

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.05.024

枸杞酵素功能特性研究进展

桂光亚, 朱绚绚, 张琦*

(江西中医药大学 中医学院, 江西 南昌 330004)

摘要: 枸杞作为一种药食两用的植物, 含有枸杞多糖、维生素、矿物质、多酚类 and 黄酮类等多种有益成分。枸杞酵素是用多种益生菌对枸杞进行发酵而得到的产品, 可以显著地影响和改善枸杞原本的营养价值、感官品质以及功能特性等, 具有增强免疫力、抗氧化、降低血糖水平等多种生理功效, 具备巨大的发展潜力。该文综合分析近年来对于枸杞酵素研究的最新进展, 介绍不同菌种及相应工艺对于制备枸杞酵素所产生的影响, 并详述枸杞酵素中所含有的营养成分与多种生理功效。此外, 还探讨未来对于枸杞酵素研究的发展方向, 以期为开拓新型酶制品并实现工业化生产奠定理论基础。

关键词: 枸杞酵素; 微生物; 发酵; 营养成分; 功能特性

Research Progress on Functional Characteristics of *Lycium barbarum* Enzymes

GUI Guangya, ZHU Xuanxuan, ZHANG Qi*,

(College of Traditional Chinese Medicine, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, Jiangxi, China)

Abstract: As a medicinal and edible plant, *Lycium barbarum* contains various beneficial elements, including *Lycium barbarum* polysaccharides, vitamins, mineral substances, polyphenols, and flavonoids. *L. barbarum* enzymes are derived from the fermentation of *L. barbarum* with various probiotics. It can significantly enhance the original nutritional value, sensory quality, and functional characteristics of *L. barbarum*. Moreover, *L. barbarum* enzymes exhibit diverse health effects such as immune enhancement, antioxidant activity, and blood sugar reduction, thus demonstrating substantial potential for further development. This study analyzed the latest research progress on *L. barbarum* enzymes in recent years and introduced the influence of different strains and corresponding processes on their preparation. Meanwhile, this study enunciated the nutritional components and health benefits of *L. barbarum* enzymes. In addition, future directions for *L. barbarum* enzyme research were proposed to lay a theoretical foundation for developing new enzyme products and realizing industrial production.

Key words: *Lycium barbarum* enzymes; microorganism; fermentation; nutritional components; functional characteristics

引文格式:

桂光亚, 朱绚绚, 张琦. 枸杞酵素功能特性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 179-186.

GUI Guangya, ZHU Xuanxuan, ZHANG Qi. Research Progress on Functional Characteristics of *Lycium barbarum* Enzymes[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 179-186.

枸杞(*Lycium barbarum*)是一种干燥成熟的茄科植物果实, 也被称为甜菜子、红耳坠、地骨子等^[1], 早在《神农本草经》中就有记载, 它具有苦味和寒性, 并且无

毒, 主要用于治疗内脏器官的异常气血运行、高温引起的消渴以及周身风湿问题^[2]。作为我国重要的食药同源物质之一, 枸杞具有非常高的营养价值, 其需求也在

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(20222ZDH04094); 赣江新区“揭榜挂帅”科技计划项目(Gjxq-jbgs2021001); 2023年大学生创新创业训练计划省级项目(S202310412117X); 江西中医药大学校级大学生创新创业训练计划项目(202181601030)

作者简介: 桂光亚(1998—), 男(汉), 在读硕士研究生, 研究方向: 药食两用药材研究。

*通信作者: 张琦(1984—), 女(汉), 教授, 博士, 研究方向: 中药新剂型与新技术、药食两用药材研究。

逐年增加^[3]。枸杞中含有丰富多样的成分,包括枸杞多糖(*Lycium barbarum polysaccharides*, LBP)、甜菜碱、枸杞色素、花青素、有机酸以及铁和锌等无机矿物质元素^[4-5]。这些成分赋予了枸杞降低血糖、抗氧化和增强免疫力等功效^[6-7]。

根据中国生物发酵产业协会发布的《酵素产品分类导则》,酵素是一种含有特定生物活性成分的产品,其原料可以来自动物、植物或菌类等。酵素的功能特性主要取决于微生物和经过微生物发酵后产生的活性成分,这些包括但不限于乳酸菌、酵母菌、双歧杆菌和芽孢杆菌等^[8]。通过使用添加剂或者本身所具备的功效,它们能够提供抗氧化、抑制癌细胞、预防心血管疾病、抗炎以及增强免疫力等多种功效,并且对肠道环境也有改善作用^[9-11]。枸杞酵素是利用各种益生菌对枸杞进行发酵而制成的,通过发酵改变枸杞中原本的活性物质,以达到增强免疫力、抗氧化、降低血脂、血糖、胆固醇水平等多种生理功效。

近年来,人们对预防疾病和保持健康饮食的重视不断提升,因此功能性发酵食品备受关注和喜爱。枸杞通过微生物发酵处理既可以被用作一种有效的食品保存方法,还能有效提高原料的营养多样性和生物活性。虽然国内市场上已经有一些以枸杞为原料的保健酵素产品,但数量并不多,因此枸杞酵素在市场上具有广阔的发展空间。本文研究国内外在选择适用于枸杞酵素人工发酵菌种、制造工艺、营养成分以及功能特点等方面的内容,旨在为深入开发和利用枸杞酵素提供参考依据。

1 发酵菌种

微生物发酵枸杞有两种方式,分别是自然发酵和人工接种发酵。自然发酵是用原料本身携带的微生物进行发酵,但难以实现大规模工业化生产。这是因为发酵周期较长且微生物种类、数量无法控制,导致产品品质参差不齐。而人工接种发酵是使用国家卫生部门允许用于食品加工或传统用于食品生产的菌株,并通过在其中添加优质菌株进行发酵,这有利于实现工业化生产^[12-13]。人工接种发酵可以划分为两种方式:单一菌株和多菌混合。单一菌株常使用不同类型的发酵菌,如酵母菌、乳酸菌和醋酸菌等。多菌混合通过以不同比例菌种复配互相作用,从而制造出独特口味的枸杞产品。

1.1 酵母菌发酵

酵母菌属是一种具有兼性厌氧特性的真菌微生物,它能够在有氧和无氧环境下有效地分解糖类,并且在发酵过程中保持着稳定的功能^[14]。叶春苗等^[15]以酸浆和枸杞为原料,接种酵母进行发酵,发现果酱经过发

酵后,其清除自由基的能力显著增强,并且抗氧化活性得到提升。Peng等^[16]提出用工程酿酒酵母对枸杞发酵后再对其进行LBP的提取,能够保证该活性物质大量稳定的产出,迎合市场需求。Wang等^[17]发现,经酵母菌发酵后再提取LBP较传统热水法提取的LBP有更强的清除1,1-二苯基-2-苦肼基(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基、羟基自由基和超氧阴离子自由基的能力,产生的抗氧化和抗衰老效果更好。

1.2 乳酸菌发酵

乳酸菌也称乳酸杆菌,是一种革兰氏阳性菌,广泛存在于自然界中^[18]。乳酸菌在食品的发酵过程中、工业上的乳酸发酵以及医疗保健领域都有广泛而多样化的应用^[19-20]。常见的乳酸菌包括嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*)、保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*)、干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*)、植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)及鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*)等,它们可以利用植物本身所含营养物质生成多种有益代谢产物,如有机酸、多肽、氨基酸以及其他化合物。这些代谢产物能够降低环境的pH值,从而延长产品的保质期。此外,乳酸菌还能通过生成活性物质来调节肠道内的菌群,进而改善肠道健康情况^[21]。冯琳等^[22]用不同菌种的乳酸杆菌与酵母菌发酵宁夏枸杞原浆进行对比,结果发现,乳杆菌MN1030经过37℃发酵48h后,生成的酵素能够提高HepG2细胞的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性以及激活抗利尿激素(antidiuretic hormone, ADH),降低谷草转氨酶(aspartate transaminase, AST)、谷丙转氨酶(alanine aminotransferase, ALT)和乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH)的泄露率以及丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量。这说明经过乳酸菌发酵的枸杞酵素具有优异的解酒护肝效果。刘予煊等^[23]对比了不同种类的乳酸菌发酵宁夏枸杞汁,结果显示使用巴达维亚芽孢杆菌(*Bacillus bataviensis*)进行发酵可以增加酵素黄酮含量,并且使其口感更好,具有淡奶香味;使用罗伊氏乳杆菌(*Lactobacillus reuteri*)进行发酵所获得的蛋白质含量最高,为(599.50±1.53) μg/mL。说明使用乳酸菌发酵枸杞能提高枸杞中的有益成分含量。李东红等^[24]以黑枸杞和桑葚为原料,在经过植物乳杆菌、罗伊乳杆菌和鼠李糖乳杆菌共同发酵47h后,检测到黑枸杞本草中产生了富含有机酸、粗多糖和多酚的药用成分。闵祥博等^[25]证明用植物乳植杆菌、罗伊氏粘液乳杆菌、鼠李糖乳酪杆菌发酵的黑枸杞酵素通过增加毛囊数量和胶原蛋白含量,提高毛囊增殖细胞标记物的阳性表达来促进脱发小鼠的毛发生长速度。

1.3 复合菌种发酵

复合菌种发酵是一种新型发酵技术,它能够同时

利用两种或更多菌种来完成特定的发酵过程。常见的菌种包括酵母菌、乳酸菌和醋酸菌等。与单一菌种发酵相比,复合菌种发酵可以弥补其不足之处,并且各个菌种之间可以相互促进,提高产生酶的品质和感官特性,从而改善整体发酵效果并形成独特风味。此外,复合菌群代谢产物中含有有机酸和抗菌物质,这些物质具有抑制病原微生物和腐败细菌生长的作用,以此提高所得到的发酵产品的安全性。王娜等^[26]研究发现,经过雪莲菌复合菌种发酵处理后,枸杞原浆中的甜菜碱含量增加了 2.54 倍。同时,与未发酵前相比,醇类、酯类和酸类物质含量显著增加,挥发性成分总含量从 8.94 mg/mL 增加至 39.76 mg/mL。Liu 等^[27]用复合菌种对枸杞汁进行发酵,蛋白质含量由原来的 (39.23±0.67) mg/100 mL 增加了 1.31~2.11 倍,挥发性化合物

含量增加,提高了果汁的抗氧化能力。

2 发酵工艺

目前市场上虽然有一些功能食品含有酵素成分,但是以枸杞为原料的酵素产品在市场上并不常见。枸杞酵素具备巨大的市场潜力。制作枸杞酵素属于食品深加工技术领域,其工艺技术多种多样,可以利用新鲜的枸杞果实、干燥的枸杞或者枸杞汁进行发酵,并且还可以添加其他有益原料来制备复合型酵素。主要步骤包括清洗、打浆、使用特定微生物进行蛋白质分解和糖化过程前的发酵预处理、调整糖分含量、灭菌处理以及接种单一或多种有益微生物进行发酵等。不同的发酵工艺会对最终产出的枸杞酵素品质评价造成明显差异,具体如表 1 所示。

表 1 枸杞酵素的发酵工艺
Table 1 Fermentation technology of *L. barbarum* enzymes

酵素品类	发酵菌种	发酵条件	产品优点	参考文献
枸杞鲜果	雪莲菌	接种量为鲜果原浆 5%,发酵时间 48 h,发酵温度 25 °C	甜菜碱含量高,为 18.95 mg/mL	[26]
	酵母菌 ACTIFLORE	鲜枸杞破碎、打浆,白酒浸泡 72 h 后蒸馏水降度 8% vol~10% vol,调整 pH 值,调糖,接种酵母,第一阶段发酵(18~22 °C)后分离下胶澄清进行第二阶段发酵(22~23 °C),陈酿	降低枸杞发酵过程中酶促褐变的发生速率	[28]
枸杞干果	乳杆菌 MN1030	干枸杞热烫后以 1:4(g/mL)的料水比在 80 °C 的水中浸泡 30 min,加入 0.3% 抗坏血酸钠,冷却后打浆。在 40 °C 用复合酶(纤维素酶与果胶酶质量比为 2:8)酶解 3 h,加酶量为 0.2%	SOD 活力及 ADH 的激活率提高	[22]
	罗伊氏乳杆菌	纯水与宁夏干枸杞的质量比为 5:1,加入枸杞质量 0.5% 的异抗坏血酸钠护色,浸泡 6 h 并打浆,用 4 层纱布过滤除籽后,加入 5% 的白砂糖,用小苏打调 pH 值至 6.5	蛋白质含量高,为(599.50±1.53) μg/mL	[23]
	巴达维亚芽孢杆菌	纯水与宁夏干枸杞的质量比为 5:1,加入枸杞质量 0.5% 的异抗坏血酸钠护色,浸泡 6 h 并打浆,用 4 层纱布过滤除籽后,加入 5% 的白砂糖,用小苏打调 pH 值至 6.5	总酚含量高,为(5.48±0.13) mg/mL,品质佳	[23]
	红茶菌	宁夏枸杞干果与水的质量比为 1:7,红茶菌接种量为 6%、初始糖度为 20%、pH3.5~4,30 °C 发酵 7 d	乳酸含量 6.758 mg/mL、柠檬酸含量 3.060 mg/mL,成品澄清透亮,无沉淀,酸中带甜	[29]
	巴氏醋酸菌亚种	发酵温度 30 °C、接种量 6%、初始 pH 值 5.5,发酵 4~6 d	枸杞果醋酸度为 4.93 g/100 mL,具有浓郁的果醋香和枸杞的清香	[30]
枸杞混合物	植物乳杆菌、罗伊乳杆菌、鼠李糖乳杆菌	黑枸杞干和桑葚(2%)为原料发酵,低聚果糖添加量 3%、发酵时间 47 h	有机酸含量为 2.4×10 ⁴ g/kg,粗多糖含量为 1 mg/g,多酚含量为 16 mg/g	[24]
	酿酒酵母 BCGQ2107	刺梨汁与枸杞汁的体积比 3:1,发酵时间 50 h、酿酒酵母接种量 4%、发酵温度 28 °C	对 α-淀粉酶抑制率高,为 55.673%	[31]
	保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌	紫山药浆添加量 30%、黑枸杞浆添加量 9%、复合菌种添加量 0.18%、发酵时间 7 h	感官评分高,活菌数为 9.21g (cfu/g),蛋白质含量 3.15 g/100 g	[32]

3 营养成分

枸杞酵素富含多种有益成分,如多糖、氨基酸、维生素和矿物质等。这些成分对人体具有积极作用,能够促进新陈代谢、增强免疫力和抗衰老^[33]。此外,在枸杞的发酵过程中,其中含有的多糖、氨基酸和淀粉等成

分会逐渐转化为一系类挥发性化合物,如醇类、酯类、酸类、醛酮类以及萜类等^[34]。这些化合物赋予了枸杞其特殊的香气,并使得其发酵产生了独特的味道。枸杞酵素的营养组成丰富多样,不仅包括了原本就存在于枸杞中的活性物质,还包括了经过发酵过程产生的

生物活性物质。这些生物活性物质在枸杞酵素中相互协同作用,并进一步提升了其生理功能。因此,在近年来备受学术界关注,已成为一个研究热点。

3.1 营养成分

枸杞酵素富含多种营养成分,如氨基酸、碳水化合物、维生素和矿物质等。这些成分不仅保留了原料中的营养价值,还为益生菌提供了所需的营养。因此,酵素食品营养丰富。郭红莲等^[35]发现在枸杞自然发酵的过程中 pH 值持续下降并稳定在 3.6~3.9;可滴定酸含量逐渐增加,直至发酵结束时含量达到 8.14%;可溶性固体含量逐步减少,并最终保持在 8.0%~8.5%;总糖含量逐渐减少,还原糖含量先上升后下降,最终均低于 0.5%。马蓉等^[36]发现在黑果枸杞酵素自然发酵中可滴定酸含量从起初的 0.62% 增加到 2.12%。还原糖含量则从最开始的 14.99% 减少至 7.69%,而蔗糖含量也从最初的 6.10% 降低至 0.87%。冀权等^[29]用红茶菌发酵枸杞后测得发酵液中含有 17 种氨基酸,其中必需氨基酸 7 种,以乳酸和柠檬酸为主的不挥发酸 5 种。刘予焯等^[23]发现经罗伊氏乳杆菌发酵的枸杞汁蛋白质含量高,为(599.50±1.53) μg/mL。

3.2 生物酶

经过多种微生物的共同发酵,枸杞中富含大量酶类成分。其中包括 SOD、淀粉酶等重要功效性酶。高庆超等^[37]配比黑果枸杞酵素发现 SOD 活性升高了 22.28%,淀粉酶活性升高了 29.88%。此外,刘爱龙等^[28]发现将鲜枸杞浸泡在白酒中后添加适量的维生素 C 再发酵可有效抑制其内部多酚氧化酶和过氧化物酶的活性,从而降低枸杞鲜果发酵后褐变的风险。

3.3 活性成分

枸杞酵素的生理活性主要归因于其含有多种生物活性成分。这些生物活性成分源于原料的高酸度而释放的化合物,以及微生物群落中水解酶和益生菌产生的化合物^[8],例如酚类、黄酮类以及挥发性香气成分等,具体见表 2。

表 2 枸杞酵素中的活性成分

Table 2 Active ingredient contained in *L. barbarum* enzymes

活性成分	变化趋势	参考文献
酚类化合物	酵母发酵的枸杞酵素中含有 49 种酚类物质,其中 3 种为特有酚类化合物	[38]
	总酚含量增加了 13.76%~28.07%	[39]
	复合发酵酸乳总多酚含量为(143.45±2.34) mg/L,具有高抗氧化活性	[32]
类黄酮	总黄酮含量增加了 55.80%~161.97%	[39]
	复合发酵酸乳总黄酮含量为(93.08±2.24) mg/L,具有高抗氧化活性	[32]
	花青素含量先上升后下降,最终为 163.51 mg/L;原花青素含量逐步下降,最终为 54.90 mg/L	[40]

续表 2 枸杞酵素中的活性成分

Continue table 2 Active ingredient contained in *L. barbarum* enzymes

活性成分	变化趋势	参考文献
挥发性香气成分	自然发酵后检测出了 20 种酯类、9 种醛类、6 种酮类、23 种醇类、3 种酸类、3 种芳香杂环类,使得酵素散发特殊的香气	[35]
	红茶菌发酵后检测出 32 种香气成分,分别为 13 种酯类、5 种挥发酸、5 种醇类、2 种酮类、2 种酚类和 4 种其他类	[29]
	枸杞酸奶发酵后检测出 32 种挥发性物质,其中醛类、酸类、酮类、酯类和萜烯类物质增多	[41]

由表 2 可知,枸杞经过发酵后,不仅保留了枸杞原有的营养成分,还产生了更多的有益物质。此外,枸杞酵素中的挥发性香气成分也更为丰富,在具有更浓郁香气的同时还具有了更强的生理活性。

4 功能特性

酵素食品富含有益的微生物,能产生有利代谢产物,提供丰富的营养成分,并可以减少毒素生成,对人体健康非常有益^[42]。枸杞酵素作为一种多功能物质,在食品、保健品和化妆品等领域广泛应用。它具备抗氧化特性,能清除自由基并预防细胞损伤及缓解衰老过程;同时增强免疫力、促进新陈代谢、改善消化功能以及保护肝脏。此外,枸杞酵素还表现出抗炎作用,在缓解肠炎和胃炎等炎性疾病方面发挥积极作用,降低血脂和血糖并对心血管健康产生正面影响。

4.1 抗氧化作用

当身体受到外部环境、疾病或药物刺激时,会产生反应性氧化剂,即自由基,如果体内自由基过多或没有在适当的时间清除,就会引起细胞膜脂质过氧化,并造成氧化损伤,这种损伤会加速身体的衰老。枸杞酵素中的多酚类、黄酮类和 SOD 等化合物通过中和自由基,可以防止体内细胞膜卵磷脂分子中不饱和脂肪酸的过氧化形成过氧化脂质,从而实现抗氧化效果。

叶春苗等^[15]用生香酵母发酵的酸浆枸杞酵素与未发酵的果酱进行对比,试验结果表明,与未经发酵处理的果酱相比较,经过这一特殊发酵过程的复合果酱,其自由基清除能力显著增强,进而提高了其抗氧化活性。高庆超等^[37]通过研究发现黑果枸杞干果单一酵素在消除 DPPH 自由基、总抗氧化能力和还原力方面展现出显著效果。这是因为该酵素富含花青素、总黄酮、总酚、维生素和有机酸等物质。这些物质的功能受到分子质量、芳香环数量以及羟基取代基等相关特性的影响,尤其会受到有机酸的调控。与此相比,黑果枸杞鲜果复合酵素具备更强大的清除羟基自由基能力。他们

猜测这可能是由于该复合酵素含有丰富的SOD或其他能够高效清除羟基自由基的活性物质。Liu等^[27]发现,发酵过程对枸杞汁的酚类组成产生了改变。经过发酵后,枸杞果汁中苯酚浓度显著提高,并通过DPPH自由基和羟基自由基清除试验表明其抗氧化能力得到了显著增强。此外,该研究还揭示了枸杞酵素的抗氧化能力与游离形式的酚类物质含量密切相关。Zheng等^[43]研究发现乳酸菌发酵显著提升了枸杞-龙眼中总酚类和类黄酮含量,增强了其基于DPPH自由基的抗氧化能力、ABTS⁺自由基清除能力以及铁离子还原水平。Xia等^[44]对新鲜枸杞接种活性干葡萄酒酵母进行发酵,发现发酵后枸杞果醋的抗氧化活性显著高于枸杞果汁,并且在发酵过程中,多糖和多酚类物质与抗氧化活性密切相关。这些研究都表明了枸杞酵素有良好的抗氧化特性。

4.2 抗炎及免疫调节作用

炎症是宿主复杂的防御机制之一,是免疫系统对感染性或非感染性刺激作出的生物反应。导致大多数感染、发炎以及自身免疫性疾病产生的根本原因在于炎症反应和免疫力变化^[45]。已有调查显示,枸杞酵素具备明显抑制发炎特性及调节免疫力的作用。

张瑞雪等^[46]在细胞水平对枸杞发酵液的免疫调节功能进行了深入研究。结果显示,枸杞发酵液显著提高了脾细胞的增殖能力、促进了腹腔巨噬细胞的吞噬作用,并且增加了一氧化氮释放量。由此可以看出,枸杞发酵液具备出色的免疫增强效果。Zhang等^[47]的研究结果显示,发酵枸杞渣能显著影响免疫相关基因的激活。他们用枸杞渣与发酵枸杞渣饲喂绵羊70 d后,抽取血液样本进行检测,发现趋化因子和免疫相关信号通路[如白细胞介素-17信号通路和核苷酸结合寡聚化结构域(nucleotide-binding oligomerization domain, NOD)样受体信号通路]的表达均升高。此外,发酵枸杞渣还对多种与免疫基因激活密切相关的化合物产生了影响。Wei等^[48]用未发酵和发酵黑枸杞汁给小鼠进行胃灌,观察其在预防葡聚糖硫酸钠诱导的溃疡性结肠炎方面的作用。结果显示,两种黑枸杞汁都降低了小鼠血清和结肠中促炎细胞因子水平,并增加了抗炎细胞因子的含量。此外,还减缓了结肠组织的病理改变,提高了结肠中Bcl-2蛋白表达水平,并通过调节小鼠肠道菌群来增加拟杆菌门菌数量、减少幽门螺杆菌数量,而乳酸杆菌发酵则进一步增强了黑枸杞汁的抗炎作用。这些结果表明发酵黑枸杞汁具有抗溃疡性结肠炎的效果。张金兰等^[33]使用脂多糖刺激RAW264.7细胞系构建了炎性细胞模型。他们发现,与未经过发酵处理的对照组相比,乳酸菌发酵枸杞果汁提取物能够显著降低RAW264.7细胞释放的肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-6和一氧化氮含量($P<0.05$),

分别为23.14 ng/mL、450 pg/mL、10.72 μ mol/L。这表明乳酸菌发酵可以增强枸杞果汁的抗炎活性,并通过减少抗炎因子水平来实现其作用。

4.3 护肝及抗疲劳作用

肝脏是人体内最重要的器官之一,不仅负责对血液中有毒物质进行过滤,还参与胆汁的合成以及药物和营养物质的代谢,并承担多种其他生理功能^[49]。枸杞酵素富含活性成分,如维生素、氨基酸和LBP等,在协同作用下既能发挥保护肝脏的功能,又具备抗疲劳效果。

冯琳等^[22]发现用乳杆菌MN1030发酵的宁夏枸杞原浆酵素能降低HepG2细胞的丙二醛含量、减少AST、ALT和LDH泄露率,并提高SOD活力和ADH激活率。这些效应有助于减缓细胞膜脂质过氧化和氧化应激对肝细胞的损害,降低酒精性肝损伤程度,有一定的保肝功效。范亦菲等^[50]用发酵枸杞原浆对急性酒精性肝损伤动物模型进行了实验,研究结果显示,发酵枸杞原浆明显减少小鼠血清中谷丙转氨酶活性和肝脏内脂多糖含量,并提高了肝脏内谷胱甘肽质量摩尔浓度和总抗氧化能力,表明发酵枸杞原浆在乙醇引起的小鼠急性酒精性肝损伤中具有辅助保护作用。这可以作为开发具有解毒保肝特性的枸杞发酵乳制品的依据。

李东红等^[24]的研究发现,小鼠在摄入不同浓度的黑枸杞本草酵素后,抗疲劳能力增强。肝脏中的糖原含量、力竭游泳时间、血液中乳酸和尿素氮浓度均有所改善。结果显示,在喂食黑枸杞本草酵素小鼠的低、中、高剂量组中,肝脏中的糖原含量分别为35.44、60.87、81.13 mg/g,明显高于对照组。此外,随着剂量增加,小鼠体内的肝脏糖原也逐渐增加,并且力竭游泳时间延长;同时血液中乳酸浓度下降了42.98%,尿素氮浓度降低了28.07%。刘喜林^[51]研究发现,百合枸杞的发酵液在灌胃小鼠后能够明显增强其耐力和抗疲劳能力,并且有效降低了运动引起的血尿素氮和乳酸水平。张佳运等^[52]提出,黑枸杞乳酸菌发酵饮料对于长跑运动员的耐力素质具有显著的促进作用。它能够加速运动员体内代谢产物的转化与排泄效率,提高运动员的糖异生能力,增强其清除自由基的能力,调节神经递质水平,从而有效提升运动员的耐力表现。

4.4 其他功能

除上述功能之外,枸杞酵素还有许多其他功能。闵祥博等^[25]发现黑枸杞酵素能够有效缓解脂溢性脱发对小鼠毛发生长的不良影响。他们通过皮下注射丙酮建立了脂溢性脱发小鼠模型,并随后进行了黑枸杞酵素的灌胃实验。研究结果显示,黑枸杞酵素显著促进了小鼠毛发生长速度,增加了毛囊数量和胶原蛋白含量。同时,该实验还观察到黑枸杞酵素能够明显

提高毛囊增殖细胞标记物 Ki67 和毛囊干细胞标记物 Sox9 的阳性表达水平($P<0.05$)。

枸杞酵素在化妆品行业也展示出极大的潜力。赵丹等^[53]利用德氏乳杆菌对枸杞进行发酵,得到了外观黏稠、弱酸性的枸杞发酵液。该发酵液的菌落总数符合化妆品品质标准,并未引起人体皮肤不良反应。此外,体积分数 0.1%~0.000 1% 的枸杞发酵液能够促进成纤维细胞增殖,从而具有延缓衰老的作用。Wang 等^[17]采用热水法和酵母发酵法提取 LBP。结果显示两种 LBP 均具备较强的 DPPH 自由基、羟基自由基和超氧阴离子自由基清除能力,并且表现出全面的抗氧化特性。在正常、氧化应激和热应激条件下,两种 LBP 均可延长秀丽隐杆线虫的寿命,而不影响其生育能力。此外,通过上调 *daf-16*、*sod-3* 和 *hsp-16.2* 基因的表达来延长秀丽隐杆线虫寿命时,酵母发酵法表现更为有效。接着使用凝胶渗透色谱对 LBP 进行了分子量表征,结果显示与传统热水法提取相比,酵母发酵法所得到的 LBP 具有更小且更均匀的分子量。皮肤渗透实验进一步证明了酵母发酵法提取 LBP 优于传统热水法。这些证据共同支持了使用酵母发酵方法提取 LBP,能够获得更佳的抗衰老效果,并使原料更适用于食品和化妆品行业。

在降低血糖方面,枸杞酵素也具有显著的效果。石玉璞等^[31]利用枸杞原浆和刺梨粉作为发酵液的原料,通过发酵获得了具有抑制 α -淀粉酶活性的枸杞刺梨发酵液,其抑制率达到 55.673%,与阿卡波糖在 70 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 浓度下表现出相当的抑制效果。这一结果揭示了该发酵液所含酶能够有效降低血糖水平,并呈现出显著的生物活性。

5 结语与展望

近年来,随着人们对健康越来越重视,枸杞的保健功能以及深加工产业也随之不断发展,并推出了许多创新产品。目前已经研发出多种类型的枸杞产品,包括枸杞饮料、枸杞果酒、枸杞果酱、枸杞酸奶和枸杞酵素等。其中,枸杞酵素不仅满足了消费者的需求,还在功能性食品市场占有巨大的份额。然而,在国内尚未建立相应的品质评价标准之下,对于酵素类食品在成分和功效方面的研究还比较滞后,并且生产工艺和开发技术也需要进一步探索。因此,在这个领域仍然需要进行更深入地研究。在开发过程中,我们应该重点关注确保食品中含有足够数量且能被人体有效吸收利用的有益成分以及其他营养物质。为了实现这个目标,可以采用微囊化、脂质体化和酵素固定化等多种技术手段。另外,在储存、加工和运输过程中要注意产品稳定性问题,并可以通过添加稳定剂、调整 pH 值和温度等措施来防止活性成分流失。此外,在产品开发时

还需要考虑市场需求与竞争情况,并制定适当的营销策略与定位。产品品质与口感也是消费者接受与否的重要因素之一。同时结合益生元与具有抗胃酸特性并促进有益菌生长等特点的益生菌共同使用可能会带来协同作用,例如将具有抗胃酸特性且能促进某些有益菌生长等特点的益生元与益生菌结合使用,有望开发出具备更好功能性效果的复合元组。当前国内外学者已将枸杞酵素中的活性物质应用于多种疾病的防治。但目前所做实验主要集中在动物模型上进行体内外研究,未来还需要进行临床实验以评估其对健康的影响。同时,酵素类产品对肠道微生物影响很大,但目前缺乏枸杞酵素对这方面的相关研究,今后可以从这个方向进行探讨。此外,摄入剂量和摄入时间也是影响其功效因素之一,建议今后研究确定摄入剂量和摄入时间相关性以优化健康效益。

参考文献:

- [1] GAO Y J, WEI Y F, WANG Y Q, et al. *Lycium barbarum*: A traditional Chinese herb and a promising anti-aging agent[J]. *Aging and Disease*, 2017, 8(6): 778-791.
- [2] 王诗雪, 王庆仙, 程肖蕊. 枸杞化学成分及药理作用研究进展[J]. *中国药理学与毒理学杂志*, 2023, 37(S1): 75.
WANG Shixue, WANG Qingxian, CHENG Xiaorui. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Lycium barbarum* L.[J]. *Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology*, 2023, 37(S1): 75.
- [3] WANG H Q, LI J N, TAO W W, et al. *Lycium ruthenicum* studies: Molecular biology, phytochemistry and pharmacology[J]. *Food Chemistry*, 2018, 240: 759-766.
- [4] TIAN Y L, XIA T, QIANG X, et al. Nutrition, bioactive components, and hepatoprotective activity of fruit vinegar produced from Ningxia wolfberry[J]. *Molecules*, 2022, 27(14): 4422.
- [5] ZHOU Z Q, XIAO J, FAN H X, et al. Polyphenols from wolfberry and their bioactivities[J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 644-654.
- [6] LIU H, CUI B, ZHANG Z. Mechanism of glycometabolism regulation by bioactive compounds from the fruits of *Lycium barbarum*: A review[J]. *Food Research International*, 2022, 159: 111408.
- [7] YUN D W, YAN Y M, LIU J. Isolation, structure and biological activity of polysaccharides from the fruits of *Lycium ruthenicum* Murr: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 291: 119618.
- [8] 杨彬彦, 党娅, 尤丽. 蓝莓酵素功能特性研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(23): 328-336.
YANG Binyan, DANG Ya, YOU Li. Research progress on functional characteristics of blueberry Jiaosu[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(23): 328-336.
- [9] FU K L, GAO X, HUA P Y, et al. Anti-obesity effect of *Angelica keiskei* Jiaosu prepared by yeast fermentation on high-fat diet-fed mice[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 9: 1079784.
- [10] HU N, LEI M, ZHAO X L, et al. Analysis of the microbial diversity and characteristics of fermented blueberry beverages from different regions[J]. *Foods*, 2020, 9(11): 1656.
- [11] DAI J, SHA R Y, WANG Z Z, et al. Edible plant Jiaosu: Manufacturing, bioactive compounds, potential health benefits, and safety aspects[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(15): 5313-5323.

- [12] 索婧怡, 朱雨婕, 陈磊, 等. 食用酵素的研究及发展前景分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(19): 271-283.
SUO Jingyi, ZHU Yujie, CHEN Lei, et al. The research and development prospect of edible Jiaosu[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(19): 271-283.
- [13] TANGYU M Z, MULLER J, BOLTEN C J, et al. Fermentation of plant-based milk alternatives for improved flavour and nutritional value[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(23/24): 9263-9275.
- [14] LISZKOWSKA W, BERLOWSKA J. Yeast fermentation at low temperatures: Adaptation to changing environmental conditions and formation of volatile compounds[J]. Molecules, 2021, 26(4): 1035.
- [15] 叶春苗, 李莉峰, 李东华, 等. 生香酵母发酵酸浆枸杞复合果酱工艺优化及抗氧化性研究[J]. 农产品加工, 2022(19): 43-46, 50.
YE Chunmiao, LI Lifeng, LI Donghua, et al. Study on technology optimization and antioxidant activity of *Lycium barbarum* compound jam fermented by aroma producing yeast[J]. Farm Products Processing, 2022(19): 43-46, 50.
- [16] PENG J J, WANG L, WANG M G, et al. Yeast synthetic biology for the production of *Lycium barbarum* polysaccharides[J]. Molecules, 2021, 26(6): 1641.
- [17] WANG Z W, SUN Q R, FANG J X, et al. The anti-aging activity of *Lycium barbarum* polysaccharide extracted by yeast fermentation: *In vivo* and *in vitro* studies[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 2032-2041.
- [18] PANNERCHELVAN S, RIOS-SOLIS L, FAIZAL WONG F W, et al. Strategies for improvement of gamma-aminobutyric acid (GABA) biosynthesis via lactic acid bacteria (LAB) fermentation[J]. Food & Function, 2023, 14(9): 3929-3948.
- [19] GARBACZ K. Anticancer activity of lactic acid bacteria[J]. Seminars in Cancer Biology, 2022, 86: 356-366.
- [20] HARPER A R, DOBSON R C J, MORRIS V K, et al. Fermentation of plant-based dairy alternatives by lactic acid bacteria[J]. Microbial Biotechnology, 2022, 15(5): 1404-1421.
- [21] 居子瑄, 王文琼, 钱易, 等. 乳酸菌发酵胡萝卜工艺与人类健康研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 333-339.
JU Zixuan, WANG Wenqiong, QIAN Yi, et al. Progress of lactic acid bacteria fermentation carrot process and human health research[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 333-339.
- [22] 冯琳, 常明, 唐年初. 不同菌种发酵枸杞酵素对酒精性肝损伤的保护作用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(17): 98-104.
FENG Lin, CHANG Ming, TANG Nianchu. Protective effects on alcoholic liver injury by fermented *Lycium barbarum* juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(17): 98-104.
- [23] 刘予焯, 程焕, 叶兴乾, 等. 不同菌株发酵枸杞汁中生物活性物质与香气组成物质含量变化[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(3): 499-509.
LIU Yuxuan, CHENG Huan, YE Xingqian, et al. Changes of bioactive compounds and volatile compounds contents in goji juice fermented by different probiotics[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(3): 499-509.
- [24] 李东红, 李雪龙, 李晶, 等. 黑枸杞本草酵素的制备及功能研究[J]. 食品工业, 2022, 43(8): 63-68.
LI Donghong, LI Xuelong, LI Jing, et al. Study on preparation and function of *Lycium barbarum* benzyme[J]. The Food Industry, 2022, 43(8): 63-68.
- [25] 闵祥博, 李丽娜, 余萍, 等. 黑枸杞本草酵素缓解小鼠脂溢性脱发作用[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 41-47.
MIN Xiangbou, LI Lina, YU Ping, et al. Alleviation of black wolf-
- berry ferment on seborrheic alopecia in mice[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 41-47.
- [26] 王娜, 樊秋霞, 袁亚宏, 等. 雪莲菌发酵提高枸杞原浆甜菜碱含量的工艺优化及品质分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(2): 72-80.
WANG Na, FAN Qiuxia, YUAN Yahong, et al. Process optimization and quality analysis to increase the betaine content of wolfberry pulp through fermentation[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(2): 72-80.
- [27] LIU Y X, CHENG H, LIU H Y, et al. Fermentation by multiple bacterial strains improves the production of bioactive compounds and antioxidant activity of goji juice[J]. Molecules, 2019, 24(19): 3519.
- [28] 刘爱龙, 赵智慧, 董建方, 等. 白酒浸泡鲜枸杞发酵工艺对枸杞酶促褐变的影响研究[J]. 酿酒, 2023, 50(5): 72-77.
LIU Ailong, ZHAO Zhihui, DONG Jianfang, et al. Effect of fermentation process of fresh *Lycium barbarum* L. soaked in liquor on enzymatic browning of *Lycium barbarum* L.[J]. Liquor Making, 2023, 50(5): 72-77.
- [29] 冀权, 罗正勇, 勉海荣, 等. 红茶菌发酵枸杞果醋饮料工艺研究与品质分析[J]. 饮料工业, 2023, 26(5): 41-48.
JI Quan, LUO Zhengyong, MIAN Hairong, et al. Optimize the process of fermented goji vinegar with kombucha and conduct quality analysis[J]. Beverage Industry, 2023, 26(5): 41-48.
- [30] 孟芳, 兰亚杰, 冀权, 等. 响应面法优化枸杞果醋醋酸发酵工艺[J]. 中国酿造, 2023, 42(6): 218-224.
MENG Fang, LAN Yajie, JI Quan, et al. Optimization of acetic acid fermentation process of *Lycium barbarum* vinegar by response surface methodology[J]. China Brewing, 2023, 42(6): 218-224.
- [31] 石玉璞, 牛思思, 韩璐瑶, 等. 枸杞刺梨复合饮料的工艺优化及其降血糖性能[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(18): 149-157.
SHI Yupu, NIU Sisi, HAN Luyao, et al. Process optimization and hypoglycemic performance of *Lycium barbarum* and Roxburgh rose compound beverage[J]. Food Research and Development, 2023, 44(18): 149-157.
- [32] 解蕙铭. 紫山药黑枸杞复合酸乳发酵工艺优化及体外模拟胃肠消化的研究[J]. 食品科技, 2023, 48(5): 97-106.
XIE Huiming. Optimization of fermentation technology of purple yam and black wolfberry compound yoghurt and simulation of gastrointestinal digestion *in vitro*[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(5): 97-106.
- [33] 张金兰, 魏巍, 杨云, 等. 乳酸菌发酵对枸杞果汁体外抗氧化和抗炎活性的影响[J]. 中国酿造, 2023, 42(2): 76-82.
ZHANG Jinlan, WEI Wei, YANG Yun, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation on antioxidant and anti-inflammatory activities *in vitro* of Goji berry juice[J]. China Brewing, 2023, 42(2): 76-82.
- [34] 许引虎, 谢再斌, 杨萌, 等. 枸杞果酒酿造工艺的研究进展[J]. 酿酒科技, 2023(1): 117-122.
XU Yinhu, XIE Zaibin, YANG Meng, et al. Research progress in the production technology of wolfberry wine[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(1): 117-122.
- [35] 郭红莲, 邢紫娟, 余巧银, 等. 天然枸杞酵素发酵的代谢产物分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(5): 48-55.
GUO Honglian, XING Zijuan, YU Qiaoyin, et al. Analysis of metabolites produced by ferment of natural *Lycium barbarum* L. [J]. Food Research and Development, 2018, 39(5): 48-55.
- [36] 马蓉, 高庆超, 常应九, 等. 黑果枸杞酵素发酵过程中理化成分变化及微生物类型分析[J]. 食品科技, 2019, 44(9): 30-37.
MA Rong, GAO Qingchao, CHANG Yingjiu, et al. The changes of physicochemical components and the analysis of microbial types during fermentation of *Lycium ruthenicum* Murr. enzymes[J]. Food

- Science and Technology, 2019, 44(9): 30-37.
- [37] 高庆超, 常应九, 马蓉, 等. 黑果枸杞酵素发酵前后主要成分分析及其体外抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 275-283.
GAO Qingchao, CHANG Yingjiu, MA Rong, et al. Analysis of main components and antioxidant activity *in vitro* for *Lycium ruthenicum* Murr. Jiaosu before and after fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(5): 275-283.
- [38] 周婷, 田晓菊, 周桂珍, 等. 基于超高效液相色谱-离子阱-静电场轨道阱质谱的代谢组学方法分析枸杞酒发酵前后酚类物质的变化[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(21): 262-268.
ZHOU Ting, TIAN Xiaojun, ZHOU Guizhen, et al. Changes of phenolic substances in fermented *Lycium barbarum* wine analyzed by UPLC-LTQ-Orbitrap-MS[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(21): 262-268.
- [39] 黄宁馨, 丁士勇, 刘睿, 等. 主成分分析法优选枸杞乳酸菌发酵饮品发酵剂[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 286-292.
HUANG Ningxin, DING Shiyong, LIU Rui, et al. Optimizing lactic acid bacteria starter culture for wolfberry juice fermentation using principal component analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 286-292.
- [40] 衡洋洋, 周志磊, 陈超, 等. 黑果枸杞乳酸菌发酵饮料生产工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(15): 114-121.
HENG Yangyang, ZHOU Zhilei, CHEN Chao, et al. Production process of *Lycium ruthenicum* Murr. beverage fermented with lactic acid bacteria[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(15): 114-121.
- [41] 罗叶名, 傅虹飞, 索朗嘉措, 等. 枸杞酸奶的制备、质构品质和风味物质分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 249-261.
LUO Yeming, FU Hongfei, SUOLANG Jiacao, et al. Preparation and analyses of textural quality and flavor substances of goji berry yoghurt[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 249-261.
- [42] DIMIDI E, COX S R, ROSSI M, et al. Fermented foods: Definitions and characteristics, impact on the gut microbiota and effects on gastrointestinal health and disease[J]. Nutrients, 2019, 11(8): 1806.
- [43] ZHENG Z J, WEI L Y, ZHU M L, et al. Effect of lactic acid bacteria co-fermentation on antioxidant activity and metabolomic profiles of a juice made from wolfberry and Longan[J]. Food Research International, 2023, 174: 113547.
- [44] XIA T, QIANG X, GENG B B, et al. Changes in the phytochemical and bioactive compounds and the antioxidant properties of wolfberry during vinegar fermentation processes[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(24): 15839.
- [45] 欧阳竞锋, 吴秋瑾, 徐兴利, 等. 虾青素抗炎及免疫调节作用的研究述评[J]. 中国医药指南, 2020, 18(18): 32-34.
OUYANG Jingfeng, WU Qiujin, XU Xingli, et al. Astaxanthin has the biological activities about immunomodulation and anti-inflammation[J]. Guide of China Medicine, 2020, 18(18): 32-34.
- [46] 张瑞雪, 崔欣悦, 马勇, 等. 枸杞发酵液抗氧化和免疫调节作用研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(10): 55-60.
ZHANG Ruixue, CUI Xinyue, MA Yong, et al. Effects of *Lycium chinense* Mill fermentation liquid on antioxidant activity and immunoregulation[J]. Food Research and Development, 2019, 40(10): 55-60.
- [47] ZHANG Y J, GUO Y S, LUO Y L, et al. Integrated metabolomics and transcriptome revealed the effect of fermented *Lycium barbarum* residue promoting *Ovis aries* immunity[J]. Frontiers in Immunology, 2022, 13: 889436.
- [48] WEI R L, ZHU C, CHEN S, et al. Preventive therapeutic effect of *Lactobacillus*-fermented black wolfberry juice on sodium dextran sulfate-induced ulcerative colitis in mice[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(7): 3102-3118.
- [49] 李川, 吴云冲, 杨颜颜, 等. 内质网应激在肝脏疾病中的研究进展[J]. 中国全科医学, 2024, 27(21): 2679-2684.
LI Chuan, WU Yunchong, YANG Yanyan, et al. Advances in endoplasmic reticulum stress in liver diseases[J]. Chinese General Practice, 2024, 27(21): 2679-2684.
- [50] 范亦菲, 郭琳, 靳文会, 等. 枸杞酸奶体外抗氧化活性和保肝功能研究[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(4): 25-30.
FAN Yifei, GUO Lin, JIN Wenhui, et al. Study on antioxidant activity *in vitro* and hepatoprotective function of *Lycium barbarum* yogurt[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(4): 25-30.
- [51] 刘喜林. 百合枸杞发酵液抗运动疲劳作用的研究[J]. 食品科技, 2017, 42(1): 107-110.
LIU Xilin. Effect on anti-exercise-fatigue of lily wolfberry fermented liquid[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(1): 107-110.
- [52] 张佳运, 孙哲. 黑枸杞乳酸菌发酵饮料对长跑运动员耐力素质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(5): 231-232.
ZHANG Jiayun, SUN Zhe. Effect of *Lycium barbarum* fermented beverage with lactic acid bacteria on endurance quality of long-distance runners[J]. Food Research and Development, 2023, 44(5): 231-232.
- [53] 赵丹, 李萌, 苏宁, 等. 枸杞发酵液的抗衰老活性和皮肤安全性研究[J]. 日用化学品科学, 2016, 39(6): 24-27, 37.
ZHAO Dan, LI Meng, SU Ning, et al. Evaluation of anti-aging activity and skin safety of fermented *Lycium barbarum*[J]. Detergent & Cosmetics, 2016, 39(6): 24-27, 37.

加工编辑:张岩蔚
收稿日期:2023-12-21