



通往极高比例可再生能源的电力系统之路

CPEM全国电力设备管理网
微信公众号: CPEM

报告人：乔颖 副教授

清华大学（电机工程与应用电子技术系）

日期：2022.5.16



目录

CONTENT

01 气候变化与能源转型

02 新能源快速发展

03 极高比例可再生能源电力系统

01

气候变化与能源转型

CPEM全国电力设备管理网
微信公众号：CPEM

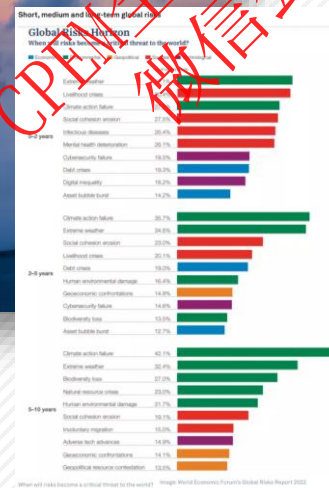
1.1

气候变化的深远影响

联合国气候工作组“越来越明确的证据表明，采取气候行动的时间窗口正在关闭。2030年必须碳达峰。”



全球经济论坛“极端天气与气候行动失败正在成为人类中长期发展的最大焦虑。”



习近平：...中国将生态文明理念和生态文明建设纳入中国特色社会主义总体布局，坚持走生态优先、绿色低碳的发展道路。中方宣布力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和...



拜登：希望修正特朗普的“错误”。世界各国都应该重视气候变化问题，并在此基础上团结一致，在尽可能短的时间内用实际行动解决这一问题。



古特雷斯：我们必须加快行动，以保持1.5度的目标。我们仍在敲响气候灾难的大门。现在是进入紧急状态的时候了——否则我们达到净零的机会将是零。

1.1

气候变化的深远影响

以平均气温为代表的全球气候变化对人类未来产生深远的影响。



联合国科技学术组织

近半个世纪全球有记载的灾难，气候相关的占据约占50%。

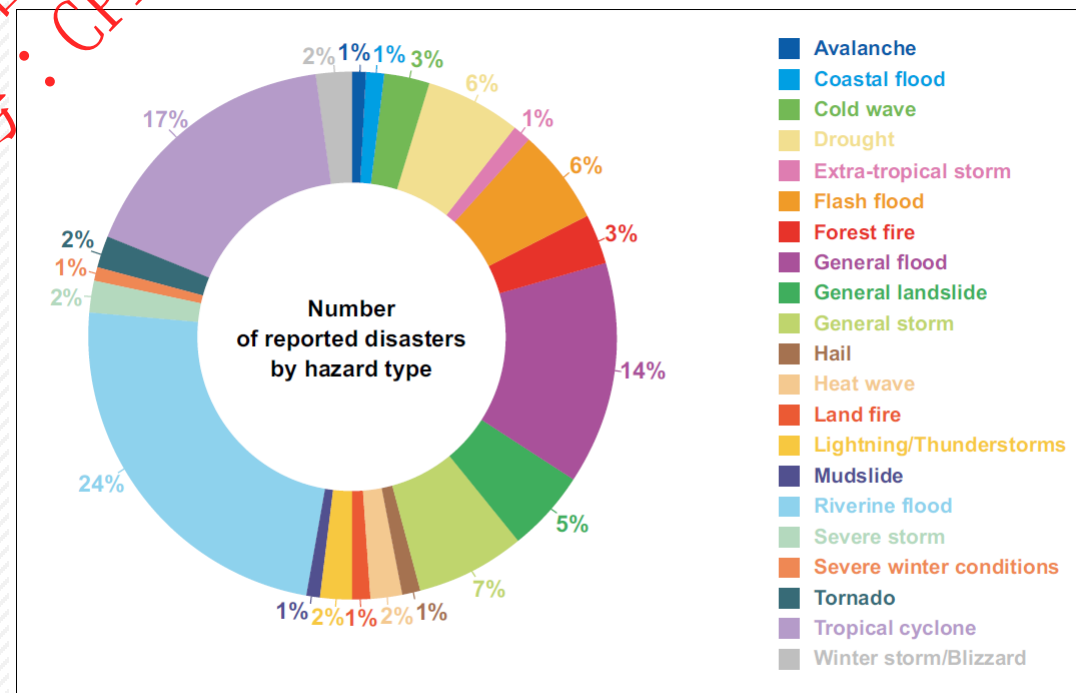
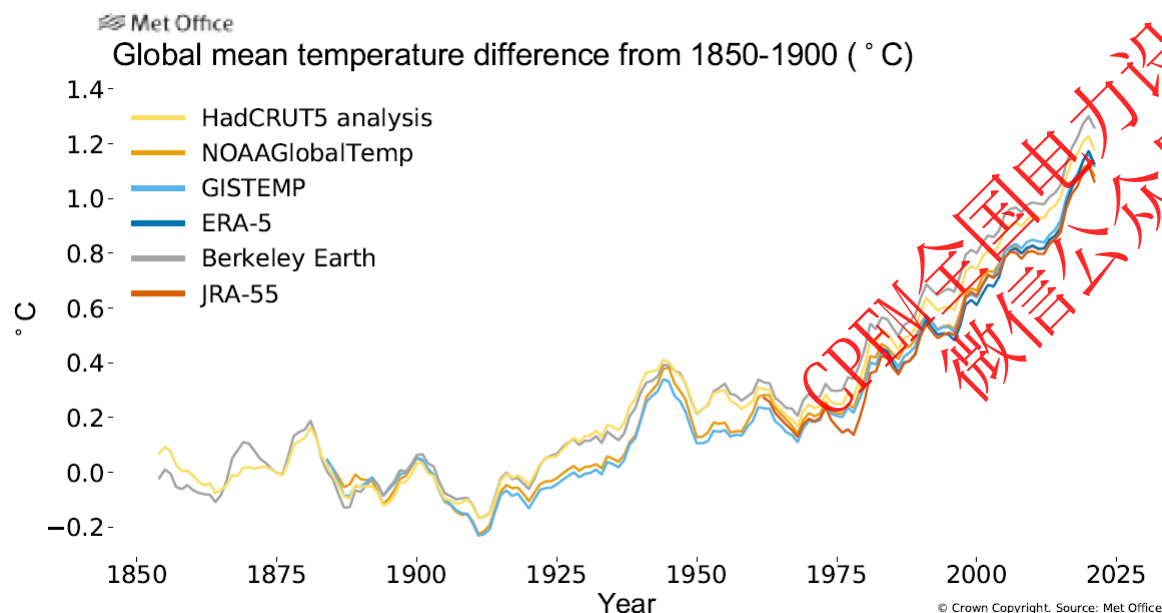
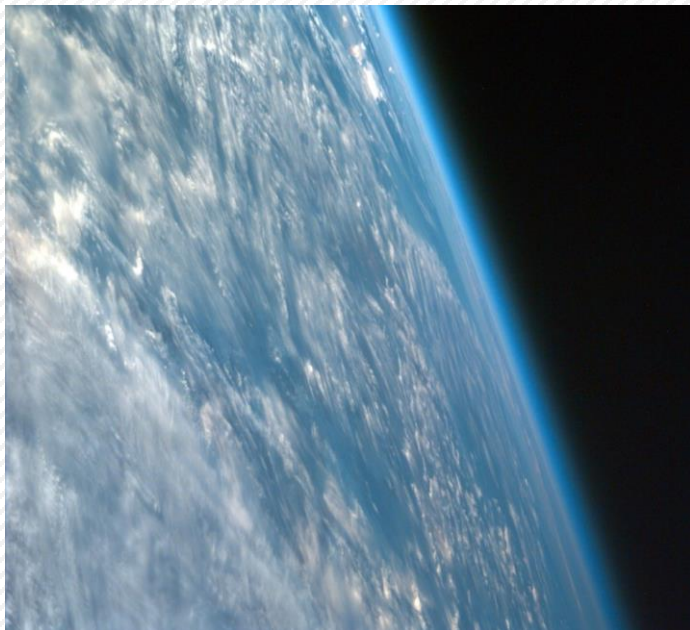


Figure 5. Distribution of number of disasters globally covering the period 1970–2019 (WMO, 2021)

工业革命以来，全球平均气温上升了1.2℃，已逼近1.5℃的生态极限。

1.2 为什么是1.5°C?



大气层是地球生命的保护膜

温度、水循环、陨石撞击...

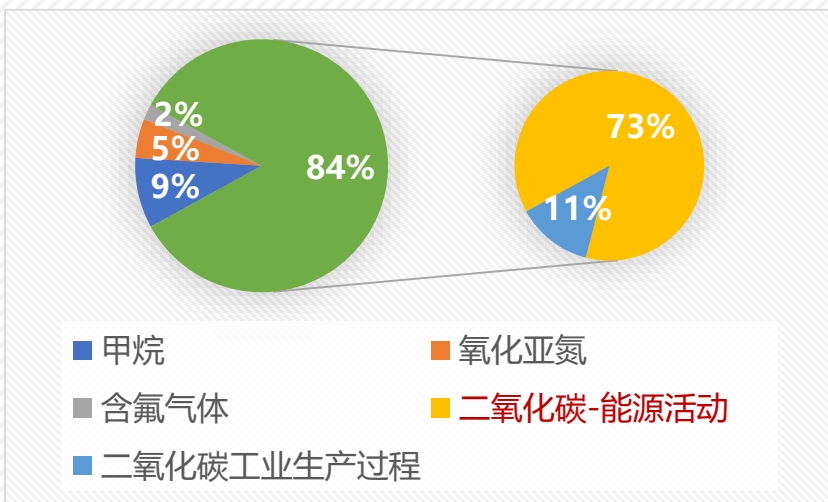
月球：昼127°C，夜-183°C

地球：若没有大气层，地表均温-18°C，目前地表均15°C



大气温室效应

大气对太阳长波辐射和地表短波辐射不同的吸收和反射率



温室气体排放构成

1、水汽

占整体温室效应的60-70%

2、二氧化碳

占整体温室效应的26%，可在大气中存留200年

1.2 为什么是1.5°C?

我们正在快速逼近1.5°C极限…



2021年加州特大山火



2021年德国超强洪水



实况排行	
6小时降水	6小时气温
来源于2418个国家级气象观测站	
07月20日14时-19时	
1 郑州 - 河南	382.4 mm
2 安阳 - 河南	147.2 mm
3 新密 - 河南	113.2 mm
4 汝州 - 河南	83.3 mm
5 淇县 - 河南	69.8 mm
6 滑县 - 河南	66.5 mm
7 新乡 - 河南	66.1 mm
8 湘阴 - 湖南	65.6 mm
9 获嘉 - 河南	58.1 mm
10 武陟 - 河南	56.3 mm

2021年河南特大暴雨

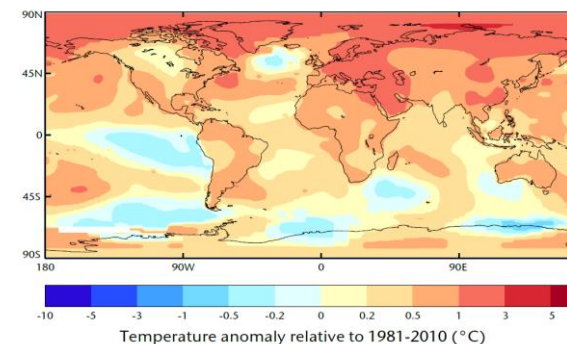


Figure 2. 2017-2021 five-year average temperature anomalies relative to the 1981-2010 average. Data is from NASA GISTEMP v4. Date updated to July 2021

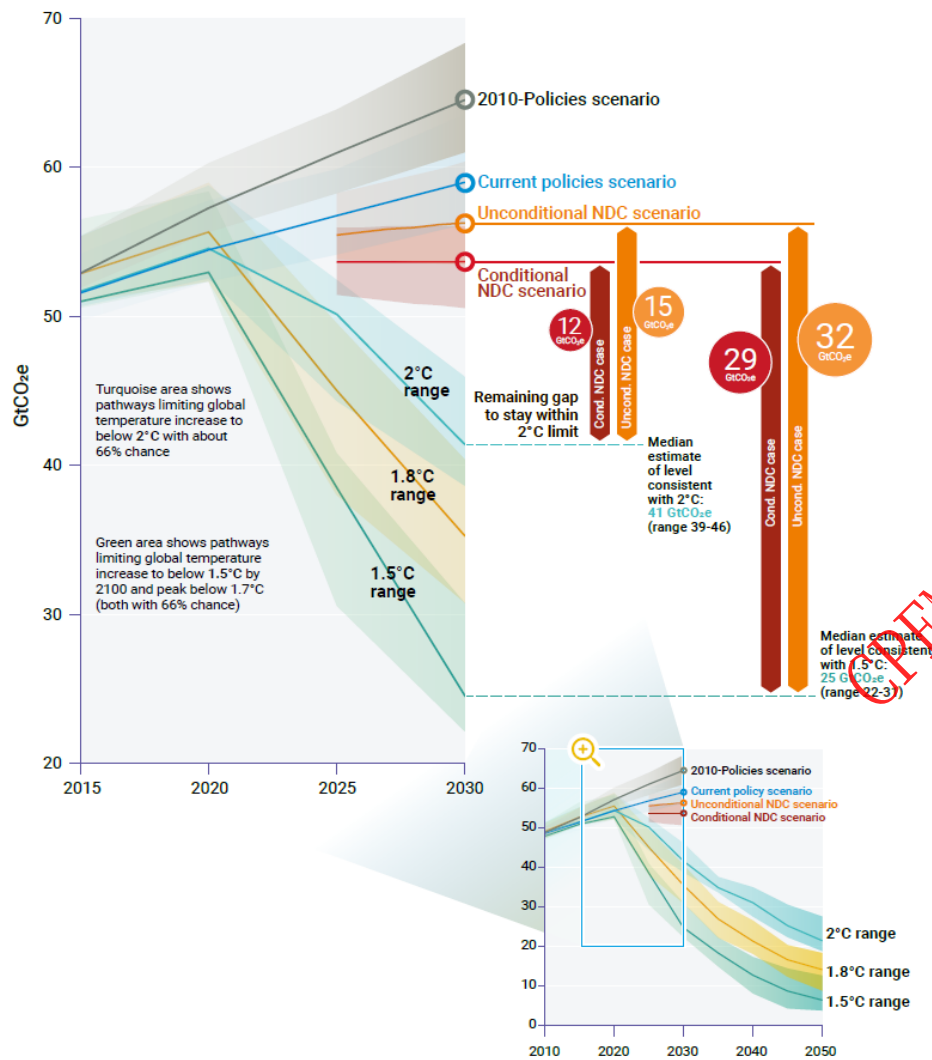
2021年席卷欧洲的极端高温、横扫美国的寒潮…

“气象难民”：全球第一个气候移民国家图瓦卢

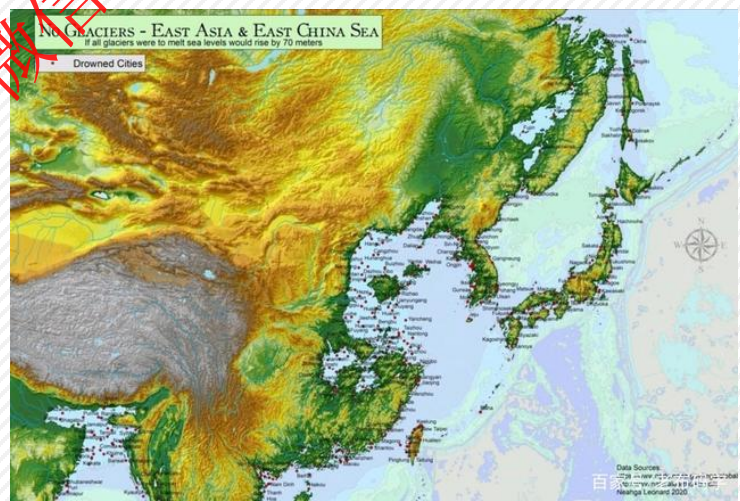
1.2

为什么是1.5°C?

机会窗口正在关闭，如果错过…



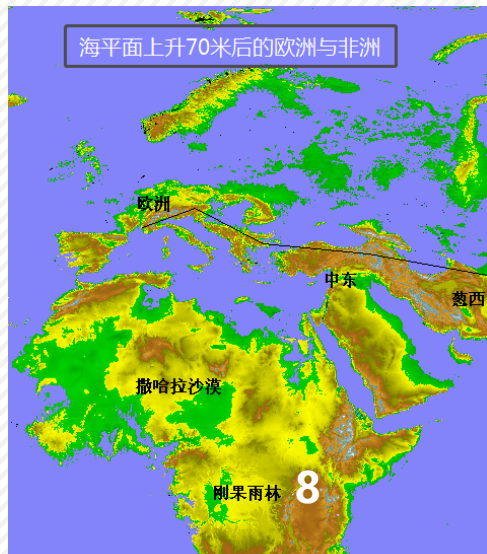
曾经的20个冬奥会举办国，也许只有6个还可能再次举办



2034北极将出现无冰之夏



海平面上升70m后的中国和欧洲

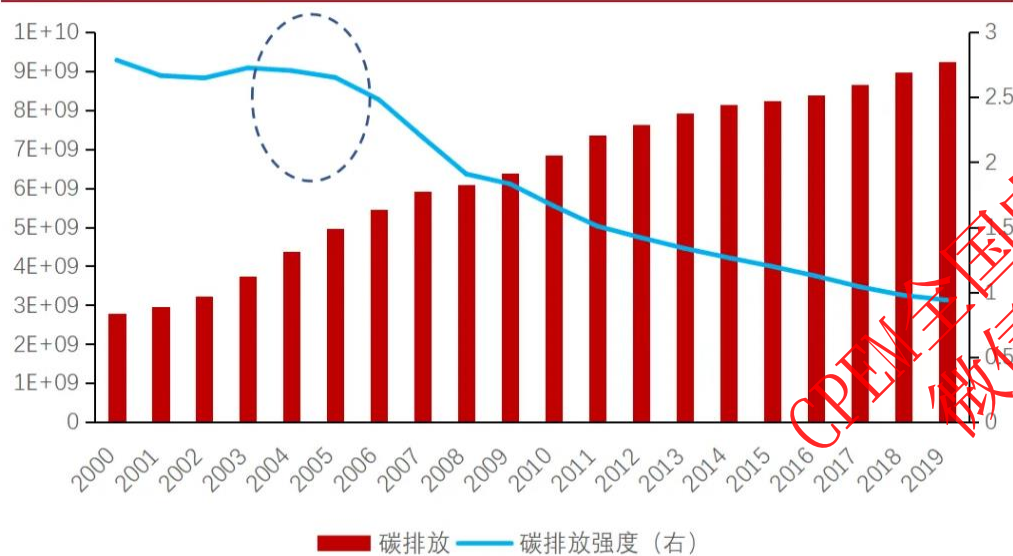


1.3

能源转型与绿色发展权

从2014年以来，我国是当今世界最大的工业国，也是最大的碳排放国，2021年约占全球27%。

图 1：我国碳排放强度不断降低



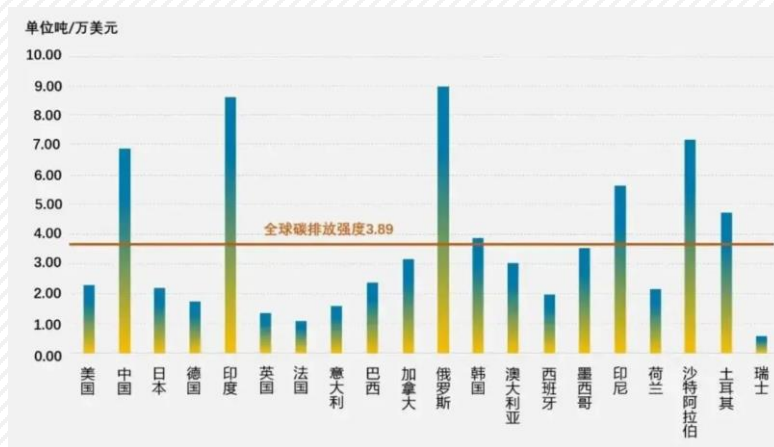
资料来源：国家统计局，招商证券。

我国将在较长一段时间内维持“工业国”发展定位。以低碳环保、节能减排技术来降低自身碳减排。

不同国家的碳达峰和碳中和现状/目标

国家	碳达峰	碳中和
英国	1970s已达到	2050
德国	1970s已达到	2050
美国	2007	2050
日本	2013	2050
韩国	未达峰	2050
中国	2030	2060

碳排放权与社会经济发展成本密切相关，碳达峰在逐步转向高附加值产业结构后。碳排放权已和绿色发展权紧密结合在一起。



世界主要国家碳排放强度对比

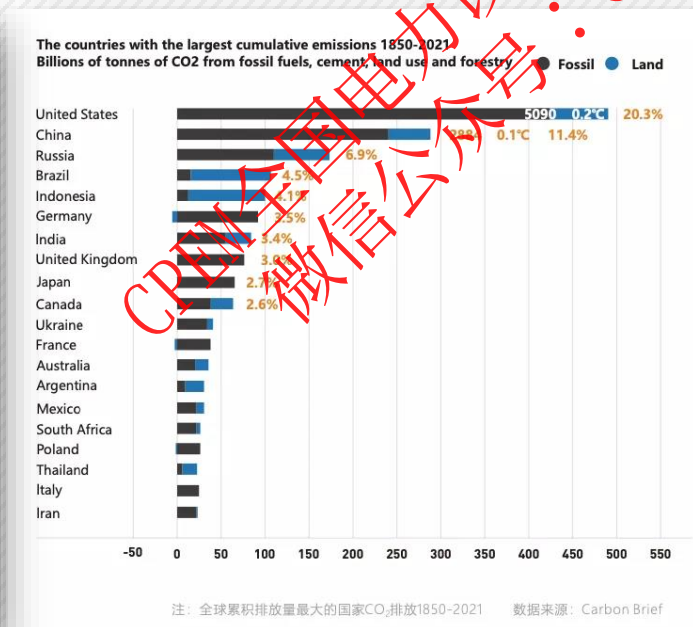
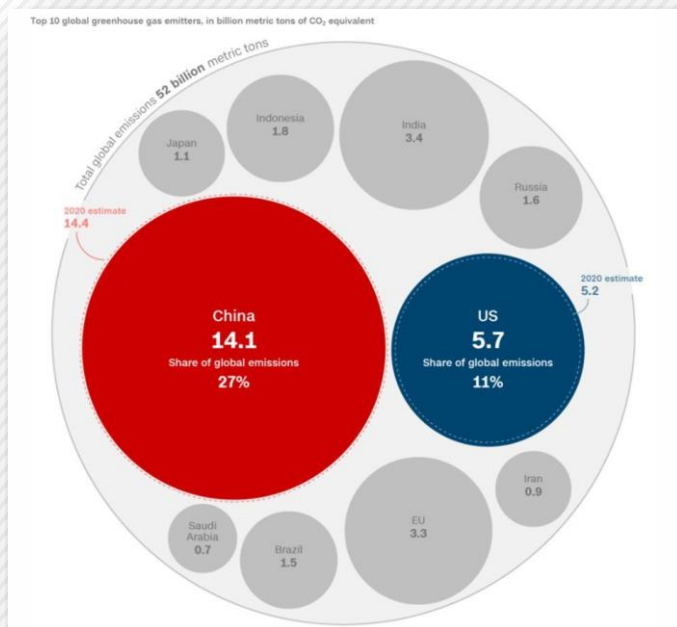
1.3

能源转型与绿色发展权

见微知著：从关于碳排放衡量指标的“文字游戏”看碳排放权之争

联合国气候大会（COP）、巴黎协定、京都议定书…

~2014年，**总碳排放**（世界第一）、**人均碳排放**（超过欧盟）、**历史总碳排放**（第二）、**人均历史碳排放**



The average American is responsible for more emissions than the average person in China

Gas-guzzling road transport and flights contribute to higher per capita emissions in the US.

Annual emissions per capita, metric tons of CO₂ equivalent, 2019



中国的人均碳排放仍不足美国的60%。

中国是当今最大的碳排放国(0.1°C)，美国是历史上最大的碳排放国(0.2°C)。

1.3 能源转型与绿色发展权

金山银山就是绿水青山



CPEN全国电力设计
微信公众号

沐凡

1.4

后疫情时代

2020年疫情造成的经济停滞曾短暂的减缓了CO₂的排放，但是...

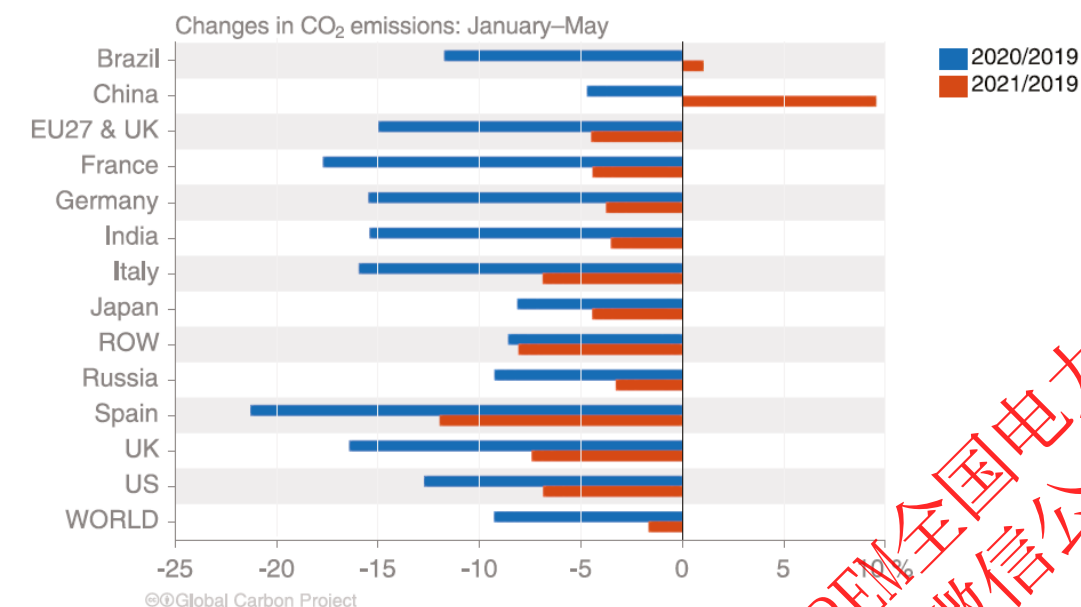
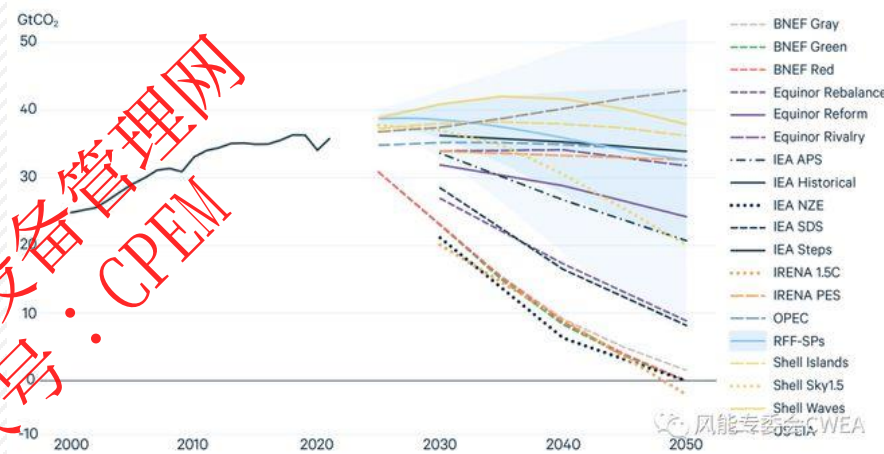


Figure 3. Changes in fossil fuel CO₂ emissions for the world and a selected group of countries for January-May in 2020 and 2021 compared with the same period in 2019 (Carbon Monitor).



多机构预测充满了不确定性...

仅去年一年，全球与能源相关的二氧化碳排放量就增长了6%，达到了历史最高水平，和煤炭有关的排放量也飙升至创纪录高位。

“气候”可能是中美所剩不多的合作话题。古特雷斯在COP26闭幕式上“我欢迎美国和中国在格拉斯哥这里达成的协议”，但似乎双方再也没有愉快的交谈

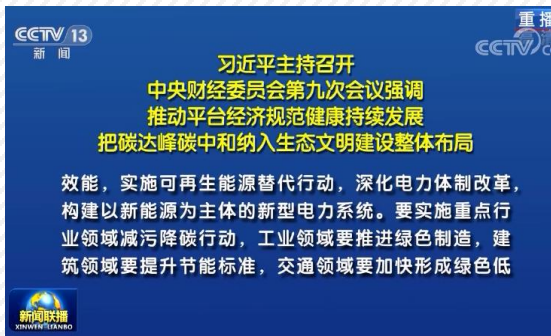
1.4 后疫情时代

地缘政治正在重构气候议题…巨大的不确定性

2015: 气候峰会



2021: 双碳布局



中国：一步一个脚印

美国：反复横跳



2008
IN

2016

OUT



2020
IN



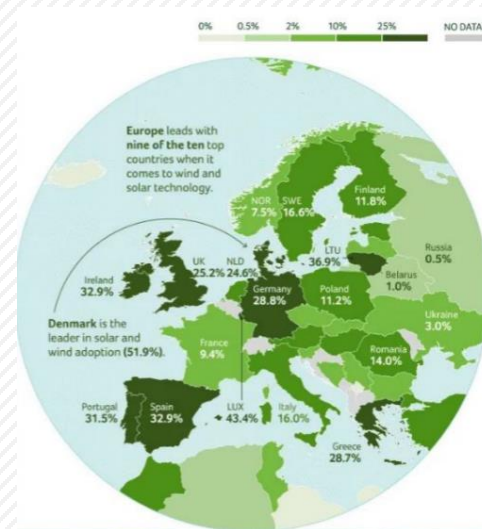
2024

??

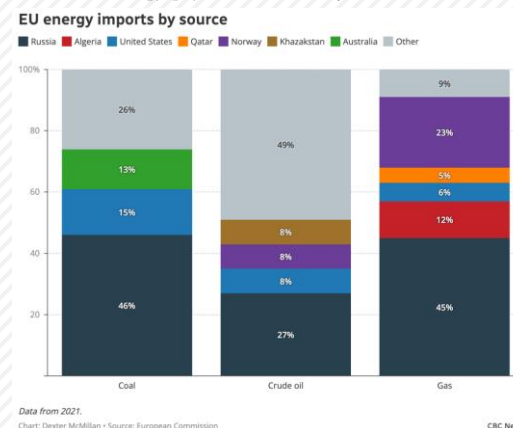


“中美欧”大三角的抉择

- ❑ 弃核、去煤炭
- ❑ 激进风光等可再生能源
- ❑ 天然气作为过渡



❑ 代价是能源安全…



欧洲能源进口来源，蓝黑色来自俄罗斯

欧洲：发展中试错

02

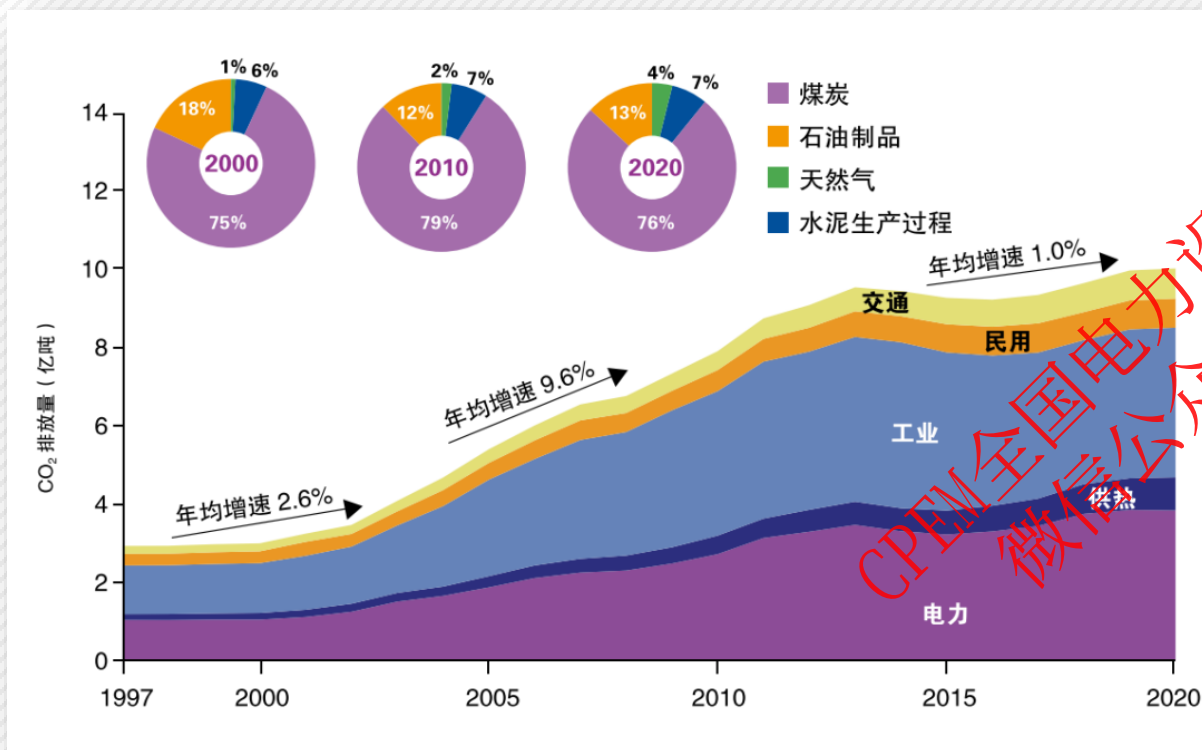
新能源快速发展

CPEN全国电力设备管理网
微信公众号：CPEN

2.1

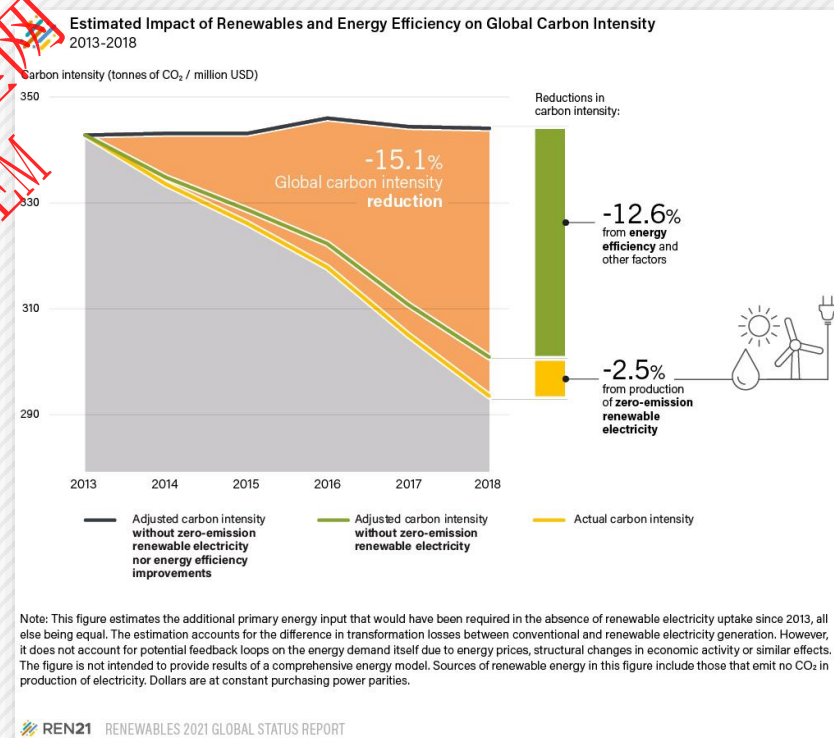
为什么是新能源

我国电力部门是最大的碳排放部门，约占总排放的40%。



1997-2020年中国二氧化碳排放趋势，来源《中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告（2021）》

近5年全球碳排放强度下降了约15%，其中83%来自能效提高，16%来自零碳能源。



零碳能源是电力能源供给侧的主要途径。

补充：名词解释

● 新能源发电

- 利用新的能源发电和新型发电技术

● 可再生能源发电

- 利用可再生能源进行发电。可再生能源一般包括太阳能、风能、地热能、海洋能、生物能，小水电和燃料电池发电也归入其中
- 流行的说法是新能源发电，更准确的说法是可再生能源发电中的“风能、太阳能发电”

● 分布式发电（DG）

- 指功率不大（一般几十kW到几十MW）、建设在负荷中心附近的、模块式采用先进信息控制技术的、清洁环保、经济、高效、可靠的自主智能发电形式。

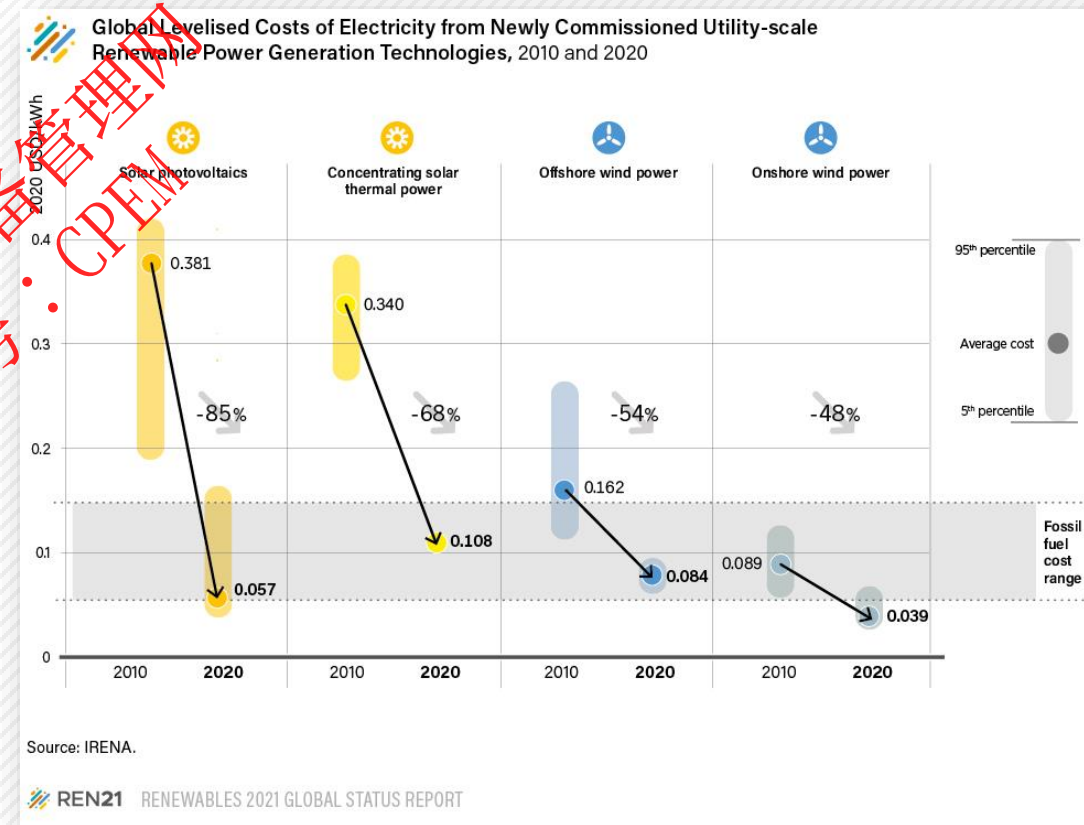
2.1

为什么是新能源

新能源发电是目前能源供给侧最具技术经济确定性的路线

零碳能源

- 已成熟低廉的但装机有上限
 - 水电，已勘探完毕。除雅鲁藏布江水系外，均已列入近期开发计划。
 - 第三代核聚变，沿海规划已布局完毕。内陆核电启动存在巨大争议。
- 未来技术充满不确定性
 - 核聚变，能够点亮人造太阳100秒，停留在“再过20-50年就成熟”的传说里。
 - 煤电+CCS，还在燃烧碳，只能作为补充。
- 风电、光伏、还有储能，最具技术经济确定性的路线



近10年，光伏发电和风电成本降低50-90%，并且还处于下降通道中。

2.2

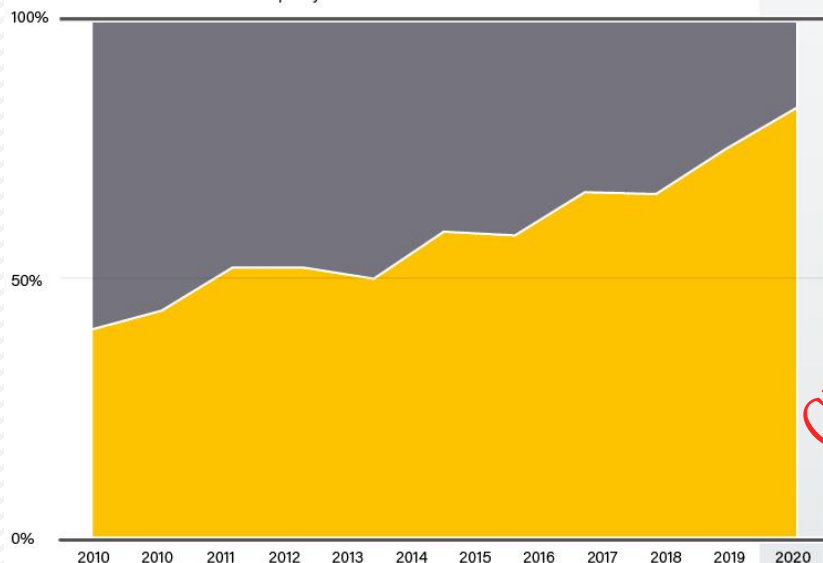
新能源的快速发展

近10年全球范围内新增发电装机逐步以可再生能源为主。

近5年新增可再生能源主要以光伏、风电为主。

Shares of Net Annual Additions in Power Generating Capacity
2010-2020

Share in Additions to Global Power Capacity



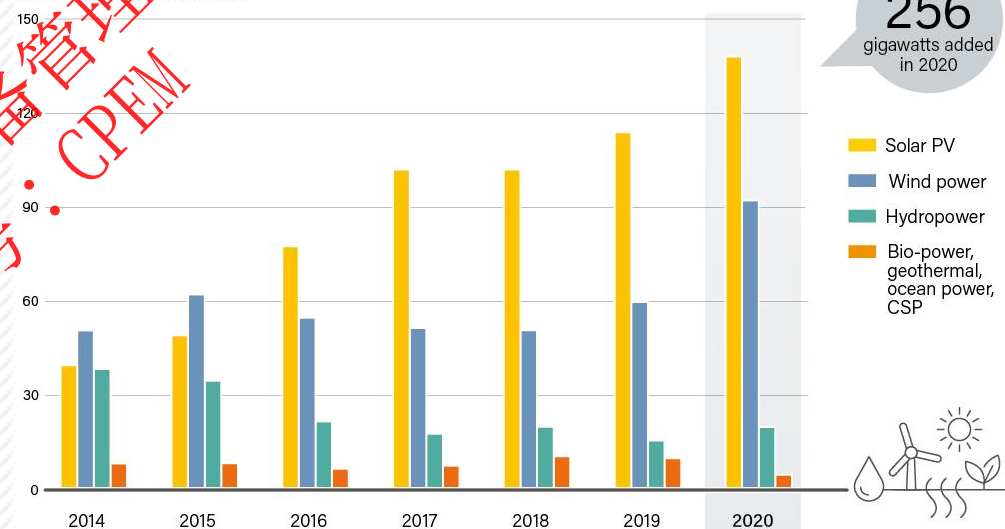
83%
renewables in
net additions

■ Non-renewable share
■ Renewable share

REN21 RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT

Annual Additions of Renewable Power Capacity
by Technology and Total, 2014-2020

Additions by technology (Gigawatts)



More than
256
gigawatts added
in 2020

Note: Solar PV capacity data are provided in direct current (DC). Data are not comparable against technology contributions to electricity generation.

REN21 RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT

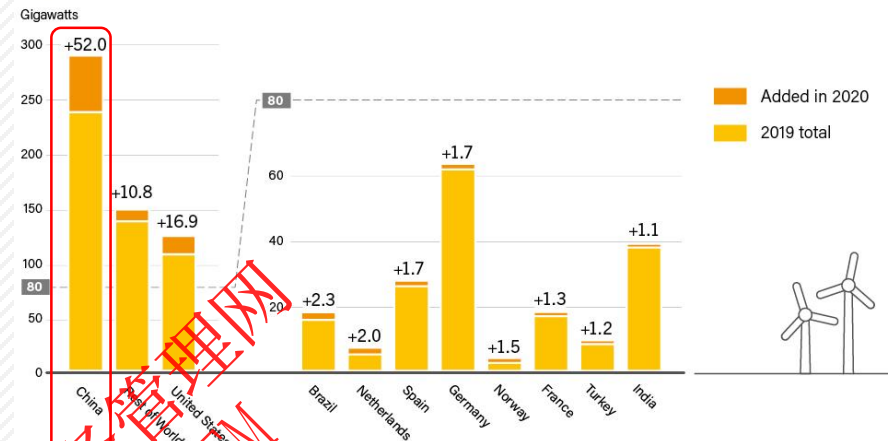
2.2

新能源的快速发展

中国的快速发展有目共睹。这是近10年
可再生能源的新增装机..

风电

Wind Power Capacity and Additions
Top 10 Countries for Capacity Added, 2020

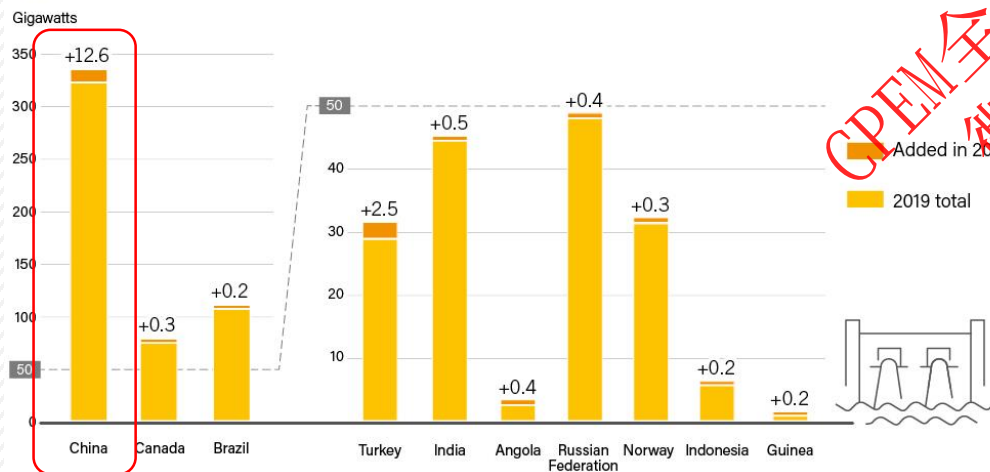


Note: Numbers above bars are gross additions, but bar heights reflect year-end totals. Germany's net additions were slightly below those of Norway.

REN21 RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT

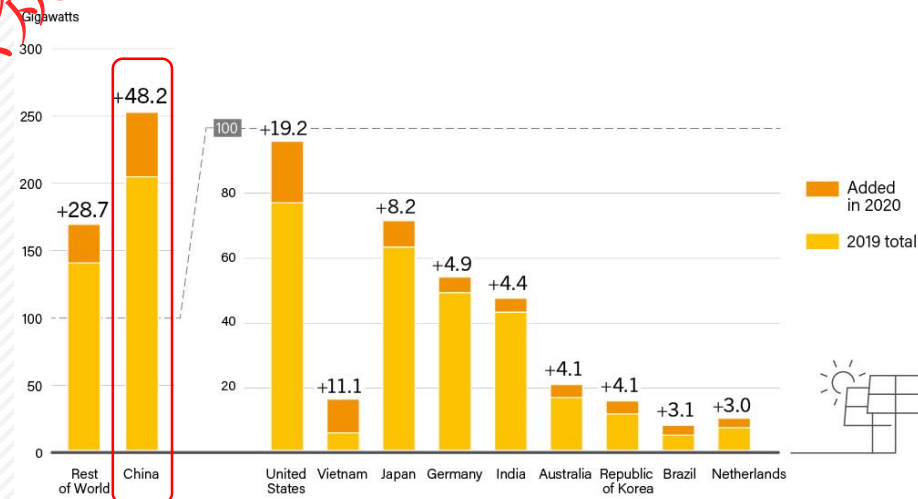
水电

Hydropower Capacity and Additions
Top 10 Countries for Capacity Added, 2020



REN21 RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT

Solar PV Capacity and Additions
Top 10 Countries for Capacity Added, 2020



Note: Data are provided in direct current (DC).

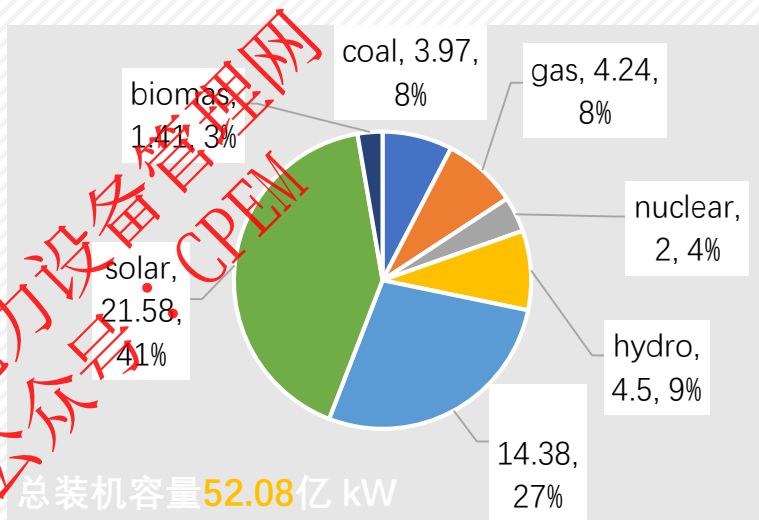
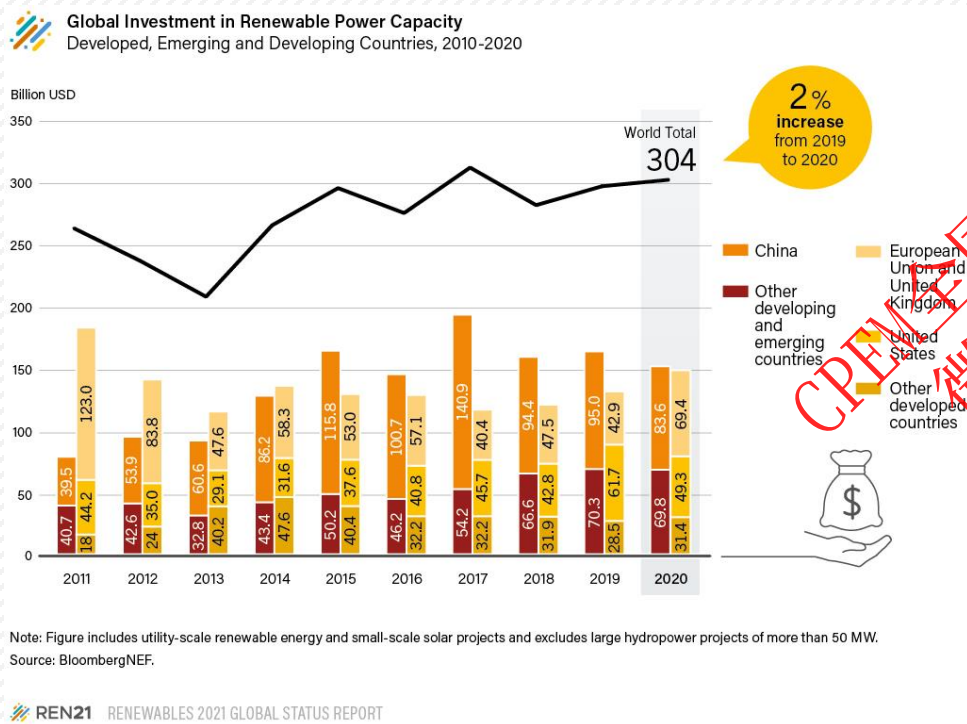
REN21 RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT

光伏

2.2

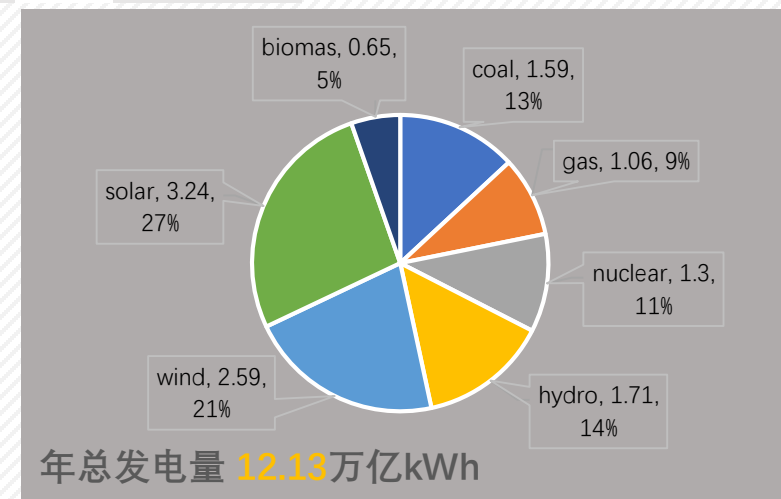
新能源的快速发展

如果不是中国，过去十年的可再生能源
发展将缺少最亮的一颗星



未来还将如此...

2050: 能源消费总量55
亿吨标煤,非化石能源占
比 50 % , 人均年用电
量9000kWh

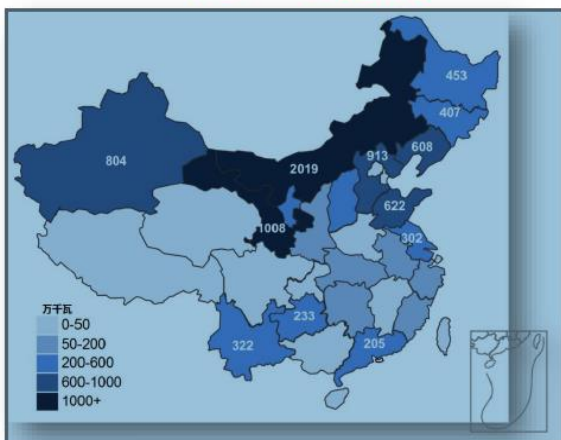


2.3

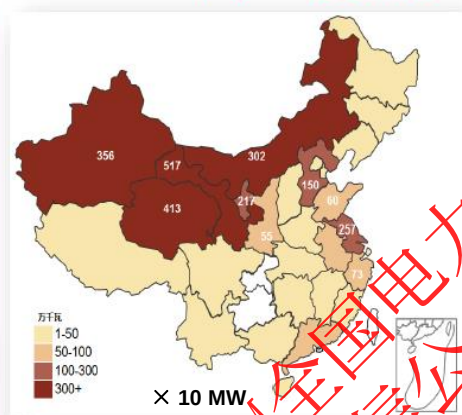
新能源也是产业发展和资源禀赋的共同选择

丰富的太阳能与风能资源，资源总量可以满足整体平衡，但分布不均匀

Wind deployment 风电布局



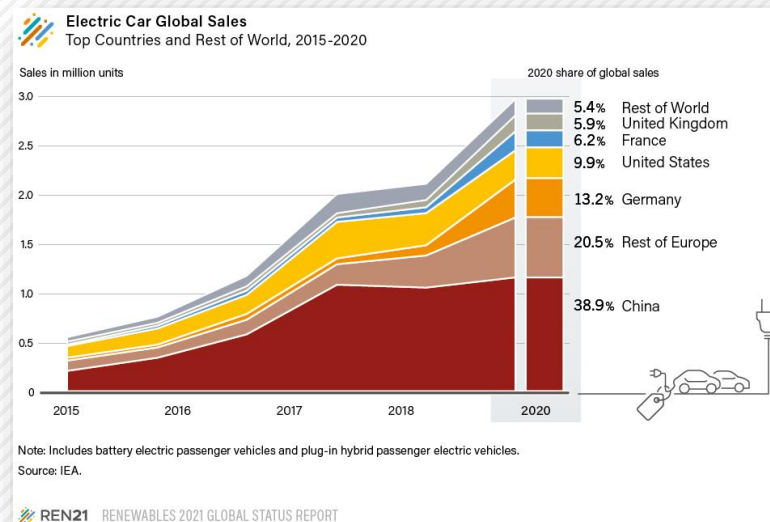
Solar PV deployment 光伏布局



From PPT of Prof. Gao Hu, China National Renewable Energy Centre (CNREC)

- ✓ 2022年风电厂商排名前10名占有6席
- ✓ 2020年中国光伏产品销售总量已经占据70%的世界市场份额
- ✓ 2022电池产业十大厂家中国占有半数以上

电动汽车



经过技术引进、自主创新和产业迭代，风、光、储为代表的新能源关键产业，我国以占据优势地位。

03

极高比例可再生能源 电力系统

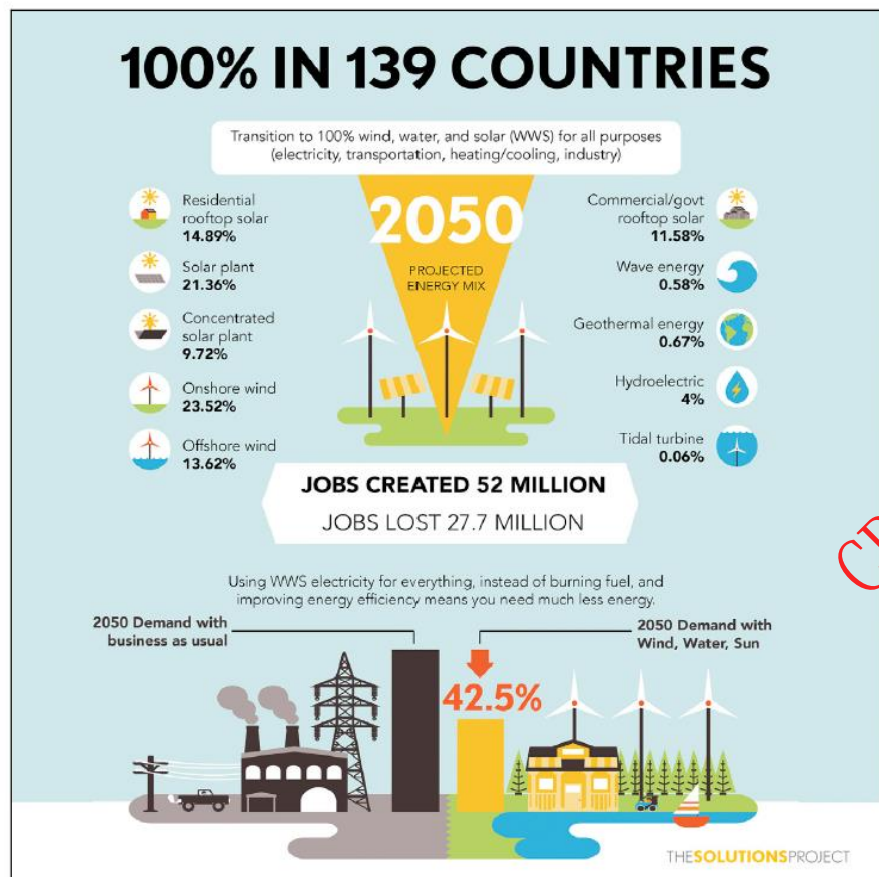
CPEM全国电力设备管理网
微信公众号：CPEM

3.1

可再生能源比例可以达到多高？

斯坦福学者认为理论上2050年139个国家都可以实现100%“风-光-水”的可再生能源。

但是考虑综合因素，主要经济体的目标是…



2021年可再生能源愿景升级

■ 2060 欧洲、美国、中国提出**100%**、**80%**、**80%** 可再生能源电量的电网



■ 2050 欧洲、美国、中国提出**100%**、**80%**、**60%** 可再生能源电量的电网

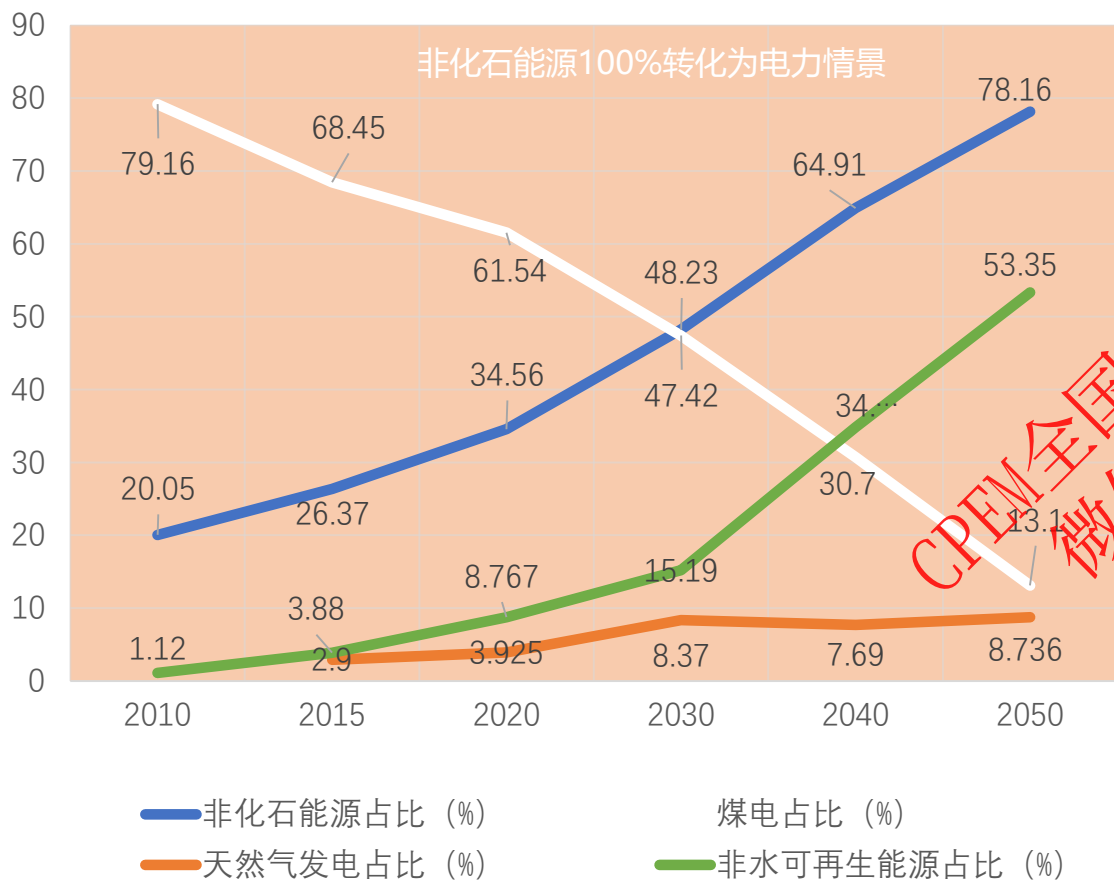
从技术难度上讲，风/光电源的电量供给能力与其装机总量之间存在失衡，提高其电量渗透率需要大幅增加装机容量…

3.1

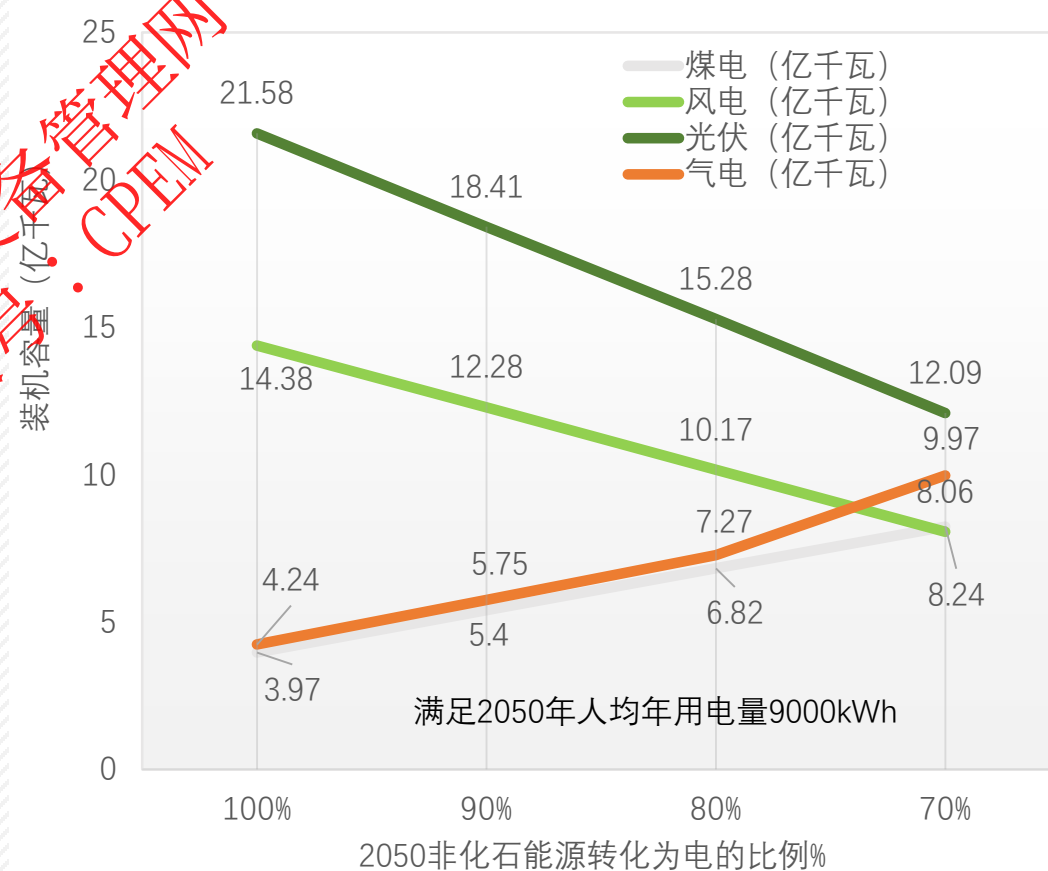
可再生能源比例可以达到多高？

国内外超过50个机构对我国的可再生能源发展开展了持续预测，这是其中一个...

2010-2050年各种能源发电量占比变化趋势



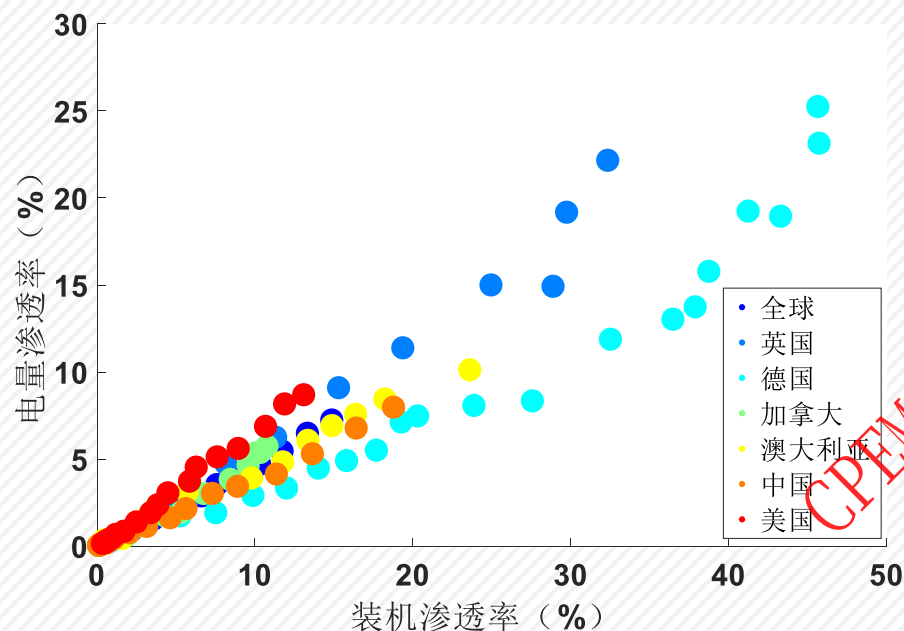
2050年非化石能源转化为电比例与发电装机容量关系



3.2

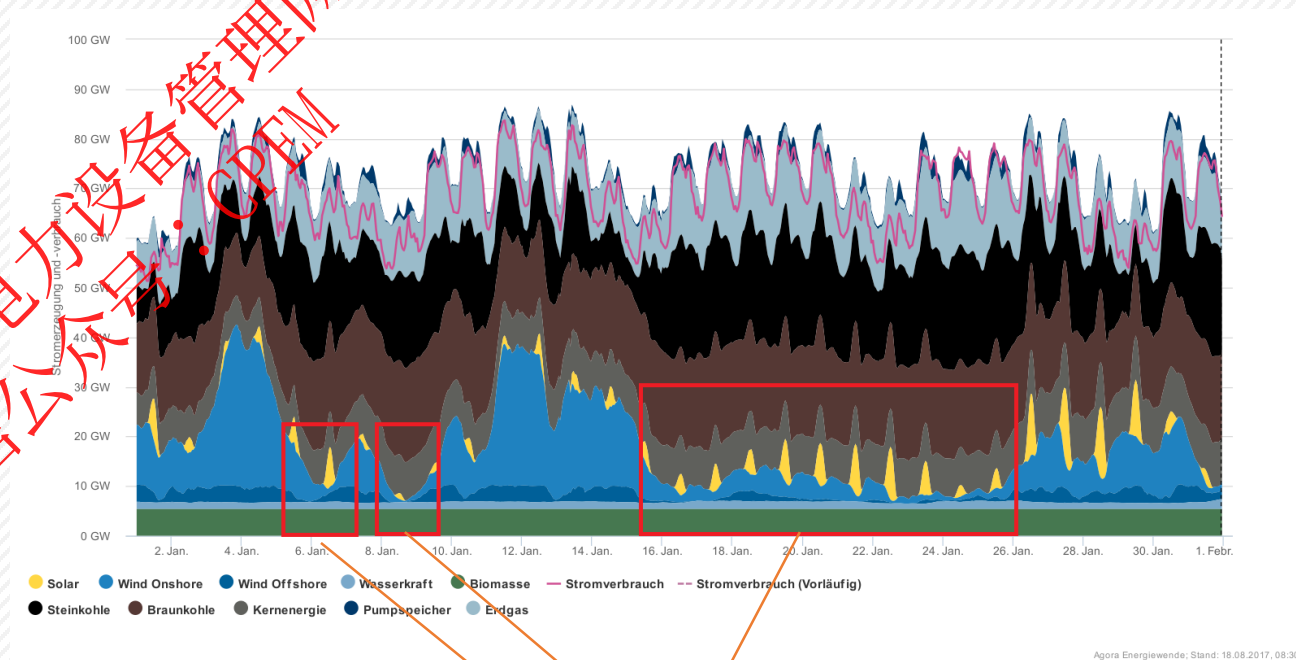
极高比例可再生能源的发电场景

提高风光电量渗透率需要大幅增加装机容量...



不同国家风/光电装机和电量渗透率发展情况

- 受天气变化过程的影响，风/光发电功率富余和紧缺的时段在时间上呈现不均匀分布的特点，可能出现连续长时段的电量富余或电量短缺，造成能量平衡的困难。

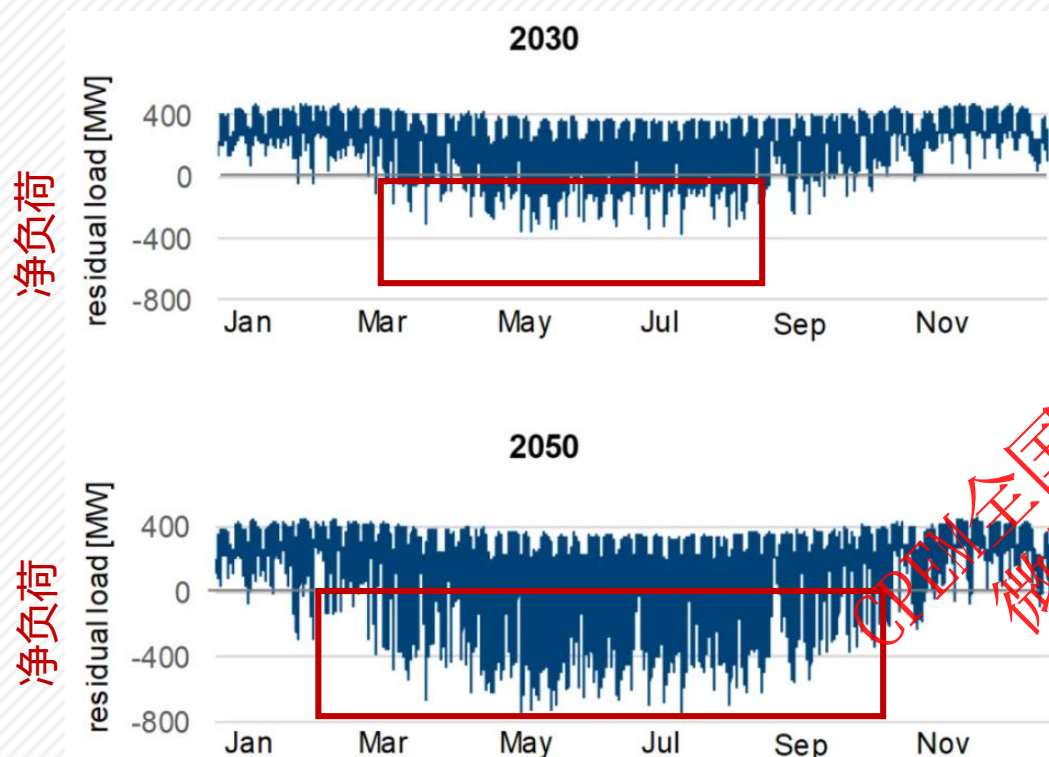


德国2017年1月出现的持续风电短缺

3.2

极高比例可再生能源的发电场景

做一个粗略概算...



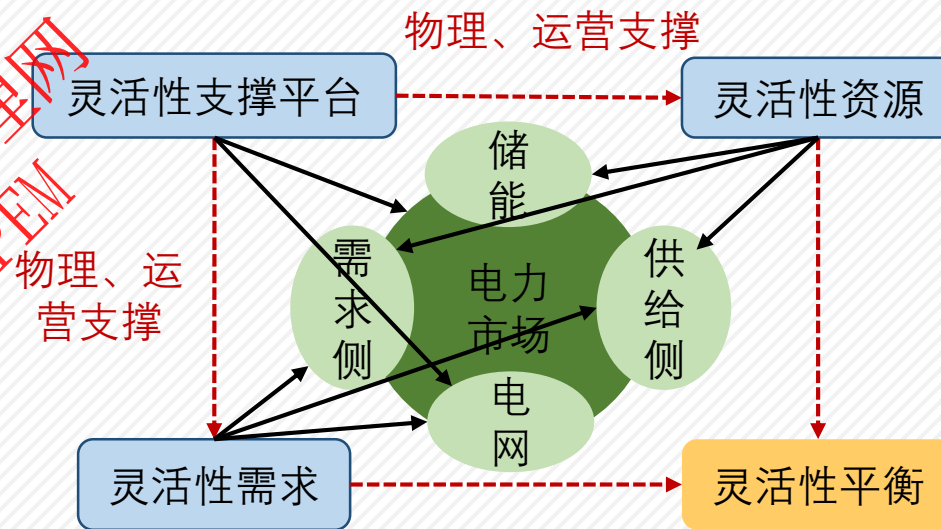
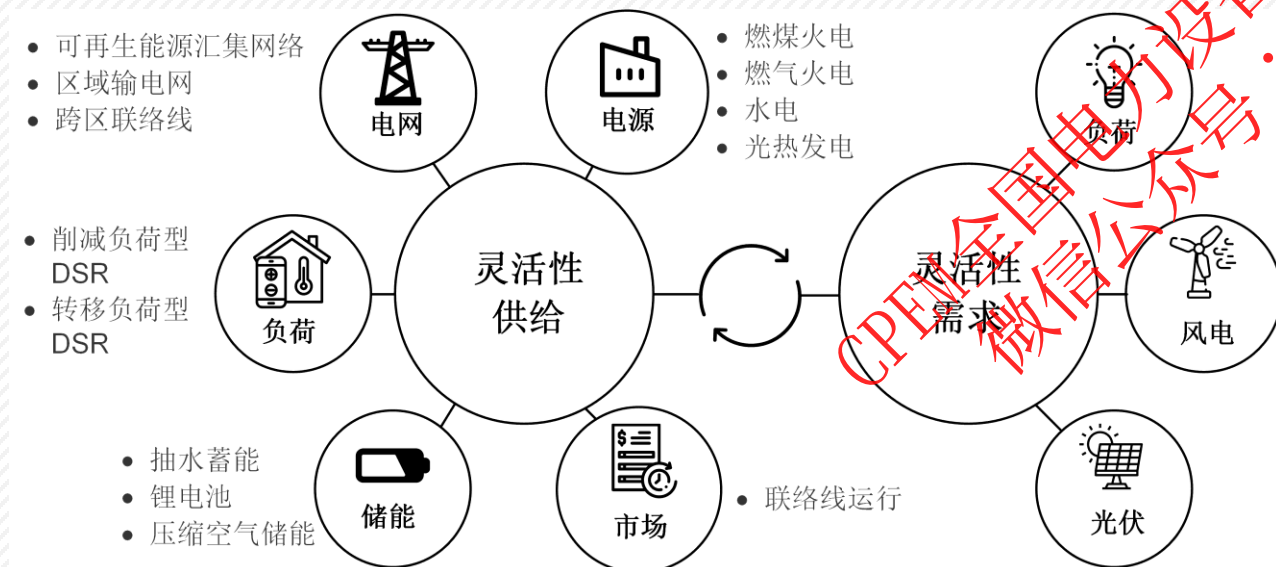
- 风电、光伏的年利用小时数很低，在2000-3000h，1000-1200h
- 当风、光电源电量渗透率达到极高水平时，装机容量可达负荷需求的2~8倍，瞬时发电功率最大可能达到负荷的1.2~5.6倍，在某些时段发电功率又远低于负荷需求，功率平衡的难度大大增加。

- 低于负荷需求的电力和电量从哪来？
- 超出负荷需求的风/光电力和电量往哪去？

德国2030和2050年净负荷曲线

我们需要调动电力系统所有的灵活性资源...

来自电源、电网、负荷、储能、市场...的调节能力，协同应对风光电源的波动性。

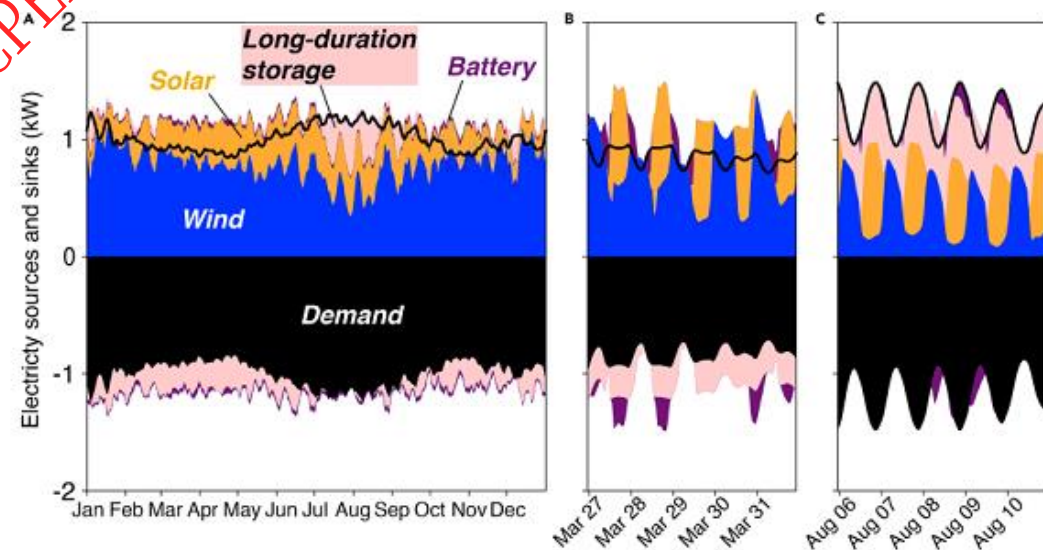
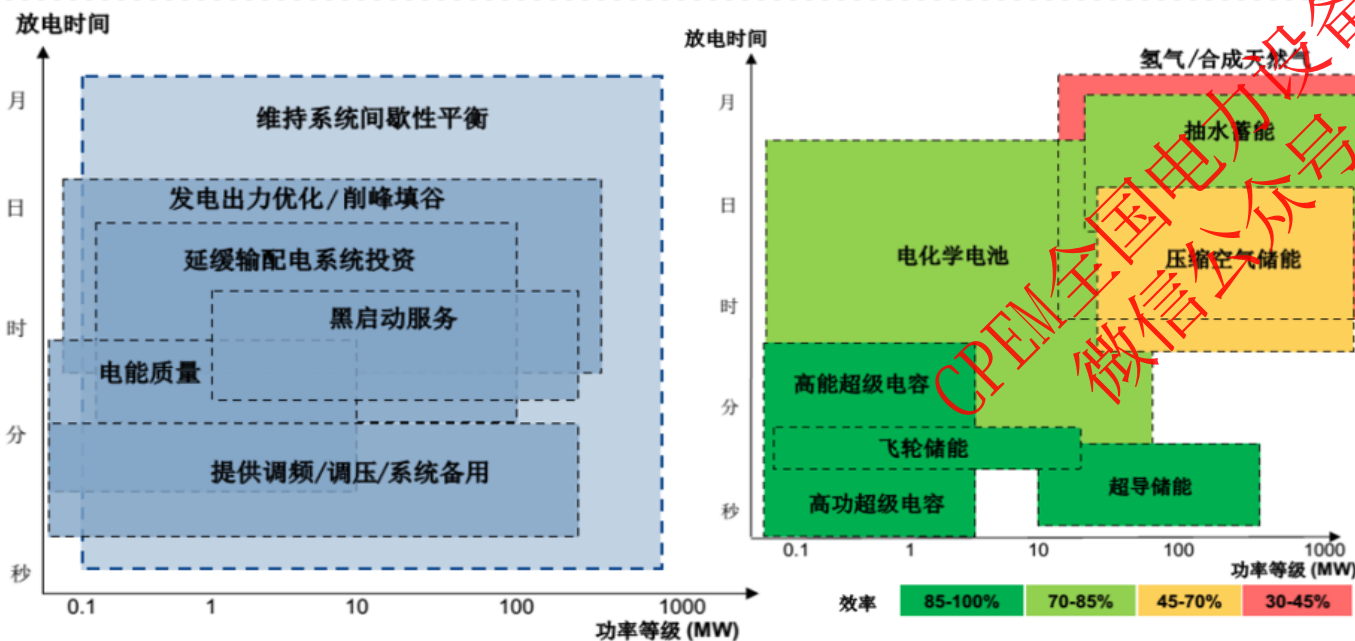


3.2

极高比例可再生能源的发电场景

新技术：储能

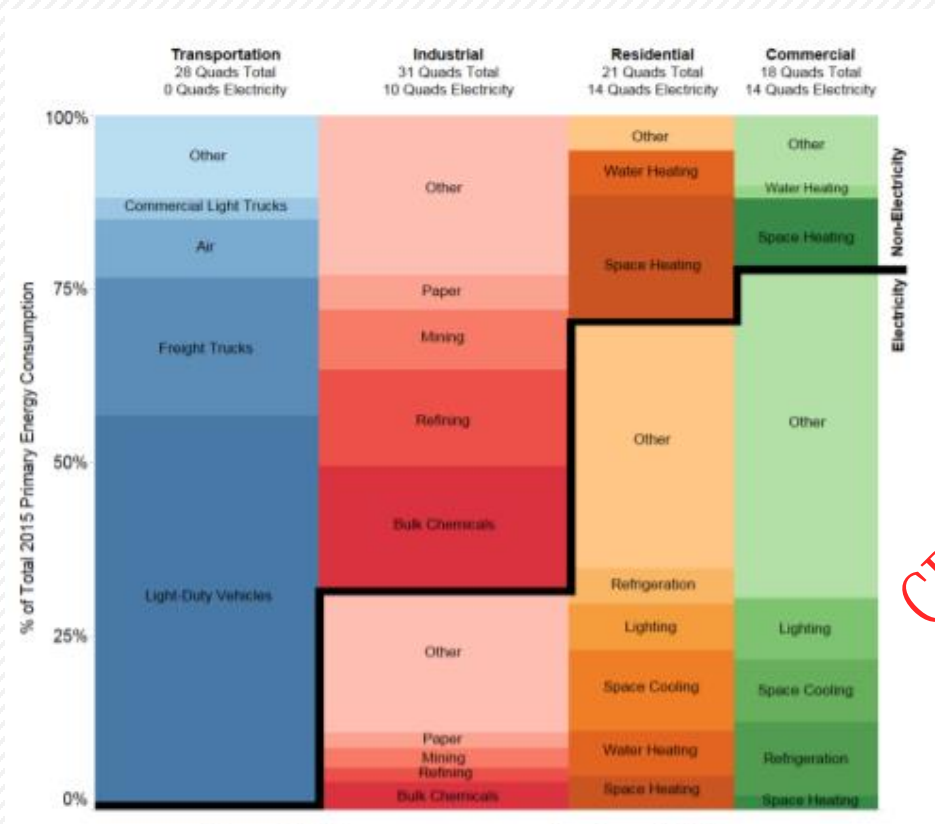
可再生能源发电及负荷需求时间分布不均匀，引入长期（4-100h）及季节性（>100h）储能实现跨多日、跨季节和跨年际的能量搬移和平衡，可有效降低系统发电成本。



3.2

极高比例可再生能源的发电场景

仅依赖电力系统是不够的，我们需要交通、工业、建筑、居民、商业的平衡潜力



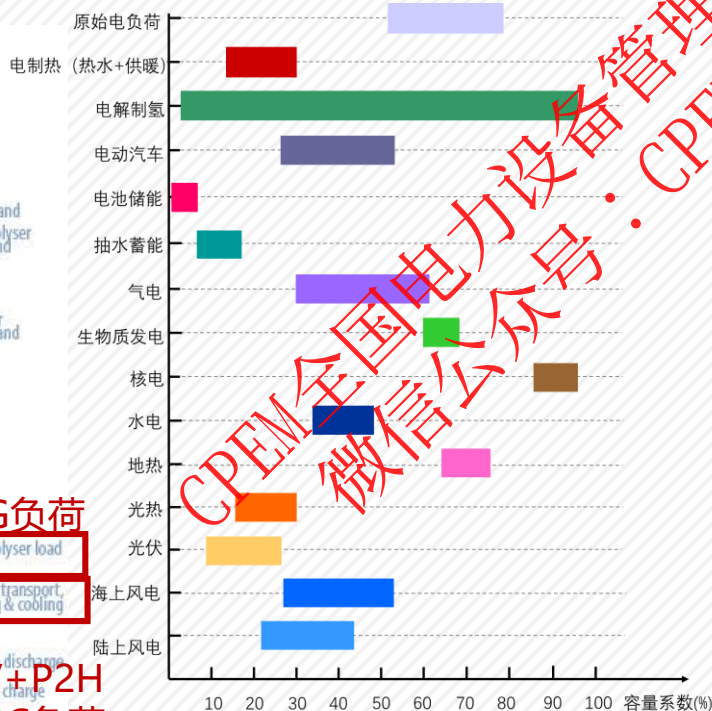
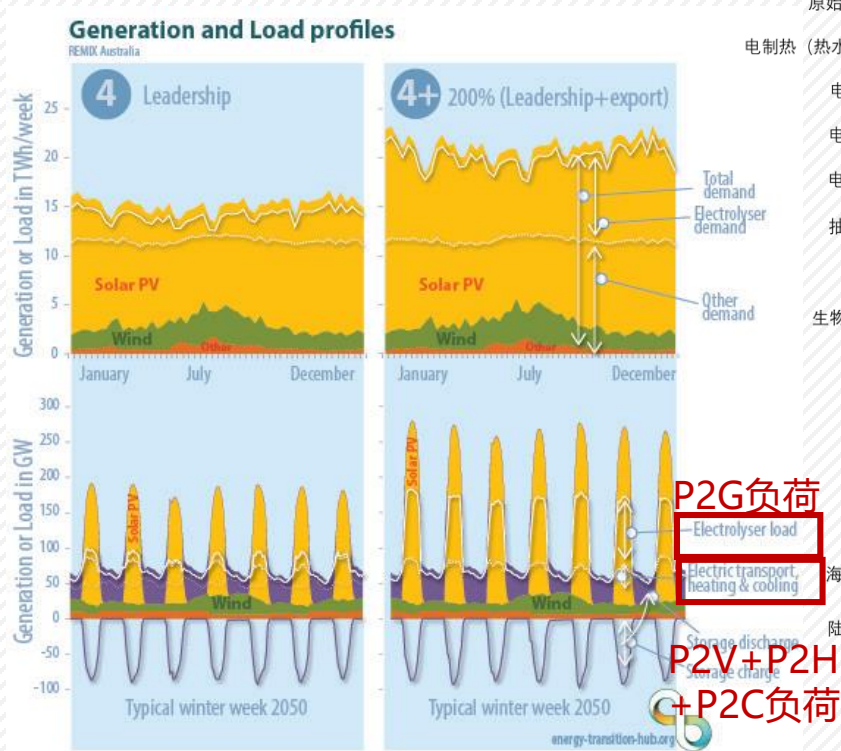
	2030	2050	2060
工业	34%	47%	54%
交通	11%	61%	81%
建筑	49%	75%	79%

P2X	输入功率允许波动	能量需求约束
碱性电解水	10%-110%	产氢量需求
质子交换膜电解水	0-160%	产氢量需求
固体氧化物电解水	20-100%	产氢量需求
热泵	10-100%	供暖/热水温度调节范围
电锅炉	20-100%	供暖/热水温度调节范围
空调	30%-100%	制冷温度调节范围

3.2

极高比例可再生能源的发电场景

净负荷为负的情形变得更加频繁是有别于之前阶段系统的重要特点。电源跟随负荷调整的规则在改变，也许**负荷要跟随电源调整**。



*上面结果为全年平均，不同季节取值范围可能有变化

**由于电制氢技术尚未规模化应用，上面范围为理论上可以达到的容量系数范围，但实际应用需要考虑经济因素

***其他项目的容量系数范围根据实际运行经验获取

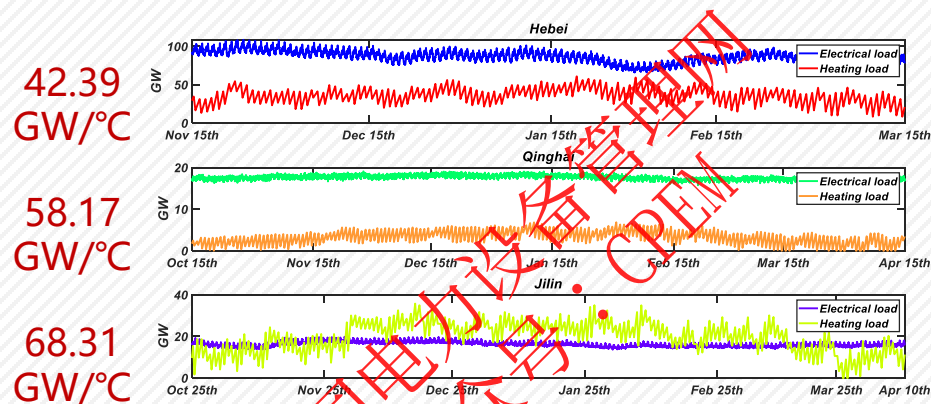
****容量系数定义为平均功率除以额定功率(或最大负荷功率)

对象	最大功率或装机容量 (TW)	能量 (TWh)	小时数(h)
原始电负荷	2.6-2.8	17000	6000-7000
风电	2.5	6000	2400
太阳能发电	3.8	5500	1500

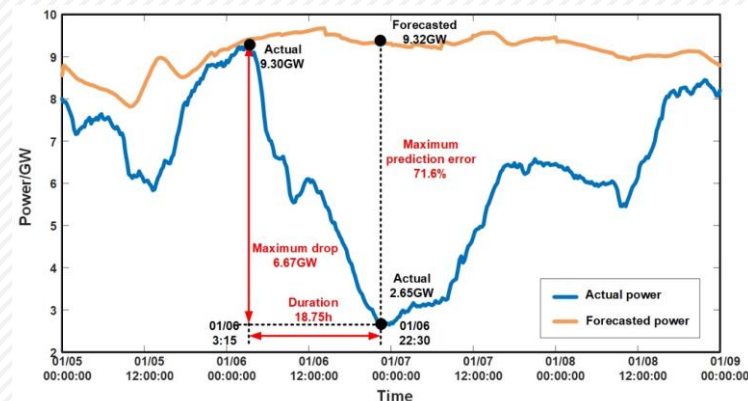
对象	额定功率 (TW)	能量 (TWh)	额定功率运行时间(h)
电制氢	0.6-0.8	~3000	4000-5000
电动汽车	1-2	~20	10-20
热泵	0.3	~800	2000-3000
电池储能	0.4-0.5	~2	2-4

与天气强耦合，系统运行对极端天气呈现脆弱性

- 源：风/光电源的发电能力都强依赖于天气过程，极端天气可导致风/光电源大规模的同时减载和停运；
- 荷：城市负荷占比提高，其中温控类负荷比例提升，负荷对温度敏感程度大大增加。在寒潮、炎热等极端天气下加重供需平衡的难度。



青海、吉林、河北2030电、热负荷曲线



冀北电网2021年1月寒潮天气对风电影响

重现水平	2年	5年	10年	20年	30年	40年	50年
风电低温停运容量年极大值 - 中国 (%)	7.6	11.2	13.3	15.3	16.3	17.0	17.5
停电事故失负荷年极大值 - 中国 (%)	3.9	5.5	7.0	7.4	7.7	7.9	8.2

*低温停运容量百分比分母是风电装机容量；失负荷量百分比分母是总发电装机容量。

感谢聆听，欢迎讨论

CPEM全国电力设备管理网
微信公众号：CPEM