

葡萄酒酿造过程中酿酒酵母乙醛代谢特征的研究

郝瑞颖¹, 赵洁¹, 刘延琳^{1,2,*}

(1.西北农林科技大学葡萄酒学院, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西省葡萄与葡萄酒工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 选用4株本土酵母(G3-3、NX8423、D3-4、NX349)与2株商业酵母(X16、F15)分别在干白与干红葡萄汁中进行发酵, 研究各菌株在酒精发酵过程中的乙醛动态变化, 并对各菌株产生乙醛的特征进行分析。结果显示: 本土酿酒酵母与商业酿酒酵母具有相似的乙醛动态变化, 但各菌株的乙醛特征参数差异显著($P < 0.05$)。在干白葡萄酒的发酵过程中, D3-4表现出最低的乙醛峰值及末值含量(发酵终止时发酵液中的乙醛含量), 分别为58.60mg/L和39.96mg/L, 较X16显著降低了25.62%及25.92%。乙醛产生速率最快的为X16菌株。乙醛降解速率最快的则为NX8423, 达到5.90mg/(L·d), 较X16提高了2.09倍。在干红葡萄酒发酵中, 乙醛峰值含量最低的为F15, 乙醛产生速率最快的为G3-3, 达到65.04mg/L, 较F15显著提高了45.63%。NX349的乙醛降解速率最高且末值含量最低, 分别为25.62mg/(L·d)及29.65mg/L。本土酿酒酵母菌株具有较商业菌株优良的乙醛代谢特征, 通过开发本土优良酵母菌株能够优化葡萄酒酿造过程中的乙醛含量。

关键词: 酿酒酵母; 葡萄酒; 乙醛; 代谢

Characterization of Acetaldehyde Metabolism of *Saccharomyces cerevisiae* during Wine Fermentation

HAO Rui-ying¹, ZHAO Jie¹, LIU Yan-lin^{1,2,*}

(1. College of Enology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center for Viti-viniculture, Yangling 712100, China)

Abstract: This study examined dynamic changes in acetaldehyde production during the fermentation of dry white wine and dry red wine by one of 4 indigenous (G3-3, NX8423, D3-4 and NX349) and 2 commercial (X16 and F15) *S. cerevisiae* strains. Besides, each strain was analyzed for characteristics of acetaldehyde production. The indigenous strains showed similar dynamic changes in acetaldehyde production to the commercial strains despite significant differences in characteristic parameters of acetaldehyde production ($P < 0.05$). The indigenous strain D3-4 exhibited the lowest acetaldehyde peak of 58.60 mg/L and the lowest final acetaldehyde concentration of 39.96 mg/L during the fermentation of dry white wine, which were decreased by 25.62% and 25.92% compared with those of the commercial strain X16, respectively. X16 presented the fastest acetaldehyde production rate, while NX8423 showed the fastest acetaldehyde degradation rate of 5.90 mg/(L·d), 2.09-fold higher than that of X16. The commercial strain F15 presented the lowest peak value of 89.33 mg/L, while the indigenous strain G3-3 showed the fastest acetaldehyde production rate of 65.04 mg/L, 45.63% higher than that of F15. In addition, NX349 exhibited the fastest acetaldehyde degradation rate of 25.62 mg/(L·d) and the lowest final concentration of 29.65 mg/L. In conclusion, the indigenous strains have better characteristics of acetaldehyde metabolism than the commercial strains, thus allowing optimization of acetaldehyde production during wine fermentation.

Key words: *Saccharomyces cerevisiae*; wine; acetaldehyde; metabolism

中图分类号: TS261.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)07-0175-05

乙醛是葡萄酒中最重要的醛类化合物, 可以从葡萄酒的色泽、香气、微生物稳定性等多方面来影响葡萄酒的质量。首先, 乙醛可以促进花青素和儿茶酚或单宁的聚合, 从而增强酒的色度与稳定性^[1], 同时单宁含量的降低也减弱了乙醛对葡萄酒口感所造成的涩味和苦味^[2]。其

次, 低浓度的乙醛可以赋予葡萄酒愉快的水果香气; 但当其浓度较高时, 则会产生青草或青苹果的氧化味^[3], 这是葡萄酒氧化的标志。近年来, 相关研究还表明: 乙醛作为酒精发酵饮料里的一种毒性物质可以从多个方面引发肝损伤^[4-6]。因此, 在葡萄酒发酵过程中, 对乙醛含量

收稿日期: 2012-01-21

基金项目: 国家现代农业(葡萄)产业技术体系建设专项(CARS-30-jg-3)

作者简介: 郝瑞颖(1987—), 女, 硕士研究生, 研究方向为酿酒酵母遗传代谢。E-mail: ying33333@126.com

*通信作者: 刘延琳(1966—), 女, 教授, 博士, 研究方向为葡萄-葡萄酒及酿酒微生物。E-mail: yanlinliu@nwsuaf.edu.cn

的动态监测及控制具有十分重要的意义。

在葡萄酒的酿制过程中,乙醛作为酒精发酵的中间代谢产物主要产生于发酵的初期,随后即被还原形成乙醇和 CO_2 ^[7-9]。目前,已有多项研究显示不同的酵母菌株产生乙醛的能力差异显著^[10-16],但这些研究大都只考虑发酵末期葡萄酒中乙醛的含量。因对发酵终点没有明确的评判标准,也没有对发酵结束时葡萄酒的化学氧化进行细致的监控,所以利用发酵结束时葡萄酒中乙醛的含量很难准确区分不同酵母菌株乙醛产量的生物学特性。近两年,Cheraiiti^[17]、Li Erhu^[18]等通过对不同酵母菌株乙醛产量的动态变化研究后发现,采用发酵过程中乙醛的动态变化特征参数来评判菌株生产乙醛的能力更为科学,但相关研究在国内还鲜有报道。本研究采用4株本土酿酒酵母、2株商业酵母及2组自然发酵,对其在干白与干红葡萄酒发酵过程中的乙醛动态变化特征进行比较与分析,旨在为我国葡萄酒工业生产中甄选具有本土特色的酿酒酵母菌株提供参考,并与其他相关研究提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

小白玫瑰、赤霞珠 陕西泾阳葡萄种植基地。

商业酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)X16、F15 法国Laffort公司;本土筛选的酿酒酵母NX8423、NX349、G3-3、D3-4 西北农林科技大学葡萄酒学院保存。

1.2 试剂

葡萄糖、酵母浸粉、蛋白胨 上海实验试剂有限公司;酒石酸、无水乙醇、氢氧化钠、硫酸铜、酒石酸钾钠、次甲基蓝、邻苯二甲酸氢钾、乙二胺四乙酸二钠 国药集团化学试剂有限公司;Megazyme乙醛试剂盒、Megazyme甘油试剂盒 英国Megazyme公司。

1.3 方法

1.3.1 菌株的准备

将低温条件下甘油保藏的酿酒酵母以1%的接种量接种于5mL YEPD培养基中,28℃摇床培养16h,再以5%的接种量接种于100mL小白玫瑰或赤霞珠葡萄汁中扩大培养16h,待用。

1.3.2 小型发酵罐实验

干白葡萄酒发酵:取新鲜小白玫瑰进行分选与除梗破碎,以目标酒度11%(V/V,下同)调整葡萄汁总糖质量浓度为187g/L(以葡萄糖计,下同),总酸质量浓度为5.50g/L(以酒石酸计,下同)(pH3.5)。除梗破碎后加入60mg/L SO_2 ,接入已活化好的菌株,接种量统一为 1×10^6 CFU/mL。发酵控温18~20℃,发酵14~19d。发酵罐容积为10L,每个样品各2组。发酵过程中定期取样测定温度和比重以对

发酵进程进行监测。当连续两次取样比重稳定不变即可作为发酵终点。静置使其自然澄清,过滤、满罐贮存,检测原酒理化指标。

干红葡萄酒发酵:取新鲜赤霞珠进行分选与除梗破碎,以目标酒度12%调整葡萄汁总糖质量浓度为204g/L,总酸质量浓度为5.76g/L(pH3.5)。将葡萄皮渣于70℃热浸渍30min,除梗破碎后加入50mg/L SO_2 与10mg/L果胶酶,接入已活化好的菌株,接种量统一为 1×10^6 CFU/mL,控温25~28℃浸渍发酵7d。发酵罐容积为20L,每个样品各2组。发酵过程中定期取样测定温度和比重以监测发酵进程。当比重降至0.995左右且不再变化时去除皮渣,自然澄清、满罐贮存,并检测理化指标。

1.3.3 理化指标测定

按GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》^[19]标准分别测定以下指标:还原糖(葡萄糖计)采用菲林A、B液热滴定法;总酸(酒石酸计)采用指示剂法;挥发酸(醋酸计)采用水蒸气蒸馏法;酒精度采用密度瓶法;pH值采用电位法。

甘油、乙醛采用Megazyme公司试剂盒操作说明测定。

1.3.4 数据分析

采用Origin pro 8.5软件进行数据分析和作图,DPSv7.05 软件进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 葡萄酒发酵进程的监控

2.1.1 干白葡萄酒的发酵过程

表1 发酵结束时干白葡萄酒的基本理化指标
Table 1 Basic physical and chemical properties of dry white wine at the end of fermentation

酵母菌株	还原糖 含量/(g/L)	干浸出物 含量/(g/L)	挥发酸 含量/(g/L)	总酸 含量/(g/L)	甘油产量/ (g/L)	酒度/%	pH
X16	0.67±0.09	14.97±1.36	0.76±0.11	7.26±0.06	7.49±0.07	10.92±0.13	2.77±0.27
D3-4	0.61±0.01	17.38±0.03	0.65±0.01	7.77±0.03	7.95±0.55	11.34±0.03	2.98±0.04
G3-3	1.88±0.11	15.62±1.44	0.89±0.04	6.90±0.10	10.67±0.50	11.34±0.03	2.93±0.02
NX349	4.00±0.02	13.80±0.14	0.76±0.02	7.95±0.02	6.34±0.08	11.65±0.01	2.98±0.01
NX8423	2.58±0.04	17.26±0.08	0.96±0.00	7.92±0.01	10.02±0.05	10.68±0.03	2.93±0.03
自然发酵	3.75±0.08	14.05±0.21	0.67±0.01	7.78±0.04	10.67±0.50	11.28±0.04	2.85±0.01

干白酒样的发酵共有6组,其中5组为接种发酵,1组为自然发酵。所有菌株发酵在14~19d之间结束。6组原酒发酵结束时的基本理化指标如表1所示。发酵结束时所有菌株的残糖质量浓度都不超过4g/L,可认为发酵完全。干浸出物的质量浓度平均值为15.51g/L,其中D3-4、NX8423大于16.0g/L,达到国家标准。干白酒样的总酸平均值为7.60g/L,挥发性酸平均值为0.78g/L,所有菌株的挥发酸含量都小于1.0g/L,也均达到国家标准。6组酒样平均酒度为11.20%,均达到了目标酒度。甘油作为醇

母酒精发酵的主要副产物之一,可以赋予葡萄酒圆润、柔滑、甘甜、肥硕等特性^[20]。发酵结束时,对6组酒样的甘油产量进行比较分析,结果显示,除NX349之外,D3-4、G3-3和NX8423的甘油产量均高于商业菌株X16,增幅分别为6.14%、42.46%和33.78%。

2.1.2 干红葡萄酒的发酵过程

表 2 发酵结束时干红葡萄酒的基本理化指标
Table 2 Basic physical and chemical properties of dry red wine at the end of fermentation

酵母菌株	还原糖 含量/(g/L)	干浸出物 含量/(g/L)	挥发酸 含量/(g/L)	总酸 含量/(g/L)	甘油 产量/(g/L)	酒度/%	pH
F15	2.25±0.07	17.85±0.21	0.38±0.05	4.48±0.07	5.83±0.04	11.98±0.06	3.29±0.13
D3-4	2.46±0.06	19.95±0.35	0.31±0.04	7.77±0.03	10.99±0.54	12.39±0.12	3.36±0.08
G3-3	1.71±0.13	20.15±0.49	0.43±0.09	6.90±0.10	6.66±4.61	11.92±0.12	3.48±0.05
NX349	2.80±0.28	21.75±0.49	0.36±0.01	7.38±0.01	13.62±0.64	13.46±0.06	3.38±0.05
NX8423	2.00±0.28	20.80±0.14	0.32±0.02	7.95±0.02	10.16±0.04	12.22±0.25	3.35±0.07
自然发酵	1.90±0.28	18.05±0.21	0.47±0.09	7.78±0.04	8.76±0.41	10.18±0.06	3.30±0.14

干红酒样的发酵也为5组接种发酵,1组自然发酵。所有菌株的发酵都在7d内结束。由表2可知,所有本土酵母菌株含量均可以快速彻底地完成发酵,且原酒干浸出物含量都高于商业菌株F15。所有干红酒样的挥发酸含量均不超过0.6g/L,平均值仅为0.38g/L。6组酒样的酒度平均值为12.03%,达到目标酒度。在发酵结束时,D3-4、G3-3和NX349、NX8423的甘油产量均高于商业酿酒酵母F15,增幅分别为88.51%、14.24%、134%和74.27%。

2.2 葡萄酒发酵过程中乙醛含量的动态变化

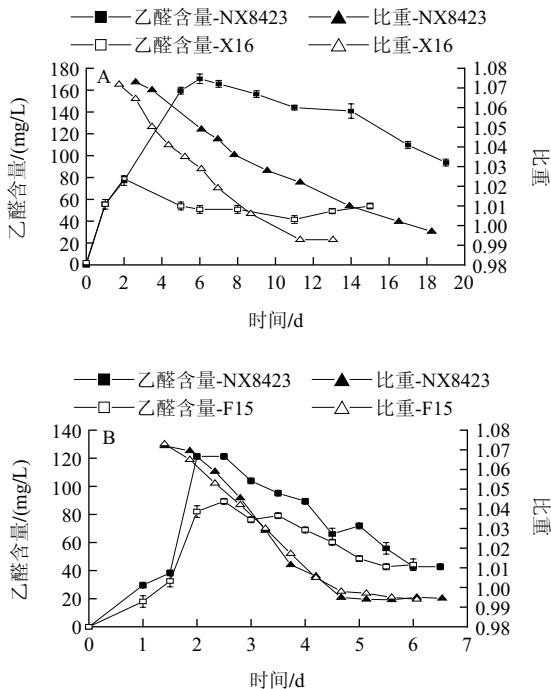


图 1 干白(A)与干红(B)葡萄酒发酵过程中乙醛含量及比重的动态变化
Fig.1 Time course of acetaldehyde content and specific gravity during the fermentation of dry white and dry red wine

图1A为本土酵母NX8423与商业酵母X16在干白葡萄酒发酵过程中的比重及乙醛动态变化曲线。在干白葡萄酒的发酵过程中,X16的乙醛动态变化可分为3个阶段:第一阶段为酒精发酵初期,乙醛快速积累,到达酵母对数生长末期时乙醛含量达到峰值;第二阶段为酒精发酵中期,乙醛含量逐渐下降;第三阶段为发酵末期乙醛含量升高并出现二次高峰,分析乙醛含量上升的原因,可能是由于发酵末期氧气隔离不及时,葡萄酒受到化学氧化所致。NX8423的乙醛上升趋势与X16相似,但其到达乙醛峰值时间及峰值含量均与X16有显著性差异($P<0.05$),在发酵末期时乙醛的含量也并未显现出上升的趋势。本土酵母D3-4、G3-3的乙醛动态变化曲线与X16相似,NX349的乙醛浓度变化曲线则在整个发酵过程中都呈现出较平稳的上升趋势。

图1B为NX8423与F15在干红葡萄酒发酵过程中的比重及乙醛动态变化曲线。在干红葡萄酒的发酵过程中,NX8423的乙醛动态变化趋势与其在干白中相似,但更为迅速,且乙醛峰值质量浓度也有显著差异($P<0.05$)。D3-4、G3-3、NX349的乙醛动态变化趋势与NX8423相似。

2.3 葡萄酒发酵过程中乙醛特征参数比较

乙醛产生速率、代谢速率、峰值与末值被用来作为评判菌株乙醛特征的4个参数。虽然这些特征参数通常并不作为筛选酵母的标准,但是在酒精发酵过程中评价这些特征参数具有重要的价值。例如,酵母具有快速的乙醛产生速率可以有效地促进乙醛与 SO_2 的结合^[20],同时可加快其自身的繁殖并提高发酵的起酵速度^[17,21]。具有快速降解乙醛能力的酵母菌株可以在酒精发酵末期快速降解乙醛,释放出自由 SO_2 ,从而发挥生物澄清作用^[2]。乙醛产量低的菌株可以在发酵过程中降低 SO_2 的使用量,从而进一步满足消费者对健康的追求。高产乙醛的菌株,由于可以增加色泽的稳定性而适用于色泽不稳定的红葡萄酒的酿造^[2]。

表 3 干白葡萄酒发酵过程中的乙醛产生速率、代谢速率、峰值和末值
Table 3 Acetaldehyde production rate, degradation rate, peak and final concentration in dry white wine during fermentation

酵母菌株	乙醛产生速率/ (mg/(L·d))	乙醛代谢速率/ (mg/(L·d))	峰值/(mg/L)	末值/(mg/L)
X16	39.39±1.10 ^a	1.91±0.34 ^c	78.78±2.20 ^c	53.94±6.59 ^e
D3-4	29.30±2.20 ^b	1.55±0.37 ^c	58.60±4.39 ^d	39.96±0.00 ^f
G3-3	14.40±1.03 ^c	1.23±0.26 ^c	86.41±6.18 ^c	74.12±8.78 ^d
NX349	12.87±0.34 ^c	0.52±0.73 ^c	167.29±4.39 ^b	165.73±2.20 ^b
NX8423	28.40±0.73 ^b	5.90±0.34 ^b	170.39±4.39 ^b	93.69±0.00 ^c
自然发酵	13.86±0.52 ^c	26.56±3.36 ^a	235.60±8.78 ^a	182.48±2.06 ^a

注:乙醛产生速率=峰值/(mg/L)/达到峰值的时间/d,乙醛代谢速率=(峰值-末值)/(mg/L)/从峰值至末值的时间/d。同列数据间比较,不同字母表示差异显著($P<0.05$)。表4同。

由表3可知,乙醛的产生主要发生在酒精发酵的初期,通过Duncan's新复极差法检验各菌株的乙醛产生速

率,结果显示所有本土酵母的乙醛产生速率均显著低于商业酿酒酵母X16($P<0.05$),但D4-3与NX8423、G3-3、NX349及自然发酵之间的差异则达不到显著水平($P>0.05$)。随着发酵的进行,当酵母生长至对数后期时,乙醛含量达到峰值。各菌株的峰值范围为58.60~235.60mg/L,其中本土酵母D3-4的乙醛峰值含量较商业菌株X16显著降低了25.62%,G3-3与X16未显现出显著性差异,NX349与NX8423则显著高于X16($P<0.05$)。随后,发酵液中的乙醛含量开始降低,NX8423的乙醛代谢速率较X16显著增加2.09倍,D3-4、G3-3及NX349则与X16无显著性差异。发酵结束时,本土酵母D3-4的乙醛末值较商业菌株X16显著降低25.92%,G3-3与X16无显著性差异,NX349与NX8423则显著高于X16。自然发酵的乙醛峰值及末值含量均最高,乙醛代谢速率也显著高于接种发酵,这可能是由于自然发酵是一个多种菌株混合发酵的过程,难于控制。

表4 干红葡萄酒发酵过程中的乙醛产生速率、代谢速率、峰值和末值
Table 4 Acetaldehyde production rate, degradation rate, peak and final concentration in dry red wine during fermentation

酵母菌株	乙醛产生速率/ (mg/(L·d))	乙醛代谢速率/ (mg/(L·d))	峰值/(mg/L)	末值/(mg/L)
F15	44.66±1.03 ^c	11.28±0.51 ^d	89.33±2.06 ^d	44.20±4.12 ^c
D3-4	45.39±2.06 ^c	8.73±0.46 ^c	90.78±4.12 ^d	51.48±2.06 ^b
G3-3	65.04±1.03 ^a	20.74±0.51 ^b	130.08±2.06 ^a	47.11±0.00 ^{bc}
NX349	23.42±1.03 ^c	25.62±1.65 ^a	93.69±4.12 ^d	29.65±0.00 ^d
NX8423	60.67±1.03 ^b	17.47±0.00 ^e	121.35±2.06 ^b	42.75±2.06 ^c
自然发酵	36.08±0.00 ^d	16.98±0.69 ^e	108.25±0.00 ^c	57.30±2.06 ^a

由表4可知,G3-3、NX8423的乙醛产生速率较F15分别显著提高了45.63%与35.85%($P<0.05$),NX349与自然发酵则较F15显著降低47.56%与19.21%。各菌株的乙醛峰值含量平均为108.70mg/L,除D3-4的乙醛峰值含量与F15无显著差异外,其余3株本土酵母乙醛峰值含量都显著高于商业酵母F15。峰值过后发酵液中乙醛的含量开始降低,各菌株乙醛代谢速率范围为8.73~25.62mg/(L·d),除D3-4外,G3-3、NX349、NX8423的乙醛代谢速率均显著高于商业酵母F15,增幅分别为83.87%、127%、54.88%。发酵结束时各菌株的乙醛末值含量范围为29.65~57.30mg/L,NX349的乙醛末值含量较F15显著降低了32.92%,其余本土酵母菌株及自然发酵都显著高于F15($P<0.05$)。

在酒精发酵初期,酿酒酵母产生乙醛作为最终的电子受体,在发酵过程中乙醛再经乙醇脱氢酶的作用被还原生成乙醇。不同的酿酒酵母菌株乙醛产量特征差异很大(0.5~286.0mg/L)^[17],本研究所选用的4株本土酵母与2株商业酵母菌株的乙醛特征参数具有显著性差异($P<0.05$)。对于酵母乙醛代谢特征与其生长状况的相关性研究,前人已有报道。Cheraiiti等^[17]通过对发酵初期乙醛的产生速率与乙醛的峰值及末值含量进行了相关性分析,发现其

三者相互间并无相关性,但乙醛的产生速率与酵母生长及发酵的迟滞期具有相关性,分别呈现出指数与线性关系。Li Erhu等^[18]的研究则显示,乙醛的产量系数(乙醛的产生速率/还原糖的代谢速率)与乙醛峰值之间呈显著的线性关系($R^2=0.92$)。本研究所选用的4株本土酵母的乙醛产生速率与峰值及末值之间也并无相关性,这与Cheraiiti先前的报道相一致。对于不同酵母菌株乙醛代谢特征产生差异的原因国内外学者还未能给予揭示。

3 结论

本土酵母与商业酵母均可快速、稳定、彻底地完成发酵。二者的乙醛动态变化趋势相似,都可分为酵母生长期乙醛含量的快速积累及酵母稳定期的乙醛逐渐分解代谢两个阶段。但是,本土酵母的乙醛特征参数与商业酵母具有显著性差异($P<0.05$)。在干白葡萄酒的发酵过程中,商业酵母X16表现出最快的乙醛产生速率。本土酵母NX8423显现出最快的乙醛代谢速率,较X16增加了2.09倍。D3-4的乙醛峰值及末值含量分别较X16降低了25.62%及25.92%,为所有菌株中最低。而在干红葡萄酒的发酵中,4株本土酵母均显示了高于商业酵母F15的乙醛产生速率,G3-3较F15最显著,增幅达到45.63%。NX349菌株表现出最快的乙醛代谢速率及最低的末值含量,其代谢速率较F15提高了1.27倍,末值降低了32.92%。基于以上结果,认为本土酿酒酵母菌株具有较商业菌株优良的乙醛代谢特征,通过开发本土优良酵母菌株优化葡萄酒酿造过程中的乙醛含量切实可行。

参考文献:

- [1] ROMERO C, BAKKER J. Interactions between grape anthocyanins and pyruvic acid, with effect of pH and acid concentration on anthocyanin composition and color in model solutions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(8): 3130-3139.
- [2] SAUCIER C, LITTLE D, GLORIES Y. First evidence of acetaldehyde-flavanol condensation products in red wine[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1997, 48(3): 370-373.
- [3] FERREIRA A C D, BARBE J C, BERTRAND A. Heterocyclic acetals from glycerol and acetaldehyde in port wines: evolution with aging[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(9): 2560-2564.
- [4] LACHENMEIER D W, SOHNIUS E M. The role of acetaldehyde outside ethanol metabolism in the carcinogenicity of alcoholic beverages: evidence from a large chemical survey[J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(8): 2903-2911.
- [5] LACHENMEIER D W, KANTERES F, REHM J. Carcinogenicity of acetaldehyde in alcoholic beverages: risk assessment outside ethanol metabolism[J]. Addiction (Abingdon, England), 2009, 104(4): 533-550.
- [6] 李先栓. 乙醇代谢物的解毒探究[J]. 实验设计与技术, 2010(10): 36-37.
- [7] WEEKS C. Production of sulfur dioxide-binding compounds and of

- sulfur dioxide by two *Saccharomyces* yeasts[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1969, 20(1): 32-39.
- [8] FARRIS G A, FATICHENTI F, DEIANA P, et al. Functional selection of low sulfur dioxide-acceptor producers among 30 *Saccharomyces cerevisiae* strains[J]. Journal of Fermentation Technology, 1983, 61(2): 201-204.
- [9] ROMANO P, SUZZI G, TURBANTI L, et al. Acetaldehyde production in *Saccharomyces cerevisiae* wine yeasts[J]. FEMS Microbiology Letters, 1994, 118(3): 213-218.
- [10] LIU S Q, PILONE G J. An overview of formation and roles of acetaldehyde in winemaking with emphasis on microbiological implications[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2000, 35(1): 49-61.
- [11] RANKINE B C, POCOCK K F. Influence of yeast strain on binding of sulphur dioxide in wines, and on its formation during fermentation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1969, 20(2): 104-109.
- [12] HERRAIZ T, REGLERO G, HERRAIZ M, et al. Differences between wines fermented with and without SO₂ using various selected yeasts[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1989, 49(2): 249-258.
- [13] LONGO E, VELAZQUEZ J B, SIEIRO C, et al. Production of higher alcohols, ethyl-acetate, acetaldehyde and other compounds by 14 *Saccharomyces cerevisiae* wine strains isolated from the same region (Salnes, NW Spain)[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1992, 8(5): 539-541.
- [14] ROMANO P, CARUSO M, CAPECE A, et al. Metabolic diversity of *Saccharomyces cerevisiae* strains from spontaneously fermented grape musts[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2003, 19(3): 311-315.
- [15] 魏运平, 赵光鳌. 葡萄酒酿造中乙醛的形成及其重要作用[J]. 酿酒科技, 2003(2): 77-78.
- [16] ROMANO P, SUZZI G, TURBANTI L, et al. Acetaldehyde production in *Saccharomyces cerevisiae* wine yeasts[J]. FEMS Microbiology Letters, 1994, 118(3): 213-218.
- [17] CHERAITI N, GUEZENEC S, SALMON J M. Very early acetaldehyde production by industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains: a new intrinsic character[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 86(2): 693-700.
- [18] LI Erhu, de ORDUÑA R M. Evaluation of the acetaldehyde production and degradation potential of 26 enological *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* yeast strains in a resting cell model system[J]. Journal of Industrial Microbiology Biotechnology, 2011, 38(9): 1391-1398.
- [19] GB/T 15038—2006 葡萄酒、果酒通用分析方法[S].
- [20] REMIZE F, ROUSTAN J L, SABLAYROLLES J M, et al. Glycerol overproduction by and engineered *Saccharomyces cerevisiae* wine yeast strains leads to substantial changes in by-product formation and to a stimulation of fermentation rate in stationary phase[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(1): 143-149.
- [21] HENNIG K, BURKHARDT R. Detection of phenolic compounds and hydroxy acids in grapes, wines, and similar beverages[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1960, 11: 64-79.