



## 中国医疗核磁共振设备资源化评估

秦晋川, 陈姝媛, 周松山, 黄银, 黄荣, 曹文星, 陈梦君<sup>✉</sup>, 舒建成, 江海银

西南科技大学固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 绵阳 621000

**摘要** 随着我国医疗器械行业市场不断扩大, 医疗设备更新换代, 导致医疗电子设备报废量逐年增加, 但对其报废量及资源回收潜力尚不清晰。因此, 以核磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 设备为例, 通过 Logistic 模型、灰色预测模型、Weibull 分布+市场供给 A 模型对 MRI 设备的百万人均保有量、销售量和报废量进行预测, 并对报废的 MRI 设备进行可资源化评估。据预测, 我国 MRI 销售量将从 2023 年的 2 251 台增长到 2032 年的 5 160 台, 复合年均增长率达 8.6%, MRI 百万人均保有量将达到 32 台。2023—2033 年, 我国 MRI 设备的年报废量将从 1 476 台增长至 3 240 台, 累计报废总量可达 287 200 t。其中, 钕铁硼磁铁累计可回收量为 9 606 t, 铌钛合金累计可回收量为 125 700 t; 铝、铁、线路板及导线、玻璃纤维增强环氧树脂、铜、低碳钢以及不锈钢的可回收量依次递减, 分别为 40 400、36 200、29 800、17 700、9 700、9 500 以及 9 100 t。研究结果可为报废医疗电子设备回收政策的制定及其产业发展提供参考。

**关键词** 报废医疗电子设备; 核磁共振成像; 灰色预测模型; 市场供给 A 模型; 资源化利用

报废医疗电子设备被欧盟《Waste Electrical and Electronic Equipment Directive (电器及电子设备废料指令)》(简称 WEEE 指令) 列为第 8 类报废电子电器设备。研究显示, 医疗设备中铁、铜、铝等各类金属约占 16%<sup>[1]</sup>, 具有极高的回收价值, 极可能是未来“城市矿山”的核心之一, 成为再生有色金属新来源<sup>[2-4]</sup>。然而, 目前国内外在此方面的研究极少。我国对于报废医疗设备的研究多集中在其报废量、报废率<sup>[5]</sup>和报废评估管理体系<sup>[6-7]</sup>等方面, 缺乏废弃医疗电子设备回收的研究, 对其资源性和回收潜力尚不清楚, 也鲜有企业开展废旧医疗设备的回收处置<sup>[8]</sup>。

核磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 是利用核磁共振现象制成的一类医学检查成像设备, 已成为目前主要的医疗电子设备之一。由于在医疗行业的高利用率, MRI 设备市场发展迅速。由图 1 可知, 2015—2020 年, 中国 MRI 设备增长量仅次于北美地区。截至 2020 年, 中国 MRI 设备保有量达 17 751 台。然而, 庞大的人口基数, 导致 2020 年中国百万人均保有量不足 8 台, 远远落后于世界发达国家。近年来, 随着我国医疗卫生水平的提高、MRI 技术的发展和设备更新换代加快, MRI 将迎来退役潮。

MRI 设备主要由主磁体、梯度磁场、射频线圈、计算机系统和其他辅助设备 5 部分构成, 如图 2 所示。根据主磁体的不同, MRI 设备可分为永磁型 MRI 和超导型 MRI, 分别由钕铁硼材料和铌钛合金组件制成。其中, MRI 设备的钕铁硼材料重量高达 700~3 000 kg<sup>[9]</sup>, 相比于发电机、硬盘驱动器, 单位产品含有的永磁材料更丰富。这些钕铁硼永磁材料主要含有稀土元素钕 (20%~30%)、硼 (1%) 和铁<sup>[10]</sup>, 被广泛用于计算机、电机、核磁共振仪、磁悬浮列车等高科技领域, 具有极高的回收价值<sup>[11]</sup>。由此可见, 报废的 MRI 设备是宝贵的二次稀土和贵重金属资源。因此, 利用灰色预测模型和市场供给 A 模型等, 对 2023—2033 年间 MRI 设备的销售量和报废量进行预测, 评估其资源回收潜力, 为医疗电子垃圾的处理提供参考, 为构建和完善医疗电子垃圾处理体系提供依据。

收稿日期: 2023-10-21; 录用日期: 2024-02-29

第一作者: 秦晋川 (2000—), 男, 硕士研究生, q1442370313@163.com ✉通信作者: 陈梦君 (1981—), 博士, 教授, E-mail: kyling@swust.edu.cn

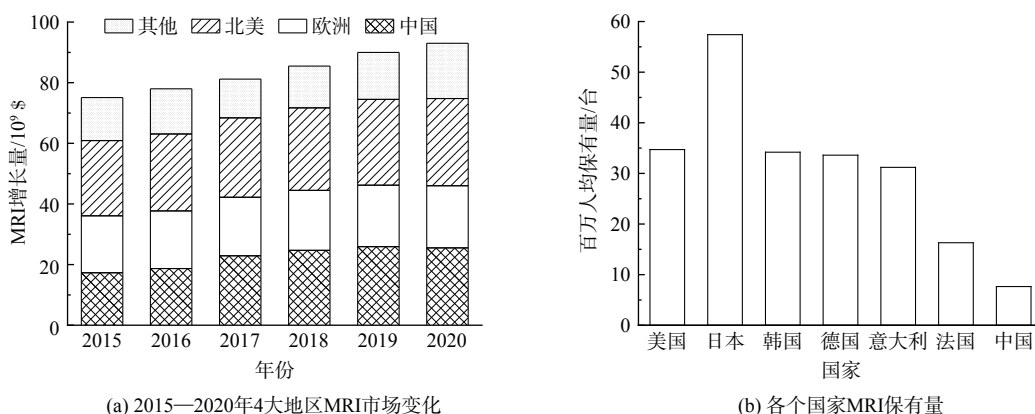


图 1 全球 MRI 现状

Fig. 1 Global MRI status

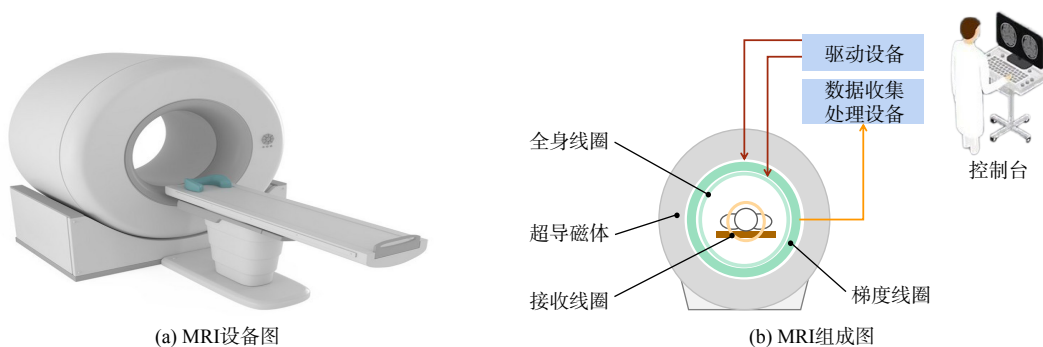


图 2 MRI 设备图及其组成图

Fig. 2 MRI equipment diagram and its composition diagram

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

研究数据源于国家统计局<sup>[12]</sup>、经济合作与发展组织 (organization for economic co-operation and development, OECD) 数据库<sup>[13]</sup> 等官方网站、相关文献资料以及医疗行业的相关报告<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 MRI 保有量模型

Logistic 模型是一种常见的非线性拟合曲线, 广泛应用于电子产品的保有量估算以及人口预测<sup>[16-17]</sup>。如图 3 所示, 电子产品的拥有量一般遵照“S”型曲线增长规律, Logistic 模型按照不同时间点百万人均保有量与百万人均保有量最大之比可分为 4 个阶段: 当比值小于 0.2 时, 该产品处于投入生长期; 当比值在 0.2~0.8 之间, 处于加速生长期; 当比值大于 0.8, 该产品处于减速生长期; 当产品达到保有量顶峰, 处于平衡点<sup>[18]</sup>。2020 年我国每百万人口 MRI 设备拥有量不足 8 台, 仍然处于投入生长期, 随着医疗行业的发展, 将经过加速增长、减速增长阶段, 并最终达到平衡点阶段。

Logistic 模型表达式如式 (1)、(2)。

$$\frac{dF}{dt} = aF(1-F) \quad (1)$$

$$F = \frac{q_t}{q_m} \quad (2)$$

式中:  $q_t$  为  $t$  年市场上百万人均保有量;  $q_m$  为市

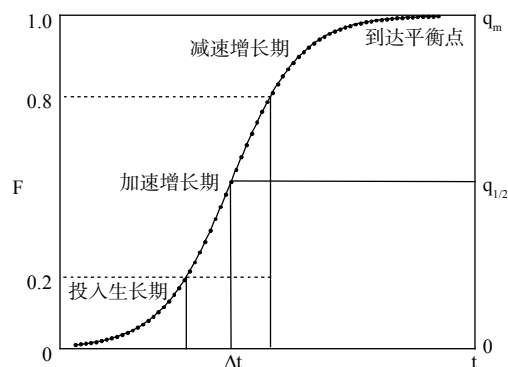


图 3 Logistic 模型曲线图

Fig. 3 Logistic model graph

场允许的最大百万人均保有量； $F$  为  $t$  年市场百万人均保有量与最大百万人均保有量之比； $a$  为常数。解得表达式如式 (3)。

$$F = \frac{1}{1 + e^{-(b+at)}} \quad (3)$$

当 MRI 设备的  $\ln(F/1-F)$  与时间  $t$  存在线性关系时，即可使用 Logistic 模型对 MRI 设备保有量进行预测。

### 1.3 MRI 销售量预测

灰色模型可通过少量的、不完全的信息，建立灰色微分预测模型 GM(1, 1)，对事物发展规律作出模糊性的长期描述<sup>[19]</sup>，能够在样本数据少的情况下实现较高精度的拟合，具有“小样本，信息差”的特征。由于 MRI 可参考的销售量数据相对较少，研究通过灰色系统理论模型，对 MRI 的销售量进行预测。基于 2014—2022 年 MRI 年销售量建立模型，预测 2023—2032 年每年 MRI 的销售量。

表 1 为 GM(1, 1) 模型的预测精准水平，据此对预测模型进行精度评价，保证模型的可靠性和预测结果的准确性。

表 1 GM(1, 1) 模型的预测精准水平  
Table 1 Forecast accuracy level of GM(1,1) model

预测精度等级	方差比
极好	<0.35
合格	<0.5
勉强合格	<0.65
不合格	≥0.65

### 1.4 MRI 寿命分布

MRI 设备寿命周期一般为 10~12 年，但使用环境和频率的差异会导致提前损坏或者使用寿命延长等情况。目前，研究者多采用 Weibull 对电子电器产品寿命进行分析，如 ISLAM 与 HUDA<sup>[20]</sup> 将其用于 16 种未受监管的废弃电子设备的寿命分析；KASTANAKI GIANNIS<sup>[21]</sup> 利用三参数 Weibull 分布函数分析了欧洲 27 国的废弃汽车电池寿命；TIAN 等<sup>[22]</sup> 将 Weibull 分布应用于 LED 产品的寿命分析；HE 等<sup>[23]</sup> 将应用动态物质流法和 Weibull 分布分析废旧手机的产生量。而 MRI 作为医疗电子设备，与上述研究对象具有类似的特性。因此，选用 Weibull 分布分析 MRI 设备每一年不同批次投入使用的产品报废概率。Weibull 概率密度函数、Weibull 累积概率函数如式 (4)、(5) 所示。

$$P(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-(x/\alpha)^\beta} \quad (4)$$

$$F(x) = 1 - e^{-(x/\alpha)^\beta} \quad (5)$$

式中： $x$  为 MRI 设备寿命，单位年， $x>0$ ； $\beta$  是形状参数， $\alpha$  是比例参数。

### 1.5 MRI 报废量模型

常用的报废量预测模型有：市场供给 A 模型、斯坦福模型、保有量系数分析模型等。其中，斯坦福模型适用于手机这类更新换代较快的电子电器产品。而保有量系数分析模型需要良好的保有量数据支持，且报废比例需要借助行业专家的判断<sup>[24]</sup>。由于医疗电子设备 MRI 拥有较长寿命期限、缺少报废比例依据，通过市场供给 A 模型预测其报废量将更为准确<sup>[25]</sup>。本研究结合市场供给 A 模型和医疗电子设备的 Weibull 概率分布，以每年不同批次设备报废比例的报废量之和作为每年设备的报废量。

市场供给 A 模型表达式如式 (6)。

$$Q_w = \sum_i S_i P_i \quad (6)$$

式中： $Q_w$  为某年的废旧电子产品产生量，台； $S_i$  为从该年算起  $i$  年前的产品销售量，台； $P_i$  为  $i$  年前所销售的产品过  $i$  年废弃的百分比， $i$  为产品实际使用年限。

## 2 结果与讨论

### 2.1 MRI 保有量预测

2013—2020 年，我国 MRI 百万人均保有量从 3.13 台增长至 7.65 台，复合年均增长率达到 11.8%，

如图 4。目前,我国医院数量为 36 976 家,平均每万人拥有医疗机构 0.26 家。相比之下,日本医院数量为 8 205 家,CT 设备百万人均保有量达到了 110 台,MRI 设备百万人均保有量为 58 台,平均每万人拥有医疗机构 0.65 家,每家医院拥有 CT 设备 1.69 台,MRI 设备 0.89 台。因此,以日本为参考,假设平均每万人拥有医疗机构 0.65 家,且每家医院 MRI 设备参考 CT 设备数量为 2 台,则共需要 183 526 台,百万人均保有量为 130.2 台。考虑后续医疗行业的发展,设 MRI 设备百万人均保有量极大值为 160 台,即  $q_m$  为 160。根据 2013—2020 年我国百万人均保有量数据,得到时间  $t$  与  $\ln(F/1-F)$  关系:以 2013 年为起点,设  $t=0、1、2、3、\dots、7、\dots$  ( $i=2013、2014、2015、\dots、2020、\dots$ ) 得到回归直线如图 5,回归方程、每年百万人均保有量方程如式 (7)、(8)。

$$\ln \frac{F}{1-F} = 0.1321t - 3.8323 \quad (7)$$

$$q_t = \frac{160}{1 + e^{-(3.8323 + 0.1321t)}} \quad (8)$$

式中:  $a$  为 0.132 1,  $b$  为 -3.832 3,  $R^2$  为 0.97。结果表明该回归直线的拟合度较高 ( $R^2$  越接近 1,则回归直线与各观测点越接近,即拟合度越高)。

如图 4,2013—2020 年,百万人均保有量预测值从 3.39 台增长至 8.62 台,复合年均增长率达到了 12.4%,与实际值基本吻合,模型总体效果较好。

Logistic 模型预测百万人均保有量变化趋势如图 6。在 2032 年,我国 MRI 设备行业将结束投入生长期,进入加速增长期,百万人均保有量将达到 32 台,超过欧盟平均水平;2032—2053 年,我国 MRI 设备百万人均保有量将处于加速生长期,百万人均保有量将达到 137 台;2053—2077 年,为减速生长期。2077 年,我国 MRI 百万人均保有量将达到最大值的 99%,百万人均保有量为 159 台,趋于稳定。

### 2.2 销售量与报废量预测

2014—2022 年 MRI 设备销售量与灰色模型预测结果如表 2。2014—2022 年,我国 MRI 销售量从 1 146 台增长至 2 391 台,复合年均增长率达 8.51%;灰色模型预测 2014—2022 年,我国 MRI 销售量从 1 146 台增长至 2 359 台,复合年均增长率达 8.35%。模型方差比为 0.2103,最大相对误差绝对值为 6.411%,表明灰色模型预测精准水平较高,总体预测效果好。

图 7 是灰色模型预测 2014—2032 年的 MRI 设备销售量变化趋势。结果显示, MRI 设备销售量将从 2023 年的 2 251 台增长到 2032 年的 5 160 台,复合年均增长率达 8.6%。目前,市场主要有超导型 MRI 和

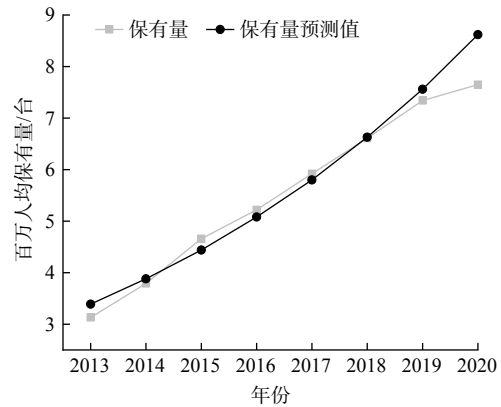


图 4 2013—2020 年百万人均保有量与预测值

Fig. 4 2013—2020 million per capita holdings and forecast

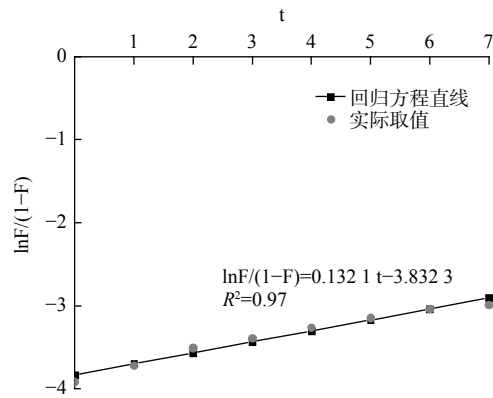


图 5 回归直线方程

Fig. 5 Regression linear equation

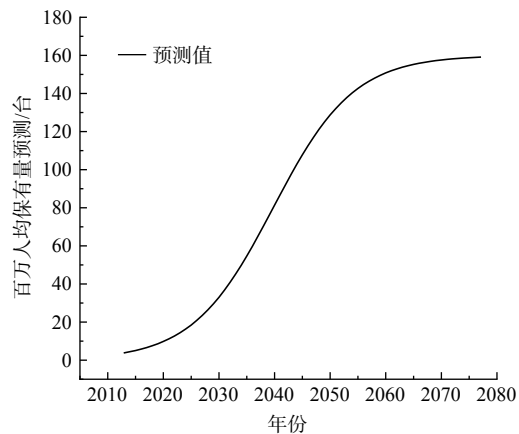


图 6 MRI 的保有量预测

Fig. 6 Prediction of MRI availability

永磁型 MRI 两种类型。由于永磁型 MRI 性能及技术的不足，其市场占比将从 2014 年的 33% 降低至 2030 年的 3.7%。目前，超导型 MRI 的市场比例已达到了 86%，并在未来市场比例将不断升高，到 2032 年市场占比将超过 95%。因此，2014—2032 年，永磁型 MRI 将从 378 台降低至 144 台，而超导型 MRI 将从 768 台增长至 5 015 台，复合年均增长率达 10.38%。

MRI 设备 Weibull 分布参数  $\beta$  形状系数为 7.6，参数  $\alpha$  为 6.9<sup>[26]</sup>。MRI 报废年限与 Weibull 概率密度函数及累积分布函数如图 8(a) 所示。MRI 设备第 3 年和第 9 年报废率分别超过 1% 和 99%，即 MRI 的寿命分布主要集中在 3~9 年。估算统计第 3~9 年报废量，报废率主要集中在使用后的 6~8 年，占报废率的 87.11%。2023—2033 年 MRI 设备报废量如图 8(b)，2023—2033 年我国 MRI 设备年报废量将从 1 476 台增长至 3 240 台，复合年增长率为 7.4%。其中，永磁型将从 385 台减少至 222 台，超导型将从 1 091 台增长至 3 018 台。由于超导型 MRI 市场占比不断扩大，其报废量呈现逐年增加的趋势，复合年增长率为 9.7%，高于整体水平。

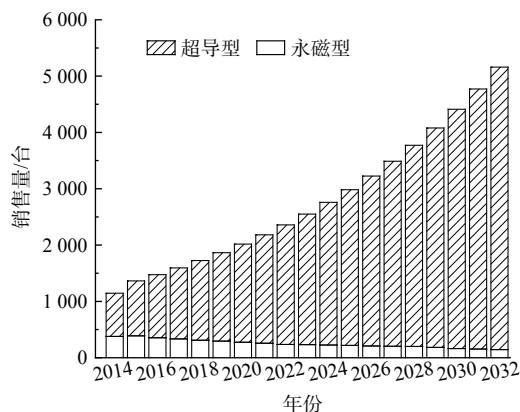
### 2.3 资源利用量

每台 MRI 重量一般为 10~13 t。假设超导型 MRI 重量为 11.5 t、永磁型 MRI 的重量为 12 t，则钕铁硼磁体重量为 3 t，铈钛合金重量为 5.8 t，以此与其他 MRI 设备中的材料含量见表 3<sup>[1]</sup>。2023—2033 年 MRI 设备资源利用如图 9。2023—2033 年，我国 MRI 设备累计报废的总重量达 287 200 t。永磁型 MRI 钕铁硼材料可回收量将从 2023 年的 1 155 t 减少至 2033 年的 666 t，累计可回收量达到了 9 606 t。其中，每年可回收的稀土元素从 2023 年的 231~346.5 t 降低至 2033 年的 133.2~199.8 t。通过与

表 2 2014—2022 年 MRI 设备销售量与模型预测结果对比  
Table 2 Comparison of sales volume and model forecast results in 2014—2022

年份	实际销售量/台	模型预测销售量/台	相对误差/%
2014	1 146	1 146	0
2015	1 291	1 364	5.606
2016	1 391	1 475	5.996
2017	1 704	1 595	-6.411
2018	1 838	1 725	-6.171
2019	1 932	1 865	-3.449
2020	1 898	2 017	6.284
2021	2 136	2 181	2.115
2022	2 391	2 359	-1.361

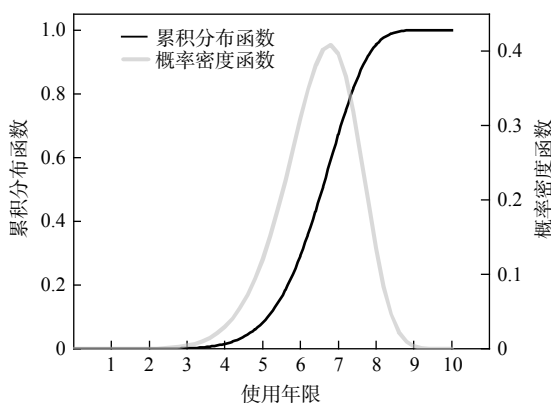
注：市场情况数据来源西南证券



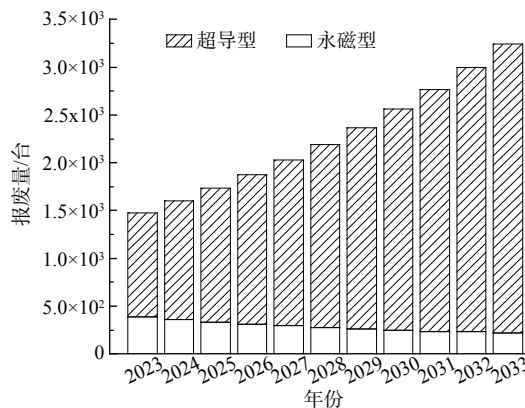
注：市场情况数据来源西南证券

图 7 2014—2032 年 MRI 设备销售量

Fig. 7 MRI sales volume in 2014—2032



(a) MRI 设备 Weibull 概率密度函数及累积分布函数



(b) 2023—2033 年不同类型 MRI 设备报

图 8 MRI 设备 Weibull 分布与报废量预测

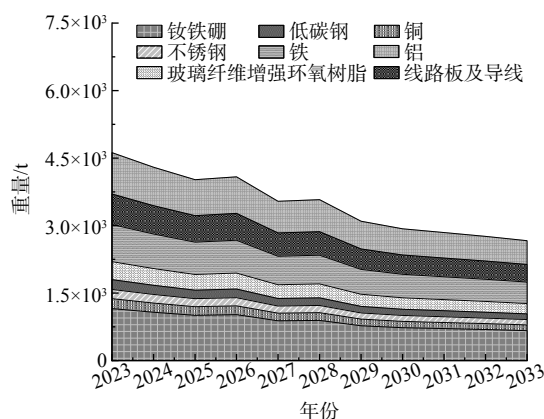
Fig. 8 MRI Weibull Distribution and Scrap Prediction

新能源汽车相比, 每辆电动汽车中含钕铁硼 5~10 kg<sup>[27]</sup>, 稀土元素钕含量约为 1 250 g·辆<sup>-1</sup><sup>[28]</sup>。等量回收 20 t 的废弃电动汽车与 MRI, 汽车钕铁硼材料回收量为 51.54~103.09 kg, 稀土元素回收量为 12.87 kg; MRI 钕铁硼材料回收量为 5 t, 稀土元素回收量为 1~1.5 t。由此可见, MRI 钕铁硼材料回收量是电动汽车的 97 倍, 稀土元素约为 78~117 倍, 回收价值高于电动汽车。超导型 MRI 中铌钛合金可回收量将从 2023 年的 6 328 t 增长至 2033 年的 17 500 t, 累计可回收量达到 125 700 t。其中金属铌钛的占比为 1:1, 因此铌、钛金属的累计可回收量均达到了 76 000 t。而我国每年的金属铌需求量为 85 000 t<sup>[29]</sup>, 超导型 MRI 中铌的可回收量在全国总需求量的占比将从 3.7% 增长至 10.3%。除此以外, 其它资源的可回收量从大到小依次为铝、铁、线路板及导线、玻璃纤维增强环氧树脂、铜、低碳钢以及不锈钢, 可回

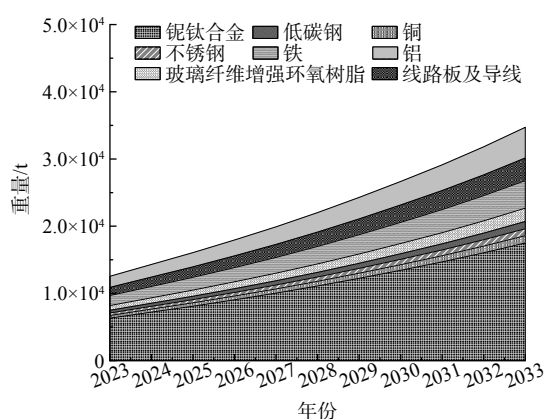
表 3 不同类型 MRI 材料比例

Table 3 Proportions of different types of MRI materials

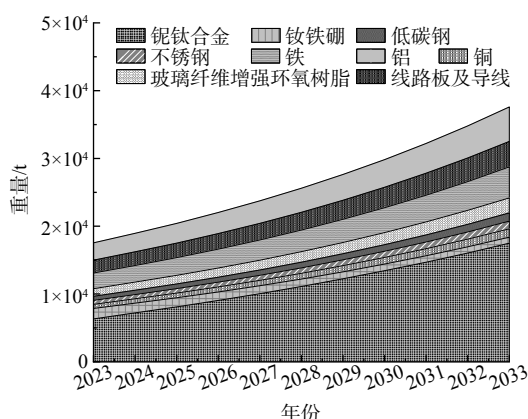
材料	含量/%	
	超导型	永磁型
铌钛合金	50.4	0.0
钕铁硼	0.0	25.0
铜	3.2	4.8
不锈钢	2.9	4.5
低碳钢	3.1	4.7
玻璃纤维增强环氧树脂	5.7	8.7
铁	11.8	17.8
线路板及导线	9.7	14.6
铝	13.1	19.9



(a) 永磁型MRI



(b) 超导型MRI



(c) 总量

图 9 2023—2033 年 MRI 资源利用评估

Fig. 9 Evaluation of MRI resource utilization in 2023—2033

收量分别达到了 40 400、36 200、29 800、17 700、9 705、9 546 和 9 069 t。与废弃“四机一脑”相比, MRI 中最高含量金属依次为铝、铁、铜, 而废弃“四机一脑”中主要金属有铜、铁、铝 3 类, 其中洗衣机、冰

箱、空调铁含量分别达到了 53%、50%、45.9%<sup>[24]</sup>。这是由于 MRI 设备庞大，为了减轻设备的总质量，多采用轻质的金属铝以及塑料作为外壳。市场价格调研发现，铝的平均价格是铁的 4.75 倍，因此，和“四机一脑”相比，MRI 的回收价值更高，且单台所含有的金属量也远远高于“四机一脑”。

### 3 结论

1) 目前，我国 MRI 百万人均保有量呈现迅速增长态势，到 2032 年，MRI 设备年销售增长量将达到 5 160 台，复合年均增长率达到了 8.6%。预计到 2077 年，我国 MRI 百万人均保有量将超过 159 台，达到供需平衡。

2) 2023—2033 年，我国 MRI 设备累计报废的总重量达 287 200 t，钕铁硼材料和铌钛合金的回收量分别可达 9 606 t 和 125 700 t，其中稀土元素钕可回收量累计 1 921.2~2 881.8 t。因此，废旧医疗 MRI 设备具有极高回收价值，以此为代表的医疗电子垃圾或将成为“城市矿产”重要组成。

### 参考文献

- [1] 茹苑. G 公司医疗设备回收再制造闭环供应链定价决策研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [2] 曾现来, 李金惠. 城市矿山开发及其资源调控: 特征、可持续性和开发机理 [J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(3): 288-298.
- [3] ZENG X, XIAO T, XU G, et al. Comparing the costs and benefits of virgin and urban mining [J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2022, 7(1): 98-106.
- [4] VAN DER MERWE A, CABERNARD L, GÜNTHER I. Urban mining: The relevance of information, transaction costs and externalities [J]. *Ecological Economics*, 2023, 205: 107735.
- [5] 陈美玲, 陈歆, 黄毅, 等. 基于基础医疗设备报废率的数学建模在优化预算管理中的应用 [J]. *医疗装备*, 2021, 34(7): 14-16.
- [6] 周学武, 杨泽楠, 孙菊江, 等. 基于层次分析法的医疗设备报废评估模型研究 [J]. *医疗卫生装备*, 2022, 43(8): 59-63.
- [7] 王惟, 周航旭, 惠敏, 等. 医疗设备报废的分类评估管理体系构建与应用 [J]. *中国医学装备*, 2021, 18(5): 171-174.
- [8] 刘雨浓, 张贺然, 于可利. 基金补贴目录外的电子产品行业发展及回收处理情况浅析 [J]. *资源再生*, 2021(8): 10-13.
- [9] PEIRÓ L T, MÉNDEZ G V, AYRES R U. Material flow analysis of scarce metals: sources, functions, end-uses and aspects for future supply [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(6): 2939-2947.
- [10] 邹婧玲. 乘风破浪——稀土永磁新时代发展浅析 [J]. *中国有色金属*, 2021(17): 46-49.
- [11] MAANI T, MATHUR N, SINGH S, et al. Potential for Nd and Dy recovery from end-of-Life products to meet future electric vehicle demand in the U. S [J]. *Procedia CIRP*, 2021, 98: 109-114.
- [12] 国家统计局. 2023 年国家统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [13] Organization for Economic Co-operation and Development. Magnetic resonance imaging (MRI) units (indicator) [EB/OL]. [2023-10-20]. <https://data.oecd.org/healthqt/magnetic-resonance-imaging-mri-units.htm>, 2023.
- [14] 西南证券. 核心三问, 窥影像设备技术兴替和投资机会 [EB/OL]. [2023-10-20]. [https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202206241574473987\\_1.pdf?1656093702000.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202206241574473987_1.pdf?1656093702000.pdf), 2022.
- [15] 国产 MRI 部件龙头企业, 打破国外技术垄断 [EB/OL]. [2023-10-20]. [https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202305171586711829\\_1.pdf?1684335082000.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202305171586711829_1.pdf?1684335082000.pdf), 2023.
- [16] 姚沛帆, 黄庆, 张西华, 等. 中国退役动力电池中关键资源回收潜力研究 [J]. *稀有金属*, 2022, 46(10): 1331-1339.
- [17] SHI Z, JIANG D, ALSAEDI A. A multi - group SEIRI epidemic model with logistic population growth under discrete Markov switching: Extinction, persistence, and positive recurrence [J]. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2022, 46(5): 5349-5369.
- [18] KIM S, OGUCHI M, YOSHIDA A, et al. Estimating the amount of WEEE generated in South Korea by using the population balance model [J]. *Waste Management*, 2013, 33(2): 474-483.
- [19] XIAO Q, WANG H. Prediction of WEEE recycling in China based on an improved grey prediction model [J]. *Sustainability*, 2022, 14(11): 6789-6803.
- [20] ISLAM M T, HUDA N. Assessing the recycling potential of “unregulated” e-waste in Australia [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 152: 104526.
- [21] KASTANAKI E, GIANNIS A. Dynamic estimation of end-of-life electric vehicle batteries in the EU-27 considering reuse, remanufacturing and recycling options [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 393: 136349.
- [22] TIAN X, XIE J, HU L, et al. Waste LEDs in China: generation estimation and potential recycling benefits [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 187: 106640.
- [23] HE P, WANG C, ZUO L. The present and future availability of high-tech minerals in waste mobile phones: Evidence from China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 192: 940-949.
- [24] 陈盼, 施晓清. 京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 [J]. *环境科学*, 2020, 41(4): 1976-1986.
- [25] 黄慧婷, 童昕, 蔡毅, 等. 电器电子产品废弃量估算方法再评估 [J]. *生态经济*, 2019, 35(11): 211-216+229.
- [26] CIACCI L, VASSURA I, CAO Z, et al. Recovering the “new twin”: analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe [J].

*Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 143-152.

[27] 杜畅. 含钕钕铁硼中稀土元素高选择性回收体系的开发 [D]. 南昌: 江西理工大学, 2021.

[28] AARTI K, KUMAR S S. A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 317.

[29] 闫飞. 基于白云鄂博矿复合钕钛合金在汽车大梁钢中的应用研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.

(责任编辑: 金曙光)

## Resource recycling potential of magnetic resonance imaging in China

QIN Jinchuan, CHEN Shuyuan, ZHOU Songshan, HUANG Yin, HUANG Rong, CAO Wenxing, CHEN Mengjun\*, SHU Jiancheng, GANG Haiyin

School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China

\*Corresponding author, E-mail: [kyling@swust.edu.cn](mailto:kyling@swust.edu.cn)

**Abstract** With the expansion of Chinese medical device industry, scrapped medical electronic devices increase year by year. However, its annual scrap volume is unclear, and research on its resource value is also limited. Therefore, taking magnetic resonance imaging (MRI) equipment as an example, the Logistic model, grey prediction model, Weibull distribution+market supply A model were used to predict its per million per capita ownership, sales and scrap volume. Meanwhile, the resource availability of the scrapped MRI equipment was assessed. The results showed that by 2032, MRI equipment sales would grow from 2 251 units to 5 160 units from 2023 to 2032, with a compound annual growth rate of 8.6%. By 2032, per million per capita ownership of MRI in China would be 32 units. In 2023—2033, the annual scrapped volume of MRI equipment in China would increase from 1 476 to 3 240 units, and the cumulative total scrapped volume could reach 287 200 t. The cumulative recoverable amount of NdFeB magnetic would be 9 606 t, which was 125 700 t for niobium titanium. MRI recyclable aluminum, iron, circuit boards and wires, glass fiber reinforced epoxy resin, copper, low carbon steel, stainless steel were in a descending order, respectively 40 400, 36 200, 29 800, 17 700, 9 700, 9 500 and 9 100 t. The results of this study can provide a guidance for the recycling policies on end-of-life medical electronic equipment and its industrial development.

**Keywords** end-of-life medical electronic equipment; magnetic resonance imaging; grey prediction model; market supply A model; resource utilization