡[J]. 动物营养学报, 2023, 35(2): 1288−1297. [TIAN P, XIE W N, DING H Y, et al. Theaflavins promote apoptosis of mouse mammary tumour cells through phosphatidylinositol 3-kinase/protein kinase B signalling pathway[J]. Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(2): 1288−1297.]

[39] SUR S, PAL D, MANDAL S, et al. Tea polyphenols epigallocatechin gallete and theaflavin restrict mouse liver carcinogenesis through modulation of self-renewal Wnt and hedgehog pathways[J]. J Nutr Biochem, 2016, 27: 32−42.

[40] 王专, 韦武均, 任珍珍, 等. 茶黄素(TF_1)人肝癌 Bel-7402 细胞的抑制作用及机制研究[J]. 茶叶科学, 2023, 43(2): 287−296. [WANG Z, WEI W J, REN Z Z, et al. Inhibitory effect and mechanism of theaflavin (TF_1) on human hepatocellular carcinoma Bel-7402 cells[J]. Tea Science, 2023, 43(2): 287−296.]

[41] O'NEILL E J, TERMINI D, ALBANO A, et al. Anti-cancer properties of theaflavins[J]. Molecules, 2021, 26(4): 987.

[42] SANG S M, LAMBERT J D, TIAN S Y, et al. Enzymatic synthesis of tea theaflavin derivatives and their anti-inflammatory and cytotoxic activities[J]. Bioorgan Med Chem, 2004, 12(2): 459−467.

[43] 谭怡青. 多酚类化合物茶黄素与焦棓酸对猪链球菌的抑制效果评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. [TAN Y Q. Evaluation of the inhibitory effects of polyphenolic compounds theaflavins and pyrogallic acid on *Streptococcus suis*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.]

[44] WANG S, WANG Y, WANG Y, et al. Theaflavin-3,3′-digallate suppresses biofilm formation, acid production, and acid tolerance in streptococcus mutans by targeting virulence factors[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1705.

[45] SATO J, TOMITA A, SONODA T, et al. Theaflavin and its derivatives exert antibacterial action against Bacillus coagulans through adsorption to cell surface phospholipids[J]. Journal of Applied Microbiology, 2022, 133(3): 1781−1790.

[46] RÉUS G Z, FRIES G R, STERTZ L, et al. The role of inflammation and microglial activation in the pathophysiology of psychiatric disorders[J]. Neuroscience, 2015, 300: 141−154.

[47] ANO Y, OHYA R, KITA M, et al. Theaflavins improve memory impairment and depression-like behavior by regulating microglial activation[J]. Molecules, 2019, 24(3): 467.

[48] 覃玉娜, 杜金杰, 吴新惠, 等. 茶对焦虑与抑郁的缓解作用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(21): 214−219. [QIN Y N, DU J J, WU X H, et al. Research progress on the alleviating effect of tea on anxiety and depression[J]. Food Research and Development, 2023, 44(21): 214−219.]

[49] EWA S, JERZY J. Theaflavin digallate inactivates plasminogen activator inhibitor: could tea help in Alzheimer's disease and obesity[J]. International Journal of Molecular Medicine, 2010, 26(1): 45−50.

[50] ZHOU C, ZHANG W Y, LIN H, et al. Effect of theaflavin-3,3′-digallate on leptin-deficient induced nonalcoholic fatty liver disease might be related to lipid metabolism regulated by the Fads1/PPARδ/Fabp4 axis and gut microbiota[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 925264.

[51] 张淦, 付红娟, 邹奕昕, 等. 茶黄素双没食子酸酯对高脂饮食诱导小鼠肝脏损伤的影响及机制探讨[J]. 陆军军医大学学报, 2022, 44(2): 147−154. [ZHANG G, FU H J, ZOU Y X, et al. Effects and mechanisms of theaflavin bis-gallate on high-fat diet-induced liver injury in mice[J]. Journal of Army Military Medical University, 2022, 44(2): 147−154.]

[52] 刘妍, 张鲁榕, 吴亮宇, 等. 茶黄素、茶褐素对新慢性高尿酸血症模型小鼠尿酸含量的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 312−316,329. [LIU Y, ZHANG L R, WU L Y, et al. Effects of theaflavin and theaflavin on uric acid content in mice with new chronic hyperuricaemia model[J]. Food Industry Science and Technology, 2020, 41(2): 312−316,329.]

[53] WANG J, JIANG J J, ZHAO C Y, et al. The protective effect of Theaflavins on the kidney of mice with Type II diabetes mellitus[J]. Nutrients, 2022, 15(1): 201−201.

[54] ZHAN J F, CAO H J, HU T, et al. Efficient preparation of

black tea extract (BTE) with the high content of Theaflavin mono- and digallates and the protective effects of BTE on CCl_4-induced rat liver and renal injury[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(21): 5938−5947.
[55] LIU C W, LIU A L, ZHOU J H, et al. Role and mechanism of Theaflavins in regulating skeletal muscle inflammation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(41): 13233−13250.
[56] XIAO Y Z, YANG M , XIAO Y, et al. Reducing hypothalamic stem cell senescence protects against aging-associated physiological decline[J]. Cell Metabolism, 2020, 31(3): 534−548.
[57] LI M Q, ZHANG C, XIAO X, et al. Theaflavins in black tea mitigate aging-associated cognitive dysfunction via the microbiota-gut-brain axis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(5): 2356−2369.
[58] CAI Q S, JI S M, LI M W, et al. Theaflavin-regulated imd condensates control drosophila intestinal homeostasis and aging[J]. iScience, 2021, 24(3): 102150−102150.
[59] UCHIYAMA S, TANIGUCHI Y, SAKA A, et al. Prevention of diet-induced obesity by dietary black tea polyphenols extract *in vitro* and *in vivo*[J]. Nutrition, 2010, 27(3): 287-292.
[60] SHI M, LU Y T, WU J L, et al. Beneficial effects of Theaflavins on metabolic syndrome: from molecular evidence to gut microbiome[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(14): 7595.
[61] CAI X Q, LIU Z H, DONG X, et al. Hypoglycemic and lipid lowering effects of theaflavins in high-fat diet-induced obese mice[J]. Food Function, 2021, 12(20): 6034.
[62] 张盛, 唐梦歌, 刘仲华, 等. 茶黄素单体改善酒精性肝损伤及其应用[P]. 湖南省: CN202310983743.4, 2024-02-27. [ZHANG S, TANG M G, LIU Z H, et al. Improvement of alcoholic liver injury by theaflavin monomer and its application[P]. Hunan Province: CN202310983743.4, 2024-02-27.]
[63] 刘子龙, 滕建造, 刘德时. 增强骨骼肌运动特性的茶黄素营养制剂及其应用[P]. 湖南省: CN114468293A, 2022-05-13. [LIU Z L, TENG J C, LIU D S. Nutritional preparation of theaflavins for enhancing the motor properties of skeletal muscle and its application[P]. Hunan Province: CN114468293A, 2022-05-13.]
[64] 徐燕, 董旭, 陈小兵, 等. 促进伤口愈合的茶黄素组合物及其制备方法、应用[P]. 安徽省: CN113577055B, 2022-10-04. [XU Y, DONG X, CHEN X B, et al. Theaflavin compositions for promoting wound healing and their preparation methods, applications [P]. Anhui Province: CN113577055B, 2022-10-04.]
[65] 王世宣, 张金金, 陈骞. 茶黄素在制备卵巢功能保护药物方面的应用[P]. 湖北省: CN112494479B, 2022-06-21. [WANG S X, ZHANG J J, CHEN Q. Application of theaflavins in the preparation of ovarian function-protecting drugs[P]. Hubei Province: CN112494479B, 2022-06-21.]
[66] 毛俊龙. 茶黄素对大黄鱼贮藏过程中品质特性的影响作用[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021. [MAO J L. The role of theaflavins in influencing the quality characteristics of rhubarb fish during storage[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.]
[67] WU D, MEI S, DUAN R, et al. How black tea pigment theaflavin dyes chicken eggs: Binding affinity study of theaflavin with ovalbumin[J]. Food Chemistry, 2020, 303(C): 125407.
[68] 左小博, 杨秀芳, 孔俊豪, 等. 一种稳态化茶黄素肉制品护色抗氧化剂及其制备方法[P]. 浙江省: CN114391574A, 2022-04-26. [ZUO X B, YANG X F, KONG J H, et al. A stabilized theaflavin meat colour protection antioxidant and its preparation method[P]. Zhejiang Province: CN114391574A, 2022-04-26.]
[69] LONG P P, RAKARIYATHAM K, HO C T, et al. Thearubigins: Formation, structure, health benefit and sensory property[J]. Trends in Food Science Technology, 2023, 133: 37−48.
[70] 任雪音, 刘剑宏, 浦平南, 等. 一种抗糖化美白的茶黄素组合物及其应用[P]. 江苏省: CN113545484A, 2021-10-26. [REN X Y, LIU J H, PU P N, et al. A theaflavin composition for anti-glycation whitening and its application[P]. Jiangsu Province: CN113545484A, 2021-10-26.]
[71] 刘德和, 刘剑宏, 浦平南, 等. 一种有祛痘消炎作用的茶黄素组合物[P]. 江苏省: CN202311725107.8, 2024-03-12. [LIU D H, LIU J H, PU P N, et al. A theaflavin composition with antiacne and anti-inflammatory effects[P]. Jiangsu Province: CN202311725107.8, 2024-03-12.]
[72] 梁慧玲, 杨秀芳, 张士康, 等. 茶黄素的应用、含茶黄素的护肤品[P]. 浙江省: CN201310025119. X, 2013-05-08. [LIANG H L, YANG X F, ZHANG S K, et al. Application of theaflavins, skin care products containing theaflavins[P]. Zhejiang Province: CN201310025119. X, 2013-05-08.]
[73] LI S M, REN X Y, LIU J H, et al. Oral care composition containing theaflavin extract[P]. WO2014074753, 2014-05-15.
[74] 左小博, 孔俊豪, 苏小琴, 等. 一种包载化茶黄素超分子体及含有其的抗氧化缓释型保鲜水凝胶及其制备方法与应用[P]. 浙江省: CN202310830081.7, 2023-10-27. [ZUO X B, KONG J H, SU X Q, et al. An encapsulated theaflavin supramolecular body and antioxidant slow-release freshness preservation hydrogel containing it and its preparation method and application[P]. Zhejiang Province: CN202310830081.7, 2023-10-27.]
[75] 陆裕肖, 王永超, 华均超, 等. 一种快速疏通肠道的淡水鱼饲料及其制备方法[P]. 安徽省: CN112314779A, 2021-02-05. [LU Y X, WANG Y C, HUA J C, et al. A kind of freshwater fish feed for rapid intestinal evacuation and its preparation method[P]. Anhui Province: CN112314779A, 2021-02-05.]
[76] BRAIMAH, HARUNA, PICKETT, et al. Pest attractantcompostition scomprising theaspirane[P]. EP3576536, 2023-03-29.
[77] 卢琴, 罗青平, 叶飞, 等. 茶黄素在制备抗禽致病菌药物中的应用[P]. 湖北省: CN114288286A, 2022-04-08. [LU Q, LUO Q P, YE F, et al. Application of theaflavins in the preparation of antipathogenic bacteria drugs for poultry[P]. Hubei Province: CN114288286A, 2022-04-08.]
[78] 袁斌. 茶黄素的酶促氧化制备与纯化技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020. [YUAN B. Research on the preparation and purification technology of the enzymatic oxidation of theaflavins [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020.]
[79] ZHAO X , YAN F , LI S X, et al. A systematic review of tea pigments: Prevention of major diseases, protection of organs, and potential mechanisms and applications[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(11): 6830−6844.
[80] CHEN J Z, ZHENG Y H, GONG S H, et al. Mechanisms of theaflavins against gout and strategies for improving the bioavailability[J]. Phytomedicine: International Journal of Phytotherapy and Phytopharmacology, 2023, 114: 154782.
[81] 郑艳超, 於天, 郑志刚, 等. 茶黄素生物活性与开发应用的研究进展[J]. 中草药, 2020, 51(23): 6095−6101. [ZHENG Y C, YU T, ZHENG Z G, et al. Research progress on bioactivity and developmental application of theaflavins[J]. Chinese Herbal Medicine, 2020, 51(23): 6095−6101.]