

周雷, 隋勇, 祝振洲, 等. 谷物茶品质及其功能特性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 490–499. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080268

ZHOU Lei, SUI Yong, ZHU Zhenzhou, et al. Research Progress in Quality and Functional Characteristics of Cereal Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 490–499. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080268

· 专题综述 ·

谷物茶品质及其功能特性研究进展

周 雷^{1,2}, 隋 勇^{1,*}, 祝振洲², 李书艺², 许 锐^{1,2}, 施建斌¹, 蔡 沙¹, 熊 添¹, 蔡 芳¹, 梅 新^{1,*}

(1.湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064;

2.武汉轻工大学硒科学与工程现代产业学院/国家富硒农产品加工技术研发专业中心/湖北省绿色富硒农产品精深加工工程技术研究中心, 湖北武汉 430023)

摘 要:全谷物保留了完整谷粒所具备的营养成分, 经常食用有助于维持健康体重, 还可以降低心血管疾病、II 型糖尿病、肠道癌症等疾病的患病风险。但全谷物的适口性和烹饪特性差, 难以被消费者接受, 因此, 改良传统加工工艺, 开发新的全谷物食品十分必要。谷物茶作为一种全谷物食品, 不仅改善了全谷物的口感, 而且保留了其营养价值和健康功效。文章主要对谷物茶在烘烤、发芽、发酵等不同加工工艺下的风味物质变化、功能特性进行综述, 并重点探讨了谷物茶在加工过程中丙烯酰胺、晚期糖基化终末产物等有害物形成机制及抑制方法, 旨在为全谷物饮品的开发利用提供理论依据。

关键词:谷物茶, 加工, 风味, 营养, 安全性

中图分类号: TS210.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)12-0490-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080268

本文网刊:



Research Progress in Quality and Functional Characteristics of Cereal Tea

ZHOU Lei^{1,2}, SUI Yong^{1,*}, ZHU Zhenzhou², LI Shuyi², XU Rui^{1,2}, SHI Jianbin¹, CAI Sha¹, XIONG Tian¹, CAI Fang¹, MEI Xin^{1,*}

(1.Hubei Academy of Agricultural Science, Institute for Farm Products Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Wuhan 430064, China;

2.School of Modern Industry for Selenium Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University/
National R&D Center for Se-Rich Agricultural Products Processing/ Hubei Engineering Research Center
for Deep Processing of Green Se-rich Agricultural Products, Wuhan 430023, China)

Abstract: Whole grains retain the nutrients found in whole grains, which can help maintain a healthy weight and reduce the risk of cardiovascular disease, type II diabetes, bowel cancer and other diseases when eaten regularly. However, whole grain is difficult to be accepted by consumers due to its poor palatability and cooking characteristics. Therefore, it is necessary to improve traditional processing technology and develop new whole grain foods. As a whole grain food, grain tea not only improve the taste of whole grain, but also retain nutritional value and health effect. This paper reviews research on the changes of flavor substances and functional properties of grain tea by baking, sprouting and fermentation. In addition, the formation mechanism and inhibition methods of acrylamide and end-products of advanced glycation during the processing of grain tea discussed. This paper would provide theoretical reference for the development and utilization of whole grain drinks.

Key words: grain tea; processing; flavor; nutrition; security

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 湖北省揭榜制粮食科技项目 (2021KJCX-06); 武汉市知识创新专项 (2022020801020344)。

作者简介: 周雷 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 粮食加工, E-mail: zhouleidj@163.com。

* 通信作者: 隋勇 (1987-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品化学, E-mail: suiyong0429@foxmail.com。

梅新 (1978-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粮食加工及副产物加工利用, E-mail: meixin0898@163.com。

全谷物是指完整的、碾成粉状、碎块状或压成片状的谷物颖果,其淀粉胚乳、胚芽和糠麸的比例与在完整颖果中的比例基本相同^[1]。市面上最常见的谷物原料主要有小麦、大麦、燕麦、糙米、荞麦、高粱、小米和藜麦等^[2],全谷物食品则是以这些天然谷物籽粒或与天然谷物有相当比例麸皮、胚芽和胚乳的谷物原材料加工制作而成的食品^[3]。与精制谷物相比,尽管全谷物食品具有很高的营养价值,但其具有成本较高,感官特性差以及需要更长的烹饪时间和准备时间等缺点,并不受消费者所青睐^[4]。因此,在多数国家的全谷物食品消费量都低于目标水平的情况下^[5],利用加工技术开发全谷物产品,提高饮食质量,发掘全谷物潜在的健康促进功能显得十分必要。

谷物茶是由一种或多种全谷物为原料通过烘烤或焙炒制熟,经简单烧煮或沸水冲调后食用的茶饮,因其独特的香气、口感和健康益处,在一些亚洲和欧洲国家受到欢迎^[6]。但也存在口味单一、生产标准不统一的问题。近年国内外对谷物茶的研究也在逐渐增多,但尚未有系统的文献综述,该研究从谷物茶的种类、加工、功能活性以及风味和安全性进行概述,并指出其存在的问题及今后的研究重点,旨在为今后谷物茶的加工和全谷物饮品研发提供现实的理论基础和智力支撑。

1 谷物茶种类及其加工工艺对品质的影响

以全谷物为原料制作的谷物茶越来越受到关注,目前市场上主要谷物茶种类有大麦茶、荞麦茶、高粱茶、米茶、薏米茶等。当前,对谷物茶的研究主要集中在不同加工工艺对谷物茶品质的改善作用方面。烘烤已广泛应用于谷物茶产品的加工,由表 1 得出,烘烤不仅可以增加大麦茶、小麦芽茶和高粱茶、米茶中香气化合物和营养物质的含量,还可以促进大麦茶可溶性营养素在茶汤中的溶解。除了烘烤之外,发芽、发酵和蒸煮已越来越多地用于增强和改变所需的食品质量,例如颜色、质地、外观、滋味和风味^[7]。谷物发芽过程能丰富积累生物活性成分,有利于高效生产具有生物活性的功能性食品^[8]。经发芽处理后荞麦茶、米茶的感官品质和生物活性成分含量均得到提升,浸泡处理则可以提高苦荞茶、米茶中营养物质的可渗透性和其茶汤品质。发酵是谷物加工的重要手段之一,发酵提高了高粱茶、薏米茶的营养物质含量和香气化合物丰富度。

1.1 大麦茶

大麦是皮大麦和裸大麦的总称,前者颖壳和颖果相联结,后者内外颖与颖果相分离,籽粒裸露在外,通常所说的大麦指带壳的皮大麦,而裸大麦则一般叫做裸麦、青稞^[9-10]。以皮大麦为原料制成的大麦茶和以裸大麦制作的青稞茶饮料因其清凉浓郁的香味和健康益处,近些年来愈发受到亚洲地区消费者的欢迎。大麦茶又称麦茶、麦汤,其通常是通过将筛选后的大麦籽粒炒干脱壳制成,并能够大量保留大麦中的

营养物质。

近年来,大麦茶的加工工艺在不断创新完善。张端莉等^[11]确定了发芽大麦茶的最佳加工工艺:发芽时间 3 d,烘烤时间 25 min,烘烤温度 170 ℃,此条件下制备的发芽大麦茶感官评分最优。曾亮等^[12]确定了青稞茶制备的最佳工艺条件为:烘烤温度 200.00 ℃,烘烤时间 7.00 min,蒸煮时间 25.50 min,加水温度 49.50 ℃,此时茶汤的营养损失最小,感官评价最佳。有研究表明,大麦茶和小麦芽茶烘烤后的粗蛋白含量增加,水分含量降低,其总酚类物质和黄酮类化合物的含量显著高于蒸茶^[13]。此外,烘烤后的大麦茶相较于未烘烤大麦,其糠醛和杂环类化合物的相对含量明显增加,烘炒香气更加浓郁^[9]。通过对烘焙和水合温度对饮料的物理成分和水中可溶性固体释放的影响研究,发现制备大麦茶饮料时释放的可溶性固体的百分比与烘烤和水合温度成正比^[14]。综上,和表 1 中其他谷物茶一样,烘烤技术不仅增强了大麦茶的营养物质和香气,还促进了茶汤中可溶性固体的释放,因此认为烘焙法是生产大麦茶的合适技术。

1.2 荞麦茶

荞麦又称乌麦、三角麦,是蓼科荞麦属双子叶植物,最早生长于我国西南的喜马拉雅山系地区^[15]。苦荞麦是荞麦中的一种,因其总 B 族维生素和黄酮类化合物(如芦丁和槲皮素)含量高于普通荞麦,而受到关注^[16-17]。目前研发制茶的荞麦品种主要有苦荞麦和金荞麦,其中又以苦荞为多。而苦荞茶又分为以完整脱壳苦荞粒为原料制成的全麦型苦荞茶和以苦荞粉和苦荞麦麸为原料经挤压成型制成的造粒型苦荞茶。其中全麦型苦荞茶生产工艺又分为经浸泡、蒸煮脱壳后焙炒的蒸煮米工艺,和焙炒后脱壳的焙炒工艺。苦荞茶因其独特的麦芽香气,在中国、日本、韩国和欧洲国家十分流行。

Qin 等^[18]发现浸泡处理显著提高了苦荞中酚类化合物的含量,蒸汽处理、干燥和烘烤过程则显著降低总黄酮和总酚类化合物含量。Liu 等^[19]发现与普通荞麦相比,苦荞的总酚含量、总黄酮含量显著提高,更适合作为苦荞茶的原料,且在制作苦荞茶时,建议采用蒸和煮两种方法处理,来最大程度地减少热降解或提高其酚类化合物和抗氧化能力。此外,研究证明采用萌发处理后的荞麦籽粒提高了荞麦茶的感官品质、总黄酮含量、GABA 含量及 DPPH 自由基清除率,比未经萌发处理的荞麦茶具有更高的营养价值^[20]。从苦荞茶风味物质来看,经过蒸煮、脱壳处理及蒸煮米工艺生产的苦荞茶以烷烃和烯类为主,而经焙炒工艺生产的苦荞茶以醛类和烷烃为主,因其含更多的苯酚、醇类、醚类、酮类和酯类,特别是吡嗪类化合物,而香味浓烈持久^[21]。综上,蒸煮工艺能较好地保留苦荞茶的营养物质及功能特性,焙炒工艺则能提供更好的风味。

1.3 高粱茶

高粱,学名双色高粱,是禾本科植物中富含碳水化合物化合物,原产于非洲^[22]。目前被认为是世界上第五大碳水化合物丰富的作物,仅次于小麦、玉米、水稻和大麦,在非洲和亚洲消费量很大^[23]。高粱籽粒中含有丰富的生物活性物质,特别是酚类化合物,如酚酸、类黄酮和缩合单宁^[24],经常食用对人体具有很大的健康益处。因此,以全高粱谷物制成的高粱茶,与苦荞、糙米、大麦茶一样,在中国和世界各地都很受欢迎。

目前国内外对高粱茶加工工艺的研究主要集中在加工对其酚类物质以及其抗氧化活性的影响方面。Wu 等^[25]发现浸泡和蒸煮导致了高粱茶中总酚、总黄酮和原花青素含量的损失,烘烤则促使酚类化合物水平、抗氧化剂、 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制活性显著增加。Sun 等^[26]发现由酿酒酵母发酵的高粱粒茶显示出更高的酚类物质含量、抗氧化能力,发酵和烘烤过程显著增加了吡咯和吡嗪的含量,促使酵母发酵高粱茶具有更好的坚果和烘烤风味。此外,与全谷物浸泡液相比,粉末浸泡液制成的高粱茶具有更丰富的挥发性化合物^[27]。综上,发酵和烘烤处理能显著提升高粱茶的营养物质和功能特性,并且提供更浓郁的风味。此外,以黑色高粱制作的高粱茶具有高酚含量和抗氧化活性,而以白色高粱制作高粱茶则具有较好的香气强度和多样性^[28],因此可以根据对高粱茶品质的需求选择不同的原料。

1.4 米茶

米茶作为“食之果腹,饮之解渴”的传统小吃,因其浓郁的香气和微甜的滋味深受湖北、湖南地区人民喜爱。米茶通常是以大米为原料,经过浸泡、焙炒后制作而成,使用时再用清水煮成一种金黄色或棕色,可冷饮亦可热饮的清汤饮品^[29]。米茶茶汤有着清凉解暑、利尿的功效,饮用茶汤后剩下的糙米亦可替代米饭进行食用,这不仅改善了糙米作为主食食用时的糟糕口感,又保留了糙米的营养物质和保健功效。

目前,研究者们对采用不同加工工艺加工米茶

的感官品质和挥发性物质进行了大量研究。研究发现,烘烤和发芽都能提高米茶的抗氧化活性和残留酚类的可萃取量,糙米发芽过程中生成的游离氨基酸和还原糖能够促进米茶制备中的非酶促褐变反应和焦香味、烘烤味、清香味的生成,感官品质得到提升,并显著减少焙炒过程中丙烯酰胺的生成^[30]。研究发现浸泡处理能改善糙米蛋白质消化率和矿物质可透析性,还能有效降低米茶中的总砷含量^[31-32],选择适中的加水量和浸润时间可以增强茶汤的黄色及纯度,如以料液比 1:20 浸润 10 min 后的大米制作的米茶茶汤呈色快速稳定,透明度好^[33]。Park 等^[34]发现在焙炒前进行冷等离子体处理,可以改善糙米颗粒茶的微生物指标和安全性,并增强其 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除活性以及总酚含量。综上,烘烤和发芽处理都能提高米茶的营养价值,此外发芽处理还能提高米茶的风味、感官品质。浸泡处理则在提高米茶茶汤质量的同时,降低米茶中的有害元素含量。

1.5 薏仁茶

薏仁属于禾本科一年生草木,具有薏米、薏苡或薏苡米珠的俗名,薏苡仁成分具有较强的抗氧化、抗炎、抗肥胖活性,能够刺激生殖激素,促进子宫收缩和调节肠道菌群^[35]。在日本,80% 的薏米加工成麦茶型薏米茶消费^[36]。其加工工艺主要是将未脱壳或未碾白的薏仁,以小火烘炒至香而不焦,凉后加水煮开,过滤后当茶饮用,味道甘醇。

目前国内外对薏仁茶的研究主要集中在加工工艺的改进上,对薏仁茶加工过程中营养物质、风味物质等方面的研究较少。黄运安等^[37]对浸泡时间、汽蒸时间、焙烤温度和焙烤时间 4 个因素进行正交试验优化,结果表明,薏仁茶最佳制备工艺为:浸泡时间 8 h、汽蒸时间 120 min、烘烤温度 120 ℃、烘烤时间 20 min。遇靓^[38]确定了薏米红曲茶的最优发酵条件:蒸料时间 6 min、料水比 1:0.34、装料量 7.22 g、初始 pH6.5、接种 9%,此条件下可以得到丰富的薏苡素、薏苡酯、洛伐他汀;此外,薏米红曲茶在焙烤温度 130 ℃、焙烤时间 40 min 条件下,黄酮保留率达

表 1 不同加工工艺对谷物茶品质的改善作用

Table 1 Improving effect of different processing technology on grain tea quality

加工工艺	谷物茶品种	改善结果	参考文献
烘烤处理	大麦茶、小麦芽茶	提高了茶中总酚类物质和黄酮类化合物的含量以及抗氧化作用,提升风味	[13]
	大麦茶	提高了制备大麦茶饮料时释放的可溶性固体的百分比	[14]
	高粱茶	导致酚类化合物水平、抗氧化剂、 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制活性显著增加	[25]
	发酵高粱茶	总酚、总黄酮和总花青素含量显著增加,风味提升	[26]
浸泡处理	苦荞茶	提高了总黄酮和总酚类化合物含量,降低总淀粉和芦丁含量	[18]
	米茶	改善蛋白质消化率和矿物质可透析性,有效降低总砷含量	[31]
发芽处理	甜荞茶、苦荞茶、黑苦荞茶	提高了感官品质、总黄酮含量、GABA 含量及 DPPH 自由基清除率	[20]
	米茶	促进非酶促褐变反应和香气化合物的生成,显著减少丙烯酰胺的生成	[30]
发酵处理	发酵高粱粒茶	提高了酚类物质含量、抗氧化能力,增加了挥发性成分的变化	[26]
	薏米红曲茶	提高了冲泡过程中黄酮保留率和香气化合物的丰富度	[38]
冷等离子体处理	糙米茶	改善糙米的微生物质量、安全性以及总酚含量,增强 DPPH 和 ABTS ⁺ 自由基清除活性	[34]

77.59%, 茶汤色泽红亮通透, 薏苡味、酯香味浓郁。综上, 对薏米进行发酵处理能促使薏米茶富含多重生理活性组分, 营养价值得到提高。烘烤则提高了茶汤的色泽和香气。

2 谷物茶及其营养成分的功能特性

全谷物食品一直被认为是健康饮食的重要组成部分, 全球疾病负担研究(2019 年)报告称, 低全谷物饮食是仅次于高钠饮食的第二大与饮食相关的死因, 其中绝大多数死因与心血管疾病、胃癌和糖尿病相关^[39]。全谷物含有丰富的蛋白质、碳水化合物、维生素、矿物质、膳食纤维等, 经过适当加工后可以显著提升营养品质和功能特性^[40]。将全谷物制作成谷物茶, 不仅能改善全谷物粗糙的口感, 还能很好地保留谷物的营养成分和健康功效。谷物茶中含有丰富的营养物质, 如酚酸、原花青素、类黄酮、缩合单宁和硒、锌等, 具有较高的抗氧化活性、降胆固醇能力以及抗炎和抗癌特性。结合表 2 可以看出, 青稞茶中富含的谷物赖氨酸、植物甾醇和 β -葡聚糖, 可以减少总胆固醇和低密度脂蛋白血液胆固醇并降低患冠心病和结直肠癌的风险^[41]。发芽糙米茶富含的 γ -氨基丁酸(GABA)是一种重要的抗抑郁神经递质, 不仅可以提高记忆力和学习能力, 还具有降低 II 型糖尿病、癌症、肥胖症、心血管疾病、神经退行性疾病、骨质疏松症、高血压风险的能力^[42]。芦丁和牡荆素是在荞麦壳茶中发现的主要类黄酮, 具有较强的抗氧化能力和抗糖化能力^[43]。

2.1 抗氧化性

Nie 等^[44]发现青稞茶醇溶性提取物具有较强的抗氧化能力, 能通过调节心肌细胞中的 AMPK/SIRT3/FoxO3a 显著抑制棕榈酸诱导的心肌细胞凋亡并改

善多种线粒体生物活性。研究发现萌发后黑苦荞茶、糙米茶及其茶汤的 DPPH 自由基清除率均得到提高, 可能是其游离酚类化合物含量增加导致^[20,30]。Sun 等^[26]通过测定 ABTS⁺和 DPPH 自由基清除活性, 发现发酵后的高粱茶抗氧化性得到较大提升, 这可能是因为发酵过程中, 微生物通过单宁酶催化大分子单宁降解, 生成可溶性单宁所致, 此外, 选用酚类物质含量更多的黑高粱生产的高粱茶抗氧化能力最强。

2.2 其他功能特性

谷物茶除了具有抗氧化的功能特性外, 还具有抗肥胖、抗流感、调节肠道、抗炎、抗癌以及抗糖尿病的功能特性。Ding 等^[45]研究发现, 以薏苡仁和大麦麸皮为底物制备的红曲发酵谷物茶能通过改变肠道菌群组成, 调节脂质代谢来有效降低高脂饮食大鼠血脂, 此外, 还发现该茶通过调节肠道 pH 来改善肠道环境。Zhou 等^[46]发现服用预发芽大米及其衍生品可显著降低血浆肾功能和血脂参数水平, 并改善肾功能。Nagai 等^[47]发现适合浓度的薏仁茶可激活细胞自身抗病毒机制抑制流感病毒的繁殖, 其各个成分对甲型流感/PR/8/34 病毒具有抗病毒活性。Wu 等^[25]发现粗高粱籽粒茶甲醇提取物对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶具有很强的抑制活性。此外, 有研究证明, 在青稞茶热处理过程中能够增加 β -葡聚糖的可萃取性, 从而降低患冠心病和结肠直肠癌的风险^[41,48]。青稞茶多酚通过激活 SIRT3 来抑制 AGEs 引起的缓解骨骼肌损伤, 降低细胞氧化应激水平和肌肉萎缩相关蛋白 Atrogin-1 水平^[49]。

3 谷物茶的特征风味

香气是谷物茶最重要的感官品质之一, 挥发性

表 2 谷物茶营养成分功能特性

Table 2 Functional characteristics of cereal tea and its nutritional components

健康益处	来源	活性物质	作用对象	机制及结果	参考文献
抗氧化	青稞茶	醇溶性提取物	C2C12心肌细胞	调节心肌细胞中的AMPK/SIRT3/FoxO3a抑制棕榈酸诱导的细胞凋亡和线粒体功能障碍	[44]
	发酵高粱茶	缩合单宁	ABTS ⁺ 和DPPH自由基清除活性	缩合单宁促进了植物抗氧化应激的保护机制	[26]
	发芽糙米茶	茶浸液	ABTS ⁺ 和DPPH自由基清除活性	游离酚类化合物含量的增加提高了的其潜在生物利用度, 因此具有更高的抗氧化潜力	[30]
抗肥胖	红曲发酵茶(薏仁、大麦麸皮)	莫纳可林K	大鼠	通过改变肠道菌群组成, 调节脂质代谢	[45]
调节肠道微生物群	红曲发酵茶(薏仁、大麦麸皮)	谷物 β -葡聚糖	大鼠	通过调节肠道pH, 显著增加双歧杆菌的数量, 减少了肠球菌和肠杆菌的数量	[45]
降血压	发芽米茶	γ -氨基丁酸	大鼠	GABA作用于肾脏交感神经末梢上的GABAB受体, 抑制去甲肾上腺素的释放, 导致血管紧张素II形成减少	[46]
抗流感	薏仁茶	热水提取物	单层MDCK细胞	通过激活细胞自身抗病毒机制来抑制病毒复制	[47]
抗炎、抗结肠癌	青稞茶	β -葡聚糖	大鼠、小鼠	通过提高系统抗氧化能力、抗炎和增加防御因子, 来减轻实验室啮齿动物的胃黏膜损伤	[41]
缓解骨骼肌损伤	青稞茶	多酚	小鼠	增加线粒体功能蛋白SIRT3的表达, 并降低肌无力相关蛋白的表达, 来缓解骨骼肌损伤	[49]
抗糖尿病	粗高粱籽粒茶	甲醇提取物	α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制活性	高粱籽粒中富含原花青素, 对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶具有抑制活性	[25]

表 3 谷物茶的风味特性研究

Table 3 Research progress on flavor characteristics of grain tea

谷物茶品种	检测方法	主要挥发性化合物	主要香气贡献者	味道	参考文献
白高粱粒茶	气相色谱-质谱	醇、烷烃、醛和酯类	甲酯、1-己醇和1-辛醇	花香、甜香、糯香和坚果香	[27-28]
发酵高粱茶	气相色谱-质谱	吡嗪、酚和酯类	1-壬醇、2-甲氧基-4-乙炔基苯酚、3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪、丁酸丁酯和十六烷酸甲酯	甜香、坚果香和水果香	[26]
发芽糙米茶	气相色谱-质谱	醛、烷烃、酰胺、羧酸、酯和酮类	糠醛、2-呋喃甲醇、甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪和2-甲基丙醛	花香、烘烤、甜味和坚果香气	[30]
苦荞茶	气相色谱-质谱	酮、醛、吡嗪和酚类化合物	2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮、壬醛、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪	麦芽香气和果香	[56]
全麦茶和全草茶	气相色谱-质谱	吡嗪	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3-甲基-吡嗪和2,5-二甲基-3-(3-甲基丁基)-吡嗪	麦芽风味和果香	[6]
发芽大麦茶	电子鼻、电子舌与气相色谱串联质谱技术	醛类、酮类、酸类和杂环类化合物	糠醛、癸醛、2-戊基呋喃和5-甲基呋喃醛	甜香、焦香、麦香、奶油味及果香味	[9]
薏仁茶	气相色谱-质谱和电子鼻分析技术	醛、醇、酸和烃类	1-辛烯-3-醇、壬醛、辛醛和3-甲基丁醛	蘑菇味、油脂味、干草味和橙子味	[58]

香气成分对鼻嗅觉感受器的刺激直接影响对品质的评价和消费者的接受程度^[50](表 3)。研究表明,香气本质上由不同浓度的多种挥发性化合物组成^[51]。而不同时间和温度的烘烤会极大地影响其化学成分^[52]。谷物茶在烘烤过程中,淀粉、蛋白质等大分子物质发生降解,发生美拉德反应、焦糖化反应等非酶促褐变反应,产生含氮杂环化合物,形成的独特烘烤香气深受消费者喜爱^[53]。

3.1 高粱茶风味研究

酯类、烷烃、醇类、吡嗪类以及少量醛、羧酸和酮是高粱茶中的主要挥发性化合物,其中,以甲酯为主的酯类为高粱茶提供了水果、蔬菜和花香的风味,醇类提供了强烈的甜味和花香味。经焙烤加工后,高粱茶挥发性化合物总量没有显著改变,但其分布发生变化,如以 2,5-二甲基-吡嗪,2-乙基-3,5-二甲基-吡嗪和四甲基-吡嗪为主的吡嗪类仅在焙烧过程后被检测到,这些吡嗪类为高粱茶增加了烘烤和坚果气味属性,与生高粱相比,高粱茶成品中的醛和烷烃含量略高,醇、酯、羧酸和酮的含量显著降低^[27]。Xiong 等^[28]发现白高粱茶叶样品挥发性化合物的丰度和多样性要高于红高粱和黑高粱,白高粱茶富含烷烃、酒精和醛,具有更多的蜡质、脂肪、花香和甜味。Sun 等^[26]研究发现对高粱茶进行发酵后,其酚类和酯类含量增加,醛类和烷烃的含量减少,与植物乳杆菌亚种发酵高粱茶不同,因含有更高浓度的吡咯和吡嗪类化合物,酵母发酵高粱茶具有更浓郁的烘烤味和坚果味。

3.2 米茶风味研究

大米挥发性物质主要以烯烃、醛、酯和烷烃类为主,经焙炒后的米茶则以醛、烷烃和杂环类为主,兼有较大比例醇、酯、酮类物质,其主要香味特征物质为 2-戊基呋喃、2-戊基吡啶、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪和醛类,其中以壬醛和己醛为主的醛类物质为米茶提供了玫瑰香、杏子香和青草香味,2-戊基呋喃、2-戊基吡啶、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪则提供了强烈的焙烤香气、焦香和清香^[54]。Shi 等^[7]对在 80~140 ℃ 下烘

烤 15~60 min 的米茶样品进行 E-nose 分析,发现烘烤温度对香气的影响小于烘烤时间,烘烤时间则对相同温度下糙米的香气有显著影响,糙米茶烘烤后,主要香气化合物糠醛、2-呋喃甲醇、5-甲基糠醛、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪和 2-甲基吡嗪含量升高,其中呋喃和吡嗪(高达 50%)是含量最高的两大主要成分。Kim 等^[30]发现发芽和烘烤的结合促进了醛、烷烃、羧酸和酯、吡嗪、呋喃化合物的大量形成,使发芽糙米茶浸液具有比未发芽糙米茶浸液更丰富的花香、烘烤、甜味和坚果香气。

3.3 大麦茶风味研究

采用皮大麦生产的大麦茶挥发性物质主要以醛类、酮类、酸类和杂环类化合物为主,采用裸大麦生产的青稞茶挥发性物质主要以醛类、酮类、杂环类和酸类物质为主。其中,醛类和酮类为大麦茶带来了脂肪香、甜味和奶油香,杂环类带来了烘烤味和坚果味。仲梦涵等^[9]利用电子鼻技术发现,与发芽大麦相比,烘烤发芽大麦茶含有更多的氮类、氟类、氧化分子、甲烷、丙烷、烃类、有机化合物、极性分子以及芳香族化合物,通过气相色谱-串联质谱发现,发芽会促进糠醛、癸醛、香叶基丙酮、2-戊基呋喃和 5-甲基呋喃醛的生成,以此增强大麦茶的甜香、木香、面包焦甜香气和烘烤香味,此外,通过电子舌分析发现,烘烤发芽第一天大麦的茶多酚、咖啡碱和呈味氨基酸含量最高,使得烘烤发芽第一天大麦茶呈现出较高的苦味值和鲜味值。陈兵等^[55]采用气相色谱-质谱技术,发现随发芽青稞茶储存时间延长,其杂环化合物和醛类物质减少,酸类和酮类物质增加,其中以正十五酸、反油酸、乙酸为主的酸类物质会给发芽青稞茶带来强烈的酸败味道,2-羟基萘则带来了霉味。

3.4 苦荞茶风味研究

苦荞茶香气成分以酯类、醇类、醛类、酮类、碳氢化合物、含氮化合物为主。Qin 等^[56]通过气相色谱-质谱对苦荞茶的芳香化合物进行分析,鉴定了 77 种芳香化合物,其中 2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋

喃酮、壬醛、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪、苯乙醛、麦芽酚、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、三甲基吡嗪对苦荞茶香气贡献率高,数量最多的吡嗪类提供了苦荞茶独特烘焙香气,OAV 值最高的 2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮则提供甜味、果味和焦糖味。Guo 等^[6]对苦荞全麦茶和全植物茶进行芳香族化合物鉴定,发现两种茶样品均具有特殊的麦芽味,最丰富的芳香化合物均是 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪,相对含量分别为 14.96% 和 11.12%。曹静^[57]利用电子鼻技术对 15 种不同炒制工艺参数制备的苦荞茶风味进行研究,发现各类样品风味特征存在差异,且焙炒温度越高、时间越长,对茶风味特征影响越显著。目前,国内外对谷物茶滋味的研究极少,未来可对谷物茶的滋味特征进行研究,探讨谷物茶主要滋味组分对滋味的影响及贡献率。

4 谷物茶的安全性

谷物茶作为焙炒食品,其主要成分淀粉和蛋白质在焙炒时会发生美拉德反应以提供谷物茶特有的清香和色泽,但同时也会有产生一些有毒副产物,如丙烯酰胺和晚期糖基化终末产物的潜在风险^[59]。这些有毒副产物能危害人体的神经系统、免疫系统,并参与多种慢性疾病、癌症的发生。因此,对谷物茶中丙烯酰胺和晚期糖基化终末产物等有害因子的形成控制进行研究,以完善谷物茶生产工艺、提高谷物茶食品安全性,具有重要意义。

4.1 谷物茶丙烯酰胺形成控制

丙烯酰胺(AM)是食品热加工(烘焙、油炸和烘烤)过程中形成的常见危害物之一,是一种具有多种生理毒性的 2A 类致癌物^[60-61]。它并非天然存在于生食或煮熟的食物中,而是通过高温下美拉德反应(通过还原糖和氨基酸的相互作用)或丙烯醛途径产生。欧盟在关于丙烯酰胺的法案 Commission Regulation (EU) 2017/2158 中,对食品中丙烯酰胺含量限定范围大多在 300~850 μg/kg,中国则暂未指定限量标准^[62]。中国人均 AM 摄入量为 0.32 μg/(kg bw·d),要低于 1.0 μg/(kg bw·d)的人类平均摄入量。研究发现,丙烯酰胺的日致癌阈值为 2.6 μg/(kg bw·d),神经毒性阈值为 40 μg/(kg bw·d),故对于摄入量大的群体存在一定的健康风险。

谷物产品是导致 AM 暴露的主要来源之一,表 4 显示了不同谷物茶及烘烤谷物中 AM 的平均含量,控制其发生以减少饮食暴露和对人类健康的风险非常重要^[63]。胡志全^[64]发现在 180~200 ℃ 米茶中 AM 含量会随温度的升高而增加,超过 200 ℃ 则会减少,且随加水量的增加和浸润时间的延长而下降。Shara-

nagat 等^[65]发现高粱粒籽在 300 W 和 600 W 的微波烘烤下,功率越低,AM 生成量越少。Basinci 等^[66]发现使用天冬酰胺酶和甘氨酸处理可以生产 AM 含量显著降低的深色烘焙麦芽。此外,发芽处理能够显著减少米茶烘烤过程中 AM 的形成^[30]。综上,为控制谷物茶中 AM 含量,可选择天冬酰胺、还原糖含量低的原料进行生产,也可通过添加适当的酶制剂和氨基酸处理或对原料进行发芽、发酵处理来降低 AM 前体含量,在加工方式上,则宜采用低温烘焙或冷加工技术进行加工。

4.2 谷物茶晚期糖基化终末产物形成控制

晚期糖基化终末产物(AGEs)是通过还原糖与蛋白质、脂质或核酸的游离氨基之间的非酶促反应产生的有害物质,它分为内源性和外源性两种,需热加工的食品是外源性晚期糖基化终末产物的主要来源^[68]。由于食品基质差异大,基质效应不同,对食品中 AGEs 的量化仍是一个挑战,故目前没有对食品中 AGEs 安全膳食摄入量的标准。

热处理是谷物茶生产过程中不可缺少的工艺,因此谷物茶含有高水平 AGEs。研究发现,高温加工谷物产品的 AGEs 水平(1.46~45.2 mg/100 g)远高于经低温短时处理、低蛋白质、碳水化合物含量和高含水量的食品,如水果(0~1.63 mg/100 g)、蔬菜(0.03~2.42 mg/100 g)和咖啡(0.25 mg/100 g)等^[69]。于五美等^[59]发现米茶中 AGEs 含量在 190 ℃ 最低,其含量(104~480 AU/g)会随焙炒温度和时间的增加而持续升高,随加水量和浸润时间增加而减少。Premakumara 等^[70]发现红色品种稻米的麸皮提取物的抗淀粉酶、抗糖基化活性和糖基化逆转活性显著高于白色品种,因此选用红米作为米茶原料有利于降低米茶中 AGEs 的生成量。综上,可通过选择抗糖基化活性强,低蛋白低糖、高水分含量的谷物茶原料来控制 AGEs 形成,在加工工艺上则宜采用非热技术,通过降低温度和处理时间控制 AGEs 产生。

4.3 谷物茶中其他有害物质形成控制

谷物中通常会积累金属和准金属,因此谷物食品在向人体提供钴、铜、铁、镁、锰、硒和锌等有益元素的同时,也是砷、镉、铅和镍等有毒元素的主要来源^[71]。目前国内外尚未对谷物茶有毒元素的形成控制进行系统研究,未来可以通过对谷物生长环境以及生长过程进行干预,来降低谷物茶原料中的有害元素,从而达到提高谷物茶安全性的目的(表 5)。如在稻米、小麦种植过程中施加硅酸盐、硫酸盐来降低这些谷物中的砷和镉的浓度等^[72-73]。

除了有害元素外,谷物茶生产过程中还会生成

表 4 不同谷物茶及烘烤谷物中 AM 的平均含量
Table 4 Average AM content in tea and baked cereals of different grains

测试样品	大麦茶 ^[64]	米茶 ^[64]	玉米茶 ^[64]	荞麦茶 ^[67]	烘烤小麦 ^[67]	烘烤黑麦 ^[67]	烘烤燕麦 ^[67]	谷类烘烤 ^[67]
AM平均含量(μg/kg)	510	141	270	180.9	250	724	807.1	130

表5 谷物茶中有害物质控制方法

Table 5 Methods for the control of harmful substances in cereal tea

有害物质	处理方法	处理对象	机制及结果	参考文献
丙烯酰胺	发芽处理	糙米	降低丙烯酰胺前体天冬酰胺含量,从而减少45%丙烯酰胺含量	[30]
	酶和甘氨酸联合处理	麦芽	天冬酰胺水平降低和美拉德反应存在竞争性氨基酸,丙烯酰胺水平降低60.5%	[66]
晚期糖基化终末产物	浸润处理	糙米	水分子进入淀粉颗粒的非结晶部分,与游离的亲水基相结合,来阻止底物之间的反应	[59]
有毒元素	添加硅酸钙和硫酸亚铁	稻谷	非晶态氧化铁和晶态氧化铁中砷的强结合减少了水稻中砷积累	[72]
	施用硫酸盐	小麦籽粒	砷和镉的易位减少,导致小麦粒子的砷、镉浓度减少	[73]
黄曲霉毒素	吸附处理	糙米	通过静电相互作用、氢键和 π - π 相互作用去除黄曲霉毒素	[77]
	脉冲光处理	大麦粒	改变细胞和DNA的结构,阻止细胞复制,并光降解黄曲霉毒素的毒性部位	[78]
镰刀菌和链格孢菌毒素	浸润处理	大麦粒	霉菌毒素的极性相对较高,被从大麦表层冲洗到浸泡水中	[75]
赭曲霉毒素A	爆炸膨化处理	大米、燕麦	由高温和高压积聚的过热蒸汽突然释放造成基质和多孔结构膨胀,导致赭曲霉毒素A减少	[76]

甲哌、黄曲霉毒素、赭曲霉毒素A和链格孢真菌毒素等有害物质。目前国内外对控制此类有害物质的定性、定量分析和毒理学特性研究较少。兰珊珊等^[74]对苦荞米茶中的黄曲霉毒素B₁进行了测定,发现苦荞米茶中黄曲霉毒素B₁达到了5.541 μg/kg。Prusova等^[75]观察到大麦粒在浸泡过程中,镰刀菌和链格孢菌毒素的含量降低,而发芽和烘干则增加了镰刀菌和链格孢菌毒素的含量。有研究证明,大米和燕麦中的赭曲霉毒素A可通过爆炸膨化工艺分别降低15%~28%和38%~52%,可应用于谷物类休闲食品的商业化生产^[76]。目前,针对这些有害物质,可以通过对原料质量的严格把控,避免使用霉变的原料生产谷物茶来控制。以后的研究可以考虑在谷物茶制作过程中进行脉冲电场、超声波、辐照和冷等离子体处理来除去谷物茶中的真菌毒素。

5 展望

通过将全谷物开发为谷物茶,可以提高全谷物的适口性,保留其营养价值和健康功效,还能大量减少谷物加工业副产物的浪费。本文从谷物茶的种类和加工技术入手,对谷物茶的功能特性、风味和安全性进行梳理,以期促进全谷物饮品进一步的开发利用。在加工工艺方面,不同加工工艺对产品的风味、质量影响较大,由于谷物茶大多没有统一的生产标准,导致不同企业间生产的同类谷物茶质量、风味差异大,未来应对生产标准进行统一。谷物茶风味独特,但滋味较为平淡,国内外对谷物茶滋味的研究较少,未来可以利用电子舌技术,探讨谷物茶主要滋味组分对滋味的影响及贡献率并对谷物茶和其他原料拼配进行研究,如水果干、药食同源原料等,在提升口感的同时,增加其营养价值。谷物茶属于烘焙食品,在热加工过程中会生成丙烯酰胺、晚期糖基化终末产物等,在国内并未出具相关的限量标准,存在一定的健康风险,目前对谷物茶中有害物质形成控制研究主要集中在原材料和加工条件的改变上,未来可以考虑采用传统方法和新兴技术(脉冲电场、超声波、

辐照等)相结合来降低谷物茶中有害物质的形成。此外,对谷物茶中黄曲霉毒素、赭曲霉毒素A和链格孢真菌毒素等有害物质的定性、定量和毒理特性研究也十分必要。

参考文献

- [1] 李富华,郭晓晖,夏春燕,等.全谷物酚类化合物抗氧化活性研究进展[J].食品科学,2012,33(13):299-304. [LI F H, GUO X H, XIA C Y, et al. Research progress on antioxidant activity of phenolic compounds from whole grains[J]. Food Science, 2012, 33(13): 299-304.]
- [2] 尚珊,臧梁,傅宝尚,等.全谷物原料的营养特性及食品开发研究进展[J].食品工业科技,2022,43(8):443-452. [SHANG S, ZANG L, FU B S, et al. Research progress on nutritional characteristics of whole grain raw materials and food development[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 443-452.]
- [3] VAN DER KAMP J W, POUTANEN K, SEAL C J, et al. The healthgrain definition of 'whole grain' [J]. Food & Nutrition Research, 2014, 58(1): 1-8.
- [4] CHEA M, MOBLEY A R. Factors associated with identification and consumption of whole-grain foods in a low-income population[J]. *Current Developments in Nutrition*, 2019, 3(7): nzz064.
- [5] MILLER K B. Review of whole grain and dietary fiber recommendations and intake levels in different countries[J]. Nutrition Reviews, 2020, 78(S1): 29-36.
- [6] GUO H, YANG X, ZHOU H, et al. Comparison of nutritional composition, aroma compounds, and biological activities of two kinds of tartary buckwheat tea[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(7).
- [7] SHI Y, WANG L, FANG Y, et al. A comprehensive analysis of aroma compounds and microstructure changes in brown rice during roasting process[J]. *LWT*, 2018, 98: 613-621.
- [8] LIU S, WANG W, LU H, et al. New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 123: 187-197.
- [9] 仲梦涵,陆晨浩,王曦如,等.烘烤和发芽对大麦挥发性风味影响的分析研究[J].食品工业科技,2020,41(7):220-225. [ZHONG M H, LU C H, WANG X R, et al. Analysis of effects of roasting and germination on volatile flavor of barley[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 220-225.]

- [10] 丁香丽. 大麦籽粒抗冻蛋白的制备及抗冻机制的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [ZHANG D L. Study on the preparation and the antifreeze mechanism of antifreeze protein from barley (*Hordeum vulgare*) [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
- [11] 张端莉, 桂余, 刘雄. 发芽大麦茶制备工艺及茶汤营养特性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(17): 252-257, 270. [ZHANG D L, GUI Y, LIU X. Study on preparation technology and nutritional characteristics of germinated barley tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(17): 252-257, 270.]
- [12] 曾亮, 车振明, 四郎生根. 响应面法优化青稞茶的制备工艺[J]. 食品科技, 2013, 38(12): 95-99. [ZENG L, CHE Z M, SHIRANG R. Optimization of preparation technology of Highland barley tea by response surface method[J]. *Food Science and Technology*, 2013, 38(12): 95-99.]
- [13] ISLAM M Z, LEE D. The effect of heat processing on chemical composition and antioxidative activity of tea made from barley sprouts and wheat sprouts[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(6): 1340-1345.
- [14] MONTANUCI F D, JORGE L M M, JORGE R M M. Influence of roasting temperature of barley on the powder characteristics and preparation of tea[J]. *Cereal Chemistry*, 2016, 93(1): 20-24.
- [15] 杨红叶, 杨联芝, 柴岩, 等. 甜荞和苦荞籽中多酚存在形式与抗氧化活性的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(5): 90-94, 97. [YANG H Y, YANG L Z, CHAI Y, et al. Study on the existence form and antioxidant activity of polyphenols in sweet buckwheat and tartary buckwheat seeds[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(5): 90-94, 97.]
- [16] QIN P, WANG Q, SHAN F, et al. Nutritional composition and flavonoids content of flour from different buckwheat cultivars[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2010, 45(5): 951-958.
- [17] JIANG P, BURCZYNSKI F, CAMPBELL C, et al. Rutin and flavonoid contents in three buckwheat species *Fagopyrum esculentum*, *F. tataricum*, and *F. homotropicum* and their protective effects against lipid peroxidation[J]. *Food Research International*, 2007, 40(3): 356-364.
- [18] QIN P, WU L, YAO Y, et al. Changes in phytochemical compositions, antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities during the processing of tartary buckwheat tea[J]. *Food Research International*, 2013, 50(2): 562-567.
- [19] LIU Y, CAI C, YAO Y, et al. Alteration of phenolic profiles and antioxidant capacities of common buckwheat and tartary buckwheat produced in China upon thermal processing[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(12): 5565-5576.
- [20] 童晓萌. 萌动发芽荞麦茶的研制及品质评价[D]. 天津: 天津商业大学, 2019. [TONG X M. Development and quality evaluation of germinated buckwheat tea [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019.]
- [21] 隋秀芳, 李祥, 秦礼康, 等. 蒸煮和焙炒整米苦荞茶香气成分分析及生产过程中主要化学成分的去向[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 269-273. [SUI X F, LI X, QIN L K, et al. Analysis of volatile aroma compounds in steamed and roasted whole tartary buckwheat teas and distribution of major chemical components during the production process[J]. *Food Science*, 2012, 33(22): 269-273.]
- [22] JARDIM A M R F, DA SILVA G Í N, BIESDORF E M, et al. Potencial produtivo da cultura do *Sorghum bicolor* (L.) Moench no semiárido brasileiro: revisão[J]. *Pubvet*, 2019, 14: 141.
- [23] RUMLER R, BENDER D, SCHÖNLECHNER R. Sorghum and its potential for the Western diet[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022: 103425.
- [24] DE MORAIS CARDOSO L, PINHEIRO S S, MARTINO H S D, et al. Sorghum (*Sorghum bicolor* L.): Nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(2): 372-390.
- [25] WU L, HUANG Z, QIN P, et al. Effects of processing on phytochemical profiles and biological activities for production of sorghum tea[J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 678-685.
- [26] SUN H, WANG H, ZHANG P, et al. Changes in phenolic content, antioxidant activity, and volatile compounds during processing of fermented sorghum grain tea[J]. *Cereal Chemistry*, 2020, 97(3): 612-625.
- [27] XIONG Y, ZHANG P, LUO J, et al. Effect of processing on the phenolic contents, antioxidant activity and volatile compounds of sorghum grain tea[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 85: 6-14.
- [28] XIONG Y, ZHANG P, JOHNSON S, et al. Comparison of the phenolic contents, antioxidant activity and volatile compounds of different sorghum varieties during tea processing[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(3): 978-985.
- [29] 陈强, 陶兴无, 高冰, 等. 传统米茶和功能米茶成分分析的研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(6): 328-329. [CHEN Q, TAO X W, GAO B, et al. Study on the composition analysis of traditional rice tea and functional rice tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2009, 30(6): 328-329.]
- [30] KIM H J, HAN J A, LIM S T, et al. Effects of germination and roasting on physicochemical and sensory characteristics of brown rice for tea infusion[J]. *Food Chemistry*, 2021, 350: 129240.
- [31] ALBARRACÍN M, GONZÁLEZ R J, DRAGO S R. Effect of soaking process on nutrient bio-accessibility and phytic acid content of brown rice cultivar[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 53(1): 76-80.
- [32] ZHANG F, GU F, YAN H, et al. Effects of soaking process on arsenic and other mineral elements in brown rice[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2020, 9(2): 168-175.
- [33] 李莎莎, 沈硕, 熊善柏, 等. 米茶茶汤呈色的动力学研究[J]. 食品科学, 2012, 33(1): 59-63. [LI S S, SHEN S, XIONG S B, et al. Study on kinetics of coloration of rice tea soup[J]. *Food Science*, 2012, 33(1): 59-63.]
- [34] PARK H, PULIGUNDLA P, MOK C. Cold plasma decontamination of brown rice grains: Impact on biochemical and sensory qualities of their corresponding seedlings and aqueous tea infusions[J]. *LWT*, 2020, 131: 109508.
- [35] DEVARAJ R D, JEEPIPALI S P K, XU B. Phytochemistry and health promoting effects of Job's tears (*Coix lacryma-jobi*)-A critical review[J]. *Food Bioscience*, 2020, 34: 100537.
- [36] 邓素芳, 林忠宁, 陆燕, 等. 薏苡产品开发与利用研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2016(6): 30-34. [DENG S F, LIN Z L, LU Z, etc. Research progress of product development and utilization of *Coix lacryma-jobi*[J]. *Grain and Feed Industries*, 2016(6): 30-34.]
- [37] 黄运安, 郭艳红, 魏林. 模糊数学感官评价法优化薏仁茶制备工艺[J]. 现代食品, 2020(8): 90-92, 100. [HUANG Y A, GUO Y H, WEI L. Optimization of preparation technology of coix seed tea by fuzzy mathematics sensory evaluation[J]. *Modern Food*, 2020(8): 90-92, 100.]
- [38] 遇颢. 红曲固态发酵薏米茶工艺及品质研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016. [YU L. Study on technology and quality of pearl's barley tea by solid-state fermentation of monascus [D]. Guiyang:

Guizhou University, 2016.]

[39] AFSHIN A, SUR P J, FAY K A, et al. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: A systematic analysis for the global burden of disease study 2017[J]. *The Lancet*, 2019, 393 (10184): 1958–1972.

[40] 刘锐, 李松函, 聂莹, 等. 营养导向的全谷物产业思考[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(7): 182–187. [LIU R, LI S H, NIE Y, et al. Thinking on nutrition-oriented whole grain industry[J]. *Journal of the Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2021, 36(7): 182–187.]

[41] BAI Y P, ZHOU H M, ZHU K R, et al. Effect of thermal treatment on the physicochemical, ultrastructural and nutritional characteristics of whole grain highland barley[J]. *Food Chemistry*, 2021, 346: 128657.

[42] WU F, YANG N, TOURÉ A, et al. Germinated brown rice and its role in human health[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(5): 451–463.

[43] ZIELINSKA D, SZAWARA-NOWAK D, ZIELIRISKI H, et al. Antioxidative and anti-glycation activity of bitter buckwheat tea[J]. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 2009(SPEC.1): 3.

[44] NIE C, LI Y, GUAN Y, et al. Highland barley tea represses palmitic acid-induced apoptosis and mitochondrial dysfunction via regulating AMPK/SIRT3/FoxO3a in myocytes[J]. *Food Bioscience*, 2021, 40: 100893.

[45] DING Y, PU L, KAN J. Hypolipidemic effects of lipid-lowering granulated tea preparation from *Monascus*-fermented grains (adlay and barley bran) mixed with lotus leaves on Sprague–Dawley rats fed a high-fat diet[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 32: 80–89.

[46] ZHOU X, ZHAO G C, SUN S Y, et al. Antihypertensive effect of giant embryo brown rice and pre-germinated giant embryo brown rice on spontaneously hypertensive rats[J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(9): 2888–2896.

[47] NAGAI E, IWAI M, KOKETSU R, et al. Inhibition of influenza virus replication by adlay tea[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(5): 1899–1905.

[48] CHEN H, NIE Q, XIE M, et al. Protective effects of β -glucan isolated from highland barley on ethanol-induced gastric damage in rats and its benefits to mice gut conditions[J]. *Food Research International*, 2019, 122: 157–166.

[49] NIE C, LI T, FAN M, et al. Polyphenols in highland barley tea inhibit the production of advanced glycosylation end-products and alleviate the skeletal muscle damage[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2022: 2200225.

[50] RAWAT R, GULATI A, BABU G D K, et al. Characterization of volatile components of Kangra orthodox black tea by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2007, 105 (1): 229–235.

[51] ZHU Y, LV H P, DAI W D, et al. Separation of aroma components in Xihu Longjing tea using simultaneous distillation extraction with comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 164: 146–154.

[52] RAMLI N, HASSAN O, SAID M, et al. Influence of roasting conditions on volatile flavor of roasted Malaysian cocoa beans[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2006, 30(3): 280–298.

[53] SHAKOOR A, ZHANG C, XIE J, et al. Maillard reaction

chemistry in formation of critical intermediates and flavour compounds and their antioxidant properties[J]. *Food Chemistry*, 2022, 393: 133416.

[54] 赵阿丹, 胡志全, 刘友明, 等. 米茶焙炒挥发性气味的形成与特征研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(3): 1–6. [ZHAO A D, HU Z Q, LIU Y M, et al. Study on the formation and characteristics of volatile odor of rice tea roasted[J]. *Journal of the China Cereals and Oils Society*, 2016, 31(3): 1–6.]

[55] 陈兵, 张端莉, 覃小丽, 等. 贮藏条件对发芽大麦茶风味物质变化的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(14): 76–80. [CHEN B, ZHANG D L, QIN X L, et al. Effects of storage conditions on flavor substances of germinated barley tea[J]. *Food Science*, 2015, 36 (14): 76–80.]

[56] QIN P, MA T, WU L, et al. Identification of tartary buckwheat tea aroma compounds with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(6): S401–S407.

[57] 曹静. 智泉在苦荞茶风味品质辨识中的应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. [CAO J. Study and application of smartnose on flavor quality identification of tartary buckwheat tea [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.]

[58] 赵泽伟, 丁筑红, 许培振, 等. 基于 SPME-GC-MS 和电子鼻分析方法分析薏仁饮料贮藏过程风味化合物变化[J]. *食品科学*, 2018, 39(14): 276–281. [ZHAO Z W, DING Z H, XU P Z, et al. Analysis of flavor compounds in coix seed beverage during storage based on SPME-GC-MS and electronic nose analysis[J]. *Food Science*, 2018, 39(14): 276–281.]

[59] 于五美, 胡志全, 牛猛, 等. 焙炒对米茶中丙烯酰胺和晚期糖基化终产物的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(12): 104–107, 112. [YU W M, HU Z Q, NIU M, et al. Effects of roasting on acrylamide and advanced glycation end products in rice tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(12): 104–107, 112.]

[60] 汪腾飞, 孙大文, 蒲洪彬, 等. 食品中丙烯酰胺抑制策略的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 333–342. [WANG T F, SUN D W, PU H B, et al. Research progress of acrylamide inhibition strategy in food[J]. *Food Science*, 2021, 42(17): 333–342.]

[61] STADLER R H, BLANK I, VARGA N, et al. Acrylamide from Maillard reaction products[J]. *Nature*, 2002, 419(6906): 449–450.

[62] 黄燕, 宋晟, 徐文泱, 李灿. 市售食品中丙烯酰胺污染现状风险分析[J]. *食品与机械*, 2021, 5(7): 81–86. [HUANG Y, SONG S, XU W Y, et al. Market risk analysis of acrylamide in food pollution status quo[J]. *Journal of Food and Machinery*, 2021, 5(7): 81–86.]

[63] MESIAS M, DELGADO-ANDRADE C, MORALES F J. An updated view of acrylamide in cereal products[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 46: 100847.

[64] 胡志全. 米茶的加工及食用品质评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. [HU Z Q. Processing and eating quality evaluation of rice tea [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.]

[65] SHARANAGAT V S, NEMA P K, SINGH L, et al. Formation of acrylamide in microwave-roasted sorghum and associated dietary risk[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(3): 1654–1665.

[66] BASINCI F, MOGOL B A, GULER S, et al. Mitigation of acrylamide formation during malt processing[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 106: 103485.

[67] YILTIRAK S, KOCADAGLI T, ÇELİK E E, et al. Effects of sprouting and fermentation on free asparagine and reducing sugars in wheat, einkorn, oat, rye, barley, and buckwheat and on acrylamide

- and 5-hydroxymethylfurfural formation during heating[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(32): 9419–9433.
- [68] URIBARRI J, WOODRUFF S, GOODMAN S, et al. Advanced glycation end products in foods and a practical guide to their reduction in the diet[J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 2010, 110(6): 911–916.
- [69] SCHEIJEN J L J M, CLEVERS E, ENGELN L, et al. Analysis of advanced glycation endproducts in selected food items by ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry: Presentation of a dietary AGE database[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 1145–1150.
- [70] PREMAKUMARA G A S, ABEYSEKERA W, RATNASOORIYA W D, et al. Antioxidant, anti-amylase and anti-glycation potential of brans of some Sri Lankan traditional and improved rice (*Oryza sativa* L.) varieties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 58(3): 451–456.
- [71] SHRAIM A M, AHMAD M I, RAHMAN M S F, et al. Concentrations of essential and toxic elements and health risk assessment in brown rice from Qatari market[J]. *Food Chemistry*, 2022, 376: 131938.
- [72] MAJUMDER S, POWELL M A, BISWAS P K, et al. The role of agronomic factors (rice cultivation practices and soil amendments) on Arsenic fractionation: A strategy to minimise Arsenic uptake by rice, with some observations related to cadmium[J]. *Cate-na*, 2021, 206: 105556.
- [73] SHI G, LU H, LIU H, et al. Sulfate application decreases translocation of arsenic and cadmium within wheat (*Triticum aestivum* L.) plant[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 713: 136665.
- [74] 兰珊珊, 陈锦玉, 邵金良, 等. 酶联免疫法测定苦荞制品中的黄曲霉毒素 B₁[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(6): 1417–1419.
- [LAN S S, CHEN J Y, SHAO J L, et al. Determination of aflatoxin B₁ in Tartary buckwheat products by enzyme-linked immunosorbent assay[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(6): 1417–1419.]
- [75] PRUSOVA N, DZUMAN Z, JELINEK L, et al. Free and conjugated *Alternaria* and *Fusarium* mycotoxins during pilsner malt production and double-mash brewing[J]. *Food Chemistry*, 2022, 369: 130926.
- [76] LEE H J, KIM S, SUH H J, et al. Effects of explosive puffing process on the reduction of ochratoxin A in rice and oats[J]. *Food Control*, 2019, 95: 334–338.
- [77] DAI H, LIANG S, SHAN D, et al. Efficient and simple simultaneous adsorption removal of multiple aflatoxins from various liquid foods[J]. *Food Chemistry*, 2022, 380: 132176.
- [78] ZENKLUSEN M H, CORONEL M B, CASTRO M Á, et al. Inactivation of *Aspergillus carbonarius* and *Aspergillus flavus* in malting barley by pulsed light and impact on germination capacity and microstructure[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 45: 161–168.