

基于生命周期评价方法的武钢钢铁 产品环境影响评估^{*}

万腾方¹ 戴方钦¹ 雷体新²

(1. 武汉科技大学材料与冶金学院 430081;
2. 武汉钢铁股份有限公司制造部 武汉 430080)

摘 要 针对研究钢铁行业环境影响的问题,采用生命周期评价方法评估武汉钢铁股份公司(以下简称“武钢”)生产过程的资源能源消耗与环境负荷。根据生命周期框架,以“大门”到“大门”作为系统边界,以 ISO14040 和 ISO14041 为标准编制钢铁产品生命周期清单,使用 IMPACT 2002 + 影响评价方法,根据 ISO14042 对清单结果做出影响评价,计算 11 种中间影响潜值,以不同物质当量值表示,并通过标准化来了解总体影响份额,以此判定钢铁产品对于呼吸道影响最为突出,全球暖化和不可回收能源使用以及人体毒性和水体生态毒性次之。最后根据蒙特-卡罗方法对数据做不确定性分析,了解评价过程的可靠性;同时通过敏感性分析了解造成影响的产品比例。

关键词 生命周期评价 清单分析 影响评价 不确定性分析 敏感性分析

Environmental Impact Assessment of WISCO Products Based on Life Cycle Assessment Method

WAN Tengfang¹ DAI Fangqin¹ LEI Tixin²

(1. College of Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology Wuhan 430081)

Abstract The energy consumption and environmental load in the production process of Wuhan Iron and Steel Company (WISCO) were evaluated by using life cycle assessment (LCA) method to study the environmental impact of steel industry. According to the life-cycle framework, the system boundary is set to be “gate” to “gate”, and the life cycle inventory of steel products is compiled under the guide of ISO14040 and ISO14041, and the IMPACT 2002 + impact assessment method is used to evaluate the inventory results according to ISO14042, and calculate eleven kinds of midpoint impact potentials, shown by different equivalents values. The share of the overall impact is understood through normalization. After calculation, it's determined that the respiratory of steel products is the most prominent, and global warming and non-renewable energy use, as well as the human toxicity and water eco-toxicity is followed. Finally, uncertainty analysis of the data was made according to the Monte Carlo method to understand the reliability of the evaluation process and at the same time the sensitivity analysis was made to understand the proportion of impact from products.

Key Words life cycle assessment inventory analysis impact assessment uncertainty analysis sensitivity analysis

0 引言

随着钢铁产品的大量生产,带来的能源短缺、资源匮乏、大气污染等环境问题也越来越突出,还产生了雾霾、酸雨等多重环境效应,对人体健康和生态环境产生巨大的威胁。生命周期评价(Life Cycle Assessment)作为国际上非常流行的环境管理与分析工具,在钢铁行业备受关注。自 1996 年起,世界钢铁协会开展生命周期清单分析,并在后面两次作出

更新与评价;在关注环境问题的同时,学者多次使用生命周期评价方法对不同地区的不同工艺下不同流程中生产过程作出评价,通过能效分析、社会效益分析不同角度给出建议。在最近 Gulnur Maden Olmez 对钢铁产品生命周期评价应用中得到其标准化结果^[1],显示钢铁生产对于人体健康中呼吸道影响最大,而炼铁流程对于温室气体贡献最突出等。在本文中,通过生命周期评价方法对以传统钢铁工艺为

^{*} 基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(2014CB660802)。

主、钢材产量超过 1500 万 t 的武钢股份公司生产过程中的环境负荷评价,并对结果进行分析与讨论。

1 生命周期评价过程

1.1 目标与范围定义

采用生命周期评价方法编制钢铁产品的生命周期清单^[2-3],了解其整体过程中资源、能源消耗与环境污染;将不同的生产过程经过统一的特征化,比较其中点影响过程中所占的比例;对于基础数据做一致性分析,了解其数据的可靠性;对评价结果做敏感性分析,了解不同的原料产品或生产过程对于结

果的影响。

系统边界定义为从“大门”到“大门”(见图 1),部分生产上游过程、运输过程、生产过程和能源与动力生产等过程都属于这个系统边界。其中上游过程不包括矿业、港务公司以及基础建设过程,只有其他含铁原料的获取,同时包括生产废钢,运输过程包括厂内所有运输过程,生产过程与能源动力生产指生产主流程和所有辅助流程。最终功能单位被定义为 1t 钢材,在本文中,所有的能源、原料消耗与排放都是基于此功能单位。

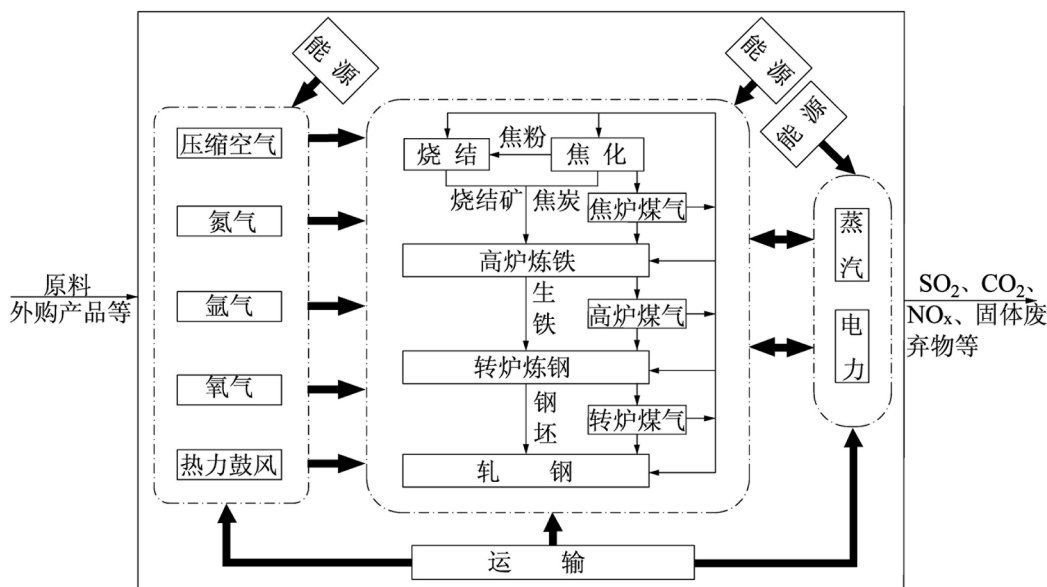


图 1 系统边界

1.2 生命周期清单

1.2.1 数据来源

编制生命周期清单(Life Cycle Inventory)需要大量的数据,文中以武钢本部在 2014 年消耗与排放数据作为收集对象,研究以钢铁传统生产工艺为主的生命周期过程,根据 ISO14040 和 ISO41 编制钢铁产品生命周期清单。数据不足部分使用中国钢协平均统计数据,购入产品的相关消耗与排放引用其他产品的生命周期清单数据。

1.2.2 基准流生命周期清单

基准流是通过生产主流程之间主产品流向作为编制方向,通过子流程生产与排放数据来分别计算各过程清单,在各自的清单计算中,其功能单位分别定义为 1t 烧结矿、1t 焦炭等各主流程产品。在采用辅助产品数据时,采用各主流程消耗的份额来分摊在辅助产品中的消耗与排放数据。

1.3 生命周期影响评价

生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment)过程包含特征化、标准化和权重分析过

程^[4-5]。本文使用 IMPACT 2002 + 影响评价方法,根据 ISO14042 对清单结果做出影响评价。IMPACT 2002 + 融合了 IMPACT 2002 和其他方法如 CML、EDIP 等中间影响评价方法的优点,包含完整且全面的环境影响转化机制,其特征化结果包括 17 种不同的中间影响类型包括人体毒性、呼吸道影响、电离辐射、光化学氧化、臭氧层损耗、水体生态毒性、炉底生态毒性、炉底酸化、水体酸化、水体富营养化、土地占用、全球暖化、不可回收能源消耗、资源消耗、水取用量、水消耗量,特征化转换计算方法分别来自于 IMPACT 2002、Eco-indicator、CML 2002、[IPCC]、eco-invent 5 种方法,并同时选用相应的当量值。同时又与 ReCiPe、Eco-indicator、EPS 等最终环境损害评价方法一样,包含终点环境损害评估类型,分别为人体健康、生态质量、气候变化和资源 4 种。在特征化的基础上,通过标准化来了解钢铁生产过程中各种环境影响在同类影响总体中所占的比例。

单个中间影响结果即特征化计算过程如式(1):

$$M_i = \sum_{j=1} CF_{ij} \times I_j \quad (1)$$

M_i 表示第 i 个种类中间影响结果, I_j 和 CF_{ij} 分别指第 j 个产品的清单物质数量和该产品对于第 i 个种类中间影响的特征化因子。

1.4 结果解释

这是生命周期评价过程的最后一个步骤, 指基于研究目的对于评价结果做出过程分析、不确定性

$$Ru = \frac{2\sigma(y)}{|y|} = 2 \sqrt{\left(\frac{2\sigma(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma(x_2)}{x_2}\right)^2 + \left(\frac{2\sigma(x_{31})}{x_3}\right)^2 + \dots} \quad (2)$$

x 、 y 、 σ 分别表示输入与输出数据和标准差。

2 清单与影响评价结果

2.1 生命周期清单

在生命周期清单编制过程中, 数据主要来自于钢铁生产中烧结、焦化、高炉炼铁、转炉炼钢、热轧与冷轧 5 个主要过程。基于每 t 钢材的功能单位, 钢铁产品生产阶段生命周期清单如表 1 至表 4。

表 1 原材料投入

名称	单位	数量	名称	单位	数量
铁矿石	t/t	1.717	硫磺	kg/t	1.233
生产废钢	t/t	0.116	氢氧化钙	kg/t	0.185
其他铁料	kg/t	24.889	脱氧剂	kg/t	3.085
返矿	kg/t	0.16	渗碳剂	kg/t	0.679
合金	kg/t	15.843	石灰石	t/t	0.134
工业水	t/t	141.509	白云石	t/t	0.075
烧结尘	kg/t	14.679	生石灰	t/t	0.046
使用量					
新水	t/t	3.371			

原材料投入包含生产原料、溶剂、添加剂以及不同用途的废物使用。其中工业水指净化水、冷却水、过滤水等用水总量。

表 2 能源输入

名称	单位	数量	名称	单位	数量
烟煤	t/t	0.091	柴油	kg/t	0.754
无烟煤	t/t	0.125	购入电 (kW·h) / t		340.379
洗精煤	t/t	0.565	购入蒸汽	MJ/t	8.988
重油	kg/t	0.058	天然气	m ³ /t	1.307

能源输入来自于生产与运输燃料、动力与电力。

表 3 产品输出

名称	单位	数量	名称	单位	数量
钢材	t/t	1	废材	GJ/t	0.068
废钢	t/t	0.04	电力 (kW·h) / t		59.93
回收煤气:	t/t	0.068	蒸汽	GJ/t	0.516
焦炉煤气					
高炉煤气	GJ/t	0.379	焦油(粗、精制产品)	kg/t	18.146
转炉煤气	GJ/t	0.124	粗笨产品	kg/t	5.064

产出煤气和电力指转调使用在生产过程之外的部分。

与敏感性分析等讨论。关于不确定性分析过程, 文中使用蒙特-卡罗模拟方法, 将正太分布作为随机变量的概率分布函数, 计算结果的相对不确定度^[6-7]。主要考虑其清单的不确定性水平, 假设输入数据相关系数为零, 其相对不确定度计算公式为式(2):

表 4 陆地与大气排放

名称	单位	数量	名称	单位	数量
SO ₂	kg/t	1.662	CO ₂	t/t	1.891
NO _x	kg/t	0.929	H ₂ S	g/t	3.019
氨氮	g/t	2.876	挥发酚	g/t	0.032
Cr	g/t	7.03E-06	氰化物	g/t	0.029
Cd	g/t	1.15E-06	HCl	g/t	7.24E-06
Ni	g/t	1.22E-05	COD	g/t	33.341
Pb	g/t	1.42E-05	粉尘	kg/t	0.881
Mn	g/t	1.71E-03	废水(悬浮物、硫化物)	m ³ /t	0.863
CO	t/t	0.05	固废(矿渣、钢渣、尘泥)	kg/t	0.456

2.2 影响评价

在钢铁产品的生命周期影响评价中, 根据钢铁生产消耗与排放的特点, 中点影响评价方面主要集中在人体毒性潜值、全球暖化潜值等部分内容, 整体表达的终点环境损害范围对人体健康等 4 部分。标准化结果如图 2。

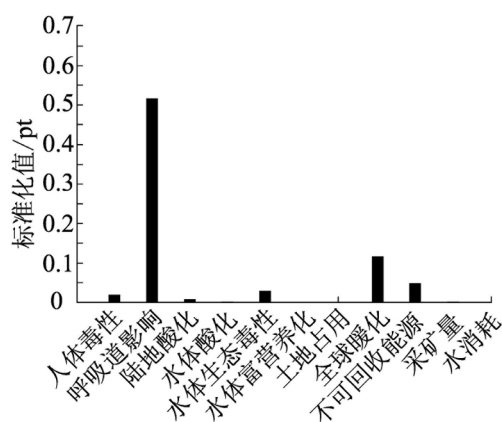


图 2 标准化结果

标准化结果是以相同的单位表达评估对象的各种环境影响在地域和时间范围内总体影响中所占的份额^[8]。图 2 表示在钢铁生产中, 呼吸道无机物影响相对最为突出, 其中最主要是由生产整个过程中特别是烧结过程排放的粉尘以及二氧化硫和氮氧化物等气体造成的; 其次作为能源密集型行业, 钢铁

生产在全球暖化效应和不可回收能源使用上的比例也比较大;同时由于排放废物中重金属、氰化物、COD 和大量废水悬浮物等存在,使人体和生态毒性也占了一定的份额;而排放的二氧化硫废物等对水体和陆地酸化也造成了一定的影响。

中间影响潜值是由消耗与排放物质根据特征化因子计算得到的客观物质,用当量值来表达对环境的潜在风险,表 5 表示部分影响种类当量值。

表 5 中间影响结果

种类	当量单位	当量值
人体毒性(HTP)	t 氯乙烯	0.583
呼吸道影响(RP)	kg PM _{2.5}	4.221
陆地酸化(TAP)	kg SO ₂	0.391
水体酸化(AAP)	kg SO ₂	1.927
水体生态毒性(AEP)	kg 三甘醇	9.856
水体富营养化(EP)	kgPO ₄ ³⁻	0.013
土地占用(LPP)	m ² 有机可耕地	1.306
全球暖化(GWP)	tCO ₂	2.124
不可回收能源(NEP)	GJ	18.542
采矿量(MEP)	t 铁矿石	2.476
水消耗(WAP)	t 水	4.879

2.3 不确定性分析

不确定性分析对于生命周期评价是个很重要的步骤,因为根据评价结果来制定决策必须建立在数据的可靠性的基础上。表 6 为置信水平为 95% 的不确定度计算结果。主要考虑其清单的不确定性水平,在人体毒性中结果不确定性水平偏高,主要原因可能来自于基准流计算过程中使用区域内平均统计排放数据,呼吸道结果与之类似,而根据能源消耗统计以及 IPCC 方法与之相关的计算方法,得到全球暖化和不可回收能源的不确定度较小。

表 6 不确定性水平

中间影响种类	人体毒性	呼吸道影响	全球暖化	不可回收能源
均值	0.832	4.407 0	2.380 8	20.635 6
相对不确定度	25.51%	12.17%	5.50%	2.85%

2.4 敏感性分析

在主要的几种影响种类中,其不同消耗及排放产品所贡献的比例如图 3。图 3 表明在呼吸道无机物影响中,二氧化硫与氮氧化物、烧结尘 3 种排放物占到了 90% 以上,主要在焦化与烧结过程中排放的高温型氮氧化物和二氧化硫以及烧结尘等物质,这是造成呼吸道影响的主要过程;水体酸化当量值中,大部分来自氮氧化物,主要是由于氮氧化物当量相对换算比例较高,造成的水体酸化效果比较强,其次二氧化硫和 COD(化学需氧量)以及其他部分酸性也产生部分酸化效果;在不可回收能源消耗中,主要

来源于洗精煤、烟煤与无烟煤 3 种煤和外购电力及其他部分外购产品隐含的能源消耗,其中在焦化过程中所使用的洗精煤占了主要的部分,超过 75%,其产品焦炭主要使用在高炉炼铁流程中;全球暖化二氧化碳当量值中包含燃料燃烧、生产过程、购入电力热力或其他产品的隐含排放以及最后固碳产品的隐含排放,其中燃料燃烧造成的碳排放超过了 85%,而炼铁流程排放超过 70%;水体生态毒性的影响中,生产工程排放的二氧化硫、氮氧化物、氨氮、重金属和 COD 都能对生态系统产生一定的破坏,其中对应当量值最大的是 COD,占到了 35%。

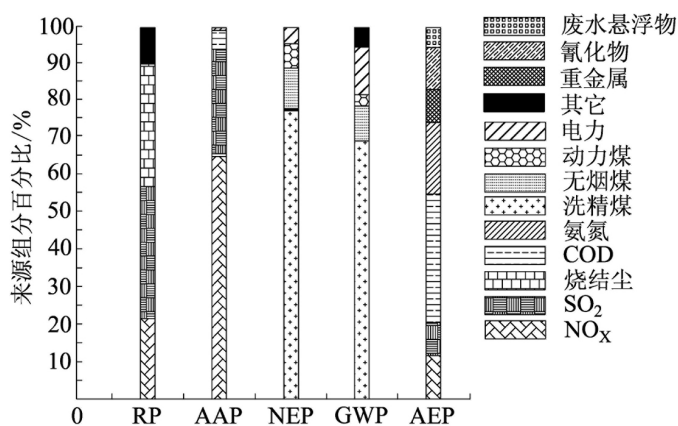


图 3 不同物质对影响潜值的贡献比例

3 结语

根据 IMPACT 2002 + 使用手册 Q2.2 版终点损害种类计算方法,计算可得到人体健康、生态质量、气候变化、资源消耗 4 种终点环境损害的值分别为 2.96×10^{-3} DALY、3.43PDF · m² · yr、2.10tCO₂、18.67GJ。针对资源能源消耗量庞大、环境负荷严重的钢铁行业,有过很多各种资源能源与环境评价过程。在 IMPACT 2002 + 的中间影响种类中,全面概括了所有影响种类,本文通过生命周期方法中特定物质当量来量化其潜在影响结果,得到其中钢铁生产主要相关影响种类包含人体毒性等在内的 11 种,并通过标准化分析来体现其总体影响比重。由于检测与统计水平、生产规模与管理限制的原因,在数据获取上会出现缺失以及不够精确的问题,同时某些问题建立在部分假设的基础上,因此在应用过程中还需要不断的完善与发展。

参考文献

- [1] Olmez G M, Dilek F B, Karanfil T, Yetis U. The environmental impacts of iron and steel industry: a life cycle assessment study [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 130: 195 - 201.
- [2] GB 24040 - 2008 环境管理 - 生命周期评价原则与框架 [S].

- [3] 国际钢铁协会. 生命周期评价方法论报告 [R]. 2011: 1 - 94.
- [4] Jolliet O, Margni M, Charles R, et al. IMPACT 2002 +: A new life cycle impact assessment methodology [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(6): 324 - 30.
- [5] Humbert S, Schryver A D, Bengoa x, et al. IMPACT 2002 +: User Guide for vQ2.21 [R]. 2012.
- [6] Papadopoulos C, Hoi Yeung. Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method [J]. Flow Measurement
- ~~~~~
- (上接第 71 页)
- on batch - reaction, one - dimensional transport, and inverse geochemical calculations [M]. Denver, Colo: U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, 1999.
- [9] 马尧. 地球化学模式 PHREEQC 在地浸工艺中的应用 [J]. 铀矿冶, 2007, 26(2): 61 - 67.
- [10] 杨森, 王永利, 张志程, 等. 甘肃北山地下水中 Pu 的形态分布及影响因素 [J]. 黄金, 2014(4): 75 - 79.
- [11] 郭辉, 康明亮, 陈万良, 等. 镅在北山地下水中赋存形态及溶解度分析 [J]. 辐射防护, 2016, 36(1): 40 - 46.
- [12] Obiri - Nyarko F, Kwiatkowska - Malina J, Malina G, et al. Geochemical modelling for predicting the long - term performance of zeolite - PRB to treat lead contaminated groundwater [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2015, 177 - 178: 76 - 84.
- [13] Åström M E, Österholm P, Gustafsson J P, et al. Attenuation of rare earth elements in a boreal estuary [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2012, 96: 105 - 119.

- and Instrumentation 2001(12) : 291 - 298.
- [7]Zhang Y R , Wu W J , Wang Y F. Bridge life cycle assessment with data uncertainty [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment ,2016 21(4) : 569 - 576.
- [8]Burchart - Korol D. Significance of environmental life cycle assessment (LCA) method in the iron and steel industry [J]. Metalurija ,2011 50(3) : 205 - 208.
- 作者简介 万腾方 男 硕士。

(收稿日期: 2017-01-11)

(上接第71页)

- on batch – reaction, one – dimensional transport, and inverse geochemical calculations [M]. Denver, Colo: U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, 1999.
- [9] 马尧. 地球化学模式 PHREEQC 在地浸工艺中的应用 [J]. 铀矿冶, 2007, 26(2): 61 – 67.
- [10] 杨森, 王永利, 张志程, 等. 甘肃北山地下水中 Pu 的形态分布及影响因素 [J]. 黄金, 2014(4): 75 – 79.
- [11] 郭辉, 康明亮, 陈万良, 等. 镅在北山地下水中赋存形态及溶解度分析 [J]. 辐射防护, 2016, 36(1): 40 – 46.
- [12] Obiri – Nyarko F, Kwiatkowska – Malina J, Malina G, et al. Geochemical modelling for predicting the long – term performance of zeolite – PRB to treat lead contaminated groundwater [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2015, 177 – 178: 76 – 84.
- [13] Åström M E, Österholm P, Gustafsson J P, et al. Attenuation of rare earth elements in a boreal estuary [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2012, 96: 105 – 119.
- [14] 徐真, 陆春海, 陈敏, 等. 西南某低放废物库场址地下水中铀的形态模拟 [J]. 物理化学学报, 2015(21): 45 – 48.
- [15] Lv X, Xu J, Jiang G, et al. Highly active nanoscale zero – valent iron (nZVI) – Fe₃O₄ nanocomposites for the removal of chromium(VI) from aqueous solutions [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2012, 369(1): 460 – 469.
- [16] Liu T, Rao P, Mak M S H, et al. Removal of co – present chromate and arsenate by zero – valent iron in groundwater with humic acid and bicarbonate [J]. Water Research, 2009, 43(9): 2540 – 2548.
- [17] Lelli M, Grassi S, Amadori M, et al. Natural Cr(VI) contamination of groundwater in the Cecina coastal area and its inner sectors (Tuscany, Italy) [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(9): 3907 – 3919.
- 作者简介 张丹丹, 女, 硕士。
(收稿日期: 2017 – 09 – 20)

(收稿日期: 2017-09-20)

CNKI 推出《中国高被引图书年报》

目前,中国知网(CNKI)中国科学文献计量评价研究中心推出了一套《中国高被引图书年报》,该报告基于中国大陆建国以来出版的422万余本图书被近3年国内期刊、博硕、会议论文的引用频次,分学科、分时段遴选高被引优秀学术图书予以发布。据研制方介绍,他们统计并分析了2013—2015年中国学术期刊813万余篇、中国博硕士学位论文101万余篇、中国重要会议论文39万余篇,累计引文达1451万条。根据统计数据,422万本图书至少被引1次的图书达72万本。研制方根据中国图书馆分类法,将72万本图书划分为105个学科,分1949—2009年和2010—2014年两个时间段,分别遴选被引最高的TOP10%图书,共计选出70911本优秀图书收入《中国高被引图书年报》。统计数据显示,这7万本高被引优秀图书虽然只占全部图书的1.68%,却获得67.4%的总被引频次,可见这些图书质量上乘,在同类图书中发挥了更加重要的作用。该报告还首次发布各学科“学科h指数”排名前20的出版单位的评价指标,对客观评价出版社的社会效益——特别是学术出版物的

社会效益具有重要的参考价值。

该报告从图书被引用的角度出发,评价图书的学术影响力,弥补了以销量和借阅等指标无法准确评价学术图书的缺憾,科学、客观地评价了图书、图书作者以及出版单位对各学科发展的贡献。

《中国高被引图书年报》把建国以来出版图书全部纳入评价范围属国内首创,是全面、客观评价图书学术影响力的工具,填补了目前图书学术水平定量评价的空白。在帮助图书馆建设特色馆藏和提高服务水平、帮助出版管理部门了解我国学术出版物现状、帮助科研机构科研管理、帮助读者购买和阅读图书等方面,均具有较强的参考价值,也为出版社评估出版业绩、决策再版图书、策划学科选题提供有用的信息。

《中国高被引图书年报》由《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司出版。该产品的形式为光盘电子出版物,分为理学、工学、农学、医学、人文科学和社会科学6个分卷,随盘赠送图书,欢迎您咨询、订购。咨询电话:010-82710850 82895056 转 8599 email: aspt@cnki.net。