世界能源转型与即将来临的第五次油气革命

The global energy transition and the upcoming fifth oil and gas revolution





张映红

2026年10月29日 湛江



1. 世界能源转型发展形势
The situation of the global energy transition

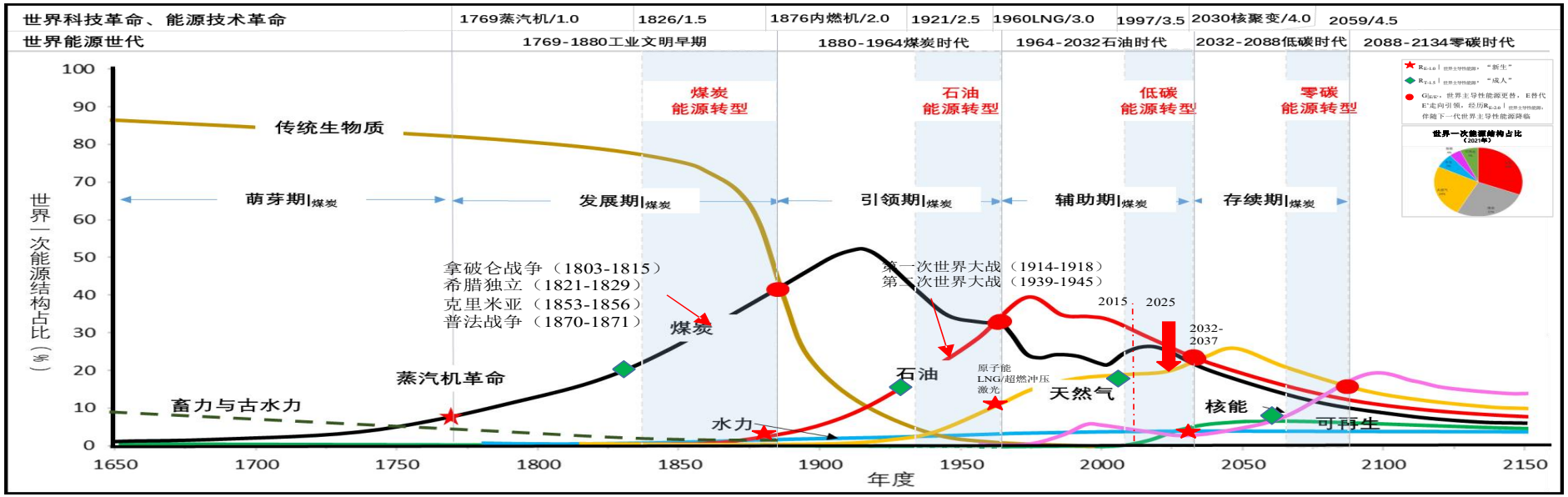
2.世界能源革命的范式特征
The paradigm of the global energy revolution

3.即将来临的第五次油气革命
The upcoming fifth oil and gas revolution

1.1 能源转型就是世界主导性能源更替

The global energy transition is the world-dominating energy replacement

世界一次能源消费历史统计与预测



- 世界主导性能源就是在世界一次能源结构占比中长期居首位的一次能源类型，主导一代能源文明；其走向引领前的约百年中被称为“新一代世界主导性能源“。当前的新一代主导性能源是天然气

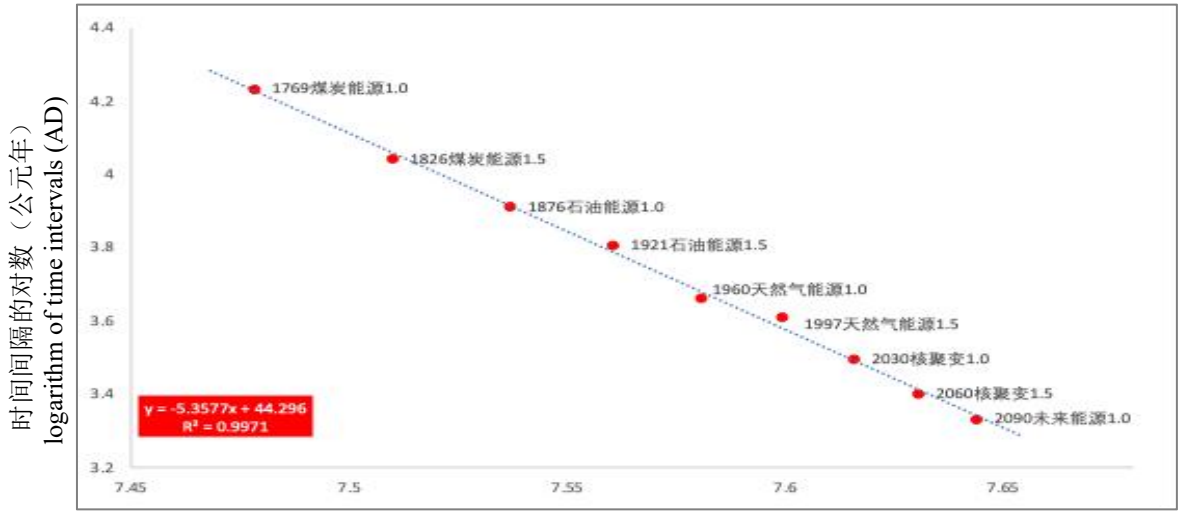
  The world's dominant energy is the type that has long held the top share in the global primary energy structure, leading a generation of energy civilization; For about a century before its leadership, it was called the "new generation of world-leading energy." The current new generation of dominant energy is natural gas
- 新一代世界主导性能源要主导两次能源革命（Re、Rt型）。Re型革命标志能源“巨婴”降临； Rt型革命为能源巨婴的“成人礼”，解决其走向引领前亟待补上的资源、成本等关键性短板。正在经历的智能化为Rt型革命

  The new generation of world-leading energy will lead two energy revolutions (Re and Rt types). The Re revolution marks the arrival of the energy "giant baby"; The R-type revolution is the "coming-of-age ceremony" for the energy giant baby, addressing key shortcomings such as resources and costs that urgently need to be addressed before it moves toward leadership. The intelligence currently undergoing is the R-type revolution
- 世界能源转型始于 Rt型革命后约10年，完成于Re型革命之后3-10年。下一次能源革命为Re型，将发生在核能领域

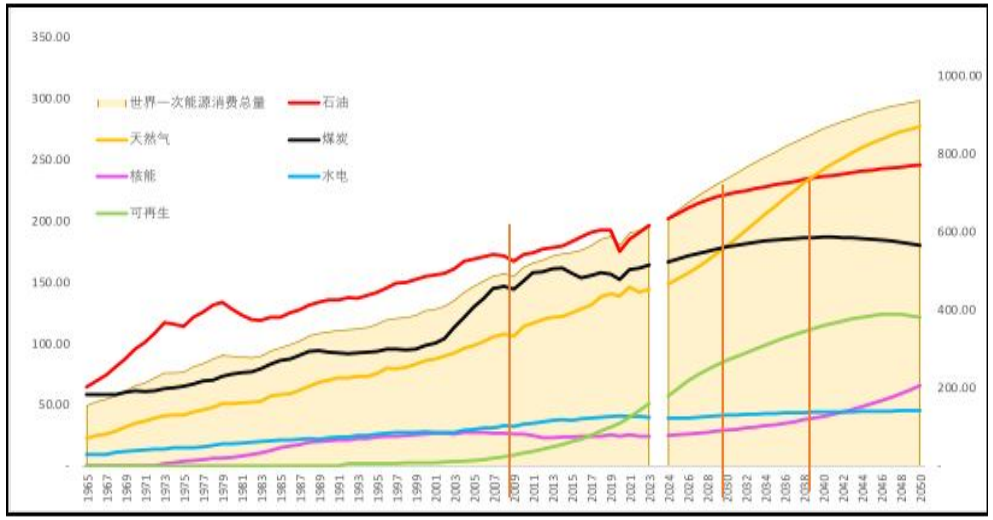
1.2 核聚变革命将发生于约2030年 能源转型将于2036年前后完成

The nuclear fusion revolution will occur around 2030. The energy transition will be completed around 2036

世界能源革命的变化趋势预测
Forecast of changes in the global energy revolution



世界一次能源消费结构变化趋势预测（EJ）
Trend Forecast of Changes in the Structure of World Primary Energy Consumption（EJ）



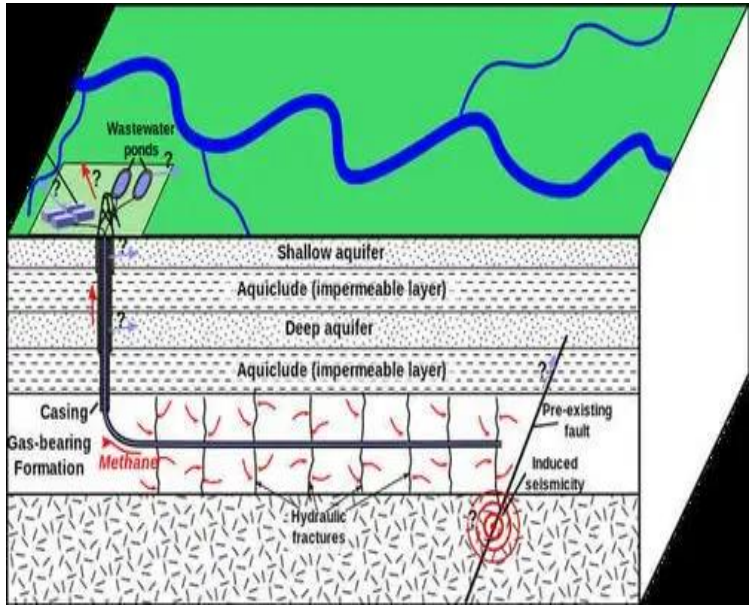
- 世界能源革命的变革周期呈指数缩短，符合人类文明加速进化特征，不以人的意志为转移。按此规律，核能革命将发生在2030年
  The cycle of transformation in the world energy revolution is exponentially shortening. This aligns with the accelerated evolution of human civilization and is not subject to human will。According to this rule, the nuclear energy revolution will occur around 2030
- 核聚变革命将导致天然气价格下降和消费信心增长，预计天然气将在2036年前后接替石油成为世界主导型能源，并主导低碳文明
  The nuclear fusion revolution will lead to lower natural gas prices and increased consumer confidence. It is predicted that natural gas will replace oil as the world's leading energy source around 2036 and lead a low-carbon civilization

1.3 驱动低碳转型的是1997-1998年兴起于油气领域的三大技术革命

The driving force behind the low-carbon transition was the three major technological revolutions in the oil and gas sector that emerged in 1997-1998

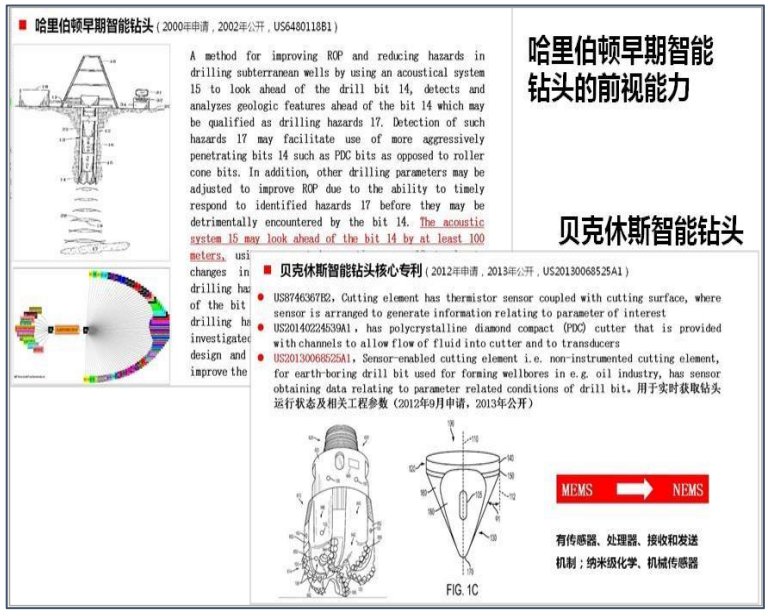
■ 页岩革命：解决资源问题

Shale Revolution: Solving Resource Issues



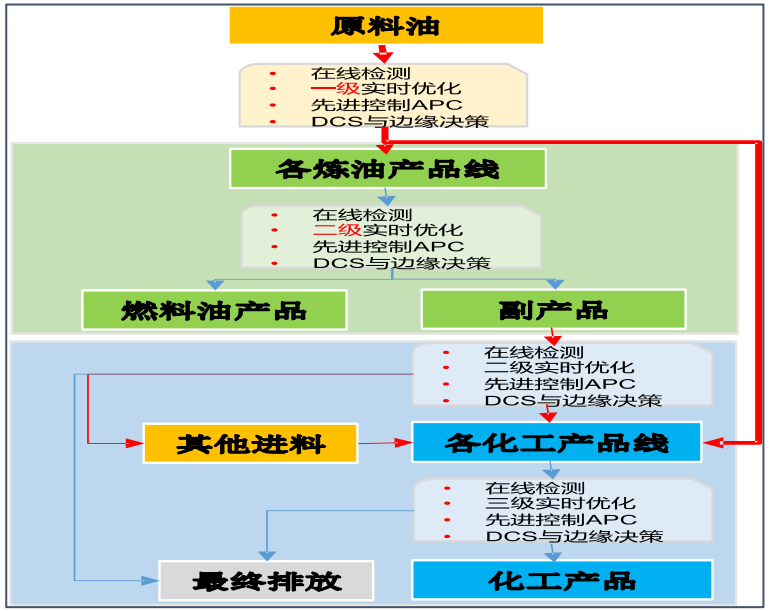
■ 智能化革命：解决成本问题

Intelligent Revolution: Solving Cost Issues



■ 分子炼化革命：解决石油换道问题

Molecular refining revolution: Solving the problem of oil rerouting issues



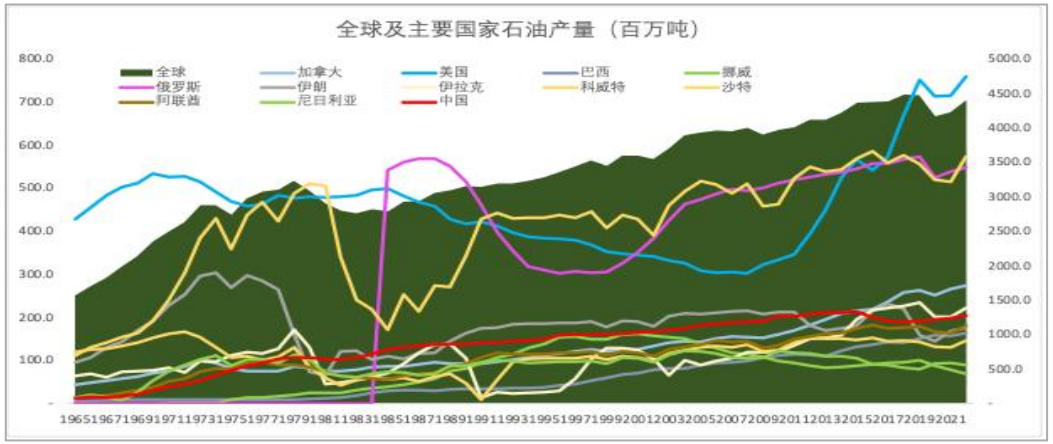
1.5 这轮革命在2007年引发低碳转型 将在2027年进入第四次浪潮

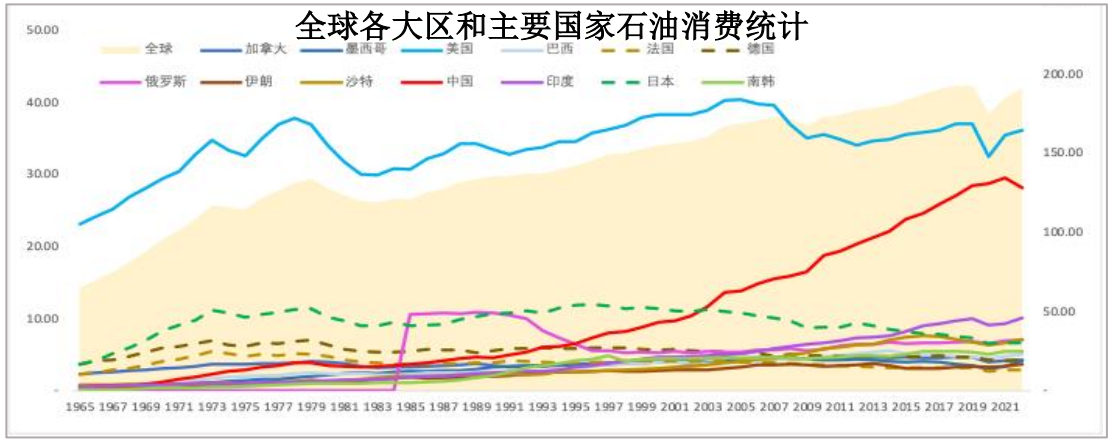
This generation of revolution triggered the low-carbon transition in 2007 and will enter the fourth wave in 2027

- 萌芽期（1987~1996）： 战略、基础、核心，探索智能化技术的早期概念原型
  Embryonic Period (1987~1996): Strategy, foundation, core, exploring early conceptual prototypes of intelligent technology
- 第一次浪潮（1997~2006）：1997年智能完井技术成为智能化的里程碑，同期兴起页岩革命、智能化革命、分子炼化三大体系；石油减油增化、天然气产业爆发、2006签署国际核聚变ITER七方协定
  First Wave (1997~2006): In 1997, intelligent completion technology became a milestone in intelligence.the shale, intelligent and molecular refining&chemical revolution.The oil industry began to transform.The natural gas industry is booming. International Nuclear Fusion ITER Seven-Party Agreement in 2006
- 第二次浪潮（2007~2016）：智能化专业深化和系统化，通过数字孪生挖掘新知识系统；形成智能化技术范式、生产范式、低碳消费文化碳转型开始，工业革命3.5兴起
  Second wave (2007~2016): Deepening and systematizing intelligent majors, exploring new knowledge systems through digital twins; Forming intelligent technology paradigms, production models, and low-carbon consumption cultures. Low-carbon transformation begins, Industrial Revolution 3.5 rises
- 第三次浪潮（2017~2026）：闭环智能化技术系统，新质生产力大爆发，形成新知识体系、新技术标准体系、新生产关系、新商业模式，油气成本大幅下降，基于两代能源体系的实体经济矛盾加剧，引发社会革命和国际金融体系大变革
  Third wave (2017~2026): Closed-loop intelligent technology systems , explosive growth of new quality productive forces, forming new knowledge systems, new technical standards, new production relations, and new business models, significantly reducing oil and gas costs, intensifying real economic contradictions based on two generations of energy systems, triggering social revolutions and major changes in the international financial system
- 第四次浪潮（2027~2036）：核聚变革命，基于新旧力量对比重建平衡，形成新的世界政治经济格局和秩序；多极化带来能源平权和新一轮繁荣，低碳能源消费激增并完成转型，进入低碳能源文明时代
  The fourth wave (2027~2036): The nuclear fusion revolution, based on the comparison between old and new forces, reconstructs balance and forms a new world political and economic pattern and order; Multipolarity brings energy equality and a new round of prosperity, with asurge in low-carbon energy consumption and the completion of transformation, ushering in an era of low-carbon energy civilization

1.6 全球石油供需已处于结构性松平衡

Global oil supply and demand have reached a structurally loose equilibrium

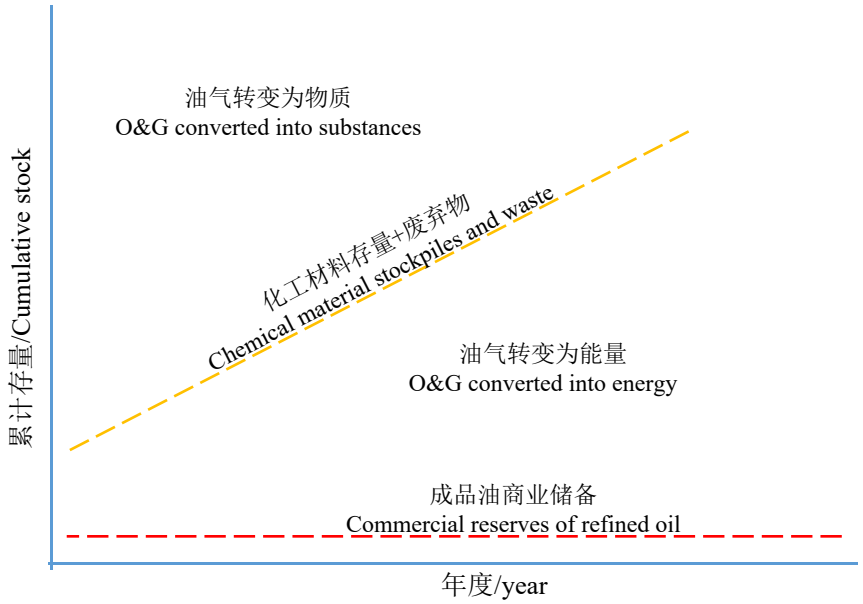




- 全球供需：石油产量、消费总体保持2.5～3%的平均同比增长，但全球产业结构发生了重大变化
  Global supply-demand: Oil production and consumption have generally maintained an average year-on-year growth of 2.5~3%, but the global industrial structure has undergone significant changes
- 石油生产：美在页岩油革命后产量激增，2007-2019年平均同比增长8.8%，最大17%；2017年超俄、沙成为世界最大产油国；2024成为净出口国，在全球产量占比达到20.8%。
  Oil production: U.S. oil production surged, with an average year-on-year growth of 8.8% from 2007 to 2019, peaking at 17%; In 2017, it surpassed Russia and Saudi Arabia to become the world's largest oil producer; By 2024, it became a net exporter, accounting for 20.8% of global output.
- 石油消费：中国作为主要增长引擎，即将结束长达45年的持续增长，预计石油能源消费在2027年达峰（据行业智库）。印度将为新引擎。
  China, as the main growth engine, is about to end a 45-year period of continuous growth, with oil and energy consumption expected to peak in 2027 (according to industry think tanks). India will be the new engine
- 闲置产能： 2000年以来的颜色革命导致相关产油国大量产能闲置闲置
  Spare capacity： The color revolution since 2000 has led to a large amount of spare capacity in oil-producing countries

1.7 炼油与化工的非等比转型进一步加剧了供需矛盾

The non-proportional transformation of refining and chemicals has further intensified supply-demand contradictions



- 非等比转型：成品油与化工材料的消费模型分别为消耗型和累积型。消耗型是将油气转变为了能量，除碳排放外不会有其他废弃物。而化工材料是将油气转变为了物质，会在地表持续累积。故减油增化并非1:1等比转型。一旦全球化工品消费增速低于增产速度（含固废再利用），必将导致化工产能快速过剩和恶性竞争

  Non-proportional transformation: The consumption models for refined oil and chemical materials are consumption and accumulation, respectively. Consumption converts oil and gas into energy, with no other waste except carbon emissions. Chemical materials, on the other hand, convert oil and gas into substances that continuously accumulate on the surface. Therefore, oil reduction and chemical enhancement are not a one-to-one transformation. Once the global growth rate of chemical consumption lags behind the production increase rate (including solid waste reuse), it will inevitably lead to rapid overcapacity and vicious competition in chemical industry

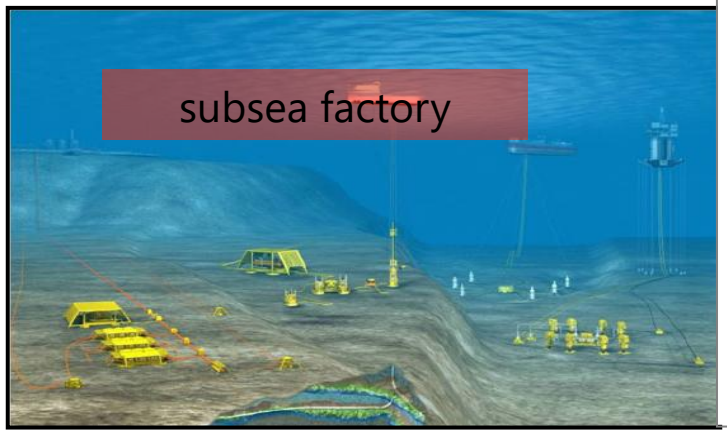
- 技术范式变革：分子炼化致复合收率大幅提升，进一步加重了松平衡

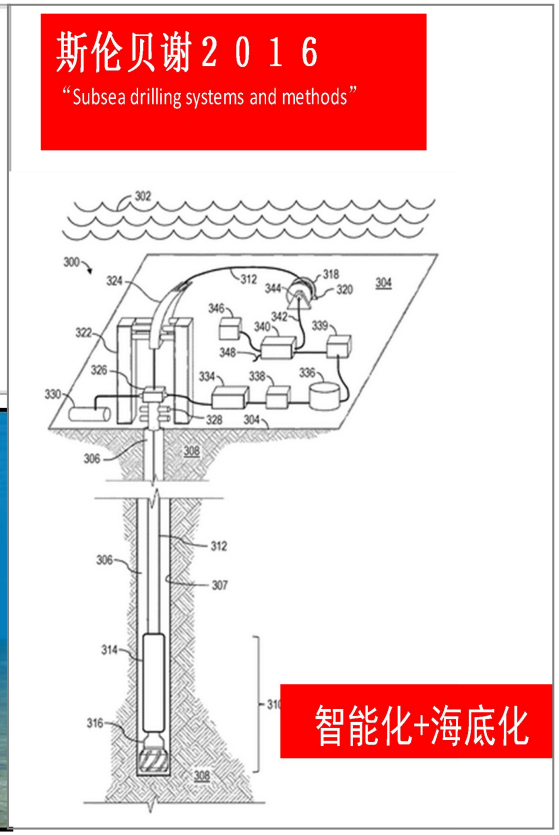
  Technological Paradigm Shift: Molecular refining has greatly increased the composite yield, further exacerbating the looseness balance

1.8 智能化极大削弱了自然禀赋带来的低成本优势

Intelligence greatly weakens the low-cost advantages from natural endowments







- 沙特：开采成本<10美元/桶（井口3.8美元/桶），完全成本19.68美元/桶
- 伊拉克/科威特：开采成本<5美元/桶，完全成本15-25美元/桶
- 伊朗：完全成本12-15美元/桶
- 委内瑞拉：开采成本8美元/桶，完全成本20美元/桶
- 尼日利亚：完全成本35美元/桶
- 俄罗斯：常规油田完全成本20-30美元/桶，其中西西伯利亚等成熟产区17-26美元/桶；北极、远东及大陆架油田40-50美元/桶；乌拉尔原油的完全成本约为48美元/桶，边际成本44美元/桶
- 挪威：综合开采成本15美元/桶
- 巴西盐下：井口8-12美元/桶，盈亏平衡点价格35-45美元/桶
- 加拿大油砂：完全成本35-41美元/桶
- 美国页岩油：井口成本8美元/桶，综合开采成本15美元/桶

*完全成本=勘探、开发、环保、运输、税费。综合成本不含运输和税费

1.9 国际油价在大博弈后可能进入中低基值-低振幅的新时期

After the big game, international oil prices may enter a new period of medium-low base value and low amplitude

- 构建基础核心研发体系，顶级科技收并购
- 油公司相继剥离需高度专业化的石油工程研发板块，聚焦核心
- 1991年苏联解体后，全球化、发展深海、探索页岩气，油气资产收并购

- 油服、油公司群组分离；油服200%涨价以收回研发投资，国际油价暴涨
- 全球致密/页岩油气资源调查获取最佳资源
- 布局国际油气市场，颜色革命确保定价权、印钞权
- 引领三大革命，油公司垂直一体化（埃克桑+美孚）

- 天然气市场成功复制石油定价机制
- 金融权投机集中布伦特，QE大规模进入国际市场；WTI放弃标杆价系地位
- 引领低碳经济和工业互联网革命
- 优化国家原油进口结构
- 油公司利润中心向炼化板块转移
- 上游及炼化板块第一波倒闭潮

- 价系分离缩小， QE成效甚微，各冲突未能拉开油价分离，唯天然气市场完成市场置换
- 随中国崛起，跨国垂直一体化浪潮和金砖本币结算，削弱油价武器和科技革命效果。中国成为全球石化中心，下游倒闭潮可控；国际原油、石化定价（霸）权遭破解
- 国际金融体系重构——稳定币、关税战；金砖本币结算体系；石油美元环流逐渐萎缩

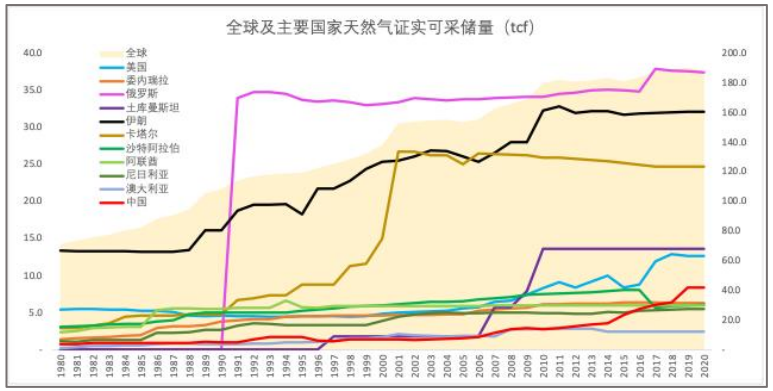


- 2030年SMR的度电成本0.3元
- 2033年核聚变度电成本0.3元

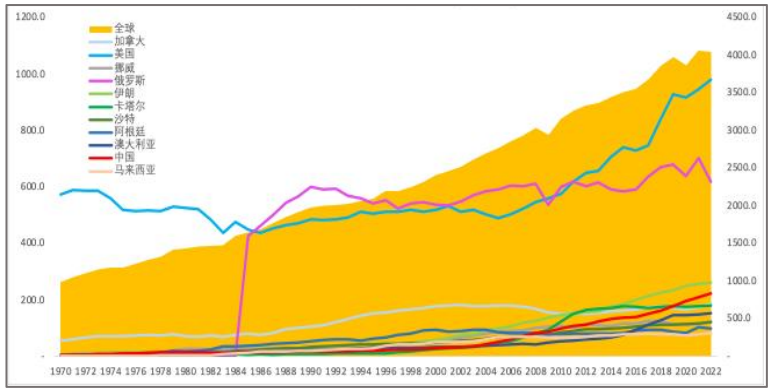
1.10 天然气已具备接替石油成为世界主导性能源的主要条件

Natural gas is now well-positioned to replace oil as the world's dominant energy source

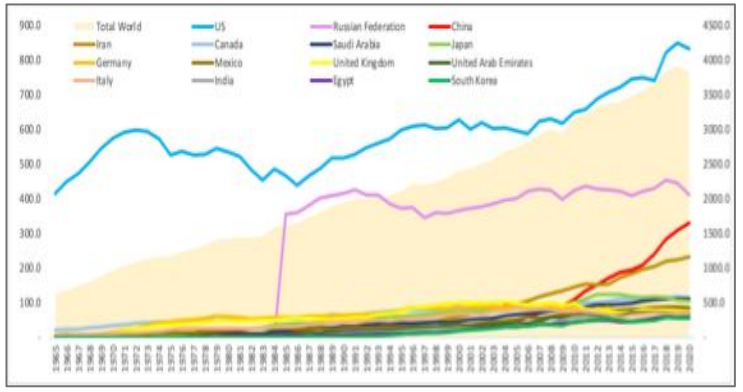
全球及主要国家天然气P1储量（TCF）
Global and Major Country Natural Gas P1 Reserves (TCF)



全球及主要国家天然气产量（BCM）
Global and Major Country Natural Gas Production (BCM)



全球及主要国家天然气消费（BCM）
Global and Major Country Natural Gas Consumption (BCM)

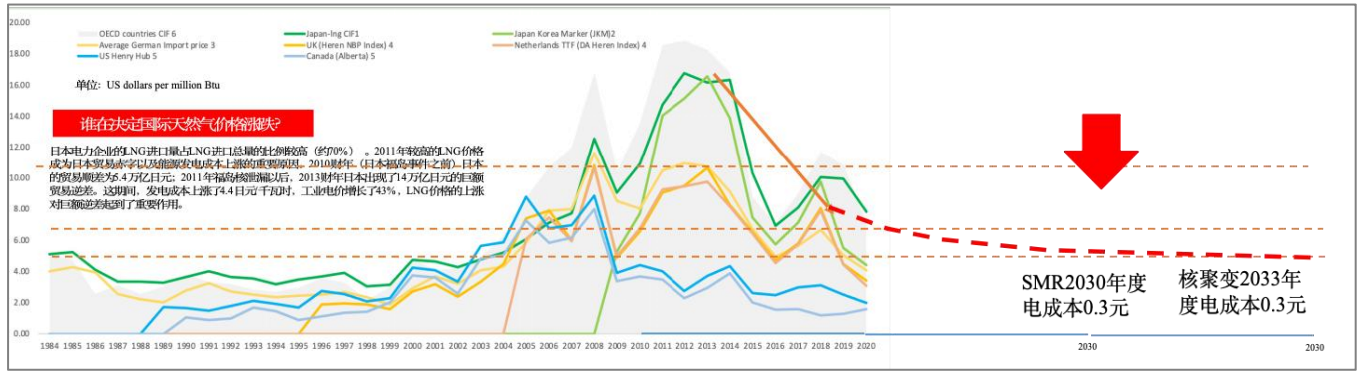


- 过去20年新增气储量提供百年发展韧劲。页岩气、智能化革命为走向引领奠定基础。低碳经济促进天然气消费
  Gas reserves provide resilience for a century of development. Technological revolution lays the foundation for leading the way. A low-carbon economy guides natural gas consumption
- 北美低碳转型基本完成。欧洲天然气市场重置将随俄乌冲突的结束而被定格。亚太市场的天然气供源体系基本形成
  North America's low-carbon transition is basically complete. The European natural gas market reset will be fixed with the end of the Russia-Ukraine conflict. The natural gas supply system for the Asia-Pacific market is basically established

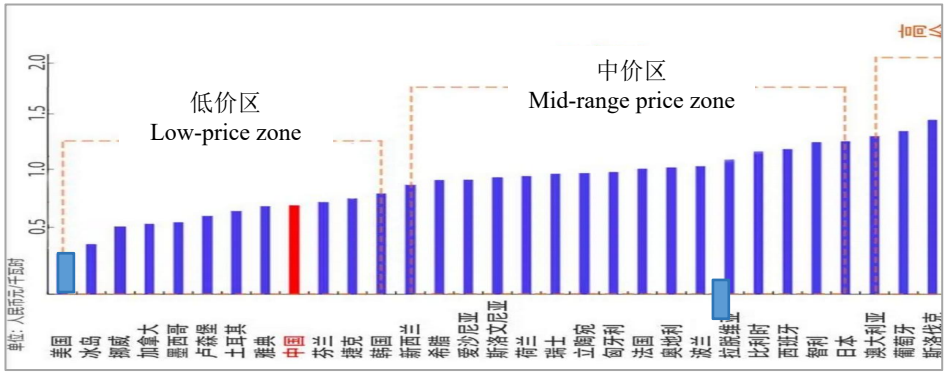
1.11 当前非结构性松平衡主要原因在于高气价和风险厌恶

The current unstructured loose balance is mainly due to high gas prices and risk aversion

国际天然气价格
International natural gas prices（USD/MMBTU）



全球电价
Global electricity prices（yuan/kWh）



- 中国全球最大新兴天然气消费市场，但电价处于全球低价区，其电力成本限定了进口天然气价格。中国度电成本（元/千瓦时）：水电（0.07 - 0.1）<光伏发电（0.1-0.3,结合储能0.26-0.38）<煤电（0.3 - 0.4）<陆上风电（0.35-0.47山地）<核电（0.43-0.6）<气电（0.29四川-1.03）<海上风电（0.75 - 1.15）<柴油发电（1.2 - 1.5）（参考《解析中国电力成本——现状、构成与展望》2025）。中国SMR到2030年的度电成本将小于0.30元。比尔盖茨投资的核聚变项目预计2028实现0.1美元，Helion Energy核聚变度电成本理论上可达1-6美分

China's electricity prices are among the lowest globally, and the prices of coal and nuclear power have limited natural gas prices

China's electricity costs (yuan/kWh) in order of low to high are: 1) hydropower (0.07 - 0.1); 2) photovoltaic power (0.1-0.3, combined with energy storage 0.26-0.38); 3) coal power (<0.3 - 0.4),; 4) onshore wind power (0.35-0.47 mountainous), ; 5) nuclear power (0.43-0.6), gas power (0.29 Sichuan-1.03),; 6) offshore wind power (0.75 - 1.15), ; 7) diesel power (1.2 - 1.5) . By 2030, the cost per kilowatt-hour of China's SMR will be less than 0.30 yuan. Bill Gates' nuclear fusion will reach $0.10 in 2028, and Helion Energy's fusion cost per kWh could theoretically reach 1-6 cents

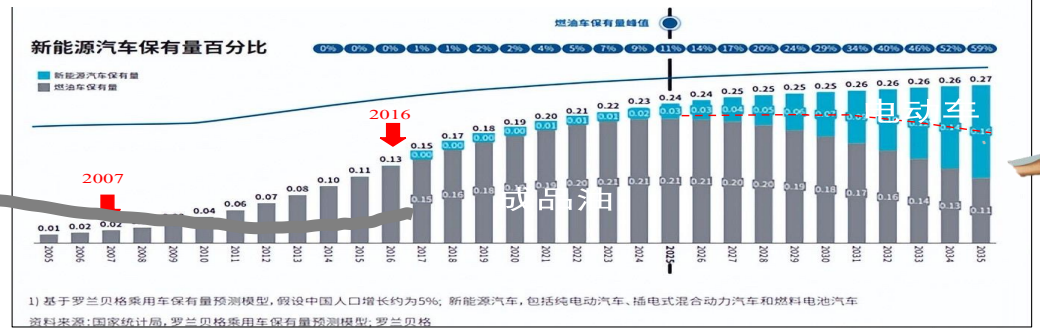
1.12 世界能源转型已进入下半场 新一轮能源革命在即

The global energy transition has entered its second half, and a new round of energy revolution is about to begin

美国主导供给侧革命
The U.S. leads the supply-side revolution



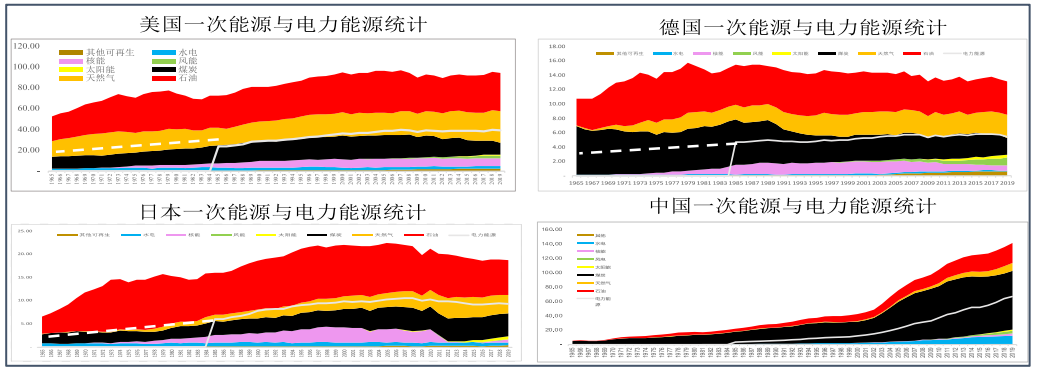
中国乘用车保有量及新能源车占比（2005-2035）
China's passenger car ownership and proportion of new energy vehicles



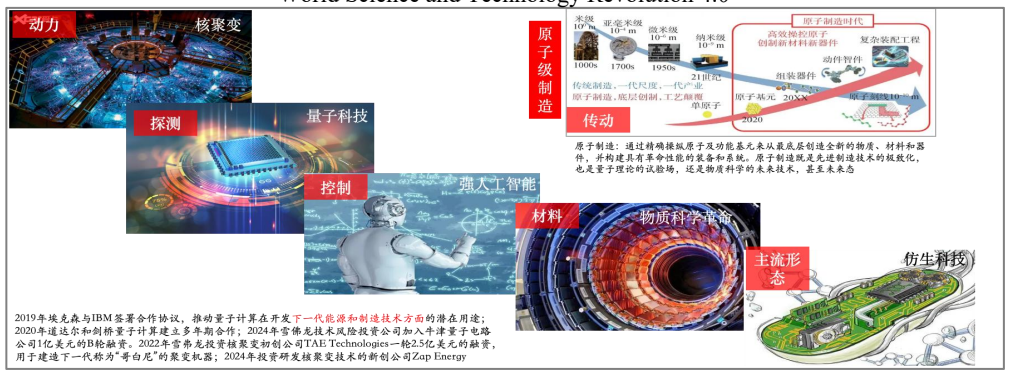
中国推动消费侧革命
China is driving a consumer-side revolution



世界主要大国低碳转型
The low-carbon transition status of major world powers



世界科技革命4.0
World Science and Technology Revolution 4.0





小结

- 世界能源转型兴起于2007年，预计将在2036年前后结束，天然气将主导未来的低碳能源文明
  The global energy transition began in 2007 and is expected to end around 2036, with natural gas leading the future of low-carbon energy civilization
- 全球石油供需目前处于结构性松平衡，产业矛盾已进入大爆发期，未来需要通过一场深刻的革命才能最终解决
  Global oil supply and demand are currently structurally loosely balanced, and industry contradictions have entered a period of explosive growth. Only a profound revolution will be needed to finally resolve them in the future
- 天然气能源已具备走向引领的主要条件，目前全球供需处于非结构性松平衡主要因“双高”抑制了消费需求。不可能通过高气价开启一个时代
  Natural gas energy now has the necessary conditions to become a leader. Currently, global supply and demand are in a non-structurally loose balance, mainly because the "double highs" suppress consumer demand. It is impossible to start an era with high gas prices
- 核聚变一旦在2030年前后实现历史性突破，将对油气行业产生极其深刻的影响‘
  If nuclear fusion achieves a historic breakthrough around 2030, it will have a profound impact on the oil and gas industry



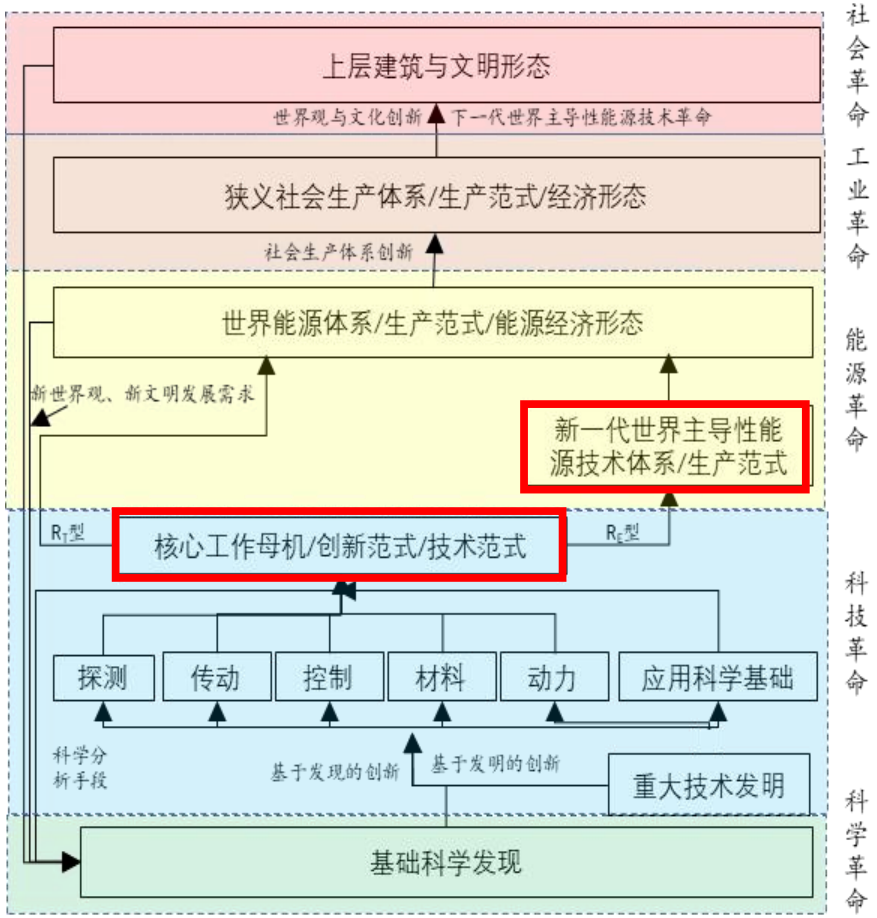
1. 世界能源转型发展形势
The situation of the global energy transition

2.世界能源革命的范式特征
The paradigm of the global energy revolution

3.即将来临的第五次油气革命
The upcoming fifth oil and gas revolution

2.1 世界能源革命为变革传导链枢纽 决定了CTP范式群

The global energy revolution as the hub of the transformation transmission chain determines the CTP paradigm cluster



- 革命就是创建范式，具有全球和领域（行业）两个层级
  Revolution is the creation of paradigms., has two levels
- 世界革命的五种类型构成变革传导链：
  The five types of world revolution form the chain of transformation transmission
  - 社会革命——人类文明范式变革（经济增长范式+国际引领）
    Social revolution—creating a new paradigm of human civilization
  - 工业革命——经济增长范式变革（CTP范化推广+国家治理）
    The Industrial Revolution—creating a new paradigm of economic growth
  - 能源革命——能源CTP范式变革（科技创新范式+工业母机）
    Energy Revolution — Creating the CTP Paradigm Group
  - 科技革命——科技创新范式变革（科学研究范式+科学仪器）
    Technological revolution—creating a model for technological innovation
  - 科学革命——科学研究范式变革（人类文明范式+思辨哲学）
    Scientific revolution—creating a scientific research paradigm
- 能源革命为变革传导链枢纽，率先发生在新一代世界主导性能源领域，决定其他实体经济领域的总范式，变革时间相对唯一性

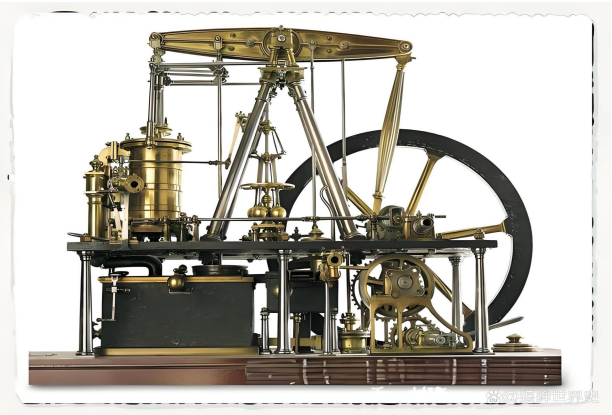
The energy revolution serves as the hub for the transformation transmission chain, first occurring in the new generation world's dominant energy sector

* CTP范式群=能源消费范式+技术范式+生产范式

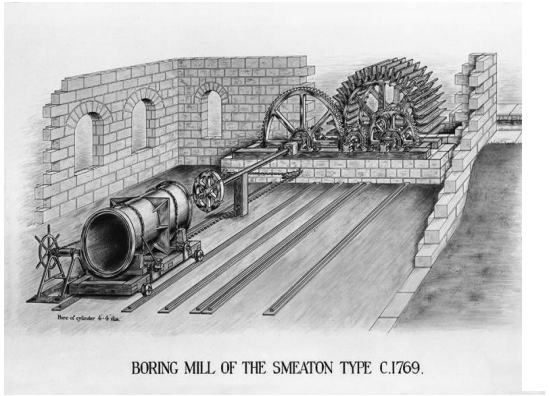
CTP paradigm group = energy consumption paradigm + technology paradigm + production paradigm

2.2 煤炭能源通过Re、Rt两次革命形塑机械化工业形态

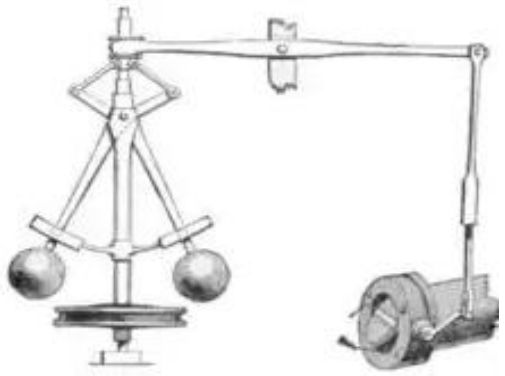
Coal energy has shaped mechanized industry through two revolutions（Re and Rt）



瓦特改良蒸汽机



威尔金森镗床



离心调速器飞球结构



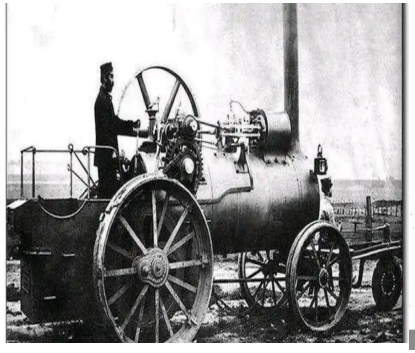
英国最早的纺纱工厂

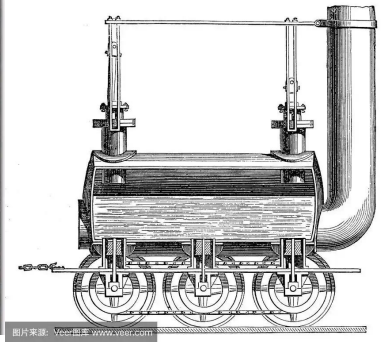
- 煤炭的Re型革命： 1769年瓦特改良蒸汽机
  Coal revolution Re: 1769 Watt’s steam engine
- 能源消费范式1.0： 煤炭能源+蒸汽机（固定式）
  Energy Consumption Paradigm 1.0: Coal + steam engine
- 科技创新范式1.0： 实验研究范式+威尔金森镗床
  Innovation Paradigm 1.0: Experimental Research Paradigm + Wilkinson Boring Machine

- 技术范式1.0：固定式机器驱动机器
  Technology Paradigm 1.0: Fixed machines drive machines
- 生产范式1.0：早期工厂化
  Production Paradigm 1.0: Early Factory-ization
- 工业形态1.0: 早期机械化
  Industrial Form 1.0: Fixed type of mechanization

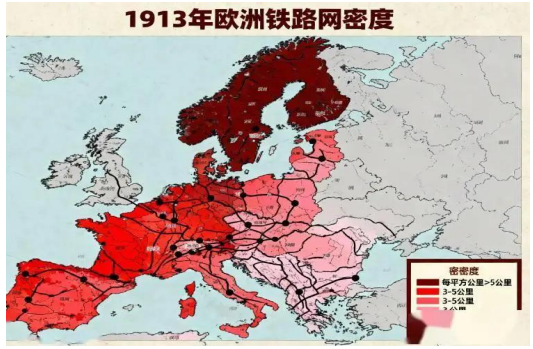
2.2 煤炭能源通过Re、Rt两次革命形塑机械化工业形态

Coal energy has shaped mechanized industry through two revolutions（Re and Rt）

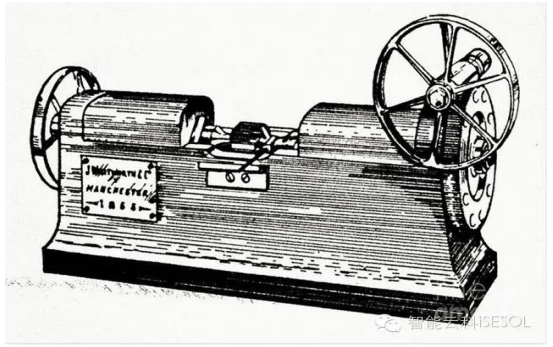




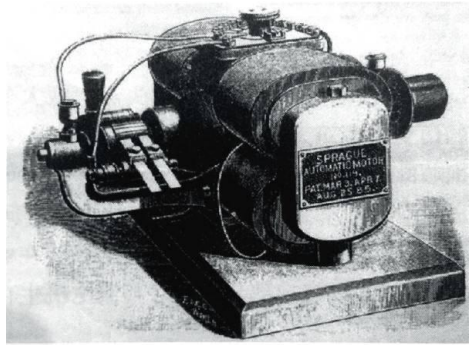
1825第一台蒸汽机车、1814年矿区第一台运煤蒸汽机车



1913年一战前的欧洲铁路网



惠特沃斯1834年的测长机

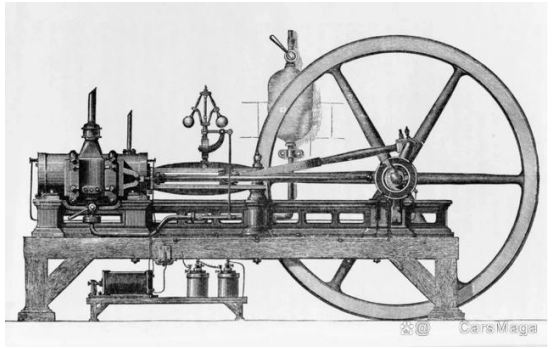


1886“电气牵引之父”斯普拉克的恒速无火花直流电动机

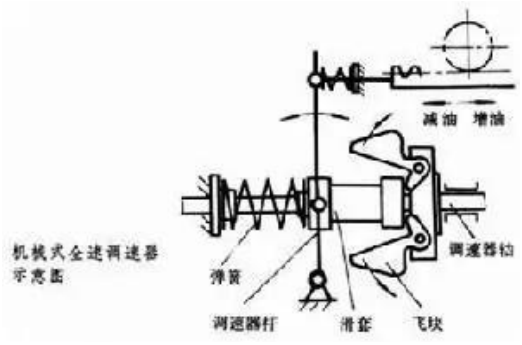
- 煤炭的Rt型革命：1825年蒸汽机车
  Coal revolution Rt: the steam locomotive of 1825
- 能源消费范式1.5：煤炭能源+蒸汽机（可移动）
  Energy Consumption Paradigm 1.5: Coal Energy + Steam Engine (Mobile)
- 科技创新范式1.5：实验研究范式+标准化机床
  Innovation Paradigm 1.5: Experimental Research Paradigm + Standardized Machine Tools
- 技术范式1.5：机器驱动机器（可移动）
  Technical Paradigm 1.5: Machines drive machines
- 生产范式1.5：现代制度的工厂化
  Production Paradigm 1.5: Industrialization of Modern Systems
- 工业形态1.5: 机械化
  Industrial Form 1.5: Mechanization

2.3 石油能源通过Re、Rt两次革命形塑自动化工业形态

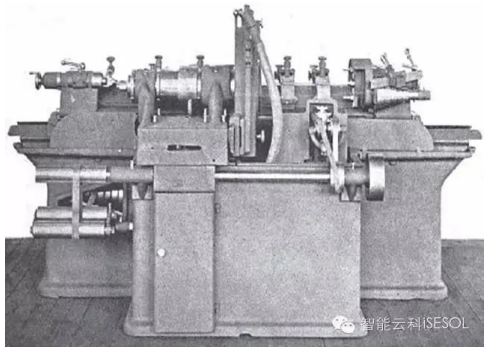
Oil energy has shaped the form of automated industries through two revolutions（Re and Rt）



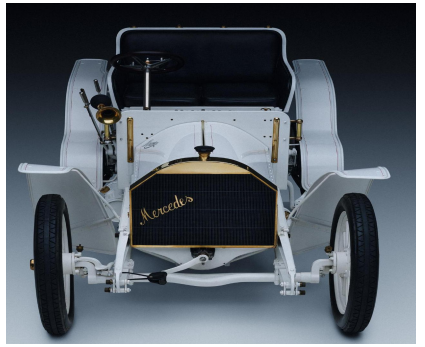
1876奥托造出的第一台四冲程内燃机



内燃机机械调速器



1900年重型磨床



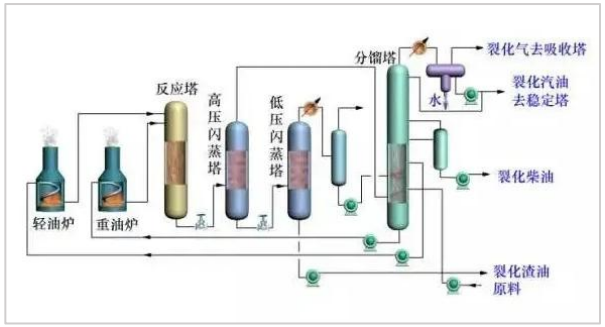
1886年第一辆内燃机驱动奔驰汽车

- 石油的Re型革命：1876年内燃机
  Petroleum‘s Re: 1876 internal combustion engine
- 能源消费范式2.0：石油能源+内燃机
  Energy Consumption Paradigm 2.0: Petroleum Energy + Internal Combustion Engine
- 科技创新范式2.0：技术原理+现代磨床
  Innovation Paradigm 2.0: Technological Principles + Modern Grinding Machines
- 技术范式2.0：机械自动化（内燃机）
  Technology Paradigm 2.0: Mechanical Automation
- 生产范式2.0：专业化、垄断
  Production Paradigm 2.0: Specialization, Monopoly
- 工业形态2.0：机械自动化
  Industrial Form 2.0: Mechanical Automation

*1876年维什涅格拉茨基的《论调节器的一般原理》；1876年美国布朗-夏普公司的第一台具有现代特征的精密化万能外圆磨床，1876年贝尔发明电话，电讯业兴起。

2.3 石油能源通过Re、Rt两次革命形塑自动化工业形态

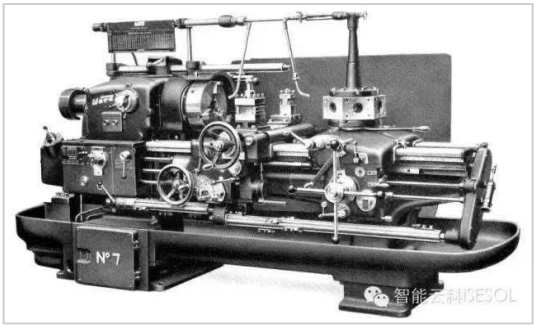
Oil energy has shaped the form of automated industries through two revolutions（Re and Rt）



连续热裂化工艺流程与气动自动化



Model 10 Stabilog比例加复位控制器



上世纪40年代电动机床



1913福特汽车流水线（机械自动化）

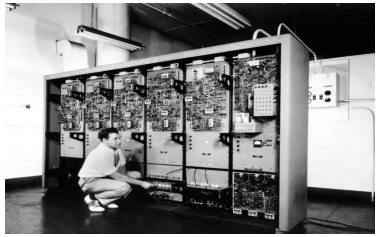
- 石油的Rt型革命：遥测+旋转法钻井+连续热裂
  Petroleum revolution Rt: rotary drilling + seismic/Well logging + continuous hot cracking in 1921
- 能源消费范式2.5：石油/电力+内燃机/电动机
  Consumption Paradigm 2.5: Oil/Electricity + Internal+Combustion Engine/Electric Motor
- 科技创新范式2.5：技术原理+精密自动化机床
  Innovation Paradigm 2.5:Technical Principles+Precision Automated Machine Tools
- 技术范式2.5：过程探测+对比+闭环反馈
  Technical Paradigm 2.5: Process detection + comparison + closed-loop feedback
- 生产范式2.5：层级化（科层制）
  Production Paradigm 2.5: Hierarchical System
- 工业形态2.5：电气自动化
  Industrial Form 2.5: Electrical Automation

*1904年的旋转法钻井、1915-1927年的遥测技术，但决定全球工业形态的电气自动化范式创建于炼油板块。1921年建成第一座基于达布斯工艺的商业化连续热裂装置（连续进料、连续反应、连续分离产品的全流程连续化），是“釜式蒸馏”走向“连续热裂化”的标志性节点。同期Foxboro推出了首款“Model 10 Stabilog比例加复位控制器”，为早期工控自动化的里程碑。炼油领域率先形成了大型连续流程工业的“测量-比较-执行-反馈（闭环反馈控制）”自动化范式。电动自动化兴起于二战期间。1922年N.迈纳斯基的PID（比例-积分-微分）控制论，1943年维纳的《控制论》为电气自动化的理论基石。1921年马克斯·韦伯《社会和经济组织的理论》的官僚制（科层制）理论，完善了层级化管理模式与生产组织形态，强调分工、标准化和等级权威。

2.4 天然气能源通过Re、Rt两次革命形塑智能化工业形态

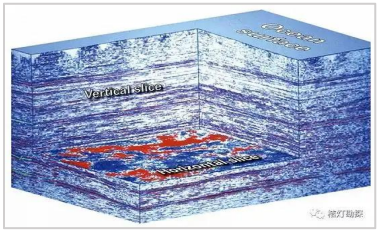
Natural gas energy is shaping the intelligent industrial form through two revolutions(Re and Rt)

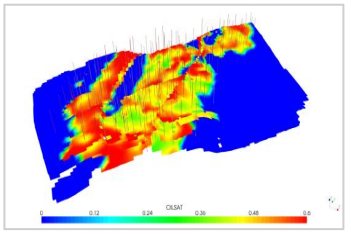

甲烷先锋号

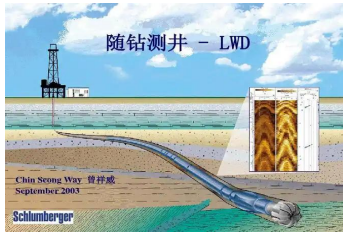

旋风计算机



仙童半导体ATE


数字地震


数值模拟



科学钻井

■ 天然气Re型革命：1960年LNG

Natural gas revolution Re: LNG in 1960

■ 能源消费范式3.0：气电/直燃+燃气轮机

Consumption Paradigm 3.0: Gas-electricity/direct firing + gas turbine

■ 科技创新范式3.0：模拟仿真+数控机床/集成电路/基础工业软件

Technological Innovation Paradigm 3.0: Simulation + CNC Machine Tools/Integrated Circuits/Basic industrial software

■ 技术范式3.0：数字化/信息化

Technology Paradigm 3.0: Digitalization/Informati-zation

■ 生产范式3.0：矩阵式、扁平化

Production Paradigm 3.0: Matrix and flattening

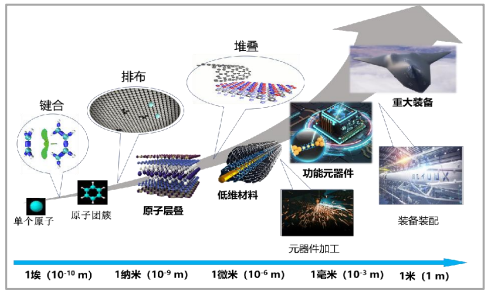
■ 工业形态3.0：数字化/信息化、分子经济

Industrial Form 3.0: Digitalization/Informatization

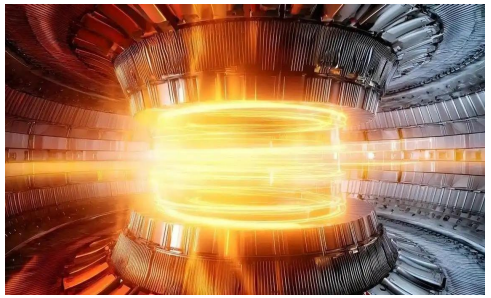
*1952年MIT将其用于处理埃克桑等油公司的手工数字地震资料；1952年斯伦贝谢在现场采集到第一条数字化测井曲线；形成构建物理世界数字镜像的“采集-处理-解释”技术范式。1953年G.H.布鲁斯等首次以数学方式模拟一维气相不稳定径向和线形流，为油气藏数值模拟的起点，标志着全球数模技术的诞生。德仪1958年推出了全球第一块集成电路。埃克桑美孚1975年投资Zilog，后者1976年成功推出Z80微处理器。斯伦贝谢1979收购仙童半导体的ATE，与同期泰瑞达、爱德万齐名。1981年斯伦贝谢完成TCP/IP研发，率先建立公司内部工业互联网，成为先驱

2.5 核聚变能将通过Re、Rt两次革命形塑自主化工业形态

Fusion energy will shape the form of autonomy industry through two revolutionst(Re and Rt)



原子级制造



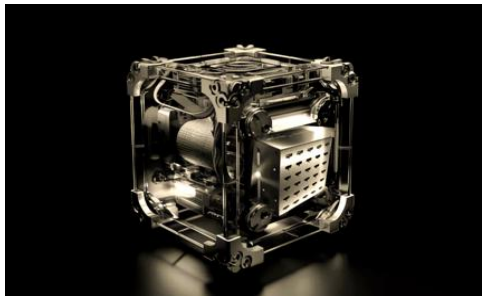
可控核聚变



SMR



MMR



微聚变

- 核聚变Re型革命： 预计2030年前后革命

  Nuclear fusion revolution Re: Around 2030

- 能源消费范式4.0： 核能（等离子态）+AI

  Energy Consumption Paradigm 4.0: Nuclear+AI

- 科技创新范式4.0： AI4S+原子级制造（原子尺度）

  Innovation Paradigm 4.0: AI4S + Atomic-level Manufacturing

- 技术范式4.0：量子探测+智能体自主（L1-L2级）+核能+人造新材料（原子级制造）

  Technology Paradigm 4.0: Quantization, Agent Autonomy

- 生产范式4.0：人机协同共创、共治

  Production Paradigm 4.0: Human-Machine Collaboration and Co-creation and Co-governance

- 工业形态4.0: 量子化、自主化、原子经济

  Industry 4.0: Quantization, Agent Autonomy 、 Atom economy

*核能发展三个方向：1）大型化（可控核聚变）接替传统煤电；2）小型化（SMR）解决能源数字中心、岛屿等分布式集中供能需求；3）微型化（MMR）满足智能体用能需求。
*L1—自主完成多目标优化Independently complete multi-objective optimization; L2—自主实现多路径优化Independently complete multi-path optimization

2.4 天然气能源通过Re、Rt两次革命形塑智能化工业形态

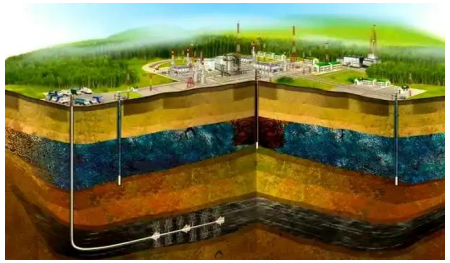
Natural gas energy is shaping the intelligent industrial form through two revolutions(Re and Rt)



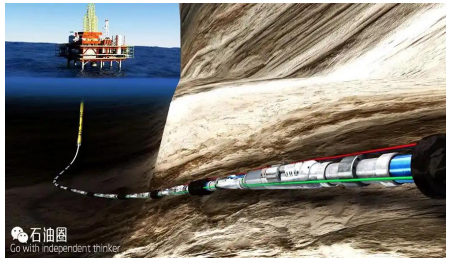
1985年与彼特森合作研发mems芯片



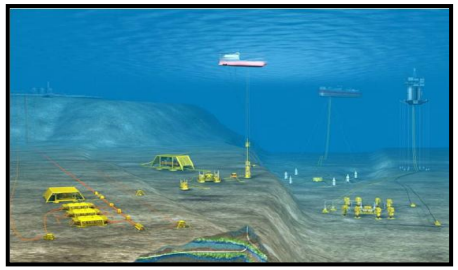
MEMS



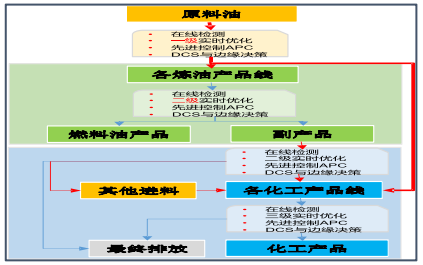
大型水平井压裂



智能完井



海底工厂



分子炼化

■ 天然气Rt型革命： 1997-1998智能完井、页岩气、分子炼化

Natural Gas Rt Revolution: 1997-1998 Intelligent Completion, Shale Gas, Molecular Refining

■ 能源消费范式3.5：气电/直燃+燃气轮机

Energy Consumption Paradigm 3.5: Gas Power/Direct Fired + Gas Turbine

■ 科技创新范式3.5：数据驱动范式+光刻机/3D增材打印/智控机床/基础工业软件/材料基因组

Innovation Paradigm 3.5: Data-Driven + Lithography Machine / 3D Printing/Intelligent machine tools/ basic industrial software / materials genomes

■ 技术范式3.5：MEMS@ANN-双决策闭环控制系统-机器学习

Technical Paradigm 3.5: MEMS@ANN-Dual Decision Closed-Loop Control System - Machine Learning

■ 生产范式3.5：一体化、人机协同

Production Paradigm 3.5: Integration

■ 工业形态3.5：智能化、分子经济

Industrial Form 3.5: Intelligentization

*1997年8月Saga Petroleum与哈里伯顿共同研制的智能井系统SCRAMS（Surface Controlled Reservoir Analysis and Management System）在北海Snorre油田成功安装，用于控制Statfjord组上部油藏的生产。哈里伯顿1997年推出的业界首套智能完井系统SmartWell，于1998年成功应用于文莱的油田。斯伦贝谢和贝克休斯联合研发的InCharge于1997年推出，1999、2000年相继在巴西Roncador油田和挪威Snohe油田实现商用。智能化及页岩气带来的流程再造，进一步催生了基于软件平台的大一体化。数字孪生1981年从油气行业起步。1987年斯伦贝谢与彼特森合作研发出最早的工业级MEMS（基于光刻机）。2018年斯伦贝谢为应对能源行业勘探开发领域的数据整合与跨学科协作需求，开发了DELFI云端数字平台，与Equinor、微软以及IBM、Red Hat等公司的战略合作，推动DELFI环境与OSDU数据平台等行业标准集成，为即将到来的第五次油气革命奠定了坚实的基础

小结
Summary

- 核能领域将于2030年前后率先形成CTP范式群。该范式群决定了第五次油气革命的总范式

  The nuclear energy sector will take the lead in forming the CTP paradigm cluster around 2030. This paradigm group determines the general paradigm of the fifth oil and gas revolution

- 核能有三个发展方向：1）大型化（可控核聚变）接替传统煤电；2）小型化（SMR）解决能源数字中心、岛屿分布式集中供能需求，替代工业气电；3）微型化（MMR）满足智能体用能需求，替代石油能源及各类电池

  Nuclear energy has three development directions: 1) Large-scale (controlled nuclear fusion) replacing traditional coal power; 2) Miniaturization (SMR) meeting distributed centralized energy supply needs in energy digital centers and islands, replacing industrial gas and electricity; 3) Miniaturization (MMR) meeting the energy needs of intelligent systems, replacing petroleum energy and various batteries

- 核能时代的技术五要素：探测（量子化）、传动与控制（自主化，SI）、材料（原子级制造）、动力（核能）。其中，Re型革命期间（2030-2060）将首先解决*量子探测、动力系统换代和材料科学革命*，*会涌现自主化早期形态*。制约石油工程技术发展的两大历史难题（动力续航、超材料）将成为历史。油气技术形态将发生剧变

  During the Re-type revolution (2030-2060), quantum detection, power system upgrades, and materials science revolutions will be the first to solve. The early forms of autonomy will emergence.

- 核能革命向油气行业的传导可能比任何历史时期都快，因为油服公司深度参与了核能革命相关基础科学体系的构建



CONTENT

1. 世界能源转型发展形势
The situation of the global energy transition

2.世界能源革命的范式特征
The paradigm of the global energy revolution

3.即将来临的第五次油气革命
The upcoming fifth oil and gas revolution

3.1 油气行业的架构、模式、范式

The structure,model，and paradigm of the oil and gas industry

- 行业结构框架：战略性油气资源类型-探测-钻采（含储运）-炼化-（动力引擎/消费体系）

  Industry Structure : Strategic Oil and Gas Resource Types - Exploration - Drilling & Production - Refining -（Power engine）

- 勘探开发模式：油气成藏组合类型及其经济有效开采所需的勘探开发配套技术方法/标准/作业规程、勘探开发策略及生产组织方式、合同模式、以及最小可采储量规模等经济评估参数指标体系；已经多个具有代表性的、成功的工业示范证实具有具有现实可操作、可重复、可评估、可推广性，是油气行业最重要源头创新，西方称“PLAY”。

  The exploration and development model is what Western Oil Company calls "PLAY"

- 勘探开发范式：用新一代探测技术、新一代钻采技术，在战略性油气资源领域首次成功实现工业示范，其创新生态系统支撑范式持续发展和泛化推广，会带来油气生产方式的根本性转变。行业范式需要以模式为基础，满足全球性范式的基本特征。创建时间晚于相关技术革命

  The industry paradigm needs to be base on the model (PLAY) and meet the basic characteristics of the global paradigm.

*战略性油气资源：是指特定时期在全球具有广泛分布，蕴藏量足以支撑一代能源文明，开采难度能驱动世界油气科技前沿的资源类型

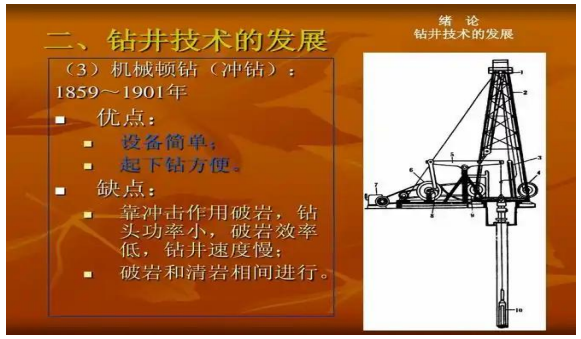
Strategic oil and gas resources: These refer to the types of resources widely distributed globally during specific periods, with reserves sufficient to support a generation of energy civilization, and whose extraction difficulty drives the forefront of global oil and gas technology

3.2 世界油气行业的第一次革命（1859）

The First Revolution in the Global Oil and Gas Industry（1859）









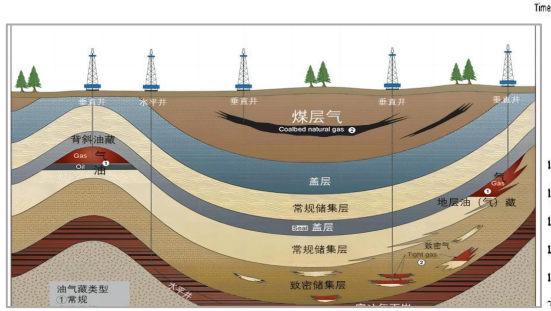
- **第一范式：地表含油构造-地质踏勘-蒸汽驱顿钻钻井-蒸馏（1859，Re）**

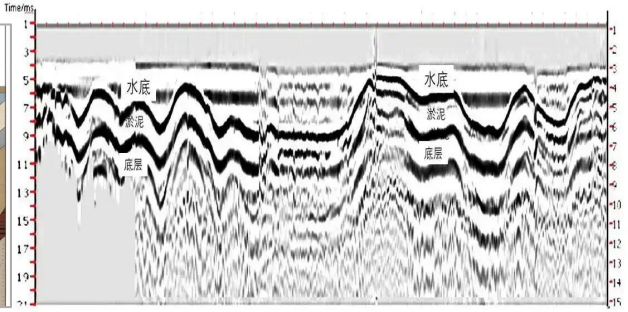
  Paradigm: surface oil-bearing structure - geological survey - steam drive drilling-distillation (1859, Re)

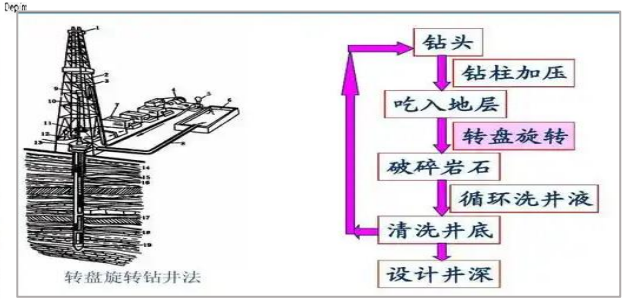
- 探测：1815年威廉·史密斯创建地质踏勘方法，1826年乔治.居维叶创建年代地层框架方法
  Exploration: In 1815, William Smith created the geological survey method.In 1826, George Cuvier created the chronostratigraphic framework method
- 钻采：1859年德雷克用蒸汽机驱动绳式顿钻钻机钻出了世界第一口具有商业开采价值的油井；用手动泵采油
  Drilling and Production: In 1859, Drake used a steam engine to drive a rope-type stomp drilling rig and drilled the world's first commercially exploitable oil well; Oil was extracted using manual pumps
- 炼油：1853年萨缪尔·M·基尔创建原油蒸馏方法
  Refining: In 1853, Samuel M. Kiel created the crude oil distillation method
- 理论：1859年构造地质学；1861年石油地质学；1863年T.S.亨特提出“石油源于低等海洋生物等有机质”
  Theory: 1859 Tectonic geology; 1861 petroleum geology; 1863: T.S. Hunt proposed that "petroleum originates from lower marine organisms and other organic matter."

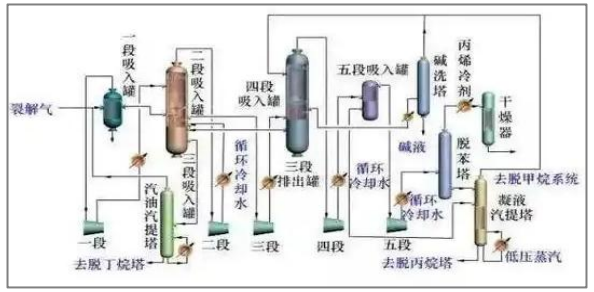
3.3 世界油气行业的第二次革命（1924）

The Second Revolution in the Global Oil and Gas Industry (Rt，1924)









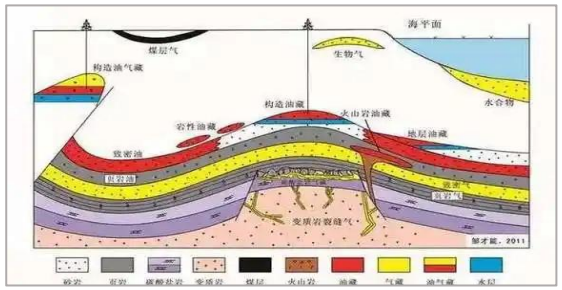
■ **第二范式： 隐伏背斜构造-遥测-旋转法钻井-催化/内燃机（Rt,1924）**

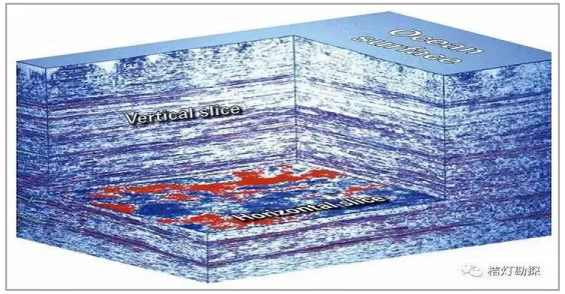
Second Paradigm: Hidden Anticline Structure - Telemetry - Rotary Drilling - Catalytic/Internal Combustion Engine (Rt, 1924)

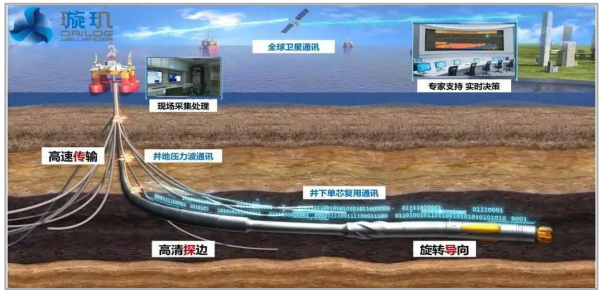
- 探测：磁法（1915）、折射波法地震（1919）、反射波法地震（1921）、重力（1922）、电法（1924）和测井（1927）。1922 年首次用重力发现与盐丘构造有关的油藏，1924年证实含油；1924年用折射波地震仪成功发现盐丘含油构造；1930年用反射波法地震勘探技术在美国发现油田
  Detection: magnetic (1915), refractive wave seismic (1919), reflection wave seismic (1921), gravity (1922), electrical (1924),and logging (1927). In 1922, was the first to use gravity to discover oil reservoirs and in 1924 confirmed oil content; In 1924, successfully discovered oil-bearing structures using a refractor seismometer; In 1930, discovered oil fields in the United States using reflection wave seismic exploration techniques
- 钻采：1904年帕蒂罗.希金斯用旋转法钻井技术成功在得克萨斯发现了“纺锤顶油田”。1925年首次使用游梁式抽油机
  Drilling and Production: In 1904, Patiro Higgins successfully discovered the "Spindle Top Oilfield" in Texas using rotary drilling techniques. In 1925, the first use of a beam-type pumping machine was made
- 炼化：1921达布斯工艺连续热裂（气动自动化），1923年建成首座乙烯裂解化工厂，1940年世界首套催化重整工业装置在美国建成投产
- 石油地质：I.C.怀特1885年《天然气地质》系统阐述了背斜构造控制油气聚集的规律，成为早期油气勘探的核心指导原则。1936年莱复生提出 “地层圈闭”概念；1953年威利斯顿盆地 Antelope 油田的发现成为全球性勘探领域战略调整的里程碑。1941年潘钟祥首次提出陆相生油理论。1950年P.H.卡伦《浊流是递变层理的成因》标志着现代浊流理论的建立

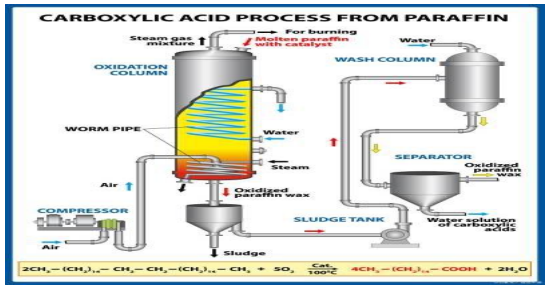
3.4 世界油气行业的第三次革命（1964）

The Third Revolution in the Global Oil and Gas Industry (Re,1964)









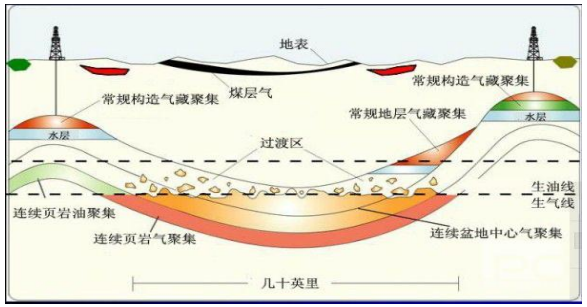
■ 第三范式：隐蔽油气藏-数字探测-科学钻井-分子筛流化床/有机金属催化剂（Re,1964）

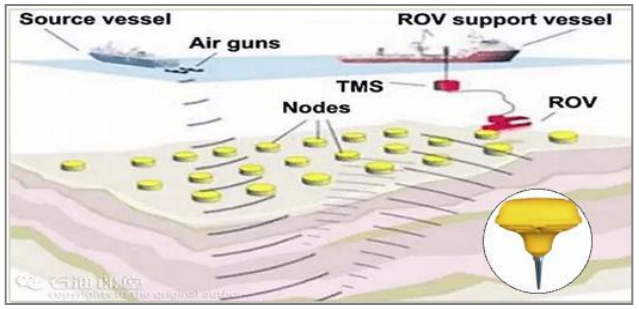
Third Paradigm: Subtle oil and gaa **Reservoirs - Digital Detection - Scientific Drilling - Molecular sieve fluidized bed (Re, 1964)**

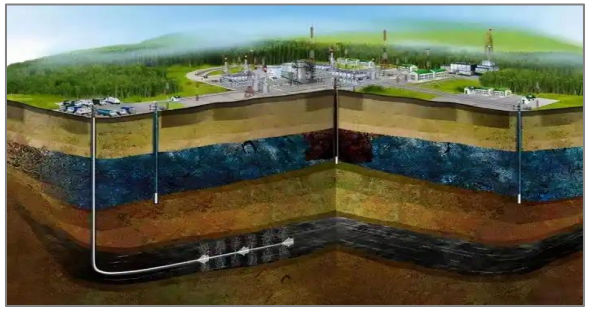
- 数字探测（Digital detection）:以1961/1964年数字地震检波器的出现作为全数字地震勘探兴起的标志
- 科学钻井（Scientific drilling）：1948年喷射钻井。1950年代肯达尔、戈因斯提出喷射钻井水力设计三大理论，实现了从经验设计到科学设计的跨越。60年代，高压喷射钻井已开始规模化应用，奠定现代高效钻井的基础。自动化钻井技术最早源于“计算机控制的钻井”，兴起于上世纪60年代。
- 战略性资源（subtle traps）：莱复生于1964年首次明确提出“隐蔽圈闭”概念，强调除背斜外，地层、岩性、不整合等难识别圈闭的勘探价值，并在1966年的论文《The Obscure and Subtle Traps》中进一步系统化，以此推动全球勘探前沿领域的战略转向。
- 炼化（Refining and Chemical Industry）：1953年K.齐格勒开发出常压下使乙烯聚合的有机金属催化剂，高分子化工快速发展。1962年石油裂化用的小球分子筛催化剂在移动床中应用，1964年XZ-15微球分子筛在流化床中使用，石油炼制工业提高到新高度
- 地质理论（Petroleum geology theory）：1965年板块构造、1963-1987年层序地层、1950-60年代有机生油三大革命性理论推动石油地质学走向成熟。
  Three revolutionary theories： plate tectonics（1965）, sequence strata （1965～1987）, and organic oil production （ 1950s-60s ）

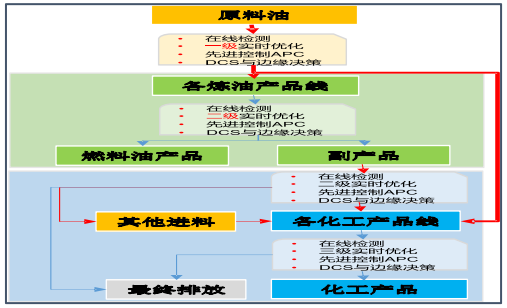
3.5 世界油气行业的第四次革命（2002）

The Fourth Revolution in the Global Oil and Gas Industry (Rt,2002)









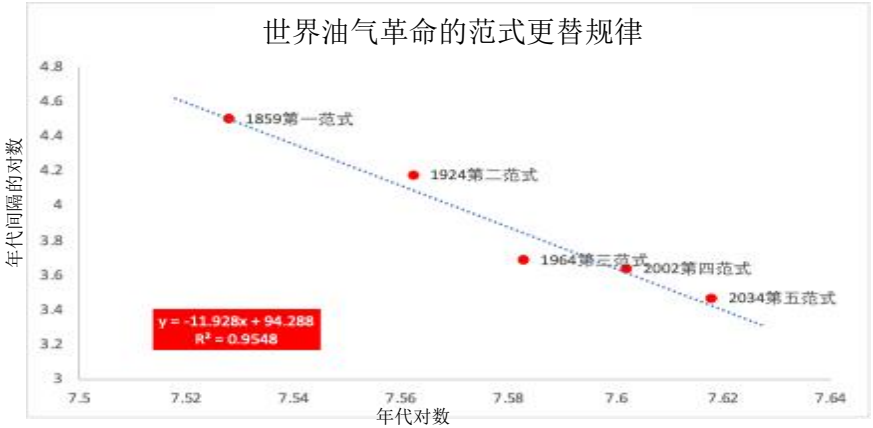
■ 第四范式：页岩油气-节点探测-智能钻采/水平井压裂-分子经济（智能化炼化一体化）（Rt,2002）

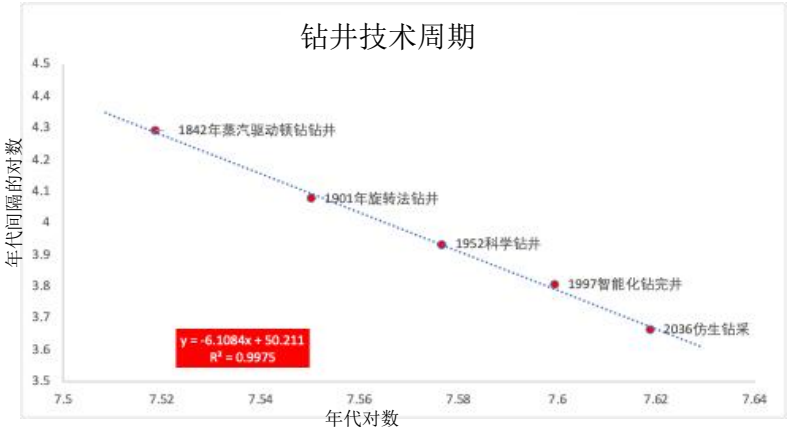
Fourth Paradigm: Shale Oil & Gas - Node Detection - Horizontal Well Fracturing/Intelligence - Molecular Economy (RT, 2002)

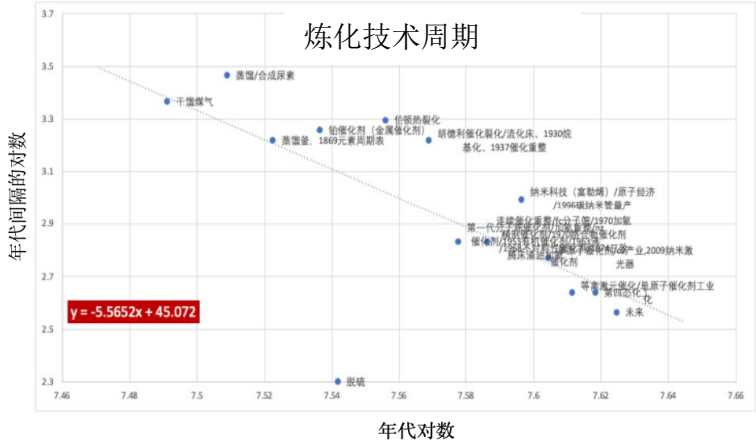
- 节点探测(Node Detection)：基于MEMS的数字传感器技术于1998年进入地震勘探市场，为节点地震奠定基础。2002 年 Seabed 地球物理公司等联合在英国北海项目首次实现海底节点（OBN）规模化应用，开启“无缆存储式”时代
- 智能钻完井：1997哈里伯顿推出SmartWell智能井系统，1998与壳牌合作遥控井下控制阀并实时监控生产，英国北海项目最早使用智能完井技术的时间是1997年，OBN与智能钻完井结合的时间大体于2002年最早出现在北海油区
- 页岩油气水平井压裂：1997/1998年页岩气水力压裂重大突破。切萨皮克公司1994年用水平井成功穿天然裂缝获高产；大陆能源公司1999年用旋转导向水平井钻探，DEVON公司2002年收购米切尔公司后将水平井和压裂技术组合，页岩气大型水平井压裂技术突破。
- 分子炼化：埃克桑美孚2002 年启动“分子管理”项目，首次系统性应用分子级模拟与数据驱动优化炼化过程，通常被视为智能化炼化的早期技术雏形。实际上，埃克桑美孚1998年就启动了新一轮战略 。
- 石油地质理论：大综合。1994《含油气系统——从源到圈闭》、1997威尔特的含油气系统模拟软件平台。

3.6 第五次油气革命为Re型 将发生在2035年前后

The fifth oil and gas revolution will occur around 2035 Re-Type







■ 行业范式形成期在2035年前后。其中，探测、钻井、炼化技术的变革点分别为2030-2032年、2034-2036年、2030-2032年

The industry model formation period is expected around 2035. Among them, revolutions in exploration, drilling, and refining technologies will occur between 2030-2032, 2034-2036, and 2030-2032, respectively

■ 据创新发展规律，范式创建前10-15年为旧范式老化，新思想、新发现、新技术快速涌现时期，也是油气科技创新的最佳机遇期

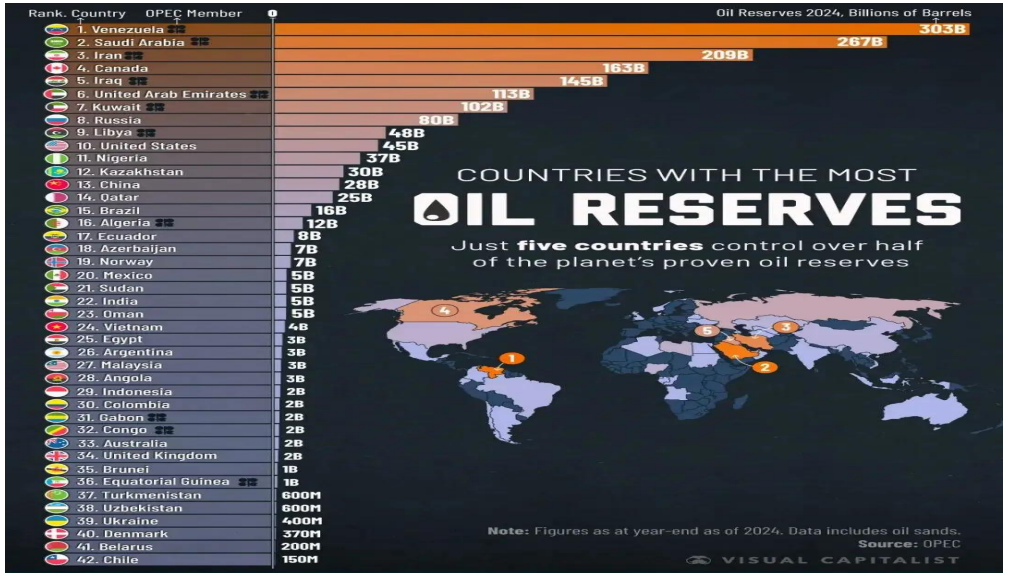
According to the laws of innovation development, the 10-15 years before paradigm creationare a period when old paradigms age and new ideas, discoveries, and technologies rapidly emerge, making it the best opportunity period for oil and gas technological innovation

■ Re型革命为大理论创建期，上一代技术成熟发展和全面推广，创建新一代技术的早期形态；Rt型革命为大技术创建期，新一代技术发展完善，新一代理论方法萌芽。智能化有知识技术化、技术隐形化特征

The Re-type revolution is the period of creating major theories, when the previous generation of technology matures and is fully promoted, creating the early forms of new generation technologies; The R-type revolution is the period of creating large technologies, when new technologies develop and become perfect, and new theoretical methods begin to emerge.

3.7 未来的战略性资源领域-1:油砂油/超稠油/稠油

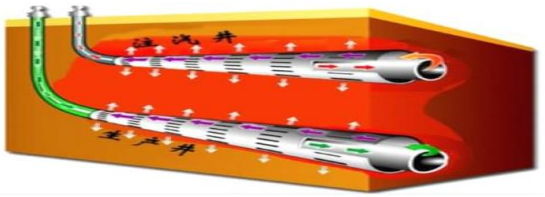
Future strategic resource areas - 1: Oil sands oil / Ultra-heavy oil / Heavy oil



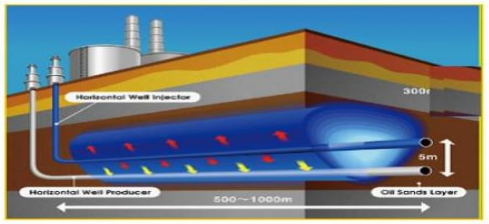
SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage) ——蒸汽 辅助 重力 泄油

。一种有效的超稠油开采方式，蒸汽辅助降粘，重力主导泄油；通常采用双水平井模式。

SAGD循环预热示意图



SAGD生产机理示意图



SAGD井组开发过程分为启动和生产两大阶段：

启动阶段：普遍采用注蒸汽循环，建立上下水平井有效泄油通道

；

生产阶段：上水平井连续注蒸汽，下水平井连续产油。

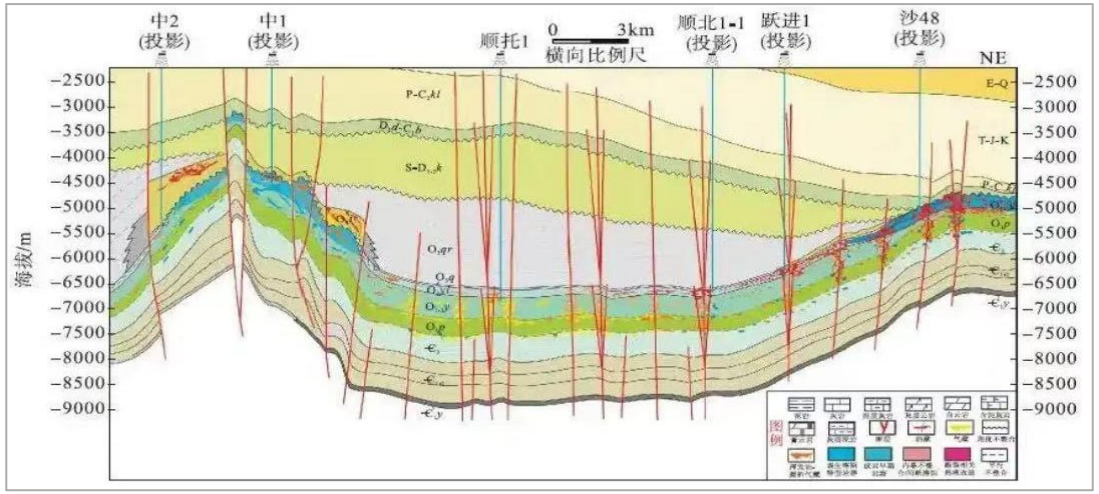
- 据国际能源署数据，全球稠油资源量约9380亿吨，占剩余石油资源的70%，其中80%以上集中在委、加、美、中等国。上一代开采技术包括SAGD、CSS 、空气泡沫驱、 智能热采。但西方石油企业过去15-20年的创新应该致力于颠覆SAGD模式，技术形态上会满足核能时代的量子化-自主化-原子经济特征。
- According to data from the IEA, global heavy oil resources are about 938 billion tons, accounting for 70% of the remaining oil resources, with over 80% concentrated in Venezuela, Canada, the US, and China. Previous generation extraction technologies included SAGD, CSS, air foam drive, and intelligent thermal extraction. However, innovations by Western Oil companies over the past 15-20 years should aim to disrupt the SAGD model, with technical forms meeting the quantization-autonomy-atomic economic characteristics of the nuclear energy era

为什么该领域30年前的创新没有构成上一代革命（页岩气、智能化），又该如何催生下一代革命？

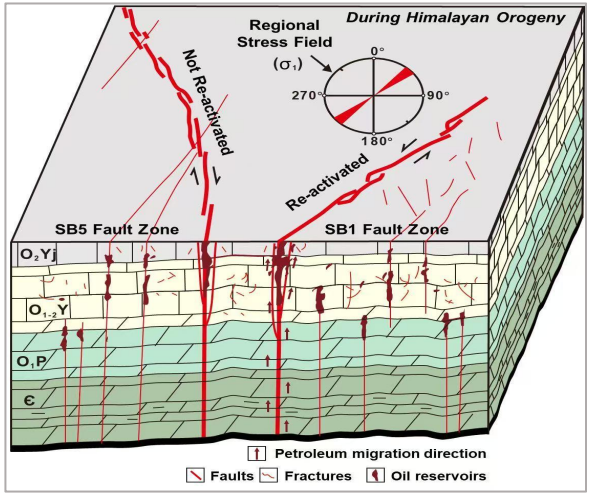
3.7 未来的战略性资源领域-2:输导体油藏

Future strategic resource areas - 2: Migration channel reservoirs（MCR）

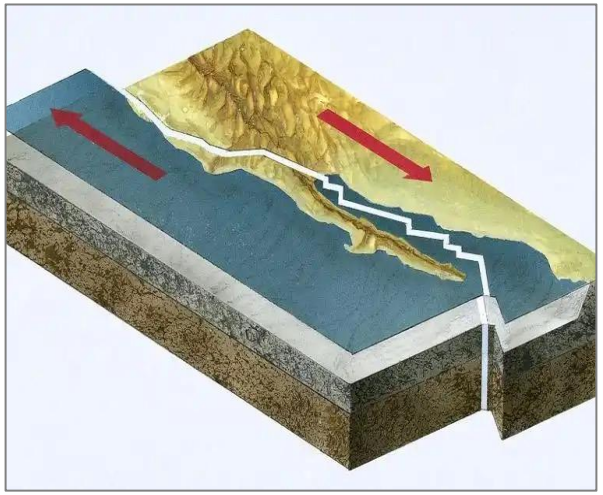
塔里木盆地顺北断溶体油藏
The Shunbei fault-karst cave-type oil reservoir in the Tarim Basin



断溶体油藏模型
Fault-karst cave reservoir model



走滑断层模型
Strike-slip fault model

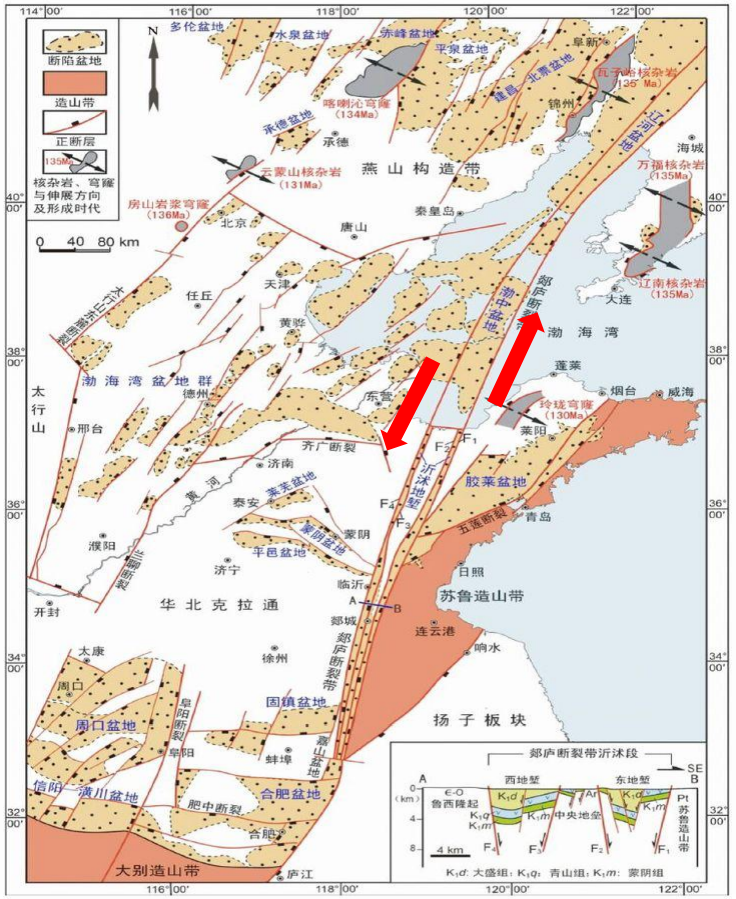


- 输导体油藏：就是保存在油气运移通道及其伴生储集空间内的油气，包括断层空间、断溶体、裂缝体、潜山内幕、风化壳等油气藏类型。中国在过去70多年中多有发现，如辽河兴隆台213千吨井等。但2016年塔里木盆地顺北油田的发现，才让这类油气藏的战略价值得以凸显。顺北油田已探明2.76亿吨，年产300万吨；邻区哈拉哈塘同类油气藏的三级储量5亿吨。美国圣安的列斯断层输导至地表的油苗已经采了150年约20万口井。只是人们极少想到断层空间本身就是储油系统。长期实践表明，输导空间内还蕴藏着大量油气资源。
  Migration channel reservoirs: These are the oil and gas stored within migration channels and associated storage spaces, including faults, disrupted solutions, underground hills, weathered crusts, and conglomerate layers. Many have been discovered globally over the past 70 years, but the 2016 discovery of the Shunbei Oilfield highlighted the strategic value of these oil and gas reservoirs. There are also large amounts of oil and gas resources within faults (especially strike-slip faults).

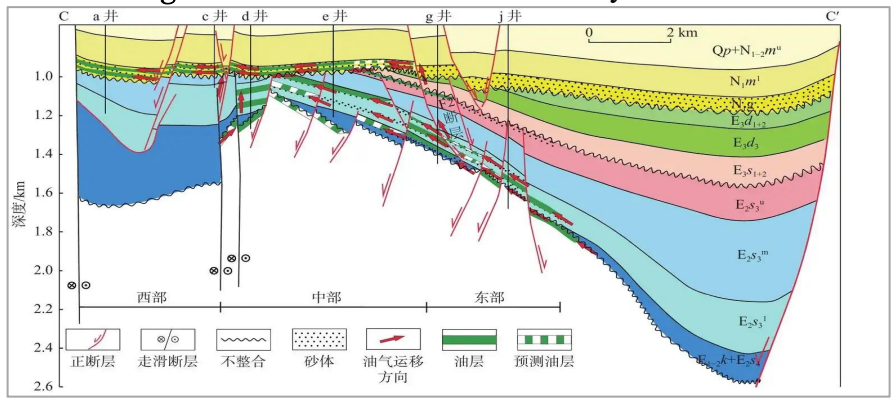
3.7 未来的战略性资源领域-2:输导体油藏

Future strategic resource areas - 2: Migration channel reservoirs

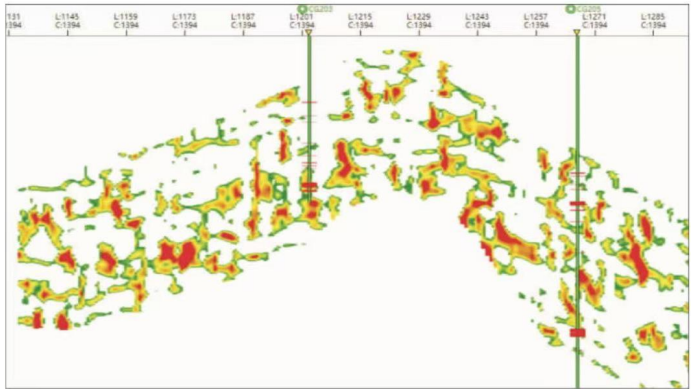
渤海湾盆地与郯庐断裂带
Bohai Bay Basin and Tanlu Fault Zone



输导体油藏具有广泛的分布
Migration channel reservoirs are widely distributed



潜山内幕油藏
Hidden Mountain Interior Oil Reservoir



- 三大难点：1）高角度地质体的地震成像挑战传统地面探测；2）储集空间分布受断层内成岩作用控制，成藏条件极为复杂，有高度的非均质性和成藏不确定性；3）断裂带钻探对钻头、钻具和精准导向钻探提出了很高要求

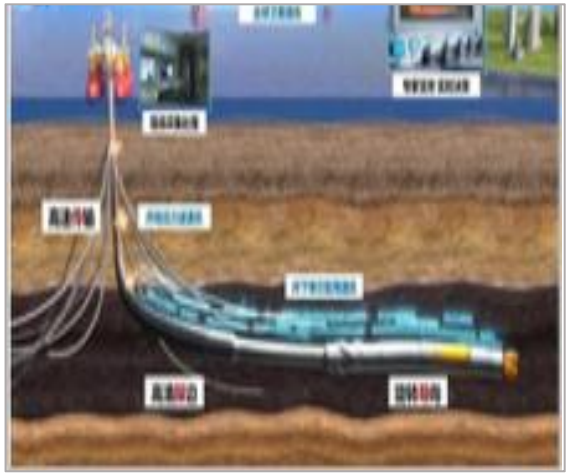
  Three major challenges: 1) Seismic imaging of high-angle geological bodies challenges traditional ground detection; 2) The spatial distribution of reservoirs is controlled by diagenesis within faults, resulting in extremely complex accumulation conditions, high heterogeneity, and accumulation uncertainty; 3) Fault zone drilling places high demands on drill bits, drill tools, and precision guided drilling

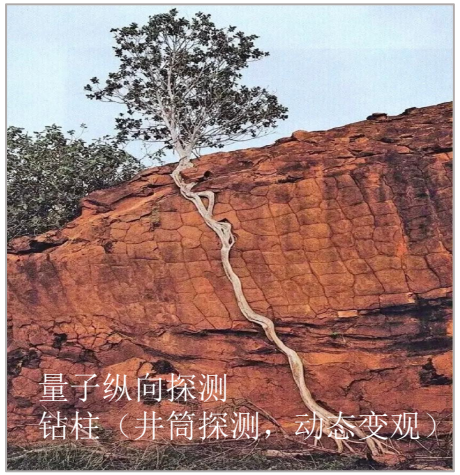
- 战略价值：隶属含油气系统的运移子系统，与生烃子系统的页岩油气具有同等级别，石油地质研究的薄弱环节。世界级难题才能催生世界级的革命性找油技术

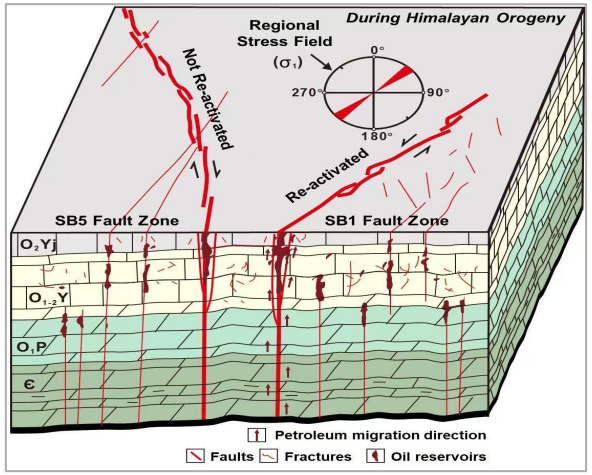
  Strategic value: Belongs to the migration subsystem of oil-bearing systems, and is of the same level as shale oil and gas in hydrocarbon-generating subsystems. World-class challenges will give rise to revolutionary oil search technologies

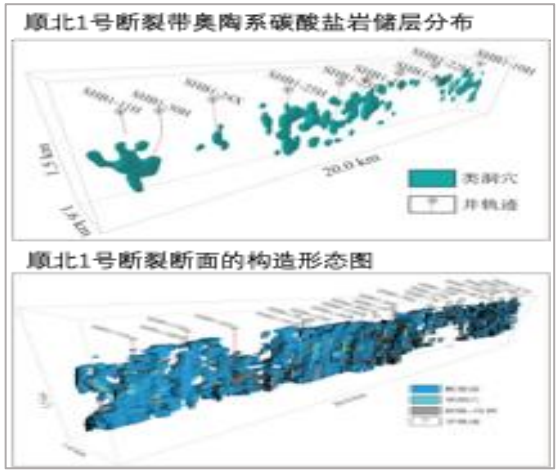
3.8 油气第五技术范式：量子探测—自主钻采—原子经济

The fifth technical paradigm o: Quantum detection—Autonomy drilling/production—Atomic economy







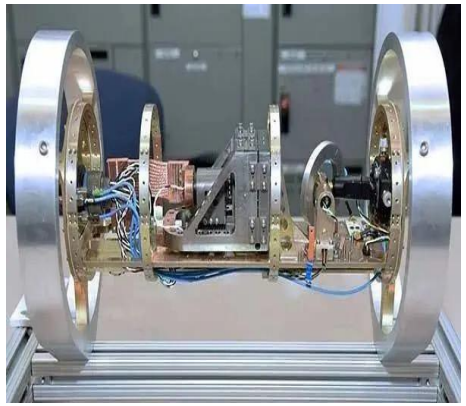


- 自主钻采：类似树根自主找水过程。1）通过钻头-钻柱构建纵向量子探测阵列，动态变观；2）智能钻头近目标（如断层）探测，精准识别各类分布式中小型油藏（溶洞、岩性体、剩余油等）；3）智能钻头自主进行多目标/多路径寻优、交互式规划，并自主实施钻采。适用于输导体油藏
- Autonomous drilling and extraction: similar to the autonomous water search process of tree roots. 1) Constructing longitudinal quantum detection arrays through drill bit-drill string and dynamically transforming observation systems; 2) Intelligent drill bits detect near targets (such as faults) to accurately identify various distributed small and medium-sized oil reservoirs (karst caves, lithological bodies, residual oil, etc.); 3) Intelligent drill bits autonomously perform multi-objective/multi-path optimization and interactive planning, and independently implement drilling and production. Especially suitable for migration channel reservoirs

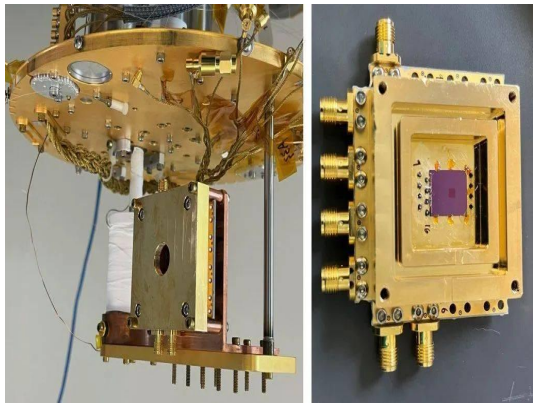
3.8 油气第五技术范式：量子探测—自主钻采—原子经济

The fifth technical paradigm o: Quantum detection—Autonomy drilling/production—Atomic economy

NV色心/量子磁力仪



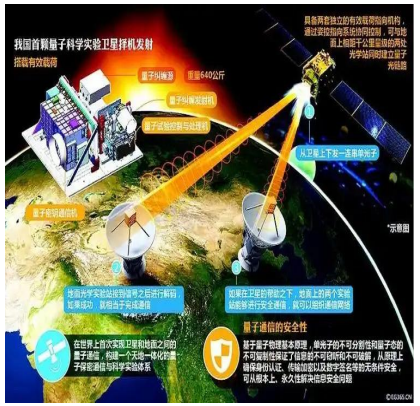
超导单光子探测仪



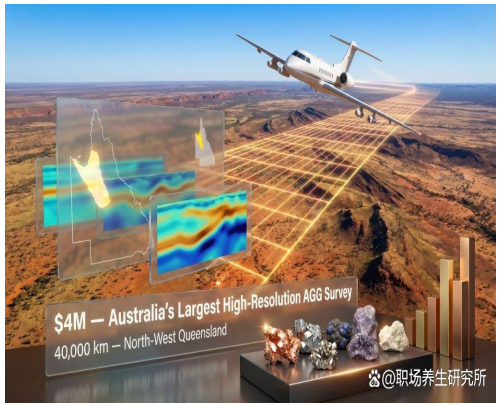
中国光量子计算机



中国量子通讯



中国量子重力探测

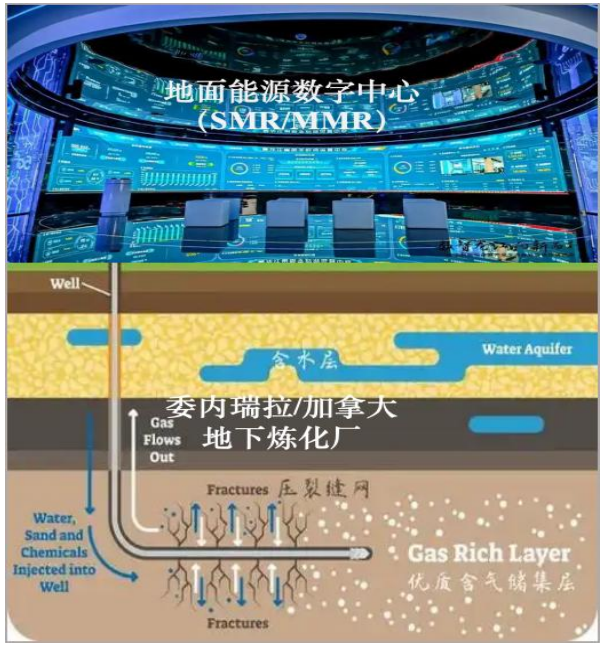


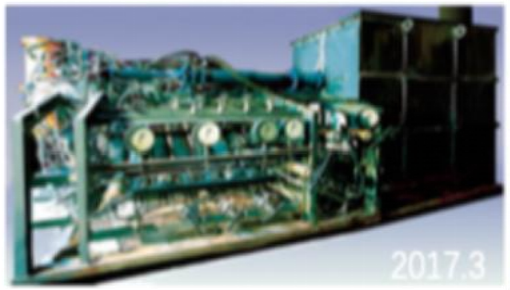
- 美国量子科技前沿（Frontiers of American quantum technology）：2018年《国家量子倡议法案》（NQIA）；2022年《芯片与科学法案》修订，将量子信息科学纳入NSF管理范畴；2024年再授权法案，新增NASA量子卫星通信研究，重点从基础研究转向应用开发与产业化；2026年参议院商务委员会通过再授权法案（附7项修正案），纳入量子制造促进、量子沙箱、国家量子网络安全迁移战略等新内容；2026年8月《量子赋能关键矿产填图法案2026》（QECMMA）。斯伦贝谢2000年“超导单光子探测仪”专利
- 中国油气量子技术（Quantum technology in China’s oil and gas industry）：1）量子探测：油公司2026年已与高校联合攻关，在量子探测技术上取得重大突破，实现对地下千米油气储量的精准探测,其准确率较传统勘探方法提升40%以上。2）量子计算：2026年基于量子计算的“超深碳酸盐岩走滑断裂系统地震成像技术”较好解决了埋深超 7300 米的油藏成像难题。
- 沙特阿美量子技术（Saudi Aramco Quantum Technology）：已在达兰部署了首台200量子比特的中性原子量子计算机，并推出了中东首个商用量子计算即服务（QCaaS）平台，合作方是法国量子计算公司Pasqal

断溶体油藏需要智能钻头进入目的层后，对地下目标体实施原位精准探测：纵向量子探测

3.8 第油气第五技术范式：量子探测—自主钻采—原子经济

The fifth technical paradigm o: Quantum detection—Autonomy drilling/production—Atomic economy

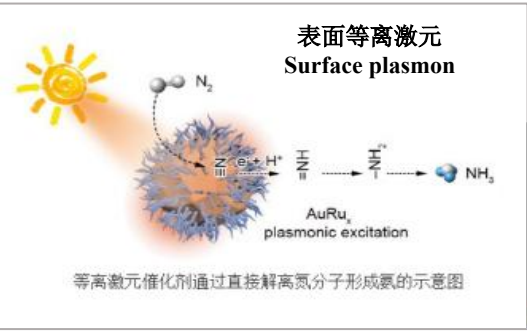


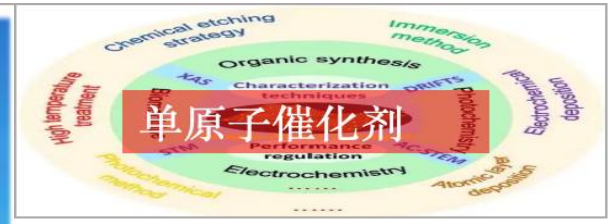


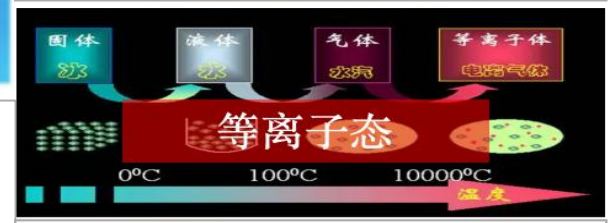


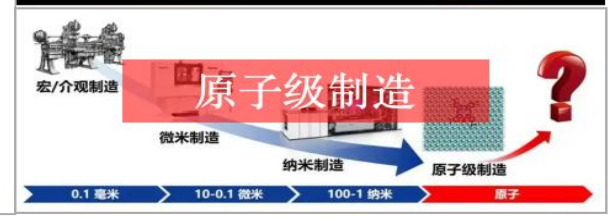


超燃冲压
Scramjet engine









- 原子经济：是指化学反应中原料原子转化为目标产物的比例，计算公式为原子利用率=（目标产物摩尔质量/所有反应物摩尔质量总和）×100%（斯坦福 B.M.Trost， 1991 ）
- 技术形态：地面工厂/地下工厂+能源数字中心。OSDU（开放的地下数据空间）作为多域智能技术系统的标准体系为上下游一体化和多能互换奠定基础。基本框架为“地面能源数字中心+地下炼化工厂”，产出的可能是C、H、O，与原子级制造结合，可能实现能源、化工、金融、信息体系在区块链上的大一统。

炼化原子经济将颠覆现有技术体系。一旦油砂/超稠油/稠油采用地下井工厂模式（量子+自主化+原子经济）就可能构成一场革命

小结

- 第五次油气革命可能发生在2035年前后。战略性油气资源领域可能为输导体油藏和油砂油/超稠油/稠油；油气技术的第五范式为“量子探测+自主化钻采+原子经济”；科技创新范式为“AI4S+原子级制造”；生产组织形态为“人机共创、共治”

  The fifth oil and gas revolution may occur around 2035. The strategic oil and gas resource sector may include conductor reservoirs and oil sands oil/ultra-heavy oil/heavy oil; The fifth paradigm of oil and gas technology is "quantum detection + autonomous drilling and extraction + atomic economy"; The technological innovation paradigm is "AI4S + atomic-level manufacturing"; The production organization form is "human-machine co-creation and co-governance"

- 输导体油藏隶属油气运移子系统，将带来石油地质理论和勘探开发技术的重大突破，中国具有范式创建的有利条件。油砂油/超稠油/稠油需要基于成熟的智能化技术和原子经济相关技术，通过创建地下炼化工厂并与能源数字中心的结合，形成全新上下游一体化技术形态，创建能源金融新优势，美国具有有利条件与优势

  MCR belong to the oil and gas transport subsystem, which will bring major breakthroughs in petroleum geology theory and exploration and development technology, giving China favorable conditions for paradigm creation; Oil sands/extra-heavy oil/heavy oil require mature intelligent technologies and atomic economy-related technologies. By establishing underground refining plants and integrating them with energy digital centers, a new integrated upstream and downstream technology form is formed, creating new advantages in energy finance. The United States has favorable conditions and advantages



结束语

- 世界能源转型将随2030年前后的核聚变革命而进入最后阶段，将在2036年前后完成转型；天然气会在未来较长时期内占有重要地位

  The global energy transition will enter its final stage around 2030 with the nuclear fusion revolution, and is expected to complete around 2036. Natural gas will play an important role for a considerable period in the future.

- 核聚变领域将率先创建CTP范式群并决定第五次油气革命的总形态。因此，石油企业需要积极参与核能的变革过程，以获取最佳科技创新资源，融入新一代的科技创新共同体

  The nuclear fusion field will take the lead in creating the CTP paradigm cluster and determine the overall form of the fifth oil and gas revolution. Therefore, oil companies should actively participate in the nuclear energy transformation process to obtain the best technological innovation resources and integrate into the new generation of scientific and technological innovation communities

- 第五次油气革命将兴起于2032-2036年，可能率先兴起于美国和中国。全球油气行业已处于科技创新的最佳历史机遇期，需要进一步加强国际合作和战略研究

  The fifth oil and gas revolution will emerge between 2032 and 2036, may first emerge in the United States and China. The global oil and gas sector is currently in the best historical opportunity period for technological innovation, which requires further strengthening international cooperation and strategic research