

基于EEA方法的中国水泥制造业能耗的空间差异

陈枫楠^{1,2}, 沈 镭¹, 刘立涛¹, 高天明^{1,2}

(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)

摘要: 基于对中国23个省区的水泥生产线的实地调研数据以及2012年水泥制造业的行业数据和相关社会经济数据, 运用EEA方法计算了各省区水泥制造业的能耗, 并对中国水泥制造业能耗的空间格局进行描述和分析。研究发现: ① 中国水泥制造业能耗总量较多分布在以安徽、山东为核心的东部地带和以四川为核心的西部地带, 其中能源焓耗强化了东部核心, 而外部性焓耗不同程度地突出了中西部省份的社会隐性成本; ② 中国水泥制造业的能效呈现出从西部向东部递增的特点, 尤其体现在能源利用效率、劳动力效率和资金利用效率三部分, 而环境效率强凸显了西藏、新疆、内蒙古、山西的环境成本; ③ 在能耗总量和能耗强度共同作用下, 对23个省区进行分类, 依据其能耗特征可分为8类; ④ 较高的行业集中度是水泥制造业能效提高的主要驱动力。

关键词: 水泥制造业; 空间差异; 能耗; EEA方法; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201510003

1 引言

传统的能源研究领域通常只考虑能源消耗的数量, 而很少考虑能源消耗的质量。近年来, 国际上逐步引入一个全新的度量能源消耗质量的概念, 即“焓 (Exergy)”, 它是衡量如何用最小的能源消耗达到最大使用效益的重要指标。当今, 关于“能源消耗”的概念正经历着彻底的重新评价, 以响应能耗与环境及整个社会的相关性。传统的“能源消耗”研究针对资源本身, 自从生物圈意识理论产生以来^[1-2], 能量系统分析开始区分能源和原料资源、以及劳动力和货币流。在现代工业社会, 货币成本成为衡量能源消耗的关键决策变量, 然而采用货币值作为能量系统评价中的表征值存在局限性, 因为货币成本的评估受到市场、资源属性以及环保活动等多方影响。1986年, Valero发现, 如果所有的“燃料”都有一个焓成本而不是货币值时, 最终产品的成本就可以用统一的单位来表达 (J/kg 等)^[3]。于是, 在“累积焓消耗”^[4]的基础上, 延伸出了扩展焓账户法^[5], 目标在于将所有的外部性都包含到焓系统分析中, 以焓为单位将其定量化。

水泥制造业是国家基础设施建设的重要产业之一, 但同时又是能耗密集型产业。在所有产业中, 水泥制造业的能耗在2%~6%左右; 在工业领域, 其能耗达到12%~15%^[6]。粗略估计, 每吨制成品的水泥消耗60~130 kg的燃料和110 kWh的电力^[7]。中国作为全球

收稿日期: 2014-12-19; 修订日期: 2015-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271547, 41401644); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05010400)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271547, No.41401644; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA05010400]

作者简介: 陈枫楠(1988-), 女, 辽宁抚顺人, 博士, 主要从事能源资源经济研究。E-mail: chenfn.12b@igsnr.ac.cn

通讯作者: 沈镭(1964-), 男, 湖北麻城人, 博士, 研究员, 主要从事资源经济与政策研究。E-mail: shenl@igsnr.ac.cn

水泥生产大国之首, 2012年的产量达到21.84亿t^[8], 占全球产量的50%以上, 但在水泥生产的能耗方面, 中国同国际先进水平依然存在不小的差距。整体来看, 中国每吨水泥的能耗要比世界先进水平高40%左右^[9], 平均煤耗高出国际先进水平11%~20%左右, 平均电耗高出23%左右。另一方面, 水泥生产排放的废弃物对环境造成较大影响, 其中排放量最大的污染物CO₂占污染物总量的99.2%, 可见中国水泥产业在可持续发展和低碳经济中将面临巨大的挑战和压力。因此, 提高行业增长的可持续性, 是中国水泥制造业发展的内在要求。

目前为止, 针对特定行业的能量系统研究中不乏对水泥制造业的关注, 大多数研究是从国家层面和部门层面上关注能源消耗。例如, Schuer等1992年计算了德国水泥工业的能源消耗值^[10]。Saxena等1995年计算了印度水泥工业的能源消耗和在有效节约方法下的能源节约量^[11]。Phylipsen等1997年以水泥工业为实证案例, 对制造业的能源效率研究方法进行了比较^[12]。Worell等对美国水泥产业的能耗进行了较为深入的分析, 列出了多种提升水泥制造业能效经济可行的技术和方法^[13-14]。曾学敏估算了不同的节能措施带给整个中国水泥制造业的能源节约潜力^[15]。齐宝平总结国际与国内不同规模水泥生产线及水泥粉磨企业的能效差异^[16]。Ali Hasanbeigi等2000年采用存量供给曲线模型(CSC)探讨了泰国水泥产业的电力使用效率和燃料使用效率, 并对节约能源进行了经济性分析^[17]。SÖGÜT 2012年以水泥熟料数据为基础, 分析了土耳其水泥产业的能效变化趋势^[18]。然而, 目前已存在的研究缺乏对空间格局及其差异的深入分析。因此, 本文以一个新视角探讨水泥制造业的可持续性, 不仅要将自然资源的使用直接定量化, 还要将外部性间接定量化, 结合扩展焓账户分析方法和空间分析与计量统计等方法, 对中国水泥制造业的省际空间差异进行较为深入的分析, 目标在于为中国水泥制造业的可持续发展和空间布局提供决策参考。

2 研究方法及数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 扩展焓账户(EEA)方法 EEA的概念在1998年形成^[19]。“扩展”在于表明产品成本的计算除了包括物质、能量, 还要包含外部性, 用公式表示如下:

$$EE = CE_x C + E_L + E_K + E_O \quad (1)$$

式中: $CE_x C$ 表示系统吸收的物质和能量流的焓成本, 即累积焓消耗; E_L 、 E_K 、 E_O 则分别表示劳动力、资金和环境成本的焓当量值。

作为一种资源量化工具, EEA能够将外部效应(资金、劳动力、环境修复等)转换为累积焓成本, 从而将它们纳入到综合资源成本评估体系中。因此EEA方法既从热动力的角度反映了生产链的“效率”, 又揭示了整个社会的“隐藏”资源成本。同时, 由于外部效应的当量焓成本依赖于社会类型和分析的时间序列, 因此扩展焓成本也能反映某一社会的“转换效率”。由此可以看出, EEA方法能够提供更多的信息用于区域层面能量转换系统的比较分析。

2.1.2 物质和能量的焓测度 根据笔者对典型水泥生产线的焓计算, 每生产1 kg水泥, 需要燃料煤的焓为2747.750 KJ, 需要电力提供的焓为261.775 KJ, 其他物质(石灰石、粘土、校正材料、石膏、粉煤灰等)提供的焓不超过2 KJ。因此, 本文选取燃料煤和电力测度累积焓消耗, 即:

$$CE_x C = E_{a1} + E_{a2} + E_b \quad (2)$$

式中： E_{a1} 代表煤的燃烧焓； E_{a2} 代表煤的显热焓； E_b 代表电力做功转化成的焓。可分别用如下公式计算^[20]：

$$E_{a1} = h_{L,f} + Cw \quad (3)$$

$$E_{a2} = m \times C \times \left[(T - T_0) - T_0 \times \ln \frac{T}{T_0} \right] \quad (4)$$

$$E_b = Q = N \times K \times \beta \quad (5)$$

式中： $h_{L,f}$ 是燃料煤的低位发热值（LHV）； C 是水分在参考环境温度下的蒸发潜热； w 是燃料煤中的水分含量； m 是煤的流速； C 是煤的比热值； T 是煤的温度；下角标‘0’代表参考环境； Q 是电力做功转换成的能量值； N 是电动机输入的净功； K 是电力做功的热当量； β 是功转换成热能的比例。

2.1.3 外部性的焓测度

(1) 劳动力外部性的计算

假设任何社会中，社会中的所有成员是由于劳动者的生产活动得以生存的^[21]，因此进入劳动力焓中的部分即为得到充分使用的部分（相对于非劳动人口而言），因此，在扩展焓账户中，本文用如下公式计算进入水泥制造业的劳动力焓当量值：

$$E_L = \gamma \times \alpha \times E_{in} = \gamma \times f \times e_{surv} \times N_h \quad (6)$$

式中： γ 是水泥制造业劳动力占社会总劳动力的比重； α 代表了由社会吸收并转化为劳动力的焓占总输入焓 E_{in} 的比例； f 是消耗的扩大系数； N_h 是人口数量； e_{surv} 代表每个人用于新陈代谢的最小焓量（约等于 1.05×10^7 J/人·天）^[21]。扩大系数 f 采用人类发展指数（HDI）计算，其中分母是前工业社会的人类发展指数值，约为0.055^[21]，公式如下：

$$f = \frac{HDI}{HDI_0} \quad (7)$$

(2) 资金外部性的计算

在假定进入社会的资源总焓流是用来维持工作者产生劳动力的基础上，还需要假定产生货币流通的焓总量与转换为劳动力的焓总量之间存在比例关系^[21]，即：

$$E_k = \beta \times E_L = \alpha \times \beta \times E_{in} \quad (8)$$

在这里， β 表示除工资报酬外，一个社会所能产生的货币流通能力，即相对于总累计工资的“金融比例”或“金融扩大因子”，用公式可表示如下：

$$\beta = \frac{M_F}{S} = \frac{M2 - S}{S} \quad (9)$$

式中： M_F 表示金融活动； S 表示总累积工资； $M2$ 代表经济系统中流通货币和金融活动的总量。与 α 相似， β 同样也取决于空间（地理位置）和时间序列（历史时期和技术水平），同时受到该国的社会经济参数的影响。

(3) 环境外部性的计算

EEA方法中，对环境外部性的计算包括一系列额外焓，这些额外焓使得系统向环境排放的废弃物的焓差值为0，即使得排出的污染物与环境保持平衡。因此，环境成本的公式如下：

$$E_0 = EE_{RP} + E_{buffer} \quad (10)$$

式中： E_0 是环境成本的焓值； EE_{RP} 是污染物处理系统所吸收的扩展焓； E_{buffer} 是环境缓冲能力的焓消耗。由于热力学第二定律认为任何一个真实的系统都不能向参考环境排放焓差值为0的物质流，因此，在EEA方法中，这些不可避免的残留焓（热焓、化学焓、

或其他类型烟)都进入到环境缓冲能力的部分,即 E_{buffer} 。

由于碳排放捕捉和储存的成本研究还处于发展阶段,因此在计算 CO_2 排放的环境外部性时,假设认为周围环境会以自然过程的方式湮平 CO_2 的烟,而不需要任何处理过程,这时环境成本约等于环境缓冲部分的烟。这时, CO_2 排放的环境成本的烟值等于:

$$E_{\text{CO}_2} = f_{\text{CO}_2} \times m_s \times C_{\text{CO}_2} \times \left[(T - T_0) - T_0 \times \ln \frac{T}{T_0} \right] \quad (11)$$

式中: f_{CO_2} 代表 CO_2 的排放因子 ($\text{kg CO}_2/\text{t}$ 熟料); m_s 代表熟料总产量; C_{CO_2} 代表 CO_2 的比热; T 表示排出 CO_2 的温度; T_0 表示环境温度。其中 CO_2 排放因子采用本研究小组的计算结果^[22]。

2.2 数据来源

截至2013年12月,本研究组对中国23个省区的水泥生产线进行了大规模抽样调查,其中包括新型干法生产线170条、立窑生产线75条、特种水泥和粉磨站94条,共计339条生产线1755个样品。因此输入输出数据来源于2011-2013年的企业和生产线的实地调研数据,包括企业年生产用实物煤消耗量、实物煤加权平均低位发热值、燃料煤中水分含量、入窑煤的温度、电力消耗量、熟料产量、 CO_2 排放量和排出 CO_2 的温度,其中 CO_2 排放量经计算得出^[22]。

经济数据中,人口总数、劳动力总数、总累积工资、国内生产总值来源于《中华人民共和国经济统计年鉴》^[23]; $M2$ 值来源于中国人民银行网站年度统计数据^[24],各省区的 $M2$ 值根据其GDP占全国总量的权重进行估算;各省年平均温度数据来源于中国气象科学数据共享服务网^[25],HDI人类发展指数借鉴胡斌的计算结果^[26]。

水泥制造业的行业数据主要来源于《中国水泥年鉴》^[27],包括熟料总产量、水泥制造业从业人员数、水泥制造业人均年工资福利费,由于《2012-2013中国水泥年鉴》没有分省的熟料产量、从业人员数和人均工资福利费的数据,因此2012年各省区的熟料产量数据来源于中商情报网^[28],而2012年水泥制造业从业人员数和人均工资福利费的数据根据2005-2010年的数据估算得出。

2012年全国熟料总产量为127854万t,而采样省份的熟料总产量达到116950万t,占全国总产量的91.5%,说明采样省份代表了水泥制造业的绝大部分产量,因此可以通过采样数据描绘全国的空间格局。本文通过各省区采样生产线的熟料产量占该省熟料总产量的比重推演各省份水泥制造业的总能耗。

3 中国水泥制造业能耗总量的空间格局及差异

依据有关数据及公式(1)~(11),计算出2012年中国23个省级行政区划的总能耗(扩展烟)以及组成总能耗的各部分烟值,包括能源烟耗、劳动力外部性烟耗、资金外部性烟耗和环境外部性烟耗(表1)。

3.1 省际的空间格局及差异

(1) 总能耗(扩展烟)的空间格局。截至2012年底,安徽省拥有最多的水泥制造业能耗(表2),山东省和四川省位居其次,河南省列第4位,前十能耗大省占全国总能耗的比重接近60%,其余6大省区为广西、广东、湖南、河北、云南和湖北,能耗在280~300万亿KJ左右。西藏和北京的总能耗相对其他省区而言非常小,只有约20万亿KJ左右。总体看,中国水泥制造业能耗的空间分布呈现出两大核心,一个是以安徽和山东为

核心的东部区域,另一个是以四川为核心的西部区域,东南地区的水泥制造业总能耗大大超出西北地区。

(2) 组成扩展焯的各部分差异。水泥制造业的能源焯耗、劳动力外部性焯耗、资金外部性焯耗、环境外部性焯耗具有不同的空间格局(图1)。能源焯耗的布局将东部地区的核心——安徽省更加凸显,西部地区的核心——四川的辐射效应则相对弱一些;劳动力焯耗的空间格局呈现出河北、山东、四川和湖南四大省区,浙江、福建和广东三大东南沿海省区的劳动力焯耗相对较少;从资金焯耗的空间布局特征来看,东部地区明显低于中西部地区,西部的水泥能耗大省四川消耗在资金上的能量成本远远超过了东部的安徽,另外,湖南、广西的资金焯耗显著;而环境焯耗强化了东部和西部的核心,同时突出了广东和广西的环境成本。

在不考虑社会隐藏成本时,广东、云南、湖北用于水泥制造业的能源消耗较大(表3),一方面是由

于其使用的燃料煤质量较低,另一方面由于这些省区内水泥行业的规模经济和行业集中度较低;四川省由于受到西南水泥整合的影响,其水泥制造业的资金焯耗和劳动力焯耗较高;安徽省得益于华东地区较完善的协同机制和较高的行业集中度,其劳动力和资金的转换效率都很高;浙江、广东、河南、安徽、山东在产能过剩的背景下保持了较高的环境焯耗,可考虑未来在这些区域实行碳税政策以控制环境成本。

3.2 三大地带的差异

(1) 水泥制造业能耗在三大地带的分布。总体来看,水泥制造业的总能耗(扩展焯耗)在西部地带最大(图2),占全国比重的34.6%;其次是东部和中部。能源消耗焯在东部和西部几乎相同,最小的是中部地带。劳动力焯消耗有37%分布在西部地带,东部和中部略低。资金焯消耗在所有外部性成本中最小,呈现出西部大于中东部的特点。环境焯消耗在东、中、西地带的比例为35:31:34。综合劳动力、资金和环境成本,西部地

表1 2012年中国23个省区水泥制造业能耗核算结果
(万亿KJ)

Tab. 1 Exergy consumption for cement production in 23 provinces of China in 2012 (trillion KJ)

	扩展焯	能源焯耗	劳动力焯耗	资金焯耗	环境成本焯耗
安徽	485.937	443.641	22.363	2.221	17.712
山东	418.394	360.372	39.139	4.624	14.259
四川	403.122	328.768	52.613	8.921	12.820
河南	338.594	300.191	25.007	1.980	11.416
广西	298.105	255.748	25.554	6.342	10.462
广东	295.514	264.361	19.731	0.566	10.857
湖南	291.936	237.273	38.695	8.170	7.798
河北	291.914	238.490	36.873	6.866	9.686
云南	290.653	261.074	20.333	1.838	7.408
湖北	279.172	244.959	22.515	3.054	8.644
江苏	262.285	226.601	25.161	2.313	8.210
浙江	254.440	236.305	8.794	0.194	9.147
福建	229.120	214.621	7.529	0.286	6.684
江西	227.888	193.742	22.709	4.482	6.956
陕西	211.176	188.898	14.276	1.165	6.837
新疆	207.209	191.190	9.618	0.541	5.860
贵州	188.316	162.811	17.833	1.335	6.337
内蒙古	175.765	153.476	13.487	2.260	6.542
辽宁	171.575	151.771	12.875	0.880	6.049
重庆	170.913	149.190	14.665	1.510	5.547
山西	154.046	137.738	10.657	0.391	5.260
西藏	21.865	19.796	1.478	0.099	0.491
北京	18.369	16.754	0.654	0.001	0.960

表2 2012年中国水泥制造业总能耗在主要省区的分布状况

Tab. 2 Exergy consumption distribution for cement production in top ten provinces in 2012

	安徽	山东	四川	河南	广西	广东	湖南	河北	云南	湖北
扩展焯值	486	418	403	339	298	296	292	292	291	279
占全国比重	8.5%	7.4%	7.1%	6.0%	5.2%	5.2%	5.1%	5.1%	5.1%	4.9%

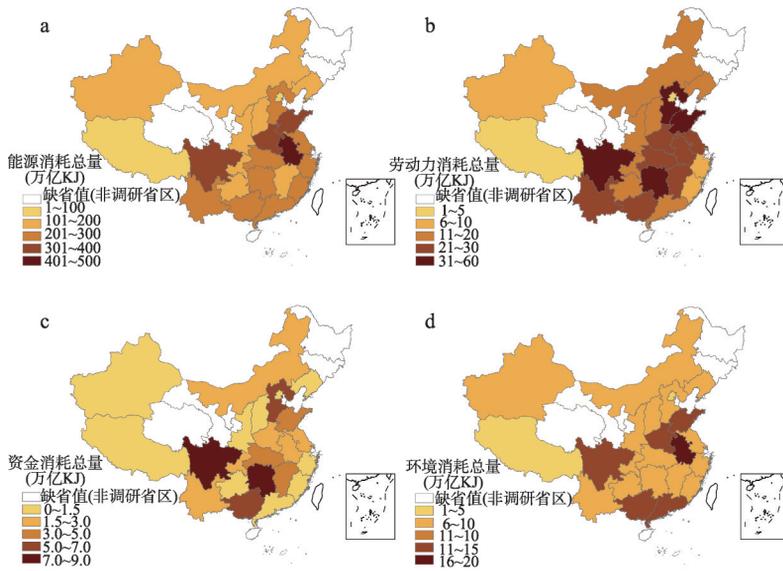


图1 2012年中国水泥制造业能源能耗、劳动力外部性能耗、资金外部性能耗、环境外部性能耗分省图
Fig. 1 Spatial distribution of exergy consumption for cement production from energy, labor, capital and environmental costs in China in 2012

表3 2012年中国水泥制造业各部分能耗在主要省区的分布状况

Tab.3 Distribution of each exergy consumption component for cement production in top ten provinces of China in 2012

	安徽	山东	四川	河南	广东	云南	广西	湖北	河北	湖南
能源能耗	444	360	329	300	264	261	256	245	238	237
占扩展焓的比重(%)	91.3	86.1	81.6	88.7	89.5	89.8	85.8	87.7	81.7	81.3
	四川	山东	湖南	河北	广西	江苏	河南	江西	湖北	安徽
劳动力外部性能耗	52.6	39.1	38.7	36.9	25.6	25.2	25.0	22.7	22.5	22.4
占扩展焓的比重(%)	13.1	9.4	13.3	12.6	8.6	9.6	7.4	10.0	8.1	4.6
	四川	湖南	河北	广西	山东	江西	湖北	江苏	内蒙古	安徽
资金外部性能耗	8.9	8.2	6.9	6.3	4.6	4.5	3.1	2.3	2.3	2.2
占扩展焓的比重(%)	2.2	2.8	2.4	2.1	1.1	2.0	1.1	0.9	1.3	0.5
	安徽	山东	四川	河南	广东	广西	河北	浙江	湖北	江苏
环境成本能耗	17.7	14.3	12.8	11.4	10.9	10.5	9.7	9.1	8.6	8.2
占扩展焓的比重(%)	3.6	3.4	3.2	3.4	3.7	3.5	3.3	3.6	3.1	3.1

带的外部性能耗超过总能耗的13%，中部地带约为12.3%，而东部地带的比重不到12%，说明水泥制造业在西部地带消耗的隐性社会成本相对较大。

(2) 水泥制造业能耗的集聚程度。分别计算三大地带内的基尼系数^[29]，用G代表扩展焓计算出的基尼系数，G1、G2、G3、G4分别代表能源能耗、劳动力能耗、资金能耗和环境成本能耗计算出的基尼系数，G0代表基尼系数平均值。可以看出，三大地带的集聚程度都不大（表4），平均值最大的东部地带也只有

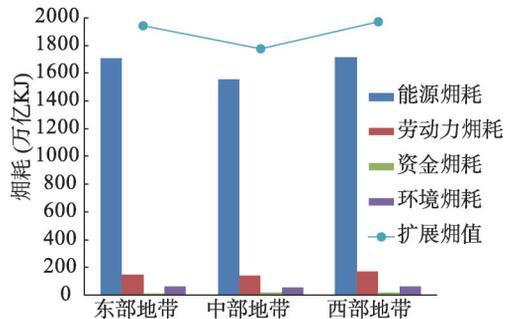


图2 中国水泥制造业能耗在三大地带的分布图
Fig. 2 Exergy consumption for cement production in three regions of China

0.337, 中部地带的平均基尼系数仅为0.234。通过各基尼系数的比较可以看出, 能源、劳动力和环境成本在三大地带都没有显著的集聚现象, 资金成本在东部和西部的集聚程度较大, 其基尼系数分别超过了0.6和0.5, 在中部地带的集聚程度相对较小, 基尼系数只有0.388。由此说明, 水泥制造业总能耗中, 社会隐藏的资源成本表现出更强的集聚特点, 而能源消耗部分很难表现出空间集聚的特性。

4 中国水泥制造业能耗强度的空间格局及差异

以各省级行政区的水泥制造业能耗数据与熟料产量的比值作为其能耗强度, 即用单位熟料消耗的能量值表现能耗强度的空间格局, 计算结果见表5。

4.1 省际的空间格局及差异

(1) 总能耗强度 (EEA 消耗强度) 的空间格局。基于2012年的截面数据, 可以看出, 西藏、新疆的水泥制造业能耗强度最大, 湖南、云南和四川其次, 排名前十的省区其能耗强度都超过了5000 KJ/kg (表6), 陕西、山西、江苏、湖北、内蒙古与全国均值基本持平。北京的水泥制造业能耗强度低于平均值44%, 可见其能效水平在全国的领先地位^[30]。整体来看, 中国水泥制造业的空间分布表现出西北、西南区域能耗强度高、东南区域能耗强度低的特征。

(2) 各部分能耗强度的空间差异。将扩展焓强度分解为能源焓强度、劳动力焓强度、资金焓强度和环境焓强度 (图3)。可以看出, 能源消耗强度在西部地区最高, 其次是中部地区, 东部地区最低。而劳动力消耗强度较大的省区不仅包括西部的西藏和四川, 中部的湖南、江西和东部的河北、山东也拥有很高的劳动力焓强度。从资金成本方面来看, 中部的湖南、江西、广西以及西部的四川和东部的河北具有较高的资金消耗强度。而环境成本消耗的高强度区域主要分布在西部和北部, 体现在西藏、新疆和内蒙古三大省区。就能耗强度而言, 能源消耗和环境消耗的重心在西部, 而劳动力消耗和资金消耗的重心相对分散, 在东、中、西部分别形成了以河北、湖南和四川为核心

表4 2012年中国水泥制造业能耗在三大地带的基尼系数
Tab. 4 Gini coefficient of exergy consumption in three regions of China in 2012

		东部地带	中部地带	西部地带
扩展焓基尼系数	G	0.225	0.191	0.243
能源焓基尼系数	G1	0.218	0.199	0.234
劳动力焓基尼系数	G2	0.389	0.174	0.353
资金焓基尼系数	G3	0.613	0.388	0.513
环境焓基尼系数	G4	0.238	0.221	0.241
基尼系数均值	G0	0.337	0.234	0.317

表5 2012年中国23个省区能耗强度计算结果(KJ/kg)

Tab. 5 Exergy intensity for cement production in 23 provinces of China in 2012 (KJ/kg)

	扩展焓强度	能源焓强度	劳动力焓强度	资金焓强度	环境成本焓强度
西藏	10339.752	9361.690	698.847	46.843	232.372
新疆	6256.840	5773.150	290.411	16.323	176.956
湖南	5496.197	4467.078	728.507	153.807	146.805
云南	5447.390	4893.027	381.086	34.443	138.834
四川	5215.048	4253.154	680.638	115.410	165.845
陕西	5160.090	4615.729	348.837	28.463	167.061
山西	5150.822	4605.546	356.344	13.063	175.870
江苏	5102.379	4408.192	489.477	45.004	159.705
湖北	5031.084	4414.514	405.759	55.041	155.770
内蒙古	5022.853	4385.894	385.427	64.591	186.941
福建	4922.684	4611.174	161.752	6.144	143.613
河北	4908.618	4010.269	620.022	115.448	162.880
山东	4803.530	4137.393	449.347	53.089	163.701
江西	4801.097	4081.713	478.424	94.417	146.543
重庆	4795.631	4186.113	411.496	42.372	155.651
河南	4721.650	4186.137	348.714	27.607	159.191
辽宁	4648.038	4111.535	348.789	23.832	163.882
浙江	4487.138	4167.314	155.084	3.427	161.313
贵州	4483.586	3876.349	424.588	31.782	150.867
广西	4389.202	3765.548	376.248	93.373	154.033
安徽	4371.883	3991.352	201.196	19.980	159.355
广东	4301.659	3848.172	287.214	8.237	158.036
北京	2842.496	2592.588	101.171	0.113	148.625

表6 2012年中国水泥制造业能耗强度在主要省区的分布状况

Tab. 6 Distribution of exergy intensity for cement production in top ten provinces in 2012

	西藏	新疆	湖南	云南	四川	陕西	山西	江苏	湖北	内蒙古
扩展焓强度	10340	6257	5496	5447	5215	5160	5151	5102	5031	5023
与均值的比	2.04	1.23	1.08	1.07	1.03	1.02	1.02	1.01	0.99	0.99

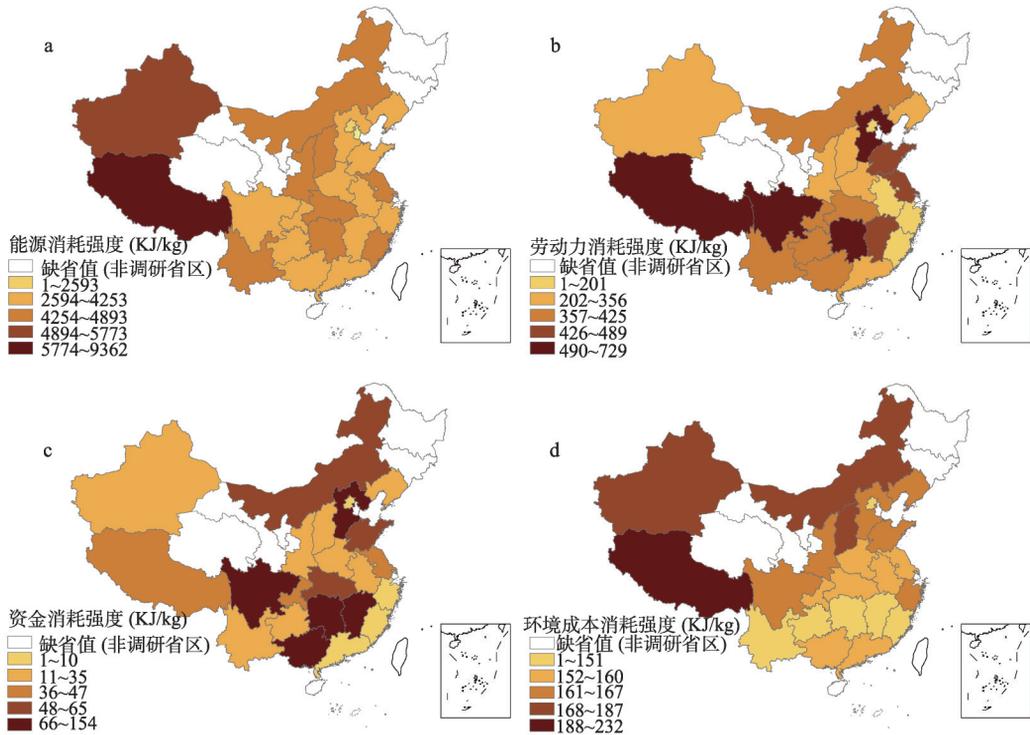


图3 2012年中国水泥制造业能源消耗强度、劳动力消耗强度、资金消耗强度、环境消耗强度分省图

Fig. 3 Spatial distribution of exergy intensity for cement production from energy, labor, capital and environmental costs in China in 2012

的三大高能耗区域。

就能源效率来看,北京领先于其他地区,西藏和新疆由于技术水平落后、行业集中度低等多种因素综合影响,导致其能源效率源低于其他省区;社会隐藏成本焓耗强度的结果表明,由于没有受到来自产能过剩的压力,湖南、四川和河北的资金焓耗强度和劳动力焓耗强度远超全国均值(表7),而在行业集中度较高的华东、华南地区,其劳动力效率和资金效率很高;得益于西南地区和中部地区处于水泥行业整合的初始阶段,广西、内蒙古、江西、湖北投入了较高的资金焓耗强度;虽然环境焓耗强度在各省区间的差距较小,但是在西藏、内蒙古、新疆、山西等生态脆弱区表现突出,未来尤其要关注这些区域。

4.2 三大地带的空间格局及差异

(1) 水泥制造业能耗强度在三大地带的分布。西部地带的水泥制造业能耗强度最大(图4),中部和东部略小。能源消耗强度和劳动力外部性消耗强度呈现出自东向西递增的特征,资金外部性消耗强度在三大地带的差距明显,西部和中部分别达到东部的1.6倍和1.4倍,环境外部性消耗强度在三大地带中差异较小。综合劳动力、资金和环境成本,

表7 2012年中国水泥制造业各部分能耗强度在主要省区的分布状况

	西藏	新疆	云南	陕西	福建	山西	湖南	湖北	江苏	内蒙古
能源消耗强度	9362	5773	4893	4616	4611	4606	4467	4415	4408	4386
与全国均值的比	2.10	1.29	1.10	1.03	1.03	1.03	1.00	0.99	0.99	0.98
	湖南	西藏	四川	河北	江苏	江西	山东	贵州	重庆	湖北
劳动力消耗强度	729	699	681	620	489	478	449	425	411	406
与全国均值的比	1.84	1.76	1.71	1.56	1.23	1.21	1.13	1.07	1.04	1.02
	湖南	河北	四川	江西	广西	内蒙古	湖北	山东	西藏	江苏
资金消耗强度	154	115	115	94	93	65	55	53	47	45
与全国均值的比	3.24	2.43	2.43	1.99	1.97	1.36	1.16	1.12	0.99	0.95
	西藏	内蒙古	新疆	山西	陕西	四川	辽宁	山东	河北	浙江
环境消耗强度	232	187	177	176	167	166	164	164	163	161
与全国均值的比	1.43	1.15	1.09	1.08	1.03	1.02	1.01	1.01	1.00	0.99

西部地带的外部性能耗强度约为总能耗的13%，而中部和东部只有12%左右，间接反映出西部地带的社会资源消耗及环境损失代价相对较高的省(区)情^[31]。

(2) 水泥制造业能耗强度的集聚程度。分别计算三大地带内的基尼系数，用g代表扩展能耗强度计算出的基尼系数，g1、g2、g3、g4分别代表能源消耗强度、劳动力消耗强度、资金消耗强度和环境成本消耗强度计算出的基尼系数，g0代表基尼系数平均值。可以看出，只有以资金消耗强度计算出的基尼系数较大(表8)，在东部、中部和西部分别达到了0.586、0.437和0.314，其他基尼系数都很小，由此说明，从能耗强度的角度，只有社会隐藏成本中资金消耗的部分在东部地带具有较显著的集聚特征。

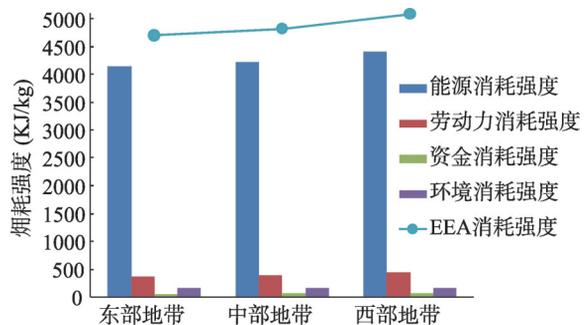


图4 中国水泥制造业能耗强度在三大地带的分布图

Fig. 4 Exergy intensity for cement production in three regions of China

表8 2012年中国水泥制造业能耗强度在三大地带的基尼系数

		东部地带	中部地带	西部地带
扩展能耗强度基尼系数	g	0.067	0.040	0.133
能源消耗强度基尼系数	g1	0.065	0.029	0.147
劳动力消耗强度基尼系数	g2	0.297	0.203	0.153
资金消耗强度基尼系数	g3	0.586	0.437	0.314
环境消耗强度基尼系数	g4	0.023	0.033	0.078
基尼系数均值	g0	0.208	0.149	0.165

5 以省区为单元的分类及其驱动机理分析

5.1 基于能耗和能耗强度的分类结果

在SPSS中以EEA总量、EEA强度、能源消耗总量、能源消耗强度、劳动力消耗总量、劳动力消耗强度、资金消耗总量、资金消耗强度、环境消耗总量、环境消耗强度作为变量，运用欧几里得距离模型^[32]计算出23个省区标准化后的距离矩阵(表9)。

根据标准化后的距离矩阵形成二维尺度的可视化图^[33](图5)，直观展示不同省区间的分类情况，进一步分析水泥制造业能耗的空间差异。综合来看，可以将第一维度认为是综合能源和社会隐性成本能耗总量的高低变化，从左至右呈现出由高到低的变化趋

势, 左侧的四川省无论从能源消耗总量还是劳动力、资金、环境外部性的消耗总量都位居前列, 湖南、河北、山东、安徽和广西其次, 广东、云南、贵州、陕西、重庆、内蒙古、河南、湖北、江苏、江西基本处于全国平均水平, 浙江、福建、辽宁、新疆、山西属于能源和外部性消耗总量较小的地区, 右侧的北京和西藏其能耗总量最低。将第二维度看成是集合了能源和各外部性能耗强度的能效高低, 能耗强度最大的西藏在下方, 能耗强度最小的安徽在上方, 即从上至下表现出能效由高变低的趋势, 除安徽省之外, 山东、河南、广东、浙江、福建、北京也具有较高的能效, 广西、湖北、江苏、云南、贵州、陕西、重庆、辽宁、新疆、山西的能效处于中等水平, 四川、湖南、河北、江西、内蒙古能效较低, 而西藏的能效远低于其他地区。

综合距离分布图和能耗及能耗强度的计算结果, 将23个省区划分为八类(表10)。第一类包括四川、湖

表9 标准化后的距离矩阵(部分)

Tab. 9 Standardized distance matrix (partial)

	重庆	浙江	云南	新疆	西藏	四川	陕西	山西
重庆	0.000	0.214	0.143	0.158	0.623	0.604	0.048	0.091
浙江	0.214	0.000	0.203	0.160	0.754	0.720	0.136	0.178
云南	0.143	0.203	0.000	0.203	0.720	0.533	0.123	0.227
新疆	0.158	0.160	0.203	0.000	0.539	0.693	0.072	0.073
西藏	0.623	0.754	0.720	0.539	0.000	0.969	0.613	0.557
四川	0.604	0.720	0.533	0.693	0.969	0.000	0.611	0.703
陕西	0.048	0.136	0.123	0.072	0.613	0.611	0.000	0.054
山西	0.091	0.178	0.227	0.073	0.557	0.703	0.054	0.000

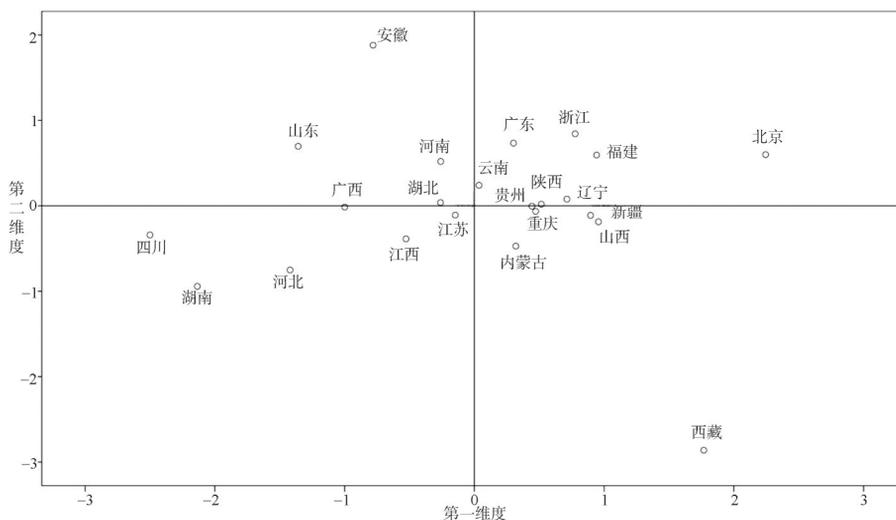


图5 欧几里得距离模型分布图

Fig. 5 Euclidean distance model diagram for the 23 provinces of China

表10 中国各省区水泥制造业能耗的空间差异分类

Tab. 10 Eight patterns for all regions on the basis of exergy use in 23 provinces of China

类别	地区	能耗主要特点
第一类	四川、湖南、河北	能耗总量高、能耗强度高
第二类	山东、安徽	能耗总量高、能耗强度低
第三类	江西、广西	略高于平均水平、劳动力和资金成本较高
第四类	河南、湖北、江苏、云南、贵州、重庆、陕西、辽宁	能耗程度中等
第五类	广东、浙江、福建	略低于平均水平、外部性成本较低
第六类	内蒙古、山西、新疆	能耗总量低、能耗强度高
第七类	西藏	能耗总量很低、能效水平落后
第八类	北京	能耗总量很低、能效水平先进

南、河北，这三个省区属于水泥制造业的能耗双高地区，即能耗总量高、能耗强度高，不仅能源消耗多，同时外部性成本较高；第二类包括山东和安徽两省，属于能耗总量高但能耗强度低的水泥制造大省区，即以较高的能效生产较多的产品；第三类包括江西和广西，其能耗总量和能耗强度略高于全国平均水平，同时劳动力和资金成本较高；第四类包括河南、湖北、江苏、云南、贵州、重庆、陕西、辽宁，这8个地区属于中国水泥制造业能耗程度中等地区，即能耗总量和能耗强度与全国平均水平相似；第五类包括广东、浙江、福建，这三个省区位于东南沿海，能耗总量和能耗强度都低于全国平均水平，同时外部性成本较低；第六类地区包括内蒙古、山西和新疆，这三个省区的水泥制造业能耗总量低但能耗强度高，即以较低的能效生产较少的产品；第七类是西藏，其能耗总量非常低，但是能耗强度远高于其他省区，可以被认为是水泥制造业能效水平落后地区；第八类是北京，属于水泥制造业能耗双低地区，即能耗总量低、能耗强度低，是水泥制造业能效水平先进地区。

5.2 水泥制造业能耗空间差异的驱动机理分析

分别选取表征规模、收益、投资、技术、行业集中度五种驱动因素的指标，分析影响水泥制造业能耗空间差异的内在驱动机理。规模因素可以反映地区内的行业发展基础和企业间的竞争关系，收益会影响企业扩大市场份额以及提高自身竞争力的决策，投资对于新型干法水泥生产线的建设而言非常重要，技术对水泥制造业的发展尤其是对生产过程中的能效影响显著，而行业集中度的提高可以实现资源整合，借鉴日本、墨西哥等国水泥制造业的发展，可以看到其对提高竞争力具有重要作用。综上所述，选取规模以上企业单位数、规模以上企业资产总额、主营业务收入、利润总额、固定资产投资、投资累计新增生产线设计生产能力、水泥生产技术专利数、全国排名前20名(N20)和前100名(N100)的水泥企业在各地区内水泥熟料产能所占总产能的比重这9个解释变量进行驱动机理分析(表11)。

相关性的计算结果(表11)表明，能耗总量与投资累计新增生产线设计生产能力、规模以上企业资产总额、规模以上企业单位数、主营业务收入、利润总额通过了0.01水平下的显著相关，与固定资产投资通过了0.05水平下的显著相关，而与水泥生产技术专利数、N20和N100的相关性较小，说明在现阶段，影响水泥制造业能耗总量的因素主要是规模、收益和投资，而技术和行业集中度对能耗总量的影响相对较小。能耗强度与N100相关性最大，通过了显著性检验，与N20的相关性略弱，但是仍高于其他解释变量，说明水泥制造业的行业集中度对能耗强度的空间格局具有较强解释力。能耗强度与行

表11 中国水泥制造业能耗空间格局与驱动因素相关分析结果

Tab. 11 Correlation of determinants of exergy use distribution for the cement manufacturing industry of China

解释变量	水泥制造业能耗的空间差异			
	EEA消耗总量		EEA消耗强度	
	相关系数	N值	相关系数	N值
规模				
规模以上企业单位数	0.779**	0.000	-0.293	0.175
规模以上企业资产总额	0.821**	0.000	-0.282	0.193
收益				
主营业务收入	0.797**	0.000	-0.273	0.207
利润总额	0.780**	0.000	-0.258	0.235
投资				
固定资产投资	0.504*	0.014	-0.057	0.795
投资累计新增生产线设计生产能力	0.973**	0.000	-0.323	0.133
技术				
水泥生产技术专利数	0.354	0.097	-0.312	0.147
行业集中度				
N20	0.149	0.497	-0.383	0.071
N100	0.228	0.295	-0.439*	0.036

注：*在0.05水平(双侧)上显著相关，**在0.01水平(双侧)上显著相关。

业集中度存在显著负相关,说明水泥制造业的行业集中度越大,则能耗强度越小,即能效越高。而技术、规模、收益和投资与能耗强度的相关性依次减弱。

以促进水泥制造业能效提高、降低行业总能耗为目标,浙江和北京作为行业集中度最高的两个地区成为了其他地区的典范。浙江省内水泥行业的并购整合走在全国前列,N20和N100分别为88%和94%;而北京的水泥企业数量虽少,但N20和N100都在88%左右。相比之下,四川、湖南、河北的水泥企业数量多,然而行业集中度却远小于50%,作为能耗总量和能耗强度双高的区域,如果能加强提升其行业集中度,则水泥制造业在这三个区域内的节能潜力巨大。西部的贵州、云南、重庆、西藏、新疆、山西、内蒙古是水泥制造业行业集中度最低的地区,虽然其能耗总量不高或很低,但是这些地区的水泥制造业仍然处于分散经营阶段,水泥行业的整合在这些地区没有得到充分发展,同时这些地区的技术水平相对落后,如果能够在行业集中度和技术方面加以提高,则会极大推动其水泥行业的优化升级。

另一方面,虽然表征规模、收益、投资、技术的几个指标对水泥制造业能效的促进作用相对较小,但是相关分析结果显示这几种因素与行业集中度之间存在正向的相互作用,即规模扩大、收益增加,投资提高和技术改进综合作用于产业集中化。进一步从区域的角度剖析,各种驱动因素对于不同区域的作用也不尽相同。其中,北京的科研技术优势对其水泥制造业的能效有显著的正面影响,并对京津冀区域形成辐射效应;广东更加稳定有序的淘汰落后产能,从而对能效提高具有促进作用;安徽以海螺集团为依托,作为亚洲最大的水泥熟料供应商,其规模效益带动了能效的提高;广西虽为西部地区,但是通过便利的西江水运与珠三角联动,得到了大量境外投资,因此相对其他西部地区而言,其水泥制造业的能效水平很高。此外,不同区域的经济水平、产业定位、金融秩序等都会影响水泥企业间的角力,进而形成了中国水泥制造业的能效在空间格局上的差异。

6 结论和讨论

本文引入EEA方法,从能源能耗和外部性能耗两方面计算了中国23个省区水泥制造业的能耗,在空间维度上探讨了中国水泥制造业能耗省区间和三大地带间的差异,并根据能耗总量和能耗强度的特征将23个省区分为八类。本文得出的主要结论如下:

(1)从能耗总量的分析来看,中国水泥制造业能耗总量的空间分布呈现出东部和西部两大核心,东部地带以安徽和山东为核心,西部地带以四川为核心;组成总能耗的各部分具有不同的空间格局,其中能源能耗强化了东部核心,劳动力能耗突出了河北、山东、四川、湖南四省,资金能耗表现出东部显著低于中西部的特点,环境能耗凸显了广东和广西的环境成本;隐性社会成本的主要消耗区在西部地带,其中资金成本在西南区域水泥整合的背景下有较明显的集聚现象。

(2)以能耗强度作为体现能效的指标可以看出,在行业集中度的主要作用下,中国水泥制造业的能效呈现西北西南区域低、东南区域高的特征;其中能源利用效率、劳动力效率和资金利用效率均表现出从西部地带向东部地带逐渐变高的趋势,而环境能耗强度强化了西藏、新疆、内蒙古、山西的环境成本;总体看隐性社会成本占总能耗强度的十分之一左右,其使用效率自西向东递增,其中东部地带得益于相对完善的协同机制,其资金使用效率有较显著的集聚特征。

(3) 综合水泥制造业能耗总量和能耗强度的计算结果, 将23个省区分为八类: 第一类是能耗双高地区, 包括四川、湖南、河北; 第二类是水泥制造业大省区和高效区, 包括山东和安徽; 第三类是劳动力和资金外部性成本显著地区, 包括江西和广西; 第四类是能耗水平中等地区, 包括河南、湖北、江苏、云南、贵州、重庆、陕西、辽宁; 第五类属于能耗和外部性成本较低区, 包括广东、浙江、福建; 第六类是低能效低能耗区, 包括内蒙古、山西和新疆; 第七类是能效水平最落后的西藏; 第八类北京是能耗双低地区。

(4) 建议未来加强四川、湖南、河北的水泥行业集中度, 已实现其巨大的节能潜力; 对西北和西南地区进行行业集中度和技术的双重提高, 以能效水平的提升带动其水泥制造业的优化升级; 尤其要在水泥行业产能过剩和环境保护的双重压力下, 重点关注浙江、广东、河南、安徽、山东等产能过剩省区的环境成本和西藏、内蒙古、新疆、山西等生态脆弱区的环境成本。

本文以水泥制造业为例, 将实物资源和外部性资源以物理量的方式进行测算, 以统一的单位将总“资源成本”赋予产品, 是对工业能耗和能效比较的探索性分析。由于本文基于单一行业的截面数据, 因此在研究时空演变分析方面存在一定的局限。未来, 可加强不同行业间的横向分析和某一行业内时间序列的纵向分析, 为工业的高效、绿色运行和空间上的优化配置提供参考。

参考文献(References)

- [1] Daly H E, Farley J. *Ecological Economics: Principles and Applications*. 2nd ed. Washington, DC, USA: Island Press, 2010: 106-125.
- [2] Costanza R, Cumberland J H, Daly H, et al. *An Introduction to Ecological Economics*. Florida, USA: Taylor & Francis, Chemical Rubber Company Press, 2002: 183-193.
- [3] Valero A, Lozano M A, Munoz M. A general theory of exergy saving: I. On the exergetic cost. *Computer-aided Engineering and Energy Systems*, 1986, 3: 1-8.
- [4] Szargut J, Morris D R, Steward F R. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*. New York, NY, USA: Hemisphere Press, 1987: 66-108.
- [5] Sciubba E. Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling. *Energy*, 2003, 28: 1315-1334.
- [6] Sogut M Z, Oktay Z, Hepbasli A. Energetic and exergetic assessment of a trass mill process in a cement plant. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(9): 2316-2323.
- [7] IEA-ETSAP. Cement production. http://iea-etsap.org/web/HIGHLIGHTS%20PDF/103_cement_June%202010_GS-get%201.pdf, 2010.
- [8] National Bureau of Statistics. <http://data.stats.gov.cn/>, 2013. [国家统计局. <http://data.stats.gov.cn/>, 2013.]
- [9] Jebaraj S, Iniyan S. A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, 10(4): 281-311.
- [10] Scheuer A, Ellerbrock H G. Possible ways of saving energy in cement production. *Zement-Kalk-Gips*, 1992, 45(5): 222-230.
- [11] Saxena J P, Saxena A, Pahuja A, et al. Energy efficiency through technological improvements. *World Cement*, 1995, 26(6): 62-67.
- [12] Phylipsen G J M, Blok K, Worrell E. International comparisons of energy efficiency: Methodologies for the manufacturing industry. *Energy Policy*, 1997, 25(7-9): 715-725.
- [13] Worrell E, Martin N, Price L. Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. *Energy*, 2000, 25(12): 1189-1214.
- [14] Worrell E, Laitner J A, Ruth M, et al. Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. *Energy*, 2003, 28(11): 1081-1098.
- [15] Zeng Xuemin. Energy consumption status and energy saving potential of cement industry. *Chinese Cement*, 2006, 20

- (3): 16-21. [曾学敏. 水泥工业能源消耗现状与节能潜力. 中国水泥, 2006, 20(3): 16-21.]
- [16] Qi Baoping. The impact analysis research on energy saving factors in China [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 58-72. [齐宝平. 中国节能因素影响分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 58-72.]
- [17] Hasanbeigi A, Menke C, Therdyothin A. The use of conservation supply conversion energy policy and economic analysis: The case study of Thai cement industry. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 392-405.
- [18] Sogut M Z. A research on exergy consumption and potential of total CO₂ emission in the Turkish cement sector. *Energy Conversion and Management*, 2012, 56: 37-45.
- [19] Rocco M V, Colombo E, Sciubba E. Advances in exergy analysis: a novel assessment of the extended exergy accounting method. *Applied Energy*, 2014, 113: 1405-1420.
- [20] Zhu Mingshan. Exergy Analysis on Energy System. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 56-89. [朱明善. 能源系统的焓分析. 北京: 清华大学出版社, 1988: 56-89.]
- [21] Sciubba E. A revised calculation of the econometric factors α and β for the extended exergy accounting method. *Ecological Modelling*, 2011, 222: 1060-1066.
- [22] Shen L, Gao T, Zhao J, et al. Factory-level measurements on CO₂ emission factors of cement industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2014, 34: 337-349.
- [23] National Bureau of Statistics. Economic Statistical Yearbook of the People's Republic of China. Beijing: China Statistics Press, 2013: 3-398. [国家统计局. 中华人民共和国经济统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2013: 3-398.]
- [24] The People's Bank of China. The annual statistics of 2012. <http://www.pbc.gov.cn>, 2012. [中国人民银行网站. 2012年度统计数据. <http://www.pbc.gov.cn>, 2012.]
- [25] CDC. The log data set of ground climate in China. <http://cdc.cma.gov.cn/>, 2012. [中国气象科学数据共享服务网. 中国地面气候资料日值数据集. <http://cdc.cma.gov.cn/>, 2012.]
- [26] Hu Bin. A comparative study on China's inter-provincial Human development Index [D]. Changchun: Jilin University, 2009: 10-21. [胡斌. 我国省际间人类发展指数比较研究. 长春: 吉林大学, 2009: 10-21.]
- [27] China Cement Association. China Cement Almanac. Beijing: China Building Industry Press, 2006-2011: 390-600. [中国水泥协会. 中国水泥年鉴. 北京: 中国建材工业出版社, 2006-2011: 390-600.]
- [28] ASKCI. The clinker production data of pre-calcining kiln in China by province. <http://www.askci.com/news/201303/21/211525881807.shtml>, 2014. [中商情报网. 中国窑外分解窑水泥熟料分省市产量数据统计. <http://www.askci.com/news/201303/21/211525881807.shtml>, 2014.]
- [29] Lv Weiguo, Chen Wen. Manufacturing industry enterprises location choice and the urban spatial restructuring in Nanjing. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(2): 142-152. [吕卫国, 陈雯. 制造业企业区位选择与南京城市空间重构. 地理学报, 2009, 64(2): 142-152.]
- [30] IEA. Tracking industrial, energy efficiency and CO₂ emissions. http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/tracking_emissions.pdf, 2007.
- [31] Liu Jiyuan, Deng Xiangzheng, Liu Weidong, et al. The concept framework of green development in western China. *Population, Resource and Environment of China*, 2013, 23(10): 1-7. [刘纪远, 邓祥征, 刘卫东, 等. 中国西部绿色发展概念框架. 中国人口资源与环境, 2013, 23(10): 1-7.]
- [32] Rokaya M, Atlam E, Fuketa M, et al. Ranking of field association terms using co-word analysis. *Information Processing and Management*, 2008, 44(2): 738-755.
- [33] Mei Changlin, Fan Jincheng. Method of Data Analysis. Beijing: Higher Education Press, 2006: 55-156. [梅长林, 范金城. 数据分析方法. 北京: 高等教育出版社, 2006: 55-156.]

Distribution of exergy use of cement manufacturing industry in China based on the extended exergy accounting method

CHEN Fengnan^{1,2}, SHEN Lei¹, LIU Litao¹, GAO Tianming^{1,2}

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

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

Abstract: Factory data from 23 Chinese provinces, combined with Chinese cement manufacturing industry data and socioeconomic data from 2012, was used to analyze the spatial distribution of exergy use for China's cement manufacturing industry using the Extended Exergy Accounting method. This method allows for the inclusion of energy and raw material supply and other external factors (capital, labor and environment) in a comprehensive resource cost assessment. We quantitatively calculated the extended exergy consumption and its intensity at the provincial level and evaluated the agglomeration level of exergy use at the regional level. Based on this analysis, a distribution in size and efficiency of exergy use at the provincial level was determined, and regional characteristics were revealed. The results are as follows. (1) The gross distribution of exergy use in China's cement manufacturing industry is focused on the eastern region, which centers on Anhui and Shandong, and on the western region with Sichuan as a core. For exergy use, energy costs related to coal and electricity are highest for the center of the eastern region, whereas the costs of capital, labor and external environmental factors highlight the invisible social cost in the central and western regions to various degrees. (2) The efficiency distribution of exergy use in China's cement manufacturing industry reveals an incremental character from west to east, especially for the energy, labor and capital efficiencies. An evaluation of the environmental efficiency indicates that Tibet, Xinjiang, Inner Mongolia and Shanxi have much higher environmental costs. (3) By building up the Euclidean distance model using the gross and efficiency results of exergy use, the 23 provinces could be classified into eight groups. (4) High industry concentration is the main driving factor of exergy efficiency improvement for cement manufacturing industry.

Keywords: cement manufacturing industry; spatial difference; exergy use; extended exergy accounting method; China