

电加热雾化型电子烟烟油化学成分分析 及其雾化效率研究

Research on chemical composition and atomization behavior of E-cigs liquid by electrical heating atomizing electronic cigarettes

张晓旭¹ 邵灯寅¹ 连培康² 郭磊¹

ZHANG Xiao-xu¹ SHAO Deng-yin¹ LIAN Pei-kang² GUO Lei¹

罗娟敏¹ 徐达¹ 苏加坤¹ 蔡继宝¹

LUO Juan-min¹ XU Da¹ SU Jia-kun¹ CAI Ji-bao¹

(1. 江西中烟工业有限责任公司技术中心, 江西 南昌 330096;

2. 江西中烟工业有限责任公司南昌卷烟厂, 江西 南昌 330096)

(1. Technology Center of China Tobacco Jiangxi Industrial Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330096, China;

2. Nanchang Cigarette Factory of China Tobacco Jiangxi Industrial Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330096, China)

摘要:分别采用溶剂萃取—气质联用法和顶空—气质联用法(HS-GC/MS)对电加热雾化型电子烟烟油的化学成分进行分析。并在标准抽吸条件下(ISO),重点对电子烟的雾化效率开展研究。结果表明:①电子烟烟油中溶剂(1,2-丙二醇和丙三醇)和烟碱的含量较高,其余成分为满足抽吸需要所调配的香精和烟草提取物;②烟油中1,2-丙二醇的含量为588.5 mg/g,丙三醇为290.2 mg/g,烟碱为10.4 mg/g;③在标准抽吸条件下,电子烟烟油的平均雾化效率为11.99%,平均每口的雾化效率为0.30%。静态顶空法的前处理过程简便,在定性分析时比较有优势,但会发生热裂解,产生一些小分子量的醛、酮类化合物,故在定量分析中使用溶剂提取—气质联用法更合适。

关键词:电子烟;烟油;GC-MS;雾化效率

Abstract: The components of the provided E-cigs liquids were analyzed by solvent extraction-gas chromatography/mass spectrometry and headspace GC/MS (HS-GC/MS). Under the standard suction (ISO) condition, the atomization behavior of E-cigs was studied. The results indicated: ① The content of PG, glycerol, and nicotine in E-cigs liquid was higher than the other components. The other components were mainly tobacco essences and extracts. ② The

基金项目:江西中烟工业有限责任公司技术创新项目(编号:赣烟工科计2014-2)

作者简介:张晓旭,女,江西中烟工业有限责任公司工程师,硕士。

通信作者:郭磊(1982—),男,江西中烟工业有限责任公司工程师,硕士。E-mail:recallerman@163.com

收稿日期:2017-08-17

component of PG in mainstream cigarette aerosol was highest, which up to 588.5 mg/g. The glycerol content was up to 290.2 mg/g, and the nicotine content was 10.4 mg/g. ③ E-cigs liquid was atomized and trapped by Cambridge pad, and the mainstream cigarette aerosol was mainly particulate matter. The average atomizing efficiency was 11.99%, and the efficiency in every puffing smoke was 0.30% under the standard puff conditions. The pretreatment process of static headspace analysis is simple and convenient, and it has advantages in qualitative analysis. However, pyrolysis will lead to the generation of aldehydes and ketones with small amounts of molecular weight. Therefore, the use of solvent extraction and GC-MS is more suitable for quantitative analysis.

Keywords: electronic cigarettes; E-cigs liquid; GC-MS; atomizing efficiency

新型烟草制品是近几年出现的新颖烟草消费形式,相对于传统的卷烟,已越来越被消费者认可和接受,影响着未来卷烟消费的发展趋势。新型烟草制品种类繁多,随着技术的不断发展和创新,其类型也在不断增加。在中国市场上,电加热雾化型电子烟的市场占有率较高,形式多种多样,是消费者普遍接受的产品。电加热雾化型电子烟是一种能够把烟碱溶液雾化的装置,通过模拟抽吸传统卷烟,给消费者带来满足感。它由锂电池(可充电)、雾化器(加热元件)、烟弹(通常看到的烟嘴)等元件构成。根据烟油添加使用方式不同,电子烟可以分为一次性、反复充电更换烟弹型和反复注油型。电子烟烟油作为电子烟主要特征性原料,其口味以烟

草口味、水果口味、薄荷口味为主。烟油的成分决定了电子烟的风味口感。同时,一些醇类化合物(如1,2-丙二醇,丙三醇等)除被用作传统卷烟的保润剂外^[1],也常被用作电子烟的雾化剂^[2-3]。为减少电子烟的甜腻感,1,3-丁二醇也常被用作电子烟溶剂^[4]。

人们通过抽吸电子烟烟气释放物来满足生理感受,电子烟烟油成分及雾化效率直接影响用户的使用体验,对其成分及雾化效率进行研究具有重要意义。有关电子烟成分分析方法的比较及其雾化效率的研究鲜有报道。目前对于电子烟烟油的研究主要集中在其化学成分分析^[5-8]及安全性评价^[9]等方面,已有的对电子烟烟油中丙三醇、丙三醇和烟碱的分析方法主要为GC-MS法、LC-MS法、紫外分光光度法和热裂解-GC-MS法等^[5,10-13]。温光和等^[14]提出了电子烟雾化液的开发思路,使电子烟的抽吸品质更接近传统卷烟。鉴于已建立的检测方法种类繁多,各有利弊,且目前还无对其雾化效率的研究。本研究对提供的电子烟烟油分别采取溶剂萃取—气质联用法和顶空—气质联用法对其化学成分进行了比较分析,并对其雾化效率进行了研究,为电子烟产品的化学成分测定及烟油调香提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

气相色谱—质谱联用仪:Agilent 7890A-5975C型,配7697A顶空进样器,美国Agilent公司;

吸烟机:20孔道直线型,英国Cerulian公司;

电加热雾化型电子烟:RN4082型,可重复添加烟油,采用4.2 V可充电式电池加热,主要结构见图1,深圳市合元科技有限公司;

丙三醇、异丙醇:分析纯,西陇化工股份有限公司;

1,2-丙二醇、甲醇、1,4-丁二醇:色谱纯,美国J.T.Baker公司;

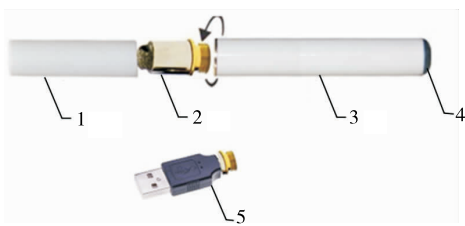
烟碱:纯度 $\geq 99.0\%$,中国国家烟草质量监督检验中心;

庚酸甲酯:纯度 $\geq 99.5\%$,德国Dr. Ehrenstoffe GmbH公司;

18种电子烟品牌共计42种型号的电子香烟油:网络购买;

吸收瓶:50 mL,郑州中原玻璃制品厂;

剑桥滤片: $\Phi 44$ mm,英国Whatman公司。



1. 烟弹(可反复添加烟油) 2. 雾化器 3. 电池 4. 指示灯
5. USB 插头

图1 电加热雾化型电子烟结构图

Figure 1 Structure of Electric heating atomization type E-cigs

1.2 样品处理与分析

1.2.1 溶剂提取—气质联用法 准确称取0.100 g烟油,加入10 mL甲醇,完全溶解后,取样分析。GC-MS分析条件:色谱柱:HP-INNOWAX(30 m \times 0.25 mm i.d. \times 0.25 μ m d.f.);进样口温度:250 $^{\circ}$ C;载气:He;进样方式:分流进样;分流比:10:1;进样量:1 μ L;流速:1.0 mL/min;升温程序:40 $^{\circ}$ C保持0.5 min,以4 $^{\circ}$ C/min升温至250 $^{\circ}$ C,保持15 min;传输线温度:250 $^{\circ}$ C;离子源温度:230 $^{\circ}$ C;四极杆温度:150 $^{\circ}$ C;扫描方式:全扫描(Full Scan);扫描范围:30~300 amu;溶剂延迟:5 min。

1.2.2 静态顶空—气质联用法 准确称取0.050 g烟油样品于顶空瓶中,压好盖后进样分析。GC-MS分析条件:色谱柱:HP-VOC(60 m \times 0.32 mm i.d. \times 0.32 μ m d.f.);进样口温度:250 $^{\circ}$ C;分流进样,分流比为5:1;载气:He;流速:1.2 mL/min;升温程序:40 $^{\circ}$ C保持0.5 min,以4 $^{\circ}$ C/min升温至250 $^{\circ}$ C,保持15 min;传输线温度:250 $^{\circ}$ C;离子源温度:230 $^{\circ}$ C;四极杆温度:150 $^{\circ}$ C;扫描方式:全扫描(Full Scan);扫描范围:30~300 amu;溶剂延迟:5 min。HS分析条件:加热炉:150 $^{\circ}$ C;加热时间:40 min;进样时间:1 min;进样阀温度:170 $^{\circ}$ C;传输线温度:200 $^{\circ}$ C。

1.2.3 烟油中主要溶剂和烟碱含量的定量分析 分别称取一定量的1,2-丙二醇、丙三醇和烟碱,以甲醇为溶剂,参考文献^[10]和^[11]所述配制方法配制一系列不同浓度的标准溶液。准确称取约15.0 mg的烟油,用甲醇定容至50 mL,经过滤后进样分析。GC-MS分析条件:色谱柱:HP-INNOWAX(30 m \times 0.25 mm i.d. \times 0.25 μ m d.f.);载气:He;进样量:1 μ L;进样口温度:250 $^{\circ}$ C;分流比:10:1;流速:1.0 mL/min;升温程序:40 $^{\circ}$ C保持0.5 min,以4 $^{\circ}$ C/min升温至250 $^{\circ}$ C,保持15 min;传输线温度:250 $^{\circ}$ C;离子源温度:230 $^{\circ}$ C;四级杆温度:150 $^{\circ}$ C;扫描方式:SIM;选择离子:1,2-丙二醇(45,61),丙三醇(45,61),烟碱(162,133)(特征离子中前者为定量离子,后者为定性离子);溶剂延迟:5 min。

1.2.4 烟气的捕集及雾化效率分析 将电子烟电池充满电后(约5 h),在直线型吸烟机上,按照标准抽吸条件(抽吸容量35 mL,抽吸持续时间2 s,抽吸间隔60 s),在温度(22 \pm 1) $^{\circ}$ C,相对湿度(60 \pm 5)%的恒温恒湿环境中进行抽吸^[15]。往烟筒中加入约0.44 g的电子香烟油,用剑桥滤片捕集40口烟气释放物,分别称量并记录电子烟烟筒及抽吸前后夹持器的重量。

2 结果与分析

2.1 电子烟烟油化学成分

溶剂提取—气质联用法和静态顶空—气质联用法得到的电子烟烟油色谱图分别见图2、3。对所得到的总离子流图进行NIST11谱库检索,分析结果见表1。由表1可知,溶剂提取—气质联用法共定性出23种化合物。烟油中除有大量的丙三醇、丙三醇等溶剂和烟碱外,还有烟草提取物(巨豆三烯酮)、呋喃类、吡嗪类、酮类、醇类等调配化合物。

与溶剂提取—气质联用法相比,静态顶空—气质联用法共定性出42种化合物,其中有6种成分因匹配度过低而无

法定性。由表 1 可知,静态顶空法所得到的分析结果中,有 15 种成分和溶剂提取法相同,另外乙酸丁酯、3-甲基-1,2-环戊二酮、2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-咪喃酮、2-甲氧基-3-(2-丙烯基)-苯酚、二氢香兰素、巨豆三烯酮 C、香兰素、可替宁 8 种成分均未检出,可能是加热温度较低(150 ℃)所致的。烟油中的溶剂除了丙二醇和丙三醇外,还有一定的乙醇,这可能是电子烟烟油中添加的香精香料所带入^[15-16]。在溶剂提取法中可能因为质谱方法的溶剂延迟时间(约 5 min)长于乙醇的出峰时间,从而导致乙醇未检出。

静态顶空法的前处理过程简便,灵敏度较好,在定性分析时比较有优势,与丁彩霞等^[17]的研究结果相一致。然而,由于静态顶空—气质联用法在 150 ℃ 下进行加热,可能会导致烟油中一些成分发生热裂解,产生一些小分子量的醛、酮类化合物,这也是在较早的出峰时间(约 5~15 min)内出现较多醛、酮类化合物的原因。考虑到该方法会产生较多的副产物,因此在后续的定量分析中采用溶剂提取—气质联用法。

重复 3 次试验,各组分峰面积的相对标准偏差(RSD)见表 1,其中大部分化合物的相对标准偏差<10%,说明该方法具有较好的稳定性。

2.2 电子烟烟油中主要溶剂和烟碱的含量

由图 4 可知,目标物实现基本分离,各目标物峰形良好。

表 1 烟油化学成分分析结果

Table 1 Chemical analysis of E-cigs liquid($n=3$)

化合物	保留时间/min		峰面积百分比/%		RSD/%	
	溶剂提取法	静态顶空法	溶剂提取法	静态顶空法	溶剂提取法	静态顶空法
乙醇	—	5.607	—	11.177	—	6.5
乙酸丁酯	5.679	—	0.015	—	1.2	—
丙酮	—	6.512	—	0.269	—	3.2
甲酸乙酯	—	7.053	—	0.101	—	2.4
1-丙醇	—	8.141	—	0.014	—	2.1
乙酸	—	9.024	—	0.371	—	6.3
丁二酮	—	9.269	—	0.139	—	8.5
2-丁酮	—	9.596	—	0.012	—	6.3
2-甲基-咪喃	—	9.763	—	0.006	—	12.0
乙酸乙酯	—	10.140	—	0.162	—	3.5
未知物 1	—	10.432	—	0.073	—	5.6
异戊醛	—	11.953	—	0.012	—	8.3
羧基丙酮	—	12.674	—	2.118	—	2.5
未知物 2	—	13.147	—	0.606	—	6.7
未知物 3	—	13.638	—	0.226	—	8.1
2,5-二甲基-咪喃	—	14.107	—	0.008	—	2.9
2,2,4-三甲基-1,3-二氧杂戊烷	—	14.813	—	0.047	—	3.0
二乙醇	—	14.914	—	0.010	—	4.1
2,3,5-三甲基吡嗪	14.863	28.626	0.014	0.212	9.6	3.9
2,3,5,6-四甲基吡嗪	16.989	32.276	0.039	0.526	8.7	8.2
2-乙氧基丙醇	—	18.886	—	0.459	—	3.8
未知物 4	—	19.875	—	0.252	—	9.4
糠醛	—	20.802	—	0.015	—	5.8
丙二醇	21.671	17.636	54.742	69.393	5.6	3.4
乙二醇二乙酸酯	—	22.029	—	0.018	—	2.8

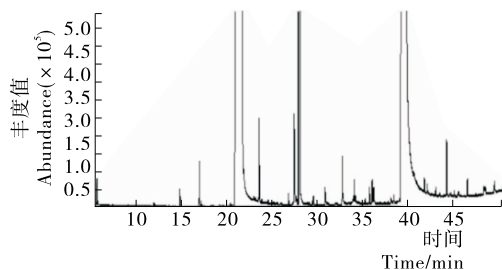


图 2 溶剂提取—气质联用法得到的电子烟烟油色谱图

Figure 2 The chromatogram of E-cigs with solvent extraction GC-MS

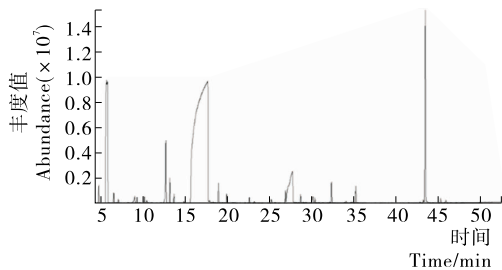


图 3 静态顶空—气质联用法得到的电子烟烟油色谱图

Figure 3 The chromatogram of E-cigs with headspace GC/MS

续表 1

化合物	保留时间/min		峰面积百分比/%		RSD/%	
	溶剂提取法	静态顶空法	溶剂提取法	静态顶空法	溶剂提取法	静态顶空法
间二甲苯	—	22.330	—	0.008	—	7.6
未知物 5	—	22.534	—	0.153	—	8.2
未知物 6	—	23.115	—	0.058	—	8.6
2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮	23.590	35.154	0.076	0.424	9.1	5.7
对二甲苯	—	23.606	—	0.008	—	2.9
γ -戊内酯	—	26.795	—	0.316	—	6.4
β -大马酮	26.823	45.192	0.009	0.110	2.7	5.3
3-甲基-1,2-环戊二酮	27.473	—	0.075	—	8.0	—
烟碱	28.005	43.342	7.239	6.366	5.9	7.2
3-吡啶甲醛	—	29.078	—	0.010	—	1.8
苯乙醇	29.555	33.871	0.007	0.033	7.5	8.9
甲基环戊烯醇酮	—	29.924	—	0.339	—	8.3
2-乙酰基吡啶	—	30.327	—	0.128	—	3.4
麦芽酚	30.877	34.010	0.020	0.064	6.0	2.9
2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-咪喃酮	32.750	—	0.047	—	3.2	—
巨豆三烯酮 A	35.245	50.911	0.004	0.009	4.2	4.6
2-甲氧基-3-(2-丙烯基)-苯酚	35.734	—	0.016	—	9.4	—
麦思明	36.041	46.371	0.024	0.010	9.7	3.5
巨豆三烯酮 B	36.218	51.361	0.012	0.008	2.6	7.9
二氢香兰素	38.076	—	0.005	—	5.7	—
巨豆三烯酮 C	38.413	—	0.007	—	8.0	—
丙三醇	39.810	27.683	37.544	5.527	5.9	3.8
吡啶	41.780	41.408	0.015	0.013	5.4	9.7
2,3-联吡啶	42.112	50.152	0.011	0.004	1.8	2.9
三环萜	—	42.749	—	0.029	—	3.7
5-羟甲基糠醛	43.071	38.021	0.009	0.004	7.6	8.9
丁香酚	—	43.126	—	0.067	—	8.5
香兰素	44.213	—	0.058	—	3.1	—
石竹烯	—	45.803	—	0.077	—	2.9
可替宁	49.562	—	0.011	—	5.6	—
二氢猕猴桃内酯	—	50.455	—	0.012	—	2.5

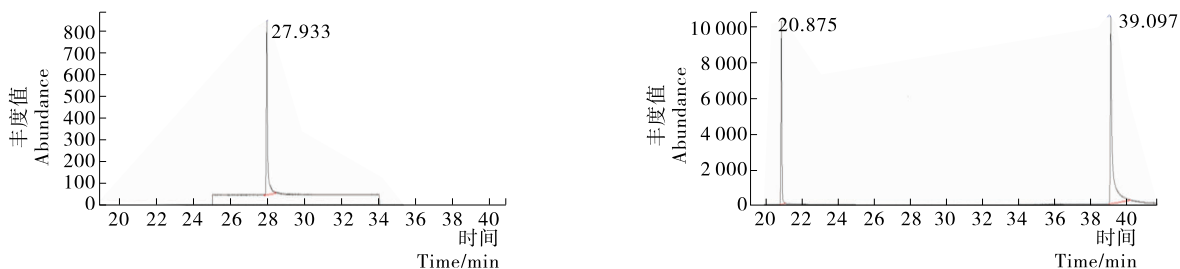


图 4 丙二醇(20.875 min)、烟碱(27.933 min)和 1,2-丙三醇(39.097 min)的提取离子流图

Figure 4 Extracted ion chromatogram of Propylene glycol (20.875 min), nicotine (27.933 min) and glycerol (39.097 min)

由 6 个样品含量,计算相对标准偏差,评价方法的重复性,结果见表 2。由表 2 可知,分析方法的相对标准偏差在 3% 以下,说明该方法重复性较好。按照与样品实际浓度相当的添加量加入标准物质,以甲醇定容至刻度,平行处理 3 个样品,计算方法的回收率,1,2-丙二醇、丙三醇和烟碱的平

均加标回收率均在 95% 以上,适合电子烟烟油中 1,2-丙二醇、丙三醇和烟碱含量的分析。含量测定结果表明,1,2-丙二醇的含量最高(588.5 mg/g),其次为丙三醇(290.2 mg/g),烟碱的含量 10.4 mg/g。3 者含量合计为 889.1 mg/g,占电子烟烟油的比例为 88.91%。

表 2 标准曲线、相对标准偏差(RSD)和回收率

Table 2 Standard curve, relative standard deviation (RSD) and recovery

化合物	回归方程	浓度范围/ (mg · L ⁻¹)	相关系数 R ²	含量/ (mg · g ⁻¹)	R.S.D./% (n=6)	回收率/% (n=3)
1,2-丙二醇	Y=0.007 2X+11.28	10~100 0	0.999 8	588.5	1.01	98.5
丙三醇	Y=0.024 0X+15.309	10~500	0.998 7	290.2	2.96	96.2
烟碱	Y=0.001 3X+0.422 2	0.5~25.0	0.999 3	10.4	2.40	99.1

2.3 电子烟烟油雾化效率研究

按照标准抽吸条件,对电子烟抽吸前后重量的变化及烟油雾化效率进行了分析,结果见表 3、4。由表 4 可知,5 组电子烟烟油的雾化效率在 11.58%~12.25%,平均的雾化效率为 11.99%,平均每口的雾化效率为 0.3%。其中,5 组样品夹持器的平均增重为 0.056 48 g,烟筒平均减重为 0.053 48 g,可看出夹持器增重与烟筒减重仅相差 0.003 g,进一步说明烟气释放物大部分被捕集完全。

表 3 电子烟抽吸前后夹持器重量变化

Table 3 Weight changes of the holder before and after e-cig suction

项目	抽吸前/g	抽吸后/g	增重/g
夹持器 A	41.591 8	41.646 3	0.054 3
夹持器 B	41.631 4	41.683 2	0.051 8
夹持器 C	40.733 7	40.790 3	0.056 6
夹持器 D	40.669 5	40.724 6	0.055 1
夹持器 E	40.751 9	40.807 5	0.055 6

表 4 电子烟抽吸前后烟筒重量变化及雾化效率

Table 4 Chimney weight changes and the atomizing efficiency of E-cigs liquid

项目	抽吸前/g			抽吸后/ g	减重/ g	雾化效率/ %
	自重	添加烟油后重量	烟油添加量			
烟筒 A	3.997 7	4.441 8	0.444 1	4.388 6	0.053 2	11.98
烟筒 B	3.961 3	4.400 8	0.439 5	4.349 9	0.050 9	11.58
烟筒 C	4.122 0	4.579 6	0.457 6	4.524 5	0.055 1	12.04
烟筒 D	4.064 3	4.503 1	0.438 8	4.449 9	0.053 2	12.12
烟筒 E	4.134 1	4.583 2	0.449 1	4.528 2	0.055 0	12.25

3 结论

本研究分别采取溶剂萃取—气质联用法和顶空—气质联用法对电子烟烟油化学成分进行了分析,并对 2 种方法进行了比较分析,研究发现静态顶空法的前处理过程简便,在定性分析时比较有优势,但会发生热裂解,产生一些小分子的醛、酮类化合物,故在定量分析中溶剂提取—气质联用法更合适。

电子烟烟油中溶剂(丙二醇、丙三醇)和烟碱的含量较高,其中 1,2-丙二醇的含量最高(588.5 mg/g),其次为丙三醇(290.2 mg/g),烟碱的含量为 10.4 mg/g。3 者含量合计为 889.1 mg/g,占电子烟烟油的比例为 88.91%。在标准抽吸条件下,电子烟的平均雾化效率为 11.99%,平均每口的雾化效率为 0.30%。若雾化剂配比、抽吸容量、口数和间隔等发生变化,电子烟的雾化效率也可能发生相应的变化,需进一步开展研究确证。

参考文献

- [1] 郭磊,苏加坤,罗娟敏,等.国内外品牌卷烟中的糖类和多元醇的 HPLC 法同时测定[J].食品与机械,2016,32(3):73-76.
- [2] RED S. Electronic cigarettes-an overview[J]. Tobacco Prevention and Tobacco Control, 2013, 19: 1-39.
- [3] 韩书磊,李中皓,陈欢,等.分散固相萃取—气相色谱—质谱联

用法同时测定卷烟烟丝中的 3 种保润剂[J].烟草科技,2014(1):49-52.

- [4] HAHN J, MONAKHOVA Y-B, HENGEN J, et al. Electronic cigarettes: overview of chemical composition and exposure estimation[J]. Tobacco Induced Diseases, 2014, 12(23): 1-12.
- [5] KIM H-J, SHIN H-S. Determination of tobacco-specific nitrosamines in replacement liquids of electronic cigarettes by liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2013, 1 291: 48-55.
- [6] MARCO E, GRIMALTI J-O. A rapid method for the chromatographic analysis of volatile organic compounds in exhaled breath of tobacco cigarette and electronic cigarette smokes[J]. Journal of Chromatography A, 2015, 1 410: 51-59.
- [7] TODD P, DIFRANCESCO A-G, Smith S-B, et al. Determination of nicotine content and delivery in disposable electronic cigarettes available in the united states by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Nicotine & Tobacco Research, 2016, 18(5): 700-707.
- [8] BANSAL V, KIM K-H. Review on quantitation methods for hazardous pollutants released by e-cigarette (EC) smoking[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2016(78): 120-133.
- [9] PISINGER C, DØSSING M. A systematic review of health effects of electronic cigarettes[J]. Preventive Medicine, 2014, 69: 248-260.

(下转第 85 页)

研究主要针对的是产品的安全性,在后续研究中将进一步探讨产品感官质量、营养成分,寻求其在实际应用中与安全的平衡点。

参考文献

- [1] 周翔宇. 中国香椿属的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005: 26-39.
- [2] YU Wen-jen, CHANG Chen-chin, KUO Tong-fong, et al. *Toona sinensis* Roem leaf extracts improve antioxidant activity in the liver of rats under oxidativestress[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(6): 1 860-1 865.
- [3] 陈丛瑾, 黄克瀛, 李德良, 等. 香椿叶总黄酮的超声波辅助提取及其清除 DPPH 自由基能力的研究[J]. *食品与机械*, 2007, 23(1): 76-80.
- [4] 王赵改, 陈丽娟, 张乐, 等. 不同采收期红油香椿营养成分和抗氧化活性分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(4): 158-163.
- [5] 孙震, 钱和, 蒋将. 蔬菜中硝酸盐与亚硝酸盐检测方法的研究进展[J]. *食品与机械*, 2006, 22(5): 123-125.
- [6] KEETON J T. History of nitrite and nitrate in food [M]// *Nitrite and Nitrate in Human Health and Disease*. [S.l.]: Humana Press, 2010: 69-84.
- [7] 何浩, 陈幸莺, 孙映球, 等. 顶空-气相色谱法测定食品中亚硝酸盐[J]. *食品与机械*, 2017, 33(1): 55-58.
- [8] 陈利梅, 李德茂, 曾庆华, 等. 不同条件下蔬菜中亚硝酸盐含量的变化[J]. *食品与机械*, 2009, 25(3): 103-105.
- [9] KLURFIELD D M. Nitrite and nitrate in cancer [M]// *Nitrite and Nitrate in Human Health and Disease*. [S.l.]: Humana Press, 2011: 263-278.
- [10] HORD N G. Dietary nitrates, nitrites, and cardiovascular disease[J]. *Current Atherosclerosis Reports*, 2011, 13(6): 484-492.
- [11] 张志国, 孙迪. 泡制香椿亚硝酸盐变化规律及其降低措施研究[J]. *中国调味品*, 2016(1): 30-34.
- [12] 徐文博, 杨海艳, 谢美华, 等. 不同预处理方法对香椿中主要成分的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2015(11): 135-139.
- [13] 赵明焯, 戴蕴青, 苏春元, 等. 干制和热烫加工对香椿品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(21): 11 070-11 072.
- [14] 黄敏, 李静静, 余萃, 等. 几种食前处理对蔬菜中硝酸盐和亚硝酸盐的去除效果[J]. *食品科学*, 2011, 32(9): 82-86.
- [15] 陈丽娟, 王赵改, 杨慧, 等. 漂烫时间及贮藏温度对香椿嫩芽品质的影响研究[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(2): 19-23.
- [16] 张京芳, 王冬梅, 刘鑫. 干制香椿褐变的控制研究[J]. *中国食品学报*, 2009, 9(2): 144-148.
- [17] 王树庆, 姜薇薇, 房晓, 等. 抗坏血酸的亚硝酸盐清除能力的研究[J]. *中国调味品*, 2011, 36(11): 22-24.
- [18] 黄丽慧, 张雁, 陈于陇, 等. 发酵蔬菜中亚硝酸盐消长规律及调控技术的研究进展[J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 303-307.
- [19] 张平, 叶文慧, 石志华. 姜汁对亚硝酸盐清除作用的研究[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2005, 17(4): 73-75.
- [20] 周志才, 王美兰. 香椿腌制及储藏过程中品质变化的研究[J]. *食品科学*, 2004, 25(12): 180-183.
- [21] 郭金全, 李富兰. 亚硝酸盐检测方法研究进展[J]. *当代化工*, 2009, 38(5): 546-549.
- [22] 中华人民共和国国家标准. GB 5009.33—2016 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 10-12.
- [23] 霍红. 模糊数学在食品感官评价质量控制方法中的应用[J]. *食品科学*, 2004, 25(6): 185-188.
- [24] 刘朝建, 康怀彬, 等. 模糊数学综合评判法在烧鸡加工中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2016(3): 19-22.
- [25] 段续, 刘文超, 任广跃, 等. 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 295-302.
- [26] 曾维丽, 刘中华, 张臻, 等. 模糊数学在香菇酱罐头感官评价中的应用[J]. *中国调味品*, 2014(8): 51-53.
- [27] 岳虹. 影响腌制雪里蕻亚硝酸盐含量的因素研究[J]. *食品工程*, 2010(4): 42-45.
- [28] 谭兴和, 时莎莎, 谭亦成, 等. 干豆角发酵过程中的成分变化[J]. *食品与机械*, 2011, 27(4): 29-31.
- [29] 杨贤庆, 樊丽琴, 陈胜军, 等. 咸鱼干腌过程中亚硝酸盐和硝酸盐的含量变化及其相关性分析[J]. *食品与发酵工业*, 2009(10): 55-58.
- [30] 刘素纯, 罗晓敏, 胡铮璐, 等. 黄菜亚硝酸盐含量的降低及其安全性评价研究[J]. *食品与机械*, 2008, 24(2): 90-92, 155.
- [31] 李珊, 李永峰, 王之波, 等. 蔬菜、腌菜亚硝酸盐测定及 V_c 对亚硝酸盐阻断[J]. *中国公共卫生*, 2004, 20(3): 357-357.
- [32] 艾对元, 张卫兵, 冯丽丹, 等. 几种物质对亚硝酸盐清除作用的比较[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(23): 118-121.
- [33] 郑桂富, 徐振相. 控制雪里蕻腌制过程中亚硝酸盐形成的研究[J]. *食品科学*, 2002, 23(9): 56-58.
- [34] 张平, 叶文慧, 石志华. 姜汁对亚硝酸盐清除作用的研究[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2005, 17(4): 73-75.
- [35] 马超, 唐玉琴. 降低盐渍滑子菇中亚硝酸盐含量的研究[J]. *北方园艺*, 2013(3): 146-148.

(上接第 37 页)

- [10] 段沅杏, 吴亿勤, 杨威, 等. GC/MS 法同时测定电子烟烟气释放物中的 5 种醇类化合物[J]. *烟草科技*, 2015(10): 43-47, 61.
- [11] 韩书磊, 陈欢, 刘彤, 等. 气相色谱法分析电子烟烟液中主要生物碱含量[J]. *分析科学学报*, 2015(4): 494-498.
- [12] 杨继, 段沅杏, 赵伟, 等. 顶空-固相微萃取-气相色谱/质谱分析电子烟烟液中的挥发性成分[J]. *烟草科技*, 2015(4): 42-48.
- [13] 韩书磊, 陈欢, 刘彤, 等. 气相色谱法同时测定电子烟烟液中主

要化学成分含量[J]. *安徽农业科学*, 2014(24): 8 344-8 347.

- [14] 温光和, 杨雪燕, 潘红成, 等. 电子烟雾化液挥发性成分分析及开发思路探讨[J]. *香料香精化妆品*, 2016(3): 6-10, 17.
- [15] STEVENS R. CORESTA electronic cigarette task force[R]. Silver Spring: FDA Public Workshop-Electronic Cigarettes and the Public Health, 2014.
- [16] 卢昕博, 蒋健, 胡安福, 等. 气相色谱-质谱法测定电子烟烟液中的 7 种溶剂[J]. *理化检验: 化学分册*, 2016(9): 1 041-1 044.
- [17] 丁彩霞, 李钢, 郑赛晶, 等. 固相萃取-气相色谱-质谱法分析电子烟烟液中的香味成分[J]. *分析实验室*, 2016(7): 846-849.