

引用格式: 栾晓玉, 刘巍, 崔兆杰, 等. 基于物质流分析的中国塑料资源代谢研究[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 372-382. [Luan X Y, Liu W, Cui Z J, et al. Plastic resources metabolism in China based on material flow analysis[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 372-382.] DOI: 10.18402/resci.2020.02.15

基于物质流分析的中国塑料资源代谢研究

栾晓玉, 刘巍, 崔兆杰, 刘业业, 陈月冬, 卢盛, 王玉标

(山东大学环境科学与工程学院, 青岛 266237)

摘要:随着塑料生产和消费快速增长, 塑料资源浪费和环境污染也日益严重, 对塑料资源代谢过程的研究对节约资源和保护环境十分重要。本文基于物质流分析方法, 构建了塑料物质流分析动态模型, 研究了1949—2018年中国的塑料从生产、使用到最终废弃的生命周期代谢过程。结果显示: ①1949—2018年, 塑料累计消费2205.6 Mt, 共产生废塑料1404.8 Mt, 其中30.0%被回收再利用, 14.0%被焚烧, 36.0%进入填埋场, 20.0%未经处理直接进入环境; ②塑料的使用存量为630.0 Mt, 损失存量为870.2 Mt, 其中66.7%堆积在填埋场中, 33.3%被随意丢弃在环境里; ③2018年, 消费量为193.1 Mt, 塑料消费产生了废塑料140.5 Mt, 废塑料后续处理中, 回收占32.0%, 焚烧占26.0%, 填埋占35.4%, 废弃占6.6%。研究表明: 中国塑料的代谢规模庞大, 一次性塑料产品对塑料代谢影响非常大; 废塑料是资源损失的关键节点, 应加强对其的回收利用; 对于已经进入环境中废塑料的污染管控非常重。因此, 今后的研究重点应在于环境中废塑料的风险和污染机理以及提高废塑料的回收利用效率, 以减少塑料资源损失, 降低环境污染。

关键词:塑料; 物质流分析; 生命周期; 使用存量; 回收再生; 中国

DOI: 10.18402/resci.2020.02.15

1 引言

塑料在我们生活中无处不在, 应用范围不断扩大, 已成为过去50年间使用增长最快的工程材料, 与钢铁、木材、水泥一起成为现今的四大基础材料^[1]。随着塑料生产和消费的增加, 资源浪费的情况也日益突出。一方面, 塑料是石化产品, 其大量生产和广泛使用增加了石化资源的消耗^[2,3]; 另一方面, 塑料被丢弃在环境中积累, 不仅占用空间资源、污染环境, 而且也浪费了可回收的废弃塑料资源。为了提高塑料资源利用效率, 减少资源浪费和环境污染, 科学解析塑料资源的生命周期代谢过程至关重要。

物质流分析是一种研究物质代谢的方法, 即在特定的系统内, 构建物质或元素的流量和存量模

型, 并对其进行定量的分析, 其主要基于系统分析方法和质量守恒原理^[4]。物质流分析通过定量刻画物质代谢过程中的流量和存量等信息, 可以为提高资源利用效率减少污染提供科学参考。近年来, 物质流分析在塑料方面的研究也逐渐深入, 主要集中于欧美亚太地区。Geyer等^[5]研究了全球塑料生产、使用及其归宿, 发现截至2015年, 全球生产了83亿t塑料, 共产生了63亿t塑料废物, 其中仅9%被回收利用, 12%被焚烧, 其余79%累积在填埋场和自然环境中; Kawecki等^[6]对欧洲的低密度聚乙烯(LDPE)、高密度聚乙烯(HDPE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、发泡聚苯乙烯(EPS)、聚氯乙烯(PVC)和聚对苯二甲酸乙二酯(PET)7大类塑料进行了物质流分析, 废旧塑料中PVC回收率最高, HDPE, PS和EPS

收稿日期: 2019-05-21, 修订日期: 2019-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701619); 中国博士后科学基金项目(2017M622208)。

作者简介: 栾晓玉, 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向为清洁生产与循环经济。E-mail: huiyu35@sina.com

通讯作者: 崔兆杰, 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 主要从事清洁生产与循环经济、工业和区域污染协同控制技术。E-mail: cuizj@sdu.edu.cn

2020年2月

主要处理方式是焚烧,其余的塑料填埋和焚烧处理比例相差不大;Millette等^[7]利用物质流分析的方法对特立尼达和多巴哥的塑料流进行了研究,结果表明48%的填埋塑料来自进口产品的塑料包装,而非国内的使用废弃;Faraca等^[8]对丹麦3个回收中心收集的废塑料进行物质流分析,发现高质量塑料废弃物的可回收性比低质量塑料废弃物高12%~35%。此外,印度尼西亚^[9]、挪威^[10]、塞尔维亚^[11]、奥地利^[12]、印度^[13]、泰国^[14]等国家均有对塑料物质流分析的案例。在这些研究中,一般将所有塑料作为一类物质,并不区分塑料类别。然而,也有一部分研究集中在某一类别的塑料,尤其是PVC^[15],源于其较高的环境风险。此外,由于PET具较高回收率,容易形成闭合循环,也有其物质流分析的报道^[16]。中国塑料物质流分析相关研究近几年才开始出现。戴铁军等^[17]建立塑料包装废弃物物质流分析框架研究中国塑料包装废物的代谢情况,结果表明2011—2014年中国塑料包装废物回收量增长了45%,回收率增长了13%,再生塑料产品产量增长了23%;辛毅明等^[18]对广东省清远市再生塑料行业进行物质流分析,结果表明每加工1 kt废塑料,能生产出960.48 t再生塑料,废塑料主要损失进入了夹杂物(21.81 t)和污泥(12.11 t);Bai等^[19]通过物质流分析估算并预测了2011—2020年间中国每年排入近海的废塑料

量。同样,国内也有关于PVC^[20,21]和PET^[22]物质流分析的报道。

目前,除了少部分塑料物质流分析聚焦于某一类塑料(如PVC和PET),大部分研究将所有塑料作为一类物质进行整体分析,相关研究结果难以支撑为不同种类塑料代谢制定针对性的优化调控方案。因此本文建立了塑料物质流分析的基本框架,研究了中国塑料代谢过程,核算了不同类型塑料在其生命周期内的物质流量及存量,分析了不同塑料资源浪费的关键节点,以提高塑料的资源利用率,降低其生命周期的环境影响,为更深入的研究及政策制定提供理论依据。

2 数据与方法

2.1 物质流分析框架

本文的研究对象为中国社会经济系统中的聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等主要类别塑料,系统边界是中国大陆,时间跨度为1949—2018年。物质流分析的框架如图1所示,分析框架将塑料生命周期分为3个阶段:生产加工阶段、使用阶段、回收处理阶段。其中,生产加工阶段包括塑料生产、塑料产品生产等过程;使用阶段为塑料在各终端领域的使用和消费过程;回收处理阶段包括塑料的报废、

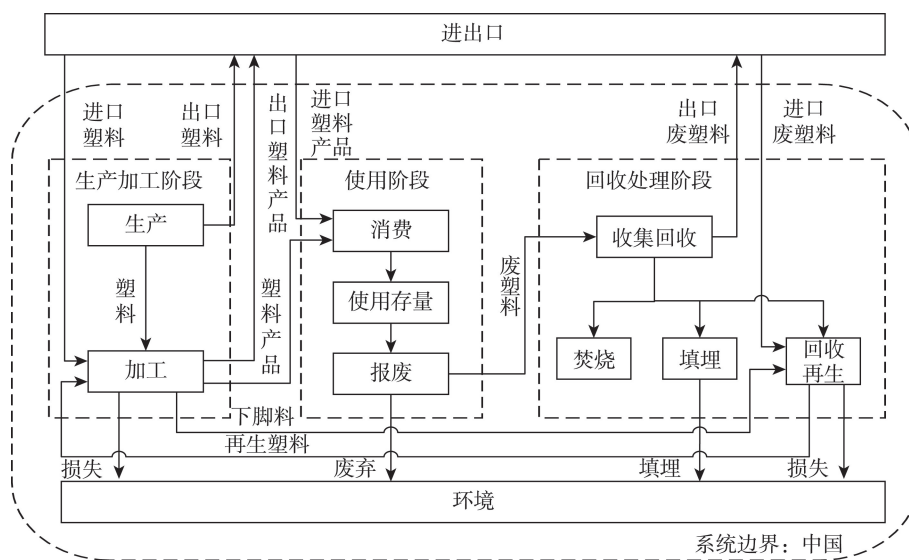


图1 塑料物质流分析框架

Figure 1 A framework for material flow analysis of plastics

废旧塑料产品的回收、终端处理以及再生利用等过程。

2.2 数据来源及处理

数据主要来自于统计年鉴、行业报告、相关文献以及企业调研等,如表1所示。其中,由于较早年份进出口量的缺失,对其采用合理估算方法进行补充,即1949—1970年的进出口量根据后期数据的趋势,进行拟合推算。本文研究的重点是对代谢现状的解析,早期较低的数据对现状的流量及存量影响较小。另外,缺失年份的消费结构采用线性插值法估算。废塑料的焚烧率和填埋率可近似等于生活垃圾的焚烧率和填埋率(由生活垃圾焚烧量、填埋量和清运量得到)。

2.3 关键流量和存量核算

本文根据中国社会经济系统中塑料生产量、消费量和塑料产品的使用寿命,利用正态分布函数可计算出1949—2018年废塑料的产生量,并结合质量守恒定律以及相关计算公式,进一步计算出塑料代谢的其他流量和存量情况。

根据物质流分析的基本计算方法,主要流量及存量的计算公式如下:

塑料消费量(C_n)的计算公式如下:

$$C_n = P_n + Import_n - Export_n \quad (1)$$

式中: P_n 代表第 n 年塑料的生产量; $Import_n$ 代表第 n 年塑料的进口量; $Export_n$ 代表第 n 年塑料的出口量。

本文使用正态分布模型表征塑料产品的寿命分布,使用了 m 年的塑料产品报废率(G_m)的计算公式如下:

$$G_m = \int_{m-1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (2)$$

进一步计算出塑料的报废量(W_n),计算公式

如下:

$$W_n = \sum_{m=m_{\min}}^{m=m_{\max}} (C_{n-m} \times G_m) \quad (3)$$

式中: C_{n-m} 代表第 $n-m$ 年塑料的消费量; m 代表实际使用年限; m_{\min} 代表最小使用年限; m_{\max} 代表最大使用年限。

报废塑料的回收量、焚烧量、填埋量和废弃量均由报废塑料量分别与回收率、焚烧率、填埋率和废弃率相乘得到。

根据使用阶段的质量守恒定律,可计算得到塑料的使用存量(S_n^{inuse}):

$$S_n^{\text{inuse}} = \sum (C_n - W_n) \quad (4)$$

塑料的损失存量(S_n^{loss})计算公式如下:

$$S_n^{\text{loss}} = \sum (L_n + D_n) \quad (5)$$

式中: L_n 代表第 n 年废塑料的填埋量; D_n 代表第 n 年废塑料的废弃量。

3 结果与分析

3.1 塑料关键流量分析

3.1.1 塑料生产量和进出口量

1949—2018年中国塑料生产量和进出口量如图2所示。1949—2000年塑料产量缓慢增加,年均增长0.3 Mt。2000年后塑料产量增长速度加快,由13.8 Mt增至2018年的129.3 Mt,年均增长6.4 Mt。从塑料类别方面看,由于限塑令的影响,PE和PP的占比在逐年减少,分别由20.2%和20.8%(2006年)降至14.6%和13.6%(2010年)。PET占比在增加,由21.2%(2000年)增至33.6%(2018年)。一方面是因为工程塑料的需求量快速增长,另一方面是PET瓶广泛应用。而PVC由于其潜在环境健康风险,占比在逐渐下降,由18.8%(2000年)降至14.8%(2018年)。1949—2018年累计生产塑料1342.8 Mt,其中

表1 本文主要数据及其来源

Table 1 Primary sources of the data used in this study

数据类型	数据来源
塑料生产量、进出口量;塑料产品进出口量等	2001—2018年《中国统计年鉴》 ^[23] ;2001—2018年《中国海关统计年鉴》 ^[24] ;2001—2017年《中国塑料工业年鉴》 ^[25] ;1984—2017年《中国化学工业年鉴》 ^[26] ;2011—2017年《中国纺织工业年鉴》 ^[27] ;文献[28]、[29]
塑料产品消费结构;使用年限	2001—2017年《中国塑料工业年鉴》 ^[25] ;《政府会计准则第3号—固定资产》应用指南 ^[30] ;《中华人民共和国企业所得税实施条例》 ^[31] ;文献[5]、[20];企业调研
废塑料回收率;生活垃圾焚烧量、填埋量;废塑料进出口量等	2001—2017年《中国塑料工业年鉴》 ^[25] ;1999—2017年《中国城市建设统计年鉴》 ^[32] ;2011—2017年《中国再生塑料行业发展报告》 ^[33] ;2001—2017年《中国资源综合利用年度报告》 ^[34] ;文献[35]、[36]

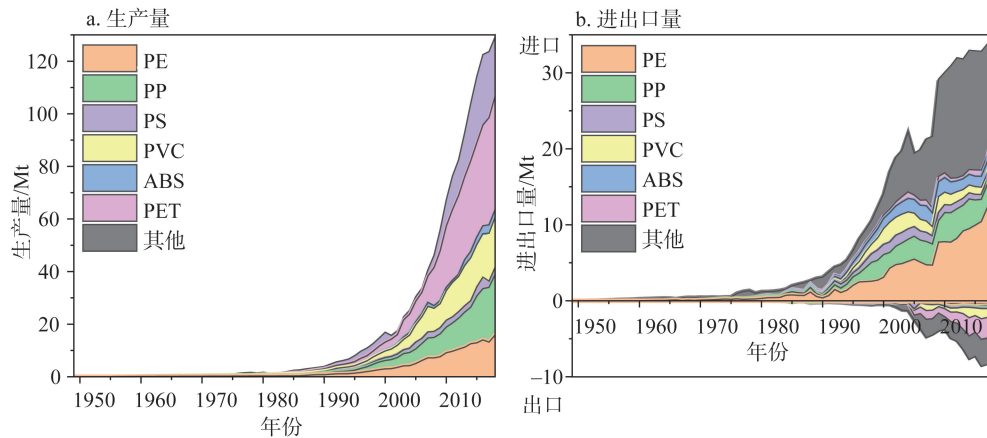


图2 1949—2018年中国塑料生产量、进口量和出口量

Figure 2 Production, import, and export of plastics in China, 1949-2018

72%的塑料是在近10年生产的,这是由于中国石油化工行业突飞猛进的发展和高分子材料合成与加工技术的进步。塑料进口量在1995年后增长速度加快,2018年较1995年增加了3.1倍(24.7 Mt),出口量在2000年后增长速度加快,2018年较2000年增加了18.5倍(7.4 Mt)。其中主要进口塑料为PE(2018年占42.4%),因为中国聚乙烯仍以自产自消为主,供应难以满足自身需求,需大量进口来满足;主要出口塑料为PET(2018年占33.2%),PET生产以纤维为主,而PET纤维主要用于生产纺织服装,中国纺织服装出口量大,因此PET出口量较多。尽管中国塑料产量的增速超过世界平均水平,但由于需求旺盛,累计净进口了塑料500.0 Mt来满足中国经济快速增长的需求。

3.1.2 塑料消费量

1949—2018年中国不同种类塑料的消费量和分终端产品塑料消费量分别如图3所示。期间中国累计消费塑料2205.6 Mt。1949—2000年塑料消费量增加缓慢,年均增长0.6 Mt。2000年后塑料消费量增长速度加快,由29.9 Mt至2018年的193.1 Mt,年均增长9.0 Mt。由于1980年前,消费量较小,不展开分析,重点研究1980年后消费结构变化。就终端产品而言,包装产品和农业产品占比变化较大,分别由1981年的40.5%和12.0%降低到2018年的26.6%和8.0%,建筑材料由2.1%左右增长到11.9%,服装鞋帽(18.9%)和家庭用品(17.4%)也是占比较高的终端领域。此外,由于家电逐渐功能多样,种类齐全,家电中塑料消费量也在上升^[37];鼓励轿车进

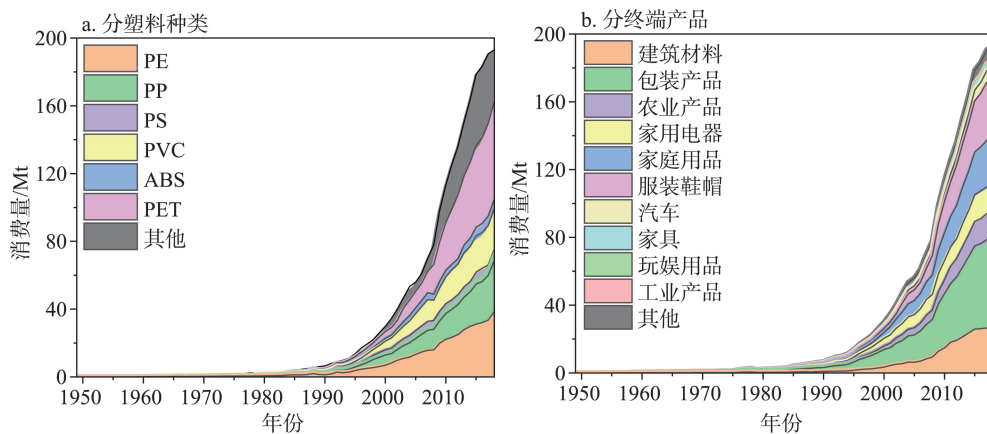


图3 1949—2018年中国塑料消费量

Figure 3 Consumption of plastics in China, 1949-2018

入家庭等政策以及汽车材料结构的改变(塑料等轻型材料的推广)也使得汽车中塑料消费量进入了新的增长阶段^[38]。塑料消费量变化主要与终端领域的需求减少有关,由于应用于包装产品和农膜的塑料主要为PE薄膜,因此消费中PE由30.4%减少到18.9%。另外目前PET也被广泛应用于乳制品、啤酒等饮料瓶包装领域中,且服装鞋帽主要为PET纤维,因此PET由8.6%增加到28.8%。另外,PP和PVC占比也较高,分别占18.9%和11.8%。

3.1.3 废塑料产生量

1949—2018年中国不同种类废塑料产生量和分终端产品废塑料产生量如图4所示。期间中国累计产生废塑料1404.8 Mt。2000年前废塑料产生量增加缓慢,2000年后废塑料产生量增长速度加快,由19.8 Mt增至2018年的140.5 Mt,年均增长6.8 Mt。具体到报废产品,包装废物量虽然由1981年53.4%降低到2018年34.2%,但仍远高于其他报废产品,农业报废产品由12.2%降低到10.4%,而服装鞋帽(19.6%)和家庭用品(17.4%)均是占比较高且逐渐增加的终端领域。而在消费量中占比较高的建筑材料在废塑料中占比较低,仅为2%左右,主要是因为报废量受产品的寿命影响较大,建筑材料使用寿命长,其报废量相对于消费量大大滞后,目前报废量少,而对于寿命短的产品,例如一次性的包装产品,其报废量随着消费量的增加而增加。相应地,报废量中PE由36.8%减少到20.2%,PET由2.2%

增加到31.8%,另外,PP和PVC占比也较高,分别占15.8%和9.7%。

3.1.4 废塑料回收量、终端处理量和废弃量

1949—2018年中国废塑料的回收量、焚烧量、填埋量和废弃量如图5所示。期间,中国累计回收废塑料407.4 Mt,焚烧204.5 Mt,填埋512.0 Mt,废弃280.9 Mt(30.0%被回收再利用,14.0%被焚烧,36.0%进入填埋场,20.0%未经处理直接进入环境)。废弃量在2002年前一直呈现增加的趋势,增加至2002年的12.6 Mt,然后逐渐减少到2018年的9.2 Mt。废弃量减少得益于对生活垃圾处理处置的改善,例如实施推广生活垃圾收集和处理。由于处理量大,投资少,见效快,可以迅速提高垃圾处理率,早期对于垃圾的终端处理主要以卫生填埋为主,因此塑料填埋量在90年代之后也随之开始增长,由1.5 Mt(1991年)增加到49.8 Mt(2018年)。垃圾焚烧处理则起步较晚,这是因为操作复杂、垃圾分类不到位、资金投入欠缺等原因,但通过借鉴国外成功经验,因地制宜有条件地采用,焚烧技术也逐渐开始发展,在进入21世纪后,塑料焚烧量由1.1 Mt(2001年)增加到36.5 Mt(2018年)。塑料回收量在2000年后增长速度加快,由3.0 Mt增加到2018年的45.0 Mt,年均增长2.3 Mt。而废塑料回收量中PET最多(37.2%),这是因为中国PET瓶的回收率可高达90%,具有很好的可循环利用性^[39]。废弃的废塑料中PE占比最高(20.2%),这是因为PE主要应用于包

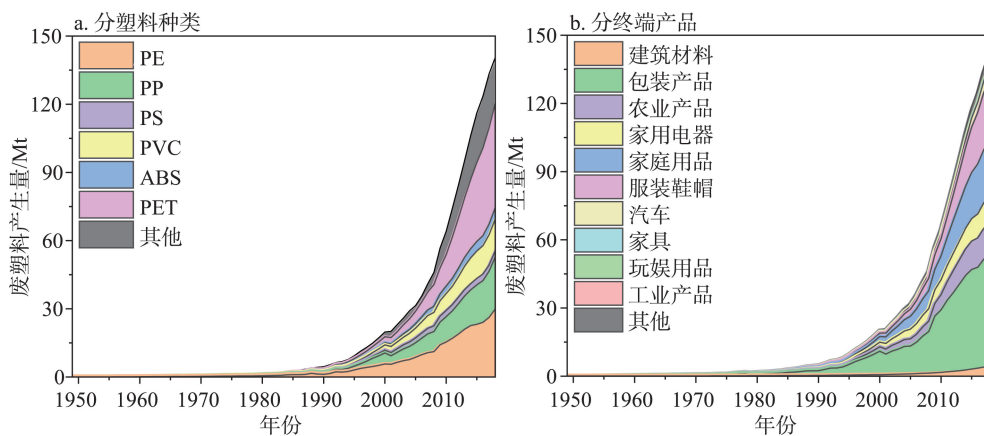


图4 1949—2018年中国废塑料产生量

Figure 4 Production of plastic waste in China, 1949-2018

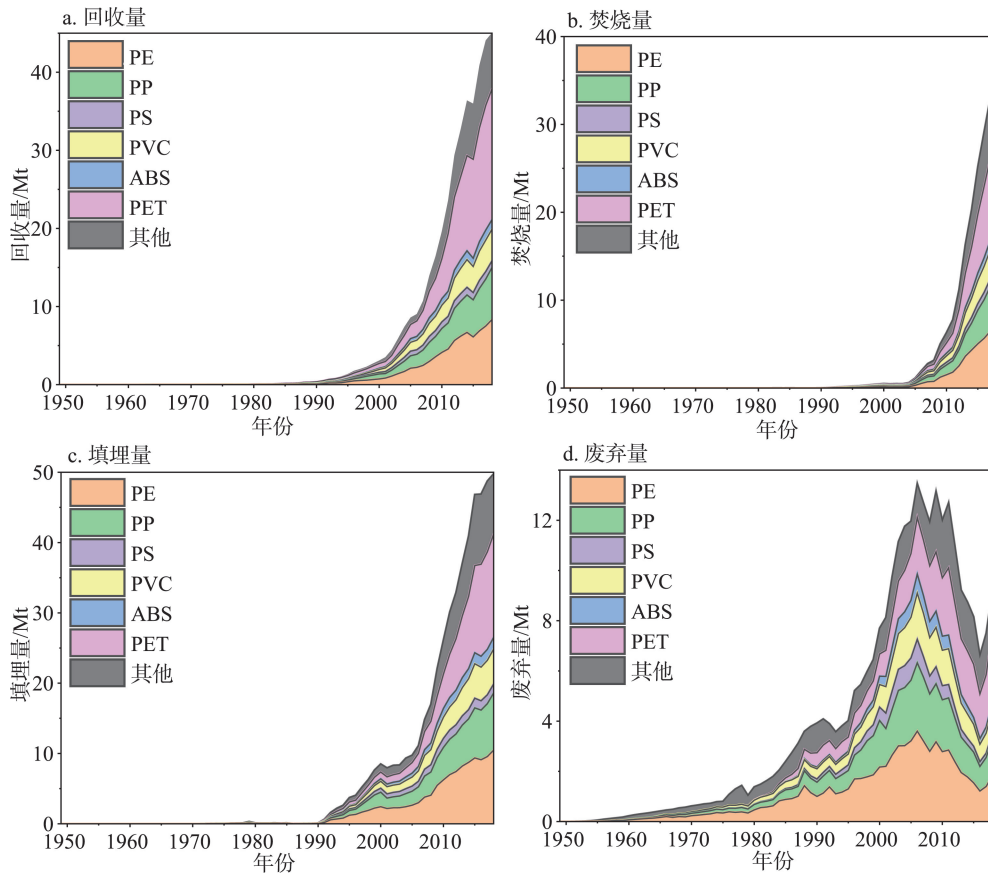


图5 1949—2018年中国废塑料回收量、终端处理量和废弃量

Figure 5 Recycling, disposal, and discard of plastic waste in China, 1949-2018

装薄膜,多为一次性产品,难以回收再利用^[40]。因此优先塑料的回收再生,难以回收再生的尽可能回收能源,减少废塑料填埋和废弃,有效促进塑料资源的综合利用。

3.2 塑料关键存量分析

3.2.1 塑料使用存量

1949—2018年中国不同种类塑料的使用存量和分终端产品塑料使用存量如图6所示。1949—

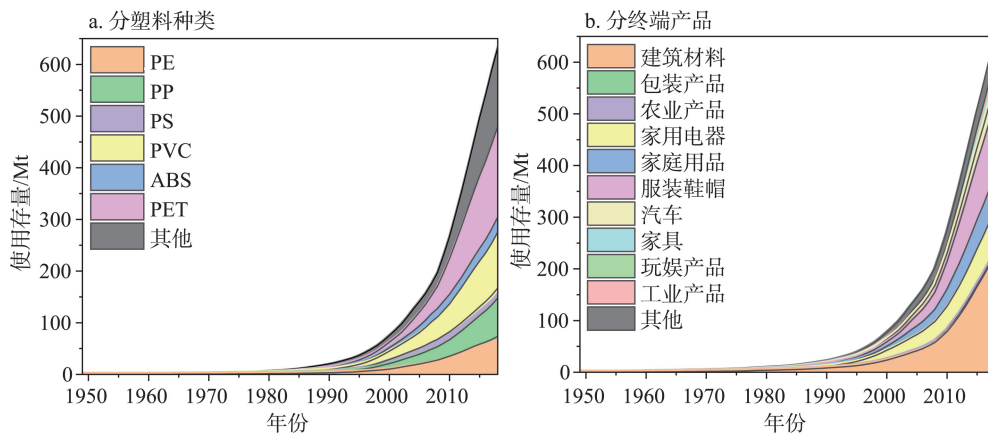


图6 1949—2018年中国塑料使用存量

Figure 6 In-use stock of plastics in China, 1949-2018

2000年塑料使用存量增加缓慢,年均增长1.5 Mt。2000年后塑料使用存量增长速度加快,由75.0 Mt至2018年的630.0 Mt,年均增长30.8 Mt。由于1970年前,使用存量相对较小,仅讨论1970年后塑料使用存量变化规律。具体到终端产品而言,建筑材料的使用存量占比在逐渐减少,由49.9%(1971年)减少到33.6%(2018年),这说明塑料用途越来越广,存量分布越来越广。另外,服装鞋帽、家庭用品和家电均是使用存量较大的领域。而使用寿命较短的终端产品使用存量占比都较少,例如包装产品占比几乎为0,农业产品仅占2.4%。而对于不同种类塑料,PVC的使用存量占比由22.2%降低到16.6%,PE的使用存量占比也在降低,由18.6%降低到10.2%,另外PP和PET均是使用存量占比较大的塑料,分别占11.7%和27.2%。未来使用存量较大的相关产品的报废量会逐年增大,应重点关注这些产品废旧塑料资源化。

3.2.2 塑料损失存量

1949—2018年中国不同种类塑料的损失存量和分终端产品塑料损失存量如图7所示。2000年前塑料损失存量增加缓慢,2000年后塑料损失存量增长速度加快,由2000年的142.4 Mt增至2018年的870.2 Mt,年均增长40.4 Mt。就报废产品而言,包装废物和农业报废产品在损失存量中的占比逐渐减少,分别由64.4%和13.9%(1971年)减少到37.1%和10.5%(2018年),这说明用途越来越分散,使用和损失存量都越来越分散。另外,废旧服装鞋帽、家

庭用品和家电均是损失存量较大的领域。与废塑料产生量相似,使用寿命较长的终端产品损失存量都较少,如废建筑材料等,仅占1.9%。而对于不同种类塑料,PE、PP的损失存量占比均在降低,分别由35.3%和19.5%降低到22.7%和16.3%,另外PVC和PET均是损失存量占比较大的塑料,分别占10.7%和18.8%。所有损失存量中有66.7%堆积在填埋场中,33.3%被随意丢弃在环境里,而在1971年只有2.0%堆积填埋场中,其余98.0%被随意丢弃在环境里。环境中的废塑料量很大,其环境风险、作用机理以及减量利用将会成为未来研究的重点。

3.3 塑料资源代谢物质流分析

在对1949—2018年塑料资源流量及存量进行分析的基础上,进一步绘制出不同类别塑料资源代谢的物质流分析。限于篇幅,本文仅给出2018年所有塑料的资源代谢物质流分析的汇总图,如图8所示。

2018年,中国生产塑料129.3 Mt,净进口塑料24.9 Mt,净进口废塑料0.7 Mt。这些塑料资源49.2 Mt进入经济系统中(使用存量),12.5 Mt以塑料产品形式出口国外,56.7 Mt进入环境(损失存量),36.5 Mt被焚烧消亡。1949—2018年,中国塑料累计生产1342.8 Mt,净进口500.0 Mt,废塑料累计净进口108.0 Mt。这些塑料资源630.0 Mt仍在经济系统中(使用存量),248.0 Mt以塑料产品形式出口国外,870.2 Mt散落在环境里(损失存量),202.6 Mt被焚烧消亡。

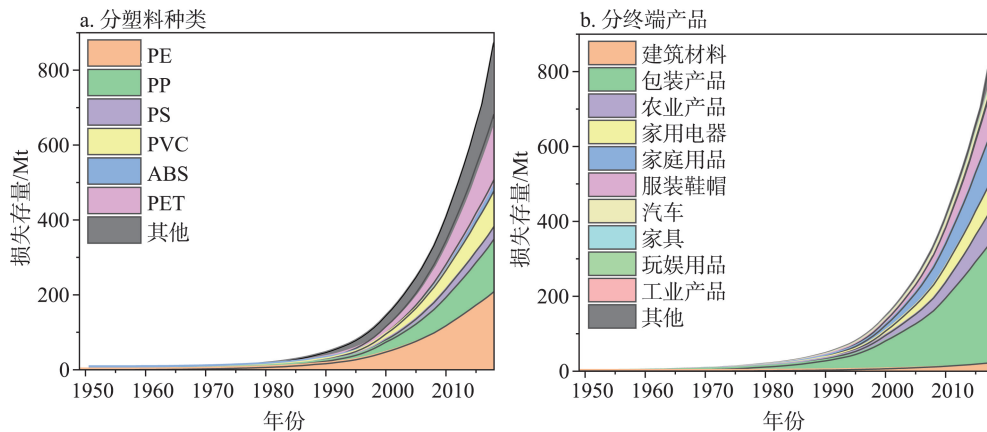


图7 1949—2018年中国塑料损失存量

Figure 7 Loss stock of plastics in China, 1949-2018

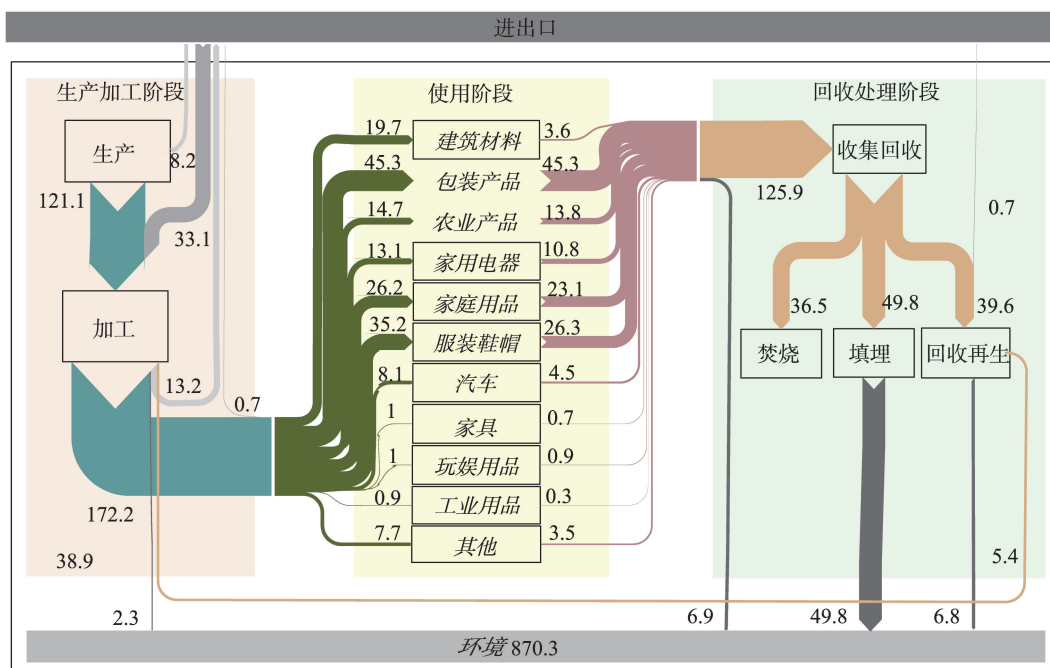


图8 2018年塑料生命周期代谢过程

Figure 8 Life cycle metabolic process of plastics in 2018

注:图中数据单位是Mt,斜体表示存量,其余为流量。

4 结论与建议

4.1 结论

本文建立了1949—2018年PE、PP、PS、PVC、ABS、PET等塑料的物质流分析模型,研究了不同类型塑料的生命周期代谢过程,核算了关键流量和存量。主要结论如下:

(1) 1949—2018年,中国塑料消费量累计为2205.6 Mt,共产生废塑料1404.8 Mt,其中,30.0%被回收再利用,14.0%被焚烧,36.0%进入填埋场,20.0%未经处理直接进入环境。塑料分终端产品消费中,包装产品、服装鞋帽、建材和农业产品等占比均较高。各种塑料消费量中,PET和PE占比较大。报废塑料产品主要是包装废物、废旧服装鞋帽、家庭用品和农业产品等,废旧PET和PE占比较大。

(2) 1949—2018年,中国塑料的使用存量为630.0 Mt,主要存在于建材、服装鞋帽、家用电器和家庭用品等4类产品中,未来相关产品报废量会逐年增大;塑料的损失存量为870.2 Mt,主要是包装废物、废旧家庭用品、服装鞋帽和农业产品等4类,其中66.7%堆积在填埋场中,33.3%被随意丢弃在环境里。

(3) 2018年,塑料生产量为129.3 Mt,消费量为193.1 Mt,塑料生产和消费产生了废塑料140.5 Mt,废塑料后续处理中,回收占32.0%,焚烧占26.0%,填埋占35.4%,废弃占6.6%。目前塑料资源代谢规模庞大,废塑料是资源损失的关键节点,环境中塑料的生物地球化学行为和生态风险需要深入研究。

4.2 建议

基于中国塑料的流量及存量的变化情况,提出以下几点建议:

(1) 鉴于中国塑料代谢的庞大规模,可通过限塑令、资源环境税费等政策法规限制塑料,尤其是一次性塑料的使用,同时加快可降解塑料的研发和应用。另外,可实行包装减量化,自觉减少一次性包装塑料的使用;改进农艺技术实现农膜减量,积极推进可降解农膜的应用。

(2) 对于塑料损失关键节点的废塑料,应实行强制分类回收政策,健全相关标准法规,完善回收基础设施,加强监管力度,为后续废塑料再利用提高效率。分类收集的废塑料,应优先材料回收,难以回收材料的尽可能回收能源。因此,深入对废塑料材料回收和能源回收技术的研究,十分有必要。

(3)已经排放进入环境中的塑料因其性质稳定,难以被生物降解,不仅会在陆地上积累,并且可能进入海洋,对生态环境造成严重影响,对动物和人类的生命健康也会造成危害。因此,应加强塑料全生命周期的监管,以减少各阶段进入环境的废塑料量,从而减少资源浪费降低环境污染。

本文研究了中国塑料资源代谢过程的流量、存量及其结构变化情况,为相关政策的制定实施以及深入的科学研究提供了方向和依据。相对于部分研究仅侧重于对废塑料回收处理的关注,本文更侧重于对整个生命周期过程,尤其是源头和末端的研究,但研究仍存在一定的局限性:只对塑料资源从生产加工、使用到报废处理的生命周期代谢过程进行物质流分析,对塑料原材料生产过程未进行分析研究,同时废塑料进入环境中的去向及分布情况等问题,也有待进一步深入探究。

参考文献(References):

- [1] Allwood J M, Ashby M F, Gutowski T G, et al. Material efficiency: A white paper[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(3): 362—381.
- [2] Al-Salem S M, Lettieri P, Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review[J]. *Waste Management*, 2009, 29(10): 2625—2643.
- [3] Jefferson H, Robert D, Edward K. Plastics recycling: Challenges and opportunities[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2009, 364(1526): 2115—2126.
- [4] Fischer-Kowalski M, Huttler W. Society's metabolism: The intellectual history of materials flow analysis, Part I, 1860—1970[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 1998, 2(4): 61—78.
- [5] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700782.
- [6] Kawecki D, Scheeder P R W, Nowack B. Probabilistic material flow analysis of seven commodity plastics in Europe[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(17): 9874—9888.
- [7] Millette S, Williams E, Hull C E. Materials flow analysis in support of circular economy development: Plastics in Trinidad and Tobago[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, DOI: 10.2139/ssrn.3463783.
- [8] Faraca G, Astrup T. Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability[J]. *Waste Management*, 2019, 95: 388—398.
- [9] Putri A R, Fujimori T, Takaoka M. Plastic waste management in Jakarta, Indonesia: Evaluation of material flow and recycling scheme[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(4): 2140—2149.
- [10] Deshpande P C, Philis G, Brattebø H, et al. Using Material Flow Analysis (MFA) to generate the evidence on plastic waste management from commercial fishing gears in Norway[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resrec.2019.100024.
- [11] Goran V, Nebojsa J, Milun B, et al. Assessment of plastic flows and stocks in Serbia using material flow analysis[J]. *Thermal Science*, 2010, 14(S1): 89—95.
- [12] Laner D, Feketiitsch J, Rechberger H, et al. A novel approach to characterize data uncertainty in material flow analysis and its application to plastics flows in Austria[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(5): 1050—1063.
- [13] Mutha N H, Patel M, Premnath V. Plastics materials flow analysis for India[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 47(3): 222—244.
- [14] Bureecam C, Chaisomphob T, Sungsomboon P. Material flows analysis of plastic in Thailand[J]. *Thermal Science*, 2018, 22(6): 2379—2388.
- [15] Ciacci L, Passarini F, Vassura I. The European PVC cycle: In-use stock and flows[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 123: 108—116.
- [16] Kuczynski B, Geyer R. Material flow analysis of polyethylene terephthalate in the US, 1996—2007[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(12): 1161—1169.
- [17] 肖庆丰, 戴铁军. 塑料包装废弃物的物质代谢分析[J]. *生态经济*, 2017, 33(1): 97—101. [Xiao Q F, Dai T J. Metabolism analysis of plastic packaging waste[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(1): 97—101.]
- [18] 幸毅明, 王伟, 彭香琴, 等. 基于物质流分析的废塑料再生固废减排研究[J]. *环境污染与防治*, 2013, 35(12): 100—105. [Xing Y M, Wang W, Peng X Q, et al. Solid waste reduction during waste plastic recycling using substance flow analysis method[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2013, 35(12): 100—105.]
- [19] Bai M Y, Zhu L X, An L H, et al. Estimation and prediction of plastic waste annual input into the sea from China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(11): 26—39.
- [20] Zhou Y C, Yang N, Hu S Y. Industrial metabolism of PVC in China: A dynamic material flow analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 73: 33—40.
- [21] Liu Y J, Zhou C B, Li F, et al. Stocks and flows of polyvinyl chloride (PVC) in China: 1980—2050[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 154: 104584.

2020年2月

- [22] 谷艾婷. 废PET塑料资源化代谢结构与代谢效率的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015. [Gu A T. Network Analysis on Metabolic Structure and Metabolic Efficiency of Waste PET in Recycling [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.]
- [23] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2018. [National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2001-2018.]
- [24] 中华人民共和国海关总署. 中国海关统计年鉴[M]. 北京: 中国海关杂志社, 2001-2018. [General Administration of Customs, P. R. China. China Customs Statistics Yearbook[M]. Beijing: China Customs Press, 2001-2018.]
- [25] 中国塑料加工工业协会. 中国塑料工业年鉴[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001-2017. [China Plastics Processing Industry Association. China Plastics Industry Yearbook[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001-2017.]
- [26] 中国石油和化学工业联合会. 中国化学工业年鉴[M]. 北京: 中国化工信息中心, 1984-2017. [China Petroleum and Chemical Industry Federation. China Chemical Industry Yearbook[M]. Beijing: China National Chemical Information Center, 1984-2017.]
- [27] 中国纺织工业联合会. 中国纺织工业年鉴[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2011-2017. [China National Textile and Apparel Council. Almanac of China's Textile Industry[M]. Beijing: China Textile Apparel Press, 2011-2017.]
- [28] 郑宁来. 我国ABS树脂应用及市场需求[J]. 塑料, 1998, 27(4): 7-12. [Zheng N L. Applications and market demands of China's ABS resin[J]. Plastics, 1998, 27(4): 7-12.]
- [29] 王鑫根. 国内PET的市场分析[J]. 金山油化纤, 2003, 22(3): 14-18. [Wang X G. Analysis on domestic PET market[J]. Petrochemical Technology in Jinshan, 2003, 22(3): 14-18.]
- [30] 中华人民共和国财政部. 《政府会计准则第3号-固定资产》应用指南[EB/OL]. (2017-02-21) [2019-05-21]. <http://zcc.bbc.edu.cn/s/69/t/253/5f/e5/info90085.htm>. [Ministry of Finance of the People's Republic of China. Application Guide for Government Accounting Standards No. 3-Fixed Assets[EB/OL]. (2017-02-21) [2019-05-21]. <http://zcc.bbc.edu.cn/s/69/t/253/5f/e5/info90085.htm>.]
- [31] 国家税务总局. 中华人民共和国企业所得税法实施条例[EB/OL]. (2017-12-06) [2019-05-21]. <https://baike.baidu.com/item/%E4%B8%AD%E5%8D%8E%E4%BA%BA%E6%B0%91%E5%85%B1%E5%92%8C%E5%9B%BD%E4%BC%81%E4%B8%9A%E6%89%80%E5%BE%97%E7%A8%8E%E6%B3%95%E5%AE%9E%E6%96%BD%E6%9D%A1%E4%BE%8B/10036107?fr=aladdin>. [State Administration of Taxation. Implementation Regulations of the People's Republic of China Enterprise Income Tax Law[EB/OL]. (2017-12-06) [2019-05-21]. <https://baike.baidu.com/item/%E4%B8%AD%E5%8D%8E%E4%BA%BA%E6%B0%91%E5%85%B1%E5%92%8C%E5%9B%BD%E4%BC%81%E4%B8%9A%E6%89%80%E5%BE%97%E7%A8%8E%E6%B3%95%E5%AE%9E%E6%96%BD%E6%9D%A1%E4%BE%8B/10036107?fr=aladdin>.]
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999-2017. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China Urban Construction Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1999-2017.]
- [33] 中国物资再生协会再生塑料分会. 中国再生塑料行业发展报告2018-2019[R]. 北京: 中国再生塑料行业发展报告, 2019. [China Plastic Recycling Association. Development Report of China Plastic Recycling Industry 2018-2019[R]. Beijing: Development Report of China Plastic Recycling]
- [34] 中国国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告2019[R]. 北京: 中国资源综合利用年度报告, 2019. [National Development and Reform Commission. Annual Report of Comprehensive Utilization of Resources in China 2019[R]. Beijing: Annual Report of Comprehensive Utilization of Resources in China, 2019.]
- [35] 徐海云. 我国可回收垃圾资源化利用水平比较分析[J]. 环境保护, 2016, 144(19): 39-44. [Xu H Y. Comparative analysis in the material recycling of municipal solid waste in China[J]. Environmental Protection, 2016, 144(19): 39-44.]
- [36] 范满国. 我国可回收垃圾资源化分析[J]. 城乡建设, 2018, (2): 23-27. [Fan M G. Analysis on the reclamation of recyclable waste in China[J]. Urban and Rural Development, 2018, (2): 23-27.]
- [37] 严丽, 刘晶茹. 基于物质流分析的中国城镇家庭代谢核算[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1682-1691. [Yan L, Liu J R. Chinese urban household metabolism accounting based on material flow analysis[J]. Resources Science, 2017, 39(9): 1682-1691.]
- [38] 孔子科, 刘晶茹, 孙铎. 中国城镇家庭乘用车物质代谢分析[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 681-688. [Kong Z K, Liu J R, Sun X. Dynamic material stock and flow of Chinese urban household private cars in recent 20 years[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 681-688.]
- [39] 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.
- [40] Hong J L, Li X Z, Cui Z J. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China[J]. Waste Management, 2010, 30(11): 2362-2369.

Plastic resources metabolism in China based on material flow analysis

LUAN Xiaoyu, LIU Wei, CUI Zhaojie, LIU Yeye, CHEN Yuedong, LU Sheng, WANG Yubiao

(School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China)

Abstract: With the rapid growth of the production and consumption of plastics, the waste and pollution of plastics become increasingly more serious. It is important to study the metabolic process of plastic resources to save the resources and protect the environment. Based on the material flow analysis method, a material flow analysis dynamic model of plastics was constructed in this study to analyze the life-cycle metabolic process of plastics from production, use, to waste from 1949 to 2018 in China. The flows and stocks of PE, PP, PS, PVC, ABS, PET and other plastic in 11 application areas were calculated, and the key points of resources waste of different kinds of plastics were analyzed. The results show that: (1) From 1949 to 2018, the consumption of plastics was 2205.6 million tons, and the output of waste plastics was 1404.8 million tons, of which 30.0% was recycled, 14.0% was incinerated, 36.0% was into landfill, and 20.0% was directly lost into the environment without treatment; (2) The in-use stocks of plastics were 630.0 million tons, and the loss stocks of plastics were 870.2 million tons, of which 66.7% were in landfill and 33.3% were carelessly discarded in the environment; (3) In 2018, the consumption of plastics was 193.1 million tons, and the output of waste plastics was 140.5 million tons, of which 32.0% was recycled, 26.0% was incinerated, 35.4% was into landfill, and 6.6% was directly lost into the environment. The study found that: The scale of plastic metabolism was large in China, and disposable plastic products had a great influence on plastic metabolism. Waste plastic was the key point of the resource loss, so the recycling of waste plastics was necessary. It was important to control the pollution of waste plastics that had entered the environment. Therefore in the future, research should focus on the risk and pollution mechanism of plastic waste scattered in the environment and improving the utilization efficiency of recycling and reusing of plastic waste, so as to reduce the loss of plastic resources and decrease the environmental pollution.

Key words: plastics; material flow analysis; life cycle; in-use stock; recycling; China