

# 煤炭高效洁净化利用的研究

陈吟颖, 王淑娟, 陈昌和, 徐旭常

(清华大学热能系热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

[摘要] 通过分析我国目前煤炭利用的主要方式和存在的问题, 分析对比国内外煤炭高效洁净化利用技术, 研究高效洁净化利用技术对环境的影响程度, 建立了煤炭高效洁净化利用指标体系, 给出了评价煤炭高效洁净化利用程度的洁净化度、生态优化度、低碳度的概念并作出了相应的定量判据, 最后提出了我国 2030 年、2050 年煤炭高效洁净化利用的有效途径和发展战略。

[关键词] 洁净煤发电; 洁净化度; 能源可持续发展综合指标; 生态优化度; 低碳度

[中图分类号] X38 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)06-0051-06

## 1 前言

随着我国经济的持续快速发展, 环境保护和资源的压力日益增大, 且已成为我国经济发展的两大瓶颈。燃煤发电厂逐年增加, 截至 2010 年年底, 全国发电装机容量达 9.62 亿 kW, 其中有 7.1 亿 kW 为火电机组, 火电装机的增长带动煤炭需求不断增长。随着时间的推移, 超超临界机组、整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)等先进的发电技术机组会逐渐实现商业化和规模化。这些高参数、大容量、高自动化机组的使用, 会不断提高煤炭的利用率, 同时也会不断增加煤炭的利用量, 随之产生的 CO<sub>2</sub> 等温室效应气体以及 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 等污染物排放也会相应增加<sup>[1,2]</sup>。因此, 深入研究我国煤炭高效洁净化利用, 开发高效、洁净的燃煤发电技术, 是实现电力工业持续健康快速发展的必然途径。

## 2 目前煤炭利用的主要方式及存在的问题

我国煤炭资源总量约为 5.6 万亿 t, 其中已探明储量为 1 万亿 t, 占世界总储量的 11%。2008 年煤炭在我国一次能源生产和消费结构中的比例分别为 76% 和 69%。今后 30~50 年内, 煤炭在我国一次能源构成

中的主导地位不会改变<sup>[3]</sup>。2009 年, 能源消费总量约为 31 亿 tce, 煤炭生产总量为 29.65 亿 t, 发电与热电联产用煤总量约为 15.47 亿 t。

煤炭利用的主要方式有: 工业锅炉、发电和煤化工。其中, 发电用煤占煤炭总产量的 50% 以上。煤炭利用存在的问题有两方面: 一是效率太低, 二是污染严重。下面将根据煤炭利用的不同方式分别论述。

### 2.1 我国燃煤电站锅炉目前存在的主要问题

目前我国火电厂煤粉锅炉燃烧主要存在锅炉燃烧不稳定、炉膛结渣、发电效率低和环境污染等问题。特别是燃煤火力发电装置排放的污染物对人类生存环境及全球环境构成了直接的危害。如现在广泛装备的静电除尘设备均难以除去燃煤排烟中超细、超轻并易分散的粉尘(5 μm 以下)。这种粉尘随风飘荡, 可以长期滞留在大气中, 对人体存在的潜在危害极大。近年来, 还发现微小粉尘携带的痕量重金属等有害化合物(譬如汞、砷、氟等)对环境的影响也很大。我国 CO<sub>2</sub> 排放量日渐增加, 与燃煤有关的区域性环境污染和全球性的气候变化问题已成为我国电力工业发展的一个主要制约因素。

随着电力工业的不断发展, 燃煤发电装机容量

[收稿日期] 2011-04-01

[基金项目] 中国工程院重点咨询项目支持

[作者简介] 陈吟颖(1972—), 女, 内蒙古乌兰察布市人, 高级工程师, 主要研究方向为煤炭高效洁净化利用和新能源开发与利用;

E-mail: cyy01016@126.com

增长迅速,大容量、高参数、高自动化机组增加,对能源的需求增加迅速,环境污染严重。据国家发展和改革委员会能源局 2008 年统计资料显示,我国优质资源日渐减少和短缺,煤炭剩余储量的保证程度不足 100 年;石油剩余储量的保证程度不足 15 年;天然气剩余储量的保证程度不足 30 年。若按照 2020 年我国的能源需求预测量估算,煤炭、石油和天然气的资源保证程度则分别下降为 30 年、5 年和 10 年。这样的需求总量,将使中国的能源安全和能源资源供应面临严峻的挑战,发展洁净高效的燃煤发电技术、节约能源、降低能耗已迫在眉睫。

## 2.2 我国燃煤工业锅炉目前存在的主要问题

目前,全国在用工业锅炉有 50 多万台,总容量约 180 万蒸吨/h(1 蒸吨介质相当于含有 0.725 MW 的热量)。其中,燃煤锅炉约 48 万台,占工业锅炉总容量的 85 % 左右,平均容量为 3.4 蒸吨/h。这部分工业炉和民用每年消耗原煤约 4 亿 t,年耗煤炭占煤炭总产量的 1/3 左右。

虽然我国工业锅炉的设计制造水平已逐步接近国际先进水平,但是由于工业锅炉用煤的生产、管理、供应体系问题,以及锅炉工的操作水平落后,我国燃煤工业锅炉的平均热效率至今仅为 60 % ~ 65 % (国外约 80 %)。主要是因为我国工业锅炉多用不筛分的高灰原煤(或称碎末散煤)。原煤平均含灰 >30 %, <3 mm 的末煤达 45 % ~ 65 %,粒度 >10 mm 的仅占 15 % ~ 30 %。由于小锅炉的单位锅炉蒸发量的烟气脱硫费用远大于大锅炉,燃煤工业锅炉难以实施烟气脱硫。

目前,燃煤工业锅炉排放 SO<sub>2</sub> 约 600 万 t/a,约占全国 SO<sub>2</sub> 排放的 1/3。燃煤工业锅炉平均烟尘排放 300 ~ 400 mg/Nm<sup>3</sup> (1 Nm<sup>3</sup> 是指在 20 °C 1 个标准大气压下的气体体积),排放烟尘 380 万 t/a,CO<sub>2</sub> 排放 6.7 亿 t/a,地面灰渣 8 700 万 t/a。我国燃煤工业锅炉容量小、数量大、布点分散,难以集中治理。前些年,一些城市曾大力推进燃气、燃油锅炉替代燃煤锅炉,但由于天然气供应量有限、燃油锅炉成本高等原因难以大规模实施。同时,天然气用于燃煤工

业锅炉转换效率不高,能量梯级利用程度不高。

目前我国动力用煤筛分、洗选率很低,加工回收率低,入选率不足 30 %,远远落后于欧美先进国家,造成大量无效运输(原煤中含矸量平均为 20 % 左右),浪费运力。我国燃煤工业锅炉热效率低下、污染严重的原因主要不是由于工业锅炉不先进,而是不应该烧高灰原煤<sup>[4]</sup>。燃用筛分、洗选煤可明显减少大气中的可吸入颗粒物、SO<sub>2</sub> 和汞等有毒物。硫、汞等大部分存在矸石中,洗煤能去除 1/3 ~ 1/4,并有利于减少城市煤灰垃圾处理量。燃用筛分、洗选煤是燃煤工业锅炉减少 SO<sub>2</sub> 和汞排放的费用低且最有效的办法。用筛分、洗选后的优质煤(煤的硫分 <0.8 %)替代原煤燃烧的经济性最佳,除了可以节约工业锅炉用煤 15 % 之外,其减少 SO<sub>2</sub> 排放的成本也最低,低于 400 元/t SO<sub>2</sub>。2030 年以前必须建立对商品动力煤进行筛分、洗选、监督和销售的体系,这是燃煤工业锅炉节能减排的最经济有效的途径,也对提高燃煤发电的经济性、可靠性、洁净度有很大好处。

煤化工中各单项技术与多联产技术相比,整体效率不高、建设投资较高、生产成本较高、环境污染未能综合治理。

## 2.3 煤炭利用产生的 CO<sub>2</sub> 排放量研究

煤炭 CO<sub>2</sub> 的排放因子高于液体燃料近 4.6 tC/TJ,高于气体燃料 9 tC/TJ 以上<sup>[5]</sup>。据在德国波恩召开的联合国气候变化会议发布的信息,中国 2007 年 CO<sub>2</sub> 排放增长 8 %,高于当年全球 CO<sub>2</sub> 排放增长的平均水平 3.1 %。预计到 2050 年,煤炭消费将占我国能源消费总量的 50 % ~ 60 %。届时,燃煤产生的 CO<sub>2</sub> 将占我国 CO<sub>2</sub> 排放总量的 70 % ~ 75 %,燃煤电厂排放的 CO<sub>2</sub> 将占 CO<sub>2</sub> 排放总量的 60 % 以上。解决因 CO<sub>2</sub> 排放增多而导致的气候变暖是当前最为重要、最为紧迫的大事。到 2050 年煤炭消费有碳捕集和封存(carbon capture and sequestration, CCS)以及没有 CCS 的 CO<sub>2</sub> 排放预测趋势见表 1<sup>[6]</sup>。

表 1 2000 年和 2050 年有/无 CCS 下煤炭消费和污染物排放情况

Table 1 Coal consumption and CO<sub>2</sub> emissions with and without CCS in 2000 and 2050

煤炭消费和 CO <sub>2</sub> 排放情况	基准方案		限制核电		不限制核电	
	2000 年	2050 年	有 CCS	无 CCS	有 CCS	无 CCS
全球煤炭利用/EJ	100	448	161	116	121	78
美国煤炭利用/EJ	24	58	40	28	25	13
中国煤炭利用/EJ	27	88	39	24	31	17

煤炭消费和 CO <sub>2</sub> 排放情况	基准方案		限制核电		不限制核电	
	2000 年	2050 年	有 CCS	无 CCS	有 CCS	无 CCS
全球 CO <sub>2</sub> 排放量/(Gt·a <sup>-1</sup> )	24	62	28	32	26	29
源于煤的 CO <sub>2</sub> 排放量/(Gt·a <sup>-1</sup> )	9	32	5	9	3	6

由表 1 可知,到 2050 年,全球 CO<sub>2</sub> 排放量是 2000 年的 2.6 倍,由燃煤引起的 CO<sub>2</sub> 排放量占总量的 51.6%。如果到 2050 年,大力发展核电并采用 CCS 技术,CO<sub>2</sub> 排放量明显减少,比 2050 年不采用任何洁净煤技术排放量减少约 60%。

### 3 煤炭高效洁净化利用技术

在过去的 30 年,我国洁净煤发电技术在能源转换效率、减排常规污染物方面取得了显著的成就。但是,适合当前能源资源与环境约束条件的洁净煤发电技术在未来的资源与环境制约下未必就是最优的选择。矿物燃料燃烧而排放的大量 CO<sub>2</sub> 已经并将持续对全球的气候环境造成前所未有的影响,使人类社会面临着巨大的生存环境恶化的威胁。麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)预测到 2050 年,全球煤炭消费量将达到 450 EJ,如果没有环境制约政策且 CCS 技术使用得较少,那么会导致每年 CO<sub>2</sub> 排放量增加到 62 Gt,环境污染治理费用进一步增加。

因此,在洁净煤发电技术的发展中,既要提高能源的转换效率、减排常规污染物,也必须整合 CO<sub>2</sub> 的减排,需要考虑减排常规污染物、汞等重金属与 CO<sub>2</sub> 的经济性协调配合,有望形成以控制 CO<sub>2</sub> 排放为基本出发点的未来洁净煤发电技术。以此为特征的新一代洁净煤发电技术意味着将来拥有巨大的技术与商业市场,新建或已建传统的燃烧煤粉电厂的改进与改造也均面临巨大的挑战。

煤炭高效洁净化利用的技术主要有:煤炭高效燃烧及先进发电、火电厂脱硫、脱硝、除尘和重金属脱除、CO<sub>2</sub> 捕获和埋存、煤炭洁净化转化、IGCC 等,如表 2 所示。

表 2 洁净煤高效利用的可能途径

Table 2 Possible ways of high efficient and clean utilization of coal

序号	技术描述	简称
1	亚临界煤粉锅炉	SBPC
2	亚临界循环流化床锅炉	亚临界 CFB
3	超临界循环流化床锅炉	超临界 CFB
4	超临界煤粉锅炉	SCPC

续表

序号	技术描述	简称
5	超超临界煤粉锅炉	USPC
6	整体式煤气化联合循环	IGCC
7	燃烧后带 CCS 的亚临界煤粉锅炉	SBPC + CCS
8	燃烧后带 CCS 的亚临界循环流化床锅炉	亚临界 CFB + CCS
9	燃烧后带 CCS 的超临界煤粉锅炉	SCPC + CCS
10	燃烧后带 CCS 的采用富氧燃烧技术的超临界煤粉锅炉	SCPC 富氧燃烧 + CCS
11	燃烧前带 CCS 的整体式煤气化联合循环	IGCC + CCS
12	燃烧后带 CCS 的超超临界煤粉锅炉	USPC + CCS
13	燃烧前带 CCS 的多联产技术	多联产 + CCS

### 4 煤炭的高效洁净化利用评价指标研究

根据世界主要工业国家经验,煤炭利用应以发电为主(发达国家煤炭 80% 以上用于发电)。随着我国国民经济的迅速发展与人民生活水平的提高,以及不断采用先进的能源利用技术,增大发电用煤的比例是必然的趋势,预计在 2030 年发电用煤将达到 60%~70%,到 2050 年增加到 80%。煤炭高效洁净化发电技术的评价指标详见文献[7~9],下面主要给出生态优化度和低碳度的概念和定量判据。

#### 4.1 生态优化度

综合洁净化指标采用加权平均的方法,对 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>(可吸入颗粒物)及固体废弃物等对环境有影响的污染物进行了综合考虑<sup>[7,8]</sup>,但没有包括 CO<sub>2</sub> 对环境的影响程度,而 CO<sub>2</sub> 是影响温室效应的主要气体,已成为共同关注和重视的主要问题。为了进一步研究 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>及固体废弃物等对环境的综合影响程度,定义了生态优化度。生态优化度就是采用加权的方法,将 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>及固体废弃物等单一指标的洁净化度进行综合。根据文献[7,8]中综合洁净化指标的计算方法,可以得到不同发电技术机组(其简称见表 2)的生态优化度(见图 1),不同技术的生态优化度的计算以 SBPC 为基准。生态优化度值越大,对环境的

友好程度越好,煤炭利用的洁净化程度越高。

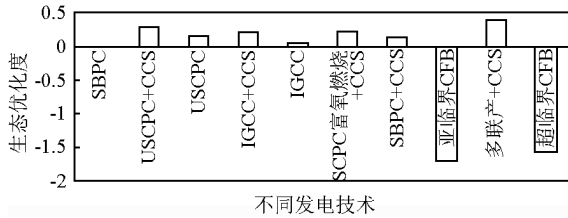


图1 不同发电技术的生态优化度

Fig. 1 Eco-friendly degree of different power generation technologies

由图1可知:a. 采用CCS技术后,各发电技术的生态优化度较大,其中最大的是多联产为0.39,其次是USCPC+CCS,再次为IGCC+CCS;b. 不采用CCS技术的USCPC的生态优化度高于SBPC+CCS;c. 亚临界CFB机组生态优化度最小。

由于CFB燃用了我国劣质煤和洗选后的煤矸石,使我国的劣质能源得到了有效的利用,但是相对于燃用优质煤且采用了先进的脱硫、脱硝、除尘等设备的其他机组来说,CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>及固体废弃物等排放物明显较高,其综合洁净化指标和生态优化度均远远低于其他技术。所以CFB的环保性能和对生态的优化程度较差。但如果提高CFB的参数和容量,如发展超临界CFB或超超临界CFB,则可降低SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>及固体废弃物等污染物的排放,CFB的环保性能和对生态的优化程度会相应提高(见图2)。如果CFB与布袋除尘相结合,则可以有效降低PM<sub>10</sub>。目前CFB与布袋除尘相结合可能会导致投资成本增加很多,将来成本可能会下降。同时,CFB的环保性能提高,随着CFB发电效率的提高,CO<sub>2</sub>的排放会减少,CFB对生态的优化程度相应提高。

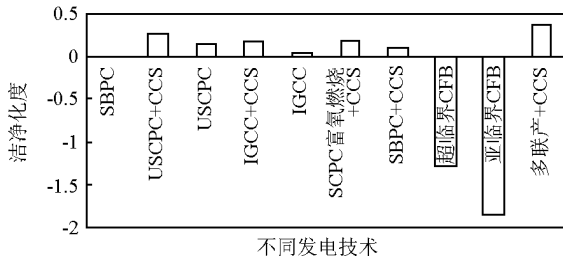


图2 不同发电技术的综合洁净化指标

Fig. 2 Clean degree of different power generation technologies

图1和图2中不同发电技术的生态优化度和综合洁净化度的变化趋势非常一致,这说明提倡高碳能源低碳利用和发展绿色能源的思路和方向是一致的。

#### 4.2 煤炭利用的总生态优化度的确定方法

确定煤炭利用的总生态化度的方法与确定总洁净化度的方法和情景假设是相同的,详见文献[7,8]。两者的区别在于总洁净化度是由煤燃烧排放的SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>和固体废弃物等的年排放总量的加权,而总生态化度除SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和PM<sub>10</sub>等污染物外还包括由煤燃烧排放的CO<sub>2</sub>总量。有文献[8]的情景假设和计算方法,可得到2007年、2020年、2030年和2050年煤炭洁净化度和生态优化度,计算结果见表3。

表3 2007年、2020年、2030年和2050年煤炭洁净化度和生态优化度

Table 3 Eco-friendly degree and clean degree of coal in 2007, 2020, 2030 and 2050

指标	2007年	2020年	2030年	2050年
洁净化度	0.18	0.59	0.61	0.71
生态优化度	0.15	0.63	0.67	0.83

分析结果表明:在以2000年煤炭利用技术为基准的情景下,2007年尽管采取了一些洁净煤技术,但是煤炭利用的总洁净化度和生态优化度较低,煤炭利用的洁净化程度不高。随着煤炭高效洁净化技术路线的实施和大规模利用,洁净化度和生态优化度提高速度很快,在能源利用过程中污染物排放明显降低,对环境和生态的友好程度不断提高。特别是2050年,煤炭总量与2030年大体相当的情况下,洁净化度和生态优化度分别从2030年的0.61和0.67提高到了0.71和0.83。2030年和2050年煤炭利用采用了高效洁净化技术路线,生态优化度不断提高。

#### 4.3 低碳度

低碳度是以2000年煤炭利用技术为基准,采用新技术和不同煤炭利用结构后实际排放的CO<sub>2</sub>量相对于2000年基准技术下CO<sub>2</sub>排放的减少程度,即为某一年或某一阶段的净减排量与基准值的比值。低碳度越大,该年度CO<sub>2</sub>排放量越少。表4为我国不同阶段煤炭利用量和低碳度的预估情况。

表4 我国不同阶段的煤炭利用量和低碳度的预估

Table 4 Prediction of coal utilization and low-carbon degree of China

项目	2020年	2030年	2050年
煤炭利用量/亿 tce	21.0	22.0	22.5
CO <sub>2</sub> 排放基准量/亿 t	52.6	55.1	56.4
CO <sub>2</sub> 排放量/亿 t	42.4	40.2	25.4
低碳度/%	19.4	27.1	55.0

由表4可知,尽管煤炭利用从2020年到2030年增加了1.0亿tce,但2030年的低碳度却提高了7.7%,2050年煤炭利用量与2030年大致相当,CO<sub>2</sub>排放量却从2030年的40.2亿t降到了25.4亿t,低碳度从2030年的27.1%提高到了55.0%,提高了27.9%。研究表明:随着煤炭利用技术的提高,合理优化煤炭利用结构,煤炭的利用将会是高效洁净的利用,可以实现高碳能源低碳利用,减少CO<sub>2</sub>排放量,降低其对温室效应的影响。

## 5 结语

煤炭高效洁净化利用研究表明<sup>[8]</sup>: a. 2030年以前,煤炭在我国能源利用中仍占主导地位,随着能源结构的调整、新技术的应用和创新等相应措施的实施,到2050年煤炭可调整为重要的基础能源、保障能源;b. 煤炭高效、洁净化利用是能源可持续发展的战略方向,通过相应的技术手段,可以量化规划体系,实现高碳能源低碳利用;c. 在未来几十年中,改变煤炭目前粗放供给的模式为科学供给满足合理需求的模式,为我国煤炭高效利用提供支持途径;d. 实现高碳能源低碳利用与发展绿色煤电趋势一致。基于以上4点,提出以下煤炭高效洁净化利用的发展战略:

首先,2030年以前必须建立对商品动力煤进行筛分、洗选、监督和销售的体系。这是燃煤工业锅炉节能减排的最经济有效的途径,也对提高燃煤发电

的经济性、可靠性、洁净化度有很大好处。超超临界发电技术是电力工业最主要的高效洁净化利用技术,如果采用CCS技术、多联产+CCS以及IGCC+CCS是比较好的选择。

其次,从2030年到2050年,超超临界技术仍将是电力工业主流的煤炭利用技术,但是随着对CO<sub>2</sub>问题重视程度的提高,IGCC+CCS、多联产+CCS、超超临界+CCS的综合指标都较好,它们都可以成为重要的选择。

再次,对于煤炭高效洁净化利用技术,重点领域为超超临界发电技术、循环流化床技术、IGCC、燃煤烟气污染控制技术、CCS技术、多联产技术等。

## 参考文献

- [1] 阎维平. 洁净煤发电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [2] Pacala S, Socolow R. Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years using current technologies[J]. Science, 2004, 305:968-972.
- [3] 黄其励. 中国燃煤发电技术现状和发展[C]//“和谐可持续煤基发电”清洁化石能源研讨会. 西安,2007.
- [4] 黄其励,范维唐,岑可法,等. 中小型工业锅炉高效燃烧和污染控制对策研究[R]. 北京:中国工程院,2001.
- [5] U. S. Department of Energy, Energy Information Administration. International Energy Annual 2004 [R]. 2006.
- [6] Stephen Ansolabehere, Janos Beer, John Deutch, et al. The coal of future [R]. American: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [7] 陈吟颖,王淑娟,冯武军,等. 煤炭利用洁净化度的构建与分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2010,50(11):1829-1833.
- [8] 徐旭常,王淑娟,陈吟颖,等. 中国能源2030/2050中长期发展战略研究之煤炭高效洁净化利用[R]. 北京:中国工程院,2010.
- [9] 陈吟颖,王淑娟,冯武军,等. 煤炭的高效洁净化利用综合评价指标的建立与研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30:159-166.

# Study on high efficient and clean utilization of coal

Chen Yinying, Wang Shujuan, Chen Changhe, Xu Xuchang

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,  
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[**Abstract**] The clean coal utilization strategy which is an important part of energy development strategy of China was presented. The main forms and problems of coal utilization in China were analyzed, and an index system for efficient and clean utilization of coal, including clean degree, eco-friendly degree, and low-carbon degree was developed. Based on the analysis of the structure and quantity of coal consumption in China, the paper gives the index values of 2020, 2030, and 2050, respectively. The development strategy of efficient and clean utilization of coal in China is finally proposed for 2011 to 2030 and 2031 to 2050. The results show that: a. By 2030, coal will still play a dominating role in the strategic layout of energy supply in China. With the adjustment of energy structure, the application and innovation of new technologies, coal will be used more cleanly, more environmental friendly, and with less CO<sub>2</sub> emissions by 2050. b. The efficient and clean utilization of coal is the strategic direction for sustainable development of energy supply. Low-carbon utilization of high-carbon energy source can be obtained. c. In the next few decades, complete transform from currently extensive coal supply mode into scientific supply which meets the reasonable needs will provide direct support for the efficient utilization of coal. d. Low-carbon utilization of high-carbon energy is in accordance with green development strategy of China.

[**Key words**] clean coal power generation; clean degree; energy sustainable development comprehensive index; eco-friendly degree; low-carbon degree