

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.06.027

基于文献计量的葡萄与葡萄酒中褪黑素研究现状与发展趋势

苏晨雪^{1,2},汪蕾³,付冬艳³,王家琪^{1,4},李嘉宁^{1,4},赵丹青^{1,2*},孙翔宇^{1,4*}

(1. 西北农林科技大学葡萄酒学院,陕西 杨凌 712100;2. 宁夏农产品质量标准与检测技术研究所,宁夏银川 750002;3. 宁夏贺兰山东麓葡萄酒产业园区管委会技术服务处,宁夏 银川 750104;4. 陕西省特色果品定向设计加工工程技术研究中心,陕西 杨凌 712100)

摘要:褪黑素是存在于动物、植物、单细胞和多细胞藻类以及细菌中的吲哚胺,在生长发育调节中扮演着重要角色,它影响植物的生长节律、根系生长、光合作用和抗逆性等方面。为把握国内外葡萄与葡萄酒中褪黑素的应用研究现状与发展趋势,推测葡萄与葡萄酒中褪黑素的研究发展趋势,采用文献计量学方法,以 Web of Science 核心合集和中国知网数据库作为数据集来源,通过 Cite Space 分析工具进行关键词、国家、作者等方面的共现分析,并对比文献的出版物分布和国内外研究时间分布。通过对关键词和其他数据的挖掘可以得出,其研究主要集中在葡萄与葡萄酒中褪黑素来源、检测方法以及褪黑素在葡萄抗性调控中的作用等。该文将为褪黑素在葡萄生理调控及其在葡萄酒品质形成中的应用提供理论依据,促进葡萄和葡萄酒产业的不断发展。

关键词:葡萄;葡萄酒;褪黑素;文献计量学;Cite Space 分析

Research Status and Trends of Melatonin in Grapes and Wine: A Visual Analysis Based on Bibliometrics

SU Chenxue^{1,2}, WANG Lei³, FU Dongyan³, WANG Jiaqi^{1,4}, LI Jianing^{1,4}, ZHAO Danqing^{1,2*}, SUN Xiangyu^{1,4*}

(1. College of Enology, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Ningxia Institute of Agricultural Products Quality Standards and Testing Technology, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. Administrative Committee of Wine Industry of the East Foothill of Ningxia Helan Mountains, Yinchuan 750104, Ningxia, China; 4. Shaanxi Engineering Research Center of Characteristic Fruit Directional Design and Machining, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Melatonin is an indoleamine present in animals, plants, single-celled and multicellular algae, and bacteria. It plays a crucial role in regulating growth and development, influencing various aspects of plant physiology including growth rhythms, root development, photosynthesis, and stress resistance. To grasp the research status and development trends of applying melatonin in grapes and wine in China and other countries and to speculate on the research trends of melatonin in grapes and wine, this study conducted co-occurrence analyses of keywords, countries, and authors with a bibliometric method using Cite Space analysis tool with Web of Science Core Collection and the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database as data set sources. The distribution of publications and the timeline of research in China and other countries were also compared. Through the exploration of keywords and other data, it was found that research primarily focused on the sources and detection methods of melatonin in grapes and wine, as well as its role in regulating grape resistance. This study aimed to provide a theoretical basis for the physiological regulation of grapes by melatonin and its application in shaping wine quality, thereby promoting the continuous development of the grape and wine industries.

Key words: grapes; wine; melatonin; bibliometrics; Cite Space analysis

基金项目:陕西省科技计划(2024NC-BSLD-01、2024NC-ZDCYL-04-22、2024NC-LSTD-001、2024QCY-KXJ-083);兵团科技计划(2024AB042);宁夏回族自治区重点研发计划(2024BBF02003)

作者简介:苏晨雪(2000—),女(汉),硕士研究生,研究方向:葡萄与葡萄酒学。

*通信作者:赵丹青(1989—),女,助理研究员,研究方向:葡萄与葡萄酒工程;孙翔宇(1988—),男,教授,研究方向:葡萄与葡萄酒学。

引文格式:

苏晨雪,汪蕾,付冬艳,等.基于文献计量的葡萄与葡萄酒中褪黑素研究现状与发展趋势[J].食品研究与开发,2025,46(6):205-215.

SU Chenxue, WANG Lei, FU Dongyan, et al. Research Status and Trends of Melatonin in Grapes and Wine: A Visual Analysis Based on Bibliometrics[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 205-215.

葡萄是全球种植最广泛的经济作物之一,其深加工产品葡萄酒备受喜爱^[1]。葡萄与葡萄酒中富含生物活性化合物,对人体健康益处良多。褪黑素是一种广泛存在于动物、植物、单细胞和多细胞藻类以及细菌中的吲哚胺,可参与人体多项生理代谢调节^[2],具有抗氧化、增强免疫、抗肿瘤等功能,尤其在阿尔茨海默病^[3]方面表现显著。研究发现褪黑素在红葡萄酒中含量较高^[4]。一些研究表明,葡萄与葡萄酒中的褪黑素可帮助调节生物钟、改善睡眠质量,对心血管健康、抗氧化、抗炎以及某些疾病有潜在作用。适量饮用红葡萄酒可能有助于提高人体褪黑素水平,对人体健康有益。然而,需注意过量饮酒可能带来的负面影响,包括睡眠质量下降和其他健康问题。因此,本文以核心数据库(Web of Science, WOS)和中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)学术期刊数据库为主要数据来源,采用文献计量学方法进行统计分析,旨在探讨目前关于葡萄和葡萄酒中褪黑素应用研究现状和未来发展趋势,有助于国内科研人员了解国内外相关主题的研究现状,以期为该领域的未来研究方向提供参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源与工具

截止到2024年4月11日,以WOS核心合集数据库作为外文文献数据库,按照检索式进行主题词高级检索“TS=(wine melatonin)或TS=(grape melatonin)”,未设置时间限制,检索得到共225篇外文文献。以

CNKI学术期刊数据库作为中文文献数据库,按照主题或篇名、篇关摘进行高级检索(检索式=“葡萄”并含“褪黑素”或者检索式=“葡萄酒”并含“褪黑素”),未设置时间限制,检索共得到71篇中文文献。

1.2 研究工具方法

使用Citespace6.1.R7软件进行作者、关键词、国家、机构关系网络可视化分析,参数设置如下。WOS的时间跨度(timespan)参数设置为1998年~2024年,阈值(selection criteria)参数设置为g-index(k=25),Link Retaining Factor (LRF)=3.0, L/N=10, Look Back Years (LBY)=5, e=1.0。鉴于检索文献数目及保存更多的信息的需求,因此并未使用任何裁剪算法(Pruning: none)。

CNKI的时间跨度(timespan)参数设置为2011~2024年,阈值(selection criteria)参数设置为g-index(k=25), Link Retaining Factor (LRF)=3.0, L/N=10, Look Back Years (LBY)=5, e=1.0。鉴于检索文献数目及保存更多信息的需求,因此并未使用任何裁剪算法(Pruning: none)。使用Excel 16.54进行统计分析及图表绘制。

2 研究发展趋势分析

2.1 发文年代分布分析

文献数量在某一研究领域是评估贡献者效率的重要指标之一,同时也部分反映了该领域的发展水平^[5]。对WOS和CNKI中检索文献的年发文数量进行分析,结果见图1。

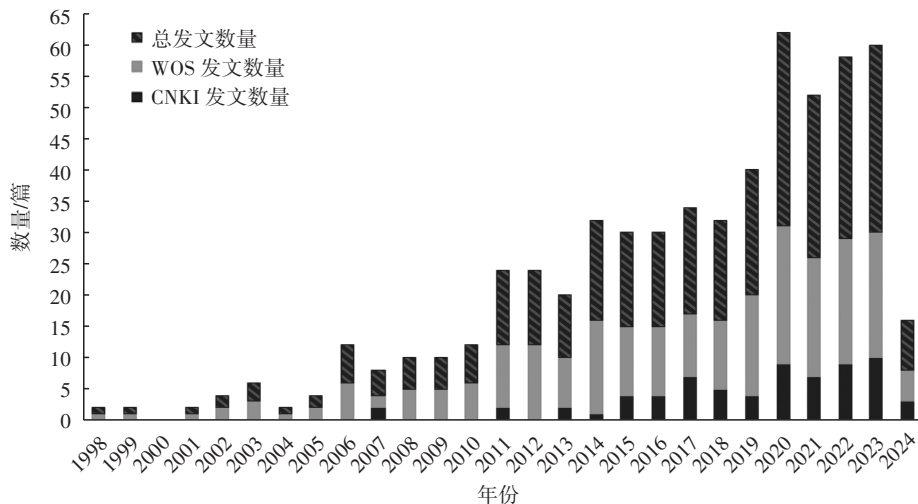


图1 WOS 发文数量、CNKI 发文数量及二者总发文数量变化

Fig.1 The annual changes of publications in WOS and CNKI and their total publications

通过观察 WOS 检索的相关文献的年发文量变化可以得出,在英文文献中对葡萄与葡萄酒中褪黑素的相关研究呈现较好的总体增长趋势。在近十年间,在该领域研究领域的发文量虽然波动较大,但基本保持在较高的数量水平,年发文量全部稳定在 20 篇以上。2019 年起发文数量持续增加,说明近年来开展相关主题的科学研究的持续在增长,不断有科研成果产出。由图 1 可知,WOS 数据库 2020 年和 CNKI 数据库中 2023 年相关文献数量最多,分别为 22 篇和 10 篇。

2.2 期刊分布分析

对 WOS 核心合集中关于葡萄与葡萄酒中褪黑素的相关研究进行出版期刊分析,共有 120 种期刊刊登过相关文献,参考检索结果中的文献数量及分析结果,对其中刊登数量 3 篇及以上的期刊进行分析比较,表 1 展示了刊登相关文献数量为 3 篇及以上的期刊。

表 1 WOS 主要期刊发表文献数量情况
Table 1 The number of literature published in WOS major journals

序号	期刊名称	发文数量/篇	发文比例/%
1	Journal of Pineal Research	19	8.44
2	Food Chemisry	13	5.78
3	Food Function	8	3.56
4	Journal of Agricultural and Food Chemistry	7	3.11
5	Frontiers in Microbiology	6	2.67
6	Frontiers in Plant Science	6	2.67
7	Antioxidants	5	2.22
8	Food Analytical Methods	5	2.22
9	Foods	5	2.22
10	Molecules	5	2.22
11	Electrophoresis	4	1.78
12	Fermentation Basel	4	1.78
13	Journal of the Science of Food and Agriculture	4	1.78
14	LWT-Food Science and Technology	4	1.78
15	Critical Reviews in Food Science and Nutrition	3	1.33
16	Horticulturæ	3	1.33
17	Horticulture Research	3	1.33
18	International Journal of Molecular Sciences	3	1.33
19	Scientific Reports	3	1.33

由表 1 可知,Journal of Pineal Research 为发表量最大的期刊,发表了 19 篇,在所有发表文献中的占比为 8.44%。其次是 Food Chemistry,期刊相关文献刊登数量在 10 篇以上,在所有文献占比 5.78%。从出版期刊分布来看,Journal of Pineal Research、Food Chemistry、Food Function、Journal of Agricultural and Food Chemistry 等相关期刊是此类文献的主要刊登期刊。

对 CNKI 核心合集中关于葡萄与葡萄酒中褪黑素的相关研究进行出版期刊分析,共有 50 种期刊刊登过相关文献,参考检索结果中的文献数量及分析结果,对其中刊登数量 2 篇及以上的期刊进行分析比较,表 2 展示了刊登相关文献数量为 2 篇及以上的期刊。

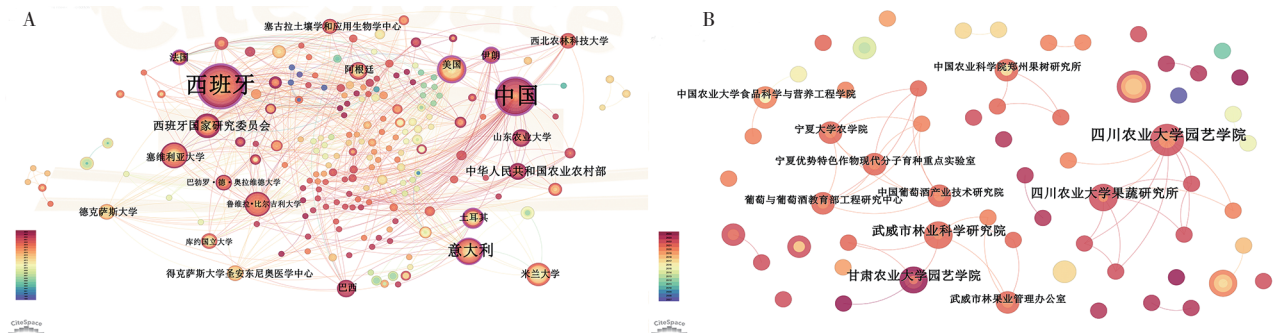
表 2 CNKI 主要期刊发表文献数量情况
Table 2 The number of literature published in CNKI major journals

序号	期刊名称	发文数量/篇	发文比例/%
1	植物生理学报	9	12.70
2	中国农业科学	3	4.20
3	园艺学报	3	4.20
4	果树学报	3	4.20
5	中国果树	2	2.80
6	中国果业信息	2	2.80
7	核农学报	2	2.80
8	江苏农业科学	2	2.80
9	林业科技通讯	2	2.80
10	落叶果树	2	2.80
11	食品工业科技	2	2.80
12	食品科学	2	2.80

由表 2 可知,植物生理学报为发文数量最多的期刊,发表了 9 篇,在所有发表文献中的占比为 12.70%,其次是中国农业科学、园艺学报、果树学报分别发表了 3 篇,在所有发表文献中的占比均为 4.20%。从出版期刊分布来看,植物生理学报、中国农业科学、园艺学报、果树学报等相关期刊是此类文献的主要刊登期刊。

2.3 国家共现及研究机构分析

国家和机构共现及发展趋势见图 2。



A. WOS 数据库; B. CNKI 数据库。

图 2 国家和机构共现及发展趋势

Fig.2 The co-occurrence and development trend maps of countries and institutions

由图 2A 可知,1998 年~2024 年,有 37 个不同的国家致力于相关研究。着重对相关文献出版数量较多的 11 个国家进行分析,主要有西班牙(65 篇)、中国(48 篇)、意大利(30 篇)、美国(21 篇)、巴西(13 篇)、土耳其(12 篇)、阿根廷(9 篇)、伊朗(7 篇)、法国(7 篇)、加拿大(6 篇)以及德国(6 篇)。从发展趋势来看欧洲地区的意大利、法国和土耳其等国家开展相关研究较早,美洲地区的美国开展相关研究也较早。近些年来欧洲地区的西班牙也展开了相关研究并且发文量位居第一;紧随其后的是位于亚洲的中国,相关文献发文量较多,位居第二;发文量排名第三的是意大利。中国作为近几年来发文量较高的国家之一,具有良好的发展趋势。在国家间合作关系分析下可以发现,西班牙是与其他国家联系最多的国家,其次是中国、美国、意大利。西班牙、中国、美国、伊朗、法国的节点中心性不小

于 0.1,且与其他国家合作较为紧密。

由图 2B 可知,相关的研究机构分布主要以地区为主,联系相对紧密,跨区域的合作研究较少。其中四川农业大学、甘肃农业大学为中文文献发表的主要研究机构。CNKI 机构合作之间的联系主要以地域相近的机构合作为主。从时间跨度来看,近年来以中国机构为主的合作网络在亚洲地区逐渐形成,并呈现出更加紧密的合作关系(2017 年~2024 年),欧洲地区的以西班牙为主的合作网络也始于 2017 年。中国作为新世界葡萄酒国家,与各国合作较为紧密,西班牙作为近年来展开相关研究的老牌葡萄酒国家势头正盛。

WOS 核心数据库葡萄与葡萄酒中褪黑素相关主题研究发文数量大于等于 8 篇的发文机构如表 3 所示。

由表 3 可知,塞维利亚大学以 20 篇的发表量位居

表 3 WOS 主要发文机构文献数量情况

Table 3 The number of literature from the main issuing agencies in WOS

序号	发文机构	所属国家	发文数量/篇	占全部比例/%
1	塞维利亚大学	西班牙	20	8.89
2	鲁维拉·比尔吉利大学	西班牙	19	8.44
3	西班牙国家研究委员会	西班牙	19	8.44
4	米兰大学	意大利	18	8.00
5	中华人民共和国农业农村部	中国	13	5.78
6	塞古拉土壤学和应用生物学中心	西班牙	11	4.89
7	山东农业大学	中国	9	4.00
8	得克萨斯大学圣安东尼奥医学中心	美国	8	3.56
9	得克萨斯大学	美国	8	3.56
10	西北农林科技大学	中国	8	3.56
11	巴勃罗·德·奥拉维德大学	西班牙	8	3.56
12	库约国立大学	西班牙	8	3.56

第一,占全部刊登文献的 8.89%,随后是意大利、中国、美国的研究机构。其中共有 3 个中国的研究机构上榜,分别是中华人民共和国农业农村部、山东农业大学、西北农林科技大学。

表 4 展示了 CNKI 相关主题文献发表量大于等于 2 篇的研究机构。

表 4 CNKI 主要发文机构文献数量情况

Table 4 The number of literature from the main issuing agencies in CNKI

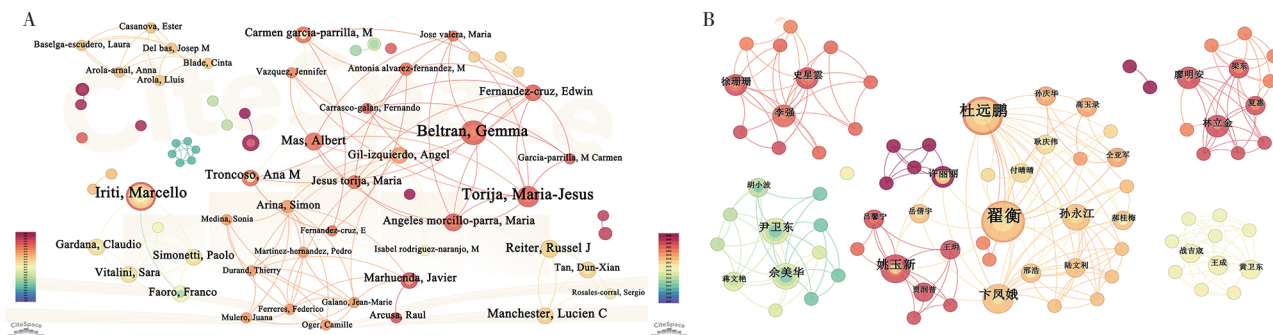
序号	发文机构	发文数量/篇	占全部比例/%
1	山东农业大学	15	21.13
2	四川农业大学	7	9.86
3	南华大学	4	5.63
4	宁夏大学	4	5.63
5	南华大学	3	4.23
6	云南农业大学	3	4.23
7	山西农业大学	2	2.82

由表 4 可知,山东农业大学以 15 篇的发文数量位居第一,占全部刊登中文文献的 21.13%;其次是四川农业大学发文数量为 7 篇,占全部中文文献的 9.86%。

2.4 作者共现分析

作者共现及发展趋势见图 3。

图 3 中的节点直径大小代表作者所发表的论文数目多少,连线则表示相互协作关系。由图 3A 可知,WOS 数据库发文最多的是 Iriti, Marcello, 发文总量达 19 篇,占 1998~2024 年度 WOS 数据库该领域文献量的 8.48%。其次是 Torija, María-Jesús, Beltran, Gemma 和 Troncoso, Ana M, 发文总量均为 12 篇。此外,图 3(A)还展示了自 1998 年以来,累计发表论文超过 3 篇的作者,可以看出 Iriti, Marcello 开始进行相关研究要早于 Torija María-Jesús 等作者,近些年来与其他研究者的联系不紧密,而以 Torija, María-Jesús 为主进行的相关研究虽起步较晚,但近年来与其他研究者的联系



A. WOS 数据库; B. CNKI 数据库。

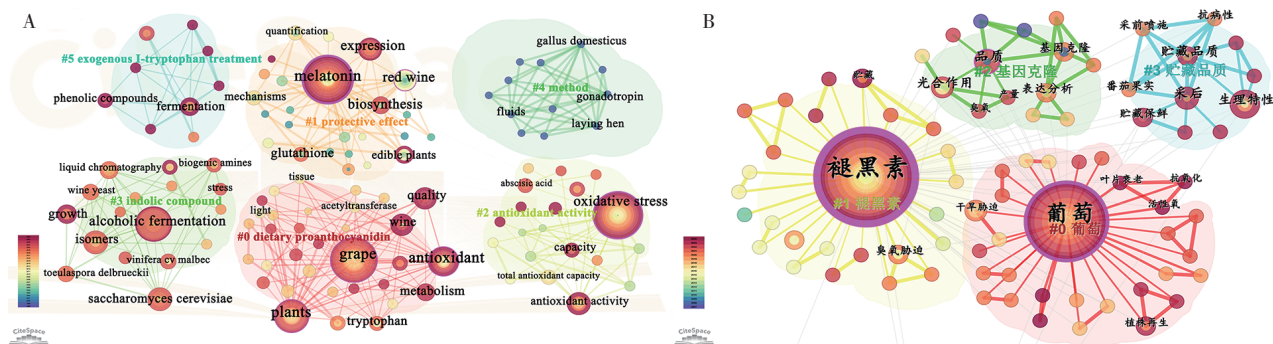
图3 作者共现及发展趋势

Fig.3 The co-occurrence and development trend maps of authors

密切,对于该领域的深度探究具有重要意义。由图 3B 可知,CNKI 数据库发文最多的是翟衡,发文总量达 10 篇,占 2007 年~2024 年 CNKI 数据库中中文文献该领域文献量的 14.10%;仅次于翟衡的是杜远鹏,发文数量为 8 篇,占 2007 年~2024 年的 CNKI 数据库中中文文献该领域文献量的 11.28%。

2.5 关键词聚类分析

关键词反映了文献所要表现的各个主题之间的相互关系,是文章的核心概括,分析关键词有利于研究本领域的热点。图 4 为葡萄与葡萄酒中褪黑素的应用研究关键词聚类图谱。该图谱每一个节点的尺寸代表了该词出现的次数。



A. WOS 数据库; B. CNKI 数据库。

图4 关键词聚类分析

Fig.4 Cluster maps of keywords

由图 4A 可知,从 WOS 核心合集数据库筛选了 6 个关键词聚类,其中以“dietary proanthocyanidin(膳食原花青素)”为主题的关键词聚类最大,该主题下以“antioxidant(抗氧化剂)”“grape(葡萄)”和“plants(植物)”为出现频次较多关键词,其中心性不小于 0.1,即该节点作为桥梁与其他节点连接较多。聚类大小排名第二的是主题为“protective effect(保护作用)”的聚类。其中“melatonin(褪黑素)”和“red wine(红葡萄酒)”为主要的关键词,且其中心性都不小于 0.1。由主要的关键词可推断出褪黑素的抗氧化作用有助于提高葡萄酒品质,是褪黑素在葡萄与葡萄酒研究的主要趋势。葡萄浆果的“melatonin treatment(褪黑素治疗)”也是褪黑素在葡萄与葡萄酒研究的热门主题。其中“oxidative stress(氧化胁迫)”为中心性较高的关键词。

由图 4B 可知,从 CNKI 数据库筛选了 4 个关键词聚类,其中以“葡萄”为主题的关键词聚类最大,该主题下

的关键词“葡萄”中心性不小于 0.1,该节点作为桥梁与其他节点连接较多。聚类大小排名第二的主题为“褪黑素”,其中关键词“褪黑素”中心性不小于 0.1;次之关键词为“臭氧胁迫”与“贮藏”,表明在葡萄与葡萄酒中褪黑素的相关研究聚焦在臭氧胁迫与葡萄的贮藏。

3 热点研究内容

通过对葡萄与葡萄酒中褪黑素相关研究进行文献计量学分析结合关键词共现分析可以得出,目前主要的热点研究内容集中在葡萄酒中褪黑素的检测方法、褪黑素在葡萄抗性调控中的作用、褪黑素对葡萄贮藏保鲜的作用等方面,接下来对热点内容进行具体分析。

3.1 葡萄与葡萄酒中褪黑素

3.1.1 葡萄中的褪黑素

褪黑素最初在意大利西北部种植的一些意大利和法国葡萄品种的果皮中被发现,含量通常为 0.005~

0.96 ng/g^[4]。类似的研究也在阿根廷的葡萄品种中进行,其中果皮的褪黑素含量为 0.6~1.2 ng/g^[6]。加拿大种植的梅洛葡萄品种显示出,在不同的生长阶段,整个浆果的褪黑素浓度在 100~150 μg/g 之间变化^[7]。

葡萄中褪黑素含量可能受到多种因素的影响,包括品种、生长条件和成熟度等。研究发现,不同的葡萄品种可能采用不同的褪黑素合成途径,其中 *VvSNATI* 和 *VvT5H* 两种基因在调节葡萄浆果中褪黑素的合成中扮演关键角色^[8]。在葡萄成熟过程中,果皮中的褪黑素含量会减少,而在种子和果肉中则会增加^[9]。

3.1.2 葡萄酒中的褪黑素

研究表明不同品种的葡萄酒中褪黑素的含量不同,这不仅取决于葡萄品种,也取决于农业化学处理和酿酒工艺^[10]。Gomez 等^[11]研究发现,葡萄提取物中检测到褪黑素为 120~160 ng/g,而成品葡萄酒中检测到褪黑素异构体的浓度为 18~24 ng/mL,同分异构体的浓度随着酒精浓度的增加而增加。这说明葡萄浆果中的褪黑素不会在酿酒过程中转移到葡萄酒中。同样,外源添加的褪黑素并没有改变所生产葡萄酒中褪黑素含量,这表明葡萄酒中的褪黑素主要取决于酿酒酵母而非葡萄果实^[12],酵母在葡萄酒中褪黑素的产生中起着关键作用^[13]。Sprenger 等^[14]证实了在高浓度酵母中褪黑素可以通过色氨酸合成途径生成。然而,研究也发现在酿酒酵母发酵过程中,补充色氨酸并未增加褪黑素含量^[11],推测这可能与所使用的酵母菌株有关。Rodriguez-Naranjo 等^[15]证明不同酿酒酵母在发酵过程中合成褪黑素存在差异。

褪黑素水平在葡萄汁发酵开始时最高,随后逐渐下降^[16]。随着细胞数量的增加,产生褪黑素的能力也会降低。在大多数酵母中,滞后期或指数期似乎是褪黑素生产的关键阶段。研究推测褪黑素可能作为一种生长信号分子,延长酵母的存活时间^[15],研究人员判断褪黑素可能对乙醇胁迫下的酿酒葡萄球菌具有保护作用^[17]。在发酵后期,非酵母菌释放的褪黑素可能会促进占主导地位酵母的生长^[17]。同时,因为非酿酒酵母菌株具有较高的褪黑素产生能力,所以生产过程中将酿酒酵母与非酿酒酵母混合发酵可能是提高葡萄酒中褪黑素水平的有效手段。Jiao 等^[16]发现葡萄酒中褪黑素水平的差异是由区域酵母种群造成的。此外,优势菌株负责葡萄酒中的褪黑素水平,特别是自然发酵开始时的非酵母菌种群。非酵母菌对褪黑素生产的贡献不容忽视,且可能比酿酒酵母的贡献更为显著,混合发酵显著提高了葡萄酒中褪黑素的含量。研究人员已经证明了葡萄表面不同酵母与当地葡萄酒褪黑素水平之间的关系。然而,不同酵母菌间褪黑素合成能力差异的分子调控机制有待进一步研究。

此外,褪黑素还可在葡萄酒苹乳发酵过程中由乳

酸菌合成,并对褪黑素含量有显著影响^[15]。Fracassetti 等^[18]研究证实了酒类酒球菌生产褪黑素的能力。经过苹乳发酵处理后,红酒中色氨酸衍生物含量明显增加,特别是在乙醇浓度较高的情况下。

3.1.3 葡萄酒中褪黑素的检测方法

由于葡萄酒是一种复杂的基质,且褪黑素的含量很低,因此需要适当的提取技术。不同的样品制备方法如固相萃取(solid-phase extraction, SPE)^[12,17-18]、填充吸附剂微萃取^[19]、超声分散液-液微萃取(ultrasound dispersive liquid-liquid microextraction, US-DLLME)^[20]、SPE 的小型化形式-填充吸附剂微萃取(microextraction by packed sorbent, MEPS)^[19]、液-液萃取(liquid-liquid extraction, LLE)^[21]等被报道用于葡萄酒中褪黑素的分析。其中液-液萃取(LLE)和固相萃取(SPE)这两种技术需要大量的溶剂和长时间的萃取。分散液-液微萃取(dispersive liquid-liquid microextraction, DLLME)是 Rezaee 等^[22]为了克服这些不便而提出的一种小型化的常规液-液微萃取技术。与超声步骤相结合的 DLLME 可以提高目标代谢物的提取效率^[23]。超声分散液-液微萃取(US-DLLME)的优点是使用体积较小的非极性溶剂,简单、快速、成本低、分析物回收率高^[20]。在 SPE 中,选择性受到限制,因为相同的经典吸附剂(化学官能化二氧化硅,离子交换)和流动相通常用于从完全不同的基质中提取和纯化完全不同的分析物^[24]。

Carneiro 等^[20]将超声分散液-液微萃取方法用于葡萄酒样品中褪黑素的预浓缩,并采用高效液相色谱-二极管阵列检测器(high-performance liquid chromatography with diode-array detection, HPLC-DAD)进行测定。建立、优化并验证了超声分散液-液微萃取方法,使 HPLC-DAD 法测定葡萄酒样品中的褪黑素含量成为可能。超声波的使用省去了分散试剂的添加。超声分散液-液微萃取法测定葡萄酒样品中的褪黑素,线性响应范围为 0.70~15 000 μg/L,相关系数为 0.998 5,检测限低、定量限低、精密度高、准确度高。HPLC-DAD 方法操作简单、成本低、快速、灵敏^[20]。

葡萄酒中褪黑素含量的研究发现,采用高效液相色谱串联质谱(high-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)技术测得的含量相较于酶联免疫吸附试验(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)技术高出数十倍^[13]。褪黑素的两性亲和性和植物提取物的化学复杂性可能导致其浓度的变异^[25]。但是 HPLC-MS/MS 过于复杂和昂贵,使得高效液相色谱-荧光检测器(high-performance liquid chromatography with fluorescence detector, HPLC-FL)更具成本效益,适合于分析葡萄酒中的褪黑素,特别是在样品纯化和浓缩后^[12,18]。

Eremia 等^[26]研究了固相萃取法(SPE)、QuEChERS

法和分散液液微萃取法(DLLME)等方法的提取效果,并对提取过程中可能出现的可变参数进行了优化,以获得最佳提取效果。采用 HPLC-FL 方法对葡萄酒中褪黑素的分析进行了验证,包括测量不确定度,并评估了提取回收率的准确性。固相萃取法(SPE)技术优势在于快速、简便、廉价、有效、坚固。DLLME 被认为是一种速度快、简单、高效、成本低、有吸引力的样品前处理方法。QuEChERS 技术也被应用于葡萄酒样品中提取褪黑素,具有操作简单、有机试剂消耗少的优势^[27-28]。Eremia 等^[26]研究表明,DLLME 结合 HPLC-FL 法是对葡萄酒中褪黑素进行测量的最佳方法。研究结果强调了葡萄酒中褪黑素水平受酿酒过程的影响,同时验证了 DLLME 结合 HPLC-FL 的方法在分析褪黑素方面的有效性。

在葡萄酒生产领域,准确测量褪黑素含量有助于进行品质控制和质量保障。通过了解褪黑素的确切含量,酿酒师可以优化酿造过程,确保葡萄酒的稳定品质,满足市场需求。这对于保持产品一致性和提升品牌形象至关重要。

3.2 褪黑素对葡萄与葡萄酒的影响

3.2.1 褪黑素在葡萄抗性调控中的作用

盐碱胁迫对葡萄生长和生物合成有负面影响。研究发现,盐胁迫使葡萄根系中褪黑素减少,幼嫩器官中五羟色胺增加,严重抑制叶片光系统活性^[29-30]。然而,通过外源施加褪黑素,可以促进其在不同器官中的代谢和分布,提高叶片中五羟色胺和新根褪黑素含量,从而减轻对光合作用的损害。类似地,在碱胁迫下,葡萄根、茎和叶中褪黑素含量降低^[31]。而外源褪黑素处理则有助于维持离子平衡、减缓膜系统伤害,提高抗氧化酶的活性并清除碱性胁迫产生的过量活性氧^[32]。总体而言,褪黑素在葡萄中对抗盐碱胁迫具有重要作用。

在干旱胁迫下,葡萄幼苗根系和叶片中褪黑素含量显著增加,达到正常条件下的 7 倍。研究表明,外源添加褪黑素可以缓解干旱胁迫对葡萄幼苗的伤害^[33]。此外,褪黑素还能保护葡萄叶绿体膜结构和基粒片层结构,在干旱胁迫下增加叶片厚度和栅栏组织紧实度,并调控气孔关闭以降低水分散失。外源褪黑素还能提高干旱胁迫下葡萄内源褪黑素含量以及与之关联的五羟色胺和 2-羟基褪黑素含量,从而缓解对叶片光抑制的影响^[34]。这表明褪黑素在增强葡萄对干旱胁迫的适应性和抵抗性方面发挥了积极作用。

在轻度缺铁胁迫下,葡萄顶叶表现失绿或黄白色,光合代谢受到抑制;褪黑素能调节细胞壁延伸的物理过程以诱导植物根系生长,使根系投影面积、总根长和根系总体积增加^[35]。陈玉鹏等^[36]研究发现,缺铁胁迫下,葡萄呈现长势不良、株高不均、叶片黄化、茎秆细小、根系发育不良等状况;添加外源褪黑素后,植株生

长状况有较好的恢复,各项指标明显优于缺铁处理。推测外源褪黑素可能通过参加必需物质的合成途径、调节植物激素的合成量和充当各类酶的辅基,促进蛋白质的表达,改善葡萄根系的生长环境,促进正常的植株生长,提高葡萄对逆境的抗性。

在臭氧胁迫下,外源褪黑素提高了葡萄叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素的含量以及叶绿素 a/叶绿素 b 值,通过调节光系统的能量分配,缓解臭氧胁迫对叶片的氧化损伤,提高光保护机制,保护叶片的光合功能^[37]。褪黑素提高叶绿素含量和光合作用能力的原因在于褪黑素诱导的光呼吸增强,这种增强作为一种保护机制能够耗散过剩的光能,最大限度地减少葡萄光合碳同化和叶片光呼吸的损伤,从而实现了提高叶绿素含量、光合能力和促进叶片淀粉积累的目的^[38]。通过对比褪黑素、乙烯合成抑制剂、臭氧和乙烯利处理的结果,刘闯等^[39]发现褪黑素、乙烯合成抑制剂以及两者复合处理可以减少臭氧胁迫下葡萄叶片的黄化面积,减轻叶片损伤,进一步推测褪黑素通过调控乙烯途径来缓解臭氧胁迫的作用。

高温对葡萄植株、花期和浆果造成严重危害,例如叶片枯黄脱落、开花延迟、授粉减少、浆果表面出现污点、果实缩小以及日灼病等,直接影响了葡萄的产量和品质^[40-41]。在高温胁迫下,葡萄幼苗通过增强超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)和过氧化氢酶(catalase from micrococcus, CAT)活性来应对高温信号,提高耐高温能力。褪黑素处理能够提升葡萄幼苗叶片中的可溶性糖和可溶性蛋白含量,增加渗透调节物质,从而增强其对高温的耐受能力,减轻高温引起的伤害。SOD、POD 和 CAT 是植物中重要的细胞保护酶,主要作用是清除活性氧,维持细胞内动态平衡,保持细胞膜稳定性^[42]。研究表明,褪黑素预处理能够减少葡萄幼苗叶片中丙二醛含量,增强 SOD、POD 和 CAT 活性,提升清除活性氧能力,进一步降低对细胞膜的伤害^[43]。外源褪黑素在高温胁迫下能够通过增加抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,降低丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量,提高葡萄幼苗抗高温逆境的能力。此外,在高温胁迫下,光合速率、蒸腾速率和气孔导度明显降低,施加外源褪黑素后可显著减轻高温对光合器官的损伤,使其在高温下得到显著提高^[44],与齐晓媛等^[45]研究结果一致。

低温胁迫对植物光合作用和能量产生造成负面影响,导致物质合成受阻,细胞内活性氧积累,引发膜脂过氧化、电解质失衡、细胞代谢紊乱等问题,严重时可能导致植物死亡。面对这种胁迫,植物能够调动自身的抗氧化防御机制,产生一系列抗氧化酶(如 SOD、CAT、POD 等)以及抗氧化剂^[46],通过直接或间接途径还原积累的活性氧^[47],从而减少低温对植物造成的伤

害。受到低温胁迫的葡萄喷施外源褪黑素后,能减轻叶片受冻程度,酶活性有所提高,但SOD、CAT、POD活性没有明显变化,其他研究表明,施用外源褪黑素能够通过提高SOD、POD、CAT等常规抗氧化酶的活性,减少细胞膜脂质过氧化、保护叶绿体的结构和功能以及保持细胞膜的完整性,从而有效降低低温对葡萄植株造成的伤害。其效果与一些植物生长调节剂和细胞膜稳态剂相似^[47-48]。

外源褪黑素处理在抗灰霉病方面表现出显著效果,能够有效降低发病率,减轻病害的严重程度^[49]。褪黑素可通过抑制植物体内过氧化物的积累,缓解细胞膜脂过氧化,进而提高葡萄灰霉病抗性^[50-51]。另外也有研究表明,外源施加褪黑素处理后,葡萄果实黑曲霉病发病率显著下降,同时增加了抗病相关的次生代谢物含量和防御酶活性。因此研究人员推测,褪黑素可能通过激活葡萄果实内部的抗病蛋白,调节抗病相关代谢网络,从而有效地抑制黑曲霉病的发生和扩散^[52]。

3.2.2 褪黑素对葡萄贮藏保鲜的作用

葡萄果实贮藏过程中受到生理和病理因素的影响,逐渐老化,这会导致果实的色泽、质地、风味等发生变化。其中,最为明显的包括脱水、脱落、腐烂、干梗和褐变等现象,这直接影响了果实的外观和商业价值^[53]。因此,葡萄果实品质的评价指标不仅包括糖分、酸度、酚类物质和花色苷含量等^[54-55],还需考虑果实在贮藏过程中的变化情况。褪黑素可有效地抑制果实采后失水、落粒及腐败,维持果实硬度、可溶性固形物及可滴定酸含量,维持葡萄果实品质,且褪黑素可有效抑制果实中 O_2 、 H_2O_2 的累积,并减少MDA含量,减缓细胞膜脂的过氧化,维持细胞膜结构与功能完整^[56]。研究表明,褪黑素能够抑制葡萄果实的呼吸与蒸腾,维持其原本的色泽,并延长其抗菌能力,对提高采后果实品质具有重要意义^[57]。然而,由于葡萄品种、处理方式、采收时间以及外界环境的影响,褪黑素的用量及贮存时间也各不相同。因此,在选择褪黑素时,要结合不同的葡萄品种、不同的贮存条件,对其进行合理的处理,并选择合适的喷施浓度。另外,褪黑素的浓度效应可能与不同温度条件下果实中褪黑素的含量水平相关;低温可能会促进外源褪黑素的吸收或内源合成,从而提高果实中褪黑素的含量,具体的机制还需要进一步深入研究^[58]。

由此可见,外源褪黑素在葡萄采后贮藏保鲜起到了关键作用,对果实的品质维持具有重要意义。在采后处理中,外源添加褪黑素能显著降低果实的落果率和腐烂率,在维持果实品质方面发挥着重要作用。另外,褪黑素还可以延缓采后果实的老化进程,保留其特有的味道。未来可为葡萄制品在运输及储存期间的保鲜提供参考。同时经过外源褪黑素处理后,果实中酯

类、醛类和醇类的积累得到促进,同时萜烯含量降低。这不仅有助于减少过氧化氢的积累,提高超氧化物歧化酶活性,还减少了抗坏血酸过氧化物酶和过氧化氢酶的活性,从而有效减缓果实的腐烂过程。

3.2.3 褪黑素对葡萄酒的作用

研究表明,褪黑素处理提高了葡萄酒的多酚含量和抗氧化能力^[59]。褪黑素处理显著提高了除根皮素外的酚类化合物含量,从而使葡萄酒中总化合物含量增加了85.8%。褪黑素处理后丁香酸和香豆酸含量分别提高1.86倍和1.81倍,绿原酸和肉桂酸的增量接近一倍^[56]。褪黑素处理提高了葡萄酒中总酚、类黄酮、花青素和原花青素的含量,使葡萄酒中花青素的总数增加了17.2%。研究表明,褪黑素通过促进多酚积累来增强抗氧化能力。总酚、总黄酮、总花青素和原花青素在褪黑素处理过的葡萄酒中显著增加,这4种化合物的含量在葡萄果实中与抗氧化性能呈显著相关^[60]。此外,在褪黑素处理的葡萄酒中,非类黄酮、黄烷醇和花青素化合物也发生了很大的变化。研究表明,褪黑素通过广泛地改变酚类化合物的含量和组成来增强葡萄酒的抗氧化能力。褪黑素处理可提高红葡萄酒中酚类物质的含量。已发表的数据表明,褪黑素本身作为一种信号分子^[61],影响种子或叶片中脱落酸和赤霉素的水平^[62],并增加乙烯的产生,此外,脱落酸和乙烯在调节葡萄果实成熟过程中发挥关键作用,包括调节多酚代谢^[63]。

此外,花色苷是红色酿酒葡萄中最重要的天然着色剂,直接影响葡萄酒的颜色。因此,其对葡萄果实品质的影响十分关键。研究人员发现,在喷施外源褪黑素后,花色苷含量呈现持续增加的趋势,这与之前的研究结果一致^[64]。

4 结论

本研究采用文献计量学方法,对葡萄与葡萄酒中褪黑素应用的相关主题进行搜集与分析。研究结果显示,近年来相关文献不断增加,反映了科研人员对褪黑素与葡萄、葡萄酒关系的持续关注。西班牙和意大利在这一领域的研究中处于领先地位,中国和美国等国家的研究也在不断增长。研究报告中褪黑素含量存在差异,需要深入、准确的研究以获取可靠的数据,所以研究可侧重于开发更便捷、快速、低成本的褪黑素含量检测方法,全面了解葡萄与葡萄酒中褪黑素的分布。同时,在使用外源褪黑素时,必须考虑其对葡萄和葡萄酒品质的影响,以免对品质造成不良影响。未来的研究方向可以聚焦于深入了解褪黑素生物合成和代谢相关酶的结构和功能、这些基因在不同发育阶段组织中的表达和调控,以及褪黑素生物合成和代谢的信号转导途径。此外,在植物对非生物和生物胁迫的响应中,

褪黑素受体和信号转导的响应机制也需进一步研究。科研人员应致力于研究更好的科学技术,确保褪黑素的使用能够服务于葡萄酒品质的提升。研究人员也应促使葡萄与葡萄酒朝着健康营养的方向发展,更深入地了解褪黑素的生物活性及其在葡萄和葡萄酒中的作用机制,以确保科研成果对酒类行业的发展有实质性的促进作用。

参考文献:

- [1] NGCOBO M E K, DELELE M A, CHEN L, et al. Investigating the potential of a humidification system to control moisture loss and quality of 'Crimson Seedless' table grapes during cold storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 86: 201-211.
- [2] PAREDES S D, KORKMAZ A, MANCHESTER L C, et al. Phyto-melatonin: A review[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(1): 57-69.
- [3] BRAAM W, SMITS M G, DIDDEN R, et al. Exogenous melatonin for sleep problems in individuals with intellectual disability: A meta-analysis[J]. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 2009, 51(5): 340-349.
- [4] IRITI M, ROSSONI M, FAORO F. Melatonin content in grape: Myth or panacea?[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(10): 1432-1438.
- [5] MUKHERJEE D, LIM W M, KUMAR S, et al. Guidelines for advancing theory and practice through bibliometric research[J]. *Journal of Business Research*, 2022, 148: 101-115.
- [6] STEGE P W, SOMBRA L L, MESSINA G, et al. Determination of melatonin in wine and plant extracts by capillary electrochromatography with immobilized carboxylic multi-walled carbon nanotubes as stationary phase[J]. *Electrophoresis*, 2010, 31(13): 2242-2248.
- [7] MURCH S J, HALL B A, LE C H, et al. Changes in the levels of indoleamine phytochemicals during véraison and ripening of wine grapes[J]. *Journal of Pineal Research*, 2010, 49(1): 95-100.
- [8] GUO S H, XU T F, SHI T C, et al. Cluster bagging promotes melatonin biosynthesis in the berry skins of *Vitis vinifera* cv. *Cabernet Sauvignon* and Carignan during development and ripening[J]. *Food Chemistry*, 2020, 305: 125502.
- [9] VITALINI S, GARDANA C, ZANZOTTO A, et al. The presence of melatonin in grapevine (*Vitis vinifera* L.) berry tissues[J]. *Journal of Pineal Research*, 2011, 51(3): 331-337.
- [10] VITALINI S, GARDANA C, ZANZOTTO A, et al. From vineyard to glass: Agrochemicals enhance the melatonin and total polyphenol contents and antiradical activity of red wines[J]. *Journal of Pineal Research*, 2011, 51(3): 278-285.
- [11] GOMEZ F J V, RABA J, CERUTTI S, et al. Monitoring melatonin and its isomer in *Vitis vinifera* cv. Malbec by UHPLC-MS/MS from grape to bottle[J]. *Journal of Pineal Research*, 2012, 52(3): 349-355.
- [12] RODRIGUEZ-NARANJO M I, GIL-IZQUIERDO A, TRONCOSO A M, et al. Melatonin: A new bioactive compound in wine[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(4/5): 603-608.
- [13] RODRIGUEZ-NARANJO M I, GIL-IZQUIERDO A, TRONCOSO A M, et al. Melatonin is synthesised by yeast during alcoholic fermentation in wines[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(4): 1608-1613.
- [14] SPRENGER J, HARDELAND R, FUHRBERG B, et al. Melatonin and other 5-methoxylated indoles in yeast: Presence in high concentrations and dependence on tryptophan availability[J]. *CYTOLOGIA*, 1999, 64(2): 209-213.
- [15] RODRIGUEZ-NARANJO M I, TORIJA M J, MAS A, et al. Production of melatonin by *Saccharomyces* strains under growth and fermentation conditions[J]. *Journal of Pineal Research*, 2012, 53(3): 219-224.
- [16] JIAO J, XIA Y, YANG M L, et al. Differences in grape-surface yeast populations significantly influence the melatonin level of wine in spontaneous fermentation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 163: 113568.
- [17] SUNYER-FIGUERES M, MAS A, BELTRAN G, et al. Protective effects of melatonin on *Saccharomyces cerevisiae* under ethanol stress[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(11): 1735.
- [18] FRACASSETTI D, FRANCESCO LO FARO A F, MOIOLA S, et al. Production of melatonin and other tryptophan derivatives by *Oenococcus oeni* under winery and laboratory scale[J]. *Food Microbiology*, 2020, 86: 103265.
- [19] FRACASSETTI D, VIGENTINI I, LO FARO A F F, et al. Assessment of tryptophan, tryptophan ethylester, and melatonin derivatives in red wine by SPE-HPLC-FL and SPE-HPLC-MS methods[J]. *Foods*, 2019, 8(3): 99.
- [20] CARNEIRO A F, CARNEIRO C N, GOMEZ F J V, et al. Doehlert matrix for the optimization of ultrasound dispersive liquid-liquid microextraction of melatonin in Argentine and Brazilian wine samples[J]. *Microchemical Journal*, 2020, 159: 105313.
- [21] KABIR A, LOCATELLI M, ULUSOY H. Recent trends in microextraction techniques employed in analytical and bioanalytical sample preparation[J]. *Separations*, 2017, 4(4): 36.
- [22] REZAEI M, ASSADI Y, MILANI HOSSEINI M R, et al. Determination of organic compounds in water using dispersive liquid-liquid microextraction[J]. *Journal of Chromatography A*, 2006, 1116(1/2): 1-9.
- [23] ANDRUCH V, BURDEL M, KOCÚROVÁ L, et al. Application of ultrasonic irradiation and vortex agitation in solvent microextraction [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2013, 49: 1-19.
- [24] DUGHERI S, MARRUBINI G, MUCCI N, et al. A review of micro-solid-phase extraction techniques and devices applied in sample pretreatment coupled with chromatographic analysis[J]. *Acta Chromatographica*, 2021, 33(2): 99-111.
- [25] GOMEZ F J V, HERNÁNDEZ I G, MARTINEZ L D, et al. Analytical tools for elucidating the biological role of melatonin in plants by LC-MS/MS[J]. *Electrophoresis*, 2013, 34(12): 1749-1756.
- [26] EREMIA S A V, ALBU C, RADU G L, et al. Different extraction approaches for the analysis of melatonin from cabernet sauvignon and feteasca neagra wines using a validated HPLC-FL method[J]. *Molecules*, 2023, 28(6): 2768.
- [27] WANG X, YOU J, LIU A L, et al. Variation in melatonin contents and genetic dissection of melatonin biosynthesis in sesame[J]. *Plants*, 2022, 11(15): 2005.
- [28] SU M C, CHENG Y Y, ZHANG C C, et al. Determination of the levels of tryptophan and 12 metabolites in milk by liquid chromatography-tandem mass spectrometry with the QuEChERS method[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(11): 9851-9859.
- [29] 卞凤娥, 肖秋红, 郝桂梅, 等. 根施褪黑素对 NaCl 胁迫下葡萄内源褪黑素及叶绿素荧光特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(5): 952-963.
- [30] BIAN Feng'e, XIAO QiuHong, HAO Guimei, et al. Effect of root-applied melatonin on endogenous melatonin and chlorophyll fluorescence characteristics in grapevine under NaCl stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(5): 952-963.
- [30] 韩国民, 刘茜, 唐美玲, 等. 外源褪黑素对 NaCl 胁迫下 5BB 葡萄叶片生理特性的影响[J]. *浙江农业学报*, 2019, 31(4): 556-564.

- HAN Guomin, LIU Xi, TANG Meiling, et al. Effects of exogenous melatonin on physiological characteristics of 5BB grape leaves under NaCl stress[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(4): 556-564.
- [31] 付晴晴, 耿庆伟, 翟衡, 等. 外源褪黑素对 NaHCO₃ 胁迫下“福客”葡萄根系和叶片生理特性的影响[J]. *植物生理学报*, 2017, 53(2): 248-256.
- FU Qingqing, GENG Qingwei, ZHAI Heng, et al. Effects of exogenous melatonin on physiological characteristics of 'Frontenac' grape roots and leaves under NaHCO₃ stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(2): 248-256.
- [32] YANG Z Y, YANG X X, WEI S M, et al. Exogenous melatonin delays leaves senescence and enhances saline and alkaline stress tolerance in grape seedlings[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2024, 19(1): 2334511.
- [33] 吴艳迪, 焦健, 姜建福, 等. 褪黑素 UPLC-MS/MS 检测方法优化及其对干旱和盐胁迫下葡萄幼苗褪黑素含量的分析[J]. *西北植物学报*, 2017, 37(8): 1657-1663.
- WU Yandi, JIAO Jian, JIANG Jianfu, et al. Optimization of UPLC-MS/MS method for melatonin detection and analysis of melatonin content in grape seedlings under the conditions of salt and drought stress with the optimized method[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(8): 1657-1663.
- [34] 卞凤娥, 唐翠花, 邢浩, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下葡萄内源褪黑素及叶绿素荧光特性的影响[J]. *植物生理学报*, 2018, 54(10): 1615-1623.
- BIAN Feng'e, TANG Cuihua, XING Hao, et al. Effect of exogenous melatonin on endogenous melatonin and chlorophyll fluorescence characteristics in grapevine under drought stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(10): 1615-1623.
- [35] MIR A R, FAIZAN M, BAJGUZ A, et al. Occurrence and biosynthesis of melatonin and its exogenous effect on plants[J]. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 2020, 89(2): 1.
- [36] 陈玉鹏, 陈文绪, 孙泽东, 等. 缺铁胁迫下葡萄试管苗对外源褪黑素的生长和生理响应[J]. *果树学报*, 2023, 40(2): 300-308.
- CHEN Yupeng, CHEN Wenxu, SUN Zedong, et al. Growth and physiological response of *in vitro* seedlings to exogenous melatonin under iron deficiency stress in grape[J]. *Journal of Fruit Science*, 2023, 40(2): 300-308.
- [37] 耿庆伟, 邢浩, 郝桂梅, 等. 外源褪黑素对臭氧胁迫下‘赤霞珠’葡萄叶片光合作用的影响[J]. *园艺学报*, 2016, 43(8): 1463-1472.
- GENG Qingwei, XING Hao, HAO Guimei, et al. Effect of exogenous melatonin on photosynthesis of 'cabernet sauvignon' grape leaves under ozone stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(8): 1463-1472.
- [38] 王亚芳, 陈征文, 杨兴旺, 等. 外源褪黑素对 O₃ 胁迫下葡萄叶片光合碳同化和光呼吸的影响[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(4): 847-855.
- WANG Yafang, CHEN Zhengwen, YANG Xingwang, et al. Effects of exogenous melatonin on photosynthetic carbon assimilation and photorespiration in grapevine leaves under O₃ stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(4): 847-855.
- [39] 刘闯. 褪黑素通过抑制乙烯合成缓解葡萄叶片臭氧胁迫[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- LIU Chuang. Melatonin alleviates ozone stress in grape leaves by inhibiting ethylene synthesis[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021.
- [40] 陈永川, 刘丽媛, 班海峰. 干热风对葡萄花期的危害及防御措施[J]. *新疆农业科技*, 2020(6): 9.
- CHEN Yongchuan, LIU Liyuan, BAN Haifeng. Harm of dry and hot wind to grape flowering period and its preventive measures[J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2020(6): 9.
- [41] 钱尚帅. 高温对葡萄花期的危害及防御措施[J]. *农业技术与装备*, 2021(4): 171-172.
- QIAN Shangshuai. The harm and defensive measures of high temperature to the flowering period of grape[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2021(4): 171-172.
- [42] 孙军利, 赵宝龙, 郁松林. 外源水杨酸对高温胁迫下葡萄幼膜脂过氧化及抗氧化酶活性的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2015, 33(3): 275-280.
- SUN Junli, ZHAO Baolong, YU Songlin. Effects of exogenous salicylic acid (SA) on membrane lipid peroxidation and the activity of antioxidant enzyme in grape seedlings under high temperature stress[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2015, 33(3): 275-280.
- [43] 李元生, 徐珊珊, 李强, 等. 外源褪黑素对高温胁迫下葡萄幼苗生理特性的影响[J]. *林业科技通讯*, 2021(4): 66-69.
- LI Yuansheng, XU Shanshan, LI Qiang, et al. Effects of exogenous melatonin on physiological characteristics of grape seedlings under high temperature stress[J]. *Forest Science and Technology*, 2021(4): 66-69.
- [44] 李国英, 代红军. 外源激素对高温胁迫下赤霞珠葡萄叶片光合性能及果实品质的影响[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(8): 2277-2285.
- LI Guoying, DAI Hongjun. Effects of exogenous hormones on leaf photosynthetic performance and fruit quality of *Cabernet Sauvignon* grape under high temperature stress[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2024, 55(8): 2277-2285.
- [45] 齐晓媛, 王文莉, 胡少卿, 等. 外源褪黑素对高温胁迫下菊花光合和生理特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2496-2504.
- QI Xiaoyuan, WANG Wenli, HU Shaoqing, et al. Effects of exogenous melatonin on photosynthesis and physiological characteristics of chrysanthemum seedlings under high temperature stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2496-2504.
- [46] JIANG M Y, ZHANG J H. Effect of abscisic acid on active oxygen species, antioxidative defence system and oxidative damage in leaves of maize seedlings[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2001, 42(11): 1265-1273.
- [47] LI J D, LV K, WU J P, et al. Exogenous melatonin promotes cold tolerance in grape seedlings: Physiological, transcriptomic, and functional evidence[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(50): 19970-19985.
- [48] 王芳, 王淇, 赵曦阳. 低温胁迫下植物的表型及生理响应机制研究进展[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(15): 5144-5153.
- WANG Fang, WANG Qi, ZHAO Xiyang. Research progress of phenotype and physiological response mechanism of plants under low temperature stress[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(15): 5144-5153.
- [49] 王宪璞, 代瑛姿, 郭宏扬, 等. 不同葡萄品种灰霉病抗性鉴定及褪黑素抗病机理初探[J]. *核农学报*, 2024, 38(4): 674-684.
- WANG Xianpu, DAI Yingzi, GUO Hongyang, et al. Identification of resistance to *Botrytis cinerea* in different grape varieties and preliminary study of the resistance mechanism mediated by melatonin[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(4): 674-684.
- [50] MIRSHEKARI A, MADANI B, YAHIA E M, et al. Postharvest melatonin treatment reduces chilling injury in sapota fruit[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(5): 1897-1903.
- [51] LI Z Z, ZHANG S J, XUE J X, et al. Exogenous melatonin treatment induces disease resistance against *Botrytis cinerea* on post-

- harvest grapes by activating defence responses[J]. *Foods*, 2022, 11(15): 2231.
- [52] 石淼, 张珍珍, 高琛瑜, 等. 褪黑素处理对采后‘赤霞珠’葡萄黑曲霉病抗性的影响[J]. *植物生理学报*, 2024, 60(3): 461-470.
SHI Miao, ZHANG Zhenzhen, GAO Chenyue, et al. Effects of melatonin treatment on resistance to *Aspergillus carbonarius* in postharvest ‘Cabernet Sauvignon’ grape[J]. *Plant Physiology Journal*, 2024, 60(3): 461-470.
- [53] 陈浩, 张润光, 付露莹, 等. 1-MCP与Na₂S₂O₅复合保鲜剂对‘红提’葡萄采后生理及贮藏品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(7): 1192-1204.
CHEN Hao, ZHANG Runguang, FU Luying, et al. Effects of 1-MCP and Na₂S₂O₅ composite preservative on postharvest physiology and storage quality of *Red Globe* grapes[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(7): 1192-1204.
- [54] 黄陈珏, 刘芳, 马琳琳, 等. 外源褪黑素对樱桃番茄果实品质的影响[J]. *山西农业科学*, 2020, 48(4): 527-530.
HUANG Chenjue, LIU Fang, MA Linlin, et al. Effect of exogenous melatonin on the quality of cherry tomato fruit[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(4): 527-530.
- [55] 钟莉莎. 褪黑素对‘夏黑’葡萄生长和果实品质及蔗糖代谢的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
ZHONG Lisha. Effects of melatonin on growth, fruit quality and sucrose metabolism of ‘Xiahei’ grape[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [56] 史星雲, 王莉, 徐珊珊, 等. 外源褪黑素对葡萄常温贮藏品质和生理特性的影响[J]. *果树学报*, 2022, 39(7): 1271-1280.
SHI Xingyun, WANG Li, XU Shanshan, et al. Effects of exogenous melatonin treatment on storage quality and physiological characteristics of table grape at room temperature[J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(7): 1271-1280.
- [57] 王天菊, 沈庆庆, 况世雪. 外源褪黑素对“红地球”葡萄采后贮藏品质的影响[J]. *中国南方果树*, 2024, 53(1): 207-215.
WANG Tianju, SHEN Qingqing, KUANG Shixue. Effects of exogenous melatonin on postharvest storage quality of ‘Red Earth’ grapes[J]. *South China Fruits*, 2024, 53(1): 207-215.
- [58] 吕馨宁, 王玥, 贾润普, 等. 不同温度下褪黑素处理对‘阳光玫瑰’葡萄采后品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(7): 1411-1422.
LÜ Xinning, WANG Yue, JIA Runpu, et al. Effects of melatonin treatment on quality of stored ‘Shine Muscat’ Grapes under different storage temperatures[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(7): 1411-1422.
- [59] XU L L, YUE Q Y, BIAN F E, et al. Melatonin treatment enhances the polyphenol content and antioxidant capacity of red wine[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2018, 4(4): 144-150.
- [60] XU C M, ZHANG Y L, CAO L, et al. Phenolic compounds and antioxidant properties of different grape cultivars grown in China[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(4): 1557-1565.
- [61] ZHANG H M, ZHANG Y Q. Melatonin: A well-documented antioxidant with conditional pro-oxidant actions[J]. *Journal of Pineal Research*, 2014, 57(2): 131-146.
- [62] SUN L, ZHANG M, REN J, et al. Reciprocity between abscisic acid and ethylene at the onset of berry ripening and after harvest[J]. *BMC Plant Biology*, 2010, 10: 257.
- [63] EREMIAS A V, ALBU C, RADU G L, et al. The influence of melatonin treatment in the vinification of feteasca neagra and *Cabernet Sauvignon* wines on the profile of polyphenolic compounds and antioxidant activity[J]. *Antioxidants*, 2023, 12(6): 1214.
- [64] LI J J, JAVED H U, WU Z S, et al. Improving berry quality and antioxidant ability in ‘Ruidu Hongyu’ grapevine through preharvest exogenous 2, 4-epibrassinolide, jasmonic acid and their signaling inhibitors by regulating endogenous phytohormones[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1035022.

加工编辑:王雪

收稿日期:2024-05-04