

# 气相色谱-质谱法测定食品接触材料中2-甲基-1,3-丙二醇和新戊二醇的迁移量

贝荣华, 陈湘颖, 董 犇, 钟怀宁, 陈燕芬, 曾 莹, 陈 胜,  
李 丹\*, 蔡汶静, 郑建国

(广州海关技术中心, 广东 广州 510665)

**摘要:**建立了食品接触材料中2-甲基-1,3-丙二醇(MPO)和新戊二醇(NPG)迁移量的气相色谱-质谱(GC-MS)检测方法。食品接触材料经迁移试验后,所得浸泡液经苯硼酸溶液衍生化、正己烷萃取后,GC-MS测定。结果表明,该方法在优化条件下的线性相关性良好,相关系数( $r^2$ )大于0.995;MPO和NPG在4%乙酸、10%乙醇、50%乙醇和异辛烷中的检出限均为0.01 mg/L;线性范围均为0.02~0.10 mg/L;在95%乙醇中,MPO的检出限为0.30 mg/L,线性范围为0.50~1.6 mg/L,NPG的检出限为0.03 mg/L,线性范围为0.05~0.16 mg/L。该方法在低、中、高3个浓度水平的平均回收率为85.0%~112%,相对标准偏差(RSD)为0.60%~9.5%。该方法的检测结果准确、灵敏度高,能较好地实现食品接触材料及制品中MPO和NPG迁移量的测定,满足我国法规的限量要求。

**关键词:** 2-甲基-1,3-丙二醇(MPO);新戊二醇(NPG);食品接触材料;气相色谱-质谱法(GC-MS);衍生化法  
中图分类号: O657.71; O622.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-4957(2021)11-1657-06

## Determination of Migration of 2-Methyl-1,3-Propanediol and 2,2-Methyl-1,3-Propanediol in Food Contact Materials by Gas Chromatography – Mass Spectrometry

BEI Rong-hua, CHEN Xiang-ying, DONG Ben, ZHONG Huai-ning, CHEN Yan-fen,  
ZENG Ying, CHEN Sheng, LI Dan\*, CAI Wen-jing, ZHENG Jian-guo  
(Guangzhou Customs Technical Center, Guangzhou 510665, China)

**Abstract:** A gas chromatography – mass spectrometry (GC – MS) was developed for the determination of migration of 2-methyl-1,3-propanediol (MPO) and 2,2-methyl-1,3-propanediol (NPG) in food contact materials. After the migration test of food contact materials, the obtained soaking solution was firstly derivatized with phenylboric acid solution, then extracted with *n*-hexane, and finally determined by GC – MS. Results showed that there were good linear relationship of this method in the optimized conditions, with correlation coefficients ( $r^2$ ) larger than 0.995. The detection limits for MPO and NPG in 4% acetic acid, 10% ethanol, 50% ethanol and isooctane were all 0.01 mg/L within linear ranges of 0.02 – 0.10 mg/L. The detection limit of MPO in 95% ethanol was 0.30 mg/L within a linear range of 0.50 – 1.6 mg/L. The detection limit for NPG in 95% ethanol was 0.03 mg/L within a linear range of 0.05 – 0.16 mg/L. The relative standard deviations (RSD) of this method were in the range of 0.60% – 9.5%, and the average recoveries were 85.0% – 112%. With the high accuracy and sensitivity, the method could be used to determine the migration of 2-methyl-1,3-propanediol and 2,2-methyl-1,3-propanediol in food contact coatings and plastic products, so as to meet the limited requirements of Chinese regulations.

**Key words:** 2-methyl-1,3-propanediol (MPO); 2,2-methyl-1,3-propanediol (NPG); food contact materials; gas chromatography – mass spectrometry (GC – MS); derivatization method

收稿日期: 2021-07-27; 修回日期: 2021-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFF0203705); 广州海关科研项目(2021GZCK12, 2020GZCK-026)

\*通讯作者: 李 丹, 研究员, 研究方向: 食品接触材料检测及安全评估, E-mail: lid@iqtcnet.cn

新戊二醇(NPG)和2-甲基-1,3-丙二醇(MPO)是两种广泛应用于塑料、涂料以及粘合剂的有机化合物<sup>[1-4]</sup>。NPG作为单体或添加剂,多应用于粉末涂料用聚酯树脂中,且保持较快增长<sup>[5-6]</sup>,而MPO凭借毒性低这一优势,应用量也逐步提升。2018年食品相关产品新品种的公告<sup>[7]</sup>规定MPO用于食品接触用涂料及涂层时特定迁移限量为5 mg/kg,GB 9685-2016<sup>[8]</sup>规定NPG应用于食品接触用塑料材料、涂料及涂层和粘合剂时的特定迁移限量为0.05 mg/kg。然而,国内外食品包装材料领域并无针对NPG和MPO迁移量的测试标准,国内外也鲜有文献报道<sup>[9-10]</sup>。本研究旨在建立该两种物质的迁移量检测方法,以同时监控食品接触材料中NPG和MPO的迁移风险。

已有研究表明,带有二元醇结构的物质采用气相色谱法测定时,其检出限一般大于1 mg/kg<sup>[11-12]</sup>。而采用衍生化或者固相萃取<sup>[13]</sup>后进行GC-MS<sup>[14-17]</sup>、HPLC<sup>[18]</sup>测定时,检出限一般小于1 mg/kg,衍生化试剂一般为硼酸<sup>[14]</sup>、苯基硼酸<sup>[19-20]</sup>、七氟丁酰咪唑<sup>[21-22]</sup>、N,O-双(三甲基硅烷基)三氟乙酸胺<sup>[15]</sup>等。本文选择食品模拟物4%乙酸、10%乙醇、50%乙醇以及化学替代溶剂95%乙醇和异辛烷作为研究对象,建立了MPO和NPG迁移量的衍生化/GC-MS测定法,并将该方法应用于食品接触材料中该两种化合物的检测,方法的灵敏度满足我国法规的限量要求,为食品接触材料中MPO和NPG的风险管控提供了有效可靠的技术支持。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

7890B-5977B气相色谱-质谱联用仪(Agilent公司),ME204电子天平(瑞士梅特勒-托利仪器公司),鼓风干燥箱(三腾仪器公司)。

2-甲基-1,3-丙二醇标准品(纯度99.5%,AccuStandard),新戊二醇标准品(纯度99%,AccuStandard),甲醇(色谱纯,ThermoFisher),乙酸、乙醇、丙酮(分析纯,广州化学试剂厂),苯基硼酸(分析纯,上海麦克林公司)。

实验所用30款实际样品均为市场随机采购所得,其中咖啡罐5款,汽水罐2款,八宝粥罐3款,咖啡胶囊6款,复合塑料制品14款。

### 1.2 标准溶液的制备

以甲醇为稀释剂,配制质量浓度约100 mg/L的MPO和NPG混合标准溶液。

用4%乙酸、10%乙醇、50%乙醇、异辛烷将MPO和NPG分别稀释成质量浓度为0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 mg/L的系列混合标准工作溶液。

用95%乙醇将MPO稀释成质量浓度分别为0.50、0.80、1.0、1.2、1.6 mg/L,NPG的质量浓度分别为0.05、0.08、0.10、0.12、0.16 mg/L的系列混合标准工作溶液。

### 1.3 衍生化试剂溶液的配制

根据已有研究<sup>[16,23]</sup>选用苯基硼酸作为衍生化试剂。称取10 g苯基硼酸,依次加入40 mL丙酮和2 mL水,搅拌使其溶解。

### 1.4 样品前处理

按照GB 31604.1<sup>[24]</sup>和GB 5009.156<sup>[25]</sup>的要求,对样品进行迁移试验,得到浸泡液。

1.4.1 4%乙酸、10%乙醇和50%乙醇浸泡液的前处理 取2.5 mL样品溶液至10 mL具塞试管中,加入0.5 mL苯基硼酸溶液,摇匀后放置于70 °C烘箱,衍生化反应20 min。冷却后加入1.5 mL正己烷,涡旋振荡1 min,静置,待分层后取上清液,待测。

1.4.2 95%乙醇和异辛烷浸泡液的前处理 取2.5 mL样品溶液至10 mL具塞试管中,加0.5 mL苯基硼酸溶液,摇匀后放置于70 °C烘箱,衍生化反应20 min。冷却后取约1 mL上机。

### 1.5 仪器条件

DB-5MS色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);载气为氦气,流速1.0 mL/min;不分流进样;进样口温度250 °C;程序升温:初始温度60 °C保持1 min,以15 °C/min升至260 °C,保持8 min;色谱-质谱接口温度280 °C;离子源温度230 °C;传输线温度150 °C;MPO的定量离子 $m/z$  176、定性离子 $m/z$  105;NPG的定量离子 $m/z$  190、定性离子 $m/z$  56、105、147。

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品前处理方法的优化

对 MPO 和 NPG 的测定, 首先尝试直接进样进行 GC 分析。结果显示, MPO 和 NPG 的标准品溶液可得到较优的色谱峰, 基本可实现 2 mg/L 的仪器检出限; 但以 4% 乙酸和 10% 乙醇迁移浸泡液作为基质, 无法检测到质量浓度低于 20 mg/L 的目标峰。

改用 GC-MS 进行分析, 由 95% 乙醇和异辛烷稀释后的标准工作溶液直接进样, 由 4% 乙酸、10% 乙醇和 50% 乙醇稀释的标准工作溶液经二氯甲烷萃取后进样, 然后进行 GC-MS 分析。结果显示, 由 95% 乙醇和异辛烷稀释后的标准工作溶液, 无法检测到质量浓度低于 0.1 mg/L 的 NPG; 由 4% 乙酸、10% 乙醇和 50% 乙醇稀释的标准工作溶液, 无法检测到质量浓度低于 5 mg/L 的 MPO 和 NPG。可见上述两种方法不能很好的满足食品接触材料中 MPO 和 NPG 迁移量的日常检测需求。

为提高方法灵敏度, 本实验参考二醇类物质的现有研究<sup>[23, 26]</sup>, 采用衍生化法对目标物进行转化后进行 GC-MS 分析。由于二醇类化合物含有两个—OH 基团, 已有研究中常用的衍生化试剂主要有苯基硼酸<sup>[16, 19]</sup>、七氟丁酰咪唑<sup>[21]</sup>、N,O-双(三甲基硅烷基)三氟乙酸胺<sup>[15]</sup>。研究表明, 使用苯基硼酸衍生化具有选择性高和疏水性强的特点, 在水溶液中, 可与具有邻二醇或间二醇结构的二醇类化合物形成稳定的共价复合物, 即硼酸环酯<sup>[27-28]</sup>。

本实验参考 3-氯-1,2-丙二醇(3-MPCD)与苯基硼酸的衍生化反应条件<sup>[16, 23]</sup>对 4% 乙酸、10% 乙醇、50% 乙醇、95% 乙醇和异辛烷迁移浸泡液中的 MPO 和 NPG 进行衍生化条件优化后, 进行 GC-MS 分析。结果显示, 苯基硼酸与二醇类化合物的衍生化反应(与待测目标物在 70 °C 条件下反应 20 min)可用于 MPO 和 NPG 的测定, 衍生化反应如图 1 所示。MPO 和 NPG 的衍生化产物在 GC-MS 中有较优的响应和色谱峰形, 其保留时间分别为 9.3 min 和 9.4 min(如图 2)。在酸性、酒精类模拟物以及化学替代溶剂 95% 乙醇和异辛烷迁移浸泡液中, 得到的检出限低于我国法规要求的限量, 满足日常检测的需求。因此, 本实验最终选择苯基硼酸作为衍生化试剂。

### 2.2 仪器方法的建立

**2.2.1 衍生化产物目标峰的确定** 由于最终测定的溶液基质为正己烷, 优先选择极性较弱的 DB-5MS 色谱柱对目标物进行分离, 采用 SCAN 模式进行扫描得到总离子流图; 根据衍生化产物的结构式, 分析其可能产生的碎片离子, 逐一分析各色谱峰, 确定 MPO 和 NPG 衍生化产物的质谱图和特征碎片离子。选择有较优峰形和响应, 且干扰较小的离子作为特征离子, 最终确定  $m/z$  105、176 作为 MPO 的特征离子,  $m/z$  190、105、147、56 作为 NPG 的特征离子。

**2.2.2 线性范围、检出限及定量下限** 用 4% 乙酸、10% 乙醇、50% 乙醇、95% 乙醇和异辛烷逐级稀释 MPO 和 NPG 标准储备液, 经衍生化处理后, 在优化的 GC-MS 条件下进行分析, 以峰面积( $y$ )对 MPO 或 NPG 的质量浓度( $x$ , mg/L)绘制标准工作曲线。实验结果表明(表 1), 4% 乙酸、10% 乙醇、50% 乙醇和异辛烷基质中, MPO 和 NPG 在 0.02 ~ 0.10 mg/L 范围内均呈良好线性关系, 相关系数( $r^2$ )大于 0.995; 95% 乙醇基质中, MPO 在 0.50 ~ 1.6 mg/L 范围内呈良好线性关系, NPG 在 0.05 ~ 0.16 mg/L 范围内呈良好线性关系,  $r^2$ 均大于 0.995。

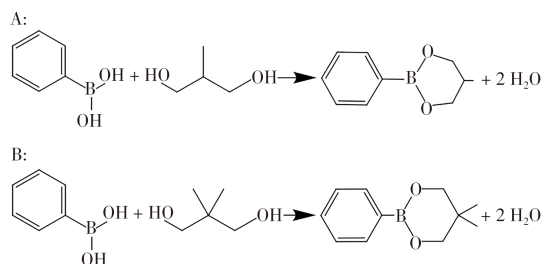


图 1 MPO(A)、NPG(B)与苯基硼酸的衍生化反应  
Fig. 1 Derivatization reactions of MPO(A) and NPG(B) with phenylboric acid

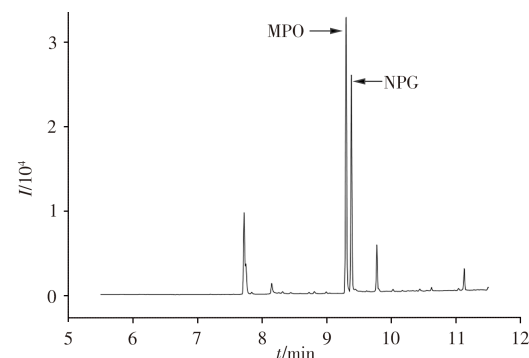


图 2 0.1 mg/L MPO 和 NPG 标准溶液衍生化产物的 GC-MS 图

Fig. 2 GC-MS spectrum of products derived from MPO and NPG standard solutions at a concentration of 0.1 mg/L

在不含目标物的迁移浸泡液(4%乙酸、10%乙醇、50%乙醇、95%乙醇和异辛烷)中添加不同质量浓度的 MPO 和 NPG, 以优化方法进行前处理和测定, 以 3 倍和 10 倍信噪比(S/N)对应的加标水平分别计算各目标物的检出限(LOD)和定量下限(LOQ), 并进行实际验证, 结果如表 1 所示。4%乙酸、10%乙醇、50%乙醇和异辛烷基质中, MPO 和 NPG 的 LOD 和 LOQ 分别为 0.01、0.02 mg/L; 95%乙醇基质中, MPO 的 LOD 和 LOQ 分别为 0.30、0.50 mg/L, NPG 的 LOD 和 LOQ 分别为 0.03、0.05 mg/L。

表 1 MPO 和 NPG 的线性方程、线性范围、检出限及定量下限

Table 1 Linear equations, linear ranges, limits of detection and limits of quantitation for MPO and NPG

Analyte	Substrate	Linear range/(mg·L <sup>-1</sup> )	Regression equation	r <sup>2</sup>	LOD/(mg·L <sup>-1</sup> )	LOQ/(mg·L <sup>-1</sup> )
MPO	4% HAc	0.02 ~ 0.10	$y = 4.03 \times 10^4 x + 58.0$	0.999 0	0.01	0.02
	10% EtOH	0.02 ~ 0.10	$y = 1.55 \times 10^5 x - 892$	0.998 5	0.01	0.02
	50% EtOH	0.02 ~ 0.10	$y = 1.29 \times 10^5 x - 317$	0.996 5	0.01	0.02
	95% EtOH	0.50 ~ 1.6	$y = 1.01 \times 10^4 x - 441$	0.996 5	0.30	0.50
	Isooctane	0.02 ~ 0.10	$y = 6.43 \times 10^4 x - 205$	0.998 8	0.01	0.02
NPG	4% HAc	0.02 ~ 0.10	$y = 8.33 \times 10^3 x - 33.0$	0.999 4	0.01	0.02
	10% EtOH	0.02 ~ 0.10	$y = 3.37 \times 10^5 x - 404$	0.997 2	0.01	0.02
	50% EtOH	0.02 ~ 0.10	$y = 2.86 \times 10^5 x - 936$	0.998 3	0.01	0.02
	95% EtOH	0.05 ~ 0.16	$y = 8.84 \times 10^4 x - 2 830$	0.996 5	0.03	0.05
	Isooctane	0.02 ~ 0.10	$y = 2.85 \times 10^4 x + 333$	0.996 0	0.01	0.02

2.2.3 回收率与相对标准偏差 选择不含目标物的涂层样品(咖啡罐)和塑料制品(咖啡胶囊), 进行(4%乙酸、10%乙醇、50%乙醇、95%乙醇和异辛烷)迁移试验, 在所得迁移浸泡液中添加低、中、高 3 个浓度水平的 MPO 和 NPG, 以确立的方法进行前处理和测定, 每个加标水平进行 6 次平行测定, 结果见表 2。MPO 和 NPG 的平均回收率为 85.0% ~ 112%, 相对标准偏差(RSD)为 0.60% ~ 9.5%, 可满足实际样品中目标物的检测需求。

表 2 涂层样品和塑料样品中 MPO 和 NPG 的回收率及相对标准偏差(n = 6)

Table 2 Recoveries and RSDs of MPO and NPG in coating and plastic samples (n = 6)

Material	Analyte	Spiked/(mg·L <sup>-1</sup> )	Substrate	Average recovery (%)	RSD (%)
Coating	MPO and NPG	0.02	4% HAc, 10% EtOH, 50% EtOH, isooctane	88.2 ~ 112	0.70 ~ 9.5
		0.06		89.0 ~ 105	0.60 ~ 4.2
		0.10		88.6 ~ 106	1.1 ~ 4.0
	MPO	0.50	95% EtOH	95.6	8.9
		1.0		98.6	3.1
		1.6		99.8	4.2
	NPG	0.05		95.0	8.8
		0.10		89.8	5.0
		0.16		88.5	3.6
Plastic	MPO and NPG	0.02	4% HAc, 10% EtOH, 50% EtOH, isooctane	88.3 ~ 105	3.4 ~ 6.7
		0.06		90.2 ~ 102	1.1 ~ 5.6
		0.10		91.0 ~ 105	2.0 ~ 5.2
	MPO	0.50	95% EtOH	88.0	1.4
		1.0		92.1	2.2
		1.6		94.4	1.6
	NPG	0.05		85.0	0.80
		0.10		88.6	1.2
		0.16		96.2	1.0

### 2.3 实际样品的测定

将建立的方法应用于 30 款实际样品中 MPO 和 NPG 的检测, 检出率为 33.3%。其中 2 例咖啡罐样品检出 NPG, 食品模拟物均为 50%乙醇, 迁移量为 0.024 ~ 0.028 mg/kg(图 3A); 8 例塑料制品检出 MPO, 食品模拟物均为 10%乙醇, 迁移量为 0.014 ~ 0.071 mg/kg(图 3B)。可见, NPG 主要在涂层制品中检出, 而 MPO 主要在塑料制品中检出。以上结果也说明, 虽然 MPO 与 NPG 的应用领域各有侧重, 但仍存在迁移风险, 为保障食品包装安全, 对其进行风险管控有较大意义。

## 3 结论

本研究建立了同时测定食品接触材料及制品中 MPO 和 NPG 迁移量的 GC-MS 检测方法。通过对前

处理方法、质谱参数等的考察, 确定了最优实验条件。对方法进行验证并将其运用于实际样品的检测, 结果表明, 该方法结果准确、灵敏度高、重现性和稳定性好, 可用于食品接触材料及制品中 MPO 和 NPG 迁移量的测定。本方法的建立满足法规的检测需求, 为加强食品接触材料及制品中 MPO 和 NPG 的安全监控提供了有效可靠的技术支持。

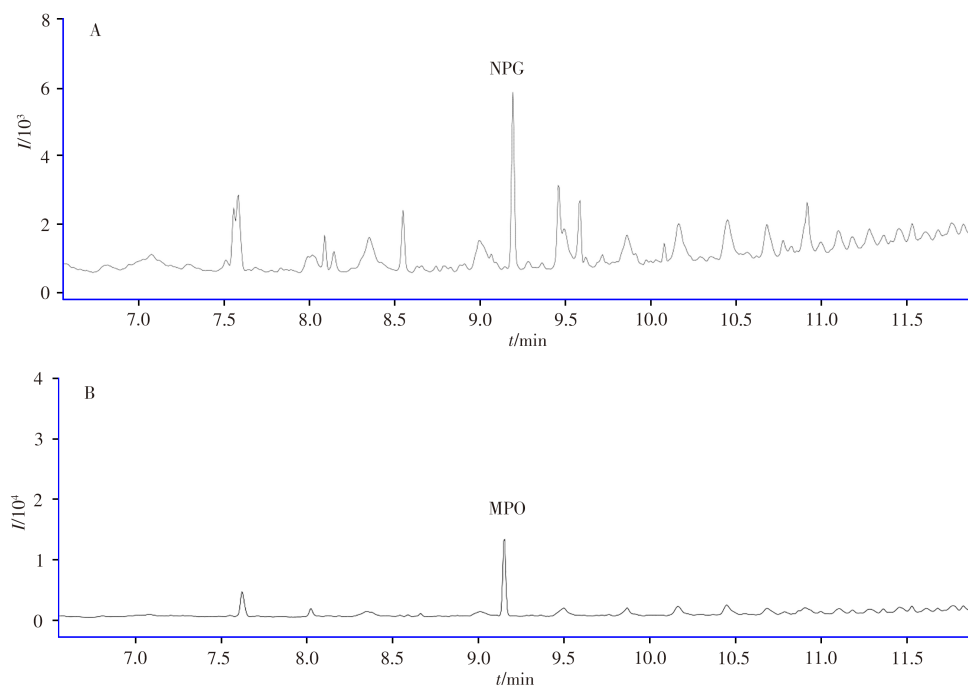


图 3 某咖啡罐样品检出 NPG(A) 及某咖啡胶囊样品检出 MPO(B) 的色谱图

Fig. 3 Chromatograms of NPG detected in a coffee can sample(A) and MPO detected in a coffee capsule sample(B)

#### 参考文献:

- [1] Weast and Grasselli. *CRC Handbook of Data on Organic Compounds*. 2nd ed. CRC Press, Inc. Boca Raton, FL, **1989**.
- [2] Suh J, Spruiell J E, Schwartz S A. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2003**, 88(11): 2598 – 2606.
- [3] Li H P. *Study on the Synthesis and Engineering Basis of 2-Methyl-1,3-propanediol*. Zhengzhou: Zhengzhou University (李惠萍. 2-甲基-1,3-丙二醇的合成及其工程基础研究. 郑州: 郑州大学), **2007**.
- [4] Zuo X B, Ning C H, Zhu Y H, Ge J, Chen S. *Spec. Pertochem.* (左晓兵, 宁春花, 朱亚辉, 葛娟, 陈霜. 精细石油化工), **2010**, 27(4): 65 – 68.
- [5] Hao Q L. *Fine Spec. Chem.* (郝庆亮. 精细与专用化学品), **2017**, 25(12): 5 – 8.
- [6] Tan G J. *Lutianhua Ke Ji*(谭光军. 泸天化科技), **2018**, (2): 56 – 57.
- [7] Notice on 6 New Varieties of Food Related Products such as 3-Aminopropyl Triethoxysilane. No. 3 in 2018(关于 3-氨基三乙氧硅烷等 6 种食品相关产品新品种的公告. 2018 年第 3 号). [2018 – 03 – 20]. <http://www.Nhfp.gov.cn/sps/s7890/201803/65aa4a4a8ab346ca814fe9a35bb0154f.shtml>.
- [8] GB 9685 – 2016. National Standard for Food Safety Standard for Additives Used in Food Contact Materials and Products. National Health and Family Planning Commission, People's Republic of China(GB 9685 – 2016. 食品安全国家标准 食品接触材料及制品用添加剂使用标准. 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会).
- [9] Liu Y Y, Lü Z G, Guo Z M. *Chem. Res. Appl.* (刘义勇, 吕志果, 郭振美. 化学研究与应用), **2010**, 22(3): 339 – 342.
- [10] Su F X, Wang J E, Jiang R X. *Synth. Technol. Appl.* (苏凤仙, 王建娥, 姜润喜. 合成技术及应用), **2011**, 26(1): 46 – 50.
- [11] GB 31604. 44 – 2016. National Food Safety Standards Food Contact Materials and Products Ethylene Glycol and Diethylene Glycol – Determination of Migration. National Health and Family Planning Commission of People's Republic of China (GB 31604. 44 – 2016. 食品安全国家标准 食品接触材料及制品 乙二醇和二甘醇迁移量的测定. 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会).

- [12] Yin Z M, Jia Z Q, Zhao Y X, Yang Q Z. *Chem. Bioeng.* (殷志敏, 贾志奇, 赵永祥, 杨巧珍. 化学与生物工程), **2014**, 31(6): 70–72.
- [13] Xiong J, Gong L, Lai Y D. *Food Sci.* (熊琚, 龚亮, 赖毅东. 食品科学), **2011**, 32(14): 232–236.
- [14] Gao P J, Liang S Q, Yu X L, Mao Z D, Li H P. *Appl. Chem. Ind.* (高鹏杰, 梁淑琴, 于秀丽, 毛楨东, 李惠萍. 应用化工), **2016**, 45(6): 1070–1072.
- [15] Lai Y H, Wang H. *Chin. J. Anal. Lab.* (赖燕华, 王华. 分析实验室), **2015**, 34(6): 667–671.
- [16] Wu H Q, Zhang G Y, Huang F, Lin X S. *Chin. J. Anal. Chem.* (吴惠勤, 张桂英, 黄芳, 林晓珊. 分析化学), **2003**, 31(3): 345–347.
- [17] Wu W F, Yan W Z. *Guangdong Chem.* (吴伟峰, 严文昭. 广东化工), **2018**, 45(7): 232–233.
- [18] Guo M L, Hu Z X, Qi Y T, Zhang W N. *J. Wuhan Polytech. Univ.* (郭明丽, 胡志雄, 齐玉堂, 张维农. 武汉轻工大学学报), **2014**, 33(1): 1–5.
- [19] Chen C F, Ren L F, Luo Y W. *Chin. J. Anal. Lab.* (陈朝方, 任立峰, 罗玉玮. 分析实验室), **2005**, 24(8): 1–4.
- [20] Fang Y D. *Research on Peroxides Mediated Functionalization of Arylboronic Acids and Oxidation of Alcohols*. Haerbin: Harbin Institute of Technology (方苑丁. 过氧化物参与的芳基硼酸官能团化和醇的氧化反应研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学), **2019**.
- [21] Hamlet C G, Sutton P G. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **1997**, 11(13): 1417–1424.
- [22] Jing Z, Liu C, Liu X B. *Mod. Food* (景赞, 刘超, 刘晓碧. 现代食品), **2020**, (4): 223–225.
- [23] Xiang X L, Wang L Y, Shen X H, Li C S, Shen J F, Wu P G. *J. Hyg. Res.* (向晓玲, 王立媛, 沈向红, 李春松, 沈建福, 吴平谷. 卫生研究), **2017**, 46(5): 777–82.
- [24] GB 31604.1–2015. National Standard for Food Safety General Rules for Migration Tests of Food Contact Materials and Products. National Health and Family Planning Commission of People's Republic of China (GB 31604.1–2015. 食品安全国家标准 食品接触材料及制品迁移试验通则. 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会).
- [25] GB 5009.156–2016. National Standard for Food Safety. General Rules for Pretreatment Methods for Migration Test of Food Contact Materials and Products. National Health and Family Planning Commission of People's Republic of China (GB 5009.156–2016. 食品安全国家标准 食品接触材料及制品迁移试验预处理方法通则. 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会).
- [26] Tang X, Liu H J, Tang W, Zou Z X. *Fujian Anal. Test.* (唐熙, 刘华建, 唐雯, 邹哲祥. 福建分析测试), **2017**, 26(1): 1–6.
- [27] Lorand J P, Edwards J O. *J. Org. Chem.*, **1959**, 24(6): 769–774.
- [28] Lü J, Ma R J, Shi L Q. *Chin. Sci. Bull.* (吕娟, 马如江, 史林启. 科学通报), **2016**, 61(19): 2113–2123.

(责任编辑: 龙秀芬)