基于物质流方法的中国铅资源使用存量研究

羊建波，程晋阳，常　青，赵会颖
（中国恩菲工程技术有限公司，北京　100037）

［摘　要］　中国是铅资源消费大国，但铅资源保障程度并不高，再生铅作为未来铅资源供应来源，科学计算其使用存量可为铅资源供应提供重要的数据支撑。本文搭建了铅物质流动态分析模型，采用两种方法核算铅使用存量：采用自上而下方法剖析了 1949—2018 年中国社会经济系统中铅元素输入量、流出量和存量的动态演化，核算了铅使用存量；采用自下而上方法分析了最为重要的铅酸蓄电池各类型的载体保有量、电池容量的变化情况，并计算 2018 年铅酸蓄电池的铅使用存量，进而推算该年铅使用存量。结果显示，自上而下方法计算 2018 年的铅使用存量为 2 320 万 t，自下而上方法为 1 892 万 t，两种方法计算结果的差异率为 14%，整体可靠。铅使用存量主要累积于铅酸蓄电池中，累计消费占比约为 71%。我国应该制定相关政策和法规，完善再生铅回收体系，优化再生铅企业与电池生产企业布局，逐步提高再生铅利用率。

［关键词］　铅资源；物质流方法；使用存量；自上而下；自下而上；铅酸蓄电池；再生铅利用率
［中图分类号］　F416.32　　［文献标志码］　A　　［文章编号］　1672-6103(2021)05-0097-08
DOI：10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.05.019

物质流分析（MFA）是基于系统分析方法和质量守恒原理[1-2]，在一定时空范围内，通过对社会经济活动中物质的投入和产出进行量化分析，来评价物质流动（消耗、累积）的关系[3]。物质流分析是循环经济的重要技术支撑[4]。在物质流分析中，涉及流量和存量等关键术语。存量是物质在流动过程中积累和储存的物质质量，使用存量是指商品进入社会领域使用系统中的存量。

铅是重要的有色金属材料，主要用于铅酸蓄电池、合金、建材、颜料等，中国精铅产量和消费量均居世界第一位。据有色金属工业协会数据，2018 年中国再生铅产量为 224.5 万 t，占精炼铅产量的 45.4%，低于世界平均 57%。摸清铅的使用存量有助于判断未来再生铅的市场规模，为铅的回收利用政策制定或产业发展规划提供重要的数据支撑，未来再生铅将成为中国铅资源主要的供给来源。

目前物质流方法已被广泛运用到 Pb[5-7]、Cu[8]、Fe[9]等物质流动分析中，但国内铅物质流量分析仅限于某个产品、某个阶段或某个区域，国家层面暂无长时间尺度量化铅资源使用存量的数值，本文的重点是量化中国建国以来铅资源的使用存量。

1　理论方法

下文将采用自上而下和自下而上两种方法计算建国以来铅物质在社会使用系统中的蓄积量，即铅资源的使用存量。

1.1　自上而下

自上而下方法是通过物质的流入量和流出量的差值计算出某一特定年进入社会使用系统中的物质存量，再逐年累加，得到特定时间段内某物质的使用存量。

建立物质流分析模型，首先定义系统边界和产品分类，限定研究目标在时间和空间上的界限。横向时间界定为 1949—2018 年；鉴于开采阶段铅物质损失很小，本文纵向时间界定为铅冶炼、铅加工、铅终端产品使用、废料回收阶段；空间边界定义为中国大陆。此模型研究范围是所有含铅商品，包括铅精

［收稿日期］2021-04-12　［修订日期］2021-05-20
［录用日期］2021-05-25　［出版日期］2021-10-28
［作者简介］羊建波（1981—），江苏靖江人，博士，工程师，从事矿业经济研究工作。
［基金项目］科技部国家重点研发项目“复杂铅基多金属固废协同冶炼技术与大型化装备”（2019YFC1907300）。
［引用格式］羊建波，程晋阳，常青，等. 基于物质流方法的中国铅资源使用存量研究[J]. 中国有色冶金，2021，50(5)：97－104.

矿、精炼铅、铅合金、铅材、铅化工品和铅终端产品。

如果将整个系统边界内的铅物质当做一个蓄水池,则整个国家层面的铅物质流出量、损失量、库存量、使用存量之和应当等于铅的流入量,详见式(1)。

$$F^{\text{input}} + F^{\text{import}} = F^{\text{output}} + F^{\text{export}} + F^{\text{loss}} + F^{\text{stock}} \quad (1)$$

式中:F^{input}、F^{import}、F^{output}、F^{export}、F^{loss}、F^{stock}分别是指铅物质流某一环节或整个国家界面的总体铅物质流的物质流入量、进口量、流出量、出口量、损失量和库存量。

根据式(1),可以得出我国某一年的铅物质流出量、存量和流入量等式,详见式(2)。

$$S_t + E_t + L_t + D_t + R_t + I'_t = S_{t-1} + P_t + I_t + I'_{t-1} \quad (2)$$

式中:t 为年份;S 为铅物质的使用存量,其中 S_t 为 t 年末使用存量,S_{t-1} 为 t 年上年末使用存量;L 为铅物质的损失量;D 为铅产品在使用过程中的耗散量;R 为铅物质的库存量;P 为国内铅精矿所含铅量;I 为进口商品的含铅量;I' 为回收的再生铅产量;E 为出口商品的含铅量。

将式(2)变形得到式(3),可以得到我国某一年的铅物质使用存量。

$$S_t = S_{t-1} + P_t + I_t + I'_{t-1} - (E_t + L_t + D_t + R_t + I'_t) \quad (3)$$

1.2 自下而上

自下而上的方法是基于系统内包含该物质的不同服务单元或终端产品的数量和服务单元中该物质的单位含量等数据,将其相乘并累加的存量。铅的主要消费领域为铅酸蓄电池,自下而上即从消费端测算铅酸蓄电池中的铅使用存量。

铅酸蓄电池按照用户和用途分为四类,起动电池、动力电池、工业电池(UPS 电池和储能电池归为工业电池)。第 t 年铅酸蓄电池的使用存量($S_t^{battery}$)可按照式(4)计算。

$$S_t^{battery} = \sum_i^4 S_{i,t}^{battery} = \sum_i^4 \sum_j U_{i,j,t} D_{i,j,t} \quad (4)$$

式中:$U_{i,j,t}$ 是第 t 年 i 类电池用户 j 的数量和规模(对于起动电池而言,即为摩托车、机动船、拖拉机、机动车等各种类型内燃机车辆的保有量;对于动力电池而言,即为电动自行车、电动三轮车、电动汽车等电动提供动力车辆的保有量;对于 UPS 电池而言,即为通信基站、电厂、银行、邮局等用户的数量;对于储能电池而言,即为新能源发电装机容量);$D_{i,j,t}$ 是第 t 年 i 类电池单位用户 j 铅酸蓄电池用量。第 t 年铅酸蓄电池中的铅使用存量(S_t)可按式(5)计算。

$$S_t = S_t^{battery} M_{i,t} = \sum_i^4 \sum_j (U_{i,j,t} D_{i,j,t}) M_{i,t} \quad (5)$$

式中:$M_{i,t}$ 是第 t 年使用中的 i 类单位容量铅酸蓄电池中平均铅含量(t/kVAh)。

2 计算结果

2.1 自上而下

2.1.1 贸易中铅物质流量

含铅商品按种类分为原料、初级产品和终端产品,原料包括铅精矿和精铅,初级产品为铅材、铅合金和含铅化工品等,终端产品主要为铅酸蓄电池。贸易过程中含铅商品的铅物质流量由含铅商品的实物量和含铅系数两者确定。

含铅系数根据含铅产品的相关标准[10-18]、材料成分等参数采取加权平均计算而得(表 1)。含铅商品的实物量数据来自于 UN Comtrade 和有色金属工业协会。由于 1992 年前贸易体量小,为了图表美观,取 1992—2018 年数据。

表 1 含铅商品的含铅比例

含铅商品	铅精矿	精铅	铅材	其他铅合金	铅锑合金
含铅比例	55%	99.99%	95%	35%	93% ~95%

含铅商品	含铅化工品	铅金属制品	铅废碎料	铅酸蓄电池	
				单位质量占比/%	单位产品含铅量/(t·kVAh^{-1})
含铅比例	85%	30%	80%	69.5 ~73	0.019 ~0.030

1992—2018 年,铅金属进口量总体大于出口量,净进口量为 190 万 t。1992—2006 年为净出口,出口产品以精炼铅为主,进口以铅精矿为主,铅金属净流出量为 278 万 t。从 2007 年开始,铅精矿进口量增加,铅金属从净出口变成了净进口。2007—2018 年,进口以铅精矿为主,出口以铅酸蓄电池为

主，含铅产品中铅金属由净出口 13.8 万 t 逐渐转为净进口 24.2 万 t，铅金属净流入量为 458 万 t，详细情况见图 1。

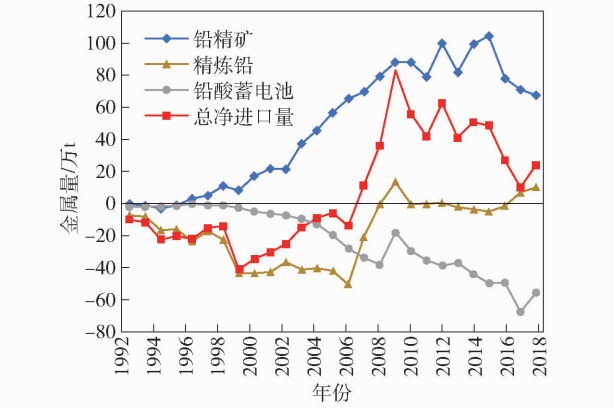

图 1　1992—2018 年含铅产品净进口量

（数据来源：UN Comtrade、有色金属工业协会）

2.1.2　铅的损失量

在铅精矿冶炼过程、精铅加工制造阶段、含铅产品使用阶段都会产生一定量的废渣、废尘、废气、废水等含铅污染物，最终排入外部环境，造成铅物质损失，下文分三个阶段分析铅在不同阶段的损失量。

冶炼阶段包括原生铅和再生铅冶炼，结合铅精矿产量、进口量数据和铅冶炼技术经济指标，1949—2018 年累计铅物质损失量为 394 万 t，原生铅冶炼阶段为 303 万 t，再生铅冶炼阶段为 91 万 t。

铅酸蓄电池是精炼铅的主要加工产品。参照《电池工业污染物排放标准（GB30484—2013）》和河南某企业调研数据，起动铅酸蓄电池、工业铅酸蓄电池和动力铅酸蓄电池铅的损失率分别为 5%、4.4% 和 4.8%，据此计算出 2018 年铅酸蓄电池加工阶段铅物质损失量为 14 万 t，累计铅物质损失量为 288 万 t。对于两种常见的铅合金-铅锑合金，参照《排污手册》数据，铅锑合金的铅损失率为 1%，铅钙合金、铅铝合金的铅损失率为 2%，据此计算出 2018 年铅合金铅物质损失量为 0.5 万 t，累计量为 22 万 t。由于铅材压延和锡材类似，铅物质损失参考《排污手册》中锡材的产污系数，铅材加工损失率为 2%，据此计算出 2018 年铅物质损失量为 0.2 万 t，累计量为 12 万 t。综上，加工制造环节中铅物质损失主要集中于铅酸蓄电池生产，1949—2018 年铅酸蓄电池铅累计损失量为 288 万 t，约占总量的 92%，铅合金为 22 万 t，铅材为 12 万 t。

含铅产品进入使用环节后，因其使用功能不同，在社会经济系统中的流向也各不一样。一类是散失性产品，即产品一旦投入使用便难以回收的产品，如含铅焊料、含铅化工产品等；另一类是非散失性产品，具有较高回收价值，如铅酸蓄电池、铅材。对于散失性含铅产品，计入当年铅损失量。2018 年，使用阶段散失性铅物质损失量为 29 万 t，1949—2018 年使用阶段累计损失量为 1 024 万 t。

1949—2018 年，在冶炼过程、加工制造阶段、含铅产品使用阶段铅物质累计损失量分别为 394、322 和 1 024 万 t，1990—2018 年的铅物质损失量情况见图 2。

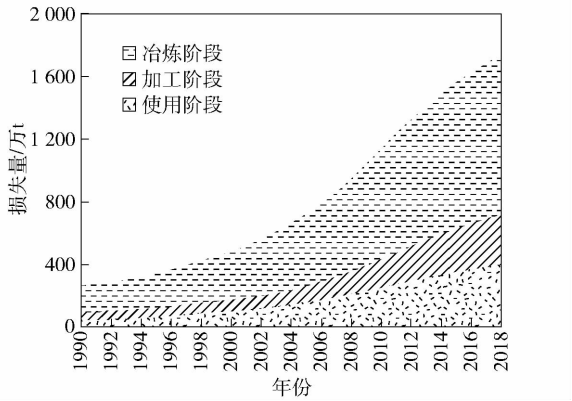

图 2　1990—2018 年不同阶段铅的累计损失量

2.1.3　铅精矿所含铅量

铅精矿包括自产铅精矿和进口铅精矿。1949—2018 年，自产铅精矿含铅金属累计量为 4 073 万 t，净进口铅精矿含铅量为 1 283 万 t，铅精矿含铅量共计 5 356 万 t。其中，净进口铅精矿含铅量已在贸易铅物质流量中计算。

2.1.4　库存量

每年生产的精炼铅不能全部即时消费形成存量，据世界金属统计局（WBMS）数据，2018 年底中国精炼铅的库存量为 123 万 t。

为了保证电解工序的正常生产，电解槽内会放置粗铅阳极板，10 万 t 规模的铅电解车间，装满电解槽需要约 13 000 块阳极板，折合 3 850 t 铅。2018 年电解槽内铅“库存量”约为 20 万 t。

电池生产企业为了预防供货中断的风险，铅锭库存量一般为 10 ~ 15 d 的生产量。2018 年铅酸蓄电池产量为 18 123 万 kVAh，耗铅量约为 400 万 t，电池生产企业铅锭库存量约为 20 万 t。同理，电池销

售商、电动车销售商、机动车销售商和回收站也有约10～15 天的存货，折算铅库存量约为 40 万 t。

综上，2018 年铅金属库存量为 203 万 t。

2.1.5 铅的使用存量

基于式(3)，选择 1949 年为基点年份，其消费量为次年的初始存量。计算得出 1949—2018 年中国铅使用存量为 2 320 万 t。其中，流入端包括自产铅精矿 4 073 万 t、净进口铅金属量 190 万 t，流出端包括冶炼阶段损失量、加工阶段损失量和使用阶段损失量，流出铅存量分别为 394 万 t、322 万 t 和 1 024 万 t；库存量包括精炼铅库存量 123 万 t、含铅产品库存量 80 万 t。

2.2 自下而上

2.2.1 起动电池

2000—2018 年起动电池载体——主要类型内燃机车辆的保有量变化如图 3 所示。

摩托车在经历了十几年快速发展后，2013 年保有量达到峰值，约为 1.3 亿辆。2013 年开始，传统摩托车受汽车、电动车替代明显，城市受“限摩”影响，摩托车保有量缓慢下滑，2018 年交管网数据显示保有量为 8 700 万辆，考虑到约有 1/5 没上牌，实际保有量约为 1.1 亿辆。

机动车随着市场需求不断增加，其中小型载客汽车保有量快速增加，由 2000 年的 620 万辆增至 2018 年 2 亿辆，年均增速为 21%。载货汽车保有量同步变化，大中型客车的需求增加明显，农村汽车市场对轻型载货汽车需求也有较大增长，但中型、微型客车保有量有所下降。

受铁路和公路运输快速发展的影响，机动运输船保有量缓慢下降，从 2000 年的 18.5 万艘降至 2018 年的 12.6 万艘；机动渔船的保有量则逐年上升，从 2000 年的 46 万艘增至 2018 年的 416 万艘，但近年增幅放缓，2018 年同比增速仅为 0.2%。

拖拉机主要用于农村市场，2008 年保有量达到峰值 2 022 万辆，之后增速缓慢下降，2018 年为 2 310 万辆，年均增速仅为 1%。小型拖拉机总体上已趋饱和，大中型拖拉机增长更显强劲。

起动电池各载体的单位电池容量受人们消费行为的变化影响，50CC < 排量 < 250CC 摩托车电池规格为 96 VAh，排量为 1.5～3 L 机动车的电池规格为 720 VAh，中型货车电池规格为 2 880 VAh，大型客车电池规格为 3 600 VAh。

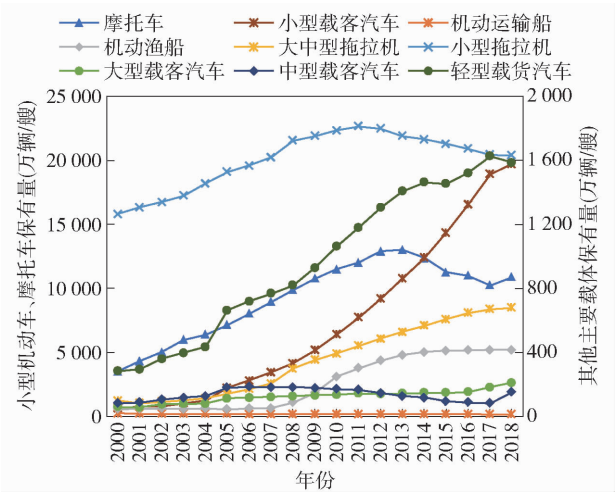

图 3 2000—2018 年起动电池载体保有量

(数据来源：国家统计局、汽车工业协会、交管网)

起动电池用户保有量和结构的变化，直接导致铅酸蓄电池及其中铅的使用存量变化。2000—2018 年，起动电池中铅使用存量从 96 万 t 增至 479 万 t，年均增加 9.9%。小型载客汽车保有量的快速增加是整个起动电池铅使用存量增加的主要驱动力，详细情况见图 4。

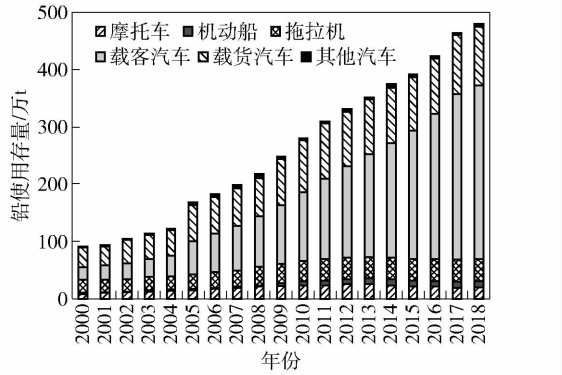

图 4 2000—2018 年起动电池铅使用存量

2.2.2 动力电池

2000—2018 年电动自行车、电动三轮车和低速电动汽车的保有量见图 5。

因铅酸蓄电池技术的突破，电池容量越来越大，电动自行车从 2004 年开始迅速增长，2018 年保有量达到 2.5 亿辆，目前市场已逐渐趋于饱和。

2008 年开始，随着网络购物的兴起，电动三轮车被作为一种便捷交通工具用于快递和物流行业，同时为了迎合农村市场的需求，电动三轮车增长势头迅猛，年均增长率约为 40%，2018 年保有量约为

5 500 万辆。

为了满足城镇及农村市场的需求，近几年低速电动汽车迎来爆发式增长，2018 年保有量约为 700 万辆，同比增长约 40%。

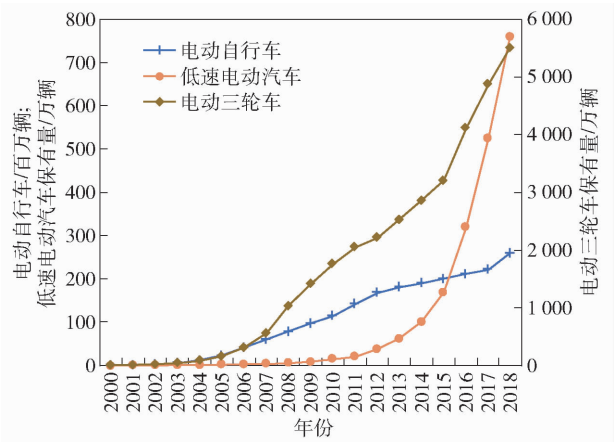

图 5　2000—2018 年动力电池载体保有量

（数据来源：自行车协会、网络资料[19]）

电动自行车电池容量从初期的 240 Wh（2 × 12 V × 10 Ah）到如今的 960 Wh（4 × 12 V × 20 Ah），电动三轮车电池规格为 1 920 Wh（4 × 12 V × 40 Ah），低速电动汽车为 4 800 Wh（5 × 12 V × 80 Ah）。

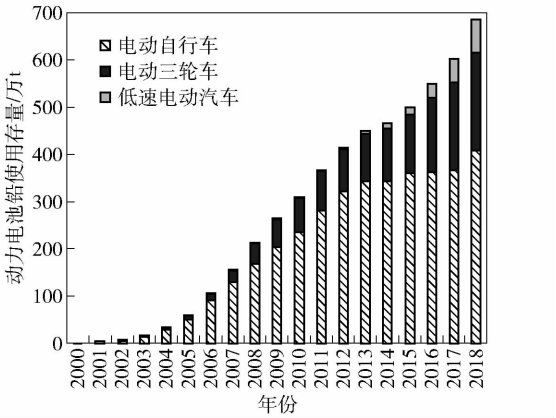

图 6　2000—2018 年动力电池铅使用存量

2000—2018 年动力电池铅使用存量从 2 万 t 增加到 686 万 t，年均增加 47%。电动自行车中动力电池占整个动力铅酸蓄电池 60% 以上，电动三轮车中动力电池占 30%。低速电动汽车目前保有量仍相对较低，城市主要为老年代步车，其铅酸蓄电池容量存量仅占 10%（图 6）。

2.2.3　UPS 电池

UPS 电池广泛用于社会经济系统中多个行业和领域，主要用于通信基站、银行和邮政系统。2000—2018 年 UPS 电池主要用户数量如图 7 所示。邮政网点数量呈缓慢增长趋势，2018 年则增至 27.5 万个，年均增长率为 11%。银行网点数量 2018 年增至 22.8 万个，年均增长率为 3.7%。通讯基站的增长尤为明显，据《通信运营统计公报》，2018 年全国通信基站的数量为 648 万个，2000 年基站数量仅为 5 万个，年均增速高达 34%。

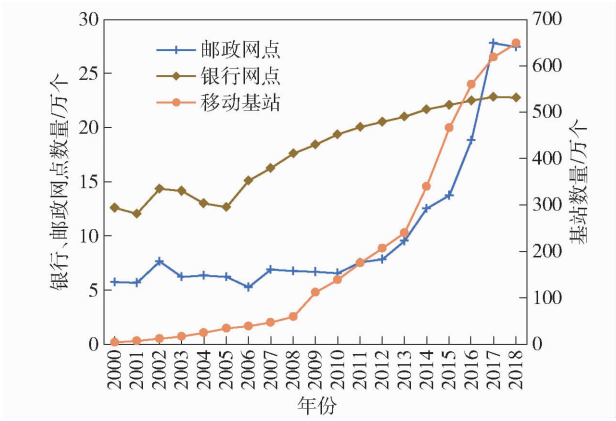

图 7　2000—2018 年 UPS 电池载体用户数量

（数据来源：国家统计局、工信部）

移动基站单个微型基站电池容量以 500 ~ 1 000 Ah（一组或者两组，电压 48 V）居多。城市内微型基站数量相对较多，但其电池容量低，中大型基站电池容量较高，以两组 500 Ah 为主。

2000—2018 年，UPS 铅酸蓄电池铅使用存量从 5 万 t 增至 312 万 t，年均增加 25%。其中，通信基站 UPS 铅酸蓄电池铅使用存量从 3 万 t 增至 306 万 t，年均增加 31%，其占比从 37.2% 增至 98.6%，银行系统中的 UPS 电池则从 23% 下降到 0.9%，详细情况见图 8。

2.2.4　储能电池

随着中国再生能源战略的实施，风电和光伏累积发电装机容量在 2008 年以后开始指数式增长，光伏发展速度尤甚（图 9）。2000—2018 年，风电累计装机容量年均增长 56%，已达 18 426 万 kW；光伏累计装机容量年均增长 171%，达 17 463 万 kW。

新能源的离网发电系统以及大型的并网发电系统都需要储能电池，电化学储能电池以锂离子电池和铅酸（炭）电池为主。铅蓄电池主要分布在用户侧领域，所占比重超过 90%。据《2019 年储能产业白皮书》数据，2018 年电化学储能装机容量为 107.3

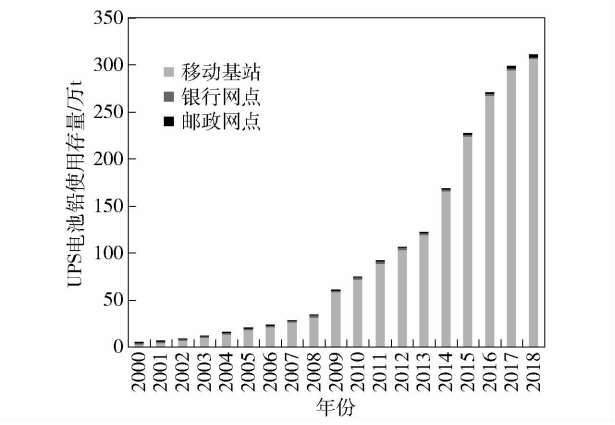

图 8 2000—2018 年 UPS 电池铅使用存量

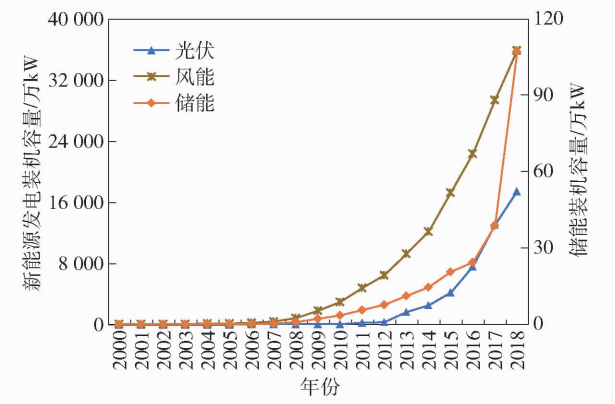

图 9 2000—2018 年风能、光伏、储能电池装机容量

（数据来源：中国电力企业联合会）

万 kW，锂离子电池市场份额为 70.7%，铅酸蓄电池为 27.2%，与风能、光伏的装机容量配置比约为 0.003。

2009—2018 年，储能铅酸蓄电池铅使用存量从 0.1 万 t 增至 3 万 t，年均增长 44%，相对于其他类型铅酸蓄电池，储能铅酸蓄电池铅使用存量几乎可忽略不计。

综上，2000—2018 年，铅酸蓄电池铅使用存量从 99 万 t 增至 1 480 万 t（图 10），年均增加 16.5%。2018 年，起动、动力、UPS 和储能铅酸蓄电池铅使用存量占比分别为 32.4%、46.4%、21.1% 和 0.2%。载客汽车起动电池、电动自行车用动力电池和通信基站 UPS 电池占比合计为 68.9%。

2.2.5 铅的使用存量

采用自下而上的方法很难覆盖所有行业和领域的铅酸蓄电池，如计算机、数据中心、医疗设备和实验室等 UPS 电池、列车备用电源等，难以被一一统计，因此本文在计算的基础上乘以系数 1.1，折算后的铅使用存量为 1 628 万 t。

鉴于精炼铅的消费结构变化，本文参考铅酸蓄电池、铅材和铅合金消费累积量占精炼铅消费累积量的占比，推算铅材和铅合金的使用存量。2018 年铅酸蓄电池铅消费累积量占精炼铅消费累积量的 71%，铅材和铅合金为 11.3%，铅化工产品为 9.7%，反推出 2018 年铅的使用存量约为 1 892 万 t。

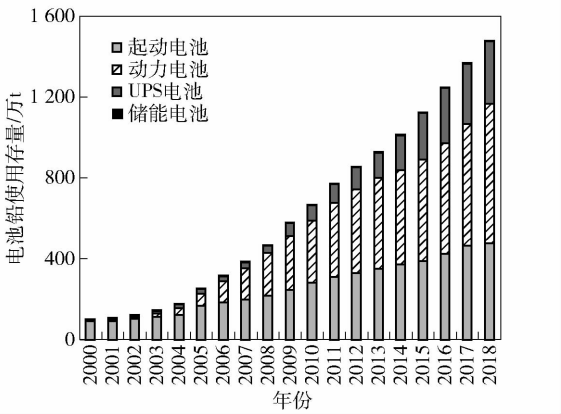

图 10 2000—2018 年自下而上方法核算的铅酸蓄电池铅使用存量

2.3 综合结果

表 2 对比了自下而上和自上而下两种方法计算的铅使用存量结果。自下而上方法计算的均值为 940 万 t，自上而下为 1 071 万 t，标准变异系数分别为 0.59 和 0.64，说明自下而上方法有较好的精度。两种不同方法的计算结果 T 检验 T 值绝对值为 0.68，F 检验 P 值为 0.50，两组数据无显著差异，整体差异率为 14%，结果整体可靠。

两种计算方法结果差异一方面是源于数据的选择，本文数据来源相对广泛，官方数据相对较少，主要来自于文献和网页，数据质量整体不高；另一方面是相关参数选取，由于调研样本相对较少，参数的选取往往以偏概全，进而影响计算结果。

3 结论与建议

本文利用物质流分析（MFA）方法，对 1949—2018 年中国铅资源使用存量进行一系列研究，自上而下方法计算结果为 2018 年中国铅使用存量为 2 320 万 t，自下而上分析计算结果为 1 892 万 t，两组数据结果整体无显著差异，结果总体可靠。

表 2　自下而上和自上而下方法计算结果比较

万 t

年份及指标	铅使用存量统计结果	
	自下而上	自上而下
2001	269	349
2002	280	330
2003	292	358
2004	328	395
2005	437	440
2006	507	493
2007	615	566
2008	686	647
2009	841	790
2010	927	944
2011	1 065	1 117
2012	1 174	1 353
2013	1 265	1 542
2014	1 372	1 736
2015	1 513	1 908
2016	1 673	2 002
2017	1 746	2 174
2018	1 892	2 320
平均值	940	1 071
标准差	547	702
标准变异系数	0. 59	0. 64

铅使用存量主要累积于铅酸蓄电池中，累计消费占比约为 71%。约 2 000 万 t 的铅使用存量为再生铅提供了充足的原料。

鉴于相对较低的再生铅回收率，应完善再生铅回收体系，制定相关政策和法规，严打非法处置铅酸蓄电池行为，淘汰非法生产、技术落后、环境污染严重的三无企业，落实生产者责任延伸制，改变废旧铅酸蓄电池行业回收无序的状况，优化再生铅企业与电池生产企业布局，保障正规企业的原料供应，逐步提高再生铅利用率。

［参考文献］

［1］ FISCHER-KOWALSKI M. Society's metabolism: the intellectual history of materials flow analysis, part I, 1860—1970 [J]. Journal of Industrial Ecology, 1998, 2(1): 61 - 78.

［2］ FISCHER-KOWALSKI M, HÜTTLER W. Society's Metabolism: the intellectual history of materials flow analysis, part I, 1860 - 1970 [J]. Journal of Industrial Ecology, 1998, 2(4): 107 - 136.

［3］ 燕凌羽. 中国铁资源物质流和价值流综合分析[D]. 北京：中国地质大学(北京), 2013.

［4］ 李贵奇. 基于生命周期思想的环境评估模型及其在铝工业中的应用[D]. 长沙：中南大学, 2011.

［5］ 郭学益,钟菊芽,宋瑜,等. 我国铅物质流分析研究[J]. 北京工业大学学报,2009,35(11):1554 - 1561.

［6］ 曾润,毛建素. 2005 年北京市铅的使用蓄积研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(8): 49 - 52.

［7］ 刘巍. 中国铅酸蓄电池行业清洁生产和铅元素流研究[D]. 北京：清华大学(北京),2016.

［8］ 王俊博,范蕾, 李新, 等. 基于物质流方法的中国铜资源社会存量研究[J]. 资源科学,2016,38(5): 939 - 947.

［9］ 李强峰,王高尚, 成金华,等. 1949 ~ 2015 年中国铁存量分析[J]. 中国矿业,2017,26(12):111 - 116, 142.

［10］ 全国有色金属标准化技术委员会. 铅锭：GB/T 469—2005[S]. 北京：中国标准出版社, 2005.

［11］ 全国有色金属标准化技术委员会. 铅及铅锑合金管：GB/T1472—2005 [S]. 北京：中国标准出版社, 2006.

［12］ 全国有色金属标准化技术委员会. 铅及铅锑合金板：GB/T1470—2005[S]. 北京：中国标准出版社, 2006.

［13］ 全国有色金属标准化技术委员会. 铅及铅锑合金棒和线材：YS/T 636—2007[S]. 北京：中国标准出版社, 2008.

［14］ 全国有色金属标准化技术委员会. 保险铅丝：GB 3132—1982[S]. 1983.

［15］ 全国有色金属标准化技术委员会. 电缆护套用铅合金锭：GB/T 26011—2010 [S]. 北京：中国标准出版社, 2011.

［16］ 全国有色金属标准化技术委员会. 铸造轴承合金锭：GB/T 8740—2013[S]. 2014.

［17］ 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会化学助剂分技术委员会. 三盐基硫酸铅：HG/T 2340—2005[S]. 2006.

［18］ 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会化学助剂分技术委员会. 二盐基亚磷酸铅：HG/T 2339—2005[S]. 2006.

［19］ 低速电动车销量连年攀升,市场需求量大[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/286308318_100227382. (2019 - 01 - 03)[2021 - 03 - 26].

Research on the in-use stock of lead in China based on substance-flow method

YANG Jian-bo, CHENG Jin-yang, CHANG Qing, ZHAO Hui-ying

Abstract: China is a major lead consumer, but its degree of security for lead resources is not high. The scientific calculation of the in-use stock of secondary lead as a supply for future lead demand can provide significant data sup-

port for lead resource supply. In this paper, a dynamic analysis model of lead material flow is built, with two methods used to verify in-use lead stock: one is the top-down method to analyze the lead inflow, outflow and stock in China's socio-economic system from 1949 to 2018 to calculate the in-use lead stock; the other is the bottom-up approach to analyze the changes of the most important types of carriers and battery capacity of lead-acid batteries, and calculate the in-use lead stock of lead-acid batteries in 2018, from which the in-use lead stock of the year can be calculated. Results show that the in-use lead stock of 2018 is calculated as 23 200 000 t by the top-down method, and 18 920 000 t by the bottom-up method. The difference rate between the two methods is 14%, which is reliable in general. The in-use lead stock mainly lies in lead-acid batteries, and the cumulative consumption accounts for approximately 71%. Relevant policies and regulations should be formulated in China to improve the recovery system of secondary lead, optimize the layout of secondary lead enterprises and battery producers, and gradually increase the utilization rate of secondary lead.

Key words: lead resources; substance-flow method; in-use stock; top-down; bottom-up; lead-acid batteries; utilization rate of secondary lead

(上接第 90 页)

data from different sources, low utilization rate of solid waste resources, insufficient coordinated utilization among various types of solid waste, which greatly hinder the progress of Beijing-Tianjin-Hebei coordinated and integrated construction. In this paper, based on the principles and targets of solid waste harmlessness, quantity reduction and recycling, the feasibility is analyzed on the coordinated utilization of solid waste from various sectors involved in industry, agriculture and urban areas in Beijing-Tianjin-Hebei Region. The overall idea and solution is proposed for the cross-industry and cross-region coordinated utilization of solid waste. The analysis suggests that, based on the solid waste database establishment, high proportion of coordinated utilization, high added-value products development, industrial materials application and new technologies & equipment for ultra-low off-gas emission shall constitute the support for the solution. The objective is to form an integrated demonstration base for solid waste coordinated treatment, optimize its economic operation indicators, explore new business operation modes, and accelerate industrial progress. In addition, all sectors of society shall, from the macro perspective of the integration of Beijing-Tianjin-Hebei region, actively formulate and implement new standards and regulations, and form a coordinated management system, to realize the cross-industry and cross-region coordinated utilization of solid waste in the Beijing-Tianjin-Hebei industrial, agricultural and urban areas, and solve the problem of solid waste treatment by industries and by regions.

Key words: solid waste in industrial; agricultural and urban areas; coordinated utilization; integration of Beijing-Tianjin-Hebei region; database; business operation mode; coordinated management system; resource and environment; resource utilization rate