

气相色谱内标校正因子法在乙酸乙酯含量测定中的应用研究

张越华,李思靖,王英,黄炜艺,陈庆,杨娟*

(广州市城市职业学院 食品健康学院,广东 广州 511370)

摘要:针对传统阿贝折射仪在测定高含量乙酸乙酯时的局限性以及气相色谱标准曲线法操作复杂的问题,采用乙酸正丙酯作为内标,建立一种检测乙酸乙酯含量的气相色谱(GC)内标校正因子法。同时与标准曲线法进行对比,并对方法的专属性、重复性、稳定性及加标回收率等进行方法学考察。结果表明,GC内标校正因子法能准确测定质量浓度为0.093~45.018 g/L和质量分数为10.262%~97.930%范围内的乙酸乙酯,该方法的检出限为7.55 mg/L,定量限为24.46 mg/L,重复性、稳定性实验结果的相对标准偏差(RSD)分别为0.12%、0.25%,白酒样品和合成样品中乙酸乙酯的加标回收率分别为100.96%和100.46%,加标回收率实验结果的相对标准偏差分别为0.66%和0.31%,说明该方法重复性好,稳定性高,适用于检测乙酸乙酯含量,操作简便快捷,可显著提高食品分析和质量控制的效率。

关键词:乙酸乙酯;校正因子;标准曲线;气相色谱;内标;含量

中图分类号:TS262.3

文章编号:0254-5071(2025)07-0278-05

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.07.040

引文格式:张越华,李思靖,王英,等.气相色谱内标校正因子法在乙酸乙酯含量测定中的应用研究[J].中国酿造,2025,44(7):278-282.

Application of gas chromatography internal standard correction factor method in the determination of ethyl acetate content

ZHANG Yuehua, LI Sijing, WANG Ying, HUANG Weiyi, CHEN Qing, YANG Juan*

(College of Food Health, Guangzhou City Polytechnic, Guangzhou 511370, China)

Abstract: Aiming at the limitation of traditional Abbe refractometer in determining high concentration ethyl acetate and the complicated operation of gas chromatography (GC) standard curve method, a correction factor method of internal standard for gas chromatography was established using n-propyl acetate as internal standard to detect ethyl acetate content. At the same time, it was compared with the standard curve method, and the specificity, repeatability, stability and standard recovery rate of the method were investigated. The results showed that the GC internal standard correction factor method could accurately determine ethyl acetate with the mass concentration of 0.093-45.018 g/L and mass fraction of 10.262%-97.930%. The limit of detection of the method was 7.55 mg/L, the limit of quantitation was 24.46 mg/L, the relative standard deviation (RSD) of the repeatability and stability tests results were 0.12% and 0.25%, respectively, the standard recovery rates of ethyl acetate in *Baijiu* samples and synthetic samples were 100.96% and 100.46%, respectively, and the RSD of the standard recovery rate test results was 0.66% and 0.31%, respectively, which showed that the method was suitable for detecting the content of ethyl acetate, with good repeatability, high stability and simple and fast operation, which significantly improved the efficiency of food analysis and quality control.

Key words: ethyl acetate; correction factor; standard curve; gas chromatography; internal standard; content

乙酸乙酯,作为一种脂肪酸酯,在工业上的应用广泛,尤其在作为溶剂、稀释剂、增塑剂、黏合剂和表面活性剂方面^[1]。此外,其在医药和有机酸生产中也具有重要地位。乙酸乙酯的香气特性使其成为香料、香水和多种水果香精的首选原料^[2-3]。在食品工业中,乙酸乙酯作为食用香料,用于增添食品香气、去除涩味、生产香辛料片剂或颗粒,以及作为酿醋的配料^[4]。它还被广泛用于调配水果型香精和酒类香精,如樱桃、桃、杏和白兰地,赋予这些产品独特的风味^[5]。

乙酸乙酯的合成是基础有机化学中的一个经典实验^[6-9]。

尽管已有大量研究关注其合成方法,但对于其定量分析和评价研究却很少^[10-14]。对于高含量乙酸乙酯的测定而言,传统的阿贝折射仪存在局限性,尤其是当样品中乙酸乙酯含量<97.5%时,其相对误差(relative error, RE)>3%^[2]。赵华绒等^[15]采用气相色谱(gas chromatography, GC)内标法、面积归一化法及核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)内标法分别对乙酸乙酯合成反应中的产物进行纯度分析,结果发现,GC内标法和NMR内标法均可准确定量,NMR内标法可同步完成纯度分析和结构鉴定,且无需引入校正因子。对于低含量乙酸乙酯的测定,则主要采用气相

收稿日期:2024-09-20

修回日期:2025-01-02

基金项目:广州市教育局高校科研项目(2024312016)

作者简介:张越华(1975-),女,副教授,硕士,主要从事功能有机分子等方面的研究工作。

*通讯作者:杨娟(1988-),女,讲师,硕士,主要从事食品检验检测等方面的研究工作。

色谱标准曲线法^[16-19]。在白酒行业,乙酸乙酯虽然以微量形式存在,但是清香型和浓香型白酒的主要香气成分,乙酸乙酯是白酒的必检项目^[20-23]。GB/T 10781.2—2022《白酒质量要求 第2部分:清香型白酒》中要求乙酸乙酯质量浓度 ≥ 0.20 g/L,GB/T10345—2022《白酒分析方法》中要求检测仪器是气相色谱仪,配氢火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID),可采用毛细管柱和填充柱。刘强等^[24-29]采用气相色谱标准曲线法测定白酒中的乙酸乙酯含量。乙酸乙酯还是酱油中的香气成分之一,对酱油的香气有举足轻重的影响。李艳清等^[30]采用气相色谱法测定酱油中的乙酸乙酯含量。综上,传统的乙酸乙酯含量测定方法,如阿贝折射仪法,虽然操作简便,但在高浓度样品的测定中存在明显的局限性。这些方法在样品浓度接近其测量上限时,误差率可超过3%,这在高精度要求的食品分析中是不可接受的。此外,折射仪法无法有效区分样品中乙酸乙酯与其他相似折射率物质,这在复杂食品基质中可能导致误判。标准曲线法作为一种常用的GC定量法,虽然能够提供较为准确的测定结果,但该方法需要制备一系列标准溶液并建立标准曲线,过程繁琐且耗时。其次,标准曲线的建立受实验条件影响较大,如温度、设备状态等,这可能导致分析结果的重现性不佳。此外,标准曲线法在处理样品基质效应时也存在局限,特别是在复杂样品分析中,基质效应可能导致定量不准确。

为了克服这些局限性,本研究采用乙酸正丙酯作为内标,建立一种检测乙酸乙酯含量的气相色谱内标校正因子法。同时与传统的标准曲线法进行对比,并对方法的专属性、重复性、稳定性及加标回收率等进行方法学考察,以期提高乙酸乙酯在食品工业中的检测效率。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

体积分数95%乙醇、无水乙醇(纯度 $\geq 99.7\%$):国药集团化学试剂有限公司;乙酸乙酯标准品(纯度 $\geq 99.9\%$)、乙酸正丙酯标准品(纯度 $> 99.5\%$):上海麦克林生化科技股份有限公司;白酒(编号为J-1、J-2、J-3):市售;合成乙酸乙酯产物(编号为H-1、H-2、H-3):实验室自制。

1.2 仪器与设备

GC7890A气相色谱仪、HP-5毛细管色谱柱(30 m \times 0.32 mm \times 0.25 μ m):美国安捷伦公司;YP1002电子天平:上海津平科学仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 乙酸乙酯样品的制备

准确称取乙酸乙酯标准品适量,用体积分数95%乙醇配制高含量样品1#~4#(质量分数为97.930%、93.979%、89.976%、79.998%),中含量样品5#~7#(质量分数为49.994%、30.006%、10.262%),低质量浓度样品8#~10#(质量浓度

为45.018 g/L、9.006 g/L、4.648 g/L);微量样品11#~13#(质量浓度为1.875 g/L、0.932 g/L、0.093 g/L)。

1.3.2 校正因子法溶液的配制

(1)校正液的配制

校正液1#:准确称取乙酸乙酯标准品10 g,乙酸正丙酯标准品(内标)5 g,混匀。校正液2#:取校正液1# 5 mL,置于10 mL容量瓶中,用体积分数95%乙醇稀释至刻度,摇匀。校正液3#:准确称取乙酸乙酯标准品2.5 g,乙酸正丙酯标准品2.5 g,置于100 mL容量瓶中,用体积分数95%乙醇稀释至刻度,摇匀。校正液4#:取校正液3# 1 mL,置于100 mL容量瓶中,用体积分数95%乙醇稀释至刻度,摇匀。

(2)乙酸正丙酯校正储备液的配制

准确称取乙酸正丙酯标准品2.5 g,置50 mL容量瓶中,用95%乙醇稀释至刻度,配制成乙酸正丙酯质量浓度为50 g/L的乙酸正丙酯校正储备液溶液。

(3)校正样品的配制

校正样品1#~7#:分别准确称取乙酸乙酯样品1#~7#各1 g,加入乙酸正丙酯标准品0.5 g,混匀。校正样品8#~13#:分别准确称取乙酸乙酯样品8#~13#各5 mL,加入乙酸正丙酯校正储备液5 mL,混匀。

1.3.3 标准曲线法溶液的配制

(1)标准系列溶液的配制

乙酸乙酯标准储备溶液配制:准确称取1.75 g乙酸乙酯标准品,置于100 mL容量瓶中,用体积分数95%乙醇溶解并稀释至刻度,制成质量浓度为17.5 g/L的乙酸乙酯溶液。

内标标准溶液配制:准确称取1.75 g乙酸正丙酯标准品,置于100 mL的容量瓶中,用体积分数95%乙醇溶解并稀释至刻度,制成质量浓度为17.5 g/L的乙酸正丙酯溶液。

标准曲线工作溶液配制:移取乙酸乙酯标准储备溶液适量分别置于7个50 mL容量瓶中;再准确移取5 mL内标标准溶液至上述7个容量瓶中,用体积分数95%乙醇稀释至刻度,摇匀,配制成乙酸乙酯标准系列溶液,终质量浓度分别为0.07 mg/L、0.10 mg/L、0.18 mg/L、0.35 mg/L、1.40 mg/L、2.44 mg/L、3.50 mg/L。

(2)标曲样品溶液的配制

取乙酸乙酯样品适量,置于容量瓶中,加内标标准溶液5 mL,用体积分数95%乙醇稀释至刻度,摇匀。标曲样品溶液的具体配制见表1。

表1 标曲样品溶液的配制

Table 1 Preparation of the standard curve sample solution

标曲样品	取样量	内标标准溶液体积/mL	定容体积/mL
1#~3#	0.15	5	50
4#~5#	0.20	5	50
6#	0.50	5	50
7#	0.10	5	50

续表

标曲样品	取样量	内标标准溶液体积/mL	定容体积/mL
8#	1	5	25
9#	5	5	25
10#	10	5	25
11#~13#	20	1	25

注:标曲样品1#~7#中取样量单位为g,标曲样品8#~13#中取样量单位为mL。

1.3.4 合成乙酸乙酯产物和白酒样品的制备

合成乙酸乙酯产物样品的配制:分别准确称取合成乙酸乙酯产物H-1、H-2、H-3各1 g,加入乙酸正丙酯标准品0.5 g,混匀。

白酒样品的配制:分别准确移取白酒J-1、J-2、J-3各5 mL,加入乙酸正丙酯校正储备液5 mL,混匀。

1.3.5 气相色谱条件^[7]

进样口温度150 °C,HP-5毛细管色谱柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm),升温程序为初始温度50 °C保持1 min,以20 °C/min升至60 °C,保持1 min。氢火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID),检测器温度180 °C,载气为氮气(N₂),柱流速为2 mL/min,分流比1:50,进样量0.5 μL。

1.3.6 专属性测试

采用GC检测校正样品5#,根据乙醇、乙酸乙酯和乙酸正丙酯的保留时间计算各色谱峰间的分离度R,考察气相色谱法的专属性。R计算公式如下:

$$R = \frac{2(t_2 - t_1)}{w_1 + w_2}$$

式中:t₁为第一个峰的保留时间,min;t₂为第二个峰的保留时间,min;w₁为第一个峰的峰宽度,min;w₂为第二个峰的峰宽度,min。

1.3.7 定性方法

根据保留时间进行定性。

1.3.8 定量方法

(1)校正因子法定量

取校正液1#~4#和校正样品1#~13#,采用GC测定乙酸乙酯峰面积(A_i)和乙酸正丙酯峰面积(A_s),并计算校正因子f₁~f₄和乙酸乙酯含量,校正样品1#~4#、5#~7#、8#~10#、11#~13#分别采用校正因子f₁、f₂、f₃、f₄计算。

内标物的相对质量校正因子(f)的计算公式如下:

$$f = \frac{A_s \times m_i}{A_i \times m_s}$$

式中:A_s:校正液中乙酸正丙酯的峰面积;m_i:校正液中乙酸乙酯标准品的称样量,g;A_i:校正液中乙酸乙酯标准品的峰面积;m_s:校正液中乙酸正丙酯标准品的称样量,g。

乙酸乙酯样品中乙酸乙酯含量(X)的计算公式如下:

$$X = \frac{A_i \times m_s}{A_s \times m} \times f \times 100\%$$

式中:A_i:校正样品中乙酸乙酯的峰面积;m_s:校正样品中乙酸正丙酯标准品的称样量,g或mL;A_s:校正样品中乙酸正丙酯的峰面积;m:校正样品中乙酸乙酯样品的称样量,g或mL;f:内标物的相对质量校正因子。

(2)标准曲线法定量

采用气相色谱仪测定标准曲线工作溶液和标曲样品溶液,以乙酸乙酯的质量浓度(x)为横坐标,以乙酸乙酯的峰面积(A_i)与内标物的峰面积(A_s)之比(y)为纵坐标,绘制标准曲线;根据标准曲线回归方程计算乙酸乙酯样品中乙酸乙酯含量。

(3)检出限与定量限

以3倍信噪比(signal noise ratio, S/N)(S/N=3)计算检出限,以10倍信噪比(S/N=10)计算定量限。

1.3.9 气相色谱内标校正因子法测定乙酸乙酯方法学考察

重复性实验:平行配制6份校正样品5#,采用GC测定乙酸乙酯峰面积(A_i)和乙酸正丙酯峰面积(A_s),并计算乙酸乙酯含量和相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)。

稳定性实验:取校正样品5#,在室温下放置0 h、2 h、4 h、8 h、16 h、24 h,采用GC测定乙酸乙酯峰面积(A_i)和乙酸正丙酯峰面积(A_s),并计算乙酸乙酯含量和RSD。

加标回收率实验:采用GC测定白酒J-1样品和合成产物H-1样品,并采用校正因子法计算乙酸乙酯含量。按照J-1样品内含乙酸乙酯量的80%、100%、120%加入乙酸乙酯标准品,即称取乙酸乙酯标准品适量,分别置于3个20 mL容量瓶中,加白酒J-1稀释至刻度,作为3个J-1加标样品(编号为J-1-1、J-1-2、J-1-3);准确吸取J-1加标样品各5 mL,加入乙酸正丙酯校正储备液5 mL,混匀,通过GC测定乙酸乙酯含量,并计算加标回收率。按照H-1样品内含乙酸乙酯量的80%、100%、120%加入乙酸乙酯标准品,即称取乙酸乙酯标准品适量加入H-1样品中,配制3个合成产物H-1加标样品(编号为H-1-1、H-1-2、H-1-3);准确称取约0.25 g H-1加标样品3份,各加乙酸正丙酯标准品约0.25 g,混匀,通过GC测定乙酸乙酯含量,并计算加标回收率。

2 结果与分析

2.1 专属性测试

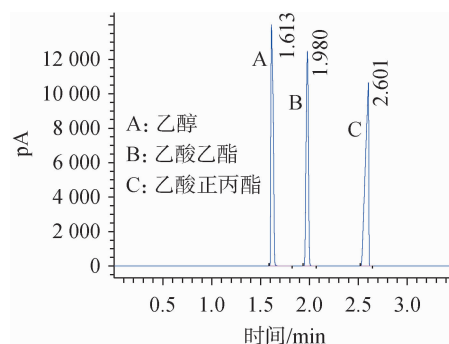


图1 校正样品5#的气相色谱图

Fig. 1 Gas chromatogram of calibration sample 5#

采用GC检测校正样品5#,气相色谱图见图1。由图1可知,乙醇、乙酸乙酯和乙酸正丙酯的保留时间分别1.613 min、1.980 min、2.601 min,各色谱峰间的分离度 R 分别为7.70、10.94,均 >1.5 ,表明专属性良好。

2.2 校正因子法定量

通过测定校正液1#~4#,得到校正因子 $f_1 \sim f_4$ 分别为1.278 6、1.266 1、1.253 2、1.267 6。根据校正因子计算得到乙酸乙酯样品1#~13#中的乙酸乙酯含量,结果见表2。由表2可知,采用校正因子法定量,乙酸乙酯样品1#~13#中乙酸乙酯含量的测定值与实际值的偏差均在 $\pm 1.5\%$ 范围内,说明测定结果准确。该方法的检出限和定量限分别为7.55 mg/L、24.46 mg/L。

表2 校正因子法定量乙酸乙酯样品中乙酸乙酯含量的结果

Table 2 Quantitative results of ethyl acetate contents in ethyl acetate samples by correction factor method

样品	乙酸乙酯			样品	乙酸乙酯		
	实际值/ %	测定值/ %	偏差/ %		实际值/ (g·L ⁻¹)	测定值/ (g·L ⁻¹)	偏差/ %
1#	97.930	98.370	0.45	8#	45.018	44.889	-0.29
2#	93.979	94.509	0.56	9#	9.006	8.990	-0.18
3#	89.976	90.703	0.81	10#	4.648	4.691	0.91
4#	79.998	80.328	0.41	11#	1.875	1.886	0.56
5#	49.994	50.017	0.05	12#	0.932	0.939	0.75
6#	30.006	30.136	0.44	13#	0.093	0.094	1.22
7#	10.262	10.306	0.42				

2.3 标准曲线法定量

2.3.1 线性关系、检出限与定量限

乙酸乙酯标准曲线的线性回归方程为 $y=0.463 25x+0.000 43$,相关系数 $R^2=0.999 91$,说明在乙酸乙酯质量浓度0.07~3.50 mg/L范围内线性关系良好,该方法的检出限和定量限分别为4.72 mg/L、15.31 mg/L。

2.3.2 乙酸乙酯含量的测定

通过标准曲线回归方程计算得乙酸乙酯样品1#~13#中的乙酸乙酯含量,结果见表3。

表3 标准曲线法定量乙酸乙酯样品中乙酸乙酯含量的结果

Table 3 Quantitative results of ethyl acetate contents in ethyl acetate samples by standard curve method

样品	乙酸乙酯			样品	乙酸乙酯		
	实际值/ %	测定值/ %	偏差/ %		实际值/ (g·L ⁻¹)	测定值/ (g·L ⁻¹)	偏差/ %
1#	97.930	98.580	0.66	8#	45.018	44.883	-0.30
2#	93.979	94.089	0.12	9#	9.006	8.969	-0.41
3#	89.976	90.240	0.29	10#	4.648	4.615	-0.72
4#	79.998	79.809	-0.24	11#	1.875	1.888	0.67
5#	49.994	49.761	-0.47	12#	0.932	0.923	-1.02
6#	30.006	29.912	-0.31	13#	0.093	0.092	-1.49
7#	10.262	10.225	-0.36				

由表3可知,乙酸乙酯样品1#~13#中乙酸乙酯含量的

测定值与实际值的偏差均在 $\pm 1.5\%$ 范围内,说明测定结果准确。当乙酸乙酯含量较低时,采用该方法测得的含量普遍低于实际含量,且随着乙酸乙酯含量的降低,与实际含量的偏差增大。

2.4 两种定量方法的比较

根据以上两种方法测定结果,发现校正因子法和标准曲线法均可以准确测定不同含量的乙酸乙酯,鉴于校正因子的校正液和样品配制过程更简单,配制的样品数量和试剂用量更少,检测时间更短,因此,校正因子法可替代标准曲线法用于乙酸乙酯的含量测定。

2.5 校正因子法定量方法学考察结果

2.5.1 重复性实验

采用GC检测6份校正样品5#,通过校正因子法对乙酸乙酯定量,结果发现,6份校正样品5#中乙酸乙酯含量测定值分别为50.634%、50.266%、50.521%、50.440%、50.526%、50.511%,RSD为0.12%,表明该方法的重复性良好,精密度较高。

2.5.2 稳定性实验

采用GC检测在室温下放置不同时间的校正样品5#,通过校正因子法对乙酸乙酯定量,结果发现,校正样品5#放置0 h、2 h、4 h、8 h、16 h、24 h时乙酸乙酯含量的测定值分别为49.946%、49.700%、49.460%、49.444%、49.308%、49.293%,RSD为0.25%,表明该方法稳定性好。

2.5.3 加标回收率实验

通过校正因子 f_1 计算白酒J-1加标样品和合成产物H-1加标样品中的乙酸乙酯含量,并计算加标回收率及相对标准偏差,结果分别见表4及表5。

表4 气相色谱内标校正因子法定定量白酒中乙酸乙酯含量的加标回收率实验结果

Table 4 Results of standard addition recovery rates tests for the determination of ethyl acetate content in Baijiu by gas chromatography internal standard correction factor method

样品	本底值/ (g·L ⁻¹)	加标量/ (g·L ⁻¹)	理论值/ (g·L ⁻¹)	测定值/ (g·L ⁻¹)	回收率/ %	平均回 收率/%	RSD/ %
J-1-1	1.13	0.915	2.045	2.056	101.20		
J-1-2	1.13	1.150	2.280	2.293	101.13	100.96	0.66
J-1-3	1.13	1.490	2.620	2.628	100.54		

表5 气相色谱内标校正因子法定定量合成产物中乙酸乙酯含量的加标回收率实验结果

Table 5 Results of standard addition recovery rates tests for the determination of ethyl acetate content in synthetic products by gas chromatography internal standard correction factor method

样品	本底值/ g	加标量/ g	理论值/ g	测定值/ g	回收率/ %	平均回 收率/%	RSD/ %
H-1-1	0.242 6	0.206 6	0.449 2	0.450 3	100.51		
H-1-2	0.248 9	0.243 2	0.492 1	0.492 8	100.28	100.46	0.31
H-1-3	0.244 4	0.294 4	0.538 8	0.540 6	100.59		

由表4和表5可知,白酒J-1加标样品和合成产物H-1加标样品的平均加标回收率分别为100.96%和100.46%,加标回收率试验结果的相对标准偏差分别为0.66%和0.31%。结果表明,校正因子法可准确对白酒和合成产物中的乙酸乙酯进行定量。

2.6 实际样品中乙酸乙酯含量的测定

采用GC内标校正因子法检测合成乙酸乙酯产物样品和白酒样品中的乙酸乙酯含量,结果见表6。由表6可知,合成乙酸乙酯产物样品H-1~H-3中的乙酸乙酯含量分别为96.54%、95.70%、97.31%,白酒样品J-1~J-3中乙酸乙酯含量分别为1.13 g/L、1.32 g/L、0.97 g/L,RSD均<1.5%,结果表明,内标校正因子法用于合成产物和白酒样品中乙酸乙酯的含量,测定结果偏差小,准确性较高。

表6 基于气相色谱内标校正因子法实际样品中乙酸乙酯含量的测定结果

Table 6 Determination results of ethyl acetate contents in actual samples based on gas chromatography internal standard correction factor method

样品	含量/%	样品	含量/(g·L ⁻¹)
H-1	96.54±0.21	J-1	1.13±1.15
H-2	95.70±0.17	J-2	1.32±0.61
H-3	97.31±0.22	J-3	0.97±1.24

3 结论

本研究采用乙酸正丙酯作为内标,建立了一种测定乙酸乙酯含量的气相色谱内标校正因子法,该方法能准确测定质量浓度为0.09~45.018 g/L和质量分数为10.262%~97.930%范围内的乙酸乙酯,检出限为7.55 mg/L,定量限为24.46 mg/L,重复性、稳定性实验结果的相对标准偏差(RSD)分别为0.12%、0.25%,白酒样品和合成产物样品中的乙酸乙酯平均加标回收率分别为100.96%和100.46%,加标回收率试验结果的相对标准偏差分别为0.66%和0.31%,说明该方法重复性好,稳定性高,既可作为合成乙酸乙酯产物的产量和纯度分析,也可用于食品中微量乙酸乙酯含量的测定。

参考文献:

[1] WANG W B, ZHANG G F, XIE L, et al. Fast assay of ethyl acetate content of double-base oblate spherical propellant after balling process by near-infrared spectroscopy[J]. *Infrared Phys Technol*, 2021, 112: 103579.
[2] 沈丽宫, 方文清, 曹晓, 等. 气相色谱法和折光率法测定合成乙酸乙酯组分含量对比[J]. *山东化工*, 2022, 51(17): 111-115, 118.
[3] 颜芸, 罗志刚, 周晓华, 等. 基础化学实验中乙酸乙酯合成实验的探索[J]. *广东化工*, 2012, 39(5): 232-233.
[4] 蔡鑫磊, 黄益平, 孙玉玉, 等. 反应精馏合成丙二醇甲醚乙酸酯的研究与模拟优化[J]. *现代化工*, 2022, 42(7): 224-227.
[5] 许女, 张天震, 樊玮鑫, 等. 山西老陈醋酿造过程中香气成分动态变化[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(11): 198-210.
[6] 王玉. 酯类化合物在啤酒酿造过程中风味演变的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.

[7] 彭奎, 刘义会, 张磊, 等. 浓香型白酒发酵糟醅中乙酸乙酯含量测定方法的研究[J]. *酿酒科技*, 2021(5): 98-100.
[8] 陈晓英, 朱仙弟. 乙酸乙酯合成的设计性实验教学探索[J]. *广州化工*, 2018, 46(9): 104-106.
[9] 戴鸣辉. 乙酸乙酯合成实验的探讨与改进[J]. *科技创新导报*, 2014, 11(27): 89-90.
[10] 李学章. 乙酸乙酯合成条件的优化研究[J]. *当代化工研究*, 2021(20): 26-27.
[11] TROFIMOVA M, SAMAROV A, MISIKOV G, et al. Vapor-liquid equilibrium in chemically equilibrium systems: The system with reaction of ethyl acetate synthesis[J]. *Russ J Gen Chem*, 2024, 94: S165-S176.
[12] VAN W B, AGHAKHANI S, LAUWAERT J, et al. Ethyl acetate synthesis by direct addition of acetic acid to ethylene on a silicotungstic acid catalyst: Experimental assessment of the kinetics[J]. *Appl Catal A-Gen*, 2022, 646: 118849.
[13] FELFELIAN Z, MAHDAVI M. A new ZrC nano powder solid acid catalyst for the esterification synthesis of ethyl acetate[J]. *Catal Commun*, 2023, 182: 106752.
[14] MA J N, WANG S Y, DUAN Y B, et al. Synthesis of ethyl acetate by the esterification process: Process optimization[J]. *Eng Adv*, 2023, 3(6): 449-453.
[15] 赵华绒, 蔡黄菊, 秦敏锐, 等. 多种方法分析与评价乙酸乙酯合成实验中产物之纯度[J]. *大学化学*, 2016, 31(9): 56-61.
[16] 方海仙, 普娅丽, 普家云, 等. 气相色谱法测定白酒中甲醇、乙酸乙酯和己酸乙酯含量的优化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(17): 6879-6886.
[17] 白宝清, 李颖星, 金晓弟, 等. 气相色谱法测定清香型白酒中乙酸乙酯和乙缩醛含量的研究[J]. *中国酿造*, 2018, 37(9): 181-184.
[18] 熊泽, 邵伟, 胡滨, 等. 鄂西地区几种畅销白酒中乙酸乙酯含量的测定[J]. *中国酿造*, 2012, 31(6): 172-175.
[19] 毕荣宇, 乔敏莎, 卢君, 等. 气相色谱-内标法测定白酒中3种高级脂肪酸乙酯含量[J]. *中国酿造*, 2022, 41(12): 240-244.
[20] 张越华, 聂飞, 周路, 等. 苯并噻唑酮类热活化延迟荧光材料的合成及其光电性能研究[J]. *有机化学*, 2023, 43(11): 3876-3887.
[21] 左惠君, 都芸, 左惠芸, 等. 气相色谱内标法测定白酒中乙酸乙酯含量的不确定度评定[J]. *酿酒科技*, 2021(4): 100-105.
[22] 彭奎, 刘义会, 张磊, 等. 浓香型白酒发酵糟醅中乙酸乙酯含量测定方法的研究[J]. *酿酒科技*, 2021(5): 98-100.
[23] 王乃军, 马美荣, 赵国锋, 等. 提高麸曲清香型白酒乙酸乙酯含量的研究[J]. *酿酒科技*, 2023(11): 65-69.
[24] 刘强. 气相色谱法测定自酿白酒中乙酸乙酯的含量[J]. *云南化工*, 2020, 47(3): 107-108.
[25] 时文靖, 于秋玲, 王真真, 等. 气相色谱法测定甲乙醚体系中乙酸乙酯含量[J]. *山东化工*, 2021, 50(1): 118, 121.
[26] 左惠君, 都芸, 左惠芸, 等. 气相色谱内标法测定白酒中乙酸乙酯含量的不确定度评定[J]. *酿酒科技*, 2021(4): 100-105.
[27] 张越华, 邢龙江, 聂飞, 等. 基于葱核深蓝光材料的合成及电致发光性能[J]. *发光学报*, 2024, 45(2): 269-279.
[28] 甄攀, 高文静, 李惠源, 等. 基于响应面法优化高产乙酸乙酯大曲清香型白酒二米查酒醋恒温发酵工艺[J]. *中国酿造*, 2023, 42(1): 186-191.
[29] 许银, 杨强, 张龙, 等. 高产乙酸乙酯酵母菌的筛选及其在清香型小曲白酒生产中的应用[J]. *中国酿造*, 2021, 40(8): 76-80.
[30] 李艳清, 付大友, 王蓉, 等. 气相色谱法测定酱油中乙酸乙酯的含量[J]. *中国调味品*, 2009, 34(6): 97-99.