

水泥生态足迹计算方法

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, 江苏南京 210098; 2. 嘉兴学院建筑工程学院, 浙江嘉兴 314001;

3. 嘉兴学院机电工程学院, 浙江嘉兴 314001)

摘要:用生态足迹的成分分析方法首次计算了中国水泥生产的生态足迹,推导出水泥制造业 CO₂ 的单位排放量(排放强度)经验公式,水泥制造业 CO₂ 的单位排放量与水泥制造业的单位综合能耗呈线性关系,降低单位综合能耗就可降低 CO₂ 的单位排放量,进而减小水泥的生态足迹。中国水泥制造业的生态足迹由 2000 年的 $1.57 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 增加到 2006 年的 $2.61 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 年均增长 8.81%, 但低于水泥产量的年均增长速度(12.91%), 特别是 2004 年以来,水泥制造业总的生态足迹增长率明显低于水泥总产量的增长率。单位水泥产量的生态足迹呈下降趋势,由 2000 年的 $0.2632 \text{ hm}^2/\text{t}$, 减少到 2006 年的 $0.2109 \text{ hm}^2/\text{t}$ 。这说明,中国在水泥行业大力开展的节能减排的效果已经显现。从足迹的构成看,排放 CO₂ 和氮氧化物的生态足迹占绝对比重(超过 90%), 这主要是因为水泥制造业是高能耗行业,要减小水泥的生态足迹,必须降低水泥制造业的能耗水平。

关键词:水泥;生态足迹;成分法;中国

文章编号:1000-0933(2009)07-3549-10 中图分类号:F062.2, Q143 文献标识码:A

Calculation method of cement ecological footprint

HE Cheng-Long^{1,2}, WU Jian-Hua^{1,*}, LIU Wen-Li³

1 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, HoHai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China

2 College of Civil Engineering & Architecture, JiaXing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China

3 College of Mechanical & Electrical Engineering, JiaXing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3549 ~ 3558.

Abstract: The cement ecological footprint of China is calculated with component approach for the first time. The experience formula of CO₂ emission intensity of cement industry is deduced. It is a linear relation between the emission intensity and the unit comprehensive energy consumption in cement industry. The unit emission quality of CO₂ can be cut down by reducing the unit comprehensive energy consumption, in turn the cement ecological footprint decreased. The cement total ecological footprint (EF_c) of China is growing, from $1.57 \times 10^8 \text{ hm}^2$ (2000) to $2.61 \times 10^8 \text{ hm}^2$ (2006). The yearly average increase 8.81% of EF_c is lower than 12.91% of total output of cement. Since 2004, the former is lower than the latter, obviously. The unit cement yield ecological footprint decreases every year, which is from $0.2632 \text{ hm}^2/\text{t}$ (2000) to $0.2109 \text{ hm}^2/\text{t}$ (2006). The result shows clearly that the energy conservation and emission reduction effect is appearing in China cement industry. From the constitution of the cement ecological footprint, the ecological footprints of CO₂ and NO_x reach an absolute proportion (above 90%). The main reason lies in the cement industry high energy consumption. This fact indicates that, to reduce the EF_c , it is necessary to decrease energy consumption of cement industry.

Key Words: cement; ecological footprint; component approach; China

水泥是工程建设三大基本材料之一,使用范围广,用途大。中国是水泥生产大国,目前全国共有水泥生产

基金项目:国家自然科学基金委员会和二滩水电开发有限公司雅砻江水电开发联合研究基金共同资助项目(50539060)

收稿日期:2008-08-30; 修订日期:2009-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jhwu@hhu.edu.cn

企业五千余家,自 1985 年以来,中国水泥产量连续 20 多年始终保持世界第一,在世界水泥总产量中所占的比重不断增加,2007 年已超过世界水泥总产量的一半。水泥生产是对大宗原料进行加工处理的过程,在破碎、烘干、粉磨、煅烧、均化、选粉、筛分、喂料、输送、包装等工序中都会产生大量的粉尘,由于各道工序都是干燥作业,形成了扬尘点多、面大、范围广的特点。在水泥生产过程中,要消耗大量的能量,排放大量粉尘、烟尘以及二氧化碳(CO₂)、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)等,给区域乃至全球都带来了不可忽视的影响。2006 年,水泥制造业能耗总量占全国能源消费总量的 5.8%,占建材工业能源消耗总量 75.1%;水泥制造业万元增加值综合能耗是工业部门单位工业增加值能耗的 6 倍,是建材工业万元增加值综合能耗的 2 倍^[1],水泥工业万元 GDP 能耗是全国万元 GDP 能耗的 4 倍^[2]。对中国水泥生产实际情况开展生态足迹成分的研究,对水泥生产过程中节能降耗、发展循环经济具有重大的现实意义。

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^[3]。现有综合法、投入产出法和成分法等计算方法。综合法(compound approach)由加拿大英属哥伦比亚大学的人口生态学家 William Rees 与其博士生 Mathis Wackernagel,在 20 世纪 90 年代初创造的“生态足迹(ecological footprint 或 eco-footprint, EF)”基本模型^[4],适用于全球、国家和区域层次的生态足迹研究。投入产出法(Ecological Footprint model based on Input Output Analysis, IOA-EF),最早由 Kathryn B. Bicknell^[5]提出,之后, Jiun-Jiun Ferng 对之进行了完善、修正^[6]和扩展应用^[7], Lenzen^[8]、McDonal^[9]、Hubacek^[10]、赖力^[11]、曹淑艳^[12]、刘建兴^[13]、贺成龙^[14]等分别运用投入产出技术进行区域 EF 核算实践。成分法(component approach)在综合法之后,由 Simmons 等学者于 1998 年提出^[15,16], Barrett^[17]等进行了完善和应用,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^[18,19],通过自上而下的物质流分析,收集和实测主要消费品消费量及废物排放成分的量值进行生态足迹核算。

1 研究方法

根据资料的可收集性,由于水泥生产过程中直接投入的物质,如石灰石、粘土、铁质校正材料、石膏、混合材料,以及间接投入物,如开采矿质原料过程中挖掘、移动和剥离的岩石、表土等无法直接计算其生态足迹。本研究尝试从水泥生产过程中排放的烟粉尘以及二氧化碳(CO₂)、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)等的生态足迹,来间接表征水泥的生态足迹。

1.1 排放 CO₂ 的足迹, EF_{CO₂}

要计算 CO₂ 的足迹 EF_{CO₂},首先要计算出 CO₂ 的单位排放量 EF_{CO₂},再根据化石能源地平均 CO₂ 的吸纳能力为 5.2t/hm²,即可算出 CO₂ 的足迹 EF_{CO₂}。

1.1.1 煅烧碳酸盐的 CO₂ 排放强度, E₁

原料中的碳酸盐(CaCO₃、MgCO₃)分解产生的 CO₂ 排放可参照式(1)和(2)计算:



根据化学平衡方程式(1)和(2),生产 1t 水泥,由碳酸钙和碳酸镁分解产生的 CO₂ 可按(3)式计算:

$$E_1 = \sum_{i=1}^2 \frac{D}{D_i} \times \lambda_i \times \eta \quad (3)$$

式中, E₁ 为生产 1t 水泥,由碳酸钙(i=1)、碳酸镁(i=2)分解产生的 CO₂ (t); D、D₁、D₂ 分别是 CO₂ (=44)、CaO (=56)、MgO (=40) 的分子量; λ₁、λ₂ 分别是普通硅酸盐熟料中 CaO、MgO 的含量,可取国内的平均水平: λ₁ = 65%、λ₂ = 1.5%^[20]; η 是水泥中熟料配比,可按 75% 的平均配比考虑^[20]。

生产 1t 水泥,由碳酸钙分解产生的 CO₂ 为: 65% × (44/56) × 75% = 0.3830t; 由碳酸镁分解产生的 CO₂ 为: 1t × 1.5% × (44/40) × 75% = 0.0124t。所以生产 1t 水泥,由碳酸钙和碳酸镁分解产生的 CO₂ 排放总量为: 0.3830t + 0.0124t = 0.3954t。

1.1.2 煅烧有机碳的 CO₂排放强度, E_2

用于熟料生产的原料中通常都含有一小部分有机碳,经由高温处理时,有机碳会转化为 CO₂,可按(4)式计算:

$$E_2 = 3.67\eta \times \varphi \times \kappa \quad (4)$$

式中, E_2 是生产 1t 水泥,由煅烧有机碳排放的 CO₂(t); 3.67 是 C-CO₂转化因子,指燃烧 1 份有机碳,平均要排放 3.67(=44/12)份 CO₂, 44、12 分别为 CO₂和 C 的分子量; φ 原料中有机碳含量,0.1%~0.3%(干重)之间,可取 0.2%^[20]; κ 为生熟料折合约,可取国内平均水平(1.65)^[20]; η 含义同式(3)。

则生产 1t 水泥,由原料中有机碳产生的 CO₂排放量为: $1.65 \times 0.2\% \times 3.67 \times 0.75 = 0.009t$ 。

1.1.3 水泥窑燃料燃烧产生的 CO₂排放强度, E_3

目前,国内水泥窑燃料仍以煤为主,天然气和石油几乎很少使用,燃油也只是在启动回转窑时才会使用,因此可只考虑煤燃烧的 CO₂排放情况。可根据煤炭中有机碳的含量与热值的关系,确定碳排放因子,其 CO₂排放可按式(5)计算:

$$E_3 = E_n \times \psi = 3.67Q \times \gamma \times \alpha \times \beta \times \psi \quad (5)$$

式中, E_3 是生产 1t 水泥,由燃料燃烧排放的 CO₂(t); E_n 为燃烧 1t 标准煤的 CO₂排放量(t); ψ 为水泥制造业的单位综合能耗(tce/t); β 为标准煤折算原煤系数,取 1.4; 3.67 是 C-CO₂转化因子; Q 为燃料发热量(10⁹J/t),原煤取 20.91; γ 为燃料的碳排放系数(tC/10¹²J),原煤取 25.80; α 为原煤的碳氧化率,取 0.98^[21]。

由式(5),可计算出燃烧 1t 标准煤的 CO₂排放量为 2.7164t。根据可比水泥综合能耗,即可得到生产 1t 水泥,由燃料燃烧排放的 CO₂量。如 2006 年,中国可比水泥综合能耗为 120kg/t,则生产 1t 水泥,由能源消耗产生的 CO₂排放量约为 0.3260t。

由此,可以推导出水泥制造业 CO₂的单位排放量(排放强度)经验公式:

$$E_{CO_2} = \sum_{i=1}^3 E_i = 0.3954 + 0.009 + 2.7164\psi = 0.4044 + 2.7164\psi \quad (6)$$

式中, E_{CO_2} 为水泥制造业 CO₂的单位排放量(排放强度)(t/t); ψ 为水泥制造业的单位综合能耗,单位(tce/t)。

1.1.4 计算 CO₂的足迹 EF_{CO_2}

根据式(6),以及年中国水泥制造业单位综合能量消耗^①(2005~2006 数据来自文献^[1]),如表 1 所示,就可计算出生产水泥产量所排放的 CO₂的足迹。

表 1 2000~2006 年中国水泥行业单位综合能量消耗

Table 1 Comprehensive energy consumption of unit cement of China (2000~2006)

项目 Item	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
能耗(10 ⁴ tce) Energy consumption *	7496	8407	9291	11115	12783	13574	14841
产量(10 ⁴ t) Output	59700	66104	72500	86208	96682	106885	123676
单位综合能耗(kgce/t) Comprehensive energy consumption of unit cement ^[1]	126	127	128	129	132	127	120

* 数据来自对应各年的《中国统计年鉴》和《2006 中国能源行业年度报告》The data come from China Statistical Yearbook and Energy Development Report of China (2006)

$$EF_{CO_2} = \frac{\sum E_{CO_2}}{5.2} \quad (7)$$

① GB17680-2007《水泥单位能源消耗限额》(2008 年 6 月 1 日实施)规定:可比熟料综合能耗根据可比熟料综合标准煤耗和可比熟料综合电耗计算,其中电力折算标准煤系数按国家统计局规定的 0.1229kg 标准煤/(kW·h)计算。但国家发改委“十一五规划”的供电标准煤指标为 0.370kg 标准煤/(kW·h);由此造成不同的文献统计出来的“单位综合能耗”不同;本文采用“0.1229kg 标准煤/(kW·h)”的统计数据

式中, EF_{CO_2} 为水泥制造业排放 CO_2 的生态足迹 (hm^2); 5.2 为化石能源地平均 CO_2 的吸纳能力 (t/hm^2); $\sum$ 为水泥的产量 (t)。

中国水泥制造业 2000 ~ 2006 年 CO_2 排放强度、排放量及 CO_2 排放所占的总的生态足迹和单位水泥产量生态足迹如表 2。

表 2 2000 ~ 2006 年中国水泥制造业 CO_2 排放量及生态足迹
Table 2 Emission quantities & EFs of CO_2 of China's cement industry (2000 ~ 2006)

项目 Item	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
排放强度 (t/t) Emission intensity	0.7455	0.7499	0.7525	0.7546	0.7636	0.7494	0.7304
排放量 ($10^4 t$) Emission quantities	44504.81	49569.23	54557.07	65055.30	73821.94	80096.71	90328.67
排放 CO_2 的总生态足迹 ($10^4 hm^2$) Total EFs of CO_2	8558.62	9532.54	10491.74	12510.63	14196.53	15403.21	17370.90
单位水泥产量 CO_2 的生态足迹 ($10^{-4} hm^2/t$) Unit cement output EFs of CO_2	1433.60	1442.05	1447.14	1451.22	1468.37	1441.10	1404.55

1.2 排放 SO_2 的足迹 EF_{CO_2}

由于缺少有关 SO_2 的相关转换因子基础数据, 本文采用二氧化硫所造成的经济损失来折算其生态足迹。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两万元人民币。2003 年, 中国生态足迹强度为 $14.2ghm^2/\text{万美元}^{[22]}$, 按当时的汇率 (1 美元 = 7.8 元人民币) 折合 $1.82051hm^2/10^4RMB$, 则单位二氧化硫的生态足迹 $3.64103hm^2/t$ 。水泥生产排放 SO_2 占用的生态足迹为:

$$EF_{SO_2} = Q_{SO_2} \cdot ef_{SO_2} = 3.64103Q_{SO_2} \quad (8)$$

式中, EF_{SO_2} 为水泥制造业排放 SO_2 的生态足迹 (hm^2); ef_{SO_2} 是单位二氧化硫的生态足迹, 可取 $3.64103 (hm^2/t)$; Q_{SO_2} 是水泥制造业排放 SO_2 的总量 (t)。

中国水泥制造业 2000 ~ 2006 年 SO_2 排放强度、排放量及 SO_2 排放所占的总的生态足迹及单位水泥产量生态足迹如表 3。

表 3 2000 ~ 2006 年中国水泥制造业 SO_2 排放量及生态足迹^[23,24]
Table 3 Emission quantities & EFs of SO_2 of China's cement industry (2000 ~ 2006)

项目 Item	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
排放强度 (kg/t) Emission intensity	1.7	1.6	1.6	1.5	1.4	1.2	0.9
排放量 ($10^4 t$) Emission quantities	101.49	105.77	116.00	129.31	135.35	128.26	111.31
排放 SO_2 的总生态足迹 ($10^4 hm^2$) Total EFs of SO_2	369.53	385.10	422.36	470.83	492.83	467.01	405.28
单位水泥产量 SO_2 的生态足迹 ($10^{-4} hm^2/t$) Unit cement output EFs of SO_2	61.90	58.26	58.26	54.62	50.97	43.69	32.77

1.3 排放 NO_x 的足迹 EF_{NO_x}

氮氧化物 (NO_x) 是由空气中的氧气和氮气在 $1200 \sim 2400^\circ C$ 的高温环境反应生成的, 包括氧化亚氮 (N_2O)、一氧化氮 (NO)、二氧化氮 (NO_2) 等, 水泥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 NO_2 , 在总的 NO_x 排放量中 NO 占 $90\% \sim 95\%$ ^[25]。

水泥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) ^① 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 CO_2 的吸纳能力 ($5.2t/hm^2$), 即可算出氮氧化物的足

① GWP 是一种物质产生温室效应的一个指数; GWP 是在 20a, 100a, 500a 的时间框架内, 各种温室气体的温室效应对应于相同效应的二氧化碳的当量; 一氧化氮 (NO) 20a, 100a 和 500a 的 GWP 值分别为 275, 296 和 156

迹 EF_{NO_x} , 如式(9)所示。由于没有水泥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:

$$EF_{NO_x} \approx EF_{NO} = \frac{150Q_{NO}}{5.2} = \frac{156 \cdot \xi \cdot Q_{NO_x}}{5.2} = \frac{156 \times 0.90Q_{NO_x}}{5.2} = 27Q_{NO_x} = 27 \sum \cdot E_{NO_x} \quad (9)$$

式中, EF_{NO_x} 为水泥制造业排放 NO_x 的生态足迹 (hm^2); EF_{NO} 为水泥制造业排放 NO 的生态足迹 (hm^2); 156 是 NO 的 GWP 值, 此处取 NO 在 500a 寿命期的 GWP 值; ξ 是氮氧化物中 NO 的含量, 本文取 90%; Q_{NO_x} 为水泥制造业 NO_x 的排放量 (t); $\sum$ 为水泥的产量 (t); E_{NO_x} 为水泥制造业 NO_x 的排放强度 (t/t)。

则中国水泥制造业 2000 ~ 2006 年 NO_x 排放强度、排放量及 NO_x 排放所占的总的生态足迹好单位水泥产量生态足迹如表 4。

表 4 2000 ~ 2006 年中国水泥制造业 NO_x 排放量及生态足迹^[23,24]

Table 4 Emission quantities & EFs of SO_2 of China's cement industry (2000 ~ 2006)

项目 Item	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
排放强度 (kg/t) Emission intensity	3.50	3.50	3.40	3.30	3.10	2.90	2.30
排放量 (10^4 t) Emission quantities	208.95	231.36	246.50	284.49	299.71	309.97	284.45
排放 NO_x 的总生态足迹 (10^4 hm^2) Total EFs of NO_x	5641.65	6246.83	6655.50	7681.13	8092.28	8369.10	7680.28
单位水泥产量 NO_x 的生态足迹 (10^{-4} hm^2 /t) Unit cement output EFs of NO_x	945.00	945.00	918.00	891.00	837.00	783.00	621.00

1.4 排放烟粉尘的足迹 EF_{dust}

由于缺少有关烟粉尘的相关转换因子基础数据, 本文采用烟粉尘所造成的经济损失来折算其生态足迹。根据文献^[26]的研究, 总悬浮颗粒物 (TSP) 或烟尘的排污收费标准是 SO_2 的 36.67% ($=2.2/6$)。则单位烟粉尘的生态足迹为 $3.64103 \times 0.3667 = 1.33504$ hm^2 /t。水泥生产排放烟粉尘占用的生态足迹为:

$$EF_{dust} = Q_{dust} \cdot ef_{dust} = 1.33504Q_{dust} \quad (10)$$

式中, EF_{dust} 为水泥制造业排放烟粉尘的生态足迹 (hm^2); ef_{dust} 为单位烟粉尘的生态足迹, 可取 1.33504 (hm^2 /t); Q_{dust} 为水泥制造业排放烟粉尘的总量 (t)。

中国水泥制造业 2000 ~ 2006 年烟粉尘排放强度、排放量及烟粉尘排放所占的总的生态足迹及单位水泥产量生态足迹如表 5。

表 5 2000 ~ 2006 年中国水泥制造业烟粉尘排放量及生态足迹^[23,24]

Table 5 Emission quantities & EFs of smoke & dust of China's cement industry (2000 ~ 2006)

项目 Item	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
排放强度 (kg/t) Emission intensity	14.34	12.91	11.62	9.06	6.50	5.52	3.77
排放量 (10^4 t) Emission quantities	856.10	853.40	842.45	781.04	628.43	590.01	466.26
排放烟粉尘的总生态足迹 (10^4 hm^2) Total EFs of smoke & dust	1142.93	1139.33	1124.70	1042.73	838.98	787.68	622.47
单位水泥产量烟粉尘的生态足迹 (10^{-4} hm^2 /t) Unit cement output EFs of smoke & dust	191.44	172.35	155.13	120.95	86.78	73.69	50.33

1.5 耗新水的足迹 EF_{water}

由于缺少水泥制造业耗水量的统计数, 本文采用文献^[27]的调查数据 (表 6), 来折算水泥制造业新水的消耗量。

设全国新干法窑的吨水泥耗水量为 ω_N , 其它窑的吨水泥耗水量为 ω_O 。考虑到调查水泥厂与全国相应水泥厂的管理水平和生产工艺等情况, 本文取 $\omega_N = 1.2 \times 4.61 = 5.53$ (kg/t), $\omega_O = 1.1 \times 114.47 = 125.92$

(kg/t)。根据中国水泥产量及新型干法窑所占比例(表7)就可计算出水泥制造业的年度耗水量。

表6 水泥厂耗水强度调查

Table 6 Consumption water intensity investigation of cement factory

水泥厂 Cement factory	生产工艺 Productive technology	产量(t/a) Output	耗新水(t/a) Consumption new water quantities	耗水强度(kg/t) Intensity of water consumption
A	新型干法预分解窑 New dry pre-resolve kiln	1657755	$1064 + 18.0 \times 365 = 7634$	4.61
B	湿法回转窑 Wet rotary kiln	503175	$180 \times 320 = 57600$	114.47

表7 2000~2006年中国水泥新型干法比例^{[28]①}

Table 7 The new dry kiln ratio of China cement industry (2000~2006)

项目 Item	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
水泥产量(10^4 t) Total output	59700	66104	72500	86208	96682	106885	123676
新干法产量(10^4 t) * Output of new dry kiln	8125	9396	12390	18912	31535	47391	63149
新干法比例(%) ** The ratio of new dry kiln	13.6	14.2	17.1	21.9	32.6	44.5	51.1

根据文献^[29],中国水资源单位面积产水量 $p_w = 2946$ (m^3/hm^2),则水泥制造业耗水量所占的生态足迹可由式(11)计算,结果见表8。

$$EF_{\text{water}} = Q_w / p_w = (\omega_N q_N + \omega_O q_O) / p_w \quad (11)$$

式中, EF_{water} 为水泥制造业耗水量所占的生态足迹(hm^2); p_w 为水资源单位面积产水量,中国取 2946 (m^3/hm^2); Q_w 为水泥制造业耗水的总量(m^3); ω_N 为新干法窑的吨水泥耗水量(m^3/t); ω_O 为其它窑的吨水泥耗水量(m^3/t)。

表8 2000~2006年中国水泥业耗新水所占的生态足迹

Table 8 The EFs of water consumption of China cement industry (2000~2006)

项目 Item	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
新干法窑耗新水量(10^4m^3) Water consumption of new dry kiln	44.95	51.98	68.54	104.62	174.45	262.17	349.34
其它窑耗新水(10^4m^3) Water consumption of other kiln	6494.17	7140.50	7568.87	8473.71	8203.11	7491.31	7621.38
总耗新水(10^4m^3) Total water consumption	6539.12	7192.48	7637.41	8578.33	8377.57	7753.47	7970.72
耗新水的总生态足迹(10^4hm^2) Total EFs of water consumption	2.22	2.44	2.59	2.91	2.84	2.63	2.71
单位水泥产量耗新水的生态足迹($10^{-4} \text{hm}^2/\text{t}$) Unit cement output EFs of water consumption	0.372	0.369	0.358	0.338	0.294	0.246	0.219

1.6 水泥厂的占地面积 EF_{factory}

由于缺少水泥厂占地面积的统计数,本文采用调查^②数据(表9),来折算水泥厂的占地面积。

由表9可见,所调查的水泥厂有的单位面积年产量有高达每公顷 32.14 万 t 的,也有仅 1.5 万 t/hm^2 的,本文取调查数据的平均值($7.34 \times 10^4 \text{t}/\text{hm}^2$)作为中国水泥企业的单位面积年产量,即单位水泥产量厂区的生态足迹为 $0.1412 \times 10^{-4} \text{hm}^2/\text{t}$ 。

① 国金证券研究所,建材统计. <http://www.okokok.com.cn/Htmls/GenCharts/071011/3125.html>

② <http://www.ztsn.com.cn>; <http://www.conch.cn>; <http://www.ieomax.com/cn>; http://www.chinacements.com/tech/detail/detail_1100.html

1.7 水泥的生态足迹 EF_c

水泥的生态足迹可由式(12)间接计算:

$$EF_c = \sum_{i=1}^6 EF_i = EF_{CO_2} + EF_{SO_2} + EF_{NO_x} + EF_{dust} + EF_{water} + EF_{factory} \quad (12)$$

式中, EF_c 为水泥的生态足迹(hm^2);其它符号含义同前。

表9 中国水泥厂年产能、占地面积调查

Table 9 Investigation of productivity & occupied area of China cement factory

序号 No.	单位名称 Business name	年产能(10^4t) Annual productivity	占地面积(hm^2) Occupied area	单位面积年产量 ($10^4t/hm^2$) Annual yield by area
1	郑州市中泰水泥有限公司 ZhengZhou ZhongTai Cement Co., Ltd.	15	10	1.50
2	泰州杨湾海螺水泥有限责任公司 Taizhou Yangwan Hailuo Cement Co., Ltd.	310	14.67	21.13
3	宁波海螺水泥有限公司 NingBo Hailuo Cement Co., Ltd.	360	11.2	32.14
4	宁海强蛟海螺水泥有限公司 NingHai QiangJiao Hailuo Cement Co., Ltd.	320	13.47	23.76
5	福建省建阳海螺水泥有限责任公司 Fujian Jianyang Hailuo Cement Co., Ltd.	60	3.2	18.75
6	江门海螺水泥有限公司 JiangMen Hailuo Cement Co., Ltd.	330	26.67	12.37
7	浙江三狮集团兰溪特种水泥有限公司 Zhejiang leomex Group Lanxi Special Cement Co., Ltd	100	10.07	9.93
8	上海海螺水泥有限公司 ShangHai Hailuo Cement Co., Ltd.	210	7	30.00
9	南通海螺水泥有限公司 NanTong Hailuo Cement Co., Ltd.	132	6.47	20.40
10	新广州水泥厂迁建项目(GCPN) New GuangZhou Cement Co., Ltd. (GCPN)	192	173.65	1.11
	合计 Total	2029	281.4	7.21

2 结果与分析

从总量指标上看:中国水泥制造业总的生态足迹呈上升趋势,由2000年的 $1.57 \times 10^8 hm^2$,增加到2006年的 $2.61 \times 10^8 hm^2$,年均增长8.81%,这与中国水泥产量在研究时段内高速增长现状一致,将对生态环境造成较大的冲击,但低于水泥总产量的年均增长速度(12.91%);特别是2004年以来,水泥制造业总的生态足迹增长率明显低于水泥总产量的增长率,如图1所示。

从单位指标上看:单位水泥产量的生态足迹逐年下降,由2000年的 $0.2632 hm^2/t$ 降到2006年的 $0.2109 hm^2/t$ 。从构成看,水泥制造业的生态足迹主要由其排放的 CO_2 和 NO_x 所占的生态足迹构成,两者之和占绝对比重(超过90%)。单位水泥产量排放 CO_2 所占的生态足迹先增加后减少,即由2000年的 $0.1434 hm^2/t$ 增加到2004年的 $0.1468 hm^2/t$,再减少到2006年的 $0.1405 hm^2/t$,这与中国水泥制造业的单位综合能耗的变化趋势一致;但所占比重持续上升,由2000年的54.46%上升到2006年的66.60%,这与单位水泥产量的生态足迹逐年下降的趋势形成明显对比。 NO_x 、 SO_2 、烟粉尘等其它环境影响物的生态足迹所占比重呈下降趋势,耗水和厂区的生态足迹所占比重很小(表10)。这说明,中国在水泥行业大力开展的节能减排的总体效果已经显现,但是 CO_2 的减排压力很大。

3 结论

推导出水泥制造业 CO_2 的单位排放量(排放强度)经验公式: $E_{CO_2} = 0.4044 + 2.7164\psi$,水泥制造业 CO_2 的

单位排放量(E_{CO_2})与水泥制造业的单位综合能耗(ψ)呈线性关系。要减小水泥的生态足迹,须降低 CO_2 的单位排放量,可通过降低水泥制造业的能耗水平来实现。降低单位综合能耗就可降低 CO_2 的单位排放量,进而减小水泥的生态足迹。

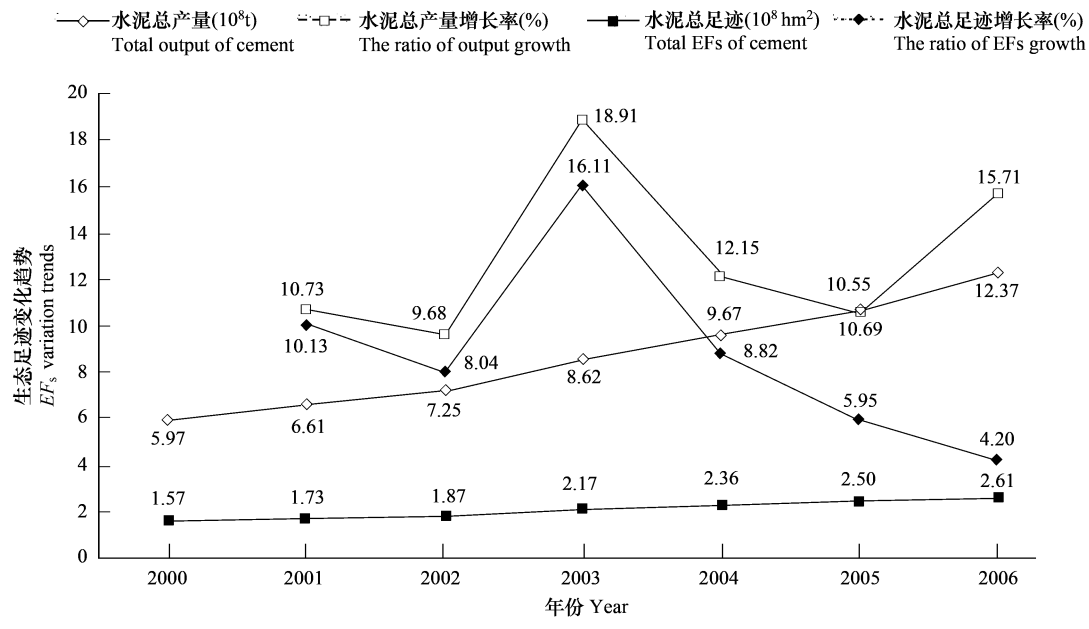


图1 中国水泥总产量及其总的生态足迹变化趋势(2000~2006)

Fig. 1 The variation trends of total output & EFs of China cement industry (2000~2006)

表10 中国单位水泥产量的生态足迹(2000~2006)

Table 10 Unit cement output EFs of China cement industry (2000~2006) ($10^{-4} \text{hm}^2/\text{t}$)

项目 Item	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
单位产量的生态足迹 Unit cement output EFs	2632.46	2618.17	2579.02	2518.26	2443.56	2341.87	2109.01
其中 among: CO_2	1433.60	1442.05	1447.14	1451.22	1468.37	1441.10	1404.55
SO_2	61.90	58.26	58.26	54.62	50.97	43.69	32.77
NO_x	945.00	945.00	918.00	891.00	837.00	783.00	621.00
烟粉尘 Smoke & dust	191.44	172.35	155.13	120.95	86.78	73.69	50.33
耗水 Water consumption	0.37	0.37	0.36	0.34	0.29	0.25	0.22
厂区 Factory area	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

中国水泥制造业总的生态足迹随产量的增加而呈上升趋势,但低于水泥总产量的增长速度。单位水泥产量的生态足迹逐年下降,由2000年的 $0.2632 \text{hm}^2/\text{t}$ 下降到2006年的 $0.2109 \text{hm}^2/\text{t}$ 。水泥制造业的生态足迹主要由于其排放的 CO_2 和 NO_x 所占的生态足迹构成,两者之和占绝对比重(超过90%)。这说明,中国在水泥行业大力开展的节能减排的总体效果已经显现,但是 CO_2 的减排压力很大。

水泥制造业排放的 CO_2 和 NO_x 的生态足迹是利用化石能源地吸纳 CO_2 的能力以及 NO 的 GWP 当量值来折算其足迹大小,这是一种静态方法;而 SO_2 和烟粉尘的生态足迹,采用 SO_2 和烟粉尘所造成的经济损失以及中国万元 GDP 生态足迹来折算,这是一种动态方法。

References:

- [1] Zhou H J. Energy consumption comment on cement industry in 2006. China Cement, 2007(10):26-29.
- [2] Wang L. Comment on energy consumption control strategy of cement industry. China Cement, 2006(10):22-25.

- [3] He C L, Wu J H. Evaluation of sustainable development in Hu-Su-Zhe on eco-footprint theory. *Construction Economy*, 2007 (6): 56—59.
- [4] Rees W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leave out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4 (2): 120—130.
- [5] Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, Bigsby R B. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological Economics*, 1998, 27(2): 149—160.
- [6] Ferng J J. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprint associated with production activity. *Ecological Economics*, 2001, (37): 159—172.
- [7] Ferng J J. Toward a scenario analysis framework for energy footprints. *Ecological Economics*, 2002, (40): 53—69.
- [8] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint and its application to Australia. *Ecological Economics*, 2001, (37): 229—255.
- [9] Medonald G, Patterson D M. Ecological footprints of New Zealand and its regions, 1997 /1998, 2003[EB/OL]. [Http: //www. mfe. govt. nz/ publications/ser/eco-footprint-sep03 /index. html](http://www.mfe.govt.nz/publications/ser/eco-footprint-sep03/index.html).
- [10] Hubacek K, Giljum S. Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprint) of International trade activities. *Ecological Economics*, 2003, (44): 137—151.
- [11] Lai L, Huang X J, Liu W L, Zhao D H. Adjustment for regional ecological footprint based on input-output technique: a case study of Jiangsu Province in 2002. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1285—1292.
- [12] Cao S Y, Xie G D. Applying input-output analysis for calculation of ecological footprint of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1499—1509.
- [13] Liu J X, Wang Q, Gu X W, Li G J. Input-output analysis in application to study on China's ecological footprints. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2007, 28(4): 592—595.
- [14] He C L, Wu J H, Liu W L. Application in ecological footprint model based on improved input-output analysis. *Resource Science*, 2008, 30(12): 1933—1939.
- [15] Simmons C, Chambers N. Footprinting UK Households: How big is your Ecological Garden? *Local Environment*, 1998, 3 (3), 355—362.
- [16] Simmons C, Lewis K, Barrett J. Two feet-two approaches: a component-based model of ecological footprinting. *Ecological Economics*, 2000, 32 (3): 375—380.
- [17] Barrett J, Scott A, Lindfield S. *Ecological Footprint of Liverpool: Developing Sustainable Scenarios*. York: Stockholm Environment Institute, 2001: 1—121.
- [18] Best Foot Forward. *Island State: An Ecological Footprint Analysis of the Isle of Wight*. Oxford: Sea Court Press Limited, 2000: 61—63.
- [19] Gu X W, Li G J, Wang Q, Liu J X, Ding Y, Liu J Z. Ecological footprint in building green university. *Environmental Science*, 2005, 26(4): 200—204.
- [20] Cui S P, Liu W. Analysis on CO₂ reduction emission potentiality of cement production Process. *China Cement*, 2008(4): 57—59.
- [21] IPCC. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook. [EB/OL] [http://www. ipcc-nggip. iges. or. jp/public/ iglu/invs1. html](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/iglu/invs1.html).
- [22] Chen M, Zhang L J, Wang R S, Huai B G. Dynamics of ecological footprint of China from 1978 to 2003. *Resources Science*, 2005, 27(6): 132—139.
- [23] Chen C, Hu D, Wen Q X, Zhang D K. Resource depletion and environmental discharge of cement production in China. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2007, 35(28): 8986—8989.
- [24] Building Materials Federation of China. Report summary of building materials industry energy conservation and discharge decrease. *China Building Materials*, 2008(2): 23—25.
- [25] Xu J. NO_x in the environment. *World Environment*, 1984(4): 24—27.
- [26] Zhong Y J, Sun K, Zhou H. An approach to new pollution charge system for thermal power plants. *Thermal Power Generation*, 2007(6): 13—17.
- [27] Yan D. Study on environmental Pres Sure of Cement Factory Based on MFA. Chengdu: Southwest Jiaotong University Master Degree Thesis, 2006, 26—28.
- [28] Wang Y M. Significant progress of China cement industry. *China Cement*, 2008(3): 9—11.
- [29] Huang L N, Zhang W X, Jiang C L, Fan X Q. Ecological footprint method in water resources assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 2179—2186.

参考文献:

- [1] 周鸿锦. 2006 年水泥工业能耗述评. *中国水泥*, 2007(10): 26~29.
- [2] 汪澜. 论水泥工业能源消耗控制战略. *中国水泥*, 2006(10): 22~25.

- [3] 贺成龙,吴建华.基于生态足迹的沪苏浙可持续发展评价研究.建筑经济,2007(6):56~59.
- [11] 赖力,黄贤金,刘伟良,赵登辉.基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析——以2002年江苏省经济为例.生态学报,2006,26(4):1285~1292.
- [12] 曹淑艳,谢高地.基于投入产出分析的中国生态足迹模型.生态学报,2007,27(4):1499~1509.
- [13] 刘建兴,王青,顾晓薇,李广军.投入产出法在我国生态足迹研究中的应用.东北大学学报(自然科学版),2007,28(4):592~595.
- [14] 贺成龙,吴建华,刘文莉.改进投入产出法在生态足迹中的应用.资源科学,2008,30(12):1933~1939.
- [19] 顾晓薇,李广军,王青,刘建兴,丁一,刘敬智.绿色大学建设中的生态足迹.环境科学,2005,26(4):200~204.
- [20] 崔素萍,刘伟.水泥生产过程 CO₂ 减排潜力分析.中国水泥,2008(4):57~59.
- [22] 陈敏,张丽君,王如松,怀保光.1978年~2003年中国生态足迹动态分析.资源科学,2005,27(6):132~139.
- [23] 陈超,胡聃,文秋霞,张大康.中国水泥生产的物质消耗和环境排放分析.安徽农业科学,2007,35(28):8986~8989.
- [24] 中国建筑材料联合会.建材工业节能减排报告提要.中国建材,2008(2):23~25.
- [25] 许嘉.环境中的氮氧化物.世界环境,1984(4):24~27.
- [26] 钟一俊,孙可,周浩.火力发电厂排污收费新体系的探讨.热力发电,2007(6):13~17.
- [27] 阎冬.基于物质流分析法的水泥企业环境压力研究.成都:西南交通大学研究生学位论文,2006:26~28.
- [28] 王燕谋.中国水泥行业重大进展.中国水泥,2008(3):9~11.
- [29] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,范晓秋.水资源生态足迹计算方法.生态学报,2008,28(3):2179~2186.