

引用格式:贾冯睿,郎晨,刘广鑫,等. 基于物质流分析的中国金属铜资源生态效率研究[J]. 资源科学, 2018, 40(9):1706-1715.
[Jia F R, Lang C, Liu G X, et al. Assessment of copper resources ecological efficiency based on material flow analysis in China[J].
Resources Science, 2018, 40(9):1706-1715.] DOI :10.18402/resci.2018.09.02

基于物质流分析的中国金属铜资源生态效率研究

贾冯睿¹, 郎晨¹, 刘广鑫¹, 孙琪¹, 马丹竹¹, 岳强²

(1. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 抚顺 113001;

2. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110819)

摘要:铜是战略物资,其高效利用关系国民经济发展及国家工业化进程。本文运用物质流分析方法,建立了金属铜资源物质流模型,在此基础上,通过层次分析与熵权法构建了铜资源生态效率评价体系,对中国1990年、1995年、2000—2015年铜资源生态效率进行评价,结果显示:单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量在1990—2015年间呈先降、后升、再降趋势;铜资源生产、加工、消费和回收过程中所消耗的能源总量及废弃物排放所产生的环境负荷自1990年开始逐年减小;生态效率在1990—2015年期间逐年攀升,于2011年进入中效状态。之后基于未来铜资源生态效率的三种情景进行分析,在情景1和情景2下:2050年中国铜资源生态效率分别达到3.10和3.65,是中效的中等水平和中效的偏高水平;在情景3中:2050年生态效率为4.45,分别为1990年、2000年、2010年、2015年生态效率的3.89、4.15、2.32、1.80倍,铜行业发展状态已达到“微耗损型发展,可持续”的初等水平,预计之后将稳定在4.45左右。依照以上研究结果,铜行业的发展应坚持经济效益和节能环保相结合的方式,以期未来走上绿色、可持续的发展道路。

关键词:金属铜;生态效率;物质流;情景分析

DOI :10.18402/resci.2018.09.02

1 引言

铜资源被广泛应用于各行各业,是在众多领域里不可替代的有色金属。近年来中国铜消费量一直稳居全球之首^[1],2015年中国精炼铜总量约990.56万t(占当年全球消费45.88%)^[2];但中国铜矿产量占本国精炼铜消费量的比值不足10%^[3],矿山铜的供应能力有限,产量峰值仅在200万~250万t^[4],中国铜资源对外依赖日益严重;此外,铜行业的飞速发展也带来严重的能源及环境问题,如火法炼铜每生产1t铜将耗电5521.50 kWh,产生2~3t铜渣^[5,6]。由此可见,研究铜资源的代谢趋势、市场供需特点及生态环境负荷具有重要意义。

“生态效率”这一概念的首次出现,是1990年德国学者 Schaltegger 等基于经济活动产生的经济价

值与环境污染在学术界提出的^[7]。近年来,国内外研究人员围绕铜资源生态效率的各项影响因素进行了相关研究和论述。① 针对铜资源的代谢趋势: Zhang L等应用存量预测模型,研究了中国未来铜资源代谢趋势^[8]; Chen W等在物质流分析的框架下,选定1975—2012年间的几个特定年份,对美国铜流量进行了量化分析^[9]; Amneklev J等对铜进行物质流分析,监测了瑞典斯德哥尔摩市铜流量随着时间推移发生的变化^[10]。② 关于市场供需特点: Melnykov A M通过统计分析方法确定了21世纪20年代末全球铜市场的主要特征并分析了全球铜市场的走势^[11];崔荣国等概述了全球铜资源状况,总结了全球铜生产、消费的变化规律和行业需求趋势,并通过对人均铜累积量的测算预测了全球矿山铜

收稿日期:2017-05-22;修订日期:2017-08-14

基金项目:国家自然科学基金项目(71373003)。

作者简介:贾冯睿,男,辽宁沈阳人,博士,副教授,从事工业生态学研究。E-mail: frjia@lnpu.edu.cn

通讯作者:岳强, E-mail: yueq@smm.neu.edu.cn

2018年9月

需求量^[12];Wei F L等采用Eviews 6.0软件,分析和测试了近年来中国铜矿资源贸易的影响因素^[13]。③对于生态环境负荷:Wan H K等采用系统动力学方法研究铜冶炼链,提出实现可持续发展的一些措施,以提高资源回收利用率,减少废物排放^[14];樊欢欢等采用生命周期法对精炼铜行业的生命周期节能减排目标进行了评价^[15];刘志宏对中国铜冶炼工业节能减排现状与发展趋势进行综述,并指出今后中国铜冶炼工业减排的方向^[16]。④针对资源效率:岳强等从单位铜矿石所能产出的铜产量着手,对中国铜的资源效率进行研究^[17];Wang C等采用“压力-状态-响应”(PSR)模型,构建了铜资源安全综合评价指标体系^[18];Reuter M A等通过工业经济创新性指标来量化铜的可持续性和资源效率^[19]。

但综文献,目前鲜有研究基于物质流方法联结整个铜行业,系统地综合资源、经济、能源及环境等多个方面对铜资源进行评价并设置情景对其未来发展趋势进行预测。基于此,本文将铜资源生态效率定义为包含资源、经济、能源及环境等多个方面的综合分析指数。采用物质流分析方法,建立金属铜资源整个生命周期(生产、加工制造、使用消费和回收利用)的模型框架,并在此基础上构建铜资源生态效率综合评价体系,然后根据生态效率的主要影响因素,分别设计经济主导型、节能环保主导型及经济发展兼顾节能环保型三种未来的铜资源生态效率情景模式对其未来发展趋势进行预测,以为铜行业政策的调整提供数据支持。

2 研究方法

2.1 数据来源

本文以1990年、1995年、2000—2015年三个时间段的中国为研究对象。铜资源生态效率的影响因素涉及资源、经济、能源及环境等多个方面,依据1990—2015年《中国有色金属工业年鉴》^[20]、《世界精炼铜产量和消费量》^[21]、《中国能源统计年鉴》^[22]、《中国环境统计年鉴》^[23]等官方资料进行统计。1990年、1995年、2000—2015年中国金属铜资源的物质及经济价值总量、能源消耗与环境负荷的主要参数见表1。

2.2 金属铜资源模型框架的建立

金属铜资源的生命周期,包括铜的生产、铜制

品的加工制造、铜制品的使用消费和废杂铜的回收利用等四个阶段^[24]。基于表1列出的基本参数项,综合考虑价值链、能源消耗及废物产量等多个因素,绘制了中国铜资源物质的流量和流向变化以及铜的产量变化,如图1。

2.3 金属铜资源生态效率综合评价方法的构建

2.3.1 评价指标体系的确定及指标含义

(1)评价指标体系的确定。金属铜资源生态效率评价的关键环节之一是指标体系的构建。根据图1,本文指标的设计从资源、经济、能源及环境等方面综合考虑后分为三级、共15项指标,详见表2(见第1709页)。其中,第三级指标的权重采用熵权法^[25]确定,详细的计算方法在下文给出。

(2)指标含义。*CREE*(Copper Resources Ecological Efficiency)表示铜资源生态效率;*MV*(Material Flow Analysis and Value Chain Analysis)表示单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量;*EE*(Energy Consumption and Environmental Load)表示铜资源生产、加工、消费和回收过程中所消耗的能源总量及废弃物排放所产生的环境负荷;“+”表示正向指标,“-”表示负向指标,正负向指标的具体含义见表3(见第1709页);表观消费量为“进口量-出口量+生产量”;贸易条件为出口单价与进口单价的比值;铜损失量为铜在废杂铜的回收利用阶段产生的损失,按废杂铜表观消费量的30%估算^[26, 27];矿石指数^[28]为统计期内铜行业所需铜矿(包含粗铜)的含铜量与统计期内的铜产量的比值;废铜指数^[28]为统计期内用于生产精炼铜的折旧废铜量与加工废铜量之和与统计期内的铜产量的比值。

2.3.2 标准化处理

由于铜资源效率指标体系中所涉及的15项具体指标的单位不统一,因此本文将其进行标准化处理,使处理后的值均在0~1之间,标准值的确定依据及正、负指标属性见表2(见第1709页);为了能够表现出指标之间的相对变化关系和趋势,在指标值与标准值进行标准化过程中,赋予了0.9和0.1的系数。评价指标的类型及计算方法见表3(见第1709页)。

表1 中国金属铜资源的物质及经济价值总量、能源消耗与环境负荷的主要参数

Table 1 Copper material and economic value, energy consumption and environmental load of the main parameters in China

年份	精炼铜 出口量 /万 t	精炼铜 进口量 /万 t	精炼铜 生产量 /万 t	精炼铜 出口单价 /(元/t)	精炼铜 进口单价 /(元/t)	能耗 /万 tce	废水 排放量 /万 t	废气 排放量 /亿 Nm ³	固体废弃 物排放量 /万 t
1990	1.65	3.84	56.16	12 698.19	12 458.74	472.15 [#]	21 588.99 [#]	1 207.36 [#]	100.69 [#]
1995	3.93	10.77	107.97	22 168.90	18 024.18	738.95	18 275.21	1 022.04	85.24
2000	10.63	68.74	137.11	14 904.95	15 282.90	696.41	11 058.04	1 526.01	148.14
2001	5.10	83.50	152.33	13 748.99	13 702.43	741.38	11 603.12	1 754.09	72.23
2002	7.66	118.10	163.25	12 878.91	13 538.07	774.37	10 161.75 [#]	1 536.20 [#]	63.25 [#]
2003	6.44	135.73	183.63	14 413.17	15 029.02	894.13	8 167.05	5 146.72	26.67 [#]
2004	12.38	120.01	219.87	22 611.55	23 113.61	1 079.90	9 739.40	1 880.99	31.12
2005	14.02	122.22	260.04	31 107.80	29 007.42	1 282.68	10 292.00	2 186.44	28.56
2006	24.30	132.70	300.32	48 345.59	50 886.55	1 542.99	11 767.96	2 712.31	41.16
2007	12.59	149.37	349.94	57 425.26	53 017.36	1 727.00	11 100.54	2 847.37	21.87
2008	9.61	145.64	379.46	57 944.60	47 650.72	1 807.66	10 850.79	3 151.59	13.54
2009	7.29	318.52	405.13	41 108.50	33 693.15	1 981.92	10 310.60	3 082.31	25.15
2010	3.87	292.21	454.03	53 046.10	50 644.30	1 986.70	10 076.37	3 566.84	15.05
2011	15.71	283.56	516.31	60 733.73*	52 185.47*	2 282.42	12 774.76	4 845.23	17.12 [#]
2012	27.40	340.21	587.91	48 396.96*	39 614.70*	2 550.00	12 692.81	5 243.41	19.49 [#]
2013	29.34	320.58	666.71	47 809.02	46 418.67	2 961.81	13 323.01	5 455.77	22.10 [#]
2014	26.59	358.97	764.90	43 281.49	43 273.08	3 253.96	13 673.16	6 484.95	25.36 [#]
2015	25.71*	368.00	796.00	40 290.79	39 508.13	3 070.06	12 135.48	6 369.09	26.39 [#]

注：①表中只列出精炼铜的全部基本参数，未给出铜精矿、废杂铜、粗铜、铜材的相关参数，但其类别与精炼铜一致；②标记*的为缺失数据，依据同年铜材对应参数的增幅估算得到；③铜行业的能耗、废水排放量、废气排放量、固体废弃物排放量均依照同年精炼铜生产量占有色金属生产量的比率进行估算；④标记#的为缺失数据，依据同年精炼铜生产量增幅估算得到。

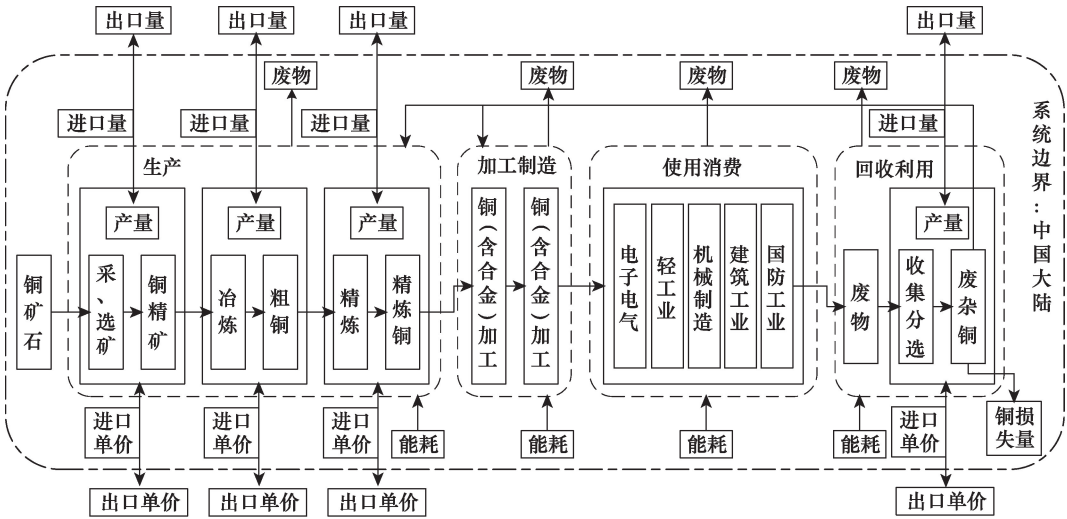


图1 中国铜资源物质流、价值链、能源消耗及废物产量

Figure 1 Copper material flow, value chain, energy consumption and waste production diagram in China

注：(1)铜的生产阶段主要包含三个工序：①采、选矿，产品为铜精矿；②冶炼，产品为粗铜；③精炼，产品为精炼铜。(2)铜制品的加工制造包含铜半成品的加工、铜合金半成品的加工，以及最终制品的制造。(3)铜制品的使用消费：加工制造出的铜制品广泛应用于国民经济的各个领域，其中主要应用于电子电气、轻工业、机械制造、建筑、国防等行业中。(4)废杂铜的回收利用：报废的铜制品经收集分选等工序后，可以返回铜工业重新利用^[24]。

表2 铜资源生态效率评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of copper resources ecological efficiency					
第一级指标	第二级指标	第三级指标/单位	标准值	第三级指标权重	正负向
铜资源生态效率(CREE)	单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量(MV)	铜精矿表观消费量/万 t	762.37	0.111 416	-
		粗铜表观消费量/万 t	90.10	0.102 732	+
		精炼铜表观消费量/万 t	742.37	0.105 554	+
		废杂铜表观消费量/万 t	3 510.93	0.113 509	+
		铜损失量/万 t	153.28	0.106 599	-
		铜精矿贸易条件/(元/元)	0.33	0.105 956	+
		粗铜贸易条件/(元/元)	0.94	0.118 078	+
		精炼铜贸易条件/(元/元)	1.05	0.118 078	+
		废杂铜贸易条件/(元/元)	1.84	0.118 078	+
	铜资源生产、加工、消费和回收过程中所消耗的能源总量及废弃物排放所产生的环境负荷(EE)	铜行业能耗/万 tce	1 986.70	0.158 785	-
		铜行业工业废水排放量/万 t	10 076.37	0.167 079	-
		铜行业工业废气排放量/亿 Nm³	3 566.84	0.157 894	-
		铜行业固体废弃物排放量/万 t	15.05	0.169 238	-
		矿石指数/(t/t)	0.67	0.173 502	+
		废铜指数/(t/t)	0.20	0.173 502	+

注:选取2010年数据为标准值,数据来源为文献[20-23]。

表3 评价指标类型及计算方法

Table 3 Evaluation index type and calculation method				
	指标类型	指标含义	条件	计算公式
单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量(MV)	正向指标	指标值越高,MV越大	$M_i \leq M$	$0.9M_i/M$
			$M_i > M$	$0.9 + 0.1(M_i - M)/M_i$
	负向指标	指标值越高,MV越小	$M_i \leq M$	$1 - 0.9M_i/M$
			$M_i > M$	$0.1 - 0.1(M_i - M)/M_i$
铜资源生产、加工、消费和回收过程中所消耗的能源总量及废弃物排放所产生的环境负荷(EE)	正向指标	指标值越高,EE越大	$M_i \leq M$	$0.9M_i/M$
			$M_i > M$	$0.9 + 0.1(M_i - M)/M_i$
	负向指标	指标值越高,EE越小	$M_i \leq M$	$1 - 0.9M_i/M$
			$M_i > M$	$0.1 - 0.1(M_i - M)/M_i$

注: M_i 为第 i 项指标值; M 是标准值。

2.3.3 评价指标权重的确定

指标权重的确定方法有很多,通过对不同方法的比较,本文采用熵权法来确定各项指标的权重,其过程主要分为4个步骤^[29]:

(1)形成原始数据矩阵X。假设研究对象包含 n 个样本单位,反映样本质量的评价指标有 m 个,则有:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2)原始数据矩阵标准化。根据指标性质,采

用相应的标准化形式对其进行处理。

对于越大越优型指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (2)$$

对于越小越优型指标:

$$r_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (3)$$

以上两式中 r_{ij} 为第 i 个评价指标在第 j 个评价对象上的标准值, $r_{ij} \in [0, 1]$ 。

(3)计算熵值。按下式进行熵值计算:

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}; \quad i=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中 H_i 为第 i 个评价指标的熵值; k 为待定常数; f_{ij} 为第 j 个评价对象在第 i 个评价指标下的特征比重。在数值上: $k = \frac{1}{\ln n}$, $f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}$; 当 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

(4)确定指标权重。基于以上的熵值计算,依照下式即可确定第 i 项指标的权重:

$$w_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^m g_{ij}}; \quad i=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$0 \leq w_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (6)$$

式中 w_i 为指标权重; g_i 为第 i 个评价指标的差异性系数; g_{ij} 为第 i 个评价指标对第 j 个评价对象的差异性系数。

通过以上步骤,第三级指标的权重即可确定,具体数据已列于表2。

2.3.4 评价依据

生态效率的定义为产出与投入的比值,其中“产出”是指企业生产或经济体所涉及的物质及经济价值总量;“投入”是指企业生产或经济体所消耗的能源总量及其所造成的环境负荷^[30]。本文中,铜资源生态效率指数是反映了资源、经济、能源和环境的一个综合无量纲评价指标,体现了铜资源生命周期内所产生的物质及经济价值、所消耗的能源及产生的环境负荷。研究目的是在最低环境负荷下,实现铜资源物质和经济价值的收益最大化。经过前文金属铜资源生态效率指标体系的构建及标准化处理,建立以下评价模型。

单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量评价模型:

$$MV = \sum_{s=1}^p MV_s \times w_s \quad (7)$$

铜资源生产、加工、消费和回收过程中所消耗的能源总量及废弃物排放所产生的环境负荷评价模型:

$$EE = \sum_{t=1}^q EE_t \times w_t \quad (8)$$

铜资源生态效率评价模型:

$$CREE = \frac{MV}{EE} \quad (9)$$

式中 MV 为单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量,为产出量; MV_s 为无量纲化后的综合分析指数第 s 类指标; EE 为铜资源生产、加工、消费和回收过程中所消耗的能源总量及废弃物排放所产生的环境负荷,为投入量; EE_t 为无量纲化后的综合分析指数第 t 类指标; $CREE$ 为铜资源生态效率; w_s 为第 s 类指标所选取因素的权重; w_t 为第 t 类指标所选取因素的权重; p 为单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量指标总数; q 为铜资源生产、加工、消费和回收过程中所消耗的能源总量及废弃物排放所产生的环境负荷指标总数。

2.3.5 评价等级判定

考虑到评判等级划分的有序性,本文选择了置信度识别准则。有序评价等级 $c = \{c_1, c_2, \dots, c_u\}$, 对于置信度 $\lambda (0.5 < \lambda < 1)$, 如果某一个 $h (1 \leq h \leq u)$ 满足:

$$\begin{cases} \sum_{r=1}^{h+1} CREE_{rh} \geq \lambda \\ \sum_{r=1}^h CREE_{rh} < \lambda \end{cases} \quad (10)$$

则评估对象 $CREE_r$ 的评估等级被识别为 c_h 级。

基于金属铜资源生态效率评价体系及模型的建立,铜资源生态效率的具体评价情况,见表4。

表4 金属铜资源生态效率评价等级

Table 4 Evaluation grade of copper resources ecological efficiency

类别	数值范围	状态	铜行业发展趋势
CREE	(0, 2]	低效	高耗损型发展, 强不可持续
	(2, 4]	中效	低耗损型发展, 弱不可持续
	(4, 6]	高效	微耗损型发展, 可持续

2.4 情景模式的设计

铜资源生态效率因资源、经济、能源与环境等因素的影响具有一定的复杂性,因此,对其未来发展趋势进行预测时采用情景分析法^[31]具有一定的优势。本研究中设定了三种情景,具体描述如下:

情景1:该情景中2015年中国国内生产总值(GDP)年均增速为6.9%,2016—2020年、2021—2030年、2031—2040年和2041—2050年四个时期

2018年9月

中国GDP增长率分别为6.5%、4.9%、3.9%和2.5%^[32];随着经济的增长,允许中国的环境负荷以适当的速度增长^[33],本文中取1%。

情景2:该情景中,到2020年中国污染物排放总量下降10%、单位国内生产总值能源消耗降低15%^[34],到2025年分别再下降10%、15%;2030年中国已基本完成工业化^[35],环境污染将跨越恶化拐点^[36]。

情景3:该情景中综合以上两种情形,中国四个时期的GDP年均增速分别为6.5%^[32]、4.3%、2.6%和0.3%;2020年中国污染物排放总量下降10%、单位国内生产总值能源消耗降低15%^[34],到2025年分别再下降8%、12%。

根据以上情景描述,将具体参数设置列于表5。

表5 三种情景的参数设置

Table 5 Parameter settings for the three scenarios (%)

参数	时段/年	情景1	情景2	情景3
GDP增速	2016—2020	6.5*	0	6.5 [#]
	2021—2030	4.9*	0	4.3
	2031—2040	3.9*	0	2.6
	2041—2050	2.5*	0	0.3
污染物排放 总量下降	2016—2020	-1.0	10 [#]	10 [#]
	2021—2025	-1.0	10	8
单位国内生产总 值能源消耗降低	2016—2020	-1.0	15 [#]	15 [#]
	2021—2025	-1.0	15	12

注:*号数据来源文献[32];#号数据来源文献[34];未做标注的情景参数是结合情景设置及参考了若干文献后进行的探索性假设。

3 分析与讨论

3.1 1990年、1995年、2000—2015年铜资源生态效率变化规律

依据前文所给出的评价模型,得到中国铜资源生态效率的变化规律如图2所示。由图2可见:

(1)单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量在1990—2000年间总体呈下降趋势,从2001年开始逐年增长,而2011—2015年再次下降,但其降幅低于1990—2000年。出现这种状况的原因是1990—2000、2011—2015年期间影响单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量的主要因子为贸易条件,而2001—2010年期间则为铜表观消费量。1990—2000年铜价出现大幅震荡,1999年全

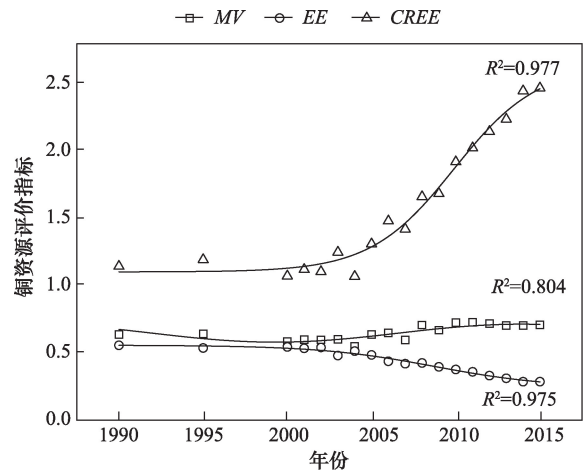


图2 中国1990年、1995年、2000—2015年铜资源生态效率变化规律

Figure 2 Variation of copper resources ecological efficiency in China in 1990, 1995, 2000–2015

年伦敦金属交易所(LME)现货铜平均价格仅在13 013元/t^[37],因此在此期间铜精矿、废杂铜的贸易条件均有所下滑,而各类铜表观消费量增长均较为缓慢;2001—2010年中国进入快速工业化进程,加之国有工业经济布局优化改革^[38],铜表观消费量增长速度明显加快;2009年经济危机结束后,2011—2015年铜表观消费量增长速度放缓,且出口市场存在较大的不确定性^[39],废杂铜、精炼铜及粗铜的贸易条件再次下降。

(2)铜资源生产、加工、消费和回收过程中所消耗的能源总量及废弃物排放所产生的环境负荷自1990年开始逐年减小,且2001—2013年的降幅明显高于1990—2000年,2014年、2015年两年依旧保持降低态势但渐趋平稳。1990年中国开始注重伴随工业发展所带来的环境问题,当年对环境污染限期治理项目投资为5亿元^[40];到2000年中国环境污染限期治理项目总投资已达到208亿元^[41],是1990年的41.60倍;2000年后,中国环境投资总额大幅增加,仅2012年、2013年和2014年环境投资总额同比增长就分别达36.96%、9.49%和5.96%^[23],且国家十一五、十二五规划期间主要污染物SO₂排放总量分别减少14.29%、18.00%,单位国内生产总值能源消耗分别降低19.10%、18.20%^[34, 42]。

(3)铜资源生态效率在1990—2015年期间呈逐年增长趋势。1990—2005年增长较缓,生态效率处

于1.05~1.35之间,为低效,此时铜行业发展状态为“高耗损型发展、强不可持续”;自2006年开始铜资源生态效率呈拟线性快速增长:2006—2010年仍处于低效状态;2011年达到2.03,铜行业发展进入“低耗损型发展、弱不可持续”状态;到2015年生态效率为2.45,是中效的初等水平。

3.2 三种情景模式的发展预测

根据2.4章节情景模式的设计,可得到三种情景下铜资源生态效率的变化,如图3所示。从图3中可以看出:

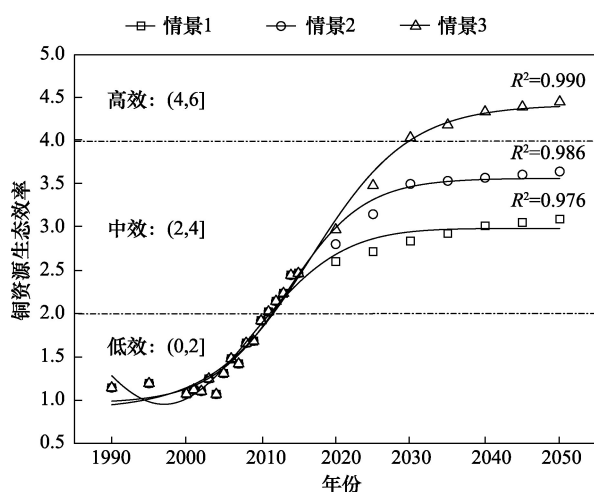


图3 中国铜资源生态效率三种情景模式

Figure 3 Copper resources ecological efficiency in China under the three scenarios

(1)三种情景模式的共性为:现阶段中国金属铜资源生态效率正处于良性发展阶段,整体呈现逐年增长的趋势。在三种情景中,2016年之后的增长速度开始出现分歧:情景3中的增长速度是最快的;情景3的增速大于情景1和情景2,因此这两种情景的铜资源生态效率明显低于情景3。此外,三种情景中铜资源生态效率的最终状态有所差别:情景3在2030年即可进入“微耗损型发展,可持续”的高效发展阶段,而情景1和情景2始终处于“低耗损型发展,弱不可持续”的中效阶段。

(2)情景1中,铜资源生态效率在不断增加且增速先于情景2和情景3放缓,到2050年数值可达3.10,处于中效的中等水平,此时中国经济仍持续高速发展,而相应节能环保政策未严格落实,这种状况在实际工作中是无法接受的,对中国的能源供应

和生态环境而言都是巨大的考验;在情景2和情景3中,铜资源生态效率走势均越来越平稳:情景2中2050年的铜资源生态效率为3.65,效率状态已为中效且接近高效,但此时经济发展缓慢,不利于中国可持续发展;情景3中铜资源生态效率到2050年可稳定在4.45左右,铜行业发展状态达到“微耗损型发展,可持续”的初等水平,此时中国经济发展稳中有升,同时兼顾能源节约与环境治理。在三种情景模式中,情景3是当今中国发展能够被接受且期望实现的。

4 结论

本文基于物质流的分析方法,建立金属铜资源模型框架,运用层次分析与熵权法相结合的方式,分别从资源、经济、能源及环境等多个角度出发构建了评价体系,并评价了1990年、1995年、2000—2015年间中国金属铜资源的生态效率变化规律,在此基础上,设计预测了三种发展情景模式,以期为中国金属铜资源的高效利用与管理提供一定的理论基础。

(1)单位时间内铜资源生命周期内所产生的可有效利用的金属铜及其附属产品的物质及经济价值总量在1990—2015年间呈先降、后升、再降趋势,数值在0.55~0.71间浮动;铜资源生产、加工、消费和回收过程中所消耗的能源总量及废弃物排放所产生的环境负荷自1990年开始逐年减小,且2001—2013年的降幅明显高于1990—2000年,2013年后趋于平稳,最小值达0.29;生态效率在1990—2015年期间呈逐年增长趋势,但1990—2010年处于低效状态,于2011年进入中效状态,到2015年达到最高值2.45,处于中效的初等水平。

(2)在情景1和情景2下,2050年中国金属铜资源生态效率分别达到3.10和3.65,是中效的中等水平和中效的偏高水平;在情景3中,2050年铜资源生态效率为4.45,分别为1990年、2000年、2010年、2015年生态效率的3.89、4.15、2.32、1.80倍,铜行业发展状态已达到“微耗损型发展,可持续”的初等水平,预计之后将稳定在4.45左右,是当今中国发展能够被接受且期望实现的。

(3)铜行业的发展要坚持经济效益和节能环保相结合的方式。中国铜行业应尽可能降低单位生

2018年9月

产总值能源消耗,减少污染物排放,提高单位在役铜创造的GDP值等,以期未来铜行业走上绿色、可持续的发展道路。

参考文献(References):

- [1] 田尤, 杨为民, 申俊峰, 等. 中国铜资源产业形势分析及发展对策建议[J]. 资源与产业, 2015, 17(4): 52-54. [Tian Y, Yang W M, Shen J F, et al. Situation and suggestions of China's copper resources industry[J]. *Resources & Industry*, 2015, 17(4): 52-54.]
- [2] Singer D A. Future copper resources[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86: 271-279.
- [3] 王俊博, 范蕾, 李新, 等. 基于物质流方法的中国铜资源社会存量研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 939-947. [Wang J B, Fan L, Li X, et al. Research on the social stock of copper resources in China based on the material flow analysis[J]. *Resources Science*, 2016, 38(5): 939-947.]
- [4] 羊建波. 全球铜资源供需格局趋势分析[J]. 中国矿业, 2015, 24(6): 1-5. [Yang J B. Trend analysis of global copper resources supply and demand pattern[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(6): 1-5.]
- [5] Zeng G, Yang J, Song X, et al. Energy consumption and carbon emissions scenario analysis of pyrometallurgical copper based on LCA[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(4): 46-50.
- [6] 吴龙, 郝以党. 铜渣资源化利用现状及高效化利用探讨[J]. 中国有色冶金, 2015, 44(2): 61-64. [Wu L, Hao Y D. Discussion on utilization status and high efficiency utilization of copper slag[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2015, 44(2): 61-64.]
- [7] 成金华, 孙琼, 郭明晶, 等. 中国生态效率的区域差异及动态演化研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 47-54. [Cheng J H, Sun J, Guo M J, et al. Research on regional disparity and dynamic evolution of eco-efficiency in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2014, 24(1): 47-54.]
- [8] Zhang L, Cai Z, Yang J, et al. The future of copper in China—a perspective based on analysis of copper flows and stocks[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 142-149.
- [9] Chen W, Wang M, Li X. Analysis of copper flows in the United States: 1975–2012[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 111: 67-76.
- [10] Amneklev J, Augustsson A, Sörme L, et al. Monitoring urban copper flows in Stockholm, Sweden: implications of changes over time [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, (5): 70-74.
- [11] Melnykov A M, Herasymenko T V. Evaluation of world resources of copper raw material [J]. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2014, (5): 123-127.
- [12] 崔荣国, 郭娟, 徐桂芬, 等. 全球铜的生产与消费及其未来需求预测[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 944-950. [Cui R G, Guo J, Xu G F, et al. Production, consumption rules and demand prediction of global copper[J]. *Resources Science*, 2015, 37(5): 944-950.]
- [13] Wei F L, Min S C, Yang L, et al. Empirical analysis of China's copper import influencing factors: a cointegration and granger test approach[J]. *Mathematics in Practice & Theory*, 2015, (3): 121-124.
- [14] Wan H K, Mu D, Peng M. Research on the sustainable development of copper metallurgy chain[J]. *International Conference on Management Science and Engineering*, 2013, 20(4): 1161-1167.
- [15] 樊欢欢, 王洪涛, 谢阿弟, 等. 精炼铜行业的生命周期节能减排目标评价[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(4): 737-743. [Fan H H, Wang H T, Xie A D, et al. Life cycle energy conservation and emission reduction targets assessment of refined copper industry [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, 9(4): 737-743.]
- [16] 刘志宏. 中国铜冶炼节能减排现状与发展[J]. 有色金属科学与工程, 2014, (5): 1-12. [Liu Z H. Present situation and development of China's copper smelting energy saving and emission reduction[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2014, (5): 1-12.]
- [17] 岳强, 陆钟武. 关于中国铜的资源效率研究[J]. 世界有色金属, 2006, (3): 68-70. [Yue Q, Lu Z W. A study about copper resource efficiency for China[J]. *World Nonferrous Metal*, 2006, (3): 68-70.]
- [18] Wang C, Zuo L, Hu P, et al. Evaluation and simulation analysis of China's copper security evolution trajectory[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(8): 2465-2474.
- [19] Reuter M A, Kojo I V. Copper: a key enabler of resource efficiency [J]. *World Metall-Erzmetall*, 2014, 67(1): 5-12.
- [20] 中国有色金属工业协会. 中国有色金属工业年鉴[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990-2017. [China Non-Ferrous Metals Industry Association. The Year Book of Non-Ferrous Metals Industry of China[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990-2017.]
- [21] International Copper Study Group. ICSG Statistical Yearbook [M]. Lisbon: Annual Publication, 1990-2017.
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1990-2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Energy Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 1990-2017.]
- [23] 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国环境保护部. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1990-2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook on Environmental [M]. Beijing: China Statistics Press, 1990-2017.]
- [24] 岳强. 物质流分析, 生态足迹分析及其应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2006. [Yue Q. Material Flow Analysis, Ecological Footprint

- Analysis and Its Application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2006.]
- [25] Chen M X, Lu D D, Zhang H. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 387-398.
- [26] 张希忠. 中国再生铜工业现状及发展前景[J]. 资源再生, 2003, (2): 11-13. [Zhang X Z. The present situation and development prospect of China's renewable copper industry[J]. *Resource Recycling*, 2003, (2): 11-13.]
- [27] 徐传华. 中国再生有色金属生产现状及前景[J]. 世界有色金属, 2004, (4): 9-15. [Xu C H. Present situation and prospect of China's renewable copper industry[J]. *World Nonferrous Metal*, 2004, (4): 9-15.]
- [28] 岳强, 陆钟武. 中国铜循环现状分析(I)-"STAF"方法[J]. 中国资源综合利用, 2005, (4): 6-11. [Yue Q, Lu Z W. An analysis of contemporary copper cycle in China(I)-" STAF " method [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2005, (4): 6-11.]
- [29] 何逢标. 综合评价方法 MATLAB 实现[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2010. [He F B. Comprehensive Evaluation Method MATLAB Implementation[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2010.]
- [30] Saling P. Eco- efficiency Assessment [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016.
- [31] Clarke A E, Friese C, Washburn R. Situational Analysis: Grounded Theory after the Interpretative Turn[M]. London: Left Coast Press, 2016.
- [32] Organization for Economic Co-operation and Development. Domestic Product-GDP Long-term Forecast -OECD Data [EB/OL]. (2014- 10- 09) [2017- 05- 22]. <https://data.oecd.org/gdp/gdp-long-term-forecast.htm>.
- [33] Hui L Y, Suo C D, Yu L, *et al*. Contrastive study of the circular economy of coal resource city based on ecological efficiency and C model[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(5): 323-333.
- [34] 国家发展和改革委员会.《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》辅导读本[M]. 北京: 人民出版社, 2016. [National Development and Reform Commission. The Thirteenth Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China [M]. Beijing: People's Publishing House, 2016.]
- [35] Xu X, Yang G, Tan Y, *et al*. Factors influencing industrial carbon emissions and strategies for carbon mitigation in the Yangtze River Delta of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 3607-3616.
- [36] 马昌盛. 2030年: 中国环境污染将跨越恶化拐点[J]. 节能与环保, 2013, (6): 44-45. [Ma C S. 2030: China's environmental pollution will cross the turning point[J]. *Energy Conservation and Environmental Protection*, 2013, (6): 44-45.]
- [37] 吕晓红, 杨长华. 1999年铜市场的回顾及2000年预测[J]. 世界有色金属, 2000, (3): 2-10. [Lv X H, Yang C H. Review of copper market in 1999 and forecast in 2000[J]. *World Nonferrous Metal*, 2000, (3): 2-10.]
- [38] Hitt M A, Xu K. The transformation of China: Effects of the institutional environment on business actions[J]. *Long Range Planning*, 2016, 49(5): 589-593.
- [39] Cao G, Han Y, Li Q, *et al*. Asymmetric MF-DCCA method based on risk conduction and its application in the Chinese and foreign stock markets[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 468: 119-130.
- [40] 国家环境保护总局. 1990年中国环境状况公报[J]. 环境保护, 1991, (8): 2-4. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China environmental status bulletin 1990 [J]. *Environmental Protection*, 1991, (8): 2-4.]
- [41] 国家环境保护总局. 2000年中国环境状况公报[J]. 环境保护, 2001, (7): 3-9. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China environmental status bulletin 2000 [J]. *Environmental Protection*, 2001, (7): 3-9.]
- [42] 国家发展和改革委员会.《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》辅导读本[M]. 北京: 人民出版社, 2011. [National Development and Reform Commission. The Twelfth Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China [M]. Beijing: People's Publishing House, 2011.]

Assessment of copper resources ecological efficiency based on material flow analysis in China

JIA Fengrui¹, LANG Chen¹, LIU Guangxin¹, SUN Qi¹, MA Danzhu¹, YUE Qiang²

(1. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;

2. SEPA Key Laboratory on Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: As an important strategic resources, the use of copper in an efficient way is related to the national economic development and industrialization process. The material flow model of copper resources was established by using material flow analysis. And then, constructing the ecological efficiency evaluation system of copper resources by AHP (Analytic Hierarchy Process) and entropy method was conducted. Next, evaluating the copper resources ecological efficiency was performed in China in 1990, 1995, and 2000-2015. The results showed that the *MV* (Material Flow Analysis and Value Chain Analysis) data were in a fluctuating state in the period 1990-2015; and the *EE* (Energy Consumption and Environmental Load) began to decrease yearly following 1990. The *CREE* (Copper Resources Ecological Efficiency) kept increasing in the period from 1990 to 2015, which reached the medium efficiency level in 2011. Furthermore, three scenario analysis for different copper resources ecological efficiency conditions was carried out. Under the first and second scenarios: the *CREE* is 3.10 and 3.65, which is in the middle level and in the high level of medium efficiency when it reached 2050, respectively. Simultaneously, under the third scenario: the *CREE* in 2050 is 4.45, which is 3.89, 4.15, 2.32, and 1.80 times of the *CREE* in 1990, 2000, 2010, and 2015, respectively. It is noted that the development of copper industry has reached the theory of “micro consumption, development, sustainability” and the *CREE* is expected to be stable at about 4.45. According to the above research results, the development of the copper industry should adhere to the way of the combination of economic efficiency, energy saving, and environmental protection, so as to embark on a green and sustainable development in the future.

Key words: copper; ecological efficiency; material flow; situational analysis