

抹茶：历史、健康益处和潜在风险

李文萱¹, 方奇挺¹, 施秀姣², 胡美娟³, 叶俭慧^{1*}

(1. 浙江大学茶叶研究所, 浙江杭州 310058) (2. 金华市农业农村生态与能源技术推广站, 浙江金华 321000)

(3. 浙江华茗园茶业有限公司, 浙江永康 321300)

摘要: 抹茶是一种由茶叶加工而成的粉末, 具有独特的绿茶风味和色泽。抹茶不仅拥有传统茶叶的健康功效, 还具备食品加工特性, 已被广泛应用于饮料和食品生产。该文综述了抹茶的发展历史、理化性质以及潜在的健康功效, 如抗炎、提高认知能力、减轻代谢综合征症状等。此外, 从提取方法和检测技术方面探讨了抹茶因全价利用茶叶而带来的潜在塑化剂风险, 提出针对茶产品建立稳定、可靠的邻苯二甲酸酯分析方法是实现抹茶塑化剂风险评估和有效控制的必要前提。

关键词: 抹茶; 发展历史; 理化性质; 健康功效; 邻苯二甲酸酯

文章编号: 1673-9078(2024)12-443-455

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.12.1414

Matcha: History, Health Benefits and Potential Risks

LI Wenxuan¹, FANG Qiting¹, SHI Xiujiao², HU Meijuan³, YE Jianhui^{1*}

(1. Zhejiang University Tea Research Institute, Hangzhou 310058, China) (2. Jinhua Agriculture and Rural Ecology and Energy Technology Extension Station, Jinhua 321000, China) (3. Zhejiang Hua's Tea Co. Ltd., Yongkang 321300, China)

Abstract: Matcha is a powder made from tea leaves and has a unique green tea flavor and color. Matcha has been widely used in beverage and food production for its health benefits and food processing properties. This study reviews the development history, physicochemical properties, and potential health benefits of matcha, including anti-inflammatory effects, promotion of cognitive improvement, and alleviation of metabolic syndrome symptoms. The potential plasticizing risks of matcha upon full utilization of tea leaves were discussed relative to each extraction method and detection technique. This discussion suggests that a stable and reliable method for analyzing phthalates in tea products must be developed to assess the associated risks and effectively control plasticizers in matcha.

Key words: matcha; development history; physical and chemical properties; health effect; phthalates

引文格式:

李文萱, 方奇挺, 施秀姣, 等. 抹茶: 历史、健康益处和潜在风险[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 443-455.

LI Wenxuan, FANG Qiting, SHI Xiujiao, et al. Matcha: History, health benefits and potential risks [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 443-455.

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目 (LZ24C160004); 金华市拟立重大(重点)科技项目 (2022-2-002); 浙江省“三农九方”科技协作计划 (2024SNJF028)

作者简介: 李文萱 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶树品质成分生物合成及调控, E-mail: 22316203@zju.edu.cn

通讯作者: 叶俭慧 (1983-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 茶树品质成分生物合成及调控, E-mail: jianhuiye@zju.edu.cn

近年来, 茶产业不断发展, 茶叶产量大幅度提高。茶资源综合利用、多元化茶产品开发是促进茶产业发展、拓展茶应用领域的重要策略。超微绿茶粉是一种理想的食品配料或添加剂, 它除了能为食品增添明亮的绿色和特殊的绿茶风味外, 还能提高食品的营养价值和潜在的健康功效。抹茶是最高等级的超微绿茶粉, 具有粒径小 ($\leq 18 \mu\text{m}$)、细度高、

绿色鲜艳的特点^[1,2]。与普通绿茶粉不同,抹茶对鲜叶原料的要求更高,需要在采前进行 14~20 d 左右覆盖遮阴处理。采前覆盖遮阴是生产抹茶的关键农艺措施之一,可以提高茶叶叶绿素、茶氨酸和咖啡碱的含量,降低苦涩味多酚含量,形成抹茶色绿、鲜爽、苦涩味低的品质特征^[3]。鲜叶收获后经贮青、切叶、杀青、冷却、初烘、梗叶分离、复烘后,碾磨成粉末。

本文综述了抹茶的发展历史、基本理化性质,罗列了抹茶的主要健康益处^[4],包括抗炎、提高认知能力、减轻精神压力、缓解代谢综合征症状、抗肿瘤等功效。此外,基于已报道的茶产品塑化剂提取方法和检测技术评估了茶叶全价利用可能带来的塑化剂风险,提出建立完善、稳定的茶产品塑化剂检测方法是有效控制抹茶塑化剂风险、开发相应减控措施的先决条件。

1 抹茶的发展历史

人类研磨茶叶的饮用方式已有很长的历史。根据中国历史记录,抹茶在中国古代被称为末茶,这种饮茶方式兴起于唐朝,繁盛于宋代^[5],而自明朝开始因冲泡饮茶方式开始流行,末茶逐步退出当时的社会^[5]。唐朝期间,茶道由中国传入日本,并于 14~16 世纪在日本广泛传播^[6]。日本镰仓时代的荣西和尚把末茶和他在中国的游学经历撰写成《吃茶养生记》献给了将军源实朝^[7]。经过数百年来在茶树品种培育、栽培措施开发、加工技术和食品应用等方面的研究,抹茶产业链已成功构建,并在日本茶业中发挥重要作用,尤其是传统茶道和抹茶食品。在 20 世纪末,中国从日本引进了抹茶生产工艺及其茶园田间管理技术。“抹茶”一词音译自日语。随着抹茶产品在中国广受欢迎,国人们也重拾了“末茶”记忆^[5]。图 1 为抹茶发展的时间轴。

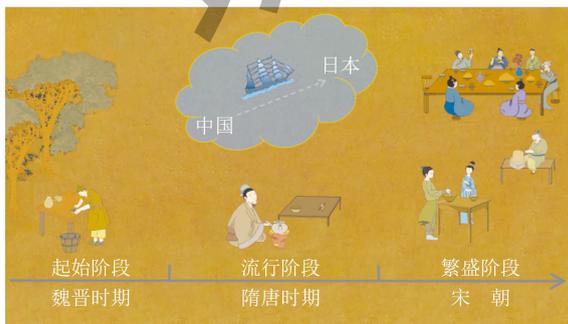


图 1 抹茶发展的时间轴

Fig.1 The history timeline of matcha development

2 抹茶的基本理化性质

2.1 物理性质

超微粉末的物理性质主要包括颜色、粒度、分散性和流动性^[8]。颜色是抹茶的一项重要质量指标,可直接影响终端产品的色泽。通常,消费者更喜欢明亮的绿色,而不是暗淡的黄绿色。粒径是衡量抹茶品质的关键物理指标,高品质的抹茶颗粒更细,这有利于其在食品中的应用,提高抗氧化活性^[9,10]。粒径可用于抹茶样品的分级,受到研磨时间和研磨方式的影响^[9,11,12]。随着研磨时间从 20 min 增加到 120 min,抹茶平均粒径从 32.5 μm 减小到 6.3 μm ,研磨 30~50 min 获得适宜的粒径 18 μm ^[9]。气流研磨抹茶的粒径范围较小,说明气流研磨所制抹茶的颗粒较小且更均匀^[12]。抹茶的物理性质受到研磨方式的影响^[9]。当颗粒变小,超微粉末的溶解度、分散性、堆积密度、流动性和表面积增加,粉末的表面化学和热性能发生改变^[8]。

2.2 化学性质

表 1 绿茶和抹茶主要品质成分含量

Table 1 The main quality-related components of green tea and matcha

物质种类	绿茶/(mg/g)	抹茶/(mg/g)	文献	
儿茶素	EC	16.55~52.43	2.10~15.40	[14,15,25]
	ECG	2.78~47.90	7.36~27.96	
	EGC	10.82~42.93	6.42~54.22	
	EGCG	50.24~156.59	47.69~87.46	
生物碱	咖啡碱	4.6~35.4	14.25~65.80	[14,15,26]
	茶氨酸	0.69~3.03	3.53~44.65	[14,27-29]
氨基酸	谷氨酸	1.43~2.61	1.50~9.63	
多糖	可溶性糖	26.4~40.1	15.70~71.40	[17,20,30,31]
维生素	维生素 C	1.3~1.53	1.63~3.98	[22,23]

抹茶的化学成分组成与绿茶相近,主要包括酚类(主要是儿茶素类化合物)、生物碱(主要是咖啡碱)、氨基酸和多糖^[13]。表 1 列举了绿茶和抹茶主要品质成分含量。咖啡碱是抹茶重要的苦味物质,已见报道的咖啡碱含量为 14.25~65.80 mg/g ^[14,15]。福林酚法测得的抹茶多酚含量为 84.50~229.60 mg/g 等量的没食子酸,其中儿茶素类化合物是主要的苦涩味成分,主要包括表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG, 47.69~87.46 mg/g)、表没食子儿茶素(EGC,

6.42~54.22 mg/g)、表儿茶素 (EC, 2.10~15.40 mg/g) 和表儿茶素没食子酸酯 (ECG, 7.36~27.96 mg/g) 等, 其中 EGCG 是含量最高的儿茶素组分^[14-19]。游离氨基酸 (15.30~133.10 mg/g 等量的茶氨酸) 是绿茶鲜味的主要来源^[19,20]。抹茶中主要的游离氨基酸包括茶氨酸 (3.53~44.65 mg/g)、谷氨酸 (1.50~9.63 mg/g)、天冬氨酸 (1.50~9.63 mg/g) 和苏氨酸 (0.49~1.30 mg/g)^[14,20,21]。蒽酮法测得抹茶可溶性糖含量为 15.70~71.40 mg/g 等量的葡萄糖^[17,20]。整体而言, 抹茶主要的儿茶素类化合物含量与绿茶相当, 而咖啡碱、茶氨酸、维生素 C 含量相对较高。抹茶与绿茶化学组成的差异主要归因于所用鲜叶原料 (采前因素) 和加工技术 (采后因素) 的差异。采前因素涉及茶树品种和栽培方式的影响。覆盖遮阴可以明显提高茶树鲜叶咖啡碱和茶氨酸的含量。已报道的抹茶维生素 C 含量为 1.63~3.98 mg/g^[22], 而绿茶中维生素 C 的含量为 1.3~1.53 mg/g, 可见, 抹茶的维生素 C 含量显著高于普通绿茶^[23]。与普通茶叶相比较, 抹茶由于粉末的形态其可溶性糖更容易被提取。茶粉含有不溶性纤维, 抹茶是不溶性膳食纤维的来源, 含有质量分数为 38.5% 的纤维素, 而去除抹茶的可溶性成分后, 残留物中的纤维素质量分数增加到 85.3%^[24]。然而,

关于不同抹茶产品的物理性质 (如分散性、堆积密度、流动性和表面积), 以及茶叶纤维的存在形式及其与酚类等其他成分的相互作用, 仍需进一步开展研究。

2.3 理化指标检测和抹茶质量评价方法

抹茶的质量取决于其物理性质和品质成分组成。建立完善的评价体系是量化抹茶质量的重要手段。在抹茶理化指标中, 粒径、酚氨比与其感官品质密切相关^[19]。激光衍射技术可用于测量抹茶粒径^[32], 高效液相色谱法 (HPLC) 和分光光度法可用于检测抹茶中酚类物质和游离氨基酸的含量^[33,34]。可见光-近红外 (Vis-NIR) 光谱技术亦可用于检测抹茶的化学成分, 如酚类物质、游离氨基酸和咖啡碱的含量^[35-37]。Wu 等^[38]采用 Vis-NIR 光谱技术结合多变量分析, 提出了快速测定抹茶粒径和酚氨比的 ICPA-CARS-PLS 模型。

3 抹茶的保健功效

区别于以茶鲜叶为原料的绿茶, 抹茶由于其化学成分、形态和生物利用度的不同, 在生理功效方面或有所差异^[39,40]。图 2 列举了抹茶的潜在健康功效。



图 2 抹茶的潜在健康功效

Fig.2 The potential health benefits of matcha

3.1 抗炎作用

炎症与许多疾病的发生、发展有关,例如癌症^[41]、炎症性肠病^[42]、肥胖等^[43]。活性氧(ROS)在炎症性疾病进程中发挥重要作用^[44],诱导氧化应激^[45],调节炎症因子水平,如细胞因子、生长因子和类二十碳烷^[46]。细胞和动物实验结果表明,抹茶可降低促炎细胞因子水平,如肿瘤坏死因子(TNF α)、白细胞介素 IL-1 β 、IL-6、IL-13 和干扰素 γ (IFN γ),提高抗炎细胞因子 IL-10 水平^[15,47]。在曼氏血吸虫感染小鼠实验中,抹茶组小鼠血清的 TNF α 、IFN γ 和 IL-13 水平约为感染对照组的一半,而 IL-10 水平约为受感染对照组水平的两倍^[47]。动物实验表明摄入抹茶可影响炎症相关蛋白丰度,如肿瘤坏死因子受体 1 (TNFR1)、一氧化氮合酶(iNOS)和环氧合酶-2 (COX-2)^[48]。此外,抹茶亦能调节机体的抗氧化体系,感染曼氏血吸虫的小鼠在摄入螺旋藻和抹茶后,血清中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)活力升高^[47]。摄入抹茶提取物可显著减少机体病灶部位炎症细胞因子的释放、调节 JAK2 和 STAT3 的表达和磷酸化^[49]。

3.2 提高认知能力

认知表现是指大脑处理、保留和回忆信息的能力,有可能受到糖尿病、高胆固醇血症、长期药物治疗、冠心病和肥胖等疾病的损害^[50]。行为测试,如 Y 迷宫、被动回避和 Morris 水迷宫测试,可用于评估动物的认知功能,包括空间学习和记忆功能^[48,51]。认知测验和蒙特利尔认知评估(MoCA)用于评估临床或医疗保健病例中患者的神经认知状态^[52-54]。表征认知功能的生物标志物有乙酰胆碱酯酶(AChE)、胆碱酰基转移酶(ChAT)、高度磷酸化的 tau 蛋白(p-tau)、 β -淀粉样蛋白(A β)、脑源性神经营养因子(BDNF)和胰岛素降解酶(IDE),以及炎症相关的生物标志物^[48,51]。炎症涉及与脑组织中 ROS 产生和线粒体损伤相关的认知功能障碍^[51]。在高脂饮食(HFD)诱导的雄性 C57BL/6 小鼠认知缺陷模型中,抹茶灌胃处理降低了 AChE、p-tau 和 A β 的蛋白质丰度,提高了 ChAT、BDNF 和 IDE 蛋白质丰度,表明抹茶对机体的大脑胆碱能系统和认知水平有改善作用^[48]。抹茶中富含茶氨酸,而茶氨酸对应激性脑萎缩具有预防作用^[55];抹茶富含的维生素 K 和叶黄素增强了血管生成力,阻止了

抹茶喂养小鼠的皮质毛细血管老化,有助于维持大脑功能^[56]。此外,抹茶还可以通过调节谷胱甘肽 S-转移酶 Mu7、钠和氯化物依赖性 GABA 转运蛋白 3 等蛋白质丰度来延缓衰老,改善认知障碍^[57]。根据 Cognitrax 测评结果,不同年龄段人群在压力状态期间或之后摄入抹茶其认知能力均有所改善^[52,54],而在相同的测试条件下,抹茶组比咖啡碱组和安慰剂组表现更好^[52,58]。“菌群-肠-脑轴”被认为是茶多酚间接作用于中枢神经系统的重要途径^[59]。抹茶对人们认知功能的影响与受试群体的性别、年龄、习惯、习俗有关。

3.3 减压作用

压力是机体面对威胁、挑战、身体或心理障碍所起的生理或生物反应,可能会带来一些不良反应,如高血压、免疫力下降、生育问题等。肾上腺是对压力敏感的器官^[60],唾液 α -淀粉酶活力被认为是与压力有关的生物标志物^[61]。茶氨酸具有减轻焦虑的作用,抹茶的减压作用可归因于其含有较高水平的茶氨酸^[14,18]。在基于地域负荷的应激模型中,在 33 mg/kg 的剂量下抹茶组雄性 ddY 小鼠的肾上腺肥大被显著抑制^[14]。开阔场地和高架迷宫测试结果显示,摄入抹茶 2 周能减少小鼠的焦虑行为^[62]。抹茶可通过激活多巴胺 D1 受体而减少健康 C57BL/6J 小鼠的焦虑^[63,64]。此外,抹茶富含的咖啡碱可通过抑制腺苷受体来增加多巴胺的释放^[65],而茶氨酸可以增加大脑多巴胺和 GABA 的释放^[66,67]。含有抹茶的食物具有类似的减压作用^[61]。

3.4 减轻代谢综合征症状

肥胖会带来许多代谢综合征症状,涉及血糖、血红蛋白 A1c、脂质(如总胆固醇和甘油三酯)、细胞因子(如 IL-6 和 IL-10),氧化应激生物标志物如丙二醛(MDA)和 SOD 等指标^[24,68]。表 2 列举了抹茶减轻代谢综合征症状的功效。抹茶富含茶多酚和膳食纤维,具有潜在的减肥效果。动物实验表明,HFD 小鼠每天摄入抹茶可以减轻体重,改善脂肪肝、高血糖、高血脂情况,调节肠道微生物群落^[24,69]。在饲喂抹茶的 HFD 动物体内,检测到低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)水平降低^[24,70]。饲喂抹茶可以下调 HFD 小鼠肝脏组织中葡萄糖和脂质代谢相关基因的表达,如 CCAAT/增强子结合蛋白- α (C/EBP- α)、分化簇 36 (CD36) 和乙酰辅酶 A 乙

酰转移酶 2 (ACAT2)^[69]。此外,膳食中添加质量分数为 1% 的抹茶, HFD 小鼠肝脏组织中丙氨酸氨基转移酶 (ALT) 和天冬氨酸氨基转移酶 (AST) 活力下降, 通过抑制 TLR4/MyD88 信号通路改善肥胖相关的脂肪肝损伤和炎症^[15]。在食用抹茶 12 周后, 受试者的平均空腹血糖水平从 91.0 mg/dL 下降至 85.2 mg/dL, 而对照组没有显著变化^[68]。值得注意的是, 抹茶的水提取物和不溶性成分能有效抑制 HFD 小鼠血清中脂质和葡萄糖水平的升高^[24], 这可归因于不溶性纤维和纤维结合酚类物质的生物活性。据报道, 微粉化茶膳食纤维能改善高胆固醇饮食小鼠的血脂和脂肪肝症状^[71]。此外, 富含纤维的基质能有效调节机体的肠道微生物群落^[72], 富集生产短链脂肪酸 (SCFA) 的拟普雷沃氏菌 (*Alloprevotella*) 和益生菌嗜黏蛋白阿克曼氏菌 (*Akkermansiamuciniphila*)^[69]。因此, 抹茶是一款理想的减肥辅助食品。

II 型糖尿病的发生与肥胖有关, 受到遗传因素、生活方式和过量饮食的影响。糖尿病会带来体重减轻、高血糖、长期炎症等健康问题, 并会导致肝脏和肾脏等脏器损伤, 以及胃肠道微生物群失调^[73]。酚类和碳水化合物成分可通过调节肠道微生物菌群发挥降血糖功效^[73-76]。相较于绿茶, 抹茶的粉末形态使其酚类物质提取率增加, 因而具有更高的抗氧化活力^[25], 而多酚是抹茶中抑制淀粉消化的主要功能成分^[77]。据报道, 抹茶比含有等量儿茶素类的绿茶提取物能更有效降低 db/db 小鼠的血糖水平^[75], 这说明儿茶素类以外的化学成分也可能具有降血糖的作用, 例如茶多糖^[74]和茶纤维^[76]。Morishima 等^[78]研究表明, 食用抹茶粉两周可影响人粪便微生物群落组成, 具体表现为有益的粪球菌增加, 潜在的致病性梭杆菌减少。含抹茶的玉米淀粉饲料可调节糖尿病小鼠的肠道微生物群落组成, 红螯菌科、乳酸杆菌科、普雷沃氏菌科和双歧杆菌科增加, 而拟杆菌科、瘤胃球菌科、螺旋杆菌科和肠杆菌科减少^[73]。

3.5 抗肿瘤作用

扩散是癌症发展的重要阶段。抑制癌细胞增殖能起到明显的抗肿瘤作用。抹茶提取物的细胞毒性能抑制视网膜母细胞瘤细胞的生长^[79], 对三阴性乳腺癌 TNBC 细胞具有剂量效应的抑制增殖作

用^[80]。抹茶的水提取物和乙醇提取物均可抑制阳性乳腺癌细胞 MCF-7 和 T47D 以及阴性乳腺癌细胞 MDA-MB-23 的增殖^[81,82]。此外, 抹茶的水提取物可以通过降低线粒体代谢和糖酵解活力, 使乳腺癌细胞 MCF7 处于代谢静止状态^[83]。

4 茶叶全价利用开发及塑化剂潜在风险控制

4.1 抹茶产品开发

抹茶在食品中的应用是抹茶的主要消费渠道。抹茶可以掺入乳制品 (如慕斯、酸奶)、谷类食品 (如面条、囊、馒头)、烘焙食品 (如曲奇、面包)、饮料 (如抹茶拿铁、优酪乳) 中, 也可以作为微胶囊化的壁材。抹茶食品因其色泽鲜绿、口感清爽和健康功效越来越受消费者的欢迎。例如, 在口香糖产品开发中, 以小麦面筋为基原料, 通过添加水、甘油、复合甜味剂以及抹茶等成分, 成功创制出口感出色且稳定性优越的抹茶味面筋蛋白口香糖, 为消费者提供了新颖选择^[84]。添加抹茶可以改善小麦面包的感官品质和抗氧化性能, 当抹茶添加量为 3% 时, 面包口感最佳^[85]。抹茶还成功应用于益生菌配方, 在包封的益生菌中添加 10% 和 15% 的抹茶粉, 通过综合抗氧化活性、酸值和感官评价结果, 确定了 10% 抹茶粉添加效果最佳的新型什米粥配方^[86]。此外, 抹茶在饼干和糖果制品中的加入不仅提升口感, 还具有减压作用, 为消费者提供更健康的零食选择^[61]。抹茶的添加显著降低了年糕的相对结晶度, 为各类年糕带来清爽风味, 同时提高了年糕的酚类含量和抗氧化能力, 通过感官评价和营养价值的全面考量, 确定了优选的抹茶年糕配方, 为消费者呈现了口感丰富、营养丰富的抹茶食品^[87]。抹茶在年糕中的有利作用还体现在抑制淀粉体外消化, 降低预期血糖指数, 增加抗性淀粉, 为更为健康的食品选择提供了可能性^[87]。抹茶具有很强的抗氧化能力, 被认为是理想的天然抗氧化剂, 可作为抗氧化剂减缓肉制品变质, 延长肉制品的储存寿命, 并改善肉制品的风味^[88,89]。此外, 抹茶还可以作为微胶囊的芯材或壁材^[90,91]。抹茶被作为壁材制作抹茶-鱼油的乳液, 用于减少鱼油的氧化^[90]。可见, 抹茶在食品开发中有着广泛的应用前景, 能够提升产品的口感和营养水平。

表 2 抹茶减轻代谢综合征症状功效
Table 2 The alleviating effect of matcha on metabolic syndrome symptoms

模型	处理方法	结果	文献
HFD 诱导的小鼠肥胖模型	饮食干预 6 周, 分为 5 组 ($n=5$ /组)。对照组: 正常饲料, 10% 能量来自脂肪; HFD 组: 60% 能量来自脂肪; HML 组: 含 0.1% 抹茶的 HFD; HMM 组: 含 0.5% 抹茶的 HFD; HMH 组: 含 1.0% 抹茶的 HFD。	与 HFD 组比较, HMM 组和 HMH 组体质量增加率以及血清中葡萄糖、TG、TC、LDL-C、ALT、AST 的水平降低。	[15]
HFD 饲养的雄性老鼠	饮食干预 4 周, 共 7 组 ($n=10$ /组)。对照组: 正常饮食; HFD 组: HFD; MLD: 含 0.025% 抹茶的 HFD; MMD: 含 0.05% 抹茶的 HFD; MHD: 含 0.075% 抹茶的 HFD; ME: 含 0.05% 抹茶提取物的 HFD; MR: 含 0.05% 抹茶残留物的 HFD。	与 HFD 组比较, MLD 和 MMD 组体质量下降, 肝脏中 TC 和 TG 水平, 和血清中 TG 水平、血糖水平降低。	[24]
观察性研究 (40 名参与者)	抹茶组遵循 LCD 计划, 每日摄入一次抹茶, 而对照组仅遵循 LCD 饮食计划, 该研究持续 12 周。	抹茶组的体质量、BMI 和腰围均显著下降, 身体的水分、蛋白质、矿物质和脂肪含量也显著降低, 空腹血糖水平、胰岛素水平降低。	[68]
HFD 诱导小鼠肥胖模型	饮食干预 8 周, 分为 4 组 ($n=5$ /组)。对照组: 正常饮食; HFD 组: HFD; NCM 组: 含 1.0% 抹茶的正常饮食; HFM 组: 含 1.0% 抹茶的高脂饮食。	与 HFD 组比较, NCM 组和 HFM 组体质量增幅减少, 血糖水平降低, LDL/HDL 降低; 抹茶摄入组的肝脏 C/EBP- α 和 CD36 的基因转录水平下降; 抹茶摄入组的肠道微生物群异丙普氏菌和嗜粘阿克曼氏菌富集。	[69]
饮食诱导的新西兰大白兔动脉硬化模型	饮食干预 4 周, 分为 2 组 ($n=5$ /组)。对照组: 4 周标准饮食和 20 周高脂肪 (0.15%~0.3% 胆固醇) 的标准饮食。抹茶组: 含 1% 抹茶的标准化饮食。	与对照组相比, 抹茶组的体质量增幅减少, 肝脏组织的 LDL-C、HDL-C、非 HDL ₃ -C 水平降低。	[70]
四氧嘧啶 (45 mg/kg BW) 诱发小鼠 II 型糖尿病模型	饮食干预 30 d, 分为 4 组 ($n=5$ /组)。对照组: 饲喂生理盐水; DM-C 组: 不含茶的玉米淀粉饲料; DM-IT 组: 玉米淀粉-速溶茶饮食; DM-M 组: 玉米淀粉-抹茶饮食。	DM-M 组与 DM-C 组相比较, 血糖水平下降, 肠道 <i>Coriobacteriaceae</i> 、 <i>Lactobacillaceae</i> 、 <i>Prevotellaceae</i> 、 <i>Bifidobacteriaceae</i> 菌群相对丰度增加, <i>Bacteroidaceae</i> 、 <i>Ruminococcaceae</i> 、 <i>Helicobacteriaceae</i> 、 <i>Enterobacteriaceae</i> 相对丰度下降。	[73]
雌性 db/db 小鼠	饮食干预 77 d, 分为 5 组 ($n=10$ /组)。对照组: AIN-93M 饲料; 实验组: 含有 1% 和 2% 的绿茶提取物的 AIN-93M 饲料, 以及含 1% 和 2% 绿茶粉 (2% 的绿茶粉儿茶素含量相当于 1% 绿茶提取物) 的 AIN-93M 饲料。	相较于对照组, 饲喂含 1% 绿茶提取物的 AIN-93M 饲料可降低小鼠的进食量、体质量、空腹血糖水平, 而饲喂含 2% 绿茶粉的 AIN-93M 饲料并无明显效果。	[75]

注: HFD: 高脂饮食; LCD: 低热量饮食; TG: 甘油三酯; TC: 总胆固醇; LDL-C: 低密度脂蛋白胆固醇; ALT: 丙氨酸氨基转移酶; AST: 谷草转氨酶; BMI: 身体质量指数; C/EBP- α : CCAAT 增强子结合蛋白 α ; CD36: 分化簇 36; HDL-C: 高密度脂蛋白胆固醇; BW: 体质量。

表 3 不同茶制品中邻苯二甲酸酯的检测方法
Table 3 Detection methods of phthalates in different tea products

样本类型	提取方法	检测方法	PAEs 的 LODs 和 LOQs	PAEs 的含量	文献
鲜茶每道工序的中间产品(摊放、杀青、揉捻、干燥)	液-液萃取系统, 以水为水相, 己烷为有机相	气相色谱-质谱	16 种 PAEs 的 LODs ($\mu\text{g}/\text{kg DW}$): DMP: 2.0; DEP: 2.0; DPrP: 3.0; DIBP: 1.0; DBP: 1.0; DMEP: 120.0; BMPP: 15.5; DEEP: 40.0; DPP: 4.5; BBP: 6.0; DBEP: 42.6; DCHP: 8.5; DPHP: 43.5; DEHP: 1.0; DNP: 38.5; DNP: 38.6	单位: $\mu\text{g}/\text{kg DW}$ DEP: 4.0~7.8; DBP: 13.3~41.2; DMP: 12.5~48.2; DiBP: 17.7~44.6; DEHP: 13.5~108.0	[93]
茉莉绿茶饮品 蜂蜜茉莉茶饮品	多孔碳涂层固相微萃取 (C-NH2-MIL-125)	气相色谱-质谱	5 种 PAEs 的 LODs (ng/L): 茉莉绿茶饮品中: DAP: 2.0; DIBP: 2.0; DBP: 3.0; BBP: 2.0; DEHP: 2.0; 蜂蜜茉莉茶饮品中: DAP: 4.0; DIBP: 4.0; DBP: 5.0; BBP: 4.0; DEHP: 4.0	蜂蜜茉莉茶饮品中仅有 DIBP 0.09 $\mu\text{g}/\text{mL}$	[96]
茶饮品 ($n=5$)	利用自合成磁性多壁碳纳米管进行固相萃取	高效液相色谱	11 种 PAEs 的 LODs 和 LOQs (ng/L): DPHP: 171, 571; DBZP: 140, 465; BBP: 103, 342; DIBP: 128, 426; BBEP/DBP: 65.9, 220; DPEP: 533, 1780; DCHP 500, 1670; DEHP: 1670, 556; DNP: 182, 606; DNNP: 111, 370	单位: $\mu\text{g}/\text{L}$ DPHP: 0.594~7.89; DBZP: ND~3.53; BBP: ND~5.86; DIBP: 3.14~6.24; BBEP/DBP: 2.22~12.6; DPEP: ND~3.06; DCHP: ND~2.24; DEHP: ND~23.5; DNP: ND~4.49; DNNP: ND~3.24	[97]
绿茶饮品 ($n=3$)	分散液-液微萃取, 使用由等摩尔比的 L-薄荷醇和乙酸组成的天然深共晶溶剂	高效液相色谱	9 种 PAEs 的 LOQs ($\mu\text{g}/\text{L}$): DPP: 5.2; BBP: 4.3; DBP: 4.8; DCHP: 4.8; DIPP: 4.6; DNPP: 4.9; DEHP: 8.8; DINP: 25; DIDP: 33	单位: $\mu\text{g}/\text{L}$ DPP: ND~49.7; DBP: ND~LOQ; DIPP: ND; DEHP: <LOQ; DINP: ND~LOQ	[98]
茶包 ($n=7$) 散茶 ($n=2$)	固相萃取, 使用 UCTCEC18 色谱柱	气相色谱-质谱	6 种 PAEs 的 LODs 和 LOQs ($\text{ng}/\text{g DW}$): DMP: 2.2, 7.2; DEP: 1.9, 6.3; DBP: 2.4, 8.0; BBP: 1.8, 5.9; DEHP: 1.8, 5.9; DNP: 1.9, 6.4	茶包 (ng/g): DMP: ND~56; DEP: ND~144; DBP: 42~171; BBP: 7~244; DEHP: 6~116; DNP: ND~101 散茶 (ng/g): DMP: 31~32; DEP: 38~48; DBP: 17~21; BBP: 24~25; DEHP: 27; DNP: 25~27	[94]

续表 3

样本类型	提取方法	检测方法	PAEs 的 LODs 和 LOQs	PAEs 的含量	文献
红茶 (n=6) 调味红茶 (n=15) 脱咖啡因红茶 (n=3) 绿茶 (n=6)	固相萃取, 使用 Oasis HLB glass (5 毫升; 0.2 克) 试剂盒	气相色谱-质谱	17 种 PAEs 的 LODs 和 LOQs (mg/L): DMP: 0.010, 0.028; DEP: 0.005, 0.015; DPrP: 0.011, 0.031; DIBP: 0.009, 0.025; DBP: 0.008, 0.022; MGP: 0.100, 0.290; DPP: 0.005, 0.015; BBP: 0.054, 0.156; DIHP: 0.229, 0.666; BGP: 0.193, 0.561; DCHP: 0.014, 0.042; DEHP: 0.005, 0.015; DPHP: 0.009, 0.025; DOP: 0.041, 0.120; DINP: 0.997, 2.904; DIDP: 3.752, 12.502; DNP: 0.024, 0.069	单位: µg/L DMP: ND~14.9; DEP: 10.5~80.4; DBP: 2.6~270.6; DEHA: ND~89.2; DEHP: 2.0~372.4; DINP: ND (除了薄荷味的绿茶含有 1689.1 µg/L)	[95]
绿茶茶包 红茶茶包	分散液-液萃取, 使用乙腈作为分散溶剂, 四氯甲烷作为萃取溶剂的混合物	气相色谱-质谱	4 种 PAEs 的 LODs 和 LOQs (mg/L): DEP: 0.03, 0.11; DEHP: 0.02, 0.09; DBP: 0.04, 0.13; BBP: 0.05, 0.17	绿茶茶包 (µg/kg DW): DEP: ND; DEHP: ND~590; DBP: ND~585; BBP: ND~21 红茶茶包 (µg/kg 干重): DEP: ND~373; DEHP: ND~281; DBP: ND~276; BBP: ND~259	[92]
绿茶 (n=16) 红茶 (n=16)	固相萃取, 使用 IST Isololute™ C18 SPE 试剂盒	气相色谱-质谱	/	绿茶浸提液 (µg/L): DMP: 12.3~27.8; DEP: 103.5~123; DIBP: 122.8~171.5; DBP: 136.8~263.8; DMEP: 0.2~0.9; BMPP: 8.4~9.5; DEEP: 7.2~10.4; DAP: 11.8~19.3; HEHP: 13.3~19.9; DHXP: 12.1~19.5; BBP: 8.1~10.9; DBEP: 8.0~10; DCHP: 8.1~10.5; DEHP: 8.3~10.4; DNP: 15.6~26; DOP: 9.1~10.9 红茶浸提液 (µg/L): DMP: 12.8~27; DEP: 113.1~140.4; DIBP: 115.4~186.8; DBP: 132.4~295.9; DMEP: 0.5~0.9; BMPP: 9.7~11.7; DEEP: 9.3~11.5; DAP: 14.9~19; HEHP: 14.4~19; DHXP: 12.6~24.2; BBP: 8.3~10.7; DBEP: 8.9~10.6; DCHP: 9.4~11.1; DEHP: 8~10.8; DNP: 14.2~29.4; DOP: 8.1~10.8	[99]

注: LOD: 检出限; LOQ: 定量限; PAEs: 邻苯二甲酸酯; DMP: 邻苯二甲酸二甲酯; DEP: 邻苯二甲酸二乙酯; DPrP: 邻苯二甲酸二丙酯; DIBP: 邻苯二甲酸二异丁酯; DBP: 邻苯二甲酸二丁酯; DMEP: 邻苯二甲酸二(2-甲氧基)乙酯; BMPP: 邻苯二甲酸二(4-甲基-2-戊基)酯; DEEP: 邻苯二甲酸二(2-乙氧基)乙酯; DPP: 邻苯二甲酸二丙酯; BBP: 邻苯二甲酸丁酯; DBEP: 邻苯二甲酸二丁基乙酯; DCHP: 邻苯二甲酸二环己酯; DPHP: 邻苯二甲酸二苯酯; DEHP: 邻苯二甲酸二(2-乙基己)酯; DAP: 邻苯二甲酸二烯丙酯; DNP: 邻苯二甲酸二壬酯; DINP: 邻苯二甲酸二己酯; DIPP: 邻苯二甲酸二异丙酯; HEHP: 邻苯二甲酸二己基-2-乙基己酯; DIPP: 邻苯二甲酸二异丙酯; DIDP: 邻苯二甲酸二异癸酯; DHXP: 邻苯二甲酸二己基-2-乙基己酯; DIPP: 邻苯二甲酸二异庚酯; DEHA: 己二酸二(2-乙基己)酯; BGP: 邻苯二甲酸二丁氧基乙酯; DW: 干重。

4.2 潜在塑化剂风险

邻苯二甲酸酯 (PAEs) 是一类亲脂性化学品, 广泛应用于塑料等多个行业, 用作增塑剂和添加剂以改善产品的机械性能。PAEs 可通过土壤中塑料的降解, 塑料颗粒的大气沉降, 以及植物栽培环节使用的塑料材料 (如塑料遮阳网) 的迁移进入环境中, 在植物中积累。近年来, 多种食品中有检测出 PAEs, 而有研究报道 PAEs 对机体健康存在潜在的风险^[92,93]。随着茶叶全价利用开发如火如荼的进行, 从传统的饮茶模式转变为吃茶, 茶叶中一些原本难以被冲泡释放的潜在风险物开始受到关注, 而有效控制风险物的前提是建立完善的检测技术。表 3 列举了已报道的茶叶产品中 PAEs 水平和检测方法。茶和茶制品中已检测出 20 多种多环芳烃, 而邻苯二甲酸二 (2-乙基己基) 酯 (DEHP) 和邻苯二甲酸二丁酯 (DBP) 是主要的多环芳烃污染物^[94,95]。GC-MS 是 PAEs 的常规检测方法, 同时开发了高效液相色谱 (HPLC) 分析方法。Liu 等^[93]开发了一种用于分析鲜茶中 16 种 PAEs 的 GC-MS 方法, 该方法与以水为水相、己烷为有机相的液-液萃取法相结合, 茶叶样品中 PAEs 的定量检测限 (LOQ) 为 1.0~120.0 ng/L。拉瓦锡研究所研发了氨基功能化材料制备的多孔碳作为固相微萃取纤维涂层, 从绿色茉莉茶饮料和蜂蜜茉莉茶饮料中提取 PAEs。Liang 等^[96]采用 GC-MS 检测了茶饮料中 5 种 PAEs 的水平, 包括邻苯二甲酸二烯丙酯 (DAP)、邻苯二甲二异丁酯 (DIBP)、DBP、邻苯二甲酸丁酯 (BBP) 和 DEHP, 茉莉花绿茶饮料检测限 LOD 为 2.0~3.0 ng/L, 蜂蜜茉莉花茶饮料 LOD 为 4.0~5.0 ng/L。Yin 等^[97]开发了磁性固相萃取法, 采用 HPLC 测定了茶饮料中的 11 种 PAEs, LOD 为 6.59~53.3 ng/L, LOQ 为 22.0~178 ng/L。以 L-薄荷醇和乙酸等摩尔比的天然深共晶溶剂, 通过分散液-液微萃取 (DLLME) 方法提取出 9 种 PAEs, 除 DEHP 和 DBP 外, 还在塑料瓶装绿茶软饮料中检测到邻苯二甲酸二丙酯 (DPrP)、BBP、邻苯二甲酸二环己酯 (DCHP)、邻苯二甲酸二异戊酯 (DIPP)、邻苯二甲酸二戊酯 (DPP)、邻苯二甲酸二异壬酯 (DINP) 和邻苯二甲酸二异癸酯 (DIDP), LOQ 为 4.3~33 μg/L^[98]。综上, 已报道的 PAEs 的 LOD 和 LOQ 值差异很大, 这可能是由于检测技术、提取方法、产品介质等差异造成的。例如, 泡茶中 DEHP 和 DBP 的检测限分别为 0.005 mg/L 和 0.008 mg/L^[95], 而 Amin 等^[92]报告

的检测限为 0.02 mg/L 和 0.04 mg/L。相比之下, Liang 等^[96,81]研究结果显示茉莉花茶饮料中 DEHP 和 DBP 的检测限分别为 2.0 ng/L 和 3.0 ng/L。检测方法灵敏度的不同, 可能大大增加 PAEs 检测结果的不确定性, 给茶叶产品的质量控制带来困难。液液萃取法和气相色谱-质谱联用从茶鲜叶中检测到 16 种 PAEs, 不同叶位茶鲜叶的 PAEs 总含量介于 69.7~2 244.0 μg/kg, 在这 16 种 PAEs 中, 所有茶鲜叶样品中均检测到 5 种 PAEs, 包括邻苯二甲酸二乙酯 (DEP)、DBP、邻苯二甲酸二甲酯 (DMP)、DIBP 和 DEHP, 在干燥过程中表现出热不稳定性^[93]。与茶鲜叶相比较, 瓶装茶饮料中检测到的 PAEs 更多, 这表明包装方法也可能影响茶饮料的 PAEs 污染物。袋泡茶样品中大多数增塑剂的含量高于非袋泡茶^[94]。与袋泡茶相比较, 散叶绿茶的 PAEs 污染物浓度较低^[94]。已报道的传统冲泡茶的主要塑化剂浓度为: ND~14.9 μg/L DMP, 10.5~80.4 μg/L DEP, 2.6~270.6 μg/L DBP 和 2.0~372.4 μg/L DEHP^[82]。日常饮茶方式不会导致人体摄入过量的 PAEs 污染物^[95]。Amin 等^[92]采用 DLLME-GC-MS 分析了 PAEs 的含量, 评估了日常饮茶 (最多 5 杯茶) 对 PAEs 的每日最大暴露量, 认为危害程度远低于专家小组设定的 PAEs 风险暴露值。Troisi 等^[99]报道了类似的结果。在绿茶和茶饮料中都检测到 PAEs, 但有关抹茶中 PAEs 存在的信息仍然很少。由于抹茶具有生物活性成分和独特的绿茶风味, 可作为烘焙食品^[100]、米粉^[101]、饮料^[39]、益生菌麦片^[86]、米糕^[87]等产品的主要成分和添加剂。考虑到抹茶是全价利用整片茶叶, 因此需关注抹茶原料包括塑化剂在内的潜在风险物, 确保产品质量安全。

5 展望

抹茶是一种将喝茶转化为吃茶的产品。作为食品原料或添加剂, 抹茶具有独特的风味和诱人的色彩。自 2019 年以来, 我国抹茶产业规模迅速扩张, 抹茶产量和产能快速提高。在这过程中, 需进一步完善抹茶生产企业行业标准, 扩大市场规模, 推动抹茶产业良性、可持续发展。本文介绍了抹茶的最新研究, 包括理化性质、潜在的健康益处, 如抗炎、减轻代谢综合征症状、改善认知和减轻压力、抗肿瘤等作用, 并对其可能存在的风险物塑化剂的检测方法和检测限度进行了讨论, 认为建立完善、稳定的茶叶塑化剂检测方法是抹茶中塑化剂含量进行

有效控制的根本前提。

扩大抹茶市场需要深入研究关于抹茶的理化性质及其食品加工性能和健康功效。因此,仍需要大量关于抹茶的物理化学信息。抹茶的健康功效和相关机制应开展深入研究,特别是抹茶中纤维结合酚类对人体肠道菌群的影响以及对人体健康的影响。需开展更多的动物实验乃至临床试验研究抹茶和含抹茶食品的健康功能。除了食物的外观和风味以外,含抹茶食物的营养价值也可以作为优化抹茶用量的评估标准。

参考文献

- [1] HARAGUCHI Y, IMADA Y, SAWAMURA S-I. Production and characterization of fine matcha for processed food [J]. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 2003, 50: 468-473.
- [2] WANG H, TAO M, ZHANG H, et al. The mechanism on decreasing the microbiological contamination of superfine green tea powder by ball milling [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 134: 109966.
- [3] CHEN X, YE K, XU Y, et al. Effect of shading on the morphological, physiological, and biochemical characteristics as well as the transcriptome of matcha green tea [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(22): 14169.
- [4] JAKUBCZYK K, KOCHMAN J, KWIATKOWSKA A, et al. Antioxidant properties and nutritional composition of matcha green tea [J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2020, 9(4): 483.
- [5] 高晨曦,任晓萌,胡潇,等.我国抹茶文化的历史渊源与发展历程[J].*中国茶叶*,2020,42(4):19-23,35.
- [6] 苏广新.浅析日本对外来文化的吸收与本土化——以日本茶道为例[J].*教育教学论坛*,2020,25:80-81.
- [7] 关剑平.中国茶文化的特质及其在日本的传播[J].*中国非物质文化遗产*,2023,3:101-108.
- [8] MENG Q, FAN H, CHEN F, et al. Preparation and characterization of *Dendrobium officinale* powders through superfine grinding [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(5): 1906-1913.
- [9] HU J, CHEN Y, NI D. Effect of superfine grinding on quality and antioxidant property of fine green tea powders [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 45(1): 8-12.
- [10] XIAO W, ZHANG Y, FAN C, et al. A method for producing superfine black tea powder with enhanced infusion and dispersion property [J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 242-247.
- [11] ZHAO Z, DAI Z, JIANG X, et al. Influence and optimization of long-time superfine grinding on the physicochemical features of green tea powder [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 117: 105124.
- [12] HUANG Y, GOH R M V, PUA A, et al. Effect of three milling processes (cyclone-, bead- and stone-millings) on the quality of matcha: Physical properties, taste and aroma [J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131202.
- [13] DEVKOTA H P, GAIRE B P, HORI K, et al. The science of matcha: Bioactive compounds, analytical techniques and biological properties [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 735-743.
- [14] UNNO K, FURUSHIMA D, HAMAMOTO S, et al. Stress-reducing function of matcha green tea in animal experiments and clinical trials [J]. *Nutrients*, 2018, 10(10): 1468.
- [15] ZHOU J, YU Y, DING L, et al. Matcha green tea alleviates non-alcoholic fatty liver disease in high-fat diet-induced obese mice by regulating lipid metabolism and inflammatory responses [J]. *Nutrients*, 2021, 13(6): 1950.
- [16] TOPUZ A, DINCER C, TORUN M, et al. Physicochemical properties of Turkish green tea powder: Effects of shooting period, shading, and clone [J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2014, 38: 233-241.
- [17] WANG J, ZAREEF M, HE P, et al. Evaluation of matcha tea quality index using portable NIR spectroscopy coupled with chemometric algorithms [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(11): 5019-5027.
- [18] WANG L, BRENNAN M, LI S, et al. How does the tea L-theanine buffer stress and anxiety [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(3): 467-475.
- [19] WU J, OUYANG Q, PARK B, et al. Physicochemical indicators coupled with multivariate analysis for comprehensive evaluation of matcha sensory quality [J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131100.
- [20] 刘东娜,聂坤伦,杜晓,等.抹茶品质的感官审评与成分分析[J].*食品科学*,2014,35(2):168-172.
- [21] KOLÁČKOVÁ T, SUMCZYNSKI D, ZÁLEŠÁKOVÁ L, et al. Free and bound amino acids, minerals and trace elements in matcha (*Camellia sinensis* L.): A nutritional evaluation [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2020, 92: 103581.
- [22] KOLÁČKOVÁ T, KOLOFIKOVÁ K, SYTAŘOVÁ I, et al. Matcha Tea: Analysis of nutritional composition, phenolics and antioxidant activity [J]. *Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 2020, 75(1): 48-53.
- [23] PARK J H, BACK C N, KIM J K. Recommendation of packing method to delay the quality decline of green tea powder stored at room temperature [J]. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, 2005, 23: 499-506.
- [24] XU P, YING L, HONG G, et al. The effects of the aqueous extract and residue of Matcha on the antioxidant status and lipid and glucose levels in mice fed a high-fat diet [J]. *Food & Function*, 2016, 7(1): 294-300.
- [25] 普冰清,徐怡,杜春华,等.不同茶叶中茶多酚类成分及咖啡碱含量研究[J].*食品工业*,2017,38(2):301-303.
- [26] LEE M S, HWANG Y S, LEE J, et al. The characterization of caffeine and nine individual catechins in the leaves of green tea (*Camellia sinensis* L.) by near-infrared reflectance

- spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2014, 158: 351-357.
- [27] SYU K Y, LIN C L, HUANG H C, et al. Determination of theanine, GABA, and other amino acids in green, oolong, black, and Pu-erh teas with dabsylation and high-performance liquid chromatography [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(17): 7637-7643.
- [28] ALCÁZAR A, BALLESTEROS O, JURADO J M, et al. Differentiation of green, white, black, Oolong, and Pu-erh teas according to their free amino acids content [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(15): 5960-5965.
- [29] DONG-NA L, KUN-LUN N, XIAO D, et al. Sensory evaluation and chemical composition of matcha [J]. Food Science, 2014, 35(2): 168-172.
- [30] LI Y, RAN W, HE C, et al. Effects of different tea tree varieties on the color, aroma, and taste of Chinese Enshi green tea [J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100289.
- [31] ZHANG M, YANG Y, YUAN H, et al. Contribution of addition theanine/sucrose on the formation of chestnut-like aroma of green tea [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 129: 109512.
- [32] SAKURAI Y, MISE R, KIMURA S I, et al. Novel method for improving the water dispersibility and flowability of fine green tea powder using a fluidized bed granulator [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 206: 118-124.
- [33] KUMAR D, RUB M A, ASIRI A M. Synthesis and characterization of geminis and implications of their micellar solution on ninhydrin and metal amino acid complex [J]. Royal Society Open Science, 2020, 7(7): 200775.
- [34] RUSAK G, ŠOLA I, VUJČIĆ BOK V. Matcha and Sencha green tea extracts with regard to their phenolics pattern and antioxidant and antidiabetic activity during *in vitro* digestion [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(9): 3568-3578.
- [35] FERNÁNDEZ-NOVALES J, GARDE-CERDÁN T, TARDÁGUILA J, et al. Assessment of amino acids and total soluble solids in intact grape berries using contactless Vis and NIR spectroscopy during ripening [J]. Talanta, 2019, 199: 244-253.
- [36] GRABSKA J, BEĆ K B, OZAKI Y, et al. Anharmonic DFT study of near-infrared spectra of caffeine: Vibrational analysis of the second overtones and ternary combinations [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2021, 26(17): 5212.
- [37] HAZARIKA A K, CHANDA S, SABHAPONDIT S, et al. Quality assessment of fresh tea leaves by estimating total polyphenols using near infrared spectroscopy [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(12): 4867-4876.
- [38] WU J, ZAREEF M, CHEN Q, et al. Application of visible-near infrared spectroscopy in tandem with multivariate analysis for the rapid evaluation of matcha physicochemical indicators [J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136185.
- [39] BURCUS A, VAMANU E, AVRAM I, et al. Antioxidant, anti-inflammatory, and antibacterial potential of different drinks based on matcha tea [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 374(1): 012072.
- [40] FUJIOKA K, IWAMOTO T, SHIMA H, et al. The powdering process with a set of ceramic mills for green tea promoted catechin extraction and the ROS inhibition effect [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2016, 21(4): 474.
- [41] HUANG P, HAN J, HUI L. MAPK signaling in inflammation-associated cancer development [J]. Protein & Cell, 2010, 1(3): 218-226.
- [42] YAMAMOTO-FURUSHO J K. Inflammatory bowel disease therapy: blockade of cytokines and cytokine signaling pathways [J]. Current Opinion in Gastroenterology, 2018, 34(4): 187-93.
- [43] SIMPSON E R, BROWN K A. Obesity and breast cancer: role of inflammation and aromatase [J]. Journal of Molecular Endocrinology, 2013, 51(3): T51-9.
- [44] MITTAL M, SIDDIQUI M R, TRAN K, et al. Reactive oxygen species in inflammation and tissue injury [J]. Antioxidants & Redox Signaling, 2014, 20(7): 1126-1167.
- [45] ARULSELVAN P, FARD M T, TAN W S, et al. Role of antioxidants and natural products in inflammation [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2016, 2016: 5276130.
- [46] TURNER M D, NEDJAI B, HURST T, et al. Cytokines and chemokines: At the crossroads of cell signaling and inflammatory disease [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2014, 1843(11): 2563-2582.
- [47] RAMEZ A M, ELMAHALLAWY E K, ELSHOPAKEY G E, et al. Hepatosplenic protective actions of *Spirulina platensis* and matcha green tea against *Schistosoma mansoni* infection in mice via antioxidative and anti-inflammatory mechanisms [J]. Frontiers in Veterinary Science, 2021, 8: 650531.
- [48] KIM J M, LEE U, KANG J Y, et al. Matcha improves metabolic imbalance-induced cognitive dysfunction [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2020, 2020: 8882763.
- [49] ZHOU J, LIN H, XU P, et al. Matcha green tea prevents obesity-induced hypothalamic inflammation via suppressing the JAK2/STAT3 signaling pathway [J]. Food & Function, 2020, 11(10): 8987-8995.
- [50] ZHUO X, HUANG M, WU M. Analysis of cognitive dysfunction and its risk factors in patients with hypertension [J]. Medicine, 2022, 101(10): e28934.
- [51] KIM J M, KANG J Y, PARK S K, et al. Powdered green tea (matcha) attenuates the cognitive dysfunction via the regulation of systemic inflammation in chronic PM(2.5)-exposed BALB/c mice [J]. Antioxidants (Basel, Switzerland), 2021, 10(12): 1932.
- [52] BABA Y, INAGAKI S, NAKAGAWA S, et al. Effects of daily matcha and caffeine intake on mild acute psychological stress-

- related cognitive function in middle-aged and older adults: A randomized placebo-controlled study [J]. *Nutrients*, 2021, 13(5): 1700.
- [53] SAKURAI K, SHEN C, EZAKI Y, et al. Effects of matcha green tea powder on cognitive functions of community-dwelling elderly individuals [J]. *Nutrients*, 2020, 12(12) :3639.
- [54] BABA Y, KANEKO T, TAKIHARA T. Matcha consumption maintains attentional function following a mild acute psychological stress without affecting a feeling of fatigue: A randomized placebo-controlled study in young adults [J]. *Nutrition Research (New York, NY)*, 2021, 88: 44-52.
- [55] UNNO K, SUMIYOSHI A, KONISHI T, et al. Theanine, the main amino acid in tea, prevents stress-induced brain atrophy by modifying early stress responses [J]. *Nutrients*, 2020, 12(1): 174.
- [56] IWAI R, ISHII T, FUKUSHIMA Y, et al. Matcha and its components control angiogenic potential [J]. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 2021, 67(2): 118-125.
- [57] IGARASHI K, TAKAGI M, FUKUSHIMA Y. The effects of matcha and decaffeinated matcha on learning, memory and proteomics of hippocampus in senescence-accelerated (SAMP8) mice [J]. *Nutrients*, 2022, 14(6): 1197.
- [58] DIETZ C, DEKKER M, PIQUERAS-FISZMAN B. An intervention study on the effect of matcha tea, in drink and snack bar formats, on mood and cognitive performance [J]. *Food Research International (Ottawa, Ont)*, 2017, 99(1): 72-83.
- [59] ZHANG Z, ZHANG Y, LI J, et al. The neuroprotective effect of tea polyphenols on the regulation of intestinal flora [J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2021, 26(12): 3692.
- [60] UNNO K, IGUCHI K, TANIDA N, et al. Ingestion of theanine, an amino acid in tea, suppresses psychosocial stress in mice [J]. *Experimental Physiology*, 2013, 98(1): 290-303.
- [61] UNNO K, FURUSHIMA D, HAMAMOTO S, et al. Stress-reducing effect of cookies containing matcha green tea: essential ratio among theanine, arginine, caffeine and epigallocatechin gallate [J]. *Heliyon*, 2019, 5(5): e01653.
- [62] MONOBE M, NOMURA S, EMA K, et al. Influence of continued ingestion of matcha on emotional behaviors after social stress in mice [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2019, 83(11): 2121-2127.
- [63] KURAUCHI Y, DEVKOTA H P, HORI K, et al. Anxiolytic activities of matcha tea powder, extracts, and fractions in mice: Contribution of dopamine D1 receptor- and serotonin 5-HT1A receptor-mediated mechanisms [J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 59: 301-308.
- [64] KURAUCHI Y, OHTA Y, MATSUDA K, et al. Matcha tea powder's antidepressant-like effect through the activation of the dopaminergic system in mice is dependent on social isolation stress [J]. *Nutrients*, 2023, 15(3): 581.
- [65] MCLELLAN T M, CALDWELL J A, LIEBERMAN H R. A review of caffeine's effects on cognitive, physical and occupational performance [J]. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2016, 71: 294-312.
- [66] BRYAN J. Psychological effects of dietary components of tea: caffeine and L-theanine [J]. *Nutrition Reviews*, 2008, 66(2): 82-90.
- [67] YAMADA T, TERASHIMA T, OKUBO T, et al. Effects of theanine, r-glutamylethylamide, on neurotransmitter release and its relationship with glutamic acid neurotransmission [J]. *Nutritional Neuroscience*, 2005, 8(4): 219-226.
- [68] EL-ELIMAT T, QASEM W M, AL-SAWALHA N A, et al. A prospective non-randomized open-label comparative study of the effects of matcha tea on overweight and obese individuals: A pilot observational study [J]. *Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 2022, 77(3): 447-454.
- [69] WANG Y, YU Y, DING L, et al. Matcha green tea targets the gut-liver axis to alleviate obesity and metabolic disorders induced by a high-fat diet [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 931060.
- [70] HUNJADI M, SIEDER C, BEIERFUß A, et al. Matcha green tea powder does not prevent diet-induced arteriosclerosis in New Zealand white rabbits due to impaired reverse cholesterol transport [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2021, 65(20): e2100371.
- [71] GUO W, SHU Y, YANG X. Tea dietary fiber improves serum and hepatic lipid profiles in mice fed a high cholesterol diet [J]. *Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 2016, 71(2): 145-150.
- [72] KARDUM N, GLIBETIC M. Polyphenols and their interactions with other dietary compounds: Implications for human health [J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2018, 84: 103-144.
- [73] ZHANG H H, LIU J, LV Y J, et al. Changes in intestinal microbiota of type 2 diabetes in mice in response to dietary supplementation with instant tea or matcha [J]. *Canadian Journal of Diabetes*, 2020, 44(1): 44-52.
- [74] LI H, FANG Q, NIE Q, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic mechanism of tea polysaccharides on type 2 diabetic rats via gut microbiota and metabolism alteration [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(37): 10015-10028.
- [75] WU G, LIU A B, XU Y, et al. The effects of green tea on diabetes and gut microbiome in db/db mice: Studies with tea extracts vs. tea powder [J]. *Nutrients*, 2021, 13(9): 3155.
- [76] ZHAO L, ZHANG F, DING X, et al. Gut bacteria selectively promoted by dietary fibers alleviate type 2 diabetes [J]. *Science (New York, NY)*, 2018, 359(6380): 1151-1156.
- [77] ZHANG H, JIANG Y, PAN J, et al. Effect of tea products on the *in vitro* enzymatic digestibility of starch [J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 345-350.
- [78] MORISHIMA S, KAWADA Y, FUKUSHIMA Y, et al. A randomized, double-blinded study evaluating effect of matcha

- green tea on human fecal microbiota [J]. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 2023, 72(2): 165-170.
- [79] SAYUTI N H, KAMARUDIN A A, SAAD N, et al. Chemotherapeutic potential of matcha green tea (*Camellia sinensis*) polyphenols to induce cell-cycle arrest and apoptosis in WERI-Rb-1 retinoblastoma cells [J]. *Journal of Herbal Medicine*, 2023, 40: 100667.
- [80] SOKARY S, ZAKARIA Z, BAWADI H, et al. Testing the anticancer effect of matcha using Zebrafish as an animal model [J]. *Nutrients*, 2023, 15(10): 2369.
- [81] KECKSTEIN S, TILGENER C, JESCHKE U, et al. Effects of matcha tea extract on cell viability and peroxisome proliferator-activated receptor γ expression on T47D breast cancer cells [J]. *Archives of Gynecology and Obstetrics*, 2022, 306(2): 451-459.
- [82] SCHRÖDER L, MARAHRENS P, KOCH J G, et al. Effects of green tea, matcha tea and their components epigallocatechin gallate and quercetin on MCF-7 and MDA-MB-231 breast carcinoma cells [J]. *Oncology Reports*, 2019, 41(1): 387-396.
- [83] BONUCCELLI G, SOTGIA F, LISANTI M P. Matcha green tea (MGT) inhibits the propagation of cancer stem cells (CSCs), by targeting mitochondrial metabolism, glycolysis and multiple cell signaling pathways [J]. *Aging*, 2018, 10(8): 1867-1883.
- [84] 曾荣,何伟俊,林燕丹,等.抹茶味面筋蛋白基口香糖的研制[J].保鲜与加工,2021,21(2):94-101.
- [85] ZHEN SHUO S, JUN GUO Y, LEI Z, et al. Effect of superfine green tea powder addition on quality and antioxidant property of bread [J]. *Journal of Tea Science*, 2018, 59(4): 229-232.
- [86] MONFARED K, GH ARACHORLOO M, JAFARPOUR A, et al. Production feasibility of functional probiotic muesli containing matcha and investigation of its physicochemical, microbial, and sensory properties [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16: 975-986.
- [87] WEI R, QIAN L, KAYAMA K, et al. Cake of Japonica, Indica and glutinous rice: Effect of matcha powder on the volatile profiles, nutritional properties and optimal production parameters [J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 18: 100657.
- [88] CHOE J, KIM G W, KIM H Y. Effects of green tea leaf, lotus leaf, and kimchi powders on quality characteristics of chicken liver sausages [J]. *Journal of Animal Science and Technology*, 2019, 61(1): 28-34.
- [89] 谢意通,黄子鸣,苏伟明,等.茶香型乌鱼肉脯的工艺研究及优化[J].食品研究与开发,2019,40(5):128-33.
- [90] SHI M, YING D, HLAING M M, et al. Oxidative stability of spray dried matcha-tuna oil powders [J]. *Food Research International*, 2020, 132: 109050.
- [91] ŞEN D B, KILIÇ B. Effects of edible coatings containing acai powder and matcha extracts on shelf life and quality parameters of cooked meatballs [J]. *Meat Science*, 2021, 179: 108547.
- [92] AMIN M M, RASTEGARI F, POURSAFA P, et al. Estimating the risk of phthalates exposure via tea consumption in the general population [J]. *International Journal of Food Studies*, 2018, 7: 69-78.
- [93] LIU P, CHEN H, GAO G, et al. Occurrence and residue pattern of phthalate esters in fresh tea leaves and during tea manufacturing and brewing [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(46): 8909-8917.
- [94] CARR KINNEAR E J, MILLER K Y, TONG A Z. Impacts of brewing time, brewing temperature and brands on the leaching of phthalates and bisphenol A in dry tea [J]. *Food Additives & Contaminants Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 2021, 38(10): 1755-1766.
- [95] LO TURCO V, DI BELLA G, POTORTI A G, et al. Determination of plasticizer residues in tea by solid phase extraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *European Food Research and Technology*, 2015, 240(2): 451-458.
- [96] LIANG W, WANG J, ZANG X, et al. A porous carbon derived from amino-functionalized material of Institut Lavoisier as a solid-phase microextraction fiber coating for the extraction of phthalate esters from tea [J]. *Journal of Separation Science*, 2016, 39(7): 1331-1338.
- [97] YIN S, YANG Y, YANG D, et al. Determination of 11 phthalate esters in beverages by magnetic solid-phase extraction combined with high-performance liquid chromatography [J]. *Journal of AOAC International*, 2019, 102(5): 1624-1631.
- [98] ORTEGA-ZAMORA C, JIMÉNEZ-SKRZYPEK G, GONZÁLEZ-SÁLAMO J, et al. Extraction of phthalic acid esters from soft drinks and infusions by dispersive liquid-liquid microextraction based on the solidification of the floating organic drop using a menthol-based natural deep eutectic solvent [J]. *Journal of Chromatography A*, 2021, 1646: 462132.
- [99] TROISI J, RICHARDS S, SYMES S, et al. A comparative assessment of metals and phthalates in commercial tea infusions: A starting point to evaluate their tolerance limits [J]. *Food Chemistry*, 2019, 288: 193-200.
- [100] GUO Z, BARIMAH A O, YIN L, et al. Intelligent evaluation of taste constituents and polyphenols-to-amino acids ratio in matcha tea powder using near infrared spectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2021, 353: 129372.
- [101] LI Y, XIAO J, TU J, et al. Matcha-fortified rice noodles: Characteristics of *in vitro* starch digestibility, antioxidant and eating quality [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149: 111852.