

唤醒沉睡的宝藏

中国废弃电子产品循环经济潜力报告

知识产权声明：

本报告由绿色和平和中国电子装备技术开发协会共同发布。

除标明引用的内容以外，本报告内所有内容（包括文字、数据、照片、图表、商标）的著作权及其他知识产权归绿色和平所有。

如需引用本报告中的数据及图表，请注明出处。

必须取得绿色和平授权后方可使用报告中的照片。

如有垂询，欢迎来信：

greenpeace.cn@greenpeace.org

编者（按姓氏首字母排列）： 鸣谢以下人员对本报告的贡献：

曹燕

唐爱军

邓婷婷

刘欣伟

江卓珊

徐婧寒

刘华

刘文杰

王衍

田梦

郑名扬

2019 年 3 月

报告摘要

高资源强度时代 电子废弃物何去 唤醒城市矿山 循环方可持续

智能电子用品、新能源、蓄电池等新兴科技产品需要各类金属作为原材料。科技的日益发展不仅创造了多种多样的金属矿物元素使用需求，也推动人类社会进入高资源强度时代。

近三十年来，全球各类金属的生产量成倍增长，用于生产显示屏的金属元素钨在 2000 年代的产量就已达 1970 年代产量的 9 倍之多。除产量飙升之外，现代科技产品对各类金属材料的使用类别之多也达到了历史顶峰。在 1980 年代，生产一台计算器只需要用到 12 种元素，而现在生产一部智能手机所需要的金属已经多达 21 种，其余非金属元素也多达数十种^[1]。

金属资源关系科技、能源和国防发展，“金属关键性”正成为世界各国政府积极关注和研究的热点。欧盟、美国、日本等国家和地区近几年已经将“金属关键性”研究纳入国家战略参考范畴，制定相关战略保障供应，控制涉及金属资源的经济风险及国家安全风险。中国虽然是多种金属资源的世界主要产地，但是对于钴、锡、锂等稀缺的关键金属，进口依赖程度依旧较高。因此，发展循环经济，实现金属资源的回收再利用，对于稳定各国金属资源供应具有极其重要的战略意义。

作为回收再利用金属资源的重要来源之一，电子废弃物的回收利用价值尚未得到充分挖掘。数据表明，中国电子产品废弃量将在 2020 年和 2030 年分别达到 1540 万吨和 2722 万吨，平均年增长率达到 10.4%^[2]。据推算，2030 年的废弃电脑和手机的电路板中可回收金属总价值将达到 1600 亿元。业内研究报告显示，每 1 吨废旧手机（不含电池）中含有超过 270 克金^[3]，然而在实际的原生金矿开采中，若每吨金精矿中含金量不小于 100 克，就可被认证为一级品^[4]。由此可见，废弃电子产品这座沉睡矿山的“含金量”远远高于一般的优质原生矿山。

本报告选取了台式电脑、笔记本电脑、手机三种生活中最为常见且迭代废弃率较高的电子产品，根据其机身中可回收金属成分的重量和价值，推算出在三个不同回收率情景下，循环利用这些废弃电子产品的潜在经济价值。

表 1. 三种回收率情景下 2030 年可回收金属总量及总价值

	电脑回收率 (%)	手机回收率 (%)	2030 年金属回收 总量 (万吨)	2030 年回收金属的 总价值 (亿元)
情景一	27	1	49905	251
情景二	62	33	128358	764
情景三	85	85	193794	1291

除《企业家第一课》、《企业家功成堂》外，其他公众号分享本期资料的，均属于**抄袭**！
邀请各位读者朋友尊重劳动成果，关注搜索正版号：《企业家第一课》、《企业家功成堂》

谢谢观看！

企业家第一课，专注做最纯粹的知识共享平台



关注官方微信
获取更多干货



加入知识共享平台
一次付费 一年干货

推算结果显示，如果 2030 年上述电子产品回收率能达到 85%，会比通过原始开采的方式节省约 300 亿千瓦时能源，减少近 2200 万吨碳排放，这相当于一架波音 747-400 往返北京和纽约 26000 次。

循环经济是未来可持续发展的必由之路，电子产品金属回收具有显著的经济潜力。然而，目前中国废弃电子产品回收拆解产业发展尚未成熟，手机回收率不足 2%。若要提高回收率，实现产业规模化，加速转型至循环经济模式，还需生产者、品牌商多方加大投入，在以下方向着力：

1. 为回收拆解产业链提供经济可行性
2. 采用生态产品设计，支持技术创新
3. 鼓励回收产业链合作，促进信息互通
4. 提高回收率
5. 制定行业标准及框架，增强回收系统运作效率

让电子产品的经济潜力通过循环经济得以发挥，我们还需要政府、企业和社会公众共同努力，为循环经济体系建立法规标准、注入资金、开发技术，让再生资源产品具备市场竞争力，为再生资源投资者带来可期的利润，为公众建立更可持续的智能未来。

这会是一个生生不息的循环。起点，就在我们脚下。

目录

1	世界金属资源需求趋势	1	4	中国废旧电子产品回收现状分析	23
	1.1 高资源强度时代	1		4.1 回收体系的整体介绍	23
	1.2 驱动金属需求上升的因素	2		4.2 废旧电子产品回收链条中 重要环节	24
	1.3 金属关键性与资源危机	3		4.3 主要存在的问题	24
	1.4 高资源强度延伸出的问题	8		4.4 问题解决的障碍	26
2	中国的金属资源现状	10	5	总结与建议：	28
	2.1 电子产品相关关键金属产量	10		发展金属循环经济 中国蓄势待发	
	2.2 中国金属进口量	11			
3	城市矿山中的金属资源	12			
	3.1 2010-2030 年中国典型电子 废弃物回收的经济潜力	13			
	3.2 手机电路板提炼金属和采矿 提炼金属的成本比较	15			
	3.3 城市矿山金属量及其经济 价值情景分析	17			
	3.4 城市采矿所节省的能耗和减 少的碳排	22			

图表		附录	
图 1. 过去 30 年全球各类金属生产趋势：2000 年代与 1970 年代的产量比例 ^[5]	1	附表	
图 2. 金属关键性分析 ^[9]	2	附表 1. 2010–2030 年典型电子废弃物产生量（千吨） ^[2]	35
图 3. 中国关键原材料矩阵图 ^[10]	4	附表 2. 每吨废弃电子产品电路板中可提取的金属含量（千克 / 吨） ^[38]	35
图 4. 深海挖矿基本方式	8	附表 3. 不同金属市场价值范围及平均值（万元 / 吨） ^[39]	36
图 5. 智能手机拆解示意图	12	附表 4. 各种电子产品中各种金属总含量（吨）	36
图 6. 2018– 2030 年典型电子废弃物电路板中金属的经济价值	14	附表 5. 废弃电子产品中可回收金属价值	38
图 7. 各金属在电子废弃物中的回收价值占比	14	附表 6. 采用原始开采方法冶炼产出一吨金属的成本范围和平均值（美元） ^[32]	39
图 8. 废旧电路板处理成本分布百分比（取不同回收类型的平均值）	16	附表 7. 2016 年中国几种矿石进口量及其中可提取金属量	40
图 9. 2018-2030 年三种情景下通过回收手机、手提电脑和台式电脑提炼的金属总价值	20	附表 8. 2010-2030 年三种情景各产品可回收金属价值汇总	40
图 10. 三种情景下城市采矿回收金属与原始开采消耗的总能源对比	22	附表 9. 单位金属回收相对于原始开采所节约的能源和减少的碳排放	41
		附表 10. 不同金属的冶炼步骤 ^[47]	41
表格		附图	
表 1. 三种回收率情景下 2030 年可回收金属总量及总价值		附图 1. 从废旧电子产品中冶炼稀贵金属的流程图 ^[46]	41
表 2. 到 2030 年由新兴技术带动的金属元素需求量占产量比例的增长 ^[6]	2	附图 2. 金属开采冶炼流程图 ^[47]	41
表 3. 中国战略性矿产目录 – 14 种金属矿产	4		
表 4. 2017 欧盟关键原材料 ^[11]	5		
表 5. 日本资源安全策略 2012 – 战略矿材	6		
表 6. 美国地质勘探局列出的美国关键原材料表 ^[14]	6		
表 7. 各地主要关键金属及其应用例表 ^[15]	7		
表 8. 电子产品相关关键金属 2017 年矿产量 ^[22]	10		
表 9. 中国的关键材料供应风险 ^[10]	11		
表 10. 不同金属的提取效率	18		
表 11. 不同情景下几种电子产品 2030 年的回收价值	21		
表 12. 不同情景下 2030 年几种金属的回收价值	21		

1 世界金属资源需求趋势

1.1 高资源强度时代

全球对金属资源的需求在过去五十年间发生了结构性变化，愈来愈多的元素种类被应用在消费品生产上。在 1980 年代生产一台计算器要用到 12 种元素，到了 2000 年代，已经增加到 61 种。随着科技发展，更多种金属元素的用途被开发出来，产品的元素组成愈发复杂。据绿色和平德国办公室在 2016 年发布的《全球电子产品制造过程使用的能源与资源报告》^[1] 分析，一部智能手机里面含有铝、镁、钴、钨、金等超过 21 种金属¹，以及数十种非金属元素。这些数据预示着全球已经进入了高资源强度的时代。

电子科技的发展拓展了一些金属的用途，并使这些金属的需求和产量增长了数倍。例如近十多年被用于生产液晶显示屏的铟，其在 2000 年代的产量是 1970 年代的 9 倍；用于生产 LED 屏幕背光的镓，现在的产量是 30 年前的 6 倍；用于生产电池的锂，2000 年代的产量与 30 年前相比翻了接近 3 倍，与此同时全球人口增长只有 1.6 倍。在过去 60 年，稀土元素的全球产量增长了 13 倍。社会对于这些金属的需求被科技产品数量以及功能所影响，如图 1 所示。金属种类趋于多样化，产量和需求持续增加，也逐渐成为了社会发展的必需品，其供应量关系着社会发展。

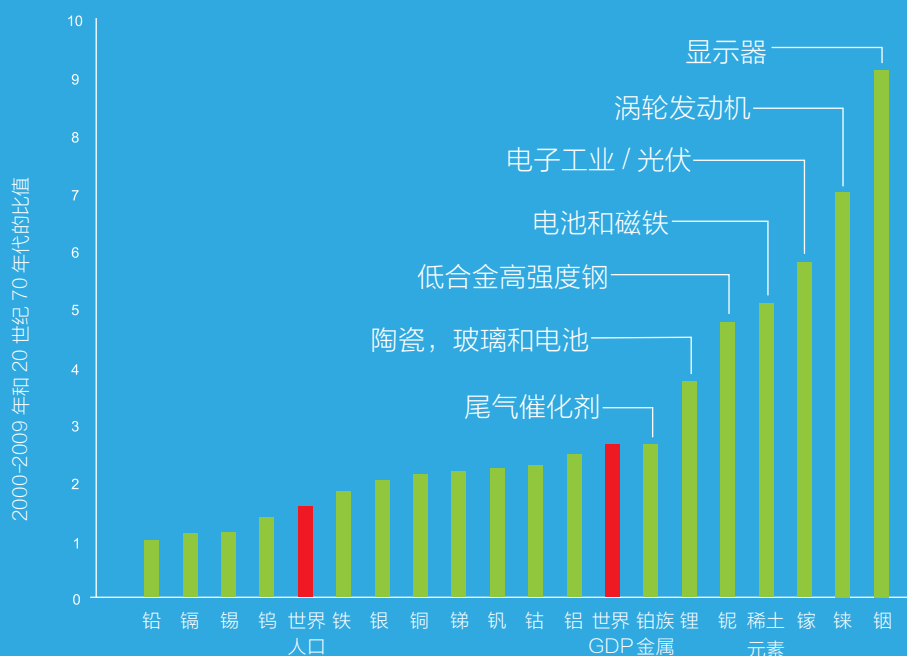


图 1. 过去 30 年全球各类金属生产趋势：2000 年代与 1970 年代的产量比例^[5]

¹ 本文中“金属”泛指过渡金属，类金属等化学元素

在新兴技术不断发展的过程中，大多数金属原材料的需求量都会大幅提升。在 2006 年，新兴技术对金属原材料的需求量仅占金属产量的很小比例，最高不超过 40%。据估计，到 2030 年，包括镓、铟、锗等 13 种金属原材料在新兴技术带动下的需求量会比 2006 年成倍增加，其中 6 种金属原材料在新兴科技的带动下需求量会超过 2006 年的总产量。用于生产芯片的重要元素——镓在新兴技术带动下的需求量在 2030 年更是会达到 2006 年总产量的 3.97 倍；用于生产显示屏的铟由新兴科技所带动的需求量会达到 2006 年总产量的 3.29 倍。详见表 2。

金属原材料	产量（吨）	2006 年新兴技术带动下的需求量（吨）	2030 年新兴技术带动下的需求量（吨）	2006 年新兴技术带动下的需求量与产量比值	2030 年新兴技术带动下的需求量与产量比值
镓	152 ^{d)}	28	603	0.18 ^{a)}	3.97 ^{a)}
铟	581	234	1911	0.40 ^{a)}	3.29 ^{a)}
锗	100	28	220	0.28 ^{a)}	2.20 ^{a)}
铂	255	非常少	345	0	1.35 ^{a)}
钽	1384	551	1410	0.40 ^{a)}	1.02 ^{a)}
银	19051	5342	15823	0.28 ^{a)}	0.83 ^{a)}
钴	62279	12820	26860	0.21 ^{a)}	0.43 ^{a)}
钯	267	23	77	0.09 ^{a)}	0.29 ^{a)}
钪	29 ^{c)}	0	1	0	0.03
铌	44531	288	1410	0.01	0.03
铈	172223	28	71	< 0.01	< 0.01
铬	19825713 ^{b)}	11250	41900	< 0.01	< 0.01

注：(a) 德国联邦地球科学研究所根据新信息更新的数据
(b) 铬铁矿
(c) 中国和俄罗斯总产量预估值
(d) 稀土元素

表 2. 到 2030 年由新兴技术带动的金属元素需求量占产量比例的增长^[6]

1.2 驱动金属需求上升的因素

全球对多种金属的需求在可见的将来会持续增加，主要的驱动因素包括：

人口上升

预计到 2050 年，全球人口会由现在的 70 亿，上升至 96 亿^[7]。资源消耗也会随之而上升。

经济及生活质量的提升

预计当亚洲和非洲的经济水平提升，当地人民的生活水平随之上升，就会带动对消费产品和服务的需求。根据非洲发展银行的数据，非洲现在是全球中产阶级增长最快的地方，其中中产阶级人口是二十年前的两倍^[7]。这些需求需要更多的资源来满足。

能源使用

新能源的生产、贮存、供给，都需要大量的基础设施。建设这些设备就需要用到大量的金属资源^[8]。

科技发展

过去数十年来，科技发展持续开拓矿物元素的新用途。尤其是科技电子产品的资源结构愈趋复杂，对资源的种类与量的需求会随着科技的发展与突破而持续增加。

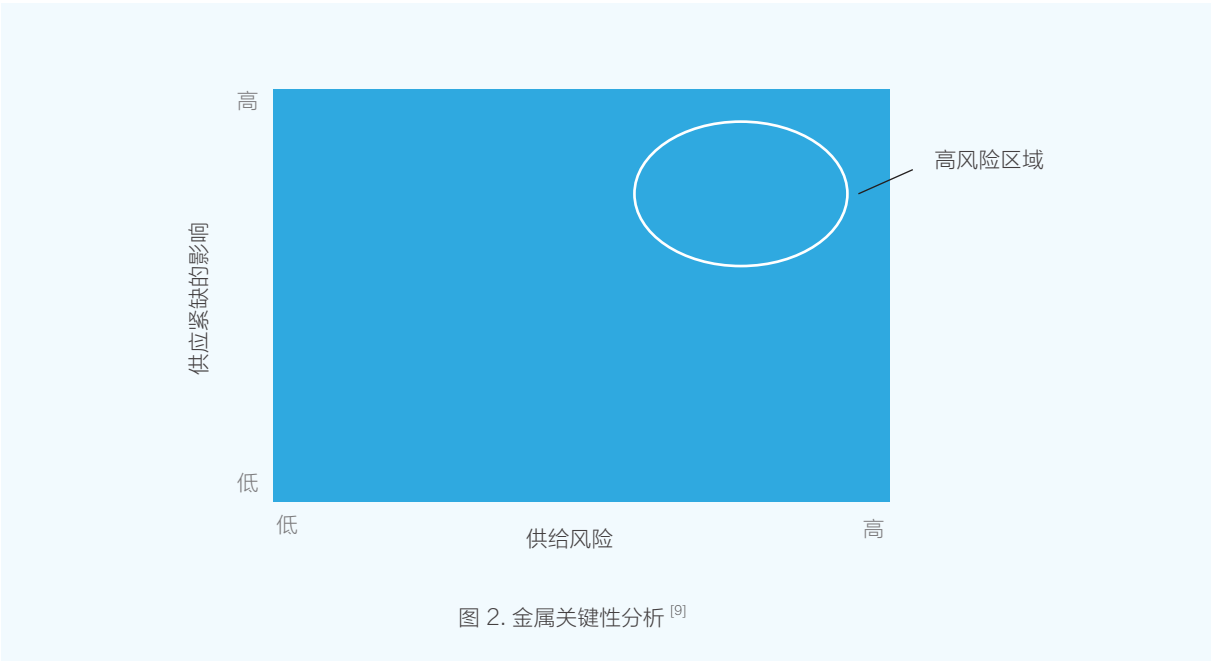
1.3 金属关键性与资源危机

电子信息产品所需的物料复杂。现在生产一部智能手机就需要用到 21 种金属元素^[1]。这些金属元素的供应关系着各种产品的生产，并支撑着社会的经济发展。可是天然矿产资源受到各种因素的限制，使其供应存在潜在风险。各国学者和政府近年纷纷意识到这些潜在风险，并开始着力分析各种金属资源的关键性²，从而进一步进行战略资源部署。

分析金属关键性主要使用以下两项作为分析条件：

供应受限的影响程度：评估当该金属的供应受到限制所造成的影响有多大。考虑该类金属对经济和社会的重要性及不可替代性，例如依赖该金属的产品所带来的经济价值，并考虑其替代品在生产某产品上的技术和成本表现。

供应风险：评估该金属供应中断的风险。考虑的是原生物料的生产地集中度，并同时考虑其政府的管治和贸易表现。



² 金属材料在工业生产和经济发展中的供应风险及重要性

2016年,国土资源部(现改组为自然资源部)发布了《全国矿产资源规划(2016-2020年)》,为矿产资源供应明确了战略规划。24种矿产列入战略性矿产目录,包括能源矿产6种,非金属矿产4种,金属矿产14种(见表3)。

《全国矿产资源规划(2016-2020年)》提到会大力发展矿业领域的循环经济,开展钢铁、有色金属、稀贵金属等城市矿产的规模化循环利用,鼓励企业提高再生金属的使用比例,缓解原生矿产资源利用的瓶颈约束。

资源安全始终是国家可持续发展的核心问题。规划提到中国多种矿产资源的人均储量远低于世界平均水平,加上受国际矿业市场竞争所影响,国内的矿产勘查投入趋于下行,增加了中国矿产资源安全供应风险。规划更指出“长年积累的矿山环境问题突出,加快转变资源开发利用方式,推动矿业绿色低碳循环发展的任务十分繁重。”

另外,清华大学的研究员通过供给风险和经济重要性这两个维度,得出了对于中国最为关键的7种原材料:铬铁矿、钴、锰、镍、铁矿石、铌和钽。除了锰、铌和钽,其他都包含在上述的战略性矿产目录中。研究考虑了净进口依赖程度、进口地的集中度和进口国政治稳定性这些参数来反映某一原材料的供给风险;同时,考虑原材料对各个经济环节带来的增值价值等参数来反映某一原材料的经济重要性。研究以2009年为基年,涵盖了52种原材料,通过数据收集和计算,得出了右面这张图表。

其中,图3右上角的这10种原材料同时具有较高的供给风险和经济重要性,被认定为对中国最关键的金属材料。

表3. 中国战略性矿产目录-14种金属矿产

铁	铬	铜	铝	金
镍	钨	锡	钼	锑
钴	锂	稀土元素	锆	

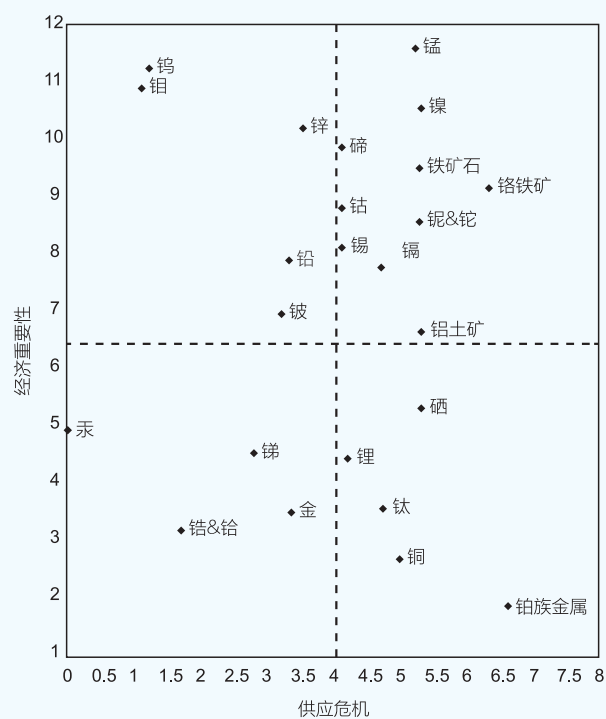


图3. 中国关键原材料矩阵图^[10]

为了回应对维持原材料稳定供应的担忧，欧盟委员会在 2008 年启动了“欧洲原材料倡议”，在欧盟实施更安全的原材料供应战略。此倡议的优先目的之一便是制定欧盟的关键材料名单。欧盟委员会根据进口依赖度³，对物料的全球主要生产地和欧盟现在的采购地进行分析，自 2011 年起多次发布名单^[11]，而最新的名单于 2017 年发表，包含 27 类材料，详见表 4。

现在欧盟境内缺乏多类金属的上游生产环节，例如：锑，铍，镁，铈，稀土元素，钪，钽，钒。原因是部分矿物在欧洲缺少天然资源，并且在勘探和采挖方面受到各种因素的阻碍。所以欧盟的原生关键金属材料主要依赖进口，进口来源地包括中国（稀土元素），美国（铍），俄罗斯（钪，钪）和墨西哥（钨）。

欧盟已经意识到关键材料急需开辟进口原生材料以外的供应来源作为战略部署^[11]，除了在欧洲境内寻找稀土资源，更有发展循环经济的迫切需要。2015 年，欧盟委员会确立循环经济行动计划，并修订废物管理方面的法律法规。行动

计划表明“要往更闭环的经济模式转型，使得产品、材料和资源的价值保持在经济系统中尽量久，把垃圾产生量尽量压缩，这是欧盟发展可持续，低碳，资源效率和有竞争力的经济体的必须举措。”

表 4. 2017 欧盟关键原材料^[11]

锑	萤石 ⁴	轻稀土元素 ⁵	磷
重晶石 ⁶	镓	镁	钪
铍	锗	天然石墨	金属硅
铋	钨	天然橡胶	钽
硼酸盐	氦	铈	钨
钪	重稀土元素 ⁷	铂族金属 ⁸	钒
焦煤 ⁹	铟	磷灰石 ¹⁰	

电子产品工业支撑着日本的经济，所以相关的金属资源对当地经济发展至关重要。由于日本的金属资源主要依赖进口，为了应对突发的供应短缺，政府及私营组织有库存制度，目前库存制度的存量足以应付 60 天的战略需求。现有的战略库存金属包括钪、钨、钼、钽、钨、钨、钨、钨、钨。不过，这措施并不能应对更长期的金属供应风险。

2012 年，日本首相府出台资源安全策略^[12]，根据 (1) 对日本工业的重要性；(2) 供应障碍的可能性，选出 30 种物质为战略矿材（见表 5）。策略指出，发展中国家对多种矿产资源的需求会持续增长，如稀土、铟、镓、硒等元素未来存在供应不足的风险；另外，全球矿产资源的生产地及生产企业高度集中，日本的资源安全策略分析这两点是造成金属资源供应不稳定的重要因素。

³ 某国家或地区对于进口某种材料的依赖程度

⁴ 又称为氟石，主要成分是氟化钙

⁵ 通常是指镧、铈、镨、钕、钐和钕七种稀土元素

⁶ 钨的矿物，主要成分是硫酸钨

⁷ 通常是钪、铈、镨、钕、钐、钕、钐、钐、钐九种稀土元素

⁸ 包括钨、钨、钨、钨、钨、钨 6 个元素

⁹ 煤化度较高，结焦性好的烟煤

¹⁰ 指在经济上能被利用的磷酸盐类矿物的总称，是一种重要的化工矿物原料

策略指出未来会促进替代材料的开发、鼓励回收及回收技术的开发并且增加库存。

由于稀土元素镱的供应紧张，日本政府曾经在 2011 年投入预算帮助国内小型电机制造商和汽车压缩机制造商摆脱对镱的依赖，促进减少使用镱。并从废弃空调压缩机中回收钕磁铁，从中提取供应非常紧张的镱，计划在 2015 年能由此回收约 13 吨镱，并在之后持续增加其回收量。

根据日本近期的研究，按供应风险、价格风险、需求风险、回收限制、其他潜在风险等几个维度，筛选出属于高关键性的金属原料。最高关键性的金属元素包括金、银、铌、钹、钆^[13]。

表 5. 日本资源安全策略 2012 – 战略矿材

铈	钇	镓	石墨	铬
锆	钴	硅	锑	铟
钨	钽	钛	铌	镍
钒	铂族金属	氟	镁	锰
钼	锂	稀土元素	铯	铁
铝	铜	铅	锌	锡

 美国

2018 年，美国地质勘探局根据需求及进口是否容易受影响，列出 35 种关键矿物，其中大部分为金属物质，部分是生产电子产品的必须材料^[14]。

主要分析条件包括：对美国的经济及国家安全的必要性；其供应链容易中断；在产品制造中具有必须的功能，缺少该材料会对美国经济及国家安全造成重大后果。

钴作为生产蓄电池的必须材料，需求与日俱增，美国目前却高度依赖进口。因此，美国在 2014 年首次在国内生产钴。并积极在爱达荷、阿拉斯加、蒙大拿等地勘探钴矿石，为资源安全作战略性准备^[14]。

表 6. 美国地质勘探局列出的美国关键原材料表^[14]

铝	铈	砷	重晶石
铍	铋	铯	铬
钴	萤石	镓	锆
石墨	钨	氦	铟
锂	镁	锰	铌
铂族金属	钾肥	稀土元素	铯
铷	钪	铟	钽
碲	锡	钛	钨
铀	钒	锆	

表 7. 各地主要关键金属及其应用例表^[15]

各国的关键金属	主要用途	主要生产地
铝 / 矾土   	输电线路、飞机机身、轻质合金	中国
铍  	电子和通信设备、战斗机机身、起落架等合金	美国
铬  	不锈钢、高温合金	南非
钴    	全球四分之一产量用于智能手机蓄电池、高温合金（用于飞机发动机、刀具和耐磨应用）	刚果民主共和国
镓  	集成电路、LED、光电探测器和太阳能电池、无线通信设备	中国
锗  	光纤、夜视望远镜等红外光学仪器、太阳能电池	中国
石墨 	蓄电池、燃料电池、润滑剂、耐火材料	中国
锂  	蓄电池、轻质合金	澳洲，智利
铟   	显示器、半导体、低温合金、薄膜电池	中国
钕   	磁铁、荧光粉、照明	中国
钽   	电容器、高温合金（发动机等）	卢旺达
锡  	有色金属合金、焊料	中国
钯   	电子产品线路板	俄罗斯，南非
铌    	生产合金钢材	巴西，加拿大
锑    	生产合金材料、阻燃剂	中国
黄金 	金币、金条、智能手机	中国，澳洲

1.4 高资源强度延伸出的问题

采矿活动对当地的影响。采矿过程产生的有毒物质会渗入地下水和地表水，可能导致环境和健康问题。在中国，采矿占用、损毁土地已经超过 375 万公顷^[16]。采矿作业一旦发生事故，会导致灾难性的影响，例如尾矿库溃坝体。采矿活动会对矿场造成永久的生态破坏，影响动植物的生存环境。近年为了满足与日俱长的金属需求，各国企业甚至开始商业深海采挖（详见信息框 1），可能带来的环境风险更难以估量^[17]。

信息框 1 深海挖矿

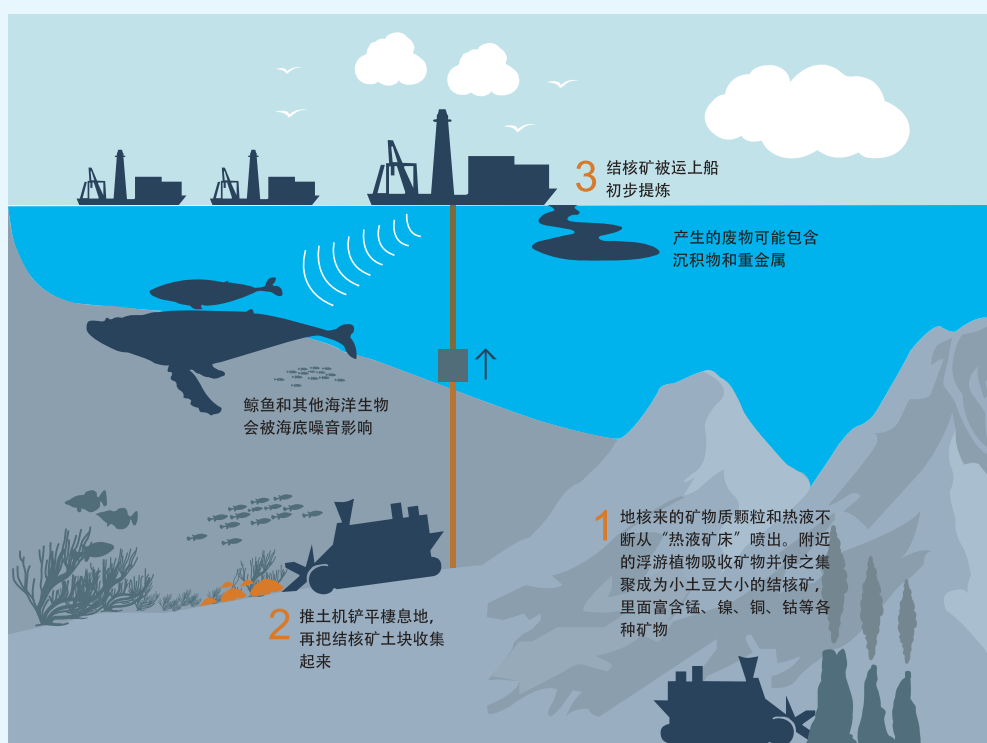


图 4. 深海挖矿基本方式

从地核来的矿物质颗粒和热液通过海底的泉眼不断喷出，称“热液矿床”。在热液矿床附近的浮游植物吸收这些矿物并使之集聚，成为一颗一颗小土豆大小的矿物土块，也叫结核矿。这些土块里富含锰、镍、铜、钴等各种矿物。

开采结核矿需要把推土机开到海床上，把海床铲平。再用泵把泥浆和固体小土块吸起来，送到千米之上的船上。货船航程期间，这些小土块不是被泡在含砷的溶液里，就是处于高温以便从中提取出金属，然后运回冶炼厂进一步处理。

深海勘探或开采项目都要事先取得国际海底管理局（ISA）的许可，目前已经取得许可的国家包括：美国、比利时、中国、韩国、新加坡、英国、德国、印度等等，就连全世界面积第三小，人口只有一万的太平洋岛国瑙鲁也准备潜入深海挖宝。

国际自然保护联盟（IUCN）在 2018 年发表了一份关于深海采矿的风险研究报告，指出深海采矿会翻起海床的沉积物，令水质变得混浊，可能会闷死周边生物。同时，机器会破坏海床，就像把森林夷为平地一样，将彻底毁灭海底生物的栖息地和生态环境。此外，还有各种噪声、光、化学品带来污染等问题。国际自然保护联盟总监更警告说，“以我们目前对深海的了解，不可能有效保护海洋生物免于采矿行为带来的伤害。”

能源消耗。采矿和金属冶炼目前占全球总能源供应量的 8% 左右，据推算，到了 2050 年，这比例会上升到 10%–15%^[18]。金属生产非常耗能且导致大量温室气体排放。尽管采矿和冶炼的工艺水平正在提高，降低了能源需求。然而与此同时，矿石的品位正在下降，处理较低等级的矿石所需的能量更高。这一点在报告中会详细阐释。

金属排放造成污染问题。如化石燃料和磷肥是金属排放到外部环境的主要源头。在农业活动中，磷肥中的重金属会在土壤中积累，长此以往导致土壤中含有高浓度的金属。这情况能在中国的土壤环境中体现，根据全国土壤污染调查，重金属镉就是农用地土壤的主要污染物^[19]。

“尽管我们拥有一些工业上重要金属的大量储备，但显而易见的是，随着世界人口的不断增长，我们无法在不超出可持续的范围内，以现在西方工业化社会标准的速度继续消费金属。”

– 联合国环境署《Metal Recycling—Opportunities, Limits, Infrastructure》报告^[6]

近十年起，世界各国都视矿产资源为经济及国家安全的重要战略部分。同时在目前高资源强度的时代，资源的开采、生产和使用将加剧气候变化。实行资源循环的生产模式才是真正能够应对金属资源和环境危机的可持续解决方案。

2 中国的金属资源现状

2.1 电子产品相关关键金属产量

中国是全球多种关键金属资源的主要生产地及消费地。中国的矾土、镓、铟、锡、稀土产量占全球最多，而钴、镍、钨、金则比较少。根据美国资源调查局（USGS）的数据，中国的矾土和氧化铝产量占全球三成；由于镓主要从由矾土及锌矿石中提炼所得，故其产量也比较高，占全球产量的六成。中国稀土矿产量远大于消费量，有大量用于出口。2017 年稀土产量为 10.5 万吨，占全球的 81%；出口量为 34832 吨，占全部产量的 33.2%^[20]。详见表 8。

金属的产量受各种因素影响，包括天然资源蕴藏量、开采难度、矿产品位、开采成本、市场需求、海外价格竞争等。中国是全球新兴科技产品的主要产地，因此相关金属原材料的消费量庞大。为稳定供应以应付需求，除了本地生产，中国亦收购海外金属矿产企业，包括铜、金、钴等。以钴为例，中国是全球最大的钴消费地，虽然国内的钴产量只占全球的 6%，然而中国企业通过收购海外资源控制着全球 62% 的钴供应，其中 90% 便是采购自刚果民主共和国^[21]。

表 8. 电子产品相关关键金属 2017 年矿产量^[22]

	世界总矿产量（公吨）	2017 中国矿 产量（公吨）	占比
稀土元素	130,000	105,000	81%
镓	495*	300*	61%
钒	80,000	43,000	54%
铟	720	310	43%
锡	290,000	100,000	34%
矾土和氧化铝	430,000,000	140,300,000	33%
黄金	3,150	440	14%
银	25,000	2,500	10%
铜	19,700,000	1,860,000	9%
钴	110,000	7,700	7%
锂	43,860 ¹¹	3,000	7%
钽	1,300	95	7%
镍	2,100,000	98,000	5%
钨	210	≤8.4*	NA

注：* 表示估计值

¹¹ 数据来源：美国资源调查局 USGS。原数据隐去了美国产量，假设美国占全球产量 2% 算。<https://www.reuters.com/article/us-usa-minerals-lithium/u-s-electric-car-sector-wary-of-china-seeks-more-domestic-lithium-idUSKBN1J82HS>

2.2 中国金属进口量

中国本地生产的金属材料因为各种原因不足以满足本地消费需求，因而需要从海外进口。这些原因包括部分金属矿产品位较低，开采成本高令价格竞争力弱，以及国内天然矿藏量少等。尽管中国的矾土产量位居世界前列，但由于品位较低，需要的提炼成本高，企业宁愿采购进口矾土。2017 年中国的矾土产量为 6800 万吨，同年矾土进口数量为 6860 万吨^[22]，进口量相当于国内产量。根据 2013 年的数据，中国铁矿的进口量占消费量比例高达 72%^{[20][21]}；中国铜消费量位居世界第一，但又是铜矿短缺国，根据 2015 年的数据，铜矿自给率仅为 36.1%，多数都依靠进口^[20]；根据 2016 年数据，铝的进口量占消费量的 48%，近半依赖进口^[22]。与 2008 年相比，铁、铜和铝的进口量在 2016 年均增加一倍以上。表 9 给出了中国一些关键材料的供应风险。

表 9. 中国的关键材料供应风险^[10]

物料	供应风险	经济重要性
铁矿	<ul style="list-style-type: none">- 进口依存度达到 66.76%。- 供应主导澳大利亚，巴西和印度。	<ul style="list-style-type: none">- 84%用于建筑业，运输业和钢铁业的制造设备。
钴	<ul style="list-style-type: none">- 进口依存度达到 97.23%。- 92%从刚果民主共和国进口。	<ul style="list-style-type: none">- 73%用于电池。- 10%用于硬质合金。
铬铁矿	<ul style="list-style-type: none">- 进口依存度达到 97.37%，- 主要来自南非和土耳其。	<ul style="list-style-type: none">- 90%用于不锈钢和多种合金。
锰	<ul style="list-style-type: none">- 进口依存度达到 67.80%。- 供应主要来自澳大利亚，南非和哈萨克斯坦。	<ul style="list-style-type: none">- 95%用于制造钢铁。- 2%用于电池。
镍	<ul style="list-style-type: none">- 进口依存度达到 72.63%。	<ul style="list-style-type: none">- 76%用于不锈钢。
铌和钽	<ul style="list-style-type: none">- 超过 95%的世界产量来自在巴西和加拿大。	<ul style="list-style-type: none">- 63%用于钢铁行业铁铌合金。

以钴为例，2015 年中国钴消费量达到 44,500 吨，其中 73% 用于生产电池。作为新兴电子产品充电电池的重要原材料，钴的进口依存度达到 97.23%^[10]。在 2015 年就进口了 17,000 吨的矿砂型精矿，和 35,000 吨的钴中间品。

锂作为电子产品充电电池的重要原材料之一，也是高度依赖进口。2015 年，中国的总碳酸锂消费量达到 78,700 吨，其中 70% 来自进口的锂辉石精矿，绝大部分来自澳洲^[23]。

锡的进口增长尤其明显，2014 年到 2016 年连续 3 年锡矿砂和精矿的进口量超过 60%，可见本地供应不能满足需求^[24]。

3 城市矿山中的金属资源

近些年来，中国金属消费量越来越大，导致某些金属的产量难以满足消费量。考虑到废弃电子产品中含有多种金属，如果能够把其中的金属资源充分利用，就能减少对原生矿的开采，也能缓解一些矿产资源的供应紧缺情况。根据文献数据（详见附表 1），中国 2010 年的电子产品废弃量约为 379 万吨，2020 年和 2030 年将分别达到 1540 万吨和 2722 万吨，平均年增长率达到 10.4%，2030 年的电子废弃量将达到 2019 年的 2 倍。业内研究报告显示，每部废旧手机中大约含有 30 毫克金。假设每部手机的重量（不含电池）是 110 克，相当于每吨废旧手机（不含电池）中含金超过 270 克^[3]。对比金矿开采，根据中国黄金行业标准，每吨金精矿中含有不小于 100 克金即为一级品^[4]，可见废弃电子产品的“含金量”比矿石还要多。

电子产品中的贵金属¹²主要存在于电路板中，而贵金属的市场价值远高于其他材料，因此电路板中贵金属的回收成为了废弃电子产品回收的焦点。本章主要探讨废弃电子产品电路板中的金属^[25]。随着电子产品报废量的持续增长，由废弃电子产品构成的“城市矿山”中蕴含的金属资源价值会越来越大。

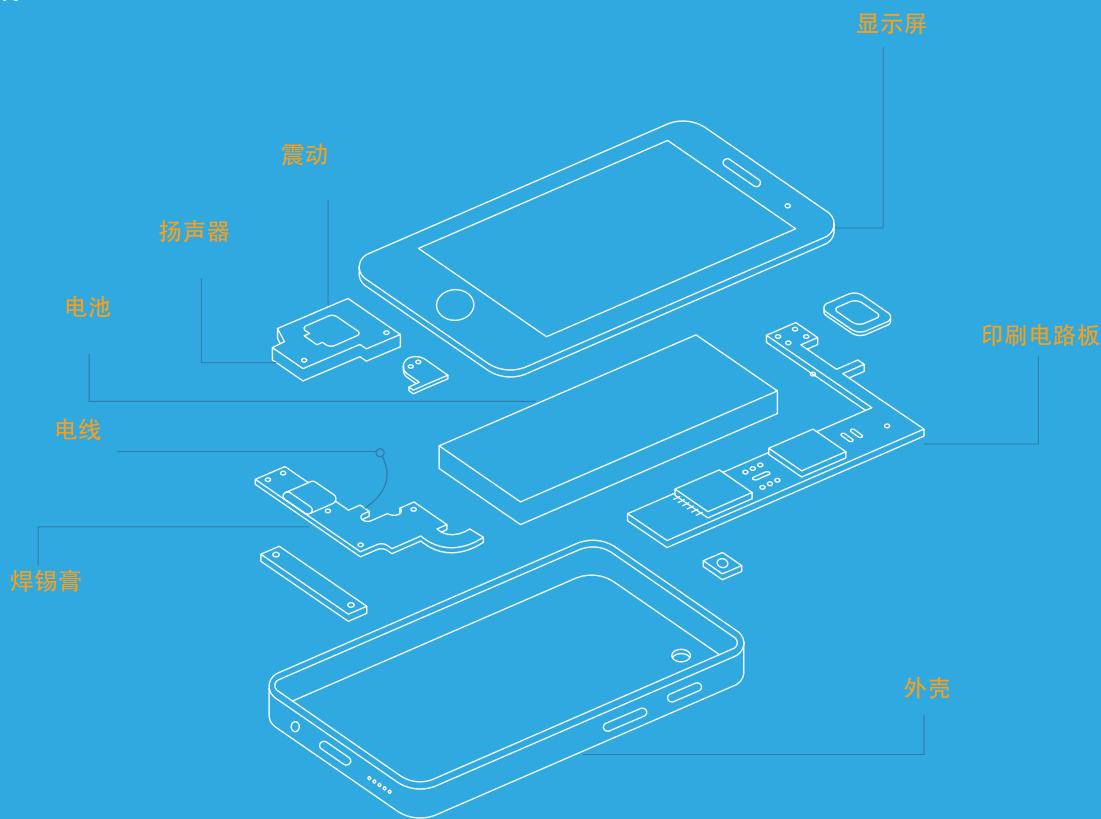


图 5. 智能手机拆解示意图

¹² 贵金属指金、银、铂、钯四种金属

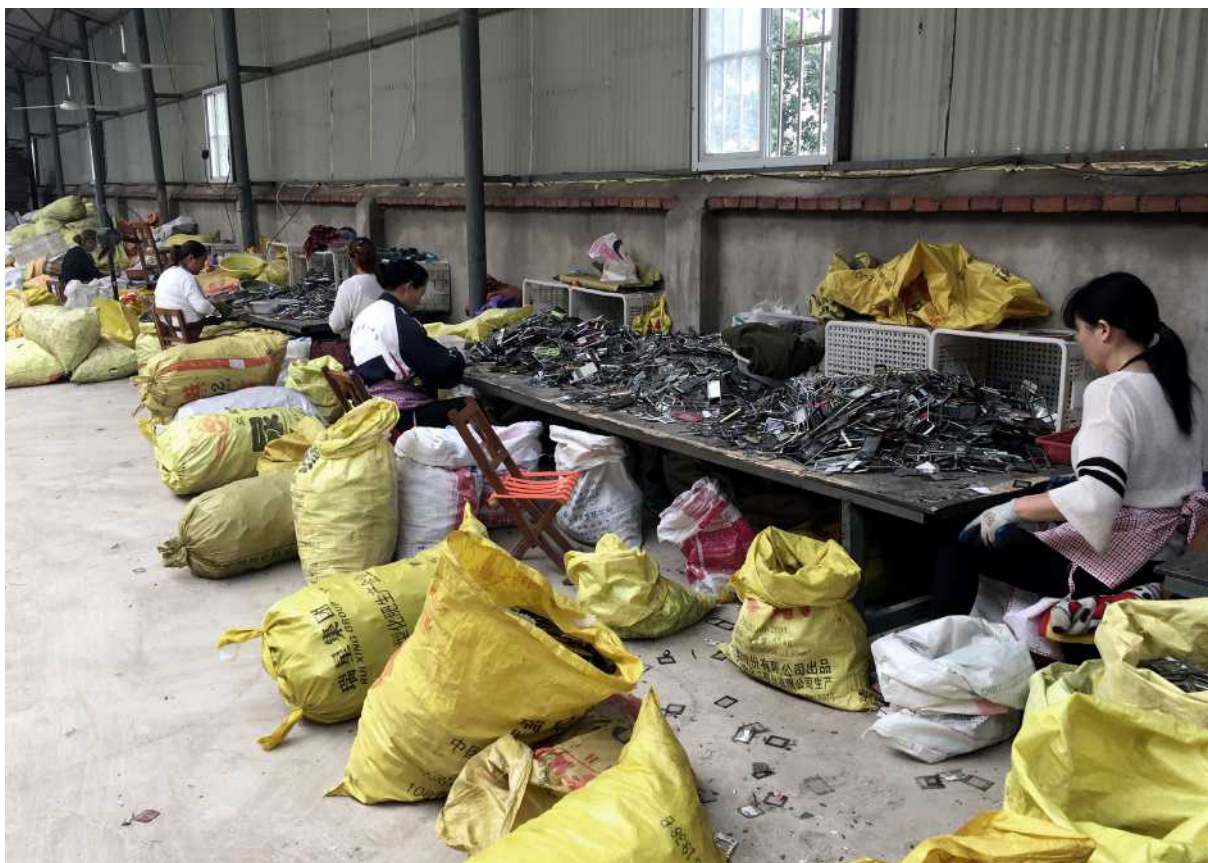
3.1 2010-2030 年中国典型电子废弃物回收的经济潜力

随着科技的进步和人民生活水平的提高，加上手机和电脑等电子产品更新速度快、使用年限降低，废旧电子产品的产生量急剧增加。废旧电子产品电路板中含有存量可观且种类丰富的关键金属和稀贵金属。根据预测，到 2030 年全国废旧台式电脑，笔记本电脑和手机的产生量分别约为 839 万吨，55 万吨和 37 万吨^[2]，其中的金属总量分别约为 17.8 万吨、1.5 万吨和 4.7 万吨。

计算 2010-2030 年典型电子废弃物电路板中的金属量和经济价值的方法为：

某种电子废弃物电路板中某种金属的重量（附表 4）= 某种电子产品废弃量（附表 1）× 电路板占电子产品的比重¹³ × 该金属在电子产品电路板中的含量（附表 2）

某种电子废弃物电路板中金属的经济价值（附表 5）= Σ （某种电子废弃物电路板中某种金属的重量 × 该金属的市场价格（附表 3））



回收商对回收的手机进行分类，分开塑料、金属等不同材料。© Eric / Greenpeace

¹³ 台式电脑，手提电脑和手机中电路板的比重分别为 7.7%，9.4% 和 30.3%

随着消费水平的提高和电子产品报废量的持续增长，城市矿产开发显示出巨大的潜在经济效益。废弃手机、手提电脑和台式电脑的潜在经济价值从2010年的135亿元增加到2020年的810亿元，预期到2030年将增加到1600亿元（图6）。若考虑到其他废弃电子产品，其潜在可开发的金属将更为可观，对原生资源的替代效应将更为显著。

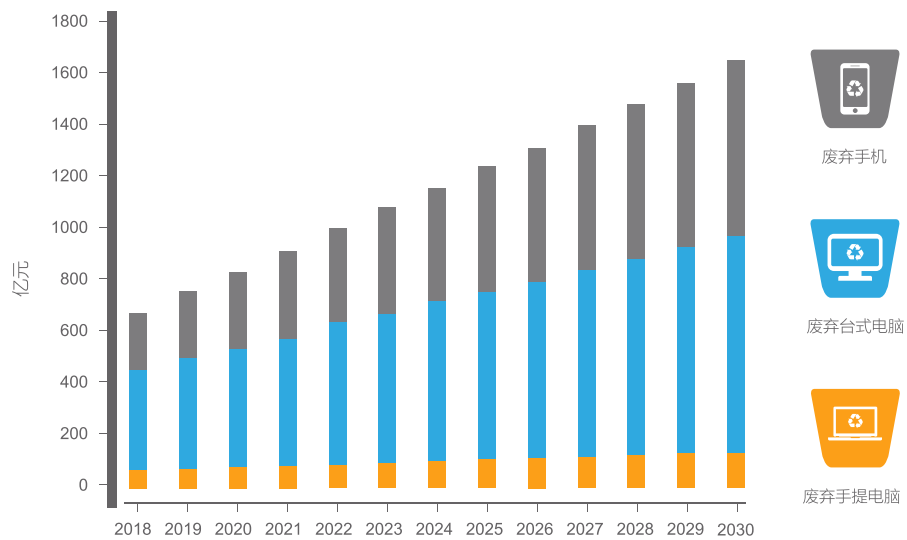


图 6. 2018 -2030 年典型电子废弃物电路板中金属的经济价值

从图 7 来看，典型电子废弃物中的贵金属具有较高的回收价值，占总经济价值的 90% 以上，其中金的回收价值尤其高，超过总回收价值的三分之二。而常见金属中，铜和锡具有相对高的回收价值。

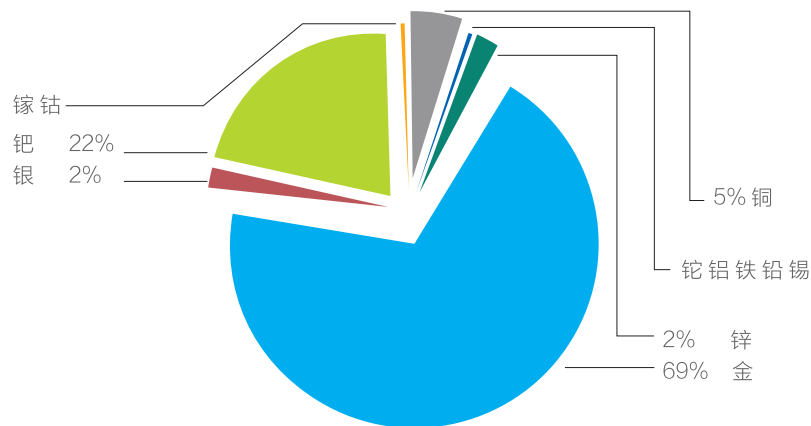


图 7. 各金属在电子废弃物中的回收价值占比

3.2 手机电路板提炼金属和采矿提炼金属的成本比较

从上一章节的数据可见，今后的数年里废旧电子产品的数量会持续增加，能从中回收的金属量也将持续增加，如果能以低成本将这些金属提取出来，将会产生极高的价值。考虑手机的高普及率和低使用年限，这一章节我们对手机电路板提炼金属和传统采矿提炼金属的成本进行比较。手机电路板提炼金属总成本用以下公式表示：

$$\text{手机电路板提炼金属总成本} = \text{废旧手机电路板回收价格} \div \text{废旧手机电路板回收价格占比}$$

其中废旧电路板回收价格中包括了废旧手机回购到电路板拆解过程的全部成本。



回收商对回收的手机进行分拣，以便进行后续处理。© Eric / Greenpeace

手机电路板回收价格

目前，回收市场中手机电路板回收尚不存在统一价格，通常由回收人员和货主交易时商定，

本报告根据市场价格进行估算。通过行业资讯了解到每吨手机电路板的价格为几千元至十万元不等，具体价值需要根据金属种类和含量，经过检测判定。根据进一步和回收企业的询价可知，目前每吨国产非智能手机电路板的价格在 3-4 万元，每吨进口品牌智能手机电路板的价格在 7-8 万元，二者分别代表了当前手机电路板回收的最低值和最高值。因此，本报告取每吨手机电路板回收和拆解成本为 5-6 万元代表平均市场价格。

手机电路板冶炼成本

英国谢菲尔德大学的研究报告中根据 2012-2016 年欧盟国家废旧电子产品的数据对废旧电路板回收的盈利能力做出评估^[26]，该报告研究了电路板的处理过程中各部分成本所占比例¹⁴（如图 8），可以看出废旧电路板的回收成本是各项成本中占比最高的，其次是人力成本和能源使用成本，其余成本占比较小。根据手机电路板回收成本所占比例，可以估算出通过回收手机电路板提炼金属的总成本，折算后为 13 万元 / 吨 - 16 万元 / 吨。本文中以欧盟国家的电路板回收成本分布作为参考，相对于欧盟国家而言，中国实际的人力成本要更低，这也会对各部分的成本比例产生一定影响。

¹⁴ “鉴于本报告中的研究方法已指出手机、电视和电脑等电子产品的电路板将统一粉碎处理，因此本报告假设以下比例也适用于手机电路板回收。”

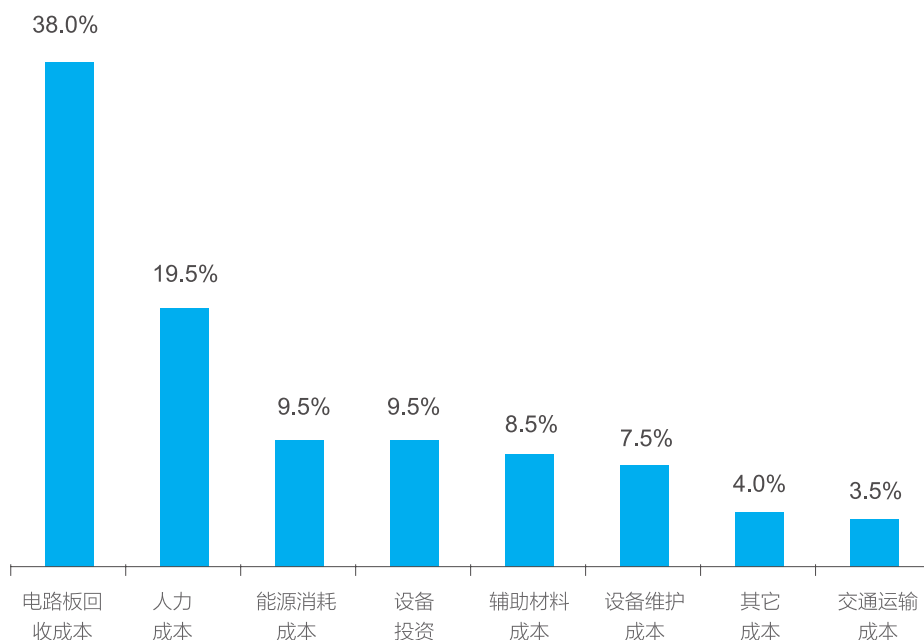


图 8. 废旧电路板处理成本分布百分比（取不同回收类型的平均值）

城市矿山和采矿的价值对比估算

通过上一个章节的分析以及相关研究结果^[27]，我们了解到从废旧电路板中回收金的价值要远大于回收其他金属的价值。鉴于不同品牌、不同年代手机电路板贵金属含量均有区别，综合文献数据选取每吨废弃手机电路板中可以提取出 0.8-1.5 千克¹⁵金^{[28][29][30]}。

现以金为例进行估算，已知回收手机电路板提炼金属的总成本为 13 万元 / 吨 -16 万元 / 吨，因此从手机电路板中提取 1 千克金的成本约为 8.7 万元 - 20 万元，而通过采矿获得 1 千克金的成本是约为 25 万元（见附表 6）。同样获取 1 千克金，城市矿山炼金的成本约为采矿炼金的 35%-80%。由此我们可以初步判断通过城市矿山提炼金的成本是低于采矿炼金的。

通过分析目前应用较广泛的城市矿山工艺流程（见附图一）可以看出，在冶炼金属的一套流程中包含了机械破碎、物理分离、火法冶金、湿法冶金和生物浸出等方法，利用不同金属间物理和化学性质的区别，可以达到提取多种金属的目的。也就是说，在获取 1 千克金的同时，从城市矿山也能同时获取银和钯这样的贵金属以及一定量的其他金属。相比较而言，由于矿石中所包含的金属种类明显少于电路板中的金属种类，而且从采矿炼金流程（见附图二和附表 10）可以看出在冶炼不同金属需要的工艺也不尽相同，一套工艺往往只能冶炼出 1-2 种金属。综上所述，城市矿山炼金的成本明显低于采矿炼金的成本，但却可以产出多种金属，可见其经济效益远高于采矿炼金。

¹⁵ 参考中国电子装备技术开发利用协会调研数据

3.3 城市矿山金属量及其经济价值情景分析

将有价值的金属从电子废弃物（即城市矿山）中回收具有巨大的资源和经济效益，但全球来看，电子废弃物回收率仍然很低。目前，许多国家和地区都颁布了相应法律法规来构建回收体系，然而包括中国在内的一些发展中国家，大部分电子废弃物却通过非正规渠道回收，而后采用原始方式如燃烧和浸酸处置，导致有价值的金属损失和严重的环境问题。另外，由于电子产品金属组成复杂，部分稀缺金属含量较低，回收不具经济可行性。因此，为了估算实际通过城市矿山回收的金属量及其经济价值，一方面要考虑废弃的电子产品中有多少得到了收集并进入正规处理途径，即电子废弃物回收率；另一方面要考虑金属回收再生过程中的工艺效率，即金属回收率（材料回收率）。



回收商对回收的手机进行拆解，分拣出屏幕、主板、摄像头等主要零配件。© Eric / Greenpeace

数据显示，2015 年欧洲地区电子废弃物回收率为 35%，美洲电子废弃物回收率为 17%，亚洲电子废弃物回收率仅为 15%。根据中国家用电器研究院测算，2015 年中国电脑的绿色回收率¹⁶ 为 27%¹⁷。截至 2014 年全球废旧手机回收率约为 3%，而我国废旧手机回收率不足 2%^[31]¹⁸。

表 10 总结了现有技术条件下从电子废弃物中回收金属所能达到的最高提取效率。其中，钴、镓和钽的提取效率基于假设。Zeng 等的研究中基于回收现状，将 2000、2005、2010 和 2015 年的金属回收率分别设为 50%、75%、85% 和 95%^[32]。因此，本报告将 2010-2015 年的金属回收率设为 85%，2015 年后的金属回收率按照报道的最大值进行计算。

表 10. 不同金属的提取效率¹⁹

金属种类	铝	铜	铁	铅	锡	锌	银	金	钯	钴	镓	钽
提取率（%）	88	95	98	95	95	95	95	95	95	95	95	95

2030 年在不同电子产品回收率情景下的经济价值

中国的电子产品回收率相比国际水平仍然较低。与中国相比，欧洲一些国家和美国在电子垃圾处理 and 回收方面具有更丰富的经验和更成熟的体系。在这一部分，我们以 2030 年为限，一方面想要以欧美国国家相对较高的产品回收率为目标，预估中国城市矿山在短期未来回收的金属量及其潜在的经济价值。另一方面想要表明尽管金属提取技术可以达到较高水准，但是较低的电子产品回收率成为中国城市矿山的限制因素，为进一步推动城市矿山发展提供依据。

信息框 2

欧盟和美国的电子产品回收体系的先进之处具体体现在以下几点：

1. 相对健全的法律法规

欧盟早在 2003 年就建立了《报废电子电气设施指令》和《关于在电气电子设施中禁止使用某些有害物质指令》来规范电子垃圾处置与管理。近些年来，以德国、芬兰等国家为代表的一些欧洲国家针对国情不断修订更新相关法律法规。美国政府也十分重视电子废弃物的管理，先后修订《固体废弃物处置法》以及《资源保护及回收法》，实现了废弃物管理由单纯的清理工作向分类回收、减量及资源再利用的综合性管理转变。

¹⁶ “绿色回收率”：有资质处理企业的实际拆解处理量与当年理论报废量的比例

¹⁷ 本报告计算中假设笔记本电脑和台式电脑回收率一样，均为 27%。

¹⁸ 参考中国电子装备技术开发利用协会调研数据

¹⁹ 表格中数据来自文献研究中各金属的最大提取效率

生产者责任延伸制度也是法规管理中的重要一环。

许多欧美国家已明确要求生产者要在产品的生命周期内承担环境责任，完成废弃产品的回收、处置等一系列工作。德国在 1990 年，组建了双重回收系统股份公司，它由 95 家公司发起设立，公司主要任务是分类回收合伙企业产生的废弃物，并进行循环再利用。这标志着德国企业真正在废弃物循环利用中担负起责任^[33]。

2. 相对完备的回收体系

欧洲的很多再生资源回收公司已经形成了电子废物处理处置体系，在回收、分类、拆解、资源提炼等几个环节都具有比较成熟的技术。为了获取更完备的电子废弃物统计数据，包括法国、爱尔兰、葡萄牙和荷兰在内的一些欧洲国家推出了新的电子废弃物统计模式，这个模式要求将金属废料贸易商、除生产企业之外的废品回收商和二手商店的电子废弃物信息纳入统计范围^[34]。在美国许多电子产品制造商都要承担回收电子废物的责任，制造商须在产品上标明自有或授权品牌的标签，向环保管理部门注册和提交回收计划，并在公司网站上公布回收信息。

3. 对公众的宣传教育

基于政府不断完善相关法律法规和多年来对公众回收电子废物的宣传教育，欧美国家民众逐渐养成了电子废物合理处置的习惯。1970 年美国颁布了世界上第一部环境教育法，规定环境教育范围不仅限于学生的学校环境教育，更包括对全体社会公民的环境教育。德国也很早就将环保课程纳入教育体系，让孩子从小学甚至幼儿园开始就了解相关知识^[35]。尽管公众意识的提高需要各方的努力和时间的积累，但从长远来看，公众将在电子废物资源化的推进中扮演极为重要的角色。

三个情景如下：

情景一

到 2030 年，若中国电脑和手机的回收率保持不变的情况。即电脑回收率 27%，手机回收率为 1%。

情景二

到 2030 年，若中国电脑和手机的回收比例能达到美国 2014 年的水平的情况²⁰。即电脑回收率为 62%，手机回收率为 33%²¹。

情景三

到 2030 年，若中国电脑和手机的回收比例能达到欧盟 2019 年的理想目标的情况。即电子产品回收率达到 85%²²。

²⁰ 根据目前能查到的最新数据代表当前水平，即美国 2014 年的数据。

²¹ 据 EPA，美国 2010 年电脑回收率为 40%，手机回收率为 11%，总体电子产品（WEEE）回收率为 20%。美国 2010-2014 年 WEEE 回收率分别为 20%，25%，29%，38%，42%。假设电脑和手机的回收率每年增长和 WEEE 整体趋势一致，则可以估算美国 2014 年电脑回收率为 62%，手机回收率为 33%。

²² 以 EU 2014 年修订法案的欧盟成员国 2019 年的电子废弃物回收目标代表 EU 当前水平，即 85%。该报告中假设电脑和手机均达到 85%。

从三个情景的比较中不难发现，提升中国废旧电子产品回收率可以使相关金属产出量明显提升，由此带来的经济价值提升也是巨大的（图 9）。从电子产品的角度来看（表 11），在情景一的前提下，手机的回收价值是最低的，通过回收手机提炼金属的价值仅为回收台式电脑的 3%。如果 2030 年手机的回收率提高到欧盟 2019 年的理想目标，其回收的金属价值将由 2018 年的 43 亿元增长到 521 亿元，增长了 12 倍²³，说明废旧手机回收有广阔的空间和前景。从金属的角度来看（表 12），如果 2030 年手机的回收率提高到欧盟 2019 年的理想目标，金、银、铜、铝、钯几种主要金属的产生量和总价值都将提升数倍。在此，我们计算了 2016 年中国相应的金属矿石进口量和从中可提炼出的金属量（见附表 7）并与不同情景下回收电子产品提炼的金属量（表 12）做对比。发现若 2030 年中国电子产品回收率达到 85%，则通过电子产品回收得到的金和钯的量（286 吨和 114 吨）远远大于 2016 年相对应的进口矿石中的金属产量（0.176 吨和 0.0022 吨），中国 2016 年进口铝，铜和银的量非常庞大，尽管如此在上述情景中银的回收量至少可以占到 2016 年进口矿石产银量的 20%。

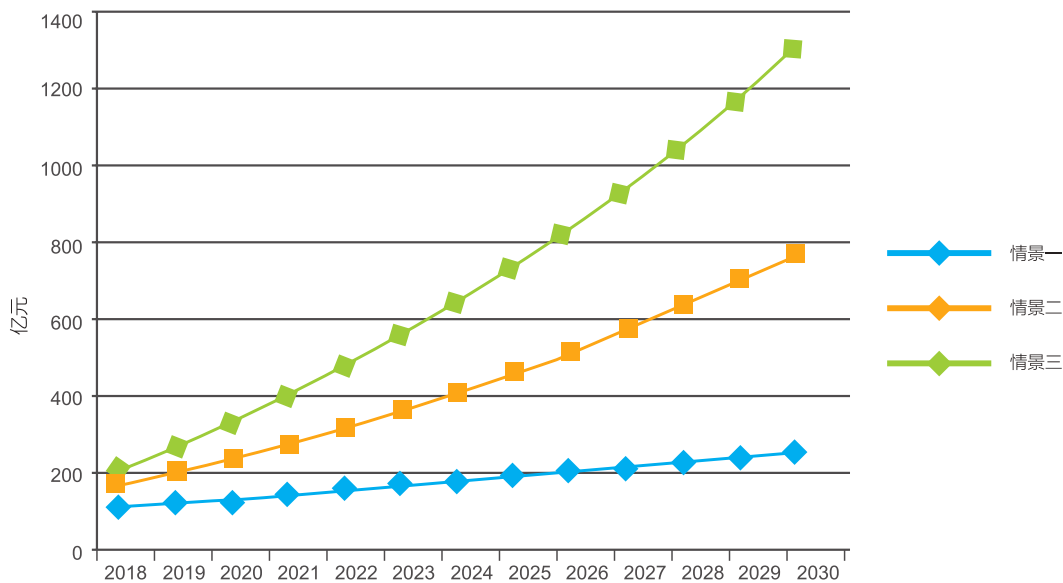


图 9. 2018-2030 年三种情景下通过回收手机、手提电脑和台式电脑提炼的金属总价值

²³ 由于金属的市场价格是与需求相关，因此难以进行预测，计算选取统一的金属价格见附表 3

表 11. 不同情景下几种电子产品 2030 年的回收价值

金属		情景一	情景二	情景三
手机	金属量 (吨)	448.21	14790.85	38097.65
	价值 (亿元)	6.13	202.24	520.92
笔记本电脑	金属量 (吨)	3933.94	9033.49	12384.62
	价值 (亿元)	35.74	82.07	112.52
台式电脑	金属量 (吨)	45522.53	104533.22	143311.67
	价值 (亿元)	208.86	479.61	657.52

* 详细数据见附表 8

表 12. 不同情景下 2030 年几种金属的回收价值

金属		情景一	情景二	情景三
铝	金属量 (吨)	2998.78	7190.07	10642.39
	价值 (百万)	47.36	113.56	168.08
铜	金属量 (吨)	36009.28	89907.57	141905.12
	价值 (百万)	1637.13	4087.56	6451.57
银	金属量 (吨)	113.10	342.86	684.74
	价值 (百万)	439.07	1330.95	2658.14
金	金属量 (吨)	49.75	147.05	286.35
	价值 (百万)	15520.26	45877.77	89338.48
钯	金属量 (吨)	27.83	70.47	113.56
	价值 (百万)	6791.72	17197.58	27714.00

3.4 城市采矿所节省的能耗和减少的碳排

提高废弃电子产品的回收处理率，把电子废弃物中闲置的金属资源回收和再利用，可以减少金属矿开采产生的大量环境影响和能源消耗。数据显示，金、银、铝、铜等金属回收再利用的能源消耗仅有开矿的 10%^[8]。因此，本研究计算了每回收 1 千克金属，相对于原始开采获得这种金属所节约的能源和减少的二氧化碳排放量均值，如附表 9 所示。其中，能源节省数据来自联合国环境署国际资源委员会 2013 年报告^[8]，该报告对全球不同地区、回收利用金属的不同工艺进行了综述，提供了能源节省的大致范围。考虑到技术进步，本计算选取了其中的最小值进行计算。由于这部分能源主要来自采矿、选矿、提取和精炼过程中电力消耗，所以在计算减少的温室气体排放时，选用国际通用的“边际二氧化碳减排系数”，数据来自中国发改委在 2016 年最新更新的各大地区电网基准线排放因子，并以全国平均值进行计算。

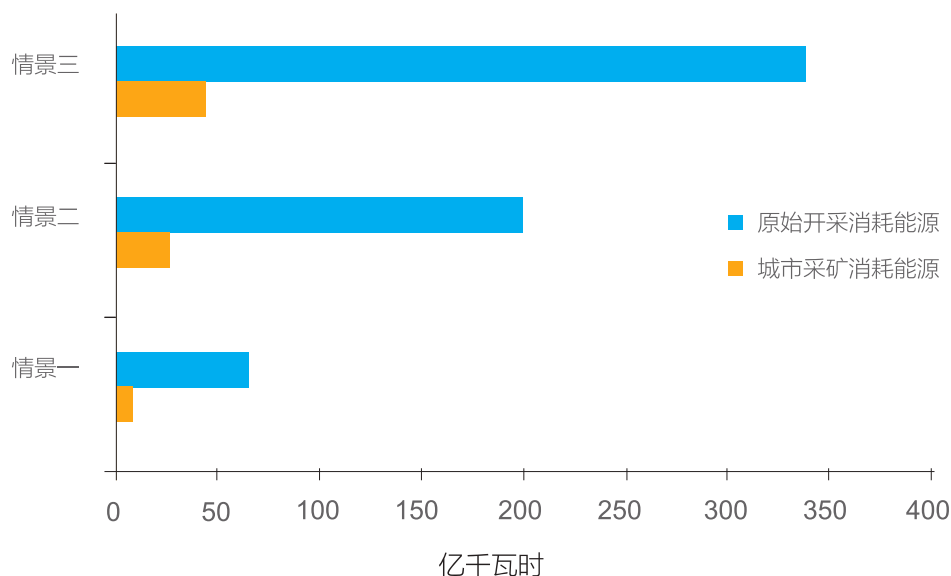


图 10. 三种情景下城市采矿回收金属与原始开采消耗的总能源对比

如图 10 所示。在中国维持现有电子产品回收率不变的情况下（情景一），到 2030 年时通过城市采矿回收金属要比通过原始开采的方式节省近 56 亿千瓦时能源。如果 2030 年中国电子产品回收率能到达欧盟 2019 年的理想水平（情景三），那么通过城市采矿回收金属要比通过原始开采的方式节省约 300 亿千瓦时能源，这些能源可以满足时速 350 千米的京沪高铁运行 75 万次。从减少碳排的角度讲，如果 2030 年中国电子产品回收率能到达欧盟 2019 年的理想目标，那么通过城市采矿回收金属要比通过原始开采的方式减少近 2200 万吨碳排放，这相当于一架波音 747-400 往返北京和纽约 26000 次的碳排量^[36]。

4 中国废旧电子产品回收现状分析

4.1 回收体系的整体介绍

中国废旧电子产品回收领域总体来看处于多渠道并存，合法非法共生的现状。目前没有统一的标准或要求对这一行业进行规范。对消费者来说，回收处理依然是一个有利可图的事情，因此消费者基本上会根据不同回收渠道的回收价格来进行选择。但是，随着智能手机等越来越多的智能电子产品的普及，越来越多的消费者在处理淘汰产品的过程中，除了回收价格，信息安全也成为了影响回收的一个重要因素。而回收商的后续处理方法则相对不透明，消费者难以以此作为选择因素。

4.2 废旧电子产品回收链条中重要环节

回收环节

- 品牌自营。品牌与第三方合作经营或授权第三方运营但以品牌官方渠道对外。其中，一些渠道仅回收自有品牌产品。其他一些渠道可以回收多数常见品牌产品，甚至包括线缆等通用产品。
- 独立于手机品牌的第三方渠道。主要有两种类型，都属于互联网经济下催生的渠道。首先是以互联网模式起家，专注于手机、笔记本电脑为主要回收产品的回收专营线上渠道，例如爱回收、回收宝等。在资本的推动下，其业务拓展迅速，流量升速显著，抢占回收市场为主要目标。在其蓬勃发展的同时，需要留意这些渠道对于自身回收业务“造血机制”的建设。另一方面，互联网电商、信息平台巨头也基本开始涉足这一领域：例如阿里巴巴集团主打 C2C 闲置交换销售的“闲鱼”，京东推出的“拍拍二手”以及 58 同城旗下的“转转”等。其背靠互联网巨头，在企业战略投资的势头下，发展迅猛。另一个优势是互联网巨头的流量导流，推动其新业务的迅速扩张。以上两类互联网回收模式，并非二元化的选择，而往往存在相互合作相互竞争的关系。例如爱回收也是京东平台下的回收渠道，而京东拍拍二手也在拓展自营的回收业务。
- 灰色或非法渠道。以线下为主，黄牛或走街串巷的回收商贩。
- 一部分拆解企业也自行建立了回收渠道。例如拆解企业“华新绿源”自行建立回收品牌“香蕉皮”，拆解企业“格林美”的自建品牌“回收哥”等。



回收商对回收的手机进行分拣，以便进行后续处理。© Eric / Greenpeace

拆解环节

- 109 家享有拆解基金补贴的拆解企业：自 2012 年 7 月至 2015 年 8 月，中国财政部、环境保护部（原）、国家发展改革委、工业和信息化部、海关总署、国家税务总局等部委分五批公布纳入废弃电器电子产品处理基金补贴范围的企业名单，共计 109 家。根据《废弃电器电子产品处理基金征收使用管理办法》，这些企业拆解符合要求的电子废弃物将得到相应的拆解基金补贴。
- 不在 109 家基金补贴目录的合法企业，例如俐通集团等。
- 非法拆解作坊。

4.3 主要存在的问题

回收价格难以达到消费者预期

与电子产品的销售价格相比，每一个电子产品在生命周期的末端总是廉价的。在厂商的销售策略下，旧产品的维修价格高昂，消费者往往不愿意维修旧产品而选择购买新的产品。然而，品牌商提供的回收计划中，针对被淘汰的旧产品的回收价格往往很低，甚至没有任何的回收补偿。而第三方的回收平台，对于老旧型号的回收价格同样不高，总体来看，回收价格难以达到消费者

的预期，加之手机等智能电子产品体积较小，导致大量废旧智能电子产品暂存在消费者手中，电子商品的回收利用习惯没有改变。

基金补贴细则迟迟未能出台

中国对废旧电子产品拆解基金补贴实行目录管理制度。2008年8月中国国务院通过《废弃电器电子产品回收处理管理条例》。条例规定，国家建立废弃电器电子产品处理基金，用于对废弃电器电子产品回收处理企业发放补贴。2012年7月，中国国家税务总局等六部委联合印发《废弃电器电子产品处理基金征收和使用管理办法》（下称“《管理办法》”），将电视机、电冰箱、洗衣机、房间空调器、微型计算机（即俗称的“四机一脑”）纳入首批基金补贴范围。2014年，废旧电子产品目录进行了扩充，手机等九种电子产品被纳入拆解补贴目录。

但是，针对手机等新增电子产品的拆解补贴实施细则始终未能出台，而让《管理办法》在事实上成为一纸空文。这一政策的胎死腹中导致拆解企业缺乏财政支持，以手机为代表的电子产品每年生产、销售、报废的巨量电子垃圾无法有效的得到拆解利用，同时生产企业没有承担制造这些电子垃圾的企业延伸社会责任为环境危害买单。从资源角度来看是对资源的巨大浪费。

拆解企业利润微薄

造成企业利润低，动力不足主要有三个因素。

第一，巨额拆解基金拖欠，拆解企业举步维艰。按照拆解基金补贴政策，中国目前共有109家电子电器拆解企业应按照相应的拆解电子电器数量享受拆解补贴基金。然而，拆解基金自2015年以来因多种原因致使基金亏空超过80亿人民币。拖欠下发补贴对许多拆解企业的运营产生较大影响，导致流动资金问题，一些企业不得不减产、限产甚至停产。这一现象也从侧面反映出拆解企业对基金补贴的依赖度较高。拆解企业在没有补贴的情况下不能良性经营保证企业运转。补贴并非长远之计，中国电子回收拆解行业未来不能依靠补贴生存，不能实现自负盈亏的市场适应性，这些回收拆解企业的未来发展堪忧。

第二，中国回收拆解企业目前仍然需要依赖非正规回收渠道的货源来满足生产需求。非正规回收渠道多以无照经营的个体经营者为主，回收拆解企业从这些上游货源收揽废旧电子产品基本上没办法得到相应的正规发票，导致回收拆解企业无法通过进项税和销项税的差额来降低增值税的缴纳，增加了回收拆解企业的负担。

第三，人力成本上升增加企业经营压力。对回收拆解行业来说，基本上拆解工作还无法摆脱人工拆解，人力成本的上升加剧了企业的经营压力。人力成本压力也是回收拆解企业无法拓展、自建回收渠道，完成最后一公里的网络搭建的主要原因之一。

零配件元器件拆解回收利用有待规范管理

历史上，曾经出现过一些著名的废旧电子产品拆解重镇，广东贵屿就是其中的主要拆解地之一。除了提炼贵重金属，产品中的零配件往往被拆解下来进行二次利用。随着智能手机的普及和大量更新换代，进入废旧手机回收拆解环节的手机中的电子元器件被大量拆解下来，分类回收重

复使用。这已经成为一条灰色产业链，在局部地区，甚至成为当地的重要产业，并作为扶贫项目得到了政府的支持。

但是，以上提到的电子零配件元器件的回收拆解利用还缺乏法规的管理和标准的约束，可能造成：1)产品功能、产品寿命等硬件质量问题。2)元器件及配套软件等最终客户使用授权等限制，带来专利风险。3)智能产品中含有存储功能的元器件也可能带来储存信息安全管理风险。

从循环经济的角度来看，资源的回收利用应该遵循从高价值层级到低价值层级的回收利用原则。在不破坏原有零配件的基础上重复利用符合这一循环经济的原则。但鉴于以上硬件、软件、信息安全等方面的顾虑，这一产业依然有待规范管理。

4.4 问题解决的障碍

基金政策不是长久之计

基金通常指为兴办、维持或发展某种事业而储备的资金或专门拨款。废旧电器电子产品拆解基金补贴的设计初衷也是为了推动、维持中国电子废弃物回收拆解产业。基金制度中，制定基金征收和发放标准非常重要，直接影响了基金的运转效果。中国的基金标准也不例外，基金涵盖的范围也对拆解基金的运转产生了重要影响。回收拆解行业尽管属于附加值较低的行业，但是，考



回收商对回收的手机进行拆解，分拣出屏幕、主板、摄像头等主要零配件。© Eric / Greenpeace

虑到深加工环节贵重金属的提炼的经济效益，实现自负盈亏的良性发展具有经济可行性。

零配件重复使用需要最佳实践验证

在目前没有明确的法规和标准的管理约束之下，零配件的回收拆解再利用属于灰色地带，属于既没有规范，也没有补贴的状态。在推动法规规范管理的目标下，零配件拆解再利用的市场经营案例，对探索回收利用行业的循环经济尝试具有一定的标志性作用。最佳实践将成为循环经济模式的有利验证。

电子产品生产企业拆解基金缴纳需要有奖有罚

根据《废弃电器电子产品处理基金征收使用管理办法》要求，对拆解补贴目录清单上的生产企业或进口企业的产品种类按产品数量征收基金。这一征收办法，没有对生产企业是否在源头开展环保举措进行差异化区分。不能激励生产企业从设计阶段优先考虑使用环保材料、提高产品维修性，生产阶段减少三废排放，通过企业渠道宣传产品回收等方面。从产品全生命周期角度来讲，对整个行业的环境改善有限。在需要进行基金补贴的前提下，生产企业缴纳回收基金需要区别对待，避免“一刀切”的政策挫伤企业绿色创新的积极性。

5 总结与建议：

发展金属循环经济 中国蓄势待发

总结

中国循环经济政策进程

2008 年，全国人大通过了《中华人民共和国循环经济促进法》。这是中国循环经济发展最高层级的法律文件，旨在促进循环经济发展，提高资源利用效率，保障环境可持续发展。此法将循环经济定义为 " 在生产、流通和消费等过程中进行的减量化、再利用、资源化活动 "。

为落实 “十二五” 规划纲要，2013 年国务院印发《循环经济发展战略及近期行动计划》提供了更具体的指导政策。重点任务包括鼓励工业、农业、服务业源头减量及资源利用，社会消费层面完善回收体系，推动再生资源利用产业化，发展再制造行业；并培育各地循环经济示范工程、示范城市和示范企业，实现技术突破和管理创新，推动循环经济形成较大规模。

2015 年，国家发展改革委进一步印发《2015 年循环经济推进计划》，列出具体措施及负责执行的对应部门。2017 年，国家发展改革委等 14 个部委联合制定了《循环发展引领行动》，对 “十三五” 期间循环经济发展工作做出整体策略部署。目标到 2020 年，主要废弃物循环利用率达到 54.6%；一般工业固体废物综合利用率达到 73%，农作物秸秆综合利用率达到 85%，资源循环利用产业产值达到 3 万亿元。

过去十年就出台了四份重要政策文件，由定义国家策略方向和大原则，逐步细化，具体到各部门的行政任务和目标，可见政府对落实循环经济的重视。要实现整个产业链条的资源循环，产业规模化往往是一大障碍，本报告尝试论证电子产品的金属资源循环具有强大的规模化的经济潜力，是实现生产、流通和消费全链条产业循环经济的关键产业。

电子产品金属资源循环 中国发展条件齐备

在各个必然的驱动因素带动下，全球多种金属资源的需求在未来数十年会继续上升。尤其是新兴科技产品和新能源技术的普及，会继续带领全球社会进入高资源强度时代。

原生金属材料的各个生产环节都会给环境带来沉重的压力。例如采矿活动对所在地的生态破坏，选矿作业产生的尾矿也对周围居民造成潜在的安全风险。此外，冶炼金属的能耗量巨大，大量碳排放会加剧气候变暖。加上自然资源有限，发展再生资源是解决未来资源需求和环境问题的一个重要战略。

纵观各项基本因素，中国尤其具备发展电子废弃物金属资源循环利用的条件：

1. 城市矿山经济价值高

据本研究推算，随着中国未来电子产品废弃量持续增长，其潜在的经济价值也非常可观。以2019年的废旧电脑和手机为例，城市矿山中埋藏着约86000吨铜，380吨银，160吨金以及多种其他金属。以目前的市场价格估算，城市矿山的经济总价值约为800亿元，预计到2030年城市矿山的经济总价值约为1600亿元。

此潜在经济价值可带动资金投入，让整个产业得以发展，推动现有比较落后的回收拆解行业，在未来有望支撑回收拆解行业的发展，为社会提供就业机会，促进经济发展。

2. 产业集中，可减少依赖进口原材料

比起世界其他国家，中国电子产品的生产、消费、废弃都达到相当的体量。具备难得的利好条件去建立高度集中的产业链条，也比其他国家存在更好的资源循环条件。中国曾经是世界各地的电子废弃物的处理地，这让中国有丰富的相关从业人员的储备。同时，作为世界最大的电子产品生产地，完整的供应链保障了再生金属材料的出路。中国经济发展，人民收入水平提升，加上科技网络生态蓬勃发展，形成了庞大的电子产品消费市场。这些背景让中国满足了三个难得的发展循环经济的基础条件，足以缓解体量、物流、需求这三个在资源回收利用方面普遍存在的问题。

中国虽然是世界上电子产品的主要生产地，但是一些必需的金属矿产由于没有本地产能，这形成一定的风险。据本研究结论，如果中国手机和电脑回收率到2030年能够达到85%，通过电子产品回收得到的金和钯远大于进口矿石中的金产量。这不但有助保障金属资源供应，还能保障价格稳定，可见发展金属资源回收利用产业是很好的资源战略部署。

3. 降低原生金属生产对环境的破坏

采矿是中国经济结构中的重要组成部分，近些年来原生矿产的开采为我们的生产生活提供了丰富的金属材料。与此同时，由采矿活动引发的水土流失、水污染、空气污染、生物多样性减少等问题也不容忽视。在中国，采矿累计占用和损毁的土地已经超过375万公顷^[16]。通过城市采矿回收金属不仅能够在很大程度上减少原生开采带来的环境污染，还能有效降低能源损耗和碳排放。根据联合国统计数据，金、银、铝、铜等金属通过回收利用的能源消耗仅为开矿的10%。根据本报告中的估算，如果中国手机和电脑回收率到2030年能够达到85%，通过城市采矿可比原生开采节省约300亿千瓦时能源，碳排放减少约2200万吨。从长远来看，城市采矿将是更加可持续的金属获取方式。

建议

电子产品金属回收具有显著的经济潜力，要推动市场加速转型至循环经济模式，必须各方共同努力，在以下方向着力：

1 为回收拆解产业链提供经济可行性的解决方案

- 政府可以用基金的形式，扶持具规模、有长远发展潜力的回收拆解冶炼企业；鼓励冶炼行业投入再生金属生产；帮助行业规模化发展，连接供应端及需求端。
- 政府亦可以研究调整税收政策，来为产业提供经济诱因。例如用税收制度帮助行业减轻能源、劳工、资源等方面的成本。
- 行业领袖例如品牌商应该增加对回收的投资，让回收拆解产业链得以发展。
- 影响投资力度的最关键因素往往是未来的经济回报前景。稳定可预期的政策、透明的数据以预测回收量、减少报废资源流向不规范的渠道，都是投资者重要的考虑点，这需要社会各方共同实现。

2 采用生态设计，支持技术创新

- 生产商和品牌商应该减少使用原生材料，改为采用再生材料。
- 品牌商应该设计使用寿命更长、更易于升级及维修的产品，并且使用标准化的部件。促进使用功能正常的零部件翻新再用。应该延长对设备支持软件更新，不应以软件更新来结束旧设备的使用寿命。
- 提升生产工艺，提高资源效率，减少消耗。
- 政府、学术界，以至整个行业鼓励拆解技术的研发，支持相关技术开发及应用。

3 鼓励回收产业链合作，促进信息互通

- 电子产品的种类繁多，零部件中的资源结构复杂，这为拆解到冶炼的技术带来难题。产业链的不同环节有必要互通信息，例如生产商可以向拆解商提供各零部件的连接方法及对应的分离方法，好让拆解商能以更高资源效率，更低损耗的对报废设备进行拆解分离。
- 生产商亦可以整合产品的资源含量。这些数据可用作分析预测报废产品的资源成分，金属品位结构，有毒化学物质的释放可能，为回收拆解及冶炼行业提供资源流量的信息。
- 废弃物资源量和回收率的不稳定和难以预测一直是回收拆解商难以投入更大资本进行规模化发展的原因。然而只要数据充分，废弃量和回收率是可以通过建立模型计算得出，结果能帮助回收拆解及其下游产业做出更可靠的投资及运营计划。故此，整个产业的数据收集和整理是回收产业的重要信息。

-
- 政府以及行业领先企业应该提供诱因，促进行业信息交流，鼓励产业链协作。

4 提高回收率

- 社会多方需要共同行动才能有效增加回收率。
- 消费者本身需要更有意识，减少消费，不过度追求更新换代，以维修去延长产品的寿命，当产品必须报废时，不屯积资源，而是寻找合适的渠道回收。
- 居民小区的行政单位，或者小区组织可以在地区设立废弃资源分类回收体系和设施，联系回收商，为公众提供更便捷的资源处置渠道。
- 面对消费者的企业可以多提供诱因，鼓励消费者把藏在抽屉中的设备拿去回收，让资源循环起来。
- 政府亦应该以资源管理角度重新规划废物处理基础设施和系统。

5 制定标准及框架，增强回收系统运作效率

- 政府及行业协会可共同制定有助提高资源使用的行业标准，包括再制造产品标准、信息安全标准等等，增强消费者对回收的信心。

结语：让资源生生不息

当资源被使用的时间更长；当产品更耐用；当消费者能以维修等方式延长产品的使用寿命，减少消耗新的资源；当报废等于资源重生；当重生的资源可以再一次进入产品中被使用起来，有限的资源便能周而复始，生生不息。

资源循环一直是农业社会的基本法则，然而自工业革命以来，攫取自然资源成为了促进社会发展的重要手段。我们可能很难逆转世界对资源的需求，但我们仍然可以建设一个可持续的未来，方法是改变我们现在开采、生产、报废这样的消耗习惯，转型到循环经济的模式。

如果我们由现在开始发展循环经济，从丰饶的城市矿山获取再生资源，即便是在需求同步上升的情况下，到了几十年后，原生矿产的产量将不必再与 GDP 挂钩；到时候我们终于可以逆转人类有史以来一直持续的原生矿产的增长趋势^[37]，更能长远减缓气候变化。这将是扭转地球资源命运的开始。

现在是启动这个生生不息的循环的关键节点。我们需要政府、商业、社会公众的多方协力，为这循环体系建立基础的法规标准、注入资金、开发技术，让再生资源产品得以与既有的原生矿产资源竞争，为再生资源投资者带来可期的利润，为产业建立经济可行性。现在这个循环的起点就在我们脚下。

参考文献

- [1] 《全球电子产品制造过程使用的能源与资源报告》 <http://www.greenpeace.org.cn/limit-recycle-on-pad-cellphone/>
- [2] Zeng, X., Gong, R., Chen, W.-Q., & Li, J. 2016. Uncovering the Recycling Potential of "New" WEEE in China. *Environmental Science & Technology*, 50(3), 1347- 1358.
- [3] Buchert, Matthias, Andreas Manhart, Daniel Bleher, and Detlef Pingel. 2012. "Recycling Critical Raw Materials from Waste Electronic Equipment." Freiburg: Öko-Institut eV 49 (0): 30 - 40.
- [4] 《中华人民共和国黄金行业标准 YS-T 3004- 2011》.
- [5] Kleijin, R. 2012. Ratio of global mineral mine production (2000-2009/1970-1979). In: *Materials and energy: a story of linkages*. Dissertation Leiden University.
- [6] Reuter, M. A., Hudson, C., Van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C., Hagelüken, C., & Others. 2013. Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.
- [7] World Economic Forum. 2015. *Mining & Metals in a Sustainable World 2050*.
- [8] United Nations Publications. 2014. *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*. United Nations Environment Pro.
- [9] National Research Council, Division on Earth and Life Studies, Board on Earth Sciences and Resources, Committee on Earth Resources, & Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy. 2008. *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*. National Academies Press.
- [10] Yang, J., Zhu, H. L., Ma, L. W., & Li, Z. 2013. An Evaluation of Critical Raw Materials for China. *AMRO*, 773, 954- 960.
- [11] Secure European Critical Rare Earth Elements. <https://cordis.europa.eu/project/rcn/216075/factsheet/en>
- [12] Resource Securement Strategies, Prime Minister of Japan and His Cabinet, 2012, <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/package/dai15/sankou01.pdf>.
- [13] Hatayama, H., & Tahara, K. 2015. Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy. *Materials Transactions*, 56(2), 229 - 235.
- [14] Fortier, S. M., Nassar, N. T., Lederer, G. W., Brainard, J., Gambogi, J., & McCullough, E. A. 2018. Draft critical mineral list—Summary of methodology and background information—U.S. Geological Survey technical input document in response to Secretarial Order No. 3359. Open-File Report. <https://doi.org/10.3133/ofr20181021>
- [15] Metal recycling; MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2017, USGS
- [16] 《全国矿产资源规划（2016 - 2020 年）》
- [17] Halfar, J., & Fujita, R. M. 2007. Danger of deep-sea mining. *SCIENCE-NEW YORK THEN WASHINGTON-*, 316(5827), 987.
- [18] McLellan, B. C., Yamasue, E., Tezuka, T., Corder, G., Golev, A., & Giurco, D. 2016. Critical Minerals and Energy- Impacts and Limitations of Moving to Unconventional Resources. *Resources*, 5(2), 19.
- [19] http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/ncjj/zhd/201404/t20140418_607888.html
- [20] USGS. 2015 *Minerals Yearbook: China*
- [21] USGS. *Global Mineral Resource Assessment 2010*
- [22] USGS. *Mineral Commodity Summaries 2018*
- [23] USGS. 2016 *Minerals Year Book: China*

- [24] UN Comtrade 联合国商品贸易统计数据库 <https://comtrade.un.org/db/>
- [25] Hagelüken, C. 2006. Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery. *Erzmetall*, 59(3), 152- 161.
- [26] Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S. C., & Rosa, P. 2016. A profitability assessment of European recycling processes treating printed circuit boards from waste electrical and electronic equipments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 749- 760.
- [27] A UL White Paper -- The Life Cycle of Materials in Mobile Phones (2011)
- [28] Chanceler, P., Meskers, C. E. M., Hagelüken, C., & Rotter, V. S. (2009). Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Industrial Ecology*, 13(5), 791- 810.
- [29] Maryam, G., Maria, R., Bijan, S.(2018). Investigation into the Recovery of Valuable Metals from Waste Mobile Phone Printed Circuit Boards (PCBs): An Australian Case Study. *Interntional Journal of Waste Resources*, 8(358).
- [30] Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A., & Kameya, T. 2011. A preliminary categorization of end- of- life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste Management* , 31(9-10), 2150- 2160.
- [31] 中国废弃电器电子产品回收处理及综合利用行业白皮书 2015.
- [32] Zeng, X., Mathews, J. A., & Li, J. 2018. Urban Mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining. *Environmental Science & Technology*, 52(8), 4835 - 4841.
- [33] 冯利华 . 国外生产者责任延伸 (EPR) 制度立法实践对我国的启示 . 国家信息中心博士后研究通讯, 2017.
- [34] Balde, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources.
- [35] Palmer, J. (2002). *Environmental Education in the 21st Century: Theory, Practice, Progress and Promise*. Routledge.
- [36] Christian, N. J. (2009). *Calculating The Carbon Dioxide Emissions of Flights*. Oxford University.
- [37] Ester, V. D. V. , Van Oers, L. , Verboon, M. , & Kuipers, K. 2018. Environmental implications of future demand scenarios for metals: methodology and application to the case of seven major metals. *Journal of Industrial Ecology*.
- [38] Duan, H., Hu, J., Tan, Q., Liu, L., Wang, Y., & Li, J. 2016. Systematic characterization of generation and management of e-waste in China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23(2), 1929 - 1943.
- [39] 全球矿物资源网 <http://www.infomine.com>
- [40] 刘时杰 . 《铂族元素矿冶学》. 冶金工业出版社, 2001.
- [41] 《中华人民共和国有色金属行业标准 YS/T 433- 201X》
- [42] 《矿产一般工业要求汇编 DZ-T0213- 2002》
- [43] 《铝土矿进口贸易指南》. 中华人民共和国商务部, 2012
- [44] 世界银行数据库 <https://data.worldbank.org/cn/>
- [45] 《2016 中国区域电网基准线排放因子 (征求意见稿)》
- [46] Wang, M. , Tan, Q. , Chiang, J. F. , & Li, J. . 2017. Recovery of rare and precious metals from urban mines—a review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(5), 1.
- [47] Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. 2003. *Principles of Mineral Processing*. SME.

附录

附表 1. 2010–2030 年典型电子废弃物产生量（千吨）^[2]

年份	废弃手机	废弃笔记本电脑	废弃台式电脑	电子废弃物
2010	26.6	66.1	733.7	3793.5
2011	33.9	89.5	980.6	4693.0
2012	42.7	118.5	1286.3	5698.6
2013	52.2	148	1648.2	6795.7
2014	63.2	177.2	2045.2	7960.5
2015	75.8	215	2475.2	9191.1
2016	90.3	244	2937.3	10460.4
2017	106.5	264.5	3396.2	11736.1
2018	123.8	287.6	3847.9	13019.5
2019	142	310.5	4281.5	14292.2
2020	160.9	333.3	4565	15396.0
2021	180.4	355.8	4934.9	16624.6
2022	200.3	378.2	5425.1	17948.2
2023	220.6	400.4	5769.7	19118.7
2024	241.2	422.5	6108.6	20274.3
2025	261.9	444.5	6450.1	21421.8
2026	282.8	466.5	6801.1	22567.6
2027	303.8	488.4	7167.3	23717.2
2028	324.8	510.2	7552.5	24874.7
2029	345.9	532	7958.5	26042.7
2030	367.1	553.8	8385.5	27222.0

附表 2. 每吨废弃电子产品电路板中可提取的金属含量（千克 / 吨）^[38]

	铝	铜	铁	铅	锡	锌	银	金	钯	钴	镓	铊
笔记本电脑	18	190	37	9.8	16	16	1.1	0.63	0.2	0.08	0.01	5.8
台式电脑	18	200	13	23	18	2.7	0.57	0.24	0.15	0.048	0.011	0.007
手机	15	330	38	13	35	5	3.8	1.5	0.3	0.28	0.14	2.6

附表 3. 不同金属市场价值范围及平均值（万元 / 吨）^[39]

	最低值	最高值	平均值
铝	1.35	1.81	1.58
铜	4.05	5.04	4.55
钴	31.30	66.42	48.86
金	28914.88	33483.75	31199.31
铅	1.30	1.87	1.59
钡	20772.51	28037.48	24404.99
银	345.06	431.33	388.19
锡	12.99	15.38	14.18
铊	85.97	129.72	107.85
锌	1.59	2.51	2.05
铁	0.04	0.13	0.08
镓	375.59	399.93	387.76

附表 4. 各种电子产品中各种金属总含量（吨）

年份	手提电脑											
	Al	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn	Ag	Au	Pd	Co	Ga	Ta
2010	111.84	1180.55	229.90	60.89	99.41	99.41	6.83	3.91	1.24	0.50	0.06	36.04
2011	151.43	1598.47	311.28	82.45	134.61	134.61	9.25	5.30	1.68	0.67	0.08	48.80
2012	200.50	2116.41	412.14	109.16	178.22	178.22	12.25	7.02	2.23	0.89	0.11	64.61
2013	250.42	2643.28	514.74	136.34	222.59	222.59	15.30	8.76	2.78	1.11	0.14	80.69
2014	299.82	3164.79	616.30	163.24	266.51	266.51	18.32	10.49	3.33	1.33	0.17	96.61
2015	363.78	3839.90	747.77	198.06	323.36	323.36	22.23	12.73	4.04	1.62	0.20	117.22
2016	412.85	4357.84	848.63	224.77	366.98	366.98	25.23	14.45	4.59	1.83	0.23	133.03
2017	447.53	4723.97	919.93	243.66	397.81	397.81	27.35	15.66	4.97	1.99	0.25	144.21
2018	486.62	5136.54	1000.27	264.94	432.55	432.55	29.74	17.03	5.41	2.16	0.27	156.80
2019	525.37	5545.53	1079.92	286.03	466.99	466.99	32.11	18.39	5.84	2.33	0.29	169.28
2020	563.94	5952.74	1159.22	307.04	501.28	501.28	34.46	19.74	6.27	2.51	0.31	181.72
2021	602.01	6354.59	1237.47	327.76	535.12	535.12	36.79	21.07	6.69	2.68	0.33	193.98
2022	639.91	6754.65	1315.38	348.40	568.81	568.81	39.11	22.40	7.11	2.84	0.36	206.19
2023	677.48	7151.14	1392.59	368.85	602.20	602.20	41.40	23.71	7.53	3.01	0.38	218.30
2024	714.87	7545.85	1469.46	389.21	635.44	635.44	43.69	25.02	7.94	3.18	0.40	230.35
2025	752.09	7938.77	1545.97	409.47	668.53	668.53	45.96	26.32	8.36	3.34	0.42	242.34
2026	789.32	8331.69	1622.49	429.74	701.62	701.62	48.24	27.63	8.77	3.51	0.44	254.34
2027	826.37	8722.82	1698.66	449.91	734.55	734.55	50.50	28.92	9.18	3.67	0.46	266.28
2028	863.26	9112.17	1774.48	470.00	767.34	767.34	52.75	30.21	9.59	3.84	0.48	278.16
2029	900.14	9501.52	1850.30	490.08	800.13	800.13	55.01	31.51	10.00	4.00	0.50	290.05
2030	937.03	9890.87	1926.12	510.16	832.92	832.92	57.26	32.80	10.41	4.16	0.52	301.93

台式电脑												
年份	Al	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn	Ag	Au	Pd	Co	Ga	Ta
2010	1016.91	11298.98	734.43	1299.38	1016.91	152.54	32.20	13.56	8.47	2.71	0.62	0.40
2011	1359.11	15101.24	981.58	1736.64	1359.11	203.87	43.04	18.12	11.33	3.62	0.83	0.53
2012	1782.81	19809.02	1287.59	2278.04	1782.81	267.42	56.46	23.77	14.86	4.75	1.09	0.69
2013	2284.41	25382.28	1649.85	2918.96	2284.41	342.66	72.34	30.46	19.04	6.09	1.40	0.89
2014	2834.65	31496.08	2047.25	3622.05	2834.65	425.20	89.76	37.80	23.62	7.56	1.73	1.10
2015	3430.63	38118.08	2477.68	4383.58	3430.63	514.59	108.64	45.74	28.59	9.15	2.10	1.33
2016	4071.10	45234.42	2940.24	5201.96	4071.10	610.66	128.92	54.28	33.93	10.86	2.49	1.58
2017	4707.13	52301.48	3399.60	6014.67	4707.13	706.07	149.06	62.76	39.23	12.55	2.88	1.83
2018	5333.19	59257.66	3851.75	6814.63	5333.19	799.98	168.88	71.11	44.44	14.22	3.26	2.07
2019	5934.16	65935.10	4285.78	7582.54	5934.16	890.12	187.92	79.12	49.45	15.82	3.63	2.31
2020	6327.09	70301.00	4569.57	8084.62	6327.09	949.06	200.36	84.36	52.73	16.87	3.87	2.46
2021	6839.77	75997.46	4939.83	8739.71	6839.77	1025.97	216.59	91.20	57.00	18.24	4.18	2.66
2022	7519.19	83546.54	5430.53	9607.85	7519.19	1127.88	238.11	100.26	62.66	20.05	4.60	2.92
2023	7996.80	88853.38	5775.47	10218.14	7996.80	1199.52	253.23	106.62	66.64	21.32	4.89	3.11
2024	8466.52	94072.44	6114.71	10818.33	8466.52	1269.98	268.11	112.89	70.55	22.58	5.17	3.29
2025	8939.84	99331.54	6456.55	11423.13	8939.84	1340.98	283.09	119.20	74.50	23.84	5.46	3.48
2026	9426.32	104736.94	6807.90	12044.75	9426.32	1413.95	298.50	125.68	78.55	25.14	5.76	3.67
2027	9933.88	110376.42	7174.47	12693.29	9933.88	1490.08	314.57	132.45	82.78	26.49	6.07	3.86
2028	10467.77	116308.50	7560.05	13375.48	10467.77	1570.16	331.48	139.57	87.23	27.91	6.40	4.07
2029	11030.48	122560.90	7966.46	14094.50	11030.48	1654.57	349.30	147.07	91.92	29.41	6.74	4.29
2030	11622.30	129136.70	8393.89	14850.72	11622.30	1743.35	368.04	154.96	96.85	30.99	7.10	4.52

手机												
年份	Al	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn	Ag	Au	Pd	Co	Ga	Ta
2010	120.90	2659.73	145.08	104.78	282.09	40.30	30.63	12.09	2.42	2.26	1.13	20.96
2011	154.08	3389.66	184.89	133.53	359.51	51.36	39.03	15.41	3.08	2.88	1.44	26.71
2012	194.07	4269.57	232.89	168.20	452.83	64.69	49.16	19.41	3.88	3.62	1.81	33.64
2013	237.25	5219.48	284.70	205.62	553.58	79.08	60.10	23.72	4.74	4.43	2.21	41.12
2014	287.24	6319.37	344.69	248.94	670.24	95.75	72.77	28.72	5.74	5.36	2.68	49.79
2015	344.51	7579.24	413.41	298.58	803.86	114.84	87.28	34.45	6.89	6.43	3.22	59.72
2016	410.41	9029.10	492.50	355.69	957.63	136.80	103.97	41.04	8.21	7.66	3.83	71.14
2017	484.04	10648.94	580.85	419.50	1129.43	161.35	122.62	48.40	9.68	9.04	4.52	83.90
2018	562.67	12378.76	675.21	487.65	1312.90	187.56	142.54	56.27	11.25	10.50	5.25	97.53
2019	645.39	14198.58	774.47	559.34	1505.91	215.13	163.50	64.54	12.91	12.05	6.02	111.87
2020	731.29	16088.39	877.55	633.79	1706.34	243.76	185.26	73.13	14.63	13.65	6.83	126.76
2021	819.92	18038.20	983.90	710.60	1913.14	273.31	207.71	81.99	16.40	15.31	7.65	142.12
2022	910.36	20028.00	1092.44	788.98	2124.18	303.45	230.63	91.04	18.21	16.99	8.50	157.80
2023	1002.63	22057.79	1203.15	868.94	2339.46	334.21	254.00	100.26	20.05	18.72	9.36	173.79
2024	1096.25	24117.59	1315.50	950.09	2557.93	365.42	277.72	109.63	21.93	20.46	10.23	190.02
2025	1190.34	26187.38	1428.40	1031.62	2777.45	396.78	301.55	119.03	23.81	22.22	11.11	206.32
2026	1285.33	28277.17	1542.39	1113.95	2999.09	428.44	325.62	128.53	25.71	23.99	12.00	222.79
2027	1380.77	30376.96	1656.93	1196.67	3221.80	460.26	349.80	138.08	27.62	25.77	12.89	239.33
2028	1476.22	32476.75	1771.46	1279.39	3444.50	492.07	373.97	147.62	29.52	27.56	13.78	255.88
2029	1572.12	34586.54	1886.54	1362.50	3668.27	524.04	398.27	157.21	31.44	29.35	14.67	272.50
2030	1668.47	36706.33	2002.16	1446.01	3893.10	556.16	422.68	166.85	33.37	31.14	15.57	289.20

附表 5. 废弃电子产品中可回收金属价值

手提电脑中各金属总价值（亿元）													
年份	Al	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn	Ag	Au	Pd	Co	Ga	Ta	总价值
2010	0.018	0.537	0.002	0.010	0.141	0.020	0.265	12.213	3.033	0.002	0.002	0.389	16.632
2011	0.024	0.727	0.003	0.013	0.191	0.028	0.359	16.536	4.106	0.003	0.003	0.526	22.520
2012	0.032	0.962	0.003	0.017	0.253	0.037	0.476	21.894	5.437	0.004	0.004	0.697	29.816
2013	0.040	1.202	0.004	0.022	0.316	0.046	0.594	27.345	6.790	0.005	0.005	0.870	37.239
2014	0.047	1.439	0.005	0.026	0.378	0.055	0.711	32.740	8.130	0.007	0.006	1.042	44.586
2015	0.057	1.746	0.006	0.031	0.459	0.066	0.863	39.724	9.864	0.008	0.008	1.264	54.097
2016	0.065	1.981	0.007	0.036	0.521	0.075	0.979	45.082	11.195	0.009	0.009	1.435	61.394
2017	0.071	2.148	0.008	0.039	0.564	0.082	1.062	48.870	12.136	0.010	0.010	1.555	66.552
2018	0.077	2.335	0.008	0.042	0.614	0.089	1.154	53.138	13.195	0.011	0.010	1.691	72.364
2019	0.083	2.521	0.009	0.045	0.662	0.096	1.246	57.369	14.246	0.011	0.011	1.826	78.126
2020	0.089	2.706	0.010	0.049	0.711	0.103	1.338	61.581	15.292	0.012	0.012	1.960	83.863
2021	0.095	2.889	0.010	0.052	0.759	0.110	1.428	65.738	16.325	0.013	0.013	2.092	89.525
2022	0.101	3.071	0.011	0.055	0.807	0.117	1.518	69.877	17.352	0.014	0.014	2.224	95.161
2023	0.107	3.251	0.012	0.059	0.854	0.124	1.607	73.979	18.371	0.015	0.015	2.354	100.747
2024	0.113	3.431	0.012	0.062	0.901	0.131	1.696	78.062	19.385	0.016	0.015	2.484	106.307
2025	0.119	3.609	0.013	0.065	0.948	0.137	1.784	82.127	20.394	0.016	0.016	2.614	111.843
2026	0.125	3.788	0.013	0.068	0.995	0.144	1.872	86.192	21.404	0.017	0.017	2.743	117.378
2027	0.131	3.966	0.014	0.071	1.042	0.151	1.960	90.238	22.408	0.018	0.018	2.872	122.889
2028	0.136	4.143	0.015	0.075	1.088	0.158	2.048	94.266	23.409	0.019	0.019	3.000	128.374
2029	0.142	4.320	0.015	0.078	1.135	0.164	2.135	98.294	24.409	0.020	0.019	3.128	133.859
2030	0.148	4.497	0.016	0.081	1.181	0.171	2.223	102.321	25.409	0.020	0.020	3.256	139.344

台式电脑中各金属总价值（亿元）													
年份	Al	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn	Ag	Au	Pd	Co	Ga	Ta	总价值
2010	0.161	5.137	0.006	0.206	1.442	0.031	1.250	42.302	20.681	0.013	0.024	0.004	71.259
2011	0.215	6.866	0.008	0.276	1.928	0.042	1.671	56.538	27.641	0.018	0.032	0.006	95.239
2012	0.282	9.006	0.011	0.362	2.529	0.055	2.192	74.163	36.258	0.023	0.042	0.007	124.929
2013	0.361	11.540	0.014	0.463	3.240	0.070	2.808	95.029	46.459	0.030	0.054	0.010	160.078
2014	0.448	14.319	0.017	0.575	4.021	0.087	3.485	117.919	57.650	0.037	0.067	0.012	198.636
2015	0.542	17.330	0.021	0.696	4.866	0.106	4.217	142.711	69.770	0.045	0.081	0.014	240.399
2016	0.643	20.565	0.024	0.826	5.774	0.125	5.005	169.354	82.796	0.053	0.096	0.017	285.279
2017	0.743	23.778	0.028	0.955	6.676	0.145	5.786	195.812	95.731	0.061	0.112	0.020	329.849
2018	0.842	26.941	0.032	1.081	7.564	0.164	6.556	221.856	108.464	0.069	0.126	0.022	373.719
2019	0.937	29.977	0.036	1.203	8.417	0.183	7.295	246.856	120.686	0.077	0.141	0.025	415.832
2020	0.999	31.962	0.038	1.283	8.974	0.195	7.778	263.201	128.677	0.082	0.150	0.027	443.366
2021	1.080	34.551	0.041	1.387	9.701	0.211	8.408	284.528	139.104	0.089	0.162	0.029	479.292
2022	1.188	37.984	0.045	1.525	10.665	0.232	9.243	312.791	152.921	0.098	0.178	0.032	526.901
2023	1.263	40.396	0.048	1.622	11.342	0.246	9.830	332.660	162.635	0.104	0.189	0.034	560.370
2024	1.337	42.769	0.051	1.717	12.009	0.261	10.408	352.199	172.188	0.110	0.201	0.036	593.285
2025	1.412	45.160	0.054	1.813	12.680	0.276	10.990	371.889	181.814	0.116	0.212	0.037	626.452
2026	1.489	47.618	0.057	1.912	13.370	0.291	11.588	392.126	191.708	0.123	0.223	0.040	660.542
2027	1.569	50.182	0.060	2.014	14.090	0.306	12.212	413.240	202.030	0.129	0.235	0.042	696.109
2028	1.653	52.878	0.063	2.123	14.847	0.323	12.868	435.449	212.888	0.136	0.248	0.044	733.521
2029	1.742	55.721	0.066	2.237	15.645	0.340	13.560	458.858	224.332	0.144	0.261	0.046	772.952
2030	1.836	58.711	0.070	2.357	16.485	0.358	14.287	483.477	236.369	0.151	0.275	0.049	814.424

手机中各金属回收价值（亿元）													
年份	Al	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn	Ag	Au	Pd	Co	Ga	Ta	总价值
2010	0.019	1.209	0.001	0.017	0.400	0.008	1.189	37.719	5.901	0.011	0.044	0.226	46.744
2011	0.024	1.541	0.002	0.021	0.510	0.011	1.515	48.070	7.520	0.014	0.056	0.288	59.573
2012	0.031	1.941	0.002	0.027	0.642	0.013	1.909	60.549	9.473	0.018	0.070	0.363	75.037
2013	0.037	2.373	0.002	0.033	0.785	0.016	2.333	74.020	11.580	0.022	0.086	0.443	91.731
2014	0.045	2.873	0.003	0.040	0.951	0.020	2.825	89.618	14.020	0.026	0.104	0.537	111.062
2015	0.054	3.446	0.003	0.047	1.140	0.024	3.388	107.485	16.816	0.031	0.125	0.644	133.204
2016	0.065	4.105	0.004	0.056	1.358	0.028	4.036	128.046	20.032	0.037	0.149	0.767	158.684
2017	0.076	4.841	0.005	0.067	1.602	0.033	4.760	151.018	23.626	0.044	0.175	0.905	187.153
2018	0.089	5.628	0.006	0.077	1.862	0.039	5.533	175.549	27.464	0.051	0.204	1.052	217.554
2019	0.102	6.455	0.006	0.089	2.136	0.044	6.347	201.357	31.501	0.059	0.234	1.206	249.537
2020	0.115	7.314	0.007	0.101	2.420	0.050	7.192	228.158	35.694	0.067	0.265	1.367	282.750
2021	0.129	8.201	0.008	0.113	2.714	0.056	8.063	255.809	40.020	0.075	0.297	1.533	317.017
2022	0.144	9.106	0.009	0.125	3.013	0.062	8.953	284.027	44.435	0.083	0.329	1.702	351.988
2023	0.158	10.028	0.010	0.138	3.318	0.069	9.860	312.813	48.938	0.091	0.363	1.874	387.661
2024	0.173	10.965	0.011	0.151	3.628	0.075	10.781	342.024	53.508	0.100	0.397	2.049	423.861
2025	0.188	11.906	0.012	0.164	3.939	0.082	11.706	371.376	58.100	0.109	0.431	2.225	460.238
2026	0.203	12.856	0.013	0.177	4.254	0.088	12.640	401.013	62.737	0.117	0.465	2.403	496.965
2027	0.218	13.811	0.014	0.190	4.570	0.095	13.579	430.791	67.395	0.126	0.500	2.581	533.869
2028	0.233	14.765	0.015	0.203	4.886	0.101	14.517	460.569	72.054	0.135	0.534	2.760	570.772
2029	0.248	15.724	0.016	0.216	5.203	0.108	15.461	490.489	76.735	0.143	0.569	2.939	607.851
2030	0.264	16.688	0.017	0.229	5.522	0.114	16.408	520.551	81.438	0.152	0.604	3.119	645.106

附表 6. 采用原始开采方法冶炼产出一吨金属的成本范围和平均值（美元）^[32]

金属种类	平均价格	价格范围
铜	1645	1000-2240
铅	2250	2000-2500
钢	550	500-600
铝	2250	2000-2500
金	36600000	24700000-51100000
银	145000	100000-200000

附表 7. 2016 年中国几种矿石进口量及其中可提取金属量

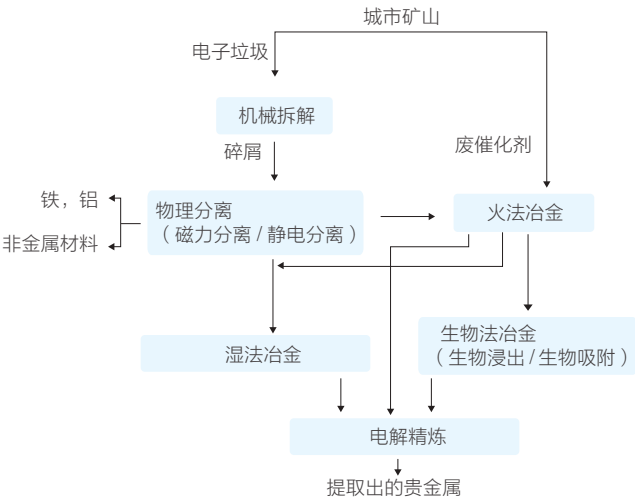
进口的矿石种类		矿石品位	2016 年中国 进口量（万吨）	可提取金属 的量（吨）
钯	粉末状 + 非粉末状未	60 克 / 吨	0.0021	0.00126-
	加工钯矿 + 半成品钯矿	-150 克 / 吨		0.00315 ^[40]
银	银矿砂及其精矿	2500 克 / 吨	56.15	1403.75
		-7500 克 / 吨		-4211.25 ^[41]
金	粉末状 + 非粉末状	20 克 / 吨	0.16	0.032
	未加工金矿 + 半成品金矿	-100 克 / 吨		-0.16 ^[4]
铝	铝矿砂及其精矿	氧化铝质量	5174.1	10956917.65
		分数 40%-70%		-19174605.88 ^{[42][43]}
铜	铜矿砂及其精矿	铜质量	1695.9	3391800
		分数 20%-30%		-5087700 ^[42]

附表 8. 2010-2030 年三种情景各产品可回收金属价值汇总

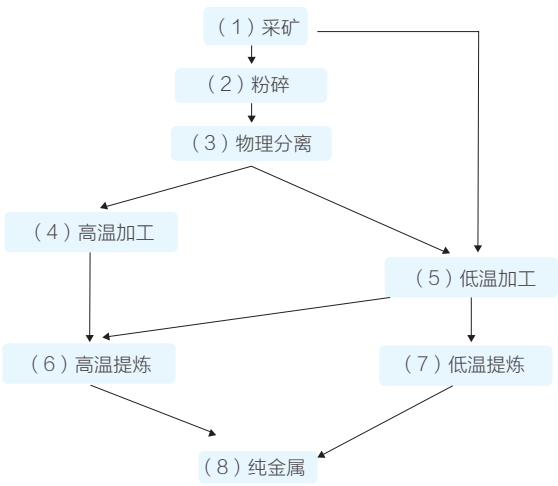
年份	情景一 各产品可回收金属的价值				情景二 各产品可回收金属的价值				情景三 各产品可回收金属的价值			
	手机	笔记本	台式机	总价值 (亿元)	手机	笔记本	台式机	总价值 (亿元)	手机	笔记本	台式机	总价值 (亿元)
2010	0.4	3.81	16.35	20.56	0.40	3.81	16.35	20.56	0.40	3.81	16.35	20.56
2011	0.51	5.17	21.86	27.54	0.51	5.17	21.86	27.54	0.51	5.17	21.86	27.54
2012	0.64	6.85	28.67	36.16	0.64	6.85	28.67	36.16	0.64	6.85	28.67	36.16
2013	0.78	8.54	36.74	46.06	0.78	8.54	36.74	46.06	0.78	8.54	36.74	46.06
2014	0.94	10.23	45.59	56.76	0.94	10.23	45.59	56.76	0.94	10.23	45.59	56.76
2015	1.27	13.87	61.65	76.79	3.80	14.9	66.22	83.65	6.33	15.41	68.50	90.25
2016	1.51	15.75	73.16	90.42	7.54	18.08	84	108.11	15.07	19.83	92.13	127.03
2017	1.78	17.06	84.59	103.43	12.44	20.86	103.39	133.14	28.44	24.02	119.06	171.51
2018	2.07	18.56	95.84	116.47	18.60	24.75	127.79	164.94	43.40	28.18	145.54	217.12
2019	2.37	20.04	106.64	129.05	26.08	28.21	150.09	197.26	64.01	33.40	177.73	275.15
2020	2.69	21.51	113.71	137.91	34.92	31.87	168.45	224.5	85.96	39.04	206.36	331.36
2021	3.01	22.96	122.92	148.89	45.17	35.72	191.21	260.06	111.43	44.22	236.74	392.39
2022	3.34	24.41	135.13	162.88	56.85	39.78	220.21	300.12	140.45	50.63	280.27	471.35
2023	3.68	25.84	143.71	173.23	69.97	44.02	244.84	336.73	173.08	57.42	319.35	549.85
2024	4.03	27.26	152.15	183.44	84.56	48.47	270.49	379.36	209.39	63.62	355.02	628.03
2025	4.37	28.69	160.66	193.72	100.56	54.18	303.47	427.6	253.58	71.18	398.68	723.44
2026	4.72	30.11	169.4	204.23	118.03	59.1	332.52	471.88	297.43	78.06	439.18	814.66
2027	5.07	31.51	178.52	215.1	136.94	64.2	363.65	524.21	344.88	86.37	489.28	920.53
2028	5.42	32.92	188.12	226.46	157.24	69.5	397.13	575.07	401.23	93.89	536.48	1031.60
2029	5.78	34.34	198.23	238.35	179.00	76.3	440.5	643.83	461.95	103.01	594.68	1159.64
2030	6.13	35.74	208.86	250.73	202.24	82.07	479.61	702.63	520.92	112.52	657.52	1290.96

附表 9. 单位金属回收相对于原始开采所节约的能源和减少的碳排放

金属	初级采矿的能源消耗 (MJ/kg)	金属回收所节约的能源比率 (%)	金属回收相对于原始开采所节约的能源		电网传输损失率 (%) ^[44]	国家边际二氧化碳减排系数 (kgCO ₂ /kWh) ^[45]	减少的二氧化碳排放量 (kgCO ₂)
			MJ/kg	KWh/kg			
Al	190-230	90-97	171	47.88	5.471	0.5-0.9	35.5
Cu	30-90	84-88	27	7.56			5.6
Au	310000	98	279000	78120			57867
Mg	270-350	97	243	68.04			50.4
Ni	180-200	90	1800.9	504.252			373.5
Pd	180000	92-98	162000	45360			33600
Pt	190000	95	171000	47880			35467
Ag	1500	96	1350	378			280



附图 1. 从废旧电子产品中冶炼稀贵金属的流程图^[46]



附图 2. 金属开采冶炼流程图^[47]

金属	来源	加工步骤							
		1	2	3	4	5	6	7	8
铁	赤铁矿, 磁铁矿	X	X	X	X		X		X
铝	三水铝矿, 水铝石	X	X			X	X		X
铜	黄铜矿, 辉铜矿	X	X	X	X	X		X	X
锌	闪锌矿	X	X	X	X		X		X
铅	方铅矿	X	X	X	X		X		X
金	金矿	X	X	X		X	X		X
铂	铂矿, 硫化铂	X	X	X		X		X	X
银	银矿	X	X	X		X	X		X

附表 10. 不同金属的冶炼步骤