

引用格式:汪中才,宋庆彬,蔡铠涵,等.家用空调制冷剂物质流动态演化特征:以中国澳门特别行政区为例[J].资源科学, 2021, 43(3): 556-566. [Wang Z C, Song Q B, Cai K H, et al. Dynamic evolution characteristics of refrigerant mass flow in household air conditioners: A case study of Macao S.A.R., China[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 556-566.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.12

家用空调制冷剂物质流动态演化特征 ——以中国澳门特别行政区为例

汪中才¹, 宋庆彬¹, 蔡铠涵¹, 李金惠²

(1. 澳门科技大学澳门环境研究院, 中国澳门特区 999078; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 由于制冷剂较高的臭氧层消耗潜势和气候变化影响, 政府和公众对于制冷剂的重视程度正不断加深。《蒙特利尔议定书》虽从源头上限制了臭氧消耗类物质(ODS)的生产和使用, 却忽略了ODS的产品生命周期过程中潜在的释放风险。基于物质流分析方法, 本文构建了中国澳门特别行政区(以下简称澳门特区)家用空调制冷剂的动态分析框架, 并从生命周期角度量化了1998—2019年澳门特区家用空调制冷剂的流量和存量特征, 揭示了不同制冷剂类型的潜在环境释放随时间的变化趋势。结果表明: ①1998—2019年间, 澳门特区家用空调制冷剂进口量、存量和释放量均有显著增加, 其中最主要制冷剂类型为R22(CHClF_2), 且R22释放也导致了最大的臭氧消耗潜势(ODP)影响和全球变暖潜势(GWP)影响。②1998—2019年间, 澳门特区家用空调制冷剂累计进口量为1096.71 t, 制冷剂的存量也由零增加至512.67 t且没有达峰的迹象。近年来, 澳门特区家用空调废弃阶段的制冷剂释放量贡献占比高达80%, 空调使用阶段制冷剂贡献率为20%左右。尽管澳门特区家用空调制冷剂的ODP影响和GWP影响已分别于2014年和2013年达到峰值, 但存量仍然具有较大规模。③未来, 澳门特区政府应继续巩固和完善废弃空调回收和处置措施, 进一步增加现有处理企业处置能力、强化废弃制冷剂的回收和循环处置技术水平。本文的结果可为澳门特区制冷剂的有效管理提供参考, 也可与其他城市核算家用空调生命周期制冷剂提供方法支撑。

关键词: 家用空调; 制冷剂; 物质流分析; 生命周期; 中国澳门特别行政区

DOI: 10.18402/resci.2021.03.12

1 引言

自1987年《蒙特利尔议定书》签署以来, 经过30多年的不懈努力, 国际社会通过淘汰计划逐步控制了臭氧消耗类物质(Ozone Depleting Substances, ODS)的生产和使用, 并且已经取得了很大成效^[1]。然而, 即使国际社会已经于2010年起达成全面禁止生产和消费氯氟烃(Chlorofluorocarbons, CFCs)的控制目标, 有证据表明东亚仍存在违规生产CFCs的行为^[2]。此外, 现存的制冷剂淘汰计划仅考虑了

源头上对ODS的约束, 对产品在使用阶段和废弃阶段ODS释放的管理和处置仍有所欠缺。制冷剂作为一种重要的ODS被广泛应用于空调行业。随着空调大量进入居民家庭, 其使用和废弃过程中的制冷剂释放问题引起了广泛的关注^[3-5]。

物质流分析是工业生态学中被广泛接受和使用的方法之一, 是一种研究系统内物质代谢的方法^[6-8]。物质流分析遵循质量守恒定理, 因而可以在一系列流动过程中对特定物质进行追踪, 如金

收稿日期: 2020-09-18, 修订日期: 2021-01-07

基金项目: 澳门特别行政区科学技术发展基金项目(0011/2018/A); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515011757)。

作者简介: 汪中才, 男, 湖北黄石人, 硕士生, 主要研究方向为城市电子废弃物环境影响评价。E-mail: mayqueen2016@163.com

通讯作者: 宋庆彬, 男, 博士, 河北保定人, 副教授, 博导, 主要研究方向为城市节能减排策略和政策分析。E-mail: qbsong@must.edu.mo

2021年3月

属^[9-11]、非金属^[12]、塑料^[13,14]和化学品^[15]等。目前,国内外关于废弃制冷剂物质流分析的研究非常少^[16,17],本文应用物质流分析法明确家用空调产品中制冷剂流向,识别家用空调产品生命周期内的制冷剂释放特征和环境风险,从而为废弃空调制冷剂的管理、回收和安全处置提供科学依据。

澳门特区是中国两个特别行政区之一,位于珠江三角洲西岸,其经济结构以第三产业为主,本地几乎无制造业。因此,澳门特区所有空调产品均来自进口。1998—2019年,澳门特区累计进口家用空调112.10万台^[18],2015年空调保有量为305台/百户,远高于2018年中国内地城镇家庭109台/百户和日本家庭281台/百户的水平。然而,由于相关管理法规和处置能力相对滞后^[19],导致澳门特区制冷剂管理和处置仍处于起步阶段,大量制冷剂被释放到环境中,因而产生了一定的臭氧消耗潜势(Ozone Depletion Potential, ODP)影响和全球变暖潜势(Global Warming Potential, GWP)影响。因此,加强澳门特区空调产品制冷剂无序排放的有效管控正在成为澳门特区环境保护局的一个重要工作。然而,现时澳门特区仍缺少科学、有效的基础数据支撑制冷剂的有效管理。

基于此,本文构建了澳门特区家用空调制冷剂(Households Air-conditioning Refrigerants, HARs)物质流分析动态模型,旨在揭示1998—2019年间澳门特区家用空调制冷剂全生命周期阶段内的动态演变特征,从而为澳门特区家用空调制冷剂的科学管理提供参考。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 物质流分析框架

本文的研究框架如图1所示。考虑到《蒙特利尔议定书》^[20]对不同国家(地区)要求的差异性,本文将澳门特区的空调来源地分为两类:发达地区和发展中地区。本文的研究边界包括空调产品的全生命周期阶段,涉及生产阶段(将扩展到日本和中国内地)、使用阶段和废弃阶段。在空调产品的生产阶段,制冷剂会在填充过程中发生逸散,但主要发生在空调原产地。进入使用阶段后,空调制冷剂开始在澳门特区境内储存和释放。随着使用年限的

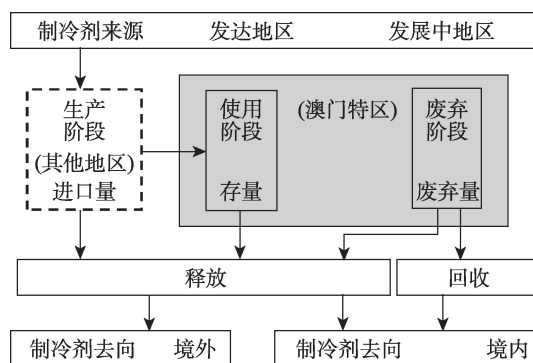


图1 澳门特区家用空调制冷剂物质流分析框架

Figure 1 Framework of material flow analysis for household air conditioning refrigerants (HARs) in Macao S.A.R.

增加,空调制冷系统密闭性逐渐降低,进而导致制冷剂的泄漏释放。当空调产品到达废弃阶段时,由于管理政策和处置措施不同,残余制冷剂或被回收或被释放至空气中。特别地,基于研究时间和制冷剂的替代情况,本文考虑的家用空调制冷剂类型涉及R22(CHClF_2), R410a(CH_2F_2 和 C_2HF_5 各占50%), R32(CH_2F_2)和R600a(C_4H_{10})4类。

2.2 核算方法

2.2.1 生产阶段

空调销售量是确定空调制冷剂进口量的关键参数,本文根据澳门特区统计数据库进出口数据估算澳门特区历年空调销售量^[18,21]。根据空调销售量、空调来源地占比、空调制冷剂类型和制冷剂填充量,结合公式(1)可计算空调产品生产阶段制冷剂的初始填充量。由于澳门特区本地数据的不可用性,本文假定1998年之前澳门特区居民使用家用空调产品为零。一般而言,空调产品生产阶段涉及的制冷剂包括以下两个部分:①制冷剂的初始填充量,该部分制冷剂会随产品进入使用地区。②组装过程中的释放量,仅发生在空调生产环节。

空调产品生产阶段制冷剂的初始填充量和组装过程中的释放量,计算公式如下所示:

$$I_y = \sum_p N_y \times F_c \times F_r \times F_p \times M \quad (1)$$

$$PE_y = I_{y,c1} \times f_{c1}^p + I_{y,c2} \times f_{c2}^p \quad (2)$$

式中: I_y 表示第 y 年澳门特区进口家用空调中制冷剂的量(kg); N_y 为第 y 年空调的销售量(台); F_c 代表空调进口来源地的占比(图2),其中 c 为 $c1$ 或 $c2$,

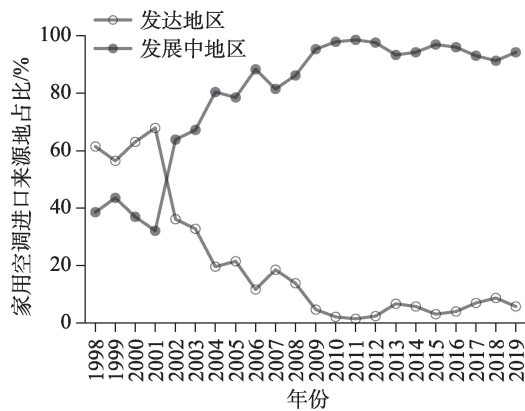


图2 1998—2019年澳门特区家用空调进口来源地占比

Figure 2 Classification of imports for household air conditioners in Macao S.A.R., 1998-2019

分别指代澳门特区家用空调进口来源地中的日本和中国内地; F_r 表示 r 型制冷剂的使用占比; F_p 为空调产品的功率关注度, p 为空调产品的功率(kW); M 表示空调的制冷剂填充量($\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1}$) (表1); PE_y 为生产阶段的制冷剂释放量(kg); $I_{y,c1}$ 和 $I_{y,c2}$ 为澳门特区家用空调制冷剂的进口量(kg),二者分别来自日本和中国内地; f_{c1}^p 和 f_{c2}^p 分别为日本和中国内地生产的家用空调在生产(P)阶段的制冷剂释放率^[22],二者的值分别为0.6%和0.2%。

2.2.2 使用阶段

使用阶段是空调生命周期中最长的阶段,鲜有研究集中于使用阶段制冷剂释放规律。基于居民调研和相关文献研究,本文假设澳门特区家用空调的平均使用年限为8年且服从正态分布,进而获得澳门特区家用空调产品使用寿命分布情况^[23]。公式(3)计算的是制冷剂的库存总量(未去除释放量),考虑了产品的使用寿命分布情况。公式(4)和公式(5)用来计算特定年份使用阶段澳门特区家用空调制冷剂释放量和制冷剂存量^[3]。公式(6)是计算历年制冷剂相对上一年的变化量。

$$\begin{bmatrix} TS_{y,1998} \\ TS_{y,1999} \\ \vdots \\ TS_{y,t} \\ \vdots \\ TS_{y,2019} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{y,1998} \\ I_{y,1999} \\ \vdots \\ I_{y,t} \\ \vdots \\ I_{y,2019} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1-\mu_{(1998,1998)} & & & & \\ & 1-\mu_{(1999,1998)} & & & \\ & \vdots & \ddots & & \\ & 1-\mu_{(t,1998)} & & 1-\mu_{(t,t)} & \\ & \vdots & & \vdots & \ddots \\ 1-\mu_{(2019,1998)} & 1-\mu_{(2019,1999)} & \cdots & 1-\mu_{(2019,t)} & \cdots & 1-\mu_{(2019,2019)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$UE_y = TS_{y,c1} \times f_{c1}^U + TS_{y,c2} \times f_{c2}^U \quad (4)$$

$$S_y = TS_y - UE_y \quad (5)$$

$$\Delta S_y = \begin{cases} S_y, y=1998 \\ S_y - S_{y-1}, y \geq 1999 \end{cases} \quad (6)$$

式中: TS_y 为使用阶段第 y 年空调制冷剂的库存总量(kg); $\mu_{(y)}$ 为空调的使用寿命分布; UE_y 为使用阶段第 y 年空调制冷剂的释放量(kg); f_{c1}^U 和 f_{c2}^U 为澳门特区产自日本和中国内地的家用空调在使用(U)阶段制冷剂的释放率^[3],其对应数值分别为3%和2%。 S_y 和 ΔS_y 分别为第 y 年制冷剂的存量(kg)和每年新增量(kg)。

2.2.3 废弃阶段

当空调进入废弃阶段(End-of-life, Eol)时,残留的制冷剂仍占很大的比重。一旦废弃空调的处置措施不当,就会造成严重的环境影响。公式(7)计算了空调制冷剂的废弃总量,公式(8)和公式(9)则计算了废弃阶段澳门特区家用空调制冷剂的释放量和回收量。

$$TO_y = \begin{cases} TS_y = 0, y=1998 \\ I_y - (TS_y - TS_{y-1}), y \geq 1999 \end{cases} \quad (7)$$

$$EE_y = TO_y \times (f_{Eol}^F \times f_r^F + f_{Eol}^{IF} \times f_r^{IF}) \quad (8)$$

表1 中国内地和日本家用空调制冷剂初始充注量

Table 1 Initial charge of household air conditioners in Mainland China and Japan

制冷剂类型	中国内地/ $\text{kg}^{[4]}$				日本/ $(\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1})^{[3]}$
	≤ 1 匹	1.5匹	2匹	≥ 3 匹	充注量
R22	0.3740	0.9600	1.5460	2.1320	0.25000
R410a (CH ₂ F ₂ 和C ₂ H ₂ F ₆ 各占50%)	0.3740	0.9600	1.5460	2.1320	0.25000
R32	0.3740	0.9600	1.5460	2.1320	0.17500
R600a	0.0244	0.0365	0.0487	0.0609	0.00973

2021年3月

$$O_y = TO_y - EE_y \quad (9)$$

式中: TO_y 表示第 y 年废弃空调中制冷剂总量(kg); I_y 和 TS_y 则分别为制冷剂的进口量和空调制冷剂的库存总量(kg); EE_y 为废弃阶段第 y 年空调制冷剂回收量(kg); f_{Eol}^F 和 f_{Eol}^{IF} 分别是废弃(Eol)阶段澳门特区家用空调正规和非正规处置的处置率; f_r^F 和 f_r^{IF} 代表澳门特区家用空调在正规和非正规处置措施下的制冷剂回收率; F 和 IF 代表正规和非正规两种处置方式; O_y 为废弃阶段制冷剂的释放量(kg)。特别地,由于当前澳门特区政府没有采取任何家用空调空调处置措施,澳门特区境内也没有可提供制冷剂回收服务的服务商,因而 1998—2019 年间澳门特区 f_{Eol}^F 和 f_r^F 均为零^[24]。

2.2.4 GWP 和 ODP 影响

将空调产品生产阶段、使用阶段和废弃阶段的制冷剂释放量累加并乘以对应制冷剂类型的 GWP 和 ODP 排放因子,即可得到空调全生命周期不同制冷剂的 GWP 和 ODP 影响。计算公式如下所示:

$$GWP_y = \sum_r (PE_y + UE_y + EE_y) \times I_r^{GWP} \quad (10)$$

$$ODP_y = \sum_r (PE_y + UE_y + EE_y) \times I_r^{ODP} \quad (11)$$

式中: GWP_y 和 ODP_y 分别表示制冷剂的 GWP 影响(千 t CO₂eq) 和 ODP 影响(kg CFC-11eq); I_r^{GWP} 和 I_r^{ODP} 分别为制冷剂的 GWP 和 ODP 排放因子(表 2); PE_y 、 UE_y 和 EE_y 是空调产品生产阶段、使用阶段和废弃阶段各自的制冷剂释放量(kg); y 和 r 为年份和

表 2 制冷剂的 GWP 和 ODP 排放因子

Table 2 Global warming potential (GWP) and ozone depletion potential (ODP) emission factors of refrigerants

制冷剂类型	ODP/kg	GWP/(CO ₂ eq·kg ⁻¹)
R22(CHClF ₂)	0.055	1810
R410a (CH ₂ F ₂ 和 C ₂ HF ₅ 各占 50%)	0.000	2100
R32(CH ₂ F ₂)	0.000	675
R600a(C ₄ H ₁₀)	0.000	20

制冷剂类型。

2.3 数据来源

本文所用数据主要来自澳门特区统计数据库、相关文献和行业报告等(表 3)。

澳门特区统计暨普查局数据显示,马来西亚、泰国、中国内地和日本是澳门特区家用空调的主要来源地^[18]。根据世界银行对于全球各经济体的统计数据,本文将澳门特区空调来源地分为发达地区和发展中地区。其中发达地区包括日本、韩国、新加坡、中国台湾、中国香港和美国,发展中地区则包括马来西亚、泰国、中国内地等其他经济体,二者占比如图 2 所示。

3 结果与分析

3.1 家用空调制冷剂进口、存量及释放量分析

3.1.1 制冷剂的进口量变化

图 3 展示了 1998—2019 年澳门特区家用空调制冷剂的进口量变化趋势。受家用空调市场需求影响,1998—2019 年间澳门特区家用空调制冷剂进口量增长趋势明显,但近年来趋于稳定,这表明澳

表 3 主要数据及来源

Table 3 Primary sources of data in this study

数据类型	数据来源	说明
空调销售量;空调进口来源比例;空调进口来源地分类	1998—2019 年澳门特区统计数据库 ^[18]	根据世界银行的公开数据,本文将澳门特区家用空调来源地分为发达地区(人均国民收入 ≥ 12536 美元)和发展中地区(人均国民收入 < 12536 美元)两类。同时,本文选择日本和中国内地分别作为上述两个分类的代表,主要考虑以下 2 点:①日本和中国内地分别在空调技术和空调制造方面的重要地位。②日本和中国内地品牌的空调在澳门特区空调市场的代表性
制冷剂使用比例;空调功率关注度;制冷剂填充量;制冷剂释放比例	文献[4]和行业报告 ^[25,26] ;中关村在线统计报告 ^[27] ;文献[4];政府间气候变化专门委员会报告 ^[22] 和文献[28]	由于缺乏澳门特区家用空调功率比例数据,本文选择了中国内地的数据作为替代
寿命分布;GWP 和 ODP 排放因子	文献[23,28];联合国环境署报告 ^[20] 和政府间气候变化专门委员会报告 ^[22]	根据文献调研及实地调研结果,假定澳门特区家用空调平均使用寿命为 8 年,上下浮动 2 年。并且,家用空调的寿命分布符合正态分布模型

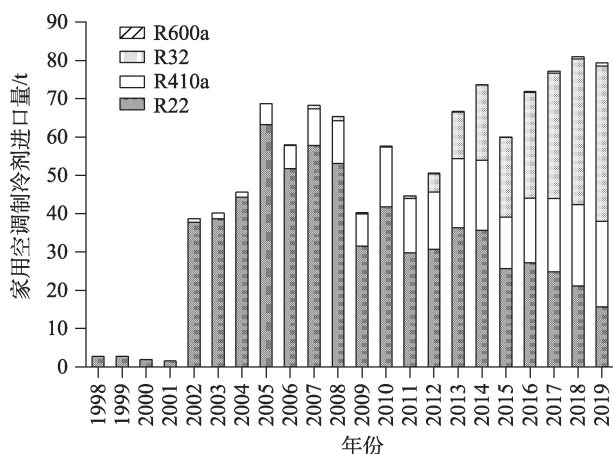


图3 1998—2019年澳门特区家用空调制冷剂的进口量

Figure 3 Imports of household air conditioning refrigerants (HARs) in Macao S.A.R., 1998-2019

澳门特区家用空调市场逐渐趋于饱和。1998年时,澳门特区家用空调制冷剂进口量仅为2.83 t,为研究范围的最低值,并且均为R22型制冷剂。此时R22制冷剂的淘汰计划尚未完成,仍是家用空调市场的主流选择。2018年澳门特区家用空调制冷剂进口量达到峰值水平86.47 t,但制冷剂类型已经转变为R32为主。2019年澳门特区家用空调制冷剂进口量比2018年略低,为79.39 t。从制冷剂的使用类型来看,R22制冷剂是澳门特区家用空调制冷剂服务期限最长的制冷剂类型。随着国际社会对制冷剂环保性能要求的不断提高,R410a和R32先后被作为R22的替代品逐步推向市场。1998—2019年,澳门特区进口R22制冷剂占比由100%逐步降低至20%。起初,国际社会忽视了R410a具有的较高GWP排放因子的事实,因此在R410a被投入市场后不久环保性能更高的R32也被投入市场。澳门特区首批使用R410a和R32制冷剂的家用空调产品分别于2001年和2006年出现,但R410a的进口占比并不高。2011年,澳门进口R410a达到历史峰值32%。2016年时,澳门特区进口R32制冷剂的总量超过R22制冷剂,成为占比最高的制冷剂类型。2016—2019年,澳门特区R32制冷剂的进口量占比由38%逐步提高至51%。

3.1.2 制冷剂存量变化

近20年间,伴随着家用空调在澳门特区广泛使用,其制冷剂存量也在不断增加,具体如图4所示。

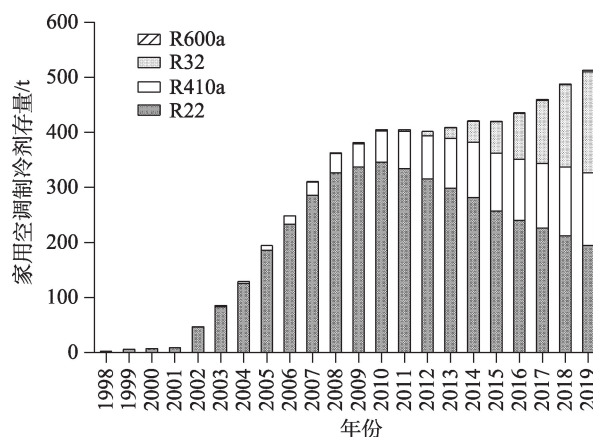


图4 1998—2019年澳门特区家用空调制冷剂的存量

Figure 4 Stocks of household air conditioning refrigerants (HARs) in Macao S.A.R., 1998-2019

1998—2010年为澳门特区家用空调器的快速普及期,因此家用空调制冷剂存量由2.77 t激增至405.02 t,年平均增速为70%。新装空调数量的不断增加是制冷剂不断累积主要原因,次要原因则是家用空调具有较长的使用寿命。在随后的2011—2019年,澳门特区家用空调开始进入缓慢增长期,制冷剂的存量增长趋势有所放缓。然而,由于人口和经济的快速增长,仍有新的家用空调市场需求产生,这使得澳门特区家用空调制冷剂存量仍保持约3%的年均增幅,且没有达到峰值的迹象。

从制冷剂类型看,澳门特区R22制冷剂存量已经在2010年达到峰值,为346.23 t。随后,由于R22制冷剂开始逐渐被限制生产和使用,澳门特区家用空调制冷剂存量中R22制冷剂开始出现明显的下降,占比由2010年的85%降低至2019年的38%,取而代之的是R410a和R32的增长。值得注意的是,尽管R22制冷剂自2010年起就已经被禁止生产和消费,但直至2019年澳门特区内仍有约194.72 t存量。这一结果表明,尽管源头处ODS的控制措施——限制R22的生产和消费已经完成,但是含ODS产品的使用阶段和废弃阶段的释放仍被严重忽视。

3.1.3 制冷剂释放量变化

澳门特区家用空调全生命周期内制冷剂的释放情况如图5a所示。1998—2000年,澳门特区家用空调使用情况还未完全普及,因而制冷剂释放水平较低;之后,随着澳门特区家用空调的使用范围逐渐扩大,澳门特区家用空调制冷剂的释放量开始激

2021年3月

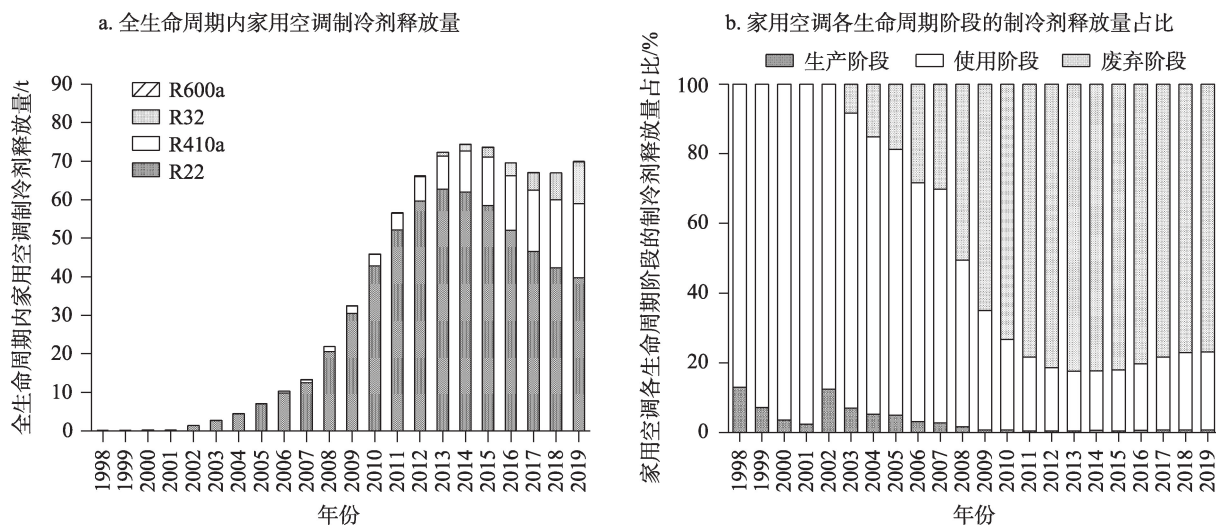


图5 1998—2019年澳门特区全生命周期内家用空调制冷剂的释放情况

Figure 5 Release of household air conditioning refrigerants (HARs) in Macao S.A.R. during the whole life cycle, 1998-2019

增,其规模由2001年的0.23 t逐渐增加至2014年的74.38 t。从制冷剂类型来看,1998—2019年,R22年平均占比高达89%。特别地,得益于国际社会的制冷剂淘汰计划,2019年澳门特区家用空调制冷剂的释放量中R22的占比已经降低至57%,并将继续保持下降趋势。然而,前述制冷剂存量当中的R22仍具有一定的规模,因此短期内R22不会完全消失。此外,R410a作为R22的替代品其释放水平也正逐年攀升,2019年R410a的释放量为19.25 t,约为R22释放量的一半,未来也需要重点关注。

就生命周期阶段而言(图5b),2004—2019年,废弃阶段的制冷剂释放量占比由8%逐步增加至77%,已经成为制冷剂释放最重要的阶段。生产阶段制冷剂的释放量一直处于较低的水平,平均占比已低至1%。使用阶段从最初的超过90%的贡献率,逐渐稳定在20%左右。

由图6可知,1998—2019年澳门特区家用空调制冷剂的境外释放量远低于境内释放量。由于澳门特区产业结构的特点,仅空调生产阶段的制冷剂释放量发生在境外,使用阶段和废弃阶段为境内释放量。1998—2019年间,澳门特区家用空调制冷剂境外释放量为0.28 t,仅为境内释放量的0.8%。显然,境外释放量相比境内释放量显得微乎其微。然而,境内释放量与澳门特区境外空调生产市场(尤其日本和中国内地)具有极强的关联性,这可为澳

门特区当前及未来的制冷剂重点控制类型提供参考。

3.2 典型年份的制冷剂物质流分析

在1998—2019年澳门特区家用空调制冷剂流量及存量分析的基础上,进一步绘制1998、2005、2012和2019年澳门特区家用空调制冷剂的物质流图(图7a-d)。

如图7a所示,1998年澳门特区家用空调制冷剂绝大多数从发达地区进口,而发展中国家的进口来源比例相对较低(39%)。这主要是经济和家用空调市场两方面因素共同作用的结果,此时澳门特区经

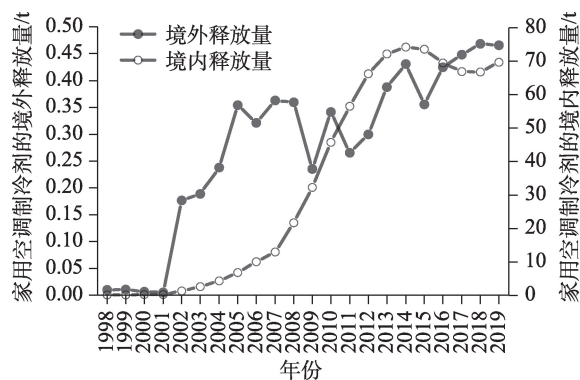


图6 1998—2019年澳门特区家用空调制冷剂的境外释放量和境内释放量对比分析

Figure 6 Comparative analysis of the household air conditioning refrigerants (HARs) release within and outside Macao S.A.R., 1998-2019

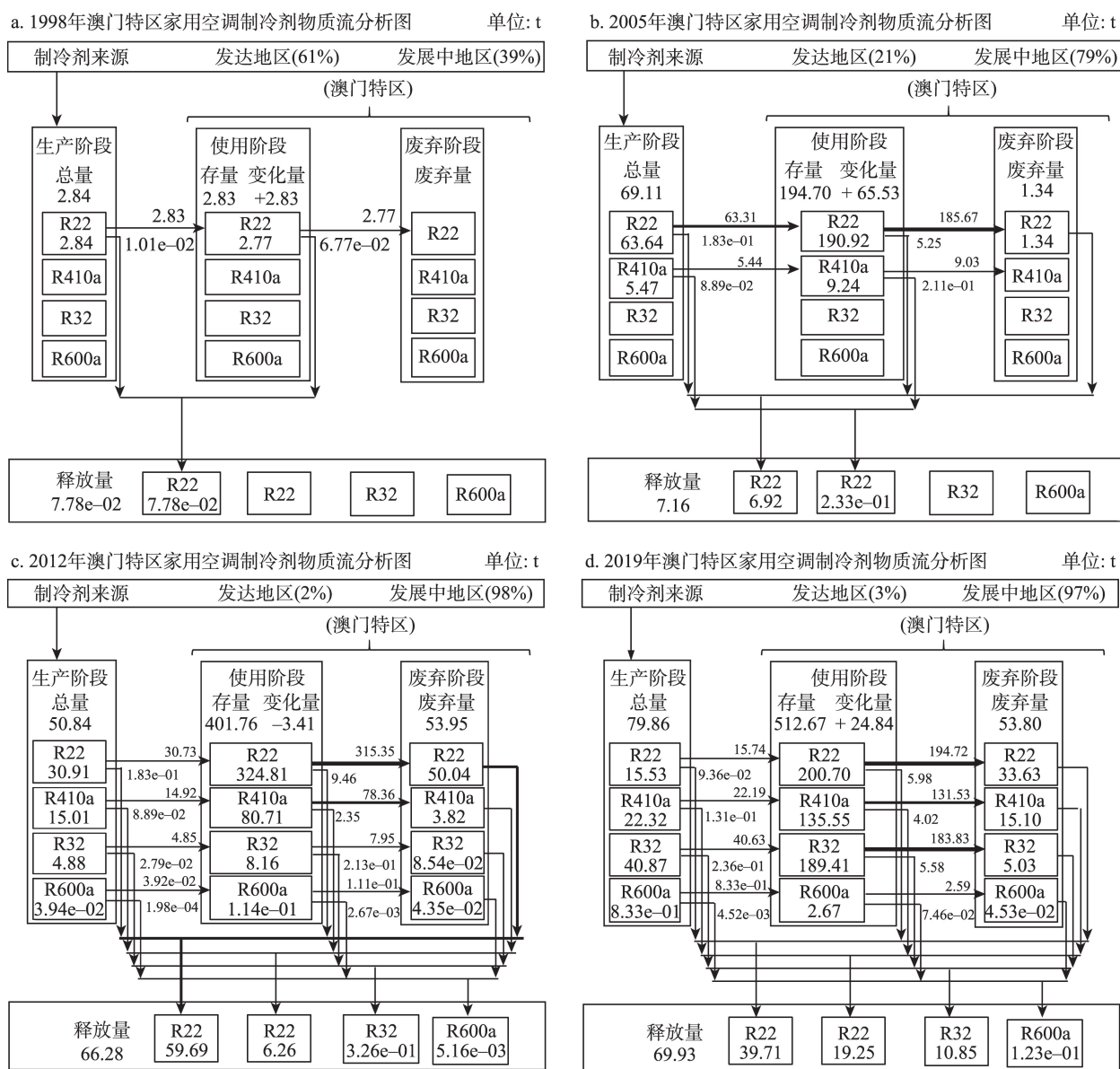


图7 1998—2019年澳门特区典型年份的家用空调制冷剂物质流

Figure 7 Material flow for household air conditioning refrigerants (HARs) in Macao S.A.R., 1998-2019

济水平较低且当时全球市场由发达地区的品牌商所控制,从而限制了澳门特区家用空调市场规模的壮大。1998年澳门特区家用空调制冷剂约有2.83 t的制冷剂进口,且均为R22,另约有0.01 t在生产阶段被释放至空调产地。同样的,1998年时澳门特区家用空调制冷剂的存量均为R22,总质量为2.77 t。与此同时,澳门特区家用空调制冷剂的释放量则大部分来自使用阶段,占比为88%。

2005年澳门特区家用空调制冷剂物质流情况如图7b所示。从图中可看出2005年澳门特区进口

制冷剂总质量为69.11 t,R22仍然是进口量最高的制冷剂,其中从发展中地区进口家用空调制冷剂的占比提高至79%,这得益于澳门特区的经济水平的提高以及中国内地空调行业的快速发展。与此同时,2005年制冷剂存量已经增加至194.70 t,但释放量仍然很低(约7.16 t)。相比1998年,澳门特区从发展中地区进口的家用空调制冷剂比例增加了18%。

2012—2019年间,随着发展中地区(如中国内地)空调行业的发展和技术水平的持续改善,澳门

2021年3月

特区的家用空调制冷剂97%来自发展中地区(如图7c和图7d所示)。在生产阶段,2012年和2019年澳门特区家用空调制冷剂的总量分别为50.84 t和79.86 t。然而,2012年澳门特区家用空调制冷剂的存量相比2011年下降了3.41 t。这表明2012年澳门特区家用空调制冷剂的进口量与释放量达到了微弱的平衡。在使用阶段,2012年时R22制冷剂的总量为324.81 t,比2019年高出38%。在废弃阶段,2012年和2019年均以R22为主,二者各自占比分别为93%和63%。2012年和2019年澳门特区家用空调制冷剂的释放量基本一致,然而,2019年R22占比进一步降低。

3.3 制冷剂释放的环境影响

1998—2019年澳门特区家用空调制冷剂释放量的ODP和GWP影响如图8所示。由图8a可看出澳门特区家用空调制冷剂释放导致的ODP影响全部由R22制冷剂产生,并在2013年达到峰值水平。2013—2019年间,澳门特区家用空调制冷剂释放量的ODP影响由3453.48 kg CFC-11eq降低至2183.90 kg CFC-11eq,呈现出明显的下降趋势,这主要由于R22制冷剂被逐步替代,释放量下降导致。未来该下降趋势仍将继续。

图8b呈现了1998—2019年澳门特区家用空调制冷剂的GWP影响。显然,以R22为主要来源的GWP影响自1998年以来持续增长,并在2014年达到峰值135.75千t CO₂eq。特别地,1998—2019年间R22制冷剂的GWP影响的平均贡献率约为89%。

2001—2019年间,R410a制冷剂的GWP影响由1.56 t CO₂eq逐步增加至40.4千t CO₂eq,这主要是由于《蒙特利尔议定书》对国际社会的制冷剂替代要求,使得R410a作为R22制冷剂的替代品得到广泛使用。2017—2019年,制冷剂的GWP影响大致维持在119.59 t CO₂eq的平均水平,其中R22与R410a的贡献率分别为65%和31%。未来,澳门特区家用空调制冷剂释放量的GWP影响将维持在当前水平,但是R22的贡献率将逐步下降。

4 讨论与结论

4.1 讨论

调研结果显示,由于缺乏有效的政策和措施,且没有正规的循环处置设施,澳门特区的家用空调制冷剂被随意释放到环境中,因此带来了较大的潜在环境风险。本文的研究结果显示,当前澳门特区的家用空调制冷剂废弃阶段的释放量占全生命周期阶段的比值约80%,已然成为澳门特区家用空调产品制冷剂释放的主要阶段。同时,考虑生产阶段和使用阶段的相对不可控性,废弃阶段制冷剂的有效回收和安全处置应该成为澳门特区政府缓解制冷剂环境风险的重点。

为贯彻“源头减废、分类回收”的固体废物处理政策,进一步解决澳门特区电子废物安全处置的压力,澳门特区环境保护局在“计算机及通讯设备回收计划”的基础上,自2020年1月1日起,进一步增加回收大型家电设备(包括冰箱、空调、洗衣机、电视机等),并且针对大家电设备更会提供免费上门

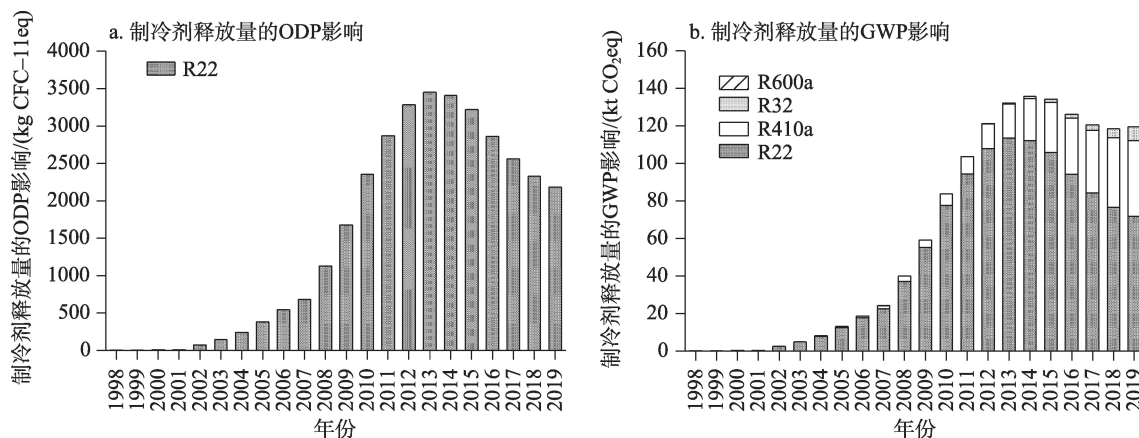


图8 1998—2019年澳门特区家用空调制冷剂的环境影响

Figure 8 Environmental impact of household air conditioning refrigerants (HARs) in Macao S.A.R., 1998-2019

回收服务。截至2020年8月31日,已有6131台废旧空调被回收并且送至正规处理企业进行循环处理,其中的制冷剂将被进行分类抽取,进而进行循环利用或安全处置。这是澳门特区政府采取的新举措,因此未来澳门特区空调制冷剂,尤其是废弃阶段的制冷剂释放将会得到一定的控制。此外,当前澳门特区仅有1家正规电子废物处理企业,涉及澳门特区所有电子废物的处置,由于场地限制,其处理能力明显不足,未来也需考虑如何提升其处置能力和技术水平。

4.2 结论

本文采用物质流分析方法,首次量化了1998—2019年澳门特区家用空调产品制冷剂的物质流特征,主要结论如下:

(1)1998—2019年间,澳门特区家用空调制冷剂的进口量累计1096.71 t,其中最主要的成分为R22。2010年澳门特区家用空调制冷剂中R22制冷剂存量达到峰值水平346.23 t,占当年制冷剂存量的86%。尽管澳门特区家用空调制冷剂进口的重点正由R22转为R32,但是由于澳门特区家用空调R22存量仍具有一定的规模,因此短期内R22类型制冷剂释放量不会完全消失。未来澳门特区家用空调制冷剂存量仍保持约3%的年均增幅,且R22和R32应当成为澳门特区废弃家用空调制冷剂环境影响管控的重点。

(2)澳门特区家用空调废弃阶段的制冷剂释放量贡献率约为80%,因而加强家用空调废弃阶段管理应该成为缓解制冷剂环境风险的重点。由于澳门特区存在产业结构的限制,澳门特区的家用空调制冷剂以境内释放量为主。为此,澳门特区政府应继续巩固和完善澳门特区废弃空调回收和处置措施,并进一步扩大和强化澳门特区现有处理企业的处置能力和技术水平。

(3)澳门特区家用空调制冷剂释放导致的ODP和GWP影响分别在2013年和2014年达到峰值,二者排放量分别为3.45 t CFC-11eq和135.75千t CO₂eq,未来澳门特区家用空调制冷剂的ODP和GWP影响将进一步降低。

受研究条件和方法限制,本文存在一些局限性可能会导致结果的不确定性:①由于澳门特区本地

数据的不可用性,因此假定1998年之前澳门特区居民使用家用空调产品为零,这会使得计算结果偏低。②澳门特区居民的生活方式和消费习惯与中国内地和日本不同,这会导致空调产品的使用寿命和制冷剂释放率与假设出现一些偏差。③由于缺乏澳门特区空调类型的比例数据,本文选择了中国内地的数据作为替代,这可能也会导致一些偏差。④诸如不同制冷剂类型的使用比例、制冷剂替代进程和废弃阶段家用空调的处理方式之类的假设也可能导致制冷剂流量结果的不确定性。

参考文献(References):

- [1] Velders G J M, Ravishankara A R, Miller M, et al. Preserving Montreal protocol climate benefits by limiting HFCs[J]. *Science*, 2012, 335(6071): 922–923.
- [2] Montzka S A, Dutton G S, Yu P F, et al. An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11[J]. *Nature*, 2018, 557(7705): 413–417.
- [3] Xue M Q, Kojima N, Machimura T, et al. Flow, stock, and impact assessment of refrigerants in the Japanese household air conditioner sector[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 586: 1308–1315.
- [4] Duan H B, Miller T R, Liu G, et al. A chilling prospect: Climate change effects of mismanaged refrigerants in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(11): 6350–6356.
- [5] Zhang N, Wang H Y, Gallagher J, et al. A dynamic analysis of the global warming potential associated with air conditioning at a city scale: An empirical study in Shenzhen, China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2020, 81: 106354.
- [6] 彭建, 王仰麟, 吴健生. 区域可持续发展生态评估的物质流分析研究进展与展望[J]. *资源科学*, 2006, 28(6): 189–195. [Peng J, Wang Y L, Wu J S. Progress and prospect of material flow analysis in the ecological assessment of regional sustainable development [J]. *Resources Science*, 2006, 28(6): 189–195.]
- [7] González-García S, Roma M, Moreira M T, et al. Environmental profile of the municipality of Madrid through the methodologies of urban metabolism and life cycle analysis[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102546.
- [8] Wang X J, Li Y X, Liu N Y, et al. An urban material flow analysis framework and measurement method from the perspective of urban metabolism[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120564.
- [9] 张安迎, 童昕, 曾现来. 中国报废汽车中铂族金属回收潜力估算[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(11): 4821–4830. [Zhang A Y, Tong X, Zeng X L. Recycling potentials of Platinum-group metals from

2021年3月

- end-of-life vehicle in China[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(11): 4821–4830.]
- [10] 卢浩洁, 王婉君, 代敏, 等. 中国铝生命周期能耗与碳排放的情景分析及减排对策[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 451–462. [Lu H J, Wang W J, Dai M, et al. Scenario analysis of energy consumption and carbon emissions in Chinese aluminum life cycle and emissions reduction measures[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1): 451–462.]
- [11] 董书恒, 逮承鹏, 邢冉, 等. 中国镁产业生态系统物质流与价值流的生命周期分析[J]. *中国环境管理*, 2019, 11(6): 50–56. [Dong S H, Lu C P, Xing R, et al. Life cycle analysis on material and value flows of magnesium industry ecosystem in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2019, 11(6): 50–56.]
- [12] 孙静亚, 韩厚锋, 张萍, 等. 基于物质流分析的我国磷资源开发利用研究[J]. *国土与自然资源研究*, 2020, (5): 68–71. [Sun J Y, Han H F, Zhang P, et al. Phosphorus cycling China based on material flow analysis[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2020, (5): 68–71.]
- [13] 蒋晓斌, 江健, 陈定江, 等. 中国乘用车塑料的动态物质流分析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(9): 4106–4114. [Jiang X B, Jiang J, Chen D J, et al. Dynamic material flow analysis of Chinese passenger car plastics[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(9): 4106–4114.]
- [14] 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.]
- [15] Gils J V, Posthuma L, Cousins I T, et al. Computational material flow analysis for thousands of chemicals of emerging concern in European waters[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122655.
- [16] Xue M Q, Kojima N, Zhou L, et al. Trade-off analysis between global impact potential and local risk: A case study of refrigerants[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 627–632.
- [17] Fang X, Yao B, Vollmer M K, et al. Changes in HCFCs emissions in China during 2011–2017[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(16): 10034–10042.
- [18] 澳门特别行政区统计暨普查局(DSEC). 澳门特别行政区对外商品贸易统计数据库 1998–2019[DB/OL]. (2020–06–15) [2021–01–30]. <https://www.dsec.gov.mo/EMTS.aspx>. [Statistics and Census Service (DSEC). Macau External Merchandise Trade Statistics Database 1998–2019[DB/OL]. (2020–06–15) [2021–01–30]. <https://www.dsec.gov.mo/EMTS.aspx>.]
- [19] 澳门特别行政区政府(GOM). 第62/95/M号法令: 就控制及减少使用可减弱臭氧层之物质制定措施[EB/OL]. (1995–12–04) [2020–03–28]. https://bo.io.gov.mo/bo/i/95/49/declei62_cn.asp. [Government of Macau S.A.R. Decree No. 62/95/M: Establishing Measures to Control and Reduce the Use of Substances That Can Weaken the Ozone Layer[EB/OL]. (1995–12–04) [2020–03–28]. https://bo.io.gov.mo/bo/i/95/49/declei62_cn.asp.]
- [20] United Nations Environment Programme(UNEP). The Montreal Protocol on Substances That Deplete The Ozone Layer[R]. Montreal: UNEP, 1987.
- [21] Miller T R, Duan H B, Gregory J, et al. Quantifying domestic used electronics flows using a combination of material flow methodologies: A US case study[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5711–5719.
- [22] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. IPCC, 2006.
- [23] Muller E, Hilty L M, Widmer R, et al. Modeling metal stocks and flows: A review of dynamic material flow analysis methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(4): 2102–2113.
- [24] 澳门特别行政区环境保护局(DSPA). 电子及电器设备回收计划[R/OL]. (2020–01–30) [2020–11–15]. https://www.dspa.gov.mo/richtext3.aspx?a_id=1506053006. [Environmental Protection Agency, Macau S.A.R (DSPA). Electronic and Electrical Equipment Recycling Program[R/OL]. (2020–01–30) [2020–11–15]. https://www.dspa.gov.mo/richtext3.aspx?a_id=1506053006.]
- [25] Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan (METI). Laws and Regulation for Fluorocarbons in Japan[R/OL]. (2015–08–20) [2021–01–07]. https://www.jraia.or.jp/english/icr/ICR2015_METI.pdf.]
- [26] Ministry of Ecology and Environment, China(MEE). Ozone Protection and Phase-out of HCFCs in China[N/OL]. (2016–09–28) [2019–03–28]. <http://www.ozone.org.cn/zlxz/wdxz/201609/P020191208417342445034.pdf>.]
- [27] 中关村在线. 中国家电市场分析[R/OL]. (2018–12–31) [2019–06–29]. <http://zdc.zol.com.cn/topic/871253.html>. [Zhongguancun Online. China Home Appliance Market Analysis[R/OL]. (2018–12–31) [2019–06–29]. <http://zdc.zol.com.cn/topic/871253.html>.]
- [28] 孙锌, 刘静茹, 杨东, 等. 家用空调碳足迹及其关键影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(4): 1054–1060. [Sun X, Liu J R, Yang D, et al. The carbon footprint of household air-conditioner and its key influence factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(4): 1054–1060.]

Dynamic evolution characteristics of refrigerant mass flow in household air conditioners: A case study of Macao S.A.R., China

WANG Zhongcai¹, SONG Qingbin¹, CAI Kaihan¹, LI Jinhui²

(1. Macao Environmental Research Institute, Macao University of Science and Technology, Macao 999078, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For decades, governments and the public have paid increasing attention to household air conditioning refrigerants (HARs) due to their huge environmental impacts. The Montreal Protocol restricts the use of ozone depleting substances (ODS) from the source but ignores the potential release risks during the life cycle of ODS products. Based on the material flow analysis (MFA) method, this study established a dynamic analysis framework for HARs in Macao S.A.R., China, and retrospectively quantified the characteristics of HARs in Macao S.A.R., China from a life cycle perspective during 1998-2019, revealing the trends of potential environmental releases of different refrigerant types over time. The results show that from 1998 to 2019, there was a significant increase in the import, stock, and release of HARs in Macao S.A.R., China, with the most dominant refrigerant type being R22 (CHClF₂), and the release of R22 also brings about a higher ozone depletion potential (ODP) effect and global warming potential (GWP) effect. From 1998 to 2019, the cumulative import of HARs was 1096.71 t, and the stock of HARs also increased from zero to 512.67 t with no sign of peaking in Macao S.A.R., China. In recent years, the contribution of HAR release from end-of-life stage accounted for up to 80% of the total HAR release and the contribution of HARs from the use stage is about 20%. Although the ODP effect and GWP effect of HARs have peaked in 2013 and 2014, respectively, the stock is still relatively large. The results of this study point out that Macao S.A.R., China, should continue to consolidate the recovery measures and improve the related disposal measures of waste air conditioners in the future. In addition, further increase of the disposal capacity of existing treatment enterprises and strengthening of the technical level of recovery and recycling of waste refrigerants are indeed. The results of this study can be a valuable reference for the proper management of HARs in Macao S.A.R., China, and provide a methodological support for other cities to account for life-cycle refrigerants in household air conditioners.

Key words: household air conditioner; refrigerants; material flow analysis; life cycle analysis; Macao S.A.R., China