



双碳目标下我国能源电力系统 发展情景分析

周孝信

2021年5月22日 南京

 国际能源研究中心

目 录



- **我国能源转型的战略目标**
- **新一代电力系统的主要特征、核心指标和关键技术**
- **双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析**
- **综合能源生产单元设想**
- **结语**

我国能源转型的战略目标



能源安全
新战略

习近平总书记2014年6月在中央财经领导小组第六次会议上发表重要讲话，提出**推动能源消费革命、能源供给革命、能源技术革命、能源体制革命和全方位加强国际合作的能源安全新战略**



30-60
双碳目标

习近平主席2020年9月22日在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话中提出“**中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和**”的**能源转型新目标**

我国能源转型的战略目标



关键指标
2030

2020年12月12日习近平主席在气候雄心峰会上讲话中进一步宣布“到2030年中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上，**非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右**”，“**风电、太阳能发电总装机将达到12亿千瓦以上**”



落实两个
“构建”

2021年3月15日，习近平总书记在中央财经委员会第九次会议上明确了“十四五”是碳达峰的关键期、窗口期，需要落实几项重点工作，其中第一项任务就是“要**构建清洁低碳安全高效的能源体系**，控制化石能源总量，着力提高利用效能，实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，**构建以新能源为主体的新型电力系统**”

国际能源研究中心

能源电力“十三五”规划和《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》

国家发展改革委、国家能源局于2016年先后发布：

《电力发展“十三五”规划》 《能源发展“十三五”规划》

能源发展目标（2020年）

- 能源消费总量：**50亿吨**标准煤以内
- 非化石能源占一次能源消费**15%**以上
- 天然气消费比重力争达到**10%**，煤炭消费比重降低到**58%**以下
- 全社会用电量预期为**6.8~7.2万亿千瓦时**

电力发展目标（2020年）

- 全国发电装机达到20亿kW
- 非化石能源装机7.7亿kW，占39%
- 燃煤发电供电煤耗少于310g/kWh
- 煤电发电装机控制在11亿kW
- 西电东送规模由1.3亿kW增加到2.7亿kW

《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》

2021-2030年

- 能源消费总量控制在**60亿吨**标准煤以内
- 非化石能源占比达到**20%**左右
- 新增能源需求主要依靠清洁能源满足，**初步构建现代能源体系**
- 非化石能源发电量占全部发电量的比重力争达到**50%**

2050年

- 能源消费总量基本稳定，**非化石能源占比超过一半，建成现代能源体系**

国际能源研究中心

目录



- 我国能源转型的战略目标
- **新一代电力系统的主要特征、核心指标和关键技术**
- 双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析
- 综合能源生产单元设想
- 结语

电网发展阶段的回顾和展望-三代电网（电力系统）

	第一代 19世纪末-20世纪50年代	第二代 20世纪50年代-20世纪末	第三代 21世纪初- 21世纪中叶
发展模式	<ul style="list-style-type: none"> 小机组（燃煤、油气、小水电） 低电压（220kV以下） 小电网（城市电网，孤立电网） 	<ul style="list-style-type: none"> 大机组（化石、核电、水电） 超高压（750kV以下） 大电网（交直流互联电网） 	<ul style="list-style-type: none"> 可再生能源等非化石能源发电为主（发电量占70%-80%以上） 骨干电源与分布式电源结合 主干电网与主动配网微网并存
主要特征	初级阶段的发展模式	高度依赖化石能源，不可持续的发展模式	基于可再生能源和清洁能源，可持续发展的综合能源电力发展模式

回顾过去100多年的电力系统发展历程，当前的电力系统是**第三代（新一代）**电力系统的初级发展阶段，正向着**新能源为主体的新型电力系统**方向发展。

新一代电力系统的主要特征、核心指标和关键技术-1

4个主要特征：

- 高比例可再生能源电力系统
- 高比例电力电子装备电力系统
- 多能互补综合能源电力系统
- 信息物理融合智慧能源电力系统



5项核心指标：

- 非化石能源在一次能源消费中比重
- 能源电力系统CO₂排放总量
- 能源电力系统总体能源利用效率
- 电能在终端能源消费中比重
- 非化石能源发电量在发电量中比重



新一代电力系统的主要特征、核心指标和关键技术-2

6类关键技术



高效低成本
新能源发电
和非电利用
技术



高可靠性
低损耗新型
电力电子器
件和系统技术



新型电力系统
模式结构及其
分析控制保护
技术



安全高效低
成本长寿命
新型
储能技术



清洁高效低
成本氢能生
产储运转化
和应用技术



数字化、
人工智能和
能源互联网
技术

目录



- 我国能源转型的战略目标
- 新一代电力系统的主要特征、核心指标和关键技术
- **双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析**
- 综合能源生产单元设想
- 结语

一次能源消费中非化石能源主要来自“一次电力”

- 非化石能源在一次能源消费中占比是我国能源绿色低碳转型的核心指标
- 一次能源消费中非化石能源主要来自“一次电力”（可再生能源发电及核电等）

年份	一次能源消费总量 (亿tce)	非化石能源消费电量 (万亿kWh)	火电平均供电煤耗 (gce/kWh)	非化石能源电量消费折合标煤 (亿tce)	计算非化石能源消费在一次能源消费中占比 (%)	实际非化石能源消费在一次能源消费中占比 (%)
2015	43.0	1.56	315	4.91	$4.91/43.0=11.4\%$	12.1
2016	43.6	1.76	312	5.49	$5.49/43.6=12.6\%$	13.3
2017	44.9	1.95	309	6.03	$6.03/44.9=13.4\%$	13.8
2018	46.4	2.16	308	6.65	$6.65/46.4=14.3\%$	14.3
2019	48.6	2.39	306.4	7.32	$7.32/48.6=15.1\%$	15.3
2020	49.8	2.58	305.5	7.88	$7.88/49.8=15.8\%$	15.3

国际能源研究中心

2021-2060年能源电力发展的四种情景设置

2021-2060年40年期间分时间段：根据**全社会用电量**年均增长百分值（%）、**一次能源消费中非化石能源占比**年均提高百分点，设定四种发展情景：

	情景一		情景二		情景三		情景四	
	全社会用电量年均增长（%）	非化石能源占比年均增长（百分点）	全社会用电量年均增长（%）	非化石能源占比年均增长（百分点）	全社会用电量年均增长（%）	非化石能源占比年均增长（百分点）	全社会用电量年均增长（%）	非化石能源占比年均增长（百分点）
2021-2025	4	0.5	4	1.14	4	1.2	4	0.83
2026-2030	3	1.15	3	1.3	3	1.6	3	1
2031-2035	2	1.15	2	1.4	2	1.7	2	1.7
2036-2040	1	1.4	1	1.4	1	1.7	1	1.7
2041-2050	1	1.4	1	1.4	1	1.8	1	1.7
2051-2060	-	-	-	-	-	-	1	3.0

- ◆ **情景一：基础情景**：参照《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》设定目标的能源电力发展情景
- ◆ **情景二：非化石能源消费适度加速增长情景**：前15年（2021-2035）间非化石能源占比加速增长
- ◆ **情景三：非化石能源消费跨越式增长情景**：30年间（2021-2050）普遍加速，达到跨越式增长
- ◆ **情景四：实现2030-2060双碳目标的一种情景**：电力系统实现2025年碳达峰、支持2050年前碳中和

双碳目标下我国能源电力系统发展情景设置-情景四

2021-2060年40年期间，分别设置**一次能源消费总量**、**全社会用电量**、**非化石能源消费在一次能源消费中的占比**变化趋势，设定双碳目标下我国能源电力系统发展的一种情景

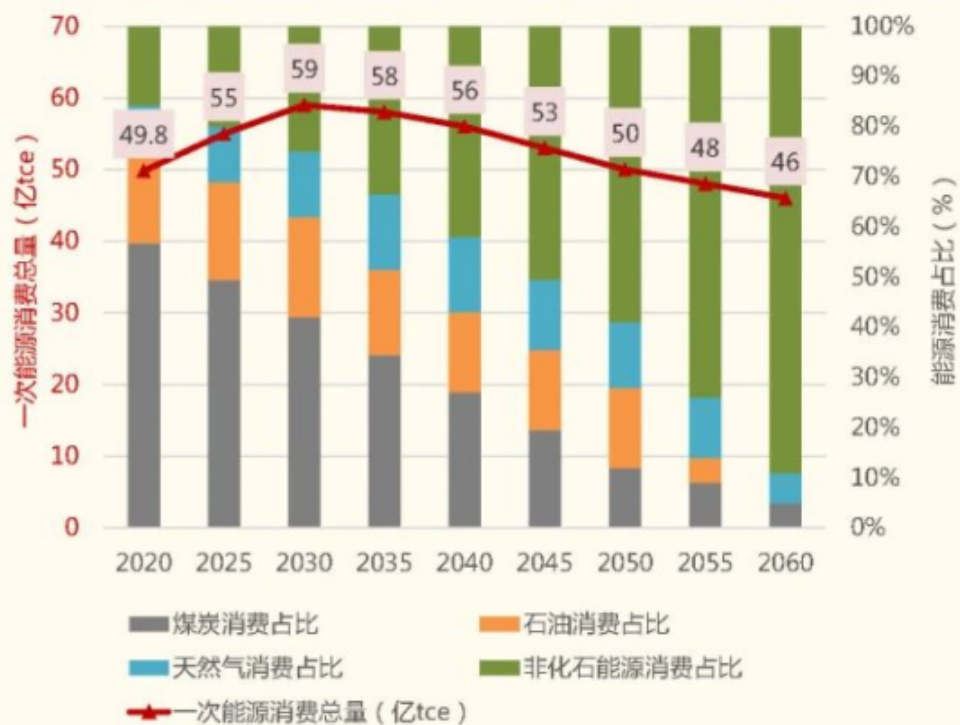
一次能源消费总量：综合考虑经济增长、碳排放尽早达峰要求和节能的可能贡献等因素，预计2025年为55亿tce，2050年降至50亿tce，2060年达到46亿tce。

年份	全社会用电量 年均增长 (%)	非化石能源消费占比 年均增长 (百分点)
前15年		
2021-2025	4	0.83
2026-2030	3	1
2031-2035	2	1.7
后25年		
2036-2050	1	1.7
2051-2060	1	3.0



2020-2060年能源电力系统关键指标变化趋势-1

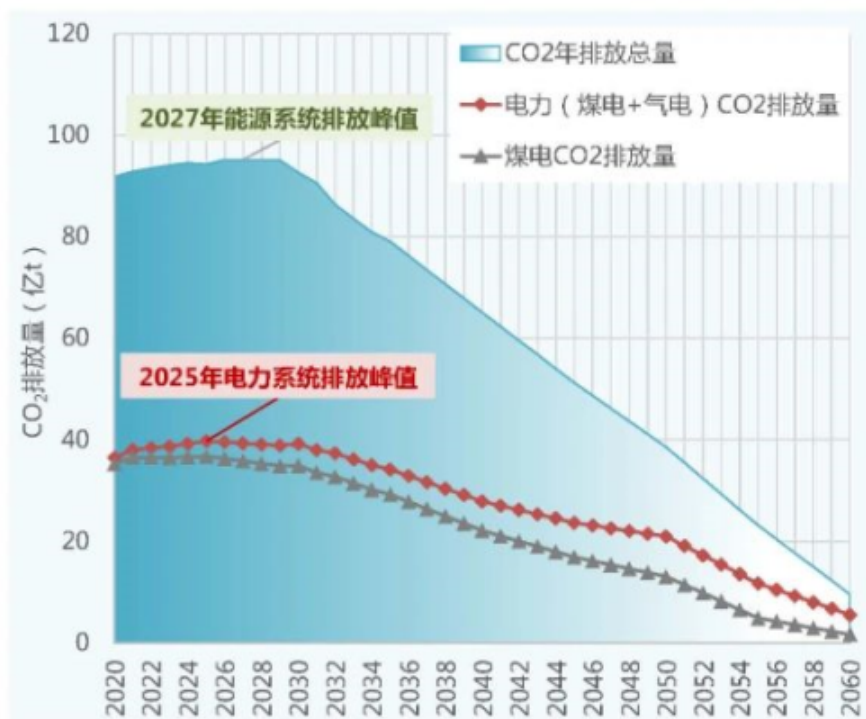
关键指标1-非化石能源在一次能源消费中比重（一次能源结构）



- ◆ 2030年，非化石能源消费占比**25%**
- ◆ 一次能源消费总量于**2030年左右达峰值59亿tce**，原油消费于**2030年左右达峰值11.8亿tce**，于**2060年清零**；天然气消费于**2035年左右达峰值8.7亿tce**
- ◆ 2045年，非化石能源消费占比**超过50%**，油气消费占比下降至**30%**，**煤炭消费下降至20%以下**

2020-2060年能源电力系统关键指标变化趋势-2

关键指标2-能源电力系统CO₂排放



年份	全国年GDP* (万亿元)	能源系统年CO ₂ 排放 (峰值%)	单位GDP CO ₂ 排放 (2020%)
2020	101.5986	96.4	100
2025	132.7894	99.0	78.6
2030	177.6722	97.3	57.7

年份	电力CO ₂ 排放量 (峰值%)	煤电CO ₂ 排放量 (峰值%)
2020	91.7	96.1
2025	100	100
2030	98.7	95.0
2035	85.9	79.4
2040	70.0	60.2
2045	59.5	45.9
2050	52.7	35.6
2055	29.4	13.2
2060	13.8	4.4

“十四五”时期单位GDP二氧化碳排放降低21.4%
 “十四五”规划目标为18%

- ◆ 能源系统CO₂排放于2027年达峰
- ◆ 电力系统（煤电+气电）CO₂排放量于2025年达峰，占当年能源系统排放总量42%
- ◆ 2030年后，随着一次能源消费总量降低，非化石能源消费占比不断提高，CO₂排放总量持续降低；2050年后，非化石能源占比增速提高，CO₂排放总量下降速度显著加快

*根据2021年政府工作报告：2021年GDP增长6%。设定2021-2025年年均增长为5.5%，5年增长1.307倍；2026-2030年年均GDP增长6%，5年增长1.338倍。

2020-2060年能源电力系统关键指标变化趋势-3

关键指标3-系统总体能源利用效率



	一次能源消费总量 (亿tce)	全年GDP (万亿元)*	单位GDP能耗 (2020年%)**	人均能耗 (tce)
2020	49.8	101.5986	100	3.53
2025	55	132.7894	84.5	3.89
2030	59	177.6722	67.7	4.13



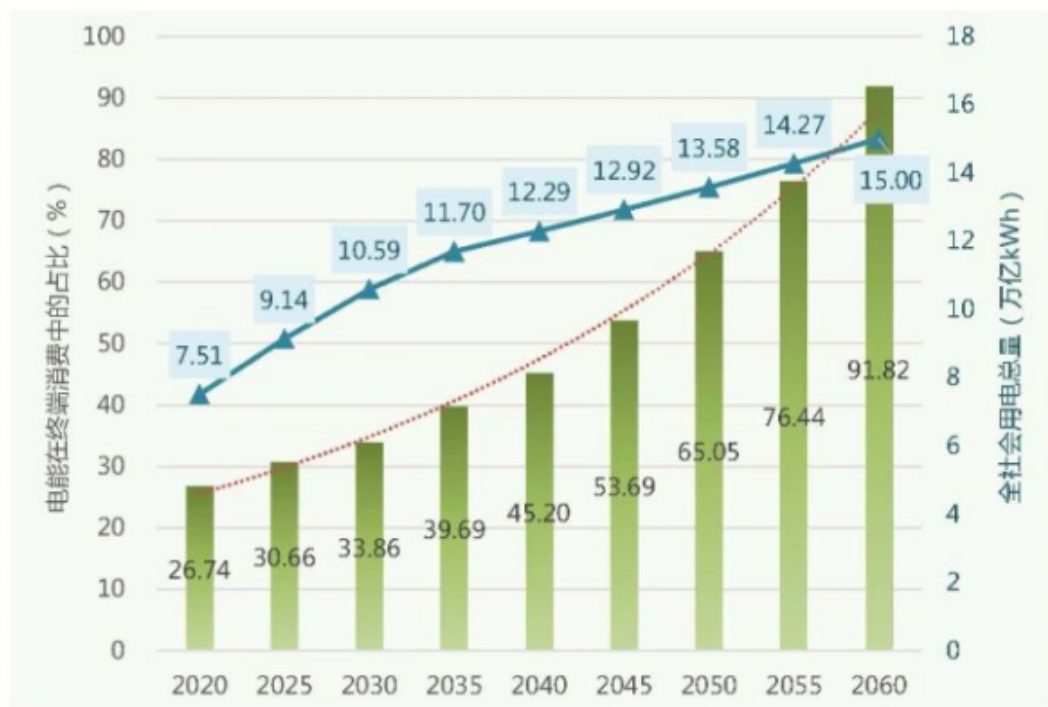
**我国“十四五”规划
目标：单位国内生产总值能源消耗降低13.5%

“十四五”时期
单位GDP能耗降低15.5%

*根据2021年政府工作报告：2021年GDP增长6%。设定2021-2025年年均增长为5.5%，5年增长1.307倍；2026-2030年年均GDP增长6%，5年增长1.338倍。

2020-2060年能源电力系统关键指标变化趋势-4

关键指标4-电能在终端能源消费中比重

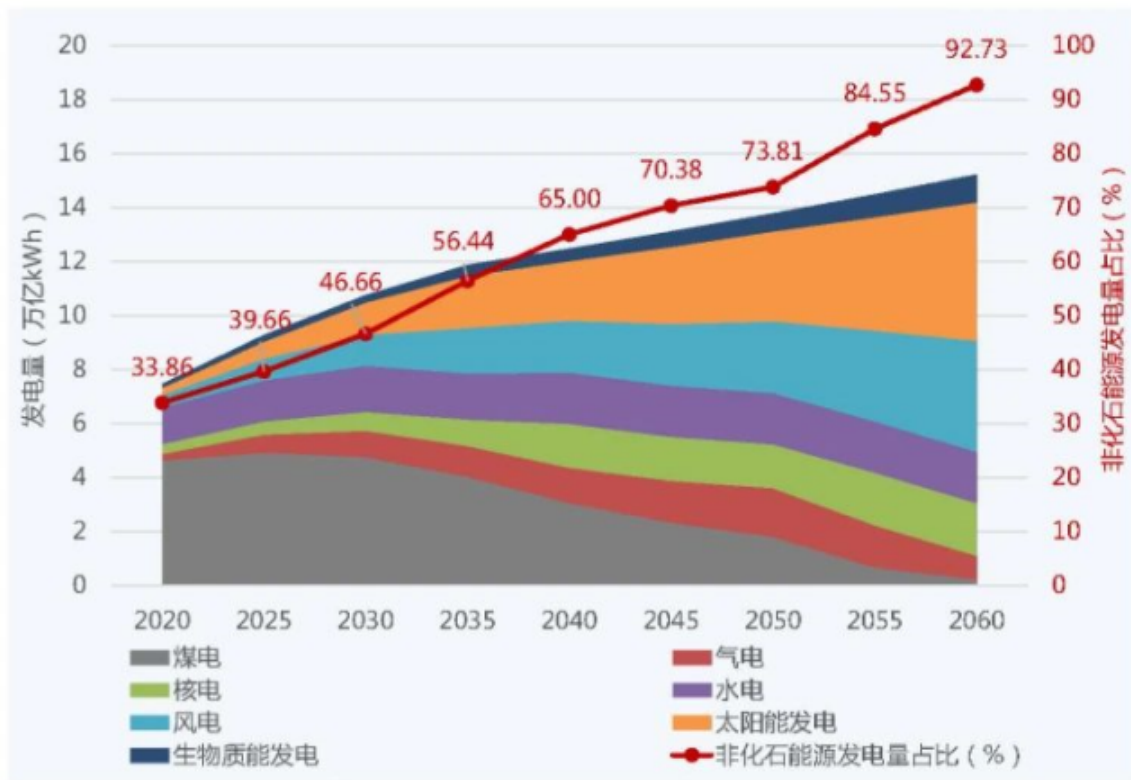


年份	全社会用电量 (万亿kWh)	电能在终端能源消费中比重 (%)
2020	7.51	26.74
2025	9.14	30.66
2030	10.59	33.86
2035	11.70	39.69
2040	12.29	45.20
2045	12.92	53.69
2050	13.58	65.05
2055	14.27	76.44
2060	15.00	91.82

- ◆ 全社会用电量逐步提高，2035年后虽增速低于2035年前，但由于2030年后终端能源消费量由上升变为下降，电能在终端消费中比重呈近似指数增长趋势，2030年达到约34%，2050年达到约65%。

2020-2060年能源电力系统关键指标变化趋势-5

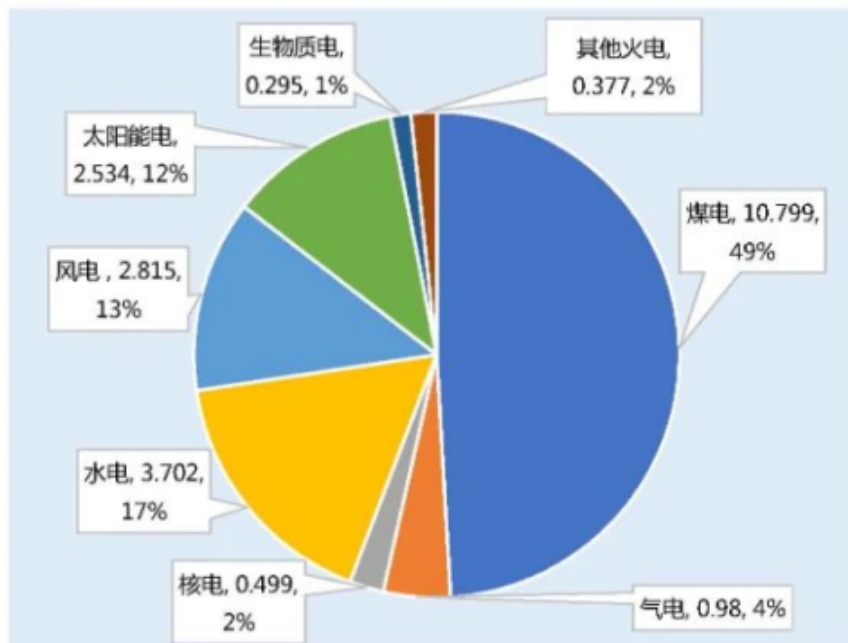
关键指标5-非化石能源发电量在总发电量中比重



- ◆ 非化石能源发电量不断增加，2030年超过5万亿kWh，2050年超过10万亿kWh，在总发电量中的占比持续提升，2060年达到约92.7%
- ◆ 风光发电快速增长是非化石能源发电量上升的主要原因
- ◆ 2050年，煤电和气电发电量各约占化石能源发电量1/2，共同提供电网灵活性资源；2050-2060年，煤电加速退役及低碳改造进程，气电在化石能源发电量中的占比提高至80%

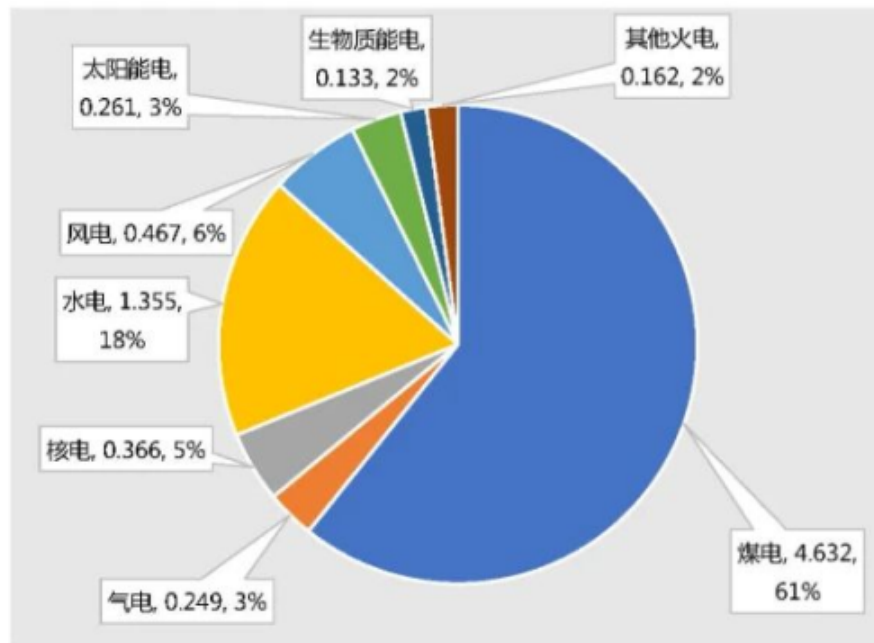
2020年我国能源电力发展情景

能源消费总量**49.8亿tce** 非化石能源消费比重**15.8%** 全社会用电量**7.51万亿kWh** 人均年用电量**5327kWh**



年末装机容量：22.01亿kW

非化石装机占比 44.7%，新能源(风光生物质)装机占比 25.7%



年总发电量：7.51万亿kWh

非化石能源发电量占比 33.9%，新能源发电量占比 11.3%

国际能源研究中心

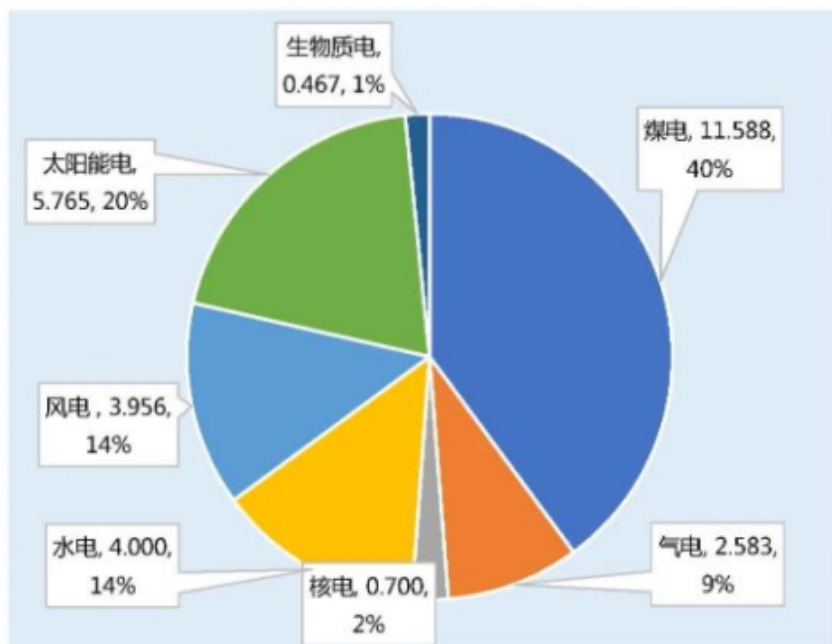
2025年我国能源电力发展估算

2025年

能源消费总量55亿tce

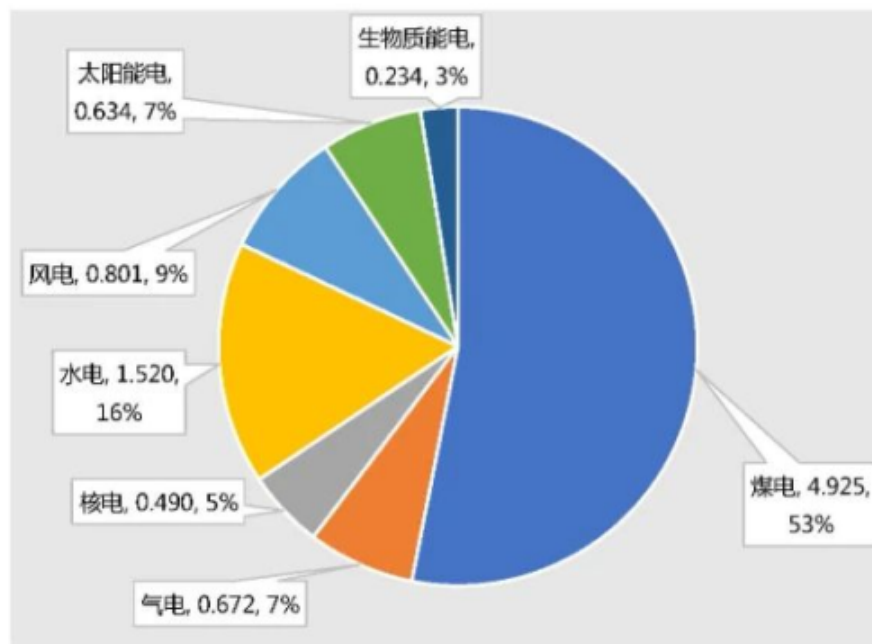
非化石能源消费比重20%

人均年用电6458kWh



年末装机容量：29.06亿kW

非化石装机占比：51.2%，新能源装机占比：35.1%



年总发电量：28.77亿kWh

非化石发电量占比：39.7%，新能源发电量占比：18%

国际能源研究中心

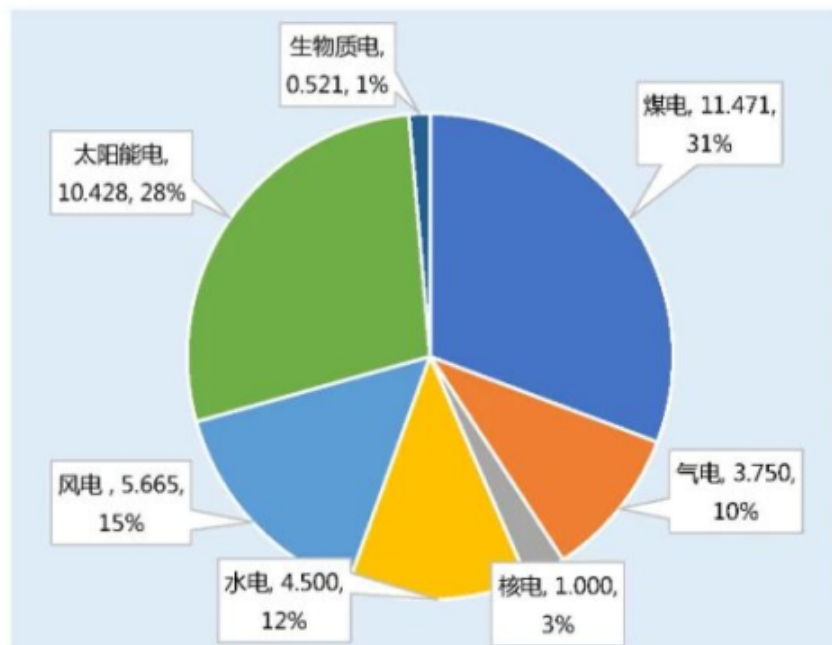
2030年我国能源电力发展估算

2030年

能源消费总量**59亿tce**

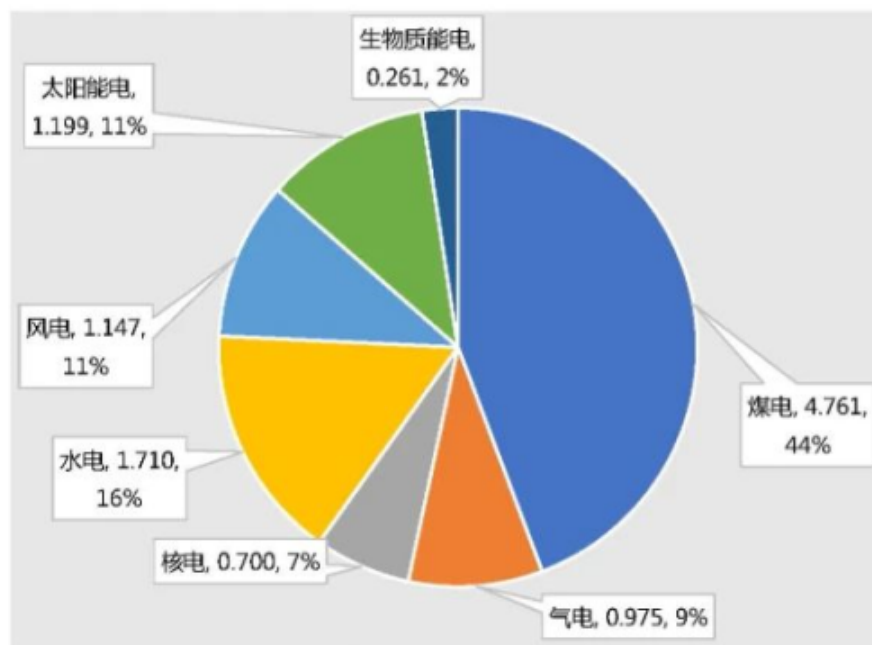
非化石能源消费比重**25%**

人均年用电**7508kWh**



年末装机容量：**37.34亿kW**

非化石装机占比：**59.2%**，新能源装机占比：**44.5%**



年总发电量：**10.75万亿kWh**

非化石发电量占比：**46.7%**，新能源发电量占比：**24.2%**

国际能源研究中心

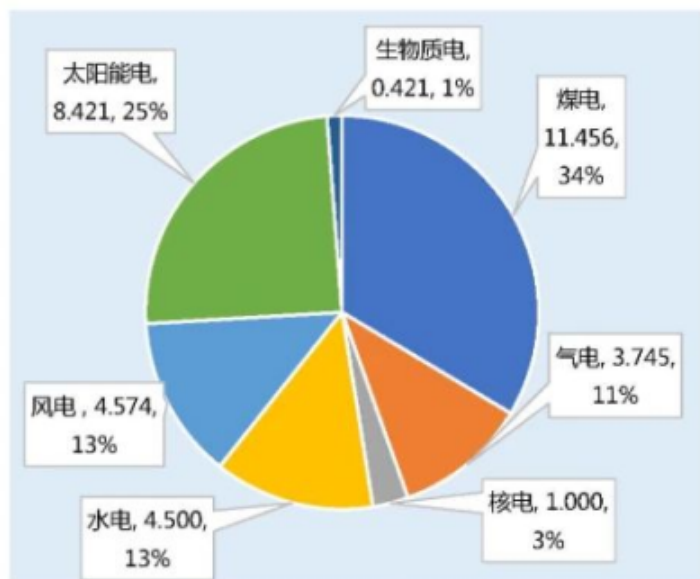
考虑非化石能源非电利用的我国能源电力发展估算*

2030年

能源消费总量**59亿tce**

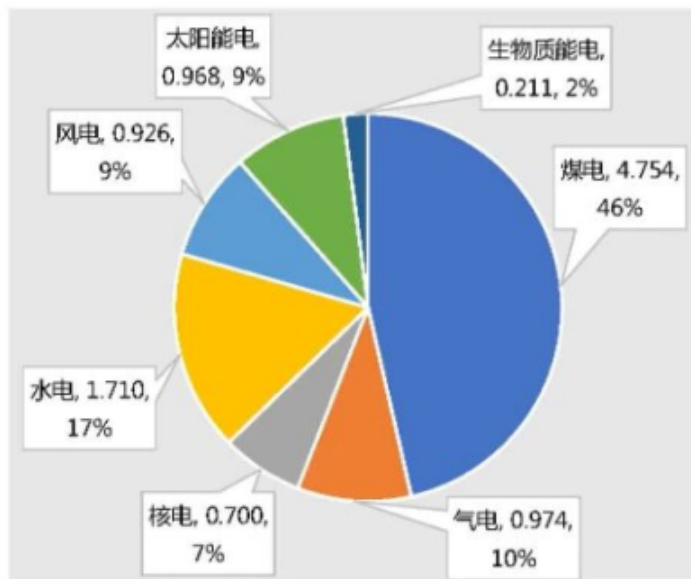
非化石能源消费比重**25%**

人均年用电**7057kWh**



年末装机容量：**34.12亿kW**

非化石能源发电装机占比**55.4%**，新能源装机占比**39.3%**



年总发电量：**10.24万亿kWh**

非化石能源发电量占比：**44.1%**，新能源发电量占比**20.6%**

非化石能源的非电利用起到代替部分风电、太阳能装机容量的作用

非化石能源中10%以非电形式利用——2030年，全国风光装机总容量由16亿kW降低为13亿kW

*假设90%的非化石能源以电力形式利用（非电利用10%，主要是地热能 and 太阳能供暖等热利用），全社会用电量为原场景电量扣减非化石能源非电利用折算电量得到

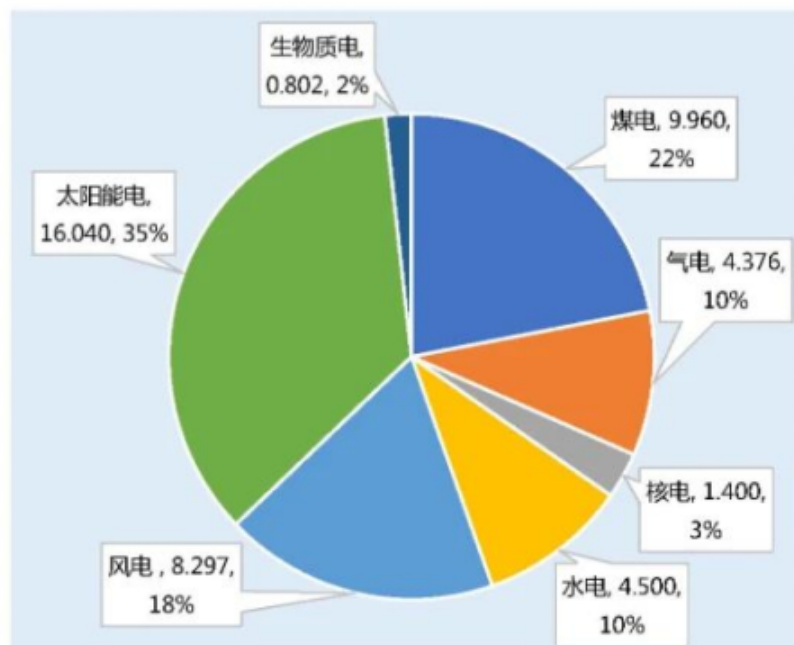
2035年我国能源电力发展估算

2035年

能源消费总量**58亿tce**

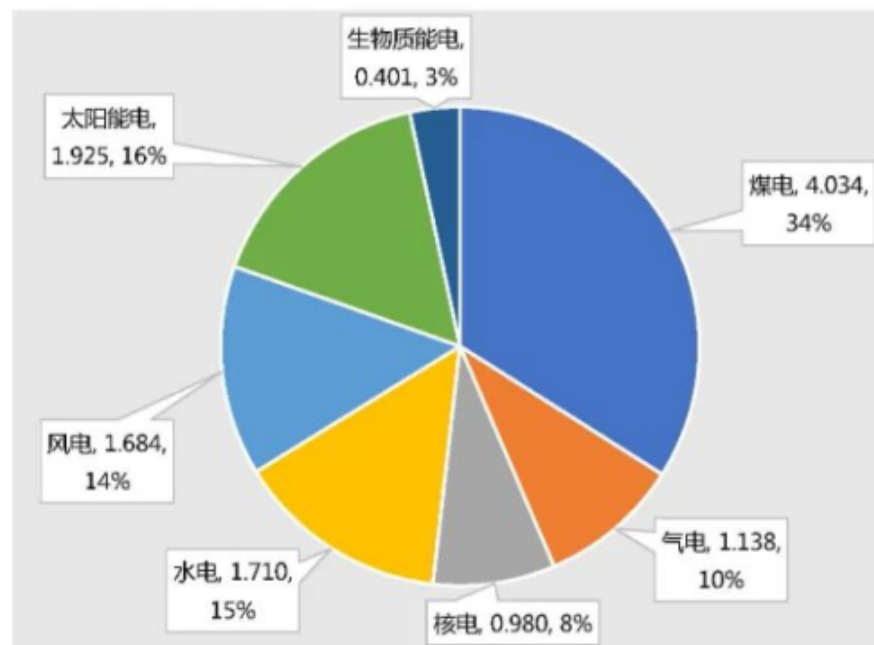
非化石能源消费比重**33.5%**

人均年用电**8295kWh**



年末装机容量：**45.38亿kW**

非化石能源发电装机占比：**68.4%**，新能源装机占比：**54.7%**



年总发电量：**875亿kWh**

非化石能源发电量占比：**56.4%**，新能源发电量占比：**32.9%**

国际能源研究中心

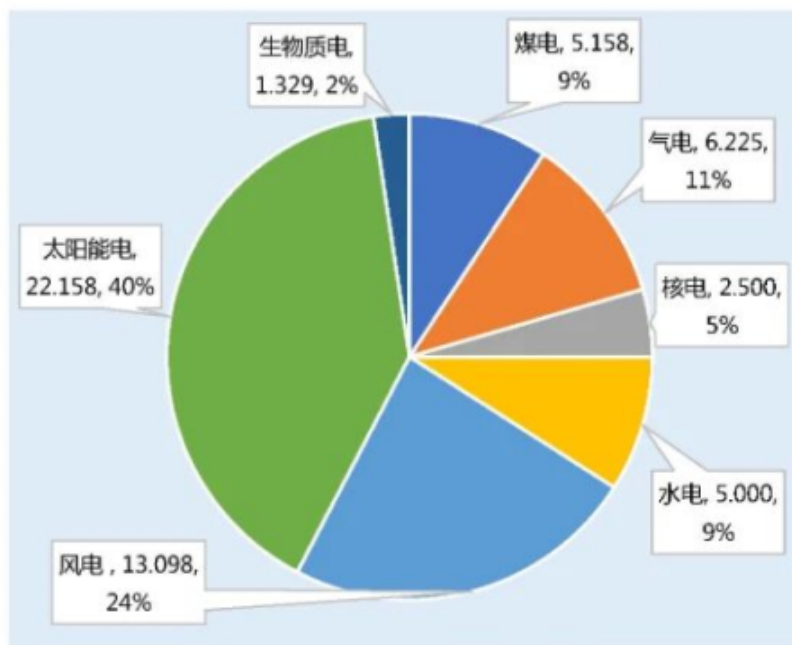
2050年我国能源电力发展估算

2050年

能源消费总量**50亿tce**

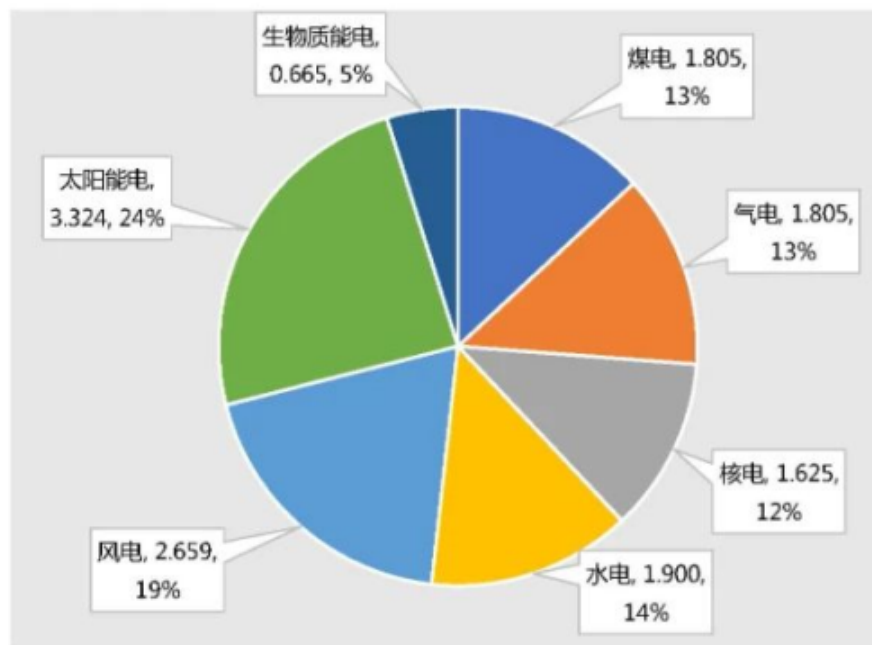
非化石能源消费比重**59%**

人均年用电**10074kWh**



年末装机容量：**55.47亿kW**

非化石能源装机占比：**79.5%**，新能源装机占比：**66.0%**



年总发电量：**13.78万亿kWh**

非化石能源发电量占比：**73.8%**，新能源发电量占比：**48.2%**

国际能源研究中心

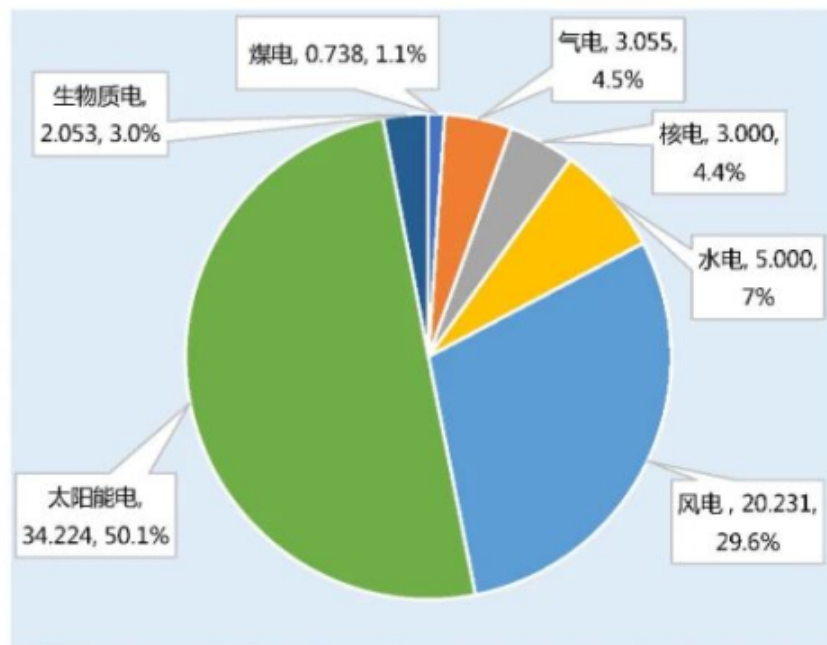
2060年我国能源电力发展估算

2060年

能源消费总量**46亿tce**

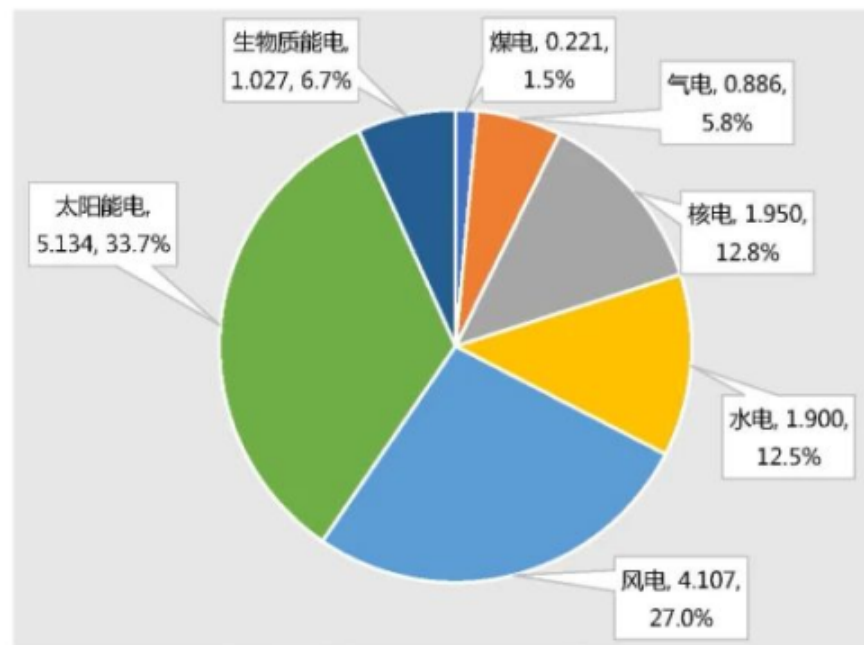
非化石能源消费比重**89%**

人均年用电**11538kWh**



年末装机容量：**68.30亿kW**

非化石能源装机占比：**94.4%**，新能源装机占比：**82.7%**



年总发电量：**15.22万亿kWh**

非化石能源发电量占比：**92.7%**，新能源发电量占比：**67.4%**

国际能源研究中心

情景分析结果表明：

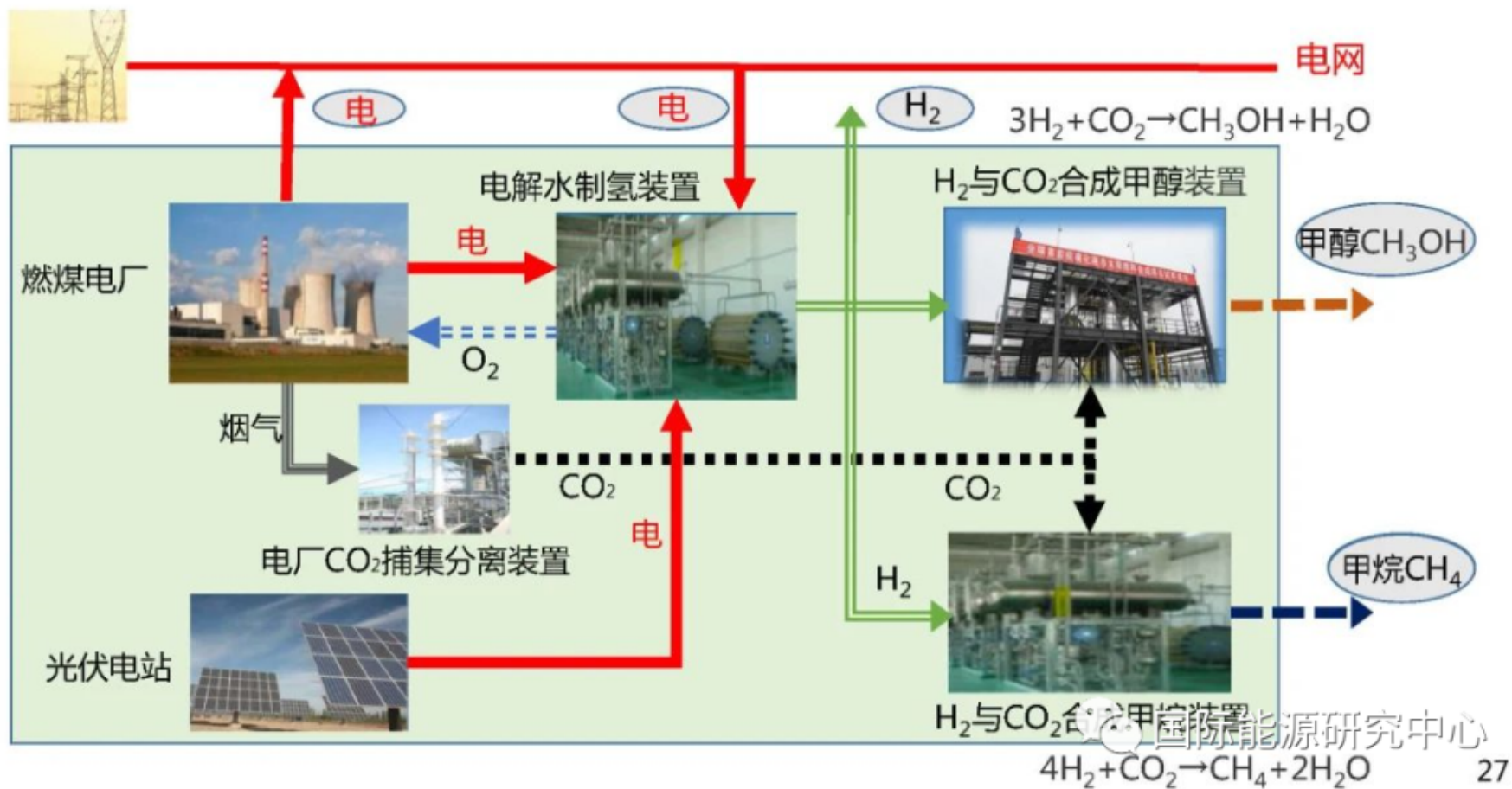
- 2030年**风能+太阳能总装机16.1亿kW**，符合12亿kW以上的目标要求；
- 2021-2025年“十四五”期间**单位GDP能耗降低15.5%**，**单位GDP二氧化碳排放降低21.4%**，下降幅度分别超过“十四五”规划纲要设置的**13.5%、18%**指标要求；
- 能源系统**CO₂排放**于2027年达峰，电力系统（煤电+气电）**CO₂排放**于2025年达峰；2060年能源系统**CO₂排放量9.5亿t**，约为2025年水平的**10%**，电力系统**CO₂排放量5.5亿t**，为2025年峰值的**13.8%**；
- **2050年新能源（非水可再生能源）发电量比重**达到48.2%，为2060年实现碳中和目标创造基础条件；
- **2060年煤电+气电装机共约3.8亿kW**，其中**煤电装机0.7亿kW**，占全国总装机的**1.1%**；**煤电+气电发电量共约1.1万亿kWh**，其中**煤电0.22万亿kWh**，占全国总发电量**1.5%**。应进一步研究**0.7亿煤电装机全部实现CCUS的可行性**，以及它们**提供电力系统灵活性资源**，支持高比例可再生能源电力系统的安全可靠运行的能力。

目录



- 我国能源转型的战略目标
- 新一代电力系统的主要特征、核心指标和关键技术
- 双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析
- **综合能源生产单元设想**
- 结语

综合能源生产单元 (Integrated Energy Production Unit , IEPU) 设想



综合能源生产单元 (IEPU) 设想-设备技术规范和参数 (合成甲醇)

设备类型	关键参数	参数值	备注
煤电机组	容量 (MW)	300	利用设备折旧完后的机组, 减少生产成本
	年运行时间 (h)	6000	年发电量18亿kWh
	CO ₂ 捕集量 (万t)	15	按CO ₂ 总排放量14%、捕集效率80%计算取整; 年耗电0.15亿kWh
电解槽	氢气产量 (亿Nm ³ /a)	2.29	按15万t CO ₂ 全部用于制甲醇, 约需氢气2.045万t (合2.29亿Nm ³)
	年工作时间 (h)	7000	尽量提高利用小时数, 以提高经济性
	电耗 (kWh/Nm ³)	4.2	总年耗电量约9.7亿kWh
	容量 (MW)	140	按小时产气量、氢气热值和电解效率计算取整
光伏发电机组	容量 (MW)	180	光伏发电容量与电解槽容量比1.25计算
	年运行时间 (h)	1300	年发电量2.34亿kWh, 只占电解槽耗电的24.2%
甲醇化设备*	容量 (t/a)	109000	15万tCO ₂ 全部利用可制成甲醇约10万t
	电耗 (kWh/t)	169	总年耗电量约0.184亿kWh

综合能源生产单元 (IEPU) 设想-设备容量配置及运行优化 (合成甲醇)

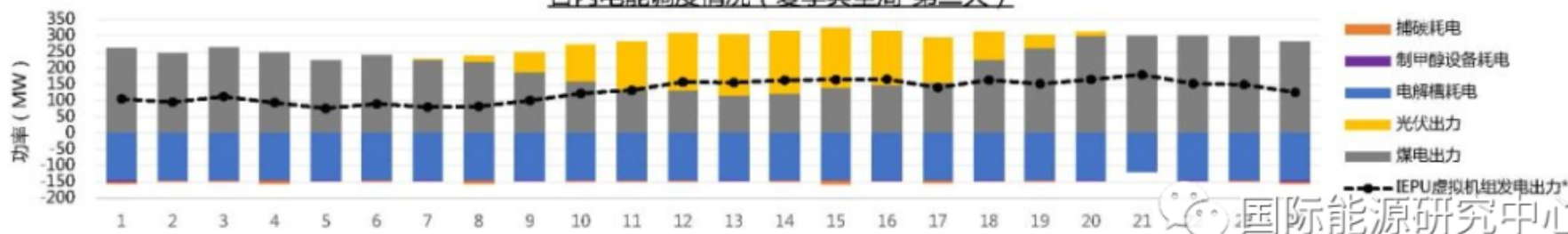
基于全年4个季节典型周数据，考虑经济成本、收益、碳补贴，优化系统设备容量配置及运行方式

- **目标：**系统净利润最大
- **约束：**能量平衡、物料质量平衡、负荷需求、风光资源约束、设备运行约束（出力上下限）等

设备容量配置及运行优化结果

设备类型	关键参数	参数值	备注
煤电机组	容量 (MW)	300	最小技术出力90MW
	年运行时间 (h)	6362	年发电量约19.1亿kWh
	CO ₂ 捕集量 (万吨)	19.9	年耗电0.192亿kWh
光伏发电机组	容量 (MW)	187	
	年运行时间 (h)	2236	年发电量4.18亿kWh，约占电解槽耗电33%
电解槽	容量 (MW)	146	
	氢气产量 (亿Nm ³ /a)	2.97	年耗电12.5亿kWh
制甲醇设备	容量 (t/a)	141431	年耗电0.24亿kWh

日内电能调度情况 (夏季典型周-第二天)

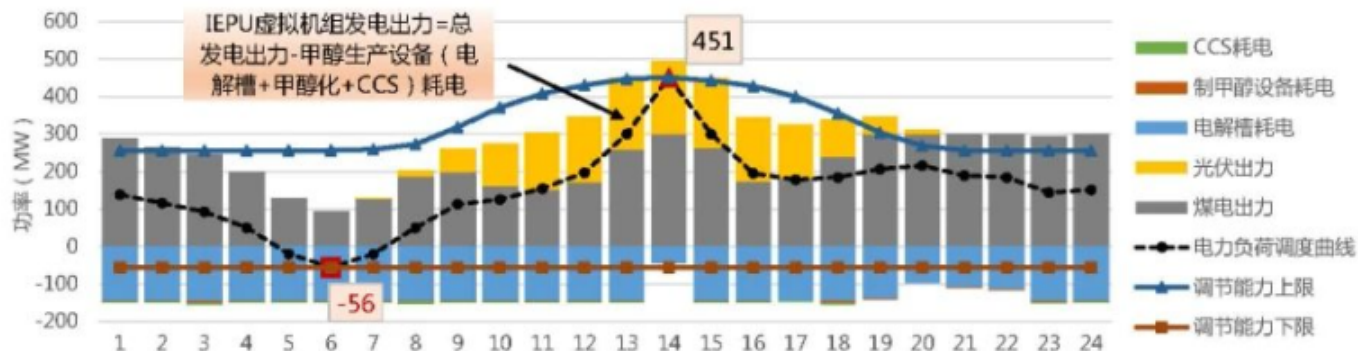


*IEPU虚拟机组发电出力=总发电出力-甲醇生产设备 (电解槽+甲醇化+CCS) 耗电

综合能源生产单元 (IEPU) 设想-灵活调节能力 (合成甲醇)

确定设备容量，考虑运行成本、收益、碳补贴，给定电力负荷调度曲线，开展日调度运行优化，测试IEPU虚拟发电机组灵活调节能力

灵活调节能力示意图-日内电能调度曲线



设备容量配置

设备类型	关键参数	参数值	备注
煤电机组	容量 (MW)	300	最小技术出力90MW
光伏发电机组	容量 (MW)	187	
电解槽	容量 (MW)	146	
制甲醇设备	容量 (t/a)	141431	年耗电0.24亿kWh



IEPU虚拟发电机组日内24小时调节能力

- 出力上限=煤电机组额定功率+光伏发电功率-电解水制氢制甲醇装置出力下限
- 出力下限=煤电机组最小出力限制-电解水制氢制甲醇装置出力上限

目 录



- 我国能源转型的战略目标
- 新一代电力系统的主要特征、核心指标和关键技术
- 双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析
- 综合能源生产单元设想
- 结语

结语

- 1、“双碳”目标下我国能源电力系统发展一种情景的初步分析结果表明，在电力系统中**大力发展可再生能源、显著提高电能在终端能源消费中比重，从而大幅度提升非化石能源在一次能源消费中比重、提高能源利用效率、大幅降低能源消耗和CO₂排放量**，成为“双碳”目标实现的重要保证。
- 2、**燃煤发电**的碳排放约占能源生产和消费系统总碳排放量的30-40%以上，2060年前实现碳中和目标，使煤电转型的任务更为紧迫。**探索**在能源转型过程中融合既有煤电及CO₂捕集技术、可再生能源发电及电制氢制甲烷/甲醇技术，构建综合能源生产单元（IEPU），使之成为能源电力系统中一种具有**多种能源产品**和**灵活性调节功能**的**新成员**，期望能作为**煤电低碳/无碳转型路径方案**的一种选择。