



国家能源集团  
CHN ENERGY

# 创新引领电力高质量发展

Innovation leads high-quality development  
of electric power

朱法华 教授、博导

Zhu Fahua Pro./ Ph.D supervisor

国家能源集团

Chn Energy

俄罗斯自然科学院

Russian Academy of Natural Sciences Foreign Academician

首席科学家

Cheif Scientist

外籍院士

创新  
innovation

高质量  
H-quality

发展  
development



## 2017-11-28中国国电集团与神华集团合并重组为国家能源投资集团有限责任公司

(简称国家能源集团)

In 2017, China Guodian Corporation and Shenhua Group Co., Ltd. were merged and reorganized into CHN ENERGY Investment Group Co.,LTD. (short for CHN ENERGY).



神华集团 (Shenhua Group)

中国排名首位的煤炭生产企业

Chinese top coal producer

《财富》2017年世界五百强第276名



中国国电 (China Guodian)

中国主要独立发电商之一

One of Chinese leading independent power generators

《财富》2017年世界五百强第397名

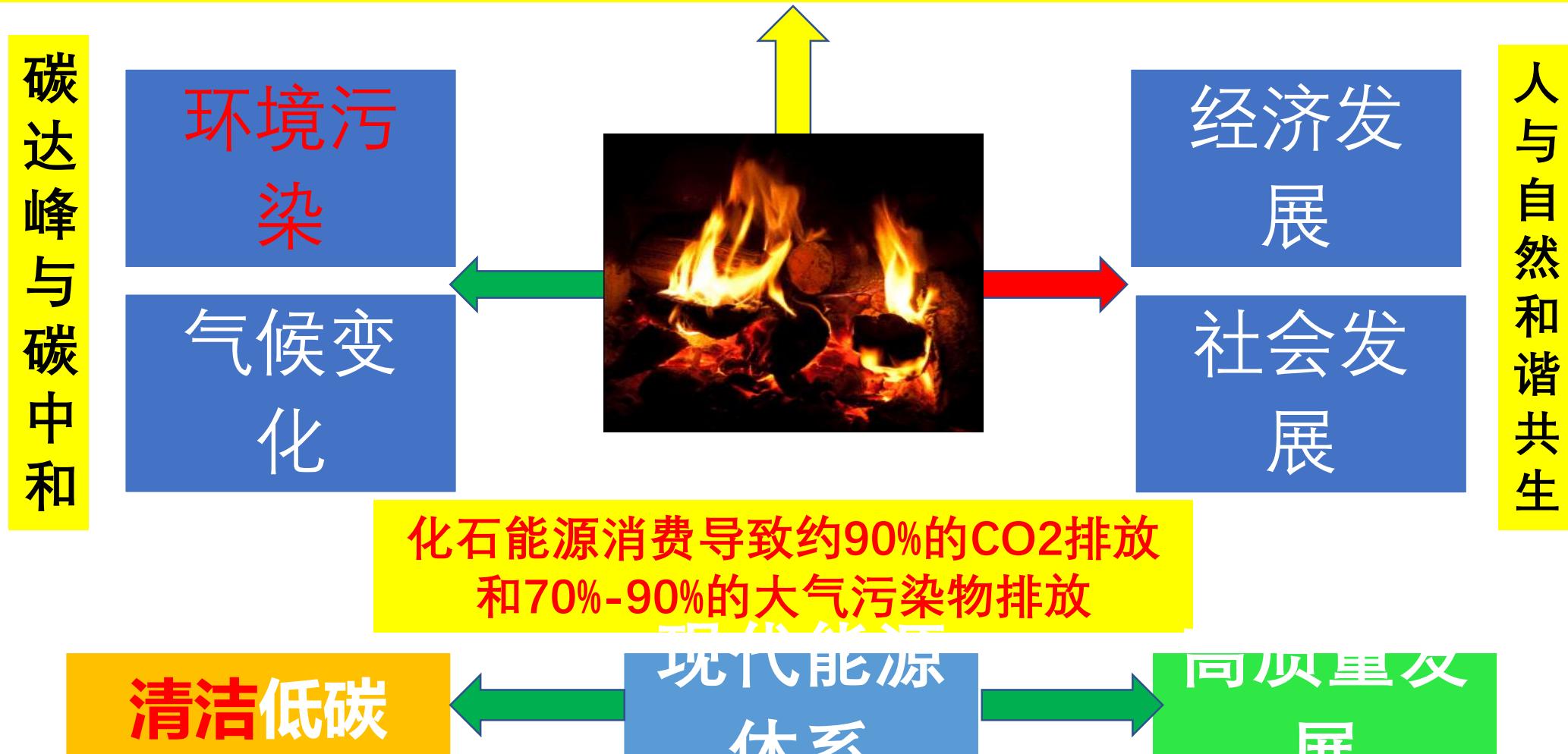
世界最大的综合性能源集团, 2023年世界500强排名76位 (ranked at 85th of Fortune Global 500 in 2023)

# 朱法华 教授



- 俄罗斯自然科学院 **外籍院士**
- 国务院政府特殊津贴 **专家**
- 国家能源集团 **首席科学家**
- 全国重点实验室 **主任**
- 生态环境部重点实验室 **主任**
- 南京信息工程大学双碳院 **院长**
- 《电力科技与环保》期刊 **主编**
- 南京大学紫金全兴 **杰出校友**

表象是环境问题，核心是能源问题，本质是发展问题



# 目录

## 电力清洁发展

Clean development of  
electric power

## 电力低碳发展

Low-carbon development  
of electric power

## 高质量发展展望

Prospects for H-quality  
development

# PART 01



电力清洁发展

Clean development of  
electric power

# 中国电力发展4个阶段 (4 stages)



1987年突破1亿，用了**105**年；

It took 105 years to reach 100 million in 1987

1995年突破2亿，用**8**年时间；

It took 8 years to reach 200 million in 1995

2000年突破3亿，用**5**年时间；

It took 5 years to reach **300 million in 2000**

2011年突破**10**个亿，超过美国

It exceeded 1 billion in 2011, surpassing the U.S.

蹒跚  
起步

185

(1882-1949)

艰苦  
创业

5712

(1950-1978)

蓬勃  
发展

35657

(1979-2002)

创造  
辉煌

256000

(2003-2022)

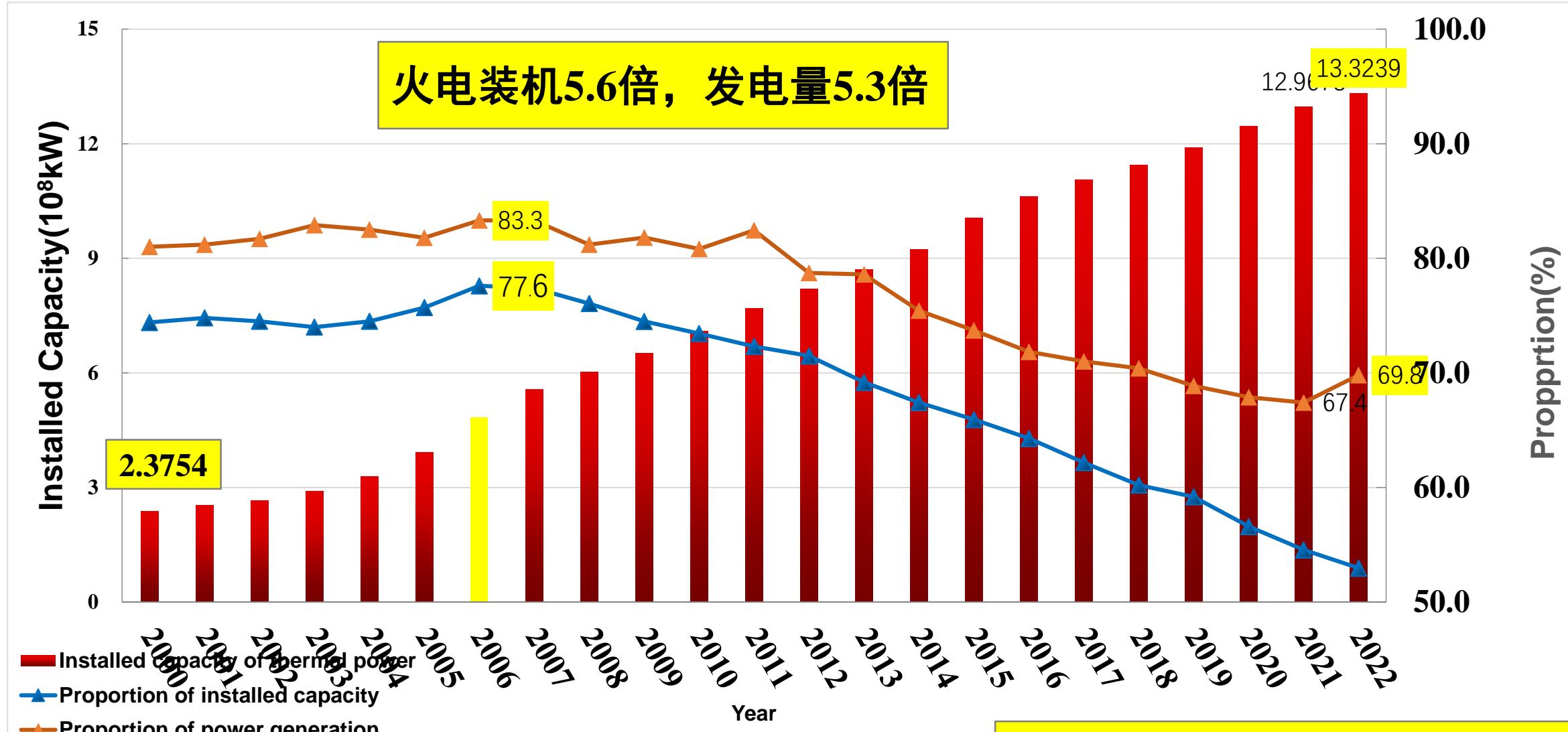
1994年2月大亚湾核电站1号机组投运  
Daya Bay Nuclear PP, unit 1 operated

# 中国电力发展4个阶段 (4 stages)



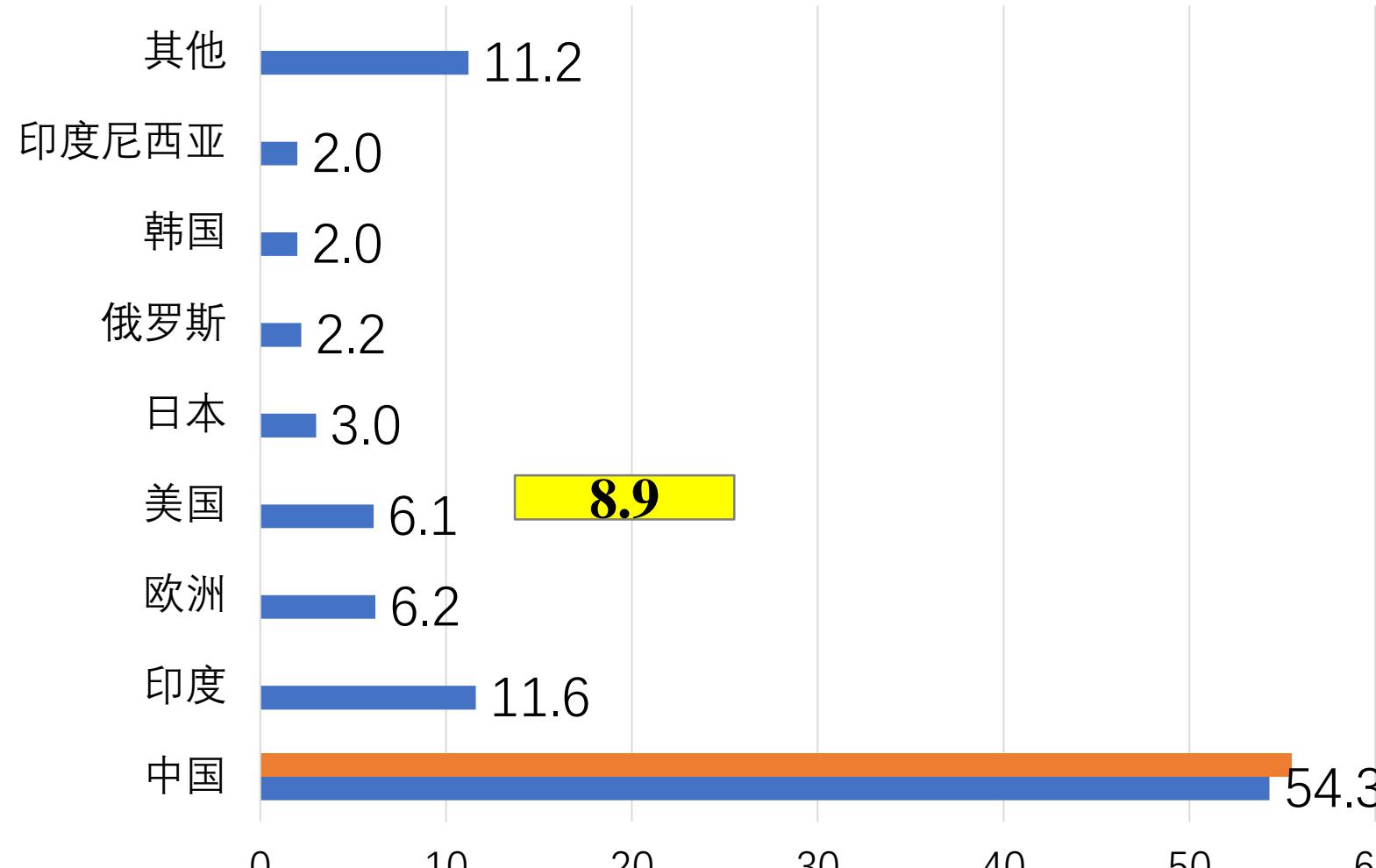
阶段	蹒跚起步	艰苦创业	蓬勃发展	创造辉煌
	<b>67年</b>	<b>28年</b>	<b>23年</b>	<b>19年</b>
时间	1882年-1949年	1950年-1978年	1979年-2002年	2003年-2022年
装机容量/ 万 kW	<b>184.86</b>	<b>5172</b>	<b>35657</b>	<b>256405</b>
位居世界	第21位	第8位	第2位	第1位 (2011年 起)
年均增长率/%	—	<b>12.6</b>	<b>7.9</b>	<b>10.4</b>

来源：《电力科技与环保》2013 (5)

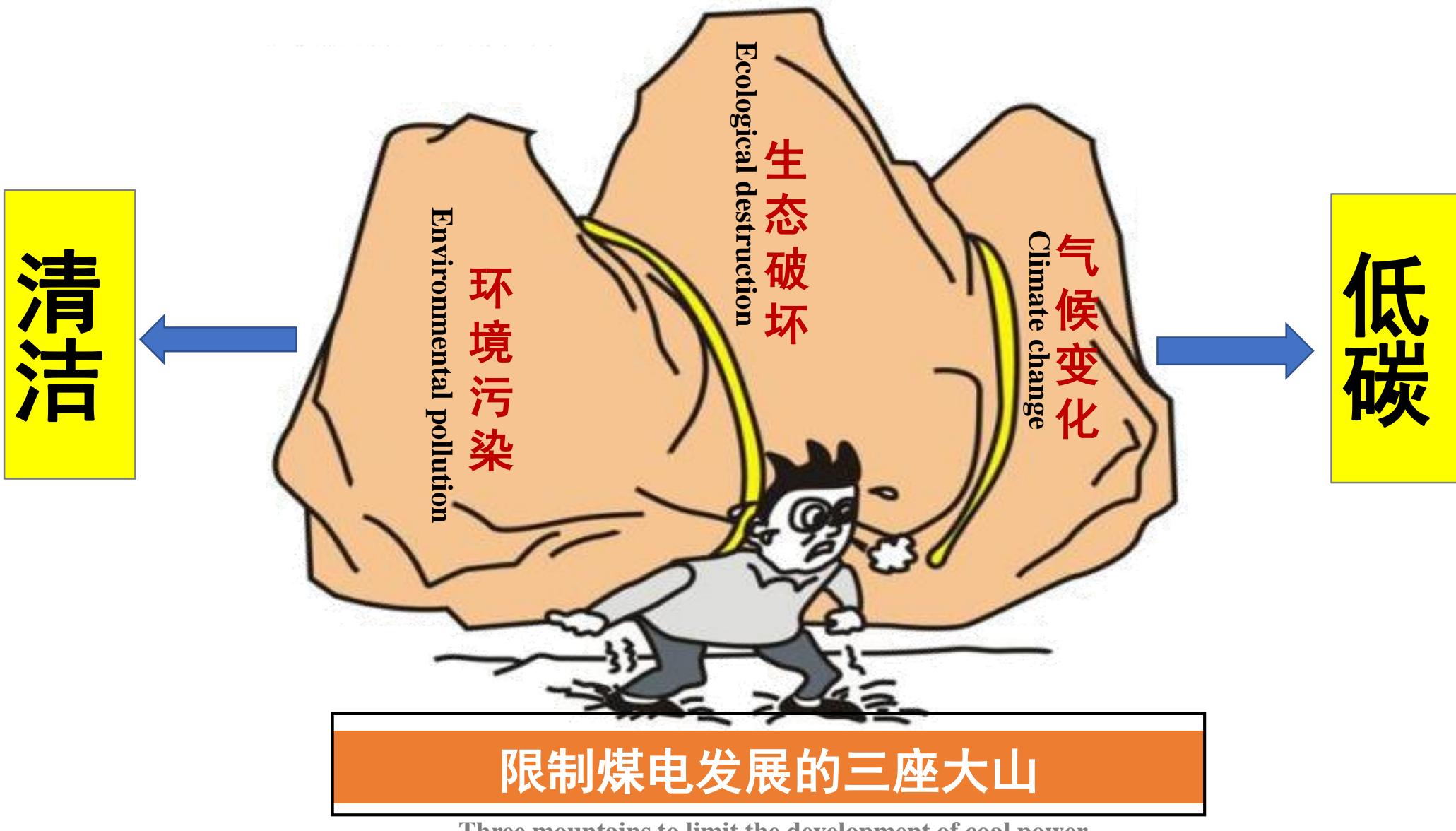


来源: 《电力科技与环保》2013 (5)

# 中国的电煤消费 (Coal consumption)



2020年中国煤炭消费量占世界总量的55.5% (Chinese coal consumption accounted for 55.5 percent of the world's total consumption in 2020)  
中国大陆煤炭消费40.5亿吨, 占世界54.3%; 电煤消费量211123万吨, 占中国52.1%.



限制煤电发展的三座大山

Three mountains to limit the development of coal power

来源: 《电力科技与环保》2013 (5)

## 3个时代7个阶段(seven stages of three eras)

无标准阶段	《工业“三废”排放试行标准》 GBJ4-1973	《火电厂大气污染物标准》 GB13223-1996	《火电厂大气污染物标准》 GB13223-2003	超低排放阶段 2014年
阶段1  (1882—1972年)	阶段2	阶段3	阶段4	阶段5  《火电厂大气污染物标准》 GB13223-2011
无标准	有标准			严格标准

# 标准最严限值的演变 (minimum limit)



国家标准 GBJ4-73

1882 1973

1

200  
000

800  
600  
400  
200  
0

浓度 (mg/m<sup>3</sup>)

1991

2

600

1996

3

2003

4

国家标准 GB13223

2003

5

2011

6

超低排放

2014

7

烟尘浓度 conc. of dust

20 10

SO<sub>2</sub>浓度 conc. of SO<sub>2</sub>

50 35

NO<sub>x</sub>浓度 conc. of NO<sub>x</sub>

100 50

200

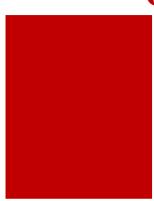
1200

50

400

650

450





中国环境科学出版社2002, 解振华局长作序



史上最严的排放标准——催生了超低排放  
The strictest emission standard in history -  
- resulting in ultra-low emissions



□ 在《环境保护》上发表封面文章，首次定义了超低排放，并得到国家认可(**ULE is defined for the first time**)

被引160次、下载2639次

本刊由环保部部长赠阅至党和国家领导人，各省省委书记、省长、分管环保工作的副省长，各部委领导，各央企主要负责人等决策群体



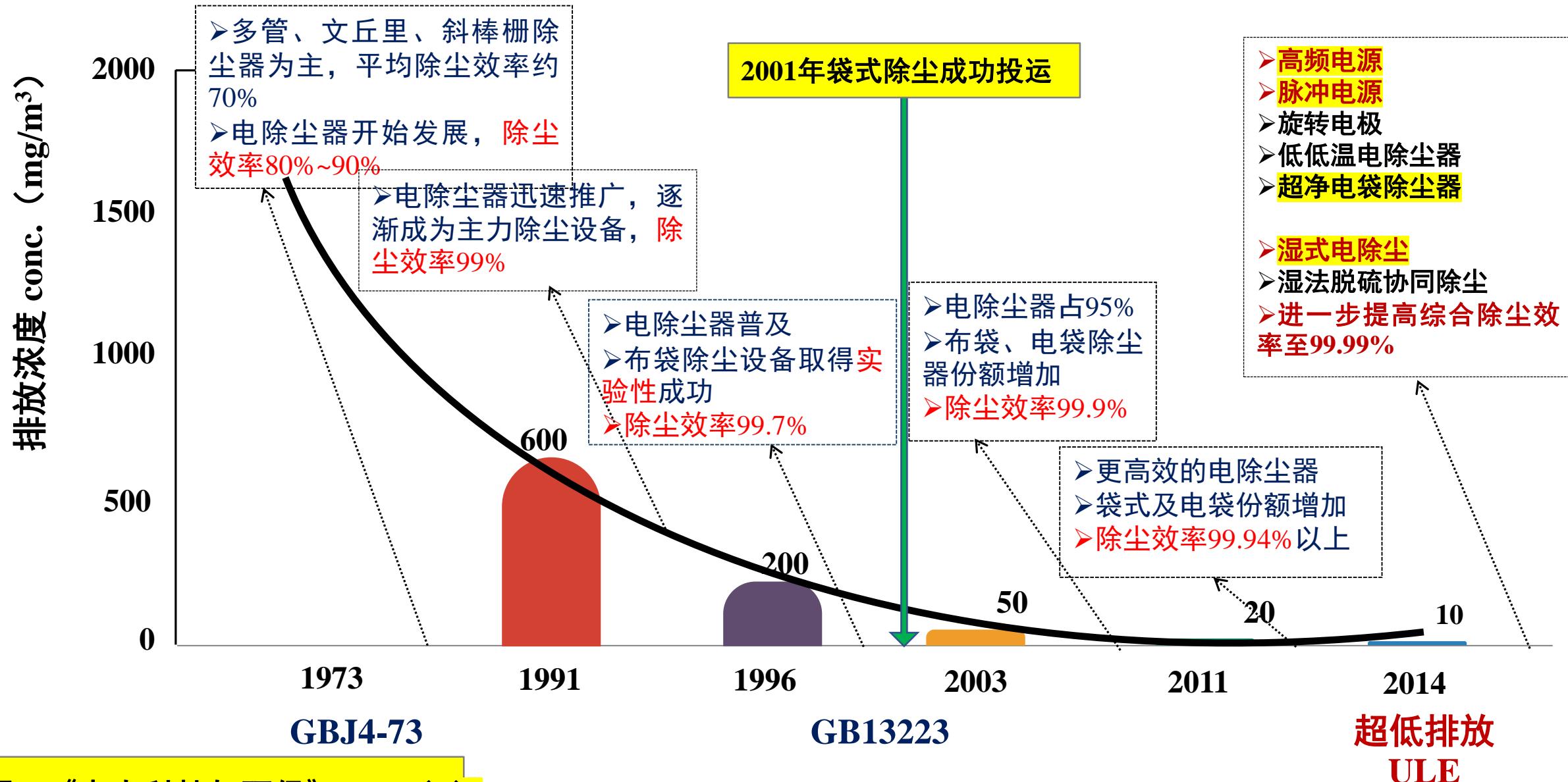
- 超低排放定义(Ultra-low emission(ULE) definition)

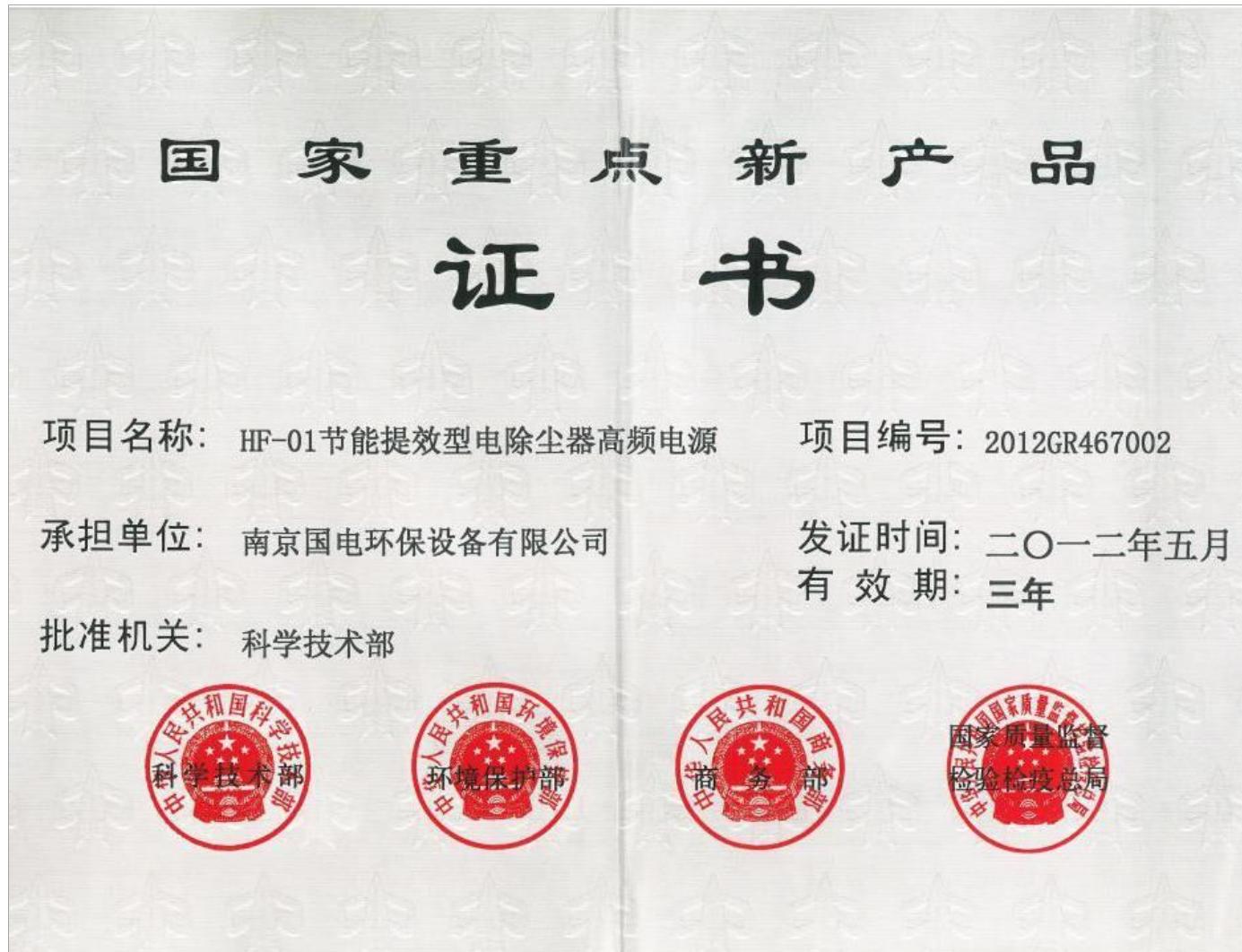
燃煤电厂采用多种污染物高效协同集成系统的脱除技术，使其大气污染物排放浓度基本符合燃气机组排放限值，即烟尘不超过10 mg/m<sup>3</sup>、二氧化硫不超过35 mg/m<sup>3</sup>、氮氧化物不超过50 mg/m<sup>3</sup>。

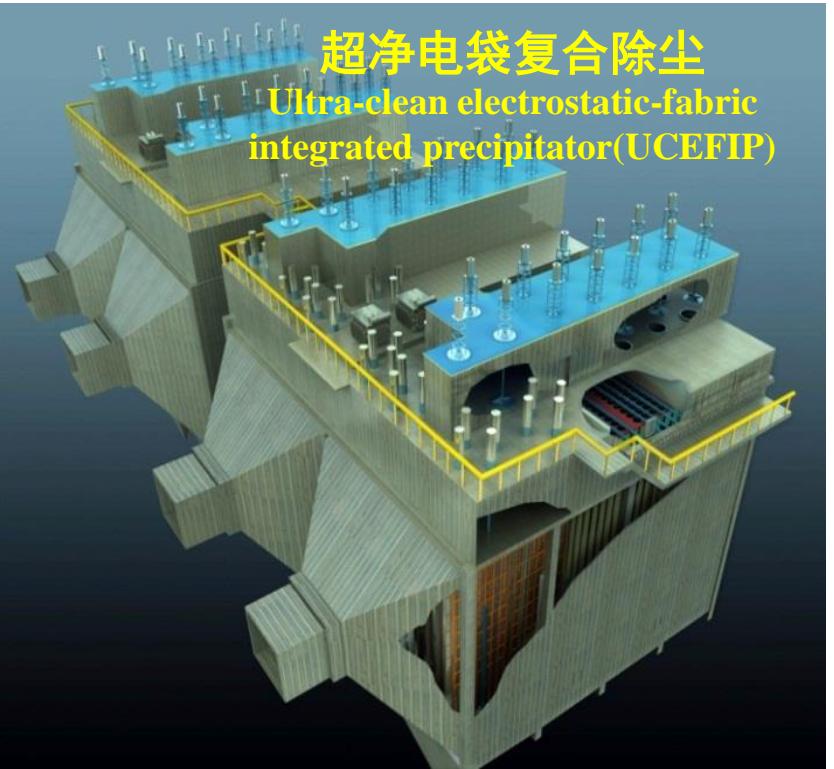
- 主要燃煤国家煤电大气污染排放最严标准限值比较(Comparison of the strictest standard limits)

国家		烟尘*	SO <sub>2</sub>	NO <sub>X</sub>
中国	发改能源 [2014]2093	10	35	50
美国	2005年2月28日至 2011年5月3日	0.015 lb/MBtu (耗煤量热值排放)	0.15 lb/MBtu (耗煤量热值排放)	0.11 lb/MBtu (耗煤量热值排放)
	折算结果	18.5	185	135
	2011年5月3日及 以后新建、扩建	0.090 lb/MWh (发电排放，最高除尘效率99.9%)	1.0 lb/MWh (发电排放，最高脱硫效率97%)	0.70 lb/MWh (发电排放)
	折算结果	12.3	136.1	95.3
德国		20	200	200
日本		50	200	200
澳大利亚		100	200	460

注\*：美国标准中指的是颗粒物(PM)。单位：mg/m<sup>3</sup>。



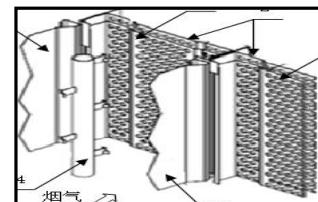
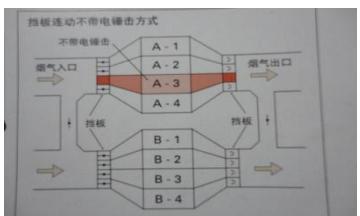
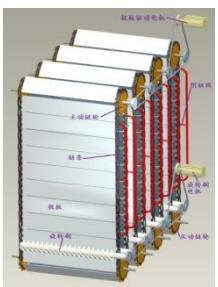
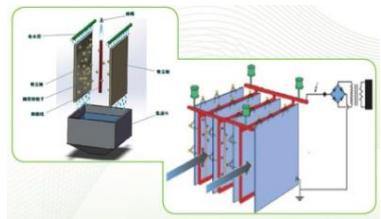
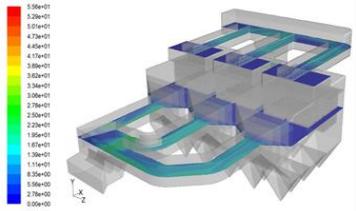




- 建成世界最大(the biggest UCEFIP project in the world)**1030MW**级超净电袋复合除尘工程——河南平顶山
- 出口土耳其、柬埔寨、塔吉克斯坦等多个国家,出口总装机**8710MW**

- 建成了世界最大(the biggest electrostatic precipitator project using high frequency+pulse power supply in the world)**1000MW**级**高频+脉冲电源**供电的电除尘工程——谏壁电厂
- 出口印度、土耳其等国家

# 除尘技术突破 (Dust removal technology breakthrough)



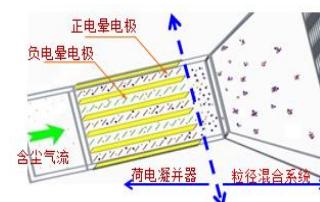
逆流式ESP

湿式电除尘

移动电极

隔断、关断气流振打

电凝聚



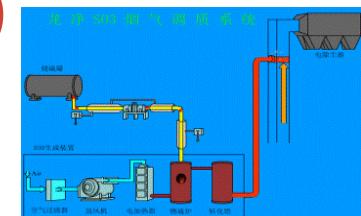
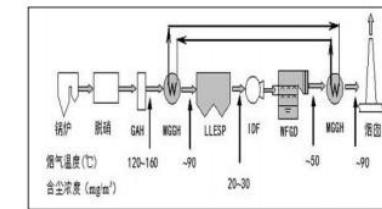
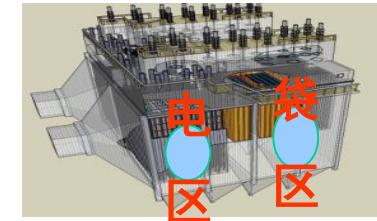
袋式除尘

超净电袋

低低温除尘

烟气调质

电源技术



HJ

中华人民共和国国家环境保护标准

HJ 2028-2013

## 电除尘工程通用技术规范

General technical specification for electrostatic precipitation  
engineering

本电子版为发布稿。请以中国环境科学出版社出版的正式标准文本为准。

2013-3-29 发布

2013-7-1 实施

环境 保护 部 发布

HJ

中华人民共和国国家环境保护标准

HJ 2039-2014

## 火电厂除尘工程技术规范

Technical specifications for dedusting engineering of thermal power plants  
(发布稿)

本电子版为发布稿。请以中国环境科学出版社出版的正式标准文本为准。

- 6.1.2 可用率应为100%
- 6.5.1.3 比集尘面积, 30/110; 20/130

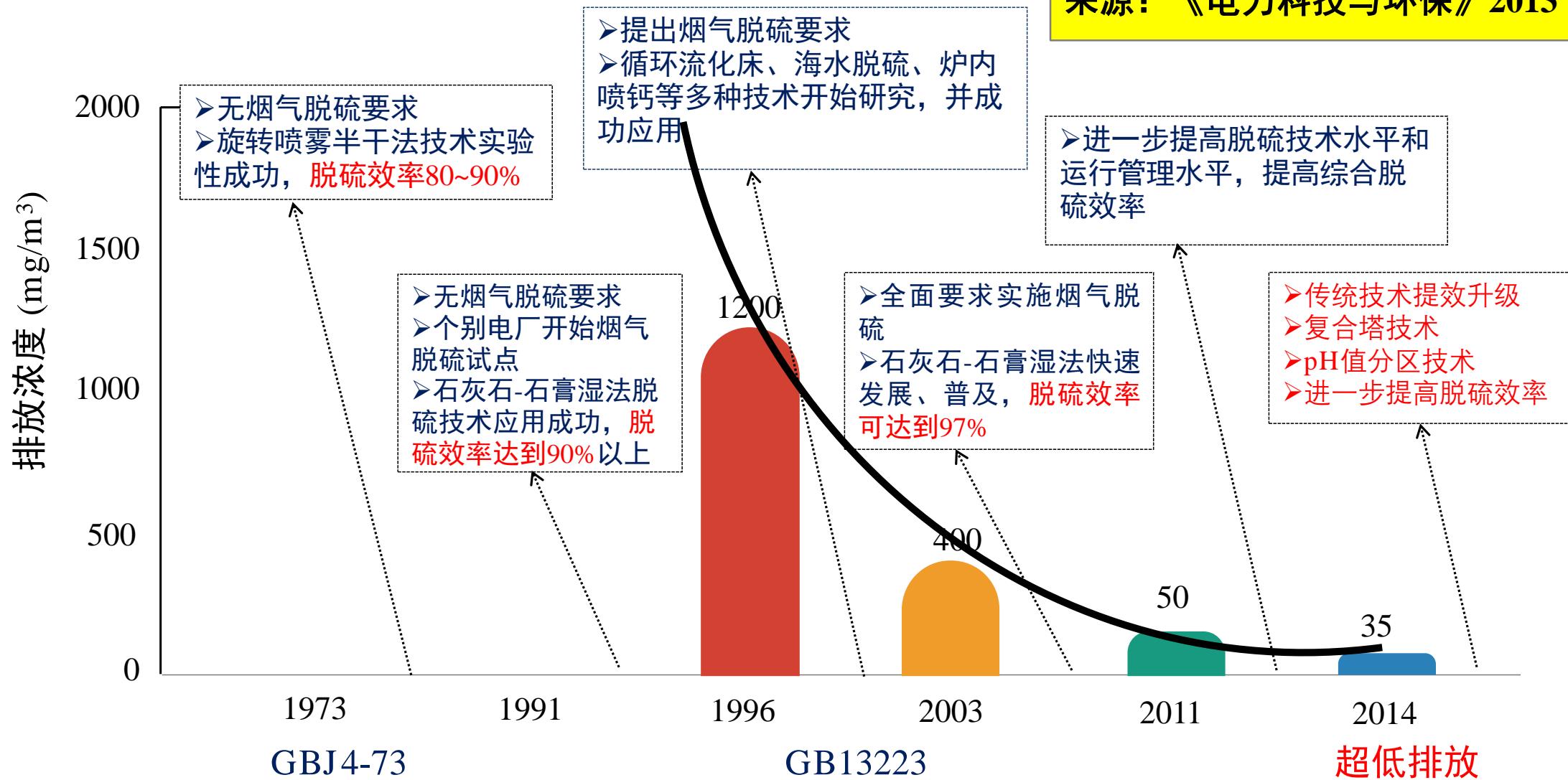
2014-06-10 发布

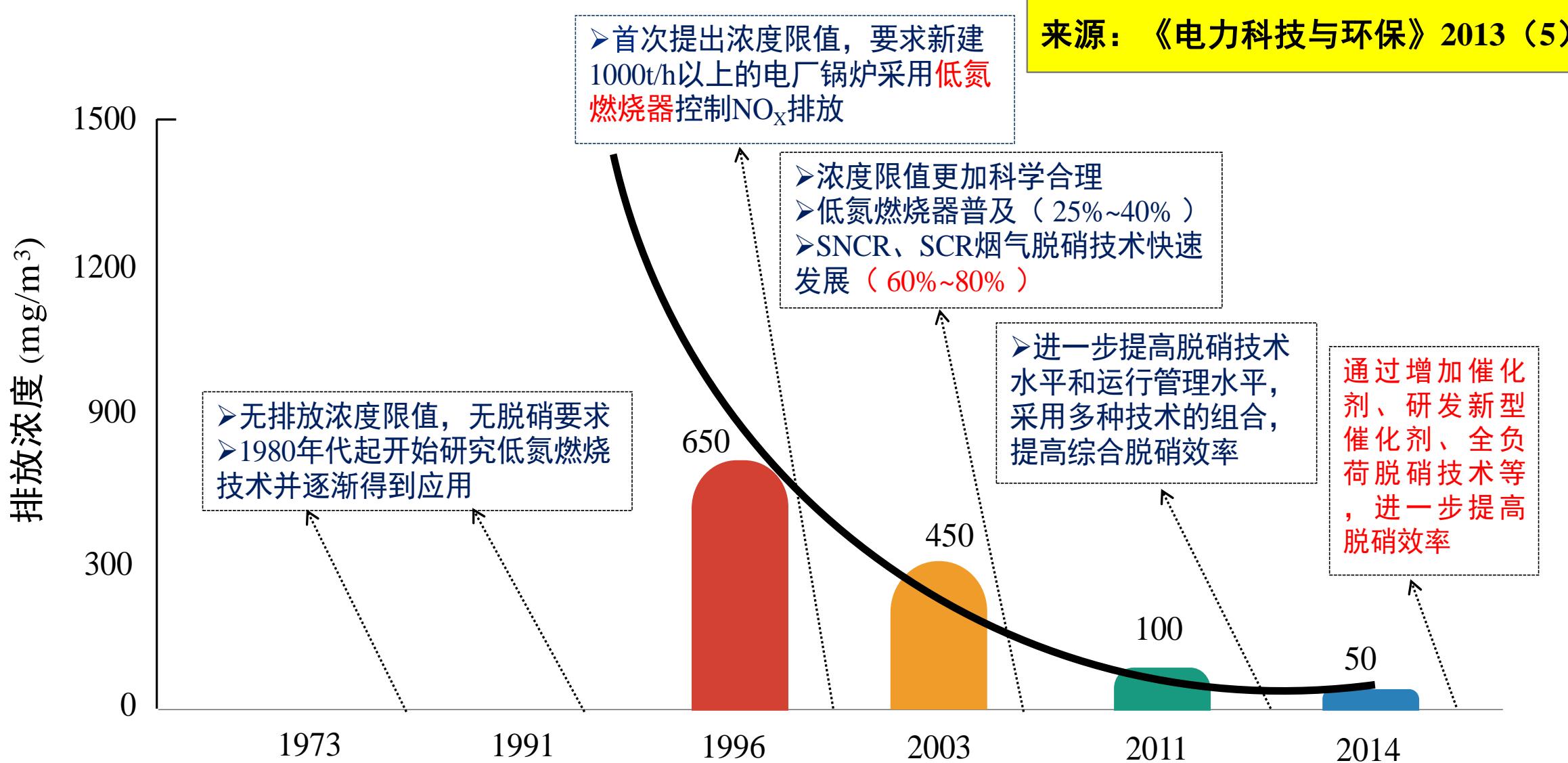
2014-09-01 实施

环境 保护 部 发布



来源：《电力科技与环保》2013 (5)





# 多污染物控制—主流WESP技术



Multiple pollution control -- mainstream WESP technology

## 金属极板 (Metal plate) WESP

国外燃煤电厂  
主流技术  
(三菱、日立、  
巴威、阿尔斯通)

菲达、南源、龙净...  
国华舟山电厂、浙能嘉华电厂...



金属极板 (316L)

## 导电玻璃钢 (Conductive glass steel) WESP

电除雾器，在冶金、  
化工行业应用较多

西安热工院、南京通用、  
宜兴化工...  
华能黄台电厂、包头希望铝业...

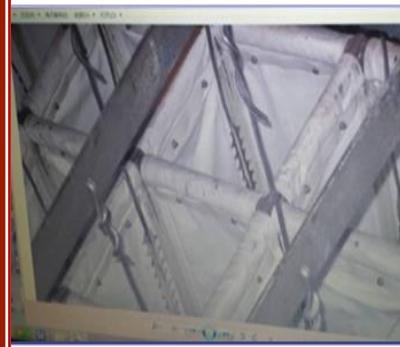


导电玻璃钢

## 柔性极板 (Flexible plate) WESP

美国俄亥俄大学最早提出，转让给美  
国南方环保公司，  
国外业绩很少

山大能源、国电南环院...  
益阳电厂、荥阳电厂...



非金属柔性极板

发展出迳流式WESP(developed a direct flow of WESP)



## 中华人民共和国环境保护行业标准

### 火电厂烟气排放连续监测技术规范

HJ/T 75-2001

Technical norm for continuous emissions monitoring  
of flue gas emitted from thermal power plants

#### 1 范围

本标准适用于以固体、液体、气体化石为燃料的火电厂固定式烟气排放连续监测系统。

#### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 HJ/T 75-2001 的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件, 其随后所有的修改(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准, 然而, 鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新的版本。凡是未注日期的引用文件, 其最新的版本适用于本标准。

GB 13223 火电厂大气污染物排放标准

GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法

HJ/T 47-1999 烟气采样器技术条件

HJ/T 48-1999 烟尘采样器技术条件

SO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub>	ROSEMOUNT	ABB	本产品
检测下限 ppm	0.7	1.5	<b>0.4</b>
零点漂移 F.S./7d	±2%	±1%	<b>±1%</b>
量程漂移 F.S./7d	±2%	±1%	<b>±1%</b>
线性误差 F.S.	±2%	±1%	<b>±1%</b>





您当前位置：[首页](#) > 正文

## 首用国产监测仪 燃煤电厂装上“千里眼”

发布时间：2018-11-09

来源：科技日报

大 中 小



燃煤污染 [截图\(Alt + A\)](#) [监测](#) [秀成果](#)

近日，记者获悉，“燃煤污染物超低排放监测仪器关键技术研发及产业化”项目组开发出系列监测仪器，填补了国内空白，打破了国外仪器的技术和市场垄断，使国产超低排放监测仪器首次在燃煤电厂应用。

“由于国内没能突破相关核心技术，导致该类仪器的技术被国外垄断。”项目负责人、国电环境保护研究院院长、国家环境保护大气物理模拟与污染控制重点实验室主任朱法华介绍，该项目的研究人员攻克了技术瓶颈，实现了仪器监测的重要指标优于国外同类仪器的目标，推动了我国燃煤污染物超低排放监测技术的进步。

1. 《火电厂烟气排放连续监测技术规范》 HJ/T75-2001
2. 《火电厂环境监测技术规范》 DL/T414-2004
3. 《火电厂环境监测技术规范》 DL/T414-2012
4. 《火电厂环境监测技术规范》 DL/T414-2022
5. 《火电厂烟气中细颗粒物测试技术规范 重量法》 DL/T1520-2016
6. 《电除尘器 性能测试方法》 GB/T 13931—2017。
7. 《烟气湿法脱硫用石灰石粉反应速率的测定》 DL/T943-2005
8. 《便携式烟气逃逸氮测量系统技术要求》 DL/T1916-2018
9. 《火电厂低浓度颗粒物测试技术规范 重量法》 DL/T1915-2018
10. 《火电厂烟气中SO<sub>3</sub>测试 控制冷凝法》 DL/T1990-2019
11. 《燃煤锅炉飞灰中氨含量的测定 分光光度法》 DL/T1984-2019

## ■ 除尘与脱硫相互影响

Mutual influence between dust removal and desulfurization



## ■ 除尘与脱硝相互影响

Mutual influence between dust removal and denitration

## ■ 脱硝与脱硫相互影响

Mutual influence between denitration and desulfurization

# 除尘、脱硫、脱硝对排放的影响

Influence of dust removal, desulfurization and denitration on emissions

HJ-BAT-001

## 环境 保护 技术 文件

# 燃煤电厂污染防治最佳可行技术指南 (试行)

Guideline on Best Available Technologies of Pollution Prevention and Control  
for Coal-fired Power Plant Industry (on Trial)

环境 保护 部

2010年2月



## 中华人民共和国国家环境保护标准

HJ 2301-2017

# 火电厂污染防治可行技术指南

Guideline on available technologies of pollution prevention  
and control for thermal power plant

(发布稿)

本电子版为发布稿。请以中国环境科学出版社出版的正式标准文本为准。

2017-05-21 发布

2017-06-01 实施

环境 保护 部 发布

# 火电厂污染防治可行技术指南

Guideline on best available technologies prevention and control for thermal power plant

(HJ-2301-2017)



国家能源集团  
CHN ENERGY

■项目承担单位共9家

烟气除尘  
Dust removal

龙净环保  
菲达环保

低氮燃烧与烟气脱硝

Low-nitrogen combustion + flue gas denitration

浙江大学

烟气脱硫

Flue gas desulfurization

国电龙源  
清新环境  
顾问集团  
龙净环保

噪声处理

Noise treatment

北京市劳保所

固体废物

Solid waste

环保部评估中心

同时负责：工艺过程污染控制技术、  
超低排放技术路线、  
汞污染防治、  
水污染防治等内容编制

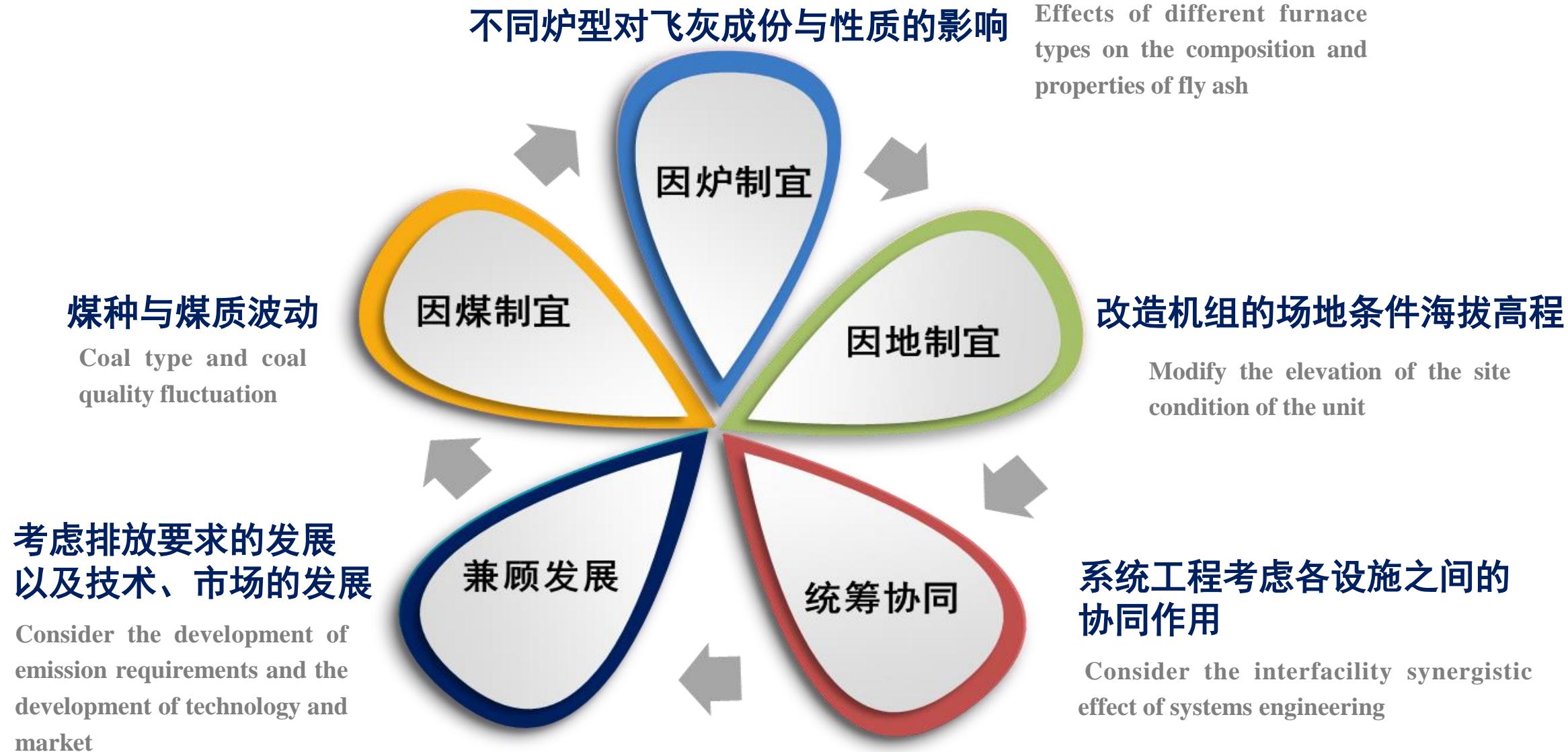
国电环境保护研究院

牵头组织、协调

# 超低排放技术路线的基本原则



## Basic principle of ULE technology route



环境保护部印发《火电厂污染防治可行技术指南》

# 推动火电行业污染防治升级改造

◆本报记者郭薇

环境保护部于近日首次以国家环境保护标准发布了《火电厂污染防治可行技术指南》(HJ2301-2017),以期进一步落实排污许可制度,加强和规范火电厂烟气、水、噪声、固体废物污染防治,改善环境质量,推动火电行业污染防治措施升级改造与技术进步。日前,环境保护部科技标准司有关负责人就这一技术指南的相关问题以及如何理解、贯彻这一技术指南,接受了记者采访。

**记者:**请介绍一下制定《火电厂污染防治可行技术指南》的必要性和背景情况。

**答:**本《技术指南》制定的必要性主要体现在“环境改善的要求、火电发展的要求、技术进步的要求、环境管理的要求”4个方面。

一是环境改善的要求。随着我国工业化和城市化进程加快,空气污染



# 火电厂污染防治 技术手册

朱法华 等 著

中国电力出版社2017年，  
黄润秋部长作序

中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 荣誉证书

朱法华同志：

您著的《火电厂污染防治技术手册》  
( ISBN 978-7-5198-0755-9 ) 入选第二批全国  
环境保护优秀培训教材。

特发此证，以资鼓励。

中华人民共和国环境保护部  
2018年2月1日

## 全流程技术标准体系



来源：《电力科技与环保》2013 (5)

**明确治理目标**

Clear governance objectives

**指明实施路线**

Specify implementation route

**规定建设要求**

Specified construction requirements

**验证工程效果**

Verify engineering effect

**指导高效运行**

Guide efficient operation

2分技术，3分设备，5分管理 (20% for technologies, 30% for equipment, 50% for managements)



## 超低排放“教父”朱法华：构建技术标准体系至关重要

Zhu Fahua, "Godfather" of ULE: It is very important to build a technology standards system.

CPTV 中能传媒视频

● By the end  
of 2016

$4.4*10^8 \text{ kW}$

Completed ULE  
retrofit



accounted for the  
national coal  
power unit  
capacity

● By the end  
of 2017

$7*10^8 \text{ kW}$

Completed ULE  
retrofit



accounted for the  
national coal  
power unit  
capacity

● By the end  
of 2018

$8.1*10^8 \text{ kW}$

Completed ULE  
retrofit



accounted for the  
national coal  
power unit  
capacity

● By the end  
of 2019

$8.9*10^8 \text{ kW}$

Completed ULE  
retrofit



accounted for the  
national coal  
power unit  
capacity

● By the end  
of 2020

$9.5*10^8 \text{ kW}$

Completed ULE  
retrofit

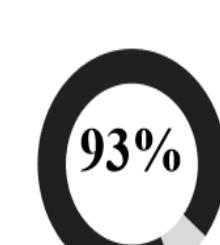


accounted for the  
national coal  
power unit  
capacity

● By the end  
of 2021

$10.0*10^8 \text{ kW}$

Completed ULE  
retrofit



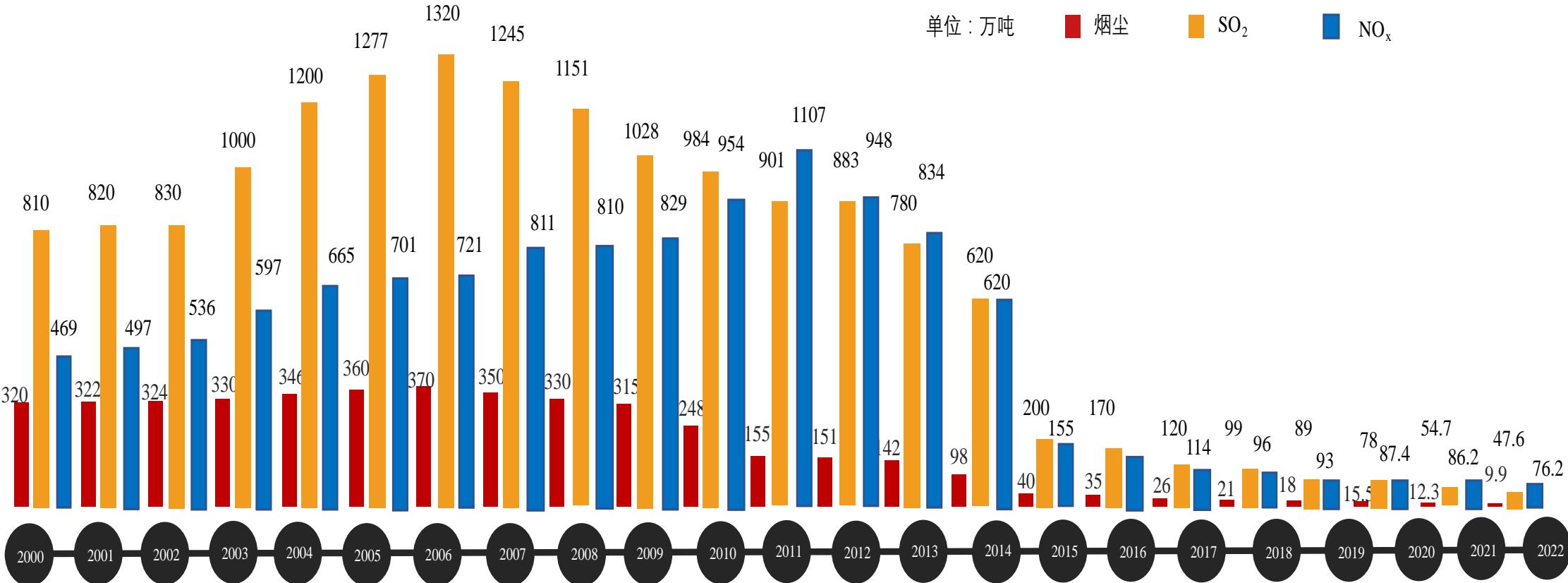
accounted for the  
national coal  
power unit  
capacity

The percentage of completed ULE retrofit was increased year by year  
and it reached to 93.5% by the end of 2022.

# 超低排放技术的应用效果 (Application effect)



来源：《电力科技与环保》2013 (5)



2022年中国火电发电量是2006年的2.5倍，但火电行业烟尘和SO<sub>2</sub>排放量分别下降了97.3%和96.4%。2011年火电行业NO<sub>x</sub>达到峰值1107万t，与2011年的峰值相比下降了93.1%

煤电超低排放改造的贡献，  
在长三角地区达到24%，  
在珠三角地区达到23%，  
在京津冀地区达到10%



十年来，以北京为代表的中国大气污染治理取得了历史性突破，北京的PM<sub>2.5</sub>年均浓度从89下降到35以下，被联合国称为**北京奇迹**

## PART 02



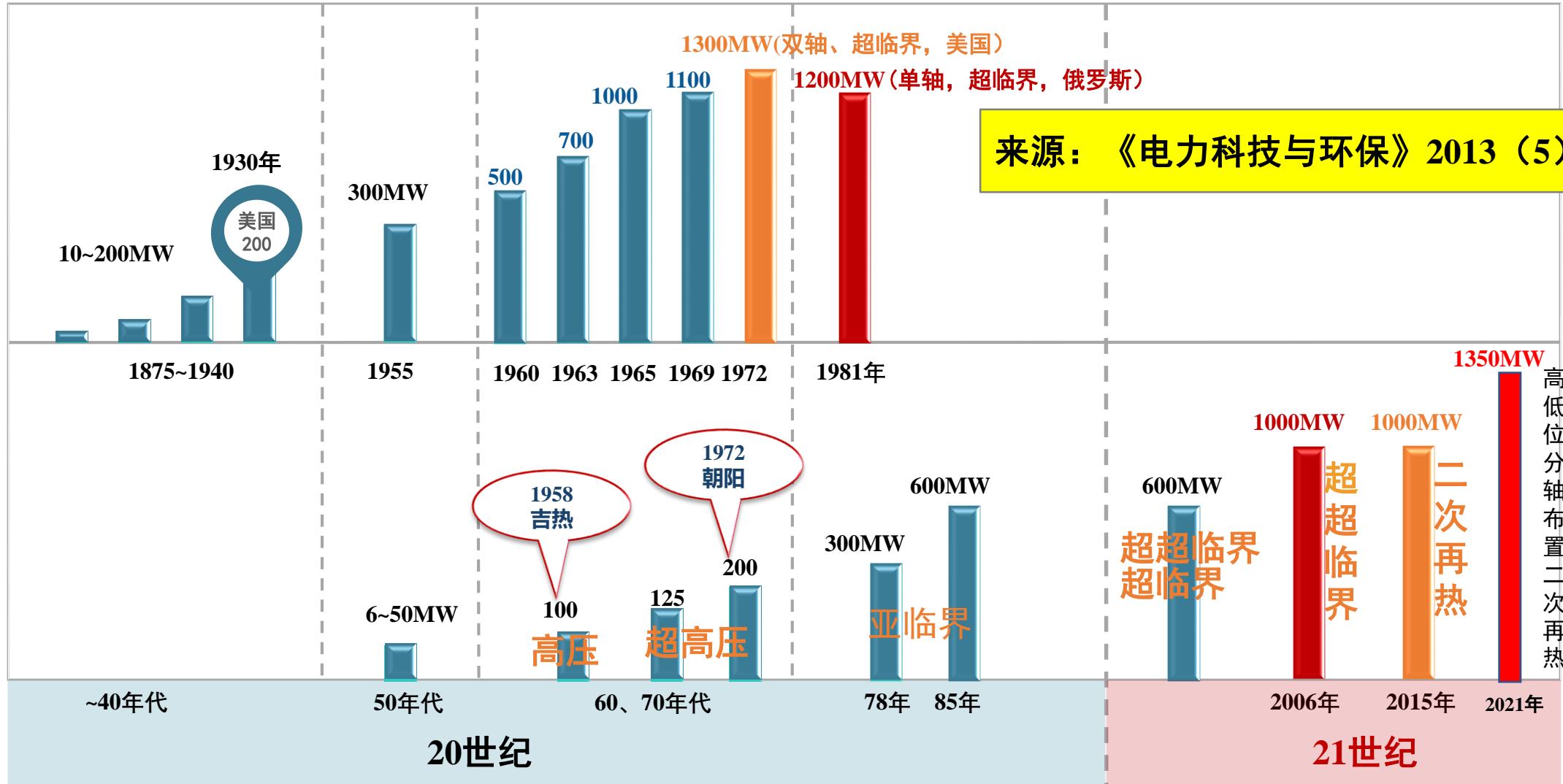
电力**低碳**发展

Low-carbon development of  
electric power

# 中国与国外单机容量对比(capacity)



国外



中国

20世纪中外在发电技术方面，差距20-50年左右，21世纪中国已超越

# 中国与国外蒸汽参数指标对比



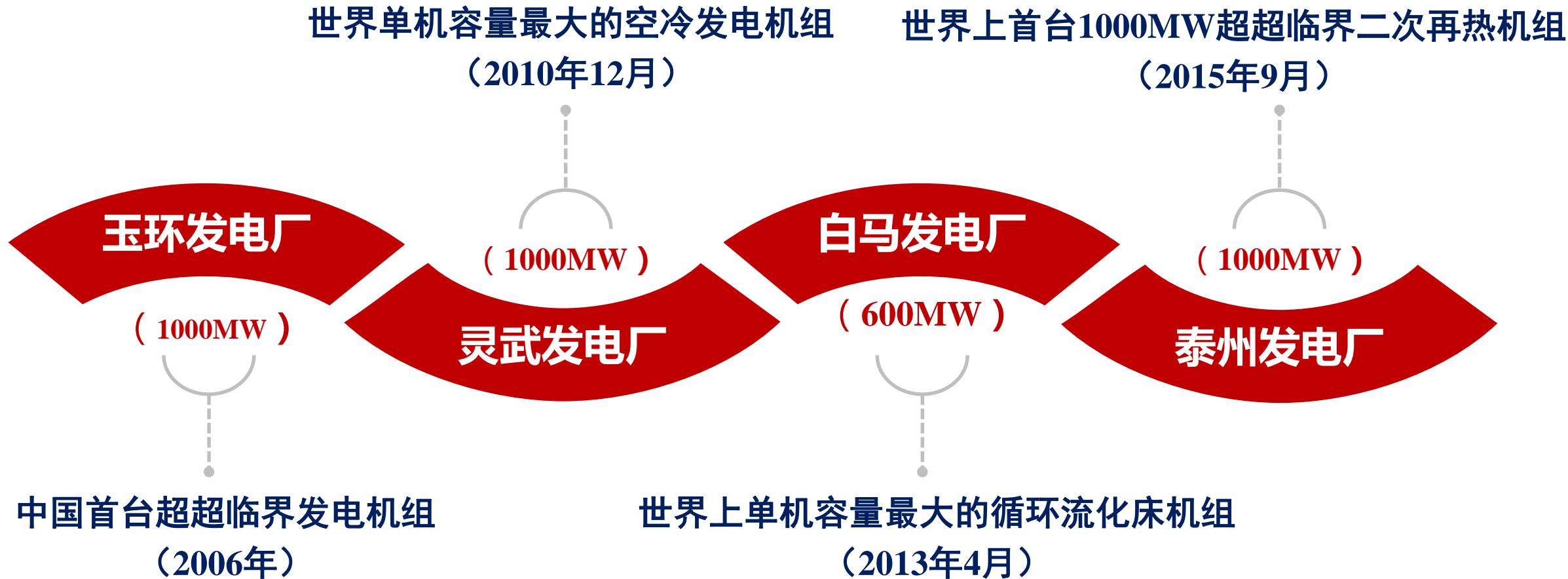
时间 (Time)	国外 (Foreign)	中国 (China)
20世纪初	低压 (1.28MPa/200~300°C)	
20世纪30年代	中压 (2.84MPa/400°C) 高压 (8.6MPa/490°C)	美国埃迪斯通 (Eddystone) 1#机组 325MW 因高温材料问题降低到 31MPa/610/560/560°C运行
20世纪40年代初	超高压 (13.7MPa/500°C) 欧美 亚临界 (15.9MPa/500°C) 欧美	
20世纪50年代	超临界 (24MPa/540~560°C) 美国 <b>超超临界 (<math>\geq 27\text{MPa}/\geq 580^\circ\text{C}</math>) 美国</b>	中压 (3.43MPa/435°C) 高压 (8.83MPa/535°C)
20世纪60年代 (1960年)	超超临界二次再热 (34.5MPa/650/566/566°C) 美国	超高压 (12.75MPa/535°C/535°C)
20世纪70年代	超临界机组	
20世纪80年代	超临界机组	亚临界 (16.6MPa/537°C/537°C)
20世纪90年代	超超临界机组快速发展	超临界 (24.2MPa/566°C/566°C)
21世纪	<b>水的临界点: 压力 22.12MPa、温度374.15°C</b>	超超临界 (25MPa~27MPa/600°C/600°C) ✓ 26.25MPa/600°C/600°C (2006年,玉环发电厂,1000MW) ✓ 27MPa/600°C/600°C (2008年,外高桥三期,1000MW)
		超超临界二次再热 ✓ 28MPa/600/620°C (2014年安徽集田电厂, 660MW) ✓ 31MPa/600/610/610°C (2015年江苏泰州电厂,1000MW)

# 2000年1-2月欧洲煤电技术的考察



AVEDØRE POWER STATION





2021年12月世界单机容量最大135万kW、供电煤耗最低251的安徽平山电厂投运

# 申能安徽平山电厂煤耗测试结果results



国内试验单位			国外试验单位		
负荷率	供电煤耗率	供电效率	负荷率	供电煤耗率	供电效率
/	g/kWh	/	/	g/kWh	/
100%	249.31	49.27%	100%	248.78	49.37%
75%	252.76	48.60%	75%	251.73	48.80%
65%	255.07	48.16%	65%	254.95	48.18%
50%	264.21	46.49%	50%	262.44	46.80%

供电效率 = $\frac{3600}{\text{供电煤耗率}(\text{kg/kWh}) \times \text{标煤热值}(\text{kJ/kg})}$
--

6 kPa  
8 kPa

高位机转速 2999 rpm  
低位机转速 3000 rpm

高位机功率 339.6 MW  
低位机功率 355.8 MW

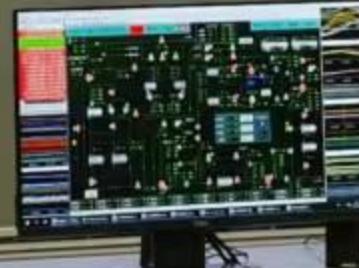
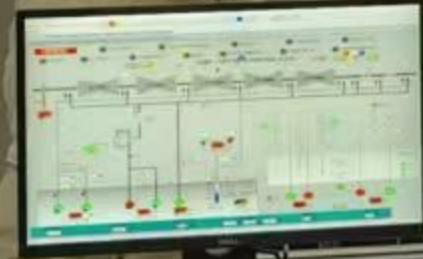
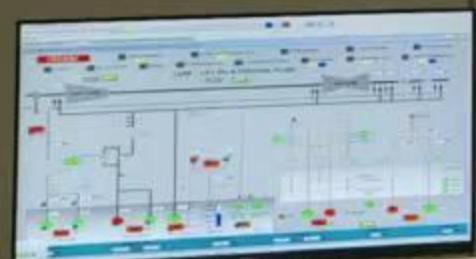
机组功率 695.5 MW  
电网频率 49.97 Hz

03/26/23  
08:38:53

主汽压力 18.60 MPa  
主汽温度 618.3 °C

一再压力 4.65 MPa  
一再温度 610.1 °C

二再压力 1.5 MPa  
二再温度 570 °C



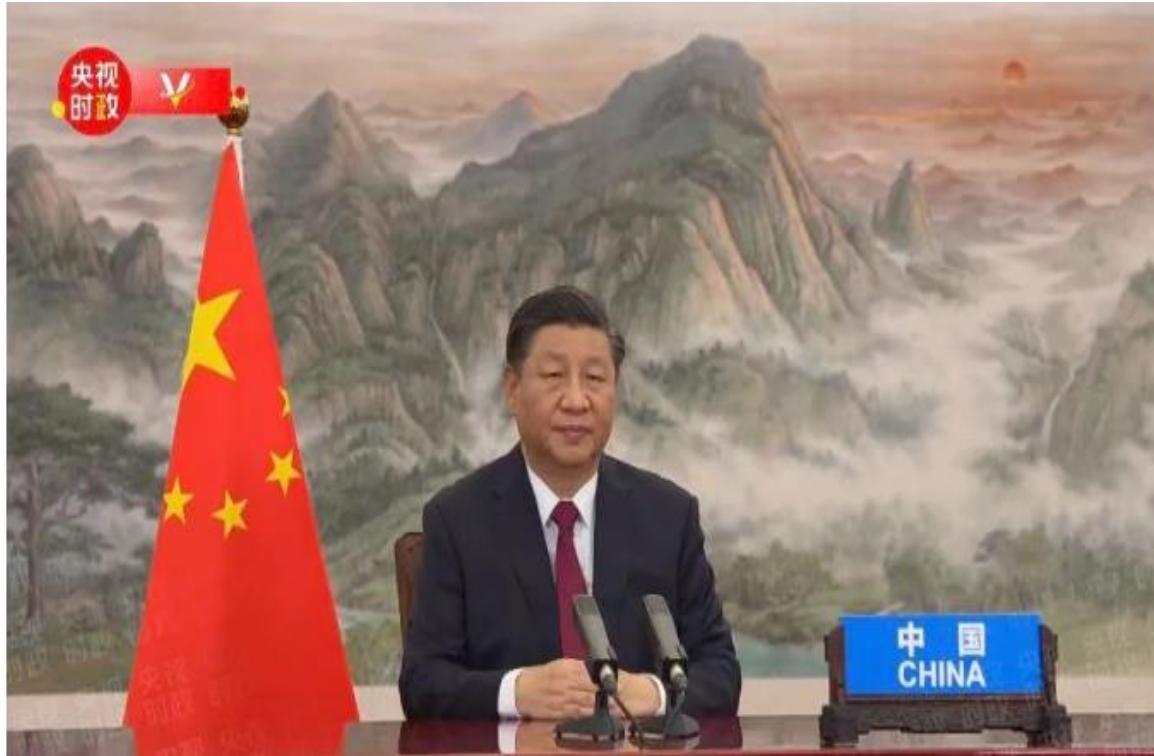
国家示范项目 “135万千瓦高低位分轴布置二次再热超超临界机组”  
院士专家参访团 申能安徽淮北发电基地 · 20230326



左起排二：秦超，王立群，姜铁骝，祁海鹰，武海，徐鸿，周怀春，冯丽萍

排一：冯义军，孙锐，张秀龙，朱法华，冯伟忠，武强，毛健雄，余贻鑫，薛禹胜，余永林，张岭

# 节能--落后机组的淘汰eliminate



Unity action to create a better future  
—Speech at the first phase of the  
16th G20 Summit

Over the past 10 years, **120 million kW** of backward installed capacity of coal-fired power has been **eliminated**.

过去10年淘汰1.2亿千瓦煤电落后装机

2021年10月30日，中华人民共和国主席习近平在二十国集团领导人第十六次峰会第一阶段会议上的讲话

# 煤电机组的节能途径Energy saving

- 提高蒸汽初参数
  - 700°C超超临界
- 二次再热
- 高低位布置
- 管道系统优化
- 外置蒸汽冷却器
- 低温省煤器
  - 锅炉排烟余热回收利用
- 锅炉本体受热面及风机改造
- 锅炉运行优化调整
- 空气预热器密封改造
- 加强管道和阀门保温
- 电厂照明节能方法

- 汽轮机通流部分改造
- 汽轮机间隙调整及汽封改造
- 汽机主汽滤网结构型式优化研究
- 汽轮机阀门管理优化
- 汽轮机冷端系统改进及运行优化
- 凝汽式汽轮机供热改造
- 热力及疏水系统改进
- 高压除氧器乏汽回收
- 凝结水泵变频改造
- 取较深海水作为电厂冷却水
- 电除尘器改造及运行优化
  - 电除尘器高频电源改造
- 脱硫、脱硝系统运行优化

# 中华人民共和国国家发展和改革委员会

## 感谢信

国家能源集团：

为积极推进电力体制改革，加快构建新型电力系统，提高我国电力供应保障能力，科学谋划电源建设，优化能源结构和煤炭清洁高效利用，根据委领导要求，我局组建了电力中长期交易、电力供需形势分析和保供能力建设专班，会同能源局组建了应急备用和调峰电源能力建设、煤电机组改造升级工作专班，开展集中工作。

贵公司积极响应，选派电力产业管理部冯卫强、刘雁宾，科学技术研究院有限公司王双童、马庆中、汪建平同志参加工作专班，对我局工作给予充分支持，为我局研判全国电力供需形势、组织电力中长期交易落地、推进应急备用和调峰电源能力建设等工作提供重要支撑，相关工作得到我委领导的多次批示和表扬。

为此，对贵公司的大力支持及相关同志的辛勤付出表示由衷感谢！新的一年，希望你们对我局工作继续给予大力支持，为我国电力行业高质量发展作出更大贡献，也祝愿贵公司各项工作取得更大成绩！

国家发展改革委经济运行调节局

2021年12月27日



□国家发改委组建了应急备用和调峰电源能力建设、煤电机组改造升级工作专班

□我院多位同志参加工作专班

□相关工作得到国家发改委领导的多次批示和表扬

# 《全国煤电机组改造升级实施方案》

(一) **开展汽轮机通流改造**。进一步提升煤电机组能效水平，重点针对服役时间较长、通流效率低、热耗高的60万千瓦及以下等级亚临界、超临界机组，推广采用汽轮机通流部分改造技术，因厂制宜开展综合性、系统性节能改造，改造后供电煤耗力争达到同类型机组先进水平。

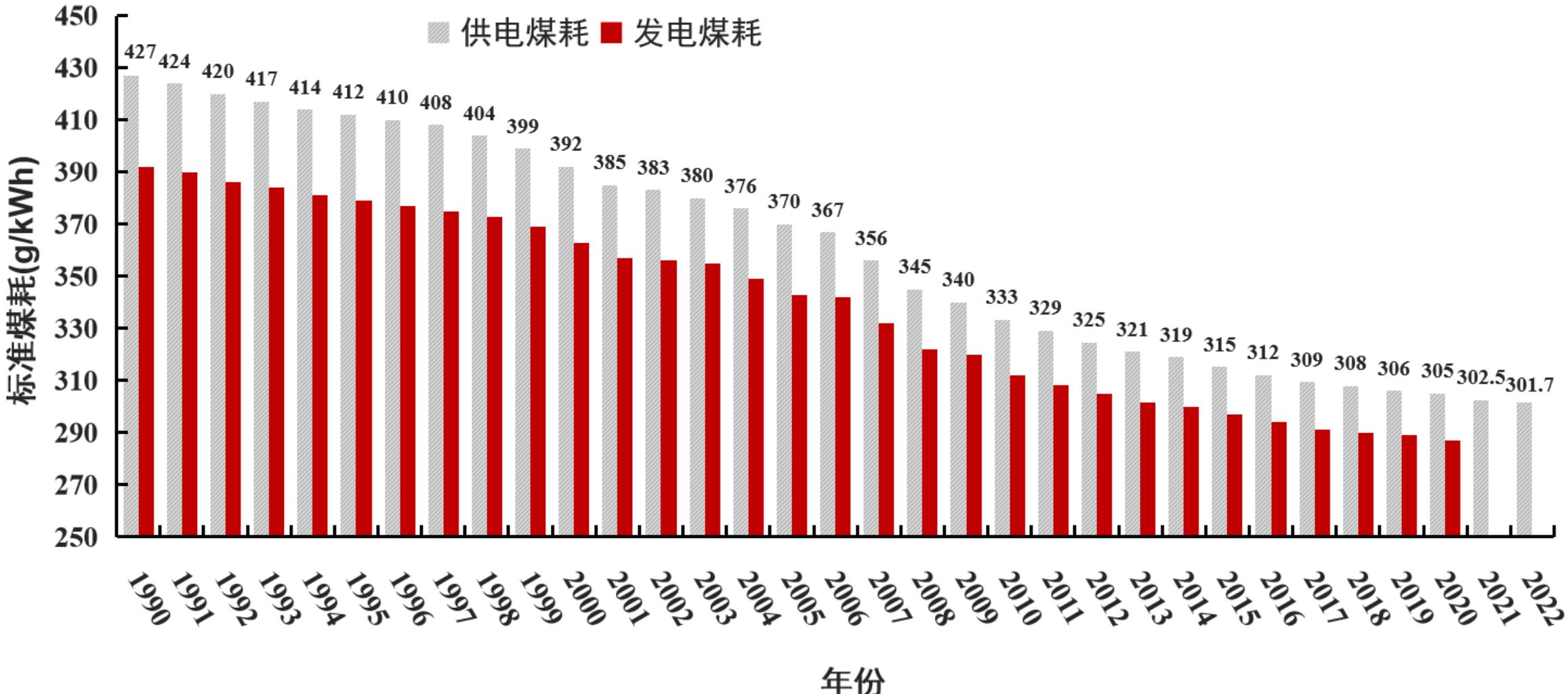
(二) **开展锅炉和汽轮机冷端余热深度利用改造**。大力推广煤电机组冷端优化和烟气余热深度利用技术。鼓励采取成熟适用的改造措施，提高机组运行真空，提升节能提效水平。鼓励现役机组应用烟气余热深度利用技术。

(三) **开展煤电机组能量梯级利用改造**。鼓励有条件的机组结合实际情况对锅炉尾部烟气余热利用系统与锅炉本体烟风系统、汽机热力系统等进行综合集成优化。

(四) **探索高温亚临界综合升级改造**。探索创新煤电机组节能改造技术，及时总结高温亚临界综合升级改造示范项目先进经验，适时向全国推广应用。梳理排查具备改造条件的亚临界煤电机组，统筹衔接上下游设备供应能力和电力电量供需平衡，科学制定改造实施方案，有序推进高温亚临界综合升级改造。

(五) **推动煤电机组清洁化利用**。新建燃煤发电机组应同步建设先进高效的脱硫、脱硝和除尘设施，确保满足最低技术出力以上全负荷范围达到超低排放要求。支持有条件的发电企业同步开展大气污染物协同脱除，减少三氧化硫、汞、砷等污染物排放。对于环保约束条件较严格的区域，鼓励新建机组实现适度优于超低排放限值的水平。

# 全国供电煤耗持续下降



# 中国化石能源储量



指标	2019年	2018年	2017年	2016年	2015年
煤炭查明资源储量(亿吨)	17182.6	17085.7	16666.7	15980.0	15663.1
石油查明资源储量(亿吨)	35.5	35.7	35.4	35.0	35.0
天然气查明资源储量(亿立方米)	59665.8	57936.0	55221.0	54365.5	51939.5
煤层气查明资源储量(亿立方米)	3040.7	3046.3	3025.4	3344.0	3062.5
页岩气查明资源储量(亿立方米)	3841.8	2160.2	1982.9	1224.1	1301.8
煤炭消费量 (亿吨)	40.19	39.74	39.14	38.88	
原油消费量 (亿吨)	6.73	6.30	5.94	5.71	
天然气消费量 (亿立方米)	3059.68	2817.09	2393.69	2078.06	

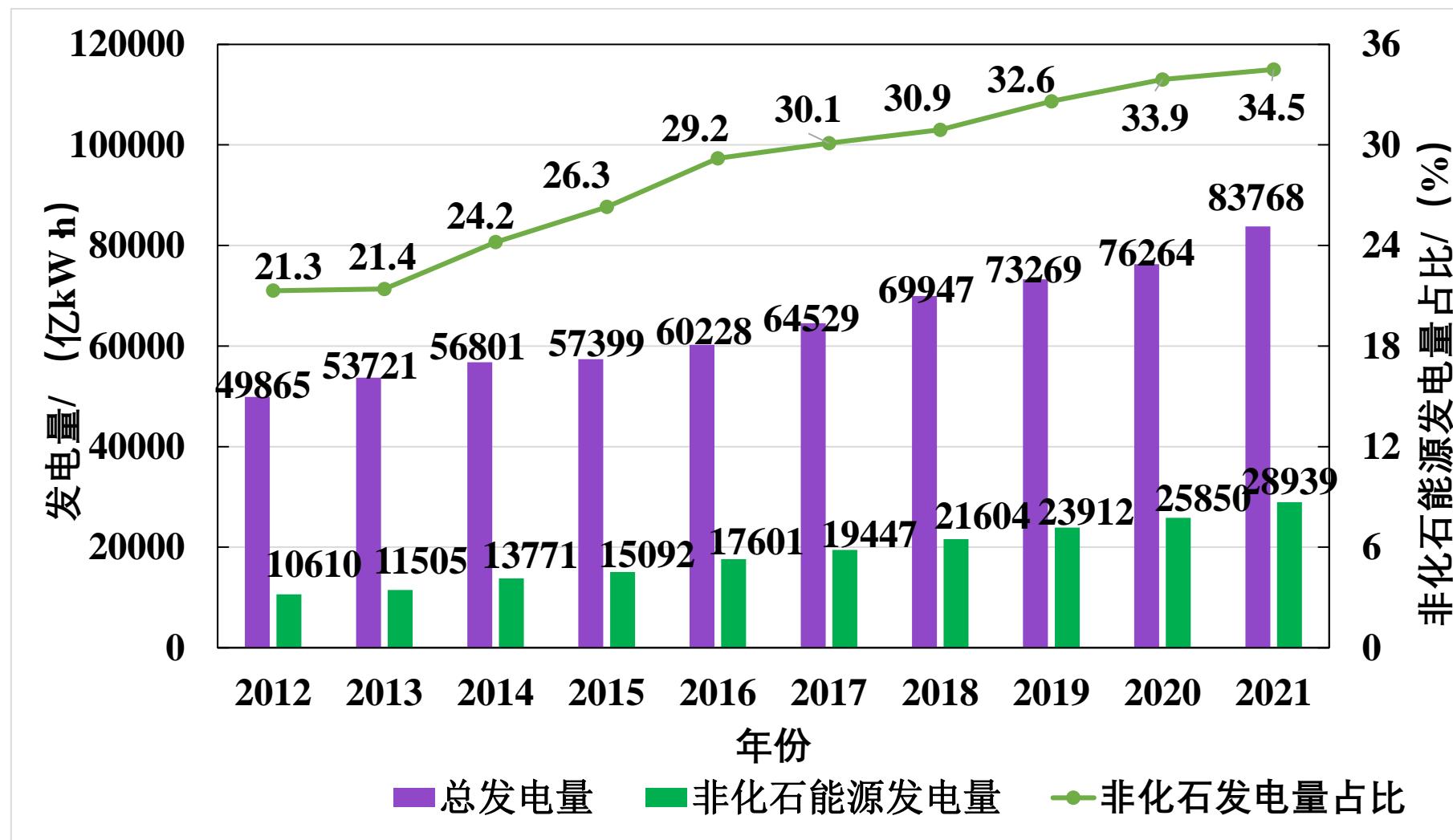
立足国情：富煤、贫油5、少气15

# 2012-2021年全国发电装机容量--非化石能源Non-fossil fuels

类型	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	增长
火电	81968	87009	93232	100050	106094	111009	114408	118957	124517	129678	58.2%
水电	24947	28044	30486	31953	33207	34411	35259	35804	37016	39092	56.7%
核电	1257	1466	2008	2717	3364	3582	4466	4874	4989	5326	323.7%
风电	6142	7652	9657	13075	14747	16400	18427	20915	28153	32848	434.8%
太阳能发电	341	1589	2486	4318	7631	13042	17433	20418	25343	30656	8890.0%
总容量	114655	125760	137869	152113	165043	178444	189993	200968	220018	237600	107.2%
非化石容量	32687	38751	44637	52063	58949	67435	75585	82011	95501	107922	230.2%
非化石占比(%)	28.5	30.8	32.4	34.2	35.7	37.8	39.8	40.8	43.4	45.4	16.9

风电并网容量连续12年位居世界第一，光伏并网容量连续7年位居世界第一

# 2012-2021年全国发电量--非化石能源Non-fossil fuels



非化石能源发电量占比从21.3%提高到34.5%，提高了13.2个百分点

# 2022年可再生能源情况 Renewable energy

- 新增风电3763万千瓦，太阳能发电 8741万千瓦，生物质发电334万千瓦，常规水电1507万千瓦，
- 新增可再生能源发电容量14345万千瓦，加抽水蓄能共1.52亿千瓦，**占全国新增发电容量的76.2%**
- 可再生能源发电总容量达到**12.13亿千瓦**，占比47.3%，较2021年提高2.5个百分点。
- 风电3.65亿千瓦，太阳能发电3.93亿千瓦，生物质发电0.41亿千瓦，常规水电3.68亿千瓦。抽水蓄能0.45亿千瓦

2022年中国可再生能源发电减排CO<sub>2</sub>约22.6亿吨，出口**风电光伏**产品减排CO<sub>2</sub>约5.73亿吨，合计占全球同期可再生能源减排总量的41%

# 中国与G7国家发电装机对比（2022年）

Comparisons



国家能源集团  
CHN ENERGY

发电技术 (Power generation technology)	中国 CHN	G7总和 The sum of G7	美国 US	日本 Japan	英国 Britain	德国 Germany	法国 France	意大利 Italy	加拿大 Canada	
化石能源 发电总计 Total fossil energy power generation	装机 Installed capacity	128947	115097	72445	18485	4504	8858	1739	5717	3349
	占比 Proportion	50.3%	49.3%	60.7%	51.6%	41.3%	35.0%	11.9%	46.9%	21.8%
非化石能 源发电总 计 Total non-fossil energy power generation	装机 Installed capacity	127458	118354	46825	17348	6693	16452	12874	6460	12002
	占比 Proportion	49.7%	50.7%	39.3%	48.4%	58.7%	65.0%	88.1%	53.1%	78.2%
可再生能 源发电总 计 Total renewable energy generation	装机 Installed capacity	120564	95557	37096	13934	5502	15373	6674	6383	10595
	占比 Proportion	47.0%	40.9%	31.1%	38.9%	50.5%	60.7%	45.7%	52.4%	69.0%
装机总计 Total power generation	256405	233450	119270	35833	10897	25310	14613	12177	15351	

来源：电信信息，2023年4月15日，国际可再生能源署

# 中国与G7国家发电装机对比（2022年）

Comparisons



发电技术 (Power generation technology)	中国 CHN	G7总和 The sum of G7	美国 US	日本 Japan	英国	德国 Germany	法国 France	意大利 Italy	加拿大 Canada
煤电(Coal power)	112305	26692	19917	5715	536	0	0	0	525
油电 (Oil power)	181	6142	2698	2711	132	0	0	0	600
气电 (Gas power)	12268	63410	49830	7878	3478	0	0	0	2224
其他化石能源 (The other fossil energy)	4193	18853	0	2182	358	8858	1738	5717	0
核电 (Nuclear power)	5553	21959	9477	3308	819	811	6140	0	1403

中国太阳能发电、风电、水电、垃圾发电装机容量远超G7总和

Installed capacities of solar power, wind power, hydropower and garbage power in China are great larger than the sum of the G7

来源：电信息，2023年4月15日，国际可再生能源署

## PART 03



高质量发展展望

Prospects for H-quality  
development

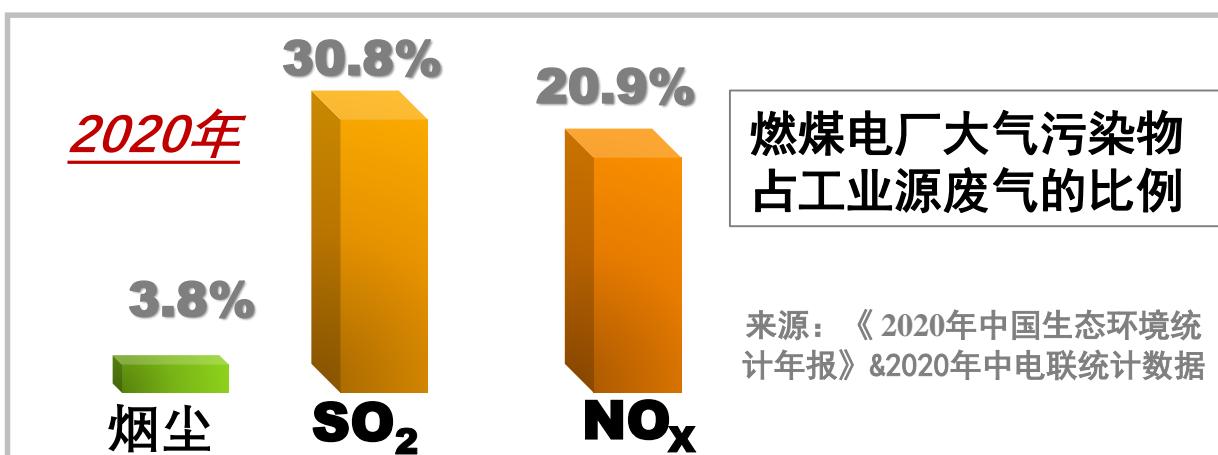
污染物	取值时间	2005 AQG	2021 AQG	NOTE
PM <sub>2.5</sub> , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	10	5	
	24-hour <sup>a</sup>	25	15	
PM <sub>10</sub> , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	20	15	
	24-hour <sup>a</sup>	50	45	
O <sub>3</sub> , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Peak season <sup>b</sup>	–	60	<b>NEW</b>
	8-hour <sup>a</sup>	100	100	
NO <sub>2</sub> , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	40	10	
	24-hour <sup>a</sup>	–	25	<b>NEW</b>
SO <sub>2</sub> , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24-hour <sup>a</sup>	20	40	
CO, $\text{mg}/\text{m}^3$	24-hour <sup>a</sup>	–	4	<b>NEW</b>

35到25下降29% ; 35到15下降57% ; 35到10下降71% ; 35到5下降86%

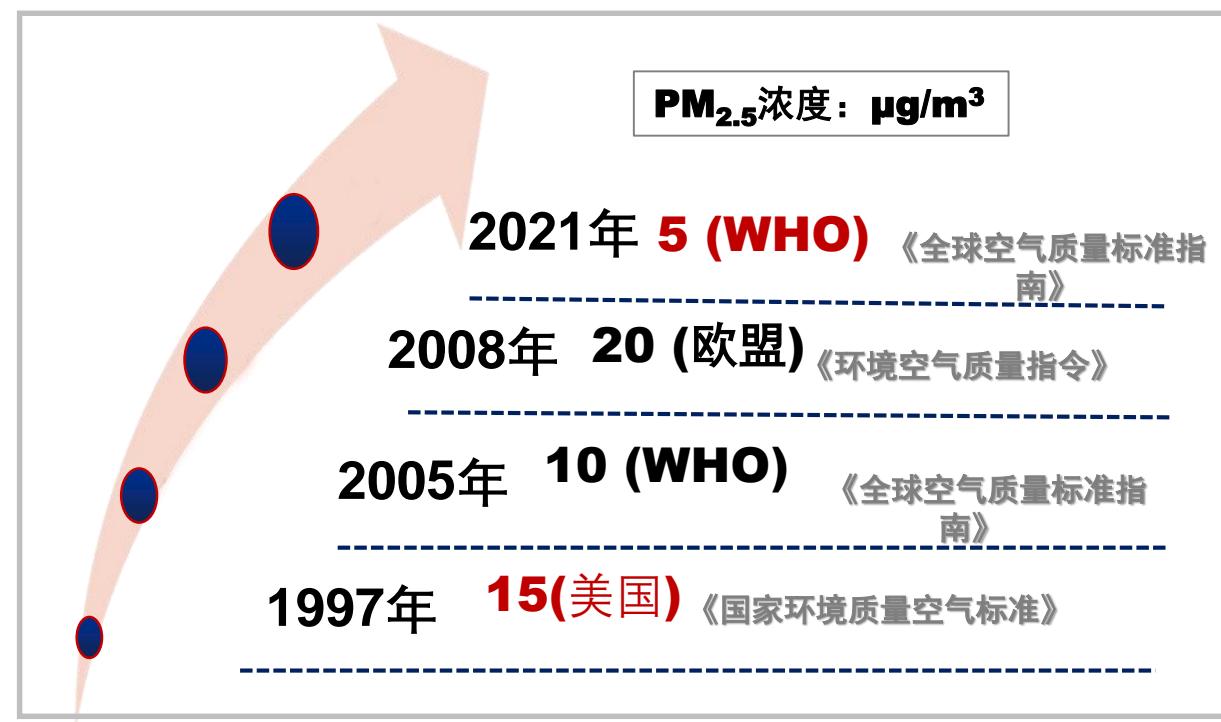
## ◆ 中国环境空气PM<sub>2.5</sub>标准



## ◆ 燃煤电厂污染物排放占比



## ◆ 国外环境空气PM<sub>2.5</sub>标准



假定2035年中国15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,中美相差38年

# 全球部分国家PM2.5年均浓度

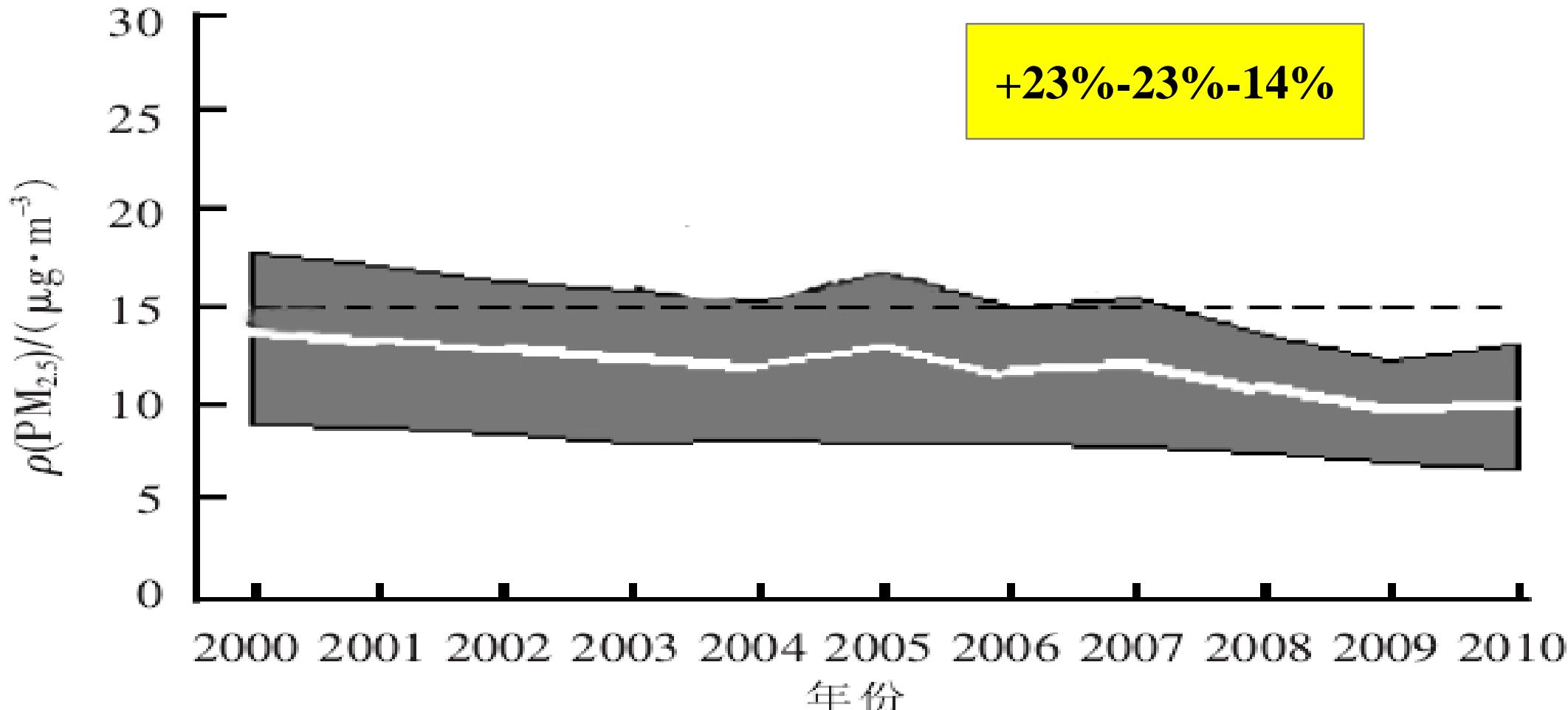


国家	2019年	2018年	2017年	2016年	2015年
美国	7	8	8	8	8
日本	11	11	12	13	13
英国	10	10	10	10	11
德国	11	12	12	12	13
法国	10	11	11	11	12
意大利	14	16	16	16	17
加拿大	6	7	7	6	7
俄罗斯	9	9	8	9	9
澳大利 亚	9	7	7	7	7
巴西	11	11	15	12	12
中国	38	41	47	48	52

# 美国污染物减排与PM<sub>2.5</sub>的关系 reduce

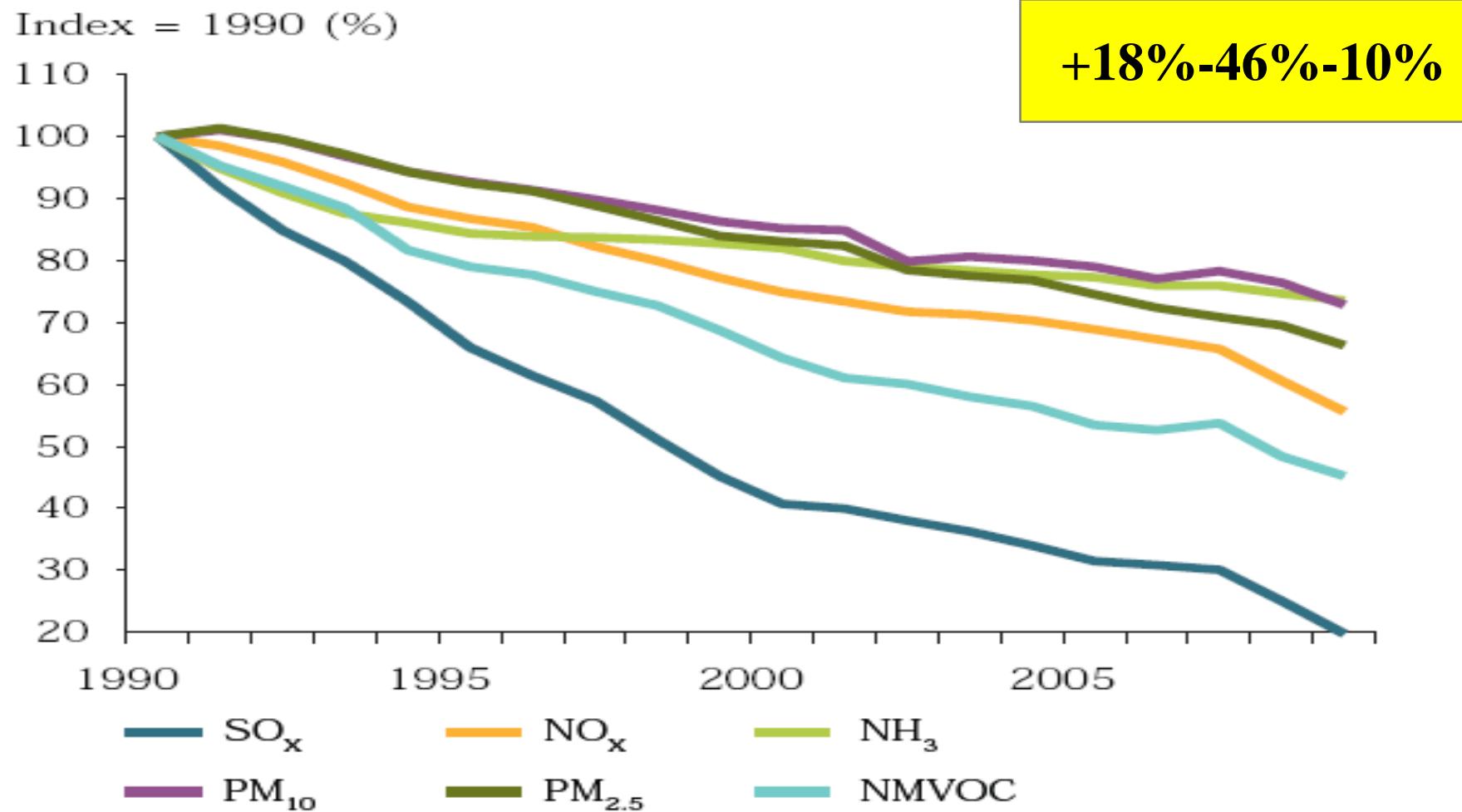


美国2010年的排放与2000年相比, PM<sub>10</sub>削减了50%, SOx削减了50%, NOx削减了41%, VOC削减了35%, 最终导致PM<sub>2.5</sub>年均地面浓度削减了**27%**。



# 欧经区污染物减排与PM<sub>2.5</sub>的关系

在欧洲经济区 (EEA) 的32个地区内, 2009年的排放与1990年相比, PM<sub>10</sub>排放削减了16%, PM2.5排放削减21%, SOx削减了80%, NOx削减了44%, VOC削减了55%, NH<sub>3</sub>削减了26%, 最终导致环境空气PM<sub>2.5</sub>削减了34%, PM10削减了27%



# 2035年煤电大气污染物的减排需求



57+ (10-30<sup>+</sup>)

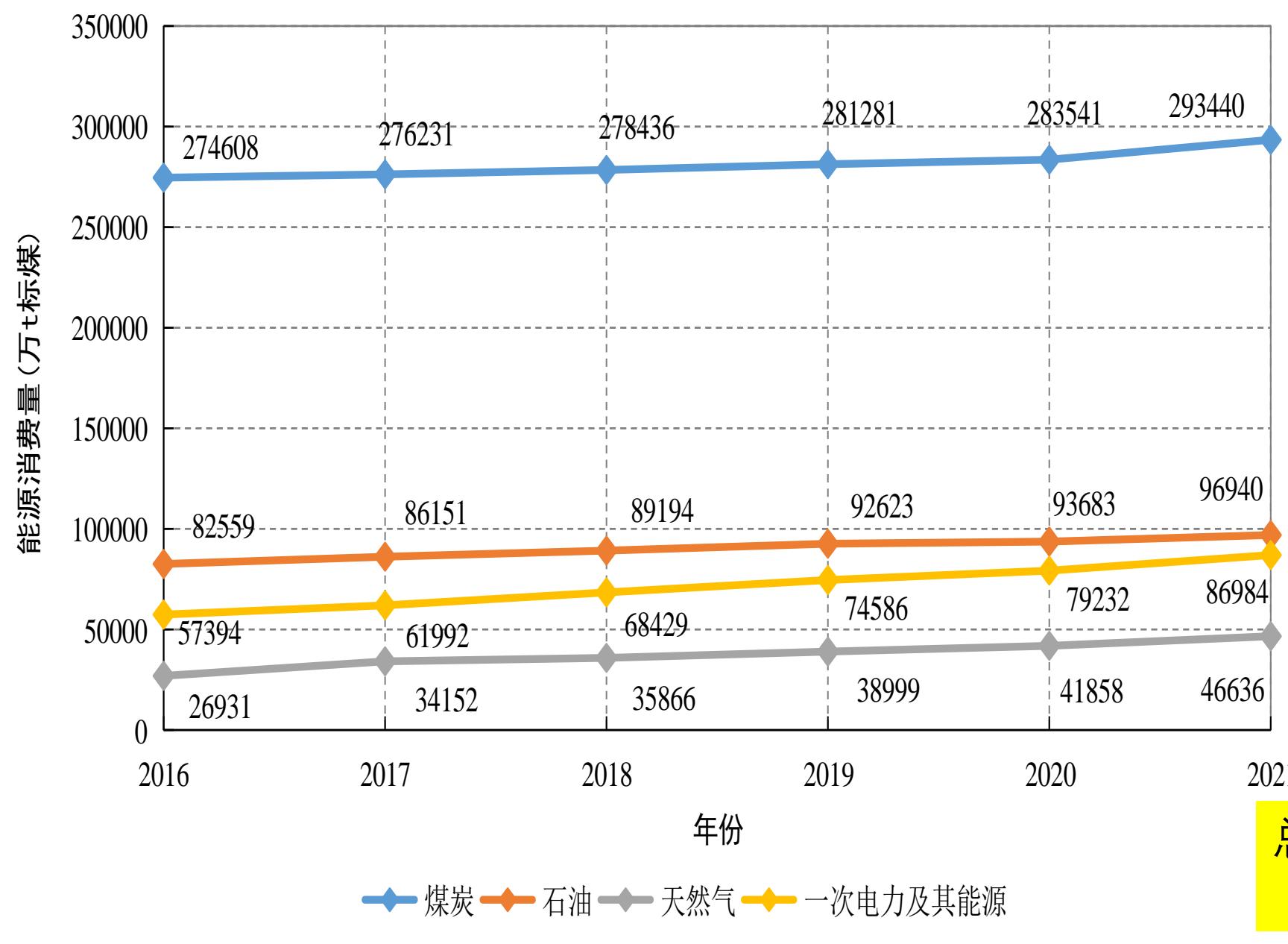
71 + (10-30)

超净排放  
super-clean

# 中国能源消费情况



国家能源集团  
CHN ENERGY



煤炭增长  
18832

石油增长  
14381

非化石能源  
增长29590

天然气增长  
19705

总量52.4亿吨，  
煤炭占56%

加快淘汰落后产能，规范燃煤自备电厂运行。淘汰3000万千瓦煤电机组

表6 超低排放煤电机组容量占比与单位发电量污染物排放强度

项目	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2025年预测	2030年预测
容量占比/%	49	71	80	86	88	95	100
烟尘排放量/[g/(kW·h)]	0.08	0.06	0.04	0.038	0.032	0.015	0.009
二氧化硫排放量/[g/(kW·h)]	0.39	0.26	0.20	0.187	0.160	0.092	0.075
氮氧化物排放量/[g/(kW·h)]	0.36	0.25	0.21	0.195	0.179	0.137	0.105

Emission intensity continues to decline

# 污染物排放展望 outlook of emissions

	2020年 排放量	2025年		2030年	
		排放量	下降	排放量	下降
烟尘	15.5	8.3	46%	4.7	70%
SO2	78.0	51.0	35%	39.0	50%
NOx	87.4	76.0	13%	54.6	38%

燃煤电厂大气污染物排放标准仍需进一步严格

## 《全国煤电机组改造升级实施方案》

- “十四五”实现煤电机组灵活制造规模1.5亿kW
- 2021年全国火电容量129678万kW
- 两者之和即2025年火电容量，144678万kW
- “十四五”新增容量 $5161+15000=20161$ 万kW
- “十五五”新增容量按“十五五”的30%预测，6048万kW
- 2030年火电容量 $144678+6048=150726$ 万kW

## 《“十四五”现代能源体系规划》

- “十四五”淘汰煤电3000万kW，预测新增生物质能发电装机容量3000万kW
- 2025年常规水电达到3.8亿kW
- 2025年核电运行容量7000万kW
- 2025年抽水蓄能装机容量6200万kW以上，在建6000万kW

# 2030年水电发展

- 到2020年，常规水电装机容量将达3.5亿kW，其中东部地区(京津冀、山东、上海、江苏、浙江、广东等)开发总规模达到3520万kW，约占全国的10%，水力资源基本开发完毕。中部地区(安徽、江西、湖南、湖北等)开发总规模达到6150万kW，开发程度达到90%以上。西部地区总规模为2.54亿kW，约占全国的72.5%，其开发程度达到54%，其中广西、重庆、贵州等省市开发基本完毕，四川、云南、青海、西藏还有较大开发潜力
- 到2030年，常规水电装机容量将达**4.3亿kW**，其中东部地区3550万kW，中部地区6800万kW，西部地区总规模为3. 26亿kW，其开发程度达到69%，**四川、云南、青海的水电开发基本结束**，西藏水电还有较大开发潜力

孙志禹等《清洁能源蓝皮书 国际清洁能源产业发展报告（2018）



# 2030年中国核电发展

◆ 中国核电发展中心、国网能源研究院发布《我国核电发展规划研究》

◆ 2030年核电发展规划规模达到1.31亿千瓦，发电量占比达到10.0%



# 2030年抽水蓄能发展

 中华人民共和国中央人民政府 [www.gov.cn](http://www.gov.cn) 简 | 繁 | EN | 注册

 国务院 总理 新闻 政策 互动 服务 数据 国情 国家政务服务

首页 > 新闻 > 政务联播 > 部门

## 《抽水蓄能中长期发展规划（2021-2035年）》印发实施

2021-09-09 21:28 来源： 能源局网站 【字体：大 中 小】 打印 分享 分享 +

## 《抽水蓄能中长期发展规划（2021-2035年）》

□ 2030年抽水蓄能投产规模将达到12200万kW

## 《“十四五”现代能源体系规划》

- 全面推进风电和太阳能发电大规模开发
- 加快推进以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点
- 积极推动工业园区、经济开发区等屋顶光伏开发利用
- 鼓励建设海上风电基地，推进海上漂浮风电、漂浮光伏
- ✓ 2021年新增风电4695万kW，均匀增长2025年51628万kW
- ✓ 2021年新增光伏5313万kW，均匀增长2025年51908万kW
- ✓ “十五五”新增容量按“十四五”的1.1倍考虑

# 2030年发电装机容量预测 (capacity prediction)

指标index	2020年	2025年	2030年	增长
发电装机容量	220018	302414	385607	75.3%
其中：火电thermol	124517	144678	150726	21.0%
水电hydro	33867	38000	43000	27.0%
核电nuclear	4989	7000	13100	162.6%
风电wind	28153	51628	77451	175.1%
太阳能发电solar	25343	51908	81130	220.1%
抽水蓄能pumped s.	3149	6200	12200	287.4%
新型储能new type s.		3000	8000	166.7%

2025年装机容量与《规划》吻合，2030年非化石装机占比60.9%

# 全国发电量展望 electricity generation

Index	2020	2025	2030
Total power generation( $10^8$ kW·h)	76264	91170	102811
Thermal power generation( $10^8$ kW·h)	51770	55474	51966
Hydropower generation( $10^8$ kW·h)	13553	13748	15557
Nuclear power generation( $10^8$ kW·h)	3662	5268	9859
Wind power generation( $10^8$ kW·h)	4665	10207	15312
solar power generation( $10^8$ kW·h)	2611	6473	10117
Non-fossil energy power generation( $10^8$ kW·h)	25850	35696	50845
Proportion of non-fossil energy power generation (%)	33.9	39.2	49.5

# 碳中和时代中国电力行业生产(不包括储能)与CO<sub>2</sub>排放

--- 《电力科技与环保》2021, 第3期

发电类型	装机容量 (亿kW)	年利用小时 (h)	发电量 (亿kW. h)	CO <sub>2</sub> 排放强度 (g/kW. h)	CO <sub>2</sub> 排放量 (亿t)
风电与太阳能	50	1500	75000	24	1.80
核电	2	7000	14000	12.8	0.18
水电	4.3	3600	15480	3.2	0.05
余热、余压、余气	0.5	3000	1500	0	0
生物质	1.2	3000	3600	0	0
气电	1	3000	3000	375.2	1.12
煤电	5.3	3000	15900	758.7	12.06
合计	64.3	-	128480	-	15.21

电力装机容量预计可达64.3亿kW, 非化石能源发电装机容量占比90.2%, 发电量占比85.3%。电力行业排放CO<sub>2</sub>将从超过47亿t下降至15.21亿t, 其中火电行业排放13.18亿t

非化石能源为主 + 储能

火电调节与后备



2023年10月22日中国工程院在合肥发布29个重大问题（科学、**工程9**、产业）

- 1 如何实现在原子、电子本征尺度上的微观动力学实时、实空间成像？
- 2 如何解决稀土基体中痕量杂质的高效分离难题，突破高纯稀土材料工程化制备技术及装备？
- 3 **适用于新型电力系统的长周期储能方式是什么？**

# 媒体报道的朱法华部分观点



2022-01-18	科技日报	科技力量推动新能源一路高歌猛进
2022-03-09	中国电力报	<b>“双碳”目标下的煤电：怎么立？怎么破？</b>
2022-03-29	中国电力报	清洁低碳转型路径更加明确
2022-04-18	中国能源报	<b>煤电“三改”联动需求迫切</b>
2022-04-29	中国能源报	钱来啦！煤电三改缺钱的企业点进来
2022-05-13	中国环境报	<b>减污降碳≠煤电消亡：更灵活、更节能才是出路</b>
2022-05-20	中国电力报	五问煤电三改联动
2022-06-06	中国能源报	<b>国内首个省级双碳平台项目来了</b>
2022-11-07	中国环境报	碳中和时还有煤电吗？
2023-01-31	中国电业与能源	<b>煤电在碳中和目标实现中的机遇与挑战</b>
2023-04-17	河南科协	院士专家把脉建言“碳路”中原绿色发展
2023-10-19	石家庄广播电视台	<b>俄罗斯自科院外籍院士朱法华参会并提出建议</b>

**清洁发展：**进入21世纪，中国火电发电量增长4.3倍，但各种大气污染物却比峰值下降了93.1%-97.3%，单位发电量污染物排放全球领先。

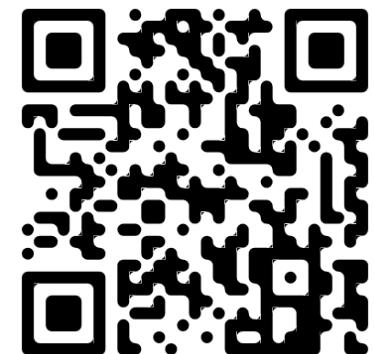
**低碳发电：**2022年中国发电装机容量超过G7国家的总和，建成了世界上单机容量最大、供电煤耗最低的燃煤发电机组。可再生能源发电容量超过G7国家的总和，风电、光伏累计发电容量及新投产容量连续多年世界第一。

**发展展望：**燃煤电厂大气污染物排放要求仍面临加严的压力；碳中和时中国人均用电量约1万千瓦时，非化石能源装机占比将超过90%，在长期储能技术取得重大突破以前，煤电需要为新能源发展“开路”。



# Thank you

- (1) 中国燃煤电厂大气污染物治理历程与展望[J].电力科技与环保, 2023, 39(5):371-384.
- (2) 煤电在碳中和目标实现中的机遇与挑战[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(2): 79-86.
- (3) 中国电力行业碳达峰碳中和的发展路径研究[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(3): 9-16.
- (4) 电力行业减污降碳发展状况及目标展望[J]. 环境保护, 2022, 50(10): 15-20.



[zhufahua@vip.sina.com](mailto:zhufahua@vip.sina.com)

2023.11