

引用格式:曹植,沈镭,刘立涛,等. 基于自下而上方法的中国水泥生产碳排放强度演变趋势分析[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2344-2357. [Cao Z, Shen L, Liu L T, et al. A bottom-up analysis of CO₂ emission intensity of Chinese cement industry[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2344-2357.] DOI :10.18402/resci.2017.12.13

基于自下而上方法的中国水泥生产碳排放强度演变趋势分析

曹植^{1,2,3}, 沈镭^{1,2}, 刘立涛^{1,2}, 钟帅^{1,2}, 刘刚³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 南丹麦大学生命周期工程研究中心, 欧登塞 5230)

摘要:水泥工业减排是实现中国碳减排目标的重要组成部分, 把握和理解中国水泥工业生产碳排放强度的演变趋势有助于评估和识别中国水泥工业的减排潜力和重点减排技术。水泥是社会经济发展所必需的基础性原材料, 但中国水泥生产又是高能耗和高排放行业, 使其成为政府和相关管理部门实施节能减排的重点关注之一。1981—2015年间, 中国水泥消耗由8208万t急剧增长到234800万t, 占全世界总产量的一半以上, 成为世界第一大水泥生产和消费国。本文利用节能减排成本曲线和技术普及趋势曲线, 计算了16项水泥工业节能减排技术的节能减排潜力和普及趋势, 并设计三种可能情景(基准情景、经济效率情景和技术情景), 模拟了2015—2050年期间中国水泥工业碳排放强度的演变趋势。结果表明, 到2050年, 基准情景、经济效率情景和技术情景下中国水泥工业综合碳排放强度将分别下降至491kgCO₂/t、431kgCO₂/t和342kgCO₂/t。相比于IEA制定的2050年目标(420kgCO₂/t水泥), 在技术情景下, 中国水泥工业的碳排放强度将足够完成既定目标; 而在经济效率情景下, 中国水泥工业的碳排放强度离减排目标仍有11kgCO₂/t水泥的差距。这意味着, 中国水泥工业若要实现IEA制定的减排目标, 需要对各个过程的技术进行改进, 重点应致力于针对工艺排放的减排技术路径, 实施政府调控, 能源或碳税机制等政策手段, 是促进技术进步的重要推动力。

关键词:水泥生产; 碳排放强度; 演变趋势; 自下而上方法; 节能减排成本曲线; 技术普及趋势曲线; 减排情景分析

DOI :10.18402/resci.2017.12.13

1 引言

水泥是社会经济发展所必需的基础性原材料, 水泥工业的发展也被视作衡量一个国家经济发展“繁荣”程度的重要指标^[1]。进入21世纪, 中国经济快速增长, 人民的生活质量普遍提高, 人们对住房和公用基础设施的需求急剧增长, 促进了交通和住宅等行业的高速发展, 由此刺激了对钢铁、水泥等原材料的消耗。1981—2015年间, 中国水泥消耗由8208万t急剧增长到234800万t, 占全世界总产量的一半以上。

中国是世界第一大水泥生产和消费国, 中国的

水泥工业不仅面临着产能过剩、污染严重等现实问题, 还是中国应对气候变化的重点领域^[2]。水泥工业是典型的能源依赖型行业, 据初步测算, 2012年水泥工业的能源消耗量约为1.8亿tec^[3], 约占有工业部门能耗总量的4.1%。水泥工业的工艺排放在各工业部门中居首, 两次气候变化国家信息通报表明, 1994年和2005年, 水泥工艺排放为主要工业生产过程排放源(见表1)。另外, 美国橡树岭国家实验室CO₂信息分析中心(CarbonDioxide Information Analysis Center, CDIAC)数据显示, 中国水泥生产工艺碳排在碳排放总量中比重呈上升趋势

收稿日期: 2017-09-07 修订日期: 2017-11-05

基金项目: 中华人民共和国科学技术部国家重点研发计划项目(2016YFA0602802); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41501604); 国家自然科学基金海外人才项目(41728002)。

作者简介: 曹植, 男, 湖北大冶人, 博士后, 主要研究方向为资源经济, 社会经济代谢与物质流分析。E-mail: zca@kbn.sdu.dk

通讯作者: 沈镭, E-mail: shenl@igsrr.ac.cn

2017年12月

表1 1994年和2005年中国工业生产过程CO₂排放构成Table 1 The composition of industrial process CO₂ emissions in China in 1994 and 2005

排放源	1994年		2005年	
	CO ₂ /万t	构成/%	CO ₂ /万t	构成/%
水泥	15 777.50	56.76	41 170.00	74.23
石灰	9 356.00	33.66	8 560.00	15.43
钢铁	2 267.80	8.16	4 700.00	8.47
电石	396.80	1.43	1 030.00	1.86
合计	27 798.10	100.00	55 460.00	100.00

数据来源:《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》^[5];《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》^[6]。

势,由1990年的不足5%上升至2014年的12.1%^[4]。

水泥工业的高能耗和高排放特征,使其成为政府和相关管理部门实施节能减排的重点关注行业之一。1990年,国家标准局制定水泥等22种主要建材产品生产企业的能耗等级定额。1997年,国家计委颁布了《当期国家重点鼓励发展的产业、产品和技术目录》^[7],并于2000年进行了修订,修订后的28个国家重点鼓励领域中,水泥工业为其中之一,“目录”中鼓励发展日产4000t以上的新型干法生产线。1999年,国家经贸委发布《关于清理整顿小玻璃厂、小水泥厂的意见》^[8],要求在年底之前关闭各重点管辖区域内落后工艺的小水泥厂,并对水泥立窑推行综合节能改造。2007年,国家发改委编制的《中国应对气候变化国家方案》^[9]中,将水泥工业作为重点节能减排行业。为加快水泥工业的转型升级,依据《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》^[10]和《工业转型升级规划(2011—2015年)》^[11],工业和信息化部颁发了《水泥工业“十二五”发展规划》^[12],针对水泥工业结构特征,确定了主要节能减排目标,同时国家发改委还发布了《中国水泥生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[13]。国际能源署(IEA)与世界可持续发展工商理事会(WBCSD)联合发布的减排路线图中^[14],针对水泥工业制订了相应的减排目标:为实现2050年的全球减排目标,到2050年,水泥工业的碳排放强度应降至420kgCO₂/t水泥以下。

已有众多学者对中国水泥工业的碳减排潜力进行了研究。如Lei等,根据历史文献以及水泥工业的产业结构反演计算获得CO₂排放,研究发现随

着立窑等落后生产线的加速淘汰,中国水泥工业的能源效率稳步提升,但由于水泥生产总量的上涨,水泥工业的碳排放规模仍相当惊人,若实行进一步的节能改造,预计2020年中国水泥工业碳排放规模将减少12.8%^[15]。Ke等分析了四种情景下中国水泥工业的节能减排潜力,模型中主要节能措施为水泥工业的结构转变和能效改进^[16]。Shi等基于技术扩散和结构调整模型,构建了中国水泥工业的碳减排潜力模型^[17]。以2005年为基期,根据水泥工业的增长规律和中国的城镇化速度,预测到2020年中国水泥的排放和节能减排潜力。Wang等考虑了四类减排策略的演进趋势,设置了三种情景,预测2010—2050年期间中国水泥工业的CO₂减排量将分别达到2.5Gt、4.7Gt和4.3Gt^[18]。该研究中还考虑了各项减排策略的实施成本,由于碳捕捉和存储技术的成本太高,目前较为可行的减排措施是熟料替代、能效改进和燃料替代。Song等使用全生命周期法分析了中国一家日产2500t的典型水泥生产线的环境影响,并设定了7种情景,分析了原料替代和燃料替代的环境效益^[19]。Li等预测了中国未来的水泥需求,同时还使用可计算一般均衡(CGE)模型估算了施加碳税对水泥工业CO₂减排的影响^[20]。Tan等建立了最优减排路径的环境经济模型,并使用情景分析法分析了中国水泥工业的碳排放趋势^[21]。在基准情景下,2020年水泥工业的单位排放因子相比于2015年将降低4%。若还需要减少其他污染物的排放,则应实施更为严厉的排放控制措施。毛紫薇等利用长期能源替代规划(LEAP)模型对山东省水泥工业的CO₂排放量及相应的减排潜力进行了模型评估,模型中设定了三种情景:基本情景、政策情景和技术情景^[22]。

现有研究分析了水泥工业的各项策略,如能效提升、废热回收、燃料替代等的减排潜力,缺乏各项生产技术的自下而上分析。本文根据国家发改委公布的重点节能减排技术目录,从中选取与水泥生产过程密切相关的16项技术,利用节能减排成本曲线和能源技术普及趋势曲线计算各项技术的节能减排潜力,并设计三种可能情景模拟2015—2050年期间中国水泥工业碳排放强度的演进趋势,探讨未来中国水泥工业的减排路径和策略。

2 研究方法与数据来源

2.1 水泥生产过程中的碳排放

水泥生产工艺主要有两种:立窑和新型干法。目前,新型干法水泥生产技术在中国水泥行业已取得绝对优势地位,2013年新型干法生产的水泥熟料占总产量的比例已达到96.2%^[23]。尽管中国水泥行业的能源使用效率在近十年取得显著进步,但整体水平仍落后于国际先进水平,因此,节能减排仍是中国水泥行业的重点发展目标。以某新型干法生产线为例,如图1所示,水泥生产过程可分为三个阶段:生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨。

生料制备阶段中,将石灰石质原料(主要含CaO)和粘土质原料(主要含SiO₂和Al₂O₃)与少量的铁质校正原料(如铁矿石、硫酸厂的废渣等含有Fe₂O₃)分别破碎和烘干后,按照一定比例混合并磨细,并调配为成分合适、质量均匀的生料。

熟料煅烧阶段中,将制备好的生料送入水泥窑内煅烧至部分熔融,得到以硅酸钙(C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF)为主要成分的水泥熟料(颗粒状或块状)。

水泥粉磨阶段中,将熟料磨细,并在磨细过程中加入适量的石膏和一定量的混合材共同磨细成水泥。水泥的装运方式主要包括袋装和散装两种。

水泥生产过程中的CO₂排放主要有三种来源:工艺排放、燃料排放和电力排放。如图2所示,工艺排放和燃料排放主要发生在熟料煅烧阶段,这两种排放也是水泥生产的主要CO₂排放源。电力排放的所占比例较小,其中生料粉磨和水泥粉磨过程的耗电量占比最大。水泥生料中的主要化学成分是碳酸钙,在高温作用下逐渐分解并释放出CO₂,这类排放称之为工艺排放。分解后CaO将继续与硅质原料中的SiO₂进行固相反应和液相反应,这一过程必须维持800℃~1450℃的高温条件,这一过程燃料燃

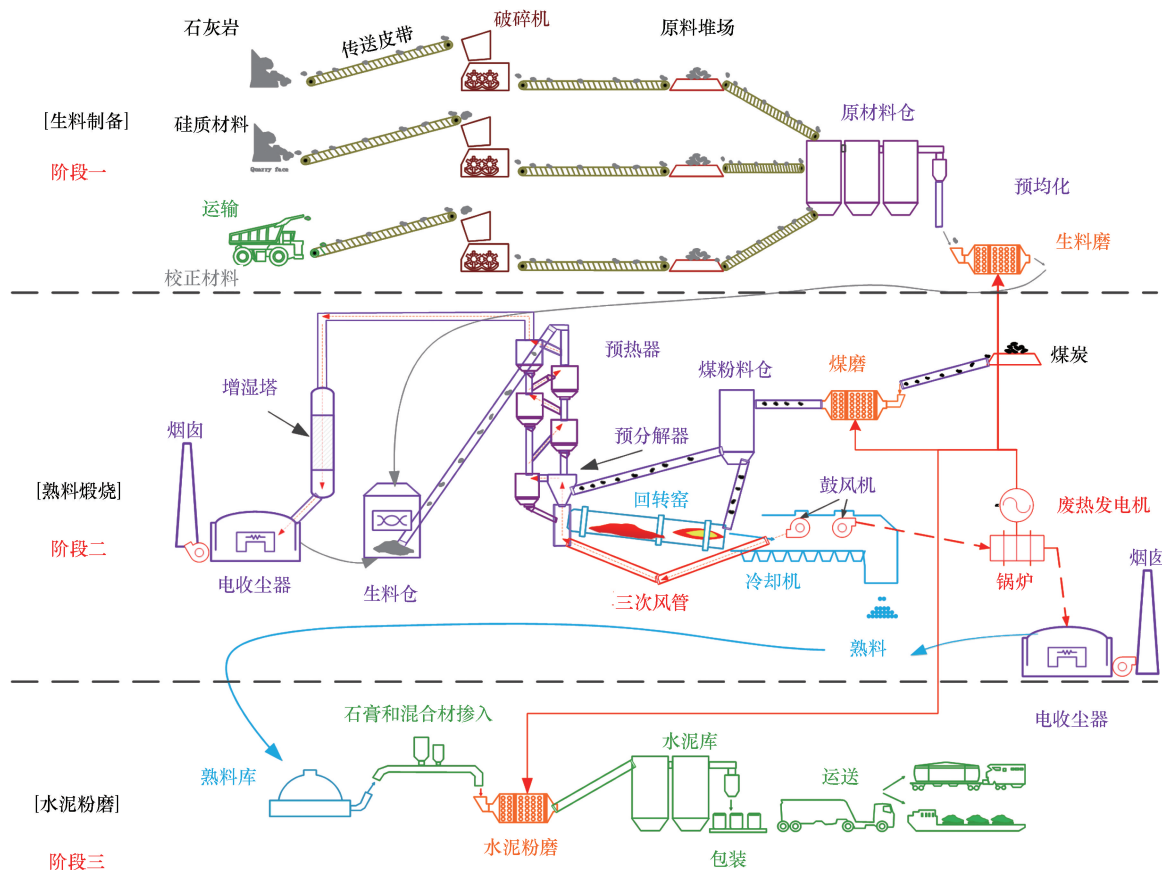


图1 水泥的生产过程(新型干法)

Figure 1 The production process of cement (new dry process)

数据来源:根据文献[24]整理。

2017年12月

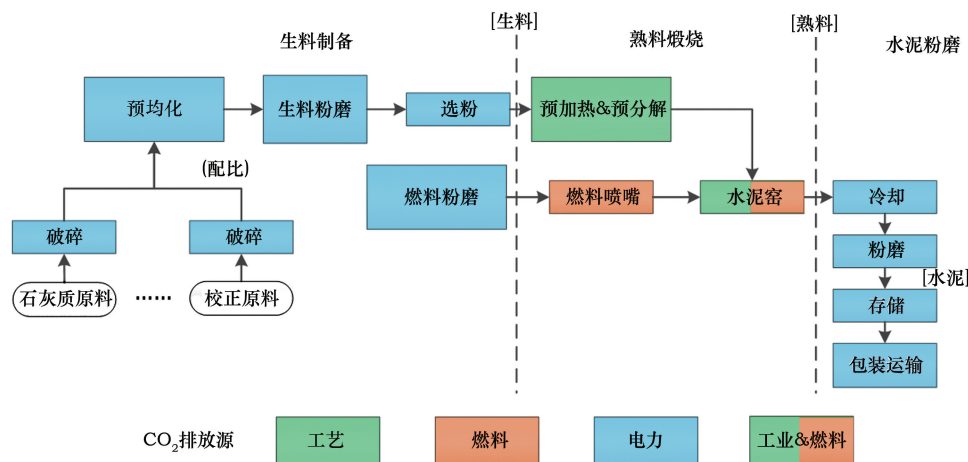


图2 水泥生产碳排放来源

Table 2 The sources of CO₂ emissions in cement production

烧所产生的CO₂排放称之为燃料排放。

2.2 水泥生产过程中的节能减排技术

针对这三种不同来源的排放,本文从中国国家发改委公布的8批《国家重点节能技术推广目录》和2批《国家重点推广的低碳技术目录》中整理了与水泥工业密切相关的16项节能减排技术,见表2。水泥生产的节能减排技术被企业采用与否,主要取决于各项技术的单位减排成本,节能减排技术的普及程度取决于各项技术的渗透趋势。本章将使用节能减排成本曲线模型和技术普及模型对中国水泥工业的总体碳排放强度趋势进行预测。

2.3 节能减排技术的成本曲线和普及趋势

节能减排成本曲线模型是由美国劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)提出,并广泛应用于评估工业节能减排潜力的研究中^[17]。在考虑节能效益的情况下,节能减排成本的计算公式如下:

$$RC = \frac{AIC + AOM - AES}{ACR} \quad (1)$$

式中RC为单位水泥产品的减排成本;AIC为年均设备投资成本;AOM为年均设备维护成本;AES为该技术年均节省能源所带来的收益;ACR为该技术年均减排量。

年均设备投资成本是根据贴现率和设备寿命计算的,具体计算公式如下:

$$AIC = IC \times \frac{d}{1 - (1 + d)^{-n}} \quad (2)$$

式中IC为设备的初始投资资本;d为贴现率;n为设备寿命。贴现率反映了水泥企业进行设备改造时所面临的投资风险、信息不完全和借贷困难度,贴现率一般设为30%,设备寿命一般设为20年,年维修费用一般为年均设备投资成本的5%^[25,26]。

能源技术的普及趋势一般可用S型曲线进行描述,水泥生产的节能减排技术的普及趋势也使用该曲线进行刻画^[27]。S型曲线函数公式为:

$$P_t = (P_0 - 1) e^{\frac{-(t-t_0)^2}{2S^2}} + 1 \quad (3)$$

式中 P_t 为第 t 年技术普及率; P_0 为初始技术普及率; t_0 为初始年份; S 为渗透参数。

2.4 情景假设

水泥工业的生产技术发展趋势定义以下三种节能减排情景:

(1)基准情景(Basic Scenario),即维持2015年的能耗和排放水平不变。

(2)经济效率情景(Cost-effective Scenario),即考虑节能减排的经济成本,选择减排经济成本最小的技术组合。

(3)技术情景(Technological Scenario),即不考虑节能减排的经济成本,选择减排最大化的技术组合。

其他相关技术参数,如能源参数、电力排放因子和水泥熟料比例,在表3中列出。

2.5 数据来源

使用的数据主要来源于国家发改委公布的8批

表2 节能减排技术清单

Table 2 The inventory for energy conservation & CO₂ emission reduction technologies

排放类别	技术名称	缩写	主要技术内容
燃料	大推力多通道燃烧节能技术	X1	采用热回流和浓缩燃烧技术,减少常温一次空气吸热量,达到节能和环保的目的。
	高固气比水泥悬浮预热分解技术	X2	采用高固气比预热技术,大幅提高气固换热效率,提升余热利用水平。
	水泥企业用能管理优化技术之一:新型干法水泥窑生产运行节能监控优化系统技术	X3	通过分析水泥窑炉废气成分监控能耗指导操作,实现节能减排。
	水泥熟料烧成系统优化技术	X4	优化配置旋风筒、分解炉、换热管道系统,改善了燃烧及换热状况,改进了撒料装置和锁风阀,提高了换热效率,采用高效冷却机,提高了熟料冷却效率;利用旋喷结合、二次喷腾的分解炉技术,提高了分解炉容积利用率,使炉内燃烧更充分,物料分解更完全。
	四通道喷煤燃烧节能技术	X5	大速差、大推力燃烧技术,四通道、周向均匀分布的小孔结构,周向均匀分布的旋流风和高速轴流风技术。
电力	高效节能选粉技术	X6	采用第三代笼型转子高效选粉分级技术,对分选物料进行充分分散和多次分级分选,达到高精度、高效率分选。
	高效优化粉磨节能技术	X7	采用高效冲击、挤压、碾压粉碎原理,配合适当的分级设备,使入磨物料粒度控制在3mm以下,并优化球磨机内部构造和研磨体级配方案,从而有效降低系统粉磨电耗。
	辊压机粉磨系统	X8	采用高压挤压料层粉碎原理,配以适当的打散分级装置,明显降低能耗。
	立式磨装备及技术	X9	采用料床粉磨原理,有效提高粉磨效率,减少过粉磨现象,降低能耗。
	曲叶型系列离心风机技术	X10	采取等减速流型设计的曲叶片,从而其附面层损失、流动损失、出口混合损失和出口截面突扩损失均比普通叶片小,经初步验证可以达到提高2%~4%的效果。
	水泥企业用能管理优化技术之二:水泥企业可视化能源管理系统	X11	对水泥企业生产全过程的煤电水气等能源数据、生产自动控制系统参数及产能参数进行实时采集,并进行加工计算。通过数据分析,对企业车间、工艺、工序、生产班组(个人)及重点耗能设备/系统的能源利用效率进行考核评价,为企业提供能源精细化管理的工具。
	水泥窑纯低温余热发电技术	X12	利用水泥窑低于350℃废气余热生产0.8MPa~2.5MPa低压蒸汽,推动汽轮机做功发电。
	稳流行进式水泥熟料冷却技术	X13	通过自动调节冷却风量,步进式冷却方式,对高温颗粒物料进行冷却的技术,主要用于对热熟料进行冷却和输送。
	新型水泥预粉磨节能技术	X14	对物料进行高效研磨,再通过后续的自流振动筛进行分级,使得进球磨机粒径控制在2mm以下,对球磨机内部衬板、隔仓及分仓长度进行优化改进,有效降低粉磨电耗。
	电石渣制水泥规模化应用技术	X15	通过开发电石渣预烘干装备、烘干与粉磨能力相匹配的立式磨以及适合于高掺电石渣生料的窑尾预分解系统的“干磨干烧”新型干法工艺,解决电石渣废弃物的利用难题,减少石灰石用量,降低碳排放。
工艺	新型干法水泥窑无害化协同处置污泥技术	X16	利用水泥窑废热烟气干化后的污泥入窑焚烧,作为替代燃料,节约部分燃煤,实现二氧化碳减排。

表3 中国水泥工业的技术参数

Table 3 Parameters for scenarios of Chinese cement industry

技术参数	2010年	2030年	2050年
水泥熟料比例/%	62.900 ^[23]	53.800 ^[28]	50.000 ^[28]
电力排放因子(kgCO ₂ /(kW·h))	0.755 ^[29]	0.755	0.755
燃料因子(kgCO ₂ /kgcc)	2.830	2.830	2.830

《国家重点节能技术推广目录》^[30]和2批《国家重点推广的低碳技术目录》^[31],包括:节能减排技术的设备初始投资成本、节省能源所带来的收益、节能减

排技术的技术普及率。其他相关技术参数从文献[23,28,29]中获得。

3 结果及分析

3.1 节能减排技术成本曲线

根据国家发改委公布的8批《国家重点节能技术推广目录》^[30]和2批《国家重点推广的低碳技术目录》^[31]中所提供的数据,代入公式(1)和公式(2)中,表4中列出了水泥工业各项技术单位减排成本的计

2017年12月

表4 国家重点推广的节能低碳技术减排成本

Table 4 The costs of energy conservation & CO₂ emission reduction technologies

类别	技术缩写	节煤量 /(kgce/t熟料)	节电量 /(kW·h/t水泥)	减排量 /(kgCO ₂ /t熟料或 /kgCO ₂ /t水泥)	单位减排成本 /(元/tCO ₂)
燃料	X1	3.6		10.2	-212
	X2	14.3		40.5	-39
	X3	10.0		28.3	-225
	X4	18.2		51.6	-137
	X5	0.7		2.1	-143
电力	X6		3.9	3.9	-538
	X7		4.0	3.9	-533
	X8		11.0	10.9	-12
	X9		7.2	7.1	-15
	X10		1.6	1.5	-405
	X11		6.0	5.9	-510
	X12		36.0	35.7	-511
	X13		7.5	7.4	-425
	X14		12.0	11.9	-488
	X15			137.2	228
工艺	X16			47.9	1 515

注:1)标煤排放因子:26.37×44/12×1 000 kg CO₂/1 000 000 MJ×29.307MJ/kgce=2.833 693 83kg/kgce。其中,26.37为《中国水泥生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》中提供的水泥行业燃料含碳量,原单位为26.37t C/TJ;29.307MJ/kg为标煤热值;2)电耗转能系数:3.5tec/(万kW·h),由《国家重点节能技术推广目录》提供的数值计算得出;3)燃料和电力价格数据来自于文献[29]。

算结果。

按照节能成本排序,并绘制燃料环节各项技术的节能成本曲线,如图3所示,关于燃料环节的累积节能潜力为46.8kgce/t。5项技术的单位减排成本皆为负,这表明从经济性来看这5项技术皆可行。其中,技术X2、X3和X4的节能潜力较大,分别达到14.3kgce/t、10.0kgce/t、18.2kgce/t。但X3(新型干法水泥窑生产运行节能监控优化系统技术)与X4(水泥熟料烧成系统优化技术)可相互替代,因为这两项技术都是对整个水泥生产系统进行优化的节能减排技术;X1(大推力多通道燃烧节能技术)与X5(四通道喷煤燃烧节能技术)也可相互替代,因为这两项技术皆可用于燃烧环节的优化。由此可知,若追求节能潜力最大化而不考虑成本,则应选择X1、X4和X2,这三项技术的累积节能潜力为36.1kgce/t;若考虑经济成本,则应选择X3、X1和X2,这三项技术的累积节能潜力为27.9kgce/t。

如图4所示,关于电力环节的累积节能潜力为89.2kW·h/t。其中,技术X12(水泥窑纯低温余热发

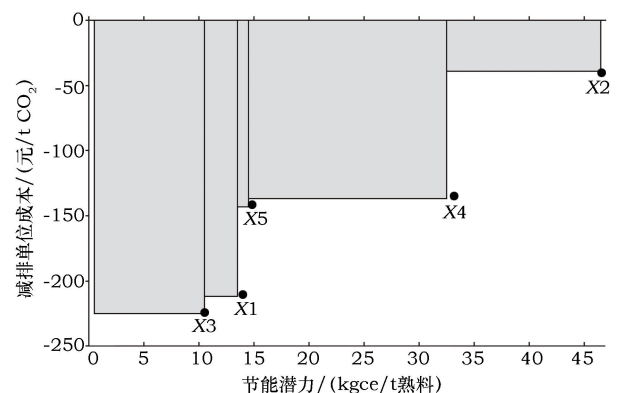


图3 燃料环节的节能减排成本曲线

Figure 3 The fuel conservation supply curve

电技术)的节能潜力最大,达到了36kW·h/t。但需要注意的是,技术X7(高效优化粉磨节能技术)、X8(辊压机粉磨系统)、X9(立式磨装备及技术)、X14(新型水泥预粉磨节能技术)之间可相互替代。若追求节能潜力最大化而不考虑经济成本,则可选择X6、X12、X11、X14、X13、X10组合,累积节能潜力为67kW·h/t;若考虑经济成本,则应选择X6、X12、

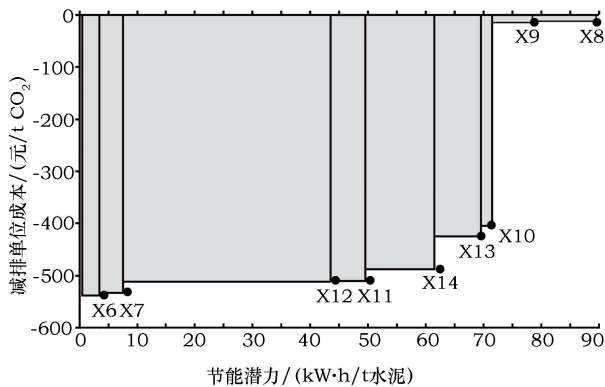


图4 电力环节的节能减排成本曲线

Figure 4 The electricity conservation supply curve

X11、X7、X13、X10组合,累积节能潜力59kW·h/t。
综上所述,燃料排放、电力排放和工艺排放三种来源的综合减排效果如图5所示,图中显示了两种不同情形下的综合减排效果。与工艺排放相关的两种技术(X15和X16)的单位减排成本皆为正,这表明在没有其他政策激励的情况下,这两种技术并不经济可行。若考虑经济成本,则X6、X7、X12、X11、X13、X10、X3、X1、X2组合为最优组合;若追求节能减排最大化,则X6、X12、X11、X14、X13、X10、X1、X4、X2、X15、X16组合最为合适。

3.2 节能减排技术的普及趋势

根据国家发改委公布的8批《国家重点节能技术推广目录》^[30]和2批《国家重点推广的低碳技术目录》^[31]中所提供的数据,代入公式(3)中,表5中列出了各项技术的历史数据和渗透参数。渗透参数越大表示该项技术的渗透速度越慢,由表5可以看出,X6(高效节能选粉技术)和X15(电石渣制水泥规模化应用技术)分别为普及最快和最慢的两项节能减排技术。

根据表5提供的参数和S型曲线函数,若不考虑经济成本,2015—2030年间各项技术的理论最大普及率如图6所示(见第2352页)。X1、X4、X5、X6、X8、X10、X12和X13等8项节能减排技术的普及程度将在2030年接近100%,这是因为这8项节能减排技术的渗透参数皆小于10,且初始普及率就已达到较高水平。其中,X6(高效节能选粉技术)和X12(水泥窑纯低温余热发电技术)2项技术的普及率将率先在2020年达到100%。截至2030年,有6

表5 各项节能减排技术的普及函数参数

Table 5 Penetration rates for various energy conservation

& CO ₂ emission reduction technologies			
技术缩写	2010年普及率/%	2015年普及率/%	渗透参数
X1	20.0	40.0	6.591 718
X2	1.0	5.0	17.409 252
X3	1.5	10.0	11.768 982
X4	10.0	30.0	7.052 552
X5	1.0	27.5	6.334 361
X6	40.0	75.0	3.778 633
X7	1.0	10.0	11.452 106
X8	40.0	60.0	5.552 368
X9	20.0	30.0	9.675 275
X10	1.0	20.0	7.658 967
X11	1.0	5.0	17.409 252
X12	65.0	79.6	4.815 729
X13	30.0	45.0	7.199 470
X14	1.5	10.0	11.768 982
X15	1.0	3.0	24.748 308
X16	1.0	10.0	11.452 106

项技术的普及率接近100%,这6项技术包括:X1(大推力多通道燃烧节能技术)、X4(水泥熟料烧成系统优化技术)、X5(四通道喷煤燃烧节能技术)、X8(辊压机粉磨系统)、X10(曲叶型系列离心风机技术)和X13(稳流行进式水泥熟料冷却技术)。

剩余8项技术中,即X2(高固气比水泥悬浮预热分解技术)、X3(新型干法水泥窑生产运行节能监控优化系统技术)、X7(高效优化粉磨节能技术)、X9(立式磨装备及技术)、X11(水泥企业可视化能源管理系统)、X14(新型水泥预粉磨节能技术)、X15(电石渣制水泥规模化应用技术)和X16(新型干法水泥窑无害化协同处置污泥技术),将在2050年分别达到92.9%、99.8%、99.8%、100.0%、92.9%、99.7%、73.2%和99.8%。

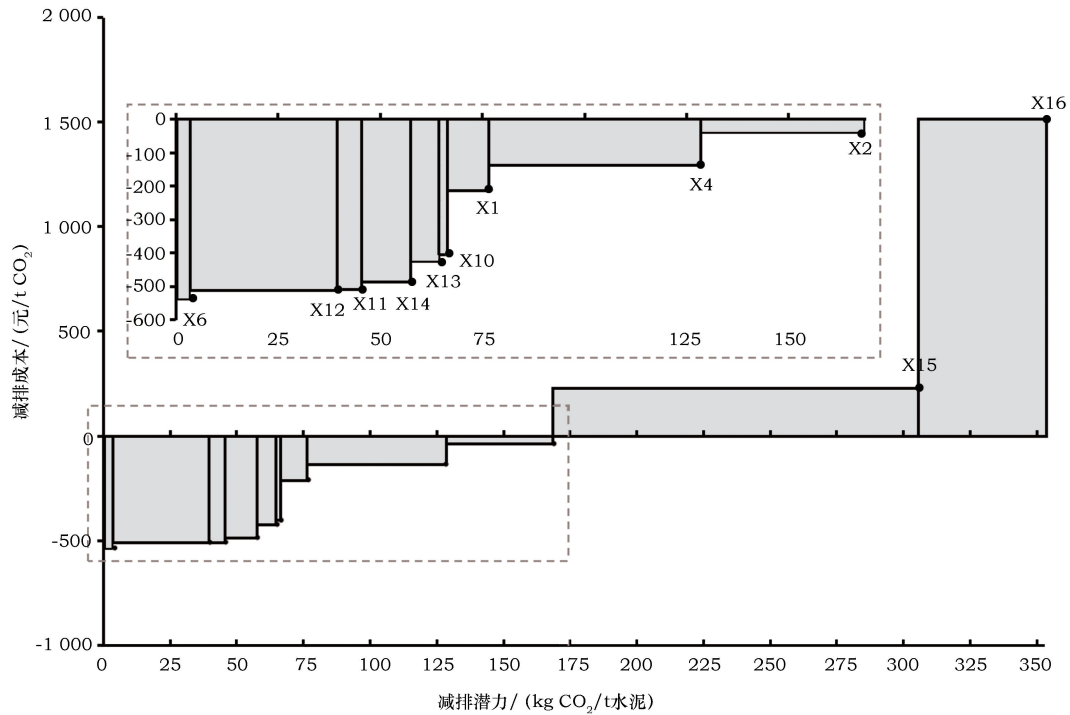
3.3 水泥工业生产碳排放强度演变趋势

基于以上情景设定,利用技术普及曲线模拟各情景下中国水泥行业的能源消耗强度、电力消耗强度、工艺排放强度和综合排放强度,如图7所示(见第2353页)。

(1)在经济效率情景下,2030年以前燃料消耗强度下降速度较为稳定,年均下降幅度保持在1 kg ec/t熟料,燃料消耗强度于2030年达到102kgec/t

2017年12月

a. 节能减排最大化情形



b. 节能减排最小化情形

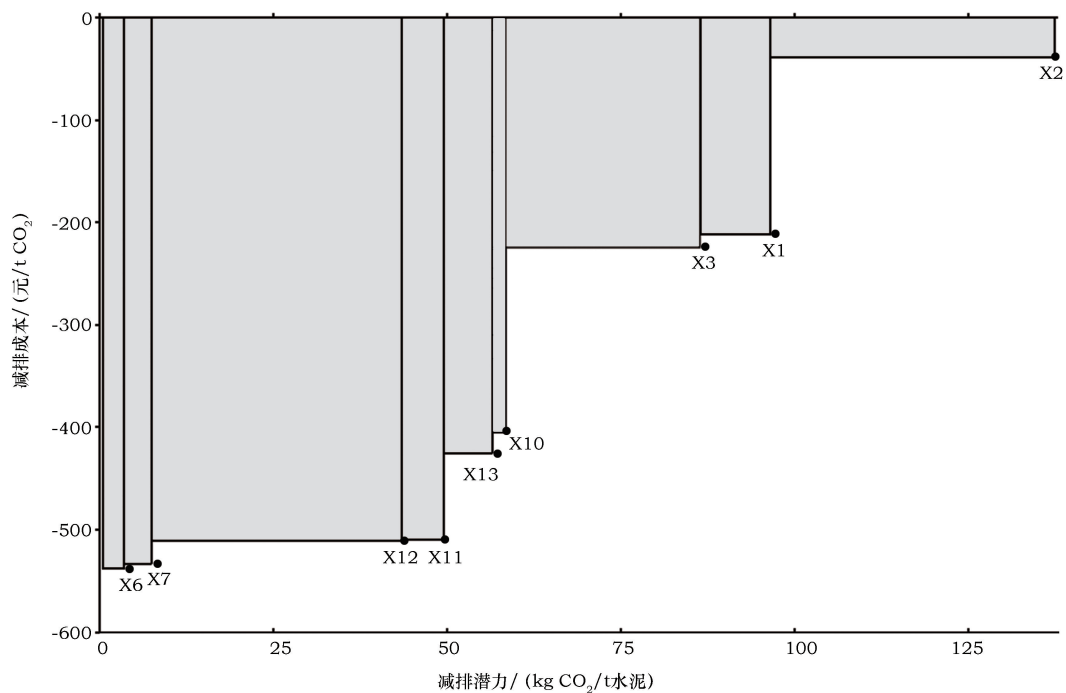


图5 节能减排最大化情形和成本最小情形的综合节能减排成本曲线

Figure 5 The energy conservation supply curves for technological scenario and cost-effective scenario

熟料,随后燃料消耗强度下降幅度开始变小,2050年燃料消耗强度降至93kgce/t熟料。电力消耗强度的下降区间主要集中在2020年之前,年均下降幅度可保持在2kW·h/t水泥之上,但2020年后下降速度

开始减缓,电力消耗强度于2050年达到48kW·h/t水泥。在经济效率情景下,由于X15和X16在经济上仍不具备可行性,因此工艺排放维持525kgCO₂/t熟料。综合排放强度的下降幅度从2014年开始减

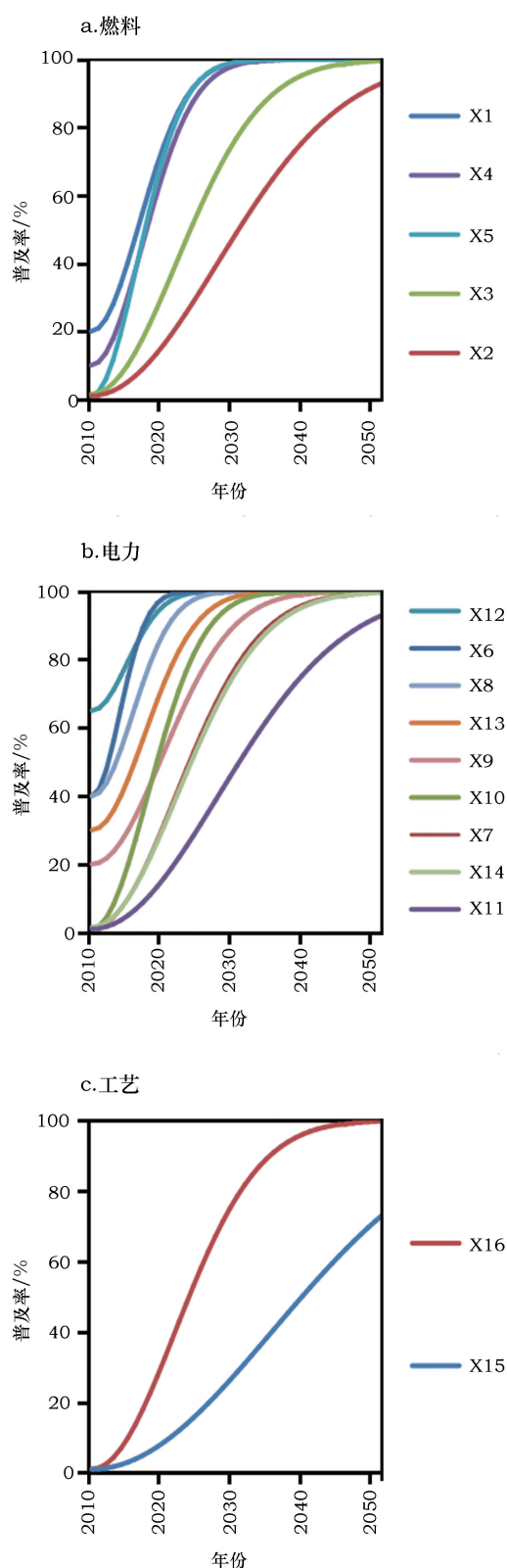


图6 2010–2050年各项节能减排技术的普及趋势

Figure 6 Penetration trends of various energy conservation & CO₂ emission reduction technologies from 2010 to 2050

缓,这是因为水泥熟料比的下降速度在2014年后就开始减缓,2050年综合排放强度达到431kgCO₂/t水泥。2015年水泥熟料比已减少到56.6%,而在避免降低强度和耐久性的前提下,水泥熟料比的极端水平为50%^[20],所以2015年后水泥熟料比的年均下降幅度开始减缓,这也是导致综合排放强度下降速度减缓的原因之一。

(2)在技术情景下,燃料消耗强度的年均下降幅度在2020年以前保持在1.5kgec/t熟料以上,2020年以后,年均下降幅度减少至1.5kgec/t熟料以下,燃料消耗强度在2050年达到87kgec/t熟料。技术情景下电力消耗强度的下降趋势与经济效益情景相似,2020年前年均下降幅度保持在2kW·h/t水泥以上,2020年以后年均下降幅度逐渐降至0.7kW·h/t水泥,电力消耗强度在2050年达到40kW·h/t水泥。工艺排放的年均下降幅度在2020年之前保持在4kgCO₂/t熟料,而在2020年后上升至5kgCO₂/t熟料,2027年后下降幅度又逐渐减少。最终工艺排放强度在2050年下降至379kgCO₂/t熟料。综合排放强度于2050年达到342kgCO₂/t水泥。

(3)基准情景下,燃料消耗强度、电力消耗强度和工艺排放强度皆保持不变,综合排放强度将降至491kgCO₂/t水泥。对比基准情景,经济效率情景下和技术情景下的燃料消耗强度可分别降低26kgec/t熟料和32kgec/t熟料,电力消耗强度可分别降低32kW·h/t水泥和39kW·h/t水泥,工艺排放强度可分别降低0kgCO₂/t熟料和73kgCO₂/t熟料,综合排放强度可分别降低60kgCO₂/t水泥和149kgCO₂/t水泥。

从节能结构上来看,在经济效率情景下,三种技术的燃料节约贡献比例在2020年以前相近,但2020年以后,由于技术X1的推广速度开始下降,因此其贡献开始逐渐下降(图8,见第2354页)。在技术情景下,2020年以前燃料消耗的节约主要由技术X4贡献,但2020年以后技术X4的普及程度已达到67%,其节能贡献开始逐渐下降。图8中还给出了两种情景下各项节电技术的贡献,两种情景下技术X12的贡献比例皆最大。技术X6的贡献在初期占较重要地位,但2015年以后,其贡献

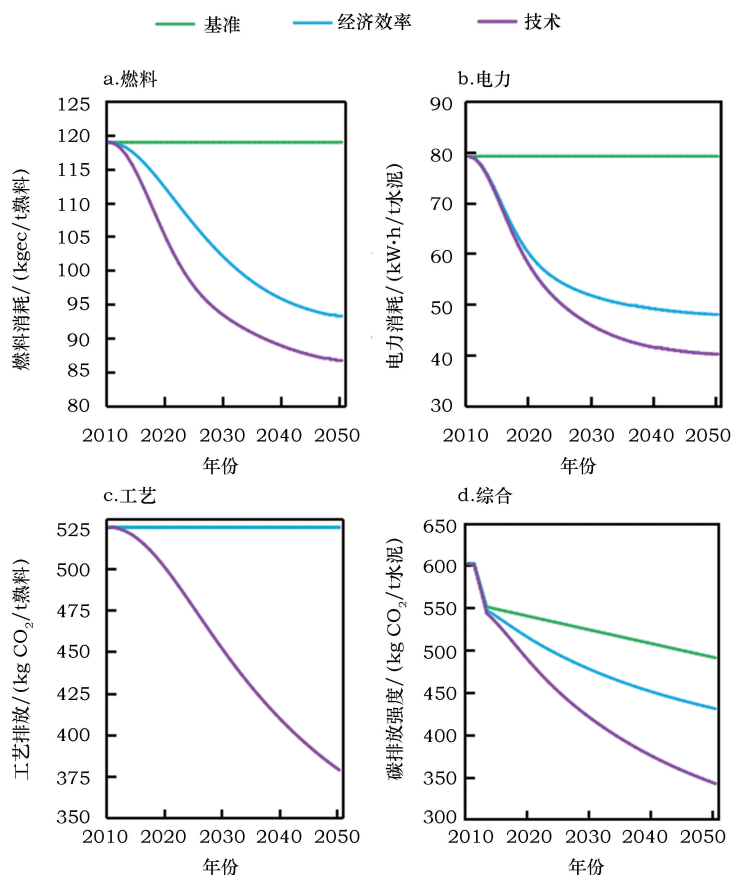


图7 2010—2050年中国水泥行业燃料消耗强度、电力消耗强度、工艺排放强度和综合排放强度的演化趋势

Figure 7 Trends for fuel intensity, electricity intensity, process emission intensity and aggregated emission intensity of Chinese cement industry from 2010 to 2050

逐渐下降。其它技术的贡献比例皆保持相对稳定。

与 IEA 制定的 2050 年目标(420kgCO₂/t 水泥)相比,技术情景下,中国水泥工业的碳排放强度将足够完成既定目标;而经济效率情景下,中国水泥工业的碳排放强度离减排目标仍有 11kgCO₂/t 水泥的差距。这意味着,中国水泥工业若要实现 IEA 制定的减排目标,则需要实施更为强力的政策手段,如政府调控,能源或碳税机制等。

3.4 可行性验证

为验证节能减排曲线预测结果的可行性,本文收集整理 197 条中国新型干法水泥生产线样本,覆盖了 22 个省市区(京、冀、晋、蒙、辽、苏、浙、皖、闽、赣、鲁、豫、鄂、湘、粤、桂、川、黔、滇、藏、陕、新),2010—2015 年中国实际运营中的新型干法生产线分别有 1287、1428、1537、1587、1758、1764 条,抽样样本规模足够代表中国水泥工业的现状。该样本集由中国科学院战略性先导碳专项课题“水泥

生产过程排放”课题组收集,具体抽样手段和数据处理方法见相关文献[24, 32-35]。如图 9 所示,2013—2015 年中国水泥工业的平均燃料消耗强度和电力消耗强度与基准情景的能耗水准基本一致。若以经济效率情景中 2030 年和 2050 年的能耗水准作为参照,197 条水泥生产线中,已有 19 和 5 条的燃料消耗强度达标,已有 18 和 16 条的电力消耗强度达标;若以技术情景中 2030 年和 2050 年的能耗水准作为参照,则有 5 和 3 条生产线的燃料消耗强度已达标,有 14 和 8 条生产线的电力消耗强度已达标。这表明已有相当数量的水泥企业达到较低能耗水准,经济效率情景和技术情景中所推测的中国水泥工业碳排放路径具备可行性。

4 结论和讨论

4.1 结论

本文从自下而上的角度,分析了水泥工业各项节能减排技术的潜力以及普及趋势,设计了三种可

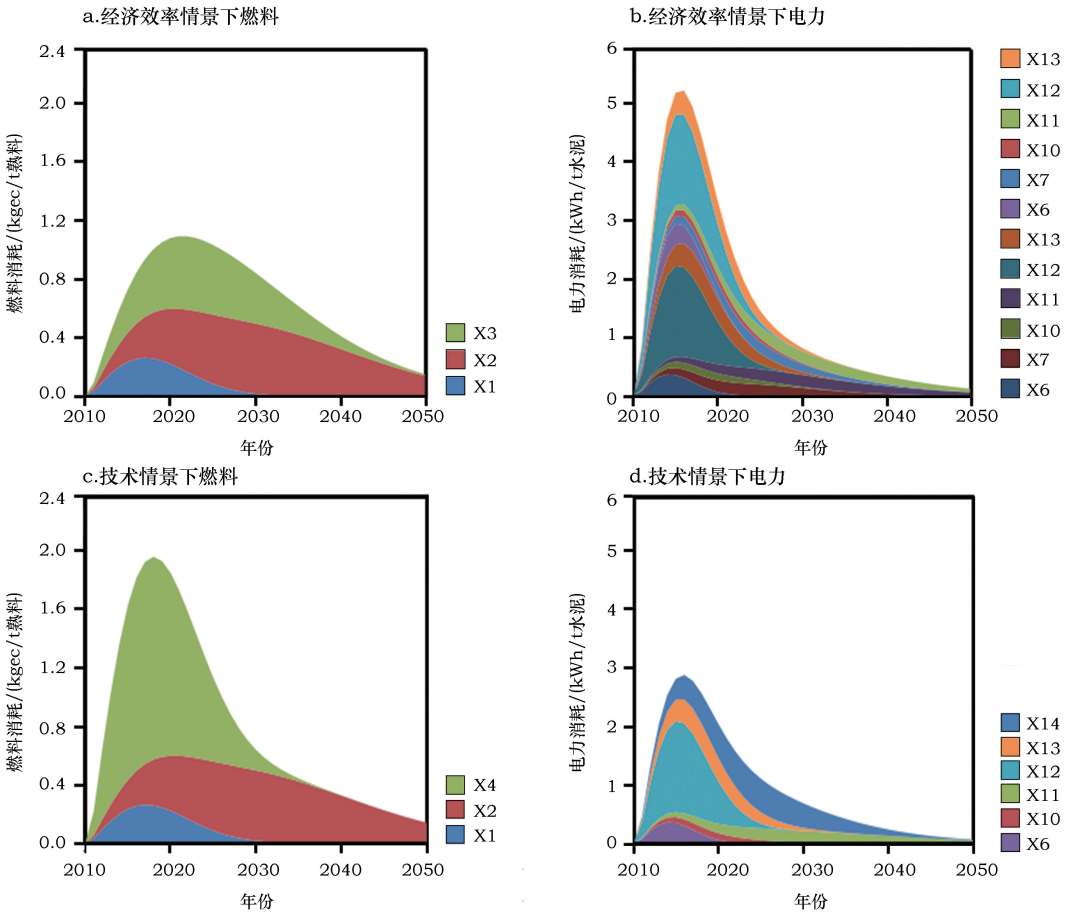


图8 经济效率情景和技术情景的节能贡献结构

Figure 8 Compositions of reserved energies in the cost-effective scenario and technological scenario

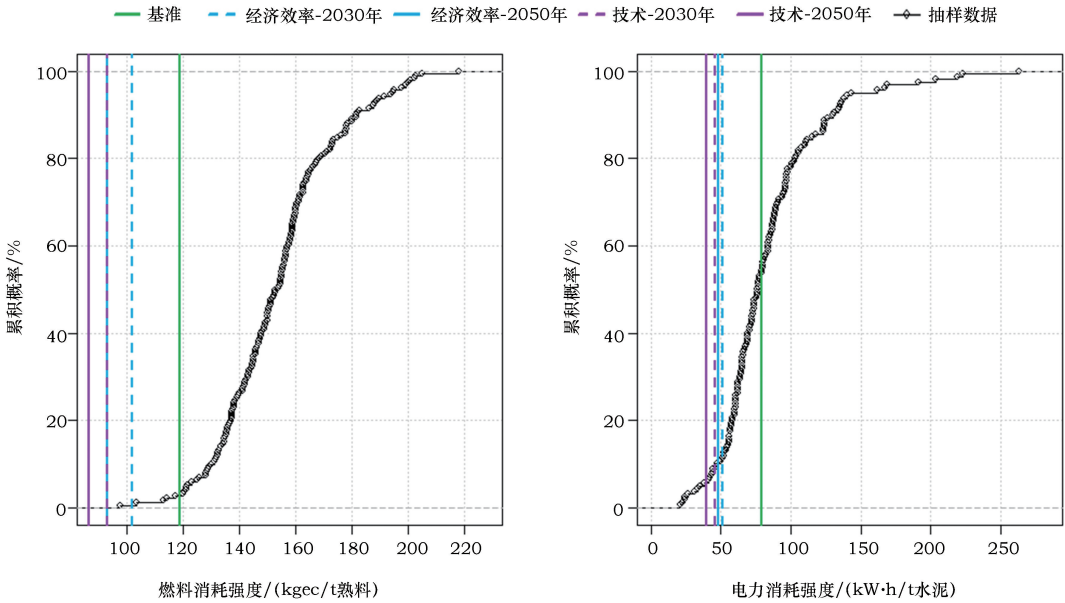


图9 水泥工业燃料消耗强度和电力消耗强度的抽样累积分布曲线

Figure 9 The cumulative distribution curves of fuel intensity and electricity intensity of Chinese cement industry

2017年12月

能情景模拟中国水泥工业生产碳排放强度的演进趋势,并利用中国水泥工业的实地调研数据对模拟结果进行验证,得出以下结论:

(1)到2050年,三种情景下中国水泥工业生产综合碳排放强度将分别达到491kgCO₂/t水泥(基准情景),431kgCO₂/t水泥(经济效率情景)和342kgCO₂/t水泥(技术情景)。

(2)燃料环节节能减排潜力最大的技术为X4(水泥熟料烧成系统优化技术),电力环节节能减排潜力最大的技术为X12(水泥窑低温余热发电技术),工艺环节减排潜力最大的技术为X15(电石渣水泥规模化应用技术)。

(3)与由下至上的抽样结果进行比较验证,本文情景分析中所设计的路径具有可行性。

(4)经济效率情景下,中国水泥工业的总体碳排放强度将不能达成IEA的既定目标,技术情景下,则可保证该目标的顺利完成。

4.2 讨论

本文所使用情景分析中,经济效率情景反映的是不增加水泥企业额外负担的前提下,水泥行业总体碳排放强度的可能变化趋势,而技术情景反映的是在加大节能减排相关政策力度的背景下,水泥行业总体碳排放强度的可能变化趋势。根据情景分析的结果,本文认为中国水泥工业的碳排放强度将会持续降低,但单纯依靠市场和企业的自发行为无法实现IEA的中国水泥行业的既定减排目标,水泥生产各个过程仍具有较大的节能减排潜力,其中工艺过程的减排潜力尤为突出,但相应技术的投资成本也相对较高。相关管理部门需出台相关政策,推进水泥行业节能减排技术的普及。当然,采取何种机制和政策、政策力度,仍需进一步深入研究,囿于篇幅和数据所限,本文并未深入讨论企业对节能减排政策的响应机制、不同政策力度对水泥行业碳排放强度的影响,譬如,若对水泥企业征收碳税或碳交易制度,是否会影响节能减排技术的普及速度。另外,本文在计算节能减排技术成本曲线时所使用的投资成本、折旧率、能源价格等参数都基于一定假设或来自于文献调研,各参数的假设是否合理以及结果对参数的敏感性如何,这也是今后研究需要努力的方向之一。

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、杨艳等在水泥企业调研中的辛苦工作。

参考文献(References):

- [1] Woodward R, Duffy N. Cement and concrete flow analysis in a rapidly expanding economy: Ireland as a case study[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(4): 448-455.
- [2] 李新, 石建屏, 吕淑珍, 等. 中国水泥工业 CO₂产生机理及减排途径研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(5): 1115-1120. [Li X, Shi J P, Lv S Z, et al. CO₂ emissions from the Chinese cement industry and methods to reduce them[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(5): 1115-1120.]
- [3] Zhang S, Worrell E, Crijns-Graus W. Mapping and modeling multiple benefits of energy efficiency and emission mitigation in China's cement industry at the provincial level[J]. *Applied Energy*, 2015, 155: 35-58.
- [4] Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions[EB/OL]. (2017-09-01) [2017-11-19]. http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国气候变化初始国家信息通报[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004. [National Development and Reform Commission. Initial National Communication on Climate Change of the People's Republic of China: Beijing, 2004[M]. China Planning Publishing House, 2004.]
- [6] 中华人民共和国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[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013. [National Development and Reform Commission. Second National Communication on Climate Change of the People's Republic of China[M]. China Economic Publishing House, 2013.]
- [7] 中华人民共和国国家计划委员会. 当前国家重点鼓励发展的产业、产品和技术目录[J]. 中华人民共和国国务院公报, 1997, (40): 1735-1754. [National Planning Commission. Current national focused industries, products, and technology inventory[J]. *Bulletin of the State Council of the People's Republic of China*, 1997, (40): 1735-1754.]
- [8] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 关于清理整顿小玻璃厂小水泥厂的意见[EB/OL]. (1999-05-22) [2017-11-01]. http://www.zhb.gov.cn/gzfw_13107/zcfw/gf/gwyfbdgfwj/201605/t201

- 60522_343100.shtml. [National Economic Commission. Opinions on Cleaning Up and Rectification of Small Cement Plants and Glass Factories[EB/OL]. (1999-05-22) [2017-11-01]. http://www.zhb.gov.cn/gzfw_13107/zcfg/fg/gwyfbdgfwj/201605/t20160522_343100.shtml.]
- [9] 中华人民共和国国务院. 中国应对气候变化国家方案[EB/OL]. (2007-06-03) [2017-11-01]. <http://www.ccchina.gov.cn/Detail.aspx?newsId=28013>. [State Council of the People's Republic of China. China's National Plan for Addressing Climate Change [EB/OL]. (2007-06-03) [2017-11-01]. <http://www.ccchina.gov.cn/Detail.aspx?newsId=28013>.]
- [10] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL]. (2011-03-16) [2017-11-01]. http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm. [State Council of the People's Republic of China. Outline of the Twelfth Five Year Plan for National Economic and Social Development[EB/OL]. (2011-03-16) [2017-11-01]. http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm.]
- [11] 中华人民共和国国务院. 工业转型升级规划 (2011-2015年) [EB/OL]. (2011-12-30) [2017-11-02]. http://www.gov.cn/zwggk/2012-01/18/content_2047619.htm. [State Council of the People's Republic of China. Industrial Transformation and Upgrading Planning (2011-2015) [EB/OL]. (2011-12-30) [2017-11-02]. http://www.gov.cn/zwggk/2012-01/18/content_2047619.htm.]
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部. 水泥工业“十二五”发展规划[EB/OL]. (2011-11-29) [2017-11-02]. <http://www.ccement.com/news/Content/48009.html>. [Ministry of Industry and Information. Twelfth Five Year Plan for Cement Industry[EB/OL]. (2011-11-29) [2017-11-02]. <http://www.ccement.com/news/Content/48009.html>.]
- [13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国水泥生产企业温室气体排放核算方法与报告指南[EB/OL]. (2013-12-10) [2017-11-02]. http://www.tanpaifang.com/zhengcefagui/2013/121026842_2.html. [National Development and Reform Commission. Greenhouse Gas Emission Accounting Methods and Reporting Guidelines for Chinese Cement Enterprise[EB/OL]. (2013-12-10) [2017-11-02]. http://www.tanpaifang.com/zhengcefagui/2013/121026842_2.html.]
- [14] WBCSD/IEA. Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions Up to 2050. World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency[EB/OL]. (2010-10-01) [2017-11-19]. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf>.
- [15] Lei Y, Zhang Q, Nielsen C, *et al.* An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990-2020[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(1): 147-154.
- [16] Ke J, Zheng N, Fridley D, *et al.* Potential energy savings and CO₂ emissions reduction of China's cement industry[J]. *Energy Policy*, 2012, 45: 739-751.
- [17] Shi Y, Chen L, Liu Z, *et al.* Analysis on the carbon emission reduction potential in the cement industry in terms of technology diffusion and structural adjustment: a case study of Chongqing [J]. *Energy Procedia*, 2012, 16(3): 121-130.
- [18] Wang Y, Höller S, Viebahn P, *et al.* Integrated assessment of CO₂ reduction technologies in China's cement industry[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 20(2): 27-36.
- [19] Song D, Yang J, Chen B, *et al.* Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 916-923.
- [20] Li N, Ma D, Chen W. Projection of cement demand and analysis of the impacts of carbon tax on cement industry in China[J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 1766-1771.
- [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]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 299-313.
- [22] 毛紫薇, 王灿, 陈吉宁. 山东省水泥行业 CO₂ 排放情景与减排效果分析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(5): 1107-1114. [Mao Z W, Wang C, Chen J N. Scenario analysis for CO₂ emission reduction in Shandong's cement sector[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(5): 1107-1114.]
- [23] 中国水泥协会. 中国水泥年鉴[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2014. [China Cement Association. China Cement Yearbook [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2014.]
- [24] Cao Z, Shen L, Zhao J, *et al.* Toward a better practice for estimating the CO₂ emission factors of cement production: an experience from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 527-539.
- [25] Hasanbeigi A, Morrow W, Masanet E, *et al.* Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement industry in China[J]. *Energy Policy*, 2013, 57(3): 287-297.
- [26] Hasanbeigi A, Price L, Lu H, *et al.* Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: a case study of 16 cement plants[J]. *Energy*, 2010, 35(8): 3461-3473.
- [27] Liu X, Yuan Z, Xu Y, *et al.* Greening cement in China: a cost-effective roadmap[J]. *Applied Energy*, 2017, 189: 233-244.
- [28] Habert G, Billard C, Rossi P, *et al.* Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(5): 820-826.
- [29] Xu J H, Yi B W, Fan Y. A bottom-up optimization model for long-term CO₂ emissions reduction pathway in the cement industry: a case study of China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 44: 199-216.
- [30] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家重点节能技术推广目录 1-8[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2008-2015. [National Development and Reform Commission. National List

2017年12月

- of Key Energy-Saving Technology Promotion I- VIII[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2008-2015.]
- [31] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家重点推广的低碳技术目录 1-2[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2014-2015. [National Development and Reform Commission. National List of Key Low-Carbon Technology Promotion I- II[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2014-2015.]
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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[J]. 科学通报, 2016, 61(26): 2926-2938. [Shen L, Zhao J A, Wang L M, *et al.* Calculation and evaluation on carbon emission factor of cement production in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(26): 2926-2938.]
- [35] Shen L, Cheng S, Gunson A J, *et al.* Urbanization, sustainability and the utilization of energy and mineral resources in China[J]. *Cities*, 2005, 22(4): 287-302.

A bottom-up analysis of CO₂ emission intensity of Chinese cement industry

CAO Zhi^{1 2 3}, SHEN Lei^{1 2}, LIU Litao^{1 2}, ZHONG Shuai^{1 2}, LIU Gang³

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

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

3. SDU Life Cycle Engineering, Department of Chemical Engineering, Biotechnology and Environmental Technology, University of Southern Denmark, Odense M 5230, Denmark)

Abstract : To tackle climate change, China has to curtail CO₂ emissions from high-emission industries. An outlook of Chinese cement industry's CO₂ emission intensity would facilitate achieving national CO₂ emission reduction targets. The cement industry is one of the basic industries of a country. Cement is the primary component of concrete and extensively used in construction activities. From 1981 to 2015, China became the biggest cement producer in the world since the cement consumption in China has increased from 82.08 to 2348 million tons. As China's future urbanization requires cement, the Chinese cement industry is confronting an ambitious reduction target. Here we employed the conservation supply curve and the technology penetration curve to estimate the cost and penetration trend of each energy conservation and carbon reduction technology, based on which we developed three scenarios to simulate future trends in CO₂ emission intensity of the Chinese cement industry. The results indicate that, up to 2050, the CO₂ emission intensity of the Chinese cement industry under basic, cost-effective, and technological scenarios will be 491, 431, and 342 kg CO₂/ton cement, respectively. Compared to the target set in IEA, only the technological scenario would ensure this target, with a gap of 11 kg CO₂/ton cement under the cost-effective scenario. From scenario analysis we conclude that the Chinese cement industry and related administrative departments should take action (such as, administrative regulation, energy tax, carbon tax) to further promote energy conservation and carbon reduction technologies and mitigate CO₂ emission intensity of different processes. We also suggest several specific energy conservation and carbon reduction technologies to significantly contribute to CO₂ emission reduction.

Key words : cement production ; CO₂ emissions ; energy conservation supply curve ; technology penetration curve ; CO₂ emission reduction scenario analysis