



INTERNATIONAL PITTSBURGH

COAL CONFERENCE

University of Pittsburgh · Swanson School of Engineering



国家能源集团
CHN ENERGY

煤炭绿色发展的创新与实践

李全生

国家能源集团

“煤炭开采水资源保护与利用” 国家重点实验室

2018.10



汇报内容

- 一、中国能源现状与能源革命**
- 二、中国煤炭革命战略与路径**
- 三、煤炭绿色发展的创新实践**

中国能源发展趋向多元化

- 我国以化石能源为主的能源结构有效支撑了国民经济社会的持续快速发展，各种能源发展速度快、规模大

煤炭



生产消费约占世界一半，安全高效开发，高效清洁利用和转化技术达到世界先进水平

石油



产量2.1亿t，居世界第五，主要原油生产基地实现持续稳产，石油储备基地规模1640万m³

天然气



天然气产量1329亿方，煤层气年抽采量77亿m³，页岩气形成年产50亿m³的开发规模

风电、太阳能



风电和太阳能发电并网装机达到1.2亿kW，装机规模世界第一

核电



具备百万千瓦压水堆核电站自主设计、制造、建设和运营能力

输配基础设施



电网规模世界第一，技术水平国际先进，输气管道建设日趋完善

中国能源以煤炭为主的能源结构

■ 能源发展形势严峻

□ 能源与环境的矛盾

- 煤炭产能目前严重过剩
- 粗放式开发，生态修复率低

□ 利用效率和能源安全

- 单位GDP能耗是世界平均1.5倍
- 石油对外依存度已达67.4%

□ 新能源开发利用水平

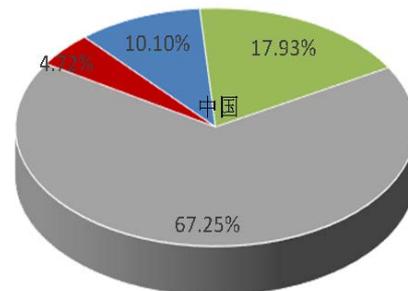
- 弃风、弃水、弃光问题突出
- 2017年弃风弃光弃水达1007亿千瓦时

■ 一次能源消费仍以煤炭为主

- 能源消费结构中，煤炭占绝对优势，低碳能源核电的比重在2000年之后才有所增加，水电、风电、光电等可再生能源的比重也不太高
- 到2030年、2050年，煤炭仍将是中国重要基础能源



世界其他国家



中国

■ 非化石能源 ■ 煤炭 ■ 天然气 ■ 石油

中国能源面临的挑战——生态损伤

化石能源为主体能源结构的环境负外部性

2017年化石能源占一次能源消费比例约86.2%，粗放式开发和未优质化利用的环境负外部性突出

● 大规模开发影响生态环境

- 煤炭开发地表塌陷——每年造成土地占压和沉陷超过4万公顷
- 石油开采导致地下土壤与岩石层松动，导致风蚀、土地沙化



中国能源面临的挑战——地下水破坏

■ 能源开采还对地下水系统造成破坏

- 每年因采煤破坏地下水资源80亿吨
- 油气资源的开采也对深部水资源带来较大威胁
- 页岩气开发不仅耗水巨大，且回流的压裂液严重污染地下水



中国能源面临的挑战—大气环境污染

■ 化石能源未优质化利用带来的大气污染问题突出

- 电煤仅占煤炭消费的52%，重金属排放问题亟待解决
- 燃煤工业燃煤锅炉和窑炉超过40万台，年用煤量约5亿吨
- 民用散烧煤总量约2亿吨，吨煤排放强度达电厂的10倍左右
- 机动车保有量大，城市拥堵带来的机动车尾气排放也是城市大气污染的重要原因



中国能源面临的挑战——温室气体排放

■ 温室气体减排面临巨大压力

- 我国碳排放量约占全球总量的**30%**，连续多年成为第一大碳排放国
- 2030年左右碳排放达峰并争取尽早达峰
- 工程院正在开展“**碳约束条件下我国能源结构优化研究**”重大战略咨询项目研究



2016年11月4日，《巴黎协定》正式生效



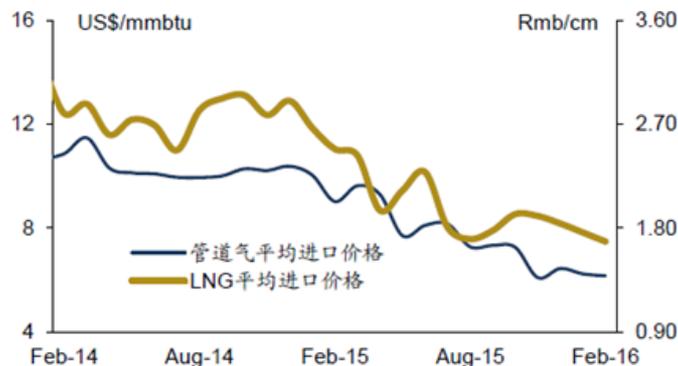
9月3日，习近平主席和奥巴马总统先后向联合国秘书长潘基文交存中国和美国气候变化《巴黎协定》批准文书



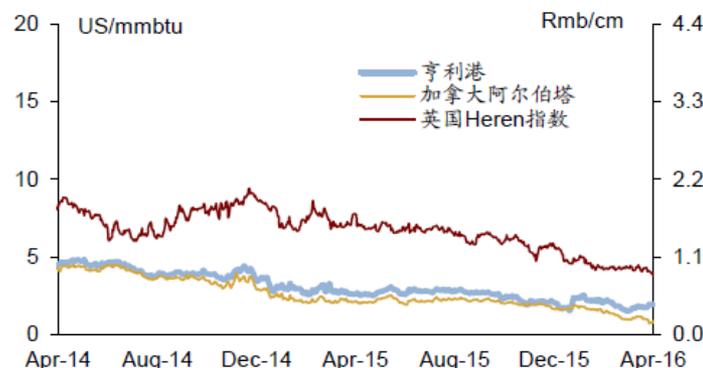
中国能源面临的挑战——能源安全形势严峻

■ 油气对外依存度高

- 2017年，石油对外依存度67.4%，天然气对外依存度39%
- 如果要我国天然气比例由目前的**5.8%**提高到世界平均水平的**23.8%**，每年需进口**6578亿方**的天然气
- 所需进口天然气量相对于目前国际天然气贸易总量的65%，**届时对外依存度将高达83%**
- 目前国内进口天然气价格远高于国际天然气价格（约为2倍左右）



不同进口渠道下的天然气价格（2014-2016）



国际天然气价格走势（2014-2016）

中国能源发展政策导向

- 习近平总书记在中央财经领导小组第六次会议上，提出推动中国“能源革命”，包括“四个革命”、“一个合作”

四个
革命

① 推动能源消费革命

② 推动能源供给革命

③ 推动能源技术革命

④ 推动能源体制革命

一个合
作

全方位
加强国
际合作



- 能源供给革命的主要目标就是提供**清洁、低碳、廉价、便捷**的能源，并保障国家**能源安全**

中国能源发展政策导向

■ 在“能源革命”要求下，我国能源的具体发展方向包括：



减
量
化

抑制不合理能源消费，控制能源消费总量



多
元
化

逐步改变煤炭在能源结构中占比过大的局面，大力发展非煤能源，形成多轮驱动的能量供应体系



清
洁
化

推动高碳能源低碳化、低碳能源无碳化以及能源开发利用过程的高效清洁无害化



创
新
化

粗放式的能源开发利用方式已经走到尽头，必须走以科技创新为动力的可持续发展之路

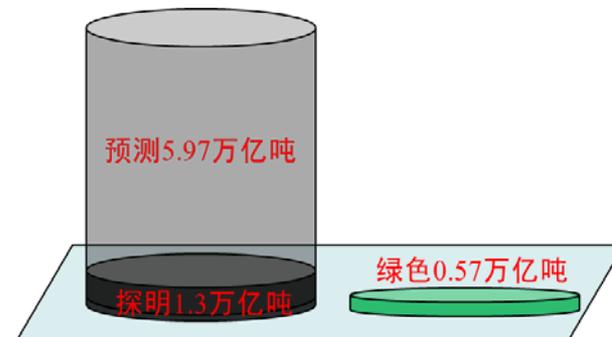
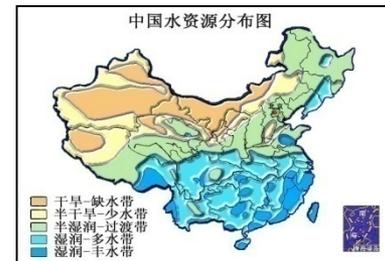
汇报内容

- 一、中国能源现状与能源革命
- 二、中国煤炭革命战略与路径
- 三、煤炭绿色发展的创新实践

煤炭开发的现状与问题

■ 我国煤炭资源分布不均，绿色煤炭资源量有限

- 我国煤炭资源地理分布极不平衡，北多南少，西多东少，山西、陕西、内蒙等地集中了我国60%的煤炭资源
- 我国煤炭资源与水资源呈逆向分布，富煤区域生态环境脆弱
- 我国预测煤炭资源量约5.97万亿吨，探明煤炭储量1.3万亿吨，其中绿色煤炭资源量只有5743亿吨



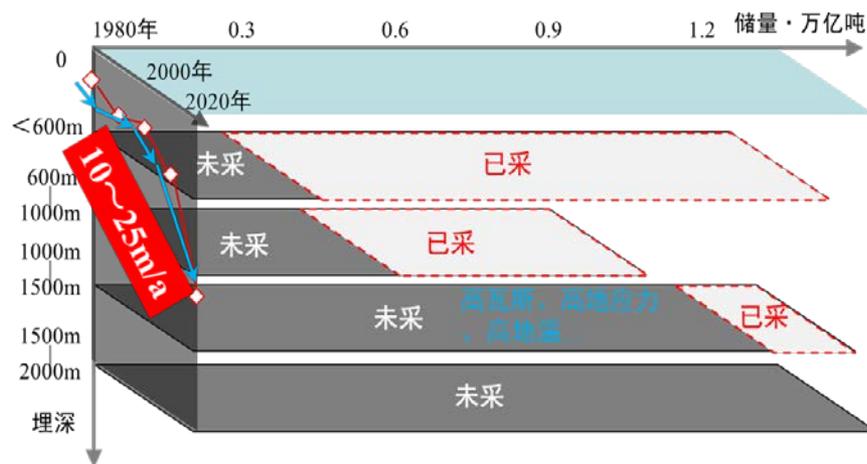
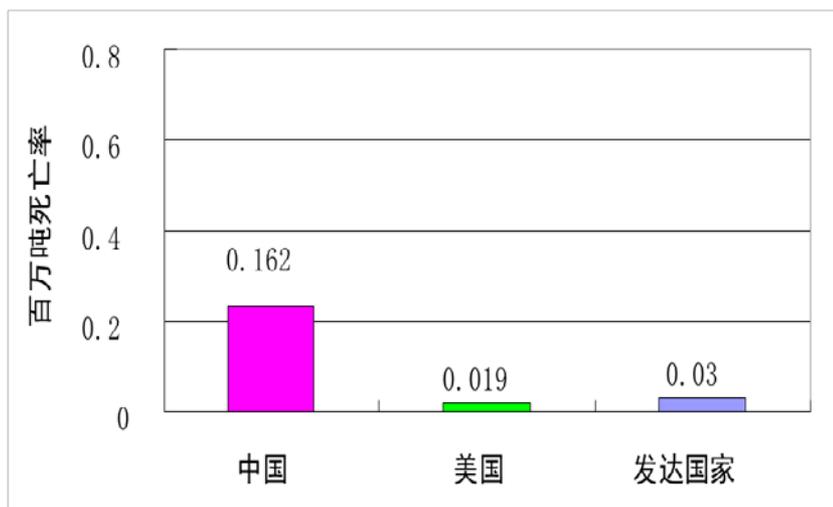
我国煤炭资源概况
(据中国工程院重点咨询项目研究报告)

粗放的资源开发造成煤炭资源的破坏和巨大浪费，按国家能源需求和煤炭资源回收现状，绿色煤炭资源量不足

煤炭开发的现状与问题

■ 随着浅部资源不断枯竭，深部开采面临安全威胁巨大

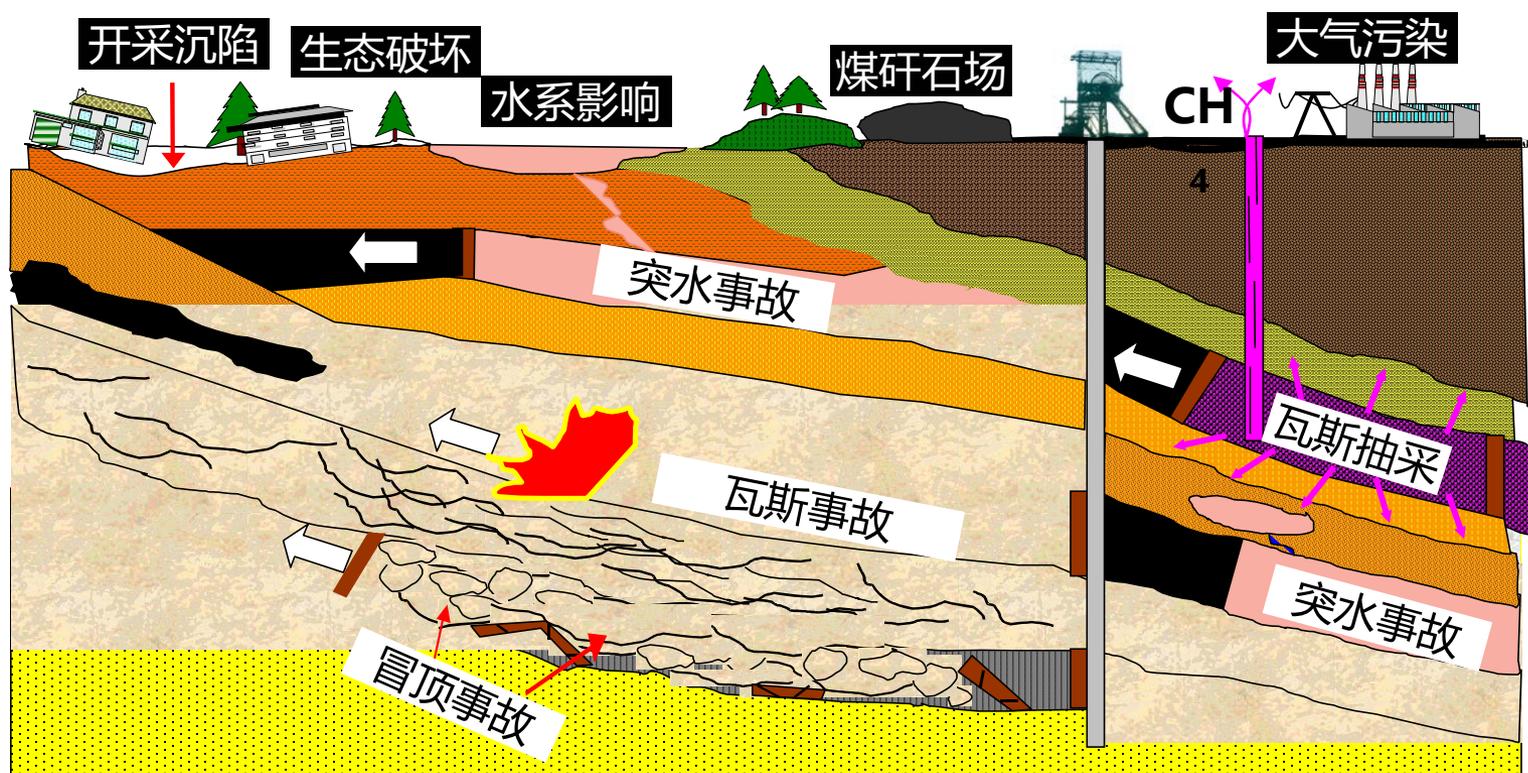
- 我国煤炭资源禀赋复杂，煤与瓦斯突出、冲击地压、矿井水害等灾害时有发生，百万吨死亡率远高于世界先进水平
- 已探明煤炭资源中，埋深在1000m以下资源量占53%，深部开采各种灾害相互耦合，成灾机理复杂，防治愈加困难



煤炭开发的现状与问题

■ 传统煤炭资源开发问题日益突出

传统煤炭资源开发基本采取“先污染后治理、先低端后高端、先粗放后集约”模式，虽然能够较快推动经济的发展，但由此引发的安全生产、环境破坏及遗留的危害问题日益突出



煤炭革命的理念与目标

- **能源革命不是要革煤炭的命，而是煤炭自身要革命**
 - 未来较长一段时间内煤炭在世界能源结构中依然占有重要比例
 - 新能源支撑能源需求依然需要很长的成长期，发展过程中需要煤炭等化石能源的支撑
 - 煤炭生产消费可以实现绿色清洁低碳，完全可以成为清洁能源
 - 煤炭长期来看是经济、可靠的能源

煤炭革命的理念与目标

- 作为主体能源，煤炭必须自身进行革命：

革煤炭“落后产能”的命

革煤炭“污染排放”的命

- 全面实现近零生态损害的绿色开采，近零排放的清洁低碳利用
- 构建清洁低碳、安全高效的能源体系，支撑国民经济高质量发展



煤炭革命的理念与目标

■ 理念革命是煤炭革命首要问题：煤炭革命五大理念

(1) 高端发展理念

国际对标

(2) 近零生态损害的绿色开采理念

生态要求

(3) 高标准的科学产能理念

安全高效要求

(4) 近零排放及高效低碳利用理念

环境要求

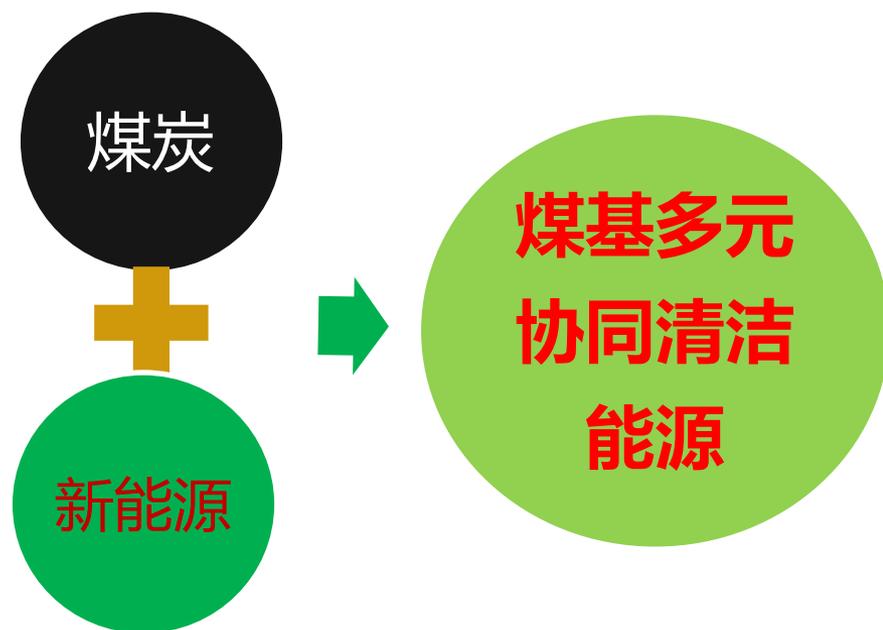
(5) 扩展、多元转型发展理念

供给侧改革要求

煤炭革命的理念与目标

■ 煤炭革命的目标

煤炭革命就是要走绿色安全智能开发的科学产能发展之路，清洁高效低碳的科学转化利用之路，并与新能源密切结合，使煤炭真正成为多元、开放、协同、一体化的清洁能源



煤炭：开发是绿色的、利用是清洁的，煤炭是清洁能源

煤矿：成为集光、风、电、热、气多元协同的清洁能源基地

煤炭行业：成为社会尊重、人才向往的高新技术行业

煤炭革命的战略蓝图及路线图

■ 煤炭革命的战略蓝图：实现中国梦的煤炭篇章(三阶段)

✓ 2020年前：煤炭3.0

建成超低生态损害与超低排放的机械化、信息化煤炭开发利用体系，进入井下少人、接近天然气排放水平的煤炭工业3.0阶段

✓ 2020—2035年：煤炭4.0

建成近零生态损害与近零排放的智能化、多元煤炭开发利用体系，进入井下无人、接近清洁能源排放水平的煤炭工业4.0阶段

✓ 2035—2050年：煤炭5.0

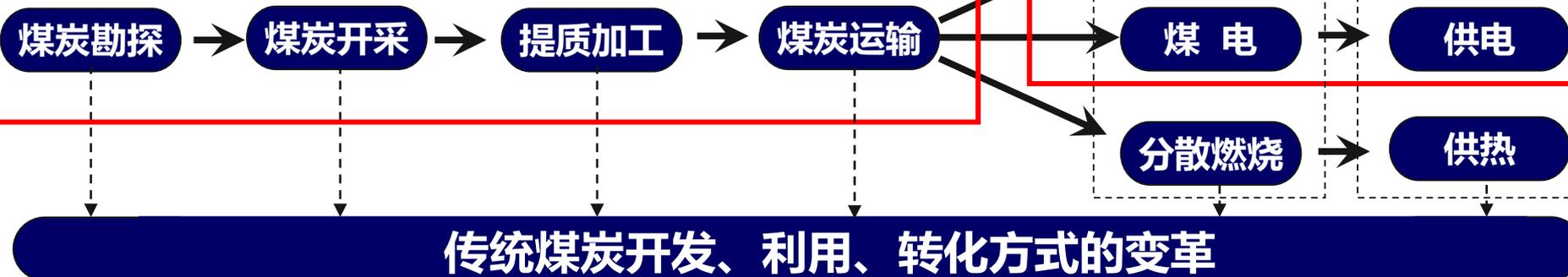
建成煤基多元、开放、协同、绿色开发利用的清洁能源基地，进入井下无人、地上无煤、纯清洁能源的煤炭工业5.0阶段

汇报内容

- 一、中国能源现状与能源革命**
- 二、中国煤炭革命战略与路径**
- 三、煤炭绿色发展的创新实践**

煤炭开发利用转化全产业链的革命

煤炭全生命周期产业链

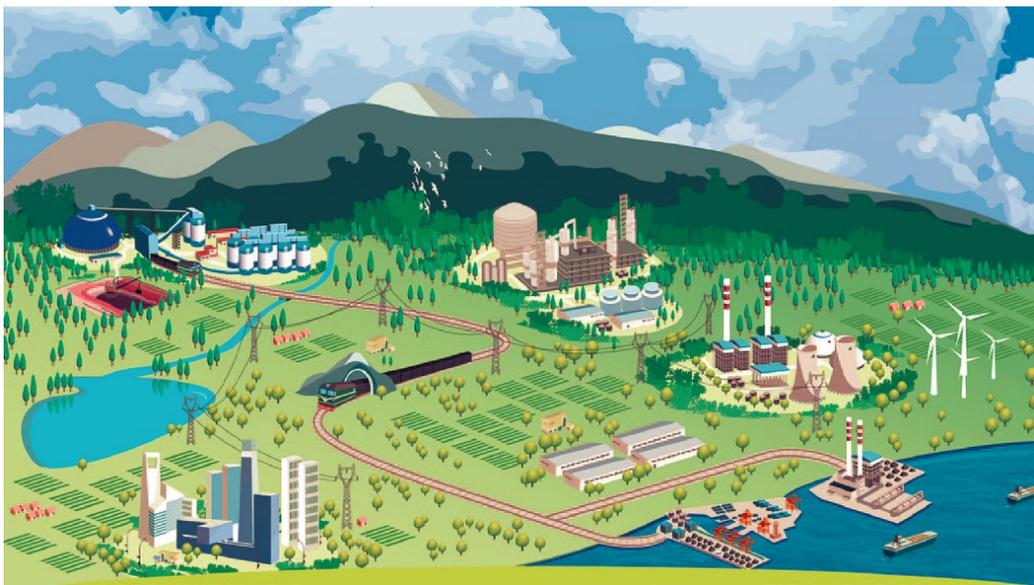


煤炭绿色开发

煤炭清洁高效利用

煤炭清洁转化

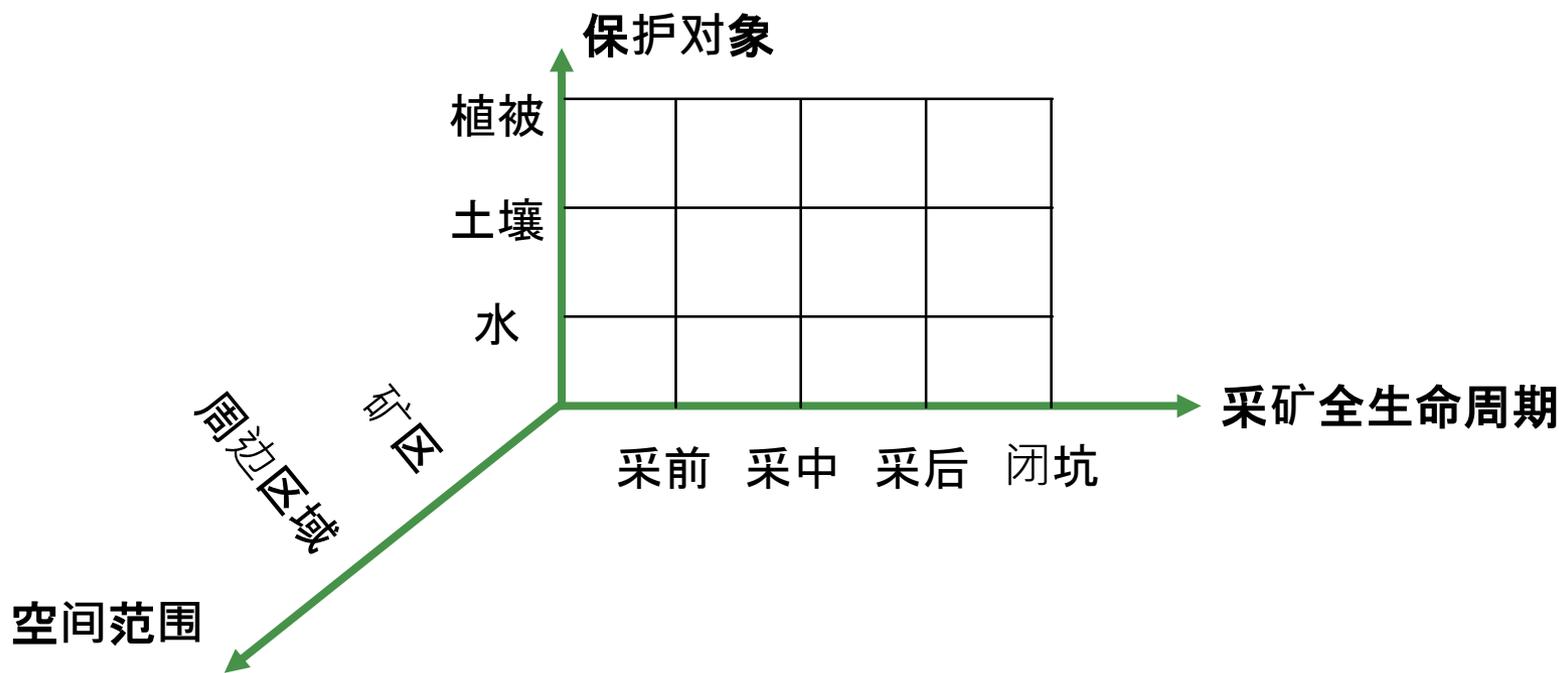
煤基能源CCS



煤炭绿色开发

■ 煤炭绿色开发的内涵

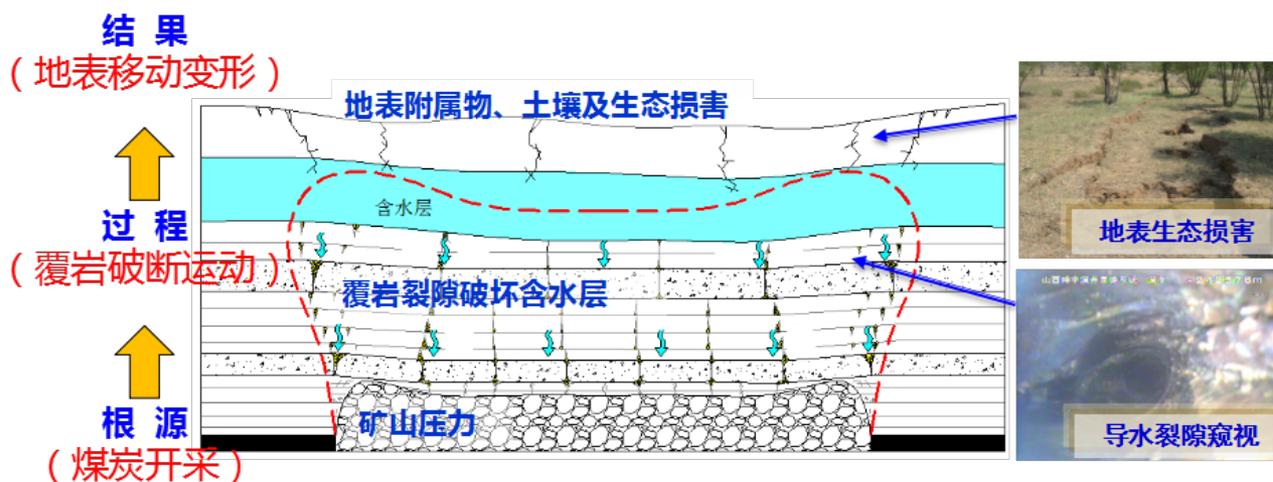
- 保护对象：**水、土壤和植被**三部分
- 空间范围：**矿区及周边影响区域**
- 时间区间：**采矿全生命周期**（采前、采中、采后以及闭坑后）
- 最终目标：实现煤炭开采对生态环境损伤的**最小化**



煤炭绿色开发

■ 构建基于煤炭开采源头主动减损，涵盖采前、采中、采后和闭坑全生命周期的主动生态减损理念

- 以实现煤炭开采生态环境损伤最小化为目标，实现水、土、植被指标达到或优于采前生态本底值
- 以最大化保护利用水资源和土壤持墒能力为核心
- 技术手段包括采前采中工艺参数优化、时空协调布局控制、表土培育、植被抗逆性和土壤持墒能力提高、含水层转移利用等

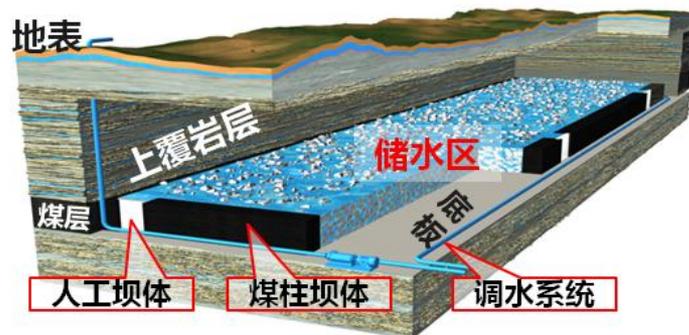


矿区生态保护主动减损理念

煤炭绿色开发

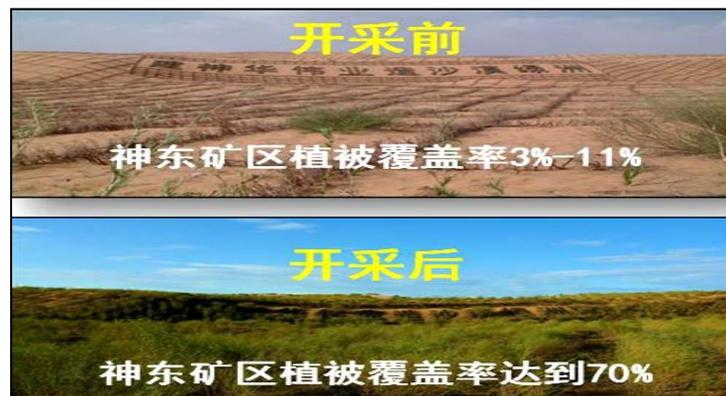
■ 研发煤矿地下水库技术，实现矿井水的有效保护和高效利用

- 充分利用井下开采形成的**采空区天然岩体空隙**，通过构筑坝体，建设取水用水设施和安全监控工程，实现矿井水井下转移储存



■ 通过科技创新，矿区生态环境甚至可以比开发前更好

- 研发基于地表生态主动减损的煤炭开采工艺和地表生态修复技术
- 研发采动岩层和矿区生态自修复促进技术和生物联合修复技术



煤炭绿色开发

- 国家能源集团拥有煤矿97处（井工煤矿76处，露天煤矿21处），大多数煤矿位于我国西部严重缺水的**生态脆弱地区**和**东部草原区**
 - 世界最大的井工矿区—**神东矿区**位于水资源严重短缺的鄂尔多斯地区；自1985年开发建设，拥有生产矿井15个，产能2亿吨
 - 亚洲最大的露天矿区—**准能露天矿区**位于准格尔旗薛家湾镇，年生产能力6900万吨的黑岱沟露天煤矿和哈尔乌素露天煤矿



神东矿区



准能黑岱沟露天矿区

煤炭绿色开发

- **国家能源集团高度重视矿区生态环境保护技术创新与工程实践，累计投入数十亿元，用于**关键技术研发和示范工程建设****
 - **神东2亿吨级矿区生态环境保护技术创新与实践**（最大储水量3100万方，相当于2.2个西湖容量；开发面积140平方公里，治理面积190平方公里，植被覆盖率由开发初的3%~11%提高到70%以上）
 - **准能特大型露天矿区生态保护技术创新与实践**（建设面积约17平方公里的集旅游、观光、教学和科普的**国家矿山公园**）
 - **东部草原区煤电基地生态保护技术创新与实践**（研发和集成大型煤电基地生态修复关键技术，建成示范区15000亩）

■ 神东矿区煤矿地下水库群技术创新与实践

- 神东矿区建成煤矿地下水库**35座**，年供水约7000万方，最高储水量**3100万方**，比**2个西湖**（1400万方）储水量还要高，供应了矿区**95%以上**的用水，保障了矿区水资源供应，建设煤制油供水工程（**1000万方/年**），并为周边电厂供水，近三年因节水创造经济效益**超过30亿元**
- 在**西部矿区（宁东、榆神、包头、新疆和乌海等）**建成、在建和规划建设煤矿地下水库井下储水

矿区名称	在建或规划	矿区名称	在建或规划
大雁矿区	1座（建成）	宁煤矿区	13座（在建和规划）
包头矿区	1座（建成）	乌海矿区	3座（建成）
榆神矿区	2座（在建）	神新矿区	12座（在建和规划）

■ 神东矿区采煤沉陷区生态系统修复技术创新和实践

- 结合神东矿区生态本底与开采特征，提出了**采前、采中和采后**的全生命周期的**主动生态保护理念**

采前：大面积标准治理，使生态环境具有**抗开采扰动能力**

采中：优化调整工艺参数，最大程度**减少生态损伤程度**

采后：以**分区治理**为引领，采用封育围护、人工促进自然恢复、微生物复垦等多种技术



采前预治理



采中优化工艺参数



采后综合治理

■ 神东矿区采煤沉陷区生态系统修复技术创新和实践

- 神东矿区植被覆盖率由建矿初3~11%提高到目前的**70%以上**，生态治理面积（240平方公里）是开发影响面积的**1.3倍**
- 建成**大柳塔水土保持科技示范园**（50平方公里）、微生物复垦示范基地，示范种植了沙棘、野樱桃和文冠果等经济作物



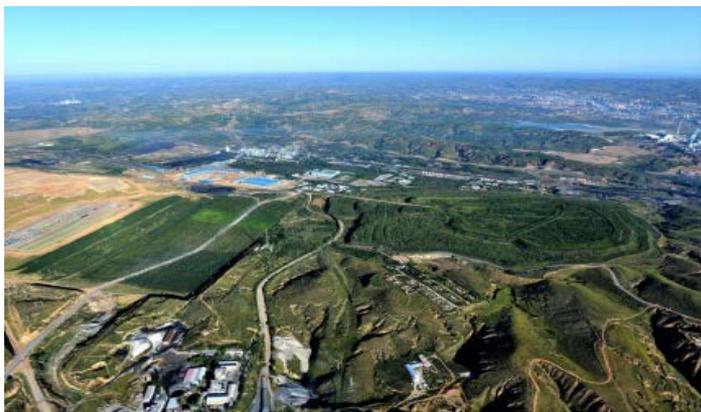
大柳塔西山治理前后对比

微生物复垦示范基地

沙棘和野樱桃种植基地

■ 准能特大型露天矿区生态保护技术创新与实践

- 基于生态减损的采排复一体化理念，完成复垦总面积超过**2300公顷**，土地复垦率**100%**
- 种植各种乔、灌6400多万株（丛），牧草17.13平方公里，植被覆盖率**达75%以上**
- 农作物试种比原有田增加产量**3倍以上**，牧草产量增长**3~5倍**



黑岱沟露天煤矿北排土场



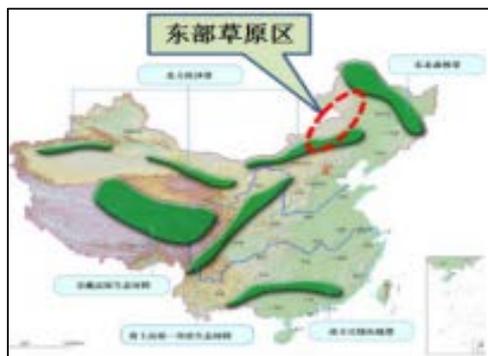
哈尔乌素露天煤矿北排土场

目标：建设国家矿山公园

煤炭绿色开发

■ 东部草原区煤电基地生态保护技术创新与实践

- 依托“十三五”**首批国家重点研发计划项目**，针对我国东部草原区大型煤电基地高强度持续开发活动和生态脆弱特征，主要研究内容包括：
 - 研究东部草原区煤电开发对草原生态系统**影响机理及累积效应**
 - 研发**基于开采源头的生态减损工艺和生态修复技术**
 - 集成示范大型煤电基地**生态安全协调控制模式**



东部草原区位置



呼盟煤炭开采地表损毁



东部草原区露天煤矿采场

■ 东部草原区煤电基地生态保护技术创新与实践

➤ 阶段研究进展：

- 建立了东部草原区**生态本底基础数据库**，初步揭示了煤炭开发对区域生态要素的影响变化，矿区及周边景观**生态演化机理**
- 构建了遥感、无人机航拍、生态智能化监测、钻探，物理数值模拟等多种方法集成的**综合研究体系**
- 研发了基于“**含水层再造**”的**矿井水地下储用**的技术，提出了基于开采工艺的排土场土壤重构方式，初步形成优化生态结构的生物修复技术
- 开展了煤电基地**生态系统稳定性维持机制**和评价研究，正在进行示范工程建设

相关研究正在稳步推进，项目预期2020年完成

煤炭清洁高效利用——燃煤发电污染物超低排放

- 国家能源集团超低排放燃煤机组共计301台1.42亿千瓦，占煤电总装机的**80.3%**
 - 2014年，在舟山电厂建成运行**国内第一个超低排放机组**
 - 超低排放度电增加成本1分钱左右，超低排放燃煤发电**上网电价0.3~0.4元**，远低于燃气发电上网电价0.7~0.8元



——2016年6月3日，习近平总书记参观国家‘十二五’科技创新成就展

舟山电厂4号机组污染物排放状况

	粉尘	SO ₂	NO _x
	(mg/Nm ³)	(mg/Nm ³)	(mg/Nm ³)
舟山4号机组	2.46	2.76	19.8
燃气机组排放标准	5	35	50
燃煤排放标准 (重点地区)	20	50	100

煤炭清洁高效利用——高效燃煤发电

供电煤耗为
283g/KWh
供电效率43.4%

供电煤耗
277g/KWh
供电效率44.5%

供电煤耗
273g/KWh
供电效率45.0%

供电煤耗
266g/KWh
供电效率46.2%

2006年

2013年

2015年

2016年



华能浙江玉环电厂

中国首个百万千瓦超超临界机组



上海外高桥三电厂

创当时燃煤发电效率世界纪录



国家能源集团安庆电厂

首次采用28MPa/600°C/620°C超高参数



华能莱芜电厂

全球最高参数二次再热机组

- 国内主要电力企业都在研发更高效率的二次再热发电技术，预期发电效率达到50%（供电效率48%左右）

■ 建成世界首台百万千瓦超超临界二次再热煤电机组，引领世界高效燃煤发电技术进步



“在中国，煤电是个大事”

——2016年6月3日，习近平总书记参观国家“十二五”科技创新成就展



国家能源集团泰州二期

—世界首台（套）百万千瓦超超临界二次再热煤电机组

供电煤耗 **265.8 g/kWh**

与常规百万机组平均相比，煤耗降低**18.7g/kW·h**

按年利用小时5500小时计算，两台机组年节约标煤
20.6万吨

按年利用小时5500小时计算，两台机组年减排CO₂
57.6万吨

煤炭清洁高效利用——循环流化床发电技术

■ 高效循环流化床发电

- 循环流化床发电是实现低热值煤有效利用的重要途径，国家能源集团运营的CFB机组规模目前世界最大 **(892万千瓦)**
- 掌握了600MW超临界CFB技术，并建设运营了全球唯一的示范工程
- 正在研发660MW超超临界CFB技术，预期**供电效率达到42%**



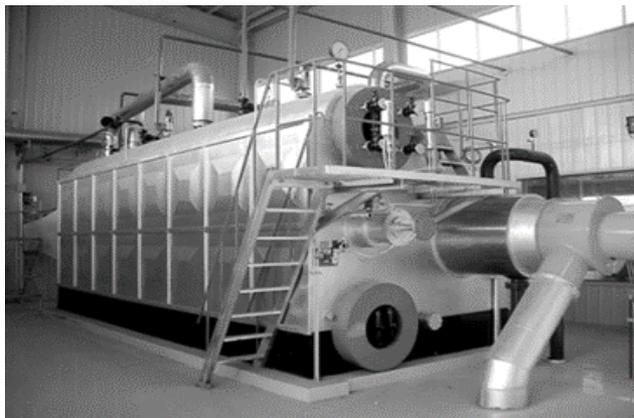
350MW超临界CFB(河曲)



600MW超临界CFB(白马)，目前世界规模最大、参数最高的CFB机组

煤炭清洁高效利用——工业锅炉清洁燃烧

- 工业燃煤锅炉清洁利用技术也取得重大突破，锅炉热效率和污染物排放可达到燃气锅炉水平
 - 热效率可达**92%**以上，烟尘排放小于**20**mg/m³，NO_x排放小于**100**mg/m³，SO₂排放小于**50**mg/m³
 - 在城市供暖，工业园区、矿区蒸汽生产，以及其它热源生产等领域已得到广泛应用



神东矿区使用的清洁工业锅炉

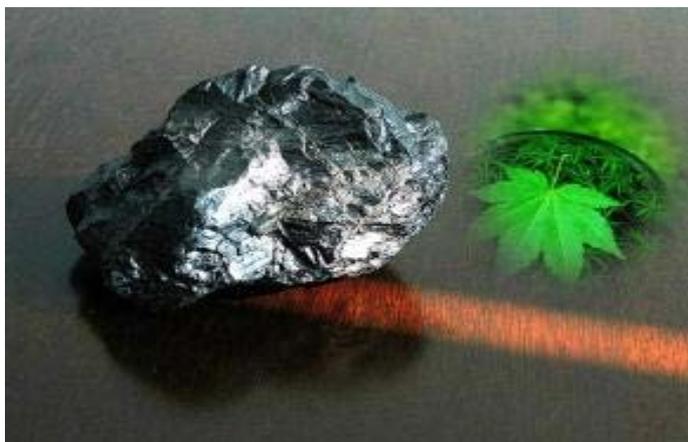


天津津能投资集团华苑5×58MW供热项目

煤炭清洁高效利用——散煤利用清洁化

■ 清洁煤替代劣质煤实现散煤清洁利用

- **2亿吨左右的散烧煤**是煤炭清洁利用的顽疾，虽总量占消费量不到10%，但污染物排放占一半左右
- 采用清洁煤替代劣质煤是治理散烧污染的重要途径，但关键要**降低清洁煤成本**，让地方财政能承受，老百姓用得起
- 国家能源集团将利用自身产业链优势，加大清洁煤生产和销售力度，做好京津冀等地区清洁燃煤替代工作

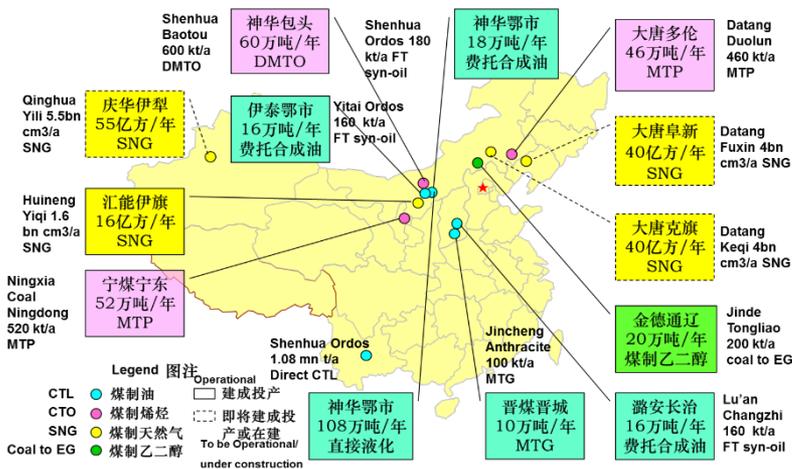


京津冀地区主要煤质标准

		全 硫 ($S_{t,d}$)%	灰 分 (A_d)%	挥 发 分 (V_{daf})%
北京	无烟块煤	≤ 0.40	≤ 16.00	≤ 10.00
天津	烟煤	≤ 0.40	≤ 11.50	≤ 20.00
	无烟煤	≤ 0.40	≤ 20.00	≤ 10.00
河北	无烟块煤	≤ 0.40	≤ 16.00	≤ 10.00

煤炭清洁转化——示范项目分布

- 进入21世纪后，中国煤炭清洁转化产业技术和工业示范取得了突破性发展，目前该领域技术及产业规模整体上处于世界领先地位
- 截止2015年底已建成20套煤(甲醇)制烯烃、4套煤制油、3套煤制天然气项目



中国现代煤化工产业规模 (2015)

名称	2015年产能	2020年预计
煤制油	258万吨	1200万吨
煤制气	31亿m ³	200亿m ³
煤制烯烃	792万吨	1600万吨
煤制乙二醇	212万吨	600万吨

中国部分代表性现代煤化工示范项目分布图

煤炭清洁转化——煤制油品/烯烃大型现代煤化工

- 利用自主研发技术，建成**世界首个百万吨级煤直接液化和世界首个60万吨/年煤制烯烃示范项目**
- 煤直接液化示范工程能源转化效率不断提高
 - 累计生产油品超过500万吨
 - 污水处理及节水技术不断进步，实现了污水的零排放
- 利用自主工艺建设的新疆68万吨MTO项目于2016年底建成并开车成功



煤炭清洁转化——煤间接液化

■ 世界单体规模最大的400万吨级煤间接液化工业装置，投资550亿元

- 工业放大25倍，集成工艺单元71个，各类设备1.3万台套，实现2000吨/天干煤粉气化炉和10万等级空分首次国产化
- 2017年底两条线均实现满负荷运行

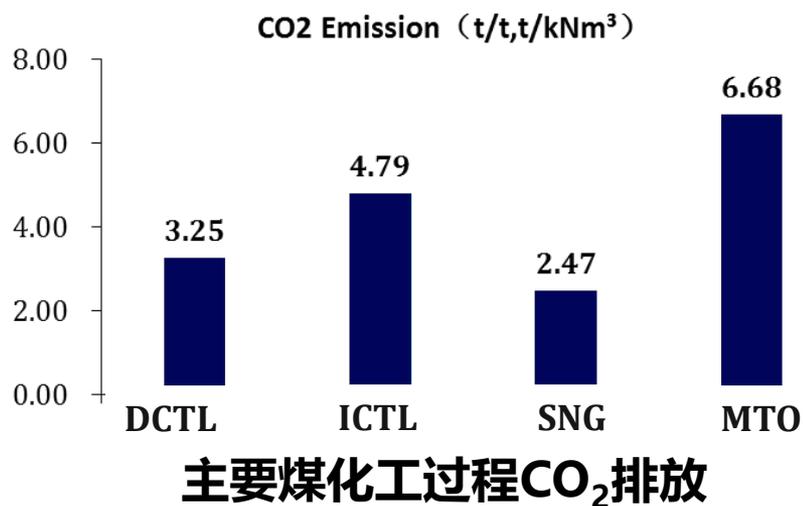
“社会主义是干出来的”

——2016年7月，习近平总书记视察宁煤400万吨间接液化项目



■ 煤制油化工CCS技术

- 现代煤化工产业排放CO₂的浓度一般超过**80%**，捕集成本相对较低（约为电厂捕集的1/3~1/4）
- 国家能源集团开展了**10万吨/年CCS工程示范**，掌握了CO₂盐水层地质封存核心技术，已完成了**30.26万吨封存量**

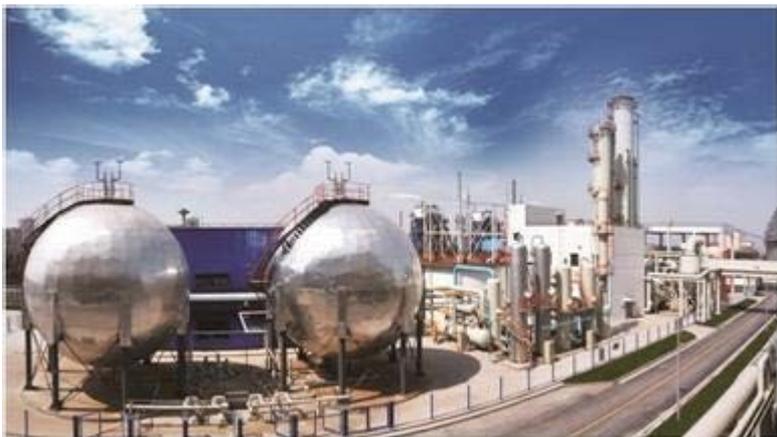


鄂尔多斯煤直接液化CCS示范工程

煤基能源CCS——燃煤发电CCS

■ 燃煤发电CCS：主要技术均开展了示范

- **燃烧后捕集**：华能、原国电已完成了3000~10万吨级/年燃烧后捕集示范项目3个（2008~2010年）
- **富氧燃烧**：华中科技大学开展了35MW富氧燃烧示范（2015年）
- **燃烧前捕集**：华能天津IGCC项目上开展了10万吨/年示范（2016年）
- **全流程项目**：正在锦界电厂开展10万吨/年燃烧后捕集+地质封存全流程示范项目建设



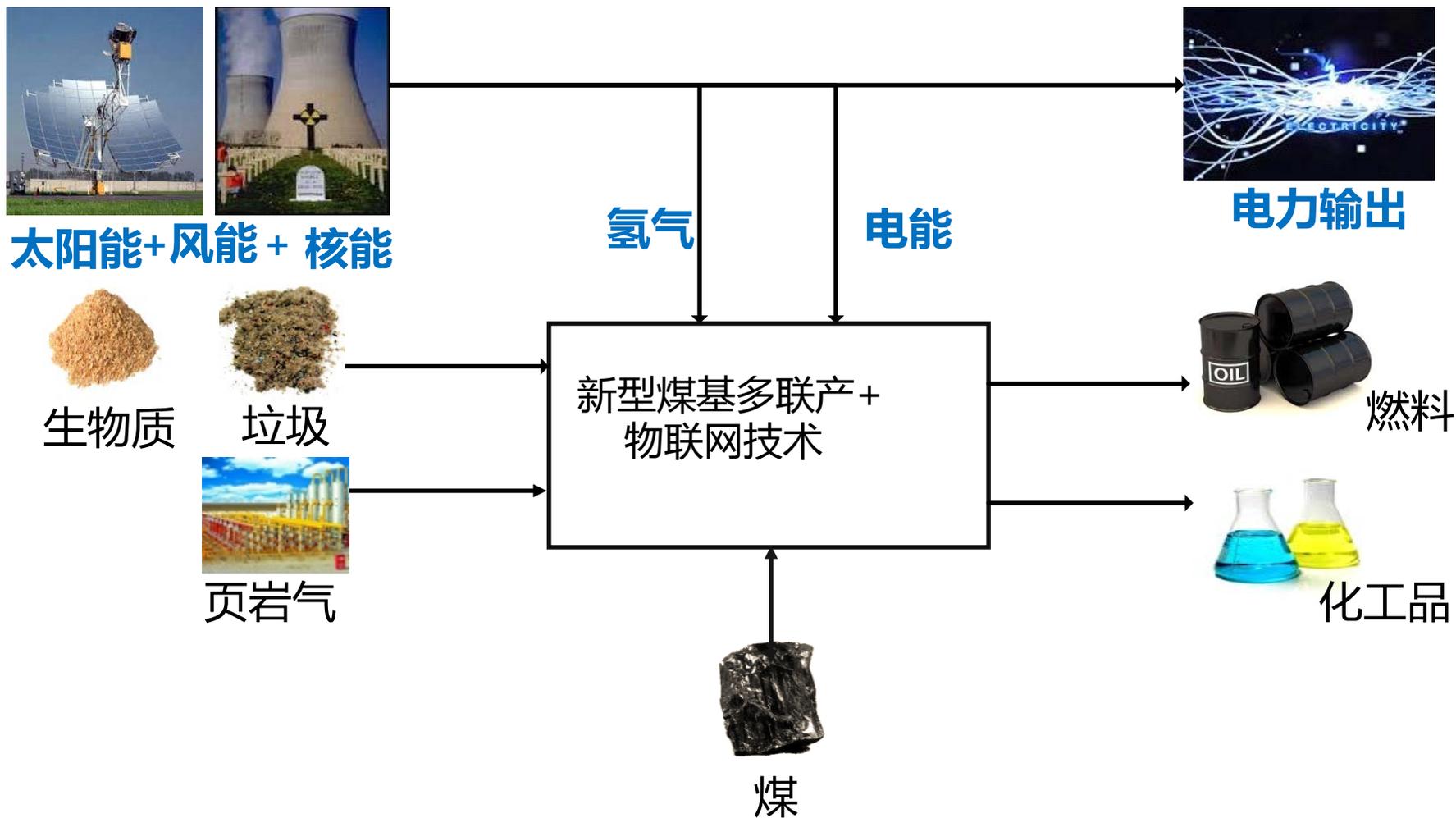
华能上海石洞口CCS项目



国家能源集团锦界电厂

煤基能源未来发展方向——煤基智能多联产

- 构建煤基能源与非化石能源智能耦合的能源系统，发挥煤炭基础能源作用，实现能源系统效率最大化、排放最小化和性价比最优化



谢谢!

