

抹茶研究热点的可视化分析及其功效研究进展

王越鹏, 耿战辉*, 郑志强, 崔燕, 杨柳
(中国人民解放军军事科学院系统工程研究院, 北京 100010)

摘要: 抹茶是一种微粉状的茶产品, 因其特殊的生产加工方式获得了独特的风味和口感, 并被广泛应用于食品中。本文主要研究近十年国内外抹茶的研究现状, 通过可视化分析研究文章的热点趋势, 并根据关键词密度分析探讨抹茶中内含的生物活性物质及健康功效。抹茶中的咖啡因和茶多酚能够提神, 且茶氨酸与之协同提升认知能力并减轻焦虑; 抹茶含有的茶多酚能够通过多种机制抑制癌细胞活性, 降低糖尿病和心血管疾病等疾病的发病率。其次, 对抹茶生产加工中活性物质的变化进行阐述归纳。最后, 探讨抹茶在食品中的各项应用与发展展望。抹茶是一种具有高健康价值的中国传统茶制品, 研究其发展趋势, 阐明其在食品中的应用, 有助于其产业价值的提升, 并可作为今后开发功能性抹茶食品提供一定的理论基础。

关键词: 抹茶; 可视化分析; 健康功效; 茶氨酸; 茶多酚; 咖啡因; 生物活性物质

Visual Analysis of Research Hotspots in Matcha and Research Progress in Its Efficacy

WANG Yuepeng, GENG Zhanhui*, ZHENG Zhiqiang, CUI Yan, YANG Liu
(Academy of Military Sciences, PLA, Systems Engineering Institute, Beijing 100010, China)

Abstract: Matcha is a micronized green tea product, which has a unique flavor and taste due to its special processing technique and is widely used in foods. This article examines the progress that has been made in the past decade in matcha research, and analyzes the hot topics and trends in research articles through visual analysis. Based on keyword density analysis, it summarizes the bioactive substances and health benefits of matcha. The caffeine and tea polyphenols in matcha can refresh the mind on their own, they can also work synergistically with theanine to enhance cognitive capacity and reduce anxiety. The tea polyphenols contained in matcha can inhibit the viability of cancer cells through various mechanisms, and reduce the incidence of diseases such as diabetes and cardiovascular diseases. Secondly, the changes in bioactive substances during the production and processing of matcha are elaborated and summarized. Finally, future prospects for the development and application of matcha in foods are discussed. Matcha is a traditional Chinese tea product with high health value. Studying its development trend and elucidating its application in foods will help to enhance its industrial value and provide a theoretical basis for the future development of matcha-based functional foods.

Keywords: matcha; visual analysis; health benefits; theanine; tea polyphenols; caffeine; bioactive substances

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240411-102

中图分类号: TS272.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 23-0367-10

引文格式:

王越鹏, 耿战辉, 郑志强, 等. 抹茶研究热点的可视化分析及其功效研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 367-376.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240411-102. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Yuepeng, GENG Zhanhui, ZHENG Zhiqiang, et al. Visual analysis of research hotspots in matcha and research progress in its efficacy[J]. Food Science, 2024, 45(23): 367-376. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240411-102. <http://www.spkx.net.cn>

随着社会经济快速发展, 工作生活节奏加快。人们对具有提神效果的天然植物来源食品关注度增加^[1], 茶等一

系列包含咖啡因的植物性原料被广泛应用于食品工业中^[2]。抹茶起源于中国隋唐时期, 是最受关注的茶产品之一^[3]。

收稿日期: 2024-04-11

第一作者简介: 王越鹏 (1973—) (ORCID: 0009-0003-1181-4835), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为食品工程、功能性食品开发。E-mail: wyp2024218@163.com

*通信作者简介: 耿战辉 (1973—) (ORCID: 0009-0008-0818-0882), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为特殊营养与食品开发。E-mail: zhanhuigeng@163.com

绿茶和抹茶均来源于茶树,但是抹茶和绿茶的种植、生长和加工条件不同。适合制作绿茶的茶树品种多样,而适合制作抹茶的茶树品种则更为特定,通常需要具备叶绿素、氨基酸、蛋白质含量高,以及茶多酚、咖啡碱含量适中等特点^[4]。GB/T 34778—2017《抹茶》规定,抹茶是采用覆盖栽培的茶树鲜叶经蒸汽(或热风)杀青、干燥制成的叶片为原料,经研磨工艺加工而成的微粉状茶产品,茶氨酸的含量决定了抹茶的品质等级,二级抹茶中茶氨酸质量分数为0.5%,而一级质量分数为1%^[5]。茶叶中60%~70%的营养成分为不可溶性成分,如脂溶性维生素、不可溶性膳食纤维、叶绿素和蛋白质。可溶性成分占30%~40%^[6],包括酚类、水溶性维生素、咖啡因、水溶性膳食纤维、氨基酸、皂苷和矿物质^[7]。由于抹茶具有独特的耕作和收获过程,抹茶中生物活性化合物的浓度高于其他类型的绿茶,例如儿茶素、茶氨酸和咖啡因。而且与传统沏茶时将茶叶摒弃不同,抹茶的饮用方式可以将茶叶中不溶于水的生物活性物质摄入体内,从而能够尽可能发挥茶的健康功效^[8]。研究发现,抹茶具有提神^[9]、改善大脑功能和健康状况^[10]、抗氧化^[11]和抗糖尿病等作用。

目前抹茶市场规模正在全球范围内持续扩大,2023年全球抹茶市场规模达到了199.11亿元^[12],全球抹茶市场规模将以8.24%的复合年增长率持续增长,有望达到320.45亿元。并以稳定的年增长率攀升。随着消费者对高品质生活和健康饮食的追求,以及对抹茶文化的更深入了解,抹茶市场有望继续保持强劲的增长动力。这一趋势不仅促进了抹茶产业的发展,也进一步推动了茶文化的传承与创新。

目前在我国,抹茶除了可添加到饮料中^[13],还应用于乳制品、谷物产品和烘焙产品中^[14-15]。但仅作为一种风味改良剂或着色剂来使用,对于抹茶的健康功效及其与其他茶叶的区别并没有明确的说明。Kochman等^[16]综述了抹茶的化学成分和健康功效,但其关注的抹茶健康功效主要为儿茶素的功能,对抹茶中其他生物活性物质阐述较少;Ye Jianhui等^[3]综述了抹茶的主要化学成分、生产加工过程中生物活性成分的变化、抹茶的应用以及酚类物质在肠道中的消化性,但对抹茶的主要化学成分与对应的生物活性并没有进行说明。

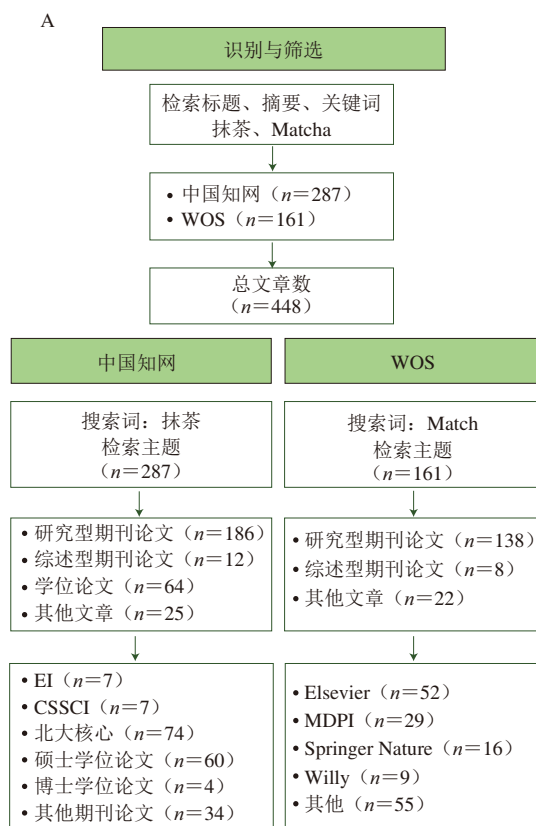
本文旨在利用统计分析文献数据,捕捉抹茶研究领域的动态,并通过分析最近的研究热点,预测该领域的发展趋势。尽管健康产业和茶制品产业的发展推动了抹茶研究内容的丰富化,但目前缺乏对其进行统计分析的科学文献数据,也缺乏对抹茶发展趋势的系统总结。因此,本综述利用Web of Science (WOS)和中国知网数

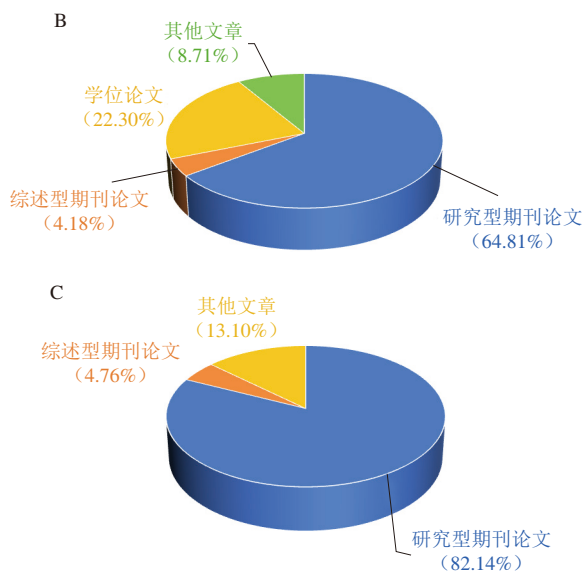
据库中关于抹茶研究的文献进行可视化分析,以解析抹茶研究的现状和发展趋势。本文旨在阐明抹茶的研究热点,预测其发展方向,探讨抹茶的生物活性物质及其对应的健康功效,并对抹茶在食品加工中的应用进行简要分析,更有助于了解抹茶独特的风味与功能,可为今后抹茶在食品工业中的应用与发展提供一定的理论支撑。

1 抹茶研究可视化分析

1.1 抹茶研究可视化分析方法

为了探索国内外抹茶研究现状,本研究参考系统评价和Meta分析优先报告条目(Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, PRISMA)指南并作了修改^[17-18]。以“抹茶”和“Matcha”为搜索词对2015—2024年国内外数据库(中国知网和WOS)所收录的论文进行搜索,搜索结果如图1所示。以检索标题、摘要、关键词“抹茶”和“Matcha”,检索发现中国知网上关于抹茶的论文为287篇,WOS为161篇,总文章数为448篇。中国知网中研究型期刊论文数占到文章总数的64.81%,其次为学位论文22.30%,综述型论文4.18%;WOS以“Matcha”为主题的文章数为161篇,研究性期刊论文和综述型论文占比分别为82.14%和4.76%,这与中国知网(除学位论文外)占比相似。





A. 2015—2024年国内外抹茶论文检索（*n*为文章数）；B. 中国知网关于抹茶论文类型占比；C. WOS关于抹茶论文类型占比。

图1 2015—2024年国内外抹茶研究文章数量

Fig. 1 Number of domestic and international research articles on Matcha from 2015 to 2024

分析逐年的发文量，发现国内外关于抹茶的文章虽有浮动，但整体呈现上升趋势。表1展示了排名前十的国内外抹茶的研究主题学科，分别来源于WOS和中国知网的检索，可以看出国内外研究主题学科前两名均为食品科学技术（Food Science Technology）和化学（Chemistry）这两大类，国外对于抹茶的研究围绕在营养学（Nutrition Dietetics）、生物化学和分子生物学（Biochemistry Molecular Biology）与工程学（Engineering）上，这与国内研究方向相似。但相较于国外，国内对于抹茶进行了艺术方面的研究。总体而言，国内外研究趋势大致相同，但相较于国内，国外对于抹茶的生物功能研究起步较早，研究较为细化。

表1 国内外抹茶研究主题学科

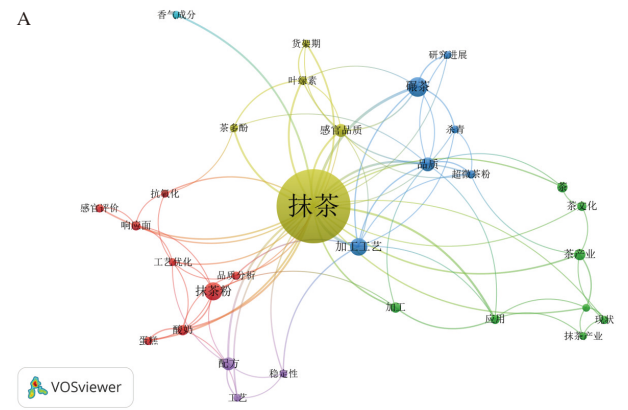
排名	国外研究主题学科	国内研究主题学科
1	Food Science Technology	轻工业手工业（食品科学技术）
2	Chemistry	化学
3	Nutrition Dietetics	农作物
4	Biochemistry Molecular Biology	农业经济
5	Engineering	一般服务业
6	Agriculture	中药学
7	Pharmacology Pharmacy	美术书法雕塑和摄影
8	Materials Science	基础医学
9	Oncology	农艺学
10	Cell Biology	内分泌腺及全身性疾病

1.2 抹茶研究关键词的VOSviewer可视化分析

从中国知网和WOS上提取文章细节，如关键词、研究领域等。这项研究于2024年4月进行，使用“Matcha”

和“抹茶”作为关键词，出版时间为“2015—2024年”。共选择了547篇符合选择标准的文章进行分析。以出现频次大于或等于5次为限制，从中国知网数据库和WOS数据库中分别得到31个和174个关键词，并使用VOSviewer（1.6.19版）软件分析了这些文章关键词的共现关系，构建关键词网络图，揭示研究热点和主题，识别领域内的关键主题^[19]。

图2为中国知网和WOS数据库中关于“抹茶”和“Matcha”关键词的共现网络图谱，不同节点代表分析文章中的1个关键词，节点大小与关键词出现频次呈现正相关，其节点的颜色相同代表其具有一定的关联性，而两个节点之间的距离越短则关联性越强，反之则越弱^[20]。由图2A可知，中国知网数据库中，除主题词“抹茶”以外，抹茶领域的高频词为加工工艺、感官品质、碾茶、抹茶粉，说明国内关于抹茶的研究主要集中于抹茶的生产加工过程。在当前的研究中，学者们更加关注抹茶的制作工艺以及产出的抹茶品质。这种集中在加工环节的研究趋势可能反映了对于提高抹茶产品质量、开发新型加工技术的迫切需求。这些信息对于了解抹茶产业的发展方向以及指导相关研究的方向具有重要意义。图2B展示了在WOS数据库中使用关键词“Matcha”时的共现网络图谱。与中国知网数据库不同，除了关键词“Matcha”之外，WOS数据库中关于Matcha的领域高频词汇包括“model”“benefit”“value”等。同时，出现了与人体健康和疾病相关的词汇，如“high fat diet”“health”等。并且研究者们可能更加关注抹茶与健康相关的科学研究。抹茶作为一种传统的茶叶制品，在全球范围内备受关注。这些关键词的频繁出现表明抹茶在国际研究领域中被视为一种具有潜在健康益处的食品，对于抹茶的研究不仅局限于其传统的制作工艺和感官品质，还逐渐扩展到其在健康领域中的潜在应用。抹茶可能具有多种益处，包括抗氧化、抗炎、减肥、心血管保护等方面的作用。因此，了解抹茶在全球范围内的研究趋势以及其在健康领域中的潜在应用，对于推动抹茶相关研究的发展、探索其更广泛的应用领域以及促进健康产业的发展具有重要意义。



2.2 抹茶生物活性物质

在抹茶的生产和加工中,一般有茶叶遮荫、采摘(特定时间与地点)、蒸汽杀青、干燥、筛分与分拣、研磨。其中遮荫、杀青、干燥、研磨这4项步骤是其与普通绿茶区分的关键。茶叶中的各项活性成分以及最后产品的物理性质均是在这4步中发生改变,使茶叶最后成为符合标准的抹茶产品。抹茶的生物活性物质与绿茶相似,从表2可以看出,抹茶的酚类物质、生物碱及氨基酸含量不同于绿茶,这与抹茶独特的种植生产及加工方式^[29]有关,特别是茶树遮荫。

表2 抹茶与绿茶的主要生物活性物质含量

类别	酚类物质含量/ (mg/g)	生物碱含量/ (mg/g)	氨基酸含量/ (mg/g)	参考文献
抹茶	169.0~273.0	18.9~44.4	36.4~64.7	[2,3,5,29-31]
绿茶	240.0~360.0	11.3~24.7	23.0~50	[6-8,32-34]

2.2.1 生物碱

抹茶中的生物碱主要为黄嘌呤生物碱,包括咖啡因、可可碱和茶碱^[35]。咖啡因,别名1,3,7-三甲基黄嘌呤,是一种黄嘌呤生物碱化合物,是世界上应用最广的提神成分^[36],可以暂时恢复精神并提高注意力。在抹茶中,咖啡因是除EGCG和L-茶氨酸以外最主要的生物活性成分^[37]。有研究表明,抹茶茶汤中的咖啡因浓度受到浸泡水温的显著影响,水温与茶汤中咖啡因含量呈正相关^[38]。

2.2.2 酚类物质

植物的主要次生代谢产物之一酚类物质的通式为ArOH,是由羟基(—OH)取代了芳香烃环上氢所形成的。被熟知的茶多酚又名维多酚,是抹茶中多酚类化合物的总称,曾被称为“茶鞣质”和“茶单宁”^[39]。根据GB 2760—2014《食品添加剂使用标准》,茶多酚可被用于油脂、坚果、糕点、饮料等食品中,起到抗氧化的作用。按照化学结构,茶多酚可分为儿茶素、黄酮、酚酸和花青素这4大类。儿茶素是抹茶最主要的苦味和涩味来源,抹茶中儿茶素单体的含量由高到低依次为EGCG、GC、GCG、EGC、EC和CG^[40]。

2.2.3 氨基酸

抹茶中的氨基酸有结合和游离氨基酸两种类型^[41]。与普通绿茶相比,抹茶中的游离氨基酸含量较低,但以结合形式存在的氨基酸含量较高^[42]。茶氨酸是抹茶中最丰富的游离氨基酸,其次是谷氨酸、 γ -氨基丁酸、蛋氨酸和苏氨酸^[29]。茶氨酸是一种茶类所独有的非蛋白氨基酸,赋予茶鲜味并能抵消茶中生物碱和酚类物质带来的苦味和涩味^[43]。茶氨酸有两种手性异构体,D-茶氨酸和L-茶氨酸,抹茶中的L-茶氨酸约占抹茶总体氨基酸的50%,有助于抵消茶浸出液的涩味和苦味。L-茶氨酸是一种水溶性化合物,目前已被用于食品、药品以及化妆品等行业^[44]。

2.2.4 膳食纤维

根据食品法典委员会的定义,膳食纤维指的是可食用聚合物碳水化合物,其由3种及以上在小肠及上消化系统中既不水解也不吸收的单体形成^[45]。一般分为可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维。抹茶中约有38.5%的不溶性膳食纤维(如纤维素、半纤维素和木质素等),含量高于普通绿茶^[46],其含量受到遮荫情况及采摘时间和施肥等因素的显著影响^[47]。

2.2.5 其他生物活性物质

抹茶中的其他生物活性物质有茶多糖、叶绿素、维生素、矿物质与有机酸等,这些成分均在茶叶代谢中发挥重要作用。茶多糖是抹茶中甘味物质的来源,大多数茶多糖是由2~10个单糖组成的杂多糖,如葡萄糖、葡糖醛酸、鼠李糖、树胶醛糖、甘露糖、核糖、木糖、半乳糖、岩藻糖和半乳糖醛酸等^[48]。同时茶多糖还包含氨基酸、蛋白质和矿物质。在遮荫过程中,茶叶中的叶绿素含量增加,这可赋予抹茶独特的色彩^[49]。抹茶中的维生素(主要是VB、VC、VE)约占抹茶干质量的5%^[50],其中VC的含量约为普通绿茶的2倍^[31]。VC是一种水溶性葡萄糖衍生物,具有很强的抗氧化性,也是在体内参与多种代谢途径的一系列酶的必需辅因子,食用富含VC的食物可以降低患心血管疾病的风险^[51]。抹茶中的矿物质含量排序为:钾>镁>锰>钙>铁>锌>钠>硒>汞^[52]。钾是人体细胞渗透平衡的调节剂,镁可以维持人体的神经和肌肉活动,在之前的研究中发现,抹茶中这两种矿物质含量均高于普通绿茶^[29]。

2.3 抹茶的健康功效

2.3.1 抹茶的提神与认知提升功效

因茶叶中含有咖啡因和茶多酚,因此茶和茶制品最早的应用之一便是提神醒脑。咖啡因是一种神经活性兴奋剂,能够显著提高警觉性和认知能力。一般情况下,咖啡是咖啡因的主要来源。但研究表明,单摄入咖啡因会影响中枢神经系统和内分泌系统,在高血压患者中,咖啡因引起的血压急性升高更加显著,升幅为血压理想受试者的1.5倍以上;这种高血压效应在老年高血压患者中可能更加显著;与咖啡不同的是,抹茶中存在的茶氨酸,不仅可以提升咖啡因的提神作用,而且增加了主观警觉性^[53]。L-茶氨酸可以影响脑电图测量的静息状态皮层活动,通过抑制皮质神经元兴奋产生抗应激作用,从而抑制咖啡因摄入导致的血压升高^[54]。而且咖啡因与茶氨酸的结合,可以增加大脑中的多巴胺和胆碱传递从而增强认知功能^[55]。同时有研究证明,咖啡因(50~100 mg)和L-茶氨酸(100~250 mg)的组合能够提升受试者的视觉、听觉以及注意力转换的准确性^[56-57]。Baba等^[58]发现存在心理压力时,与单独摄入咖啡因相比,服用抹茶能够提高注意力和工作表现,同时可以缩

短任务反应时间。抹茶中的儿茶素能够通过减少下丘脑小胶质细胞中的神经炎症改善认知功能, 还可通过增加参与突触和神经元可塑性长期变化的基因的表达来减缓与年龄相关的认知能力下降^[59]。EGCG可以通过血脑屏障, 防止 β 淀粉样蛋白 (amyloid β -protein, A β) 的毒性和积累^[28]。茶氨酸也可以穿过血脑屏障, 主要是因为其结构类似于脑中主要的兴奋性神经递质——谷氨酸^[60]。

2.3.2 抹茶的抗癌效果

癌是恶性肿瘤中的一类, 属于不受限制的细胞增殖, 其响应于癌基因激活或肿瘤抑制基因失活而获得转移特性。癌症是全球第二大死亡原因, 其发病率和死亡率逐年上升^[61]。癌症的发生大致分为3步: 致癌、促癌和演进。癌症的发生与饮食习惯、环境和遗传等因素有关^[62]。抹茶中的活性物质对癌症预防的活性已经在许多模型中进行了研究。Bonuccelli等^[63]研究了抹茶对MCF7细胞 (一种人乳腺癌细胞) 的作用, 发现抹茶能够使癌细胞处于相对静止的代谢状态, 抑制哺乳动物雷帕霉素靶蛋白信号, 使细胞的氧化线粒体代谢和糖酵解下降。在抹茶的生物活性功能因子中, EGCG的抗癌活性已被验证^[64]。EGCG可以通过调节细胞增殖、分化、凋亡以及血管的生成, 在癌症的各个阶段起到抗癌活性。

2.3.3 抹茶的抗氧化活性

在恶劣环境、心理压力、高强度体能消耗和长时间饥饿等情况下, 人体发生氧化应激防御, 细胞过度合成活性氧, 使细胞膜、结构蛋白和细胞遗传物质受到损伤, 从而引发各种疾病。使机体保持氧化平衡的解决方法是摄入外源性抗氧化剂。抗氧化剂是一类可以清除自由基 (体内产生的活性氧和活性碳等) 的化合物。抗氧化剂因其在体内对氧化应激导致的病理过程和对食品药品的氧化变质的保护作用而受到越来越多的关注^[65]。

抹茶中的多酚、氨基酸 (主要是单宁) 和咖啡因是公认的抗氧化剂, 抹茶中的抗氧化剂含量为低品质绿茶的137倍^[66], 这可能是抹茶表现出各类健康功效的基础^[4]。抹茶浸泡后的生物活性物质与其浸泡时的水温密切相关, 研究发现水温大于90℃时, 抹茶浸泡液中的抗氧化物质含量最高^[67]。茶多酚的化学结构中有2个以上的邻位羟基多元酚, 使其能够有较强的供氢能力, 抗氧化能力与羟基数呈现正比关系^[68]。而且多酚中的芦丁和VC能够产生协同作用, 影响机体循环和胶原蛋白的合成^[69]。

2.3.4 抹茶的抗焦虑与神经保护功效

抹茶的抗焦虑或减压作用受到抹茶中咖啡因和EGCG的影响。抹茶抗焦虑效果与其茶氨酸含量呈正相关, 而与咖啡因、EGCG和精氨酸、茶氨酸的比值呈负相关^[70]。研究表明, 抹茶粉能够通过激活包括前额叶皮层-伏隔核-腹侧被盖区回路在内的多巴胺系统发挥抗抑郁和抗焦虑作用^[71]。茶氨酸的存在是抹茶具有减轻应激作用的

原因。Unno等^[72]以小鼠和药学院五年级学生为样本研究了抹茶饼干的减压效果, 发现食用抹茶能够抑制小鼠的肾上腺肥大 (小鼠压力特征) 以及人体的 α -淀粉酶活性 (人体压力特征)。研究人员在小鼠中评估了抹茶粉的抗抑郁作用^[71], 发现抹茶能激活多巴胺能神经回路, 并改善小鼠的抑郁情况, 抹茶也可以通过多巴胺D1受体信号激活多巴胺功能来改善小鼠的焦虑样行为, 由此产生的多巴胺增加也可以改善抑郁症状。

神经是支持有效情绪识别以促进安全和生存的关键系统发育底物。抹茶中的茶氨酸能够抑制谷氨酸诱导的大鼠皮层神经元死亡^[10], 并通过降低炎症、氧化应激、细胞凋亡和纤维蛋白 (A β 和 α -突触核蛋白) 积累而具有支持性神经保护作用。EGCG可以抑制棕榈酸激活的小胶质细胞中促炎细胞因子如肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、白细胞介素 (interleukin, IL)-6和IL-1 β 的产生, 并抑制脂质积聚^[73], 达到减少神经炎症的效果。

2.3.5 抹茶预防超重、糖尿病和心血管疾病的功效

2型糖尿病 (type-2 diabetes, T2D) 是威胁人类健康的一大慢性代谢疾病, 占总体糖尿病患者的90%以上^[74]。T2D和代谢综合征发病原因主要为过度摄入热量和体力活动不足等问题产生脂肪炎症, 从而发生胰岛素抵抗。T2D患者特征主要为高血糖, 长期高血糖可能会导致心脑血管的并发症^[75]。抹茶及抹茶中的生物活性物质对这些疾病的预防或改善作用已得到了广泛的研究。

抹茶能够改善高脂饮食诱导的肥胖、脂质积聚和肝脂肪变性的发展^[76]。抹茶中的茶多酚可以改变淀粉结构, 阻碍消化酶与淀粉的相互作用位点发挥抗糖尿病活性, 这表明它们可能在改变肠道微生物群的功能和防止患者血糖水平突然升高方面发挥作用, 并降低对葡萄糖和脂质的吸收^[77]。同时, 抹茶中的不溶性纤维和纤维结合酚类物质可以抑制小鼠血清中脂质和葡萄糖的升高^[46]。并且调节肠道微生物群是膳食纤维发挥生理作用的重要途径, 摄入不溶性膳食纤维能够增加肠道微生物的丰度, 并增加短链脂肪酸和粪便中的生物量^[78]。有研究表明, 儿茶素能够降低血液中甘油三酯和LDL的含量, 并增加HDL-C^[79], 从而改善脂质代谢、体质量和心脏健康^[72]。EGCG抑制参与脂质代谢的基因如FAS、SCD1和SREBP1a的表达, 导致游离脂肪酸的排泄增加; 还可通过胰岛素受体底物/蛋白激酶B和细胞外信号调节蛋白激酶/环磷酸腺苷效应元件结合蛋白/脑源性神经营养因子信号通路改善海马的突触可塑性, 并通过抑制下丘脑小胶质细胞中的JAK2/STAT3信号通路减少神经炎症, 从而改善心脏健康^[80]。此外, 抹茶还能下调小鼠的脂质和葡萄糖水平。咖啡因通过抑制淀粉酶活性, 同时拮抗腺苷受体, 导致肾上腺素释放量更高, 增强胰岛素敏感性^[28]。

3 抹茶在食品工业中的应用与前景

3.1 抹茶在食品工业中的应用

抹茶可以被加入到如酸奶、冰淇淋和奶茶等乳制品中。目前乳制品与抹茶的结合,主要是因为风味,动物乳制品能够掩盖多酚所带来的苦涩味^[18]。但是动物乳制品,特别是牛奶及其制品被认为是递送抹茶中活性多酚的理想介质^[81],能够增强多酚的生物利用率。多酚和蛋白质结合可以通过亲水、疏水及氢键进行,EGCG与蛋白结合具有较强的稳定性和装载效率^[82]。目前茶基饮料和食品的工业制作过程中为了减少苦味和涩味,常在加工过程中消除多酚,以提升消费者的兴趣^[18],但这通常会导致产品健康功效的降低。添加抹茶能够抑制脂质过氧化和二次脂质过氧化产物的形成,不仅能够改善食品在储存期间的颜色和质地风味,还可以提升消费者接受度,同时还可以增强食品的功能性。

添加抹茶的谷类食物,如面团、谷类零食等,其蛋白质-酚类相互作用可以改变谷类蛋白质的二级和三级结构,并通过改变蛋白质的溶解度和热特性来影响食品的物性及加工性能,如颜色、风味、黏度、弹性和流变特性^[83]。Liu Zipeng等^[84]探讨了抹茶和面筋之间的相互作用,研究发现抹茶中茶氨酸能够通过形成二硫键和 β -折叠,提升面团的延展性;茶多酚能够与蛋白质形成大量的氢键从而增强面团的韧性。EGCG可以通过增强氢键和疏水相互作用、水-固体相互作用增加面筋的强度和改善面团的稳定性^[85]。同时抹茶中生物活性物质的加入可以使食品保质期延长,并增加其功能性。Ebrahimi Monfared等^[86]制作了一种功能性抹茶什锦,研究发现与未加入抹茶的样品相比,添加抹茶的什锦具有更强的抗氧化性和抑菌性。

在含油食品中,在高温情况下发生的脂质过氧化容易生成活性羰基物质(reactive carbonyl species, RCS),如丙烯醛,这些物质会对人体健康造成危害^[87]。在食品中,添加抹茶能够显著抑制烘焙过程中RCS的累积,因为儿茶素能够与其反应生成共轭物^[88],抑制丙烯醛和丙二醛的积累。在热加工过程中(油炸或烘焙),游离天冬酰胺和还原糖产生美拉德反应,可能会生成丙烯酰胺^[89],这是一种潜在的遗传和生殖毒素。茶粉的加入能够使食品中的丙烯酰胺含量降低,并增加多酚的含量^[90]。茶中的多酚具有较强的抗氧化活性,可以抑制丙烯酰胺的形成,并且抗氧化能力与多酚苯环上的羟基数量相关并呈正比。

3.2 抹茶在食品工业中的应用前景

目前抹茶主要应用于饮料、乳制品、烘焙食品配料及谷类食品中。在食品工业中通过添加抹茶能够使食品增添风味、延长保质期并增加功能性。但目前研究多数

关注于抹茶对于食品物理特性的影响,并未深入讨论抹茶中的活性物质对食品性质影响的机理及其可能的功能性协同作用。因此后续的抹茶食品开发研究可以分为两个方面:一方面考虑到抹茶成分能够与蛋白质、脂质、纤维等其他食品成分的相互作用,以及在不同食品体系中的释放和生物利用度;另一方面,抹茶是一种富含多种生物活性成分的特殊茶叶,如茶多酚、茶氨酸、咖啡因等。这些成分具有抗氧化、抗炎症、抗菌、以及对心血管健康、代谢调节等方面的积极作用;而且与咖啡等产品不同,抹茶的茶氨酸含量高于普通绿茶,与单摄入咖啡因相比,茶氨酸与咖啡因协同能够增强提神效果,同时降低机体因摄入咖啡因所带来的高血压等负面影响。因此,将抹茶作为功能性食品的成分,有望为人们提供更健康的饮食选择,具有广大的市场应用前景。

4 结语

本研究利用可视化分析方法,探讨了近十年来抹茶在中国知网和WOS数据库中的研究热点和趋势,揭示了抹茶研究领域的重要主题和关注焦点。运用了密度可视化分析方法,深入探究了抹茶生物活性物质与健康功效之间的关系。通过这一分析,可以更好地理解抹茶在健康领域中的潜在应用和价值,并为未来的抹茶研究和产品开发提供了有益的指导和启示。抹茶的健康功效主要集中在提神、认知提升、神经保护、降低代谢疾病和癌症发生的风险方面。抹茶的提神效果归功于其所含的咖啡因和茶多酚,且抹茶中的茶氨酸能够与咖啡因协同提升其效果,并且由于抹茶与其他茶类不同的饮用方式,使其能够将茶叶的各项成分均摄入人体,增强其功能特性。虽然抹茶具有良好的健康功效,但目前添加抹茶的食品多数集中于其对风味和质构的改善,抹茶在食品中的健康功能应用尚未得到充分的研究。综上所述,抹茶是一种有潜力的天然来源并具备多种功效的健康茶制品。这些研究结果不仅有助于加深对抹茶的科学认识,还为相关领域的学者提供了重要的参考和启发。

参考文献:

- [1] BABA Y, TAKIHARA T, OKAMURA N. Matcha does not affect electroencephalography during sleep but may enhance mental well-being: a randomized placebo-controlled clinical trial[J]. *Nutrients*, 2024, 16(17): 2907. DOI:10.3390/nu16172907.
- [2] 汪凌辉, 许娜, 杨倩楠, 等. 茶儿茶素稳定血糖作用及机理研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(10): 330-341. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230626-198.
- [3] YE J H, FANG Q T, ZENG L, et al. A comprehensive review of matcha: production, food application, potential health benefits, and gastrointestinal fate of main phenolics[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(22): 7959-7980. DOI:10.1080/10408398.2023.2194419.

- [4] SIVANESAN I, GOPAL J, MUTHU M, et al. Retrospecting the antioxidant activity of Japanese matcha green tea: lack of enthusiasm?[J]. Applied Sciences, 2021, 11(11): 5087. DOI:10.3390/app11115087.
- [5] 曾淋, 毛雅琳, 汪芳, 等. 不同遮荫方式及加工工艺对碾茶品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(15): 118-126. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2023.15.018.
- [6] MAEDA-YAMAMOTO M, TACHIBANA H, SAMESHIMA Y, et al. Green tea (cv. Benifuuki) powder and catechins availability[M]// PREEDY V R. Tea in health and disease prevention. Amsterdam: Elsevier, 2013: 115-125. DOI:10.1016/b978-0-12-384937-3.00010-0.
- [7] PHONGNARISORN B, ORFILA C, HOLMES M, et al. Enrichment of biscuits with matcha green tea powder: its impact on consumer acceptability and acute metabolic response[J]. Foods, 2018, 7(2): 17. DOI:10.3390/foods7020017.
- [8] KU K M, CHOI J N, KIM J, et al. Metabolomics analysis reveals the compositional differences of shade grown tea (*Camellia sinensis* L.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(1): 418-426. DOI:10.1021/jf902929h.
- [9] 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, 2021, 88: 44-52. DOI:10.1016/j.nutres.2020.12.024.
- [10] 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-HT_{1A} receptor-mediated mechanisms[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 59: 301-308. DOI:10.1016/j.jff.2019.05.046.
- [11] PANNUCCI E, DELLA POSTA S, SBROCCA I, et al. Evaluation of the antiglycative and antioxidant activities of matcha tea[J/OL]. Natural Product Research, 2024: 1-10. https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2375758.
- [12] 贝哲斯咨询社区. 2024年全球与中国抹茶行业现状概览及发展趋势预测报告[EB/OL].[2024-03-16]. https://report.csdn.net/market/65f52953857a901a0ff9edd4.html.
- [13] 刘爱琴, 王胜南, 吕红萍, 等. 大麦若叶固体饮料的研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(10): 168-174. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2022.10.021.
- [14] CHEN L, CAO H, HUANG Q, et al. Absorption, metabolism and bioavailability of flavonoids: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(28): 7730-7742. DOI:10.1080/10408398.2021.1917508.
- [15] 李东, 唐璇, 雷雨, 等. 球磨机制备超微抹茶粉的生产工艺优化及其理化特性研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(1): 120-125. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2023.01.028.
- [16] KOCHMAN J, JAKUBCZYK K, ANTONIEWICZ J, et al. Health benefits and chemical composition of matcha green tea: a review[J]. Molecules, 2020, 26(1): 85. DOI:10.3390/molecules26010085.
- [17] NAGENDRABABU V, DILOKTHORNSAKUL P, JINATONGTHAI P, et al. Glossary for systematic reviews and meta-analyses[J]. International Endodontic Journal, 2020, 53(2): 232-249. DOI:10.1111/iej.13217.
- [18] BHAGAT A R, DELGADO A M, ISSAOUI M, et al. Review of the role of fluid dairy in delivery of polyphenolic compounds in the diet: chocolate milk, coffee beverages, matcha green tea, and beyond[J]. Journal of AOAC International, 2019, 102(5): 1365-1372. DOI:10.5740/jaoacint.19-0129.
- [19] KAMDEM J P, DUARTE A E, LIMA K R R, et al. Research trends in food chemistry: a bibliometric review of its 40 years anniversary (1976–2016)[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 448-457. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.05.021.
- [20] UNGUREANU E L, MOCANU A L, STROE C A, et al. Assessing health risks associated with heavy metals in food: a bibliometric analysis[J]. Foods, 2023, 12(21): 3974. DOI:10.3390/foods12213974.
- [21] WANG L Q, JIANG J J, LI Y, et al. Global trends and hotspots in research on osteoporosis rehabilitation: a bibliometric study and visualization analysis[J]. Frontiers in Public Health, 2022, 10: 1022035. DOI:10.3389/fpubh.2022.1022035.
- [22] 袁丽萍, 雷震东, 王欢欢, 等. 基于多元统计分析的抹茶适制品种综合评价[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 229-234. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20130110-079.
- [23] 胡芝. 不同遮荫条件对碾茶品质成分影响的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023. DOI:10.27047/d.cnki.ggudu.2023.003169.
- [24] 郭刚, 马云龙, 徐铭辰. 不同品种抹茶营养物质和抗氧化活性的测定及主成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(2): 239-246. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033644.
- [25] ZHOU J H, YU Y E, DING L J, 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. DOI:10.3390/nu13061950.
- [26] 杜璇. 抹茶的加工工艺研究及制品配方优化[D]. 宁波: 宁波大学, 2020. DOI:10.27256/d.cnki.gnbou.2020.000600.
- [27] NIU J X, SHANG M S, LI X J, et al. Health benefits, mechanisms of interaction with food components, and delivery of tea polyphenols: a review[J/OL]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023: 1-13. https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2253542.
- [28] SOKARY S, AL-ASMAKH M, ZAKARIA Z, et al. The therapeutic potential of matcha tea: a critical review on human and animal studies[J]. Current Research in Food Science, 2022, 6: 100396. DOI:10.1016/j.crfs.2022.11.015.
- [29] 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. DOI:10.1016/j.jfca.2020.103581.
- [30] 李文萱, 方奇挺, 施秀姣, 等. 抹茶: 历史、健康益处和潜在风险[J/OL]. 现代食品科技, 1-15[2024-03-09]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.12.1414.
- [31] PHUAH Y Q, CHANG S K, NG W J, et al. A review on matcha: chemical composition, health benefits, with insights on its quality control by applying chemometrics and multi-omics[J]. Food Research International, 2023, 170: 113007. DOI:10.1016/j.foodres.2023.113007.
- [32] 王欢欢, 袁丽萍, 雷震东, 等. 基于多元统计分析评价不同茶树品种的绿茶适制性[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 9-15. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230516-153.
- [33] PÉREZ-BURILLO S, NAVA-JAS-PORRAS B, LÓPEZ-MALDONADO A, et al. Green tea and its relation to human gut microbiome[J]. Molecules, 2021, 26(13): 3907. DOI:10.3390/molecules26133907.
- [34] ZHAO T T, LI C, WANG S, et al. Green tea (*Camellia sinensis*): a review of its phytochemistry, pharmacology, and toxicology[J]. Molecules, 2022, 27(12): 3909. DOI:10.3390/molecules27123909.
- [35] BOROS K, JEDLINSZKI N, CSUPOR D. Theanine and caffeine content of infusions prepared from commercial tea samples[J]. Pharmacognosy Magazine, 2016, 12(45): 75-79. DOI:10.4103/0973-1296.176061.
- [36] ARES G, TORRES M, MACHIN L, et al. Caffeine warning labels may increase young adults' intention to purchase energy drinks[J].

- Food Quality and Preference, 2023, 112: 105003. DOI:10.1016/j.foodqual.2023.105003.
- [37] TAN F Y, TAN C, ZHAO A P, et al. Simultaneous determination of free amino acid content in tea infusions by using high-performance liquid chromatography with fluorescence detection coupled with alternating penalty trilinear decomposition algorithm[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(20): 10839-10847. DOI:10.1021/jf2023325.
- [38] VENDITTI E, BACCHETTI T, TIANO L, et al. Hot vs. cold water steeping of different teas: do they affect antioxidant activity?[J]. Food Chemistry, 2010, 119(4): 1597-1604. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.09.049.
- [39] LIU J H, WANG Y M, LV J H, et al. Biodegradable composite films based on egg white protein and tea polyphenol: physicochemical, structural and antibacterial properties[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 38: 101098. DOI:10.1016/j.fpsl.2023.101098.
- [40] LI S M, ZHANG L, WAN X C, et al. Focusing on the recent progress of tea polyphenol chemistry and perspectives[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(3): 437-444. DOI:10.1016/j.fshw.2021.12.033.
- [41] KOLÁČKOVÁ T, SUMCZYNSKI D, MINAŘÍK A, et al. The effect of *in vitro* digestion on matcha tea (*Camellia sinensis*) active components and antioxidant activity[J]. Antioxidants, 2022, 11(5): 889. DOI:10.3390/antiox11050889.
- [42] MIYAUCHI S, YUKI T, FUJI H, et al. High-quality green tea leaf production by artificial cultivation under growth chamber conditions considering amino acids profile[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, 118(6): 710-715. DOI:10.1016/j.jbiosc.2014.05.008.
- [43] MINDT M, WALTER T, KUGLER P, et al. Microbial engineering for production of *N*-functionalized amino acids and amines[J]. Biotechnology Journal, 2020, 15(7): e1900451. DOI:10.1002/biot.201900451.
- [44] TÜRKÖZÜ D, ŞANLIER N. *L*-Theanine, unique amino acid of tea, and its metabolism, health effects, and safety[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(8): 1681-1687. DOI:10.1080/10408398.2015.1016141.
- [45] STEPHEN A M, CHAMP M M J, CLORAN S J, et al. Dietary fibre in Europe: current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes and relationships to health[J]. Nutrition Research Reviews, 2017, 30(2): 149-190. DOI:10.1017/S095442241700004X.
- [46] XU P, YING L, HONG G J, 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. DOI:10.1039/c5fo00828j.
- [47] VENKATESAN S, GANAPATHY M N K. Impact of nitrogen and potassium fertiliser application on quality of CTC teas[J]. Food Chemistry, 2004, 84(3): 325-328. DOI:10.1016/S0308-8146(03)00215-2.
- [48] ZHANG Z B, SUN L L, CHEN R H, et al. Recent insights into the physicochemical properties, bioactivities and their relationship of tea polysaccharides[J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137223. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.137223.
- [49] ENGELHARDT U H. Tea chemistry: what do and what don't we know? a micro review[J]. Food Research International, 2020, 132: 109120. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109120.
- [50] NOVIKOVA Z V, SERGEEVA S M, ZAKHAROVA A D, et al. Justification of the use of green tea "Matcha" in the production of functional confectionery[J]. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies, 2019, 81(1): 168-172. DOI:10.20914/2310-1202-2019-1-168-172.
- [51] HALLIWELL B. Vitamin C and genomic stability[J]. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 2001, 475(1/2): 29-35. DOI:10.1016/S0027-5107(01)00072-0.
- [52] KOLÁČKOVÁ T, SUMCZYNSKI D, BEDNAŘÍK V, et al. Mineral and trace element composition after digestion and leaching into matcha ice tea infusions (*Camellia sinensis* L.)[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 97: 103792. DOI:10.1016/j.jfca.2020.103792.
- [53] ABBAS-HASHEMI S A, HOSSEININASAB D, RASTGOO S, et al. The effects of caffeine supplementation on blood pressure in adults: a systematic review and dose-response meta-analysis[J]. Clinical Nutrition ESPEN, 2023, 58: 165-177. DOI:10.1016/j.clnesp.2023.09.923.
- [54] KELLY S P, GOMEZ-RAMIREZ M, MONTESI J L, et al. *L*-theanine and caffeine in combination affect human cognition as evidenced by oscillatory alpha-band activity and attention task performance[J]. The Journal of Nutrition, 2008, 138(8): 1572S-1577S. DOI:10.1093/jn/138.8.1572S.
- [55] 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, 2017, 99: 72-83. DOI:10.1016/j.foodres.2017.05.002.
- [56] CAMFIELD D A, STOUGH C, FARRIMOND J, et al. Acute effects of tea constituents *L*-theanine, caffeine, and epigallocatechin gallate on cognitive function and mood: a systematic review and meta-analysis[J]. Nutrition Reviews, 2014, 72(8): 507-522. DOI:10.1111/nure.12120.
- [57] KAHATHUDUWA C N, DASSANAYAKE T L, AMARAKOON A M T, et al. Acute effects of theanine, caffeine and theanine-caffeine combination on attention[J]. Nutritional Neuroscience, 2017, 20(6): 369-377. DOI:10.1080/1028415X.2016.1144845.
- [58] 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. DOI:10.3390/nu13051700.
- [59] 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. DOI:10.1155/2020/8882763.
- [60] SUGIYAMA T, SADZUKA Y, TANAKA K, et al. Inhibition of glutamate transporter by theanine enhances the therapeutic efficacy of doxorubicin[J]. Toxicology Letters, 2001, 121(2): 89-96. DOI:10.1016/S0378-4274(01)00317-4.
- [61] SIEGEL R L, MILLER K D, JEMAL A. Cancer statistics, 2019[J]. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2019, 69(1): 7-34. DOI:10.3322/caac.21551.
- [62] SARKAR S, HORN G, MOULTON K, et al. Cancer development, progression, and therapy: an epigenetic overview[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2013, 14(10): 21087-21113. DOI:10.3390/ijms141021087.
- [63] 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 signalling pathways[J]. Aging, 2018, 10(8): 1867-1883. DOI:10.18632/aging.101483.
- [64] ANTONIOLI L, FORNAI M, BLANDIZZI C, et al. Adenosine signaling and the immune system: when a lot could be too

- much[J]. Immunology Letters, 2019, 205: 9-15. DOI:10.1016/j.imlet.2018.04.006.
- [65] GULCIN İ. Antioxidants and antioxidant methods: an updated overview[J]. Archives of Toxicology, 2020, 94(3): 651-715. DOI:10.1007/s00204-020-02689-3.
- [66] KOLÁČKOVÁ T, KOLOFIKOVÁ K, SYTAŘOVÁ I, et al. Matcha tea: analysis of nutritional composition, phenolics and antioxidant activity[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2020, 75(1): 48-53. DOI:10.1007/s11130-019-00777-z.
- [67] JAKUBCZYK K, KOCHMAN J, KWIATKOWSKA A, et al. Antioxidant properties and nutritional composition of matcha green tea[J]. Foods, 2020, 9(4): 483. DOI:10.3390/foods9040483.
- [68] ABDULLIN I F, TUROVA E N, BUDNIKOV G K. Coulometric determination of the antioxidant capacity of tea extracts using electrogenerated bromine[J]. Journal of Analytical Chemistry, 2001, 56(6): 557-559. DOI:10.1023/A:1016636912280.
- [69] GROSSO G, BEI R, MISTRETTA A, et al. Effects of vitamin C on health: a review of evidence[J]. Frontiers in Bioscience, 2013, 18(3): 1017-1029. DOI:10.2741/4160.
- [70] 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. DOI:10.3390/nu10101468.
- [71] 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. DOI:10.3390/nu15030581.
- [72] 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. DOI:10.1016/j.heliyon.2019.e01653.
- [73] OHISHI T, GOTO S, MONIRA P, et al. Anti-inflammatory action of green tea[J]. Anti-Inflammatory & Anti-Allergy Agents in Medicinal Chemistry, 2016, 15(2): 74-90. DOI:10.2174/1871523015666160915154443.
- [74] DART A B, SELLERS E A C, MCGAVOCK J, et al. 24-h Ambulatory blood pressure readings and associations with albuminuria in youth with type 2 diabetes: a cross sectional analysis from the iCARE cohort[J]. Journal of Diabetes and Its Complications, 2023, 37(12): 108633. DOI:10.1016/j.jdiacomp.2023.108633.
- [75] XU X M, FENG C W, HAN H, et al. Prospective study of depressive symptoms and incident cardiovascular diseases in people with type 2 diabetes[J]. Journal of Affective Disorders, 2024, 345: 427-434. DOI:10.1016/j.jad.2023.10.145.
- [76] LI Y, XIAO J H, 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. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111852.
- [77] FU T T, NIU L Y, LI Y, et al. Effects of tea products on *in vitro* starch digestibility and eating quality of cooked rice using domestic cooking method[J]. Food & Function, 2020, 11(11): 9881-9891. DOI:10.1039/D0FO02499F.
- [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. DOI:10.3164/jcbrn.22-81.
- [79] SUN X W, DEY P, BRUNO R S, et al. EGCG and catechin relative to green tea extract differentially modulate the gut microbial metabolome and liver metabolome to prevent obesity in mice fed a high-fat diet[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2022, 109: 109094. DOI:10.1016/j.jnutbio.2022.109094.
- [80] LI F, GAO C, YAN P, et al. EGCG reduces obesity and white adipose tissue gain partly through AMPK activation in mice[J]. Frontiers in Pharmacology, 2018, 9: 1366. DOI:10.3389/fphar.2018.01366.
- [81] FEI S W, ZOU L, XIE X L, et al. Purification and characterization of bovine β -lactoglobulin variants A and B (characterization of bovine β -lactoglobulin variants)[J]. Food Science and Technology Research, 2020, 26(3): 399-409. DOI:10.3136/fstr.26.399.
- [82] CHANPHAI P, BOURASSA P, KANAKIS C D, et al. Review on the loading efficacy of dietary tea polyphenols with milk proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 322-328. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.10.008.
- [83] GÜNAL-KÖROĞLU D, LORENZO J M, CAPANOGLU E. Plant-based protein-phenolic interactions: effect on different matrices and *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Food Research International, 2023, 173(Pt 1): 113269. DOI:10.1016/j.foodres.2023.113269.
- [84] LIU Z P, CHEN J, ZHENG B, et al. Effects of matcha and its active components on the structure and rheological properties of gluten[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 124: 109197. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109197.
- [85] TIAN C, ZHEN T Y, MA M, et al. Contribution of catechin monomers in tea polyphenols to the structure and physicochemical properties of wheat gluten and its sub-fractions[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 101: 103306. DOI:10.1016/j.jcs.2021.103306.
- [86] EBRAHIMI MONFARED K, GHARACHORLOO 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(2): 975-986. DOI:10.1007/s11694-021-01224-x.
- [87] ZARKOVIC K, UCHIDA K, KOLENC D, et al. Tissue distribution of lipid peroxidation product acrolein in human colon carcinogenesis[J]. Free Radical Research, 2006, 40(6): 543-552. DOI:10.1080/10715760500370048.
- [88] SUGIMOTO K, MATSUOKA Y, SAKAI K, et al. Catechins in green tea powder (matcha) are heat-stable scavengers of acrolein, a lipid peroxide-derived reactive carbonyl species[J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129403. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129403.
- [89] SEMLA M, GOC Z, MARTINIAKOVÁ M, et al. Acrylamide: a common food toxin related to physiological functions and health[J]. Physiological Research, 2017, 66(2): 205-217. DOI:10.33549/physiolres.933381.
- [90] HUANG Y, XIAO H B, ZHANG L, et al. The effect of superfine tea powder addition on the acrylamide content of innovative Xinjiang nang products (tea nang)[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2020, 37(8): 1-18. DOI:10.1080/19440049.2020.1769199.