无核白葡萄干蒸馏酒不同馏分挥发性风味成分分析

于 筱[1]，王文文[2]，周晓明[3]，伍新宇[3]，陈 恺[1,*]
（1.新疆农业大学食品科学与药学学院，新疆 乌鲁木齐 830052；
2.新疆维吾尔自治区科技资源共享服务中心，新疆特色功能食品营养与安全检测重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
3.新疆维吾尔自治区农业科学院果蔬研究所，新疆 乌鲁木齐 830091）

摘 要：为研究葡萄干蒸馏酒挥发性成分馏出规律，采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱技术分析无核白葡萄干蒸馏酒酒头（T1）、酒心前段（T2）、酒心中段（T3）、酒心后段（T4）、酒尾前段（T5）、酒尾后段（T6）6个不同蒸馏阶段挥发性风味成分。结果表明，各馏分共检出104种挥发性风味成分，其中酯类48种、醇类27种、酸类7种、醛酮类11种和其他类11种。酯类物质在T1段质量浓度最高，达到106 354.15 μg/L，T2～T3段急剧降低，酒尾后段降至706.85 μg/L。醇类物质质量浓度从T1段的33 523.27 μg/L持续降至T6段的735.72 μg/L。酸类物质与醛酮类物质含量呈现持续上升趋势，酒尾略有下降。层次聚类分析将不同馏分聚为4类，T1、T2、T3与T4、T5与T6。基于气味活度值并参考经典白兰地关键香气成分初步筛选出酒体9种关键香气成分，包括辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸异戊酯、己酸乙酯、乙酸苯乙酯、月桂酸乙酯、异戊醇、苯乙醇及异戊醛。本研究为深入解析无核白葡萄干蒸馏酒馏分变化规律及摘酒工艺的精细优化提供了理论依据。

关键词：无核白葡萄干；蒸馏酒；馏分；挥发性风味成分

Analysis of Volatile Flavor Components in Different Fractions of Thompson Seedless Raisins Distilled Spirits

YU Xiao[1], WANG Wenwen[2], ZHOU Xiaoming[3], WU Xinyu[3], CHEN Kai[1,*]
(1. School of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Ürümqi 830052, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Featured Functional Food Nutrition and Safety Testing, Xinjiang Uygur Autonomous Region Science and Technology Resources Sharing Service Centre, Ürümqi 830011, China;
3. Institute of Fruits and Vegetables, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Ürümqi 830091, China)

Abstract: To explore the distillation patterns of volatile components in raisin distilled spirits, the volatile flavor components in six distillation fractions of Thompson seedless raisins spirits, namely head distillate (T1), early core distillate (T2), middle core distillate (T3), late core distillate (T4), early tail distillate (T5) and final tail distillate (T6), were analyzed by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry. The results showed that a total of 104 volatile flavor components were identified across all fractions, consisting of 48 esters, 27 alcohols, 7 acids, 11 aldehydes and ketones, and 11 other compounds. Ester content peaked at 106 354.15 μg/L in the T1 fraction, then dropped sharply from T2 to T3, and declined to 706.85 μg/L in the tail cut. Alcoholic substance contents decreased steadily from 33 523.27 μg/L in T1 to 735.72 μg/L in T6. Acidic and aldehyde/ketone compound contents showed a continuous upward trend with a slight reduction in the tail. The different fractions were clustered into four categories by hierarchical cluster analysis (HCA): T1 (head), T2 (early core), T3 and T4 (middle-to-late core), and T5 and T6 (early-to-final tail). A total of 9 key aroma

收稿日期：2025-10-15
基金项目：自治区创新环境（人才、基地）建设专项——科技创新基地建设（资源共享平台建设）项目（PT2402）；新疆维吾尔自治区重点研发项目（2022B02034-3）
第一作者简介：于筱（2000—）（ORCID: 0009-0005-1781-6625），女，硕士研究生，研究方向为葡萄加工品质评价。E-mail: yux066@qq.com
*通信作者简介：陈恺（1985—）（ORCID: 0009-0000-3420-4579），男，正高级实验师，硕士，研究方向为果蔬加工及综合利用。E-mail: chenk117@qq.com

compounds were preliminarily identified in distillate, including ethyl octanoate, ethyl decanoate, isoamyl acetate, ethyl caproate, phenylethyl acetate, ethyl laurate, isoamyl alcohol, phenylethyl alcohol, and isovaleraldehyde, based on odor activity values with reference to typical aroma components of classic brandy. This study provided theoretical support for revealing the variation characteristics of distillates and optimizing spirit-cut process of Thompson seedless raisin spirits.

Keywords: Thompson seedless raisins; distilled spirits; distilled fractions; volatile flavor component

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.06.018

中图分类号：TS262.7 文献标志码：A 文章编号：0254-5071（2026）06-0139-09

引文格式：

于筱, 王文文, 周晓明, 等. 无核白葡萄干蒸馏酒不同馏分挥发性风味成分分析[J]. 中国酿造, 2026, 45(6): 139-147. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.06.018. http://www.chinabrewing.net.cn

YU Xiao, WANG Wenwen, ZHOU Xiaoming, et al. Analysis of volatile flavor components in different fractions of Thompson seedless raisins distilled spirits[J]. China Brewing, 2026, 45(6): 139-147. (in Chinese with English abstract) DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.06.018. http://www.chinabrewing.net.cn

无核白葡萄是新疆吐鲁番的主栽葡萄品种，主要用于制干、鲜食等。吐鲁番葡萄干主要由阴干、晒干等[1-2]不同方式获得。晒干葡萄干由于工艺差异[3]，造成其褐色的外观及差异性的口感，使其市场价格明显低于荫干制成的绿色葡萄干。受晾晒制干环境等多种因素的影响，市面上葡萄干产品品质优劣不一，加之近年葡萄干总产量偏高，受市场供需格局变动制约，部分年份收购售价持续走低，极大挫伤了种植农户的生产与种植积极性。因此积极推进葡萄干原料的二次深加工，实现高值化转化，有助于抵御市场价格波动对产业造成的不良影响。

蒸馏酒可利用多样化的原料进行生产，借助科学的发酵及蒸馏技术，不仅能拓展产品种类，还能大幅提升产品的经济价值。挥发性香气成分是决定蒸馏酒风格特质的核心物质，也是评定其品质优劣的重要指标[4-6]。不同香气组分的种类、含量、嗅觉阈值及组分间的协同作用共同塑造蒸馏酒独特的风味与典型性[7]。因此明晰各类香气物质在蒸馏阶段的馏出规律，对调控酒体风味品质至关重要。近年来，诸多学者围绕水果蒸馏酒香气物质馏出特征开展相关研究：李冠宇等[8]研究了户太8号葡萄白兰地在蒸馏过程中的馏出动力学，发现大多数果香酯主要在前期快速馏出，高级醇馏出贯穿全程，脂肪酸主要于中后期馏出。彭波等[9]发现白玉霓葡萄基酒蒸馏过程中，高级醇和酯类物质主要在乙醇体积分数47%前大量馏出，酸类主要在蒸馏中段馏出，醛酮类呈“U”形规律馏出。康三江等[10]从花牛苹果蒸馏酒中检出108种香气成分，发现蒸馏过程中酯类物质含量逐渐减少，酸类物质含量逐渐增加，而醇类物质、醛酮类物质含量则先增加后减少。

本研究采用吐鲁番无核白葡萄干（晒干）作为原料生产蒸馏酒，通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱（headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）技术分析蒸馏阶段不同馏分挥发性香气成分的种类、含量及变化规律，为无核白葡萄干蒸馏酒工艺优化及产品质量提升提供理论依据及技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

无核白葡萄干购于吐鲁番葡萄干市场，均为2024年采收并自然晒干。

Lallzyme EX-V果胶酶（5 700 U/g） 加拿大Lallmand公司；Bayanus葡萄酒&果酒通用酵母 法国Lamothe-Abiet公司；其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

R15铜制葫芦蒸馏器 杭州葫陆实业有限公司；QP2020NX GC-MS仪 日本岛津公司；DB-WAX气相色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm） 美国安捷伦公司；DVB/PDMS自动SPME头 美国Supelco公司。

1.3 方法

1.3.1 无核白葡萄干蒸馏酒制备工艺

1.3.1.1 无核白葡萄干蒸馏酒原酒发酵工艺流程及操作要点

工艺流程：葡萄干清洗→复水→酶解浸提→分离皮渣→清汁发酵→倒罐澄清。

发酵液制备：参考林范学等[11]的方法稍作修改，葡萄干用清水洗净，按照质量比1∶3复水，超声（200 W、40 kHz）浸提15 min，加入0.02 g/L果胶酶，搅拌均匀，常温浸提24 h，分离皮渣。分离皮渣后发酵液总糖质量浓度182.4 g/L、滴定酸4.22 g/L。

酵母活化：取5%发酵液体积的温水，加入0.2 g/L酵母（按总发酵液体积计），37 ℃保温激活15 min；再加入20%发酵液，冷却10～30 min；待温差小于10 ℃时，转入发酵液。

乙醇发酵：控制发酵温度（20±5）℃，发酵过程中检测可溶性固形物质量浓度连续2 d无明显变化，发酵基本结束。发酵基本结束后7 d内进行一次倒罐澄清，发酵完全结束。澄清后基酒总糖质量浓度5.34 g/L、滴定酸度4.13 g/L、乙醇体积分数9.6%。

1.3.1.2 无核白葡萄干白兰地一次蒸馏工艺操作要点

将发酵结束后的基酒（10 L）放入铜制葫芦蒸馏器（仿照夏朗德蒸馏器）中进行蒸馏。葫芦上方加装精馏塔，用以提高蒸馏酒乙醇体积分数及分离效果。采用电陶炉加热蒸馏，前期设置功率2 200 W，即将沸腾时调整功率为800 W，直至结束蒸馏。每收集500 mL馏出液为1个馏分，整个蒸馏阶段共收集馏分6个，分别为酒头（T1）、酒心前段（T2）、酒心中段（T3）、酒心后段（T4）、酒尾前段（T5）、酒尾后段（T6）。6个阶段乙醇体积分数分别为66.0%、54.5%、41.0%、24.5%、10.0%、2.5%。

1.3.2 挥发性风味成分分析

采用HS-SPME-GC-MS技术测定葡萄酒样挥发性风味成分[12]。

HS-SPME条件：准确量取3 mL待测葡萄酒样于装有磁力搅拌转子的15 mL顶空瓶中，加入0.6 g NaCl，同时再加入5 μL 4-辛醇溶液（0.093 g/L），即刻旋紧顶空瓶瓶盖。将装有待测酒样的顶空瓶置于磁力加热搅拌器工作台上，45 ℃恒温平衡15 min，然后将已活化好的65 μm PDMS/DVB SPME纤维头插入顶空瓶内，45 ℃恒温萃取45 min，萃取完成后取出萃取头，立即插入GC-MS进样口，解吸5 min，同时启动仪器进行数据采集。

GC条件：选用DB-WAX色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）；检测器及进样口温度分别为230 ℃和250 ℃；升温程序：40 ℃保持3 min，以2 ℃/min升至140 ℃，然后以7.5 ℃/min升至270 ℃，保持6 min；载气为高纯（99.999%）氦气；载气流速1.78 mL/min，不分流进样。

MS条件：电子离子源，电离能量70 eV，离子源温度230 ℃；传输线温度270 ℃；全扫描模式，质量扫描范围*m/z* 30～450。

定性定量方法：将GC-MS检出挥发性风味成分与NIST 17数据库对比鉴定，选取匹配度不小于85%的物质进行定性；采用内标法进行定量。

1.3.3 关键挥发性成分分析

气味活度值（odor activity value，OAV）为挥发性风味成分的质量浓度和阈值的比值，用以评估挥发性成分对样品整体风味贡献。一般OAV＞1的挥发性成分为样品的关键挥发性成分。

1.4 数据处理

所有数据均表示为$\bar{x}\pm s$，采用R语言绘制层次聚类热图，采用SPSS 29.0软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同馏分的挥发性风味成分组成及类别分析

由表1可知，从6个阶段馏分中共检出104种挥发性风味成分。其中酯类48种，质量浓度126 525.39 μg/L；醇类27种，质量浓度57 108.23 μg/L；酸类7种，质量浓度6 295.11 μg/L；醛酮类11种，质量浓度2 053.48 μg/L；其他类11种，质量浓度822.51 μg/L。酯类物质含量占挥发性风味成分总含量的65.62%，是无核白葡萄干蒸馏酒最主要的挥发性成分及呈香物质。酯类物质阈值相对较低，对白兰地香气形成具有突出贡献[13-14]。醇类物质含量占挥发性物质总含量的29.62%，排名第2。

T1～T6段挥发性风味成分数量分别为79、76、68、63、59、54个，整体呈下降趋势。6个阶段共同检出的挥发性风味成分有33个，多为酯类与醇类。T1段独有的挥发性风味成分为13个，远高于其他阶段，表明酒头馏分香气物质种类更为丰富，风味特征独具代表性。T1、T2与T1、T2、T3也有相对较多的共有挥发性风味成分，表明酒头至酒心阶段部分挥发性风味成分馏出具有连贯性。T5～T6段检出物质数量减少，酸类与其他类物质比例增加，醇类与酸类物质比例减少。

随着蒸馏的推进，酯类物质数量、质量浓度均呈持续下降趋势，从T1段的43种、106 354.15 μg/L降至T6段的22种、706.85 μg/L；醇类物质数量、质量浓度整体呈现下降趋势，从T1段的21种、33 523.27 μg/L降至T6段的6种、735.72 μg/L；酸类物质数量、质量浓度整体略有上升，从T1段的3种、284.66 μg/L升至T5段的7种、2 181.07 μg/L；醛酮类物质数量整体呈上升趋势，在T2～T6段基本稳定，醛酮类物质质量浓度变化与酸类相似，整体呈增加趋势，至T5段达到最高（526.05 μg/L）；其他类物质数量差别不大，质量浓度为88.33～217.51 μg/L。综上，各阶段馏分的挥发性风味成分由酯类及醇类物质主导逐渐变为酯类与多类物质并存。彭波等[9]研究葡萄蒸馏酒挥发性成分变化，发现酯类与醇类物质含量均为前期剧烈降低，后期降低幅度减缓，相应的变化规律与本研究类似，但酸类物质含量在蒸馏中段有较大幅度增加，与本研究结果有所不同。

T1阶段含量最高的5种挥发性风味成分依次为辛酸乙酯、异戊醇、癸酸乙酯、乙酸异戊酯、己酸乙酯。T2阶段含量最高的5种挥发性风味成分依次为异戊醇、辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、苯乙醇。T3阶段含量最高的5种挥发性风味成分依次为异戊醇、辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、苯乙醇。T4阶段含量最高的5种挥发性风味成分依次为辛酸乙酯、癸酸乙酯、异戊醇、辛酸、苯乙醇。T5阶段含量最高的5种挥发性风味成分依次为辛酸、辛酸乙酯、苯乙醇、正癸酸、糠醛。T6阶段含量最高的5种挥发性风味成分依次为辛酸、苯乙醇、辛酸乙酯、糠醛、正癸酸。

表 1 不同蒸馏阶段馏分挥发性风味成分种类及含量

Table 1 Types and contents of volatile flavor components in fractions at different distillation stages

类别	编号	保留时间/min	化合物	CAS号	质量浓度/（μg/L）						总质量浓度/（μg/L）	阈值/（μg/L）	OAV	香气描述[15-18]
					T1	T2	T3	T4	T5	T6				
酯类	A1	0.79	甲酸乙烯酯	692-45-5	180.33±10.34^{a}	28.76±1.04^{b}	—	—	—	2.37±0.05^{c}	211.46	9	23.50	
	A2	1.18	醋酸异丙烯酯	108-22-5	45.63±4.74^{a}	32.12±1.69^{b}	23.97±2.50^{c}	20.72±1.73^{c}	—	—	122.44	—	—	醋酸果香
	A3	1.67	乙酸乙酯	141-78-6	6 767.82±411.73^{a}	186.24±19.46^{b}	64.56±4.07^{b}	46.53±4.02^{b}	51.29±5.64^{b}	18.34±1.56^{b}	7 134.78	7 500	0.95	苹果、菠萝
	A4	3.65	乙酸异丁酯	110-19-0	321.25±10.07^{a}	—	—	—	—	—	321.25	3 400	0.09	香蕉
	A5	4.26	丁酸乙酯	105-54-4	495.78±48.55^{a}	8.27±0.75^{b}	9.90±0.90^{b}	9.16±0.86^{b}	7.35±0.39^{b}	2.72±0.16^{b}	533.18	80	6.66	苹果、菠萝
	A6	7.26	乙酸异戊酯	123-92-2	14 326.83±2 230.77^{a}	397.16±51.12^{b}	123.92±9.82^{b}	44.60±0.93^{b}	26.03±2.07^{b}	15.96±1.06^{b}	14 934.50	30	497.82	香蕉、甜果香
	A7	7.56	戊酸乙酯	539-82-2	106.04±5.24^{a}	—	—	—	—	—	106.04	20	5.30	苹果、菠萝
	A8	9.64	4-甲基戊酸甲酯	2412-80-8	45.51±3.85^{a}	—	—	—	—	—	45.51	—	—	菠萝、香蕉、奶酪
	A9	11.69	己酸乙酯	123-66-0	11 079.68±625.09^{a}	415.01±6.77^{b}	314.25±21.07^{b}	376.45±27.00^{b}	255.97±18.69^{b}	102.31±11.67^{b}	12 543.67	60	209.06	菠萝香
	A10	11.92	2,4-己二烯酸乙酯	110318-09-7	—	11.63±1.28^{a}	7.95±0.27^{b}	4.12±0.16^{c}	2.71±0.17^{d}	1.32±0.10^{e}	27.73	—	—	
	A11	13.54	乙酸己酯	142-92-7	198.17±32.57^{a}	—	—	—	—	0.43±0.02^{b}	198.60	10	19.86	梨香、花香
	A12	16.37	庚酸乙酯	106-30-9	137.82±11.30^{a}	4.31±0.45^{b}	3.47±0.14^{b}	3.71±0.20^{b}	2.57±0.12^{b}	1.51±0.13^{b}	153.39	13 150	0.01	菠萝香
	A13	17.91	乳酸乙酯	97-64-3	46.92±3.09^{c}	43.14±2.72^{c}	—	113.89±19.01^{b}	148.18±12.23^{a}	—	352.13	128 000	0.00	果香、奶油
	A14	18.14	3-糠酸乙酯	614-98-2	175.93±5.91^{a}	136.47±5.73^{b}	—	57.52±5.67^{c}	20.34±0.96^{d}	—	390.26	—	—	
	A15	18.39	乙酸庚酯	112-06-1	39.74±3.89^{a}	—	—	—	—	—	39.74	670	0.06	杏仁、樱桃、梨香、玫瑰
	A16	18.43	甲酸己酯	629-33-4	112.99±9.80^{a}	—	—	—	—	—	112.99	98	1.15	苹果、菠萝、梅子
	A17	21.59	辛酸乙酯	106-32-1	41 696.42±1 306.51^{a}	2 822.29±371.69^{b}	2 092.52±133.94^{bc}	1 919.80±223.63^{bc}	1 198.21±85.95^{cd}	416.00±28.71^{d}	50 145.24	500	100.29	香蕉、葡萄香
	A18	22.33	己酸异戊酯	2198-61-0	55.87±3.15^{a}	3.75±0.28^{b}	—	—	0.60±0.05^{c}	—	60.22	1 000	0.06	苹果、菠萝、奶酪
	A19	23.10	乙酸辛酯	112-14-1	118.26±6.71^{a}	2.17±0.25^{b}	—	—	—	—	120.43	20	6.02	橙子、茉莉
	A20	23.57	7-辛烯酸乙酯	35194-38-8	32.69±1.27^{a}	—	—	—	—	—	32.69	—	—	花香、柑橘
	A21	25.00	辛酸丙酯	624-13-5	34.67±2.68^{a}	—	—	—	—	—	34.67	—	—	椰子、可可、杜松子
	A22	25.74	壬酸乙酯	123-29-5	216.93±20.30^{a}	17.96±0.70^{b}	8.32±1.14^{bc}	5.19±0.59^{bc}	1.54±0.06^{c}	0.87±0.07^{c}	250.81	3 150	0.08	玫瑰、葡萄
	A23	26.35	*DL*-白氨酸乙酯	10348-47-7	—	14.52±0.70^{a}	12.01±0.58^{b}	—	—	—	26.53	57	0.47	黑莓
	A24	26.40	正辛酸丁酯	589-75-3	30.17±3.43^{a}	—	—	—	—	—	30.17	—	—	黄油
	A25	27.42	乳酸异戊酯	19329-89-6	7.02±0.30^{b}	13.35±1.16^{a}	13.26±1.73^{a}	7.64±0.71^{b}	4.62±0.32^{c}	—	45.89	—	—	果香、奶油、坚果
	A26	27.86	3-壬烯酸乙酯	91213-30-8	121.43±5.73^{a}	3.08±0.19^{b}	1.84±0.19^{b}	2.49±0.14^{b}	1.80±0.06^{b}	0.86±0.04^{b}	131.50	—	—	
	A27	28.21	癸酸甲酯	110-42-9	121.89±7.93^{a}	5.67±0.18^{b}	3.97±0.35^{bc}	4.42±0.58^{bc}	1.65±0.16^{bc}	0.30±0.02^{c}	137.90	1 200	0.11	果香、紫罗兰
	A28	30.35	癸酸乙酯	110-38-3	22 893.35±2 666.70^{a}	1 845.59±65.51^{b}	1 235.93±103.03^{bc}	869.14±128.87^{bc}	259.76±21.67^{bc}	62.19±7.44^{c}	27 165.96	1 120	24.26	梨香
	A29	30.90	正辛酸异戊酯	2035-99-6	162.52±6.88^{a}	12.66±0.67^{b}	5.84±0.42^{c}	2.75±0.27^{bc}	—	—	183.77	125	1.47	烤苹果
	A30	31.00	乙酸香茅酯	150-84-5	21.24±2.42^{a}	—	—	—	—	—	21.24	1.4	15.17	紫罗兰、玫瑰、杏子
	A31	31.74	丁二酸二乙酯	123-25-1	—	20.05±0.78^{b}	23.60±2.59^{a}	17.43±1.08^{c}	19.80±1.47^{b}	15.28±0.86^{c}	96.16	353 190	—	苹果
	A32	32.11	(*Z*)-4-癸烯酸乙酯	7367-84-2	—	104.77±8.03^{a}	—	—	—	—	104.77	—	—	
	A33	32.20	乙基9-癸烯酸酯	67233-91-4	1 430.50±211.60^{a}	—	42.58±2.70^{b}	40.51±5.27^{b}	25.54±2.22^{b}	8.64±0.50^{b}	1 547.77	200	7.74	桃、苹果、梨
	A34	34.71	乙酸香叶酯	105-87-3	21.56±0.45^{a}	—	—	—	—	1.56±0.04^{b}	23.12	150	0.15	玫瑰、薰衣草、苹果香
	A35	34.81	水杨酸甲酯	119-36-8	27.25±1.84^{a}	7.67±0.71^{b}	—	—	—	—	34.92	40	0.87	薄荷、冬青叶
	A36	35.63	苯乙酸乙酯	101-97-3	15.53±0.50^{a}	9.86±0.86^{b}	3.87±0.54^{c}	1.14±0.02^{d}	—	—	30.40	410	0.07	玫瑰、蜂蜜
	A37	36.73	乙酸苯乙酯	103-45-7	2 125.09±153.62^{a}	1 572.13±129.80^{b}	946.44±80.68^{c}	419.21±35.90^{d}	157.27±13.46^{e}	41.23±3.46^{e}	5 261.37	20	263.07	茉莉、玫瑰、蜂蜜

续表1

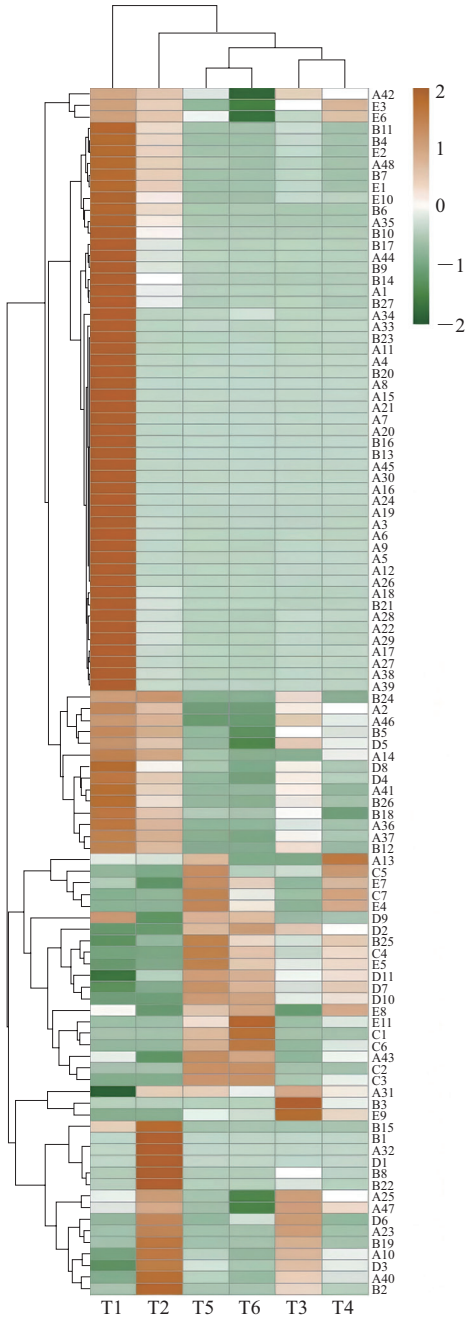
类别	编号	保留时间/min	化合物	CAS号	质量浓度/（μg/L）						总质量浓度/（μg/L）	阈值/（μg/L）	OAV	香气描述[15-18]
					T1	T2	T3	T4	T5	T6				
酯类	A38	38.06	月桂酸乙酯	106-33-2	2 379.79±206.90^{a}	130.35±10.87^{b}	67.29±9.98^{b}	32.81±1.74^{b}	4.72±0.05^{b}	1.17±0.10^{b}	2 616.13	406.83	6.43	甜糯花香、茉莉、晚香玉
	A39	38.81	癸酸异戊酯	2306-91-4	123.34±8.85^{a}	4.62±0.38^{b}	1.55±0.15^{b}	—	—	—	129.51	3 000	0.04	玫瑰、果香
	A40	38.82	3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯	77-68-9		10.74±1.48^{a}	5.46±0.46^{b}	2.77±0.17^{c}	1.85±0.29^{c}	0.79±0.05^{d}	21.61	—	—	
	A41	39.20	3-苯丙酸乙酯	2021-28-5	67.44±5.43^{a}	31.38±3.05^{b}	22.94±2.02^{c}	—	—	—	121.76	130	0.94	风信子、玫瑰、果香
	A42	42.32	丁位十二内酯	713-95-1	28.58±3.47^{a}	24.56±1.79^{b}	23.60±2.44^{b}	18.62±1.56^{c}	16.81±0.35^{c}	—	112.17	200	0.56	桃子油、椰子油
	A43	44.00	椰子醛	104-61-0	6.25±0.55^{c}	2.92±0.17^{e}	4.29±0.56^{d}	6.38±0.79^{c}	10.34±0.69^{a}	9.28±0.46^{b}	39.46	30	1.32	椰子、桃子、杏、李子
	A44	45.31	肉豆蔻酸乙酯	124-06-1	268.12±30.49^{a}	25.42±4.40^{b}	4.28±0.39^{c}	0.79±0.04^{c}	2.07±0.14^{c}	—	300.68	2 000	0.15	紫罗兰、鸢尾草
	A45	45.86	月桂酸异戊酯	6309-51-9	20.39±1.39^{a}	—	—	—	—	—	20.39	100 000	—	油香、脂香
	A46	47.04	3-羟基十三烷酸乙酯	107141-15-1	12.36±0.66^{e}	10.54±0.25^{b}	8.90±1.17^{c}	5.43±0.42^{d}	—	—	37.23	—	—	
	A47	50.56	壬二酸二乙酯	624-17-9	5.39±0.29^{c}	8.72±0.76^{a}	9.16±0.83^{a}	7.05±1.10^{b}	4.02±0.40^{d}	1.49±0.11^{c}	35.83	1 280 000	—	
	A48	51.88	棕榈酸乙酯	628-97-7	229.66±17.02^{a}	104.67±7.58^{b}	22.96±3.16^{c}	5.53±0.71^{d}	12.37±1.09^{cd}	2.23±0.22^{d}	377.42	1500	0.25	苹果、梨、奶油
醇类	B1	4.49	1,3-戊二醇	149-31-5	—	24.70±0.88^{a}	—	—	—	—	24.70	—	—	
	B2	6.83	异丁醇	78-83-1	—	162.50±18.17^{a}	63.34±5.93^{b}	8.77±0.83^{c}	0.74±0.01^{e}	—	235.35	179 190	—	焦糖
	B3	12.45	2-甲基丁醇	137-32-6	—	—	468.13±23.44^{a}	69.54±2.76^{b}	6.22±0.56^{c}	—	543.89	159	3.42	乙醇、香蕉
	B4	12.64	异戊醇	123-51-3	31 169.44±2 749.97^{a}	13 200.79±946.88^{b}	4 216.06±302.41^{c}	857.29±21.63^{d}	106.03±12.74^{d}	3.89±0.27^{d}	49 553.50	30 000	1.65	苹果、香蕉
	B5	14.30	5-氨基十二氢-4-茚醇	57366-15-1	101.33±4.37^{a}	82.60±6.33^{b}	49.78±1.26^{c}	41.49±3.74^{d}	21.32±0.55^{e}	—	296.52	—	—	
	B6	16.78	4-甲基-1-戊醇	626-89-1	45.52±4.02^{a}	16.81±0.67^{b}	—	—	—	—	62.33	50 000	—	
	B7	17.29	3-甲基-1-戊醇	589-35-5	49.21±2.79^{a}	21.83±1.93^{b}	5.27±0.38^{c}	—	—	—	76.31	500	0.15	土壤、蘑菇香气
	B8	18.43	正己醇	111-27-3	—	40.50±3.59^{a}	8.18±0.70^{b}	1.39±0.11^{c}	—	—	50.07	6	8.35	甜香、花香、苹果、梨、青草香
	B9	22.57	蘑菇醇	3391-86-4	170.34±24.96^{a}	18.12±0.21^{b}	—	—	—	—	188.46	1	188.46	生鸡肉、蘑菇香
	B10	22.82	正庚醇	111-70-6	89.48±8.10^{a}	22.14±1.52^{b}	—	—	—	—	111.62	2 500	0.04	青草香、柑橘、鸢尾
	B11	23.21	6-甲基-5-庚烯-2-醇	1569-60-4	27.81±3.60^{a}	11.08±1.24^{b}	3.78±0.06^{c}	—	—	—	42.67	2 000	0.02	香菜、焦甜香
	B12	24.27	2-乙基己醇	104-76-7	99.72±8.62^{a}	68.51±5.19^{b}	51.03±4.85^{c}	8.71±0.68^{d}	—	—	227.97	270	0.84	花香
	B13	25.62	2-壬醇	628-99-9	152.25±12.57^{a}	—	—	—	—	—	152.25	82	1.86	奶油、柑橘、橙子、奶酪
	B14	27.16	正辛醇	111-87-5	524.37±29.58^{a}	100.70±2.14^{b}	—	—	—	—	625.07	200 000	0.00	柑橘、橙花、玫瑰
	B15	28.69	反-2-十一烯醇	75039-84-8	12.38±1.28^{a}	29.19±0.48^{b}	—	—	—	—	41.57	—	—	橙花、果香
	B16	29.49	反式-2-辛烯-1-醇	18409-17-1	40.67±2.28^{a}	—	—	—	—	—	40.67	40	1.02	柑橘、青香
	B17	31.28	正壬醇	143-08-8	193.49±10.33^{a}	24.37±2.49^{b}	5.40±0.30^{c}	—	—	—	223.26	280	0.80	玫瑰、柑橘
	B18	32.46	*α*-松油醇	98-55-5	18.51±1.52^{a}	13.32±0.21^{b}	10.16±0.84^{c}	5.09±0.53^{c}	7.94±0.46^{d}	7.61±0.67^{d}	62.63	1	62.63	木质、柑橘、柠檬、花香
	B19	33.63	5-甲基-2-呋喃甲醇	3857-25-8	—	12.17±1.80^{a}	7.94±0.72^{b}	—	—	—	20.11	—	—	焦糖
	B20	33.65	2-十三醇	1653-31-2	57.70±5.01^{a}	—	—	—	—	—	57.70	—	—	
	B21	35.27	正癸醇	112-30-1	189.66±8.00^{a}	13.73±1.00^{b}	2.6±0.16^{c}	1.03±0.05^{c}	0.79±0.06^{c}	0.79±0.06^{c}	208.60	4 000	0.05	橙花
	B22	35.37	(*R*)-(+)-*β*-香茅醇	1117-61-9	—	66.46±2.41^{a}	7.84±0.86^{b}	—	—	—	74.30	40	1.86	香茅油、玫瑰叶

续表1

类别	编号	保留时间/min	化合物	CAS号	质量浓度/（μg/L）						总质量浓度/（μg/L）	阈值/（μg/L）	OAV	香气描述[15-18]
					T1	T2	T3	T4	T5	T6				
醇类	B23	35.39	香茅醇	106-22-9	161.94±13.71^{a}	—	—	0.73±0.05^{b}	—	—	162.67	40	4.07	柑橘、香茅、玫瑰
	B24	38.38	香叶醇	106-24-1	26.24±0.63^{a}	27.77±2.61^{a}	16.27±1.69^{b}	—	—	—	70.28	8 000	0.01	玫瑰香、桃子香
	B25	40.34	苯乙醇	22258	286.01±26.55^{c}	438.45±11.41^{d}	563.3±14.21^{c}	756.03±62.42^{b}	1 011.44±58.13^{a}	718.41±45.09^{b}	3 773.64	2 600	1.45	玫瑰
	B26	42.73	月桂醇	112-53-8	44.27±5.16^{a}	21.26±1.35^{b}	20.23±1.06^{b}	6.35±0.46^{c}	4.55±0.33^{c}	2.90±0.09^{c}	99.56	820	0.12	青草、苹果皮
	B27	45.09	反式-橙花叔醇	40716-66-3	62.93±1.00^{a}	11.71±1.63^{b}	3.10±0.15^{c}	1.08±0.02^{d}	1.59±0.11^{d}	2.12±0.03^{cd}	82.53	100	0.83	花香、柑橘、木质
酸类	C1	22.55	冰醋酸	64-19-7	—	—	—	—	18.14±1.51^{b}	31.42±1.77^{a}	49.56	—	—	醋
	C2	31.57	3-甲基戊酸	105-43-1	—	—	—	—	18.95±0.50^{a}	18.66±2.73^{a}	37.61	10 000	—	酸性奶酪
	C3	38.22	正己酸	142-62-1	—	—	33.68±1.30^{c}	75.33±6.99^{b}	200.11±13.28^{a}	205.28±26.59^{a}	514.40	890	0.58	脂肪
	C4	45.74	辛酸	124-07-2	123.09±6.93^{c}	144.27±16.14^{c}	452.8±30.36^{d}	820.46±31.62^{c}	1 425.33±134.27^{a}	950.78±65.96^{b}	3 916.73	2 700	1.45	奶酪香
	C5	52.59	正癸酸	334-48-5	155.91±14.66^{c}	132.72±5.72^{c}	236.93±5.73^{b}	464.99±48.58^{a}	492.78±46.42^{a}	208.72±6.54^{b}	1 692.05	1 000	1.69	中药香
	C6	54.49	9-癸烯酸	14436-32-9	—	—	—	3.32±0.26^{c}	9.24±0.39^{b}	13.76±1.81^{a}	26.32	5.86	4.49	肥皂、蜡香、果香、乳香
	C7	58.87	月桂酸	143-07-7	5.66±0.59^{d}	6.10±0.44^{d}	6.57±0.32^{d}	14.43±1.40^{b}	16.52±0.96^{a}	9.16±0.60^{c}	58.44	10	5.84	椰子油
醛酮类	D1	1.77	正戊醛	110-62-3	—	71.18±3.56^{a}	—	—	—	—	71.18	12	5.93	发酵面包、果香
	D2	1.93	异戊醛	590-86-3	—	—	50.36±3.28^{b}	34.77±2.79^{c}	55.25±3.44^{b}	67.6±5.31^{a}	207.98	0.1	2 079.78	巧克力、桃子
	D3	5.43	正己醛	66-25-1	—	16.73±1.65^{a}	11.45±1.22^{b}	6.87±0.41^{c}	6.29±0.27^{c}	4.31±0.37^{d}	45.65	7.5	6.09	柑橘、苹果、木质
	D4	14.94	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	14.40±1.20^{a}	10.74±0.74^{b}	9.61±0.75^{b}	7.67±0.58^{c}	6.80±0.47^{cd}	5.72±0.79^{d}	54.94	0.067	819.94	土味、霉味、蘑菇、真菌
	D5	15.92	反式-2-庚醛	18829-55-5	5.38±0.34^{a}	4.69±0.37^{b}	4.63±0.16^{b}	4.00±0.26^{c}	3.33±0.34^{d}	2.57±0.16^{e}	24.60	—	—	蔬菜、脂肪、麦芽香
	D6	18.98	正壬醛	124-19-6	—	40.54±2.79^{a}	34.65±2.75^{b}	—	—	8.79±0.76^{c}	83.98	312	0.27	腊味、油脂、青梅、柑橘
	D7	22.62	糠醛	98-01-1	—	41.88±5.09^{e}	112.88±4.90^{d}	192.34±14.17^{c}	270.08±16.43^{a}	220.98±22.96^{b}	838.16	3 000	0.28	甜木、杏仁、烤面包
	D8	23.89	癸醛	112-31-2	48.42±2.94^{a}	21.26±1.84^{b}	21.13±1.52^{b}	10.49±1.46^{c}	11.07±1.23^{c}	4.25±0.59^{d}	116.62	1 000	0.12	甜橙油、柠檬油
	D9	25.41	反式-2-壬烯醛	18829-56-6	11.47±1.40^{a}	6.71±0.42^{c}	7.80±0.67^{bc}	8.08±0.45^{b}	10.76±0.12^{a}	10.51±0.05^{a}	55.33	50.5	1.10	黄瓜、柑橘
	D10	27.15	5-甲基-2-糠醛	620-02-0	—	—	24.46±2.02^{c}	34.97±3.15^{b}	56.14±6.14^{a}	52.85±4.43^{a}	168.41	466 321.08	0.00	香料
	D11	29.77	苯乙醛	122-78-1	—	46.23±5.73^{d}	61.96±1.32^{c}	75.46±8.78^{b}	106.33±6.67^{a}	96.65±8.97^{a}	386.63	260	1.49	风信子、杏仁、玫瑰
其他	E1	31.10	(*E*)-*β*-法尼烯	18794-84-8	44.00±3.09^{a}	19.71±0.51^{b}	4.17±0.43^{c}	—	—	—	67.88	—	—	木质香、花香
	E2	34.27	*α*-法尼烯	502-61-4	26.05±1.26^{a}	10.96±1.20^{b}	3.09±0.19^{c}	—	—	—	40.10	16	2.51	苹果、草药、薰衣草
	E3	10.91	2-戊基呋喃	3777-69-3	28.00±0.32^{a}	23.09±2.69^{b}	19.28±1.28^{c}	25.54±2.29^{ab}	12.74±1.12^{d}	5.80±0.55^{e}	114.45	5.8	19.73	浆果香
	E4	24.31	2-乙酰基呋喃	1192-62-7	—	—	—	16.25±0.54^{b}	20.61±1.82^{a}	10.07±0.84^{c}	46.93	10	4.69	杏仁、可可、焦糖、咖啡
	E5	49.68	4-乙烯基愈创木酚	7786-61-0	5.50±0.44^{d}	6.35±0.56^{d}	9.27±0.87^{c}	11.03±0.92^{b}	15.13±1.76^{a}	11.66±0.69^{b}	58.94	3	19.65	果木、丁香、甜香、烟熏香
	E6	14.63	乙基糠基醚	6270-56-0	24.26±2.14^{a}	20.77±1.16^{b}	13.79±0.44^{d}	21.23±1.24^{b}	16.12±1.88^{c}	4.06±0.42^{e}	100.23	1 283	0.08	甜辣味
	E7	28.47	苯吡咯	2167-14-8	17.77±1.34^{c}	11.99±0.67^{d}	15.57±2.44^{c}	27.14±1.05^{b}	31.29±1.94^{a}	25.09±1.94^{b}	128.85	—	—	烧焦、烘烤
	E8	33.54	1,1,6-三甲基-1,2-二氢萘	30364-38-6	12.17±1.48^{c}	—	—	23.14±2.27^{a}	19.46±1.69^{b}	23.57±0.79^{a}	78.34	—	—	甘草
	E9	35.42	*N*-苄基乙二胺	4152-09-4	—	—	14.20±1.73^{a}	6.63±0.29^{b}	4.06±0.50^{c}	2.95±0.11^{c}	27.84	—	—	
	E10	36.98	茴香脑	104-46-1	59.76±4.01^{a}	20.48±2.65^{b}	8.96±0.28^{c}	7.3±0.52^{c}	2.35±0.14^{d}	2.45±0.25^{d}	101.30	100	1.01	甜茴香、甘草香
	E11	46.39	2-羧甲基-3-正己基马来酸酐	39212-21-0	—	—	—	7.12±1.11^{c}	13.63±1.75^{b}	36.90±2.15^{a}	57.65	—	—	

注：同列小写字母不同表示差异显著（$P<0.05$）。—.未检出。

2.2　不同馏分挥发性风味成分的层次聚类分析



挥发性风味成分编号与表1一一对应。

图1　不同馏分挥发性风味成分层次聚类分析热图

Fig. 1　Hierarchical cluster analysis heatmap of volatile flavor components in different fractions

为直观展示无核白葡萄干蒸馏酒各阶段馏分挥发性风味成分之间的差异，将104种挥发性风味成分进行层次聚类分析。由图1可知，6个阶段馏分可按照挥发性风味成分差异分为4类：酒头阶段的T1、酒心前段的T2、酒心阶段的T3与T4及酒尾阶段的T5与T6。T1段展现出最高的酯类物质含量，低沸点酯类在蒸馏初期更易被蒸馏出来，反映挥发性酯类的馏出特性。适量的酯类能提升酒的果香、花香等，使酒体芳香扑鼻，口感柔和，但其含量过高易打破酒体风味平衡，出现刺激性异香[19]。因此酒头部分可根据挥发性风味成分的馏出情况进行分段截取，部分可进行后期调香。T2段具有相对较高的酯类及醇类物质含量，但与T1段相比，含量降幅明显。T5、T6段则具有含量相对较高的醛酮类、杂醇类物质，这些物质沸点相对较高，影响酒的风味、口感和安全性[20]。

2.3　关键挥发性风味成分馏出规律分析

挥发性风味成分对食品香气体系的贡献不仅仅取决于其含量，更是与其自身阈值密切相关，因此需从含量和阈值2个维度进行综合判定[21]。蒸馏过程中，OAV＞1的成分共计41个，选取高含量成分并参考经典白兰地关键香气成分，综合考量筛选出无核白葡萄干蒸馏酒的9种主要关键挥发性风味成分，分别为辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸异戊酯、己酸乙酯、乙酸苯乙酯、月桂酸乙酯、异戊醇、苯乙醇及异戊醛。

辛酸乙酯作为质量浓度最高的酯类，其酒头就馏出41 696.42 μg/L，T2段即降为2 822.29 μg/L，最后酒尾仅为416.00 μg/L。癸酸乙酯质量浓度仅次于辛酸乙酯，T1段为22 893.35 μg/L，T2段则降至1 845.59 μg/L。乙酸异戊酯T1段质量浓度为14 326.83 μg/L，T2段降至397.16 μg/L。己酸乙酯T1段质量浓度为11 079.68 μg/L，T2段降至415.01 μg/L。乙酸苯乙酯各阶段降幅较其他酯类略平缓，T1段质量浓度为2 125.09 μg/L，T2段降至1 572.13 μg/L。月桂酸乙酯T1段质量浓度为2 379.79 μg/L，T2段降至130.35 μg/L，最后酒尾段仅为1.17 μg/L。蒸馏过程中酯类物质不断发生水解反应，致使其含量持续下降，进而造成体系内脂肪酸含量逐步升高[7]。

异戊醇是含量最高的醇类物质，T1至T3段质量浓度降幅明显，从31 169.44 μg/L降至4 216.06 μg/L，酒尾段含量极低。在蒸馏过程中，馏分醇类含量与其沸点、体系乙醇含量及物质在醇水体系中的溶解度有关。大多数醇类由于其高乙醇溶解性、低沸点和低分子质量，倾向于富集在蒸馏液的头部和心部馏分[22]。苯乙醇是典型的尾部化合物，其含量随馏出液乙醇体积分数下降而上升[23]，从T1段的286.01 μg/L增至T5的1 011.44 μg/L，T6段略下降至718.41 μg/L。由于乙醇可与水形成共沸物，这将影响苯乙醇在乙醇水体系中的溶解度与亲和力[24]。异戊醛在蒸馏后期逐渐积累，至T6段达到67.60 μg/L。异戊醛具有高沸点、低挥发性特征，为“尾段富集型”杂醇醛[25]。

葡萄蒸馏酒公认的核心香气如乙酸乙酯、己酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、异戊醇、异丁醇、糠醛等[26-27]，在本研究蒸馏酒中均有检出，尤其是酯类及醇类，在T1～T2段具有较高的含量。对比刘其耸[28]在张裕白兰地一次蒸馏液中检出的27种骨架香气物质，其中异戊醇、

庚酸乙酯、辛酸乙酯、糠醛、正辛醇、癸酸甲酯、正壬醇、正癸醇、苯乙醇和月桂醇在本研究酒样中也均有检出。经典干邑白兰地要求选择香气相对中性或较淡的葡萄品种，部分香气较淡的鲜食葡萄可能会成为较好的替代选择，只是在品种选择及最终产品定位上需要综合考量。户太8号葡萄蒸馏酒酒头中乙酸乙酯含量极高[29]，而本研究酒头辛酸乙酯含量明显高于其他成分，这也表明葡萄品种对酒体风味的决定性作用。无核白葡萄干原料本身挥发性香气物质略显不足[30]，加之吐鲁番高温天气对葡萄风味物质积累的影响，导致酿出的蒸馏酒缺乏柔顺优雅的香气。今后可考虑通过混合蒸馏或后期调配逐步完善无核白葡萄干蒸馏酒品质。

3 结 论

采用HS-SPME-GC-MS技术对无核白葡萄干蒸馏酒不同蒸馏阶段（T1～T6）的挥发性风味成分进行分析。结果表明，6个蒸馏阶段共检出104种挥发性风味成分，其中酯类48种、醇类27种、酸类7种、醛酮类11种和其他类11种。不同类别化合物在不同蒸馏阶段变化规律有所不同。酯类物质在酒头T1阶段数量和质量浓度均最高，分别为43种和106 354.15 μg/L，在酒心的T2～T3段急剧降低，酒尾段降至706.85 μg/L。醇类物质质量浓度从酒头T1段的33 523.27 μg/L持续降低至酒尾T6段的735.72 μg/L，其中T2段降幅明显。酸类和醛酮类物质含量呈现持续上升趋势，在酒尾略有下降。通过层次聚类分析，将不同馏分划分为4类，分别为酒头阶段的T1，酒心前段的T2，酒心中后段的T3、T4及酒尾阶段的T5、T6。初步筛选出无核白葡萄干白兰地蒸馏酒的9种关键挥发性风味成分，分别为辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸异戊酯、己酸乙酯、乙酸苯乙酯、月桂酸乙酯、异戊醇、苯乙醇及异戊醛。研究结果为深入解析无核白葡萄干蒸馏酒馏分变化规律、精细优化摘酒工艺提供了理论依据与技术借鉴。为深入解析挥发性成分在蒸馏过程中的馏出规律，今后研究中可缩短取样时间间隔，并增加取样频次，通过馏出动力学研究以全面揭示各馏分的馏出特性。

参考文献：

[1] 伍国红, 李玉玲, 王勇, 等. 吐鲁番葡萄主要制干方法及其比较[J]. 西北园艺(果树), 2019(4): 52-53.

[2] XIE H, ZHANG W, HAN S, et al. Analysis of environmental factors for production of green raisins in Liang-fang[J]. International Journal of Food Engineering, 2021, 17(7): 529-539. DOI:10.1515/ijfe-2020-0349.

[3] 户金鸽, 白世践. 无核白葡萄营养系果实品质及葡萄干特性分析[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(11): 2751-2763. DOI:10.6048/j.issn.1001-4330.2023.11.019.

[4] HUANG H, CHEN Y Y, HONG J X, et al. Unraveling the chemosensory characteristics on different types of spirits based on sensory contours and quantitative targeted flavoromics analysis[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101716. DOI:10.1016/j.fochx.2024.101716.

[5] YAGISHITA M, REBER O, ALTER D, et al. Optimizing aroma compound fractionation in pear brandy distillation by controlling their relative volatility[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(8): 7095-7111. DOI:10.1007/s11947-025-03815-8.

[6] KOKOTI K, KOSMA I S, TATARIDIS P, et al. Volatile aroma compounds of distilled “tsipouro” spirits: effect of distillation technique[J]. European Food Research and Technology, 2023, 249(5): 1173-1185. DOI:10.1007/s00217-023-04205-0.

[7] AWAD P, ATHÈS V, DECLOUX M E, et al. Evolution of volatile compounds during the distillation of cognac spirit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(35): 7736-7748. DOI:10.1021/acs.jafc.7b02406.

[8] 李冠宇, 王瑶, 尹荐, 等. 鲜食葡萄白兰地蒸馏过程中主要发酵香气物质馏出动力学研究[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(3): 49-57; 80. DOI:10.12301/spxb202300266.

[9] 彭波, 王顺利, 唐凤仙, 等. 新疆产区白玉霓白兰地基酒一次蒸馏过程中挥发性化合物变化[J]. 中国酿造, 2023, 42(3): 157-161. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2023.03.027.

[10] 康三江, 慕钰文, 曾朝珍. 花牛苹果蒸馏酒不同馏分香气成分变化分析[J]. 中国酿造, 2025, 44(4): 96-103. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.04.014.

[11] 林范学, 韩小龙, 师艳秋, 等. 葡萄干酿制葡萄酒的工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 203-209. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2024.04.023.

[12] YANG S, DUAN J, LÜ S, et al. Revealing the changes in compounds when producing strong-flavor Daqu by statistical and instrumental analysis[J]. Fermentation, 2022, 8(12): 720. DOI:10.3390/fermentation8120720.

[13] LONČARIĆ A, PATLJAK M, BLAŽEVIĆ A, et al. Changes in volatile compounds during grape brandy production from ‘Cabernet Sauvignon’ and ‘Syrah’ grape varieties[J]. Processes, 2022, 10(5): 988. DOI:10.3390/pr10050988.

[14] HU R, DUAN C, LAN Y. Investigating the effects of distillation system, geographical origin, and aging time on aroma characteristics in brandy using an untargeted metabonomic approach[J]. Foods, 2024, 13(12): 1922. DOI:10.3390/foods13121922.

[15] 孙宝国, 陈海涛. 食用调香术[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2016: 23-25.

[16] 段长青, 王军, 朱保庆, 等. 葡萄酒化学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 46-52.

[17] SUN X, XIONG Y, NI X, et al. Characterization of the key aroma compounds in herbal Baijiu via a sensitivity approach[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 139: 107085. DOI:10.1016/j.jfca.2024.107085.

[18] LIU P T, DUAN C Q, YAN G L. Comparing the effects of different unsaturated fatty acids on fermentation performance of *Saccharomyces cerevisiae* and aroma compounds during red wine fermentation[J]. Molecules, 2019, 24(3): 538. DOI:10.3390/molecules24030538.

[19] ZANGHELINI G, GIAMPAOLI P, ATHÈS V, et al. Charentaise distillation of cognac. Part I: behavior of aroma compounds[J]. Food Research International, 2024, 178: 113977. DOI:10.1016/j.foodres.2024.113977.

[20] PANG X N, LI Z J, CHEN J Y, et al. A comprehensive review of spirit drink safety standards and regulations from an international perspective[J]. Journal of Food Protection, 2017, 80(3): 431-442. DOI:10.4315/0362-028X.JFP-16-319.

[21] 陈芝飞, 蔡莉莉, 郝辉, 等. 香气活力值在食品关键香气成分表征中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 329-335. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201819049.

[22] TIAN T T, RUAN S L, ZHAO Y P, et al. Multi-objective evaluation of freshly distilled brandy: characterisation and distribution patterns of key odour-active compounds[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100276. DOI:10.1016/j.fochx.2022.100276.

[23] BALCEREK M, PIELECH-PRZYBYLSKA K, PATELSKI P, et al. The effect of distillation conditions and alcohol content in 'heart' fractions on the concentration of aroma volatiles and undesirable compounds in plum brandies: distillation conditions affect plum distillates quality[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2017, 123(3): 452-463. DOI:10.1002/jib.441.

[24] CORTÉS S, GIL M L, FERNÁNDEZ E. Chemical affinities between the major volatile compounds present in a grape pomace distillate[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(7): 1221-1226. DOI:10.1002/jsfa.3579.

[25] 秦燕飞, 李泽福, 孙建平, 等. 被氧化的葡萄酒蒸馏过程中挥发性风味物质的变化[J]. 中国酿造, 2023, 42(6): 151-160. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2023.06.025.

[26] WANG X, CUI W, HAN S, et al. Comparative analysis of sensory properties and chemical composition in grape spirits: pervaporation separation vs. distillation[J]. Food Chemistry, 2025, 469: 142647. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.142647.

[27] QIAO L, WANG J, WANG R, et al. A review on flavor of Baijiu and other world-renowned distilled liquors[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100870. DOI:10.1016/j.fochx.2023.100870.

[28] 刘其耸. 张裕白兰地蒸馏过程香气物质变化规律研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2011.

[29] 尹荐. 户太八号葡萄蒸馏酒果香酯类分析及其生产工艺优化设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.002319.

[30] WANG J, MUJUMDAR A S, WANG H, et al. Effect of drying method and cultivar on sensory attributes, textural profiles, and volatile characteristics of grape raisins[J]. Drying Technology, 2021, 39(4): 495-506. DOI:10.1080/07373937.2019.1709199.