

基于 LEAP 的中国钢铁行业 CO₂ 减排潜力分析

王克, 王灿, 吕学都, 陈吉宁

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 为了评估中国钢铁行业 CO₂ 减排潜力, 利用长期能源替代规划系统 (long range energy alternatives planning system, LEAP) 软件建立了 LEAPChina 模型。用该模型模拟了 3 个不同情景下中国钢铁行业 2000—2030 年 CO₂ 排放量及相应的减排潜力。根据减排成本评估其可行性并识别重点减排技术。模拟结果表明, 相对基准情景, 当前政策情景和新政策情景下的年均 CO₂ 减排量分别为 0.51 亿 t 和 1.07 亿 t, 所需要的总的额外资金投入分别为 93.4 亿美元和 809.49 亿美元。因此, 钢铁行业具有一定的 CO₂ 减排潜力, 实现减排主要通过行业结构调整和技术进步。如果目前制定的政策措施得到有效实施, 那么可以以较低的成本实现减排; 但是进一步的减排受制于高昂的成本。

关键词: CO₂ 减排; 钢铁行业; 情景分析; 减排技术; LEAP (long range energy alternatives planning system) 软件

中图分类号: X 21

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2006)12-1982-05

Abatement potential of CO₂ emissions from China's iron and steel industry based on LEAP

WANG Ke, WANG Can, LU Xuedu, CHEN Jining

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A model was developed based on the LEAP (long range energy alternatives planning system) software to assess the CO₂ abatement potential of China's iron and steel industry from 2000 to 2030 according to cost information. The results show that the average CO₂ abatement for the recent policy scenario and the new policy scenario, compared with the reference scenario, are 51 Mt/a and 107 Mt/a, respectively. Total incremental costs are 9.34 billion and 80.95 billion US dollars, respectively. Therefore, China's iron and steel industry has a large CO₂ abatement potential which will depend on structure adjustments and technology advances in the industry. Implementation of sustainable development policies can result in low cost CO₂ abatement, but more abatement will be very expensive.

Key words CO₂ abatement; iron and steel industry; scenario analysis; abatement technologies; LEAP (long range energy alternatives planning system) software

钢铁行业是中国最重要的基础产业部门之一, 对社会经济发展起着重要的支撑作用。自 1996 年以来, 中国钢铁行业产量一直居世界第一。2004 年, 钢产量为 27 280 万 t。2000—2004 年, 钢产量的年均增长率高达 20.7%^[1,2]。钢铁行业年耗能占全国能源消费总量 10% 左右。能源消耗以煤炭为主, 排放大量 CO₂。作为重要的耗能部门, 钢铁行业的进一步发展也将承受温室气体减排压力。

本研究开发了一个基于长期能源替代规划系统 (long range energy alternatives planning system, LEAP) 软件的包含能源需求、能源成本、CO₂ 排放等信息的 LeapChina 模型。利用该模型构造了中国钢铁行业 2000—2030 年 CO₂ 排放情景。基于情景信息, 评估该行业的减排潜力、减排成本及减排技术战略。

1 LeapChina 模型

LEAP 是一个基于情景分析的能源-环境模型工具, 由瑞典斯德哥尔摩环境研究所开发^[3]。本研究以 LEAP 软件为工具建立 LeapChina 模型, 采用自下而上的计量经济方法, 根据各行业终端用能的变化设置不同情景, 并链接成本数据和 CO₂ 排放因子, 可以对各行业进行能源需求、CO₂ 排放和减排成本效益分析。模型以 2000 年为基准年, 目前版本包括电力、钢铁、水泥、合成氨、造纸等 5 个高耗能行业。

根据中国钢铁行业的技术特点, 模型中的钢铁行业数据为分层的树状结构。第一层按照工序进行划分。传统流程包括炼焦-烧结-高炉炼铁-转炉炼钢-铸造-热轧-冷轧等工序, 产成品是各种钢材。对

收稿日期: 2005-11-02

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划项目 (2004-B A611B)

作者简介: 王克 (1979-), 男 (汉), 江西, 博士研究生。

E-mail: wangker@ gmail.com

通讯联系人: 陈吉宁, 教授, E-mail: jchen@ tsinghua.edu.cn

干熄焦和高炉喷煤技术进行单列。此外,流程中还包括电炉炼钢及熔融还原法炼铁。在此基础上,模型对每个工序又按照技术的先进程度分成几个类别,情景设定时对不同设备的比例进行调整。这是数据结构的第二层。在第三层,模型对于每一种设备,利用单位产品能耗系数、CO₂排放因子及成本数据,进行自下而上的计算汇总。

模型的计算过程分为行业活动水平、能源需求计算、CO₂排放计算及总成本计算4个阶段。

1) 行业活动水平

钢铁行业的活动水平主要用焦炭、烧结矿、生铁、粗钢、钢材等各道工序的产品产量来表示。

钢铁行业第 i 道工序的产品产量为

$$G = \sum g_{j,i} \quad (1)$$

其中: $g_{j,i}$ 为第 i 道工序由第 j 种工艺或者设备生产的产品产量。

2) 能源需求计算

钢铁行业总的能源需求为

$$E = \sum_i \sum_j \sum_n e_{n,j,i} g_{j,i} \quad (2)$$

其中: $e_{n,j,i}$ 为第 i 道工序中由第 j 种工艺或者设备进行生产时第 n 种能源的单位产品需求量。

3) CO₂排放计算

钢铁行业 CO₂ 排放总质量为

$$m_{CO_2} = \sum_i \sum_j \sum_n f_{n,j,i} e_{n,j,i} g_{j,i} \quad (3)$$

其中: $f_{n,j,i}$ 为 CO₂ 排放因子,即第 i 道工序中利用第

j 种工艺或者设备进行生产时消耗第 n 种能源时的 CO₂ 排放质量。

4) 总成本计算

钢铁行业总的技术及原料成本为

$$C = \sum_i \sum_j \left[\left(\sum_n e_{n,j,i} p_{n,i} + \sum_k m_{k,j,i} p_{k,i} + p_{3j,i} \right) g_{j,i} \right] \quad (4)$$

其中: $p_{n,i}$ 为能源品种 n 的单位碳当量价格, $m_{k,j,i}$ 为第 i 道工序中利用第 j 种工艺或者设备进行生产,单位产品所需要的原材料 k 的数量, $p_{k,i}$ 为原材料 k 的单价, $p_{3j,i}$ 为第 i 道工序第 j 种工艺或者设备的单位产品固定成本。

建模过程中,假设上一工序提供下一工序所用的中间产品,各个工序产品之间关系按照比例确定,因而没有考虑一些中间产品的进出口情况。对于焦炭生产环节,投入的能源一部分在该环节中直接消耗并且产生排放,另一部分转化为焦炭进入下一工序,因此焦炭利用所产生的 CO₂ 排放是在下一工序中进行计算。此外,在生铁生产中考虑了石灰石利用带来的 CO₂ 排放,并计入总的排放。

2 情景设定

本研究采用情景分析方法考察不同假设条件下 CO₂ 排放的变化以及影响排放变化的主要因素,包括技术和成本因素。研究中设定了3种情景,情景说明如表1所示。

表1 研究中所采用的3种不同情景

情景	政策措施	情景描述
情景1 基准	2000年基础上的趋势外推,没有考虑2000年以后制定的中长期节能规划和产业发展政策	钢产品的旺盛需求,延缓了行业内的结构调整和技术升级;仍有较大数量的行业产出由中小型设备完成;整体的技术水平比情景2弱;采取了一定的节能措施,单位产品能耗保持缓慢下降态势
情景2 当前政策	重点考虑截至2005年,已经制定的规划和政策措施,譬如“钢铁产业发展政策”和“中长期节能规划”等	产业集中度有所加强,现代化大型钢铁企业集团逐步占据市场主导;大型企业的生产能力进一步扩大,技术装备水平得到提高;小设备被迅速淘汰;加大节能技术改造力度,干熄焦技术以及各种废气废热回收装置的普及率有较大提高
情景3 新政策	受到节能和减排压力,制定力度更大的政策措施和行业标准	产业集中度比情景2更强,超大型设备的比例更高;基本普及废气废热回收利用装置;工序结构的调整力度加强;加大废钢的回收利用;电炉炼钢以及熔融还原炼铁等工艺过程在行业中的比重更大

情景设定中,不同情景之间的差别主要是以下几个方面的比例调整^[4-7]:

1) 总体技术进步率;

2) 设备大型化和现代化,包括高炉大型化、转炉大型化、高功率电炉等;

3) 工艺技术节能减排,包括干熄焦、高炉喷煤

高炉炉顶压差发电、转炉煤气回收利用、连铸机建造与高效化改造等技术;

4) 结构调整,包括电炉钢比、短流程铁产量、连铸比、冷轧比等参数;

5) 管理,是否建立能源管理中心。

3 分析结果

3.1 CO₂ 排放

根据未来国民经济发展对钢铁行业产品需求的预测以及定量化的情景设定,可以得到 3 种不同情景下的 CO₂ 排放量,如图 1 所示。本文所涉及的 CO₂ 排放量是基于综合能耗推算的,因而包含了钢铁行业的辅助生产部门,并假设辅助生产部门的能耗占总能耗的 20%。

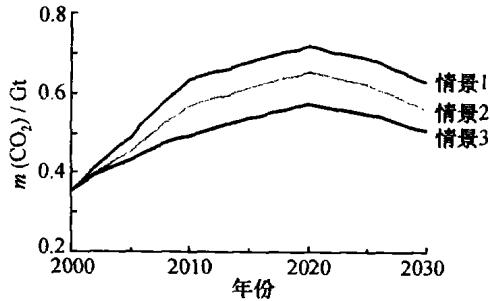


图 1 2000—2030 年不同情景下中国钢铁行业 CO₂ 排放量

结果表明,基准情景下,中国钢铁行业 CO₂ 的排放量从 2000 年的 3.52 亿 t 增长到 2010 年的 6.33 亿 t。2010 年后增速有所减缓,并于 2020 年达到峰值,为 7.17 亿 t。此后,产量的稳中有降和技术进步带来的单位产品排放强度的降低使得年排放量逐渐回落,2030 年为 6.27 亿 t。与 2000 年相比,上述 3 个年份的 CO₂ 排放量分别为基准年的 1.8、2.04 和 1.78 倍。整体上维持在较高水准。

情景 2 以及情景 3 下的 CO₂ 排放量,从趋势上看与基准情景基本一致,但是排放水平更低,如表 2 所示。

表 2 不同情景下 CO₂ 排放质量与基准年的比 (2000 年为基准年)

情景	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年
1. 基准	1.00	1.80	2.04	1.78
2. 当前政策	1.00	1.61	1.86	1.59
3. 新政策	1.00	1.41	1.64	1.44

根据模拟结果对钢铁行业的减排潜力进行评估,可以看到,由于结构调整和技术进步,情景 2 和情景 3 的排放量相对基准情景有比较明显的降低。2000—2030 年情景 2 的年均 CO₂ 减排量为 0.51 亿 t,可以视为中国可持续发展对全球气候变化所作出的贡献。情景 3 则是在情景 2 基础上进一步实现减排,年均 CO₂ 减排量为 0.56 亿 t。

但是分析过程也表明,对中国未来钢产量的预测本身存在很大的不确定性,排放量的绝对水平受行业活动水平的假设影响非常大。因而在模型中对 3 种不同情景下的行业活动水平做了相同的假设,不同情景之间排放量的差异将主要由行业结构调整和技术进步决定,反映在单位质量的钢 CO₂ 排放强度这一指标上。

表 3 比较了不同情景下 CO₂ 排放强度。2010 年前排放强度的下降比较快,说明 2010 年前是行业结构调整和技术进步的关键时期。此后,虽然排放强度仍然保持下降趋势,但是速度趋缓。相对基准情景,其他两类政策情景的排放强度指标下降更快,并且主要是在 2010 年前与基准情景拉开了差距。此后的下降速率比较接近。

表 3 不同情景下 CO₂ 排放强度比较

情景	$m(\text{CO}_2) / m(\text{钢})$				$(100 \times \text{下降率}) / (\text{a}^{-1})$		
	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年	2000—2010 年	2010—2020 年	2020—2030 年
1. 基准	2.68	2.19	1.97	1.83	1.96	1.05	0.73
2. 当前政策	2.68	1.96	1.80	1.63	3.04	0.85	0.99
3. 新政策	2.68	1.71	1.58	1.48	4.36	0.79	0.65

3.2 减排成本

评估减排潜力能否实现,需要考虑相应的减排成本。减排过程中,一方面需要投入大量的资金引入先进技术,从而增加了固定生产成本。另一方面,新技术的采用使生产效率提高,能源需求量减少,减少了相应的能源成本。但是相对排放量,成本预测由于受市场供求关系影响,有较大的不确定性。

图 2 是情景 2 及情景 3 与基准情景之间每年的成本差额。可以看到,情景 2 下能耗的降低部分弥补了技术改造中增加的成本,因而与基准情景的总成本比较接近。如果目前已经制定的钢铁产业政策和节能规划能够得到有效实施,情景 2 下的减排潜力相对较易实现。情景 3 实际上是在情景 2 的基础上进一步减排,其总成本大幅度上升。相对基准情景,2001—2030 年情景 2 总的增量成本为 93.4 亿美

元,平均 CO₂的减排成本为 6.13美元·t⁻¹。进一步减排,即情景 3 所需要的额外资金投入高达 716.09 亿美元,平均 CO₂的减排成本则为 25.30 美元·t⁻¹。因此,要实现情景 3 下的减排潜力面临很大难度。

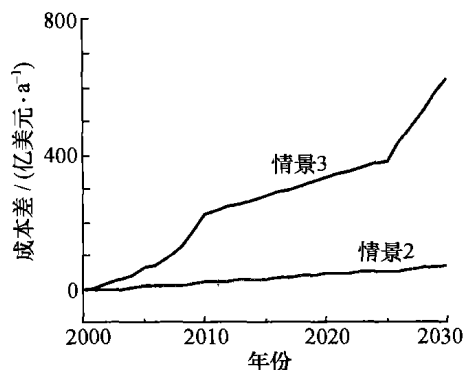


图 2 中国钢铁行业 2000-2030 年不同情景与基准情景之间的成本差额

上述分析结果仍然有很大的不确定性,但是从趋势上看比较明显。目前的可持续发展政策的实施可以以较低成本实现一定量的减排。进一步减排,则面临高昂的成本制约。

3.3 减排技术战略

钢铁行业的减排是一项综合性工作,包含管理措施、结构调整、设备规模扩大以及具体的节能减排技术。实现减排主要通过各种技术措施,而技术措施的采用会带来相应的成本。进一步的减排,则意味着成本的进一步增加。随着减排量的增加,成本较低的技术措施潜力已经被挖掘,只能采用成本更高的技

术措施,因而边际减排成本不断增加。以 2010 年为例,表 4 列出了利用 LeapChina 模型估算得到的不同技术措施的减排成本以及基于情景分析得到的相应减排量。(该减排量为情景 3 与情景 2 的排放量差,重点在于比较基于当前政策,进一步实现减排所需要的额外资金投入和技术需求。)图 3 绘制了基于技术信息的边际减排成本曲线。图中编号为对应的减排技术措施,该图描述了根据不同技术措施的边际减排成本排序而得到的累积减排量。可以看出,提高高炉喷煤量、采用更先进的连铸机、建立能源管理中心等措施具有负的减排成本,即既可以实现 CO₂ 减排,还可以提高效率。这 3 项措施带来的累积 CO₂ 减排量为 9.45 Mt。如果所有的措施都采用的话,累积减排量可达 72.43 Mt, 总的平均累积减排成本为 42.74 美元·t⁻¹。与此同时,铁钢比的调整、更先进的高炉技术、焦炉技术等可以以相对较低的成本实现较大规模的减排,因而具有一定的优先性。

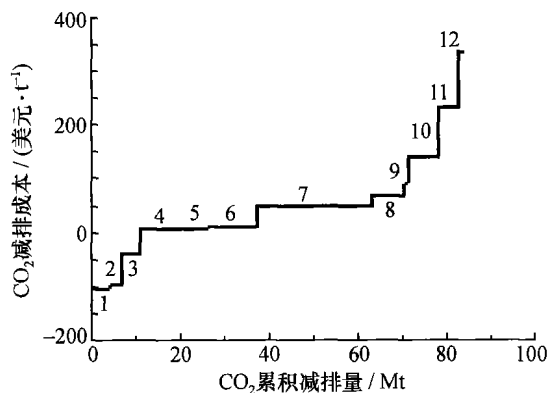


图 3 钢铁行业不同技术措施的减排成本曲线

表 4 2010 年钢铁行业各种减排措施及减排成本列表

编号	措施名称	CO ₂ 减排成本	减排量	总成本	累积减排量	累积净成本	平均累积减排成本
		美元·t ⁻¹	Mt	10 ⁶ 美元	Mt	10 ⁶ 美元	美元·t ⁻¹
1	建立能源管理中心,提高能源管理能力	-105	3.54	-373.48	3.54	-373.48	-105.42
2	提高高炉喷煤量	-96	2.45	-234.18	5.99	-607.67	-101.43
3	更先进的连铸机	-39	3.46	-133.77	9.45	-741.44	-78.48
4	更先进的高炉带 TRT	5	10.46	54.69	19.90	-686.75	-34.50
5	干熄焦技术	8	2.95	23.23	22.85	-663.52	-29.04
6	更先进的焦炉	10	9.36	92.86	32.21	493.22	-17.72
7	铁钢比的调整	49	22.26	1063.88	54.47	572.72	10.51
8	更先进的烧结机	69	6.15	424.06	60.62	917.28	15.13
9	轧钢设备连续化	92	1.01	93.13	61.63	1010.40	16.39
10	推广转炉先进技术,提高转炉煤气回收利用	140	5.65	787.91	67.28	1798.32	26.73
11	采用熔融还原炼铁工艺	234	4.22	984.50	71.49	2782.82	38.92
12	推广电炉先进技术	336	0.93	313.00	72.43	3095.81	42.74

总体而言,由于炼铁能耗在钢铁行业总能耗中的比例非常高,减少高炉炼铁能耗的技术措施在减少 CO₂ 排放中起到重要作用。短期内,可以重点采用的工艺技术包括高炉喷煤技术、干熄焦技术、高炉炉顶压差发电技术 (TRT) 以及焦炉煤气回收利用、转炉煤气回收利用等。而中长期来看,减排的技术选择包括通过加强废钢的回收利用加大电炉钢的比例以及更多采用短流程炼铁 (熔融还原) 技术等。

4 结 论

2000-2030年中国钢铁行业仍然处于比较快速的发展阶段,基准情景下 CO₂ 排放量将大幅度上升并维持在一个相对较高的水平。通过加大结构调整和采取各种减排技术措施,可以实现不同程度的减排。但是减排潜力的实现程度取决于各种技术措施的采用以及相应的减排成本。钢铁行业目前制定的政策如果得到有效实施可以以较低的成本带来减排,而进一步的减排则受制于高昂的成本。制定减排技术战略需要对不同技术措施的减排成本进行评估,尽可能先采用成本较低的技术措施。短期内一些具体的节能技术如干熄焦、高炉喷煤和高炉煤气回收利用等对于减排具有重要意义,但是从中长期看,钢铁行业的减排更多依靠结构调整,包括工序调整和各种工艺设备的规模化、现代化。

参考文献 (References)

- [1] 中国统计局. 中国统计年鉴 2001 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
China Statistics Bureau. China Statistics Yearbook 2001 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2001. (in Chinese)

- [2] 中国统计局. 中国统计年鉴 2005 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2005.
China Statistics Bureau. China Statistics Yearbook 2005 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2005. (in Chinese)
- [3] Stockholm Environment Institute, Tellus Institute. LEAP Long Range Energy Alternatives Planning System, User Guide for LEAP 2005 [EB/OL]. <http://forums.seib.org/leap/documents/Leap2005UserGuideEngLish.pdf>, 2005.
- [4] 中国钢铁工业年鉴 2000-2004 [M]. 北京: 中国钢铁工业年鉴编辑委员会, 2001-2005.
China Steel Yearbook 2000-2004 [M]. Beijing: The Editorial Board of China Steel Yearbook, 2001-2005. (in Chinese)
- [5] 胡秀莲, 姜克隽. 中国温室气体减排技术选择及对策评价 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
HU Xiulian, JIANG Kejun. Evaluation of Technology and Countermeasure for Greenhouse Gas Mitigation in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 周大地, 戴彦德, 郁聪, 等. 2020中国可持续能源情景 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
ZHOU Dadi, DAI Yande, YU Cong, et al. China Sustainable Energy Scenarios in 2020 [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003. (in Chinese)
- [7] 全国资源节约和综合利用信息中心. 中国高耗能行业结构调整战略及相关政策研究项目报告 [R]. 项目编号: G-0105-05712, 2002.
China Information Center for Resources Conservation and Comprehensive Utilization. Research Report of Structure Adjustment Strategy and Related Policy for China High Energy Intensive Industries [R]. Project Number G-0105-05712, 2002. (in Chinese)

(上接第 1981页)

参考文献 (References)

- [1] 韩行瑞, 时坚, 孙有俨, 等. 丹河岩溶水系统——中国北方岩溶水系统典型研究 [M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1994.
HAN Xingrui, SHI Jian, SUN Youyan, et al. Danhe Karst Water System—A Typical Study on Karst Water System in North China [M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 1994. (in Chinese)
- [2] 李砚阁, 杨昌兵, 耿雷华, 等. 北方岩溶大泉流量动态模拟及其管理 [J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 275-281.
LI Yangge, YANG Changbing, GENG Leihua, et al. Modeling and management of flow regime of the big springs in North of China [J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(3): 275-281. (in Chinese)
- [3] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙-孔隙三重介质地下水流模型及模拟方法研究 [J]. 地球科学, 1995, 20(4): 361-366.

- CHEN Chongxi. Groundwater flow model and simulation method in triple media of karstic tube-fissure-pore [J]. *Earth Science*, 1995, 20(4): 361-366. (in Chinese)
- [4] Ni G, Herath S, Musiak K. A distributed catchment model and its application to simulate urbanization effect [C] // Proc. 9th IAHR-APD Congress, Singapore: IAHR Press, 1994: 254-261.
- [5] Singh V P, Woolhiser D A. Mathematical modeling of watershed hydrology [J]. *J Hydrologic Eng*, 2002, 7(4): 270-292.
- [6] Fujita M. A study on subcatchment scale for a distributed runoff model [J]. *Environment Int*, 1995, 21(5): 491-496.
- [7] Yang D, Herath S, Musiak K. Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability [J]. *Hydro Proc*, 2000, 14: 403-416.
- [8] Mike K, Tom F. Notes for ARCInfo Users [EB/OL] [2005-9-21]. ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/Version2/Documentation/Notes_for_ARCInfo_users.pdf