

葡萄酒风味物质研究进展

刘春艳,张 静,李栋梅,谢 岳,王振平*

(宁夏大学农学院,宁夏银川 750021)

摘要:风味物质是影响葡萄酒质量的重要因素。葡萄酒中的风味物质主要受葡萄品种、成熟度、环境条件、酵母选择等因素的影响,风味物质的种类、含量、气味特性决定葡萄酒的风格和典型性。本文为更好地了解葡萄酒风味物质的研究进展,结合前人研究资料,对葡萄酒风味物质的种类、含量、作用、研究热点以及影响因素进行简单综述,提出葡萄酒风味物质研究方向的展望,并为后期研究提供理论依据。

关键词:葡萄酒,风味物质,影响因素

Research progress of the flavor compounds in wine

LIU Chun-yan, ZHANG Jing, LI Dong-mei, XIE Yue, WANG Zhen-ping*

(College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Flavor substances are important factors affecting the quality of wine. The flavor substances are mainly affected by varieties, maturity, growth conditions and yeast varieties in wine. Compositions and odor characteristics of flavor substances play key roles in wine styles. In this paper, the varieties, content, function, research focus and influential factors were reviewed based on previous research data, in order to put forward the outlook of research direction of flavor compounds, meanwhile, it could provide theoretical basis for the later research.

Key words: wine; flavor compounds; factors

中图分类号:TS251.7

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2017)14-0310-05

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.061

葡萄是世界上最有栽培价值的,具有适应性强,种植面积广,产量高,应用广泛等特点,它还是第一个完成基因组测序的水果^[1]。葡萄酒是一款历史悠久的酒精饮料,独特的营养保健功能和令人愉悦的口感被人们所青睐,葡萄酒风味化合物种类较为丰富,仅芳香化合物已测出 460 多种^[2],其风味化合物来自数百个化学成分反应生成的混合物,这些混合物和人的感官相互作用经过大脑传递产生神经反应形成心理感知^[3],这些混合物之间相互作用、相互影响,表现出协同或是拮抗作用,这些相互作用决定了葡萄酒最后的香气^[4]。葡萄酒风味由香气和口感组成^[5]。葡萄酒香气复杂、多样,主要来源有三类:一类是品种香气,即葡萄本身的特征香气;二类是发酵香气,是葡萄在酒精发酵过程中由不同风味类型的酵母菌发酵生成多样的风味物质,如醇、醛、酮、酸、酯类;三类是陈酿香气,是葡萄酒在橡木桶陈酿过程中形成的风味物质^[6]。甜、酸、苦、涩是葡萄酒的基本口感,具有甜味的物质主要是糖、酒精和甘油;酸是各种有机酸;酚类会产生一定苦味,苦味往往与涩味联系在一起,二者很难区分开来;葡萄酒风味物质主要源于葡萄果实,葡萄果实和葡萄酒化学组成成分复

杂,主要风味物质种类可以概括为呈味物质(糖类、酸类、酚类)和呈香物质(香气物质),已在葡萄酒中发现 800 多个挥发性化合物,浓度范围从数百毫克每升到几毫克每升^[7-9]。近年来,风味物质的研究成为一个热点,国际市场以及食品行业对食品风味物质的需求增加使得食品风味备受关注^[10],风味物质是衡量葡萄酒的一个重要质量指标,也是影响消费者购买意向的重要因素,复杂且平衡的风味有助于提高市场竞争力^[11]。本文简单综述了国内外葡萄酒中风味物质的种类、含量、作用以及影响因素,为今后优选酿酒葡萄品种,提高葡萄品质,改进酿酒工艺以及构建优质葡萄与葡萄酒评价体系提供理论指导和参考^[12-13]。

1 呈味物质

1.1 糖类

糖分是葡萄果实中的重要营养物质,是果实品质形成的关键,是葡萄酒酒精发酵的基质,同时还是葡萄酒中的呈味物质,葡萄浆果中的糖主要有葡萄糖、果糖、少量的戊糖、蔗糖以及多糖^[14]。葡萄糖和果糖是葡萄浆果中最主要的糖,可被酵母菌转化为酒精,为发酵性糖,在酒精发酵彻底的葡萄酒中,它们几乎完全消

收稿日期:2017-01-05

作者简介:刘春艳(1992-),女,硕士研究生,研究方向:葡萄逆境生理与分子生物学,E-mail:m18295276299@163.com。

* 通讯作者:王振平(1965-),男,博士,研究员,研究方向:葡萄栽培生理与葡萄酒酿造,E-mail:dr.wangzhp@163.com。

基金项目:国家自然科学基金(31360463);国家葡萄产业技术体系(CARS-30-zp-8)。

失,蔗糖在酒精发酵过程中在酸和转化酶的作用下转化为转化糖而被酵母利用,戊糖在浆果中是结合态,在发酵过程中游离出来,被保留在葡萄酒中^[14],葡萄酒中的多糖主要源于葡萄浆果中的阿拉伯糖、鼠李糖和酵母发酵过程中的甘露糖,多糖可以和一些缩合单宁结合,有助于稳定葡萄酒的颜色^[15]。糖在葡萄浆果中的比例为17%~25%,等到酒精发酵结束,干葡萄酒中只剩下4 g/L的残糖^[16]。葡萄浆果本身并不含酒精,它的含糖量决定了葡萄酒最终的潜在酒度,酒精发酵将葡萄糖转化为二氧化碳和乙醇,乙醇是葡萄酒中最重要的成分,具有挥发性,含量较高,而且具有甜味,同时也是许多非挥发性物质的载体^[5]。

1.2 有机酸类

葡萄中主要的有机酸是酒石酸和苹果酸,此外还有少量的柠檬酸^[17]。成熟果实中70%的有机酸分布在果肉中,种子中的有机酸含量非常少^[18]。葡萄酒中酒石酸、苹果酸、柠檬酸源于葡萄果实,乳酸、琥珀酸和乙酸是在酒精发酵和苹果酸发酵过程中形成的^[19-20]。葡萄酒发酵过程中,一部分酒石酸被酒石酸氢钾沉淀消失,另一部分经苹果酸发酵生成乳酸和乙酸;L-苹果酸在苹果酸-乳酸发酵过程中被乳酸菌分解为L-乳酸;柠檬酸也是酒精发酵的副产物,随后在苹果酸-乳酸发酵过程中被当作底物消耗,几乎全部消失^[20-21]。总酸是测量葡萄酒的重要指标,总酸占葡萄浆果成分约9 g/L,在葡萄酒中含量降至6 g/L左右,总酸低于5.0 g/L,酒体乏味,香味不足;超过8.0 g/L则表现酒体尖酸粗糙,平衡性差^[17]。葡萄品质很大程度上取决于糖分和有机酸的含量及其它成分,与糖相比,有机酸含量很低,但它对葡萄和葡萄酒的品质影响更为重要;同时,有机酸还可以提高葡萄酒的风味,从而提高葡萄酒口感,甜酸平衡也是消费者对葡萄酒能否接受的重要质量标准^[22]。

1.3 酚类物质

酚类物质是分子结构中含有酚羟基官能团的物质^[23],是葡萄酒的重要组成部分,其对葡萄酒的感官特征如颜色、涩味、香气等产生一定影响^[24]。葡萄和葡萄酒中的酚类物质根据化学结构不同分为类黄酮和非类黄酮,葡萄的非类黄酮物质主要分布在果肉中,类黄酮物质则分布在果皮、种子和茎中,葡萄和葡萄酒中的主要非类黄酮物质是酚酸,包括羟基安息酸和羟基肉桂酸,果实中20%~25%的酚酸都以游离态形式存在;类黄酮化合物主要包括黄酮醇、黄烷-3-醇和花色苷^[25-26]。红葡萄酒包括的酚类化合物有浓缩单宁、白藜芦醇、斛皮酮、儿茶酚以及表儿茶酚。近年来,葡萄酒销量猛增,其原因在于红葡萄酒中的多酚类物质可以预防癌症,也对心脑血管有保健作用。加利福尼亚大学FRANKEL博士研究表明:红葡萄酒多酚对预防LDL氧化能力比维生素E高2倍左右,多酚物质已经成为一个研究热点^[27-28]。

2 呈香物质

香气是决定葡萄酒品质和质量的重要因素之一,一些香气化合物直接从果实中释放,另一些则是在发酵和陈酿过程中由于酶水解释放出更多的葡萄果实中的芳香化合物形成的^[29]。根据香气化学结构上的不同主要分为萜类、烃类、醇类、酯类、酮类和羧基类^[30]。根据香气生物合成途径的不同,香气的化学成分主要有萜烯类化合物、降异戊二烯类化合物、脂肪族挥发性有机化合物、甲氧基吡嗪类化合物,每一类化合物对葡萄酒风味的贡献不同,它们的种类、含量、气味特性以及相互作用决定着葡萄酒的品质,也决定着葡萄酒的风味和典型性^[31],香气的相关代谢合成途径见图1。

2.1 萜烯类化合物

萜类化合物是以降异戊二烯(C5)为基本结构单

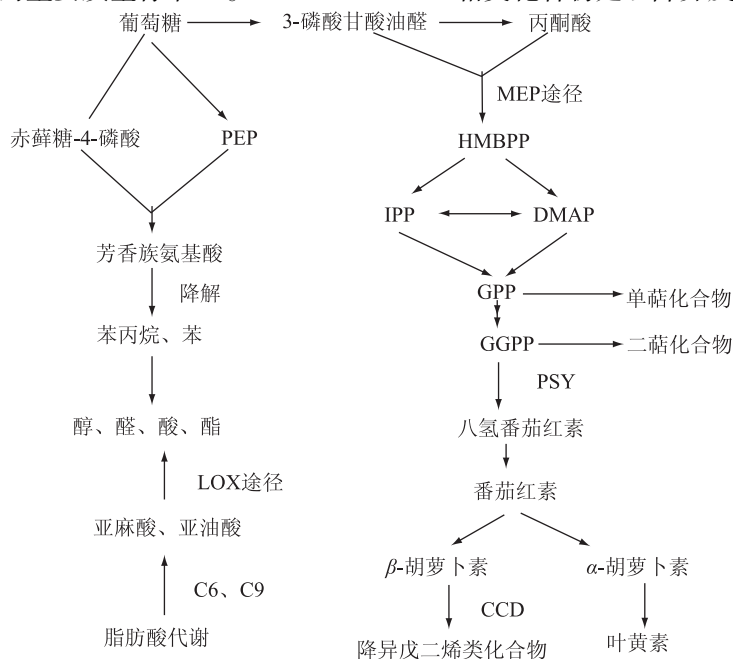


图1 葡萄酒中重要芳香化合物形成图^[42-44]

Fig.1 Formation of important aromatic compounds in wine^[42-44]

元构成的烃类化合物,根据基本结构单元的数量分为单萜(C10)、倍半萜(C15)、二萜(C20)、三萜(C30)及多萜(C>40)等;根据萜类化合物有没有碳环,分为链萜、单环萜、双环萜、三环萜等;很多萜类是含氧衍生物,又可分为醇、酮、醛、酯、羧酸及苷等萜类^[32]。单萜和倍半萜类化合物是植物中主要的萜类化合物,除具有很重要的生理生态学作用,还是最天然的风味和香气化合物,有益于人体健康^[33]。葡萄酒中的单萜化合物直接源于葡萄果实,主要有香茅醇、橙花醇、里那醇、香叶醇及 α -萜品醇,香味最浓的是香叶醇和里那醇^[34]。已有研究报道在‘Baga’葡萄中发现40种倍半萜和二萜类化合物,赤霞珠葡萄含单萜类化合物较高,蛇龙珠葡萄含倍半萜烯类化合物较多,萜烯类化合物是葡萄中研究最多的一类化合物^[35]。

2.2 降异戊二烯类化合物

降异戊二烯类化合物也被称为脱辅基类胡萝卜素,是由类胡萝卜素(C40萜烯色素)降解产生,广泛存在于植物中。目前研究的重点主要是C13化合物,大部分已知的C13化合物拥有很低的感觉阈值,也是葡萄酒风味的主要来源^[36]。降异戊二烯类化合物研究最多的主要有TDN、 β -大马烯酮、 β -紫罗兰酮,其次是TCH和雷司令缩醛,TDN是“雷司令”的典型香气,TCH只在波特酒中检测了出来,关于雷司令中的缩醛,人们只了解它具有水果香气,但未见其它报道^[37-38]。

2.3 脂肪族挥发性有机化合物

葡萄中脂肪族化合物主要由直链或支链的短链的C6醛和醇,在葡萄和葡萄酒中存在最多的脂肪族化合物是C6醛、醇,目前检测到的重要的呈香物质有苯乙醇、苯乙醛、苯酚、愈创木酚、己醇、己醛、异戊醇,大部分的脂肪族化合物都具有青草味,但在酿酒过程中转化为醇类或酯类,可以发挥积极的感官效应^[39]。

2.4 甲氧基吡嗪类化合物

甲氧基吡嗪类化合物是一类含氮的杂环化合物,目前在葡萄酒中检测出来的主要有6种:2-甲氧基吡嗪、3-甲基-2-甲氧基吡嗪、3-乙基-2-甲氧基吡嗪、3-异丁基-2-甲氧基吡嗪、3-异丙基-2-甲氧基吡嗪和3-仲丁基-2-甲氧基吡嗪^[40]。此类化合物都具有较强的青椒气味,尤其作为浓度偏高的3-异丁基-2-甲氧基吡嗪被认为是青草味的主要来源,在葡萄酒中,青椒味浓度太高是一种香气缺陷,是由不成熟的酿酒葡萄原料所致^[41]。

3 影响葡萄酒风味物质组成的因素

影响葡萄酒风味物质的因素有很多,首先取决于葡萄果实,果实中的风味物质一直处于不断波动的状态,影响果实风味物质组成的因素主要包括品种差异,成熟度,果实生长在生长期、采后处理及储存期间的的环境条件;其次发酵过程中酵母选择也会影响葡萄酒风味物质组成。

3.1 品种

不同品种酿酒葡萄都有独特的风味物质,欧洲

种葡萄由于果实中萜类化合物含量的不同被划分为3个品种,挥发性香气中萜类化合物含量高于4 mg/L为玫瑰香型品种(玫瑰香 Muscat de Hambourg)、1~4 mg/L为非玫瑰香型的芳香品种和低于1 mg/L的非芳香型品种(赤霞珠 Cabernet Sauvignon)^[8]。葡萄种群间也存在很大差异,山葡萄、欧亚种葡萄以及山欧杂种葡萄的主要风味物质是C6化合物;欧亚种玫瑰香型葡萄富含萜烯类化合物;美洲种、欧美杂种和山美杂种葡萄则含有丰富的酯类化合物^[45]。

3.2 成熟度

成熟度是影响葡萄风味物质的重要因素。理想状态下,应在葡萄风味物质口感最佳时收获^[46]。研究发现在“京秀”和“京亚”葡萄中,所有的醇类和羰基类,大部分的C6化合物和萜类化合物在葡萄着色期已经积累明显,C6化合物在成熟期早期增加,然后逐渐下降,大多数醇类和羰基类在成熟期逐渐下降,萜类化合物和香叶醇在成熟期含量逐渐增加,一部分酯类在成熟期后继续增加^[47]。

3.3 环境因素

环境因素包括光照、温度、水分、土壤、气候等,在葡萄生长发育过程中起重要作用,香气水平和香气前体化合物受环境影响波动较大,温暖环境下生长的葡萄叶黄素、 β -胡萝卜素和TDN含量较高,而气候凉爽的条件下葡萄中甲氧基吡嗪含量较高^[48]。光照充足,植物光合作用强,有利于有机物的积累,合理的整形修剪方式有助于提高光合作用。葡萄潜在香气在轻度水分胁迫和中度氮供应状态下含量最高,重度水分胁迫和缺氮会减弱葡萄香气^[49]。

3.4 酵母选择

葡萄酒酒精发酵利用酵母将糖转化为酒精以及多醇、醛、酸、酯等副产物,它们的组成受酵母菌种的影响^[50]。酵母是影响葡萄酒风味的重要因素,研究发现酿酒酵母‘*Saccharomyces cerevisiae*’使葡萄和酒在酒精发酵前后发生很大变化,香气、风味、口感、色泽增强以及组成成分复杂化;细菌‘*Oenococcus oeni*’对葡萄酒的最大贡献是启动了苹果酸-乳酸发酵,这两种微生物通过分解葡萄果实中的颗粒化合物,分解葡萄果实中的二次衍生物,产生很多有益的风味代谢物使葡萄酒风味独特^[51]。

4 展望

葡萄酒风味物质组成种类多,目前人们对风味物质的基本组成、贡献、影响因素已较为清楚,但是很多影响机理还需要进一步研究。“七分靠原料,三分靠工艺”,葡萄酒的品质最主要由原料决定,葡萄果实品质的提高直接决定葡萄酒品质的提高,有些地区的葡萄酒由于青草味、青椒味偏重导致品质下降,缺乏市场竞争力。对于环境因素对葡萄果实风味物质的影响还需进一步研究,掌握适宜葡萄生长的环境,以提高葡萄品质。

参考文献

- [1] Louime C, Vasanthaiah H K N, Lu J, et al. Future prospects of the grape industry[J]. Currentence, 2007, 93(9): 1210-1211.
- [2] 梁乘榜, 张风杰, 吴霏霏, 等. 果实香气研究进展[J]. 北方

- 园艺, 2013(9):211-215.
- [3] Anthony L Robinson, Paul K Boss, Peter S Solomon. Origins of Grape and Wine Aroma [J]. American Journal of Enology & Viticulture, 2014, 65(1):1-24.
- [4] 王家梅, 张军翔. 葡萄酒香气来源和形成研究进展[J]. 中国酿造, 2014, 33(5):5-9.
- [5] R J Clarke, J Bakker. Wine Flavour Chemistry [M]. America: Blackwell, 2005.
- [6] 王淋靓, 艾静汶, 刘功德, 等. 朗姆酒风味物质的研究进展[J]. 中国酿造, 2014, 33(9):9-11.
- [7] 田长平, 魏景利, 刘晓静, 等. 梨不同品种果实香气成分的GC/MS分析[J]. 果树学报, 2009, 26(3):294-299.
- [8] Ebeler S E, Thorngate J H. Wine chemistry and flavor: looking into the crystal glass [J]. J Agric Food Chem, 2009, 57: 8098-8108.
- [9] Styger G, Prior B, Bauer FF. Wine flavor and aroma [J]. J Ind Microbiol Biotechnol, 2011, 38: 1145-1159.
- [10] 胡花丽, 王贵禧, 李艳菊. 桃果实风味物质研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4):280-287.
- [11] 刘丽媛, 刘延琳, 李华. 葡萄酒香气化学研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(5):310-316.
- [12] 涂正顺, 薛洁, 常伟, 等. 吉林地区山葡萄果实香气成分的GC/MS分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(10):66-70.
- [13] 姜文广, 李记明, 徐岩, 等. 4种酿酒红葡萄果实的挥发性香气成分分析[J]. 食品科学, 2011, 32(6):225-229.
- [14] 李华, 王华, 袁春龙, 等. 葡萄酒化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] 陈代, 问亚琴, 潘秋红. 葡萄酒中多糖的研究进展[J]. 酿酒科技, 2009(8):107-111.
- [16] Richard P Vine, Ellen M Harkness, Theresa Browning, et al. WINEMAKING [M]. America: Chapman & Hall, 1997.
- [17] 成冰, 张京芳, 徐洪宇, 等. 不同品种酿酒葡萄有机酸含量分析[J]. 食品科学, 2013, 34(12):223-228.
- [18] 问亚琴, 张艳芳, 潘秋红. 葡萄果实有机酸研究进展[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 2009, 27(3):302-307.
- [19] Stephen Ball. HPLC Analysis of Organic Acids in Wine [J]. LC-GC Europe, 2008, 26(2):28-29.
- [20] 莫燕霞, 殷居易, 顾晓俊, 等. 葡萄酒有机酸研究现状及应用展望[J]. 食品工业科技, 2015, 36(6):380-384.
- [21] 李华, 王华. 葡萄酒工艺学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [22] A Topalovic, M Mikulic - Petkovsek. Changes in sugars, organic acids and phenolics of grape berries of cultivar Cardinal during ripening [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2010, 8(3):223-227.
- [23] 史明科, 郭金英, 任国艳. 葡萄酒酚类物质研究进展[J]. 酿酒科技, 2012(4):17-20.
- [24] MA Gómez Gallego, E Sánchezpalomo, I Hermosíngutiérrez, et al. Polyphenolic composition of Spanish red wines made from Spanish Vitis vinifera L. red grape varieties in danger of extinction [J]. European Food Research and Technology, 2013, 236(4):647-658.
- [25] 张娟, 王晓宇, 田呈瑞, 等. 基于酚类物质的酿酒红葡萄品种特性分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(7):1370-1382.
- [26] B Jiang, ZW Zhang. Comparison on phenolic compounds and antioxidant properties of cabernet sauvignon and merlot wines from four wine grape-growing regions in China [J]. Molecules, 2012, 17(8):8804-8821.
- [27] 刘一健, 孙剑锋, 王颀. 葡萄酒酚类物质的研究进展[J]. 中国酿造, 2009, 28(8):5-9.
- [28] 朱美蓉, 房玉林. 葡萄多酚研究进展及其开发利用[J]. 中国酿造, 2015, 34(12):1-4.
- [29] G Cheng, Y Liu, TX Yue, et al. Comparison between aroma compounds in wines from four Vitis vinifera grape varieties grown in different shoot positions [J]. Food Science & Technology, 2015, 35(2):237-246.
- [30] 邓晓军, 陈晓亚, 杜家纬. 植物挥发性物质及其代谢工程 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(1):11-18.
- [31] 温可睿, 黄敬寒, 潘秋红, 等. 葡萄香气物质及其影响因素的研究进展[J]. 果树学报, 2012, 29(3):454-460.
- [32] 王凌健, 方欣, 杨长青. 植物萜类次生代谢及其调控[J]. 中国科学, 2013, 43(12):1030-1046.
- [33] DA Nagegowda. Plant volatile terpenoid metabolism: biosynthetic genes, transcriptional regulation and subcellular compartmentation [J]. Febs Letters, 2010, 584(14):2965-2973.
- [34] 张明霞, 吴玉文, 段长青. 葡萄与葡萄酒香气物质研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7):2098-2104.
- [35] 姜文广, 范文来, 徐岩, 等. 溶剂辅助蒸馏-气相色谱-串联质谱法分析酿酒葡萄中的游离态萜烯类化合物[J]. 色谱, 2007, 25(6):881-886.
- [36] F Yuan, H Feng, MC Qian. C 13-Norisoprenoids in Grape and Wine Affected by Different Canopy Management [M]. America: Acs Symposium Series, 2015.
- [37] 後藤奈美, 赵欣. 葡萄酒中的降异戊二烯系列香气成分 [J]. 中国酿造, 2015(8):168-168.
- [38] 孟楠, 刘斌, 潘秋红. 葡萄果实降异戊二烯类物质合成调控研究进展[J]. 园艺学报, 2015, 42(9):1673-1682.
- [39] 房经贵, 刘崇怀. 葡萄分子生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [40] 刘文忠. 葡萄酒中甲氧基吡嗪类物质的研究进展[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2014(5):60-62.
- [41] Scheiner J J, Heuvel J E V, Pan B, et al. Modeling Impacts of Viticultural and Environmental Factors on 3-Isobutyl-2-Methoxypyrazine in Cabernet franc Grapes [J]. American Journal of Enology & Viticulture, 2012, 63(1):94-105.
- [42] 席万鹏, 郁松林, 周志钦. 桃果实香气物质生物合成研究进展[J]. 园艺学报, 2013, 40(9):1679-1690.
- [43] 韦艳萍, 庞欣, 刘云飞. 植物类胡萝卜素裂解氧化酶研究进展[J]. 核农学报, 2014, 28(11):2071-2078.
- [44] Fenoll J, Manso A, Hellín P, et al. Changes in the aromatic composition of the Vitis vinifera grape Muscat Hamburg during ripening. [J]. Food Chemistry, 2009, 114(2):420-428.
- [45] 丁燕, 郭亚芸, 王哲, 等. 酿酒葡萄中芳香物质形成的影响因素及其研究进展[J]. 酿酒科技, 2015, 254(8):83-89.
- [46] MA El Hadi, FJ Zhang, FF Wu, et al. Advances in fruit

(下转第320页)

- [11] Kim PI, Chung K-C. Production of an antifungal protein for control of *Colletotrichum lagenarium* by *Bacillus amyloliquefaciens* MET0908 [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2004, 234 (1): 177-183.
- [12] Hong T-Y, Meng M. Biochemical characterization and antifungal activity of an endo-1,3- β -glucanase of *Paenibacillus* sp. isolated from garden soil [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 61 (5-6): 472-478.
- [13] Hong T-Y, Hsiao Y-Y, Meng M. The 1.5 Å structure of endo-1,3- β -glucanase from *Streptomyces soiyaensis* - evolution of the active-site structure for 1,3- β -glucan-binding specificity and hydrolysis [J]. *Acta Crystallographica Section D Biological Crystallography*, 2008, 64 (9): 964-790.
- [14] Masuda S, Endo K, Koizumi N. Molecular identification of a novel β -1,3-glucanase from alkaliphilic *Nocardiopsis* sp. strain F96 [J]. *Extremophiles*, 2006, 10 (3): 251-255.
- [15] Jeng WY, Wang NC, Lin CT. Crystal structures of the laminarinase catalytic domain from *Thermotoga maritima* MSB8 in complex with inhibitors - essential residues for beta-1,3- and beta-1,4-glucan selection [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2011, 286 (52): 45030-45040.
- [16] Fibriansah G, Masuda S, Koizumi N. The 1.3 Å crystal structure of a novel endo-beta-1,3-glucanase of glycoside hydrolase family 16 from alkaliphilic *Nocardiopsis* sp. strain F96 [J]. *Proteins*, 2007, 69 (3): 683-690.
- [17] Dong W, Huang J, Li Y. Crystal structural basis for Rv0315, an immunostimulatory antigen and inactive beta-1,3-glucanase of *Mycobacterium tuberculosis* [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15073.
- [18] Labourel A, Jam M, Jeudy A. The beta-glucanase ZgLamA from *Zobellia galactanivorans* evolved a bent active site adapted for efficient degradation of algal laminarin [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2014, 289 (4): 2027-2042.
- [19] Labourel A, Jam M, Legentil L. Structural and biochemical characterization of the laminarinase ZgLamCGH16 from *Zobellia galactanivorans* suggests preferred recognition of branched laminarin [J]. *Acta Crystallographica Section D, Biological Crystallography*, 2015, 71 (Pt 2): 173-184.
- [20] Cota J, Alvarez TM, Citadini AP. Mode of operation and low-resolution structure of a multi-domain and hyperthermophilic endo-beta-1,3-glucanase from *Thermotoga petrophila* [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2011, 406 (4): 590-594.
- [21] Michel G, Chantalat L, Duee E. The κ -carrageenase of *P. carrageenovora* features a tunnel-shaped active site - a novel insight in the evolution of Clan-B glycoside hydrolases [J]. *Structure*, 2001, 9 (6): 513-525.
- [22] Welfle K, Misselwitz R, Welfle H. Influence of Ca^{2+} on conformation and stability of three bacterial hybrid glucanases [J]. *European Journal of Biochemistry*, 1995, 229 (3): 726-735.
- [23] Bleicher L, Prates ET, Gomes TC. Molecular basis of the thermostability and thermophilicity of laminarinases - X-ray structure of the hyperthermostable laminarinase from *Rhodothermus marinus* and molecular dynamics simulations [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2011, 115 (24): 7940-7949.
- [24] Ilari A, Fiorillo A, Angelaccio S. Crystal structure of a family 16 endoglucanase from the hyperthermophile *Pyrococcus furiosus* - structural basis of substrate recognition [J]. *The FEBS Journal*, 2009, 276 (4): 1048-1058.
- [25] Krah M, Misselwitz R, Politz O. The laminarinase from thermophilic eubacterium *Rhodothermus marinus* [J]. *European Journal of Biochemistry*, 1998, 257 (1): 101-111.
- [26] Davies G, Henrissat B. Structures and mechanisms of glycosyl hydrolases [J]. *Structure*, 1995, 3 (9): 853-859.
- [27] Wojtkowiak A, Witek K, Hennig J. Structures of an active-site mutant of a plant 1,3- β -glucanase in complex with oligosaccharide products of hydrolysis [J]. *Acta Crystallographica Section D - Biological Crystallography*, 2013, 69 (1): 52-62.
- [28] Chen L, Garrett TP, Fincher GB. A tetrad of ionizable amino acids is important for catalysis in barley β -glucanases [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1995, 270 (14): 8093-8101.
- [29] Witek AI, Witek K, Hennig J. Conserved Cys residue influences catalytic properties of potato endo-(1 \rightarrow 3)- β -glucanase GLUB20-2 [J]. *Acta Biochimica Polonica*, 2008, 55 (4): 791-797.
- [30] Akiyama T, Shibuya N, Hrmova M. Purification and characterization of a (1 \rightarrow 3)- β -D-glucan endohydrolase from rice (*Oryza sativa*) bran [J]. *Carbohydrate Research*, 1997, 297 (4): 365-374.
- [31] Peumans WJ, Barre A, Derycke V. Purification, characterization and structural analysis of an abundant β -1,3-glucanase from banana fruit [J]. *European Journal of Biochemistry*, 2000, 267 (4): 1188-1195.
- [47] Yang C, Wang Y, Wu B, et al. Volatile compounds evolution of three table grapes with different flavour during and after maturation [J]. *Food Chemistry*, 2011, 128 (4): 823-830.
- [48] A Robinson. Environmental Influences on Grape Aroma Potential [D]. Australia: Murdoch University, 2011.
- [49] dGC Peyrot, L Cvan, T Tominaga, et al. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L cv Sauvignon blanc in field conditions [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2005, 85 (1): 73-85.
- [50] Antonelli A, Castellari L, Zambonelli C, et al. Yeast influence on volatile composition of wines [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 1999, 47 (3): 1139-1144.
- [51] Swiegers J H, Bartowsky E J, Henschke P A, et al. Microbial modulation of wine aroma and flavour [J]. *Australian Journal of Grape & Wine Research*, 2005, 11 (2): 139-173.

(上接第 313 页)

aroma volatile research [J]. *Molecules*, 2013, 18 (7): 8200-8229.