

毕莹莹,刘景洋,董莉,等.我国废PET饮料瓶产生量与回收水平研究[J].环境工程技术学报,2022,12(1):185-190.

BI Y Y,LIU J Y,DONG L,et al.Study on the production and recovery level of waste PET drinking bottles in China[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 185-190.

# 我国废PET饮料瓶产生量与回收水平研究

毕莹莹,刘景洋\*,董莉,孙晓明

国家环境保护生态工业重点实验室,中国环境科学研究院

**摘要** 聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)饮料瓶属一次性塑料包装,应用广泛且周期短,废弃量大,从节约资源、减少碳排放和保护环境等方面看,废PET饮料瓶回收都具有重要的意义。基于PET瓶装的饮料产量和PET瓶消费量的正相关性,建立了饮料总产量—PET瓶装的饮料产量—废PET饮料瓶产生量(PET饮料瓶消费量)间的数量响应关系,结合灰色模型,预测2020—2025年我国废PET饮料瓶的产生量;根据国内PET饮料瓶回收现状和物质代谢定性分析,确定了废PET饮料瓶的主要流向;通过问卷调查和现场实测,测算出现阶段我国PET饮料瓶回收总体水平。结果表明:2020—2025年,我国废PET饮料瓶的年产生产量预测值为370万~409万t,主要流向回收利用体系、餐厨垃圾处理厂、垃圾填埋场、垃圾焚烧发电厂以及海滩等地,其中流向餐厨垃圾处理厂、垃圾填埋场、垃圾焚烧发电厂、海滩等地的废PET饮料瓶所占比例总体低于5%,即全国废PET饮料瓶回收率在95%以上,处于较高的回收水平。

**关键词** PET; 饮料瓶; 消费量; 灰色预测; 回收率; 物质代谢

中图分类号: X705 文章编号: 1674-991X(2022)01-0185-06 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210123

## Study on the production and recovery level of waste PET drinking bottles in China

BI Yingying, LIU Jingyang\*, DONG Li, SUN Xiaoming

State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

**Abstract** Polyethylene terephthalate(PET) drinking bottles are a kind of disposable plastic packaging, which are widely used with a short cycle and a large amount of waste. From the perspectives of saving resources, reducing carbon emissions and protecting the environment, the recycling of waste PET drinking bottles is of great significance. Based on the positive correlation between the output of PET bottled drinks and the consumption of PET bottles, the quantity response relationship among “total output of drinks - output of PET bottled drinks - production or consumption of PET bottles” was established. Combined with grey model, the waste PET drinking bottle production from 2020 to 2025 in China was predicted. According to the status of PET drinking bottles recycling and qualitative analysis of material metabolism, the main flow directions of waste PET drinking bottles were determined. Through questionnaire surveys and field measurements, the overall level of PET drinking bottles recycling in China at the present stage was calculated. The results showed that, from 2020 to 2025, the annual production of waste PET drinking bottles in China would be in the range of 3.7 million to 4.09 million tons, and they would mainly flow to the recycling system, kitchen waste treatment plants, landfills, waste incineration power plants and beaches. And the total proportion of waste PET drinking bottles flowing to kitchen waste treatment plants, landfills, waste incineration power plants and beaches would be less than 5%, that is, the recycling rate of waste PET drinking bottles would be more than 95% in China on the whole, being at a relatively high recycling level.

**Key words** PET; drinking bottle; consumption; grey prediction; recovery rate; material metabolism

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)是由对苯二甲酸(terephthalic acid)和乙二醇(ethylene glycol)化合形成的聚合物,是PET饮料瓶的主要成分。PET瓶因

质量轻、强度高、成本低、耐酸碱以及安全性高而被广泛用作饮料包装<sup>[1]</sup>,在饮料包装中占据不可替代的地位。随着经济的发展和消费升级,饮料刚性需求

收稿日期:2021-04-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1903601)

作者简介:毕莹莹(1990—),女,工程师,硕士,主要从事固体废物处置与资源化研究,biyyjob@163.com

\* 责任作者:刘景洋(1974—),男,研究员,博士,主要从事生态工业、循环经济方面的研究,liujy@craes.org.cn

增加, PET 瓶的消耗量和废旧 PET 瓶的产生量随之激增。中国物资再生协会再生塑料分会发布的《2019—2020 中国再生塑料行业发展报告》中显示, 2019 年我国废塑料回收量达 1 890 万 t, 其中, 废 PET 瓶总回收量占比为 22%, 超过电子电器塑料、汽车废塑料、农膜、快递包装和未被污染的输液瓶袋, 而饮料瓶在废 PET 瓶中占比近 90%。由于塑料的聚合物结构很难自然降解<sup>[2]</sup>, 通常自然降解时间长达 200~400 年<sup>[3]</sup>, 废 PET 瓶是白色污染的重要来源, 同时, 我国废 PET 饮料瓶量大面广、资源化价值较高, 因而一直广受关注。2020 年, “新版限塑令”《关于进一步加强塑料污染治理的意见》及新修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》先后发布, 新法规要求逐步实现固体废物零进口, 加强生活垃圾分类管理, 这也为国内废 PET 瓶回收提供了新的发展契机。

因优质的材料性能和市场价值, PET 饮料瓶回收率一直都比较, 但在生产和生活中, PET 饮料瓶多与其他 PET 包装混合在一起, 国内鲜有针对 PET 饮料瓶的产生量和回收率的系统研究。目前, 国内已有的研究集中在论述 PET 饮料瓶的回收利用方法<sup>[4-8]</sup>和回收物流体系<sup>[9-10]</sup>、资源化管理对策和政策建议<sup>[11-12]</sup>, 以及 PET 瓶设计<sup>[13-14]</sup>等方面。基于我国 PET 饮料瓶产生量和回收率统计的难度及统计数据的缺失, 笔者以饮料产量、PET 瓶装的饮料产量与 PET 饮料瓶消费量的正相关性为基础, 测算了近年来 PET 饮料瓶的消费量, 即废 PET 饮料瓶产生量; 以此为基础, 采用灰色预测模型, 预测 2020—2025 年我国废 PET 饮料瓶产生量; 并通过统计回收体系外的废 PET 饮料瓶所占比例, 逆向测算出我国 PET 饮料瓶的回收率, 以期政府制定 PET 饮料瓶回收体制机制、回收目标, 优化回收体系提供参考, 同时也为进一步提升我国 PET 饮料瓶乃至其他废塑料的回收水平提供思路。

## 1 研究方法

### 1.1 废 PET 饮料瓶产生量测算与预测

#### 1.1.1 废 PET 饮料瓶产生量测算

饮料产品流通周期为半年左右, 因此可以认为当年的饮料产品当年流通消费。因 PET 饮料瓶不会随消费而消耗减重, 即 PET 饮料瓶的表现消费量等于废 PET 瓶的产生量。由于 PET 饮料瓶全部用于盛装饮料产品, 因此 PET 瓶装的饮料产量和 PET 瓶消费量存在显著的正相关性; 而目前国内仅有饮料总产量的统计, 未单独统计 PET 瓶装的饮料量及其

消耗的 PET 瓶量, 基于此前提和基础, 建立起我国饮料总产量—PET 瓶装的饮料产量—废 PET 饮料瓶产生量(PET 饮料瓶消费量)间的数量响应关系。

#### 1.1.2 2020—2025 年废 PET 饮料瓶产生量预测

基于灰色系统理论, 建立灰色模型(GM 模型)。GM 模型是以部分信息已知, 部分信息未知的小样本、信息不确定系统为研究对象, 将由随机扰动项所引起的冲击序列进行由灰色到白色的转换灰色模型<sup>[15-16]</sup>。具体预测步骤如下。

校验原始数据级比, 考察模拟要用的原始数据是否都位于灰色分析模型可覆盖范围内, 若超过模型可覆盖区间, 则需进行数据平移或弱化。假设原始数据列为无规律的时间序列  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 数列级比计算公式如下:

$$\lambda(k) = \frac{x_k}{x_{k+1}} \quad (k = 1, 2, \dots, n-1) \quad (1)$$

式中:  $\lambda(k)$  为级比;  $n$  为时间序列长度。

计算模型可覆盖区间  $Z$ , 公式如下:

$$Z = \left( e^{-\frac{2}{n+1}}, e^{\frac{2}{n+1}} \right) \quad (2)$$

将时间序列  $X$  进行累加(AGO), 使其生成较为规律的累加数列  $Y_t=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , 其中:

$$y_t = \sum_{k=1}^t x_k \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

建立关于  $Y_t$  的一阶微分方程, 即 GM(1,1) 预测模型的白化方程:

$$\frac{dy_t}{dt} + ay_t = u \quad (4)$$

式中  $a, u$  为待识别的灰参数。

对式(4)进行微分方程求解:

$$y_t = \left( x_1 - \frac{u}{a} \right) e^{-a(t-1)} + \frac{u}{a} \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中  $x_1$  为初始时刻的原始数据。采用 1stOpt 软件中拟合参数求解计算方法对  $a, u$  2 项参数进行求解。

基于  $Y_t$ , 对累加数据进行逆运算得到累减(IAGO)数列  $\hat{X}=(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ , 求解预测值:

$$\hat{X} = Y_{t+1} - Y_t \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

当  $t < n$  时,  $\hat{X}$  为模拟值序列; 当  $t > n$  时,  $\hat{X}$  为预测值序列。

计算实际数据与模拟数据的相对残差进行预测值检验, 公式如下:

$$\varepsilon(k) = \frac{x_k - \hat{x}_k}{x_k} \quad (7)$$

式中 $\varepsilon(k)$ 为相对残差。当 $|\varepsilon(k)| < 0.1$ , 则认为模型达到较高要求; 当 $0.1 < |\varepsilon(k)| < 0.2$ , 则认为模型达到一般要求; 否则, 模型未达到要求。

### 1.2 废 PET 饮料瓶平均质量测算

设计饮料企业包装使用情况调查问卷, 对饮料瓶类型、使用量、单个饮料瓶质量进行调查, 调查典型样本企业的包装饮用水、碳酸饮料、非碳酸饮料等不同饮料产品的不同规格(330、400、500、550、600、1 000、1 250、1 500、2 000、2 500、5 000 mL) PET 瓶的质量。调研样本为包装饮用水、碳酸饮料、非碳酸饮料三大类饮品的主要供应企业, 能够反映国内饮料市场分布情况, 其 PET 瓶子规格涵盖了市场上 90% 以上种类。采用加权平均法计算单个 PET 饮料瓶的平均质量, 公式如下:

$$m = \sum_{j=1}^k w_j \times m_{xj} \quad (8)$$

式中:  $m$  为单个 PET 饮料瓶的平均质量,  $g$ ;  $w_j$  为不同

规格的 PET 饮料瓶质量的占比, 占比之和为 1;  $m_{xj}$  为不同规格 PET 饮料瓶的质量,  $g$ 。

### 1.3 废 PET 饮料瓶回收率计算

研究废 PET 饮料瓶的物质代谢过程和逆向物流, 为废 PET 饮料瓶回收率测算奠定基础。与传统的物质流分析不同, 在包装废物物质代谢的物质流中, 物质的输入端是包装废物而不是原料, 输出端是再生产品<sup>[17]</sup>。基于此原理, 从再生资源输入、回收利用、再生产品输出 3 个模块考虑<sup>[18]</sup>, 重点分析废 PET 饮料瓶不同回收路径及流向。逆向物流与传统的正向物流的物质流动方向相反, 物品由消费端向生产端延伸, 即由产业链下游向上游运动<sup>[19]</sup>。本研究 PET 饮料瓶逆向物流仅指废物物流, 指消费后失去原有使用价值的 PET 饮料瓶回收至上游企业, 经加工处理后作为原料再次进入产业链。基于 PET 饮料瓶的物质流和逆向物流, 从物质代谢的角度入手, 定性分析 PET 饮料瓶物质代谢过程中的流向以及它们之间的相互关系, 形成废 PET 饮料瓶物质代谢的物质流框架, 如图 1 所示。

再生资源输入	回收利用		再生产品输出
废PET饮料瓶总量	废PET饮料瓶回收利用量	小PET饮料瓶加工工厂	再生纤维和其他PET再生产品
		正规PET加工企业	
废PET饮料瓶损失量		焚烧量	产生热能
		填埋量	
		混在厨余中的量	
		散落在海滩河滩的量	

图 1 废 PET 饮料瓶物质代谢的物质流分析框架

Fig.1 Material flow analysis framework for material metabolism of waste PET drinking bottles

从图 1 看出, 废 PET 饮料瓶进入回收利用体系, 或流向餐厨垃圾处理厂、垃圾填埋场、垃圾焚烧场以及遗散于海滩等地, 除回收利用量(本研究不包括热能回收), 其他为损失量。选取北京市和海南省开展实测, 测算回收体系外的废 PET 饮料瓶所占比例。实测样本点为北京某垃圾填埋场、北京某餐厨垃圾处理场、海南某垃圾分拣中心、海南某餐厨垃圾处理场、海南某垃圾填埋场、海南某生活垃圾填埋场、海南某垃圾发电厂、海南某环保餐厨处理场; 海滩的塑料垃圾密度数据来自海滩现场实测, 并综合了全国公益净滩行动的统计数据。通过现场取样, 测算各样本点 PET 饮料瓶数量及质量, 综合考察各场地的 PET 饮料瓶总量及其在全国废 PET 饮料

瓶中的占比。

餐厨垃圾处理厂中 PET 的饮料瓶总量根据下式测算:

$$M_1 = C_1 \times P_1 \quad (9)$$

式中:  $M_1$  为餐厨垃圾中 PET 饮料瓶总量, 万 t;  $C_1$  为餐厨垃圾总产量, 万 t;  $P_1$  为餐厨垃圾中 PET 饮料瓶占比, %, 采用餐厨垃圾处理厂现场实测数据。

测算垃圾填埋场中 PET 的饮料瓶总量, 公式如下:

$$M_2 = C_2 \times P_2 \quad (10)$$

式中:  $M_2$  为填埋垃圾中 PET 饮料瓶总量, 万 t;  $C_2$  为填埋垃圾总量, 万 t;  $P_2$  为填埋垃圾中 PET 饮料瓶占

比, %, 采用垃圾填埋场现场实测数据。

测算焚烧发电厂中 PET 的饮料瓶总量, 公式如下:

$$M_3 = C_3 \times P_3 \quad (11)$$

式中:  $M_3$  为焚烧垃圾中 PET 饮料瓶总量, 万 t;  $C_3$  为焚烧垃圾总量, 万 t;  $P_3$  为焚烧垃圾中 PET 饮料瓶占比, %, 采用焚烧发电厂现场实测数据。

海岸垃圾的检测包括样品采集、分类、计数、测算大小、称重、统计密度、辨识来源等步骤。滩涂垃圾密度或 PET 的饮料瓶密度采用下式测算:

$$D = N / (L \times W) \quad (12)$$

式中:  $D$  为垃圾或 PET 饮料瓶的密度, 个/ $\text{km}^2$  或  $\text{g}/\text{km}^2$ ;  $W$  为调查海滩的宽度或拖网的有效宽度, m;  $L$  为调查海滩的总长度, m;  $N$  为对应的垃圾或 PET 饮料瓶的数量或者质量, 个或 g。

## 2 研究结果

### 2.1 我国废 PET 饮料瓶产生量

对全国规模以上饮料生产企业开展问卷调查, 结果如图 2 所示。将全国饮料生产企业作为总体, 调研样本的产量占总体产量的 50% 以上, 统计样本的饮料产量、PET 瓶装的饮料产量及对应的 PET 饮料瓶消费量(废 PET 饮料瓶产生量), 建立基于全国的数量响应关系[式(13)和式(14)]。

$$M_{\text{PET}} / P_{\text{PET}} = c_1 \quad (13)$$

$$P_{\text{PET}} / P = c_2 \quad (14)$$

式中:  $M_{\text{PET}}$  为 PET 饮料瓶消费量(废 PET 饮料瓶产生量), 万 t;  $P_{\text{PET}}$  为 PET 瓶装的饮料产量, 万 t;  $P$  为全国饮料总产量, 万 t;  $c_1$  为单位质量饮料对 PET 瓶的需求, 取  $31 \text{ g}/\text{kg}$ ;  $c_2$  为现阶段全国 PET 瓶装的饮料与饮料总产量的比例, 取 79%。

根据国家统计局关于 2014—2019 年全国饮料

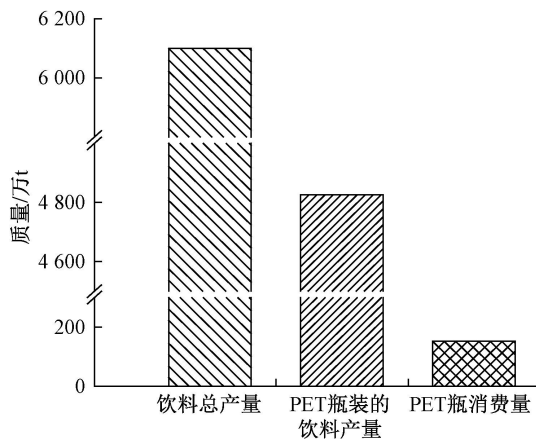


图 2 问卷调查结果

Fig.2 Results of questionnaire

总产量的数据, 由式(13)和式(14)计算 2014—2019 年废 PET 饮料瓶产生量, 结果如表 1 所示。考虑到废 PET 饮料瓶回收有近 6 个月的滞后时间, 取 2018 年和 2019 年 2 年的平均值作为目前废 PET 饮料瓶年总产生量, 为 415.5 万 t。

表 1 2014—2019 年我国饮料瓶产生量

Table 1 Total drinking bottles production from 2014 to 2019 in China 万 t

年份	饮料总产量	废 PET 饮料瓶产生量
2014	16 677.10	415
2015	17 661.00	440
2016	18 345.20	457
2017	18 051.20	449
2018	15 679.20	389
2019	17 763.48	442

基于 2014—2019 年废 PET 饮料瓶产生量, 采用式(1)和式(2)计算 2015—2019 年废 PET 饮料瓶产生量的级比和模型可覆盖区间, 级比结果如表 2 所示。所有数据级比均位于模型可覆盖区间[ $Z=(0.7515, 1.3310)$ ]内, 可采用灰色分析模型进行预测。

表 2 废 PET 饮料瓶产生量数据校验结果与相对残差

Table 2 Data verification and relative residuals of waste PET drinking bottle production

项目	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
级比	0.943 2	0.962 8	1.017 8	1.154 2	0.880 1
相对残差	0	0.026 3	0.031 2	0.033 3	0.094 0

采用式(3)构建 2014—2019 年废 PET 饮料瓶产生量  $X$  的累加数列  $Y_t$ , 根据式(4)构建关于  $Y_t$  的白化方程, 并采用 1stOpt 求解其中的参数  $a$ 、 $u$ , 得出  $a=0.0198, u=464.24$ 。以 2014 年废 PET 饮料瓶产生量为初值 ( $x_1=415, t_1=2014$ ) 带入白化方程, 得到 2014—2025 年的预测值累加数列, 采用式(6)对该累加数列进行累减运算, 得到废 PET 饮料瓶产生量的模拟值, 并根据式(7)计算 2015—2019 年模拟值与实际值的相对残差(表 2)。由表 2 可见, 模拟值与实际值相对残差均小于 0.1, 模型达到较高要求, 即灰色分析模型可以有效预测废 PET 饮料瓶产生量, 预测结果符合统计学要求。

通过以上计算, 得到 2020—2025 年我国废 PET 饮料瓶产生量预测值如图 3 所示。由图 3 可知, 2020—2025 年我国废 PET 饮料瓶年产生量为 370 万~409 万 t。

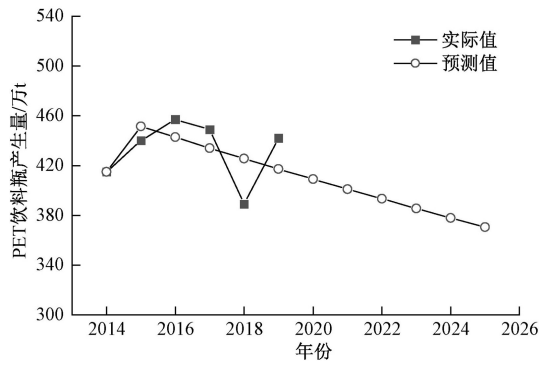


图 3 2020—2025 年我国废 PET 饮料瓶产生量预测值  
Fig.3 Forecasted production of waste PET drinking bottles in China in 2020-2025

## 2.2 单个 PET 饮料瓶质量

图 4 显示了调查的  $3.3 \times 10^{10}$  个 PET 饮料瓶的质量及占比信息: 碳酸饮料的单个 PET 瓶质量为 18~45.7 g, 其中, 20~30 g 占比最高, 为 53.52%; 非碳酸饮料的单个 PET 瓶质量为 22~46 g, 其中, 20~30 g 占比最高, 为 13.29%; 包装饮用水的单个 PET 瓶质量为 9.4~76 g, 其中, 20 g 以下占比最高, 为 21.74%。按式(8)得到单个 PET 饮料瓶的平均质量为 23 g。

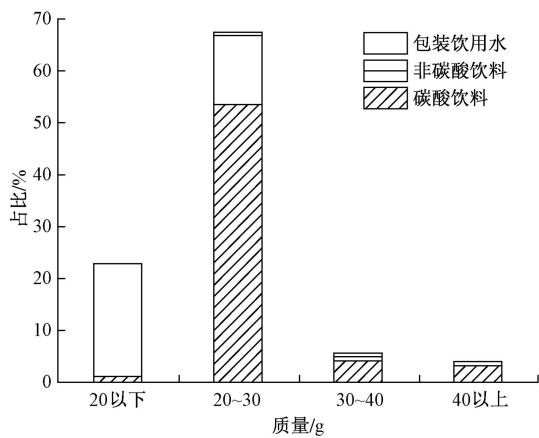


图 4 调查中不同类型 PET 饮料瓶质量及占比  
Fig.4 Quality and weight of different types of PET drinking bottles in the survey

## 2.3 我国废 PET 饮料瓶回收率

### 2.3.1 典型场地中废 PET 饮料瓶总量

#### (1) 餐厨垃圾处理厂

《2020 年中国餐厨垃圾处理产业分析报告》<sup>[20]</sup> 显示, 2018 年和 2019 年中国餐厨垃圾产生量分别为 10 760.91 万、11 280.94 万 t, 平均为 11 020.93 万 t。根据样本实测, 每个质量级为 3 t 的餐厨垃圾运输车含有 10~15 个 PET 饮料瓶, 按式(9)测算餐厨垃圾中 PET 饮料瓶平均为 10 562 t。根据 2.1 节计算结

果, 我国废 PET 饮料瓶年产生量为 415.5 万 t, 则餐厨垃圾处理厂中的 PET 饮料瓶在我国废 PET 饮料瓶总量中占比约为 0.25%。

#### (2) 垃圾填埋场

据国家统计局统计, 2018 年和 2019 年我国生活垃圾填埋处置量分别为 11 706.0 万、10 948.0 万 t, 平均为 11 327 万 t。根据样本实测, 1 t 填埋垃圾中含有 15~35 个 PET 饮料瓶, 按式(10)测算填埋垃圾中 PET 饮料瓶平均为 65 130 t。则垃圾填埋场中的 PET 饮料瓶在我国废 PET 饮料瓶总量中占比约为 1.57%。

#### (3) 焚烧发电厂

国家统计局数据显示, 2018 年和 2019 年我国城市生活垃圾焚烧处理量分别为 10 184.9 万、12 174.2 万 t, 平均为 11 179.55 万 t。根据对垃圾吊车每 t 抓手的 PET 饮料瓶的实测, 1 t 垃圾中含有 20~38 个 PET 饮料瓶, 按式(11)测算焚烧垃圾中的 PET 饮料瓶平均为 74 568 t。则焚烧发电厂中的 PET 饮料瓶在我国 PET 饮料瓶总量中占比约为 1.80%。

其中, 垃圾填埋场和焚烧发电厂中的测算比例符合 Chen 等<sup>[21]</sup> 预测的“十三五”时期我国废 PET 塑料总体填埋和焚烧所占比例 (1.4% 和 1.7%) 趋势。

#### (4) 海滩

参考 NOWPAP (Northwest Pacific Action Plan) 的统计方法, 将采集的海洋垃圾按材料分成 5 类<sup>[22]</sup>, 结果如表 3 所示。

表 3 海洋垃圾分类<sup>[22]</sup>

Table 3 Classification of marine garbage	
垃圾来源	垃圾种类
航运/捕鱼活动	废弃渔网及碎片、鱼线、浮漂等
医疗/卫生用品	注射器、卫生巾、尿布等
吸烟相关垃圾	烟头、烟盒、打火机等
人类海岸活动和娱乐活动	塑料瓶、快餐盒、饮料罐、报纸、塑料袋等
其他弃置物	轮胎、荧光灯管、窗纱、电线、灯泡、玻璃片等

对垃圾进行测量和称重(干质量), 统计不同种类垃圾的数量和质量, 根据调查面积计算其数量密度或质量密度, 估算海洋垃圾中 PET 饮料瓶的占比。受地域影响, 不同海滩的一般塑料类垃圾数量密度为 0.02~3.6 个/m<sup>2</sup>, 质量密度为 0.4~110 g/m<sup>2</sup>, 其中, PET 饮料瓶数量密度为 0~0.025 个/m<sup>2</sup>。海滩面积以我国滩涂面积为 21 709 km<sup>2</sup><sup>[23]</sup> 计, 则海滩垃圾中的 PET 饮料瓶在我国废 PET 饮料瓶总量中的比例远低于 1%。

### 2.3.2 我国 PET 饮料瓶回收率

通过定量和定性分析, 测算出典型场地中 PET 饮料瓶总量, 进一步得出餐厨垃圾处理厂、垃圾填埋场、焚烧发电厂及海滩的 PET 饮料瓶在我国废 PET 饮料瓶总量中的比例, 平均分别为 0.25%、1.57%、1.80%、<1%(以 1% 计), 逆向测算出目前我国 PET 饮料瓶回收率约为 95.4%, 回收量接近 400 万 t。

## 3 结论

(1) 基于 PET 瓶装饮料的产量和 PET 瓶消费量的正相关性, 建立了饮料总产量-PET 瓶装的饮料产量-废 PET 饮料瓶产生量(PET 饮料瓶消费量)间的数量响应关系, 基于灰色模型, 预测 2020—2025 年我国废 PET 饮料瓶的年产生量为 370 万~409 万 t。

(2) 采用问卷调查方式对国内包装饮用水、碳酸饮料、非碳酸饮料三大类饮品的主要供应企业及市场上 90% 以上规格种类的 PET 饮料瓶进行统计, 通过加权平均法计算出单个 PET 饮料瓶的平均质量为 23 g, 并以此作为 PET 饮料瓶回收率测算参数。

(3) 根据我国 PET 饮料瓶回收现状和物质代谢分析, 形成了以回收利用体系、餐厨垃圾处理厂、垃圾填埋场、垃圾焚烧发电厂、海滩等地为主要流向的废 PET 饮料瓶物质代谢流向框架; 现场实测表明, 流向餐厨垃圾处理厂、垃圾填埋场、垃圾焚烧发电厂、海滩等地的废 PET 饮料瓶所占比例平均分别为 0.25%、1.57%、1.80%、<1%, 推测出现阶段我国废 PET 饮料瓶的回收率超过 95%, 已处于较高的水平。

## 参考文献

- [1] MASSEY S, CLOUTIER P, SANCHE L, et al. Mass spectrometry investigation of the degradation of polyethylene terephthalate induced by low-energy (<100 eV) electrons[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2008, 77(7): 889-897.
- [2] WILCOX C, van SEBILLE E, HARDESTY B D. Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(38): 11899-11904.
- [3] 宋宏宇, 刘吉波, 甘振昱. 回收废 PET 瓶的废水处置研究[J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(3): 191-193.  
SONG H Y, LIU J B, GAN Z Y. Study on wastewater treatment in waste PET recycling plant[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2020, 38(3): 191-193.
- [4] 周文聪, 杨锋, 陈飞飞, 等. 废弃 PET 聚酯醇解技术进展[J]. *武汉科技学院学报*, 2008, 21(12): 15-18.
- [5] 李剑. 废弃 PET 瓶的回收利用与再生料工程塑料改性研究进展[J]. *中国新技术新产品*, 2017(20): 100-101.
- [6] 刘丞. 北京 X 企业 PET 饮料瓶再生工艺质量控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [7] 卓强. 醇碱水解法解聚废旧聚酯瓶的工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [8] ZHANG R R, MA X T, SHEN X X, et al. PET bottles recycling

in China: an LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 260: 110062.

- [9] 张华, 温宗国. 北京市居民 PET 饮料瓶的消费及回收行为研究[J]. *再生资源与循环经济*, 2014, 7(5): 19-22.  
ZHANG H, WEN Z G. Resident consumption and recycling behavior of PET bottles in Beijing[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2014, 7(5): 19-22.
- [10] WANG Y, GU Y F, WU Y F, et al. Performance simulation and policy optimization of waste polyethylene terephthalate bottle recycling system in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 162: 105014.
- [11] 于杨曜, 林路索. 我国食品接触塑料包装制品再生利用的法律规制: 以 PET 饮料瓶为例[J]. *食品科学*, 2019, 40(19): 370-377.
- [12] GU Y F, ZHOU G L, WU Y F, et al. Environmental performance analysis on resource multiple-life-cycle recycling system: evidence from waste pet bottles in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 158: 104821.
- [13] 郭太松. PET 饮料瓶轻量化设计研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [14] 李炎辉. PET 瓶顶压性能研究及结构优化设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [15] 李眩, 童百利, 吴晓兵. 基于数据变换和背景值同步优化的 GM(1, 1) 预测模型研究: 以安徽省电商交易额预测为例[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2020, 21(2): 106-114.  
LI X, TONG B L, WU X B. The research on GM(1, 1) prediction model based on the synchronous of data transformation and background value: taking the forecast of Anhui E-commerce transaction volume as an example[J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2020, 21(2): 106-114.
- [16] 庄绪宁, 宋小龙, 白建峰, 等. 我国废弃液晶显示器产生量预测及管理策略分析[J]. *环境工程技术学报*, 2014, 4(6): 489-495.  
ZHUANG X N, SONG X L, BAI J F, et al. Generation estimation of waste liquid crystal displays (LCDs) in China and analysis of countermeasures[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2014, 4(6): 489-495.
- [17] 戴铁军, 肖庆丰. 塑料包装废弃物的物质代谢分析[J]. *生态经济*, 2017, 33(1): 97-101.  
DAI T J, XIAO Q F. Metabolism analysis of plastic packaging waste[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(1): 97-101.
- [18] 王仁祺, 戴铁军. 包装废弃物物质流分析框架及指标的建立[J]. *包装工程*, 2013, 34(11): 16-22.
- [19] 张瑞端, 陈起俊, 刘兴民. 基于 EPR 的建筑废物逆向物流回收模式研究[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(4): 653-660.  
ZHANG R R, CHEN Q J, LIU X M. Research on reverse logistics recovery model of construction waste based on EPR[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(4): 653-660.
- [20] 2020 年中国餐厨垃圾处理产业分析报告-市场现状调查与投资战略研究[R/OL]. (2020-11-24)[2021-03-20]. <http://baogao.china.baogao.com/huanbao/522620522620.html>.
- [21] CHEN Y D, CUI Z J, CUI X W, et al. Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 146: 348-357.
- [22] 国峰, 李志恩, 秦玉涛, 等. 上海市海洋垃圾分布、组成与来源分析[J]. *海洋开发与管理*, 2014, 31(9): 110-113.
- [23] 全国海岸带办公室. 中国海岸带和海涂资源综合调查专业报告集: 第十集. 环境质量调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1989.