

原生资源与再生资源的耦合配置

顾一帆, 吴玉锋, 穆献中, 左铁镛

(北京工业大学循环经济研究院, 北京 100124)

[摘要] 本文论证是否可通过原生与再生资源的耦合配置实现中国资源的可持续利用。本文挖掘了再生资源对于资源供给的乘数效应,构建了资源动态可持续利用模型,并选取钢和金两种战略资源做案例分析。结果表明:在再生资源驱动下,原生资源消费量与资源需求总量呈脱钩趋势,且再生资源的乘数效应呈近似指数型增长,这将大幅提升资源可持续利用能力,减少蓄积原生资源消费量。然而,在基准情景中,资源可持续利用的目标仍然无法实现。究其原因,在于再生资源回收利用具有强烈的资源环境正外部性,需要政府制度设计予以保障。本文进而构建多种政策情景分别测评政策方案对资源可持续利用的影响,集成了延长产品寿命、高回收率增幅及峰值、资源减量化等优势策略来构建政策组合情景,并模拟其运行效果。结果显示,这一组合情景可将钢和金资源供给量快速提升19倍,自2037年起两种资源均可达到强可持续利用的目标,且2015—2050年原生钢和金资源蓄积消费量较基准情景分别降低70.9%和72.1%,可实现资源弱可持续利用,有效破解中国资源约束新常态。随后,本文利用产品全生命周期管理的思路,分析了产品回收保证金制度、减量化设计与模块化生产对于实现政策组合情景的重要作用。

[关键词] 资源约束; 再生资源; 耦合配置; 乘数效应; 可持续利用

[中图分类号]F062.1 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1006-480X(2016)05-0022-18

一、问题提出

原生资源是人类从自然界直接获取的、未经人类加工转化的自然资源。中国工业化的快速发展,加速了原生资源转化为社会财富的进程。为了支撑社会经济的持续快速发展,原生资源消费量增长速度显著提升,迫使中国多种原生资源的保障能力面临着严峻的挑战,无法保证其后续的供应,进口依存度不断增高,严重影响了中国工业经济的持续稳定发展。为此,在2014年中央经济工作会议上,党和国家领导人明确提出中国面临着严峻的资源约束新常态。

[收稿日期] 2016-03-07

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目“海外化石能源投资环境动态模拟和风险博弈研究”(批准号71273021);北京市2011计划“首都资源循环材料技术协同创新中心”建设项目(批准号009000546616016);北京市重点学科“资源环境与循环经济”交叉学科项目(批准号033000541214001)。

[作者简介] 顾一帆(1989—),男,山东青岛人,北京工业大学循环经济研究院博士研究生;吴玉锋(1980—),男,安徽池州人,北京工业大学循环经济研究院教授,博士生导师;穆献中(1966—),男,北京工业大学循环经济研究院教授,博士生导师;左铁镛(1936—),男,中国工程院院士,北京工业大学教授,博士生导师。通讯作者:吴玉锋,电子邮箱:wuyufeng3r@126.com。感谢匿名审稿人和编辑部的宝贵意见,当然文责自负。

破除资源约束问题的实质在于实现资源的可持续利用,其传统思路是“开源节流”:①通过加大勘探技术和资源开发技术研发,以及充分利用国内国外两个市场、两种资源来提升资源供给总量;②通过调整产业结构,提升资源利用效率^[2]。然而,随着地表及浅层资源的逐渐耗竭,深层勘探和开采具有必然性,如2010年中国开采深度超过1000米的矿井数已接近50个,这将大幅提升资源勘探和开发的成本;与此同时,国内资源供给难以满足工业发展的需求,对资源进口数量的持续增加并未使得中国在国际市场掌握资源的定价权,近年来国际资源价格的大幅波动加剧了中国制造业产能过剩现象,产业利润率明显降低。此外,作为世界上工业产品产量最大的制造业国家,中国仍然承担着全球供应链的中、低端环节,这使得中国以原生资源作为直接原材料投入的制造业类型在国民经济中占据重要地位,产业结构难以在短的时间内调整,资源消费仍将长期维持在较高水平。由此可见,上述两种思路可以缓解中国资源约束的现状,然而,如何摆脱国际市场对于资源的控制,充分利用国内现有资源,从根本上破解资源约束新常态,实现工业可持续发展的目标,仍然值得深入探讨。

在实践上,日本、美国等发达国家给予了中国很好的启示。日本是原生资源极度匮乏的国家,然而,2000年日本开始推动循环型社会建设,通过开发再生资源,已成为世界上金、铅、铜资源储量最大的国家,铜、银、铂也均居世界前五位。据美国地质勘探局统计,2015年美国再生铅资源产量已达到其总产量的95%以上,再生钢铁产量已达到其总产量的60%以上。同年,欧盟论证了通过资源循环可以有效提升其可持续竞争力^[3]。再生资源是从废旧产品中通过回收再利用得到的一种特殊资源类型,既源于原生资源,又与之具有相同的市场竞争目标,两者处于相互竞争、相互替代又相互补充、相互耦合的复杂系统之中。发达国家的发展经验表明,在社会资源蓄积量已达到一定规模的特定发展阶段中,再生资源必将成为支撑社会经济发展的一种重要资源投入。那么,是否可以通过原生与再生资源的耦合配置实现中国资源的可持续利用呢?

从全生命周期视角分析,新旧产品分别是资源消费和再生资源供给的载体。随着产品逐渐达到报废年限,废旧产品必然产生,两者数量虽存在时滞性差异,但仍保持着密切的相关关系。由此,产品消费量的持续增加必然伴随着废旧产品产出的高速增长,如2001—2014年中国主要电子产品产量的年均增长率约为17.3%,而电子废弃物产生量的年均增长率约为20.7%。按照物质守恒定律,产品报废后其中蕴含的资源并未消灭,只是经历了“原生资源—加工制品—流通消费—废旧产品”的生命周期历程,而中国的城镇化进程必然会使大量废旧产品不断在城市聚集,城市便成为一座永不枯竭的“城市矿山”,这为工业生产提供了源源不断的资源供给。

从多生命周期视角分析,在中国现有技术条件下,再生资源具有多次重复循环的可能,这对于资源供给具有重要的乘数效应,无疑是“资源银行”。对于一单位的任意资源,如果其回收利用率达到90%,则一次循环可增加0.9倍的资源量,二次循环可增加1.7倍的资源量,而无限次循环则可增加9倍的资源量。根据耶鲁大学的研究,随着人类技术水平的提升,在其研究的56种元素中,可回收利用比例低于90%的资源类型仅有锌、砷、硒、铊、镱、镳、汞和铋8种元素,这为中国充分发挥再生资源的乘数效应、实现资源可持续利用提供了重要支撑^[4]。

因此,与原生资源主导下的研究思路不同,再生资源占比的日益提升将带动资源可持续利用能力的评测范式发生重大变革。本文将构建原生与再生资源耦合配置下的资源可持续利用的理论架构,并分析二者耦合配置的动态演化过程。基于此,构建依靠再生资源长期供给的资源动态可持续利用能力评测模型。选取中国稀缺的战略资源作为案例,实证分析原生与再生资源的耦合配置机制,论证再生资源推动下的原生资源消费量与社会经济发展的脱钩趋势,并系统分析再生资源的乘数效应对实现其资源可持续利用的重要作用。进一步地,本文将面向再生资源开发利用的市场失灵

现象,模拟不同的政策设计方案对提升再生资源乘数效应的作用效果,并选取其中优势策略构建政策组合情景,分析该情景如何利用再生资源的乘数效应实现资源可持续利用的目标。随后,本文将利用产品全生命周期管理的思路,理顺政策方案对各利益相关者的影响,构建新型的回收利用模式,力争发挥政府与市场的合力,共促中国实现资源可持续利用的目标。

二、理论架构

原生资源具有两层稀缺性:第一层为经济上可行的资源开发能力相对工业当下产品生产需求的稀缺,即相对稀缺状态;第二层为探明的资源总量相对工业无限发展需求的稀缺,即绝对稀缺状态。资源的相对稀缺程度可通过资源价格在国民经济中予以表现。虽然近年来勘探及开发技术的提升使得资源相对稀缺程度维持稳定,世界原生资源的实际价格并未呈现出明显的上升态势^[5,6]。然而,在供给侧,原生资源年探明储量服从哈伯特曲线,即经济上可开发的年探明储量呈现先增长至峰值后逐渐减少的发展态势。在需求侧,如图 1(a)和(b)所示,为了满足新增产品以及产品报废替换的双向需求,社会资源的消费量呈现先快速增长后维持高位的过程。供需侧分析可知,原生资源稀缺程度维持稳定的状态不可持续,势必会在后续年份中逐渐提升,这使得原生资源价格的增长具有必然性,将呈现一条向右上方倾斜的 P_0 曲线^[7,8]。尤其是在原生资源已达到相对稀缺状态时,如图 1(c)和(d)所示,原生资源开发的边际成本 MC_p 大幅提升并超过资源价格。然而,国民经济持续运行对资源消费仍然具有惯性需求,且不同资源类型在功能禀赋上的差异限制了资源间的替代效应,这些因素使得资源价格大幅上涨,逐渐与 MC_p 曲线重合^[9]。

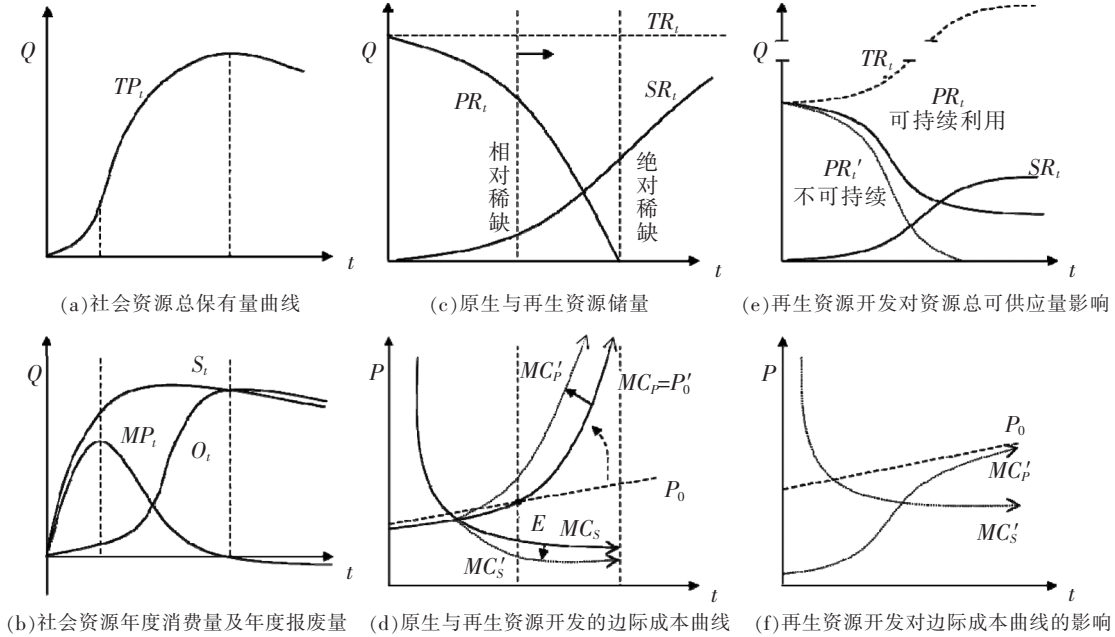


图 1 原生与再生资源耦合配置下的资源可持续利用理论架构

注: TP 为社会资源总保有量; MP 为社会资源边际保有量, 即 TP_t 一阶导数; S 为年度资源消费量; O 为年度资源报废量; PR 为原生资源储量; SR 为再生资源储量; TR 为资源总供应量; MC_p 为原生资源开发利用的私人边际成本, 对应的 MC_p' 为原生资源的社会边际成本; MC_s 为再生资源开发利用的私人边际成本, 对应的 MC_s' 为再生资源的社会边际成本; P_0 为资源价格。

资料来源:作者绘制。

在再生资源尚未使用时,资源总可供应量 TR 等于原生资源储量 PR 、再生资源储量 SR 以及社会资源总保有量 TP 的总和,如图 1(c)所示。在社会资源总保有量 TP 趋于饱和的过程中,原生资源的大量消耗必然伴随着再生资源储量的大幅提升,这使得再生资源开发的边际成本曲线 MC_s 向右下方倾斜;与此同时,与传统矿山相比,废旧产品中的资源品位更高,如 1 吨旧手机可提炼黄金 250 克,而用天然矿石提炼同样数量的黄金,则至少需要 50 吨矿石,这将使得再生资源开发利用逐渐达到规模经济效益,其开发利用的边际成本 MC_s 大幅降至资源价格 P_0 之下,具有潜在的盈利能力,可以成为一种独立的产业类型存在,即再生资源产业。

引入再生资源后,原生与再生资源间三个重要的外部性差异将逐渐显现:①原生资源的开发利用造成资源耗竭,而再生资源则可缓解资源耗竭,具有强烈的代际资源正外部性,这将使得二者的资源耗减成本存在较大差异。②相较于原生资源,再生资源开发利用具有重要的节能减排效果,这将使得二者的环境外部性成本存在较大差异。如以原生和再生铜在中国污染物排放标准中的限值为例,原生铜采矿过程工业废水中悬浮物的直接排放限值为 100mg/L,而再生铜的限值仅为 30mg/L;原生铜生产的最高排水量限值为选矿过程 1.65m³/t 原矿、冶炼过程 25m³/t 铜产品,而再生铜的全过程排水量限值仅为 1m³/t 铜产品,两者甚至不在同一数量级。③从机会成本而言,若不开发原生资源,将不会造成环境污染,其开发必然伴随着植被破坏和大量尾矿(即矿物废弃物)的产生;相反,若不开发再生资源,废旧产品堆存长期看将对生态环境造成损害,而其开发利用是逐渐消解废旧产品的过程,这将加剧二者在环境外部性成本方面的差异。

受外部性影响,原生资源的社会边际成本将向左上方移动,而再生资源则向右下方移动,如图 1(d)所示。事实证明,外部性差异(尤其是再生资源开发可解决城市固体废弃物)已倒逼政府更加关注并支持再生资源产业。除了财税政策支持外,近年来国际上通用方式是废旧产品的回收环节逐渐由国家可管控的回收体系负担。这意味着对于当年已回收的废旧产品,再生资源开发利用企业仅需要为产品拆解及资源再生利用环节付费,这将进一步大幅降低其整体开发利用的边际成本,使得其社会边际成本 MC_s' 的斜率增大,并巩固了相对于原生资源开发的成本优势。这也是世界各国再生资源产量大幅提升,超过原生资源产量,甚至接近资源总产量的重要原因。

再生资源与原生资源耦合配置的动态演化结果如图 1(e)和(f)所示,工业系统对原生资源的消费量不断减少,对再生资源的消费量持续增加,并促使再生资源充分发挥其乘数效应,资源总可供应量 TR 大幅提升,社会最终将形成再生资源主导下的资源稳态供给结构。然而,一方面,再生资源的年度供给量并非可以无限增加,对于任意时间 t ,在该年度及之前年度已回收但尚未拆解利用的废旧产品中蕴含的再生资源量将成为第 t 年中其开发利用的最大限额。另一方面,为了达到规模经济的效益,再生资源往往是在产品的社会蓄积量达到一定规模后才会得到开发,且废旧产品回收体系的建设以及回收利用数量的提升仍需较长周期,使得再生资源开发利用相对原生资源较为滞后。这些因素会限制再生资源的供给量,短期内原生资源的持续投入具有必然性,储量 PR 仍将不断减少,能否通过原生资源与再生资源的耦合配置,使得原生资源不至于达到绝对稀缺状态,直接关系到资源可持续利用的实现与否。

基于上述探讨,本文定义两种资源可持续利用的状态,一是资源强可持续利用水平,即原生资源存量保持不变。如前文所述,原生资源开发利用会对资源环境造成负外部性影响,而再生资源开发利用则会对资源环境产生正外部性影响,因此,在经济可行范围内,用再生资源全面替代原生资源代表了一种最佳的资源供给状态,保证了人类工业系统对自然资本的最小扰动性。二是资源弱可持续利用水平,即人类对原生资源的需求总量小于其资源储量,这代表了一种人类可持续发展的底

线状态,如果超越该底线,则无法保证工业产品的持续供给。本文将基于上述理论框架,构建资源动态可持续利用模型,并以稀缺战略资源为例,分析如何通过政策设计确保实现资源可持续利用。

三、资源动态可持续利用模型

1. 资源需求量及再生资源供给量的核算

为了评测原生与再生资源耦合配置下的资源可持续利用状态是否可以实现,需要同时预测资源需求量及再生资源供给量。然而,中国现阶段的统计工作仍无法系统测算再生资源的数量。产品是资源的载体,可借助产品消费量与其中某一类资源含量的乘积代表该种资源需求量,借助同年开发利用的废旧产品量与该类资源实际回收利用比例的乘积代表再生资源供给量。

按照物质守恒定律,物质的流量和存量是相互影响的,存量(保有量)增加则意味着整体系统中的流入(消费量)超过流出(报废量),反之亦然^[10,11]。与此同时,产品报废量与产品消费量及寿命分布之间存在密切的相关关系^[12,13],即第 t 年产品的报废量等于第 $t-i$ 年的产品消费量与其中使用 i 年报废比例之间的乘积之和($i=1,2,\dots,t$)。基于上述原理,本文构建 StockBased 模型来核算不同时空范围内废旧产品的资源潜力,其关系式为:

$$O_t = S_t - (P_t - P_{t-1}) \quad (1)$$

$$O_t = \sum_{i=1}^t S_i g(i) \quad (2)$$

其中, P 为产品社会保有量, S 为产品消费量, O 为产品报废量, $g(i)$ 为产品寿命分布。需要说明的是,产品寿命分布具有多种解释^[14],本文中将其定义为产品服务寿命,即从产品消费到最终使用者报废的时间间隔。估算产品寿命分布,可通过调研等方法直接获得。然而,由于样本数量有限,难以涵盖全部消费者,因此,为了提高产品寿命分布的准确度,需将调研数据与正态分布或 Weibull 分布等函数拟合^[15]。对于电子废弃物等由多个零部件组成的产品,Weibull 分布的精确程度要高于正态分布^[16]。因此,本文将 Weibull 分布模型引入 StockBased 模型以有效修正调研数据。Weibull 分布的概率密度函数为:

$$f(t; u, v) = \frac{u}{v} \left(\frac{t-t_0}{v} \right)^{v-1} \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{v}\right)^u\right], t \geq t_0 \quad (3)$$

其中, t_0 代表初始年份, u 为尺度参数, v 为形状参数。利用 MATLAB 中的 Wblfit 函数(应用最大似然估计原理)计算 u, v , 进而推算从销售年起经过 i 年报废的比例,即寿命分布 $g(i)$ 。

同时,通过原生与再生资源的耦合配置实现资源可持续利用是一个长期的系统工程,需要远景的再生资源供给潜力以及资源总需求量的数据来支撑,这就要求对 StockBased 模型的时间维度进行拓展。按照产品数量的变化规律,其人均保有量综合表现为成长、拐点和饱和三种状态,即保持“S”形的增长趋势,并在长期无限接近一个固定最大值(K 值),服从 Logistic 分布^[17,18]。因此,本文将该分布引入 StockBased 模型,测算产品的远景保有量、消费量及报废量数据。Logistic 分布的微分方程为:

$$dp/dt = rp(1-p/K) \quad (4)$$

其中, p 代表产品的人均保有量, r 为内在增长率, K 为增长的最大值。该微分方程的解为:

$$p_i = K/[1+\exp(-ri+C)]; \quad i=1,2,3,\dots \quad (5)$$

其中, $C = \ln[p_0/(K-p_0)]$, p_0 代表初始年份的人均保有量, i 为选定年份距初始年份的时间差。

经 Weibull 分布及 Logistic 分布修正后的 StockBased 模型可同时测算产品的远景消费量及报

度量, 本文将用于测算远景资源需求量及再生资源供给量。

2. 资源动态可持续利用能力评测模型

为了测评再生资源对资源强/弱可持续利用水平的影响, 本文引入如下三类指标: 一是资源可持续利用指数(SI), 即第 t 年中利用再生资源供给可以替代原生资源投入的比例; 二是蓄积原生资源消费量(AC), 即仅依靠再生资源的供给难以满足产品生产的资源需求, 而必须在一段时间内投入原生资源的蓄积量; 三是再生资源对于资源供给的乘数效应(MU), 即再生资源供给对资源总可供应量的扩充倍率。

本文构建了动态可持续供给模型来测评上述三个数值。如图 2 所示, 该模型是利用杠杆原理来加以推算, 并将该测算结果拓展到长期动态过程的比较之中。其中, 杠杆的需求端为第 t 年第 j 种资源类型的总需求量($S_t w_j^{in}$), 供给端由再生资源的供给量($O_t w_j^{out}$)和必需的原生资源供给量(ΔF)两部分构成, 其中, w_j^{in} 和 w_j^{out} 分别为第 t 年生产产品和废旧产品中第 j 种资源含量。由此, SI、AC 及 MU 值的计算方法分别为:

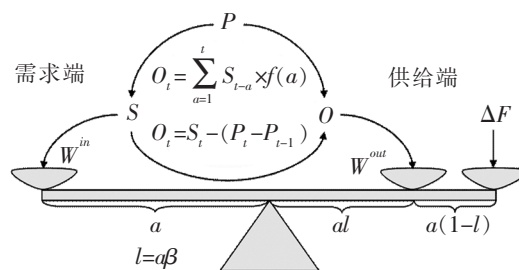


图 2 动态可持续利用能力评测模型

资料来源: 作者绘制。

$$SI(t) = \frac{O_t w_j^{out} l_t}{S_t w_j^{in}} \quad (6)$$

$$AC(t) = \sum_{i=t_0}^t (\Delta F_{i,j}) = \sum_{i=t_0}^t (S_i w_j^{in} - O_i w_j^{out} l_i) \quad (7)$$

$$MU(t) = 1/l_t = 1/(\alpha_t \beta_t) \quad (8)$$

其中, t_0 与 t 分别为选定的初始年份和终止年份。由于并非所有废旧产品中蕴含的再生资源均得到有效的回收再利用, 在该模型中需要加入杠杆的力矩 l , 该力矩代表了废旧产品蕴含的资源量中实际可以为产品生产过程提供的资源比例, 计算公式为 $l = \alpha\beta$, α 表示废旧产品回收利用的比例, β 表示回收利用的废旧产品中技术上可行、经济上合理的再生资源开发利用比例。 $SI(t) \geq 1$ 表示再生资源可完全替代原生资源, 实现资源强可持续利用的状况; 如果 $SI(t) < 1$, 其值越大, 代表再生资源替代原生资源的比例越高, 越能通过再生资源开发利用接近资源强可持续利用的要求。 AC 值越大, 意味着原生资源长期投入越多, 越难达到资源强可持续利用的水平; 当 $t \rightarrow \infty$ 时, AC 值需要小于资源储量, 以保证达到资源弱可持续利用的状况。 MU 值越大, 代表再生资源开发利用对原生资源的替代能力越强, 资源总可供应量的增长倍率越高。由此, 本文设定的依靠原生与再生资源的耦合配置实现资源可持续利用的目标参数为: 再生资源的乘数倍率快速提升, 长期可实现资源强可持续利用; 尽量减少蓄积原生资源消费量, 至少达到资源弱可持续利用的水平。

四、战略资源的可持续利用能力测评

中国主要原生资源的储采比如表 1 所示, 其中, 基础储量是指能满足现行采矿和生产所需的技术条件要求且可行性或预可行性研究后经济上合理、环境等其他条件允许的储量类型。资源储量是指勘查工作发现的原生资源储量总和。可见, 基础储量储采比以及资源储量储采比分别对应的是资

源相对稀缺及绝对稀缺状态。除铝、钒等少数资源类型的基础储量储采比超过 20 年以外,其余资源类型均接近相对稀缺状态。尤其是钢和金两种资源的基础储量储采比不足 5 年,且资源储量储采比仅能维持 20 年,处于极度稀缺的状态。此外,钢和金资源具有独特的电学和光学特性,广泛应用于高精尖设备的生产之中,短期内难以被其他资源类型替代,属于国家战略资源的重要组成部分,若找不到资源可持续利用的方法,其将成为中国工业持续稳定发展的瓶颈约束。因此,本文选取上述两类资源开展案例分析。

表 1 2014 年中国主要原生资源的储采比

资源类别	单位	产量	基础储量	基础储量储采比 (相对稀缺)	资源储量	资源储量储采比 (绝对稀缺)
铁	亿吨	15.10	206.56	13.68	843.40	55.85
铝	亿吨	0.24	9.83	40.96	41.50	172.92
锰	亿吨	0.14	2.14	15.29	12.20	87.14
锌	万吨	493.00	4034.06	8.18	14486.10	29.38
铅	万吨	240.00	1720.82	7.17	7384.90	30.77
铜	万吨	176.00	2836.36	16.12	9689.60	55.05
钨	万吨	10.30	836.55	81.22	2826.00	274.37
镍	万吨	10.00	252.98	25.30	1016.90	101.69
锡	万吨	9.60	110.58	11.52	418.90	43.64
钒	万吨	8.03	900.17	112.10	6074.50	756.48
钨	万吨	7.10	185.03	26.06	571.43	80.48
银	万吨	0.41	3.85	9.39	23.70	57.80
钢	吨	460.00	2017.03	4.38	7243.05	15.75
金	吨	450.00	2016.66	4.48	9816.00	21.81

注:所有资源类型的产量均为原生资源产量,不含再生资源量。中国对于铁、锰、铝资源的统计指标为矿石量,钒资源的统计指标为氧化物量,其余为金属量。

资料来源:产量数据来自 United States Geological Survey,基础储量数据来自《中国统计年鉴》(2015),资源储量数据来自《中国矿产资源报告》(2015)^[9],其余数据为作者计算。

由钢资源制备的钢锡氧化物具有良好的电学传导和光学透明等特性,是液晶产品生产的必备原料^[20]。据统计,约有 84% 的钢资源用于液晶产品等薄膜涂层的制备^[4]。近年来,液晶产品的产业化制造技术取得重大突破,已快速应用于电子产品生产。据《中国经济贸易年鉴》统计,2005 年中国液晶电视机的产量仅占彩色电视机产量的 5.5%,而据《中国电子信息产业统计年鉴》统计,2014 年该比例已上升至 98.1%。金资源除了应用于制造货币和饰品等保价值物外,也凭借其稳定的抗腐蚀能力和良好的导电、导热性,广泛应用于电子产品中,尤其在手机、液晶电视、电脑等产品的线路板中含量较高^[21]。在日本和韩国等钢及金资源需求量较大且国内资源供给能力不足的发达国家,从上述废旧电子产品中回收再生资源已成为钢和金资源的重要来源^[22]。因此,本文将以液晶电视、台式电脑、笔记本电脑及手机四类产品中的钢资源及金资源为例,分析现实情况中原生与再生资源的耦合配置机制,以及对实现中国资源可持续利用的重要作用。

1. 数据来源及基本假设

城镇和农村平均每百户居民年末电视、电脑和手机的保有量,以及城乡人口的数量和平均家庭户规模均来自《中国统计年鉴》;城镇和农村中液晶电视数量占电视总量的比例来自《中国电视收视年鉴》;中国人口增长率长期变动趋势来自联合国人口统计数据库^[23]。本文基本假设见表 2。此外,资

源可持续利用是一个长期的系统工程,虽然钢及金资源在未来的使用领域及使用情况存在不确定性,然而,为了更加详尽地描述原生与再生资源耦合配置机理,本文将研究周期设定为2015—2050年。

表2 基本假设

产品类别		保有量 K 值 (台)	钢资源含量 (g/台)	金资源含量 (g/台)	再生资源正规 回收率增幅(%)	再生资源正 规回收率(%)	再生资源 利用率(%)
液晶电视	城市	1.40(户均)	0.60	0.60	2.00	$\alpha_{\max}=80.00$	$\beta_{\max}=95.00$
	农村	1.20(户均)					
液晶台式电脑	城市	1.00(户均)	0.40	0.40			
	农村	1.00(户均)					
笔记本电脑	城市	1.50(户均)	0.40	0.30			
	农村	1.50(户均)					
手机	城市	1.00(人均)	—	0.10			
	农村	0.85(人均)					

资料来源:作者整理。

(1)产品中资源含量的假设。对于液晶显示器中钢资源的含量,大量学者进行了检测,但结果差异较大,如 Hasegawa et al.^[24]测得废旧液晶显示器中钢的含量为 380mg/kg—410mg/kg, Yang et al.^[25]测得的钢含量为 250mg/kg, Rocchetti et al.^[26]测得的钢含量为 100mg/kg—400mg/kg, 本文取自三者的平均值。金资源的含量相对稳定,数据来自 Oguchi et al.^[21]。

(2)人均保有量 K 值的假设。液晶电视与传统的阴极射线管电视(CRT)的功能类似,虽然液晶电视目前仍未达到饱和状态,但根据《中国统计年鉴》中的户均保有量情况可知,各类电视的总户均保有量已达到饱和状态,城市户均保有量长期接近于 1.4 台/户,农村接近于 1.2 台/户。其余产品 K 值的选取借鉴 Yu et al.^[11],其设定数值如表 2 所示。

(3)再生资源回收利用率的假设。中国再生资源回收利用过程的主体由正规企业及非正规作坊构成,其中,非正规作坊仍然占据较大份额,由于技术装备落后,难以回收利用钢及金等含量较低的资源类型,造成了该类资源的耗散,而正规企业已在不断探索钢及金资源的回收利用方式,有望实现再生战略资源的产业化制备。据中国商务部流通业发展司统计,2013 年中国电子废弃物的回收量约为 11430 万台,而据中国物资再生协会统计,同年中国电子废弃物的正规拆解量约为 4149.9 万台,仅为当年电子废弃物回收量的 36.3%。由于中国电子废弃物拆解利用行业仍处于起步阶段,有较大发展空间,因此,本文假设该比例将以每年 2.0% 的速度增长。欧盟设定其在 2019 年电子废弃物的回收目标为 85.0% 的电子废弃物产生量^①。因此,本文将回收率最大值设定为 80.0%,即 $\alpha_{\max}=80.0\%$ 。同时,按照 Ciacci 等的推算,4.2% 的钢资源在使用中耗散,而金资源则基本不存在耗散情况,考虑再生利用工艺的限制以及部分钢及金资源以混合物形式存在难以达到经济上可开发的水平,本文假设两种资源再生利用过程中的最高资源利用率为 $\beta_{\max}=95.0\%$ ^[4]。

2. 电子产品消费量及报废量的核算

中国四类电子产品的保有量根据 Logistic 分布回归,结果如表 3 所示,回归方程的拟合优度较高,且各检验值均十分显著,接受原假设。据此,进一步测算各类产品的消费量及报废量情况,如图

① 欧盟于 2012 年修订 WEEE 指令,即“Directive 2012/19/EU European Parliament and the Council of 4 July 2012 On Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)”,设定了 2019 年需实现的电子废弃物回收目标。

3 所示。四类电子产品的消费量及报废量均逐渐靠拢,并且报废量将分别于 2037—2044 年超越消费量。这意味着废旧产品中蕴含的钢及金资源潜力足以保证新产品的资源需求量。

表 3 Logistic 分布的回归方程式与检验值

类别		保有量回归方程式	检验指标		
			R ²	F 统计量	Sig.
液晶电视户均保有量	城市	$1/[0.7143+66.1005 \times 0.5229^{(t-2006)}]$	0.9918	486.1869	0.0000
	农村	$1/[0.8333+139.8044 \times 0.5385^{(t-2006)}]$	0.9833	234.8220	0.0001
液晶台式电脑户均保有量	城市	$1/[1+401.6302 \times 0.5434^{(t-2006)}]$	0.9902	403.2718	0.0000
	农村	$1/[1+7490.6130 \times 0.4219^{(t-2006)}]$	0.9919	490.1043	0.0000
笔记本电脑户均保有量	城市	$1/[0.6667+2.9556 \times 0.8174^{(t-2006)}]$	0.9959	965.9522	0.0000
	农村	$1/[0.6667+67.5270 \times 0.6548^{(t-2006)}]$	0.9921	502.3959	0.0000
手机人均保有量	城市	$1/(1+11.0110 \times 0.7574^{(t-1999)})$	0.9069	107.2000	0.0000
	农村	$1/[(1.1765+85.2992 \times 0.6569^{(t-1999)})]$	0.9863	793.1547	0.0000

资料来源:作者利用 SPSS 软件计算。

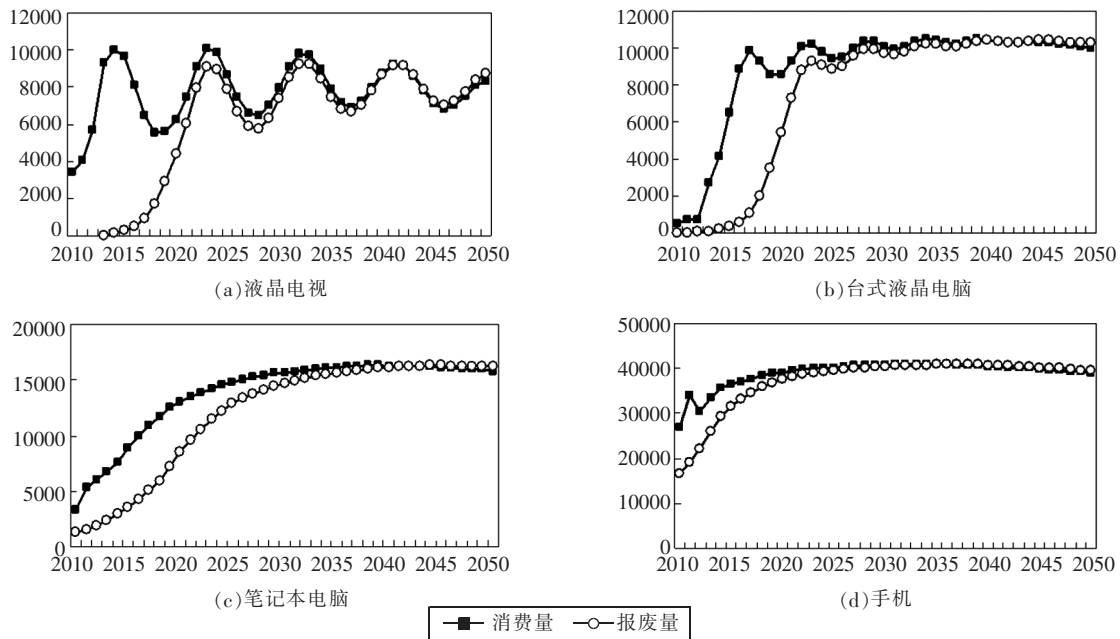


图 3 中国电子产品消费量及报废量

注:单位为万台

资料来源:作者计算。

其中的液晶电视及台式液晶电脑的消费量及报废量均呈现周期性相互吻合的波动状态。以液晶电视为例,维持 10 年一个消费和报废周期,如图 3(a)所示。这是由于技术的突破使得液晶电视的价格显著下降,对传统电视的替代速度明显加快,2008—2014 年其消费量年均增长率达 58.9%。但随着替代比例的逐渐提高,液晶电视户均保有量逐渐达到饱和状态,而原先销售的液晶电视尚未达到报废年限,无需新电视替换,两者相互作用使得液晶电视的消费量不但无法保持前面年份快速增长的趋势,反而会有所回落,如在第一个周期中,2014—2018 年液晶电视的理论消费量会有所下降。此外,自 2020 年开始,液晶电视的户均保有量会基本达到饱和状态,在后续周期中,一台废旧产

品意味着一台新产品的市场需求,因此,2014—2018年的消费量下降意味着经过寿命分布函数转化为后续年份的报废量也会有所下降,而报废量的下降意味着当年消费量的同步下降,如此往复;同样,2018—2023年的消费量上升也会逐渐传递到下一个周期。由此,产品消费量与报废量呈现相同的周期性,这意味着在资源总需求量增加时,同一年度的再生资源开发利用潜力也会对应增加,这为再生资源替代原生资源,从而实现资源可持续利用提供了充分的保障。

3. 原生资源与再生资源的耦合配置机制

(1)再生资源驱动下的原生资源消费量与资源需求总量的脱钩效应。原生资源与再生资源对于满足产品性能要求具有相同的作用,两者共同满足市场需求。如图4所示,由于产品保有量日趋饱和,以及上文中已论证的产品年度消费量呈现周期性变化,这将使得2022年之后用于四类电子产品生产的钢资源及金资源需求量趋于动态稳定,将分别围绕150吨及175吨上下波动。然而,再生资源的引入,使得原生资源消费量逐渐呈现下降趋势,并将与产品生产的资源需求总量逐渐脱钩。如2030年中国原生钢资源消费量为82.7吨,相较2015年减少30.6%,而含钢电子产品的消费量却由24979.1万台增长至33669.2万台,增长34.8%。该年度原生资源的总体利用效率已提升1.9倍,原生资源消费量大幅降低。与此同时,再生资源在资源需求总量中的比例将逐渐增加,并在2032年之后超越原生资源,成为工业经济发展的主导资源类型。如在2040年及2050年,再生钢资源占资源需求总量的比例将依次增长至70.0%及78.6%。

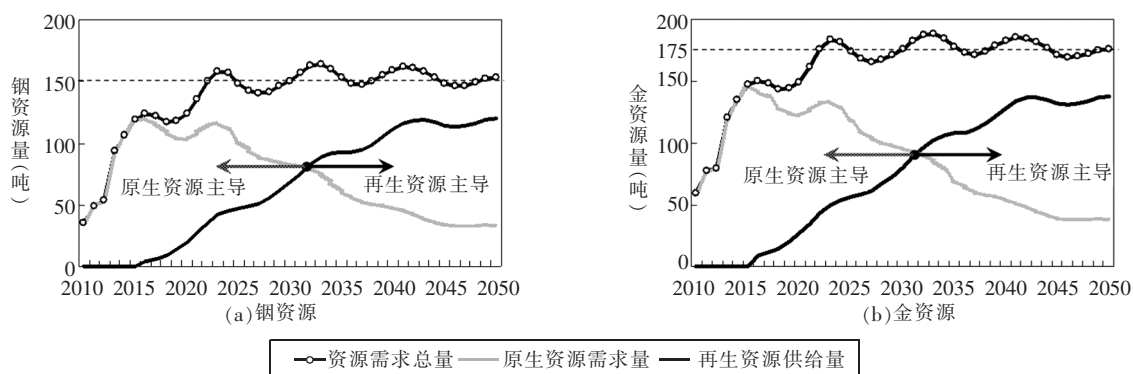


图4 原生资源消费量与资源需求总量的脱钩效应

资料来源:作者计算。

(2)再生资源对资源供给总量的乘数作用。随着废旧电子产品回收利用率的不断增加,再生钢及再生金资源的乘数效应逐渐显现。如图5所示,在再生资源产业发展初期,其对资源供应量的乘数效应并不显著,然而,随着产业的不断发展,后续的乘数效应将呈现近似指数型的增长趋势。以再生钢为例,2020年再生钢资源的引入仅能提升0.3倍的资源数量,然而,2030年及2040年则分别可提升0.9倍及2.4倍资源量;再生金资源的乘数效应也呈现相同的趋势。2044年钢及金资源的回收利用率将达到本文设定的峰值状态,限制了后续年份中资源乘数的增长。这说明,为了充分发挥再生资源的乘数效应,短期需加快再生资源的回收利用率的增速,而长期则需增加回收利用率峰值,提升再生资源对原生资源的替代能力。

4. 钢资源及金资源的可持续利用能力测评

从资源可持续利用指数SI角度分析,钢及金资源呈现了相同的增长趋势,如图5所示。以钢资源为例,再生资源的引入使得SI指数由2016年的3.1%增长至2050年的78.6%。虽然可明显减少

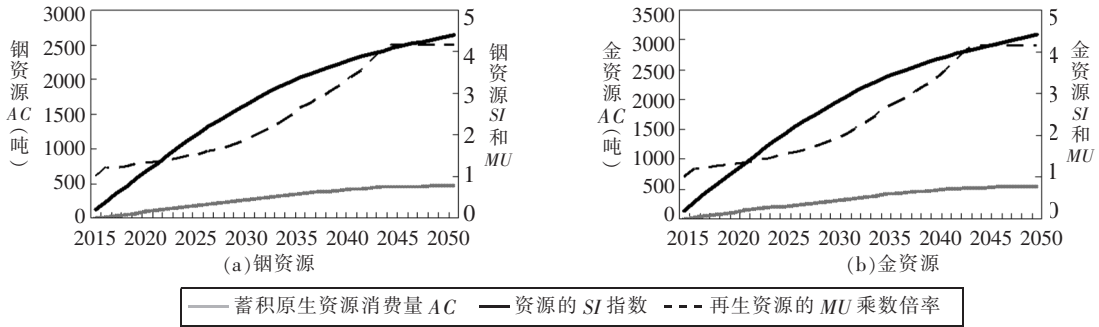


图5 再生资源对资源供给总量的乘数作用

资料来源:作者计算。

原生资源的投入量,但是由于产品生产、使用及再生利用过程中的钢资源损耗,以及非正规回收利用者受技术限制无法对钢资源进行回收利用等因素的影响,使得再生钢资源的实际供给量仍然明显小于钢资源的需求量,无法实现钢资源强可持续利用的目标。与此同时,由再生资源的乘数倍率 MU 与 SI 指数的相关性分析可知,钢与金资源的上述两指标的 Pearson 相关系数分别可达到 0.945 与 0.947,均具有极强的相关性。这说明在原生资源与再生资源耦合配置时,减少资源耗散,提高再生资源的乘数倍率已成为解决资源可持续利用的重要手段。这与在原生资源主导的情况下,提升资源可持续利用能力主要依赖于开源节流(即提升原生资源的找矿能力和技术开发能力,以及提高资源利用效率)具有重大变革。尤其是对于表 1 中接近绝对稀缺状态的资源类型,开源节流仅能延长资源的使用年限,而保证资源的远景可持续利用能力则需通过提高再生资源的乘数倍率,依靠资源近闭路循环的方式予以解决。

从蓄积原生资源消费量 AC 角度分析,由于再生资源的引入使得 2015—2050 年间中国钢资源的蓄积消费量由 5279.2 吨减少至 2650.0 吨,总量减少近 1/2。但是由于再生资源的供给量与资源需求总量的缺口长期存在, AC 值后续仍会逐渐增大,无法在达到某一年份后即成为定值或实现负增长。同时,上述四类产品分别涵盖了 23.2% 的社会钢资源需求总量及 29.9% 的社会金资源需求总量,按照倍率计算,钢及金资源的社会实际消费量分别为 11427.1 吨及 10307.9 吨,均超过表 1 中的资源储量,仍然无法达到资源弱可持续利用的状态。因此,在后续的章节中,本文将继续分析再生资源的乘数效应无法有效发挥的重要原因,寻找破解资源约束的具体手段。

五、政策方案对资源可持续利用的影响

废旧产品中蕴含的钢资源量及金资源量将分别于 2043 年及 2042 年超越其对应的资源需求总量,这为开发利用再生资源实现资源可持续利用提供了可能。然而,再生资源开发利用兼具资源再生与节能减排的双重效果,强烈的资源环境正外部性易于形成市场失灵现象,使得其产量水平难以达到最优。进而,再生资源的乘数效应无法有效发挥,难以实现资源的可持续利用。这就需要政府制定合理的制度设计方案,以充分利用原生与再生资源的耦合配置机制,破解当前中国工业可持续发展面临的资源约束问题。

1. 政策组合情景的构建与模拟

本文择选了上文基准情景中的四类基本假设(即产品寿命保持不变,正规企业的资源回收利用率均以 2% 的年均速度增长,其最高限额为 80%,以及产品中的钢资源及金资源含量保持不变),设定了相应的政策方案,分别为寿命延长情景、高回收增长率情景、高回收率峰值情景和资源减量化情

景,探讨各类情景对钢资源及金资源可持续利用能力的影响,其基本假设与参数设置的变更如表4所示。各类政策情景对原生与再生钢资源及金资源的配置情况,以及资源可持续利用能力的影响见图6和图7。

相较于基准情景,寿命延长情景可减少资源需求总量,从而降低原生资源投入,如2015—2050年间蓄积原生钢资源消费量可减少13.5%。然而,如图6及表5所示,该种情景中资源需求总量的减少也降低了再生资源开发利用的潜力,这使得资源可持续利用指数以及再生钢资源的乘数倍率并未得到显著提升。此外,中国正规拆解利用企业存在严重的产能过剩现象,该种情景降低了废旧产品的数量,将加剧拆解企业的货源危机,阻碍了该产业形成规模经济效益,利润率明显下降,将不利于再生资源产业的持续发展。

高回收增长率情景可快速提升再生资源的乘数倍率,从而增加资源可持续利用指数,如在2023年及2028年分别使再生钢资源回收利用率达到钢资源需求总量50%及70%的水平,比基准情景缩短了近10年。蓄积原生钢资源消费量也得到了显著减少,相较基准情景,降幅达25.5%。然而,该情景无法改变资源乘数及可持续利用指数的最大值,也无法降低2044年之后的原生资源需求量,无法通过资源闭路循环实现资源的强可持续利用状态。

高回收率峰值情景大幅提升了再生资源的乘数倍率,使得2044年后资源可持续利用指数达到

表4 各类政策情景的基本假设及其参数设置

政策情景	基本假设与参数设置的变更
寿命延长情景	各类产品的使用寿命分布整体向右平移(增加)1年
高回收增长率情景	废旧产品正规回收利用率的年均增长率均提升至5%
高回收率峰值情景	废旧产品中钢资源及金资源的回收利用率峰值提升至95%
资源减量化情景	每台产品中所添加的钢资源量及金资源量均以1%/年的速度减少

资料来源:作者按照基本假设情况整理。

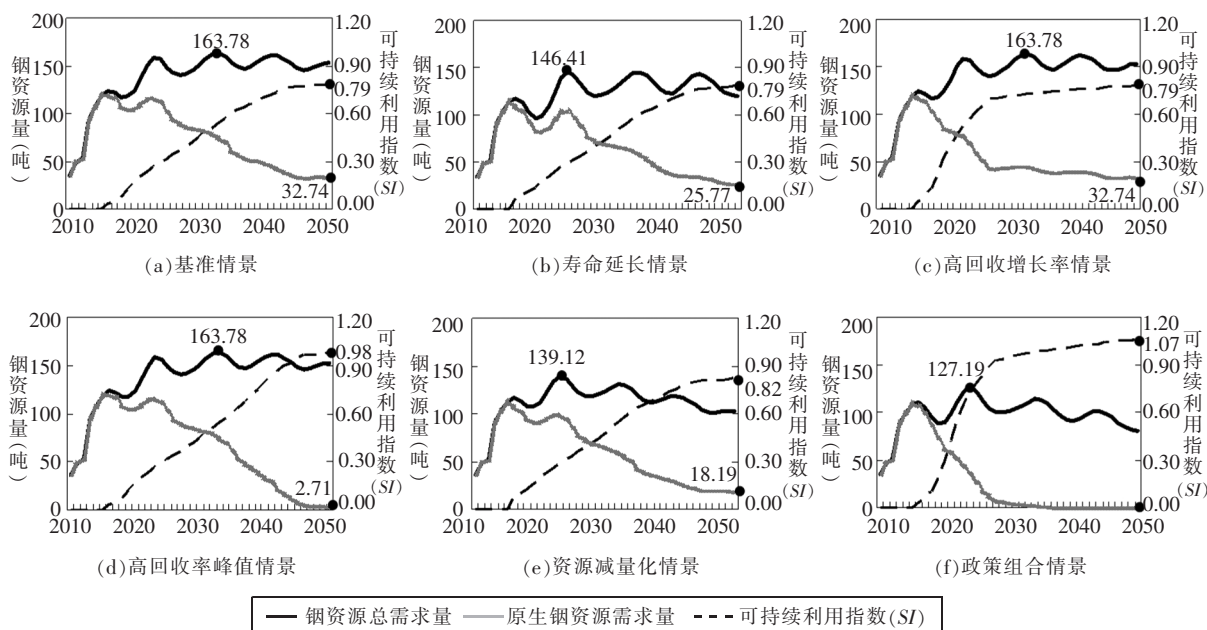


图6 政策设计对原生与再生钢资源配置的影响

资料来源:作者绘制。

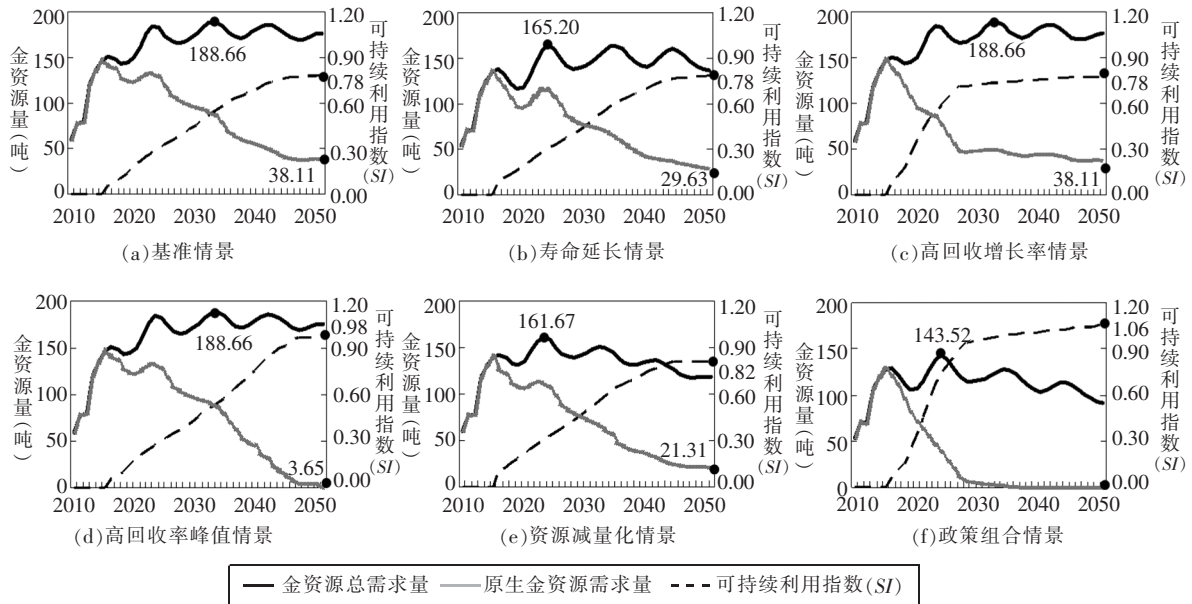


图7 政策设计对原生与再生金资源配置的影响

资料来源:作者绘制。

表5 各类情景下再生钢资源的乘数倍率

年份	基准情景	寿命延长情景	高回收增长率情景	高回收率峰值情景	资源减量化情景	政策组合情景
2015	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2020	1.3183	1.3183	1.9231	1.3183	1.3183	1.9298
2025	1.5378	1.5378	3.1250	1.5378	1.5378	5.1948
2030	1.9159	1.9159	4.1667	1.9159	1.9159	20.0000
2035	2.6596	2.6596	4.1667	2.6762	2.6596	20.0000
2040	3.3784	3.3784	4.1667	4.8695	3.3784	20.0000
2045	4.1667	4.1667	4.1667	14.4928	4.1667	20.0000
2050	4.1667	4.1667	4.1667	20.0000	4.1667	20.0000

资料来源:作者计算。

90%的水平,接近资源强可持续利用的目标,且蓄积原生钢资源消费量减少11.2%。然而,该情景并不能改变2035年之前的资源可持续利用指数走势,短期内不能很好缓解资源约束情况。

资源减量化情景可使钢资源消费量的峰值不超过140吨,大幅减少了资源需求总量,从而使2015—2050年的蓄积原生钢资源消费量减少21.5%。然而,与寿命延长情形相似,该情景对资源可持续利用指数的影响较小,且同样会引起再生资源开发利用量的骤减,加剧了该产业的产能过剩现象。

根据上述四类政策情景与基准情景的对比容易发现,为了利用再生资源达到资源可持续利用的目标,政府可以采取的优势策略为:尽量延长产品的使用寿命,尽快提高废旧产品进入正规拆解企业的比例,尽力提高国家整体回收利用率水平,尽早实行产品减量化生态设计方案。为此,本文将对应的四类情景进行整合,构建了政策组合情景。

政策组合情景可快速提升再生资源的乘数倍率,进而提升资源可持续利用指数。以钢资源为例,如图6(f)所示,自2028年起再生钢资源的乘数倍率达到20倍的水平,有效缓解了钢资源的稀缺状态。在其推动下,该年度钢资源的可持续利用指数达到90%的水平。2037年该组合情景可实现

钢资源的强可持续利用的目标,在后续年份中原生钢资源消费量长期保持在负值水平,这意味着再生资源全面替代了原生资源,且可以维持工业经济的长期稳定运行。与此同时,2015—2050年政策组合情景的蓄积原生钢资源消费量比基准情景降低70.9%,且由此推算的社会原生钢资源的总需求量减少至3608.1吨,低于表1中的资源储量,可以达到资源弱可持续利用的状态。此外,该组合情景继承了寿命延长情景及资源减量化情景中可有效减少钢资源需求总量的优势,且由于回收率的快速提升,反而在废旧产品开发利用的起步阶段(2015—2030年)增加了再生资源开发利用的数量,解决了这两类情景中抑制再生资源产业规模效益的问题。由此,政策组合情景完全可以达到资源可持续利用的目标,破解了中国资源约束的新常态。

2. 政策组合情景的实现方法

与传统的政策方案仅针对单一主体不同,废旧产品回收利用是一个系统工程,涉及的产业链条更长、利益相关者及管理主体更多,相互之间的关系错综复杂,且任何一个环节的政策缺位,均会对监管的实施效果产生较大的关联影响。本文政策组合情景中涉及的重要因素,其中的产品寿命与公众的消费意识密切相关,回收利用率的增幅及峰值均与产品回收利用者相关,而减量化则与生产者行为相关,几乎涉及产品全生命周期各利益相关者的责任,不仅局限于产品回收利用者的行为。这就需要政策方案逐渐向全生命周期管理模式转变,用联系的观点看问题,理顺政策方案对各利益相关者的影响,形成政策合力,共促再生资源开发利用,满足国家对资源可持续利用的发展要求。

产品寿命缩短的主要原因在于产品更新换代频次增加,从需求侧角度分析,涉及如下两个必备要素:一是产品功能和外观的变化使得消费者认定新产品的属性更加适配自身的需求,二是新产品的价格需要满足公众的价格预期范围。其中,前者由企业自发进行,代表了企业满足社会需求能力的提升,这种趋势不应改变,因此,后者是延长产品使用寿命的重要抓手。这就要求政府加大对绿色消费理念的宣传力度,促进公众逐渐将废旧产品的负环境外部性价值引入价值观中,提升产品更新换代成本。从供给侧角度分析,需加快维修市场及二手市场建设,提升产品再制造能力,挖掘废旧产品的再利用价值。对于难以避免的更新换代行为,应大力推动模块化生产理念,变整机更新为个别部件更新。模块化生产能够给予消费者自由搭配和更新产品功能的空间,通过零部件替换,消费者既可减少更新成本,也可达到功能升级的效果,这将成为产品寿命延长的重要推动力。

减量化对于提高资源利用效率,降低企业生产成本具有重要作用,且电子产品的小型化与轻量化逐渐成为消费者偏好的重要因素。通过市场机制的作用,减量化已成为世界各国的重要发展趋势。然而,资源减量化伴随着配套产品生产工艺的升级改造,这将大幅提升企业的研发和运行成本;且由于信息不对称现象,生产企业难以了解最新的减物质化生产工艺,也无法全面了解其他企业在产品使用过程中的资源投入情况。因此,需要政府加大对资源减量化及其配套技术的研发支持力度,并加快利用互联网、移动互联网等新兴信息化手段,大力推动科技服务平台建设,构建集成各类先进减量化技术的透明科研系统。同时,减量化并非仅指生产环节的减量,而应促进产品全生命周期(包括生产、消费和再生利用等环节)的资源消耗降至最低水平,这就要求国家全面推进生态设计理念,如将全生命周期减量化能力作为绿色环保企业评比的重要依据,或学习中国台湾地区对生态设计产品进行税费减免的措施,从而激励生产企业关注全生命周期减量化操作。此外,政府可借鉴“互联网+”新业态创新的思路,促进分享经济模式发展,充分发挥信息资源和闲置要素的作用,以功能服务消费取代物质产品消费,按照其国际发展趋势,这将成为未来引领资源减量化政策的重要举措。

正规企业回收利用率的增幅和峰值的提升对于实现资源可持续利用具有重要的推动作用,实践证明这两项指标的提升需要政府与市场共同推进。如在缺乏政策制约的背景下,2013年中国仅

注册的回收企业就达到 10 万余家,再加上分散于各个小区的游商,激烈的竞争导致业内利润下降。而非正规回收利用者无需支付环境污染的外部性成本,使其具有更大的效益空间,势必会挤出正规企业,获得更多的原料来源,这也是中国小型非正规回收利用企业屡禁不止的主要原因。相反,在市场经济更为成熟的发达国家,政府通过政策法规的引导逐渐构建起了一整套全新的废旧产品回收利用行业促进体系,且通过提升处罚金额和监管力度的方式坚决抵制非正规回收利用者,确保了废旧产品可以在国家管控的回收体系内运行。如欧盟通过 WEEE 和 RoHS 两项指令,构建了生产者责任延伸制度,规定生产者付费建立单独的或联合性的电子废弃物回收体系;日本构建了《家电回收法》,采取消费者为家电回收和再生利用付费的模式,而其余环节则放开市场,由多个回收利用者相互竞争,降低运营成本。这既发挥了政府的政策引导作用,也推动了废旧产品回收利用行业回归市场化、标准化和品牌化的正规发展轨道,形成了废旧产品正规回收利用的长效机制。

中国政府逐渐关注政策法规对废旧产品回收利用行业的引导,2012 年开始实行“废弃电器电子产品处理基金”制度,如以电视为例,由政府向电视的生产商收取 13 元/台的基金,并以 85 元/台(接近 5.5 倍的差额)的数额向正规拆解企业发放。这种模式取得了一定的效果,促进了正规拆解企业的积极性,在其带动之下,截至 2015 年底,中国已形成 109 家正规拆解企业。然而,一方面,由上文中计算的电子产品消费量和报废量情况可知,该种基金制度的收发金额无法实现长期持续,在后续年份中势必会造成严重的中央财政压力。另一方面,基金制度的补贴对象为正规拆解企业,该类企业产能过剩现象明显,为了获取更多的废旧产品货源,企业会提高产品收购价格,从而在市场机制作用下基金大部分转移至回收环节,不但使基金制度实施效果大打折扣,而且进一步增加了各类回收者的盈利空间,加剧了回收利用环节的混乱程度^[27]。

因此,正规企业回收利用率增幅及峰值的提升,仅能将上述处理基金制度作为短期辅助政策,长期看仍需学习发达国家经验,抓住源头的回收环节,借助政策法规强制力界定各利益相关者的责任,构建成套完备的废旧产品回收利用行业促进体系,并通过税费减免和强制约束等政策逐渐引导非正规回收者进入该体系运行。中国电子产品生产者的总体盈利能力不足,2014 年其工业成本费用利润率仅为 5.2%,低于工业全行业平均(6.5%)。这说明中国电子行业整体上处于高度竞争、盈利水平低下的状态,难以为高额的回收利用体系建设付费。因此,与发达国家不同,中国废旧产品回收利用体系的构建应充分发挥消费者的作用,如可采用消费者缴付回收保证金等手段。以电视为例,在消费者购买商品时收取 50 元/台的电子产品回收保证金,仅相当于提升 1%—2% 的购买价格;然而,将其用于回收环节,相当于提高了近一倍的废旧产品回收价格。在其激励下,完全可以通过市场机制挤出非正规回收者。整体看,这 50 元的价格只是由消费者效用提升的低敏感区域向高敏感区域转移,既增加了消费者的整体效用水平,也促进了正规回收行为。与此同时,产品由消费至报废具有近十年的周期,这可以确保产品回收保证金形成基金池,从而可充分发挥其资本运作功能,增值部分也可更好的激励正规回收利用者。

六、结论和启示

1. 结论

资源约束问题已成为制约中国工业可持续发展的重要因素。发达国家的经验表明,在社会资源蓄积量达到一定规模的特定发展阶段,再生资源必将成为支撑社会经济发展的一种重要资源投入。再生资源是一种特殊的资源类型,既源于原生资源,又与之具有相同的市场竞争目标,两者处于相互竞争、相互替代又相互补充、相互耦合的复杂系统之中。从全生命周期的视角分析,随着新产品逐

渐达到报废年限,废旧产品必然产生,两者数量虽存在时滞性差异,但仍保持着密切的相关关系;从多生命周期视角分析,再生资源具有多次重复循环的可能,这对于资源供给具有重要的乘数效应。本文进一步论证了是否可以通过原生资源与再生资源的耦合配置来实现中国资源的可持续供应。为此,构建原生与再生资源耦合配置下的资源可持续利用研究的理论架构,并分析二者耦合配置的动态演化过程。基于此,构建了 StockBased 模型计算再生资源供应量与资源需求总量的耦合关联,并引入了 Weibull 分布模型及 Logistic 分布模型对其进行修正。进而,延伸构建了资源动态可持续利用模型,将可持续利用指数、蓄积原生资源消费量以及再生资源的乘数效应作为三项重要指标,用于测评中国资源总需求量与再生资源供给量的远景匹配能力,并选取了钢及金两种中国稀缺的战略资源作为案例进行实证分析。此外,由于资源可持续利用是一个长期的系统工程,虽然钢资源及金资源在未来的使用情况存在不确定性,然而,为了更加详尽地描述原生与再生资源耦合配置机理,本文将研究周期设定为 2015—2050 年。

研究结果表明,在再生资源的驱动下,原生资源消费量与资源需求总量将呈现脱钩的趋势,且再生资源的乘数效应将呈近指数型增长。这将大幅提升资源可持续利用指数,减少蓄积原生资源消费量。以钢资源为例,2015—2050 年间资源可持续利用指数将提升近 80%,且蓄积原生资源消费量减少近 1/2。然而,在这种情景中,资源强/弱可持续利用的目标均无法实现。究其原因,在于再生资源开发利用兼具资源再生与节能减排的双重效果,强烈的资源环境正外部性易于形成市场失灵现象,使得其产量水平难以达到最优产量,再生资源的乘数效应无法有效发挥,难以破解资源约束的新常态。这就需要合理的政府制度设计以有效提升资源的可持续利用能力。为此,本文对应上述基准情景中的假设条件,设定了相应的政策情景,分别为寿命延长情景、高回收增长率情景、高回收率峰值情景、资源减量化情景,模拟了四类情景对资源可持续利用能力的影响,并延伸探讨了各类情景的实现路径。择取其中的优势策略,构建了政策组合情景,并模拟了其运行效果。该种组合情景可快速提升 19 倍的钢资源及金资源供给量,自 2037 年两种资源均可达到强可持续利用目标;且在 2015—2050 年间,原生钢及金资源的蓄积消费量相较基准情景分别降低 70.9%和 72.1%,可达到资源弱可持续利用目标,有效破解了中国资源约束新常态。

2. 启示

本文的系列探讨为国家实施循环发展引领计划,加快废旧产品资源化利用提供了理论支撑,并为政府合理的利用原生与再生资源的耦合配置机制,破解当前中国工业可持续发展面临的资源约束问题提供了有意义的政策调整和改革依据:

(1)在原生资源与再生资源耦合配置时,减少资源耗散,提升再生资源的回收利用率,从而提高再生资源的乘数倍率已成为解决资源可持续利用的重要手段。这与在原生资源主导的情况下提升资源可持续利用能力主要依赖于开源节流具有重大变革。尤其是对于接近绝对稀缺状态且难以以为其他资源类型所替代的战略资源,开源节流仅能延长其使用年限,从根本上保证资源的远景可持续利用能力仍需要通过提高再生资源的乘数倍率,依靠资源近闭路循环的方式予以解决。

(2)延长产品使用寿命、促进资源减量化设计以及提升正规企业回收利用率的增幅和峰值对于实现资源可持续利用具有重要作用。这几乎涉及产品全生命周期各利益相关者责任,需要政策方案逐渐向全生命周期管理模式创新的方向转变,用联系的观点看问题,理顺政策方案对各利益相关者的影响,形成政策合力,共促再生资源开发利用,满足资源可持续利用的发展要求。

(3)政府既应通过财税政策培育公众生态环境意识以及支持相关企业进行减量化实践,也应充分调动市场的积极性,形成废旧产品正规回收利用的长效机制。中国已实施的“废弃电器电子产品

处理基金”制度无法实现基金的长期持续供应,且加剧了回收利用环节的混乱程度。因此,基金制度仅能作为短期辅助政策,长期看仍需借助政策手段的引导,构建完备的废旧产品回收利用行业促进体系,推动其回归市场化发展轨道。该体系的构建应发挥消费者的作用,充分挖掘同一价值量在新产品购买环节以及废旧产品回收环节对消费者效用影响的敏感性差异,从而构建新型的产品回收保证金制度,通过市场机制挤出非正规回收者。与此同时,产品由消费至报废具有长周期的特点,确保了产品回收保证金形成基金池,从而可充分发挥其资本运作功能。

[参考文献]

- [1]陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J]. 经济研究, 2009,(4): 41-55.
- [2]金碚. 中国工业化的资源路线与资源供求[J]. 中国工业经济, 2008,(2): 5-19.
- [3]Dame, E., K. Zumwinkel, and M. Stuchtey. Growth within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe[R]. Ellen Macarthur Foundation, 2015.
- [4]Ciacci, L., R. Barbara, N. T. Nassar, and T. D. Graedel. Lost by Design [J]. Environmental Science & Technology, 2015,49(16):9443-9451.
- [5]Gaudet, G. Natural Resource Economics under the Rule of Hotelling [J]. Canadian Journal of Economics/Revue Canadienne D'économique, 2007,40(4):1033-1059.
- [6]Cynthia, L. C. Y., and G. Wagner. Steady-State Growth in a Hotelling Model of Resource Extraction[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2007,54(1):68-83.
- [7]Campbell, C. J., and J. H. Laherre. The End of Cheap Oil[J]. Scientific American, 1998,(3):78-84.
- [8]Reynolds, D. B. The Mineral Economy: How Prices and Costs can Falsely Signal Decreasing Scarcity [J]. Ecological Economics, 1999,31(1):155-166.
- [9]Tietenberg, T., and L. Lewis. Environmental & Natural Resource Economics (Ninth Edition)[M]. New Jersey: Addison-Wesley, 2012.
- [10]Zhang, L., Z. Yuan, and J. Bi. Predicting Future Quantities of Obsolete Household Appliances in Nanjing by a Stock-Based Model[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011,55(11):1087-1094.
- [11]Yu, J., E. Williams, M. Ju, and Y. Yang. Forecasting Global Generation of Obsolete Personal Computers[J]. Environmental Science & Technology, 2010,44(9):3232-3237.
- [12]雪晶,胡山鹰,杨倩. 中国废旧汽车再生资源潜力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013,23(2):169-176.
- [13]Dwivedy, M., and R. K. Mittal. Future Trends in Computer Waste Generation in India[J]. Waste Management, 2010,30(11):2265-2277.
- [14]Murakami, S., M. Oguchi, T. Tasaki, I. Daigo, and S. Hashimoto. Lifespan of Commodities, Part I[J]. Journal of Industrial Ecology, 2010,14(4):598-612.
- [15]Oguchi, M., S. Murakami, T. Tasaki, I. Daigo, and S. Hashimoto. Lifespan of Commodities, Part II[J]. Journal of Industrial Ecology, 2010,14(4):613-626.
- [16]Mueller, D. B., J. Cao, E. Kongar, M. Altonji, P. H. Weiner, and T. E. Graedel. Service Lifetimes of Mineral End Uses[R]. U.S. Geological Survey, 2007.
- [17]Yang, Y., and E. Williams. Logistic Model-Based Forecast of Sales and Generation of Obsolete Computers in the U.S.[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2009,76(8):1105-1114.
- [18]Yang, Y., and E. Williams. Forecasting Sales and Generation of Obsolete Computers in the U.S. [J]. Proceedings of IEEE Symposium on Electronics and the Environment, 2008.
- [19]中华人民共和国国土资源部. 中国矿产资源报告[M]. 北京:地质出版社, 2015.
- [20]Li, Y., Z. Liu, Q. Li, Z. Liu, and L. Zeng. Recovery of Indium from Used Indium-Tin Oxide (ITO) Targets [J]. Hydrometallurgy, 2011,105(3-4):207-212.
- [21]Oguchi, M., S. Murakami, H. Sakanakura, A. Kida, and T. Kameya. A Preliminary Categorization of End-

- of-life Electrical and Electronic Equipment as Secondary Metal Resources[J]. *Waste Management*, 2011,31(9-10): 2150-2160.
- [22] Amy, C. T. Indium[R]. United States Geography Survey Indium Statistics and Information, 2015.
- [23] John, W., and H. Sabine. *World Population Prospects: The 2012 Revision* [R]. United Nations, Department of Economic and Social Affairs: Population Division, Population Estimates and Projections Section, 2012.
- [24] Hasegawa, H., I. M. M. Rahman, Y. Egawa, H. Sawai, Z. A. Begum, T. Maki, and S. Mizutani. Recovery of Indium from End-of-Life Liquid-Crystal Display Panels Using Aminopolycarboxylate Chelants with the Aid of Mechanochemical Treatment[J]. *Microchemical Journal*, 2013,106(1):289-294.
- [25] Yang, J., T. Retegan, and C. Ekberg. Indium Recovery from Discarded LCD Panel Glass by Solvent Extraction[J]. *Hydrometallurgy*, 2013,137(5):68-77.
- [26] Rocchetti, L., A. Amato, V. Fonti, S. Ubaldini, I. D. Michelis, B. Kopacek, F. Vegliò, and F. Beolchini. Cross-Current Leaching of Indium from End-of-Life LCD Panels[J]. *Waste Management*, 2015,42(8):180-187.
- [27] Gu, Y., Y. Wu, M. Xu, H. Wang, and T. Zuo. The Stability and Profitability of the Informal WEEE Collector in Developing Countries: A Case Study of China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016,107(2):18-26.

Coupling Allocation of Primary and Secondary Resources

GU Yi-fan, WU Yu-feng, MU Xian-zhong, ZUO Tie-yong

(Institute of Circular Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this paper, we analyzed whether a sustainable resource supply could be realized in China through coupling allocation of primary and secondary resources. The multiplier effect of the secondary resource industry on resource supply was discovered. A dynamic sustainable supply model was used to measure the sustainability of resource supply. Two kinds of strategic resources, namely indium and gold, were employed as case studies. The results showed that primary resource consumption was decoupling with total resources demand, and the multiplier effect of secondary resource presented a trend close to exponential growth. The resource sustainability supply index will be significantly promoted and the primary resource accumulated consumption will be decreased. However, the goal of resource sustainability supply can still not be achieved in the baseline scenario. The reason is that strong positive externalities of environment and resource are shown during the secondary resource recycling. A reasonable policy is necessary to internalize the positive externality. A variety of policy scenarios were constructed to measure the impact on sustainability. Prolonging the service life of a product, improving recovery and recycling rate, raising formal recycling peak, and eco-design were proved to be the most effective ways to promote the resource sustainability supply. Subsequently, a combined policy scenario based on their advantages was built. In this scenario, the total quantity of indium and gold are rapidly raised 19 times, and the goal of strong resource sustainability supply can be achieved in 2037. Moreover, the primary resource demand of indium and gold will be reduced by 70.9% and 72.1% respectively during 2015—2050, and the goal of weak resource sustainability supply can also be achieved. This meant the combined policy scenario was demonstrated to be a feasible method to solve China's new normal of resource constraint. Subsequently, based on the product life cycle management method, the important roles of the product recovery margin system, the eco-design and the modular production were analyzed to realize the combined policy scenario.

Key Words: resource constraint; secondary resource; coupling allocation; multiplier effect; sustainable supply

JEL Classification: Q01 Q21 Q32

[责任编辑:覃毅]