

贺成龙, 吴建华, 刘文莉. 2009 成分法计算钢铁的生态足迹 [J]. 环境科学学报, 29(12): 2651–2657

He C L, Wu J H, Liu W L. 2009 Calculating the ecological footprint of the iron & steel industry with a component approach [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(12): 2651–2657

成分法计算钢铁的生态足迹

贺成龙^{1,2}, 吴建华^{1*}, 刘文莉³

1 河海大学水利水电工程学院, 南京 210098

2 嘉兴学院, 建筑工程学院, 嘉兴 314001

3 嘉兴学院, 机电工程学院, 嘉兴 314001

收稿日期: 2009-02-20 修回日期: 2009-05-22 录用日期: 2009-09-03

摘要: 运用生态足迹成分法, 研究了钢铁工业排放废水、废气等的生态足迹占用, 并对中国钢铁工业生态足迹及其构成进行实证研究. 结果表明, 中国钢铁工业总的生态足迹随总产量的增加而增加, 由 2000 年的 $1.89 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 增加到 2006 年的 $5.09 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 年均增长率为 17.99%, 但低于钢铁总产量的年均增长率 (21.78%). 单位钢铁产量的生态足迹呈下降趋势, 由 2000 年的 $1.4685 \text{ hm}^2 \text{ t}^{-1}$ 下降到 2006 年的 $1.2150 \text{ hm}^2 \text{ t}^{-1}$. 2005 年, 钢铁工业的生态足迹主要由吸收二氧化碳所需要的林地 (27.28%)、铁矿石的生态足迹占用 (27.14%)、氮氧化物排放的生态足迹占用 (18.94%) 和能源地占用 (18.70%) 组成, 四者合计高达 92.06% (2005 年). 近年来, 中国钢铁工业在节能减排方面取得一定成效, 但钢铁工业高能耗、高污染的特征仍十分明显. 要减少钢铁工业的生态足迹, 关键是要减少能源和铁矿石的消耗, 减少废水和废气的排放.

关键词: 钢铁工业; 生态足迹; 成分法; 中国

文章编号: 0253-2468(2009)12-2651-07 中图分类号: X171 文献标识码: A

Calculating the ecological footprint of the iron & steel industry with a component approach

HE Chenglong^{1,2}, WU Jianhua^{1*}, LIU Wenli³

1 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098

2 College of Civil Engineering & Architecture, Jiaxing University, Jiaxing 314001

3 College of Mechanical & Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001

Received 20 February 2009; **received in revised form** 22 May 2009; **accepted** 3 September 2009

Abstract The ecological footprint of the iron & steel industry in China was calculated by component analysis, particularly considering wastewater and gas discharges. The main points of the results are as follows: ① The total ecological footprint (EF) of China iron & steel industry is growing from $1.89 \times 10^8 \text{ hm}^2$ in 2000 to $5.09 \times 10^8 \text{ hm}^2$ in 2006. ② The 17.99% yearly average increase of EF is lower than 21.78% of the total output of iron & steel. The unit output ecological footprint of China's iron & steel industry decreases every year, from $1.4685 \text{ hm}^2 \text{ t}^{-1}$ in 2000 to $1.2150 \text{ hm}^2 \text{ t}^{-1}$ in 2006. ③ Based on the 2005 data, the EF consists of four main aspects: the ecological footprints of CO_2 (27.28%), iron-ore (27.14%), NO_x (18.94%) and energy consumption (18.70%). In summary: ① the iron & steel industry of China achieved initial success in energy conservation and emission reduction because the industry is characterized by high energy consumption and high pollution. ② The crux of reducing the ecological footprint of iron & steel industry lies in decreasing energy and iron ore consumption, and cutting the discharge of wastewater and waste gas.

Keywords iron & steel industry; ecological footprint; component approach; China

1 引言 (Introduction)

2007 年, 我国生铁、粗钢和钢材产量分别达 4.76×10^9 、 4.89×10^9 和 $5.65 \times 10^9 \text{ t}$. 钢铁产量已占

世界总产量的 1/3. 但是, 钢铁工业是资源能源密集型产业, 是耗水和排污大户, 在生产中需要消耗大量能源并排放大量污染物, 其耗水量约占全国工业水耗的 14%, 排放污水量约占工业总排放的 12%.

基金项目: 水利部科技创新项目 (No. SCX2003-08)

Supported by the Science and Technology Innovation Foundation of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (No. SCX2003-08)

作者简介: 贺成龙 (1972—), 男, 副教授, E-mail: zjhuhc@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: jhwu@hhu.edu.cn

Biography: HE Chenglong (1972—), male, associate professor. E-mail: zjhuhc@126.com; * **Corresponding author:** E-mail: jhwu@hhu.edu.cn

(段新虎, 2008). 中国钢铁行业的二氧化碳排放量约占发展中国家钢铁工业总排放量的 30%, 在国内工业二氧化碳排放量中仅次于电力、建材(水泥)行业, 居第 3 位(张春霞等, 2007). 因此, 探讨钢铁行业资源效率与生态效率及其可持续发展已成为一项重要课题.

生态足迹 (Ecological Footprint 或 Eco-Footprint EF) 是近年来发展并流行起来的一种量化测度可持续发展、资源效率与生态效率的重要方法 (徐中民等, 2000). 主要有综合法 (Rees, 1992)、成分法 (Simmons *et al*., 1998; Simmons *et al*., 2000)、基于投入产出的计算方法 (Bicknell *et al*., 1998; Feng, 2001; 贺成龙等, 2008) 和基于能值理论的计算方法 (Zhao *et al*., 2005) 等. 成分法 (component approach) 通过收集和实测相关消费与排放成分的量值来计算生态足迹, 适用于城镇、村庄、学校、公司、个人或单项活动的生态足迹研究 (Best Foot Forward, 2000; 2002; 顾晓薇等, 2005). 于宏民等 (2008) 用生态足迹的综合法对中国钢铁行业的生态足迹及其构成和变化进行了实证研究. 但是, 诚如作者所指出那样, 没有对 SO₂、NO_x 等有害气体对环境的影响进行研究, 有关钢铁行业的生态足迹研究还有待深入和

完善. 本研究尝试运用生态足迹的成分法, 从钢铁生产过程的能源、铁矿石等消耗, 排放的废气如二氧化碳 (CO₂)、二氧化硫 (SO₂)、氮氧化物 (NO_x) 以及烟粉尘、废水和废渣等生态占用方面来间接表征钢铁工业的生态足迹.

2 计算方法 (Method of calculation)

2.1 数据来源

粗钢产量数据来自《中国统计年鉴 2008》, 铁矿石消费量 2000~2005 年数据来自文献 (刘铁敏等, 2007), 2006 年数据来自《中国统计年鉴 2008》, 并将进口矿石按品位折合为国产原矿的总消费量; 吨钢耗水、吨钢外排废水以及 2004~2006 年吨钢综合能耗为重点企业的统计数据, 来自《2007 中国工业发展报告-工业发展效益现状与分析》2000~2003 年吨钢综合能耗取 73 家中大型企业的数据 (中国钢铁工业协会, 2004), 数据见表 1. 钢铁工业的其它主要大气污染物的排放强度分别取 SO₂ 为 9.66, 烟尘为 4.34, 粉尘为 10.40 (张夏等, 2000) 和 NO_x 为 8.90 kg t⁻¹ (蔡九菊等, 2001), 化学需氧量取文献 (赵立祥等, 2008) 的平均值为 0.05 kg t⁻¹.

表 1 中国钢铁工业资源与生态效率 (2000~2006)

Table 1 Resource & ecological efficiency of China's iron and steel industry (2000~2006)

年份	粗钢产量 /10 ⁴ t	铁矿石消费量 /10 ⁴ t	吨钢耗新水 /(m ³ t ⁻¹)	吨钢外排废水 /(m ³ t ⁻¹)	吨钢综合能耗 /(tce t ⁻¹)
2000	12850	35476	25.24	17.16	1.008
2001	15103	40293	18.81	12.70	0.965
2002	18225	45443	15.88	10.40	0.874
2003	22234	55726	13.73	9.73	0.823
2004	28291	72618	12.27	8.41	0.761
2005	35324	97097	8.06	4.81	0.747
2006	41915	108255	6.56	-	0.645

下面以 2005 年为例, 详细介绍如何用成分法来计算钢铁的生态足迹.

2.2 排放 CO₂ 的生态足迹 (EF_{CO₂})

钢铁工业 CO₂ 的排放受企业能源结构、能耗水平、碳能源发热量、含碳量、单位能源 CO₂ 排放量及 CO₂ 末端治理水平等多个因素的影响. 物质流和能量流问题是钢铁生产流程中 2 个关键问题, 对钢铁企业的 CO₂ 排放量影响极大 (蔡九菊等, 2008). 相关研究根据资料的可收集性和国内外钢铁工业生产实际现状, 并参考先进企业的生产指标, 在一定原燃料条件下, 构造了理想的高炉、转炉热轧板材典型流程. 张春霞等 (2007) 在假设碳素近 100% 转

变为二氧化碳, 且不计电、蒸汽等动力消耗的情况下, 对其碳素流进行了分析, 发现该流程中由于碳素消耗产生的二氧化碳排放量为 1.322 t t⁻¹; 如果考虑动力消耗等因素, 该流程中二氧化碳的排放量约为 1.800 t t⁻¹, 本文取值以后者为准. 排放 CO₂ 的生态足迹计算公式如下:

$$EF_{CO_2} = \frac{E_{CO_2}}{5.2}$$

(1)

式中, EF_{CO₂} 为单位钢铁产量所排放 CO₂ 的生态足迹 (hm² t⁻¹), 5.2 为化石能源地平均 CO₂ 的吸纳能力 (t hm⁻²), E_{CO₂} 为钢铁工业 CO₂ 的排放强度 (t t⁻¹).

2.3 排放 SO₂的生态足迹 (EF_{CO₂})

由于缺少有关 SO₂相关转换因子的基础数据,不能直接计算排放 SO₂的生态足迹.根据顾晓薇等(2006)的研究,在整个 42年期间(1961~2003年),中国生态足迹与 GDP之间的相关系数为 0.97.因此,可以引入“万元 GDP生态足迹”这个参数,将二氧化硫所造成的经济损失折算为其生态足迹.根据中华人民共和国环境保护部的有关研究显示,考虑到从医疗成本到酸雨对建筑物的损害等多种因素,中国每排放 1t 二氧化硫所造成的经济损失约 2万元人民币.2003年,中国 1万美元 GDP的生态足迹强度为 14.2hm² (陈敏等,2005),取 USD/RMB=7.8 折合 1万元人民币的生态足迹强度为 1.82051hm².排放 SO₂的生态足迹计算公式如下:

$$EF_{SO_2} = Y_{SO_2} \times E_{SO_2} = Y \times I_{SO_2} \times E_{SO_2} = 1.8205 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^2 \times E_{SO_2} = 3.64103E_{SO_2} \quad (2)$$

式中, EF_{SO₂}为单位钢铁产量所排放 SO₂的生态足迹 (hm²·t⁻¹); Y_{SO₂}为单位二氧化硫的生态足迹系数 (3.64103hm²·t⁻¹); Y为中国单位 GDP的生态足迹强度 (1.82051hm²·10⁻⁴元); I_{SO₂}为单位二氧化硫所造成的经济损失 (2×10⁴元·t⁻¹); E_{SO₂}为钢铁工业 SO₂的排放强度 (t·t⁻¹).

2.4 排放烟粉尘的生态足迹 (EF_{dust})

由于缺少有关烟粉尘的相关转换因子基础数据,本文同样采用烟粉尘所造成的经济损失来折算其生态足迹,计算公式见式(3).根据文献(钟一俊等,2007)的研究,总悬浮颗粒物(TSP)或烟尘的排污收费标准是 SO₂的 36.67% (=2.2/6),则单位烟粉尘的生态足迹为: Y_{dust} = 0.3667 × Y_{SO₂} = 0.3667 × 3.64103 = 1.33504 hm²·t⁻¹.

$$EF_{dust} = Y_{dust} \times E_{dust} = 1.33504E_{dust} \quad (3)$$

式中, EF_{dust}为单位钢铁产量所排放烟粉尘的生态足迹 (hm²·t⁻¹); Y_{dust}为单位烟粉尘的生态足迹系数 (1.33504 hm²·t⁻¹); E_{dust}为钢铁工业排放烟粉尘的强度 (t·t⁻¹).

2.5 排放 NO_x的生态足迹 (EF_{NO_x})

氮氧化物(NO_x)是由空气中的氧气和氮气在 1200~2400℃的高温环境反应生成的,包括氧化亚氮(N₂O)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO₂)等.钢铁生产排放的氮氧化物主要是燃料燃烧产生的,燃烧过程排放的 NO_x主要是 NO和极少量的 NO₂.在总 NO_x排放量中 NO占 90%~95% (许嘉,1984).

钢铁生产排放氮氧化物的生态足迹可通过其

全球变暖潜能值(Global Warming Potential, GWP)折算出相当于二氧化碳的当量值,再根据已知的化石能源地平均 CO₂的吸纳能力(5.2t·hm⁻²),即可算出氮氧化物的足迹 EF_{NO_x},计算公式如式(4)所示.由于没有钢铁生产过程所排放氮氧化物中各成分的比例,本文以占 90%以上的 NO代表 NO_x来计算.

$$EF_{NO_x} \approx EF_{NO} = \frac{g \cdot E_{NO}}{5.2} = \frac{g \cdot \xi \cdot E_{NO_x}}{5.2} = \frac{156 \times 0.90 \times E_{NO_x}}{5.2} = 27E_{NO} \quad (4)$$

式中, EF_{NO_x}为单位钢铁产量所排放 NO_x的生态足迹 (hm²·t⁻¹); EF_{NO}为单位钢铁产量所排放 NO的生态足迹 (hm²·t⁻¹); g为 NO的 GWP值,此处取 NO在 500a寿命期的 GWP值(156); ξ是氮氧化物中 NO的含量,本文取 90%; E_{NO}、E_{NO_x}分别为钢铁制造业 NO和 NO_x的排放强度 (t·t⁻¹).

2.6 外排废水的生态足迹 (EF_{wastewater})

以钢铁联合企业为例,外排废水中含有挥发酚、氰化物、化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、六价铬、锌、油类、苯、悬浮物等环境污染物.根据目前的研究,本文只考虑钢铁工业外排废水中化学需氧量、氨氮、总磷的生态足迹.根据浙江省嘉兴市排污权储备交易中心的统计数据和虞锡君教授的研究成果,化学需氧量排污交易费平均为 (2818.09×10⁴元/322.13t) = 8.7483×10⁴元·t⁻¹.按照江苏省环境资源区域的补偿办法,环境资源区域补偿标准:氨氮为 1.0×10⁵元·t⁻¹,总磷为 1.0×10⁵元·t⁻¹.则单位化学需氧量、氨氮和总磷的生态足迹为:

$$Y_{COD} = Y \times I_{COD} = 1.82051 \times 10^{-4} \times 8.7483 \times 10^4 = 16.10842 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1} \quad (5)$$

$$Y_{NH_3-N} = Y \times I_{NH_3-N} = 1.82051 \times 10^{-4} \times 1.0 \times 10^5 = 18.2051 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1} \quad (6)$$

$$Y_{TP} = Y \times I_{TP} = 1.82051 \times 10^{-4} \times 1.0 \times 10^5 = 18.2051 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1} \quad (7)$$

式(5)~(7)中, Y_{COD}、Y_{NH₃-N}、Y_{TP}分别为单位化学需氧量、氨氮和总磷的生态足迹 (hm²·t⁻¹); Y含义同式(2); I_{COD}、I_{NH₃-N}、I_{TP}分别为单位化学需氧量、氨氮和总磷的排污交易费或环境资源区域补偿标准 (元·t⁻¹).

根据《钢铁工业水污染物排放标准》(GB13456-92)和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002),并假设钢铁工业外排废水都能

达标(三级)排放,外排废水中化学需氧量、氨氮、总磷的排放浓度分别为 $500, 40$ 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 则每立方米外排废水中,含有的化学需氧量、氨氮、总磷分别为 $500, 40$ 和 5 g 由此可以计算出单位外排废水的生态足迹为:

$$Y_{\text{waste-water}} = Q_{\text{COD}} \times Y_{\text{COD}} + Q_{\text{NH}_3\text{-N}} \times Y_{\text{NH}_3\text{-N}} + Q_{\text{TP}} \times Y_{\text{TP}} = 0.008873 \text{ hm}^2 \cdot \text{m}^{-3} \quad (8)$$

式中, $Y_{\text{waste-water}}$ 为钢铁工业单位外排废水的生态足迹系数 ($0.008873 \text{ hm}^2 \cdot \text{m}^{-3}$); $Q_{\text{COD}}, Q_{\text{NH}_3\text{-N}}, Q_{\text{TP}}$ 分别为单位外排废水中化学需氧量、氨氮和总磷的含量 ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$).

钢铁工业单位钢铁产量外排废水所占的生态足迹可以根据公式(9)计算:

$$EF_{\text{waste-water}} = Y_{\text{waste-water}} \times E_{\text{waste-water}} \quad (9)$$

式中, $EF_{\text{waste-water}}$ 为单位钢铁产量所排放废水的生态足迹 ($\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); $Y_{\text{waste-water}}$ 含义同式(8); $E_{\text{waste-water}}$ 为钢铁工业外排废水的排放强度 ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$).

2.7 耗新水的生态足迹 ($EF_{\text{ef-water}}$)

根据文献(黄林楠等, 2008)可知,中国水资源单位面积产水量 $q_{\text{water}} = 2946 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 则钢铁工业单位钢铁产量耗新水所占的生态足迹为:

$$EF_{\text{new-water}} = E_{\text{new-water}} / q_{\text{water}} \quad (10)$$

式中, $EF_{\text{new-water}}$ 为单位钢铁产量耗新水所占的生态足迹 ($\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); q_{water} 为水资源单位面积产水量, 本研究中取值为 $2946 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; $E_{\text{new-water}}$ 为钢铁工业吨钢耗新水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$).

2.8 能源消耗的生态足迹 (EF_{energy})

钢铁工业单位能源消耗的足迹可以按式(11)计算:

$$EF_{\text{energy}} = Y_{\text{energy}} \times \phi \times E_{\text{energy}} \quad (11)$$

式中, EF_{energy} 为单位钢铁产量所消耗能源的生态足迹 ($\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); Y_{coal} 为单位原煤的生态足迹系数, 取值为 $0.2268 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$ (谢鸿宇等, 2008); ϕ 为标准煤折算原煤系数, 取值为 1.4 ; E_{energy} 为吨钢综合能耗 ($\text{tce} \cdot \text{t}^{-1}$).

2.9 消耗铁矿石的生态足迹 ($EF_{\text{iron-ore}}$)

2007年,受进口铁矿石价格上涨和国内铁矿石资源不足影响,国内铁矿石价格达到 $1480 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ (马忠普, 2008). 考虑到铁矿石 2003 年以前价格较低,而近期非理性上涨等因素(如 2007 年 12 月,进口铁矿石平均到岸价格为 $125.28 \text{ USD} \cdot \text{t}^{-1}$), 本文采用《中国统计年鉴 2008》的 2007 年我国进口铁矿石整体平均到岸价格 ($88.22 \text{ USD} \cdot \text{t}^{-1}$) 为计算基数,则

单位铁矿石的生态足迹为:

$$Y_{\text{iron-ore}} = Y \times p_{\text{iron-ore}} = 14.2 \times 10^{-4} \times 88.22 = 0.12527 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1} \quad (12)$$

式中, $Y_{\text{iron-ore}}$ 为单位铁矿石的生态足迹系数 ($\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); Y 为中国单位 GDP 的生态足迹强度, 取 $14.2 \times 10^{-4} \text{ hm}^2 \cdot \text{USD}^{-1}$ (陈敏等, 2005); $p_{\text{iron-ore}}$ 为铁矿石的平均价格 ($\text{USD} \cdot \text{t}^{-1}$).

钢铁工业单位铁矿石消耗的足迹可以按式(13)计算:

$$EF_{\text{iron-ore}} = Y_{\text{iron-ore}} \times E_{\text{iron-ore}} \quad (13)$$

式中, $EF_{\text{iron-ore}}$ 为单位钢铁产量所消耗铁矿石的生态足迹 ($\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); $Y_{\text{iron-ore}}$ 含义同式 12, 取值为 $0.12527 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$; $E_{\text{iron-ore}}$ 为吨钢铁矿石消耗量 ($\text{t} \cdot \text{t}^{-1}$).

2.10 建筑用地的生态足迹 (EF_{building})

根据于宏民等(2008)研究,中国钢铁工业建筑用地的生态足迹 $EF_{\text{building}} = 0.00042 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$.

2.11 钢铁工业的生态足迹 (EF_{steel})

单位钢铁产量的生态足迹由其所消耗的铁矿石、能源、水、建筑用地以及所排放的二氧化碳、二氧化硫、烟粉尘、废水等组成, 可以按式(14)计算:

$$EF_{\text{steel}} = \sum_{i=1}^9 EF_i = EF_{\text{CO}_2} + EF_{\text{SO}_2} + EF_{\text{dust}} + EF_{\text{NO}_x} + EF_{\text{new-water}} + EF_{\text{waste-water}} + EF_{\text{energy}} + EF_{\text{iron-ore}} + EF_{\text{building}} \quad (14)$$

式中, EF_{steel} 为单位钢铁产量的生态足迹 ($\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); 其它符号含义同前.

钢铁工业的生态足迹 EF_{steel} 可用式(15)计算:

$$EF_{\text{steel}} = Q_{\text{steel}} \times EF_{\text{steel}} \quad (15)$$

式中, EF_{steel} 为钢铁工业总的生态足迹 ($\text{hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$); Q_{steel} 为钢铁工业的年产量 (t); 其它符号含义同前.

3 钢铁生态足迹组成分析 (Composition analysis of iron & steel ecological footprint)

2005 年, 中国单位钢铁产量的生态足迹为 $1.2687 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$, 生态足迹总量为 $4.4814 \times 10^8 \text{ hm}^2$. 中国钢铁工业的生态足迹主要由吸收二氧化碳所需要的林地 (27.28%)、铁矿石的生态足迹 (27.14%)、排放氮氧化物所占据的生态足迹 (18.94%) 和能源地占用 (18.70%) 组成, 四者合计高达 92.06%. 这说明要减少钢铁工业的生态足迹, 关键是要减少能源和铁矿石的消耗. 如根据《2007 中国工业发展报告-工业发展效益现状与分析》的数

据, 2005年国内先进与落后钢铁企业吨钢综合能耗分别为 0.680和 1.018 $\text{tce}\cdot\text{t}^{-1}$, 则单位钢铁能耗的生态足迹分别为 0.2159 $\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$ 和 0.3232 $\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$; 如都达到先进企业的能耗水平, 仅此一项就将使单位钢铁的生态足迹下降近 7%. 同时, 要加大脱硝力

度, 重视排放氮氧化物对环境的影响. 排放废水所占用的生态足迹排在第 5位 (占 3.36%), 其它依次为二氧化硫、烟粉尘、耗新水占用的足迹和建筑占地. 2005年中国单位钢铁工业的生态足迹组成情况见表 2

表 2 中国单位钢铁产量的生态足迹组成 (2005)

Table 2 Unit output ecological footprint composition of China's iron & steel industry (2005)										
项目	CO ₂	铁矿石	NO _x	能耗	废水	SO ₂	烟粉尘	耗水	建筑	合计
吨钢生态足迹 ($\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$)	0.3462	0.3443	0.2403	0.2372	0.0427	0.0352	0.0197	0.0027	0.0004	1.2687
比例	27.28%	27.14%	18.94%	18.70%	3.36%	2.77%	1.55%	0.22%	0.03%	100%

2000~2006年单位钢铁产量的生态足迹整体呈逐年下降趋势, 由 2000年的 1.4685 $\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$ 下降到 2006年的 1.2150 $\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$, 年均减少 3.11% (表 3). 在单位钢铁生态足迹构成中, 吨钢能耗、耗新水、外

排废水的生态足迹均呈下降趋势, 而吨钢铁矿石消耗变化不大. 这说明我国钢铁工业近几年在节水和减少污水排放方面取得了一定成效, 特别是在节水方面.

表 3 单位钢铁产量的生态足迹构成 (2000~2006)

Table 3 Composition of unit output ecological footprint of iron & steel industry (2000~2006)						
年份	EF _{steel} / ($\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$)	EF _{iron-ore} / ($\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$)	EF _{energy} / ($\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$)	EF _{new-water} / ($\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$)	EF _{wastewater} / ($\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$)	吨钢生态 足迹增长率
2000	1.4685	0.3458	0.3201	0.0086	0.1523	
2001	1.4015	0.3342	0.3064	0.0064	0.1127	-4.78%
2002	1.3293	0.3124	0.2775	0.0054	0.0923	-5.43%
2003	1.3081	0.3140	0.2613	0.0047	0.0863	-1.62%
2004	1.2838	0.3215	0.2416	0.0042	0.0746	-1.89%
2005	1.2687	0.3443	0.2372	0.0027	0.0427	-1.18%
2006	1.2150	0.3235	0.2048	0.0022	0.0427	-4.42%

注: 由于资料收集原因, 假设二氧化碳、氮氧化物、烟粉尘、二氧化硫的单位排放量及单位钢铁产量的建筑占地不变, 则单位钢铁产量的生态足迹年度间数值不变, 分别为 0.3462, 0.2403, 0.0197, 0.0352, 0.0004 $\text{hm}^2\cdot\text{t}^{-1}$; 2006年吨钢废水排放量采用 2005年数据.

从生态足迹的时间序列来看, 中国钢铁工业总的生态足迹随总产量的增加而增加, 由 2000年的 $1.89\times 10^8\text{hm}^2$ 增加到 2006年的 $5.09\times 10^8\text{hm}^2$, 年均

增长 17.99%. 这与中国钢铁产量在研究时段内高速增长现状一致, 并对生态环境造成了较大的冲击, 但低于钢铁总产量的年均增长率 (21.78%) (图 1).

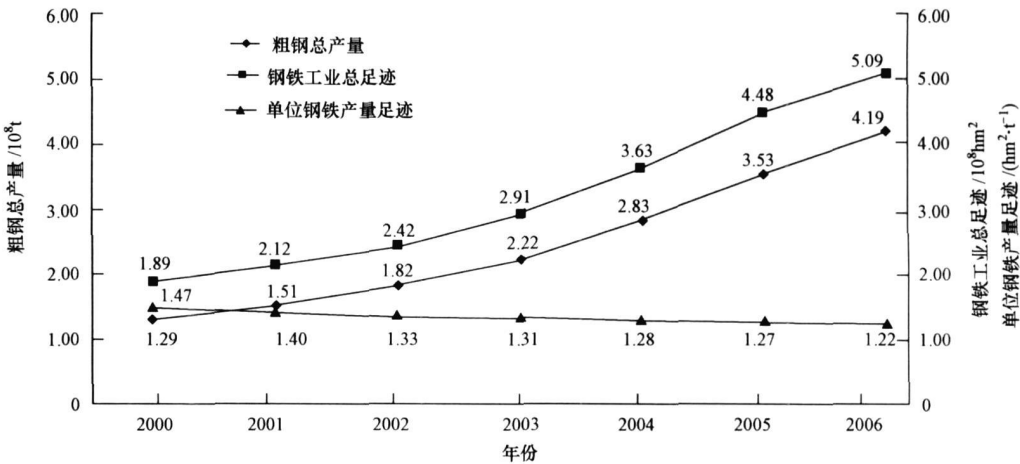


图 1 中国钢铁总产量及其生态足迹变化趋势 (2000~2006)

Fig 1 Total output& EFs of China's iron & steel industry (2000~2006)

4 讨论 (Discussion)

SO₂、烟粉尘、废水等污染物造成的环境损失采用“万元 GDP生态足迹”作为转换媒介,没有考虑污染物占用生态足迹与其他生物产品占用生态足迹的差异性;废水的足迹只考虑了化学需氧量、总氮和总磷,没有考虑其它环境影响因子,使计算出结果偏小;下一步可将生态足迹的成分法与能值理论和物质流分析方法结合,以改进此缺陷。

由于资料收集原因,某些年份的相关数据没有,在进行时间序列分析时以某一年的数据代表其它年份的值,如单位钢铁产量的二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物的排放量等,这对钢铁工业生态足迹变化趋势的计算精度有一定影响。

5 结论 (Conclusions)

1)本研究考虑了钢铁工业排放废水、废气等的生态足迹,单位钢铁产量的生态足迹 ($1.2687 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$)大于于宏民等 (2008)的研究值 ($0.8570 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$,均为 2005 年数据)。

2)2000~2006 年,中国钢铁工业总的生态足迹随钢铁产量的上升而快速增加,由 2000 年的 $1.89 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 增加到 2006 年的 $5.09 \times 10^8 \text{ hm}^2$,年均增长 17.99%,但低于粗钢总产量的年均增长率 (21.78%);单位钢铁产量的生态足迹呈逐年下降趋势,由 2000 年的 $1.4685 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$ 下降到 2006 年的 $1.2150 \text{ hm}^2 \cdot \text{t}^{-1}$,年均减少 3.11%;从生态足迹的构成来看,吸收二氧化碳所需要的林地、消耗铁矿石、排放氮氧化物和能源地占用这四项所占的生态足迹是其主要构成,2005 年这四项合计高达 92.06%。

责任作者简介:吴建华 (1958—),男,河海大学教授,博士生导师,主要从事水力学及河流动力学和工程生态安全研究。
E-mail: jhw@hhu.edu.cn

参考文献 (References):

- BestFoot Forward. 2000 Island State: An ecological footprint analysis of the Isle of Wight [J]. Oxford: Sea court Press Limited, 61—63
- BestFoot Forward Ltd. 2002 A resource flow and ecological footprint analysis of Greater London [OL]. 2009-05-07. <http://www.citylimitslondon.com/download/Complete%20report.pdf>
- Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, et al. 1998 New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy [J]. Ecological Economics, 27(2): 149—160
- 蔡九菊,杜涛. 2001 钢铁企业投入产出模型及吨钢能耗和环境负

- 荷分析 [J]. 黄金学报, 3(4): 306—312
- Cai J J, Du T. 2001. Input-output model & analysis of energy consumption crude steel and environmental loads on steel enterprise [J]. Gold Journal, 3(4): 306—312 (in Chinese)
- 蔡九菊,王建军,张琦,等. 2008 钢铁企业物质流、能量流及其对 CO₂ 排放的影响 [J]. 环境科学研究, 21(1): 196—200
- Cai J J, Wang J J, Zhang Q, et al. 2008. Material flows and energy flows in iron & steel factory and their influence on CO₂ emissions [J]. Research of Environmental Sciences, 21(1): 196—200 (in Chinese)
- 陈敏,张丽君,王如松,等. 2005 1978 年~2003 年中国生态足迹动态分析 [J]. 资源科学, 27(6): 132—139
- Chen M, Zhang L J, Wang R S, et al. 2005. Dynamics of ecological footprint of China from 1978 to 2003 [J]. Resources Science, 27(6): 132—139 (in Chinese)
- 段新虎. 2008 实现吨钢新水“零”消耗的对策 [J]. 节能与环保, (6): 36—37
- Duan X H. 2008. The way to realize zero new water consumption of unit steel [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, (6): 36—37 (in Chinese)
- Feng J J. 2001. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprint associated with production activity [J]. Ecological Economics, 37: 159—172
- 顾晓薇,李广军,王青,等. 2005 绿色大学建设中的生态足迹 [J]. 环境科学, 26(4): 200—204
- Gu X W, Li G J, Wang Q, et al. 2005. Ecological footprint in building green university [J]. Environmental Science, 26(4): 200—204 (in Chinese)
- 顾晓薇,王青,王军. 2006 本国生态足迹指标的构建及其实证研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 27(10): 1150—1153
- Gu X W, Wang Q, Wang J. 2006. Formulation of domestic ecological footprint indicator and its application [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 27(10): 1150—1153 (in Chinese)
- 贺成龙,吴建华,刘文莉. 2008 改进投入产出法在生态足迹中的应用 [J]. 资源科学, 30(12): 1933—1939
- He C L, Wu J H, Liu W L. 2008. Application in ecological footprint model based on improved input-output analysis [J]. Resources Science, 30(12): 1933—1939 (in Chinese)
- 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 2008 水资源生态足迹计算方法 [J]. 生态学报, 28(3): 2179—2186
- Huang L N, Zhang W X, Jiang C L, et al. 2008. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 28(3): 2179—2186 (in Chinese)
- 刘铁敏,周伟,王青. 2007 依据钢铁生产过程的中国铁矿石需求预测模型 [J]. 金属矿山, (2): 6—8
- Liu T M, Zhou W, Wang Q. 2007. Prediction model for china's iron ore demand based on steelmaking process [J]. Metallurgical Engineering, (2): 6—8 (in Chinese)
- 马忠普. 2008 浅谈铁矿石价格上涨 63% 对钢市的影响 [J]. 冶金管理, (2): 36—37
- Ma Z P. 2008. Inquire the effect of 65% rising of iron ore price to the steel [J]. China Steel Focus, (2): 36—37 (in Chinese)

- Rees W E. 1992 Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leave out [J]. *Environment and Urbanization*, 4 (2): 120—130
- Simmons C, Chambers N. 1998 Footprinting UK households: how big is your ecological garden? [J]. *Local Environ*, 3 (3): 355—362
- Simmons C, Lewis K, Barrett J. 2000 Two feet-two approaches: a component-based model of ecological footprinting [J]. *Ecological Economics* 32(3): 375—380
- 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 等. 2008 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹 [J]. *生态学报*, 28(4): 1729—1735
- Xie H Y, Chen X S, Lin K R, *et al*. 2008 The ecological footprint analysis of fossil energy and electricity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(4): 1729—1735 (in Chinese)
- 许嘉. 1984. 环境中的氮氧化物 [J]. *世界环境*, (4): 24—27
- Xu J. 1984. NO_x in the environment [J]. *World Environment* (4): 24—27 (in Chinese)
- 徐中民, 张志强, 程国栋. 2000. 甘肃省 1998年生态足迹计算与分析 [J]. *地理学报*, 55(5): 607—616
- Xu Z M, Zhang Z Q, Cheng G D. 2000. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu province [J]. *Acta Geographica Sinica* 55(5): 607—616 (in Chinese)
- 于宏民, 王青, 俞雪飞, 等. 2008 中国钢铁行业的生态足迹 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 29(6): 897—900
- Yu H M, Wang Q, Yu X F, *et al*. 2008 Ecological footprint of China's iron and steel industry [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 29(6): 897—900 (in Chinese)
- 张春霞, 胡长庆, 严定璠, 等. 2007. 温室气体和钢铁工业减排措施 [J]. *中国冶金*, 17(1): 7—12
- Zhang C X, Hu C Q, Yan D L, *et al*. 2007. GHG emission and its mitigation of steel industry [J]. *China Metallurgy*, 17(1): 7—12 (in Chinese)
- 张夏, 郭占成. 2000. 我国钢铁工业能耗与大气污染物排放量 [J]. *钢铁*, 35(1): 63—68
- Zhang X, Guo Z C. 2000 On energy consumption and atmospheric pollutants of China's iron and steel industry [J]. *Iron and Steel* 35(1): 63—68 (in Chinese)
- 赵立祥, 邢李志, 李京文. 2008 中国钢铁企业生态化研究 [J]. *统计研究*, 25(8): 30—34
- Zhao L X, Xing L Z, Li J W. 2008 A study on ecological evaluation of Chinese steel industry [J]. *Statistical Research* 25(8): 30—34 (in Chinese)
- Zhao S, Li Z, Li W. 2005 A modified method of ecological footprint calculation and its application [J]. *Ecological Modeling* 185: 65—75
- 中国钢铁工业协会. 2004 中国钢铁工业能耗现状与节能前景 [J]. *中国钢铁业*, (8): 17—21
- Industrial Steel Association of China. 2004 Present situation & energy conservation prospect of iron & steel industry of China [J]. *China Steel*, (8): 17—21 (in Chinese)
- 中国国家统计局. 2008 中国统计年鉴 2008 [M]. 北京: 中国统计出版社
- National Bureau of Statistics of China. 2008 China Statistical Yearbook 2008 [M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)
- 中国社会科学院工业经济研究所. 2007. 2007 中国工业发展报告—工业发展效益现状与分析 [M]. 北京: 经济管理出版社. 215
- Industry Economy research institute of CASS. 2007 China's Industrial Development Report 2007 — Present Situation & Analysis of Industry Development Benefit [M]. Beijing: Economy & Management Press. 215 (in Chinese)
- 钟一俊, 孙可, 周浩. 2007. 火力发电厂排污收费新体系的探讨 [J]. *热力发电*, (6): 13—17
- Zhong Y J, Sun K, Zhou H. 2007. An approach to new pollution charge system for thermal power plants [J]. *Thermal Power Generation* (6): 13—17 (in Chinese)