

食品用香料 β -紫罗兰酮应用研究进展

涂雅蕙¹, 贾林金¹, 黄昆仑^{1, 2, 3}, 仝涛^{1, 2, 3, *}

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 精准营养与食品质量重点实验室, 教育部功能乳品重点实验室, 北京 100083; 2. 农业农村部转基因生物安全评价重点实验室(食品安全), 北京 100083; 3. 食品质量与安全北京实验室, 北京 100083)

摘要: β -紫罗兰酮是一种具有紫罗兰花香的天然香料, 存在于各种花卉、水果和蔬菜中, 且被证明不会对人体产生危害, 已作为一种具有很高商业价值的香料被应用于化妆品和护肤品等领域。目前的研究表明, 除芳香特性外, β -紫罗兰酮还具有抑菌防腐、增强食品感官与提高动物生产量等作用, 在食品工业与动物生产中充当着重要角色, β -紫罗兰酮的抗癌与抗炎等多种生物活性, 对医疗领域也具有重要意义。本文综述了 β -紫罗兰酮的基本性质、合成、安全性评价、在多种生产中的应用与药代动力学, 以期对 β -紫罗兰酮在食品工业、动物养殖和生物学领域中的开发及应用提供科学依据。

关键词: β -紫罗兰酮; 食品用香料; 合成; 安全性; 应用

中图分类号: TS202.3/TQ656+.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-2513(2024)7-0225-0009

doi: 10.19804/j.issn1006-2513.2024.7.028

Research progress on the application of β -ionone as a food spice

TU Yahui¹, JIA Linjin¹, HUANG Kunlun^{1, 2, 3}, TONG Tao^{1, 2, 3, *}

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Key Laboratory of Exactness Nutrition and Food Quality, Key Laboratory of Functional Dairy, Ministry of Education, Beijing 100083; 2. Key Laboratory of Safety Assessment of Genetically Modified Organism (Food Safety), the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Beijing 100083; 3. Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, Beijing 100083)

Abstract: β -Ionone is a natural fragrance with a violet flower scent, commonly found in various flowers, fruits, and vegetables. It has been proven to be safe for human body and has been extensively used in cosmetics and skincare products due to its high commercial value. Current research indicates that aside from its aromatic properties, β -ionone also possesses antibacterial and preservative effects, enhances food sensory characteristics, and improves animal productivity. It plays a crucial role in the food industry and animal production. Moreover, β -ionone exhibits diverse biological activities, including anti-cancer and anti-inflammatory effects, making it valuable in the medical field. This article reviewed the basic properties, synthesis, safety assessment, applications, and pharmacokinetics of β -ionone across different sectors, aiming to provide a scientific foundation for its further development and application in food technology, animal husbandry, and biomedical research.

Key words: β -ionone; food spices; synthesis; security; applications

收稿日期: 2023-07-28

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2021QC118); 北京市自然科学基金项目(7222249); 中国农业大学2115人才工程资助项目

作者简介: 涂雅蕙(2003-), 女, 本科, 研究方向: 食品科学与工程。E-mail: tuyawenhui@163.com

*通信作者: 仝涛(1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 营养与食品安全。E-mail: tongtao1028@cau.edu.cn

β -紫罗兰酮又称香堇酮、 β -芷香酮等，是十三碳的酮类化合物，属于 β -类胡萝卜素的内环类似物，由 β -胡萝卜素的9, 10和9', 10'裂解而来，具有维生素A活性^[1]，它是一种常见的芳香挥发物，天然地存在于多种花卉、水果和蔬菜中，例如：桂花、矮牵牛、胡萝卜、番茄、甜瓜、覆盆子、杏、李子、苹果和无花果^[2-3]。 β -紫罗兰酮在国内外均已被证明是一种安全的物质，在食品工业中常被用作调味剂或食品添加剂来改善食品的风味、保证食品品质，且由于其本身带有的紫罗兰花香，使 β -紫罗兰酮作为一种商业价值较高的香料广泛使用。目前世界上 β -紫罗兰酮的使用量在每年100~1000吨左右^[4]。

由于 β -紫罗兰酮有抑菌防腐、抗癌消炎等作用且已被证明不会对人体造成毒害，可以通过正常代谢途径排出体外，因而近年来在许多领域如食品工业、药品和生物学研究等方面备受关注。对于 β -紫罗兰酮是脂溶性物质不易溶于水这一性质，已有相关文献表明，用环糊精包含 β -紫罗兰酮可以提高卷烟的香气量、降低刺激性与改善余味、延长卷烟的存放时间和对易挥发性香料具有稳定保香等作用^[5]，但是对于使用类似环糊精等物质对 β -紫罗兰酮进行药物封装以促进人体的吸收等方面的研究较少。目前对于 β -紫罗兰酮高效的合成方法、药代动力学等方面也缺乏更深入的研究。本文综述了 β -紫罗兰酮及其衍生物的理化性质、 β -紫罗兰酮的来源与合成、在食品与动物生产上的应用、药代动力学与生理活性，分析并总结了 β -紫罗兰酮的应用前景和发展趋势，旨在为 β -紫罗兰酮在食品工业、动物养殖和药品等领域的应用提供科学依据和理论参考。

1 β -紫罗兰酮的来源与含量

β -紫罗兰酮广泛分布于植物精油、花草和水果中，在香气强烈的花草及其精油中含量较高，比如桂花^[6]、茶叶^[7]，以及变叶木精油^[8]和卫矛科植物精油^[9]等；在多汁的浆果比如覆盆子^[10]中含量也比较丰富，是一种常见的有挥发性的植物物质。表1列举了 β -紫罗兰酮的含量、来源、检测方法和产地的部分信息。

在不同品种的植物中 β -紫罗兰酮的含量差别很大(表1)，例如在中国河南产地的覆盆子中 β -紫罗兰酮相对含量高达10.46%^[10]，在变叶木精油中的 β -紫罗兰酮相对含量更高，为29.7%^[8]，但是在来自巴西的9种卫矛科植物精油和夹竹桃科植物中其相对含量大大减少，卫矛科植物精油中最高相对含量为9.76%^[9]，而夹竹桃科植物为3.25%^[11]，在中国黄茶中， β -紫罗兰酮质量分数也仅为1.10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[12]。即便是对于同一种植物，其品种不同，所含 β -紫罗兰酮也有所不同。例如对在中国浙江产地的桂花用GC-MS法检测，品种玉玲珑中检测出的 β -紫罗兰酮含量最高，为50.90%，品种软叶丹桂中检测出的 β -紫罗兰酮含量最低，为0.13%^[6]。产自中国山东省的红茶中 β -紫罗兰酮含量也与品种有关，金轩与龙井昌业中没有检测到 β -紫罗兰酮，而在白毫早中检测到的 β -紫罗兰酮相对含量最高，为1.79%^[7]。类似地，来自中国云南的绿茶中的 β -紫罗兰酮相对含量为209.51~289.27 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[13]，产自巴西的9种卫矛科植物精油中 β -紫罗兰酮相对含量为0.28%~9.76%^[9]。

总之， β -紫罗兰酮作为一种天然的挥发性有机化合物广泛存在于各种水果与植物精油中，通过对现有文献进行横向对比可知， β -紫罗兰酮在不同植物中的含量差别较大，在同一植物的不同品种中含量也有较大的差异。因此，如果需要从植物中提取天然的 β -紫罗兰酮，可以从植物的种类、产地等方面加以筛选，以确定合理的栽培方案，从而可以通过大规模作物培养获取较高的 β -紫罗兰酮收率，使得效益最大化。

表1 β -紫罗兰酮的来源与含量
Table 1 β -ionone source and content

名称	来源	检测方法	产地	含量	参考文献
β -紫罗兰酮	夹竹桃科植物	GC-MS	尼日利亚中北部 尼日尔州	3.25%	[11]
	枇杷	GC-MS	西班牙阿里坎特	-	[14]
	变叶木精油	GC-MS	尼日利亚	29.70%	[8]
	卫矛科植物精油	GC-MS	巴西	0.28%~ 9.76%	[9]
	覆盆子	GC-O	德国 Gochsheim	-	[15]
	覆盆子	GC-MS	中国河南省	10.46%	[10]

名称	来源	检测方法	产地	含量	参考文献
β-紫罗兰酮	番茄	GC	中国陕西省	-	[16]
	桂花	GC-MS	中国浙江省	0.13%~50.90%	[6]
	红茶	GC-MS	中国山东省	0%~1.79%	[7]
	绿茶	GC-O GC-MS	中国云南省	$2.10 \times 10^{-5}\%$ $\sim 2.90 \times 10^{-5}\%$	[13]

2 β-紫罗兰酮的衍生物

β-紫罗兰酮有多种天然来源且已经被鉴定,多数衍生物和β-紫罗兰酮都是植物香气的挥发性成分,并且都有着抗氧化、抗菌、抗炎活性和化感作用^[17]。通过查阅文献分析,目前,对二氢-β-紫罗兰酮^[19]和5,6-环氧-β-紫罗兰酮^[18]两种衍生物的研究较为深入,这两种β-紫罗兰酮衍生物目前的应用主要有:与果香、花香和木质香气息联系在一起^[18],在食品的感官特性中发挥着重要作用;在用甜味剂代替蔗糖从而降低食物的卡路里含量上表现出了巨大潜力,为创造低糖食品提供了新思路^[19];可以抑制或者刺激植物的生长,且在水生环境中易于生物降解,故在研发环境友好型除草剂方面具有较大潜力^[20]。

3 β-紫罗兰酮的合成

虽然β-紫罗兰酮广泛存在于自然界的各种植物中,但是在实际生产过程中会遇到一系列问题:由于提取过程中回收率低、所得到的成分复杂等原因会导致所获得的β-紫罗兰酮产量极低^[21];覆盆子作为紫罗兰酮最丰富的来源之一,每千克湿重却仅产生1.72 mg β-紫罗兰酮^[22];再由于土地稀缺、天气和气候变化未知,也给其供应链带来了不稳定性。由于以上种种原因,想通过种植以获得更多作物为手段来增加紫罗兰酮的产量,无法满足人们日益增长的对β-紫罗兰酮的需要。因此,化学合成、微生物转化和酶催化是目前生产β-紫罗兰酮的主要方法。

3.1 化学合成

Parimi 等人提供了一种较为方便的合成路线来制备β-紫罗兰酮:即利用已知的一些物质,从丙酮开始,通过反应物柠檬醛分九个步骤来制

备^[23]。沈润溥^[24]等在用α-环柠檬醛和丙酮缩合时发现β-紫罗兰酮为主要产物,而非当初设想的α-紫罗兰酮。并且发现当丙酮和柠檬烯在5%的NaOH水溶液作用下于45℃反应6h时所得到的β-紫罗兰酮收率最高,为71.6%。该方法收率高且路线简洁,且精馏回收的中间体和原料可以当作副产物直接使用,对探索大规模生产β-紫罗兰酮的工业路线有着重要的指导意义。

3.2 微生物转化

植物的生长周期较长,且植物中的β-紫罗兰酮含量较低,不足以满足需求。相比之下,微生物的生长速度远大于植物的生长速度。因此,通过在酿酒酵母或大肠杆菌等微生物宿主中表达特定的植物生物合成途径基因,以提高代谢物的产量成为了一种具有吸引力的替代方法。最近的一些研究表明,酿酒酵母在摇瓶中滴度达到33 mg/L和184 mg/L^[25];在大肠杆菌中,摇瓶中滴度达到32 mg/L,在生物反应器中滴度为500 mg/L^[26];迄今报道的工程菌株中β-紫罗兰酮滴度最高的菌株是产油酵母脂化耶氏酵母(*Yarrowia lipolytica*),其进料分批发酵产量高达1 g/L,摇瓶发酵产量略低,为358 mg/L^[27]。

相较于化学合成法,微生物转化法得到的β-紫罗兰酮属于天然成分,其价值高于人工合成的香料^[28]。因此该方法多用于批量化和商业化的生产β-紫罗兰酮。

3.3 酶催化

在微生物中生产β-紫罗兰酮时会受到CCD的限制^[25],桂花OfCCD4酶体外生物转化提取β-紫罗兰酮的最高浓度仅为71.186 mg/L。CCD1和CCD4是植物中两个重要的亚族^[29],可以通过断裂β-胡萝卜素的双键产生β-紫罗兰酮。齐志鹏等人从向日葵中克隆了一个新的类胡萝卜素切割双加氧酶1,并在大肠杆菌中表达。该重组CCD能够通过裂解多种类胡萝卜素在体外产生β-紫罗兰酮,并且HaCCD1还显示出在积累类胡萝卜素的大肠杆菌中裂解9,10(9',10')双键产生β-紫罗兰酮的高特异性,同时发现HaCCD1在pH为8.8和温度为50℃时活性最佳。研究表明,HaCCD1在生物转化或积累高滴度β-胡萝卜素的微生物细胞工厂中具有巨大的潜力,

从而可以获得更多的 β -紫罗兰酮。但是 CCD 酶在合成途径中存在速率限制问题^[28]，有待在未来得到解决。

综上所述，用于合成 β -紫罗兰酮的化学合成、微生物转化与酶催化三种方法，在实际生产中各有优势与不足。其中 β -紫罗兰酮产量最高的提取方法是酶催化法，但是由于在合成可以催化 β -紫罗兰酮生成的酶时会存在速率限制等问题，因此目前工业上用于批量化生产 β -紫罗兰酮的方法是微生物转化法。虽然一些化学合成法也可以实现大规模生产紫罗兰酮，但是由于微生物转化法得到的是天然成分的紫罗兰酮，价值更高，因此微生物转化法仍更受生产商的青睐。

4 β -紫罗兰酮的安全性评价

β -紫罗兰酮作为一种广泛应用于香水、洗发液等生活用品中的物质，人类普遍暴露于 β -紫罗兰酮中，且最大皮肤暴露浓度大约为 0.11 mg [kg wt d]⁻¹^[30]。但目前为止， β -紫罗兰酮未引起安全问题，FDA 授予 β -紫罗兰酮和一些其他紫罗兰酮衍生物在食品中预期用途是公认安全 (GRAS, 21 CFR 172.515) 的地位，而国际粮农组织 / 世卫组织食品添加剂联合委员会 (JECFA) 将单独或组合 α 和 β -紫罗兰酮确定为 0~0.1 mg [kg wt]⁻¹。一项研究表明，用 0、125、250、500 和 1000 mg [kg wt d]⁻¹ β -紫罗兰酮饲喂大鼠，仅在用最高剂量 1000 mg [kg wt d]⁻¹ 饲喂怀孕大鼠后会引发压力和痛苦——表现如毛发竖立和攻击性发声等各种毒性临床症状，高剂量诱发的母体毒性可能还会导致胚胎死亡率的增加。将暴露于 β -紫罗兰酮的大鼠的妊娠体重增加与对照组相比，发现除了最高剂量组 1000 mg [kg wt d]⁻¹ 的 β -紫罗兰酮外，任何剂量水平的 β -紫罗兰酮都没有降低妊娠子宫重量，也没有减少怀孕期间母鼠的净体重增加和产仔数或增加大鼠胎儿畸形的频率，且每窝雌性与雄性胎儿的比例也不受影响。值得一提的是，暴露于 β -紫罗兰酮并没有改变公鼠精子数量、活力和形态以及发情循环^[31]。总之，人类在所处的 β -紫罗兰酮暴露水平下，给未出生的孩子带来的风险并不大。

β -紫罗兰酮也很容易在水生生态系统中

积累。 β -紫罗兰酮在沉积物中的浓度可高达 1669.37 ng/g 干重，在湖泊上覆水中可达到 5.16 $\mu\text{g/L}$ ^[32]，在鱼类组织中达 70 ng/g^[33]。研究者通过研究 β -紫罗兰酮对斑马鱼的毒性发现， β -紫罗兰酮诱导了剂量依赖性胚胎毒性，当斑马鱼暴露在浓度高于 818.8 $\mu\text{g/L}$ 的 β -紫罗兰酮时孵化率显著降低，暴露浓度高于 1181.3 $\mu\text{g/L}$ 时观察到显著的畸形率，而 24.2 和 818.8 $\mu\text{g/L}$ 暴露组的 β -紫罗兰酮显著增加了斑马鱼的体长^[34]。不仅如此，暴露于 β -紫罗兰酮会导致斑马鱼出现色素沉着过度、幼虫运动减少的现象，而游泳活动减少是斑马鱼模型中神经退行性疾病的典型特征^[35]，因此通过文献分析我们可以推测， β -紫罗兰酮暴露会损害斑马鱼幼虫的神经发育并导致神经行为改变。

综上，现有研究已经证明 β -紫罗兰酮不会对人类胎儿构成风险，但是会影响水生生物如斑马鱼的神经发育并造成胚胎毒性。但是关于 β -紫罗兰酮对水生生态系统造成的生物效应的研究很少，数据也有限，且迄今为止还没有报告显示 β -紫罗兰酮是否影响脊椎动物的神经发育，因此未来还需要进一步的研究来评估和了解 β -紫罗兰酮对各种模式物种的毒理学影响。

5 β -紫罗兰酮在食品工业中的应用

β -紫罗兰酮有类似紫罗兰花的香气，还有木香气息并伴有果香香韵，已被证明是安全类物质。 β -紫罗兰酮作为一种风味化合物已经被当作香精香料添加在各种食品中。

5.1 百香果汁

百香果因其香味浓郁、酸甜可口、色泽宜人而被誉为“果汁之王”，研究百香果的营养成分和香味成分对充分利用百香果具有重要意义。 β -紫罗兰酮是百香果的关键致香成分之一，Casimir 等通过缺失品尝实验，并运用 GC-MS 技术，确认 β -紫罗兰酮对百香果的香味起重要作用^[36]。 β -紫罗兰酮在‘台农’品种中含量最低，为 0.77%，在‘实生株系紫果’品种中占比最高，为 4.65%^[37]。

5.2 茶

中国作为产茶与消费茶叶的大国，人们对于茶叶的品质也颇有讲究，而茶叶香气对茶叶感官

品质的贡献率达 25%，是评价茶叶品质的重要因子。研究者发现， β -紫罗兰酮在凌云白毫发酵茶^[38]的几种关键香气组分中，贡献度最大。

5.3 鸡油菌

利用 β -紫罗兰酮香味阈值较低 (7.00 $\mu\text{g/L}$) 的特性^[39]，可以发挥其在其他食品领域的功能：鸡油菌具有浓郁的杏仁香味，且蒸制后香味更加浓郁，袁雷、刘瑜等发现，鸡油菌挥发性成分中含有较大比例的 β -紫罗兰酮，是形成鸡油菌独特风味的关键香气成分^[40]。

5.4 烟草

由于 β -紫罗兰酮感官阈值较低，对食品香气品质具有较明显影响，可以增加食品的香味，提高食品品质。因此 β -紫罗兰酮等化合物被当作重要香气物质应用于烟草及烟草制品中，为卷烟加香^[41]。

5.5 调味品

β -紫罗兰酮还可以作为调味品。主要挥发性化合物 β -紫罗兰酮为挤压和膨化工艺制成的辣椒粉的风味成分，该调味品的主要特点包括轻微烤辣椒的辛辣味和细腻的米香^[42]。我国传统郫县豆瓣酱因其独特的风味而被中国和欧盟委员会注册为受保护的地理标志 (PGI) 调味品， β -紫罗兰酮与其他挥发物和非挥发物的比例可以作为风味和口感的指标，以区别于其他类型的传统发酵酱。另外，由于豆瓣酱的核心微生物是芽孢杆菌和念珠菌等，研究者还发现独特的风味代谢物比如 β -紫罗兰酮，与曲霉菌、芽孢杆菌和乳酸杆菌密切相关^[43]。还有近期一项研究发现，似乎添加 β -紫罗兰酮有助于改变人们对“甜味”和“果味”的看法，这一结果表明， β -紫罗兰酮对其他感官属性有掩蔽或增强作用^[44]，利用此特性可以将 β -紫罗兰酮作为调味品应用于食品中改善食物风味。

5.6 果蔬贮藏与食品防腐

由于 β -紫罗兰酮在抗菌与抗真菌方面有生理活性，且 β -紫罗兰酮的残留不会对人体造成副作用与危害，所以在果蔬贮藏与防腐方面， β -紫罗兰酮具有巨大潜力。灰霉病与茎腐病是猕猴桃冷藏期间最严重的疾病，但是一些天然产物如 β -紫罗兰酮可有效抑制猕猴桃中的灰霉菌造成的

水果腐烂^[45]，从而延长水果保质期。随着人们对新型功能性食品配方的兴趣日益增长，不断提高对新型食品配料的需求，用天然防腐剂取代合成防腐剂的可能性受到了广泛关注。而天然存在于多种植物或藻类中的有机化合物如 β -紫罗兰酮对许多菌种均有抑制作用，故基于 β -紫罗兰酮研发一种天然防腐剂有着较大的可行性。

6 β -紫罗兰酮在动物生产中的应用

6.1 β -紫罗兰酮在养猪生产中的应用

各种寄生虫病会对畜牧业造成重大经济损失，猪的寄生虫病中最常见的是线虫，包括兰氏类圆线虫，会导致仔猪出现贫血、腹泻、脱水、厌食、体重快速减轻、生长迟缓和死亡等现象^[46]。将幼虫暴露在 0.01、0.1、1、10 g/L 四种 β -紫罗兰酮浓度下 24 h 后，发现 β -紫罗兰酮对幼虫生长有抑制作用，但是幼虫死亡率无法达到 50%。即便如此，由于 β -紫罗兰酮是一种具有花香的调味剂且被允许用于人类的食品中，因此， β -紫罗兰酮在开发新型抗虫药物和兽医制剂等方面潜力巨大。

6.2 β -紫罗兰酮在肉鸡生产中的应用

李国伟等使用 200 日龄的雌性肉鸡进行实验，采用麦芽浆状的基础饲料 +10 mg/L β -紫罗兰酮、基础饲料 +10 g 胆固醇/kg、基础饲料 +200 g 胆固醇/kg+97 mg/L β -紫罗兰酮四种实验饮食分别饲喂雌性肉鸡，饲养 26 天后发现胆固醇的添加对脂质谱无影响。且日粮增重、采食量和增料比并没有受到饮食成分的影响，说明在目前的实验条件下， β -紫罗兰酮未能影响雌性肉鸡的生长性能^[47]。然而，Yu S G 等人发现用 100 或 250 mg/L 的 β -紫罗兰酮饲喂 2 周或 4 周龄的白里霍恩雏鸡后，雏鸡的体重平均增加 10.6% 和 22.3%^[48]，这与李国伟等人实验不符，可能是由于个体间差异较大或体重增加未达统计学意义所致。还有研究表明，用一些植物的精油饲喂肉鸡可以促进肉鸡的生长：用 1000 mg 香菜、500 mg 菊苣或 500 mg 香菜 +250 mg 菊苣提取物/kg 日粮饲喂肉鸡，发现肉鸡的体重显著增加，死亡率降低^[49]，这可归因于两种提取物有增强食欲、刺激消化和抗菌的作用^[50]。用 GC \times GC-TOFMS

法测定香菜精油成分,经鉴定含有 β -紫罗兰酮^[51],因此可以推测 β -紫罗兰酮在肉鸡体重增加方面发挥了一定的作用。

6.3 β -紫罗兰酮在水产养殖中的应用

嗅觉对鱼类的生存至关重要,因为它在识别适当的食物、种群、后代、栖息地和避免捕食者方面起作用^[52]。据HORDE数据库,中华鲟鱼的一个亚科66的OR基因与人类OR51E2基因直系同源,而OR51E2可被气味剂 β -紫罗兰酮激活,增强鱼类对一些植物气味的识别,从而进行与嗅觉有关的摄食行为。然而,在水产养殖时若蓝藻大量繁殖,蓝藻产生的有气味的化合物在鱼组织中堆积会造成鱼产品有浑浊异味^[53]。研究者在鱼肌肉中检测到高浓度的 β -紫罗兰酮,因此,在养殖中可以合理使用 β -紫罗兰酮,但是分量尤为重要。

7 β -紫罗兰酮的药代动力学

7.1 吸收

取4只体重为28~39 g、年龄大约2周的Wistar大鼠,放置在圆柱形的Lucite笼子中,将经过木炭过滤器和分子筛的新鲜空气通入笼中,空气流量保持在0.6 L/s左右,同时加入 β -紫罗兰酮使其浓度在气流中为 1.6×10^{-9} m,对照组的大鼠仅暴露于经过过滤的新鲜空气里。暴露1周和5周后处死大鼠,检测到嗅球二尖瓣细胞选择性变化的分布,与对照组进行比较,发现 β -紫罗兰酮暴露使二尖瓣细胞层中位和侧面发生中度变性^[54]。

7.2 分布

测量吸入某种香料化合物气味后的血液水平,是评估香料化合物对小鼠运动能力影响的研究的一部分。研究者将四只雌性远育瑞士小鼠作为一组进行饲养,小鼠通过吸入暴露于单一的 β -紫罗兰酮1 h,空气通过装有测试材料的玻璃管进入笼内。使用GC-MS法对吸入后0、30、60、90 min采集的血液样本进行分析,发现 β -紫罗兰酮仅检出微量(<0.1 ng/mL)^[55]。

7.3 排泄

排泄指药物以原型通过尿液、胆汁、粪便等途径排出体外。研究者连续7天将 β -紫罗兰酮

的阿拉伯胶水悬液经胃管注射给体重约3.0 kg的雄性白化家兔,剂量为 1 g [kg d]⁻¹,总给药剂量为23 g。在给药期间每天收集尿液,最后一次给药后4天收集尿液。提取尿液,分析 β -紫罗兰酮及其代谢产物。结果表明,尿液中存在5种游离代谢物。这些化合物包括3-氧代- β -紫罗兰酮、3-氧代- β -紫罗兰醇、二氢-3-氧代- β -紫罗兰醇、3-羟基- β -紫罗兰醇和 β -紫罗兰酮。此外,还检测到两种 β -紫罗兰醇的葡萄糖醛酸酯。葡萄糖醛酸酯经 β -葡萄糖醛酸酶水解,鉴定为3-氧代- β -紫罗兰醇和二氢-3-氧代- β -紫罗兰醇的葡萄糖醛酸酯^[56]。Prelog和Meier在100天内给犬科动物喂食18 g纯 β -紫罗兰酮,对尿液成分进行萃取同样发现了 β -紫罗兰酮及其代谢物,比如4-氧代- β -紫罗兰酮、4-氧基- β -紫罗兰醇和可能存在的4-氧代- β -紫罗兰醇^[57]。

8 总结与展望

综上所述, β -紫罗兰酮是一种广泛存在于自然界中的天然物质,由于其具有天然的紫罗兰酮芳香、抑菌防腐与促进动物生长等多种生物活性,且不会对人体或环境造成危害,在人体中可以被正常代谢无副作用,因而如今被较好地运用于食品生产与医疗保健领域。其衍生物也有抗氧化、抗菌、抗炎等多种活性,但是目前已知在生产生活中可以被利用的具体方向尚不丰富,需要未来更加充分地挖掘。本综述较为全面地介绍了 β -紫罗兰酮,然而目前为止,该物质的研究尚不完全成熟,有关其生产生活方面的用途与功能活性方面的研究仍不完善。有关 β -紫罗兰酮未来的研究与开发有如下几个方面:

(1) β -紫罗兰酮作为植物中的天然成分含量极少,使得想仅从天然原料中提取它既困难又昂贵。但目前人工合成 β -紫罗兰酮的途径较少,收率较低,因此进一步探索简单高效的 β -紫罗兰酮合成途径具有重要意义。目前最有潜力的是酶催化法,但是由于催化 β -紫罗兰酮生成的酶在合成途径中存在速率限制问题,有待在未来得到解决。

(2) 虽然已有研究证明 β -紫罗兰酮不会对

人类胎儿构成风险,但是会影响一些水生生物的神经发育并造成胚胎毒性,且目前无有关 β -紫罗兰酮与脊椎动物的神经发育的报道,因此 β -紫罗兰酮对各种模式物种的毒理学影响还需要进一步探究。

(3) β -紫罗兰酮在表现食物香味上起重要作用,在食品储藏方面是一种天然的防腐剂,但是目前 β -紫罗兰酮在食品工业中的应用还比较有限,未来可以充分挖掘 β -紫罗兰酮在食品生产上的潜力。

(4) 对于 β -紫罗兰酮药代动力学方面的研究较少,药物分子如何对身体起作用以及药物分子在体内如何持续与转化均需要通过未来的研究不断完善。且由于药物分子要被溶解后才能被人体吸收, β -紫罗兰酮作为一种不易溶于水的油状液体,或许可以通过使用包涵体复合物,比如环糊精以提高此类亲脂性药物的水溶性,从而更好的被人体吸收。

(5) 关于 β -紫罗兰酮对于食品与动物生产方面的探究大多局限于体外实验,仅探讨了作用效果,缺乏相应的动物实验和临床实验。比如仅通过动物体外实验发现饲喂 β -紫罗兰酮可以使肉鸡增重,而不知道对于水产鱼虾蟹类是否有类似的作用,增重的原理、机制也未知。因此,需要更多的体内和临床实验来研究 β -紫罗兰酮的疗效及其分子机制。

(6) 随着人们尤其是女性群体逐渐对生活品质、外在形象等方面的重视,对工艺改进、效果优良的化妆品、护肤品等产品的市场需求扩大,因 β -紫罗兰酮有紫罗兰的香气且有抗菌、诱导细胞凋亡和修复皮肤光老化等功能活性,故在研发化妆品、香水、抗癌药物和保健食品上有较大的开发前景。

参考文献:

- [1] Auldrige M E, McCarty D R, Klee H J. Plant carotenoid cleavage oxygenases and their apocarotenoid products [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, 9 (3): 315-321.
- [2] Ibdah M, Azulay Y, Portnoy V, et al. Functional characterization of CmCCD1, a carotenoid cleavage dioxygenase from melon [J]. *Phytochemistry*, 2006, 67 (15): 1579-1589.
- [3] Nawade B, Shaltiel-Harpaz L, Yahyaa M, et al. Analysis of apocarotenoid volatiles during the development of *Ficus carica* fruits and characterization of carotenoid cleavage dioxygenase genes [J]. *Plant Science: an International Journal of Experimental Plant Biology*, 2020, 290: 110292.
- [4] Lalko J, Lapczynski A, McGinty D, et al. Fragrance material review on ionone [J]. *Food and Chemical Toxicology: an International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 2007, 45 (Suppl 1): S251-S257.
- [5] 谭国治, 毛多斌, 刘春晖, 等. 环糊精对易挥发性烟用香料保香作用的研究 [J]. *昆明理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 37 (2): 78-82.
- [6] Fu J X, Hou D, Wang Y G, et al. Identification of floral aromatic volatile compounds in 29 cultivars from four groups of *Osmanthus fragrans* by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2019, 60 (4): 611-623.
- [7] Wang B Y, Chen H M, Qu F F, et al. Identification of aroma-active components in black teas produced by six Chinese tea cultivars in high-latitude region by GC-MS and GC-O analysis [J]. *European Food Research and Technology*, 2022, 248 (3): 647-657.
- [8] Lawal O A, Ogunwande I A, Gbetoyon F S, et al. Chemical composition and insecticidal activity of essential oils of four varieties of *Cordia alliodora* (L.) from Nigeria [J]. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2018, 21 (3): 840-847.
- [9] Camargo K C, Duarte L P, Vidal D M, et al. Chemodiversity of essential oils from nine species of Celastraceae [J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2020, 17 (5): e2000107.
- [10] 辛秀兰, 张强, 赵新颖, 等. 主成分分析法评价树莓中挥发性香气成分气味活度值 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13 (2): 395-403.
- [11] Okhale S, Igwe O, Egharevba H, et al. GC-MS analyses of the volatile oil constituents of the leaf of *Landolphia owariensis* P. beaur (Apocynaceae) [J]. *European Journal of Medicinal Plants*, 2016, 13 (2): 1-5.
- [12] Shi Y L, Wang M Q, Dong Z B, et al. Volatile components and key odorants of Chinese yellow tea (*Camellia sinensis*) [J]. *LWT*, 2021, 146: 111512.
- [13] He C J, Li Z Y, Liu H X, et al. Characterization of the key aroma compounds in *Semnostachya menglaensis* Tsui by gas chromatography-olfactometry, odor activity values, aroma recombination, and omission analysis [J]. *Food Research International*, 2020, 131: 108948.
- [14] Besada C, Sanchez G, Gil R, et al. Volatile metabolite profiling reveals the changes in the volatile compounds of new spontaneously generated loquat cultivars [J]. *Food Research International*, 2017, 100: 234-243.
- [15] Lang S, Ozcelik M, Kulozik U, et al. Processing of raspberries to dried fruit foam: Impact on major odorants [J]. *European Food Research and Technology*, 2020, 246 (12): 2537-2548.
- [16] Cheng G T, Li Y S, Qi S M, et al. *SICC1A* enhances the aroma quality of tomato fruits by promoting the synthesis of

- carotenoid-derived volatiles [J]. Foods, 2021, 10 (11) : 2678.
- [17] Aloum L, Alefshat E, Adem A, et al. Ionone is more than a violet's fragrance: A review [J]. Molecules, 2020, 25 (24) : 5822.
- [18] Waché Y, Bosser-DeRatuld A, Lhuguenot J C, et al. Effect of cis/trans isomerism of beta-carotene on the ratios of volatile compounds produced during oxidative degradation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51 (7) : 1984-1987.
- [19] Xiao Z B, Jiang X Y, Niu Y W. Study on the interaction of sweet protein (thaumatin) with key aroma compounds in passion fruit juice using electronic nose, ultraviolet spectrum, thermodynamics, and molecular docking [J]. LWT, 2022, 162: 113463.
- [20] Jančula D, Maršálek B. Critical review of actually available chemical compounds for prevention and management of cyanobacterial blooms [J]. Chemosphere, 2011, 85 (9) : 1415-1422.
- [21] Paparella A, Shaltiel-Harpaza L, Ibdah M. β -ionone: Its occurrence and biological function and metabolic engineering [J]. Plants, 2021, 10 (4) : 754.
- [22] Beekwilder J, van der Meer I M, Simic A, et al. Metabolism of carotenoids and apocarotenoids during ripening of raspberry fruit [J]. BioFactors, 2008, 34 (1) : 57-66.
- [23] Vani P V S N, Chida A S, Srinivasan R, et al. Synthesis of β -IONONE[#] [J]. Synthetic Communications, 2001, 31 (2) : 219-224.
- [24] 沈润溥, 胡四平, 宋小华, 等. 由 α -环柠檬醛直接缩合制备 β -紫罗兰酮的研究 [J]. 高校化学工程学报, 2011, 25 (3) : 538-542.
- [25] López J, Bustos D, Camilo C, et al. Engineering *Saccharomyces cerevisiae* for the overproduction of β -ionone and its precursor β -carotene [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2020, 8: 578793.
- [26] Zhang C Q, Chen X X, Lindley N D, et al. A "plug-n-play" modular metabolic system for the production of apocarotenoids [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2018, 115 (1) : 174-183.
- [27] Lu Y P, Yang Q Y, Lin Z L, et al. A modular pathway engineering strategy for the high-level production of β -ionone in *Yarrowia lipolytica* [J]. Microbial Cell Factories, 2020, 19 (1) : 49.
- [28] Qi Z P, Tong X Y, Bu S, et al. Cloning and characterization of a novel carotenoid cleavage dioxygenase 1 from *Helianthus annuus* [J]. Chemistry & Biodiversity, 2022, 19 (1) : e202100694.
- [29] Meng N, Yan G L, Zhang D, et al. Characterization of two *Vitis vinifera* carotenoid cleavage dioxygenases by heterologous expression in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Molecular Biology Reports, 2019, 46 (6) : 6311-6323.
- [30] Lalko J, Lapczynski A, McGinty D, et al. Fragrance material review on beta-ionone [J]. Food and Chemical Toxicology: an International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association, 2007, 45 (Suppl 1) : S241-S247.
- [31] Pinto F C M, De-Carvalho R R, De-Oliveira A C A X, et al. Study on the developmental toxicity of β -ionone in the rat [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology: RTP, 2018, 97: 110-119.
- [32] Liu X S, Shi C F, Xu X G, et al. Spatial distributions of β -cyclocitral and β -ionone in the sediment and overlying water of the west shore of Taihu Lake [J]. The Science of the Total Environment, 2017, 579: 430-438.
- [33] Deng X W, Xie P, Qi M, et al. Microwave-assisted purge-and-trap extraction device coupled with gas chromatography and mass spectrometry for the determination of five predominant odors in sediment, fish tissues, and algal cells [J]. Journal of Chromatography A, 2012, 1219: 75-82.
- [34] Zhou W C, Wang Y M, Wang J L, et al. β -Ionone causes endocrine disruption, hyperpigmentation and hypoactivity in zebrafish early life stages [J]. The Science of the Total Environment, 2022, 834: 155433.
- [35] Jin M, Li N, Sheng W L, et al. Toxicity of different zinc oxide nanomaterials and dose-dependent onset and development of Parkinson's disease-like symptoms induced by zinc oxide nanorods [J]. Environment International, 2021, 146: 106179.
- [36] Luo Y, Wang K, Zhuang H N, et al. Elucidation of aroma compounds in passion fruit (*Passiflora alata* Ait) using a molecular sensory approach [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46 (9) : e14224.
- [37] 潘葳, 刘文静, 韦航, 等. 不同品种百香果果汁营养与香气成分的比较 [J]. 食品科学, 2019, 40 (22) : 277-286.
- [38] 阳景阳, 梁光志, 李子平, 等. 基于气味活度值法的凌云白毫发酵茶香气特征分析 [J]. 食品科学, 2023, 44 (14) : 336-343.
- [39] Kanani D M, Nikhade B P, Balakrishnan P, et al. Recovery of valuable tea aroma components by pervaporation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42 (26) : 6924-6932.
- [40] 袁雷, 刘瑜, 扎罗, 等. 林芝野生鸡油菌营养成分分析与评价 [J]. 中国农业大学学报, 2019, 24 (4) : 73-81.
- [41] 张雅雯. 潜香化合物的合成及其卷烟加香研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [42] 李达, 傅维. 挤压膨化技术制备辣椒粉调味营养品风味研究 [J]. 中国调味品, 2016, 41 (7) : 104-105, 110.
- [43] Yang M L, Huang J, Zhou R Q, et al. Characterizing the microbial community of Pixian Doubanjiang and analysing the metabolic pathway of major flavour metabolites [J]. LWT, 2021, 143: 111170.
- [44] Jaeger S R, Reinbach H C, Roigard C M, et al. Sensory characterisation of food and beverage stimuli containing β -ionone and differences between individuals by genotype for rs6591536 [J]. Food Research International, 2014, 62: 205-214.
- [45] Ward B G, Poole P R, Hill R A, et al. Postharvest application of natural products to control Botrytis storage rot in kiwifruit [J]. Acta Horticulturae, 1998, 464 (464) : 225-230.

- [46] MULIANI N K, DWINATA I M, APSARI I A P. The prevalence and risk factors of strongyloides ransomi infection in pigs maintained at landfill suwung, denpasar [J]. Indonesia Medicus Veterinus, 2019, 8 (2) : 155-162.
- [47] Lee K W, Everts H, Lankhorst, et al. Addition of β -ionone to the diet fails to affect growth performance in female broiler chickens [J]. Animal Feed Science and Technology, 2003, 106 (1-4) : 219-223.
- [48] Yu S G, Abuirmeileh N M, Qureshi A A, et al. Dietary beta-ionone suppresses hepatic 3-hydroxy-3-methylglutaryl coenzyme A reductase activity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1994, 42 (7) : 1493-1496.
- [49] Gazwi H S S, Mahmoud M E, Toson E M A. Analysis of the phytochemicals of *Coriandrum sativum* and *Cichorium intybus* aqueous extracts and their biological effects on broiler chickens [J]. Scientific Reports, 2022, 12 (1) : 6399.
- [50] Adisa R A, Choudhary M I, Adewoye E O, et al. Hypoglycaemic and biochemical properties of *Cnestis ferruginea* [J]. African Journal of Traditional, Complementary, and Alternative Medicines: AJTCAM, 2010, 7 (3) : 185-194.
- [51] Eyres G, Dufour J P, Hallifax G, et al. Identification of character-impact odorants in coriander and wild coriander leaves using gas chromatography-olfactometry (GCO) and comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry (GC x GC-TOFMS) [J]. Journal of Separation Science, 2005, 28 (9-10) : 1061-1074.
- [52] Yabuki Y, Koide T, Miyasaka N, et al. Olfactory receptor for prostaglandin F₂ α mediates male fish courtship behavior [J]. Nature Neuroscience, 2016, 19 (7) : 897-904.
- [53] Ruan E D, Aalhus J L, Summerfelt S T, et al. Determination of off-flavor compounds, 2-methylisoborneol and geosmin, in salmon fillets using stir bar sorptive extraction-thermal desorption coupled with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2013, 1321: 133-136.
- [54] Pinching A J, Døving K B. Selective degeneration in the rat olfactory bulb following exposure to different odours [J]. Brain Research, 1974, 82 (2) : 195-204.
- [55] Buchbauer G, Jirovetz L, Jäger W, et al. Fragrance compounds and essential oils with sedative effects upon inhalation [J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 1993, 82 (6) : 660-664.
- [56] Ide H, Toki S. Metabolism of β -ionone. Isolation, characterization and identification of the metabolites in the urine of rabbits [J]. Biochemical Journal, 1970, 119 (2) : 281-287.
- [57] PRELOG V, MEIER H L. Organ extracts and urine. The biochemical oxidation of β -ionone in the animal body [J]. Helvetica Chimica Acta, 1950, 33: 1276-1285.

行业组织 品牌展览

2024国际天然提取物和健康食品配料展览会

(FIC-健康展2024)

暨第二十三届全国秋季食品添加剂和配料展览会

展出时间：2024年11月21 ~ 23日

展出地点：广州中国进出口商品交易会展馆B区

主办单位：中国食品添加剂和配料协会 《中国食品添加剂》杂志社有限公司
北京中食添会展中心

网址：www.cfaa.cn 电话：010-59795833