

山核桃主要营养活性成分及其保健功能研究进展

高军龙¹ 王春晓¹ 高 飞² 何 侃¹ 金 超¹ 吴伟杰³ 邓杨勇¹

(1. 杭州姚生记食品有限公司, 浙江 杭州 311322; 2. 浙江农林大学食品与健康学院, 浙江 杭州 311300;
3. 浙江省农业科学院食品科学研究所, 浙江 杭州 310021)

摘要: 山核桃是一种生长在特定自然环境中的无公害、无污染的天然绿色野生坚果类食品, 因其独特的香脆疏松口感、丰富的营养价值以及对人体健康的多重益处, 深受人们的喜爱。文章综合分析了山核桃的主要营养活性成分, 包括蛋白质及氨基酸、脂肪及脂肪酸、维生素、矿物质、膳食纤维、多酚、角鲨烯、植物甾醇等成分, 并与常见坚果类产品进行对比, 阐明了山核桃中主要营养活性成分的含量水平。同时重点探讨了山核桃在神经系统调控、心血管系统调控、抗氧化、肝脏和肠道调控等方面的生物活性及其研究进展, 并对山核桃营养活性成分的利用趋势进行了综述。

关键词: 山核桃; 坚果; 营养活性成分; 保健功能; 生物活性

Research progress on the main nutritional active components and health functions of hickory

GAO Junlong¹ WANG Chunxiao¹ GAO Fei² HE Kan¹ JIN Chao¹ WU Weijie³ DENG Yangyong¹

(1. Hangzhou Yaoshengji Food Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311322, China;
2. College of Food and Health, Zhejiang A & F University, Hangzhou, Zhejiang 311300, China;
3. Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310021, China)

Abstract: Hickory is a natural, pollution-free wild nut that grows in specific natural environments. It is highly favored by consumers for its uniquely crisp and fluffy texture, rich nutritional value, and multiple health benefits. This article provides a comprehensive analysis of the main nutritional and bioactive components of hickory, including proteins and amino acids, fats and fatty acids, vitamins, minerals, dietary fiber, polyphenols, squalene, and phytosterols. These components are compared with those of commonly consumed nut products to clarify the content levels of the primary bioactive nutrients in hickory. It also focuses on the bioactivities and recent research progress related to hickory in areas such as nervous system regulation, cardiovascular regulation, antioxidant activity, as well as liver and intestinal modulation. Finally, it reviews the current trends in the utilization of hickory's nutritional and bioactive components.

Keywords: hickory; nut; nutritional active ingredients; health functions; biological activity

山核桃(*Carya cathayensis* Sarg.), 又称小核桃、小胡桃、核桃揪, 系胡桃科山核桃属。山核桃属在全世界共有 18 个种, 其中包括 3 个亚种, 主要分布在北美东部及亚洲东南部^[1]。山核桃是中国重要的珍稀干果和木本油料作物, 已有 500 多年的栽种历史, 适宜生长于海拔 400~1 200 m, 气候条件优越, 疏松而富含腐殖质的石灰岩风化而成的砾质土壤且植被茂盛的自然环境中。在中国, 山核桃的主要

产地集中在浙、皖两省交界的天目山系, 尤其是浙江的临安、淳安、桐庐以及安徽的宁国、绩溪等地, 这些地区以其得天独厚的自然条件, 成为了山核桃的主要产区^[2]。

山核桃因其极高的营养价值和独特的口感风味, 成为众多消费者在追求健康生活方式时的高档坚果。目前, 有关山核桃的深加工利用越来越广泛, 包括开发山核桃油、制备山核桃蛋白以及作为糕点、饮料等食品配料,

基金项目: 杭州市农业和社会发展的重点项目(编号: 20231203A03)

通信作者: 邓杨勇(1979—), 男, 杭州姚生记食品有限公司高级工程师。E-mail: dengyy@yaoshengji.cn

收稿日期: 2025-01-18 **改回日期:** 2025-08-01

引用格式: 高军龙, 王春晓, 高飞, 等. 山核桃主要营养活性成分及其保健功能研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 218-226.

Citation: GAO Junlong, WANG Chunxiao, GAO Fei, et al. Research progress on the main nutritional active components and health functions of hickory[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 218-226.

呈现出多元化、健康化和高附加值化的趋势。其中山核桃油是山核桃深加工的主打产品,一直是国内外研究的热点,山核桃乳、山核桃坚果能量棒等健康营养食品市场潜力大,而山核桃蛋白及山核桃粕为附加产品,简单加工后可以应用于肥料及饲料工业^[3]。山核桃在神经系统调控、心血管系统调控、抗氧化等方面有一定的作用。目前,有关山核桃的相关文献已突破2 000篇,近10年的研究成果占其总量的85%以上。其中关于营养成分及保健功能的文献仅占山核桃总文献的30%~40%,而山核桃与其他坚果的对比分析仅占10%~15%。此外,多数研究仅对比了蛋白质、脂肪、碳水化合物等基础成分,对多酚类、植物甾醇等微量营养素及保健功能或生物利用度的深入研究不足,缺少较为全面的量化分析。文章拟对山核桃的宏量营养素到微量营养素以及生物活性物质进行系统综述,同时与其他坚果进行对比,明确山核桃的优势营养素及含量水平。此外,借助纳米技术、计算机辅助药物设计和合成生物学等新型技术分析山核桃营养成分的利用趋势,旨在进一步促进山核桃产品的深加工和扩展应用,为相关产业创新发展提供依据。

1 山核桃的主要营养活性成分

1.1 蛋白质及氨基酸

山核桃是一种营养价值较高的坚果类食品,蛋白质和氨基酸是其主要营养成分之一,对于人体健康至关重要。刘力等^[4]对浙江临安、淳安、安吉三地的山核桃种仁粗蛋白含量进行了测定,发现不同地区和品种间山核桃的蛋白质含量存在差异,其中临安、淳安和安吉山核桃中粗蛋白含量分别为110.0,108.5,124.8 mg/g,三者平均值为113.0 mg/g。赵玉顺^[5]对比了山核桃与腰果、栗子、杏仁、榛子、松子5种坚果的蛋白质含量,发现山核桃蛋白质含量仅高于栗子,含量相对偏低。由表1可知,山核桃蛋白质总含量为11.3 g/100 g,与其他坚果相比蛋白质含量相对较低,但其含有17种氨基酸,包括8种必需氨基酸,且必需氨基酸占氨基酸总量的33.8%,仅次于香榧,参照1973年联合国粮农组织提供的理想蛋白模式^[6],山核桃的氨基酸构成均衡且合理。坚果类食物中蛋白质含量通常为7.5%~28.0%^[7],虽然山核桃中蛋白质含量不高,但其氨基酸种类丰富,比例均衡,是良好的蛋白质来源。

表1 常见坚果类产品蛋白质及氨基酸含量[†]

Table 1 Protein and amino acid content of common nut products							mg/100 g
项目	核桃	山核桃 ^[4]	香榧	腰果	松子	榛子 ^[9]	杏仁 ^[9]
蛋白质总量	17.9	11.3	12.4	24.0	12.9	13.6	16.9
异亮氨酸*	650	444	660	940	440	460	640
亮氨酸*	1 400	882	830	1 740	740	1 100	1 440
赖氨酸*	500	539	670	1 050	350	490	630
蛋氨酸*	270	80	200	410	140	200	140
苏氨酸*	120	589	520	830	380	150	200
色氨酸*	260	130	100	270	90	150	260
缬氨酸*	930	574	840	1 270	450	760	930
苯丙氨酸*	810	765	630	1 130	530	660	970
胱氨酸	230	269	250	350	40	220	220
酪氨酸	600	555	540	740	500	500	590
精氨酸	3 410	1 773	850	2 590	1 470	2 540	2 160
组氨酸	460	903	250	470	220	360	450
丙氨酸	700	633	580	1 200	560	510	800
天冬氨酸	1 510	824	1 250	2 270	1 000	1 390	2 150
谷氨酸	4 060	857	1 510	5 160	1 840	3 780	5 240
甘氨酸	840	857	530	1020	530	650	1 060
脯氨酸	120	565	580	840	570	120	290
丝氨酸	660	607	720	1220	600	360	660
氨基酸总量	17 530	11 846	11 510	23 500	10 450	14 400	18 830
必需氨基酸	4 940	4 003	4 450	7 640	3 120	3 970	5 210
必需氨基酸/总氨基酸/%	28.2	33.8	38.7	32.5	29.9	27.6	27.7

† 除有文献标注之外的数据来源于文献^[8]¹⁶⁰⁻¹⁶³; *为必需氨基酸。

1.2 脂肪及脂肪酸

山核桃属于油性坚果,具有较高的脂肪含量,可达到64.5%,与夏威夷果和纸皮核桃含量相当^[10]。高军龙等^[11]研究发现,山核桃油中共含有12种脂肪酸,包括6种饱和脂肪酸和6种不饱和脂肪酸,其中油酸含量最高,其次为亚油酸和 α -亚麻酸。何国庆等^[12]研究发现,山核桃仁中主要脂肪酸为油酸、亚油酸和棕榈酸,三者占脂肪酸总量的92.33%~97.50%。由表2可知,山核桃与其他坚果相比脂肪总含量偏高,但其脂肪酸组成主要为不饱和脂肪酸,占比高达93.5%,在常见坚果中含量位居第一,而饱和脂肪酸只占6.5%。不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸比例越高,其营养价值也越丰富,有助于降低人体血浆中的胆固醇水平^[13]。因此,山核桃是一种有益脂肪酸含量高且脂肪酸组成较为合理的优质食品。

1.3 矿物质元素

由表3可知,山核桃中富含多种矿物质元素,包括钙、磷、钾、镁、铁、锌、硒和锰等,其中含量最高的为磷,可达

279.0 mg/100 g,其次是钙、镁,分别为132.0、130.0 mg/100 g。李新委等^[14]测出的山核桃仁中钙、铁、锌、锰含量与表3中数据基本一致。与其他坚果相比,山核桃中锰、锌含量较高,铁含量次之,钙、磷、镁含量居中。钙、铁和锌是儿童和青少年成长发育过程中不可或缺的营养元素,对其骨骼健康、血液形成以及细胞功能极其重要,表明山核桃可作为良好的钙、铁、锌补充食品来源。

1.4 维生素

山核桃中含有丰富的维生素,每100 g山核桃中含维生素A 23.00 mg、维生素E 14.75 mg、维生素B₁ 0.11 mg、维生素B₂ 0.07 mg、维生素B₆ 0.07 mg、烟酸0.83 mg、叶酸69.80 μ g^[15],其中含量最高的是维生素A,其次是维生素E。Alasalvar等^[16]综述了常见的10种坚果(杏仁、巴西坚果、腰果、板栗、榛子、澳洲坚果、山核桃、松子、开心果、核桃)中维生素E含量,发现山核桃中维生素E含量处于中等水平。维生素A也称视黄醇,作为脂溶性维生素的一种,不仅有助于降低夜盲症和视力下降的风险,还能支

表2 常见坚果类产品脂肪及脂肪酸含量[†]
Table 2 Fat and fatty acid content of common nut products

项目	单位	核桃 ^[9]	山核桃	开心果	香榧	腰果	松子 ^[10]	榛子 ^[9]	杏仁
脂肪总量	g/100 g	56.7	64.5	53.0	57.0	50.9	57.4	56.4	58.4
总脂肪酸	g/100 g	56.5	61.7	50.7	54.5	48.7	77.7	56.7	55.8
饱和脂肪酸	g/100 g	5.1	4.0	8.0	4.9	10.6	7.2	4.1	6.6
饱和脂肪酸占比	%	9.1	6.5	15.8	9.0	21.8	9.2	7.2	11.9
单不饱和脂肪酸	g/100 g	8.9	44.8	33.8	18.1	28.1	25.0	44.7	36.2
单不饱和脂肪酸占比	%	15.7	72.6	66.7	33.3	57.8	32.2	78.8	64.8
多不饱和脂肪酸	g/100 g	42.5	12.9	8.9	26.9	9.1	45.6	7.9	13.2
多不饱和脂肪酸占比	%	75.2	20.9	17.5	49.4	20.4	58.7	13.9	23.6
总不饱和脂肪酸	g/100 g	51.4	57.7	42.7	45.0	37.2	70.6	52.6	49.4
总不饱和脂肪酸占比	%	91.0	93.5	84.2	82.7	78.2	90.8	92.7	88.4

[†] 除有文献标注之外的数据来源于文献[8]¹⁸⁰⁻¹⁸¹。

表3 常见坚果类产品矿物质元素含量[†]
Table 3 Mineral content of common nut products

矿物质	核桃	山核桃	开心果	香榧	腰果 ^[9]	松子	榛子 ^[7]	杏仁 ^[7]
钙	56.0	132.0	108.0	83.0	47.6	14.0	86.0	174.0
磷	294.0	279.0	468.0	248.0	559.0	453.0	336.0	341.0
钾	385.0	4.0	735.0	664.0	886.0	1 007.0	807.0	693.0
镁	131.0	130.0	118.0	291.0	287.0	272.0	168.0	277.0
铁	2.7	6.0	4.4	1.8	5.9	3.9	4.2	5.3
锌	2.2	7.1	3.1	2.0	5.5	4.3	2.2	3.7
硒	4.6	1.2	6.5	1.5	15.0	0.6	1.1	1.7
铜	1.2	1.3	0.8	0.4	2.4	1.0	1.4	1.4
锰	3.4	11.4	1.7	0.7	1.8	1.4	2.9	2.5

[†] 除有文献标注之外的数据来源于文献[8]¹¹⁶⁻¹¹⁹。

持正常的生长发育过程^[17]。维生素E也是一种脂溶性维生素,主要由生育酚和三烯生育酚构成。生育酚是人体内对抗活性氧(ROS)的天然抗氧化剂,对维护健康具有积极作用,并有助于预防慢性疾病的发生^[18]。山核桃仁中含有的生育酚主要以 γ -生育酚形式存在,其在总生育酚中所占比例高达90%以上^[19]。由此可见,山核桃是多种维生素的良好来源,非常适合作为健康食品的原料,用于保健功能产品的开发。

1.5 其他营养活性成分

山核桃中除含有大量常见营养成分外,还含有丰富的多酚、膳食纤维、角鲨烯、植物甾醇等重要活性物质。山核桃中的多酚类物质主要分为单体和聚合体两大类,可进一步细分为黄酮类、酚酸类、芪类或二苯乙烯类、木酚素类等,均为苯基丙氨酸和酪氨酸衍生物的代表^[20]。目前已从山核桃中鉴定出67种酚类代谢物,包括36种单宁、22种类黄酮和9种酚酸^[21]。赵玉顺^[5]测得山核桃中多酚总量占0.86%~2.90%,房祥军等^[22]测得山核桃仁中总多酚含量为4.71%。由表4可知,几种坚果中山核桃多酚含量较高,仅次于核桃和开心果,含量高达

777.6 mg/100 g。多酚具有较强的抗氧化性和清除自由基能力。膳食纤维被称为“第七类营养素”,其摄入有助于控制血糖和血脂水平,同时能够预防和治疗多种胃肠道疾病^[23]。山核桃中膳食纤维含量占7.1%~7.7%。山核桃中膳食纤维含量远高于其他几种坚果,高达20.2 g/100 g。

由表4可知,山核桃角鲨烯和植物甾醇含量在几种坚果中含量偏高。高军龙等^[11]测得山核桃油中角鲨烯含量为162.3 mg/kg。卢红伶等^[24]通过冷压榨法提取山核桃油,测得其角鲨烯含量为207.1 mg/kg。角鲨烯是一种萜类物质,其分子结构由6个异戊二烯单元组成,广泛存在于动物、植物和微生物体中,具有多种生物活性,因而被广泛应用于医药、食品工业以及畜牧业等多个领域^[25]。坚果中植物甾醇含量普遍较高,韩军花等^[26]测得山核桃中植物甾醇含量为189.3 mg/100 g;杨佳佳^[19]测得大别山山核桃仁中总植物甾醇含量为132 mg/100 g,其中 β -谷甾醇是山核桃仁中含量最高的甾醇,可达109 mg/100 g。植物甾醇作为甾族化合物的一员,其分子结构与胆固醇极为接近,不仅以不同种类的游离固醇形式存在,还以共轭物形式存在,具有抗氧化、护肝、降低胆固醇等作用^[27]。

表4 常见坚果类产品主要活性物质含量^{[7-9,25,28-29]†}

Table 4 Main bioactive substance content of common nut products

活性物质	单位	核桃	山核桃	开心果	香榧	腰果	松子	榛子	杏仁
总多酚	mg/100 g	1 252.1	777.6	981.0	606.4	280.0	99.9	326.4	39.2
角鲨烯	mg/100 g	21.8	10.6	—	1.6	5.2	—	22.6	11.1
植物甾醇	mg/100 g	307.0	189.3	481.7	175.0	156.9	244.9	173.8	154.7
膳食纤维	g/100 g	9.5	20.2	8.2	11.7	10.5	4.9	8.8	10.3

† “—”代表未检测。

2 山核桃的主要保健功能

2.1 对神经系统的调控作用

山核桃中丰富的脂质成分,对神经系统的发育、功能维持及认知能力提升具有显著益处(见图1)。Gao等^[30]揭示了山核桃脂提取物可促进SH-SY5Y细胞的突触生长。吴建峰^[31]研究发现,单一的亚麻酸、亚油酸和油酸对SH-SY5Y细胞突触生长无明显促进作用,而将这些脂肪酸以特定比例混合后,其神经营养活性相比单独的脂肪酸更为显著。同时也表明了新鲜山核桃果实中的3种脂肪酸实际含量比例接近最优。王鸿飞等^[32]研究证明,食用山核桃油可显著提升小鼠的记忆能力,并增强学习能力。Zamroziewicz等^[33]发现来自坚果等食物中的单不饱和脂肪酸与普遍智力水平存在一定的联系。由此可见,山核桃中丰富的脂肪酸含量和优质的脂肪酸组成,对神经系统的调控和大脑发育具有明显益处,甚至可以延长寿命。Liu等^[34]研究发现,每周摄入超过140 g核桃的个体,在60岁时的预期寿命有所延长,女性平均增加1.30岁,男性

平均增加1.26岁。此外,杜倩等^[35]研究发现,核桃肽在幼年小鼠中具有提升学习与空间记忆能力的潜力,同时在主动回避和被动回避反应上有所增强。综上,山核桃独特的脂质组成和神经活性成分,已成为补脑益智保健品开发的理想原料。相关研究成果已推动多项专利技术的诞生,并在功能食品、膳食补充剂及医药领域实现产业化应用。

2.2 对心血管系统的调控作用

山核桃中富含的不饱和脂肪酸,特别是油酸、亚油酸和亚麻酸,对心血管具有保护作用^[36]。李晴^[37]通过体外

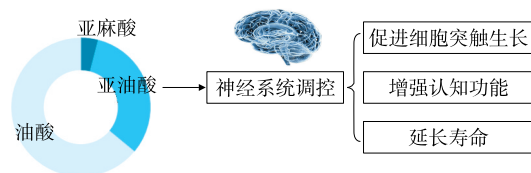


图1 山核桃不饱和脂肪酸对神经系统调控作用

Figure 1 Regulatory effect of unsaturated fatty acids in hickory on the nervous system

HepG2 细胞培养和体内 ICR 小鼠高血脂症模型发现,山核桃油中不饱和脂肪酸可降低低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-C) 水平,促进脂质代谢的改善,并对降低血脂水平有积极作用。山核桃中还含有较高的 ω -3: ω -6 比例,是降低心血管疾病风险的理想比例,有助于避免血管炎症,改善血管内皮功能^[38-39]。此外,适量食用富含不饱和脂肪酸的坚果有助于促进血糖水平的稳定,减少胰岛素抵抗和降低患 2 型糖尿病的风险^[40]。杨佳佳^[19]在构建高糖高脂诱导的大鼠代谢综合征模型的基础上,探究了浙江和美国山核桃仁对大鼠代谢综合征的营养干预效果,结果表明山核桃仁能有效调节大鼠的血糖和血脂水平,显示出对代谢综合征症状的改善作用。参考奇亚籽油凝固型酸奶具有降血脂的功效^[41],同样富含不饱和脂肪酸的山核桃油也适合与其他食品基质复配制备功能性食品,发挥其营养保健价值。山核桃不饱和脂肪酸对心血管系统的调控作用机理如图 2 所示。



图 2 山核桃不饱和脂肪酸对心血管系统调控作用机理
Figure 2 Regulatory mechanism of unsaturated fatty acids in hickory on the cardiovascular system

2.3 抗氧化作用

山核桃是天然抗氧化剂的良好来源,其作用机制如图 3 所示。俞憬等^[42]研究表明,山核桃仁多酚的 FRAP、DPPH 自由基清除率和 ABTS 自由基清除率分别为 108.94, 184.71, 175.92 $\mu\text{mol Trolox/g}$,说明山核桃仁多酚抗氧化作用显著。除可食的山核桃仁具有抗氧化功能外,山核桃内果皮浸提液也富含多酚、黄酮等成分,可延缓油脂氧化,延长其保质期^[43]。基于此,对山核桃内果皮进行回收提取,将回收到的多酚等抗氧化成分用于制作护肤品和化妆品,可满足消费者对天然、健康、环保产品的需求,同时提高山核桃产品的综合利用程度。朱亚新^[44]从山核桃废弃物中提取核桃多酚制备的淡斑乳液化妆品具有较强的抑制黑色素生成和清除自由基的作用。慈傲特^[45]提取了山核桃粕蛋白,经分离纯化合成的新型抗氧化肽 LAYLQYTDFETR 有较强的羟自由基、DPPH 自

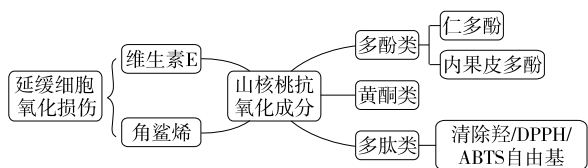


图 3 山核桃抗氧化成分作用机制

Figure 3 Mechanism of antioxidant components in hickory

由基和 ABTS 自由基清除能力。山核桃中的维生素 E 和角鲨烯也可抵御自由基对细胞造成的氧化损害,有助于延缓衰老^[46-47]。

2.4 对肝脏、肠道的调控作用

山核桃及其衍生物具有显著的器官保护作用,其作用机制如图 4 所示。山核桃壳水提取物可防止乙醇对大鼠肝脏的有害影响,山核桃油通过抗脂质过氧化能有效缓解由四氯化碳引起的肝脏损伤^[48-49]。Nakanishi 等^[50]研究表明,富含核桃的饮食可以改变结肠的整体代谢状态,使其能够抵抗右旋糖酐硫酸钠引起的损伤的溃疡形成作用,这可能与核桃中富含的纤维和酚类抗氧化剂有关。山核桃的多酚提取物还可以改变小鼠肠道微生物群的组成和功能,增加微生物的丰度^[51]。此外,食用山核桃油因其丰富的脂肪酸成分还具有润肠等功效^[52]。山核桃油通过低温冷榨工艺可保留更高含量的营养成分,其抗氧化能力显著优于高温精炼油^[53],而山核桃壳多酚通过超声辅助提取比传统醇提法效率更高^[54]。

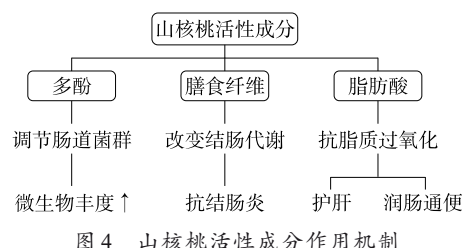


图 4 山核桃活性成分作用机制
Figure 4 Mechanism of active ingredients in hickory

2.5 其他保健功能

除上述功能外,山核桃在抗菌、提高免疫力、加强心肌功能及滋润补气等方面的生物活性也有一些研究报道。然而,这些领域的研究相对较少,相关的作用机理尚不明确,需要进一步深入研究。赵定华^[55]研究发现,山核桃内果皮各萃取物在抑制细菌生长方面的效果优于真菌,且对金黄色葡萄球菌的抑菌效果较好,其中乙酸乙酯提取物对金黄色葡萄球菌的抑菌效果最显著。王鲁黔^[56]研究表明,山核桃多肽能够显著促进淋巴细胞的增殖。山核桃具有加强心肌功能作用,其富含的锌和锰元素是构成脑垂体、胰腺及性腺等内分泌腺体的关键物质,对心肌功能的增强起到了重要作用^[15]。此外,山核桃还具有滋润、补气、养血、化痰平喘的功效^[57]。

3 山核桃营养活性成分的利用趋势

3.1 基于纳米技术的山核桃活性物质应用

纳米技术催生了纳米农药、纳米载体和纳米材料等前沿技术和产品的涌现。该技术成功运用于多个领域,如活性成分物性稳态、靶向递送等^[58-59]。油脂是包括山核桃在内的许多坚果的重要功能成分,而纳米技术已被应用于制备核桃油凝胶,通过特殊的纳米材料(如至少一

维尺寸<100 nm的食用纳米纤维素)作为凝胶因子,在不添加增稠剂的情况下,成功将核桃油转化为固体“植物黄油”^[60]。这种凝胶化技术不仅延长了核桃油的保质期,还增加了其食用范围和应用场景,如可用于烘焙、煎炸等需要固体脂肪的领域。同时,这种核桃油凝胶具有低饱和、无反式脂肪的特点,符合现代健康饮食的需求。山核桃等坚果类活性物质的提取过程中也可以利用纳米技术,通过超声波辅助提取、超临界CO₂萃取等先进技术,结合纳米材料的特性,可以有效提高活性物质的提取效率和品质,减少能耗和废弃物的产生^[61]。山核桃功能性产品的开发可以借助纳米技术。例如,通过纳米技术将功能性油脂与其他功能性成分(如维生素、矿物质等)进行复合,形成具有降低胆固醇、预防心血管疾病等特定健康功能的产品,拓展了山核桃加工利用范围。

3.2 基于计算机辅助药物设计技术的山核桃活性物质应用

计算机辅助药物设计(CADD)主要是通过模拟、计算和预测药物与生物大分子(如受体、酶等)之间的相互作用来设计和优化药物分子,分子动力学也是计算机辅助药物设计中的一个重要工具。而核桃含有多种对人体有益的功能因子,如不饱和脂肪酸、蛋白质、维生素E、多酚类物质等,这些功能因子在抗氧化、抗炎、抗癌、保护心血管和改善认知功能等方面具有显著作用^[62]。

针对山核桃中的特定功能因子,如多酚类物质或特定脂肪酸,可以借助CADD技术模拟其与人体内特定靶点的相互作用,设计出具有更高亲和力、更低毒性和更好生物利用度的药物分子,作为新药研发的候选物质。利用CADD技术,可以快速筛选和评估这些候选物质的生物活性和药效,从而加速新药研发的进程^[63]。例如,针对心血管疾病、癌症等重大疾病,可以探索山核桃功能因子在这些疾病治疗中的潜在应用^[64]。山核桃功能因子在人体内的具体作用机理也可以与CADD结合研究。在山核桃加工过程中,蛋白质、脂类和多糖会发生复杂的化学变化,通过模拟这些功能因子与人体内生物大分子的相互作用过程,揭示其影响人体的生理功能和代谢过程,能够更精准地研究山核桃成分在加工过程中的结构变化及其对功能特性的影响,从而为山核桃功能因子的利用和新药开发提供更为深入的理论依据。

3.3 基于合成生物学技术的山核桃活性物质应用

合成生物学作为一门新兴学科,通过运用基因操作工具等将基因植入到微生物中,使之生产出功能因子、化学制品等,为山核桃活性物质的利用提供了前所未有的前景^[65]。山核桃中富含脂肪酸、萜类多酚等营养活性成分,这些物质具有抗菌、抗癌等多种药理活性。相较于传统的提取效率低下且易污染环境的方法,合成生物学技术可以设计并构建出能够生产特定化合物的微生物菌株,从而实现对这些活性成分的高效合成^[66]。此外,利用

基因模块组合优化等技术还可以进一步提高这些活性成分的产量,满足大规模生产的需求。通过代谢组学等方法对这些成分进行检测和分析,可以进一步了解其生物合成途径和代谢产物变化^[67]。在此基础上,可以设计出更加精准的基因编辑和组装策略,实现对山核桃活性成分的高效异源生物全合成。合成生物学技术与食品的结合应用,也为功能性食品添加剂和营养强化剂的生物制造提供了更多的可能性,能够提升山核桃加工产品的营养价值和功能特性,拓展山核桃产业发展思路,推动山核桃行业发展和创新。

4 总结与展望

通过对山核桃的主要营养活性成分的深入分析,揭示了其在健康和疾病预防方面的潜在价值。虽然当前围绕山核桃的活性成分及保健功能展开的研究取得了一定的成果,但仍存在一些不足之处和尚未解决的问题。首先,山核桃的营养活性成分在人体内部的具体作用机制尚不完全明确,需要进一步的临床研究和分子生物学研究来验证。其次,山核桃的加工技术方面仍有待改进,以提高其生物活性成分的提取效率和稳定性。此外,山核桃的规模化生产和原料供应问题也是制约其产业发展的关键因素。后续可以深入研究解决这些关键问题,进一步推动山核桃产业的发展,实现其在健康食品和疾病预防中的广泛应用。

参考文献

- [1] 王静,吕芳德.我国山核桃属植物研究进展[J].经济林研究, 2012, 30(1): 138-142.
WANG J, LÜ F D. Advances in research on *Carya nutt* in China [J]. Nonwood Forest Research, 2012, 30(1): 138-142.
- [2] 郭传友,黄坚钦,方炎明.山核桃研究综述及展望[J].经济林研究, 2004, 22(1): 61-63.
GUO C Y, HUANG J Q, FANG Y M. Review and perspective of research on *Carya cathayensis*[J]. Economic Forest Researches, 2004, 22(1): 61-63.
- [3] 周樾波.贮藏条件及加工工艺对山核桃品质的影响[D].杭州:浙江农林大学, 2018: 1-67.
ZHOU L B. The effects of storage conditions and processing methods on the quality of walnut[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2018: 1-67.
- [4] 刘力,龚宁,夏国华,等.山核桃种仁蛋白质及氨基酸成分含量的变异分析[J].林业科学研究, 2006, 19(3): 376-378.
LIU L, GONG N, XIA G H, et al. Analysis on the protein and amino acids contents in hickory (*Carya cathayensis* Sarg.) kernel and their variations[J]. Forest Research, 2006, 19(3): 376-378.
- [5] 赵玉顺.临安山核桃产品营养成分特性研究[D].杭州:浙江农林大学, 2013: 1-48.
ZHAO Y S. The study on nutritional characteristics of pecan

- product from Lin'an[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2013: 1-48.
- [6] PELLET P L, YOUNG V R. Nutritional evaluation of protein foods[M]. Tokyo: The United Nations University, 1980: 4.
- [7] 荣瑞芬. 几种重要坚果的营养特性比较[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2010, 24(1): 12-16.
- RONG R F. A comparison of the nutritional characteristics of several common nuts[J]. Journal of Beijing Union University (Natural Sciences), 2010, 24(1): 12-16.
- [8] 杨月欣. 中国食物成分表[M]. 6 版. 北京: 北京大学医学出版社, 2018.
- YANG Y X. Chinese food composition[M]. 6th Edition. Beijing: Peking University Medical Press, 2018.
- [9] 崔亚娟, 郭莹莹, 殷嘉彤, 等. 坚果及坚果仁油营养品质综合评价[J/OL]. 中国食物与营养. (2023-11-10) [2025-01-08]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20231108.001>.
- CUI Y J, GUO Y Y, YIN J T, et al. Comprehensive evaluation of nutritional quality of nuts and nut kernel oil[J/OL]. Food and Nutrition in China. (2023-11-10) [2025-01-08]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20231108.001>.
- [10] 王芳. 坚果中脂肪含量及脂肪酸组成分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(15): 4 105-4 111.
- WANG F. Analysis of fat content and fatty acid composition in nut[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(15): 4 105-4 111.
- [11] 高军龙, 赵美钰, 李童, 等. 传统压榨山核桃油理化性质及脂肪酸组成分析[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(11): 2 633-2 635, 2 687.
- GAO J L, ZHAO M Y, LI T, et al. Physical and chemical properties and fatty acid composition analysis of traditional pressing hickory oil[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(11): 2 633-2 635, 2 687.
- [12] 何国庆, 俞春莲, 饶盈, 等. 山核桃果实成熟过程中矿质元素及脂肪酸组分变化[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(6): 1 208-1 216.
- HE G Q, YU C L, RAO Y, et al. Dynamic changes in composition of mineral elements and fatty acids for hickory nuts (*Carya cathayensis*) during maturity[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2019, 36(6): 1 208-1 216.
- [13] 王海燕, 李睿. 功能性不饱和脂肪酸研究进展[J]. 肉类研究, 2010, 24(12): 14-17.
- WANG H Y, LI R. The research advance in polyunsaturated fatty acid[J]. Meat Research, 2010, 24(12): 14-17.
- [14] 李新委, 谢世友, 马燕. 山核桃营养价值与种植经济效益分析[J]. 农学学报, 2015, 5(2): 51-56.
- LI X W, XIE S Y, MA Y. Analysis of pecan nutritional value and planting economic benefit[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(2): 51-56.
- [15] 常存, 段楠, 杨雪冰. 山核桃的营养成分测定及保健功能研究[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(12): 46-47.
- CHANG C, DUAN N, YANG X B. Study on nutritional composition and health function of *Carya cathayensis*[J]. Heilongjiang Science, 2019, 10(12): 46-47.
- [16] ALASALVAR C, SHAHIDI F. Natural antioxidants in tree nuts [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2009, 111(11): 1 056-1 062.
- [17] 李清清, 刘淑一, 李秋雨, 等. 影响婴幼儿面条中维生素 A 稳定性的因素[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 160-165.
- LI Q Q, LIU S Y, LI Q Y, et al. Factors influencing the stability of vitamin A in infant noodles[J]. Food & Machinery, 2024, 40 (11): 160-165.
- [18] ZAFFARIN A S M, NG S F, NG M H, et al. Pharmacology and pharmacokinetics of vitamin E: nanoformulations to enhance bioavailability[J]. International Journal of Nanomedicine, 2020, 15: 9 961-9 974.
- [19] 杨佳佳. 山核桃仁对大鼠代谢综合征的营养干预作用及传统炒制加工规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 1-63.
- YANG J J. Nutritional effect of carya nut kernel on metabolic syndrome and changes of functional components during traditional stir-frying process[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 1-63.
- [20] 郜海燕, 李兴飞, 陈杭君, 等. 山核桃多酚物质提取及抗氧化研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 336-341.
- GAO H Y, LI X F, CHEN H J, et al. Research progress on extraction and antioxidant activity of phenolic compounds from carya (*Carya cathayensis*) [J]. Food Science, 2011, 32(5): 336-341.
- [21] 贾晓东, 许梦洋, 莫正海, 等. 薄壳山核桃酚类代谢物研究进展[J]. 植物学报, 2020, 55(1): 106-119.
- JIA X D, XU M Y, MON Z H, et al. Recent advances in phenolic metabolites in pecan[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2020, 55(1): 106-119.
- [22] 房祥军, 郜海燕, 陈杭君. 正交试验法优化山核桃仁中总多酚的提取工艺参数研究[J]. 中国食品学报, 2009, 9(1): 153-157.
- FANG X J, GAO H Y, CHEN H J. Studies on the technological parameters optimization of total polyphenols extraction from the carya cathayensis sarg kornel by orthogonal experiment[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2009, 9(1): 153-157.
- [23] LI X N, WANG L P, TAN B, et al. Effect of structural characteristics on the physicochemical properties and functional activities of dietary fiber: a review of structure-activity relationship[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 269: 132214.
- [24] 卢红伶, 俞罡雷, 蒋起宏, 等. 响应面法优化冷榨核桃油及其脂肪酸组分分析[J/OL]. 中国油脂. (2024-02-06) [2025-03-21]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230547>.
- LU H L, YU G L, JIANG Q H, et al. Response surface methodology for optimization of cold-pressed extracted walnut oil and its fatty acid composition analysis[J/OL]. China Oils and Fats. (2024-02-06) [2025-03-21]. <https://doi.org/10.19902/>

- j.cnki.zgyz.1003-7969.230547.
- [25] 覃慧婷, 康恒, 付帆, 等. 角鲨烯来源及其生物活性研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2024, 49(1): 102-107.
- QIN H T, KANG H, FU F, et al. Research progress on the source and bioactivity of squalene[J]. Food Science and Technology and Economy, 2024, 49(1): 102-107.
- [26] 韩军花, 杨月欣, 冯妹元, 等. 中国常见植物食物中植物甾醇的含量和居民摄入量初估[J]. 卫生研究, 2007, 36(3): 301-305.
- HAN J H, YANG Y X, FENG M Y, et al. Analysis of phytosterol contents in Chinese plant food and primary estimation of its intake of people[J]. Journal of Hygiene Research, 2007, 36(3): 301-305.
- [27] FENG S M, WANG L, BELWAL T, et al. Phytosterols extraction from hickory (*Carya cathayensis* Sarg.) husk with a green direct citric acid hydrolysis extraction method[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126217.
- [28] 刘畅, 周家春. 植物多酚抗氧化性研究[J]. 粮食与油脂, 2011, 24(2): 43-46.
- LIU C, ZHOU J C. Research on antioxidation of plant polyphenols[J]. Cereals & Oils, 2011, 24(2): 43-46.
- [29] 任传义, 张延平, 汤富彬, 等. 油茶籽油、橄榄精油、核桃油、香榧油中主要化学成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(12): 5 011-5 016.
- REN C Y, ZHANG Y P, TANG F B, et al. Analysis of main chemical components in camellia oil, olive oil, walnut oil and torrea seeds oil[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2015, 6(12): 5 011-5 016.
- [30] GAO F, WU J F, ZHOU Y, et al. An appropriate ratio of unsaturated fatty acids is the constituent of hickory nut extract for neurite outgrowth in human SH-SY5Y cells[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(12): 6 346-6 356.
- [31] 吴建峰. 山核桃神经营养功能因子的分离与鉴定[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017: 1-59.
- WU J F. Isolation and identification of neurotrophic factors from *Carya cathayensis* Sarg.[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2017: 1-59.
- [32] 王鸿飞, 徐超, 周明亮, 等. 山核桃油改善小鼠记忆功能的研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(7): 63-66.
- WANG H F, XU C, ZHOU M L, et al. Studies on improving the memory capacity of mice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(7): 63-66.
- [33] ZAMROZIEWICZ M K, TALUKDAR M T, ZWILLING C E, et al. Nutritional status, brain network organization, and general intelligence[J]. NeuroImage, 2017, 161: 241-250.
- [34] LIU X R, GUASCH-FERRÉ M, TOBIAS D K, et al. Association of walnut consumption with total and cause-specific mortality and life expectancy in U. S. adults[J]. Nutrients, 2021, 13(8): 2 699.
- [35] 杜倩, 乌兰, 刘睿, 等. 核桃肽对幼年小鼠学习记忆能力的影响[J]. 中国生育健康杂志, 2017, 28(6): 538-543.
- DU Q, WU L, LIU R, et al. The effects of walnut peptides on learning and memory abilities in juvenile mice[J]. Chinese Journal of Reproductive Health, 2017, 28(6): 538-543.
- [36] HUANG C Y, LI Y, WANG K T, et al. Analysis of lipidomics profile of *Carya cathayensis* nuts and lipid dynamic changes during embryonic development[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 130975.
- [37] 李晴. 山核桃油降血脂功能活性及其微胶囊化技术研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022: 1-50.
- LI Q. Study on hypolipidemic activity and microencapsulation technology of walnut oil[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022: 1-50.
- [38] CUPINO A, FRASER G, KNUTSEN S, et al. Are total omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids predictors of fatal stroke in the adventist health study 2 prospective cohort? [J]. PLoS One, 2022, 17(9): e0274109.
- [39] HAYES D, ANGOVE M J, TUCCI J, et al. Walnuts (*Juglans regia*) chemical composition and research in human health[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(8): 1 231-1 241.
- [40] MOZAFFARIAN D. Dietary and policy priorities to reduce the global crises of obesity and diabetes[J]. Nature Food, 2020, 1(1): 38-50.
- [41] 徐慧敏. 奇亚籽油降血脂作用研究及在酸奶中的应用[D]. 锦州: 锦州医科大学, 2024: 1-68.
- XU H M. Study on the hypolipidemic effect of chiaseed oil and its application in yogurt[D]. Jinzhou: Jinzhou Medical University, 2024: 1-68.
- [42] 俞憬, 陈冠林, 杨璐齐, 等. 山核桃仁多酚提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(11): 2 109-2 112, 2 130.
- YU J, CHEN G L, YANG L Q, et al. Optimal technological conditions for extraction of polyphenols in hickory nut kernel and its antioxidant activities[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(11): 2 109-2 112, 2 130.
- [43] 赵一丁. 山核桃内果皮酚类成分稳定性及抗油脂氧化研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018: 1-62.
- ZHAO Y D. Study on stability and anti-lipid oxidant of phenolic compounds from endocarp of *Carya cathayensis*[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2018: 1-62.
- [44] 朱亚新. 核桃多酚对酪氨酸酶活性和黑色素合成的影响及其化妆品的试制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016: 1-81.
- ZHU Y X. Effect of polyphenols from walnut on tyrosinase activity and melanogenesis and preparation of cosmetic[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016: 1-81.
- [45] 慈傲特. 山核桃饼粕抗氧化肽的制备与鉴定[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018: 1-56.
- CI A T. Preparation and identification of antioxidant peptide from Pecan meal[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018: 1-56.

- [46] 丁之恩, 丁昱, 张继刚, 等. 加工工艺对山核桃油活性物质及油脂品质的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41(4): 12-21.
DING Z E, DING Y, ZHANG J G, et al. Effects of processing technology condition on active component and quality in *Carya cathayensis* Sarg oil[J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(4): 12-21.
- [47] 柏薇薇. 山核桃及山核桃油的功效[J]. 食品界, 2018(6): 83.
BAI W W. The efficacy of hickory and hickory oil[J]. Food Industry, 2018(6): 83.
- [48] MÜLLER L G, PASE C S, RECKZIEGEL P, et al. Hepatoprotective effects of pecan nut shells on ethanol-induced liver damage[J]. Experimental and Toxicologic Pathology, 2013, 65(1/2): 165-171.
- [49] 金晟, 郑昌吉, 郑明昱. 山核桃油对四氯化碳诱导的大鼠急性肝损伤的影响[J]. 延边大学医学学报, 2013, 36(3): 177-180.
JIN S, ZHENG C J, ZHENG M Y. Effects of wild walnut oil on carbon tetrachloride-induced acute liver injury in rats[J]. Journal of Medical Science Yanbian University, 2013, 36(3): 177-180.
- [50] NAKANISHI M, MATZ A, KLEMASHEVICH C, et al. Dietary walnut supplementation alters mucosal metabolite profiles during DSS-induced colonic ulceration[J]. Nutrients, 2019, 11(5): 1 118.
- [51] JIANG C Y, WANG S, WANG Y H, et al. Polyphenols from hickory nut reduce the occurrence of atherosclerosis in mice by improving intestinal microbiota and inhibiting trimethylamine N-oxide production[J]. Phytomedicine, 2024, 128: 155349.
- [52] 胡闰茹, 丁继垠, 王皓悦, 等. 临安山核桃研究综述[J]. 南方农业, 2024, 18(2): 22-25.
HU R R, DING J K, WANG H Y, et al. A review of research on Lin'an walnut[J]. South China Agriculture, 2024, 18(2): 22-25.
- [53] 肖仁昱. 山核桃油的提取工艺及其氧化稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 1-51.
XIAO R X. Study on *Carya cathayensis* sarg. oil: extraction and its oxidative stability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 1-51.
- [54] 涂宝军, 马利华, 秦卫东, 等. 超声波辅助提取山药皮多酚工艺及酚类的鉴别研究[J]. 中国食品添加剂, 2014, 25(1): 120-126.
TU B J, MA L H, QIN W D, et al. Studies on ultrasound-assisted extraction of yam peel polyphenol and its compositions[J]. China Food Additives, 2014, 25(1): 120-126.
- [55] 赵定华. 山核桃内果皮黄酮提取、抗氧化及抑菌活性研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015: 1-59.
ZHAO D H. Study on flavonoid extraction, antioxidation and antibacterial activity in the endocarp of *Carya cathayensis*[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2015: 1-59.
- [56] 王鲁黔. 山核桃仁中脂肪酸分析和多肽的制备及活性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
WANG L Q. Fatty acid analysis and polypeptide preparation and activity study of hickory kernel[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [57] 陈咏佳. 山核桃主要营养成分比较及其加工影响的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017: 1-56.
CHEN M J. The research on comparison of main nutritional components of hickory and the influence of processing[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2017: 1-56.
- [58] PETERS R J B, BOUWMEESTER H, GOTTARDO S, et al. Nanomaterials for products and application in agriculture, feed and food[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 54: 155-164.
- [59] RAM P, VIVEK K, KUMAR S P. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects[J]. African Journal of Biotechnology, 2014, 13(6): 705-713.
- [60] LI C, XU Y Y, ZHANG Y, et al. Novel bigels based on walnut oil oleogel and chitosan hydrogel: Preparation, characterization, and application as food spread[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260: 129530.
- [61] JIANG W J, LIU K X, HUAN W W, et al. Specific extraction of bioactive flavonoids from *Torreya grandis* pomace using magnetic nanoparticles modified with a $\text{CHCl}_3/\text{acetamide}$ deep eutectic solvent[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 211: 116914.
- [62] VEMULA D, JAYASURYA P, SUSHMITHA V, et al. CADD, AI and ML in drug discovery: a comprehensive review[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2023, 181: 106324.
- [63] GOMES D, SILVESTRE S, DUARTE A P, et al. In silico approaches: a way to unveil novel therapeutic drugs for cervical cancer management[J]. Pharmaceuticals, 2021, 14(8): 741.
- [64] PFLIPSEN M C, VEGA COLON K M. Anaphylaxis: recognition and management[J]. American Family Physician, 2020, 102(6): 355-362.
- [65] YAN X, LIU X, ZHAO C H, et al. Applications of synthetic biology in medical and pharmaceutical fields[J]. Signal Transduction and Targeted Therapy, 2023, 8(1): 199.
- [66] LOU H Q, SONG L L, LI X L, et al. The *Torreya grandis* genome illuminates the origin and evolution of gymnosperm-specific sciadonic acid biosynthesis[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 1 315.
- [67] ENGLER C, YOULES M, GRUETZNER R, et al. A golden gate modular cloning toolbox for plants[J]. ACS Synthetic Biology, 2014, 3(11): 839-843.