水泥生产碳排放分类细节校正的分析和探讨

耿元波^{①*}, 魏军晓^{①②}, 沈镭^①, 岑况^②

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

* 联系人, E-mail: gengyb@igsnrr.ac.cn

2014-08-11 收稿, 2014-10-27 接受, 2014-12-25 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(XDA05010400)资助

摘要 水泥生产碳排放分类是精确测算碳排放因子的前提, 基于对水泥生产各环节的生料、熟料、燃煤和窑灰的碳酸盐和有机碳的定量分析, 认为对目前主流分类进行细节校正十分必要. 抽样分析如下: (1) 生料(A)、熟料(B)、燃煤(D)和窑灰(E)均含无机碳和有机碳, 新型干法窑样品的无机碳含量分别为 74.00%~82.06%(A), 0.01%~0.17%(B)和 0.39%~3.12%(D), 有机碳含量为 0.02%~0.41%(A), 0.01%~0.22%(B)和 56.78%~88.52%(D), 立窑样品的无机碳含量分别为 66.93%~76.70%(A), 0.01%~0.17%(B)和 3.57%~68.52%(E), 有机碳含量为 2.56%~9.96%(A), 0.01%~0.28%(B)和 0.04%~7.11%(E); (2) 校正后新型干法窑的无机碳排放因子为 522 kg CO₂/t_{cl}, 有机碳排放因子为 265 kg CO₂/t_{cl}, 碳排放因子为 787 kg CO₂/t_{cl}, 立窑的无机碳排放因子为 505 kg CO₂/t_{cl}, 有机碳排放因子为 334 kg CO₂/t_{cl}, 碳排放因子为 839 kg CO₂/t_{cl}. 按照该种分类, 两种工艺类型的碳排放因子分别较校正前的结果低约 50 和 90 kg CO₂/t_{cl}.

关键词

碳排放
碳酸盐
有机碳
无机碳排放
有机碳排放

水泥生产碳排放是三大CO₂人为排放源之一^[1~3], 占人为排放量的5%~7%^[4~7], 占全球人为增温潜势的10%^[8]. 水泥生产碳排放分类是精确测算碳排放因子的前提, 目前国际上对碳排放分类划分的权威机构主要有WRI/WBCSD和IPCC, WRI/WBCSD分类(http://www.wbcsdcement.org/pdf/tf1_co2%20protocol%20v3.pdf)详见图1, 而IPCC(www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_2_Ch2_Mineral_Industry.pdf)指出水泥碳排放仅包括熟料煅烧过程由碳酸盐矿物分解排放的CO₂, 消耗燃料产生的CO₂相关排放应纳入能源相关的排放.

我国水泥年产量自1985年一直居于世界首位, 水泥生产的碳排放是必须关注的问题, 但国内一直没有较为统一的碳排放分类和排放因子测算方法. 目前国内外水泥碳排放主流分类有两种: 一种分为直接排放和间接排放^[9~13], 另一种分为工艺排放、燃

料燃烧排放和间接排放^[14], 两种分类都没有对熟料中存在的少量或微量的碳酸盐和有机碳进行扣除, 并且将燃煤中的碳全部视为有机碳, 这两种分类尚未达到精确测算碳排放因子的目的. 由于生料和燃煤中均存在无机碳和有机碳, 因此建议对上述分类中的直接排放进行细节校正, 即考虑并区分熟料和燃煤中的无机碳和有机碳.

1 研究方法

水泥生产过程排放CO₂的环节主要为熟料煅烧阶段, 该过程主要包括生料中由碳酸盐矿物分解和少量有机碳以及燃料燃烧排放的CO₂, 其CO₂排放量约占全过程排放总量的90%~95%^[15,16]; 间接排放CO₂环节主要包括原料、燃料的开采和运输, 水泥成品运输以及全部生产过程中扣除余热发电的外购电力消耗等, 由于缺少间接排放的数据, 本次研究暂不

引用格式: 耿元波, 魏军晓, 沈镭, 等. 水泥生产碳排放分类细节校正的分析和探讨. 科学通报, 2015, 60: 206~212

Geng Y B, Wei J X, Shen L, et al. Redefining CO₂ emission classification and measurement for cement production (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 206~212, doi: 10.1360/N972014-00781

探讨间接排放。本研究以全国抽样调查的部分新型干法窑和立窑生产线为研究对象,其中新型干法窑23条,立窑13条,采集和分析的样品主要包括生料、熟料、燃煤和窑灰等,上述所选36条水泥生产线概况见表1。

1.1 实验及数据处理方法

水泥生产线上与碳排放密切相关的样本有生料(A)、熟料(B)、燃煤(D)、窑灰(主要是立窑工艺中的,E),测试项目包括无机碳、有机碳、烧失量、钙和镁等,采用方法分别为气量法^[17]、重铬酸钾容量法^[18]、

灼烧差减法^[19]、EDTA滴定法(或称基准法)^[20]和差减法(或称代用法)^[20],分析质量用国家标准物质样品GBW03203a(生料)、GBW03204a(熟料)、GBW11107n(煤)和GBW07135(石灰石)以及平行样品进行控制,每批次样品测试结果的准确度及精密度均满足要求。

用Excel 2007, SPSS 17.0和SigmaPlot 12.0进行数据分析,用OriginPro8成图。

1.2 测算方法

目前我国水泥生产工艺主要包括新型干法窑和立窑^[21],因此仅对这两种生产工艺作一探讨。

图1 WRI/WBCSD的水泥生产碳排放分类方法. 根据WRI/WBCSD的报告绘制

Figure 1 CO₂ emission classification for cement production by WRI/WBCSD. This figure is drawn according to the report of WRI/WBCSD

表1 36条生产线概况^{a)}

Table 1 Overview of 36 cement production lines

生产工艺	产能(t/d)	生料组成比例(以95%置信区间计)(%)	水泥产品类别和标号
新型干法窑	1000, 1300, 1500, 2500, 3000, 3200, 3500, 4000, 5000, 6500等	L.O.I: 35.49~35.74; IC(以CaCO ₃ 表示): 79.06~80.28; Ca(以CaO表示): 43.86~44.72; Mg(以MgO表示): 0.86~1.64; OC: 0.05~0.10	P.C 32.5, P.O 32.5(R), P.O 42.5(R), P.O 52.5等
立窑	300, 330, 500	L.O.I: 37.97~38.73; IC(以CaCO ₃ 表示): 66.92~70.54; Ca(以CaO表示): 38.88~40.62; Mg(以MgO表示): 1.05~2.25; OC: 6.63~7.72	P.C 32.5, P.C 42.5等

a) L.O.I, 烧失量; IC, 无机碳; OC, 有机碳

(1) 新型干法窑的碳排放因子测算见式(1)和(2):

$$EF_{IC} = \left(R_{RM}^{IC} \times \frac{1-G_A}{1-L} + R_C^{IC} \right) \times 1000 \times \eta, \\ \eta = \frac{A_{IC} - B_{IC}}{A_{IC}} \times 100, \quad (1)$$

式中, EF_{IC} 为生产单位熟料所需生料和燃煤中的无机碳煅烧所排放的 CO_2 , $kg\ CO_2/tonne-clinker$ (以下简写 $kg\ CO_2/t_{cl}$); R_{RM}^{IC} 为单位生料的 CO_2 含量, %; G_A 为燃煤灰分掺入熟料中的质量分数, %; L 为生料烧失量, %; R_C^{IC} 为生产单位熟料所需燃煤中的无机碳含量, %; η 为碳酸盐分解率; A_{IC} 为生料、燃煤中碳酸盐含量, %; B_{IC} 为熟料中碳酸盐含量, %.

$$EF_{OC} = \left(R_{RM}^{OC} \times \frac{1-G_A}{1-L} + R_C^{OC} \right) \times \frac{44}{12} \times \lambda, \\ \lambda = \frac{A_{OC} - B_{OC}}{A_{OC}} \times 100, \quad (2)$$

式中, EF_{OC} 为生产单位熟料所需生料和燃煤中有机碳燃烧所排放的 CO_2 , $kg\ CO_2/t_{cl}$; R_{RM}^{OC} 为单位生料中所含有机碳含量, %; R_C^{OC} 为生产单位熟料所需燃煤中的有机碳含量, %; $44/12$ 为有机碳到 CO_2 的转换系数; λ 为有机碳燃烧率, %; A_{OC} 为生料、燃煤中的有机碳含量, %; B_{OC} 为熟料中的有机碳含量, %.

(2) 目前我国立窑工艺多采用全黑生料进行生产^[22], 即将煅烧所用煤全部配入生料磨, 因此熟料煅烧所需生料和燃煤的排放因子只需考虑生料中的无机碳和有机碳含量即可, 立窑碳排放因子测算见式(3)和(4):

$$EF_{IC} = \left(R_{RM}^{IC} \times \frac{1}{1-L} - U_{CKD} \times CKD_{IC} \right) \times 1000 \times \eta, \quad (3)$$

$$EF_{OC} = \left(R_{RM}^{OC} \times \frac{1}{1-L} - U_{CKD} \times CKD_{OC} \right) \times \frac{44}{12} \times \lambda, \quad (4)$$

式中, R_{RM}^{IC} 为单位全黑生料中的无机碳煅烧所排放的 CO_2 , %; U_{CKD} 为生产单位熟料所排放窑灰的总量, $kg\ CKD/t_{cl}$, 如缺少测定值可取经验值, 即熟料产量的2%(www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_2_Ch2_Mineral_Industry.pdf; 2006和www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/3_Industry.pdf; 2000); CKD_{IC} 为单位窑灰中的 CO_2 值, $kg\ CO_2/kg\ CKD$; R_{RM}^{OC} 为单位全黑生料中的有机碳含量, %; CKD_{OC} 为单位窑灰中的有机碳含量, %.

2 结果与分析

通过实验结果可知, 熟料中含有极少量未分解的碳酸盐和未燃烧的有机碳. 使用同位素^[23,24]可以确定无机碳和有机碳是来源于生料还是燃煤, 但使用该法费用将大幅增加. 如分别考虑生料、熟料、燃煤和窑灰中的无机碳和有机碳, 则可以规避该问题, 使结果更为准确.

2.1 新型干法碳排放分类的结果分析与排放因子测算

使用23条新型干法生产线的样品数据对校正后的结果进行分析与排放因子测算. 由于新型干法窑的窑灰大部分都会入窑, 而旁路放风粉尘的成分又近于熟料^[25], 因此新型干法窑的排放因子只考虑窑尾生料、窑头熟料和燃煤中的无机碳和有机碳含量即可. 新型干法窑的生料、熟料和燃煤中的无机碳和有机碳含量及分析见表2. 在考虑碳酸盐分解率和有机碳燃烧率之后, 所得我国新型干法工艺的无机碳排放因子为522 $kg\ CO_2/t_{cl}$, 有机碳排放因子为265 $kg\ CO_2/t_{cl}$, 碳排放因子为787 $kg\ CO_2/t_{cl}$, 该结果较主流分类的结果832 $kg\ CO_2/t_{cl}$ 低近50 $kg\ CO_2/t_{cl}$.

2.2 立窑碳排放分类的结果分析与排放因子测算

立窑属于高能耗、高污染的落后工艺, 但是由于我国地域幅员辽阔, 各地经济发展和资源存储、开采情况不平衡, 该种生产工艺仍存在于我国的部分市区. 立窑生产企业用13条生产线进行样品分析与排放因子测算, 立窑生料、熟料和窑灰的无机碳、有机碳含量及分析见表3. 如前所述, 由于立窑生料中燃煤的配入, 全黑生料中的有机碳会较白生料、半黑生料或新型干法生料的有机碳高很多, 对45个全黑生料样本(包括其他生产线的全黑生料样本)数据进行单样本 t 检验, 全黑生料有机碳含量的95%置信区间为5.47%~6.19%, 平均值为5.83%, 其统计分析见图2. 校正后计算得我国立窑工艺的无机碳排放因子为505 $kg\ CO_2/t_{cl}$, 有机碳排放因子为334 $kg\ CO_2/t_{cl}$, 碳排放因子为839 $kg\ CO_2/t_{cl}$, 该结果较主流分类921 $kg\ CO_2/t_{cl}$ 低近90 $kg\ CO_2/t_{cl}$.

通过上述的标准偏差可看出, 不同厂家或不同生产线的窑灰中碳酸盐含量相差较大. 13个窑灰样品中的碳酸盐含量的变异系数为44.14%. 因此, 不同

表2 新型干法工艺的生料、熟料和燃煤的无机碳、有机碳含量及分析结果

Table 2 Contents of inorganic and organic carbon in the raw material, clinker and coal for NSP kilns

样品 类型	无机碳		有机碳		样本数(个)
	含量(%)	碳酸盐分解率(%)	含量(%)	有机碳燃烧率(%)	
A	74.00~82.06		0.02~0.41		23
B	0.01~0.17	99.95	0.01~0.22	99.69	
D	0.39~3.12		56.78~88.52		22

表3 立窑的生料、熟料和窑灰的无机碳、有机碳含量及分析结果

Table 3 Contents of inorganic and organic carbon in the raw material, clinker and coal for shaft kilns

样品 类型	无机碳		有机碳		样本数(个)
	含量(%)	碳酸盐分解率(%)	含量(%)	有机碳燃烧率(%)	
A	66.93~76.70		2.56~9.96		
B	0.01~0.17	99.39	0.01~0.28	97.59	13
E	3.56~68.52	35.26	0.04~7.11	42.42

图2 立窑全黑生料有机碳含量频率分布

Figure 2 Frequency distribution of organic carbon in the black raw material for shaft kilns

生产线的窑灰煅烧程度相差较大。

3 讨论

3.1 燃煤中的碳含量

水泥用煤分析主要包括水分、灰分、挥发分、发热量和全硫以及煤灰成分等,通常不涉及煤中有机碳和无机碳的问题。煤中碳酸盐二氧化碳的含量一般为0~3.5%^[26]。如考虑煤中的碳酸盐二氧化碳,那么煤燃烧的CO₂排放量计算公式应为: $EF_{CO_2} = (C_{OC} \times 44/12 + C_{IC} \times 44/60)$ (其中C_{OC}为生产单位熟料所需燃煤中的有机碳;C_{IC}为生产单位熟料所需燃煤中的碳酸盐;44/60为碳酸盐到CO₂的转换系数)。因此,如果按

照 $EF_{CO_2} = C_{def} \times 44/12$ ^[27] 来计算煤燃烧的CO₂排放量会使结果偏大。燃煤灰分的钙、镁和碳酸盐回归分析表明($n=19$), $R^2=0.129$ 拟合质量较差,但是灰分钙、镁和燃煤碳酸盐均符合正态性检验($P=0.122$)和常数方差检验($P=0.461$)。因此,煤中的钙和镁还会以其他形式存在,例如钙会以硫酸盐(主要是石膏)、磷酸盐、硅酸盐和有机状态存在,镁会存在于黏土矿物中或以有机态存在^[28]。该问题也说明了对直接排放进行校正后来进行碳排放因子测算的合理性。

3.2 熟料的烧失量及其中的碳酸盐和有机碳

烧失量是物料在水泥窑煅烧过程中失去结晶水、碳酸盐分解释放CO₂,硫酸盐分解释放SO₂以及有机杂质被排出后物量损失的过程。图3为新型干法窑和立窑的生料和窑灰烧失量与有机碳和碳酸盐二氧化碳之和的关系对比图。由图3可知,窑灰的烧失量与有机碳和碳酸盐二氧化碳之和的线性关系($R^2=0.9707$)要高于新型干法窑($R^2=0.0270$)和立窑($R^2=0.0902$)生料的3种化学成分的线性关系,这可能与不同生料样品间的挥发损失相差太大等因素有关;由图3还可看出,无论是新型干法还是立窑,不同生产线间的生料烧失量都相差无几,所以除生产单位使用替代原料和替代燃料等特殊情况下,企业间的生料配料相差不多。由于窑灰相当于10%~20%的熟料成分,其中的结合水等挥发物质几乎不存在,因此可将熟料烧失量近似看成碳酸盐二氧化碳和有机碳之和。

对87个新型干法和57个立窑熟料样本(含上述23

图3 烧失量与有机碳和碳酸盐二氧化碳之和的回归分析
Figure 3 Regression analysis of loss on ignition and the sum of organic carbon and carbon dioxide in carbonate

条新型干法生产线和13条立窑生产线的熟料样品)进行单样本 t 检验. 结果表明, 两种水泥窑熟料烧失量的95%置信区间分别为0.45%~0.65%和1.12%~1.65%. 由此可见, 立窑熟料烧失量明显高于新型干法窑熟料烧失量, 并且与立窑熟料的无机碳和有机碳含量均高于新型干法窑熟料的无机碳和有机碳含量(表2和3对比)趋势相一致. 对于新型干法窑, 熟料中碳酸盐和有机碳的存在应该与生料的粉磨粒度, 预分解窑内物料的运动速度、停留时间和物料填充以及回转窑内的鼓风情况(如窑内气体流速和企业所处的纬度、海拔-纬度、海拔高, 氧气稀薄, 鼓风量需增大)、传热(包括燃料、物料、窑衬和窑皮之间)等因素有关^[29]; 对于立窑工艺, 其巨大的能量损耗和料球

的物理性质、窑内流场、温度场等原因都可能导致燃料的不完全燃烧^[30], 生料成球不理想、鼓风较差和卸料较快等原因应该是熟料中存在碳酸盐和有机碳的主要原因. 熟料中无机碳和有机碳的存在表明, 对直接排放进行校正后再进行碳排放因子测算会更合理且更准确.

4 结论

对水泥熟料的定量分析表明, 熟料中确实含有少量或微量的碳酸盐和有机碳, 并且可视熟料烧失量为碳酸盐二氧化碳和有机碳之和, 如果不考虑其中的碳酸盐和有机碳会使计算结果偏大; 对新型干法窑燃煤样品(烟煤)进行碳酸盐分析, 结果表明其中的碳酸盐二氧化碳平均含量约为1.4%, 如果把其中的碳全部按有机碳形式来计算, 也会导致结果偏大. 因此, 若要精确测算水泥生产碳排放因子, 则有必要区分其中的无机碳和有机碳. 将现有的主流分类进行校正后再进行碳排放因子的测算, 既可以不用同位素方法就直接对熟料中存在的无机碳和有机碳进行扣除, 又可以对燃煤中的无机碳和有机碳进行区分. 利用该种分类方法计算得新型干法工艺的无机碳排放因子为522 kg CO₂/t_{cl}, 有机碳排放因子为265 kg CO₂/t_{cl}, 排放因子为787 kg CO₂/t_{cl}, 立窑工艺的无机碳排放因子为505 kg CO₂/t_{cl}, 有机碳排放因子为334 kg CO₂/t_{cl}, 碳排放因子为839 kg CO₂/t_{cl}. 校正后两种工艺类型的碳排放因子分别较主流分类的结果低约50和90 kg CO₂/t_{cl}.

参考文献

- 1 Szabó L, Hidalgo I, Ciscar J C, et al. CO₂ emission trading within the European Union and Annex B countries: The cement industry case. *Energy Policy*, 2006, 34: 72–87
- 2 Benhelal E, Zahedi G, Shamsaei E, et al. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *J Clean Prod*, 2013, 51: 142–161
- 3 Xu J H, Fleiter T, Fan Y, et al. CO₂ emissions reduction potential in China's cement industry compared to IEA's Cement Technology Roadmap up to 2050. *Appl Energ*, 2014, 130: 592–602
- 4 Hendriks C A, Worrell E, De Jager D, et al. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. 1998. 939–944
- 5 Deja J, Uliasz-Bohenczyk A, Mokrzycki E. CO₂ emissions from Polish cement industry. *Int J Greenh Gas Con*, 2010, 4: 583–588
- 6 Pearce F. Green foundations. *New Sci*, 2002, 175: 39–40
- 7 McLellan B C, Williams R P, Lay J, et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *J Clean Prod*, 2011, 19: 1080–1090
- 8 Anand S, Vrat P, Dahiya R P. Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO₂ emissions from the cement industry. *J Environ Manage*, 2006, 79: 383–398

- 9 Shen L, Gao T M, Zhao J A, et al. Factory-level measurements on CO₂ emission factors of cement production in China. *Renew Sust Energ Rev*, 2014, 34: 337–349
- 10 Worrell E, Price L, Martin N, et al. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annu Rev Energ Env*, 2001, 26: 303–329
- 11 Ali M, Saidur R, Hossain M. A review on emission analysis in cement industries. *Renew Sust Energ Rev*, 2011, 15: 2252–2261
- 12 Wang Y, Zhu Q, Geng Y. Trajectory and driving factors for GHG emissions in the Chinese cement industry. *J Clean Prod*, 2013, 53: 252–260
- 13 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
- 14 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]
- 15 Teller P. Use of LCI for the decision-making of a Belgian cement producer: A common methodology for accounting CO₂ emissions related to the cement life cycle. In: 8th LCA Case Studies Symposium SETAC-Europe. 2000
- 16 Mikulčić H, Vujanović M, Duić N. Reducing the CO₂ emissions in Croatian cement industry. *Appl Energ*, 2013, 101: 41–48
- 17 LY/T1250-1999. Determination of calcium carbonate in forest soil (in Chinese). 1999 [LY/T1250-1999. 森林土壤碳酸钙的测定. 1999]
- 18 Schumacher B A. Methods for the Determination of Total Organic Carbon (TOC) in Soils and Sediments. Washington DC: US Environmental Protection Agency. 2002
- 19 GB/T 176-2008. Methods for chemical analysis of cement (in Chinese). 2008 [GB/T 176-2008. 水泥化学分析方法. 2008]
- 20 Ma Z Z. Cement Laboratory Handbook (in Chinese). Beijing: China Building Materials Industry Press, 2009. 325–326 [马振珠. 水泥实验室工作手册. 北京: 中国建材工业出版社, 2009. 325–326]
- 21 Lei Y, Zhang Q, Nielsen C, et al. An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990–2020. *Atmos Environ*, 2011, 45: 147–154
- 22 Xiao Z M, Li L J. Cement Technology (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 246–269 [肖争鸣, 李坚利. 水泥工艺技术. 北京: 化学工业出版社, 2006. 246–269]
- 23 Andres R J, Marland G, Boden T, et al. Carbon Dioxide Emissions From Fossil Fuel Consumption and Cement Manufacture 1751 to 1991 and An Estimate of Their Isotopic Composition and Latitudinal Distribution. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 53–62
- 24 Meijer H, Smid H, Perez E, et al. Isotopic characterisation of anthropogenic CO₂ emissions using isotopic and radiocarbon analysis. *Phys Chem Earth*, 1996, 21: 483–487
- 25 He H T. Carbon dioxide emission in cement production and the quantitative research (in Chinese). *Cement Eng*, 2009, 1: 61–65 [何宏涛. 水泥生产二氧化碳排放分析和定量化探讨. *水泥工程*, 2009, 1: 61–65]
- 26 Liu Y, Guo Y H. The study oil the determination of carbon dioxide of carbonate in oil shale (in Chinese). *Coal Qual Technol*, 2009, 5: 25–26 [刘泳, 郭玉红. 油页岩碳酸盐二氧化碳含量的测定方法研究. *煤质技术*, 2009, 5: 25–26]
- 27 Stefanović G M, Vučković G D, Stojiljković M M, et al. CO₂ reduction options in cement industry: The Novi Popovac case. *Therm Sci*, 2010, 14: 671–679
- 28 Ren D Y, Zhao F F, Dai S F, et al. Trace Element Geochemistry of Coal (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006. 61–85 [任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学. 北京: 科学出版社, 2006. 61–85]
- 29 Li H T, Guo X J, Wu W W. Technology and Equipment of NSP Cement (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2011. 185–198 [李海涛, 郭献军, 吴武伟. 新型干法水泥生产技术与设备. 北京: 化学工业出版社, 2011. 185–198]
- 30 Lin Z S. “Hundred Thousand” Whys of Cement ⑩. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2012. 106–107 [林宗寿. 水泥“十万”个为什么⑩. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2012. 106–107]

Redefining CO₂ emission classification and measurement for cement production

GENG YuanBo¹, WEI JunXiao^{1,2}, SHEN Lei¹ & CEN Kuang²

¹*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

²*School of the Earth and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

Our premise was to measure carbon dioxide (CO₂) emission factors accurately to classify CO₂ emissions from cement production. We quantitatively analyzed carbonate and organic carbon in the raw material, clinker, coal, and cement kiln dust for two types of cement kilns. All samples of raw material (A), clinker (B), coal ash (D) and cement kiln dust (E) contained carbonate (inorganic carbon) and organic carbon. The range of inorganic carbon contents (%) for NSP kiln samples were 74.00–82.06 (A), 0.01–0.17 (B) and 0.39–3.12 (D), while their organic carbon contents (%) were 0.02–0.41 (A), 0.01–0.22 (B) and 56.78–88.52 (D). In contrast, the inorganic carbon contents (%) for shaft kiln samples for these same materials were 66.93–76.70 (A), 0.01–0.17 (B) and 3.57–68.52 (E), while their organic carbon contents were 2.56–9.96 (A), 0.01–0.28 (B) and 0.04–7.11 (E). Using this scheme, we calculate that the inorganic carbon emission factors for the NSP kiln are 522 kgCO₂/t_{cl}, while organic carbon emission factors are 265 kgCO₂/t_{cl}, CO₂ emission factors are 787 kgCO₂/t_{cl}. For the shaft kiln, inorganic carbon emission factors and organic carbon emission factors are 505 and 334 kgCO₂/t_{cl} respectively, while CO₂ emission factors are 839 kgCO₂/t_{cl}. Using our new calculation method, the emission factors for the NSP and shaft kilns are respectively 50 and 90 kgCO₂/t_{cl} lower than results based on a mainstream classification.

CO₂ emissions, carbonate, organic carbon, inorganic carbon emissions, organic carbon emissions

doi: 10.1360/N972014-00781