

冠突散囊菌对植物酚类物质的生物转化及生物活性的影响

陈如扬,樊子依,潘一玲,高瑶,贺成,黄钰昕,王远亮,肖愈*

(湖南农业大学 食品科学技术学院,湖南 长沙 410128)

摘要:冠突散囊菌(*Eurotium cristatum*),俗称“金花”菌,是茯砖茶后发酵过程中的优势微生物,其对茯砖茶特殊品质和功能活性的形成具有重要作用。在发酵过程中冠突散囊菌能分泌丰富的胞外酶,如多酚氧化酶、淀粉酶、 β -葡萄糖苷酶等,对茶叶中的酚类物质如儿茶素等具有代谢及转化作用。近年来,大量研究表明冠突散囊菌能作用于其他植物基质,如中草药、豆类、谷物等,对其中的酚类物质进行生物转化并引起结构改变,从而使其功能活性发生显著变化。该文就近年来国内外关于冠突散囊菌对植物酚类成分的转化及生物活性的影响进行综述,为冠突散囊菌在食品及健康保健行业中的应用提供理论依据和指导。

关键词:冠突散囊菌;酚类物质;生物转化;水解酶;生物活性

Eurotium cristatum Biotransformation Plant Phenolic Compounds and Affects Their Biological Activities: A Review

CHEN Ru-yang, FAN Zi-yi, PAN Yi-ling, GAO Yao, HE Cheng, HUANG Yu-xin,

WANG Yuan-liang, XIAO Yu*

(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China)

Abstract: *Eurotium cristatum*, commonly known as ‘golden flower’, is the dominant fungus in the post-fermentation process of Fuzhuan tea, playing a crucial role in the special quality and functional activities of Fuzhuan tea. During the fermentation, *E. cristatum* secretes abundant extracellular enzymes, such as polyphenol oxidase, amylase, and β -glucosidase, to metabolize and transform phenolic compounds such as catechins in tea. Recent studies have also demonstrated that *E. cristatum* can act on other plant substrates, such as Chinese herbal medicines, legumes and cereals, to transform their phenolic substances, thus affecting their biological activities. This article reviewed the studies about the effects of *E. cristatum* on the biotransformation and biological activities of plant phenolic compounds in recent years, aiming to provide a theoretical basis for the application of *E. cristatum* in the food and healthcare industries.

Key words: *E. cristatum*; phenolic compounds; biotransformation; hydrolase; biological activity

引文格式:

陈如扬,樊子依,潘一玲,等.冠突散囊菌对植物酚类物质的生物转化及生物活性的影响[J].食品研究与开发,2022,43(8):193-201.

CHEN Ruyang, FAN Ziyi, PAN Yiling, et al. *Eurotium cristatum* Biotransformation Plant Phenolic Compounds and Affects Their Biological Activities: A Review[J]. Food Research and Development, 2022, 43(8): 193-201.

基金项目:湖南省自然科学基金(2020JJ5243);湖南省优秀博士后创新人才项目(2020RC2055);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(19B269);湖南农业大学大学生创新训练项目(XCX2021042)

作者简介:陈如扬(1999—),女(汉),在读本科生,研究方向:食品微生物。

*通信作者:肖愈(1989—),男(汉),讲师,博士,研究方向:食品微生物与发酵食品,天然产物生物转化与活性评价。

冠突散囊菌(*E. cristatum*)是茯砖茶中的有益微生物,也是茯砖茶后发酵过程中的优势微生物,其产生的菌落色泽金黄,俗称“金花”菌。长年饮用茯砖茶对人体有降血糖、降血脂、抗氧化等功效。据报道,冠突散囊菌是茯砖茶制作过程中的核心功能微生物之一,为茯砖茶独特风味的形成做出重要贡献,是形成茯砖茶菌花香气的关键因素,在其生理活性功能的形成方面发挥重要作用^[1-3]。此外,有研究发现,冠突散囊菌能在不同中草药及植物基质上生长繁殖及代谢转化,分解、转化、催化及结构修饰(如去甲氧基、切断糖苷键等)发酵基质中的生物活性成分,提高某些活性成分的含量以及产生新的活性成分,从而增强其功能。已有研究表明,冠突散囊菌对植物酚类具有潜在的转化能力,并能产生丰富的代谢衍生物。黄群等^[4]研究表明冠突散囊菌发酵产生的多酚氧化酶和过氧化物酶将茶多酚的主要成分儿茶素氧化为邻醌,邻醌氧化生成茶黄素,茶黄素再氧化聚合成茶红素和茶褐素等。据报道,茶褐素具有降血脂^[5]、降血糖^[6]、抑菌^[7]、抗氧化^[8]、抗肿瘤^[9]等多种功能活性。此外,Gu等^[10]研究表明沙棘叶经冠突散囊菌固态发酵后,其中的芦丁转化为槲皮素、山奈酚和异鼠李素,且其抗氧化能力得到显著增强。因此,本文就近年来冠突散囊菌对植物酚类成分的转化及生物活性的影响进行综述,旨在为冠突散囊菌在保健食品行业的应用提供新的研究思路与方向。

1 冠突散囊菌对植物酚类成分的转化作用

1.1 茶多酚

茶多酚,包括黄烷醇类、羟类-4-黄烷醇类、花色苷类、黄酮醇类和黄酮类等化合物^[11]。已有研究表明,经冠突散囊菌发酵后,成品茶的色泽、香气等感官品质都有所改善,苦涩感减少,色泽更加澄清明亮,菌香味浓郁,而这与发酵过程中茶叶酚类成分的转化有关。杨金梅等^[12]以冠突散囊菌为菌种,对铁观音茶叶进行固态发酵,研究冠突散囊菌发酵对茶中主要化学成分的影响,结果表明,铁观音茶叶经发酵后其茶多酚含量下降,同时根据超高效液相色谱检测结果分析表明发酵茶中增加了多种新成分。黄浩等^[13]用冠突散囊菌发酵大红袍、红茶、绿茶、黑茶,采用高效液相色谱、高分辨质谱和核磁共振技术分析发现,发酵后的茶叶中出现两种新的黄酮醇化合物,分别是槲皮素和山奈酚。新物质的产生可能是在冠突散囊菌分泌的酶以及热的作用下将原本以黄酮苷形式存在于茶叶中的黄酮类化合物水解形成了黄酮醇化合物,即黄酮苷(结合态)被水解为黄酮和糖,再经过复杂的反应,最终羟

基取代碳原子上的氢,形成黄酮醇。表1是关于冠突散囊菌发酵不同茶叶基质后对其茶多酚含量的影响。

表1 不同茶多酚经冠突散囊菌发酵后含量变化
Table 1 Changes of different tea polyphenol content after
E. cristatum fermentation

茶叶 基质	植物多酚	产酶	发酵 情况	含量变化	文献
绿毛茶	总的儿茶素	-	发酵前	-	[14]
			发酵后	22.36 mg/g	
	茶褐素		发酵前	13.79 mg/g	
			发酵后	42.44 mg/g	
	酯型儿茶素		发酵前	89.13 mg/g	
			发酵后	7.65 mg/g	
铁观音 茶水	茶多酚	-	发酵前	56.361 mg/100 mL	[15]
			发酵后	9.012 mg/100 mL	
云南黑 毛茶	阿魏酸	阿魏酸 酯酶	发酵前	7.5096 mg/100 g	[16]
			发酵后	59.3262 mg/100 g	
炒青绿 毛茶	茶多酚	胞外酶	发酵前	24.85%	[17]
			发酵后	14.63%	
普洱 生茶	没食子酸 GA	-	发酵前	0.27%	[18]
			发酵后	1.64%	
	没食子		发酵前	9.45%	
			发酵后	18.26%	
	儿茶素 GC		发酵前	0.28%	
			发酵后	0.48%	
	表没食子		发酵前	2.43%	
			发酵后	0.78%	
	儿茶素 EGC		发酵前	3.93%	
			发酵后	3.05%	
	表没食子儿茶素		发酵前	2.06%	
			发酵后	2.23%	
	没食子酸酯 EGCG		发酵前	2.62%	
			发酵后	0.91%	
	表儿茶素没食子		发酵前	1.01%	
			发酵后	0.72%	
	酸酯 ECG		发酵前	0.41%	
			发酵后	0.61%	
	儿茶素没食子		发酵前	21.80%	
			发酵后	26.43%	
	酸酯 CG		发酵前		
			发酵后		
	儿茶素类		发酵前		
			发酵后		
	Catechins		发酵前		
			发酵后		

注:-表示未报道。

由表1可知,茶叶中多酚类成分的含量经冠突散囊菌发酵后发生了显著变化,这可能与冠突散囊菌分泌的阿魏酸酯酶、多酚氧化酶等胞外酶有很大的关系。阿魏酸酯酶可以水解植物细胞壁中由阿魏酸、p-香豆酸及二聚阿魏酸等酚酸与半纤维素和木质素形成的酯键,降解木质纤维素,同时释放出阿魏酸等物质^[19]。儿茶素在冠突散囊菌分泌的过氧化物酶和多酚氧化酶等作用下,首先会氧化成醌类化合物,醌类化合物再氧化聚合形成茶黄素和茶红素,这些茶色素再

与多糖、蛋白质以及咖啡碱等物质聚合产生茶褐素，同时过氧化物酶也能将醌类物质直接氧化聚合生成茶褐素^[5,20]。此外，有研究报道，冠突散囊菌能将酯型儿茶素转化为脱酯型儿茶素和没食子酸，这两种物质再经过氧化聚合、环裂变和甲基化等一系列反应降解成小分子酚酸^[3,20-21]。Xie 等^[22]报道，冠突散囊菌能转化表没食子儿茶素没食子酸酯为二氢杨梅素及黄烷-3-醇 B 环裂解类似物，如茯砖素 A。这些研究均表明，冠突散囊菌发酵对茶多酚具有显著影响，可为冠突散囊菌在茶叶领域的应用提供一定的理论依据。

1.2 药用植物多酚

我国药用植物资源十分丰富，已被《全国中草药名鉴》收录的药用植物有 11 470 多种^[23]，不同的药用植物含有不同酚类物质。冠突散囊菌对药用植物多酚的生物转化可能是通过发酵过程中分泌的胞外酶实现的。胡谢馨等^[24]利用从茯砖茶中分离鉴定出的冠突散囊菌发酵野葛、粉葛、葛渣，并利用高效液相色谱技术分析发现，发酵后葛根素响应值升高，吸收峰面积增加，且有新的物质峰产生；野葛、粉葛、葛渣经冠突散囊菌发酵后，葛根素含量分别提高了 20.48%、7.00%、20.29%。葛根素含量的变化，可能是因为冠突散囊菌在发酵过程中，分泌的一系列酶类，通过去糖基化、去甲基化、去羟基化等作用，将与葛根素结构相类似的异黄酮物质转化为葛根素，从而提高葛根素的含量^[25]。Zhang 等^[26]利用反相高效液相色谱技术分析发现，经冠突散囊菌发酵后，葛根中的葛根素及大豆苷元、黄豆黄素、染料木素含量显著提高，而大豆苷、黄豆苷元、染料木苷含量显著降低。Gu 等^[10]在茯砖茶中筛选得到具有高糖苷酶活性的散囊菌，用于固态生物转化沙棘叶的成分，发现发酵 7 d 后，其总酚、总黄酮、槲皮素、山奈酚和异鼠李素含量均显著增加，芦丁含量减少，可能是芦丁在散囊菌的作用下转化为槲皮素-3-葡萄糖苷、山奈酚-3-葡萄糖苷、异鼠李素-3-葡萄糖苷，这些物质在散囊菌分泌的 β -葡萄糖苷酶的作用下进一步转化成了苷元型黄酮。表 2 列举了 3 种药用植物的多酚类物质在冠突散囊菌作用下的含量变化。

有研究表明，冠突散囊菌有利于增加发酵基质中极性高的物质的含量，而极性高的物质有助于提高基质的生物利用度^[29]。因此，冠突散囊菌可以考虑应用于药用植物副产物中物质成分的转化中，以提高其生物活性功能及药用价值。Kong 等^[30]利用从茯砖茶分离出来的冠突散囊菌发酵中药残渣，对发酵产物进行分析发现了 9 种有药用价值的蒽醌类物质，分别为石黄酸 (parietinic acid)，山扁豆酸 (endocrocin)，羟基大黄素

表 2 不同药用植物多酚经冠突散囊菌发酵后含量变化
Table 2 Changes of polyphenol content in different medicinal plants after *E. cristatum* fermentation

药用植物	植物多酚	产酶	发酵情况	含量变化	文献
桑叶	总酚酸	-	发酵前	3.95 mg/g	[27]
			发酵后	1.24 mg/g	
	总黄酮		发酵前	4.39 mg/g	
			发酵后	8.53 mg/g	
葛根	总酚	-	发酵前	1.37~1.93 g GAE/kg	[28]
			发酵后	5.88~6.36 g GAE/kg	
	总黄酮		发酵前	0.79~4.86 g RE/kg	
			发酵后	6.62~13.33 g RE/kg	
	葛根素		发酵前	1 822.73 mg/kg	
			发酵后	2 905.58 mg/kg	
	大豆苷		发酵前	226.91 mg/kg	
			发酵后	15.38 mg/kg	
黄豆黄苷			发酵前	168.48 mg/kg	
			发酵后	137.18 mg/kg	
	染料木苷		发酵前	126.55 mg/kg	
			发酵后	70.90 mg/kg	
	大豆苷元		发酵前	128.65 mg/kg	
			发酵后	193.43 mg/kg	
	黄豆黄素		发酵前	1.98 mg/kg	
			发酵后	118.35 mg/kg	
染料木素			发酵前	7.65 mg/kg	
			发酵后	139.28 mg/kg	
	沙棘叶	-	发酵前	55.97 mg GAE/g DWW	
			发酵后	100.16 mg GAE/g DW	
	槲皮素	β -葡萄糖苷酶	发酵前	5.68 mg/100 g DW	
			发酵后	64.14 mg/100 g DW	
	山奈酚		发酵前	11.02 mg/100 g DW	
			发酵后	85.24 mg/100 g DW	
异鼠李素			发酵前	ND	
			发酵后	48.37 mg/100 g DW	
	野葛根	胞外酶	发酵前	0.326 2 mg/g	
			发酵后	0.378 3 mg/g	
粉葛根	总黄酮		发酵前	0.253 0 mg/g	[24]
			发酵后	0.284 2 mg/g	
葛根渣	总黄酮		发酵前	0.069 1 mg/g	
			发酵后	0.083 4 mg/g	

注：-表示未报道；GAE 表示没食子酸当量；RE 表示芦丁当量；DW 表示干重；ND 表示未检出。

(citreorosein)，小麦长蠕孢菌素 (tritisorpin)，大黄素 (e-modin)，链蠕孢素 (catenarin)，大黄素甲醚 (physcion)，毛罂红 (erythroglauin)，2,2'-双-长蠕孢素 (2,2'-bis-helminthosporin)。

1.3 豆类、谷物酚类物质

豆类、谷物中酚类化合物含量丰富，这些酚类化

合物是其生物活性功能得以发挥的物质基础,然而,有研究表明,这些酚类化合物中有很大部分是以不溶性形式存在的,大多数不溶性酚类物质与细胞壁化学物质(包括果胶、纤维素、木质素、阿拉伯木聚糖和结构蛋白)通过共价键、酯键、醚键等相结合,以结合形式出现,难以提取出来,严重影响其发挥生物活性功能^[31]。目前有大量研究表明,微生物发酵可以显著影响谷物、豆类中酚类物质的组成、含量和分布。表3列举了豆类及谷物中多酚含量经冠突散囊菌发酵后的含量变化。

表3 豆类、谷物多酚经冠突散囊菌发酵后含量变化

Table 3 Changes of polyphenol content in beans and grains after *E. cristatum* fermentation

豆类/谷物	植物多酚	产酶	发酵情况	含量变化	文献
燕麦	燕麦黄酮	苯丙氨酸解氨酶	发酵前	-	[32]
			发酵后	58.13 mg/g	
	阿魏酸	阿魏酸酯酶	发酵前	-	[33]
			发酵后	835.89 μ g/g	
	燕麦多酚	-	发酵前	-	[34]
			发酵后	2.28 mg/g	
豆渣	大黄素	-	发酵前	ND	[35]
			发酵后	1.02 mg/100 g DW	
	大黄素甲醚	-	发酵前	ND	
			发酵后	42.24 mg/100 g DW	
大豆	总酚	水解酶	发酵前	2 716 μ g GAE/g DW	[36]
			发酵后	5 205 μ g GAE/g DW	
	大豆苷	β -葡萄糖苷酶、纤维素酶、淀粉酶、蛋白酶	发酵前	730 μ g/g DW	
			发酵后	150 μ g/g DW	
	染料木苷		发酵前	954 μ g/g DW	
			发酵后	361 μ g/g DW	
	总的糖苷型		发酵前	1 685 μ g/g DW	
			发酵后	511 μ g/g DW	
	大豆异黄酮		发酵前	74 μ g/g DW	
			发酵后	777 μ g/g DW	
	染料木素		发酵前	79 μ g/g DW	
			发酵后	669 μ g/g DW	
荞麦	总酚	α -淀粉酶、蛋白酶、 β -葡萄糖苷酶、纤维素酶	发酵前	1 990.48~2 541.27 μ g GAE/g DW	[37]
			发酵后	3 671.43~4 447.62 μ g GAE/g DW	
	麸皮	木聚糖酶	发酵前	0.20 g/100 g	[38]
			发酵后	0.886 g/100 g	
	花青素		发酵前	0.000 67 g/100 g	
			发酵后	0.016 7 g/100 g	

注:-表示未报道;ND表示未检出;DW表示干重;GAE表示没食子酸当量。

由表3可知,经冠突散囊菌发酵后,燕麦、荞麦、麸皮及豆类的一些多酚类物质成分的含量显著提高。刘善鑫等^[32]研究发现,在发酵温度 30℃,基质 pH 值 6.0,接种量 0.5%,发酵时间 7 d 的最优发酵条件下,燕麦经冠突散囊菌发酵后,燕麦黄酮含量达到最大值(58.13 mg/g),是未发酵燕麦的 3.8 倍,燕麦黄酮含量的变化与苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)活性的变化呈显著正相关。这可能是因为 PAL 降低了细胞壁对黄酮类物质溶出的阻滞作用,从而使燕麦黄酮含量增加^[39]。Liu 等^[40]研究发现, PAL 可能是黄酮类物质合成的关键酶。Xiao 等^[41]利用冠突散囊菌发酵黑豆,发现发酵后黑豆中总酚和苷元型异黄酮含量显著增加,而糖苷型异黄酮含量明显减少。Chen 等^[36]利用冠突散囊菌发酵大豆,发现在发酵过程中,大豆总酚和苷元型异黄酮显著增加,而糖苷型异黄酮明显减少。固态发酵 15 d 后,大豆总酚、大豆苷元、染料木素和总苷元型大豆异黄酮分别比未发酵大豆高了 1.9、10.4、8.4、9.4 倍,这与冠突散囊菌发酵过程中产生的 α -淀粉酶、 β -葡萄糖苷酶、纤维素酶和蛋白酶密切相关,其中 β -葡萄糖苷酶通过水解葡萄糖苷键,去糖基化,有利于糖苷型异黄酮转化为苷元型异黄酮,最终增加苷元型异黄酮的含量。此外, Xiao 等^[37]利用冠突散囊菌生物转化荞麦,探讨其代谢物变化规律,研究结果表明,荞麦中总酚类物质经固态转化后显著增加,并进一步通过基于超高效液相色谱-串联质谱的代谢组学技术分析发现,在负离子模式下,21 种酚类物质(如咖啡酸、绿原酸、木犀草素、异鼠李素等)显著上调,而只有 7 种酚类物质显著下调。同时,冠突散囊菌将荞麦中的香豆素生物转化为咖啡酸。Lu 等^[38]利用冠突散囊菌发酵麸皮,发现发酵后麸皮的总酚、花青素含量增多,这可能与发酵过程中冠突散囊菌产生的木聚糖酶有关;发酵后麸皮中的阿魏酸含量大约是未发酵麸皮的 12.06 倍,这可能是由冠突散囊菌发酵过程中释放的阿魏酸酯酶所导致的。可见,冠突散囊菌用于谷物、豆类生物转化,其产生的酶能有效释放多酚类物质,促进其结构转化,产生新的代谢产物,增强其生物活性功能,有利于功能性食品的研究与开发。

1.4 其他植物多酚

冠突散囊菌除了对茶多酚、药用植物多酚、谷类多酚、豆类多酚存在生物转化之外,对其他植物多酚也存在转化作用。郝鹏飞^[42]将冠突散囊菌株 3.0448 接种于辣椒叶,并利用高效液相色谱技术研究冠突散囊菌发酵对辣椒叶成分的影响,结果发现发酵后物质发生了巨大的变化,产生了新的代谢产物,且多集中在

石油醚与乙酸乙酯部位;并利用液液萃取、减压硅胶柱色谱等方法,分离鉴定乙酸乙酯部位的发酵产物,分别是芹菜素、4',7,8-三羟基黄酮、5-甲氧基-4',7-二羟基黄酮、(Z)-6-[2-(3-(羟甲基)戊-1-烯-3-基)-1H-吡啶-3-基]亚甲基]-3-甲氧基-3-甲基哌嗪-2,5-二酮、曲黄素和芹菜素-7-O- β -D-芹糖(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-葡萄糖苷。此外,利用气相色谱-质谱联用技术,鉴定了石油醚部位的6种发酵产物,分别为二氢猕猴桃内酯、十四烷酸甲酯、1,3,5-三甲基-4-正-十八烷基环己烷、棕榈酸甲酯、油酸甲酯、十八烷酸甲酯。发酵前存在醇类和酸类化合物^[43],而发酵后石油醚部位主要是酯类化合物。由此推测,冠突散囊菌发酵促进酯化反应,产生较多的酯类物质,从而减少了发酵制品的苦涩味。詹欣^[44]将冠突散囊菌接种于银杏叶中,利用高效液相色谱技术,发现发酵后有新的物质生成,并对新增的峰进行目标分离,推测是咖啡因。表4为银杏多酚经冠突散囊菌发酵后含量变化规律。

表4 银杏多酚经冠突散囊菌发酵后含量变化

Table 4 Changes of polyphenol content in *Ginkgo biloba* leaves after *E. cristatum* fermentation

植物基质	植物多酚	发酵情况	含量变化	文献
银杏叶	银杏酸	发酵前	1.42 mg/g	[45]
		发酵后	0.63 mg/g	
		发酵前	2.33%	[46]
		发酵后	1.11%	
	总黄酮	发酵前	1.49 mg/g	[45]
		发酵后	1.85 mg/g	
		发酵前	14.44 mg/g	[46]
		发酵后	31.57 mg/g	
	原花青素	发酵前	-	
		发酵后	0.12 mg/g	

注:-表示未报道

由表4可知,在冠突散囊菌作用下,银杏总黄酮含量上升,而银杏酸含量下降。银杏酸含量的下降可能是因为冠突散囊菌在发酵过程中分泌多酚氧化酶,而银杏酸与儿茶素等酚酸类物质有相似的官能团,进而可能在多酚氧化酶的作用下,银杏酸被氧化,导致其含量下降^[47]。

2 冠突散囊菌发酵对植物生物活性的影响

2.1 抗氧化性

已有研究表明,微生物发酵对植物基质抗氧化活性产生显著影响。詹欣等^[48]利用冠突散囊菌发酵银杏叶,研究不同发酵时间银杏叶乙酸乙酯提取物的抗氧

化活性,结果表明,发酵11 d的银杏叶抗氧化活性最强,DPPH 自由基及 ABTS⁺自由基清除率的半抑制浓度(IC₅₀)分别为105.60 mg/L和102.09 mg/L,而未发酵的银杏叶 DPPH 自由基及 ABTS⁺自由基清除率的 IC₅₀为328.81 mg/L和226.75 mg/L。发酵后抗氧化活性的提高,与冠突散囊菌发酵过程中的转化产物密切相关。Zhou 等^[49]用乙酸乙酯、石油醚、乙醇提取冠突散囊菌发酵的白芷中的活性物质,发现发酵后白芷不同溶剂提取物的抗氧化能力(ABTS⁺、DPPH 自由基清除能力、铁离子还原抗氧化能力)均强于发酵前相对应的提取物,同时利用一种高效液相色谱-二极管阵列检测器-三重四级杆飞行时间串联质谱-2,2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐的方法分析,发现发酵后的白芷中存在12种具有抗氧化活性的物质,其中海胆灵(echinulin)、异白当归脑(isobyakangelicol)、生物碱 E-7(alkaloid E-7)、cristatumin F、2-(3E,5E-庚二烯基)-3,6-二羟基-5-(3-甲基-2-丁烯基)苯甲醛(isodihydroauroglaucon)、灰绿曲霉黄色素(flavoglaucon)这6种活性物质是发酵过程中产生的,均有利于提高其抗氧化活性。Zhang 等^[28]研究发现,葛根经冠突散囊菌发酵后,总酚、总黄酮的含量显著增加,抗氧化能力也得到了提高,相关性分析和主成分分析结果均表明这与总酚和总黄酮的含量密切相关。杜静等^[50]研究表明,葛根经冠突散囊菌发酵后,体外的抗氧化活性增加;发酵前,葛根对 DPPH 自由基清除率的 IC₅₀ 值为2.217 7 mg/mL,发酵后为0.835 9 mg/mL;且发酵后葛根中葛根素、大豆苷元的含量分别是发酵前的1.6、4.9倍,而大豆苷元的含量降低了近50%。研究发现,葛根中分离出来的5种异黄酮类化合物,即葛根素、大豆苷、大豆苷元、鹰嘴豆芽素A、染料木素,可以充当自由基清除剂,并抑制亚油酸过氧化和脂质氧化酶活性^[51]。李鹏程等^[52]利用冠突散囊菌发酵枸杞,发现冠突散囊菌可增加枸杞活性成分多酚、黄酮等的含量,并增强其抗氧化活性,主成分分析结果表明抗氧化活性与多酚和黄酮含量呈正相关。Xiao 等^[57]发现,荞麦经冠突散囊菌发酵后,其抗氧化活性显著增强,相关性分析发现这与酚类物质的增加密切相关;同时发酵过程中形成的生物碱及萜类物质也有助于抗氧化活性的增强。

2.2 降血脂活性

研究表明,冠突散囊菌在发酵过程中能产生丰富的降血脂成分,如茶褐素、洛伐他汀。Xiao 等^[59]采用冠突散囊菌 PW-1 发酵制备黑茶,研究从其中分离得到的茶褐素的降血脂活性,发现茶褐素具有很好的降脂

效果,可以使斑马鱼 100%的脂质水平降低至 51.57%。尹慧慧等^[53]以冠突散囊菌为菌种对甜菜粉进行发酵,可产生降血脂成分洛伐他汀,其产量可高达 95 mg/kg。此外,在 Jiang 等^[18]的细胞模型试验中,冠突散囊菌发酵基质的降血脂活性的提高得到了证实。其研究发现,冠突散囊菌发酵的普洱茶乙酸乙酯提取物在 60、80、100 $\mu\text{g/mL}$ 浓度时,对油酸诱导的 HepG2 细胞脂质抑制率分别为 24.06%,31.03%和 67.99%,抑制效果比发酵前好。

2.3 降血糖活性

有研究表明,植物基质经过冠突散囊菌发酵后可以提高淀粉酶及葡萄糖苷酶抑制活性,从而减少人体消化过程中葡萄糖的生成,降低血糖水平。刘善鑫^[54]利用冠突散囊菌发酵燕麦,发现发酵 6 d 后燕麦对 α -淀粉酶抑制率最高为 87.7%,与未发酵的燕麦相比增加了 29%。黄俊^[55]研究发现,经冠突散囊菌发酵 6 d 后,甜荞对 α -淀粉酶抑制率为 64.3%,与未发酵前相比,提升了 34%。此外,也有研究表明,经冠突散囊菌发酵后的植物基质降血糖活性的提高与发酵产物存在一定的关系。Xiao 等^[37]研究发现,荞麦经冠突散囊菌发酵后其 α -葡萄糖苷酶抑制活性显著增强,相关性分析发现这与酚类物质的增加密切相关;同时,也与发酵过程中生物碱及萜类物质的增加有一定的相关性。Li 等^[39]利用超高效液相色谱-串联质谱技术,发现在冠突散囊菌的作用下,从发酵后的豆渣中发现两种蒽醌类物质[大黄素(emodin)和大黄素甲醚(phycion)]含量分别为 1.02 mg/100 g DW 和 42.24 mg/100 g DW;动物实验中喂食患有二型糖尿病的小鼠和高脂饮食诱导胰岛素抵抗的小鼠餐后食用发酵前和发酵后的豆渣,结果发现发酵后的豆渣降血糖能力更加明显,可能是因为发酵后的豆渣含有蒽醌类物质,导致其抑制 α -葡萄糖苷酶的作用增强,能够减少餐后葡萄糖的释放,具有抗二型糖尿病的潜力。

2.4 其他生物活性

有研究表明,植物基质经冠突散囊菌发酵后能提高其抑菌活性、抗肿瘤活性等。郝鹏飞^[42]研究了冠突散囊菌发酵前后辣椒叶不同萃取部位的抗菌能力,发现发酵后乙酸乙酯部位、正丁醇部位以及水部位均显示出了一定的抑菌活性,而发酵前只有水部位显示出了抑菌活性,可能是因为发酵前后物质发生了变化。彭晓赞等^[56]发现冠突散囊菌的 4 种次级代谢产物,即灰绿曲霉黄色素、2-(2',3'-环氧基-1',3'-庚二烯基)-6-羟基-5-(3-甲基-2-丁烯基)苯甲醛、2-(2',3'-环氧基-1',3'5'-庚三烯基)-6-羟基-5-(3-甲基-2-丁烯基)苯甲醛和 2-(3E,5E-庚二烯基)-3,6-二羟基-5-(3-甲基-2-丁烯基)苯甲醛,它们对 3 种肿瘤细胞(SF-268、MCF-7 和 NCI-H460)有较好的细胞毒活性。冠突散囊菌可以使植物基质的抑菌、抗肿瘤等生物活性提高这一特点有利于保健食品的开发。苏二正等^[57]发明了一种冠突散囊菌液体发酵白果的方法及其制备的产品,该产品具有抗肿瘤、免疫调节等功能,主要是因为冠突散囊菌发酵后具有多种新增物质,而这些物质具有抑菌、抗肿瘤、免疫调节等功能。

3 总结与展望

微生物转化是植物多酚结构改变及生物活性功能增强的重要途径之一。冠突散囊菌目前主要应用于茯砖茶的制作及其他茶叶产品的加工上,然而,其在药用植物和食物基质上产生丰富的代谢酶系,展现出了强大的代谢转化能力,其代谢转化产物由于具有更强的生物活性功能将受到更加广泛的关注。通过微生物发酵中药材及食物基质的方法有望得到原来不存在的活性成分或者提高含量低的酚类活性成分(如抗氧化活性、降血脂活性、降血糖活性物质等),经过筛选,开发获得具有特异性药效及功能活性的成分。冠突散囊菌在植物活性成分的代谢转化方面的研究将会受到更加广泛的关注,而基于代谢组学及转录组学等技术的推广将应用于研究冠突散囊菌代谢转化的机理。

参考文献:

- [1] LIU Z, GAO L, CHEN Z, et al. Leading progress on genomics, health benefits and utilization of tea resources in China[J]. Nature, 2019, 566(7742): S15-S19.
- [2] LI Q, LI Y D, LUO Y, et al. Characterization of the key aroma compounds and microorganisms during the manufacturing process of Fubrick tea[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 127: 109355.
- [3] XIAO Y, HE C, CHEN Y L, et al. UPLC-QQQ-MS/MS-based widely targeted metabolomic analysis reveals the effect of solid-state fermentation with *Eurotium cristatum* on the dynamic changes in the metabolite profile of dark tea[J]. Food Chemistry, 2022, 378: 131999.
- [4] 黄群, 李彦坡, 陈林杰, 等. 冠突散囊菌液态发酵过程中黑茶活性成分变化研究[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 231-234.
HUANG Qun, LI Yanpo, CHEN Linjie, et al. Study on changes of active components in dark tea during liquid fermentation by *Eurotium cristatum*[J]. Food Science, 2007, 28(12): 231-234.
- [5] XIAO Y, LI M Y, WU Y P, et al. Structural characteristics and hypolipidemic activity of theabrownins from dark tea fermented by single species *Eurotium cristatum* PW-1[J]. Biomolecules, 2020, 10(2): 204.

- [6] 徐湘婷, 王鹏, 罗绍忠, 等. 普洱熟茶茶褐素对2型糖尿病小鼠降糖作用研究[J]. 中国民族民间医药, 2015, 24(20): 9–10.
XU Xiangting, WANG Peng, LUO Shaozhong, et al. Hypoglycemic effects of fermented Puer tea extracts— theabrownins in mice of type 2 diabetes[J]. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacology, 2015, 24(20): 9–10.
- [7] 岳随娟, 刘建, 龚加顺. 普洱茶茶褐素对大鼠肠道菌群的影响[J]. 茶叶科学, 2016, 36(3): 261–267.
YUE Suijuan, LIU Jian, GONG Jiashun. Effects of theabrownin extracted from Pu-erh tea on the intestinal flora[J]. Journal of Tea Science, 2016, 36(3): 261–267.
- [8] 倪德江, 樊蓉, 陈玉琼, 等. 普洱茶主要氧化产物提取条件的优化及其抗氧化活性分析[J]. 中国茶叶, 2010, 32(2): 22–24.
NI Dejiang, FAN Rong, CHEN Yuqiong, et al. Optimization of extraction condition of Pu'er tea's main oxidation products and analysis of its antioxidant activity[J]. China Tea, 2010, 32(2): 22–24.
- [9] JIN W D, ZHOU L, YAN B, et al. Theabrownin triggers DNA damage to suppress human osteosarcoma U2OS cells by activating p53 signalling pathway[J]. Journal of Cellular and Molecular Medicine, 2018, 22(9): 4423–4436.
- [10] GU Q Y, DUAN G L, YU X B. Bioconversion of flavonoid glycosides from *Hippophae rhamnoides* leaves into flavonoid aglycones by *Eurotium amstelodami*[J]. Microorganisms, 2019, 7(5): 122.
- [11] 叶新民. 茶叶功能及产品开发研究现状[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2004(2): 27–29.
YE Xinmin. Research status of tea function and its product development[J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 2004(2): 27–29.
- [12] 杨金梅, 黄婧, 杨民和. 金花菌发酵对茶叶主要化学成分的影响[J]. 广东农业科学, 2015, 42(19): 20–26.
YANG Jinmei, HUANG Jing, YANG Minhe. Effects of Jinhua-fungi fermentation on chemical compositions of Tie-guan-yin tea[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(19): 20–26.
- [13] 黄浩, 赵熙, 黄怀生, 等. 茯茶“散茶发花”加工前后差异化学成分的分离与鉴定[J]. 茶叶科学, 2016, 36(1): 27–37.
HUANG Hao, ZHAO Xi, HUANG Huaisheng, et al. Isolation and identification of variant phytochemical in the processing of fu tea by fungal fermentation with loose tea[J]. Journal of Tea Science, 2016, 36(1): 27–37.
- [14] XIAO Y, ZHONG K, BAI J R, et al. The biochemical characteristics of a novel fermented loose tea by *Eurotium cristatum* (MF800948) and its hypolipidemic activity in a zebrafish model[J]. LWT—Food Science and Technology, 2020, 117: 108629.
- [15] 黄婧. “金花”菌的分离鉴定及其对茶叶成分的生物转化[D]. 福州: 福建师范大学, 2013: 39–44.
HUANG Jing. Isolation and identification of “Jinhua” fungi and its biotransformation of tea constituents[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013: 39–44.
- [16] 刘闫, 胡茂丰, 刘素纯. 冠突散囊菌产阿魏酸酯酶及其发酵麸皮和黑毛茶形成阿魏酸的研究[J]. 农产品加工, 2015(8): 1–3, 6.
LIU Yan, HU Maofeng, LIU Suchun. Feruloyl esterases from *Eurotium cristatum* and ferulic acid forming from *Eurotium cristatum* fermentation wheat bran and dark tea[J]. Farm Products Processing, 2015(8): 1–3, 6.
- [17] 欧阳梅, 熊昌云, 屠幼英, 等. 冠突散囊菌对茶叶品质成分及其抗氧化活性影响[J]. 菌物学报, 2011, 30(2): 343–348.
OUYANG Mei, XIONG Changyun, TU Youying, et al. Effects of *Eurotium cristatum* on tea quality and antioxidant activity[J]. Mycosystema, 2011, 30(2): 343–348.
- [18] JIANG C K, ZENG Z, HUANG Y H, et al. Chemical compositions of Pu'er tea fermented by *Eurotium cristatum* and their lipid-lowering activity[J]. LWT—Food Science and Technology, 2018, 98: 204–211.
- [19] 王丽, 孙钦栋, 王贺祥. 阿魏酸酯酶的研究与应用进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 628–635.
WANG Li, SUN Qindong, WANG Hexiang. A review on research and applications of feruloyl esterase[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 47(4): 628–635.
- [20] ZHU M Z, LI N, ZHOU F, et al. Microbial bioconversion of the chemical components in dark tea[J]. Food Chemistry, 2020, 312: 126043.
- [21] ZHU Y F, CHEN J J, JI X M, et al. Changes of major tea polyphenols and production of four new B-ring fission metabolites of catechins from post-fermented Jing-Wei Fu brick tea[J]. Food Chemistry, 2015, 170: 110–117.
- [22] XIE H F, KONG Y S, LI R Z, et al. Feature-based molecular networking analysis of the metabolites produced by in vitro solid-state fermentation reveals pathways for the bioconversion of epigallocatechin gallate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(30): 7995–8007.
- [23] 刘海林, 马本驰, 王乾贵, 等. 不同煎煮时间对代代花等10种药用植物水提液的总多酚与总黄酮含量及其抗氧化活性的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018(9): 161–165.
LIU Hailin, MA Benchu, WANG Qianguai, et al. Effects of different decocting time on the total phenolic, flavonoid contents and antioxidant capacities of aqueous extract of 10 medical plants including *Citrus aurantium* L.[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2018(9): 161–165.
- [24] 胡谢馨, 易有金, 柏连阳, 等. 茯砖茶“金花”菌的分离、鉴定及转化葛根产物研究[J]. 茶叶科学, 2016, 36(3): 268–276.
HU Xiexin, YI Youjin, BO Lianyang, et al. Research on separation, identification and transformation products transformed kudzu root of “Jinhua” fungus[J]. Journal of Tea Science, 2016, 36(3): 268–276.
- [25] 宋艳秋, 陈有为. 葛根的红曲霉转化产物化学成分分析[J]. 天然产物研究与开发, 2013, 25(11): 1525–1528.
SONG Yanqiu, CHEN Youwei. Study on the chemical components of transforming Puerariae Radix with *Monascus* [J]. Natural Product Research and Development, 2013, 25(11): 1525–1528.
- [26] ZHANG B, LI W, DONG M S. Flavonoids of kudzu root fermented by *Eurotium cristatum* protected rat pheochromocytoma line 12 (PC12) cells against H₂O₂-induced apoptosis[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(12): 2754.

- [27] 王吉成, 刘轩, 唐劲天, 等. 桑叶发酵前后总黄酮、总酚酸含量变化及抗氧化活性研究[J]. 中国民族民间医药, 2014, 23(23): 15–18.
- WANG Jicheng, LIU Xuan, TANG Jintian, et al. Antioxidant activities and determination of total flavonoids and total phenolics in the fermentation and non-fermentation products in Mulberry leaf[J]. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy, 2014, 23(23): 15–18.
- [28] ZHANG B, LU Z, XU X, et al. Solid-state fermentation with *Eurotium cristatum* HC-18 to improve antioxidant activity of kudzu (*Pueraria lobata*) root[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2018, 57(4): 384–395.
- [29] XIANG X L, SONG C W, SHI Q X, et al. A novel predict-verify strategy for targeted metabolomics: Comparison of the curcuminoids between crude and fermented turmeric[J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127281.
- [30] KONG W P, HUANG C S, SHI J, et al. Recycling of Chinese herb residues by endophytic and probiotic fungus *Aspergillus cristatus* CB10002 for the production of medicinal valuable anthraquinones[J]. Microbial Cell Factories, 2019, 18(1): 102.
- [31] ACOSTA-ESTRADA B A, GUTIÉRREZ-URIBE J A, SERNA-SALDÍVAR S O. Bound phenolics in foods, a review[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 46–55.
- [32] 刘善鑫, 刘素纯, 李再贵. 冠突散囊菌对燕麦黄酮含量的影响[J]. 中国酿造, 2019, 38(2): 93–97.
- LIU Shanxin, LIU Suchun, LI Zaigui. Effect of *Eurotium cristatum* on flavones content in oat[J]. China Brewing, 2019, 38(2): 93–97.
- [33] 刘善鑫, 刘素纯, 李再贵. 冠突散囊菌发酵燕麦对阿魏酸含量的影响[J]. 中国酿造, 2018, 37(6): 165–169.
- LIU Shanxin, LIU Suchun, LI Zaigui. Effect of *Eurotium cristatum* fermentation on ferulic acid content in oats[J]. China Brewing, 2018, 37(6): 165–169.
- [34] 王家琛, 刘素纯, 刘善鑫. 冠突散囊菌发酵燕麦对多酚含量影响的研究[J]. 中国酿造, 2017, 36(8): 104–108.
- WANG Jiachen, LIU Suchun, LIU Shanxin. Effect of *Eurotium cristatum* fermentation on polyphenol content in oats[J]. China Brewing, 2017, 36(8): 104–108.
- [35] LI Y C, TAKAHASHI M, PEI J L, et al. *Eurotium cristatum* fermented okara as a potential food ingredient to combat diabetes[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 17536.
- [36] CHEN Y L, WANG Y L, CHEN J X, et al. Bioprocessing of soybeans (*Glycine max* L.) by solid-state fermentation with *Eurotium cristatum* YL-1 improves total phenolic content, isoflavone aglycones, and antioxidant activity[J]. RSC Advances, 2020, 10(29): 16928–16941.
- [37] XIAO Y, WU X, YAO X S, et al. Metabolite profiling, antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities of buckwheat processed by solid-state fermentation with *Eurotium cristatum* YL-1[J]. Food Research International, 2021, 143: 110262.
- [38] LU X J, JING Y, LI Y Y, et al. *Eurotium cristatum* produced β -hydroxy acid metabolite of monacolin K and improved bioactive compound contents as well as functional properties in fermented wheat bran[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 113088.
- [39] 杜晨晖, 闫艳, 冯前进, 等. 葛根芩连汤发酵前后总黄酮和总生物碱含量变化研究[J]. 中华中医药杂志, 2016, 31(11): 4850–4853.
- DU Chenhui, YAN Yan, FENG Qianjin, et al. Research on levels of total flavonoids and total alkaloids in Gegen Qinlian Decoction before and after fermentation[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2016, 31(11): 4850–4853.
- [40] LIU R R, XU S H, LI J L, et al. Expression profile of a PAL gene from *Astragalus membranaceus* var. *Mongolicus* and its crucial role in flux into flavonoid biosynthesis[J]. Plant Cell Reports, 2006, 25(7): 705–710.
- [41] XIAO Y, HUANG Y X, CHEN Y L, et al. Effects of solid-state fermentation with *Eurotium cristatum* YL-1 on the nutritional value, total phenolics, isoflavones, antioxidant activity, and volatile organic compounds of black soybeans[J]. Agronomy, 2021, 11(6): 1029.
- [42] 郝鹏飞. 辣椒叶“金花”菌发酵产物及活性研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2013: 27–62.
- HAO Pengfei. Research on the fermentation products of pepper leaves fermented by "Jinhua" fungus and its activities[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2013: 27–62.
- [43] 陈娜. 辣椒叶化学成分及抗氧化活性研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2012: 31–44.
- CHEN Na. Research on chemical components and antioxidant activity of pepper leaves[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2012: 31–44.
- [44] 詹欣. 银杏叶发酵产物的生物活性检测与分离及其发酵条件优化[D]. 北京: 北京中医药大学, 2014: 18–27.
- ZHAN Xin. Bioactivity detection and isolation of *Ginkgo biloba* leaves fermentation products and optimization of fermentation conditions[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2014: 18–27.
- [45] 秦俊哲, 任金玫, 李银亮, 等. 银杏茶人工接种发酵工艺优化研究[J]. 食品科技, 2014, 39(6): 114–118.
- QIN Junzhe, REN Jinmei, LI Yinliang, et al. Process optimization of *Ginkgo biloba* tea artificial inoculation fermentation[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(6): 114–118.
- [46] ZOU M M, GUO X H, HUANG Y, et al. Improvement of the quality of *Ginkgo biloba* leaves fermented by *Eurotium cristatum* as high value-added feed[J]. Processes, 2019, 7(9): 627.
- [47] 任金玫, 秦俊哲, 邹力. 人工接种发酵银杏砖茶的研究[J]. 食品科技, 2015, 40(4): 137–140.
- REN Jinmei, QIN Junzhe, ZOU Li. *Eurotium cristatum*-fermented *Ginkgo biloba* brick tea artificially[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(4): 137–140.
- [48] 詹欣, 辛敏, 王然, 等. 不同天数银杏叶发酵液提取物的体外抗氧化活性比较[J]. 中国实验方剂学杂志, 2014, 20(3): 118–123.
- ZHAN Xin, XIN Min, WANG Ran, et al. Comparison of anti-oxidation of ethyl acetate extracts from *Ginkgo biloba* leaves medium un-

- der different fermentation time condition *in vitro*[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2014, 20 (3): 118–123.
- [49] ZHOU S D, XU X, LIN Y F, et al. On-line screening and identification of free radical scavenging compounds in *Angelica dahurica* fermented with *Eurotium cristatum* using an HPLC-PDA-Triple-TOF-MS/MS-ABTS system[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 670–678.
- [50] 杜静, 王琪琪, 王云胜, 等. 冠突散囊菌发酵对葛根的活性物质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 121–125, 131.
- DU Jing, WANG Qiqi, WANG Yunsheng, et al. Effect on bioactive components and antioxidant activity of *Pueraria lobata* fermented by *Eurotium cristatum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 121–125, 131.
- [51] JUN M, FU H Y, HONG J, et al. Comparison of antioxidant activities of isoflavones from kudzu root (*Pueraria lobata* ohwi)[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(6): 2117–2122.
- [52] 李鹏程, 肖咪, 薛宏坤, 等. 冠突散囊菌发酵枸杞工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 51–58.
- LI Pengcheng, XIAO Mi, XUE Hongkun, et al. Study on technology and antioxidant activity of *Lycium barbarum* fermented by *Eurotium cristatum*[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(2): 51–58.
- [53] 尹慧慧, 陈育如, 赵文文. 冠突散囊菌利用不同原料产洛伐他汀的条件优化[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2018, 41(2): 93–98.
- YIN Huihui, CHEN Yuru, ZHAO Wenwen. Optimization of producing lovastatin by *Eurotium cristatum* with different materials[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2018, 41(2): 93–98.
- [54] 刘善鑫. 冠突散囊菌发酵燕麦主要功能性成分及燕麦功效分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019: 33–40.
- LIU Shanxin. Analysis on main functional components and oat efficacy of oat fermented by *Eurotium cristatum*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019: 33–40.
- [55] 黄俊. 冠突散囊菌发酵甜荞主要功能性成分变化和功效研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019: 23–31.
- HUANG Jun. Study on the main functional components and effects of sweet buckwheat fermented by *Eurotium cristatum*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019: 23–31.
- [56] 彭晓赞, 梁法亮, 李冬利, 等. 茯砖茶中冠突散囊菌的次级代谢产物及其生物活性研究[J]. 中草药, 2013, 44(14): 1881–1886.
- PENG Xiaoyun, LIANG Faliang, LI Dongli, et al. Secondary metabolites of *Eurotium cristatum* from Fu Brick tea and their biological activities[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2013, 44 (14): 1881–1886.
- [57] 南京林业大学. 一种白果冠突散囊菌液态发酵的方法及其制备的产品和应用: 201811273904.6 [P]. 2019–02–01.
- Nanjing Forestry University. *Eurotium cristatum* liquid state fermentation method of *Ginkgo* seeds, and product prepared by *Eurotium cristatum* liquid state fermentation method and application of product: 201811273904.6 [P]. 2019–02–01.

加工编辑: 孟琬星

收稿日期: 2021–04–04