

引用格式:高天明,沈镭,赵建安,等. 中国水泥熟料排放系数差异性及其区域减排策略选择[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2358-2367. [Gao T M, Shen L, Zhao J A, et al. Differences in the emission coefficients of cement clinkers and selection method for regional emission reduction[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2358-2367.] DOI: 10.18402/resci.2017.12.14

中国水泥熟料排放系数差异性及其区域减排策略选择

高天明^{1,2,4,5}, 沈 镭^{2,3}, 赵建安^{2,3}, 王礼茂^{2,3}, 刘立涛², 钟 帅²

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
5. 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037)

摘 要:水泥熟料是主要的CO₂排放源,其排放系数受原料种类和品质、生产工艺、生产规模等多种因素的影响。分析中国各地区熟料排放的差异性、减排潜力和策略选择,可以为区域降低熟料排放的方法和政策选择提供决策支持。本文以全国22省市中182条新型干法生产线和75条立窑生产线为样本,对中国水泥熟料排放系数差异性进行了分析,结论认为:①生产工艺的排放差异:立窑熟料排放系数高于新型干法;②生产规模的差异:随着生产规模的增加,燃料排放、电力排放呈现降低的趋势,而工艺排放则不受此影响;③熟料排放系数呈现从东部沿海向西部内陆逐渐增加的态势,从熟料排放系数构成来看,熟料高MgO含量将导致高的工艺排放,原料替代减排主要集中在钢铁和磷生产集中的华北和西南地区;高寒区域和西南地区也是高能源强度和高燃料排放的区域。论文进一步分析了工艺替代、规模生产和原料替代三种方式在调研省区的减排潜力,根据各种方法减排量所占份额,将驱动区域减排的方式选择归纳为单因素、双因素和均衡发展三种类型。文章认为调研区域应根据三种方式的份额,有目的地选择减排方式和设计相应的减排政策。

关键词:水泥熟料;排放系数;差异性;区域减排策略;中国

DOI: 10.18402/resci.2017.12.14

1 引言

水泥工业是以矿产资源为基本原料、以化石能源为主要燃料且具有“高资源、高能源”消耗、“高排放”的产业。水泥工业是主要的CO₂排放行业,约占世界CO₂排放的7%^[1]。自1985年以来,中国水泥产量已30多年位居世界第一。2016年中国水泥产量24.03亿t,占世界产量的57.21%^[2],水泥生产的CO₂排放量约为12.27亿t^[3]。水泥行业的迅速发展所带来的资源、能量消耗和污染排放问题日趋严重,使国家和区域经济社会的可持续发展面临严峻的挑战。

学者基于不同的计算方法、生产工艺、原料燃料消耗,对中国水泥生产的CO₂排放进行了研究,估

算的CO₂排放系数有较大的差异。在比较国际和国内学者水泥生产CO₂排放测算方法的基础上^[4,5],讨论了其在中国的适应性,提出了中国水泥生产的碳排放因子计算方法选择^[4]。从生产工艺来看,Hu等分析了新型干法和立窑两种生产工艺的污染排放^[6]。Shen等基于企业生产数据研究了主要生产工艺熟料和水泥的排放系数,并比较了不同工艺排放系数的差别^[7]。生产规模也导致排放系数的差异,赵建安比较了2500t/d和5000t/d两种典型生产规模的排放差别,并分析了差异的原因^[8]。水泥熟料排放与生产工艺、原料种类和品质、能源效率有关,同时也受生产经验、管理水平等影响。而学者对区域排放差异的研究则很少,研究水泥熟料的区域差异和成

收稿日期:2017-09-07;修订日期:2017-11-10

基金项目:科技部国家重点研发计划(2016YFA0602802);国家自然科学基金青年项目(41501590;41501604)。

作者简介:高天明,男,山西长治市人,博士,副研究员,主要研究方向为资源经济与资源政策。E-mail: gaoming0920@aliyun.com

通讯作者:沈镭, E-mail: shenl@igsrr.ac.cn

2017年12月

因,为区域减排方法和策略选择指导方向。

水泥生产过程中CO₂排放主要来自工艺排放、燃料排放和电力间接排放三方面,所占比重分别为:50%,40%和10%^[9]。为了降低水泥熟料的排放系数,学者在燃料、工艺减排方面进行了深入的研究。技术更新和提高能效等减少水泥生产的能源排放方面,干法窑比湿法窑消耗电能低13%,消耗的燃料低28%^[10],Ali等研究了各种煅烧水泥窑和辅助设备对热能消耗的情况,并比较了不同水泥窑生产工艺的能源强度,认为多级旋风预热新型干法窑能显著地降低燃料排放^[11]。因此,用新型干法窑替代落后水泥窑也是CO₂减排的主要途径之一。刘静等关注电石渣、钢渣、镁渣替代石灰石原料,降低水泥生产过程CO₂减排,认为电石渣可完全替代石灰质原料生产水泥熟料^[12]。Gao等研究了不同电石渣替代率的减排效果^[13]。钢渣中含有40%的CaO,与石灰石中的CaO含量相近,在生料中掺入钢渣可部分替代石灰石和铁粉,生产水泥熟料。钢渣作为替代原料并不影响水泥熟料的矿物学特征^[14]。Iacobescu等研究了10%、17%和27%三种情况下钢渣掺入量与石灰石、石膏、铝土矿共同配比制造水泥熟料的可行性^[15]。而钢渣掺入量达到25%时,表

现出了早期机械强度低^[16]。当钢渣的含量为15%时,水泥性能达到最佳水平^[17]。董效林研究发现镁渣加入生料配料中,具有广阔的减排前景^[18]。

学者在燃料、原料减排方面进行了深入的研究,但区域生产的差异、生产规模的不同、替代原料种类和规模的差别,都将决定区域的减排潜力。而在这方面学者少有研究,本文基于中国科学院战略先导专项的抽样调查数据,基于区域生产工艺、规模,可替代原料的种类和数量等,分析调研省区的减排潜力及减排方法,为区域降低熟料CO₂排放方法和政策选择提供决策支持。

2 数据来源与核算方法

2.1 数据来源

课题组在2011—2015年间对全国22省市351条水泥生产线进行了调研,其中新型干法182条,立窑75条,粉磨站和特种水泥94条。本文主要研究水泥熟料排放的差异,因此仅对新型干法和立窑两种主要生产工艺进行分析(图1)。在项目的调研过程中,收集的数据内容包括:企业名称,地理位置,生产线条数,生产线规模,熟料年产量,水泥年产量,燃料年消耗量,原料、生料、熟料、燃料化学成分,燃料工业分析,生料配比构成,生产三阶段电力

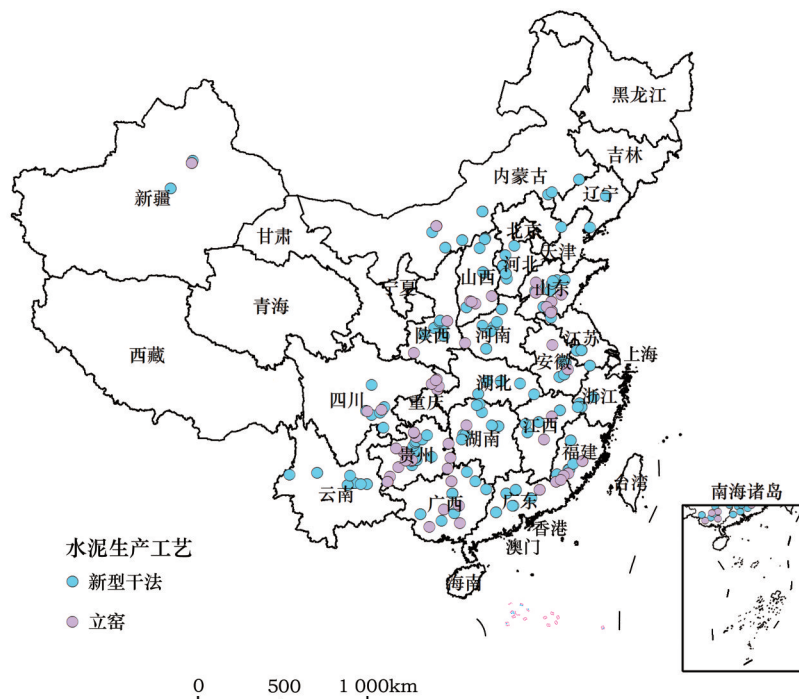


图1 采样水泥生产线分布

Figure 1 Location of surveyed cement production lines

消耗,余热发电量等。为了真实地反映排放情况和减少误差,所有数据均采用企业正常生产情况下的年均值数据。

2.2 排放核算方法

水泥熟料工艺排放即原料碳酸盐矿物分解产生的排放。工艺排放测算方法有生料法和熟料法两种。熟料法基于熟料中CaO和MgO的含量,并假定熟料中的CaO和MgO均来自于碳酸盐原料。这种方法虽然解决了生料法工作量大、成本高的缺点,但可能导致排放系数的高估,特别是非碳酸盐原料,钢渣、粉煤灰、电石渣等作为原料在生料配比中的使用。基于以上核算方法的不足,Gao等提出基于常规检验的工艺排放测算方法。该方法基于生料中的料耗强度及其碳酸盐含量(公式(1))^[13]。生料碳酸盐含量计算如公式(2)所示,它基于生料配比和碳酸盐原料化学构成。料耗强度是熟料扣减煤灰掺入量后对生料的消耗。根据质量守恒定律,得到料耗强度的计算公式为:

$$EF_{pr} = Ra_{CO_2} \times r_a \times 1000 \quad (1)$$

式中 EF_{pr} 为熟料工艺排放系数(kg/t_{cl}); Ra_{CO_2} 为生料中的CO₂含量(%); r_a 为料耗强度(t/t_{cl});

$$Ra_{CO_2} = \sum (Rca_i \times r_i \times \frac{44}{56} + Rmg_i \times r_i \times \frac{44}{40}) \quad (2)$$

($i = 1, 2, \dots, n$)

式中 Rca_i , Rmg_i 分别为原料*i*中的碳酸钙和碳酸镁的含量(%); r_i 为原料*i*在生料配比中的比例(%)。

$$r_a = \frac{1 - C_{cl} \times A_c}{1 - R_1} \quad (3)$$

式中 C_{cl} 为熟料能源强度(t/t_{cl}); A_c 为燃料灰分(%); R_1 为生料烧失量(%)。

燃料排放是熟料煅烧过程中燃料燃烧产生的CO₂排放。其核算方法为基于燃料消耗量,低位发热值及其对应的排放系数^[19]。电力排放(EF_{poe})是原料粉磨、熟料煅烧过程中电力消耗而产生的排放。不同的国家通常使用相同的方法核算电力排放,即:电力消耗量×电力排放因子。

3 熟料排放差异分析

3.1 生产工艺、规模排放差异分析

从熟料主要生产工艺来看,立窑熟料排放系数(893.53kg/t_{cl})高于新型干法(856.78kg/t_{cl})。在

影响熟料的主要指标中(表1),立窑生产工艺在电力消耗、碳酸盐类需求量方面要小于新型干法,这两方面在排放中的表现为:立窑工艺的电力排放小于新型干法,但燃料排放大于新型干法生产工艺。目前,中国立窑的燃料排放系数为325.48kg/t_{cl},而新型干法的排放则为292.51kg/t_{cl},余热发电的减排量为22.99kg/t_{cl}。从熟料构成来看,新型干法CaO含量(65.26%)高于立窑(64.44%),而MgO含量两者差别不大。在替代原料减排方面,立窑的减排量更大一些(10.21kg/t_{cl} > 7.44kg/t_{cl})。因此,导致立窑的工艺排放系数(521.23kg/t_{cl})小于新型干法(526.39kg/t_{cl})。

为了研究规模变化对排放系数的影响,本文将新型干法生产线分成五类(<2000t/d, (2000~2500)t/d, (3000~4000)t/d, (4000~5000)t/d, 和>5000t/d),将立窑分成了四类(≤300t/d, (500~900)t/d, 1000t/d 和 >1000t/d)。从两种主要生产工艺不同规模的排放来看(图2),两种工艺均表现出了随着规模的增加,燃料排放、电力排放降低的趋势。

而生产规模的变化则对工艺排放影响不大。由图3可知,熟料中CaO、MgO含量并未随着生产规模的变化而变化,不同规模新型干法熟料中的CaO平均含量均>65%,而不同规模立窑的CaO平均含量均<65%。两种生产工艺熟料CaO含量差别导致的工艺排放差为6.43kg/t_{cl}。不同规模新型干法熟料中MgO含量在2%左右,而立窑熟料的MgO含量高于新型干法。在原料替代率来看,两种生产工艺均表现出规模小的替代率高的特点。立窑<

表1 两种生产工艺排放指标比较

Table 1 Comparison of carbon emission coefficients between the main production processes

指标	新型干法	立窑
能源强度/(kgec/t _{cl})	110.43	123.29
生料电耗/(kW·h/t _{cl})	32.14	33.65
煅烧电耗/(kW·h/t _{cl})	31.58	25.54
熟料成分/(CaO/%)	65.26	64.44
熟料成分/(MgO/%)	2.20	2.28
原料替代率/%	2.88	2.36
替代减排量/(kg/t _{cl})	7.44	10.21
余热发电减排量/(kg/t _{cl})	22.99	0
熟料排放系数/(kg/t _{cl})	856.78	893.53

2017年12月

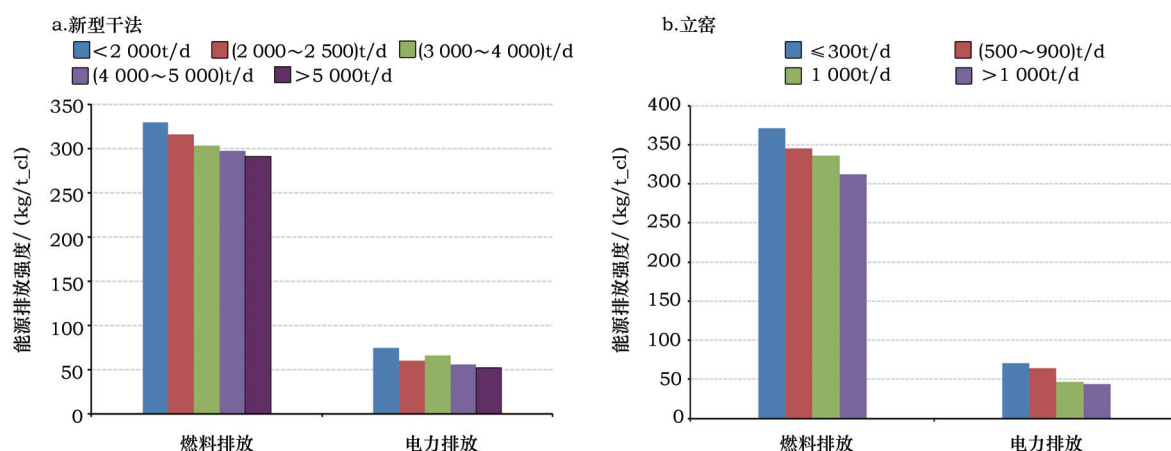


图2 不同生产规模变化对能源排放的关系

Figure 2 Changes in scale of production processes in relation to fuel and power emissions

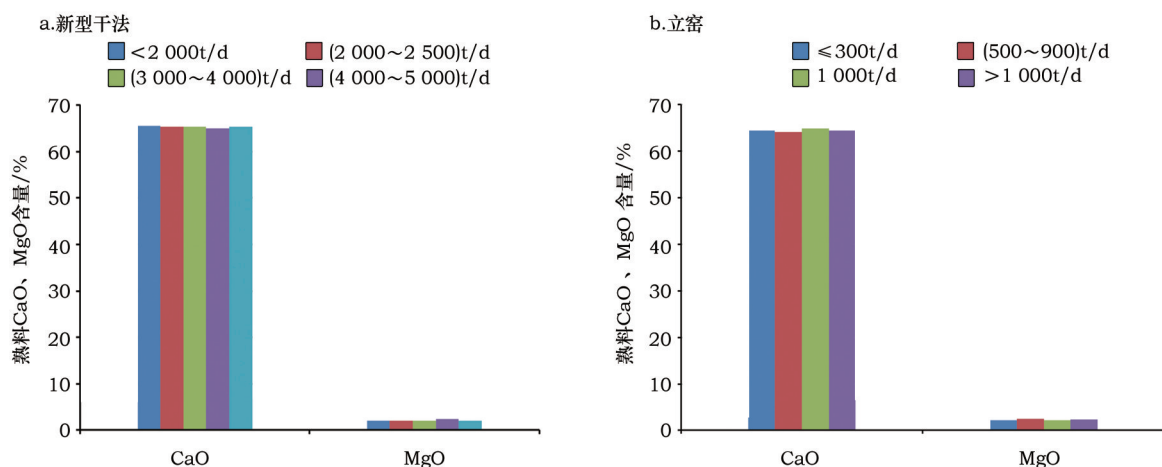


图3 不同生产规模熟料CaO和MgO的含量情况

Figure 3 CaO and MgO content of different scale production processes

300t/d 和(500~900)t/d 两种生产规模的替代率分别为 2.77% 和 4.41%, 减排量分别为 15.16kg/t_{cl} 和 15.91kg/t_{cl}。新型干法生产工艺 <2000t/d 和 (2000~2500)t/d 两种规模的原料替代率为 2.95% 和 3.81%, 减排量分别为 8.16kg/t_{cl} 和 12.59kg/t_{cl}。

3.2 区域排放差异分析

从熟料排放系数的区域差异来看(图4a), 熟料排放系数总体上呈现从东部沿海向西部内陆逐渐增加的态势。西藏、新疆、内蒙古、云南等内陆边境省份排放系数最高; 内陆省份如四川、重庆、陕西、山西等高于东部沿海省份; 河北、广西两省的熟料排放系数最低, 但其导致因素也不同。广西排放系数较低是因为熟料中的 MgO 含量显著的低于全国平均水平, 而河北则是由于高的原料替代率, 降低

了工艺排放。

从工艺排放来看, 新型干法熟料样品 CaO、MgO 含量呈现出随着 CaO 含量的升高, MgO 含量降低的趋势(图5, 见第2363页)。总体上来看, 中国熟料的 MgO 含量均高出 CSI 默认排放系数值。新型干法和立窑熟料样品的平均 MgO 含量分别为 2.20% 和 2.28%。中国高 MgO 含量的区域主要分布在黄河中下游的山东、河北、河南和山西等省, 和武夷山脉周边的江西和福建。高 MgO 含量在这两个地区形成了福建、江西、河南、山东的高工艺排放区域(图4b)。而在湖北、湖南、贵州、云南等省区, 形成了一条低 MgO 含量的区域, 这些区域的工艺排放系数低于 CSI 的默认排放系数(525kg/t_{cl})(图4b)。

能源强度的差异受生产工艺、生产规模、气候

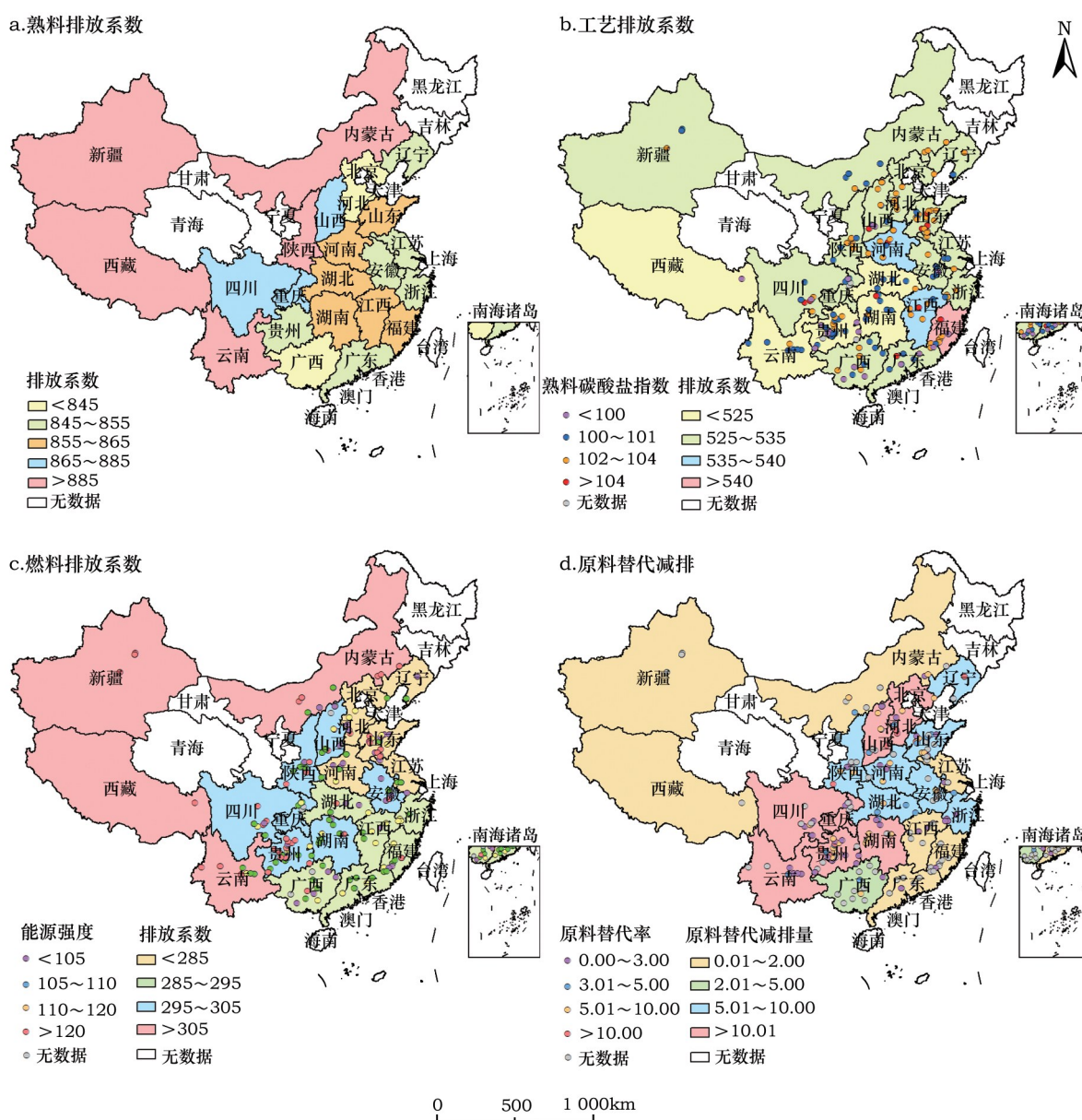


图4 区域熟料排放系数构成差异

Figure 4 Differing compositions of regional emission coefficients of clinkers

等多重因素的影响。从燃料排放的区域差异来看,空间分布呈现出东部低于西部,南部低于北部的格局。北部沿海是中国熟料能源效率最高的地区,南部沿海次之,高寒区域(西藏、新疆、内蒙古)和西南地区也是高能源强度和高燃料排放的区域(图4c)。上文分析得到:中国新型干法生产工艺的能源强度($110.43\text{kgce/t}_{\text{cl}}$)小于立窑($123.29\text{kgce/t}_{\text{cl}}$)(表1)。因此,在生产工艺与能源强度的关系来看,在新型干法熟料生产比重较低的省份,如湖北、陕西、四川、新疆等区域,熟料能源强度较高于全国平

均水平。同时得到:增加大规模新型干法的比重,可降低熟料能源强度。在22省区中,4000t/d以上生产能力比重较大的地区,能源强度均较低;而比重较小的地区,如贵州、西藏、新疆、云南能源强度则较高,因此熟料的燃料排放系数也较高(图6)。

应用钢渣、粉煤灰、磷渣、硫酸渣等替代天然钙质和硅铝质原料是降低熟料生产工艺排放的主要方法。在对全国22省市的调研中发现,在钢铁、磷矿、煤炭资源分布的地区原料替代程度要高于资源匮乏地区。钢铁产量大省河北、磷矿富集省份贵

2017年12月

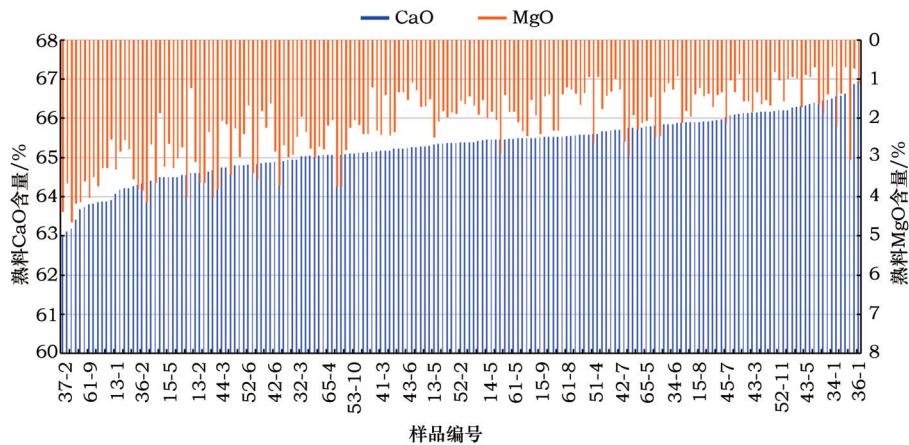


图5 新型干法熟料样品CaO、MgO含量分布

Figure 5 Distribution of CaO and MgO contents of clinker samples for the NSP process

注:样品编号前两位为省市编号,最后一位为省内样品编号。

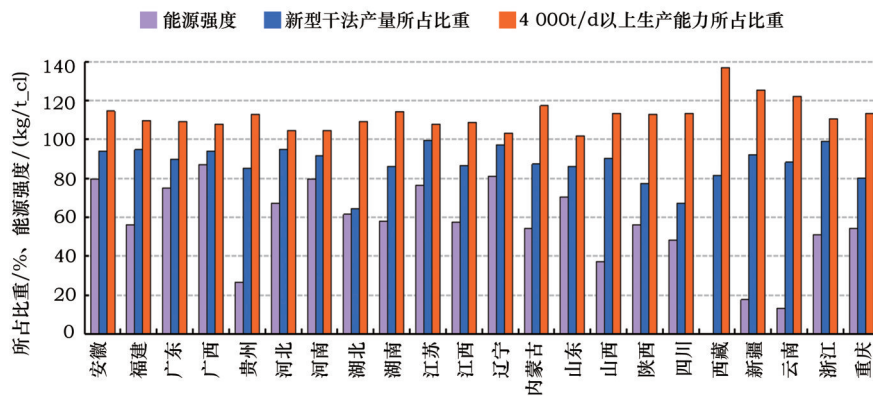


图6 能源强度与生产工艺及生产规模的关系

Figure 6 Relationship between energy intensity and production processes and scales

州、云南,煤炭主要产区山西,陕西、山东等均是中國高比例原料替代的区域(图4d)。在这些省区中,华北的山西、河北,主要以钢渣、粉煤灰替代石灰石和砂岩等天然原料,其原料替代减排量分别为:14.30kg/t_{cl}和14.67kg/t_{cl}。同时西南地区也是中国原料替代减排的主要地区。贵州、云南、四川等主要替代原料为磷渣、钢渣、电石渣、硫酸渣、粉煤灰,三省的替代原料减排量分别为24.84kg/t_{cl}、10.18kg/t_{cl}和10.12kg/t_{cl}。而在一些钢铁、煤炭产量大省,如江苏、内蒙古、新疆等省区,原料替代程度较低,有较大的替代减排潜力。

4 区域减排潜力及策略选择

4.1 减排方式减排量核算

基于降低熟料排放的主要方法,本文主要从工

艺替代(新型干法替代立窑)、规模生产(逐步淘汰规模<4000t/d的生产线)和原料替代三方面来研究调研省区的减排潜力、减排方法及其减排量。各地区以上3种减排方法减排量核算公式为:

$$\begin{aligned}
 R_{NRS_i} &= (EF_{fu_{s_i}} - EF_{fu_{n_i}}) \times (1 - R_{N_i}) \\
 R_{SC_i} &= ((EF_{fu_{<4000_i}} - EF_{fu_{4000_i}}) \\
 &\quad + (EF_{po_{<4000_i}} - EF_{po_{4000_i}}) \times (1 - R_{4000_i})) \\
 R_{RM_i} &= R_{ca_i} \times EF_{re_{ca}} + R_{si_i} \times EF_{re_{si}} - R_{RMN_i}
 \end{aligned} \quad (4)$$

式中 R_{NRS} , R_{SC} , R_{RM} 分别表示工艺替代,规模生产和原料替代的排放系数减排量; $EF_{fu_{n_i}}$, $EF_{fu_{s_i}}$ 分别表示各省市新型干法和立窑的燃料排放系数; $EF_{fu_{4000}}$, $EF_{fu_{<4000}}$, 分别为我国生产规模>4000t/d和<4000t/d的能源排放系数; $EF_{po_{4000}}$, $EF_{po_{<4000}}$ 分别表示其电力排放系数; R_{ca} , R_{si} 分别表示各省区

的钙质、硅铝质原料替代率, EF_{re_ca} , EF_{re_si} 分别表示钙质、硅铝质原料的减排系数; R_{N_i} , R_{4000_i} 分别表示 i 省市新型干法和新型干法生产规模 $>4000t/d$ 的比例; R_{RMN_i} 表示 i 省市现阶段原料替代减排量。

4.2 各减排方式区域减排量

通过调研排放数据和公式(4)计算,得到了三种减排方法在调研省市中的减排潜力(图7)。在工艺替代的减排量中具有减排潜力的省份包括内蒙古、湖北、山东、西藏、四川、陕西、新疆,这些省份减排潜力均 $>5kg/t_cl$ 。在这些省份中,立窑能源强度显著地高于新型干法。即使在一些省份的新型干法熟料所占比重也较高,但区域能源强度高于全国平均水平。

上文研究发现揭示了提高生产规模可降低熟料生产的能源和电力消耗。因此,本文提出淘汰 $<4000t/d$ 以下新型干法生产线的规模生产的减排潜力。生产能力在 $4000t/d$ 以上同时比重 $<30\%$ 的省份包括西藏、云南、新疆、贵州等,在这些省份规模生产的减排潜力均 $>21kg/t_cl$;在生产能力 $4000t/d$ 以上比重介于 $30\% \sim 60\%$ 的省份,包括山西、内蒙古、浙江、福建、江西、湖北、湖南、重庆、四川等省份,其减排潜力 $>11kg/t_cl$ 。规模减排潜力来自于两方面:一是燃料排放的降低,二是电力消耗的减少和余热发电量的提高。

在规模生产降低燃料排放方面,新疆、西藏、云南、贵州、山西的减排潜力较大。在规模生产降低电力排放方面,新疆尤为显著,可降低 $15kg/t_cl$,这是由于其小规模生产导致的高电力排放。而在新

疆、西藏、云南、贵州、山西、内蒙古等省份,应加强新型干法余热发电的减排。通过分析得到:在多数省份规模生产的减排潜力大于工艺替代。因此,淘汰小规模新型干法生产线将是未来中国降低熟料排放的主要方法之一。

用工业废渣替代天然钙质、硅铝质资源是降低工艺排放的主要方法。在调研中我们得到区域原料替代具有显著的地域特征,同时,原料替代率受替代原料规模、分布特征等的影响。替代原料的规模,本文考虑了调研区域钢铁、五氧化二磷生产对钙质资源的替代,考虑了火力发电、精炼铜对硅铝质资源的替代规模(表2),研究了区域替代原料的规模与熟料生产原料消耗量间的比例,确定了区域的可能钙质、硅铝质原料替代水平(表2)。调研省市原料替代的减排潜力来看,磷矿资源富集区域贵州、云南、湖北的减排潜力最大;在钢铁的主产区河北、江苏、山东、辽宁、山西其减排潜力次之;而新疆、西藏等地域广阔,替代原料也较少的省份,原料替代减排潜力较小;同时,湖南现阶段原料替代水平相对于现阶段替代原料规模已经较高,未来替代原料减排潜力有限。

4.3 区域减排方式选择

基于以上3种减排方式在调研省区的减排所占的比重,将其划分为三类(表3)。单因素驱动型,指在这类省市中,某一种减排方法的减排潜力占3种方式减排量的 $2/3$ 以上,替代原料或规模生产是该地区主要的减排方式。双因素驱动型,其中两种方式是该地区的主要减排方式,规模生产+替代原料

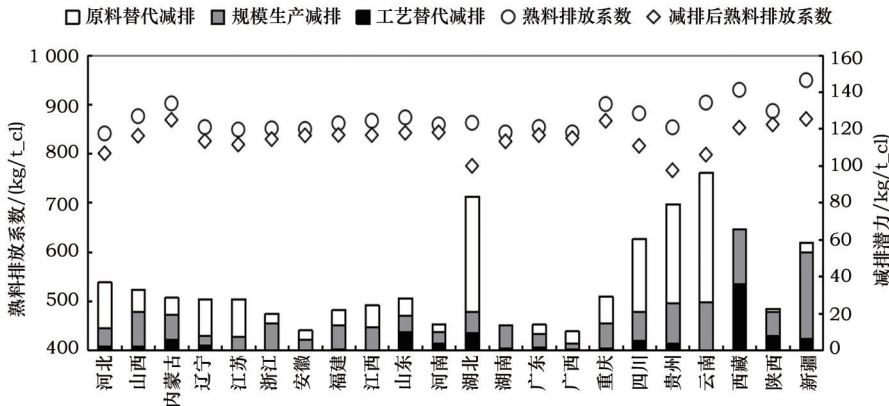


图7 调研省区不同减排方法的减排潜力

Figure 7 Potential emission reductions for different emission reduction scenarios in the surveyed provinces

2017年12月

表2 调研省区熟料生产替代原料种类和潜在替代比例

Table 2 Types of substitute materials for clinker production and potential substitution rates in the surveyed provinces

省市	熟料产量 /万t	钢渣&磷 渣量/万t	粉煤灰&铜 渣量/万t	钙质原料 替代率/%	硅铝质原料 替代率/%	省市	熟料产量 /万t	钢渣&磷 渣量/万t	粉煤灰&铜 渣量/万t	钙质原料 替代率/%	硅铝质原料 替代率/%
河北	5 775.37	1 974.08	36.04	5.00	6.00	湖北	5 733.94	344.00	41.21	10.00	3.00
山西	2 809.89	418.85	69.72	3.00	8.00	湖南	5 819.56	218.38	11.28	2.00	2.00
内蒙古	3 238.33	200.36	91.61	1.00	5.00	广东	7 099.23	158.91	36.09	0.50	4.00
辽宁	3 117.98	650.98	45.28	3.00	10.00	广西	7 436.58	145.46	5.53	1.50	1.50
江苏	5 292.52	820.66	75.04	2.00	10.00	重庆	4 384.93	75.67	7.06	2.00	1.00
浙江	5 540.33	159.59	54.90	1.00	7.00	四川	8 205.94	207.50	5.15	7.00	1.00
安徽	12 255.00	236.23	33.92	1.00	5.00	贵州	5 646.58	52.08	11.97	11.00	2.50
福建	4 875.93	140.03	17.43	1.00	2.00	云南	6 229.42	158.78	36.98	11.00	5.00
江西	5 243.36	248.13	100.09	1.00	8.00	西藏	225.78	0.00	1.34	0.00	0.00
山东	8 896.43	679.77	61.59	2.00	8.00	陕西	5 082.45	91.92	14.96	1.00	3.00
河南	7 450.25	284.49	28.80	1.00	5.00	新疆	3 645.95	107.16	15.56	0.50	2.00

注:工业废渣量按生产1t钢产生120kg钢渣,1t铜75t铜渣,1t五氧化二磷9t磷渣,1kW·h电力煤炭消耗0.33gce,煤炭灰分30%计算。

表3 调研省区水泥熟料减排策略划分

Table 3 Classification of emission reduction strategies for cement clinker production

类型	减排方式	省市	工艺替代措施	规模生产措施	原料替代措施
单因素驱动	替代原料	河北、辽宁、江苏			钢渣替代石灰石;粉煤灰/铜渣替代砂岩
		湖北、广西、四川、贵州、云南			磷渣替代石灰石
	规模生产	湖南、浙江、新疆		淘汰<4 000t/d以下的生产线; 鼓励利用余热发电	
双因素驱动	规模+替代	山西、安徽、福建、江西、广东、重庆		淘汰<4 000t/d以下的生产线	钢渣替代石灰石;粉煤灰替代砂岩
	工艺+规模	陕西、西藏	淘汰立窑等落后生产工艺	淘汰<4 000t/d以下的生产线; 鼓励利用余热发电	
均衡发展	工艺+规模+原料	内蒙古、山东、河南	淘汰立窑等落后生产工艺	淘汰<4 000t/d以下的生产线	钢渣替代石灰石;粉煤灰替代砂岩

或工艺替代+规模生产是这类省市熟料生产减排的策略选择。均衡发展型,即这3种减排方式在减排总量中所占份额均等,减排方式要综合运用这3种减排方式。

5 结论与建议

5.1 结论

本文以课题调研数据为基础,分析了调研区域水泥熟料的区域分布情况。从生产工艺来看,立窑熟料排放系数高于新型干法生产工艺;从生产规模来看,小规模生产线排放系数高于大规模生产线;从排放系数区域分布来看,东部沿海向西部内陆逐渐增加的态势。从熟料排放系数的构成来看,调研

生产线加权平均熟料MgO含量高于CSI默认值,这将导致高的工艺排放;现阶段原料替代减少工艺排放的地区主要集中于华北和西南地区,这两个区域是中国磷渣和钢渣的主要产地。北部沿海是中国熟料能源效率最高的地区,南部沿海次之,高寒区域(西藏、新疆、内蒙古)和西南地区也是高能源强度和高燃料排放的区域。

5.2 建议

本文提出了工艺替代、规模生产、原料替代3种减排方式,测算调研区域各减排方式的减排潜力。由于新型干法在中国的广泛推广,工艺替代减排只在少数省份具有一定的减排潜力;规模生产和原料

替代应成为中国主要的减排方式。根据3种减排方式在调研省区减排量所占份额,本文将将各省市的减排策略分为:单因素型,双因素型和均衡发展3种类型。单因素的省份,在原料替代或规模生产方面加强其减排方法的选择;双因素型的省份,则要在3种减排方式中选择两种配合实施;而均衡发展的省份,3种减排方式减排份额相差不大,都应作为减排的主要方式。各调研省市应根据本地区3种减排方式的减排能力,选择实施减排方式和减排策略。

参考文献(References):

- [1] Deja J, Uliasz-Bohenczyk A, Mokrzycki E. CO₂ emissions from Polish cement industry[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4: 583-588.
- [2] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2017 [EB/OL]. (2017-01-19)[2017-06-07]. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf>.
- [3] Gao T, Shen L, Shen M, et al. Evolution and projection of CO₂ emissions for China's cement industry from 1980 to 2020[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 74: 522-537.
- [4] 刘立涛, 张艳, 沈镭, 等. 水泥生产的碳排放因子研究进展[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 10-19. [Liu L T, Zhang Y, Shen L, et al. Research progress in carbon emission factors during cement production[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 10-19.]
- [5] 魏丹青, 赵建安, 金迁致. 水泥生产碳排放测算的国内外方法比较及借鉴[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1152-1159. [Wei D Q, Zhao J A, Jin Q Z. Comparison and reference of domestic and foreign calculation methods for carbon emissions in cement production[J]. *Resources Science*, 2012, 34(6): 1152-1159.]
- [6] Hu D, Guo Z, Wang Z, et al. Metabolism analysis and eco-environmental impact assessment of two typical cement production systems in Chinese enterprises[J]. *Ecological Informatics*, 2015, 26(1): 70-77.
- [7] Shen L, Gao T, Zhao J, et al. Factory-level measurements on CO₂ emission factors of cement production in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 34: 337-349.
- [8] 赵建安, 魏丹青. 中国水泥生产碳排放系数测算典型研究[J]. 资源科学, 2013, 35(4): 800-809. [Zhao J A, Wei D Q. Prototype research on the calculation of carbon emission coefficients in China's cement production[J]. *Resources Science*, 2013, 35(4): 800-809.]
- [9] Mikulčić H, Vujanović M, Duić N. Reducing the CO₂ emissions in Croatia's cement industry[J]. *Applied Energy*, 2013, 101: 41-48.
- [10] Avami A, Sattari S. Energy conservation opportunities: Cement industry in Iran[J]. *International Journal of Energy*, 2007, 3(1): 65-71.
- [11] Ali M, Saidur R, Hossain M. A review on emission analysis in cement industries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(5): 2252-2261.
- [12] 刘静, 李和平. 大力发展低碳经济 促进水泥产业变革[J]. 中国资源综合利用, 2010, 28(9): 56-57. [Li J, Li H P. Developing the low-carbon economy actively and promote the reform in cement industry[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2010, 28(9): 56-57.]
- [13] Gao T, Shen L, Shen M, et al. Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 160-170.
- [14] Tsakiridis P E, Papadimitriou G D, Tsivilis S. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(2): 805-811.
- [15] Iacobescu RI, Pontikes Y, Koumpouri D, et al. Synthesis, characterization and properties of calcium ferroaluminate belite cements produced with electric arc furnace steel slag as raw material[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 44(93): 1-8.
- [16] Adolfsson D, Menad N, Viggh E, et al. Hydraulic properties of sulphoaluminate belite cement based on steelmaking slags[J]. *Advances in cement research*, 2007, 19(3): 133-138.
- [17] 董涛. 钢渣在水泥生产中的应用研究[D]. 济南: 济南大学, 2012. [Dong T. Research on Application of Steel Slag in Cement Production[D]. Jinan: Jinan University, 2012.]
- [18] 董效林. 镁渣替代石灰石生产水泥应用前景广阔[J]. 金属世界, 2011, (4): 57-58. [Dong X L. Bright application prospect of the substitution of magnesium slag for limestone in cement production[J]. *Metal World*, 2011, (4): 57-58.]
- [19] Cement Sustainability Initiative. The Cement CO₂ and Energy Protocol (Version 3) [EB/OL]. (2011-05-01)[2017-06-09]. http://www.cement-co2-protocol.org/en/Content/Resources/Downloads/WBCSD_CO2_Protocol_En.pdf.

Differences in the emission coefficients of cement clinkers and selection method for regional emission reduction

GAO Tianming^{1,2,4,5}, SHEN Lei^{2,3}, ZHAO Jian'an^{2,3}, WANG Limao^{2,3}, LIU Litao², ZHONG Shuai²

(1. Institute of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

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

4. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Beijing 100037, China;

5. Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Cement is the major industry in greenhouse gas emissions. The emission coefficient of a cement clinker is determined by production process, energy efficiency, and the type and quality of raw materials. We analyze differences in clinker emissions, potential for reductions and strategic options across all regions of China, provide regional approaches and policy options to reduce clinker emissions. Using data from 182 NSP process lines and 75 Shaft kiln lines, we analyzed differences in emission coefficients for production of cement clinkers. In respect of production processes, the emission coefficient of the Shaft kiln process is higher than that of the NSP process; in respect of production scales, the emission coefficient of small-scale production is higher than that of large-scale production. The distribution of regional clinker emission coefficients tends to increase from the eastern coastal to western inland regions of China. The high content of MgO in clinker is mainly distributed in the middle and lower reaches of the Yellow River and the surrounding areas of the Wuyi Mountains. The process emissions in these two regions are also higher than other regions. Northern coastal regions have the highest energy efficiency of clinkers, followed by southern coastal regions; the high-cold regions and Southwest China are characterized by high energy-intensity and high fuel-related emissions. The rates of raw material substitution are relatively high in regions where steel, phosphorite, and coal resources are widely distributed, especially in Guizhou, Yunnan and Hebei. Three methods of emission reduction: process substitution, large-scale production, and raw material substitution are measured to calculate the potential emission reductions in the surveyed regions. In Hebei, Liaoning and Jiangsu, substitute steel slag for limestone is the main reduction method, substitute phosphorous slag is preferred for Hubei, Guangxi, Sichuan, Guizhou and Yunnan. Large-scale production plus raw material substitution is suggested by Shanxi, Anhui, Fujian, Jiangxi, Guangdong and Chongqing. Process substitution plus large-scale production eliminate the outdated process and small-scale production lines are the major reduction methods for Shaanxi and Tibet. While other provinces, such as Inner Mongolia, Shandong and Henan, should apply these three reduction methods equally.

Key words: cement clinker; emission coefficient; differences; regional emissions reduction strategy; China