

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.11.020

生物基聚乙烯在化妆品包材中的应用

刘彩云, 陈衍玲, 王琳琳, 毛华, 王景, 郭学平

(华熙生物科技股份有限公司, 济南 250101)

摘要: 为进一步将化妆品包材绿色化,以减少碳排放,对生物基低密度聚乙烯(Bio-PE)代替石油基低密度聚乙烯(石油基PE)在化妆品包材中的应用进行了相关试验。首先验证了Bio-PE的生物来源并对比了Bio-PE和石油基PE物性参数,结果显示,Bio-PE和石油基PE物性参数相当,因此,适用于石油基PE加工的工艺参数同样适用于Bio-PE。进一步,采用吹灌封一体的三合一无菌灌装设备将Bio-PE及石油基PE加工成化妆品次抛包材,对比了这两种次抛包材的性能,包括水蒸气透过率、氧气透过率及在三种不同模拟环境下的总迁移量,结果显示,Bio-PE次抛包材和石油基PE次抛包材阻隔性及在三种不同模拟环境下的总迁移量总体上相当。继而根据医疗器械相关生物学评价方法对Bio-PE进行了皮肤刺激性和皮肤致敏性测试,结果显示Bio-PE不会引起皮肤刺激及致敏反应。最后,考察了Bio-PE次抛包材与化妆品内料的兼容性,证明了Bio-PE不会影响化妆品内料的外观、pH及黏度,且浸泡过Bio-PE的精华液细胞相对增值率较石油基PE不会增加。因此,Bio-PE可以代替石油基PE在化妆品包材中进行应用。

关键词: 生物基聚乙烯;石油基聚乙烯;化妆品;包材;安全性

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)11-0127-06

Application of Bio-based Polyethylene in Cosmetic Packaging Materials

Liu Caiyun, Chen Yanling, Wang Linlin, Mao Hua, Wang Jing, Guo Xueping

(Bloomage Biotechnology Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract : In order to further use green cosmetic packaging materials and reduce carbon emissions, relevant tests were carried out for the application of bio-based low-density polyethylene (Bio-PE) instead of petroleum-based low-density polyethylene (petroleum-based PE) in cosmetic packaging materials. Firstly, the biological origin of Bio-PE was verified and the physical property parameters of Bio-PE and petroleum-based PE were compared. The results show that the physical property parameters of Bio-PE and petroleum-based PE are similar. Therefore, the process parameters suitable for petroleum-based PE processing are also suitable for Bio-PE. Furthermore, Bio-PE and petroleum-based PE were processed into disposable cosmetic packaging materials by three-in-one aseptic filling equipment integrating blowing, filling and sealing. The performances of the two disposable cosmetic packaging materials were compared, including water vapor transmittance, oxygen transmittance and total migration under three different simulated environments. The results indicate that Bio-PE and petroleum-based PE disposable cosmetic packaging materials have similar barrier properties and total migration under three different simulated environments on the whole. Then, according to the biological evaluation method of medical devices, Bio-PE was tested for skin irritation and skin sensitization. The results show that Bio-PE don't cause skin irritation and sensitization. Finally, the compatibility of Bio-PE disposable cosmetic packaging materials and cosmetic interior material was investigated, it is proved that Bio-PE can not affect the appearance, pH and viscosity of cosmetic interior material, and the relative productivity of cells of the essence soaked in Bio-PE can not increase compared with that of petroleum-based PE. Therefore, Bio-PE can be used in cosmetic packaging materials instead of petroleum-based PE.

Keywords : bio-based polyethylene ; petroleum based polyethylene ; cosmetic ; packaging material ; security

石油基塑料作为从石油中提取的一大类资源,其消耗石油量巨大,《中国塑料的环境足迹评估》指

出,到2050年全球塑料生产将消耗全球20%的石油^[1]。其中,塑料中的聚烯烃约占据塑料总量的

通信作者: 陈衍玲,工程师,主要从事功能性护肤品和化妆品包材研究

收稿日期: 2022-08-22

引用格式: 刘彩云,陈衍玲,王琳琳,等.生物基聚乙烯在化妆品包材中的应用[J].工程塑料应用,2022,50(11):127-132.

Liu Caiyun, Chen Yanling, Wang Linlin, et al. Application of bio-based polyethylene in cosmetic packaging materials[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(11): 127-132.

45%,其次是聚酯,主要品种包括聚乙烯(PE),聚丙烯(PP),聚对苯二甲酸乙二酯(PET)等^[2-3],这些聚烯烃及聚酯的重要应用领域之一为包装行业。迫于石油资源供应日益紧张,科学家、政府以及相关企业正在开发利用可再生资源以减少石油资源的消耗。生物基材料是一类原料全部或部分来源于植物的产品,研究领域经常用大量术语对其解释,如“植物来源”、“新碳”或“有机碳”等^[4-5]。生物基材料又可分为可降解生物基材料和不可降解生物基材料,是一类绿色环保材料,具有广阔的发展前景及应用潜力。可降解生物基材料包括聚乳酸、淀粉基材料、聚羟基烷酯族聚合物等^[6-7]。不可降解生物基材料较可降解生物基材料发展较为成熟,主要包括生物基PE(Bio-PE),生物基PP(Bio-PP)和生物基PET(Bio-PET)^[8-9]。这类材料来源为可再生能源而不是石化原料,与传统石油基塑料相比,它们具有更少的碳足迹和较低资源消耗的生态优势,是实现循环经济、节能减排的重要途径^[10-11]。生物基材料可以从不同的生物材料中获得,如甘蔗、甜菜、玉米、小麦或其它谷物的淀粉和木质纤维素材料等。与石油基PE一致,Bio-PE同样是由乙烯单体聚合而成,不同的是Bio-PE的乙烯单体是从生物质材料中获得的,其制备过程首先是从甘蔗、甜菜、玉米等生物质材料中获得葡萄糖,这些葡萄糖经发酵获得生物乙醇,生物乙醇再经蒸馏、脱水、催化等步骤获得生物基乙烯单体,继而再聚合成Bio-PE^[12]。

塑料由于成本低且功能性多,其用途非常广泛,在众多应用领域中,包装占塑料消费市场的40%,其次是建筑、汽车和家用电器^[13]。如今,包装工业中使用的大多数材料都来自石化原料,且其用量不容小觑,由此产生了大量的包装垃圾,据统计,2019年产生的包装垃圾约为每个居民177.4 kg,其中塑料约占包装垃圾总量的20%,比2009年增加了1 330万t(+20.1%)^[14]。包装行业从源头上选择绿色环保的材料,如生物基来源的塑料或可完全降解的塑料等是加快低碳环保、减少石油资源消耗进程的重要推动力。笔者首先对比了石油基PE和Bio-PE的基本性能参数,并进一步将石油基PE和Bio-PE加工成化妆品次抛包材进行了包材相关测试,验证了Bio-PE在化妆品包材中应用的可行性及安全性,为Bio-PE在化妆品领域包材中应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

Bio-PE(低密度PE):医用级别,巴西Braskem公司;

石油基PE(低密度PE):荷兰Lyondell Basell公司;

正己烷、乙酸:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

0.9%氯化钠注射液:山东齐都药业有限公司;

棉籽油:山东西亚化学工业有限公司;

新西兰兔、豚鼠:山东艾莱克生物科技有限公司;

小鼠成纤维细胞株(L929细胞)、RPMI 1640基础培养液、胰蛋白酶:江苏凯基生物技术股份有限公司;

胎牛血清:美国Gibco公司;

3-(4,5-二甲基噻唑-2)-2,5-二苯基四氮唑溴盐(MTT):美国Sigma-Aldrich公司;

二甲基亚砷:分析纯,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

吹灌封三合一无菌灌装设备:CGF3型,湖南千山制药机械股份有限公司;

蒸发残渣恒重仪:C830型,济南兰光机电技术有限公司;

水蒸气透过率测试系统:W3/230型,济南兰光机电技术有限公司;

氧气透过率测试系统:OX2/230型,济南兰光机电技术有限公司;

加速质谱仪:定制,美国Beta Analytic Inc公司;

黏度计:DV2TRVTJ0型,美国Brookfield公司;

pH计:FE28型,瑞士Mettler Toledo公司;

生化培养箱:SHH-250SD型,重庆康诚永生试验设备有限公司;

超净工作台:SC-1520型,北京东联哈尔仪器制造有限公司;

二氧化碳培养箱:MCO-18AIC型,日本Sanyo公司;

倒置显微镜:CKX41型,日本Olympus公司;

数显恒温水浴锅:DK-8D型,金坛市中大仪器厂;

恒温微孔板快速振荡器:BE-9008型,海门市其

林贝尔仪器制造有限公司;

多功能孔板酶标仪:Spark型,瑞士Tecan公司。

1.3 试样制备

Bio-PE及石油基PE次抛包材制备过程:将塑料颗粒倒入颗粒进料罐,打开吹灌封三合一无菌灌装设备,设置螺杆挤出温度175~185℃、螺杆转速41 r/min,挤出后设备依次进行自动吹瓶、灌装、封口,继而得到次抛包材。

1.4 性能测试

(1) Bio-PE及石油基PE次抛包材水蒸气透过率及氧气透过率测试。

水蒸气透过率及氧气透过率的测试方法分别参照GB/T 31355-2014和GB/T 31354-2014,水蒸气透过率测试条件为温度38℃、相对湿度90%,氧气透过率测试条件为温度23℃、相对湿度0%。

(2) Bio-PE及石油基PE次抛包材总迁移量测试。

采用蒸发残渣恒重仪,参照GB 31604.8-2021测试次抛包材总迁移量。分别选择可代表水溶液、油溶液以及呈现酸性环境的模拟物——水,正己烷和4%的乙酸溶液对两种PE次抛包材进行浸泡以模拟不同化妆品环境,测试环境温度为23.2℃,相对湿度为49%,在水中的浸泡温度及时间为60℃,2 h,在正己烷中的浸泡温度及时间为室温,2 h,在4%乙酸溶液中的浸泡温度及时间为60℃,2 h。

(3) Bio-PE皮肤刺激性及致敏性测试。

皮肤刺激性及致敏性测试方法和制样方法分别参考GB/T 16886.10-2017和GB/T 16886.12-2017。皮肤刺激性试验按照GB/T 16886.10-2017的方法要求,分别采用极性0.9%氯化钠注射液和非极性棉籽油对Bio-PE进行浸提,继而将浸提液对新西兰兔皮肤进行单次接触的皮肤刺激性试验,并按皮肤刺激反应评分标准进行评分。对于皮肤致敏性试验,参照GB/T 16886.10-2017中7.5部分推荐的最大剂量法,采用0.9%氯化钠注射液和棉籽油浸提Bio-PE,通过皮内诱导和局部诱导激发豚鼠,以评价Bio-PE浸提液在试验条件下潜在的皮肤致敏反应。采用皮内注射和封闭敷贴使浸提液接触豚鼠皮肤24 h和48 h,分别观察试验组和阴性对照组动物激发部位的皮肤反应,对每一激发部位和每一观察时间皮肤红斑和水肿反应进行描述并分级。

(4) 细胞毒性试验。

细胞毒性试验参照GB/T 16886.5-2017,取对数生长期的L929细胞,以 1×10^5 个/mL密度接种于96孔板,每孔100 μ L,培养体系为RPMI 1640基础培养液,添加10%胎牛血清,接种细胞置于二氧化碳培养箱中,在37℃,5%CO₂下培养24 h。使用细胞培养液对化妆品精华液进行1:9稀释,过滤除菌。使用磷酸盐缓冲液将MTT配制成5 mg/mL的溶液,过滤除菌,使用无血清培养液稀释至0.5 mg/mL。将L929细胞培养24 h后,弃去旧培养液,试验组换成100 μ L精华液样品,阴性对照组加入等量细胞培养液,每个水平5个平行孔。继续培养24 h,采用MTT法检测细胞相对增值率。

2 结果与讨论

2.1 物性参数

表1列出石油基PE及Bio-PE的出厂物性数据。熔体流动速率(MFR)是表征热塑性塑料在熔融状态下黏流特性的重要指标,是在塑料加工过程中工艺参数调整的重要参考,从表1可以看出,Bio-PE和石油基PE在MFR上仅有细微的差距,因此在Bio-PE加工成型过程中工艺参数的调整可参照石油基PE进行。同时,从表1还可以看出,Bio-PE的断裂伸长率高于石油基PE,说明Bio-PE的柔软度高、弹性好。综合来看,Bio-PE和石油基PE在物性参数上差别不大,且由于两种PE材料具有相同的分子结构,因此需要通过特定的方法对Bio-PE材料进行生物基来源鉴别,放射性碳同位素(¹⁴C)法是对Bio-PE进行鉴别的有效方法,该方法最早被用于考古学和地质学研究^[15]。生物基碳含量是评价材料生物来源最直接的参数,是通过测试聚合物中¹⁴C计算得到的。生物基碳含量测试结果通常有两种表示方法:一种是聚合物中生物基碳占整个聚合物碳总量的百分数;另一种是聚合物中生物基碳占整个聚合物中总有机碳的百分数,其中,生物基碳含量为100%表示材料中的碳全部来源于植物或动物衍生,生物

表1 石油基PE及Bio-PE出厂物性数据对照表

物性指标	Bio-PE	石油基PE
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	0.32	0.3
密度/(kg·m ⁻³)	923	927
拉伸弹性模量/MPa		300
拉伸屈服强度/MPa	10	13
断裂伸长率/%	390	350
热变形温度/℃	45	51
肖氏硬度/HS	50	52
生物基碳含量/%	100	

基碳含量为0%表示材料不含有任何来自于植物或动物衍生的碳。采用加速质谱仪测得的Bio-PE的生物基碳含量为100%(总有机碳百分数),结果见表1,此结果证明了Bio-PE为生物来源塑料。

使用吹灌封三合一无菌灌装设备进行次抛包材制备,石油基PE及Bio-PE次抛包材实物图如图1所示。从图1可以看出,由两种PE颗粒制备的包材外观上没有区别,都为无色透明。但包材在柔软度上的特性与表1的物性参数相一致,Bio-PE包材较石油基PE包材稍软一些,因此在消费者使用Bio-PE包材时,更容易将包材中的护肤品挤出。

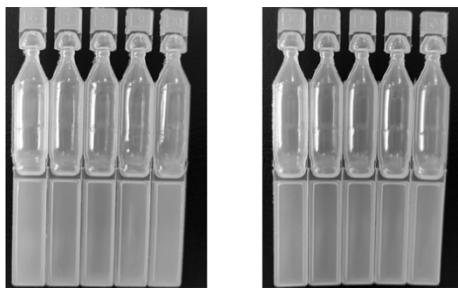


图1 石油基及Bio-PE次抛包材实物图

2.2 阻隔性

将Bio-PE加工成包材使用时,对包材性能的考察是必不可少的,通常在考虑包材性能时阻隔性是必须要衡量的因素,阻隔能力越强,环境中的氧气、水蒸气等越不容易进入包装内,包装内的物质越不容易变质,有效期越长。通常,以包装的水蒸气透过率和氧气透过率来衡量包装的阻隔性^[6]。两种次抛包材水蒸气透过率及氧气透过率测试结果见表2。从表2可以看出,Bio-PE和石油基PE次抛包材水蒸气透过率相当,分别为0.06,0.07 mg/d,说明Bio-PE在高湿度环境下阻水性能和医用级别的石油基PE相当。对于氧气透过率而言,石油基PE次抛包材稍小于Bio-PE次抛包材,分别为0.128 11 cm³/d和0.164 61 cm³/d。

表2 Bio-PE及石油基PE次抛包材水蒸气透过率及氧气透过率的测试结果

材 质	水蒸气透过率/(mg·d ⁻¹)	氧气透过率/(cm ³ ·d ⁻¹)
石油基PE	0.07	0.128 11
Bio-PE	0.06	0.164 61

2.3 安全性

(1)总迁移量。

由于化妆品会和人体直接接触,因此在将Bio-

PE作为化妆品包材使用时,安全性考察是重中之重,因此,故需要对Bio-PE次抛包材及石油基PE次抛包材安全性进行考察,以确保Bio-PE作为化妆品包材使用时不会出现安全隐患。通常情况下包材中的小分子或低聚物与化妆品长时间接触可能会溶出、析出,对人体构成危害。但由于在化妆品包材总迁移量检测方面目前还未出台相关标准及方法,因此借鉴较化妆品更严格的食品包装相关要求进行测试。总迁移量是指食品包装材料迁移到食品(或食品模拟物)中所有不挥发物质的总量。通常化妆品成分中含有含水量较高的精华液、化妆水等及含油量较高的精华油、护肤油等,考虑到会有化妆品呈现酸性,因此选择三种模拟物——水、正己烷、4%乙酸分别模拟水剂环境、油性环境及酸性环境,总迁移量测试结果见表3。从表3可以看出,Bio-PE次抛包材和石油基PE次抛包材经过水浸泡后,总迁移量相同,为0.87 mg/dm²,说明Bio-PE次抛包材在接触水剂化妆品时非挥发性迁移物与石油基PE次抛包材相当,Bio-PE作为水剂化妆品包材时较安全。两种次抛包材经4%乙酸浸泡后,虽然Bio-PE次抛包材的总迁移量高于石油基PE次抛包材,分别为0.25 mg/dm²和0.08 mg/dm²,但总的来说其总迁移量均较低,远远低于2002/72/EC关于食品接触塑料类材料和制品的专项指令规定中的迁移上限10 mg/dm²。而在模拟两种PE次抛包材接触油性环境测试中,Bio-PE的总迁移量远远低于石油基PE的总迁移量,分别为0.5 mg/dm²和1.35 mg/dm²,说明在Bio-PE作为油性化妆品包材使用时较石油基PE安全性更高。总而言之,两种PE次抛包材在模拟水剂环境、油性环境及酸性环境中浸泡后,其总迁移量均远远低于食品接触塑料类材料和制品的专项指令规定中的迁移上限,说明Bio-PE和石油基PE在作为化妆品包材使用时安全性较高,且Bio-PE取代石油基PE使用时不会增加安全隐患。

表3 Bio-PE和石油基PE次抛包材在三种模拟环境条件下的总迁移量

材 质	水浸泡总迁移量	正己烷浸泡总迁移量	乙酸浸泡总迁移量
石油基PE	0.87	1.35	0.08
Bio-PE	0.87	0.50	0.25

(2)皮肤刺激性及皮肤致敏性。

除总迁移量测试外,Bio-PE作为化妆品包材使用时应当保证材料不会引起皮肤刺激及皮肤致敏

反应,因此对Bio-PE进行了皮肤刺激性及皮肤致敏性试验,试验过程及方法见1.4部分。使用极性和非极性溶液对Bio-PE进行浸提,对新西兰兔皮肤展开皮肤刺激试验,去除浸提液后1,24,48,72 h新西兰兔皮肤刺激反应评分结果见表4,其中,兔原发性或积累刺激指数类型评分标准见表5。从表4可以看出,Bio-PE对新西兰兔未出现刺激反应,原发性刺激指数均为0.00,说明Bio-PE较安全,不会出现刺激反应。Bio-PE皮肤致敏性试验结果见表6,其中皮肤红斑和水肿反应分级标准见表7。从表6可以看出,激发后24,48 h,Bio-PE塑料颗粒的极性和非极性浸提液均未引起豚鼠皮肤致敏反应,阳性激发结果的发生率均为0%,说明Bio-PE不会引起皮肤致敏反应。

表4 新西兰兔皮肤单次接触Bio-PE浸提液后不同时间的刺激观察结果记录表

浸提介质	动物编号	接触部位	原发性刺激指数			
			1 h	24 h	48 h	72 h
0.9%氯化钠注射液	4708	试验组1	0	0	0	0
		对照组1	0	0	0	0
		试验组2	0	0	0	0
		对照组2	0	0	0	0
0.9%氯化钠注射液	4709	试验组1	0	0	0	0
		对照组1	0	0	0	0
		试验组2	0	0	0	0
		对照组2	0	0	0	0
0.9%氯化钠注射液	4710	试验组1	0	0	0	0
		对照组1	0	0	0	0
		试验组2	0	0	0	0
		对照组2	0	0	0	0
棉籽油	4711	试验组1	0	0	0	0
		对照组1	0	0	0	0
		试验组2	0	0	0	0
		对照组2	0	0	0	0
棉籽油	4712	试验组1	0	0	0	0
		对照组1	0	0	0	0
		试验组2	0	0	0	0
		对照组2	0	0	0	0
棉籽油	4713	试验组1	0	0	0	0
		对照组1	0	0	0	0
		试验组2	0	0	0	0
		对照组2	0	0	0	0

注:试验组为背部去毛左上部位,对照组为背部去毛右上部位。

表5 兔原发性或积累刺激指数类型

平均计分	反应类型
0~0.4	极轻微
0.5~1.9	轻度
2~4.9	中度
5~8	重度

表6 豚鼠皮肤经Bio-PE浸提液激发后24,48 h的反应结果和临床观察表

浸提介质	动物编号	分组	反应等级		阳性发生率/%		皮肤反应有无异常
			24 h	48 h	24 h	48 h	
0.9%氯化钠注射液	5583	阴性对照	0	0			无
	5575		0	0			无
	5582		0	0	0	0	无
	5593		0	0			无
	5580		0	0			无
0.9%氯化钠注射液	5588	试验组	0	0			无
	5589		0	0			无
	5581		0	0			无
	5577		0	0			无
	5566		0	0	0	0	无
	5594		0	0			无
	5568		0	0			无
	5590		0	0			无
	5576		0	0			无
棉籽油	5567	阴性对照	0	0			无
	5595		0	0			无
	5569		0	0			无
	5592		0	0	0	0	无
	5591		0	0			无
棉籽油	5570	试验组	0	0			无
	5571		0	0			无
	5587		0	0			无
	5572		0	0			无
	5574		0	0			无
	5579		0	0	0	0	无
	5585		0	0			无
	5586		0	0			无
	5584		0	0			无
棉籽油	5578	试验组	0	0			无
	5573		0	0			无

表7 Magnusson 和 Kligman 分级标准表(皮肤红斑和水肿反应)

敷贴试验反应	等级
无明显改变	0
散发性或斑点状红斑	1
中度融合性红斑	2
重度红斑和水肿	3

(3)与化妆品内料的兼容性。

虽然两种PE包材的总迁移量测试结果远远低于食品领域规定的迁移上限,但对于Bio-PE与化妆品内料的兼容性考察是必不可少的。以石油基PE为对照,展开了Bio-PE和石油基PE与化妆品内料精华液的兼容性试验,考察了Bio-PE及石油基PE浸泡于精华液45℃条件下存放4个月后内料精华液的pH、精华液的黏度及精华液的细胞毒性,结果见表8。表8显示,Bio-PE不会影响精华液内料的外观、pH及黏度,且浸泡过Bio-PE的精华液细胞相对增值率较石油基PE不会增加,兼容性试验结果进一

步证明可以将Bio-PE用于化妆品包材,以代替石油基PE。

表8 两种PE次抛包材与精华液兼容性试验结果

检测项目	初始		45℃存放4个月		
	石油基PE	Bio-PE	空白对照	石油基PE	Bio-PE
精华液pH	4.65	4.65		4.65	4.66
精华液黏度/(mPa·s)	81.2	81.6		81.5	82.1
精华液外观	无色透明	无色透明		无色透明	无色透明
精华液细胞相对增值率/%			91.25±2.60	95.5±2.50	95.67±3.56

3 结论

通过对Bio-PE作为化妆品次抛包材的应用研究,证明了Bio-PE可以替代石油基PE进行使用。作为化妆品包材使用时两种PE包材阻隔性相当;对于总迁移量而言,Bio-PE在不同模拟物浸泡条件下总迁移量均远远低于食品领域中规定的上限,且在油性环境中Bio-PE的总迁移量要低于石油基PE;皮肤致敏性及刺激性试验结果显示,Bio-PE不存在皮肤致敏性及刺激性风险。Bio-PE与化妆品内料精华液在45℃,4个月条件下兼容性试验结果显示,Bio-PE不影响精华液内料的外观、pH及黏度。另外,浸泡过Bio-PE的精华液细胞相对增值率较石油基PE不会增加,进一步证明了Bio-PE可以代替石油基PE作为次抛包材应用。

参考文献

- [1] 曹淑艳,陈宝生,郭红,等.中国塑料的环境足迹评估[R].北京:北京石油化工学院,2020.
Cao Shuyan, Chen Baosheng, Guo Hong, et al. Plastics environmental footprint in China[R]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2020.
- [2] Valentina S, Ignazio B. Bio-polyethylene (Bio-PE), bio-polypropylene (Bio-PP) and bio-poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications[J]. *Polymers*, 2020, 12(8). DOI:10.3390/polym12081641.
- [3] Sheldon R A, Norton M. Green chemistry and the plastic pollution challenge: towards a circular economy. *Green Chemistry*. 2020, 22(19):6 310–6 322.
- [4] Bhagwat G, Gray K, Wilson S P, et al. Benchmarking bioplastics: A natural step towards a sustainable future[J]. *Journal of Polymers and the Environment*. 2020, 28:3 055–3 075.
- [5] Karan H, Funk C, Grabert M, et al. Green bioplastics as part of a circular bioeconomy[J]. *Trends in Plant Science*, 2019, 24(3):237–249.
- [6] Rujnić-Sokele M, Pilipović A. Challenges and opportunities of biodegradable plastics: A mini review[J]. *Waste Management & Research*, 2017, 35(2):132–140.
- [7] Siqueira L V, Arias C I L F, Maniglia B C, et al. Starch-based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspectives[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 38: 122–130.
- [8] Niaounakis M. Recycling of biopolymers-the patent perspective[J]. *European Polymer Journal*, 2019, 114:464–475.
- [9] Pellis A, Malinconico M, Guarneri A, et al. Renewable polymers and plastics: Performance beyond the green[J]. *New Biotechnology*, 2021, 60:146–158.
- [10] Moshood T, Nawanir G, Mahmud F, et al. Expanding policy for biodegradable plastic products and market dynamics of bio-based plastics: Challenges and opportunities[J]. *Sustainability*, 2021, 13(11). DOI:10.3390/su13116170.
- [11] Calabrò P S, Grosso M. Bioplastics and waste management[J]. *Waste Management*, 2018, 78:800–801.
- [12] Filho M V, Araujo C, Bonfá A, et al. Chemistry based on renewable raw materials: Perspectives for a sugar cane-based biorefinery [J]. *Enzyme Research*, 2011, 2011(4). DOI:10.4061/2011/654596.
- [13] Ibrahim N I, Shahar F S, Sultan M T H, et al. Overview of bioplastic introduction and its applications in product packaging[J]. *Coatings*, 2021, 11(11). DOI:10.3390/coatings11111423.
- [14] Porta R, Sabbah M, Pierro P D. Bio-based materials for packaging [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(7). DOI: 10.3390/ijms23073611.
- [15] 余巧玲,王万卷,刘志健,等.生物基塑料中3种¹⁴C含量检测方法的对比[J]. *中国塑料*, 2016, 30(7):1–6.
Yu Qiaoling, Wang Wanjuan, Liu Zhijian, et al. Comparison of three kinds of determination methods of ¹⁴C content in Bio-based plastics[J]. *China Plastics*, 2016, 30(7):1–6.
- [16] 霍东风,肖宇,张肖宁.低密度聚乙烯滴眼剂瓶的阻隔性研究[J]. *黑龙江医药*. 2021, 34(3):547–549.
Huo Dongfeng, Xiao Yu, Zhang Xiaoning. Study on barrier property of LDPE eye drops bottle[J]. *Heilongjiang Medicine Journal*, 2021, 34(3):547–549.