

中国水泥生产过程碳排放因子测算与评估

沈镭^{①*}, 赵建安^①, 王礼茂^①, 刘立涛^①, 王燕^②, 姚予龙^①, 耿元波^①, 高天明^①, 曹植^{①③*}

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071;

③ 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: shenl@igsrr.ac.cn; caozhi.14b@igsrr.ac.cn; caozhi0312@gmail.com

2016-03-17 收稿, 2016-06-06 修回, 2016-06-06 接受, 2016-08-19 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(XDA05010400)资助

摘要 从科学问题、研究方案以及基于水泥生产线抽样调查所获得的测算与评估结果三个方面对中国科学院战略性先导专项课题“水泥生产过程排放”的研究工作进行了系统性的总结. 自2011年下半年至2015年, 完成了全国22个省区水泥生产线的野外抽样, 取得了359条生产线的活动水平数据, 并采用“生产线-省市区-国家”三级集成方案, 分区域、分工艺、分规模构建了中国水泥生产碳排放因子核算体系. 通过对工艺排放因子、燃料排放因子、电力排放因子、直接排放因子及分工艺的熟料、水泥综合排放因子共10个指标的分析测算, 判断得到国内外研究对中国水泥生产碳排放因子的估计与计算结果存在一定偏差: 其中, 工艺排放和水泥熟料比上分别存在1.4%~3.4%和12%~32%的高估; 燃料排放则存在-27.63%~+6.25%的偏差. 分析了全部采样测试的排放因子不确定性并探讨了国际上对中国水泥生产碳排放测算结果高估的原因, 总结了目前国内外测算方法中存在的问题及解决方案, 提出了水泥生产未来的节能潜力及方向, 并认为未来工作重点将是跟踪既有调查企业的动态变化, 反演中国水泥生产的历史碳排放, 同时开展与国际相关机构的沟通与交流, 确保中国的研究成果更具科学性和准确性, 从而为中国参与气候变化谈判提供科学依据, 并使国家在环境外交中掌握更大的主动权.

关键词 水泥生产, 二氧化碳, 排放因子, 抽样调查, 测算方法

水泥生产是我国国民经济各产业部门中除了火电之外CO₂排放量最大产业. 2014年中国水泥产量达到 24.76×10^8 t, 占全球产量的59.23%以上. 如果按IPCC公布的默认值(在缺少排放因子国家或区域, 建筑用水泥熟料比按0.75计, 硅酸盐水泥熟料比为0.95, 不考虑MgO的工艺排放系数按0.52 t CO₂/t熟料计), 我国水泥生产的仅CO₂排放工艺排放量就达到 9.66×10^8 t或 12.23×10^8 t; 按照荷兰环境评估署(PBL)2008年发布的中国水泥生产碳排放综合因子大于1.2 t CO₂/t水泥计算, 中国的水泥排放排放量则高达 29.71×10^8 t. 然而, 我国发布的《中华人民共和国气

候变化第二次国家信息通报》^[1]中, 2005年中国水泥生产过程的工艺二氧化碳排放量为 4.1176×10^8 t, 通报中的熟料产量为 6.74×10^8 t, 则可推算工艺排放因子为610.92 kg CO₂/t熟料. 因此, 上述机构的估算结果与我国的实际情况明显不符.

国外经常发布水泥生产碳排放的机构主要来自美国、英国、日本、荷兰、澳大利亚等国家, 如美国能源署(EIA)、世界资源研究所(WRI)、美国橡树岭国家实验室碳排放信息分析中心(CDIAC)、荷兰环境评估署(PBL)等; 一些国际组织和跨国集团也经常发布, 主要有: 政府间气候变化专门委员会(IPCC)^[2]、国际

引用格式: 沈镭, 赵建安, 王礼茂, 等. 中国水泥生产过程碳排放因子测算与评估. 科学通报, 2016, 61: 2926–2938

Shen L, Zhao J A, Wang L M, et al. Calculation and evaluation on carbon emission factor of cement production in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2926–2938, doi: 10.1360/N972016-00037

能源署(IEA)^[3,4]、欧洲能源署(EEA)^[5]、世界可持续发展工商理事会(WBCSD)^[6,7]、美国环境保护署(EPA)^[8,9]、世界水泥工业协会(CIF)等^[10]。IPCC公布了3种测算方法,其中方法3是最接近实际排放的计算方法,但是,方法3需获得熟料烧制用的碳酸盐消耗量及其化学成分,该方法投入较大,过程繁琐复杂,因而世界各国往往根据国际上提供的默认值简单估算水泥生产的碳排放。目前包括中国在内的世界各国还没有一个国家和机构按照此方法进行水泥生产CO₂排放量计算。中国作为世界第一大水泥生产大国,其默认排放因子明显背离中国水泥生产的实际情况。为此,必须建立一套符合中国国情的水泥生产碳排放核算体系^[11],迫切需要根据中国水泥生产规模、工艺技术、不同工序、品种特性和行业发展前景,全面核查中国的水泥生产过程CO₂排放,并准确获得我国自主的分省市、分工艺、分规模水平上的碳排放因子,而这正是中国科学院碳专项目前正在积极开展的一项基础性研究工作。

作为该项基础性研究工作的主要执行人员,我们将根据目前已经开展的工作,就相关的科学问题、测算方法,以及基于水泥生产线抽样调查所获得测算与评估结果,提出我们的认识和看法。

1 研究方案设计

水泥生产的碳排放量是活动水平产量与排放因子的乘积。尽管计算简单,但目前国外针对中国水泥生产碳排放量测算结果相差悬殊。主要原因有:(1) 计算边界和口径不一,如有的只测算水泥生产的工艺排放,不考虑能源活动的排放,有的把两者全部计算在内;(2) 活动水平数据难以掌握,特别是熟料和水泥产量数据难以获取;(3) 排放因子的不确定性,国外计算方法仅参考各种默认值。其中前两个问题比较简单,只要确定核算边界,就可以区分水泥生产的直接排放和间接排放;根据权威部门统计如中国水泥协会、国家统计局等公布的相关数据,可以掌握历年熟料和水泥产量数据。因此,排放因子的测算与确定是问题的关键。

基于对上述重大科学问题的判断,自2011年下半年起,展开了全国范围基于水泥生产线系统抽样调查和采样测试分析的排放因子测算工作。总目标是:(1) 在中国水泥统计数据的基础上,分区域、分年份构建中国水泥生产的活动水平数据;(2) 采取大样

本的水泥生产线抽样调查,分别分析测算重点省市、分生产工艺的排放因子,综合比较形成基于我国水泥生产特色的单位熟料和单位水泥的排放因子,修正补充IPCC方法中的有关默认值;(3) 构建水泥企业碳排放计算方法,开展不确定性分析;(4) 开展典型水泥生产的碳流动与物质平衡分析。最终为我国水泥碳排放清单的编制提供权威数据支撑,形成中国自主的碳排放数据,并为我国节能减排和城镇化发展提供决策服务。

1.1 核算边界的界定

任务界定水泥生产过程是指各种原料进厂直到水泥产品储存的企业内全部生产流程,大致包括各种原料处理、粉碎、给料混合和预处理、预热、窑外分解、熟料生产、熟料冷却和储藏、混合、研磨、水泥仓库储藏等10个环节。由此确定的碳排放测算运营边界包括生料制备、熟料煅烧和水泥制备三个大的阶段。按照工艺流程,水泥生产又分为全流程和短流程两大类,前者包括从生料-熟料-水泥的全部生产过程,后者只包括利用外购熟料生产水泥的过程。

1.2 抽样方法的选择

由于人力物力的限制,要对全部水泥生产线进行普查较难实现,抽样调查方法相对较易操作,时间和费用较省,通过误差控制也能较为准确地估算总体值。水泥生产碳排放系数与区域内的原料、燃料特征、技术发展程度等区位因素相关,使用地理空间抽样能提高总体估值的精确度,但在实际抽样调查工作中,调查企业的选择需要考虑企业的生产情况、可到达度、配合程度等,完全的空间随机抽样很难实现。在针对多变量多目标的大规模区域抽样工作中,一般采用分层抽样,根据各层的不同特点采用不同的抽样方式,各层之间互不干扰,不仅可以保证总体估值的准确性,还可兼顾各层抽样的空间均衡性。

以水泥生产不同工艺的生产线为调查范围(总体),采用二阶段不等概率分层随机抽样方法选取样本。以新型干法生产工艺为例,在样本总体个数为1113,同时保证置信度(t)为95%且允许相对误差(p)为10%的前提下,若假设估计量的变异系数(v)为0.5,则必要样本容量($n=t^2 \times v^2 / p^2$)为96,若变异系数为0.6,则必要样本容量为138,若变异系数为0.7,则必要样本容量为189。根据以往IPCC公布的不确定性数据(可

视为经验数据),水泥生产碳排放各变量的变异系数均在0.5以下,考虑到数据回收率不足的可能性,放大样本量10%,最小必要样本容量为106.

(i) 第一阶段不等概率抽样(抽取调查省份). 与全国水泥产量成比例,采用概率比例规模抽样,抽取足够的省份数量,使样本单元产量占总体的90%以上,满足样本规模. 由于水泥生产的原料具有遍在性,全国各省市均可就近布局水泥生产. 按2009年各省市水泥产量占全国比重统计,在5.5%~8.9%之间的主要集中在江苏、山东、河南、河北、浙江、广东和四川等7省;在1.5%~5.0%之间的省份较多,包括湖南、安徽、湖北、广西壮族自治区、江西、福建、云南、辽宁、陕西、内蒙古自治区、重庆和山西等12个省市,以上19个省市的水泥生产量合计占全国89.5%;考虑地域分布的特殊性,加上新疆维吾尔自治区、贵州省和西藏自治区三个省区,上述比重达到92.47%. 再从熟料生产的比重考虑,上述22个省市的熟料产量占全国92.45%. 因此,本任务选择上述省市开展采样调研,即抽样调查的区域覆盖率在92.46%以上.

(ii) 第二阶段分层随机抽样(抽取样本生产线). 各省份的生产线按新型干法、立窑及湿法转窑、特种水泥与短流程(粉磨站),共划分三大类不同工艺类型水泥生产. 采用随机抽样方法,结合空间分布均衡性、企业配合程度等因素,从各层中抽取样本. 其中,由于新型干法工艺的生产线产能规模差异较大,按产能规模分为3层(<2000 t/d, 2000~4000 t/d, >4000 t/d)进行抽样.

2009年全国共有新型干法生产线1113条,生产能力在10亿t左右,约占全国水泥生产能力的72.2%,年设计熟料产能95859万t. 其中日产700~900 t生产线41条;日产1000 t生产线151条;日产1100~1400 t生产线99条;日产1500~1800 t生产线53条;日产2000 t生产线76条;日产2500 t生产线324条;日产3000~3500 t生产线53条;日产4000~4200 t生产线46条;日产5000 t及以上生产线270条. 日产5000 t及以上生产线设计水泥熟料产能占新型干法水泥熟料的总产能比重为45.3%. 其他工艺(立窑、湿法转窑等)生产线2000多条,生产能力仅占全国的17.8%.

根据上述情况,按工艺划分的抽样调查样本数分别为:(1) 全流程新型干法水泥生产,360~400组(每组样品共计7个),样品代表性约为37.3%;(2) 全

流程立窑及湿法转窑水泥生产,330~370组(每组样品共计7个),样品代表性约为18.5%;(3) 短流程及特种水泥生产,309~360组(每组样品共计7个),样品代表性约为18.0%;以上三者的样品代表性平均约为24.6%. 其中涉及全流程新型干法抽样调查21个省区,主要是东、中部有关省区(北京、新疆维吾尔自治区、辽宁、四川、山东、浙江、江苏、河南、山西、河北、陕西、湖北、安徽、广西壮族自治区、广东、云南、福建、江西、湖南、内蒙古自治区、贵州);全流程立窑及湿法转窑生产工艺同样为15个省区,但主要是中、西部省区(山东、西藏自治区、新疆维吾尔自治区、四川、山西、陕西、安徽、重庆、贵州、广西壮族自治区、福建、湖南、内蒙古自治区、江西、广东);短流程及特种水泥涉及到19个省区,分别兼顾到东、中、西部各省区(新疆维吾尔自治区、辽宁、四川、浙江、山东、河北、陕西、湖北、广西壮族自治区、云南、山西、广东、河南、湖南、江苏、安徽、福建、江西、内蒙古自治区). 其中,将全流程新型干法按产能规模进一步细分为大、中、小型,因全流程立窑及湿法转窑生产工艺和短流程及特种水泥是将两类不同生产工艺合并到一起,在此不再按产能规模细分. 此外,未采样省区直接到所在省区水泥协会收集面上数据.

本任务排放因子的测算和集成采取三级集成方案,即先测算抽样调查水泥生产线的碳排放因子,接着按生产规模分工艺加权平均计算各省市区的排放因子,再按加权平均计算出全国的排放因子. 具体的排放因子分熟料和水泥两类,按排放源分别计算每类因子,包括工艺排放因子、燃料排放因子、电力排放因子;同时,计算直接排放因子和间接排放因子(电力消耗),然后集成为分工艺的综合排放因子,共计10个指标.

1.3 样本的采集与数据处理

生产线取样样品主要有:原料、生料、熟料、水泥、燃料等. 主要测试数据包括测试样品的全成分含量(主要是碳酸钙、碳酸镁、氧化钙、氧化镁的比重),原料、生料的有机碳和燃料低位发热值、发热量和氧化率等. 制作水泥企业生产与排放调查表,获取包括水泥生产工艺、原、辅料来源与规模、结构,各类能源消耗规模与结构,产品结构与规模等数据.

每条水泥生产线每次采样5~7个,形成1组样品,

包括:水泥用灰岩原料1个,生料1个,熟料1个,燃料煤1个,水泥成品1~2个。根据不同生产线实际状况,部分生产线还增加了黏土、窑灰、电石渣、硫酸渣等样品的采样。

截至2015年,本任务已完成了全国22个省区水泥生产线的野外抽样(图1),已取得的359条生产线空间分布如图1所示,其中新型干法完成21个省区,190条生产线的抽样调查,取得样品总计956个;立窑及湿法窑完成15个省区,75条生产线,样品442个;特种水泥和粉磨站完成19个省区,94条生产线,459个样品的抽样调查(表1)。

截至2015年,对全部22个省份共1757个样品进行了化验分析,其中新型干法样品956个,中空窑、立窑和湿法转窑样品442个,特种及粉磨站水泥样品459个。

工艺排放因子、燃料排放因子和电力排放因子的核算是在已有研究基础上进行的^[12,13],所采用的计算方法是在IPCC方法3和CSI推荐的熟料法基础上进行了简化和改进。

2 排放系数的测算结果

通过对22个抽样省份359条生产线物性数据分析,初步测算了中国水泥生产碳排放情况(表2)。表2为抽样结果的均值和95%置信区间,由于样本总体分布可能不是正态分布,均值置信区间是利用自展抽样法(bootstrap)获得。

如表2所示,全国新型干法水泥生产的工艺排放因子95%置信区间为517.46~521.82 kg/t熟料,化石燃料排放因子95%置信区间为316.27~325.91 kg/t熟料,间接排放因子95%置信区间为76.39~88.39 kg/t水泥(扣除余热发电)。

全国立窑水泥(包含中空窑和湿法转窑)生产的工艺排放因子95%置信区间为491.28~507.00 kg/t熟料,化石燃料排放因子为342.21~376.62 kg/t熟料,间接排放因子为70.44~80.26 kg/t水泥。

全国特种水泥的工艺排放因子95%置信区间为337.89~448.30 kg/t熟料,化石燃料排放因子为437.15~531.02 kg/t熟料,间接排放因子为108.90~144.29 kg/t水泥。

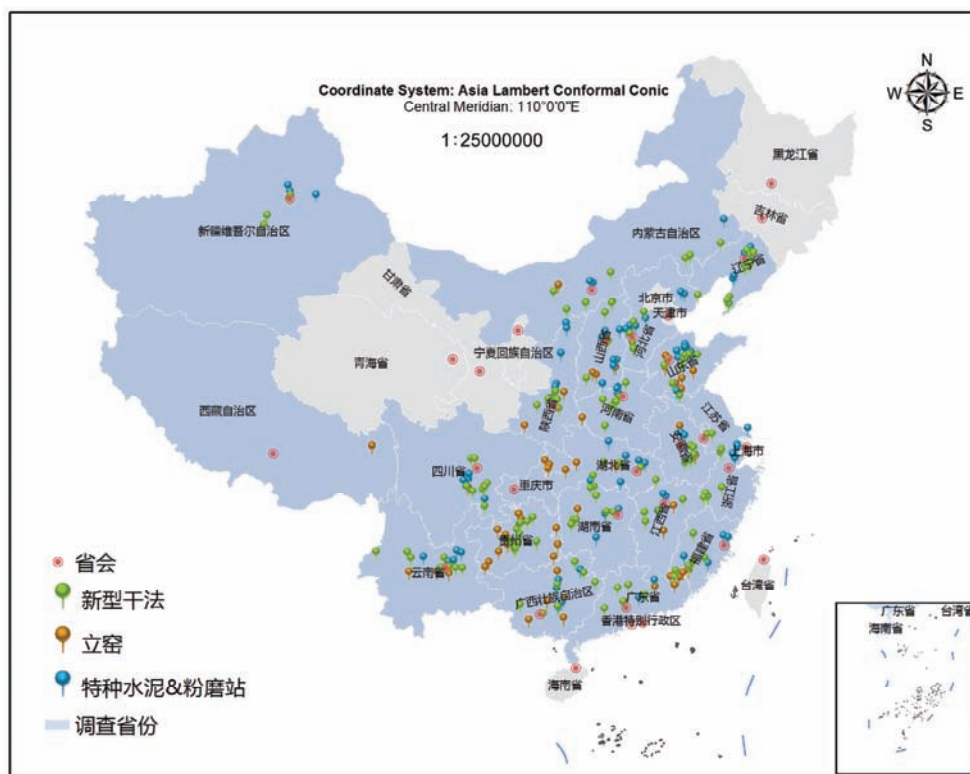


图1 抽样水泥样品空间分布图

Figure 1 Spatial distribution map of cement production line samples

表 1 已抽样省份、生产线及样品数量分布

Table 1 List of sample provinces and production lines for different production processes

省份	新型干法		立窑		粉磨站及特种水泥		合计	
	组数	样品数	组数	样品数	组数	样品数	组数合计	样品合计
辽宁	14	82			5	31	19	113
四川	8	54	3	18	4	20	15	92
新疆维吾尔自治区	6	35	2	10	6	20	14	65
山东	11	58	10	58	8	35	29	151
浙江	8	32			4	14	12	46
江苏	6	25			3	9	9	34
重庆			3	31			3	31
西藏自治区			1	7			1	7
河南	10	51			7	34	17	85
贵州	12	61	18	99			30	160
山西	8	34	3	15	6	37	17	86
河北	10	43			6	36	16	79
陕西	9	55	4	28	6	37	19	120
湖北	8	35	3	20	6	33	17	88
安徽	14	59	3	17	2	9	19	85
广东	11	55	5	25	3	12	19	92
广西壮族自治区	10	50	5	44	5	16	20	110
云南	10	52	3	21	6	34	19	107
福建	8	40	3	18	4	22	15	80
内蒙古自治区	10	49	4	16	4	8	18	73
江西	7	34	2	0	3	13	12	47
湖南	10	52	3	15	6	39	19	106
合计	190	956	75	442	94	459	359	1857

表 2 抽样省份平均熟料CO₂排放因子^{a)}

Table 2 Average CO₂ emission factors of different production processes

工艺类型	排放类型	排放源	分类排放因子
新型干法	直接排放(kg/t熟料)	工艺排放	517.46~521.82 (519.66)
		化石燃料排放	316.27~325.91 (321.03)
	间接排放(kg/t水泥)	电力排放	76.39~88.39 (82.15)
立窑	直接排放(kg/t熟料)	工艺排放	491.28~507.00 (499.83)
		化石燃料排放	342.21~376.62 (359.01)
	间接排放(kg/t水泥)	电力排放	70.44~80.26 (75.12)
特种水泥	直接排放(kg/t熟料)	工艺排放	337.89~448.30 (394.17)
		化石燃料排放	437.15~531.02 (482.67)
	间接排放(kg/t水泥)	电力排放	108.90~144.29 (126.17)
粉磨站	间接排放(kg/t水泥)	电力排放	33.32~36.44 (34.85)

a)自展抽样法的均值和95%置信区间。间接排放不仅包含熟料制造阶段消耗的电力，还包含水泥产品制造阶段消耗的电力，因此间接排放的单位为水泥基。全流程水泥生产线中电力消耗包含熟料制造阶段和水泥粉磨阶段所消耗的电力，粉磨站仅包含水泥粉磨阶段所消耗电力

粉磨站主要是依靠外购熟料、通过电力加工生产水泥。全国粉磨站间接排放为33.32~36.44 kg/t水泥。

立窑生料中石灰石配比小于新型干法的比重,导致立窑生料中碳酸盐的含量较新型干法少,其工艺排放小于新型干法。同时,新型干法生产工艺在熟料制备阶段增加了一定电耗,但其窑炉的热效率较立窑大大提高,大大降低了化石燃料的消耗,总体来看,立窑熟料生产的CO₂排放高于新型干法。

特种水泥的排放系数置信区间较宽,这是因为不同种类特种水泥的原料也不相同,导致不同特种水泥生产线生料中的碳酸盐含量差异较大。同时,由于特种水泥的原料中添加了高比例的非碳酸盐原料,其工艺排放系数低于新型干法和立窑。

由自展抽样法的计算结果可知,分类排放因子的置信区间并不完全对称,初步验证了之前的非正态分布假设,在计算熟料产品直接排放因子和最终水泥产品的综合排放因子时,不适合利用中心极限定理来推断这两个排放因子的不确定性置信区间。下面章节将在抽样经验数据的基础之上,拟合其概率分布函数,并利用蒙特卡洛方法(Monte Carlo simulation)模拟熟料产品直接排放因子和最终水泥产品综合排放因子的不确定性情况,还将分产能规模以及分地区对中国水泥生产碳排放进行比较分析。

2.1 排放因子的不确定性分析

表2中仅为抽样计算的结果,由于各排放源皆携带着自身误差,这些误差随着计算过程传递给最终

排放因子,造成最终综合排放因子的不确定性。利用极大似然估计和K-S统计检验等方法,确定各排放源的概率分布模型。表3为各排放源的概率分布类型和参数估值。

将表3中的概率分布函数作为输入参数,利用蒙特卡洛模拟方法分别对新型干法、立窑和特种水泥进行100000次模拟,获得3种工艺熟料产品直接排放因子和最终水泥产品综合排放因子的不确定性情况(表4),同时提供了基于正态分布假设的常规误差传递方法的不确定性计算结果(表4)。新型干法的熟料直接排放因子平均值为840.33 kg/t熟料(95%置信区间为773.63~915.01),水泥产品综合排放因子为702.35 kg/t水泥(95%置信区间为626.44~810.82);立窑的熟料直接排放因子平均值为857.40 kg/t熟料(95%置信区间为733.00~1012.88),水泥产品综合排放因子为621.66 kg/t水泥(95%置信区间为534.01~728.45);特种水泥的熟料直接排放因子平均值为879.88 kg/t熟料(95%置信区间为517.07~1305.20),水泥产品综合排放因子为891.71 kg/t水泥(95%置信区间为558.09~1280.11)。

各工艺类型排放因子的不确定性范围皆显示出不对称特征,这是因为模拟的输入为偏斜分布,抽样样本越少则不对称越明显且不确定范围越大。

2.2 分生产规模的排放系数比较

从生产规模来看熟料CO₂排放情况,由图2可以看到,生产规模较大的生产线,单位熟料工艺排放、

表3 各排放因子的概率分布函数^{a)}

Table 3 Probability distribution function of emission factors

工艺类型	排放源	拟合概率分布函数	估计参数	
			参数1	参数2
新型干法	工艺排放	对数正态分布	6.25	0.03
	燃料排放	对数正态分布	5.77	0.10
	电力排放	对数正态分布	4.31	0.45
立窑	工艺排放	威布尔分布	29.78	509.69
	燃料排放	对数正态分布	5.86	0.19
	电力排放	对数正态分布	4.28	0.26
特种水泥	工艺排放	威布尔分布	3.05	442.04
	燃料排放	对数正态分布	6.14	0.29
	电力排放	对数正态分布	4.75	0.43
粉磨站	电力排放	对数正态分布	3.54	0.17

a) 参数1为对数正态分布的几何平均、威布尔分布的形状参数,参数2为对数正态分布的几何标准偏差、威布尔分布的尺度参数

表4 直接排放因子和综合排放因子的不确定性分析结果

Table 4 Results of uncertainty analysis for direct emission factor and total emission factor

工艺类型	蒙特卡洛模拟(非正态分布假设)		误差传递方法(正态分布假设)	
	直接排放因子 (kg/t熟料)	综合排放因子 (kg/t水泥)	直接排放因子 (kg/t熟料)	综合排放因子 (kg/t水泥)
新型干法	773.63~915.01 (840.33)	626.44~810.82 (702.35)	827.54~853.92 (840.73)	663.08~742.15 (702.62)
	[-7.94%, +8.89%]	[-10.81%, +15.44%]	±1.57%	±5.63%
立窑	733.00~1012.88 (857.40)	534.01~728.45 (621.66)	813.19~904.08 (858.64)	580.29~665.47 (622.88)
	[-14.51%, +18.13%]	[-14.10%, +17.18%]	±5.29%	±6.84%
特种水泥	517.07~1305.20 (879.88)	558.09~1280.11 (891.71)	717.70~1036.89 (877.30)	691.14~1087.36 (889.22)
	[-41.23%, +48.34%]	[-37.41%, +43.56%]	±18.19%	±22.28%

燃料排放和电力排放的均值均小于小规模生产线。虽然大小规模生产线工艺排放差距不大,但在燃料和电力排放方面,大规模生产线要低于小规模生产线。如图2(c)所示, <2000 t/d的水泥生产线因余热利用效率不高,吨熟料燃料排放明显的高于规模较大的生产线。表5的结果是方差分析的多重比较检验结果,不同生产规模之间工艺排放的差异并不明显,但燃料排放和电力排放的差异较大。如2000~4000 t/d的燃料排放比>4000 t/d高出24.31 kg/t, <2000 t/d的燃料排放比2000~4000 t/d高出29.63 kg/t; 2000~4000 t/d的电力排放比>4000 t/d高出11.01 kg/t, <2000 t/d的电力排放比2000~4000 t/d高出7.91 kg/t。燃料排放的多重比较检验结果较为显著,而电力排放的多重比较检验结果较不显著,这是因为电力排放的异常值较多,且电力排放较高值中存在熟料外调,这些生产线生产的熟料相当大一部分不用于本生产线水泥产品的生产,而电力排放是按照本生产线水泥产量计算,导致这些生产线电力排放因子的夸大。总的来说,大规模水泥生产线的能耗水泥较小规模低,中国要逐步淘汰小规模的水泥生产线,改扩建大规模水泥生产线。

2.3 分地区的排放系数比较

从新型干法过程排放、熟料排放和水泥加权排放因子省际与全国平均值的对比情况来看,过程加权排放因子高于全国平均水平的省份为闽、蒙、赣、晋、鲁、粤、豫、陕、苏、桂、川;熟料加权排放因子高于全国平均水平的省份为晋、滇、闽、蒙、桂、赣;水泥加权排放因子高于全国平均水平的省份为皖、晋、陕、滇、冀、粤、桂、鄂(图3)。

3 与国内外测算结果的比较

目前,IPCC建立并定期修改和公布了世界各国的排放因子数据库(EFDB),这是关于排放因子以及与国家层面的温室气体排放量或清除量估算有关参数的网络信息交换论坛,它不断被进行修订。可以通过IPCC和IPCC-NGGIP的主页或直接在其网站在线访问排放因子数据库(<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>)。IPCC定期发布具有数据库和查询工具的光盘。通过检索,与水泥生产有关的参数见表6所示。IPCC国家温室气体清单指南1996年公布的水泥生产熟料排放因子是0.5071 t CO₂/t熟料,2006年修改为0.52 t CO₂/t熟料;按水泥计算的排放因子是0.4985 t CO₂/t水泥。这两项排放因子都只是熟料中因碳酸钙分解产生的直接碳排放系数,没有考虑熟料中碳酸镁分解和其他燃料燃烧的碳排放。

在缺乏更好数据的情况下,熟料排放因子一般采用缺省值527 kg/t。具体计算过程是在正常情况下,普通硅酸盐水泥熟料含氧化钙65%左右,根据化学反应方程式:CaCO₃=CaO+CO₂,每生成1份CaO同时生成0.7857份CO₂,故每生产1 t水泥熟料CO₂排放量为1×65%×0.785 7=0.511 t。另外,考虑熟料中典型的MgO含量为1.5%左右,根据化学反应方程式MgCO₃=MgO+CO₂,每生成1份MgO同时生成1.092份CO₂,所以每生产1 t水泥熟料CO₂排放量为1×1.5%×1.092=0.016 t。综合计算得煅烧熟料排放因子为527 kg/t。

我国发布的《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》中,清单编制的方法是IPCC方法2,方法2依据各国熟料CaO和MgO的测定值(未剔除非碳

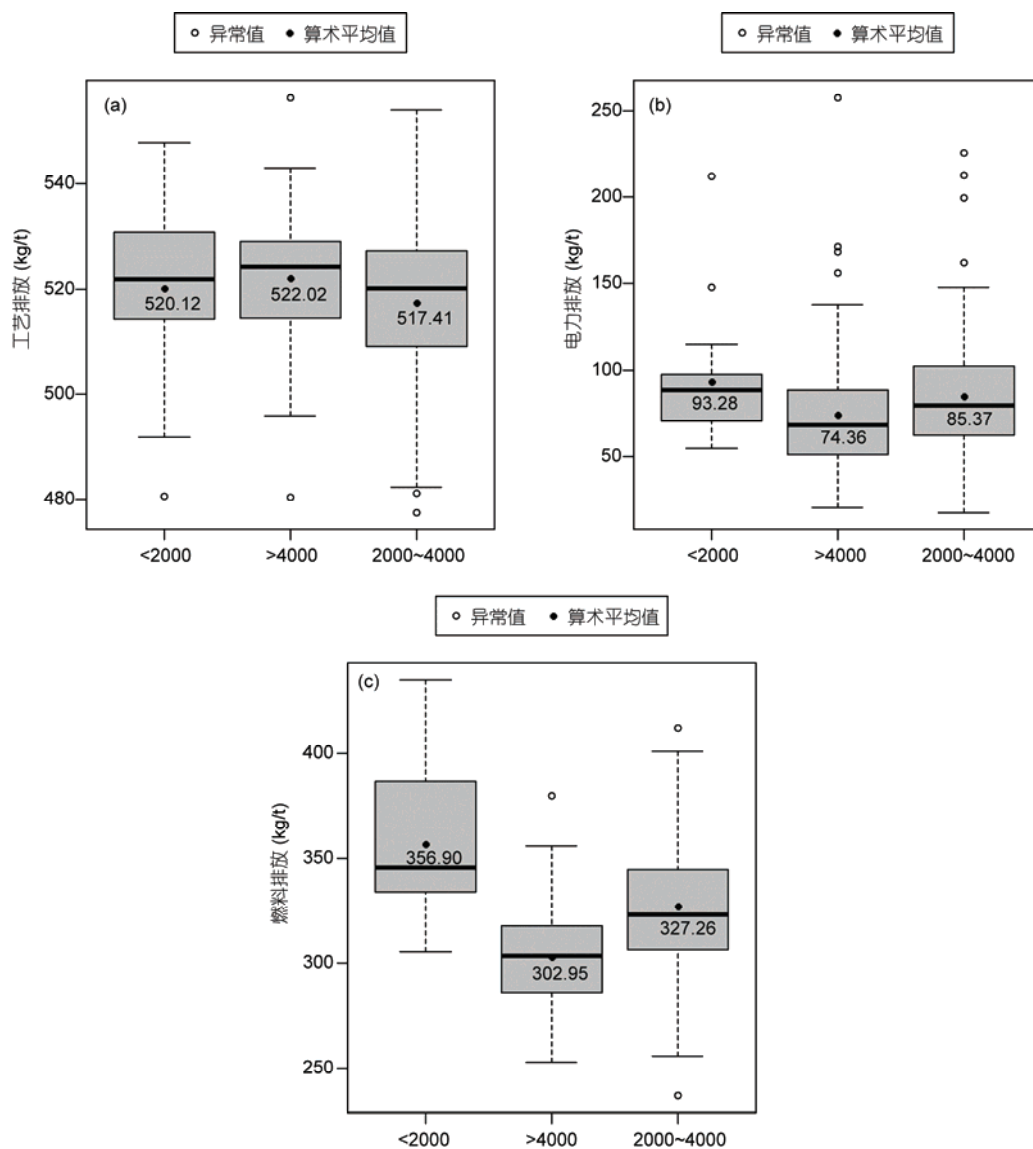


图2 新型干法排放系数的箱线图。(a) 工艺排放; (b) 电力排放; (c) 燃料排放

Figure 2 Boxplot of emission factor for new suspension preheater. (a) Process emission; (b) electricity emission; (c) fuel emission

表5 不同生产规模的最小显著性差异法检验(LSD)结果

Table 5 LSD comparison for different capacity level

排放类型	生产规模(t/d)	两两差异	P值
工艺排放	2000~4000和<2000	-2.71	0.7221
	2000~4000和>4000	-4.61	0.1258
	>4000和<2000	1.90	0.8583
燃料排放	2000~4000和<2000	-29.63	0.0001
	2000~4000和>4000	24.31	0.0000
	>4000和<2000	-53.94	0.0000
电力排放	2000~4000和<2000	-7.91	0.6793
	2000~4000和>4000	11.01	0.2173
	>4000和<2000	-18.92	0.1276

酸盐), 而根据本文收集的熟料物性数据, 熟料中CaO和MgO的含量分别为65.26%和2.23%, 皆高于表6中的推荐值。

国际上一般认为在水泥生产过程中, 每生产1 t熟料就会释放出大约0.92 t的CO₂(或者920 kg/t)。这种CO₂的排放主要是通过石灰石中未饱和的碳酸盐(527 kg/t)和用来供热的含碳燃料(390 kg/t)混合在一起形成的^[14]。也就是说, 考虑工艺排放和燃料排放的熟料排放因子应该是920 kg/t熟料。对于一些不在本地生产熟料的水泥粉磨站而言, 外购熟料产生的CO₂应基于报告实体的净购入熟料(购买的熟料减去

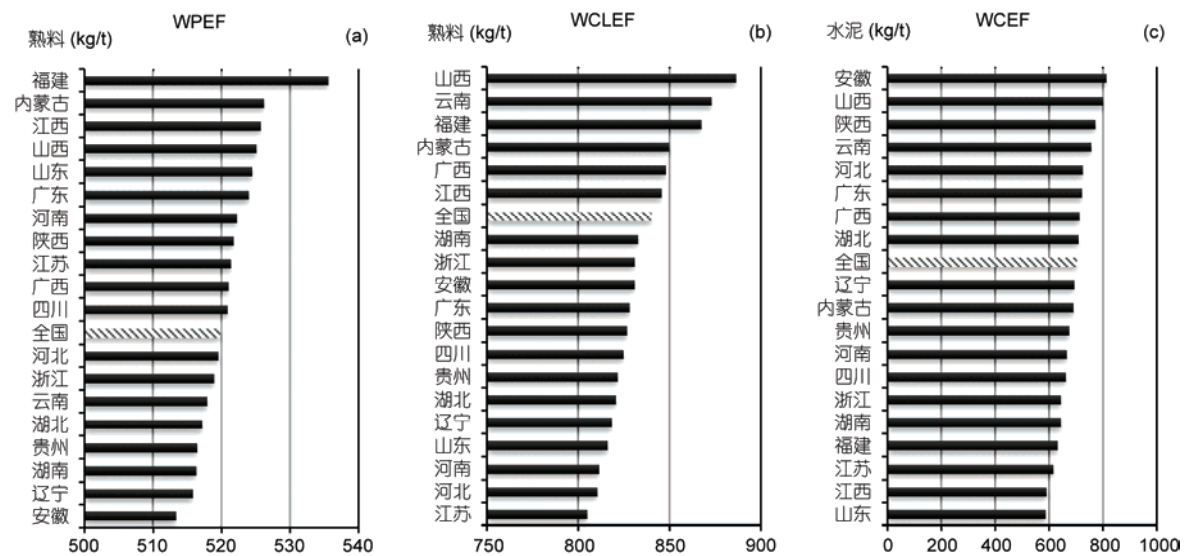


图3 新型干法各省份过程排放(a)、熟料排放(b)和水泥加权排放因子(c)
Figure 3 Weighted CO₂ emission factor of cement production from NSP kiln

表6 IPCC公布的默认排放因子推荐值^{a)}

Table 6 Default emission factors of IPCC

A	B	描述	技术/实践	参数/条件	数值	单位	数据来源
2A1	2.A.1	水泥生产的CO ₂ 排放因子			0.5071	t CO ₂ /t熟料	1996年IPCC国家温室气体清单指南修订版(参考手册2.6页)
2A1	2.A.1	熟料生产排放因子		熟料的CaO含量是65%; 碳酸钙原料的CaO含量是100%; 窑灰考虑了2%的矫正因子	0.52	t CO ₂ /t熟料	2006年IPCC国家温室气体清单指南(第3卷, 第2章, 公式2.4)
2A1	2.A.1	水泥生产的CO ₂ 排放因子			0.4985	t CO ₂ /t水泥	1996年IPCC国家温室气体清单指南修订版(参考手册2.6页)
2A1	2.A.1	水泥窑灰(CKD)矫正因子			1.02		2006年IPCC国家温室气体清单指南(第3卷, 第2章, 公式2.12)
2A1	2.A.1	水泥窑灰(CKD)矫正因子			1.02		IPCC最佳实践指南与国家温室气体清单不确定管理(第3.12页)
2A1	2.A.1	熟料比	如果水泥生产不能划分出各种类型, 建议把普通硅酸盐水泥生产中混合材或砖石水泥的比例作为熟料比		75	%(重量)	IPCC最佳实践指南与国家温室气体清单不确定管理(第3.14页)
2A1	2.A.1	熟料比	如果水泥生产不能按类型划分, 最佳做法是把它看作是普通硅酸盐水泥, 并使用此缺省值		95	%(重量)	2006年IPCC国家温室气体清单指南(第3卷, 第2章, 公式2.13); IPCC最佳实践指南与国家温室气体清单不确定管理(第3.14页)
2A1	2.A.1	熟料中CaO含量			0.65 (0.646)		1996年IPCC国家温室气体清单指南修订版(参考手册2.6页); IPCC最佳实践指南

a) A为IPCC 1996 Source/Sink Category定义的2A1-Cement production; B为IPCC 2006 Source/Sink Category定义的2.A.1-Cement production

售出的熟料)计算, CSI默认排放系数为862 kg/t熟料^[7]。

通过以上的分析测算结果, 可以判断国内外研究对中国水泥生产的碳排放因子估计与本研究的计算存在一定偏差^[15]。其主要原因有以下几种。

(i) 高估了工艺排放因子。依据《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》中的清单编制方案, 我国水泥生产的过程排放(工艺排放)是依据IPCC方法2, 而中国的水泥生产在保证熟料品质的前提下, 在生料配方中使用了一定的电石渣、钢渣、硫酸渣等替代原料。若采用方法2, 则会导致对我国水泥工艺排放的明显高估。IPCC的默认推荐值为527 kg/t熟料, 根据IPCC方法2计算的工艺排放因子为537.26 kg/t熟料。若采用前者, 则比剔除非碳酸盐来源后的计算结果(519.66 kg/t熟料)高出1.4%; 若采用后者, 则高出3.4%。

(ii) 高估了水泥生产的熟料比。调查和测算结果可以纠正国际上有关计算方法的误差, 尤其是熟料比的差异。IPCC发布的水泥生产熟料比默认值分别为75%和95%, 但2011年中国水泥生产熟料比平均只有63%, 主要是水泥产品结构以中低标号的普通硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥为主, 由此至少高估了12%~32%。

(iii) 高估了燃料的排放因子。国内外对水泥生产碳排放的研究所使用的燃料排放系数未达成共识(表7), 根据表7中的燃料排放系数计算水泥熟料生产的燃料排放因子, 这些研究与本研究新型干法水泥生产燃料(煤炭)排放因子的差异为-88.72~+20.08 kg

CO₂/t熟料(相对比值为-27.63%~+6.25%)。中国水泥技术结构最大的特色就是长时期以立窑为主体, 在“十五”期间, 立窑水泥产量占水泥总产量的比例还在80%左右波动, 2003年以后, 立窑水泥产量由升转降; 自2005年以来, 中国大量关闭和淘汰了立窑和小回转窑, 以新型干法为主体的水泥生产逐步在中国各地普及。如新型干法窑外预分解的熟料生产比重由2006年的46%快速提高到2014年的92%; 同时, 水泥生产燃煤品质的不确定性直接影响水泥生产燃料排放因子大小。调查中发现, 大量的水泥生产采用不同热值的烟煤, 因品质较差, 只能采用中国烟煤的低位发热值作为测算基础, 才能更真实反映出燃料的排放因子。

4 主要结论与建议

经过近5年的现场调研和采样测试分析, 本文取得以下的主要结论和建议:

(1) 国际上普遍采用的水泥生产碳排放因子是一个大致的估算值, 在没有能力和测试条件下, 只能作为碳排放估算结果的大致参考值, 不能作为国家气候变化谈判和企业节能减排的主要考核指标;

(2) 水泥生产的排放测算必须确定其边界范围, 区分不同的生产工艺、不同工序阶段、不同规模大小、不同品质类型、不同的区域特点; 否则, 测算的结果不能作为实际排放考核依据;

(3) 中国水泥生产类型复杂、工艺和工序以及水泥品种多样, 其活动化水平数据难以统计, 随着政策的调控, 关停的水泥企业逐年发生变化, 很难完全掌握其实际生产情况, 必须实行动态监测和严格管理;

(4) 中国的新型干法生产线单线产能持续提升, 技术进步持续增长, 国产5000 t/d及2500 t/d熟料生产线成为中国水泥生产的主流生产线, 在中国未来水泥生产节能减排进程中扮演着重要的角色;

(5) 从大量抽样调查的结果分析, 中国水泥生产的工艺排放因子如果没有原料结构的重大变革, 很难有大幅度持续下降空间, 即工艺排放因子将维持在现有水平上, 但燃料排放因子还有进一步下降的潜力和空间;

(6) 利用我们构建的水泥生产线碳排放因子测算模型, 在抽样调查现场运用, 就可以简便快速地检验数据的真实性与可靠性, 故可以将企业提供的生产线数据作为测算的主要依据, 将水泥生产碳排放

表7 水泥生产碳排放研究所采用的燃料排放系数^{a)}

Table 7 Fuel CO₂ emission factor adopted in various studies

转换为统一的计量单位 (kg CO ₂ /TJ)	文献中原始值	数据来源
96400	96.4 g CO ₂ /MJ	[16]
92800	92.8 kg CO ₂ /GJ	[17]
94600	94.6 t CO ₂ /TJ*	[18]
89500~99700	89.5~99.7 t CO ₂ /TJ	[19]
67902~92801	1.99~2.72 t CO ₂ /tce	[20]
92128	2.7 t CO ₂ /tce**	[21]
95700	26.1 kg C/GJ	[22]
83826	2.4567 t CO ₂ /tce	[23]
94686	25.8×10 ⁻⁶ kg C/kJ	[24]

a) *, 文献中的原始值为94.6 Mt/TJ, 不符实际, 因此予以修正; **, 文献中原始值为2.7 t CO₂/kg ce, 不符实际, 因此予以修正

的测算模型在水泥生产企业中广泛地推广应用,既可以实现水泥生产线碳排放测算的可靠性与简便性,又能够为企业与政府、民间的碳排放对话和沟通提供一个平等的科学依据与平台;

(7) 已有的研究成果显示,及时开展与国际相关

机构的沟通与交流,既有利于国际社会正确了解和掌握中国水泥生产实际碳排放状况,获取国际社会对中国水泥生产碳排放系数体系研究的认可,更能为中国参与气候变化谈判提供科学依据,以便使国家在环境外交中掌握更大的主动权.

致谢 感谢中国水泥协会及相关水泥企业在本课题实地调研中给予的大力支持,同时感谢中国科学院地理科学与资源研究所“水泥生产过程排放”课题组成员魏丹青、薛静静、张艳、冯丽娟、周洵、牟初夫、顾梦琛、郑宗强、杨艳、钟帅等在水泥企业调研中的辛苦工作.

参考文献

- 1 National Development and Reform Commission (NDRC). Second National Communication on Climate Change (in Chinese). Beijing: China Economic Publishing House, 2013 [国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报. 北京: 中国经济出版社, 2013]
- 2 Buendia L, Miwa K, Ngara T, et al. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Hayama, Japan. 2006
- 3 Hendriks C A, Worrell E, Price L, et al. The reduction of greenhouse gas emissions from the cement industry. International Energy Agency (IEA) Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, United Kingdom (Report PH3/7), May, 1999
- 4 International Energy Agency (IEA). World Business Council for Sustainable Development. Cement Technology Roadmap 2009-Carbon Emissions Reductions up to 2050. 2009
- 5 European Environment Agency. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2008 and inventory report 2010. 2010, 5
- 6 World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development (WRI/WBCSD). The Greenhouse Gas Protocol. Revised Edition. Washington DC: A Corporate Accounting and Reporting Standard, 2004
- 7 Cement Sustainability Initiative (CSI). CO₂ Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2005
- 8 United States Environmental Protection Agency (EPA). Climate Leaders Greenhouse Gas Inventory Protocol Core Module Guidance: Direct Emissions from Stationary Combustion Sources. 2008
- 9 United States Environmental Protection Agency (EPA). Climate Leaders Greenhouse Gas Inventory Protocol Core Module Guidance: Indirect Emissions from Purchases/Sales of Electricity and Steam. 2008
- 10 Cement Industry Federation (CIF). Annual Report on the Cement Industry Federation Greenhouse Energy Management System (GEMS). 2002
- 11 Liu L T, Zhang Y, Shen L, et al. A review of cement production carbon emission factors: Progress and prospects (in Chinese). Res Sci, 2014, 36: 110–119 [刘立涛, 张艳, 沈镭, 等. 水泥生产的碳排放因子研究进展. 资源科学, 2014, 36: 110–119]
- 12 Shen L, Gao T, Zhao J, et al. Factory-level measurements on CO₂ emission factors of cement production in China. Renew Sust Energ Rev, 2014, 34: 337–349
- 13 Zhao J A, Wei D Q. Carbon emission factors for cement plants in China (in Chinese). Res Sci, 2013, 35: 800–808 [赵建安, 魏丹青. 中国水泥生产碳排放系数测算典型研究. 资源科学, 2013, 35: 800–808]
- 14 Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. Cement Concrete Res, 2004, 34: 1489–1498
- 15 Gao T, Shen L, Shen M, et al. Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants. J Cleaner Prod, 2015, 103: 160–170
- 16 Kajaste R, Hurme M. Cement industry greenhouse gas emissions-management options and abatement cost. J Cleaner Prod, 2016, 112: 4041–4052
- 17 Xu J H, Fleiter T, Eichhammer W, et al. Energy consumption and CO₂ emissions in China’s cement industry: A perspective from LMDI decomposition analysis. Energy Policy, 2012, 50: 821–832
- 18 Hasanbeigi A, Morrow W, Masanet E, et al. Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement industry in China. Energy Policy, 2013, 57: 287–297
- 19 Ke J, McNeil M, Price L, et al. Estimation of CO₂ emissions from China’s cement production: Methodologies and uncertainties. Energy

- Policy, 2013, 57: 172–181
- 20 Wen Z, Chen M, Meng F. Evaluation of energy saving potential in China's cement industry using the Asian-Pacific Integrated Model and the technology promotion policy analysis. *Energy Policy*, 2015, 77: 227–237
- 21 Tan Q, Wen Z, Chen J. Goal and technology path of CO₂ mitigation in China's cement industry: From the perspective of co-benefit. *J Cleaner Prod*, 2016, 114: 299–313
- 22 Chen W, Hong J, Xu C. Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement. *J Cleaner Prod*, 2015, 103: 61–69
- 23 Shen W, Cao L, Li Q, et al. Quantifying CO₂ emissions from China's cement industry. *Renew Sust Energy Rev*, 2015, 50: 1004–1012
- 24 Cui S P, Liu W. Analysis of the reduction potential in Chinese cement production (in Chinese). *China Cement*, 2008, 4: 57–59 [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]

Calculation and evaluation on carbon emission factor of cement production in China

SHEN Lei¹, ZHAO JianAn¹, WANG LiMao¹, LIU LiTao¹, WANG Yan², YAO YuLong¹, GENG YuanBo¹, GAO TianMing¹ & CAO Zhi^{1,3}

¹ Institute of Geography Science and Natural Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

This article summarized the latest progress of a sub-project, Carbon Emission of Cement Production in China, undertaken by Chinese Academy of Sciences. This project seeks to establish a domestic CO₂ emissions factor calculation system for China's cement production. The Chinese-specific CO₂ emissions factor of cement production will provide a benchmark to support China's international negotiation on climate change and a baseline for setting emission reduction target. Considering the diversities in different production lines, a sampling survey of cement production lines covering various production technologies and scales has been carried out since the second half of 2011. A two-stage stratified random sampling with unequal probability is devised to ensure the sampling precision. By the end of 2015, 22 provinces have been sampled and a CO₂ emission factor inventory database consisting of 359 cement production lines has been established.

The emission factor of cement production can be divided as three components: raw material calcination emission, fuel combustion emission and indirect emission. At present, international organizations like Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and a number of developed countries have promulgated a series of calculation methods for CO₂ emissions of cement production with a default emissions factor. To provide a CO₂ emissions factor inventory better reflects the de facto situation of Chinese cement production, a bottom-up integration from factory-level to national level is proposed. Bootstrap and Monte Carlo simulation are exploited to provide the confidence intervals of the CO₂ emission factors of different production stages.

Since the Monte Carlo simulation requires parameter distribution of inputs, the probabilistic distribution function of CO₂ emission factors for each production stage is fitted by maximum likelihood estimation and bootstrap simulation. Combining the probabilistic distribution of various CO₂ emission factors, uncertainties for cement emission factors of different production technologies are simulated. The simulation results are as followings: (1) the 95% confidence interval for direct emission factor and integrated emission factor of new suspension preheater kilns are 773.63–915.01 kg CO₂/t clinker and 626.44–810.82 kg CO₂/t cement, respectively; (2) the 95% confidence interval for direct emission factor and integrated emission factor of shaft kilns are 733.00–1012.88 kg CO₂/t clinker and 534.01–728.45 kg CO₂/t cement, respectively; (3) the 95% confidence interval for direct emission factor and integrated emission factor of special cement are 517.07–1305.20 kg CO₂/t clinker and 558.09–1280.11 kg CO₂/t cement, respectively.

The simulation result shows that the process CO₂ emission of unit clinker is overestimated for 1.4%–3.4% and the clinker/cement ratio is overestimated for 12%–32% comparing to IPCC or WBCSD default emission factors. Compared to previous studies, the discrepancies of fuel emission factor are at the range of –27.63%–+6.25%. Through the quantitative evaluation and uncertainty analysis of calculation method, it is suggested that international default calculation factor is not applicable for Chinese cement industry. In addition, comparison between different scales is conducted. It is indicated that there exists significant differences between diverse scales for fuel and electricity emission factor while the process emission factors of different scales have no differences.

It is concluded that a Chinese-specific CO₂ emissions factor for Chinese cement production is recommended to estimate and evaluate the CO₂ emissions of China. Not only that, technology type, scale and regional variation should be considered in the CO₂ emission inventory of cement production. Furthermore, several proposals are put forward to direct the future research of cement CO₂ emissions accounting. Tracking the dynamic changes of sampled cement plants, establishing a complete CO₂ emission monitor framework of cement production and carrying out international exchanges and cooperation should be paid more attention on.

cement production, CO₂, carbon emission factor, sample survey, calculation method

doi: 10.1360/N972016-00037