

丁仲礼院士：中国“碳中和”框架路线图研究（附PPT）

在中国科学院学部第七届学术年会上，中国科学院院士丁仲礼作了题为《中国“碳中和”框架路线图研究》的专题报告，介绍了中国科学院学部近期围绕碳中和问题所布局的咨询项目进展情况。丁仲礼院士在报告中指出，碳中和看似很复杂，但概括起来就是一个“三端发力”的体系：

第一端是能源供应端，尽可能用非碳能源替代化石能源发电、制氢，构建“新型电力系统或能源供应系统”；

第二端是能源消费端，力争在居民生活、交通、工业、农业、建筑等绝大多数领域中，实现电力、氢能、地热、太阳能等非碳能源对化石能源消费的替代；

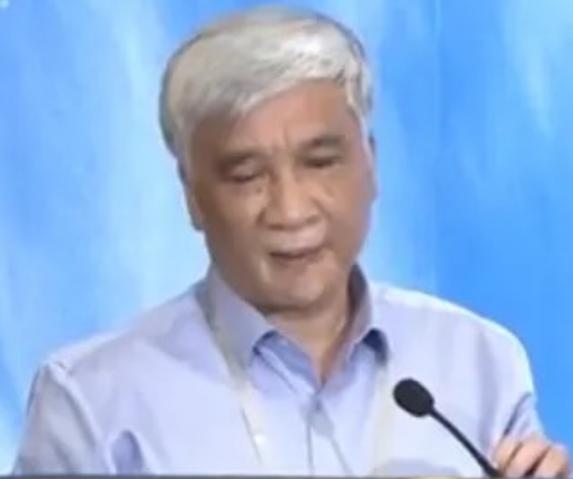
第三端是人为固碳端，通过生态建设、土壤固碳、碳捕集封存等组合工程去除不得不排放的二氧化碳。简言之，就是选择合适的技术手段实现“减碳、固碳”，逐步达到碳中和。



中国科普博览
Science Museum of China



西瓜视频





应对气候变暖的国际行动



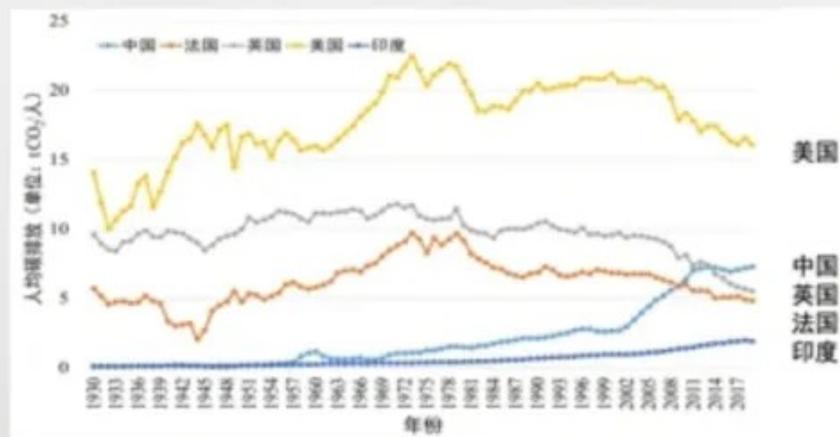
新闻视频

- 欧盟一些国家首倡，2050年达到碳中和
- 我国于去年9月承诺：2030年碳达峰，2060年碳中和
- 美国2021年2月19日，重新加入《巴黎协定》
 - 目标：2035年无碳发电，2050年碳中和（但对美国，还得“走着瞧”）
- 全球大部分国家正在制定“碳中和”目标

雄心勃勃但又极其艰难的战略目标



不同大国碳排放现状



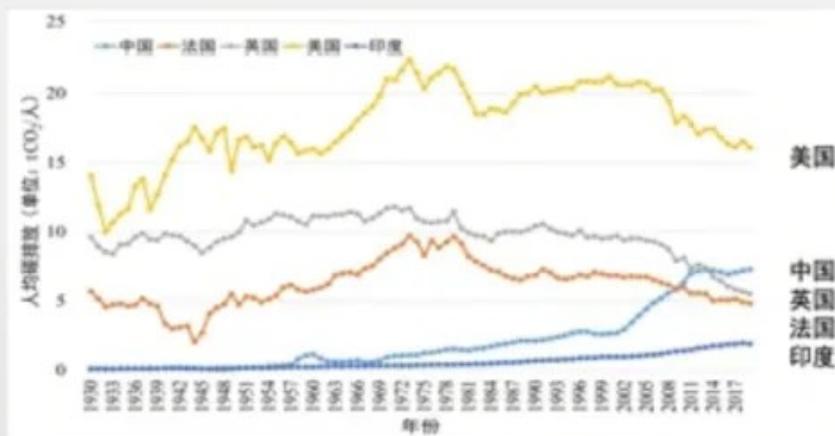


不同大国碳排放现状



➤ 四大类：

- 达峰后的**下降阶段**（美英法）
- 排放**增长阶段**（印度）
- 进入“**平台期**”（中国）
- 尚未“**启动**”（农业国）



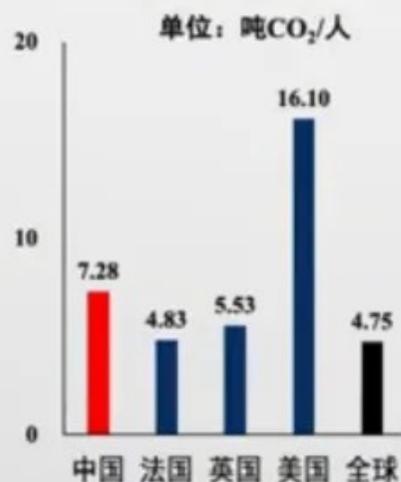
- 由于没有“天花板”，我国2030年达峰不太难，但有两种选择：**一是把峰调高，二是尽量压低峰高**。出于**空气质量考虑**，无疑要追求“选择二”。因此，“**达峰**”不需太多研究，关键是研究如何“**中和**”。



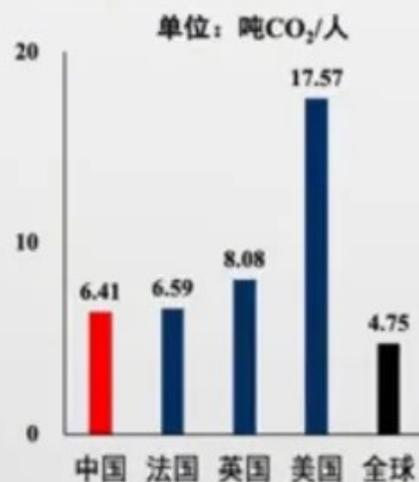
主要国家人均二氧化碳排放比较



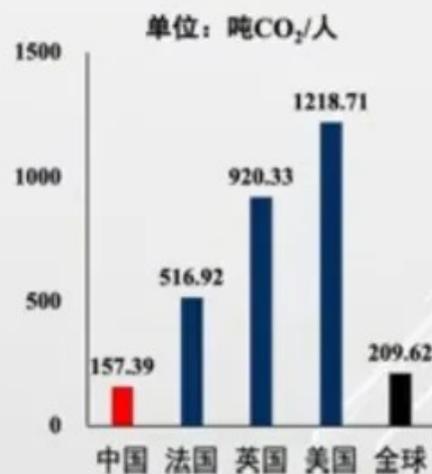
生产端人均碳排放（2019）



消费端人均碳排放（2019）



人均累计碳排放（1900-2019）



注：一个国家的发展程度同人均累计碳排放有密切关系：中国的人均碳排放量虽已超过全球平均，但人均累计排放远不及，意味着我国的“碳中和”更为困难。

简言之，**人为排放量**（化石燃料利用和土地利用）被**人为努力**（木材蓄积量、土壤有机碳、工程封存等）和**自然过程**（海洋吸收、侵蚀-沉积过程的碳埋藏、碱性土壤的固碳等）所吸收，即**净零排放**。



本文PPT图片获取方式

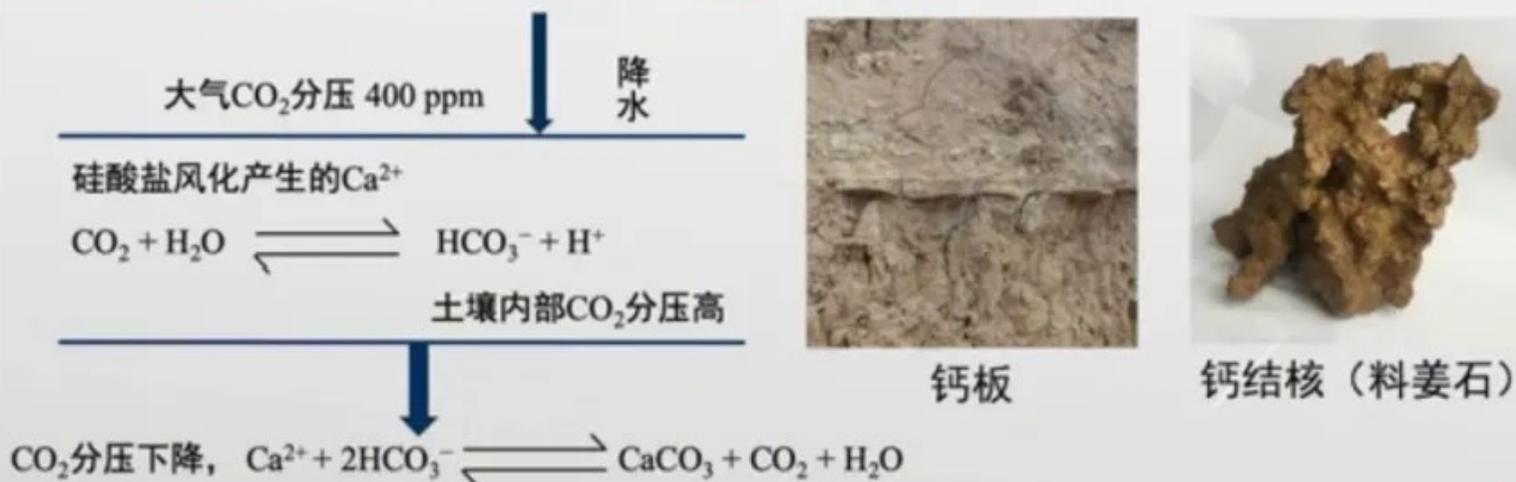
长按下方二维码

回复：**碳中和**

碳固定过程举例



- 碱性土壤（分布在干旱半干旱区）固碳主要是其富含钙离子，在 CO_2 分压高的土壤中，钙离子溶解于土壤水，向下迁移到分压低的下部时，形成 CaCO_3 沉淀，我国干旱半干旱区中常见的钙板、钙结核（料姜石）即由此过程形成。与土壤有机碳固定有个“平衡”问题不同，此为永久固定。

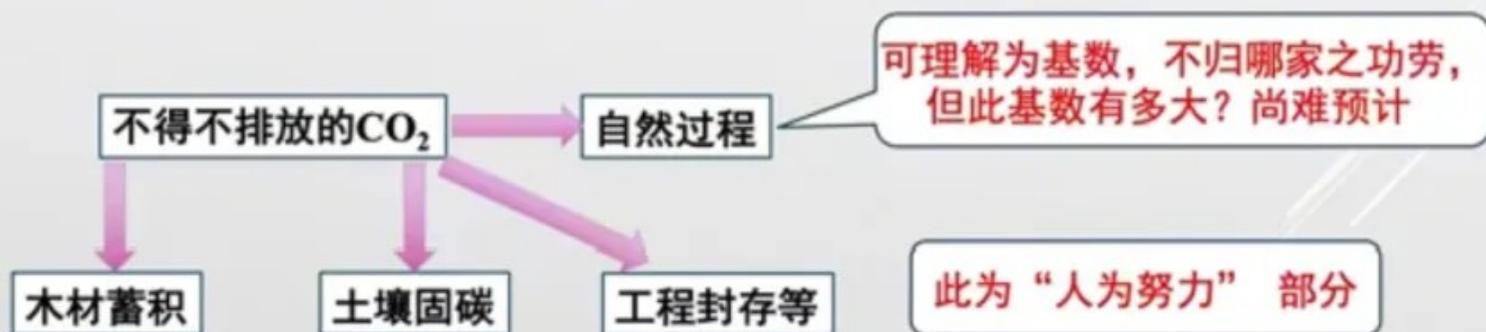




未来碳中和的主要途径



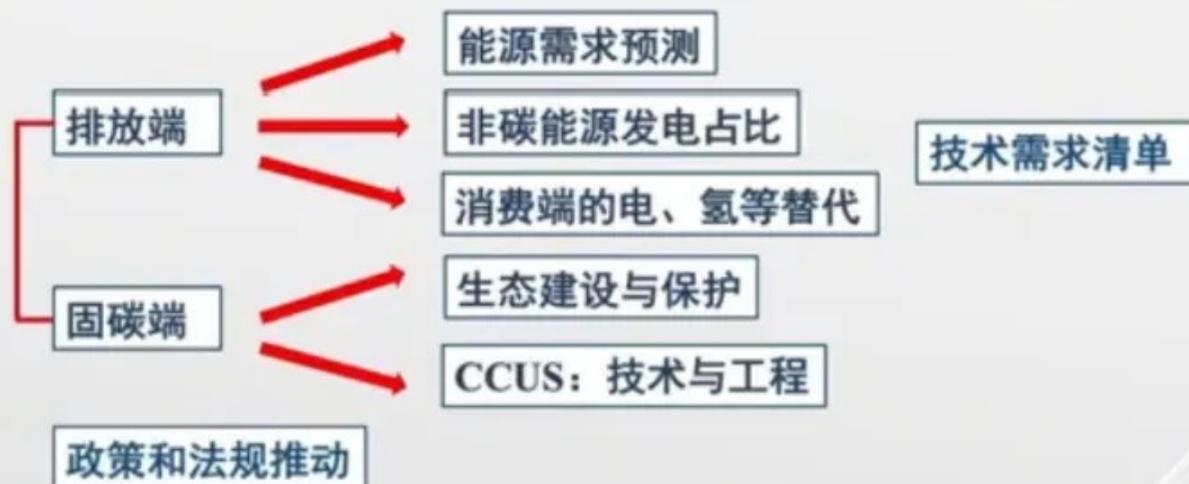
- 预计：在人为排放逐渐下降背景下，海洋碳吸收亦会相应降低。碱性土壤固碳和沉积固碳会继续起作用。“不得不排放的CO₂”需通过生态建设、工程封存等去除，以达中和。



碳中和：排放量=自然过程吸收+生态碳汇（木材、土壤有机质、碳屑等）+工程封存



学部咨询项目



- 目标是**设计初步路线图**，可供研讨、修订、完善，同时在如何落实“路线图”上，提出**操作层面的建议**。
- 设立**九个专题**。下面重点介绍各专题研究的主要问题，以及已有的初步认识。

专题1：未来能源消费总量预测

负责人：江 亿 魏一鸣

主要参加人：杨旭东 付 林 夏建军 胡 姍

张 洋 廖 华 唐葆君 梁巧梅

余碧莹

拟解决的核心问题



- 不同时间节点（面向2060），我国居民生活、工业、建筑、交通等重点领域的能源需求以及全社会能源总需求。
- 主要边界条件：2035年GDP翻番，2060年再翻番；生活水准与相应发展阶段相当；产业结构逐渐向中高端发展；人口变动（少子、老龄化）等。
- 建立预测模型。
- 预测常常不准，希望提供“高、中、低”三种可供参考的预测。



专题2：非碳能源占比阶段性提高途径

负责人：孔力 王一波

主要参加人：庞中和 吕雪峰 申彦波

胡书举 裴玮 唐西胜

饶建业 陈伟伟 詹晶等

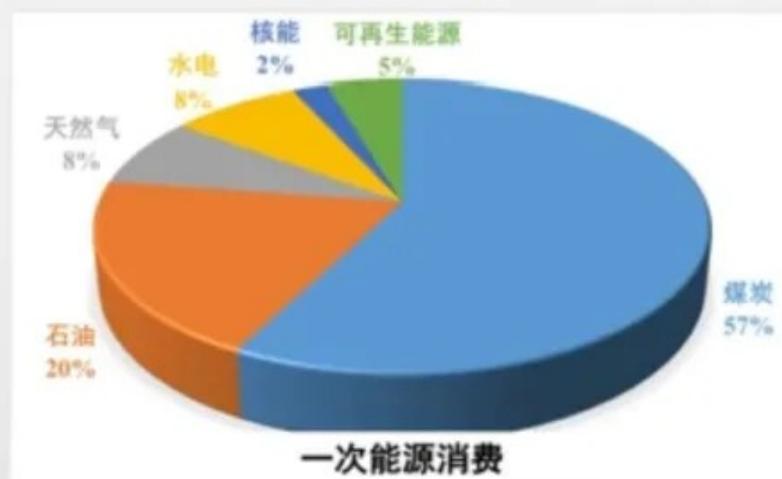
- 根据碳中和要求以及能源需求预测（分行业及总量），主要在市场机制作用下，未来不同阶段应构建一个什么样的**新型能源供应系统**？即如何逐步增加**非碳能源**（风、光、水、地热、核等）占比？
- 重点要回答，西部丰富的风、光资源，如何从**发电、储能、转化、输电、消纳等环节协调发力**，得到有效充分利用？如何解决**风、光资源时空分布不平衡而保证稳定输出**问题？有哪些**基础设施建设需求**？
- 为构建“新型电力系统或能源供应系统”列出**技术需求清单**。



目前我国一次能源比例



- 2019年我国能源总消费 48.6亿吨标准煤；
- 2019年我国能源利用总排放 98.26 亿吨CO₂。



- 假如我们设定2060年能源利用排放不超过20到25亿吨CO₂，就需要以能源需求为依据，绘制出不同阶段能源结构调整路线图，以及实现这个路线图的技术组合和基础设施组合。

- 非碳能源占比提升不会是线性的，并且主要由技术进步所驱动。
- 煤炭作为主力能源，还会存在较长一段时期，因此**煤炭清洁利用技术**的进步仍需十分重视。
- **先进裂变能**如能解决乏燃料、安全、内陆建厂及群众心理问题，可以在碳中和上发挥重要作用，我国不该追随某些“弃核国家”的脚步。
- 我国丰富的**风、光、地热资源**，尤其是西部的风、光资源，是我们实现碳中和的最大底气，关键在“稳定输出”。



专题3：不可替代化石能源预测

负责人：张锁江

主要参加人：谢在库 何鸣元 孙丽丽 韩布兴 徐春明
刘中民 王建国 郭占成 许光文 胡迁林
华 炜 齐 涛 李会泉 魏 伟 张香平
薛忠民 胡鸿飞 李鑫钢 程嘉猷 田志坚
俞红梅 等

碳中和的最重要途径是：**用非碳能源替代化石能源发电、制氢，再用电量、氢气替代化石能源**应用于居民生活、交通、工业过程、建筑、农业等领域，从而**达到大幅度CO₂减排之目的**。由此带来问题：

- “电力替代、氢气替代”由易到难，能否**排个队**？
- 面向2060年，“**难以替代**”的领域有哪些？这些领域需要多少化石能源消耗？将排放多少CO₂？（作为固碳之最大目标）

一些初步看法



- **居民生活**（烧饭、冷暖气等），易用电力、地热、太阳能等替代，难处在投入与推动。
- **交通**大部分可电力替代，大概只是时间问题。
- **农业**领域大部分可替代。
- 许多**工业**过程，如冶金、化工、建材、矿山等用能大户，电力替代的潜力很大，但需要研发新的技术体系，同时，其市场竞争力尚无法预测。
- 估计为克服**风、光能源不稳定问题**，如核能调峰能力较弱，那还得有一定数量火电或创新“稳定输出体系”，同时需解决储能和转化问题。
- 一些发达国家对**氢能**寄予了很大希望，但怀疑声音也不小，故需要深入研究氢能应用体系问题，以建议我国该搞什么样的“氢能战略”。

目前CO₂ 排放98.26 亿吨

发电端
~47%

消费端
~53%

增加非碳发电占比到接近无碳发电

电力替代
氢能替代
地热替代等

构建“两端同时发力”体系



专题4：非碳能源技术研发迭代需求

负责人：刘中民 蔡睿

咨询专家：包信和 李建刚 詹文龙 李灿

衣宝廉 韩布兴 徐春明 金红光 陈海生

编写专家：化石能源燃烧与转化：王建国 吕清刚

化工领域：丁云杰 田志坚 叶茂 刘应春

储能：李先锋 李泓

氢能：邵志刚 俞红梅

非化石能源：王建强（核能） 吕雪峰 王峰（生物能）

支撑体系：陈伟（技术情报） 吕正（能源模型）

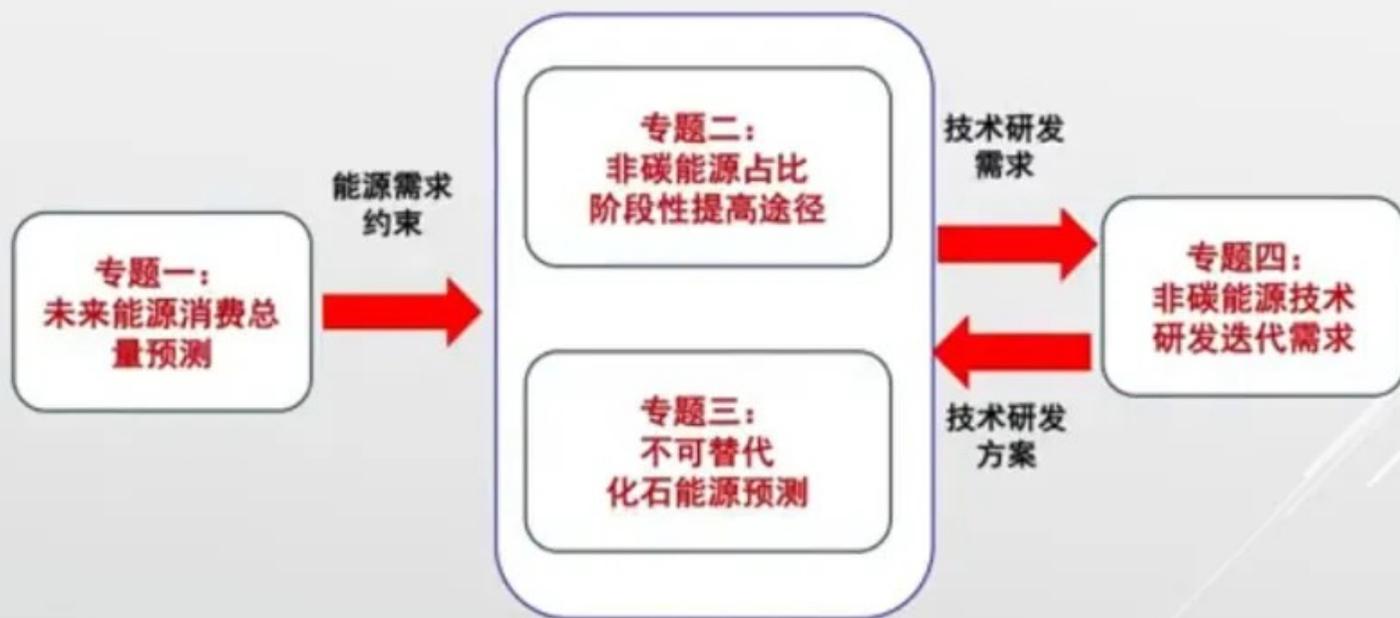


拟解决的核心问题（为技术研发进步列出清单和路线图）

- “新型发电系统”、“电力替代、氢气替代”的**技术体系**是什么？如何实现和**工艺再造**？研发此类技术的**可能路线图**？
- 在碳中和进程中，**化石能源的清洁高效利用**仍将在较长时期内处于核心地位，如何在推动其技术进步上持续发力？
- 按“三条主线”，描绘**国家低碳化能源新体系**：
 - 化石能源清洁高效利用与耦合替代
 - 可再生能源多能互补与规模应用
 - 低碳化、智能化多能融合

同第二专题一起“收口”

排放端专题分布及关系





专题5：陆地生态系统固碳现状测算

负责人：于贵瑞

主要参加人：陈镜明 王绍强 袁文平 刘毅
居为民 何洪林 王秋凤 陈智
牛书丽 张扬建 何念鹏 高扬
朱剑兴 逯非等

注：本项目仅考虑陆地和近海，没考虑大洋（其固碳过程难以人为调控）

- 陆地生态系统各类碳库的**现存储量格局**
 - 林、草、湿、农、内陆水体及河岸带生态系统的**碳储量及稳定性**；地上植被、地下植被、土壤、凋落物碳库组分及其关系；生态系统**碳库容量及成因分析**。
- 陆地生态系统**碳汇功能及速率格局**
 - 各类生态系统固碳功能的时空格局；生态系统固碳速率估算的**不确定性**；**碳汇功能、稳定性以及可持续性**。
- 不同**有机碳库的平衡点**
- 碱性土壤的**碳酸钙累积速率及人为固碳可能性**（此问题过去很少研究）



中国科学院植物研究所

已有初步认识（基于中科院“碳收支”项目）

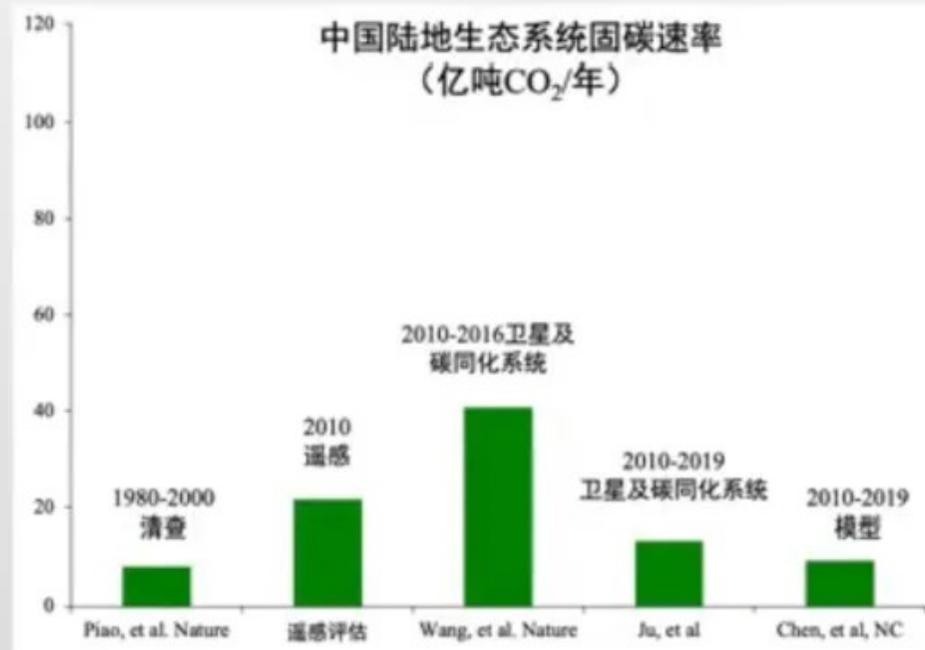
西瓜视频

- 中国陆地表层系统碳储量约为 $95.15 \pm 5.71 \text{ PgC}$ （约363.3亿吨 CO_2 ），碳储量及空间格局已经基本弄清，但是对部分生态系统的碳库储量评估仍然存在较大不确定性，如湿地、内陆水体以及海岸带生态系统。
- 汇总不同评估方法的结果发现，中国陆地固碳速率约为10~40亿吨 CO_2 /年。
- 主要森林固碳的峰值有可能在2060年前达到。
- 干旱-半干旱区土壤将有机碳转化为无机碳的速率尚难估计。



当前我国陆地生态系统碳汇抵消人为碳源10% ~~40%~~

西瓜视频





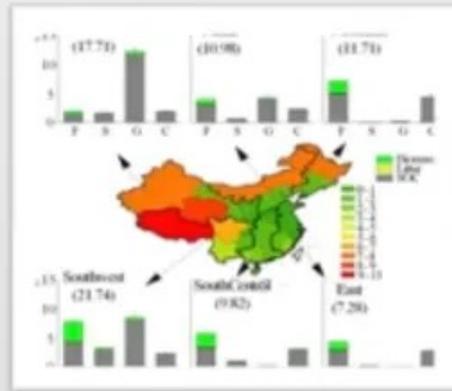
中国科学院

中科院碳专项中有关陆地碳汇研究成果



西瓜视频

陆地碳储量空间分布

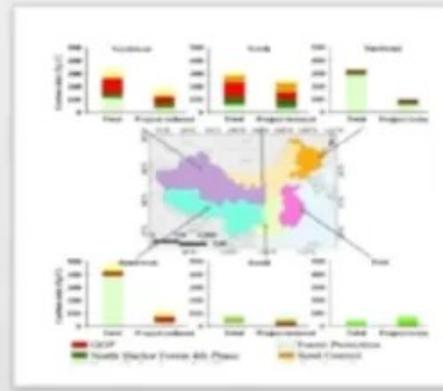


✓中国陆地的碳储量

95.15 ± 5.71 PgC

✓森林生态系统碳储量占38.9%

六个生态工程区的固碳速率



✓六大生态工程区年固碳速率

132 Tg C

✓占全国总量的 56%



专题6：陆地生态系统未来固碳潜力分析

负责人：方精云 朱教君

主要参加人：杨元合 唐志尧 王襄平

赵霞 孙文娟 逯非

王绪高 胡会峰 郭兆迪

黄玫 朱剑霄

- 未来中国陆地及近海不同生态系统**固碳潜力**及**气候变化的影响**
- 国家**生态恢复、建设工程**的未来固碳潜力（面状分布区）
- **新增造林**的固碳潜力（如城镇种树等点状分布区）
- **其他人为措施**情景下的生态固碳潜力（比如南水北调等）
- 未来陆地生态系统**增加碳汇的措施**（比如秸秆闷烧成碳屑等）

均需证明固碳作用的长期性



中国科学院
地球系统研究所



西瓜视频

专题7：碳捕集利用封存技术评估

负责人：李小春 邹才能

主要参加人：潘松忻 魏伟 孙楠楠 高林

李 胜 魏宁 刘桂臻 刘胜男



全球实现碳中和的主要技术（国际上称“负排放技术”）

负排放技术

负排放技术路径	碳移除/碳捕捉途径	形成的可利用产品	碳移除/碳利用潜力 (亿吨CO ₂ /年)	成本 (美元, 负值表示盈利)
二氧化碳制化学品	烟道气等来源CO ₂ → 化学产品	甲醇、尿素和塑料等	0.1~0.3 / 3~6	-80 ~ 320
二氧化碳制燃料	烟道气等来源CO ₂ → 燃料, 催化氢化	甲醇、甲烷等	0 / 10~42	0 ~ 670
微藻的生产	CO ₂ → 微藻生物	水产养殖饲料等生物制品	0 / 2~9	230 ~ 920
混凝土碳捕集	烟道气等来源CO ₂ → 水泥建筑物、混凝土	碳化的水泥、混凝土	1~14	-30 ~ 70
提高原油采收率	烟道气等来源CO ₂ → 储油池	石油	1~18	-60 ~ 45
生物能源的碳捕捉和储存	植物的生长	农作物、植物等	5~50	60 ~ 160
矿物碳化	CO ₂ → 粉状硅酸盐岩石	农作物利用形成生物质	20~40	少于 200
植树造林	森林的光合作用	森林、木材等	5~36 / 0.7~11	-40 ~ 10
土壤碳封存技术	CO ₂ → 土壤有机碳	农作物利用形成生物质	23~53 / 9~19	-90 ~ -20
生物炭	CO ₂ → 木炭	农作物利用形成生物质	3~20 / 1.7~10	-70 ~ -60

CCUS





拟解决的核心问题（规模化封存）

- 国际CCUS技术的现状与发展趋势；
- CCUS技术未来的突破口与经济性能评估；
- CCUS如何集群化及与产业融合；
- 中国CCUS地址优选；



专题8：青藏高原率先达标示范区建议

负责人：陈发虎 朴世龙

主要参加人：刘毅 曲建升 汪涛

孙建 林金泰 刘竹

刘晓洁 曾静静 丁金枝 等



中国科学院
植物研究所

拟解决的核心问题

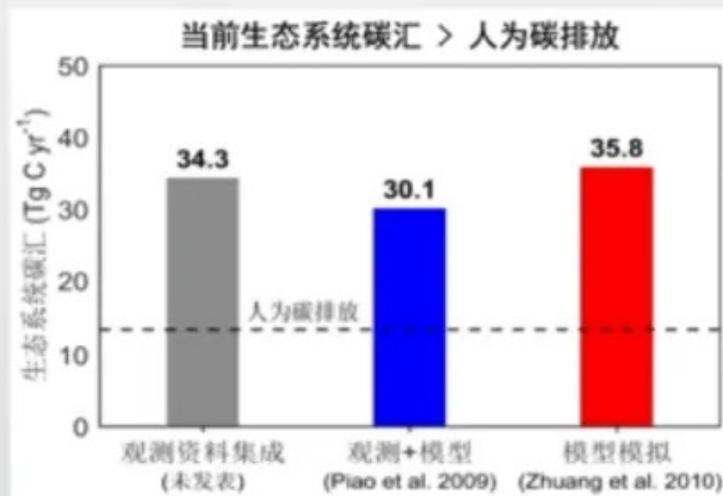
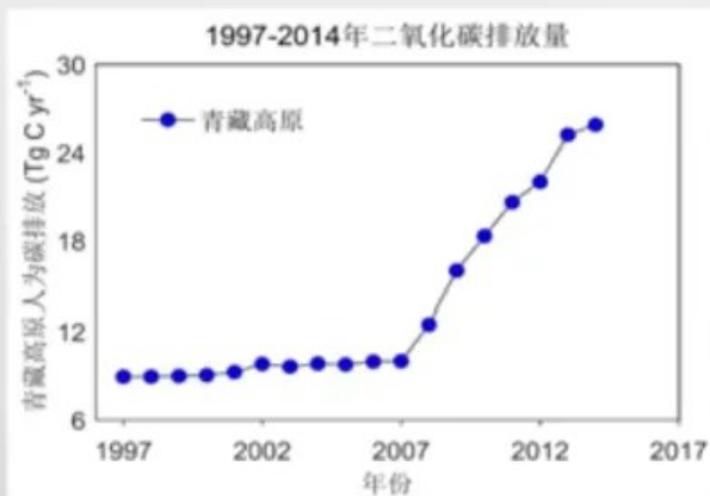


新闻视频

- 计算青藏高原（大藏区）**人为碳排放**（生产侧和消费侧）数值及预测趋势
- 评估青藏高原**生态系统固碳**现状及未来趋势
- 提出青藏高原**减排/增汇**的途径及达标方案
- 进而研究如何进行“**碳中和**”程度的分区域评估

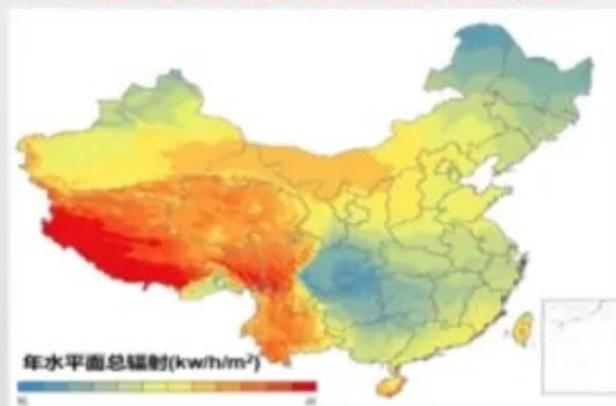
注：此工作宜结合生态屏障建设一起谋划；可在国际上取得道义制高点。

- 青藏高原人为碳排放小，不足全国的1%
- 当前生态系统为碳汇，占全国的12%-16%，但仍面临风险



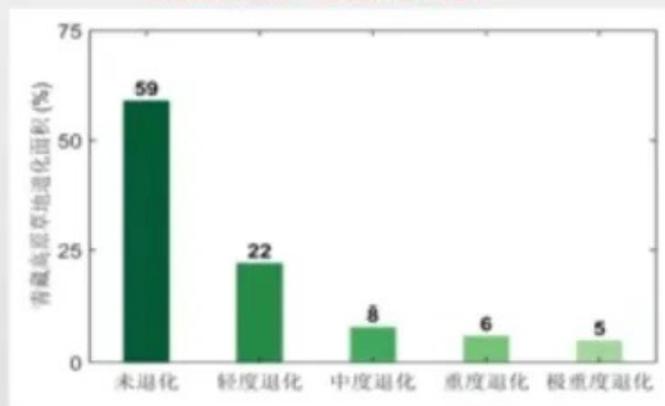
➢ 青藏高原是我国**新能源重要基地**，且**增汇潜力大**（退化草地占比高和暖湿化）

青藏高原新能源替代减排优势明显



■ **减排措施**：太阳能、风能和水能等清洁能源

青藏高原草地退化现状

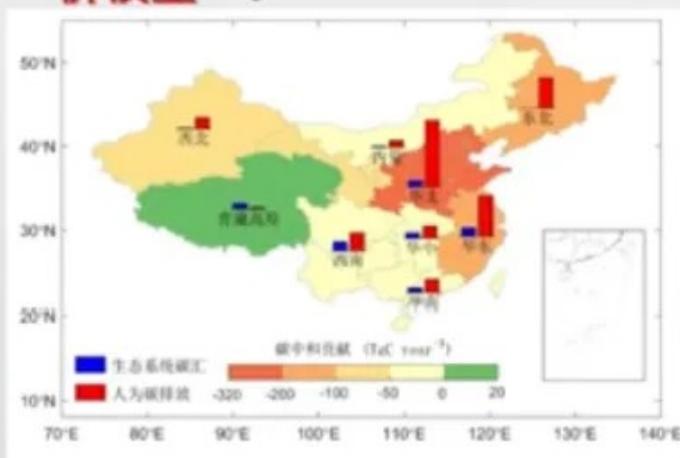


■ **增汇措施**：退化草地恢复、宜林植林、退牧还湿等

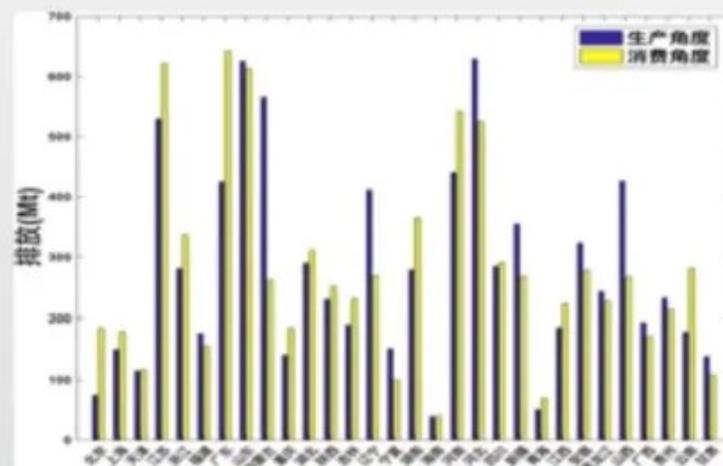


已有初步认识（针对“碳中和”分区域评估问题）

- 省级尺度上，碳汇/碳排放比例不匹配，生产端/消费端碳排放不匹配，因此，“碳中和”问题要研究如何下“全国一盘棋”“碳中和程度评价模型”。



区域“碳中和”现状



生产端/消费端碳排放现状



专题9：政策技术分析研究

负责人：樊杰 潘教峰

主要参加人：谭显春 邹乐乐 郭雯 苏利阳

孙翊 王建芳 郭建新 刘宝印

周道静 马宁 王红兵 曾桉



聚焦前八个专题的技术预测，形成政策建议。

- 推动**非碳技术**的政策；
- **生态建设等固碳**的政策。

政策
分析

法律规划

经济政策

管理体制

技术政策



咨询项目的最后情景设计与综合



西瓜视频

1、不得不排放的CO₂假定25亿吨，电力系统、工业过程、交通等假定各自排放量为多少？

2、自然过程吸收13亿吨（目前的比例）。

3、生态系统吸收8亿吨（南水北调西线工程，海水淡化等使干旱区变绿……）

4、通过增加硅酸盐的风化增加碳酸钙沉淀（研究如何把高氧化钙含量的固废如煤矸石等利用；磨成一定粒径加到表面土壤中……），2亿吨。

5、秸秆闷烧成生物质炭加到土壤中，2亿吨。

6、CCS技术保持研发迭代，2050年后考虑应用。

7、设计低碳电力系统发展路线图，能做到“无碳电力”吗？推进的时间节点？

8、设计电力替代、氢能替代、地热替代等技术进步和产业应用路线图。

9、国家层面推动“碳中和”的系统性制度设计，尤其是技术研发的系统布局。

把九个专题“收口”



五点初步看法

一、“碳中和”过程**既是挑战又是机遇**，其过程将会是**经济社会的大转型**，将会是一场涉及**广泛领域的大变革**。“技术为王”将在此进程中得到充分体现，即谁在技术上走在前面，谁将在未来国际竞争中取得优势。国家需要积极研究与谋划，谋定而动，系统布局，组织力量，特殊支持，力争以技术上的先进性获得产业上的主导权，使之成为**民族复兴的重要推动力**。



五点初步看法

二、项目组强调：完成这个大转型，需要在**能源结构、能源消费、人为固碳“三端发力”**，所需之资金将会是天文数字，决不可能依靠政府财政补贴得以满足，必须坚持市场导向，鼓励竞争，稳步推进。**政府的财政资金应主要投入在技术研发、产业示范上**，力争加快我国技术和产业的迭代进步速度。在此过程中，特别要**防止能源价格明显上涨**，影响居民生活和产品出口。



三、本学部咨询项目只能先给出一个**框架性建议**，以供科技界讨论、修正、完善。期望汇聚众智后，学部的建议对我国如何推动此大转型，如何在未来国家创新体系中形成布局完善、责任明确的**技术研发体系**等重大问题，有实质性的指导意义。项目组也认为应持开放的态度，广泛参与，发挥出想象力。在确定路线图的问题上可考虑先经**不要急于“收口”**。





五点初步看法

三、本学部咨询项目只能先给出一个**框架性建议**，以供科技界讨论、修正、完善。期望汇聚众智后，学部的建议对我国如何推动此大转型，如何在未来国家创新体系中形成布局完善、责任明确**的技术研发体系**等重大问题，有实质性的指导意义。项目组也认为，我国学术界应该秉持开放的态度，广泛参与，发挥出想象力和创造力；**国家有关部门在确定路线图的问题上可考虑先经历一段“百家争鸣”时期，不要急于“收口”。**

四、“大转型”中，**行业的协调共进**极其重要。“减碳、固碳”“电力替代”“氢能替代”均需要增加企业的额外成本，如果某一行业不同企业间不能协调共进，势必会使“不作为企业”节约了成本，从而出现“劣币驱逐良币”现象。

由此，**分行业设计“碳中和”路线图及有效的激励/约束制度**需尽早完成。



五点初步看法

五、评价国家、区域、行业、企业甚至家庭的“**碳中和程度**”，需从**收、支两端**计量。从能源消费角度论，“支”（即排放）相对容易计量；“收”（即固碳）由于类型多样，过程复杂，很难精确计量，尤其是“人为努力”下的**固碳增量**不易确定。

由此，国家要**尽早建立系统的监测、计算、报告、检核的标准体系**，以期针对我国的碳收支状况，**保证话语权在我**。



国际上的合作与斗争

- 未来排放权如何分配？
 - “天花板” 应定在什么水平上？
 - “共同又有区别的责任” 未来如何体现？
 - “资金和技术援助” 的承诺如何兑现？
 - 各国逐步的排放量如何计算、报告、检核？等等
- 如何应对“舆论抹黑”？
 - 比如“中国的承诺不够雄心勃勃”、“中国是最大排放国”等等
- 如何应对一些国家对我国的太阳能电池等绿色产品设立的高额关税？