

2025年国内外蜂王浆研究概况

胡云霄 付晨浩 邹培缘 李珊珊 胡福良
(浙江大学动物科学学院, 杭州 310058)

摘要: 本文对2025年国内外蜂王浆的研究概况进行了综述, 对公开发表的159篇中英文文献的地域分布、研究领域等情况进行了统计分析和评述, 并重点介绍了蜂王浆的化学成分、质量控制、生物学活性及其作用机制的研究进展, 旨在为蜂王浆的科学研究与产业应用提供参考。

关键词: 蜂王浆; 化学成分; 质量控制; 生物学活性

An Overview of Royal Jelly Research in China and Abroad in 2025

Hu Yunxiao, Fu Chenhao, Zou Peiyuan, Li Shanshan, Hu Fuliang
(College of Animal Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: This article provides an overview of the research progress on royal jelly both domestically and internationally in 2025. It conducts statistical analysis and review of 159 published Chinese and English literature, covering geographical distribution and research areas. The article particularly focuses on advancements in the chemical composition, quality control, biological activities, and underlying mechanisms of royal jelly, aiming to offer valuable insights and references for its scientific research and industrial applications.

Key words: royal jelly; chemical compositions; quality control; biological activities

蜂王浆是工蜂咽下腺和上颚腺分泌的用于饲喂蜂王和幼虫的浆状物, 营养成分丰富、生物活性广泛, 近年来持续受到国内外科研与产业界关注。本文对2025年度国内外公开发表的159篇中英文研究性论文和公开专利的地域分布、研究领域进行统计分析与评述, 并重点介绍蜂王浆在化学成分、质量控制、生物学活性及其作用机制等领域新的研究进展。

1 蜂王浆相关研究性论文

1.1 论文数量及地域分布

根据中国知网、Google Scholar、Web of Science等数据库的检索结果, 2025年度发表与蜂王浆相关的中、英文研究论文共159篇, 包括136篇英文论文以及23篇中文论文。2025年发表的SCI论文数量是近十年来最多的。

在136篇英文论文中, 第一作者单位来自中国的有49篇, 是2025年发表蜂王浆研究论文最多的国家; 其次是伊朗(18篇), 土耳其排名第三(14篇)。

1.2 研究领域分布

2025年蜂王浆研究仍然主要集中于蜂王浆的生物学活性、化学成分分析和质量控制。在136篇英文论文中, 有89篇是有关蜂王浆及其活性成分的生物学活

性研究, 占论文总数的近2/3; 有36篇是有关蜂王浆成分、理化特性和质量控制的研究。此外, 还有11篇是有关蜂王浆研究的综述。

2 蜂王浆化学成分与质量控制研究进展

2.1 化学成分

蜂王浆化学组成的精细解析、生物合成机制是当前研究的核心热点。希腊Nastou等^[1]建立了基于LC-TIMS-HRMS的靶向分析策略, 可覆盖61种蜂王浆相关生物活性小分子; 在其检测的蜂王浆样品中定量了24种化合物, 并报道其中8种为首次在蜂王浆中实现定量表征。

针对蜂王浆核心活性成分10-羟基-2-癸烯酸(10-HDA)的合成机制与体外合成, 中国农业科学院蜜蜂研究所Li等^[2]解析了蜜蜂上颚腺中10-HDA生物合成的分子网络, 指出酰基辅酶A- Δ 11脱饱和酶相关基因d11ds是影响10-HDA生成的关键节点, 并基于网络分析提示Kay、Drep-2等转录调控因子可能参与10-HDA合成途径的调控。在合成生物学方面, 中国科学院深圳先进技术研究院He等^[3]通过代谢工程在*E. coli*中实现10-HDA异源合成, 报道其体系最高滴度为18.8 mg/L。齐鲁工业大学Su等^[4]在酿酒酵母体

基金项目: 国家自然科学基金项目(32472967); 国家蜂产业技术体系专项(CARS-44)

通讯作者: 胡福良, 教授, 博导, E-mail: flhu@zju.edu.cn

系中通过区室化与辅因子调控实现10-HDA合成。Xu等^[5]针对10-HDA对宿主细胞的毒性限制,在*E. coli*中引入MexHID转运蛋白以缓解产物合成负反馈抑制,并结合优化培养模式将10-HDA产量提升至0.94 g/L,为实现该活性成分的工业化绿色制造奠定了基础。

中国农业科学院蜜蜂研究所Li等^[6]采用非靶向与靶向代谢组学对不同人工饲料产生的蜂王浆进行化学表征与标志物筛选。结果显示,蜂王浆水分、总蛋白与10-HDA等基础质量指标在各组间总体一致,而 $\delta^{13}\text{C}$ 与糖组成存在差异;并确认大豆来源异黄酮代谢物daidzein与genistein可作为大豆粕替代花粉饲喂产生蜂王浆的特异性化学标志物。意大利D'Emilio等^[7]从组织形态学证实,富含多花蜂花粉的饲料能显著促进工蜂咽下腺腺泡的发育与蛋白分泌机能。土耳其Seker等^[8]则证实地理来源和饲料糖类型是影响蜂王浆挥发性有机化合物谱系的主要因素。此外,蛋白质尤其是王浆主蛋白(MRJPs)是蜂王浆的重要营养与功能物质基础。浙江大学胡云霄等^[9]系统总结了MRJPs的组成、结构与功能特性,并从蜂种、发育阶段及环境条件等方面梳理了其在工蜂咽下腺中合成与分泌的影响因素,为从腺体源头理解蜂王浆蛋白质品质形成提供了新的视角。

2.2 质量控制

随着分析技术的发展,蜂王浆的质控体系已涵盖标准化体系建设、深加工质控及多维安全性检测。在基础标准与真实性评价方面,青海省药品检验检测院韩生兰等^[10]建立了蜂王浆中脯氨酸、赖氨酸、谷氨酸的薄层色谱鉴别法及10-HDA的高效液相色谱测定法,为完善蜂王浆药材质量标准提供了依据。中国农业科学院蜜蜂研究所Liu等^[11]建立了基于稳定同位素比率结合理化指标的机器学习溯源模型,实现了对不同蜜粉源蜂王浆的精准分类。北京工商大学Zhuang等^[12]利用肽组学技术鉴定了源自MRJPs的特征性肽段作为指示贮存品质劣变的分子标志物。土耳其Gül^[13]开发的微胶囊化技术则有效提升了10-HDA的贮存稳定性。浙江大学Yu等^[14]建立并验证了基于气相色谱的快速定量检测方法,通过优化酸水解-乙醇/乙醚两步提取及BSTFA衍生化条件,可同步测定蜂王浆中多种主要脂肪酸,且线性、精密度与回收率等指标表现良好,为脂肪酸谱的快速质控与真实性评价提供了方法学支撑。

在安全性与污染物监控方面,检测技术向着高灵

敏度与广覆盖度发展。针对农兽药残留,周静等^[15]优化了蜂王浆中氟胺氰菊酯(杀螨剂)残留的GC-ECD检测方法,检出限低至0.002 mg/kg。武汉食品化妆品检验所Yang等^[16]合成了磁性共价有机框架材料,实现了对蜂王浆中20种喹诺酮类抗生素的快速富集检测。此外,国内外学者对蜂王浆中的农药残留^[17]、塑化剂(PAEs)风险^[18]、植物源性生物碱(PAs)污染^[19]进行了研究,为生物性污染/微生物风险监测提供方法学依据。

在微量元素检测方面,巴西dos Reis等^[20]与辽宁大学Zhang等^[21]分别优化了重金属及微量元素硒的检测技术。长春中医药大学Li等^[22]利用分子印迹技术解决了孕酮的富集检测难题;中国海关科学技术研究中心王珮玥等^[23]建立了17种游离氨基酸的高通量检测方法。

环境条件对蜂王浆品质的精细调控机制进一步被揭示。韩国Maigoro等^[24]对温度胁迫条件下工蜂咽下腺转录组进行分析,发现差异基因显著富集于外界刺激应答与内质网蛋白加工等通路,提示温度胁迫可能通过影响咽下腺的蛋白加工与营养分泌相关过程,从而关联蜂王浆品质变化。针对此类热应激,伊朗Rasouli-Nadergoli等^[25]在热胁迫条件下评估了在糖浆饲料中添加有机锌与有机硒对工蜂咽下腺与蜂王浆产出的影响。结果显示,在其试验条件下锌5000 $\mu\text{g/L}$ 与硒500 $\mu\text{g/L}$ 处理具有较优综合表现。山西农业大学Yang等^[26]评估了蜂群瓦螨防治常用杀螨剂(甲酸、草酸、百里酚、双甲脒)暴露对蜂王浆代谢组与蛋白组的影响。结果表明,杀螨剂暴露引起的蛋白组变化较少,代谢组仅少数代谢物出现差异,总体生物学影响较小;且主要关键成分(如MRJPs、10-HDA)未见显著变化。

3 蜂王浆的生物学活性及其作用机制研究进展

3.1 抗衰老

蜂王浆在延缓机体衰老、延长寿命及改善衰老相关代谢紊乱方面表现出优良活性。中国计量大学Zhang等^[27]以秀丽隐杆线虫为模型,系统比较了蜂王浆的新鲜度、贮藏温度及不同剂量对寿命、发育、生理活力与繁殖等表型的影响。结果显示,新鲜蜂王浆在较高剂量下可使线虫平均寿命延长(最高约16.37%);蜂王浆处理可影响多种与衰老/活力相关的基因表达(如应激响应、自噬及抗氧化相关基因等)。齐鲁工业大学Li等^[28]从蜂王浆中提取小分子抗光老化肽,研究其

对紫外线B (UVB) 诱导的光老化人类角质细胞的保护作用 and 分子机制。结果证明蜂王浆肽可以通过多靶点效应有效缓解UVB诱导的光老化。

在系统性衰老与脑保护方面, 北京工商大学Chen等^[29]在自然衰老小鼠模型中开展长期口服研究, 结果显示蜂王浆可调节血脂代谢, 并在脑脂质谱层面改善脂质组成特征, 同时伴随神经组织形态学与功能相关指标的改善, 提示其在“代谢-脑脂质稳态”层面可能具有延缓衰老相关损伤的潜力。

3.2 抗氧化

聊城大学Gao等^[30]利用多光谱技术与分子对接模拟, 揭示了王浆主蛋白1 (MRJP1) 与蜂胶活性成分咖啡酸苯乙酯 (CAPE) 的协同机制。研究发现, CAPE通过氢键和范德华力嵌入MRJP1的疏水活性口袋, 诱导蛋白二级结构折叠, 形成的非共价复合物在ABTS自由基清除实验中表现出显著的增效作用。伊朗Pasdar等^[31]在耐力训练男性运动员中开展随机双盲交叉试验, 蜂王浆补充可显著提高力竭时间并上调过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 辅激活子1 α 抗原 (PGC-1 α) 表达, 但对核因子E2相关因子2 (Nrf2) 表达以及总抗氧化能力 (TAC)、丙二醛 (MDA) 等多项氧化应激指标未观察到显著改善, 暗示蜂王浆具有选择性能效作用。聊城大学高双双等^[32]进一步研究了MRJPs酶解多肽的糖基化改性, 发现葡萄糖接枝修饰可使多肽的DPPH自由基清除能力提高约13.5倍, 显著增强了其抗氧化活性。

3.3 抗菌

蜂王浆的抗菌研究已从广谱抑菌向抗耐药菌机制解析、特定病原体靶向治疗及纳米/分子修饰材料构建方向纵深发展。针对临床棘手的多重耐药革兰氏阴性菌, 巴西Lima等^[33]研究发现, 蜂王浆来源的抗菌肽Jelleine-I对多粘菌素耐药的肺炎克雷伯菌具有显著杀菌活性, 其机制为细菌发生非受体依赖性的膜裂解, 且未表现出与多粘菌素的交叉耐药性; 巴西Pieve de Castro等^[34]进一步证实, Jelleine-I能通过静电和疏水相互作用破坏多重耐药鲍曼不动杆菌 (MDR-*Acinetobacter baumannii*) 的磷脂双分子层结构, 导致细菌死亡。

摩洛哥Hbibi等^[35]证实蜂王浆对高致病性牙周病原体——伴放线聚集杆菌具有显著抑制作用, 其抑菌活性与过氧化氢及类黄酮含量呈正相关。泰国

Somwongin等^[36]开发了一种含蜂王浆与低剂量水杨酸 (0.1%) 的成膜凝胶, 该复配体系对痤疮丙酸杆菌及表皮葡萄球菌显示出显著的协同抑菌效果。土耳其Gülpinar等^[37]首次发现蜂王浆对细胞内寄生虫——肠道脑炎微孢子虫的孢子活性具有高达99%以上的抑制率。

在纳米生物技术与分子修饰的前沿领域, 继伊朗Hashemirad等^[38]利用蜂王浆绿色合成银/铁/铜/锌纳米颗粒后, 沙特阿拉伯Selim等^[39]合成的蜂王浆介导的硒纳米颗粒对金黄色葡萄球菌和黑曲霉的抑制效果优于天然蜂王浆。美国Hong等^[40]采用分子修饰策略, 将10-HDA及其类似物与特定三肽 (如ILK) 偶联, 构建的新型超分子水凝胶对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌表现出显著的接触杀菌活性, 为感染性伤口愈合提供了新一代生物材料。此外, 有科研团队还分别构建了基于壳聚糖-蜂王浆的纳米银复合材料和生物膜, 实现了对真菌及细菌生物膜的高效清除^[41, 42]。

3.4 抗肿瘤

蜂王浆抗肿瘤活性的研究已从单一的细胞毒性评估, 深入到肿瘤代谢重编程以及纳米靶向递送系统的构建。在抑制肿瘤代谢与信号通路调控方面, 土耳其Köprülü等^[43]研究发现, 蜂王浆与鞣花酸联用能显著抑制结直肠癌 (HT-29) 细胞的糖酵解途径, 具体表现为下调关键限速酶己糖激酶2、磷酸果糖激酶和乳酸脱氢酶A的基因表达, 从而阻断肿瘤细胞的能量供应并诱导线粒体凋亡。此外, 研究还证实了蜂王浆与芦荟的组合能通过调节MAPK信号通路, 显著抑制非小细胞肺癌 (A549) 细胞的糖酵解^[44], 且在口腔鳞状细胞癌模型中发现, 蜂王浆能增强肿瘤细胞对紫杉醇的敏感性, 协同抑制细胞迁移并诱导S期阻滞^[45]。

蜂王浆展现出卓越的辅助治疗价值。伊朗Abedikanzagh等^[46]研究证实, 蜂王浆与一线化疗药顺铂联合作用于肺癌细胞时, 能产生显著的协同效应, 通过下调抗凋亡基因Bcl-2并上调促凋亡基因Bax和Caspase-3, 能大幅降低顺铂的有效使用剂量。土耳其Asmaz等^[47]证实蜂王浆能以剂量依赖方式抑制人卵巢腺癌细胞增殖, 其机制涉及Ki-67表达的下调及Cleaved-PARP介导的凋亡激活。浙江工业大学何荣军等^[48]构建了双酚A诱导的乳腺癌细胞增殖模型, 发现植物乳杆菌N1发酵的蜂王浆能显著拮抗环境雌激素双酚A的促癌作用, 通过阻滞细胞周期于S期并诱导细

胞凋亡,抑制MCF-7细胞的迁移与侵袭。

在纳米生物技术与新型递送系统领域,蜂王浆的组分被开发为高效载体。大连工业大学Lu等^[49]提取蜂王浆外泌体作为岩藻黄质的纳米载体,不仅解决了岩藻黄质稳定性差的难题,还通过激活ROS/Caspase信号通路,显著增强了其对黑色素瘤细胞的杀伤效力。埃及Abu-Hussien等^[50]则利用蜂王浆作为绿色还原剂一步法合成了氧化锌纳米颗粒,该纳米材料通过诱导ROS爆发及上调*p53*基因表达,对HepG2和A549细胞表现出强效的抗癌活性。

3.5 皮肤保护

蜂王浆在皮肤领域的应用研究已从基础的抗氧化防护与美白,拓展至再生医学材料的构建、难愈合创面的修复。蜂王浆正被深度开发为多功能水凝胶和纳米纤维支架。中国农业科学院蜜蜂研究所Zhou等^[51]合成了10-HDA功能化的碳点(10-HDA@CDs),并将其引入蜂蜜增强的海藻酸盐-多巴胺水凝胶中。该纳米复合水凝胶不仅通过清除ROS保护角质形成细胞(HaCaT)免受氧化损伤,还通过多靶点调控显著加速了金黄色葡萄球菌感染伤口的再生。浙江大学Yi等^[52]开发了一种无需生物杂化的纯天然来源水凝胶,利用MRJPs的光交联特性制备了急救止血材料,在抗凝猪肝/脾出血模型中观察到其可显著缩短止血时间并减少失血量。中国计量大学Yu等^[53]利用共混静电纺丝技术制备了负载蜂王浆的聚乙烯醇/壳聚糖纳米纤维膜,该纳米纤维通过氢键相互作用实现了药物的缓释,表现出优异的水蒸气透过率和抗菌性能。台湾国立中山大学Tsai等^[54]证实蜂王浆细胞外囊泡能通过调节炎症微环境和促进血管生成加速糖尿病伤口愈合。福建农林大学Huang等^[55]发现MRJP3的C端片段通过RHBDF2/EGFR/AKT/mTOR信号通路促进角质形成细胞迁移。

除了伤口愈合,针对皮肤炎症与瘙痒,浙江工商大学Xue等^[56]研究了蜂王浆中另一类脂肪酸——3-羟基癸酸(3-HDA)的活性。它不仅能通过降低ROS、TNF- α 和COX-2的表达抑制巨噬细胞炎症反应,还能抑制肥大细胞脱颗粒以减少组胺释放,并通过下调瞬时受体电位香草酸亚型1(TRPV1)活性和IL-31分泌有效缓解由热或辣椒素诱导的角质形成细胞致痒反应,为蜂王浆治疗特异性皮炎提供了新依据。齐鲁工业大学Liang等^[57]进一步揭示了蜂王浆肽能通过MAPK通路下调黑色素生成相关基因*MITF*表达,从而在转

录水平抑制黑色素生成。大连工业大学Lu等^[58]则利用蜂王浆外泌体作为纳米载体,通过激活皮肤细胞的自噬通路实现美白功效。

3.6 神经保护

蜂王浆对神经系统的保护作用已从基础的抗氧化与抗炎,深入到神经元电生理活动的调节和神经退行性疾病的临床干预。斯洛伐克Bilikova等^[59]研究发现,蜂王浆能显著增加中脑腹侧被盖区多巴胺能神经元的爆发式放电频率,从而改善认知表现。智利Zavala等^[60]研究发现,蜂王浆来源的细胞外囊泡不仅能降低LPS诱导的促炎因子(TNF- α 、IL-6)表达,还能逆转激活态微胶质细胞的“细胞硬化”现象,恢复其纳米机械特性,从而维持脑内免疫稳态。沈阳药科大学杨云帆等^[61]利用LC-MS/MS技术证实,喂食蜂王浆能使小鼠脑内的乙酰胆碱浓度显著提高22%,直接支持了其改善认知的神经化学基础。此外,红河学院龚志文等^[62]以蜜蜂为模型,发现蜂王浆能上调与学习记忆密切相关的DNA甲基转移酶3基因(*Dnmt3*)的表达,提示其改善记忆的作用可能涉及表观遗传修饰。苏州大学Huang等^[63]研究发现10-HDA能通过抑制铜离子的异常积聚,阻断铜介导的神经元焦亡,从而减轻脑水肿。

在神经退行性疾病与自身免疫性神经病变临床研究方面,两项针对复发缓解型多发性硬化症(RRMS)的随机双盲临床试验提供了有力证据:伊朗Sabbagh等^[64]发现每日补充500 mg蜂王浆能显著降低患者血清中的关键促炎因子(IL-1 β 、TNF- α)并提升抗炎因子IL-10水平;Eslamifar等^[65]则证实,该干预方案能显著降低扩展残疾状态量表评分及MDA,改善患者的身体功能与生活质量。Elshafey等^[66]证实蜂王浆与单籽沙蒿提取物的协同联用能产生更强的抗阿尔茨海默病活性。

3.7 生殖系统保护

在雄性生殖功能与精子保护方面,伊拉克Atta等^[67]针对未成熟雄性大鼠的研究发现,蜂王浆可改善精子相关参数,并伴随性激素相关指标变化,同时对雌性卵巢卵泡发育及子宫相关指标亦有促进作用,提示其对生殖发育具有一定支持潜力。伊朗Mohammadi等^[68]开发了一种无冷冻保护剂的玻璃化精液冷冻技术,添加1%蜂王浆能显著维持蜜蜂雄蜂精子的质膜完整性。

在雌性生殖保护与卵巢功能维护方面,土耳其Kalkan等^[69]研究发现,蜂王浆预处理对卵巢组织炎症

相关指标 (TNF- α 、IL-1 β 、IL-6) 及与卵巢功能相关的PTEN、AMH等指标呈一定缓解趋势,并结合组织学观察提示其对化疗相关卵巢损伤具有潜在保护作用。伊朗Ramazany等^[70]开展了一项针对外阴阴道念珠菌病的随机对照临床试验,使用阴道蜂王浆乳膏治疗与2%标准药物克霉唑对照,结果显示两组治疗后念珠菌水平均显著下降,瘙痒、分泌物及灼烧等症状得以改善,提示蜂王浆对外阴阴道念珠菌病具有治疗价值。

3.8 胃肠道保护

在肠道屏障修复和抗炎的分子机制方面,吉林大学中日联谊医院Wang等^[71]揭示了10-HDA抗炎的新靶点,发现其能通过上调miR-210-3P的表达,靶向抑制鸟苷酸结合蛋白3,进而阻断NLRP3炎症小体的组装与活化,有效减轻DSS诱导的小鼠结肠损伤。中国农业大学Guo等^[72]则聚焦蜂王浆蛋白来源的抗炎肽,证实其可抑制Src/NF- κ B等炎症信号通路的活化,并促进紧密连接蛋白ZO-1、Occludin表达,从而改善DSS诱导的肠黏膜屏障受损。复旦大学华东医院Huang等^[73]从“肠-肝轴”角度出发,发现10-HDA不仅能治疗结肠炎本身,还能通过抑制TLR9-NLRP1/NLRP3介导的细胞焦亡,有效改善由肠道屏障渗漏引发的继发性肝损伤。

蜂王浆正被开发为新型益生元用于肠道微生态调节与免疫增强。东北农业大学Ma等^[74]构建了“副干酪乳杆菌JY091+蜂王浆”的合生元复合物,研究表明蜂王浆能作为增殖因子显著促进益生菌生长,二者联用能协同调节肠道菌群结构,并增强机体免疫功能。日本Itatani等^[75]也发现,富含10-HDA的发酵蜂王浆能诱导肠道滤泡相关上皮中的M细胞分化,通过上调GP2和SPIB基因表达,增强肠道黏膜的抗原摄取与免疫监视能力。

在“微生物-肠-脑轴”与行为调节的前沿领域,合肥工业大学Zhu等^[76]发现蜂王浆能通过重塑肠道菌群并调节肠-脑通讯,逆转处于从属地位大鼠的社交回避行为,提升其社会竞争等级,这表明蜂王浆对胃肠道的调节作用可进一步延伸至神经心理层面。

3.9 心血管保护

10-HDA已被证实是抗心肌梗死与血管炎症的核心活性分子。温州医科大学Zhao等^[77]在小鼠心肌梗死模型中发现,10-HDA能显著改善心功能并减少心肌纤维化,其机制在于阻断TLR4/MyD88/NF- κ B信号

轴,从而抑制巨噬细胞介导的炎症级联反应。河南工业大学Jia等^[78]则聚焦于血管壁病变,证实10-HDA能与Toll-like受体4直接相互作用,抑制血管紧张素II诱导的血管平滑肌细胞炎症。埃及Abdel-Kareem等^[79]证实,蜂王浆能通过上调抗凋亡蛋白Bcl-2并下调促凋亡蛋白Bax及Caspase-3,有效拮抗异丙肾上腺素诱导的心肌梗死和心肌细胞凋亡。

伊朗Karimi等^[80]研究发现,缺血性脑卒中患者连续12周补充蜂王浆后,红细胞沉降率下降、NO水平上升、氧化状态指数降低,并降低卒中相关残疾发生概率。巴西Kemp等^[81]针对维持性血液透析患者的研究发现,蜂王浆联合绿蜂胶连续2个月可降低血浆IL-6及总胆固醇水平。张洋^[82]通过糖尿病足溃疡模型,研究发现蜂王浆能激活血管内皮生长因子信号轴,增强脂肪干细胞外泌体的促血管生成能力,加速缺血组织的血管网重建。河南科技大学Yang等^[83]从蜂王浆蛋白中筛选出新型血管紧张素转化酶抑制肽,并以代表性肽段PYPDWSFAK等开展分子对接与内皮保护相关验证,展现出开发天然降压功能食品的潜力。浙江工业大学何荣军等^[84]针对蜂王浆致敏难题,通过正交试验优化了酶解工艺,在脱除主要致敏原MRJP1的同时,显著提升了酶解产物的体外降血压及降血糖活性。

3.10 其他

在组织修复与器官保护领域,深圳龙华区人民医院Zhang等^[85]证实负载10-HDA的水凝胶能通过抑制铁死亡治疗椎间盘退变;日本Rojasawasthien等^[86]发现10-HDA代谢物癸二酸能激活BMP-2/Smad通路促进成骨细胞分化;土耳其Topan等^[87]证实蜂王浆对药物相关性颌骨坏死的治疗作用。此外,埃及Saleh等^[88]与沙特Naguib等^[89]分别证实了蜂王浆及其活性成分在缓解铅诱导的肾毒性和糖尿病诱导的腮腺损伤中的保护作用。

蜂王浆在农业生产领域也有应用前景。意大利Lo Presti等^[90]指出蜂王浆可作为水产饲料添加剂,显著改善鱼类生长与免疫;陕西师范大学张雨菡等^[91]与伊朗Bidarnamani^[92]分别证实蜂王浆在绿豆及蝴蝶兰育苗中具有显著的生物刺激素效应。

4 总结与展望

蜂王浆作为重要的蜂产品,因其营养价值与多维生物活性而持续受到关注。相较2024年,2025年的研究规模与产出有明显上升,蜂王浆整体发文量与国际化程度继续提升,其中第一作者单位来自中国的英文

论文达49篇，显示我国在该领域的研究活跃度与国际影响力进一步增强。

从研究领域看，2025年的研究仍以生物学活性为主（89篇），但成分解析与质量控制类研究显著扩容（34篇），并出现更强的方法学驱动特征——高灵敏度、广覆盖的检测技术被更频繁地用于蜂王浆成分的精刻画、差异标志物挖掘与质控指标构建，这也意味着，蜂王浆研究正在形成一条更清晰的技术路线，从成分解析到质量标志物验证、加工/储藏影响量化，最后是功效与机制证据链，并开始更贴近监管与产业的可落地需求。

值得强调的是，蜂王浆标准化与质控体系仍存在关键短板，尤其是新鲜度评价指标长期缺乏突破，且细胞与动物证据相对丰富，而高质量人体研究不足仍制约应用转化。2025年的新增进展在一定程度上回应了这些问题：质量控制研究不再局限于单一指标检测，而更倾向于以多维检测与组合指标框架提升鉴别与评价能力。然而，就证据结构而言，真正能支撑标准升级的“跨区域/跨批次验证、长期随访、可比性临床证据”仍是最薄弱环节。

展望未来，蜂王浆研究中以下三个方向能否形成“闭环式推进”值得期待：

（1）以标准问题为牵引的标志物体系。围绕新鲜度、掺假识别与安全风险等关键问题，建立“筛选—验证—应用”层层递进的证据链，强调多中心样本、跨产地与跨加工链条的稳定性检验，使指标从“实验室可测”走向“监管与产业可用”。

（2）从功效描述到机制可解释与等效性评价。将关键活性成分（如脂肪酸、MRJPs及其衍生肽等）的供给稳定性、加工稳定性与体内暴露水平纳入统一评价框架，推动“批次一致性—剂量可视化—效应可预测”的研究范式，以提升不同研究之间的可比性与可重复性。

（3）高质量人体研究与长期安全性评估。在明确原料质量分级与用量标准的前提下，开展更规范的临床研究，重点补齐长期使用安全性、不同人群差异反应及与既有干预措施的比较证据，从而推动蜂王浆从“传统天然产物”升级为“可标准化、可验证、可产业化”的功能原料与产品体系。

参考文献

[1] NASTOU E S, PREZA-MAYO-KATAKI D A, GIALOURIS P P, et al. Mapping royal jelly's bioactive profile by liquid chromatography

coupled to trapped ion mobility spectrometry and high-resolution mass spectrometry [J]. *J Agric Food Chem*, 2025, 73(37): 23684–23699.

[2] LI Y, ZHANG X, XIA Z, et al. Dissecting the molecular mechanism of 10-HDA biosynthesis: role of acyl-coA Delta(11) desaturase and transcriptional regulators in honeybee mandibular glands [J]. *Insects*, 2025, 16(6): 563.

[3] HE D, CHEN Y, SHEN J, et al. Biosynthesis of 10-hydroxy-2-decenoic acid in *Escherichia coli* [J]. *Metab Eng*, 2025, 88: 240–249.

[4] SU C, WANG Z, ZHANG G, et al. Engineering compartmentalization and cofactor regulation for 10-Hydroxy-2-decenoic acid biosynthesis in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *J Agric Food Chem*, 2025, 73(20): 12364–12373.

[5] XU Z, DU C, GAO S, et al. Enhancing 10-HDA production of *Escherichia coli* by heterologous expression of MexHID transporter proteins [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2025, 13: 1590291.

[6] LI H, RAKA R N, HU H, et al. Effects of bee artificial diets on the composition of royal jelly: Chemical characterization and marker identification by untargeted and targeted metabolomic approaches [J]. *J Food Compos Anal*, 2025, 142: 107411.

[7] D'EMILIO C, VALENZANO V, MAIOLINO P, et al. Effects of pollen enriched diet on hypopharyngeal glands' morphology and morphometry and vitellogenin transcription levels in honey bees [J]. *Ital J Anim Sci*, 2025, 24(1): 484–492.

[8] SEKER I, KARLIDAG S, AKYOL A, et al. Volatile organic compounds of royal jellies obtained from honeybee (*Apis mellifera* L.) colonies fed with different industrial sugars at different locations [J]. *J Food Meas Charact*, 2025, 19(3): 2019–2034.

[9] 胡云霄, 祝梅斐, 袁斌, 等. 王浆主蛋白的结构和功能特性及其在蜜蜂咽下腺中合成和分泌的影响因素 [J]. *昆虫学报*, 2025, 68(3): 346–357.

[10] 韩生兰, 李永鹏, 乔亚玲, 等. 蜂王浆药材质量标准研究 [J]. *亚太传统医药*, 2025, 21(03): 46–52.

[11] LIU Z, YU X, YIN X, et al. Machine learning for precise identification of royal jelly from various food sources with stable isotope and physicochemical properties [J]. *Food Frontiers*, 2025, 6(5): 2314–2327.

[12] ZHUANG S, ZHANG X, MING H, et al. Exploration of quality deterioration mechanisms of royal jelly proteins during storage by LC-MS/MS-based peptidomics [J]. *J Food Compos Anal*, 2025, 140: 107202.

[13] G ü L L B. Royal jelly microencapsulation with a maltodextrin/gum Arabic binary blend by spray drying [J]. *Ital J Food Sci*, 2025, 37(4): 403–421.

[14] YU X Y, WEI W T, WU Y Q, et al. Development and validation of a rapid gas chromatography for simultaneous quantification of major fatty acids in royal jelly [J]. *Food Sci Anim Prod*, 2025, 3: 9240099.

[15] 周静, 黄志强, 徐倩, 等. 气相色谱法测定蜂王浆中氟胺氰菊酯的残留量 [J]. *分析测试技术与仪器*, 2025, 31(05): 339–344.

[16] YANG M, YI J, LU Y, et al. Facile synthesis of magnetic covalent organic frameworks for simultaneous detection of twenty quinolone residues in bee products [J]. *J Food Compos Anal*, 2025, 147: 108100.

[17] SWIATLY-BLASKIEWICZ A, KLUPCZYNSKA-GABRYSZAK A, MATUSZEWSKA-MACH E, et al. Pesticides in honeybee products—determination of pesticides in bee pollen, propolis, and royal jelly from polish apiary [J]. *Molecules*, 2025, 30(2): 275.

[18] XU H, YUAN Y, MU G, et al. Distribution and risk assessment of phthalate esters in different types of royal jelly products based on modified QuEChERS combined with GC-MS/MS [J]. *J Food Compos Anal*, 2025, 142: 107473.

[19] BRUGNEROTTO P, SILVA B, GONZAGA L V, et al. Comprehensive review of pyrrolizidine alkaloids in bee products: Occurrence, extraction, and analytical methods [J]. *Food Chem*, 2025, 483: 144211.

- [20] DOS REIS M L C M, DOS SANTOS L F M, GUIMARÃES L B, et al. Atomic spectrometric techniques in bees and beehive products analysis for elemental determination and their use as environmental indicators [J]. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2025, 48: e00288.
- [21] ZHANG J, SU D, XUE S, et al. Determination of selenium in different types of bee products by hydride generation atomic fluorescence spectrometry [J]. Eur Food Res Technol, 2025, 251(5): 829–840.
- [22] LI H, PAN X, ZHANG K, et al. Preparation of molecularly imprinted polymer nanoparticles for the extraction and purification of progesterone combined with UPLC–ESI–MS mass spectrometry detection in royal jelly [J]. J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci, 2025, 1252: 124462.
- [23] 王珮玥, 梁娜娜, 韩深, 等. 超高效液相色谱串联质谱法测定蜂产品中 17 种游离氨基酸 [J]. 中国口岸科学技术, 2025, 7(04): 70–83.
- [24] MAIGORO A Y, LEE J H, YUN Y, et al. In the battle of survival: transcriptome analysis of hypopharyngeal gland of the *Apis mellifera* under temperature–stress [J]. BMC Genomics, 2025, 26(1): 151.
- [25] RASOULI–NADERGOLI K, SADEGHI A A, SHAWRANG P, et al. The effects of zinc–methionine and Sel–Plex on the hypopharyngeal gland size, royal jelly yield and composition and the relative expression of hsp90 and trx gene in honey bees under heat stress [J]. Apidologie, 2025, 56(2): 37.
- [26] YANG T, MA C, HU M, et al. Impact of common acaricide exposure of honey bee colonies for *Varroa* control on royal jelly metabolome and proteome [J]. J Agri Food Res, 2025, 23: 102217.
- [27] ZHANG C, DENG Y, LUO Z, et al. Effects of royal jelly freshness and concentration on lifespan, growth, motility and reproduction in *Caenorhabditis elegans* [J]. Foods, 2025, 14(22): 3839.
- [28] LI Z, LIANG J, FENG J, et al. Preparation, identification, and anti-photoaging effect of royal jelly protein peptides on UVB-irradiated HaCaT cells [J]. Food Res Int, 2025, 213: 116548.
- [29] CHEN L, ZHAO L, ZHANG G, et al. Royal jelly modulates serum lipid metabolism and improves brain lipid profiles in natural aging mice [J]. Food Sci Hum Well, 2025, 14(3): 9250071.
- [30] GAO S, LI T, TANG Y, et al. Studying the interaction of major royal jelly protein 1 with caffeic acid phenethyl ester via multi-spectroscopy and molecular docking [J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2025, 341: 126473.
- [31] PASDAR Y, TADIBI V, SADEGHI E, et al. Royal jelly supplementation improves endurance and mitochondrial biogenesis in athletes: A crossover trial [J]. Food Sci Nutr, 2025, 13(7): e70497.
- [32] 高双双, 吕志伟, 玄红专. 蜂王浆主蛋白酶解多肽糖基化改性后的结构及抗氧化活性变化 [J]. 食品科技, 2025, 50(11): 226–234.
- [33] LIMA W G, LAIA R M R, BRITO J C M, et al. Antibacterial activity of jelleine–I, a peptide isolated from royal jelly of *Apis mellifera*, against colistin–resistant *Klebsiella pneumoniae* [J]. Toxins (Basel), 2025, 17(7): 325.
- [34] PIEVE DE CASTRO A, BRITO J C M, CANDIDO W A B, et al. Jelleine–I membrane interaction–related biological properties and antimicrobial activity against MDR, XDR, and PDR–acinetobacter baumannii clinical isolates [J]. ACS Omega, 2025, 10(11): 10938–10948.
- [35] HBIBI A, EZZAHI A, OZTURK F, et al. Honey compounds exhibit antibacterial effects against aggregatibacter actinomycetemcomitans JP2 [J]. Antibiotics (Basel), 2025, 14(9): 887.
- [36] SOMWONGIN S, TAMMASORN P, LIMBUNJERD R, et al. Bee product–based antimicrobial film–forming gels targeting staphylococcus aureus, staphylococcus epidermidis, and cutibacterium acnes for anti-acne applications [J]. Gels, 2025, 11(10): 802.
- [37] GULPINAR D G, POLAT Z A, CETINKAYA U. Therapeutic potential of propolis and royal Jelly in encephalitozoon intestinalis infection: An in vitro study [J]. Acta Parasitol, 2025, 70(1): 26.
- [38] HASHEMIRAD F–S, KAVOOSI G, MAHDI DADFAR S M. Royal jelly: A novel eco–friendly biotemplate for the sustainable green synthesis of antibacterial silver, iron, copper, and zinc nanoparticles [J]. Lwt, 2025, 223: 117797.
- [39] SELIM S, HAMOUD Y A, EL–SAYED S M, et al. Novel royal jelly–mediated green synthesis of selenium nanoparticles and their multifunctional biological activities [J]. Nanotechnol Rev, 2025, 14(1): 2555–66.
- [40] HONG S, BARAVKAR S B, LU Y, et al. Molecular modification of queen bee acid and 10–hydroxydecanoic acid with specific tripeptides: rational design, organic synthesis, and assessment for prohealing and antimicrobial hydrogel properties [J]. Molecules, 2025, 30(3): 615.
- [41] ALGHUTHAYMI M A. Antifungal nanocomposites from honeybee chitosan and royal jelly–mediated nanosilver for suppressing biofilm and hyphal formation of *Candida albicans* [J]. Polymers (Basel), 2025, 17(14): 1916.
- [42] DUMITRU C D, ILIE C I, NEACSU I A, et al. Antimicrobial composite films based on alginate–chitosan with honey, propolis, royal jelly and green–synthesized silver nanoparticles [J]. Int J Mol Sci, 2025, 26(14): 6809.
- [43] KUL KOPRULU T. Royal jelly with ellagic acid inhibits the glycolytic pathway and induces apoptosis through multiple pathways in colorectal cancer [J]. Turk J Biol, 2025, 49(6): 675–689.
- [44] KUL KOPRULU T, GEZER B, ERKAL CAM B. The impact of apoptosis–inducing MAPK and glycolytic pathways modulated by Aloe vera and royal jelly in lung and colorectal cancer [J]. Med Oncol, 2025, 42(2): 51.
- [45] KUL KOPRULU T, GEZER B, BALKAN J. Royal jelly enhances the sensitivity of oral Squamous cancer cells to paclitaxel, suppressing proliferation, migration, and glycolysis [J]. Cell Biochem Biophys, 2025, 83(4): 5167–5180.
- [46] ABEDIKANZAGH F, TAHMASEBI FARD Z, HASANZAD M. The combined effects of cisplatin and royal jelly on lung cancer: Growth, proliferation, gene expression, and apoptosis [J]. Int J Cancer Manag, 2025, 18(1): e161127.
- [47] ASMAZ E D, GULER S, ZIK B. Effects of royal jelly on ovary cancer cells proliferation and apoptosis [J]. Med Oncol, 2025, 42(4): 89.
- [48] 何荣军, 任玫, 沈倩儿, 等. 植物乳杆菌 N1 发酵蜂王浆前后的抗癌及降血糖活性变化 [J]. 现代食品科技, 2025, 41(09): 56–64.
- [49] LU Y, JIN J, YANG Y, et al. Royal jelly exosomes as a stable and bioavailable carrier for fucoxanthin: A novel approach for antimelanoma therapy [J]. Food Biosci, 2025, 71: 107118.
- [50] ABU–HUSSIEN S H, KHAN M A, SALAH M. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles from royal jelly with enhanced antimicrobial, antioxidant and anticancer properties [J]. Inorg Chem Commun, 2026, 184: 115899.
- [51] ZHOU E, ZHU Y, CHEN G, et al. Bioactive nanocomposite hydrogel with synergistic antibacterial and cytoprotective functions: Multi–target keratinocyte modulation for infected wound regeneration [J]. Chem Eng J, 2025, 520: 165748.
- [52] YI W, ZHU Q, PEI J, et al. A multifunctional royal jelly–derived hydrogel for first–aid wound treatment: a natural origin alternative without biohybridization [J]. Chem Eng J, 2025, 522: 166750.
- [53] YU H, CHEN D, LU W, et al. Characterization of polyvinyl alcohol/chitosan nanofibers loaded with royal jelly by blending electrospinning for potential wound dressings [J]. Int J Biol Macromol, 2025, 307(Pt 2): 141977.
- [54] TSAI Y Y, CHANG L S, LAN C W, et al. Royal jelly extracellular vesicles enhance diabetic wound healing via inflammation modulation, fibroblast migration, and angiogenesis [J]. Int J Nanomedicine, 2025, 20: 12767–12781.
- [55] HUANG L, LIN T, WANG Y, et al. MRJP3–C113, a major royal jelly protein 3–derived fragment, accelerated cutaneous wound healing through RHBDF2–mediated activation of EGFR/AKT/mTOR signaling pathway [J]. Food Sci Hum Well, 2025, 14(10): 9250327.

- [56] XUE Z, SHEN C, MENG Q. Effects of 3-hydroxydecanoic acid on skin cells: anti-inflammatory, anti-allergic and anti-pruritic activities [J]. *Nat Prod Res*, 2025: 1-6.
- [57] LIANG J, GUO C, LI Z, et al. Preparation, identification, and anti-melanogenesis activity of royal jelly protein peptides [J]. *J Funct Foods*, 2025, 129: 106897.
- [58] LU Y, GUO Y, WANG L, et al. Royal jelly exosome-based nanocarriers enhance the stability and bioactivity of polyphenols from *Ascophyllum nodosum* for melanin regulation [J]. *Food Res Int*, 2025, 221(Pt 4): 117495.
- [59] BILIKOVA K, JEZOVA D, GRINCHII D, et al. Pro-cognitive effect of royal jelly is linked with increased burst activity of mesocorticolimbic dopaminergic neurons [J]. *Nutrients*, 2025, 17(22): 3593.
- [60] ZAVALA G, BERRIOS P, SANDOVAL F, et al. Royal jelly derived extracellular vesicles modulate microglial nanomechanics and inflammatory responses [J]. *Nanoscale*, 2025, 17(36): 20947-20959.
- [61] 杨云帆, 徐锦忠. 蜂王浆提高小鼠大脑乙酰胆碱浓度研究 [J]. *中国蜂业*, 2025, 76(01): 61-65.
- [62] 龚志文, 刘娜, 张祖芸, 等. 蜂王浆对蜜蜂学习记忆及相关基因 *Dnmt3* 的影响分析 [J]. *应用昆虫学报*, 2025, 62(01): 103-113.
- [63] HUANG X, AN Y, LIU J, et al. The neuroprotective effect of 10-hydroxy-2-decenoic acid in traumatic brain injury by inhibiting copper-mediated neuronal pyroptosis [J]. *Phytomedicine*, 2025, 142(156816): 156816.
- [64] SABBAGH S, ESLAMIFAR Z, BEHZADIFARD S, et al. Anti-inflammatory potential of royal jelly in multiple sclerosis disease: a double randomized clinical trial [J]. *Ann Med Surg (Lond)*, 2025, 87(3): 1301-1306.
- [65] ESLAMIFAR Z, MANUCHERI F, GHANBARI S, et al. Impact of royal jelly consumption on oxidative stress, anti-oxidant markers and physical activities of patients with multiple sclerosis: a randomized double-blind placebo-controlled study [J]. *Ir J Med Sci*, 2025, 194(6): 2307-2318.
- [66] ELSHAFFEY N, EHMEDAN S S, HAGAGY N, et al. Synergistic *Artemisia monosperma* with royal jelly: antibacterial, antioxidant, antibiofilm, and anti-azheimer assay [J]. *AMB Express*, 2025, 15(1): 45.
- [67] ATTA D M, RASHED R J, HASSAN S M A. Honey and royal jelly boost sperm parameters, ovarian follicles growth, and steroid hormones in immature rats [J]. *Open Vet J*, 2025, 15(6): 2573-2585.
- [68] MOHAMMADI A, SABBIVAND A, HAJARIAN H. Successful cryoprotectant-free vitrification of honey bee (*Apis mellifera*) drone sperm with royal jelly supplemented extender [J]. *Vet Med Sci*, 2025, 11(2): e70237.
- [69] KALKAN K T, YALCIN B, YILDIZ H T, et al. Royal jelly alleviates gemcitabine-induced ovarian toxicity: an investigation on rat models [J]. *BMC Complement Med Ther*, 2025, 25(1): 264.
- [70] RAMAZANY C M, MADADIAN M, AKBARI SANE A, et al. Vaginal royal jelly for vulvovaginal candidiasis treatment: A randomized clinical trial [J]. *Adv Biomed Res*, 2025, 14: 32.
- [71] WANG M, WANG M, GAO X, et al. Involvement of the miR-210-3P/Gbp3 axis in NLRP3 inflammasome modulation by royal jelly acid in ulcerative colitis therapy [J]. *J Funct Foods*, 2025, 128: 106791.
- [72] GUO J, YE R, GUO Q, et al. Royal jelly proteins-derived anti-inflammatory peptides protected inflammation in DSS-induced colitis mice through Src/NF- κ B signaling pathway [J]. *Food Biosci*, 2025, 74: 107808.
- [73] HUANG S, FU J, NIU Y, et al. 10-hydroxy-2-decenoic acid ameliorates liver injury secondary to DSS-induced colitis by regulating TLR9-NLRP1/NLRP3-mediated pyroptosis [J]. *J Funct Foods*, 2025, 127: 106742.
- [74] MA M, MIAO C, ZHENG M, et al. Effects of the complex of *Lactobacillus paracasei* JY091 and royal jelly on immunomodulatory effect and intestinal flora [J]. *Food Biosci*, 2025, 73: 107623.
- [75] ITATANI H, YAMAKI A, KONISHI K, et al. Fermented royal jelly enriched With 10-hydroxydecanoic acid and its potential for enhancing mucosal immunity [J]. *Food Sci Nutr*, 2025, 13(2): e70041.
- [76] ZHU F, XU J, WANG T, et al. Royal jelly enhances the social status of submissive rats by restoring balance to the disturbed gut-brain communication [J]. *Foods*, 2025, 14(5): 819.
- [77] ZHAO R, XIE Y, XU K, et al. 10-hydroxydec-2-enoic acid alleviates post-myocardial infarction inflammation and oxidative stress by modulating the TLR4 signaling axis [J]. *Phytomedicine*, 2025, 148: 157457.
- [78] JIA F, WANG Y, CHEN Z, et al. 10-Hydroxydec-2-enoic acid reduces vascular smooth muscle cell inflammation via interacting with Toll-like receptor 4 [J]. *Phytomedicine*, 2025, 140: 156534.
- [79] ABDEL-KAREEM M A, OSMAN A, FARAGE A E, et al. The antioxidant, anti-inflammatory, and antiapoptotic effects of royal jelly against isoproterenol-induced myocardial infarction in experimental rats [J]. *Eur J Anat*, 2025, 29(5): 687-698.
- [80] KARIMI E, ARAB A, KHORVASH F, et al. Effects of royal jelly consumption on clinical outcomes in patients with ischemic stroke: A triple-blind randomized controlled trial [J]. *J Funct Foods*, 2025, 125: 106688.
- [81] KEMP J A, MENDONCA M, CHRISPIM P, et al. Apitherapy with royal jelly and green propolis EPP-AF(R) improves cardiovascular risk markers in patients undergoing hemodialysis [J]. *Toxins (Basel)*, 2025, 17(8): 369.
- [82] 张洋. 蜂王浆通过血管内皮生长因子信号轴提升干细胞外泌体治疗糖尿病足溃疡效能研究 [J]. *中国医药指南*, 2025, 23(14): 21-24.
- [83] YANG W, ZOU X, ZHANG T, et al. Novel ACE-inhibitory peptides from royal jelly proteins: comprehensive screening, mechanistic insights, and endothelial protection [J]. *Foods*, 2025, 15(1): 84.
- [84] 何荣军, 任玫, 叶家豪, 等. 蜂王浆中致敏因子去除工艺及生理活性研究 [J]. *发酵科技通讯*, 2025, 54(03): 147-153.
- [85] ZHANG K, YANG F. Light-crosslinked gelatin methacrylate hydrogel prevents intervertebral disc degeneration by delivering 10-hydroxy-2-decenoic acid to inhibit ferroptosis via NF- κ B signaling [J]. *Int J Biol Macromol*, 2025, 331(Pt 2): 148454.
- [86] ROJASAWASTHIEN T, ITO T, OKAMOTO H, et al. Sebacic acid promotes osteoblast differentiation [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2025, 89(11): 1572-1578.
- [87] TOPAN C, BILGE S, DEMIRBAS A E, et al. Royal Jelly as a therapeutic intervention in medication-related osteonecrosis of the jaw (MRONJ): An animal model study [J]. *J Oral Pathol Med*, 2025, 54(4): 232-240.
- [88] SALEH S R, AGWAH R G, ELBLEHI S S, et al. Combination of 10-hydroxy-decanoic acid and ZnO nanoparticles abrogates lead acetate-induced nephrotoxicity in rats: targeting oxidative stress and inflammatory signalling [J]. *BMC Pharmacol Toxicol*, 2025, 26(1): 69.
- [89] NAGUIB G H, KAYAL R A, ABD EL-AZIZ G S, et al. Innovative dual therapy: magnesium oxide nanoparticles and royal jelly for parotid gland protection in diabetic male rats [J]. *Int J Nanomedicine*, 2025, 20: 10301-10324.
- [90] LO PRESTI V, CAVALLARO M, DI ROSA A R. Bee-derived products in aquaculture nutrition: A comprehensive review of impacts on fish performance, health, and product quality [J]. *Animals (Basel)*, 2025, 15(21): 3153.
- [91] 张雨茜, 雷明霞. 蜂王浆在农作物育苗中的应用探析 [J]. *蜜蜂杂志*, 2025, 45(01): 43-44.
- [92] BIDARNAMANI F. Royal jelly as a novel bio-stimulant for asymbiotic seed germination and protocorm development in *Phalaenopsis* [J]. *J Horticult Sci*, 2025, 20(1): 4938. 