

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.091>



## 非常规油气地质学理论技术及实践

邹才能, 杨智\*, 张国生, 朱如凯, 陶士振, 袁选俊, 侯连华, 董大忠, 郭秋麟, 宋岩, 冉启全, 邱振, 吴松涛, 马锋, 白斌, 王岚, 熊波, 潘松圻, 刘翰林, 王小妮

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要:** 形成非常规油气地质学理论技术, 引领油气工业从常规到非常规, 进源找油, 是世界油气勘探开发形势发展和科学研究持续推进的必然趋势. 研究团队紧密结合中国特殊地质背景和油气工业条件, 经过 10 余年不懈攻关, 构建了非常规细粒沉积学、非常规油气储层地质学、非常规油气成藏地质学、非常规油气开发地质学和常规—非常规油气有序“共生富集”发展战略等学科内容, 集成了非常规油气关键实验技术、勘探评价技术、开发工程技术和常规—非常规油气勘探开发关键技术, 基本形成了非常规油气地质学理论技术体系框架. 从常规油气的“源控论”到非常规油气的“源储共生系统”, 深刻认识到源岩层系及其大面积紧密接触的致密储集层系中可以聚集巨量工业油气资源. 非常规油气地质学理论技术, 引领推动了非常规油气地质学科发展、关键技术研发、国家标准制定、国家实验室建设和专业人才培养, 有效推进了我国致密油和气、页岩油和气等非常规油气资源的工业勘探开发, 截至 2022 年底, 中国非常规油气产量超过  $1 \times 10^8$  t 油当量, 约占油气总产量 28%, 其中非常规气约占天然气总量的 41%, 非常规油约占石油总量的 17%. 油气不可再生, 但非常规油气革命可延长油气工业的生命, 持续强化理论、技术和管理“三个创新”的深度融合, 努力实现地下原位加热低熟页岩转化油气、地下原位加热富油煤岩转化油气和地下原位压裂脆性页岩层系产出油气“三个地下革命”的颠覆创新, 不断推动以鄂尔多斯盆地为代表的超级能源盆地化石能源与新能源的协同发展, 塑造碳中和下中国式超级能源盆地“油气与新能源”融合发展模式, 非常规油气革命支撑油气工业可持续发展, 力推实现中国“能源独立”.

**关键词:** 非常规油气地质学; 常规—非常规油气地质学; 源岩油气; 源岩层系油气; 细粒沉积; 微纳米级孔喉; 连续型油气聚集; “人工油气藏”; 进源找油; 页岩革命; 煤岩革命; 源内化学转化; 超级能源盆地.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2023)06-001-22

收稿日期: 2023-05-01

## Theory, Technology and Practice of Unconventional Petroleum Geology

Zou Caineng, Yang Zhi\*, Zhang Guosheng, Zhu Rukai, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Hou Lianhua, Dong Dazhong, Guo Qiulin, Song Yan, Ran Qiquan, Qiu Zhen, Wu Songtao, Ma Feng, Bai Bin, Wang Lan, Xiong Bo, Pan Songqi, Liu Hanlin, Wang Xiaoni

Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

**基金项目:** 中石油科技项目(No.2021DJ18); 国家高层次特殊人才支持计划(第四批次).

**作者简介:** 邹才能(1963—), 男, 博士, 中国科学院院士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师、博士生导师, 主要从事常规—非常规油气地质学理论研究与实践、新能源与能源战略等研究. E-mail: zcn@petrochina.com.cn

\* **通讯作者:** 杨智, 男, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师、博士生导师, 主要从事非常规源岩层系油气地质、常规油气地质勘探等研究工作. E-mail: yangzhi2009@petrochina.com.cn

**引用格式:** 邹才能, 杨智, 张国生, 朱如凯, 陶士振, 袁选俊, 侯连华, 董大忠, 郭秋麟, 宋岩, 冉启全, 邱振, 吴松涛, 马锋, 白斌, 王岚, 熊波, 潘松圻, 刘翰林, 王小妮, 2023. 非常规油气地质学理论技术及实践. 地球科学, 48(6): 1-22.

**Citation:** Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, Zhu Rukai, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Hou Lianhua, Dong Dazhong, Guo Qiulin, Song Yan, Ran Qiquan, Qiu Zhen, Wu Songtao, Ma Feng, Bai Bin, Wang Lan, Xiong Bo, Pan Songqi, Liu Hanlin, Wang Xiaoni, 2023. Theory, Technology and Practice of Unconventional Petroleum Geology. *Earth Science*, 48(6): 1-22.

**Abstract:** Forming the theory and technology of unconventional petroleum geology for driving the expansion of exploration and development from conventional to unconventional resources and exploring petroleum inside source kitchen is an inevitable trend in the global petroleum industry. With over 10 years of efforts, we have formed the theories of unconventional fine-grained sedimentology, unconventional reservoir geology, unconventional hydrocarbon accumulation geology, unconventional petroleum development geology, and orderly accumulation of conventional - unconventional petroleum, and developed the key technologies of unconventional petroleum experiment, exploration appraisal, development engineering, and conventional - unconventional petroleum exploration and development, depending upon the distinct geologic setting and petroleum industry conditions in China. These theories and technologies have basically comprised a system framework for unconventional petroleum geology. The evolution from the source control theory for conventional petroleum to the source-reservoir symbiosis system for unconventional petroleum leads to a profound understanding that a huge size of economic resources accumulate in source rock strata and extensive tight reservoir beds in the immediate vicinity. Innovations in the theory and technology of unconventional petroleum geology have guided the unconventional petroleum geology discipline development, research and development of key technologies, formulation of national standards, construction of state laboratories, and professional training, and promoted the economic exploration and development of unconventional resources such as tight oil and gas and shale oil and gas in China. By the end of 2022, unconventional oil and gas production exceeded  $1 \times 10^8$  t oil equivalent, accounting for 28% of total oil and gas production in China. Specifically, unconventional gas contributed to 41% of total gas production, and unconventional oil contributed to 17% of total oil production. Oil and gas are non-renewable, but unconventional oil and gas revolution may prolong the life-span of petroleum industry. Through intensifying the innovations in theory, technology and management, and performing “three underground revolutions”(in-situ conversion of low-mature shale for oil and gas, in-situ conversion of oil-rich coal rock for oil and gas, and in-situ fracturing of brittle shale for oil and gas production), it is possible to coordinate the fossil energy and new energy resources in energy super basins represented by Ordos, and shape an integration of petroleum and new energy in energy super basins in China against the background of carbon neutrality. Unconventional oil and gas revolution is expected to sustain the petroleum industry for another 150 years or more and boost China’s Energy Independence.

**Key words:** unconventional petroleum geology; conventional-unconventional petroleum geology; source rock oil and gas; oil and gas in source rock stratum; fine-grained sediment; microscale to nanoscale pore throat; continuous hydrocarbon accumulation; artificial hydrocarbon reservoir; exploring petroleum inside source kitchen; shale revolution; coal rock revolution; chemical transformation within source; super energy basin.

## 0 引言

非常规油气突破,对世界油气工业发展和油气地质学科创新均具有革命性影响(Schmoker, 1995; Pollastro, 2007; Yarkin, 2012; 贾承造, 2017; 邹才能等, 2014a, 2015; 窦立荣等, 2022)。随着油气勘探开发从常规不断向非常规领域延伸,进(近)源找油气工业活动越来越频繁,非常规油气地质理论认识和技术研发将不断向深入化精细化推进(Zou *et al.*, 2009, 2016, 2018a; 戴金星等, 2012; 马永生等, 2012, 2018; 贾承造等, 2017, 2021; 赵文智等, 2020; 金之钧等, 2021)。2008年起作者及研究团队引入并发展了连续型油气聚集理论,2009起先后几次出版了“非常规油气地质学”相关中英文论文和教材,基本构建起了非常规油气地质学科的理论框架(邹才能等, 2013a, 2014a, 2017b, , 2019c; 杨智等, 2015a, 2019a, 2021a, , 2022a)。本文叙述了非常规油气地质学的产生背景,主要介绍了研究团队关于非常规油

气地质学的理论技术进展和国内生产应用的思考 and 实践,展望了非常规油气革命路径及超级能源盆地多能协同发展,以期与同行学者共同努力,更好共同推动非常规油气学科进步和工业持续发展。

## 1 非常规油气地质学的产生背景

### 1.1 油气勘探开发发展趋势

世界油气工业的勘探开发领域,正持续从占油气资源总量 20% 的常规油气,向占油气资源总量 80% 的非常规油气延伸,进(近)源找油气成为勘探开发的主流趋势(Zou *et al.*, 2013a, 2017, 2022; 邹才能等, 2018; Yang *et al.*, 2022a)(图 1)。非常规油气突破,大幅增加了现实油气资源,推动了世界能源行业诸多重大转变,非常规油气在世界油气产量中的作用不断加强、地位不断提高。综合分析非常规油气变革,烃源岩内巨量资源是基本条件,颠覆性理论技术创新是关键要素,能源布局及政策保障是

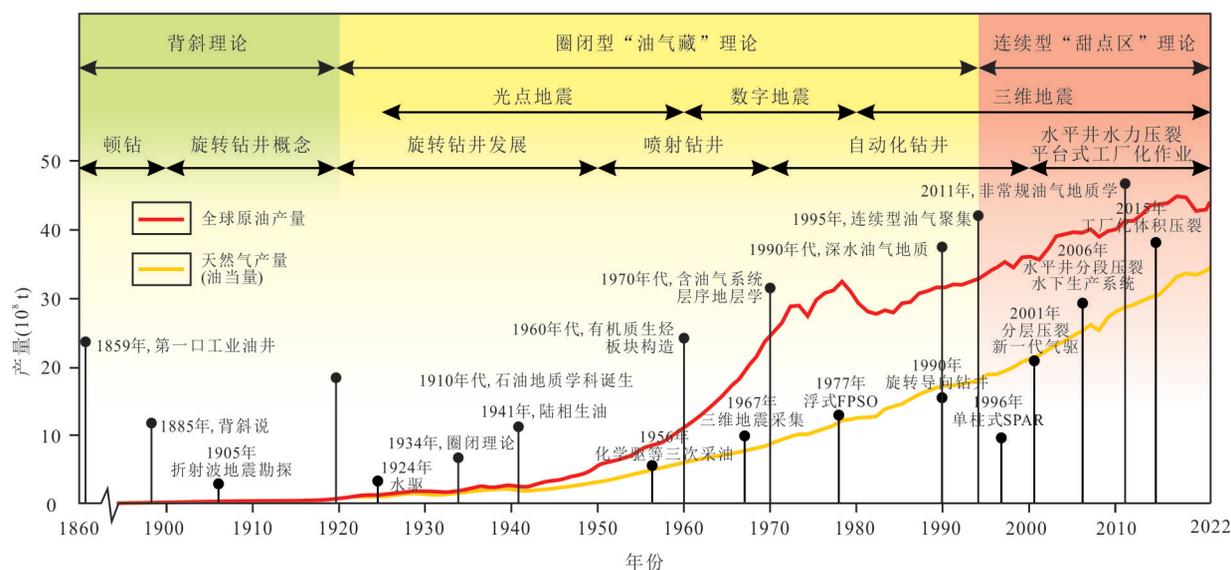


图1 世界油气工业主要地质理论和关键技术创新发展历程(据杨智等,2021a,修改)

Fig.1 Innovative development history of major geologic theories and key technologies in world petroleum history (modified from Yang *et al.*, 2021a)

强力推动。2022年,世界石油产量为 $43.5 \times 10^8$  t,其中非常规石油约占15%,世界天然气产量为 $4.25 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,其中非常规天然气约占25%(EIA, 2023;余国和陆如泉, 2023)。美国和中国是世界非常规油气规模快速发展的两个大国。2022年美国非常规油气产量为 $11.26 \times 10^8$  t油当量,占油气总产量的76%,其中非常规天然气约占天然气总量的83%(其中页岩气产量为 $8.069 \times 10^8$  m<sup>3</sup>)、非常规石油约占石油总量的53%(其中页岩层系石油产量 $3.99 \times 10^8$  t)(EIA, 2023;余国和陆如泉, 2023)。2022年中国非常规油气产量超过 $1 \times 10^8$  t油当量,占油气总产量约28%,其中非常规天然气约占天然气总量的41%,非常规石油约占石油总量的17%。2022年中国致密砂岩气产量 $579 \times 10^8$  m<sup>3</sup>、页岩气产量 $240 \times 10^8$  m<sup>3</sup>、煤岩气产量 $96 \times 10^8$  m<sup>3</sup>、页岩层系石油产量约 $1.600 \times 10^4$  t、油页岩油 $150 \times 10^4$  t、油砂稠油 $1.700 \times 10^4$  t。目前非常规油气开发已深入到烃源岩内部,正逼近物理方式采油采气的技术极限;烃源岩内部加热化学转换有望成为下一轮油气革命的关键,地下大面积富有机质页岩和煤岩是以化学方式革命的主要对象,是石油工业化化石能源发展的终极方向。

## 1.2 油气地质学科发展趋势

从常规油气的“源控论”到非常规油气的“源储共生系统”,非常规油气地质实践实现了3个方面的转变,深刻认识到源岩层系及其大面积紧密接触的致密储集层系中可以聚集巨量工业油气资源(杨

智等, 2021b; Yang *et al.*, 2022b)。一是改变了高部位圈闭极端重要的传统认识,低部位斜坡—凹陷区也可以形成重要的油气聚集,实现了由局部圈闭、区带向大面积储层、“甜点区”勘探开发的转变;二是改变了自然条件极端重要的传统认识,自然条件下难渗流的油气资源经过改造也可以形成重要的油气产出,实现了由优越自然油气藏向大规模“人工油气藏”勘探开发的转变;三是改变了优质资源极端重要的传统认识,大规模源岩层系油气劣质资源经过一体化管理也可以形成重要的油气收益,实现了由优质高丰度油气资源向规模低成本油气资源勘探开发的转变。非常规油气的突破,对传统油气地质学科基本概念产生了深刻影响,主要体现在6个方面(黎茂稳等, 2019;杨智等, 2019a, 2021a, 2021b;朱如凯等, 2019;邹才能等, 2019c;李国欣等, 2020):一是源内滞留页岩油气形成工业性聚集,突破了页岩是烃源岩而非储集层的传统认识;二是近源微纳米级孔隙储集层致密油气有效开采,突破了毫微米级孔隙是储集层充注下限的传统认识;三是油气“甜点区”大面积连续型分布,突破了油气依靠浮力成藏受圈闭边界限制的传统认识;四是非常规油气水平井平台式体积压裂“人工渗透率”,突破了依靠达西渗流开发的传统认识;五是低熟富有机质页岩和煤岩可地下原位加热转化成油气,突破了利用物理方式开发动用油气资源的传统认识;六是常规—非常规油气有序“共生富集”,突

破了只针对单一油气类型评价和开采的传统认识。非常规油气革命,打破了常规渗透性储层、经典圈闭油气成藏的概念,突破了直井达西渗流开发的技术路线,为非常规油气地质学科建立和技术创新创造了条件。

## 2 非常规油气地质学理论技术

### 2.1 基本概念及主要特征

非常规油气是指用传统技术无法获得自然工业产量、需用物理方式改善储层渗透率与流体黏度或化学方式转化油气等新技术才能经济开采的连续型油气资源。按赋存运聚特点,非常规油气划分为滞聚油气、致密油气和源岩油气 3 种类型(图 2)。迄今,中国已发现的非常规油气聚集类型包括致密砂岩气、致密油、页岩气、页岩油、煤岩油气、油页岩油、重油沥青、油砂、天然气水合物等。

源岩层系油气包括源岩油气和致密油气两种资源类型,是指烃源层系生成、滞留或就近聚集在烃源层系内部或紧邻烃源层系的致密储层中,利用新技术可实现工业开采的连续分布油气资源,目前已成为非常规油气增储上产的主要组成部分(图 2)(邹才能等, 2013a, 2013b, 2019c; 杨智等, 2019a,

2021a)。通常情况下,源岩层系油气单井一般无自然产能或自然产能低于工业油气流下限,但在一定技术措施下可获得工业产量,这些技术措施包括水平井、多分支井、压裂、加热等。

源岩油气是自生自储、滞留在生烃层系内部的非常规油气,主要包括页岩气、煤岩油气、页岩油和油页岩油。页岩气是指以游离态、吸附态为主,赋存在富有机质黑色页岩层中的天然气,为自生自储、大面积连续聚集的天然气(全国石油天然气标准化技术委员会, 2015)。煤岩油气是以吸附态及游离态储集在煤岩中,是与煤岩伴生、共生的、成煤物质在煤化作用过程中形成的油气聚集;富油煤是焦油产率大于 7%,中低成熟度的煤基油气资源(王双明等, 2022)。页岩油是指赋存于富有机质页岩层系中的石油;富有机质页岩层系烃源岩内粉细砂岩、碳酸盐岩等单层厚度不大于 5 m,累计厚度占页岩层系总厚度比例小于 30%(全国石油天然气标准化技术委员会, 2020)。油页岩是一种高灰分的含可燃有机质的细粒沉积岩,油页岩油是指含在致密页岩岩石结构中、需经过低温干馏才能获得的液态烃。

致密油气是他生自储、近源聚集在致密储层中的非常规油气,主要包括致密砂岩气和致密油。

资源类型	聚集类型	聚集形态	聚集机理	分布特征	资源比例	勘探对象	开发模式	关键技术	实例
常规油气	圈闭油气	构造油气藏	远源浮力	单体型	20%±	常规圈闭	油气藏 自然产能	二维或三维地震	松辽盆地长垣白垩系
		岩性、地层油气藏		集群型				直井或水平井	准噶尔盆地西北缘二叠系-侏罗系
非常规油气	滞聚油气	水合物	远源结晶化	连续型	80%±	非常规甜点区	人工油气藏 人造渗透率	三维地震	珠江口盆地新近系
		油砂+重油						微地震监测	辽河拗陷西斜坡新近系
	致密油气	致密油	近源压差					水平井 体积压裂	鄂尔多斯盆地三叠系
		致密气	原位转化/改质					鄂尔多斯盆地石炭-二叠系	
	源岩油气	页岩油	源内滞留					平台式“工厂化”开采	松辽盆地白垩系
		煤岩油气						.....	鄂尔多斯盆地三叠-侏罗系
页岩气		.....		四川盆地寒武-志留系					

石油

天然气

水层

煤岩

页岩

泥岩

盖层

常规储层

致密储层

图 2 常规-非常规油气资源形成分布与关键技术(邹才能等, 2014a; 杨智和邹才能, 2019a 修改)

Fig. 2 Conventional-unconventional petroleum resources and key technologies (after Zou *et al.*, 2014a; Yang and Zou, 2019a)

致密砂岩气是指覆压条件下基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密砂岩类气藏(全国石油天然气标准化技术委员会, 2014)。致密油是指储集在覆压条件下基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密砂岩、致密碳酸盐岩等致密储集层中的石油(全国石油天然气标准化技术委员会, 2018)。

滞聚油气是经过较长距离运移、因水洗、降解等稠化、温压稳定带结晶等作用, 滞留聚集在近地表储集层、海底沉积物及冻土带等储集层中的非常规油气, 主要包括水合物、油砂、重稠油等。

非常规油气有两个关键标志:(1)油气大面积连续分布, 圈闭界限不明显;(2)无自然工业稳定产量, 达西渗流不明显(Zou *et al.*, 2013b; 杨智等, 2015b, 2019b)。非常规油气的两项关键参数:(1)孔隙度一般小于10%;(2)孔喉直径一般小于 $1 \mu\text{m}$ 或空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (邹才能等, 2011)。源岩层系致密储集层中为微一纳米级孔喉系统, 以毛管压力和分子间吸附力作用为主, 油气以非浮力驱动成藏和连续性聚集为特征。非常规油气资源主要特征表现为源储共生共存或源内油气赋存富集, 在盆地斜坡—坳陷中心连片大面积分布, 无圈闭或圈闭界限与水动力效应不明显, 资源丰度一般较低, 存在“甜点区/段”局部富集, 主要采用水平井与分段体积压裂技术、平台式“工厂化”作业模式等实现规模工业开采(表1, 图2)。

非常规油气与常规油气的本质区别在于是否受圈闭控制、是否连续分布、单井是否有自然工业产量(图3)。非常规油气地质与传统常规油气地质的研究内容明显不同(图3、表2), 勘探开发非常规油气区与勘探开发常规油气藏的关注重点和工作重点也明显不同(图3、表3)。未来研究“共生富集”盆地中常规油气藏—非常规油气区, 常规—非常规油气地质研究也将面临全新的内容和重点(表2、表3)。常规—非常规油气地质学是研究“共生富集”盆地中, 常规油气藏—非常规油气区形成机理、有序共生、差异富集、采出规律、发展战略的地质学科, 涵盖常规油气和非常规油气两种资源类型, 包括油气勘探地质、开发地质和发展战略3项基础理论。常规—非常规油气地质研究核心是确定“圈闭群”及“甜点体”有效性和“剩余油气是否全部勘探开发”, 重点评价“烃源性、储集性、含油性、流动性、可采性与经济性”6特性及其匹配关系; 勘探目标是寻找“圈闭群”和“甜点体”, 确立常规油气藏和非常规油

气区的边界; 开发追求区块高产与累产。勘探开发常规—非常规油气, 需要经历从常规油气与非常规油气独立平行勘探发展为常规油气与非常规油气整体并行勘探, 剩余油气资源的有利“圈闭群”和“甜点体”成为油气勘探开发的重点, 地质工作关键是编制出烃源岩供烃范围平面与剖面分布图、有利储盖组合平面与剖面分布图、剩余油气资源空间分布图和圈闭群及甜点体评价表的“三图一表”(杨智和邹才能, 2022a)。

## 2.2 地质理论体系

非常规油气地质学理论内涵是以大面积连续型“甜点区(段)”评价为核心, 重点研究细粒沉积、微纳米级储层、油气富集规律、产出机制、评价方法、发展战略的油气地质理论, 是传统石油地质学的创新和发展, 为现代矿床学的一个分支学科。10余年间, 研究团队通过构建非常规细粒沉积学、非常规油气储层地质学、非常规油气成藏地质学、非常规油气开发地质学、常规—非常规油气有序“共生富集”发展战略等5方面学科内容, 基本形成了非常规油气地质学理论体系框架。

非常规细粒沉积学是研究细粒沉积岩的物质成分、结构构造、分类和成因, 以及沉积过程与分布模式的基础学科(图4)。陆相敞流湖盆大型浅水三角洲砂体、湖盆中心砂质碎屑流沉积、海陆相富有机质页岩细粒沉积、陆相细粒重力流沉积等研究新进展, 为盆地中心储集体形成和分布提供了理论依据。敞流湖盆浅水三角洲沉积模式, 明确了以河流作用为主的浅水湖泊中, 三角洲平原及前缘水下分流河道较发育的储集体分布方式; 陆相深水砂质碎屑流理论, 是对现行经典浊流理论的部分否定与补充, 明确了深水砂体是很多深水盆地中砂质碎屑流的产物; 提出了四川盆地南部及邻区晚奥陶—早志留世半深水—深水陆棚富有机质页岩沉积模式, 揭示了五峰—龙马溪组岩相古地理与富有机质页岩成因机理, 为海陆相富有机质黑色页岩的分布预测提供了依据(Zou *et al.*, 2017, 2018a, 2022); 建立了陆相湖盆细粒沉积岩四端元分类体系, 提出了陆相坳陷湖盆和断陷湖盆细粒重力流沉积模式(图5), 湖盆细粒沉积主要受陆源碎屑岩、内碎屑化学岩、空落火山灰、盆底热液等多因素共同控制, 为陆相页岩层系细粒沉积岩的分布预测提供了依据(邹才能等, 2022a, 2023a)。

非常规油气储层地质学是研究非常规储层类

表 1 非常规源岩层系油气的主要地质特征(据邹才能等,2017b 修改)

Table 1 Main geologic features of unconventional source rock strata oil and gas (modified from Zou *et al.*, 2017b)

特征	页岩气	致密砂岩气	煤岩油	煤岩气	页岩油	致密油	
分布特征	靠近盆地沉降-沉积中心	盆地中心或斜坡部位	盆地或坳陷向斜区	盆地或坳陷向斜区	深凹或斜坡页岩发育地区	盆地中心或斜坡部位	
源储关系	生储盖三位一体	源储直接接触或邻近	生储盖三位一体	生储盖三位一体	生储盖三位一体	源储直接接触或邻近	
运移方式	无运移或烃源层内短距离初次运移	初次运移或短距离二次运移	无运移或烃源层内短距离初次运移	无运移或烃源层内短距离初次运移	无运移或烃源层内短距离初次运移	初次运移或短距离二次运移	
聚集作用	页岩内弥散式分布, 裂缝区富集	构造区或裂缝区富集高产	/	裂隙或割理为富集区	存在纳米孔喉系统, 裂缝发育区富集	构造区或裂缝区富集高产	
流体特征	以干气为主, 吸附在干酪根、孔隙中, 游离于裂缝中, 一般游离气比例为 40%~70%	含气饱和度差异大, 多数小于 60%, 一般游离气比例为 90%~100%	游离烃比例较低	吸附气、游离气, 一般游离气比例为 5%~30%	以中高成熟度石油为主, 一般游离烃比例为 10%~30%	以中高成熟度石油为主, 一般游离烃比例为 20%~50%	
产烃组成特征	初期产气游离气占比 80%~100%, 累计产气游离气占比 30%~60%	初期产气游离气占比 90%~100%, 累计产气游离气占比 95%~100%	/	初期产气游离气占比 5%~25%, 累计产气游离气占比 0%~15%	初期产油游离烃占比 95%~100%, 累计产烃游离烃占比 90%~100%	初期产油游离烃占比 90%~100%, 累计产烃游离烃占比 80%~100%	
开采工艺	产量低、采收率低、生产周期长, 需水平井、分段压裂等技术	储层致密, 自然产能低, 常需水平井压裂改造等	无或低自然产能, 需水平井原位加热等转化技术	低产, 无自然产能, 生产周期长, 需水平井、压裂、原位燃烧等技术	产量低, 无或低自然产能, 需水平井压裂、原位加热等改造转化技术	储层致密, 自然产能低, 需水平井增能驱油压裂等针对性技术	
可采资源	世界	$210 \times 10^{12} \text{ m}^3$	$456 \times 10^{12} \text{ m}^3$	/	$256 \times 10^{12} \text{ m}^3$	$15\,000 \times 10^8 \text{ t}$	$(400 \sim 600) \times 10^8 \text{ t}$
	中国	$(9 \sim 13) \times 10^{12} \text{ m}^3$	$(10 \sim 25) \times 10^{12} \text{ m}^3$	约 $500 \times 10^8 \text{ t}$	$11 \times 10^{12} \text{ m}^3$	$(200 \sim 300) \times 10^8 \text{ t}$	$(20 \sim 25) \times 10^8 \text{ t}$
2022 年产量	美国	$8\,069 \times 10^8 \text{ m}^3$	$850 \times 10^8 \text{ m}^3$	/	$214 \times 10^8 \text{ m}^3$	$3.99 \times 10^8 \text{ t}$	
	中国	$240 \times 10^8 \text{ m}^3$	$579 \times 10^8 \text{ m}^3$	/	$96 \times 10^8 \text{ m}^3$	$320 \times 10^4 \text{ t}$	约 $1\,300 \times 10^4 \text{ t}$
典型实例	四川盆地南部奥陶系一志留系连续型和构造型页岩气、寒武系筇竹寺组及二叠系大隆组等页岩气	鄂尔多斯盆地石炭一二叠系、四川盆地三叠系等致密砂岩气	鄂尔多斯盆地地三叠一侏罗系、准噶尔盆地东部及三塘湖盆地等煤岩油	鄂尔多斯盆地中东部、沁水石炭一二叠系等煤岩气	鄂尔多斯盆地三叠系、松辽盆地白垩系、准噶尔盆地二叠系、渤海湾盆地古近系等致密油、页岩油		

型、形成机理、储集性能、分布特征、评价方法与预测技术的新学科。2008年在蜀南钻探我国第1口页岩气参数井长芯1井,首次在井下取得含气页岩岩心,发现了我国南方奥陶系一志留系页岩气主力工业层系,直接推动四川盆地海相页岩气勘探与研究。2010年,应用场发射扫描电子显微镜、Nano-CT等技术,在我国五峰一龙马溪组(4.476亿年)页岩有机质中发现纳米孔隙(5~100 nm),这是在北美地台石炭系以外,第一次在更古老的我国奥陶一志留系

页岩中,发现了具工业价值的纳米级孔喉系统。之后,又系统表征的四川、鄂尔多斯等重点盆地黑色页岩、致密砂岩、致密碳酸盐岩等致密储层中,广泛发育具有工业价值的微纳米级孔隙。通过系统研究论证,证实海陆相富有机质页岩层系纳米级孔隙中赋存了甲烷和液态烃,揭示了页岩层系极其重要的巨量资源价值。开展页岩层系油气充注孔喉下限研究,厘定了页岩气、页岩油、致密油与CO<sub>2</sub>驱替油充注孔喉直径下限分别为5 nm、20 nm、50 nm和

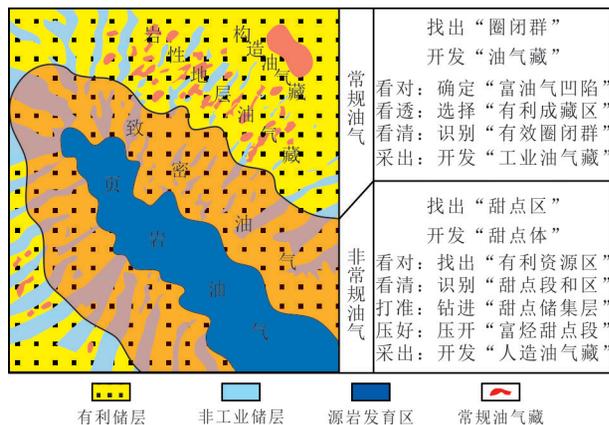


图3 常规与非常规油气资源有序聚集(据杨智等, 2021a, 有修改)

Fig.3 Orderly accumulation of conventional-unconventional petroleum resources (modified from Yang *et al.*, 2021a)

300 nm(图6),突破了经典油气储层理论孔喉下限,为非常规油气资源工业评价提供了科学依据(邹才能等, 2011, 2012a, 2013a; 杨智等, 2015b).提出了致密储层微米孔隙—纳米喉道系统分类方案,物理模拟与地质分析揭示微纳米孔喉系统演化规律,揭示了致密储层早期压实致密,后期胶结致密、优势岩性发育孔隙的成因机制,为有利致密储层预测提供了理论依据.

非常规油气成藏地质学是研究非常规油气地质特征、运聚机理与赋存规律的新学科,连续型“甜点段”“甜点区”油气聚集理论是其理论内核.“甜点段”

是在剖面上源储共生的烃源岩层系内,人工改造可形成工业价值的非常规油气生产段;“甜点区”是在平面上优质烃源岩分布范围内,可形成工业价值的非常规油气连续型富集生产区.系统总结了非常规油气不同于常规油气的10项特征和2个关键标志,科学论述了大面积连续分布是非常规油气的标志特征,为大规模勘探开发非常规油气提供了科学依据;提出“储层是否富油气”是非常规油气成藏地质学研究的核心,重点评价“烃源性、储集性、含油性、流动性、成缝性和经济性”“甜点区/段”“6特性”及匹配关系(表4),明确了优质生烃层系、有效储集空间、稳定保存条件是非常规油气富集的关键因素,建立了小面元容积法、资源丰度类比法、EUR类比法等非常规油气资源评价方法,形成了不同类型非常规油气资源分级评价和“甜点段”识别标准,为非常规油气资源有利区带和“甜点区”预测提供了方法指导;明确海相富有机质页岩地层中“高TOC、页理及裂缝发育”是页岩气“甜点段”高产的主控因素,提出陆相富有机质页岩地层中“相对粗粒径岩相区、较大孔隙度、较高成熟度、页理及裂缝发育”是页岩层系石油富集区的主控因素;建立了不同储层油气充注运聚模型和理论公式(流体流动规律见公式1)(邹才能等, 2012a, 2012b, 2023c; 杨智等, 2022b),揭示了非常规油气大面积“连续型”聚集规律(Zou *et al.*, 2013b; 邹才能等, 2014b; 杨智等, 2019b)(图6),打破了传统圈闭局部成藏的概念,推动勘探从寻找常规“单体型”油气藏,向非常规“连续型”甜点区转变.

表2 非常规油气地质学与常规油气地质学、常规—非常规油气地质学的学科理论体系区别(杨智和邹才能, 2022a)

Table 2 Theoretical systems of unconventional, conventional, and conventional-unconventional petroleum geologies (after Yang and Zou, 2022a)

学科	常规油气地质学	非常规油气地质学	常规—非常规油气地质学
研究对象	圈闭和油气藏	核心区 and 甜点区	圈闭群和甜点体
研究方法	石油地质条件、成藏要素与动态过程分析等常规石油地质方法	场发射、环境扫描、激光共聚焦、微纳米CT、矿物组分等微观技术手段	常规—非常规油气共生盆地物理及数值模拟、源控论及源储共生系统、地质工程一体化等研究手段
学科基础	浮力圈闭成藏理论	连续型油气聚集理论	常规—非常规油气“共生聚集”理论
沉积学科	中粗粒沉积学等	细粒沉积学等	源—汇系统沉积学
储层学科	毫微米储层地质学	微纳米非常规储层地质学	多尺度常规—非常规储层地质学
聚集成藏	浮力驱动成藏	油气(准)连续聚集	常规—非常规油气“共生聚集”
理论核心	圈闭是否成藏	储集层油气是否连续聚集	剩余油气是否全部勘探开发
评价重点	生、储、盖、圈、运、保“6要素”及最佳匹配关系	烃源性、储集性、含油性、流动性、成缝性和经济性“6特性”及匹配关系	烃源性、储集性、含油性、流动性、可采性与经济性“6特性”及其匹配关系
评价目的	预测油气藏分布与潜力	预测“甜点区/段”分布及潜力	实现常规油气和非常规油气剩余资源的整体发现、极限开采和协同发展

表 3 非常规与常规、常规—非常规油气勘探开发工作的主要区别(杨智和邹才能, 2022a)

Table 3 Exploration and development of unconventional, conventional, and conventional - unconventional petroleum (after Yang and Zou, 2022a)

序号	工作重点	常规油气	非常规油气	常规—非常规油气
1	地质研究	优选圈闭	优选核心区	优选剩余资源
		确定有效聚油气圈闭	确定富集“甜点区/段”	确定富油气“圈闭群”和“甜点体”
2	技术攻关	地球物理区带目标预测	地球物理“储层甜点”预测	地球物理高分辨率空间预测
		直井、定向井	水平井体积压裂	地质工程一体化集成适用技术
3	勘探方法	发现油气藏	突破“甜点区”	评价剩余资源
		确定圈闭边界	确定连续型油气区边界	确定常规、非常规油气资源边界
4	开发方式	产能目标建设	平台式“工厂化”生产试验区建设	常规—非常规油气资源立体开发
		探索开发方式	探索降低成本工艺	探索一体化、低成本工艺
5	开采模式	单井高产稳产	单井初期高产和长期累产	区块初期高产和长期累产
		注气液提高采收率	井间接替与注气等提高采收率	区块接替、注气等提高采收率
6	关键地质图表	圈闭平面构造分布图	成熟烃源岩厚度平面分布图	烃源岩供烃范围平面与剖面分布图
		油气藏剖面图	储层厚度平面分布图	有利储盖组合平面与剖面分布图
		圈闭要素表	甜点区评价表	剩余油气资源空间分布图
				圈闭群和甜点体评价表

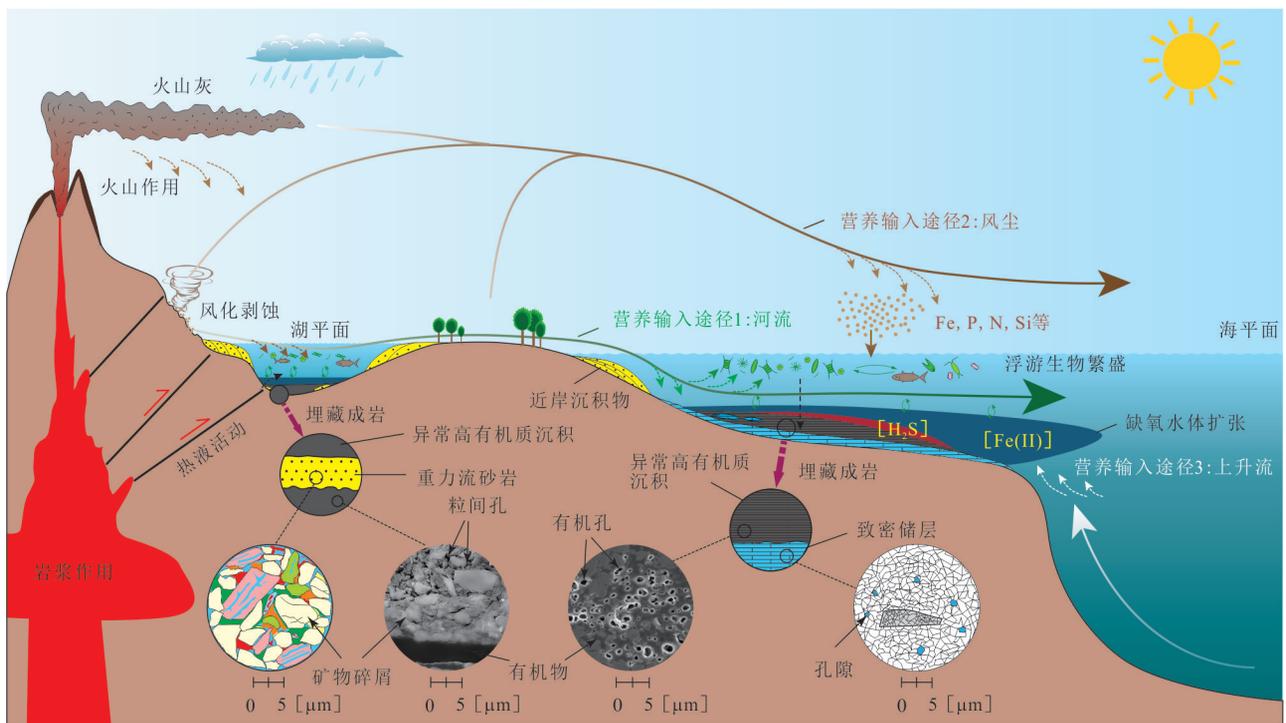


图 4 全球/区域性重大地质事件与非常规油气“甜点区、甜点段”形成过程示意图(据邹才能等, 2022c)

Fig.4 Major global/regional geologic events and schematic forming process of unconventional sweet spots (after Zou et al., 2022c)

$$J = \left[ (1 + b) \frac{r^2 \rho_l}{8\mu_l} + D_k r \right] \nabla p_{lz} \quad (1)$$

非常规油气开发地质学是研究非常规油气“甜点区(段)”评价预测、“人工油气藏”开发理念、“L”型生产曲线模型、经济评价方法、配套关键技术的新学科. 提出非常规油气“甜点区(段)”概念与评价

指标体系, 首创“人工油气藏”开发概念, 为非常规油气有效开发提供理论基础; 提出优质页岩层系发育油气富集“甜点区”, 研发了“甜点区(段)”地质工程评价预测方法; 阐明以应力场、渗流场等为核心的“人工油气藏”开发内涵(图 7), 建立了非常规油

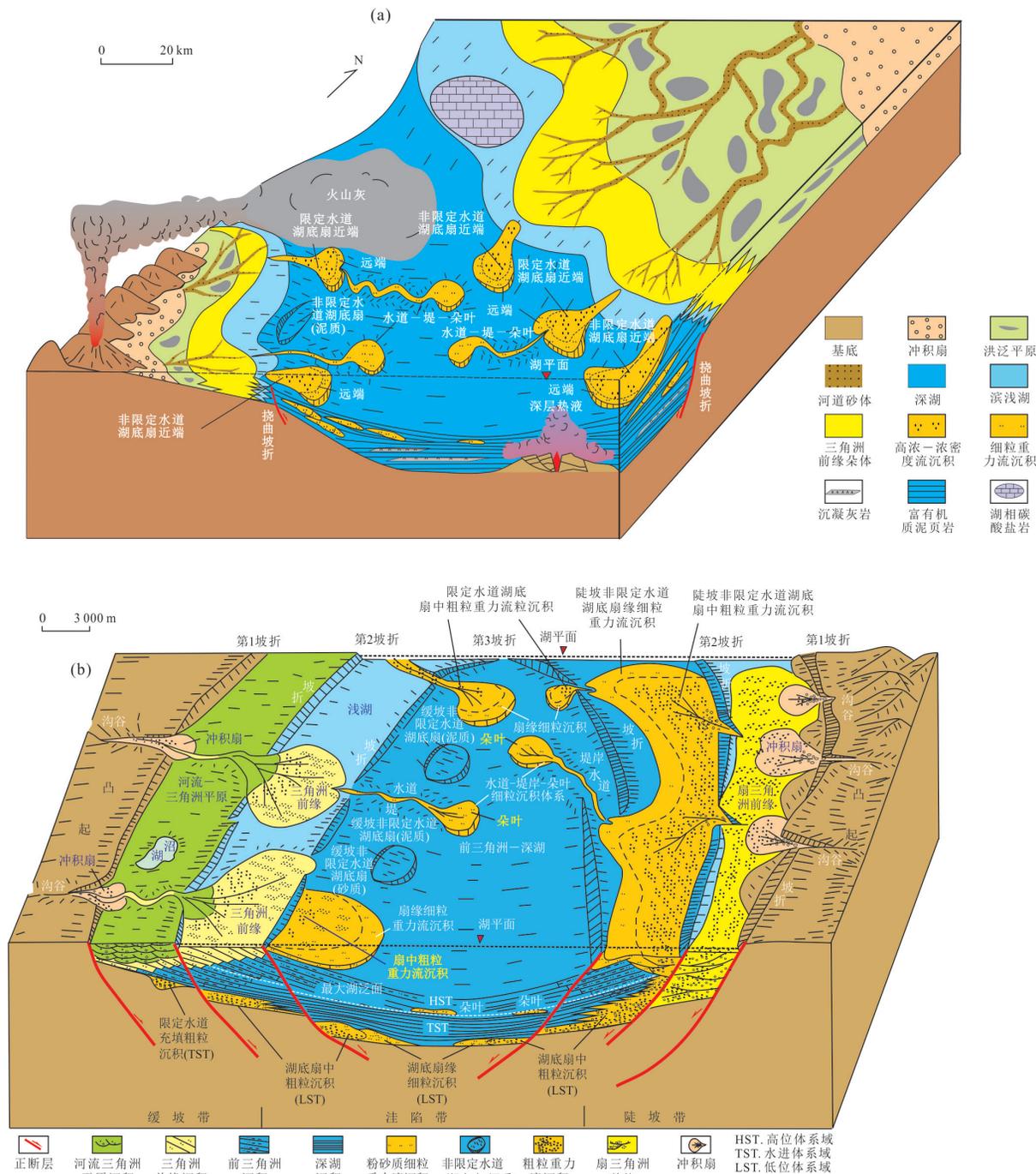


图5 拗陷湖盆和断陷湖盆细粒沉积模式(据邹才能等, 2023a)

Fig.5 Depositional models of fine-grained sediments in depressed lake basin and faulted lake basin (after Zou *et al.*, 2023a)

气开采“L”型生产曲线与产量理论预测模型(全生命周期油气生产规律见公式2)(邹才能等, 2013b), 揭示了非常规油气形成机理与开采规律, 引领非常规油气效益开发. 近年来, 建立了以人造复杂缝网干扰和水平及纵向流动耦合复合流动为核心理论认识的非常规油气“体积开发”理论技术, 形成了“大平台”与“井工厂”开发方式, 实现多层一次性动

用与增效(焦方正等, 2020). 总之, 在非常规油气“甜点区(段)”内, 通过长水平井和大规模分段分簇压裂改造, 建立平台式人工体积缝网系统; 立体交错布井, 建立空间井网和缝网体系, 减小流体在基质中的渗流距离, 实现“人工油气藏”规模效益开发(邹才能等, 2017a).

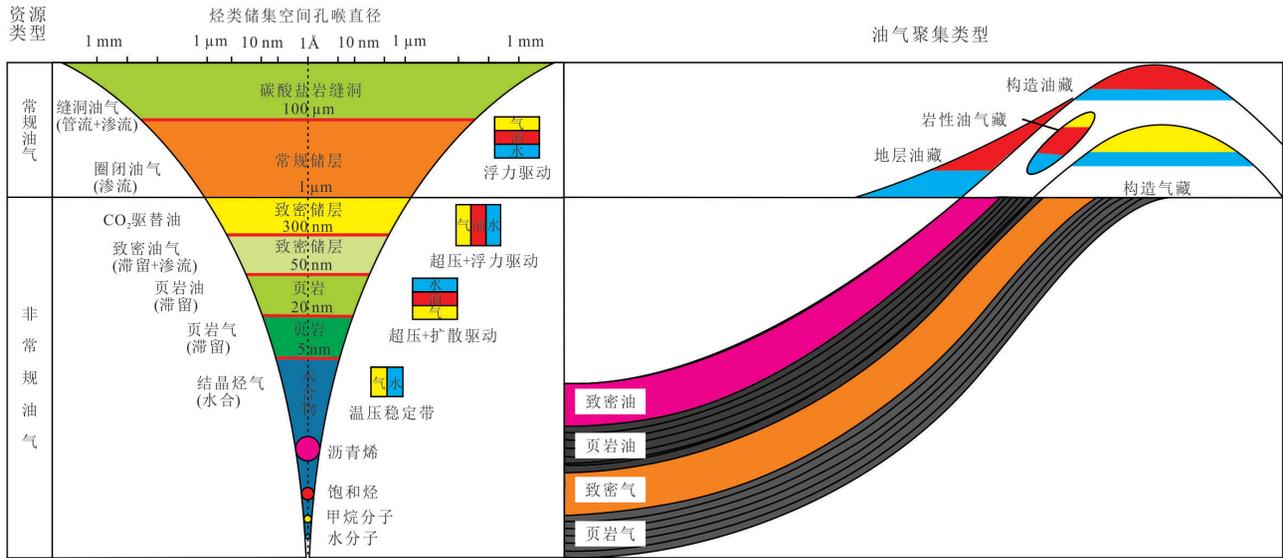


图 6 常规—非常规油气储层孔喉结构与油气聚集类型(邹才能等, 2012b, 2023d; 杨智和邹才能, 2019a)

Fig.6 Pore-throat structures and hydrocarbon accumulation types of conventional-unconventional reservoirs (after Zou *et al.*, 2012b, 2023d; Yang and Zou, 2019a)

表 4 中国源岩层系油气“甜点区/段”主要参数和评价标准(据杨智等, 2021b, 修改)

Table 4 Major parameters and evaluation criteria of source rock strata oil and gas sweet spots in China (modified from Yang *et al.*, 2021b)

资源类型	主要参数和标准
致密油及 中高成熟 页岩油	烃源性: 一般厚度大于 50 m、TOC 大于 2%、 $R_o$ 大于 0.9%、面积大于 200 km <sup>2</sup> 储集性: 一般厚度大于 20 m、孔隙度大于 6%、主流喉道半径大于 100 nm、面积大于 200 km <sup>2</sup> 含油性: 一般含油饱和度大于 50%、游离烃占比大于 30% 流动性: 一般相对高压系统、气油比大于 50 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> 、原油黏度小于 10 mPa·s、储层基质渗透率相对较高 成缝性: 一般纹层及天然裂缝较发育、岩石脆性矿物含量大于 50%、水平应力差小于 10 MPa 经济性: 一般埋深小于 4 000 m、单井初产—累产—成本组合效益较好
致密砂岩气	烃源性: 一般厚度大于 30 m、生气强度大于 $20 \times 10^8$ m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> 、面积大于 5 000 km <sup>2</sup> 储集性: 一般厚度大于 30 m、孔隙度大于 5%、主流喉道半径大于 50 nm、面积大于 5 000 km <sup>2</sup> 含气性: 一般含气饱和度大于 50%、游离气占比大于 90%、基本不含水 流动性: 一般为相对高压系统、甲烷含量大于 90%、储层基质渗透率相对较高 成缝性: 一般天然裂缝较发育、岩石脆性矿物含量大于 50%、水平应力差小于 10 MPa 经济性: 单井初产—累产—成本组合效益较好
油页岩油 中低成熟 页岩油	一般厚度大于 5 m、连续分布面积大于 20 km <sup>2</sup> ；有机质类型为 I 型、II <sub>1</sub> 型；含油率大于 8%；灰分产率低于 75% 一般 TOC 大于 6%、有机质类型为 I 型、II <sub>1</sub> 型；富有机质页岩集中段厚度大于 15 m、净地比大于 0.8、连续分布面积大于 50 km <sup>2</sup> ； $R_o$ 一般为 0.5%~1.0%；埋深小于 3 000 m；顶底板封闭性好，断层不发育，且地层含水率小于 5%
页岩气	烃源性: 一般厚度大于 100 m、TOC 大于 2%、 $R_o$ 大于 1.5%、面积大于 5 000 km <sup>2</sup> 储集性: 一般厚度大于 20 m、孔隙度大于 3%、主流喉道半径大于 20 nm、面积大于 5 000 km <sup>2</sup> 含气性: 一般含气量大于 2 m <sup>3</sup> /t、游离气占比大于 50% 流动性: 一般为超压系统、甲烷含量超过 96%、储层基质渗透率相对较高 成缝性: 一般纹层及层理、天然裂缝较发育、岩石脆性矿物含量大于 50%、泊松比 0.1~0.3 经济性: 一般埋深小于 4 200 m、单井初产—累产—成本组合效益较好
煤岩气	一般煤层单层厚度大于 5 m、面积大于 50 km <sup>2</sup> ；一般含气量大于 5 m <sup>3</sup> /t、含气丰度大于 $2 \times 10^8$ m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> 、吸附饱和度大于 80%；一般为相对高压系统、甲烷含量大于 95%、煤层原始渗透率相对较高；有效应力小于 15 MPa，一般割理、天然裂缝较发育；一般埋深小于 1 300 m、单井初产—累产—成本组合效益较好

$$q = \frac{p_e - p_w - 2\eta G \left\{ \sqrt{\zeta_B(t - t_A)} + \sqrt{\zeta_C[t - t_A - \delta_4(t_B - t_A)]} \right\}}{S_1 \left( \frac{1}{h} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{h}{2r_w} \right) \vartheta(t) + \frac{S_2 \delta_1}{h} \chi(t) + \frac{(1+b)\pi r^2 h \delta_2}{4\mu_1 \ln \frac{4\sqrt{\zeta_C}(t - t_B)}{d}} + \frac{2\pi h \delta_3}{D_k r \ln \frac{4\sqrt{\zeta_D}(t - t_e)}{d}}}. \quad (2)$$

常规—非常规油气“共生盆地”是指富油气盆地内,常规油气与非常规油气共生伴生、“有序聚集”,遵循接续找油思路、协同发展理念,可最终实现常规—非常规油气资源有序发展、协同开发的发展战略(邹才能等,2014a,2014b).含油气盆地中,常规油气和非常规油气有序“共生富集”(杨智和邹才能,2022a),“共生”强调常规和非常规油气的客观自然形成分布规律,“富集”强调始终有寻找常规和非常规油气“甜点”或“甜点区”的主观地质勘探使命,“有序”强调研究和利用常规和非常规油气,需协调处理好客观规律性与主观能动性之间的关系,充分认识常规和非常规油气在时间演化、形成序次、聚集机理、空间分布和找油思想5层有序内涵,坚信客观规律可以主观认知,坚持资源战略,坚定发现信念,坚定开发决心,超前研发理论技术,可以实现更好发掘剩余油气资源的潜力和价值(邹才能等,2014a;杨智和邹才能,2022a).常规—非常规油

气有序“共生聚集”,关注所有富有机质岩石、全种类储集空间和全类型油气资源,明显不同于“源控论”“含油气系统”“源储共生系统”等局限关注常规圈闭油气或非常规连续油气的找油气思路.立足含油气盆地自然或人工条件下所有烃类资源的地质地面条件,勘探主要目的是寻找“甜点”或“甜点区”,最终谋求常规—非常规油气的整体发现;开发主要目的是形成流体压差、建造“人工油气藏”,最终谋求常规—非常规油气的极限开采;战略主要目的是建立支持体系和发展模式,最终谋求常规—非常规油气的协同发展.常规—非常规油气“共生盆地”发展战略,突破了传统只专注常规或只专注非常规油气的思路,为新时期全方位利用油气资源提供了新的战略方案.大型常规—非常规油气“共生盆地”,是世界油气工业可持续发展的主要领域,预计鄂尔多斯、四川盆地等大型“共生盆地”将在中国油气工业未来发展中具有重要地位.

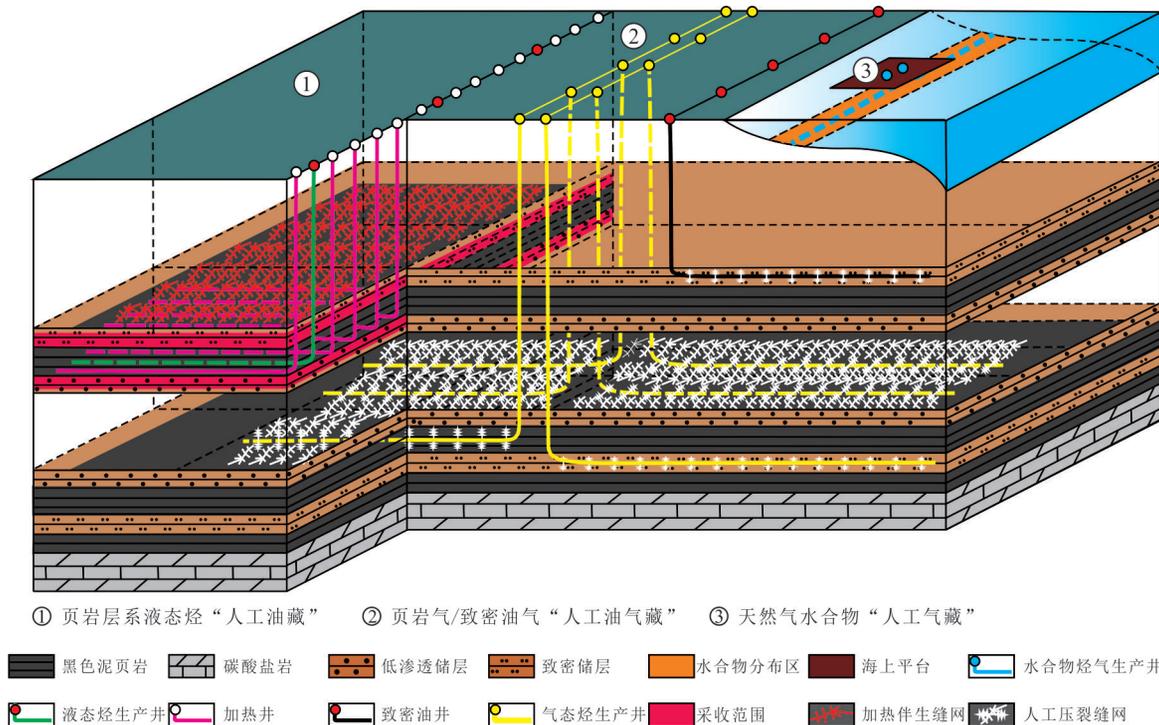


图7 非常规油气“人工油气藏”开发模式(邹才能等,2017a;Yang *et al.*, 2019b)  
 Fig.7 Development model for artificial unconventional reservoirs (after Zou *et al.*, 2017a; Yang *et al.*, 2019b)

### 2.3 关键技术研发

非常规油气勘探开发关键技术研发主要集中在实验分析、勘探评价和开发工程 3 个方面,近年来在陆相页岩油技术研发方面取得较大进展(杨华等,2016;刘合等,2020;孙金声等,2020;李阳等,2022;李宁等,2023;赵文智等,2023)。(1)非常规油气关键实验技术.主要包括数字岩石智能化定量评价、综合矿物分析、孔隙-裂缝多尺度融合-演化模拟、微纳米孔烃类赋存地球化学表征、有机质原位高分辨率定量分析、可动流体核磁共振分析、地层条件流体相态分析、微纳米尺度流体流动模拟、成岩物理模拟与孔隙保持评价、岩石薄片智能鉴定技术与系统等关键技术.目前数字岩石智能评价技术,实现从米到纳米“9”个数量级融合,集成了致密储层跨尺度微-纳米级孔喉、裂缝表征方法,尤其是微纳米孔喉系统连通性评价方法,建立了三维数值模型和标准图版,为有利致密储层预测提供了方法支撑。(2)非常规油气核心勘探评价技术.主要包括三项关键技术:一是由基于数字岩心的饱和度建模技术、基于各向异性模型的地应力评价技术、基于岩性校正的岩石脆性测井评价技术等组成的高分辨测井预测甜点段技术,二是由相控地质统计学反演、黄土塬三维地震“炮振混采”、三维地震资料建模、天然裂缝预测、全生命周期地震监测等组成的高精度地震预测甜点区技术系列,三是由资源分级评价、甜点段及最优靶层评价、甜点区综合评价、可采储量评价、地质工程甜点综合评价等组成的甜点区(段)“6 特性”综合评价技术.目前长庆等多个地区应用地质工程甜点段综合评价技术,甜点段储层钻遇率可达 90% 以上。(3)非常规核心开发工程技术.主要包括非常规体积开发理论与评价、大平台-井工厂开发、长水平段水平井优快钻井、水平井一趟钻、水平井旋转导向、高性能钻井液与体积压裂、顶部驱动与安全下套管、井网优化部署、非常规油气藏全生命周期管理、二氧化碳捕获利用及埋存(CCUS)、超前能量补充、合理排采生产制度、油气井裂缝及产能监测、页岩及煤岩原位转化油气等关键技术。(4)中国特色陆相页岩油关键技术攻关.重点从 6 个加快评价入手,即加快评价页岩油经济技术可采储量,加快评价页岩油甜点区和甜点层,加快评价单井最终可采储量(EUR)、平台 EUR 和开发区 EUR,加快评价科学的压裂液体系,加快评

价生产学习曲线,加快评价低成本的工程技术.中国中高成熟和中低成熟两大类页岩油理论技术体系正在加快形成,利于推动实现陆相页岩油革命和油气工业可持续发展.

常规-非常规油气勘探开发关键技术展望。(1)源控论及源储共生系统评价方法.核心是围绕源岩层系,常规油气勘探开发遵循“源控论”,非常规油气遵循“源储共生系统”地质认识,深刻认识常规-非常规油气地质规律。(2)常规-非常规油气共生盆地物理及数值模拟技术.主要包括构造岩相古地理重建与主力源储层系分布评价、源岩层系成烃-成岩-成藏过程物理-数值模拟、常规-非常规油气有利成藏组合地球物理评价预测、常规-非常规油气共生盆地地质-地球物理建模、常规-非常规油气剩余资源与区带目标评价等关键技术。(3)地质工程一体化评价技术.针对含油气单元(区带或区块)内常规油气和非常规油气资源,以常规油气“圈闭群”和非常规油气“甜点区”评价识别为基础,以“圈闭群”高产稳产和“甜点体”累产稳产为目标,以“逆向思维设计、正向作业施工”为工作指南,坚持地质设计与工程实践一体化组织管理,做好“圈闭群”评价优选及“甜点区(段)”评价刻画、“油藏群”整体动用及“人工油气藏”制造开发两项工作,最终把蓝图设计转化为工程实施作业、转化为规模效益产量的系统工业过程。(4)多井平台式“工厂化”生产模式.对不同层系、不同类型的常规与非常规油气资源,按照大平台布井方式,集中部署一批井身结构、完井方式不尽相同的井,采用标准化、模块化的技术装备,以流水线作业方式进行数口井的钻井、完井、返排、生产同步作业,实现常规、非常规油气高效发展或二者同步整体经济开发.

非常规油气地质学理论,是对经典石油天然气地质学的重大突破,为中国乃至世界油气从常规向非常规战略发展提供了理论指导,促进了非常规油气针对性的勘探开发实践,对坚定资源信心、加强实践应用和端牢能源饭碗,具有重大的科学价值和意义(贾承造,2017).实现非常规油气革命,需要依托“理论、技术和管理”三个创新的深度融合.理论上突破圈闭型“油气藏”理论,建立连续型“甜点区”理论;技术上突破直井自然渗流开采方法,建立水平井压裂平台式技术;管理上突破科技管理市场分界围墙,建立一体化最优降成本模式.

### 3 非常规油气地质学实践应用

#### 3.1 研究实践

非常规油气地质学理论技术,引领推动了非常规油气地质学科完善发展、国家行业标准制定、国家实验室建设和专业人才培养.10余年间,依托国家“973”计划、国家油气重大专项、国家高层次特殊人才支持计划等科研项目,研究团队取得一系列成果:一是出版了《非常规油气地质学》(中、英文版),被认为是第一本综合对非常规油气勘探开发潜力进行判断、分类和评价的专著,发表了《非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学》《Continuous hydrocarbon accumulation over a large area as a distinguishing characteristic of unconventional petroleum: The Ordos Basin》《中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值》《纳米油气与源储共生型油气聚集》《“进源找油”:源岩油气内涵与前景》《常规—非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义》《论常规—非常规油气有序“共生富集”——兼论常规—非常规油气地质学理论技术》等一批有代表性的学术论文,基本形成非常规油气地质学科的理论体系框架.二是制定和颁布了一系列有规范性的国家行业标准,包括《页岩气地质评价方法》《致密砂岩气地质评价方法》《致密油地质评价方法》《页岩油地质评价方法》等4项国家标准.三是倡导并致力实验基地建设 with 专业人才培养,主持建成“国家能源致密油气研发中心”,推动“国家能源页岩气研发(实验)中心”发展,推进非常规油气云数据智慧平台建设,在中国石油勘探开发研究院研究生部开设“非常规油气地质学”研究生必修课程,在石油系统内外培训和传播非常规油气理论与实践新成果,培养了一大批从事非常规油气理论与实践的专门人才.

#### 3.2 生产应用

非常规油气地质学理论技术,有效推动和支撑了中国致密油和气、页岩油和气等非常规油气资源的工业勘探开发.10余年间,非常规油气地质学理论的传播和应用,支撑了致密砂岩气、页岩气、致密油等的战略突破和页岩油的科学探索,非常规油气已基本实现工业化规模发展(图8).一是非常规天然气已实现整体规模快速发展.非常规天然气2022年产量 $915 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占全国天然气总产量的41%.致密砂岩气规模发展,实现了从圈闭型砂岩气

藏到连续型致密砂岩气的关键转变,已形成以鄂尔多斯盆地苏里格、四川盆地须家河组为代表的多个万亿方、千亿方级大气区,2022年产量 $579 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;页岩气快速发展,实现了从“铁板一块”的页岩到页岩气革命,已提交探明地质储量 $2.89 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,在奥陶系五峰组—志留系龙马溪组发现了涪陵、长宁、威远等多个千亿方级海相页岩大气田,新近在四川盆地筇竹寺组海相页岩获得重大发现,是全球首次在距今5.4亿年的寒武系古老页岩地层钻获具商业开发价值的高产工业气流,此外多口井在四川盆地二叠系吴家坪组、大隆组也试获了工业页岩气流,新层系海相页岩气勘探取得重大突破,2022年全国页岩气产量 $240 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;煤岩气持续发展,实现了从高煤阶气向低煤阶气、中浅层气向深层—超深层气的重要突破,尤其是近年来鄂尔多斯盆地中东部等多个区带深层煤岩气勘探评价和开发试验取得重大进展,水平井分段压裂规模开发见到成效,目前已形成鄂尔多斯盆地、沁水盆地等生产基地(Hao *et al.*, 2013; 马新华等, 2018; 宋岩等, 2016; 郭旭升等, 2017; 孙龙德等, 2019; 孙赞东等, 2011; Yang *et al.*, 2017; 张金川等, 2004; 邹才能等, 2018, 2019a, 2019b, , 2020b, 2021; Gao *et al.*, 2021), 2022年煤岩气产量 $96 \times 10^8 \text{ m}^3$ .二是非常规石油工业起步和探索已迈出实质步伐.非常规页岩层系中高成熟度石油风险勘探及试验开发和中低成熟度石油科学研究平行探索.针对中高成熟源内页岩层系石油,长庆、新疆、大庆、胜利、大港、青海等成熟探区积极探索利用水力、气体等体积压裂技术,初步解放了较粗粒径页岩层段裂缝—孔隙型石油资源,多层系页岩段取得重要突破,实现了从未成熟油页岩向成熟页岩层系石油的重要转变(Zou *et al.*, 2013b, 2015, 2019; 贾承造, 2018; Yang *et al.*, 2019a; 杨智等, 2019a; 胡素云等, 2020; Li *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022);截至2022年底,在鄂尔多斯、准噶尔、松辽等盆地发现多个规模储量区,正在建设鄂尔多斯盆地陇东、准噶尔盆地吉木萨尔、松辽盆地古龙、渤海湾盆地济阳等国家级页岩层系石油示范区/基地(杜金虎等, 2019; 金之钧等, 2019; 孙焕泉等, 2019; 邹才能等, 2019b, 2020b; 焦方正等, 2020; 孙龙德, 2020; 赵贤正等, 2020; 匡立春等, 2021).针对中低成熟富有机质页岩层系,巨量油气资源决定于尚未转化有机质的生烃潜力和已生成尚未排出的滞留烃数量,研究

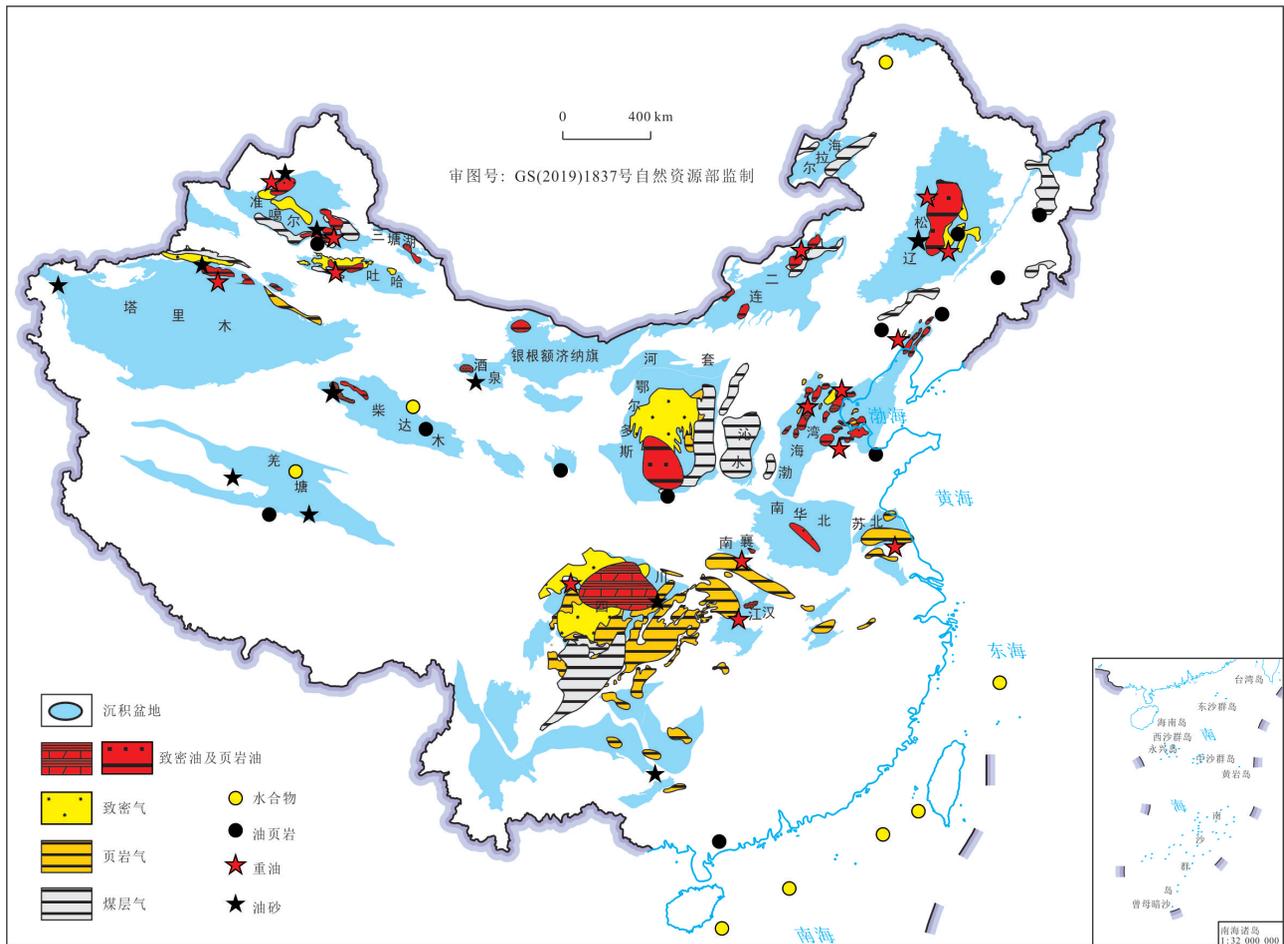


图 8 中国不同类型非常规油气资源有利区分布示意图(据杨智等, 2019b)

Fig.8 Schematic distribution of unconventional resources in China (after Yang *et al.*, 2019b)

发现地下原位水平井电加热转化可能是有效的技术路径(赵文智等, 2020; 邹才能等, 2020a, 2022d). 中国陆相富有机质页岩及富油煤岩原位转化油气资源, 主要分布在鄂尔多斯、松辽、准噶尔等盆地陆相页岩层系, 初步评价地下原位转化石油技术可采资源量  $(700\sim 900)\times 10^8$  t(赵文智等, 2020), 富油煤转化石油资源约  $500\times 10^8$  t、气资源量约  $75\times 10^{12}$  m<sup>3</sup> (王双明等, 2022). 推动富有机质页岩及富油煤岩地下原位转化率先在中国探索并有望实现商业化突破, 对国内石油稳产上产和技术升级换代具战略意义(邹才能等, 2021, 2022c).

### 3.3 战略研究

通过深刻理解页岩—煤岩层系烃源岩属性和储集层属性特征, 提出加快颠覆创新地下原位加热低熟页岩转化油气、地下原位加热富油煤岩转化油气和地下原位压裂脆性页岩层系产出油气理论技术的建议, 努力实现“三个地下革命”, 未来非常规油气革命有望推动世界油气工业可持续长远发展.

一是地下原位加热低熟页岩转化油气: 建议加快推进地下低熟富有机质页岩的加热原位转化“人工油气藏”颠覆性技术研发. 突破传统油气开发理念, 建立页岩油气地下原位转化“人造炼厂”. 地下加热原位转化是利用水平井电加热轻质化技术, 持续对埋深 300~3 000 m 的低熟富有机质页岩层段加热, 使多类有机质发生轻质化转化的物理化学过程, 如能实现商业突破, 可实现陆相页岩油的地下清洁高效开发利用, 对中国油气工业的长期稳定发展具里程碑意义. 二是地下原位加热富油煤岩转化油气: 建议加快推进地下煤岩一体化地下燃烧气化“人工气藏”、富油煤岩地下原位加热转化“人工油气藏”等颠覆性技术研发. 结合煤炭地下气化、原位加热转化、地下煤炭制氢、二氧化碳捕捉与埋存等技术, 使高碳化石能源实现低碳利用. 其中煤岩地下气化是将地层中的煤岩通过适当工程工艺技术, 在地下原位进行有控制的燃烧, 在煤岩的热作用及化学作用下产生 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 等可燃合成气的过程. 如能实现商业

突破,可有效缓解“富煤”和“油气不足”之间的矛盾,有望开启中国陆相“石油革命”与“天然气革命”,实现油气产量跨越式增长.三是地下原位压裂脆性页岩层系产出油气:建议基于水平井加水、注气等体积压裂人工改造等现有技术,持续加强中—低熟页岩油、中—低压致密油、含水致密砂岩气、深层—超深层煤岩气、中—低阶煤岩油气、海陆过渡相页岩气和陆相页岩气等非常规油气资源类型的瓶颈理论技术研发(图9).上述非常规油气资源具有资源规模大、储量动用难、认识程度低的特点,亟须提高动用程度,努力提升国内油气保供能力.

水平井加水压裂是突破性技术,水平井加热转化是革命性技术.突破传统油气以物理方式为主的开发理念,构建“源内化学转换”油气生产理论体系.通过化学方式实现油气开采方式的革命,地下原位加热低熟富有机质页岩转化成油和气、地下原位加热低熟富油煤岩转化成油和气,油气资源潜力超过千亿吨级油当量,不断推动未来可期的“页岩革命”和“煤岩革命”两场“非常规油气革命”,有望支撑实现未来中国“能源独立”.

未来在绿色智慧能源体系框架下,伴随化石能源与新能源协同、高效、智慧与绿色发展,“超级能源盆地”将重塑包括非常规油气在内的能源勘探开发的理念与模式(邹才能等,2022b,2023b,2023d).

“超级能源盆地”是指地下赋存大规模煤炭、石油、天然气等化石能源,地上具有丰富的风、光等新能源,具备建成超大型能源生产与利用基地的资源基础和地质、地理条件的能源富集盆地(图10).当前浅层煤炭与常规油气的传统能源利用,正在转向深层煤炭原位开采、非常规油气水力压裂与中低熟富有机质页岩原位转化、地面新能源利用,未来将向地下化石能源(煤炭、石油、天然气等)与CCUS/CCS及地面风能、光能、氢能等新能源协同融合发展,构建“超级能源盆地”多种能源有效利用与碳中和模式.超级能源盆地具有化石能源规模大,新能源规模大,地上地下储备规模大,碳捕获、利用与封存规模大等4大标志特征.如中国鄂尔多斯盆地,目前已成为中国最大的化石能源生产基地,油气资源绝大多数由致密砂岩气、致密油、页岩油、煤岩气等非常规油气资源构成.盆地地下埋深2000 m以浅煤炭可采资源量约 $2 \times 10^{12}$  t,石油和天然气可采资源量分别为 $32 \times 10^8$  t和 $12.9 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>.盆地地上的风、光等新能源资源也十分丰富,光能资源年辐射总量为4500~5600 MJ/m<sup>2</sup>,年有效利用时间1400~1600 h;风能密度为154~420 W/m<sup>2</sup>,风速为3 m/s以上的有效风力时间为2000 h以上;目前盆地内二氧化碳排放 $1 \times 10^8$  t左右.未来新型能源体系,是以新能源、新电力、新储能“三新”为技术主导的绿

油气类型	油气聚集剖面	理论认识	关键技术	战略定位	典型实例
油页岩		整体含有机质, 坳陷深湖、断陷浅湖富有机质岩相带控制高含油率油页岩分布	地面干馏+加热原位转化	油页岩油重要资源	敦密盆地桦甸
页岩油	中低成熟	厚层大面积富有机质页岩整体含有机质+烃类 富有机质段整体含油、连续分布, 纹层裂缝发育段富集高产	水平井电加热等地下原位转化	页岩油战略接替资源	鄂尔多斯盆地长7段 松辽盆地嫩江组
	中高成熟	富有机质页岩层系整体含油、连续分布	最优靶层评价、水平井体积压裂、平台式工厂化、超前补能等	页岩油现实重要资源	松辽盆地青一段
致密油	中高压	整体含油、连续分布, 裂缝发育储层甜点富集高产	水平井复杂缝网压裂平台式开发	致密油重要接替资源	准噶尔盆地二叠系
	中低压	整体含气、连续分布, 构造高点富集高产	水平井密切割体积压裂蓄能增产	致密油重要现实资源	鄂尔多斯盆地长7 <sup>上</sup> 长7 <sup>下</sup> 油层
致密气	含水气层	煤系层整体含气、连续分布, 生气中心+有利相带富集高产	控水+排水提高采收率	致密气重要接替资源	四川盆地川中须家河组
	无水气层	整体含油气、连续分布, 充足油气源充注区富集高产, 富油煤中煤岩油资源丰富	砂体刻画+水平井体积改造	致密气重大现实资源	鄂尔多斯盆地苏里格中东部
煤岩油气	中低煤阶	整体含气、连续分布, 深层煤岩具较高游离气含量, 饱含气、高渗带富集高产	直井等多井型压裂增产 水平井加热地下原位转化	煤岩气现实接替资源 煤岩油战略接替领域	二连盆地白垩系 三塘湖—准噶尔盆地侏罗系
	中高煤阶		水平井分段压裂、多井型适度改造排水解气开发	煤岩气重要现实资源	鄂尔多斯盆地、沁水盆地石炭系—二叠系
页岩气	陆相	湖盆深水富有机质纹层页岩富集区高产	水平井水力体积压裂、平台式“人工气藏”体积开发	页岩气可能接替资源	四川盆地川中北大安寨段
	海陆过渡相	过渡相深水富有机质纹层页岩整体含气、连续分布		页岩气重要接替资源	鄂尔多斯盆地山西组
	海相	深水陆棚区段富有机质页岩整体含气、连续分布		页岩气上产主力资源	四川盆地五峰组—龙马溪组

图9 中国非常规源岩油气和致密油气理论认识、关键技术和战略定位(据杨智等,2021a,修改)

Fig.9 Theoretical knowledge, key technologies, and strategic positioning of unconventional source rock oil and gas and tight oil and gas in China (after Yang *et al.*, 2021a)

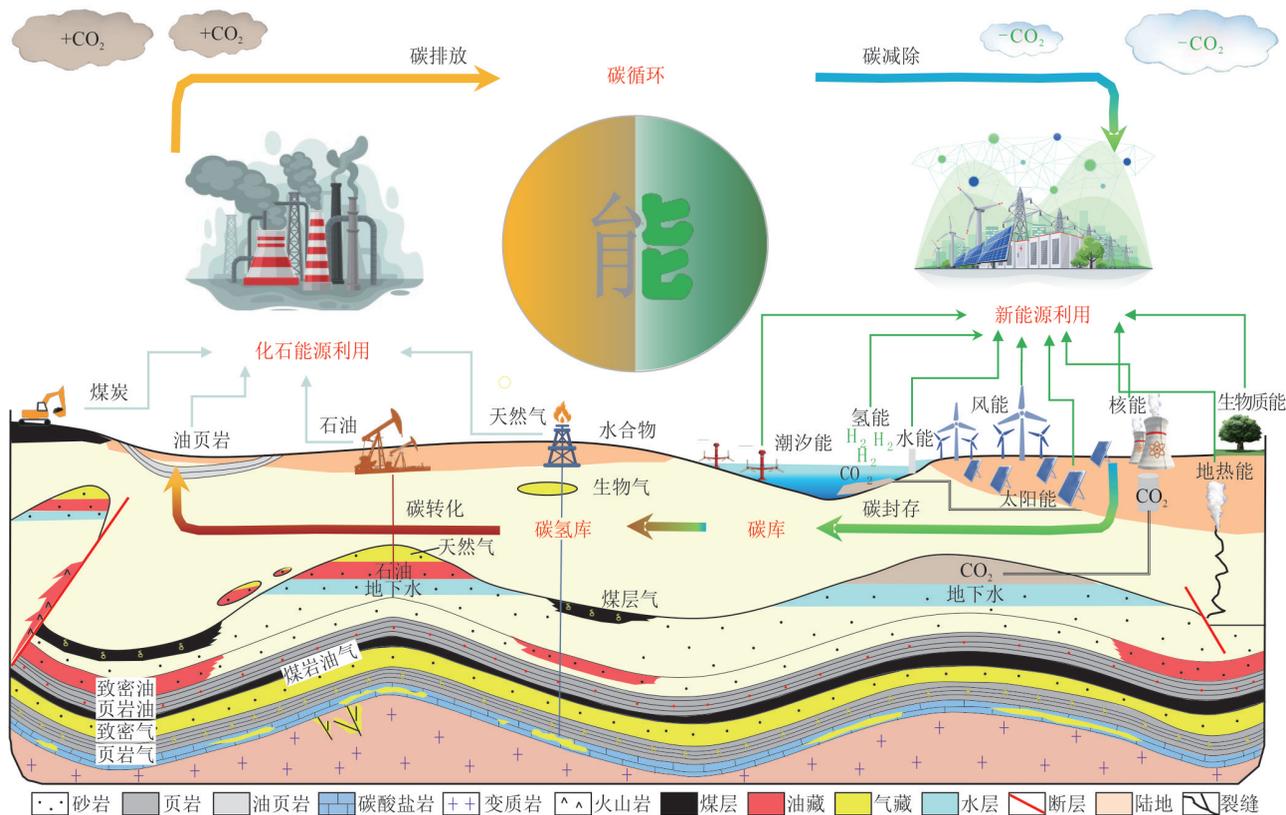


图 10 超级盆地能源利用示意图(据邹才能等, 2023b)

Fig.10 Schematic energy utilization in a super basin (after Zou *et al.*, 2023b)

色智慧能源新体系,以鄂尔多斯盆地为代表的“超级能源盆地”理念,是中国式“油气与新能源”融合发展模式,对碳中和下的能源革命具全球重大意义。

#### 4 结语

非常规油气地质学是世界油气工业从常规油气向非常规油气跨越的一次理论突破。10余年不懈攻关,基本形成了以海陆相细粒沉积模式、微纳米级尺度储层地质、连续型油气聚集、“人工油气藏”开发模式、常规—非常规油气有序“共生富集”发展战略为核心内容的非常规油气地质学理论技术体系,引领推动了石油地质学科发展、关键技术研发、国家标准制定、国家实验室建设和专业人才培养,有效推进了我国致密油和气、页岩油和气等非常规油气资源的工业勘探开发。未来通过理论、技术和管理“三个创新”的深度融合,突破传统油气以物理方式为主的开发理念,构建“源内化学转换”油气生产理论体系,通过地下原位加热低熟页岩转化油气、地下原位加热富油煤岩转化油气和地下原位压裂脆性页岩层系产出油气“三个地下革命”的颠覆

创新,通过构建超级能源盆地化石能源与新能源的协同发展,不断推动未来可期的“页岩革命”和“煤岩革命”两场“非常规油气革命”,非常规油气革命支撑油气工业持续发展。

非常规油气地质学研究的意义在于要用非常规思想,不断探索油气的新理论、新方法、新技术、新管理,解决非常规油气勘探开发快速发展的理论技术和生产需求。建立“非常规油气地质学”,不仅仅指导非常规油气勘探开发,更重要是培育非常规思维、引领非常规创新,使人类认识世界有非常规思想、和谐世界有非常规方法、推动世界有非常规人才。就是要形成颠覆性与革命性新思想、新理论、新技术、新人才、新工业……

致谢:本文在撰写和研究中得到石油公司、国家部委、高等院校、科研院所等院士、领导、专家、学者等的诸多指导和帮助,以及中国石油非常规油气地质研究团队的大力支持,在此一并致谢。

#### References

- Dai, J.X., Ni, Y.Y., Wu, X.Q., 2012. Tight Gas in China and Its Significance in Exploration and Exploitation. *Petro-*

- leum Exploration and Development*, 39(3): 257—264(in Chinese with English abstract).
- Dou, L.R., Wen, Z.X., Wang, J.J., et al., 2022. Analysis of the World Oil and Gas Exploration Situation in 2021. *Petroleum Exploration and Development*, 49(5): 1033—1044 (in Chinese with English abstract).
- Du, J.H., Hu, S.Y., Pang, Z.L., et al., 2019. The Types, Potentials and Prospects of Continental Shale Oil in China. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 560—568(in Chinese with English abstract).
- EIA, 2023. Drilling Productivity Report: For Key Tight Oil and Shale Gas Regions. EIA Independent Statistics & Analysis, Washington, U.S.A..
- Gao, Z.Y., Xiong, S.L., 2021. Methane Adsorption Capacity Reduction Process of Water-Bearing Shale Samples and Its Influencing Factors: One Example of Silurian Longmaxi Formation Shale from the Southern Sichuan Basin in China. *Journal of Earth Science*, 32(4): 946—959. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1120-5>
- Guo, X.S., Hu, D.F., Li, Y.P., et al., 2017. Geological Factors Controlling Shale Gas Enrichment and High Production in Fuling Shale Gas Field. *Petroleum Exploration and Development*, 44(4): 481—491(in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zou, H.Y., Lu, Y.C., 2013. Mechanisms of Shale Gas Storage: Implications for Shale Gas Exploration in China. *AAPG Bulletin*, 97(8): 1325—1346. <https://doi.org/10.1306/02141312091>
- Hu, S.Y., Zhao, W.Z., Hou, L.H., et al., 2020. Development Potential and Technical Strategy of Continental Shale Oil in China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(4): 819—828(in Chinese with English abstract).
- Jia, C.Z., 2017. Breakthrough and Significance of Unconventional Oil and Gas to Classical Petroleum Geological Theory. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 1—11(in Chinese with English abstract).
- Jia, C.Z., Pang, X.Q., Song, Y., 2021. The Mechanism of Unconventional Hydrocarbon Formation: Hydrocarbon Self-Containment and Intermolecular Forces. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 437—452(in Chinese with English abstract).
- Jia, C.Z., Zou, C.N., Yang, Z., et al., 2018. Significant Progress of Continental Petroleum Geology Theory in Basins of Central and Western China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 546—560(in Chinese with English abstract).
- Jiao, F.Z., Zou, C.N., Yang, Z., 2020. Geological Theory and Exploration & Development Practice of Hydrocarbon Accumulation Inside Continental Source Kitchens. *Petroleum Exploration and Development*, 47(6): 1067—1078 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.J., Bai, Z.R., Gao, B., et al., 2019. Has China Ushered in the Shale Oil and Gas Revolution? *Oil & Gas Geology*, 40(3): 451—458(in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.J., Zhu, R.K., Liang, X.P., et al., 2021. Several Issues Worthy of Attention in Current Lacustrine Shale Oil Exploration and Development. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1276—1287(in Chinese with English abstract).
- Kuang, L.C., Hou, L.H., Yang, Z., et al., 2021. Key Parameters and Methods of Lacustrine Shale Oil Reservoir Characterization. *Acta Petrolei Sinica*, 42(1): 1—14(in Chinese with English abstract).
- Li, G.X., Zhu, R.K., 2020. Progress, Challenges and Key Issues of Unconventional Oil and Gas Development of CNPC. *China Petroleum Exploration*, 25(2): 1—13(in Chinese with English abstract).
- Li, J.R., Yang, Z., Wu, S.T., et al., 2021. Key Issues and Development Direction of Petroleum Geology Research of Source Rock Strata in China. *Advances in Geo-Energy Research*, 5(2): 121—126. <https://doi.org/10.46690/ager.2021.02.02>
- Li, M.W., Ma, X.X., Jiang, Q.G., et al., 2019. Enlightenment from Formation Conditions and Enrichment Characteristics of Marine Shale Oil In North America. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 26(1): 13—28(in Chinese with English abstract).
- Li, N., Feng, Z., Wu, H.L., et al., 2023. New Advances in Methods and Technologies for Well Logging Evaluation of Continental Shale Oil in China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 28—44(in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Zhao, Q.M., Lyu, Q., et al., 2022. Evaluation Technology and Practice of Continental Shale Oil Development in China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(5): 955—964(in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Kuang, L.C., Li, G.X., et al., 2020. Considerations and Suggestions on Optimizing Completion Methods of Continental Shale Oil in China. *Acta Petrolei Sinica*, 41(4): 489—496(in Chinese with English abstract).
- Ma, X.H., Xie, J., 2018. The Progress and Prospects of Shale Gas Exploration and Exploitation in Southern Sichuan Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 161—169(in Chinese with English abstract).
- Ma, Y.S., Cai, X.Y., Zhao, P.R., 2018. China's Shale Gas Exploration and Development: Understanding and Practice. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 561—574(in Chinese with English abstract).
- Ma, Y.S., Feng, J.H., Mu, Z.H., et al., 2012. The Potential

- and Exploring Progress of Unconventional Hydrocarbon Resources in SINOPEC. *Engineering Sciences*, 14(6): 22–30(in Chinese with English abstract).
- National Technical Committee on Petroleum and Natural Gas of Standardization Administration of China, 2014. Geological Evaluation method for Tight Sandstone Gas: GB/T 30501-2014. Standards Press of China, Beijing(in Chinese).
- National Technical Committee on Petroleum and Natural Gas of Standardization Administration of China, 2015. Geological Evaluation Method for Shale Gas: GB/T 31483-2015. Standards Press of China, Beijing(in Chinese).
- National Technical Committee on Petroleum and Natural Gas of Standardization Administration of China, 2018. Geological Evaluation Method for Tight Oil: GB/T 34906-2017. Standards Press of China, Beijing(in Chinese).
- National Technical Committee on Petroleum and Natural Gas of Standardization Administration of China, 2020. Geological Evaluation Method for Shale Oil: GB/T 38718-2020. Standards Press of China, Beijing(in Chinese).
- Pollastro, R.M., 2007. Total Petroleum System Assessment of Undiscovered Resources in the Giant Barnett Shale Continuous (Unconventional) Gas Accumulation, Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91(4): 551–578. <https://doi.org/10.1306/06200606007>
- Schmoker, J. W., 1995. Method for Assessing Continuous - Type (Unconventional) Hydrocarbon Accumulations. U. S. Geological Survey Digital Data Series DDS-30, Washington.
- Song, Y., Liu, S.B., Ma, X.Z., et al., 2016. Research on Formation Model and Geological Evaluation Method of the Middle to High Coal Rank Coalbed Methane Enrichment and High Production Area. *Earth Science Frontiers*, 23(3):1–9(in Chinese with English abstract).
- Sun, H. Q., Cai, X. Y., Zhou, D. H., et al., 2019. Practice and Prospect of Sinopec Shale Oil Exploration. *China Petroleum Exploration*, 24(5):569–575(in Chinese with English abstract).
- Sun, J.S., Xu, C. Y., Kang, Y. L., et al., 2020. Research Progress and Development Recommendations Covering Damage Mechanisms and Protection Technologies for Tight/ Shale Oil and Gas Reservoirs. *Petroleum Drilling Techniques*, 48(4):1–10(in Chinese with English abstract).
- Sun, L.D., 2020. Gulong Shale Oil (Preface). *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 39(3): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Sun, L. D., Zou, C. N., Jia, A. L., et al., 2019. Development Characteristics and Orientation of Tight Oil and Gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(6): 1015–1026(in Chinese with English abstract).
- Sun, Z.D., Jia, C.Z., Li, X.F., et al., 2011. Unconventional Oil and Gas Exploration and Development. Petroleum Industry Press, Beijing, (in Chinese).
- Wang, S.M., Wang, H., Ren, S.H., et al., 2022. Potential Analysis and Technical Conception of Exploitation and Utilization of Tar - Rich Coal in Western China. *Strategic Study of CAE*, 24(3):49–57(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.N., Li, J.R., Jiang, W.Q., et al., 2022. Characteristics, Current Exploration Practices, and Prospects of Continental Shale Oil in China. *Advances in Geo-Energy Research*, 6(6): 454–459. <https://doi.org/10.46690/ager.2022.06.02>
- Wu, S. T., Li, S. X., Yuan, X. J., et al., 2021. Fluid Mobility Evaluation of Tight Sandstones in Chang 7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin. *Journal of Earth Science*, 32(4): 850–862. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1050-2>
- Yang, H., Niu, X.B., Xu, L.M., et al., 2016. Exploration Potential of Shale Oil in Chang7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(4): 511–520(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Hou, L.H., Tao, S.Z., et al., 2015. Formation Conditions and “Sweet Spot” Evaluation of Tight Oil and Shale Oil. *Petroleum Exploration and Development*, 42(5):555–565(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Li, Q. Y., Wu, S. T., et al., 2017. Evidence of the Near-Source Accumulation of the Tight Sandstone Gas in Northern Ordos Basin, North - Central China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(5):1820–1835. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13413>
- Yang, Z., Zou, C. N., 2019a. “Exploring Petroleum Inside Source Kitchen”: Connotation and Prospects of Source Rock Oil and Gas. *Petroleum Exploration and Development*, 46(1):173–184(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zou, C.N., 2022a. Orderly “Symbiotic Enrichment” of Conventional & Unconventional Oil and Gas-Discussion on Theory and Technology of Conventional & Unconventional Petroleum Geology. *Acta Geologica Sinica*, 96(5):1635–1653(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zou, C.N., Chen, J.J., et al., 2021a. “Exploring Petroleum Inside or near the Source Kitchen”: Innovations in Petroleum Geology Theory and Reflections on Hydrocarbon Exploration in Key Fields. *Acta Petrolei Sinica*, 42(10):1310–1324(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zou, C. N., Fu, J. H., et al., 2019b. Characteristics and “Sweet Area (Section)” Evaluation of Continuous

- Tight & Shale Oil and Gas in Ordos Basin, North-Central China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(4):459–474(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zou, C.N., Gu, Z.D., et al., 2022a. Geological Characteristics and Main Challenges of Onshore Deep Oil and Gas Development in China. *Advances in Geo-Energy Research*, 6(3): 264–266. <https://doi.org/10.46690/ager.2022.03.09>
- Yang, Z., Zou, C.N., Hou, L.H., et al., 2019a. Division of Fine-Grained Rocks and Selection of “Sweet Sections” in the Oldest Continental Shale in China: Taking the Coexisting Combination of Tight and Shale Oil in the Permian Junggar Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 109: 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.06.010>
- Yang, Z., Zou, C.N., Wu, S.T., et al., 2015b. Characteristics of Nano-Sized Pore-Throat in Unconventional Tight Reservoir Rocks and Its Scientific Value. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 32(3): 257–265(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zou, C.N., Wu, S.T., et al., 2019b. Formation, Distribution and Resource Potential of the “Sweet Areas (Sections)” of Continental Shale Oil in China. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.11.049>
- Yang, Z., Zou, C.N., Wu, S.T., et al., 2021b. From Source Control Theory to Source-Reservoir Symbiosis System: On the Theoretical Understanding and Practice of Source Rock Strata Oil and Gas Geology in China. *Acta Geologica Sinica*, 95(3): 618–631(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zou, C.N., Wu, S.T., et al., 2022b. Characteristics, Types, and Prospects of Geological Sweet Sections in Giant Continental Shale Oil Provinces in China. *Journal of Earth Science*, 33(5): 1260–1277. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1735-9>
- Yang, Z., Zou, C.N., Wu, S.T., et al., 2022b. Reservoir Fracturing or Hydrocarbon Generating? —On the Reservoir and Source Rock Properties of Source Rock Strata Oil and Gas. *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 183–194(in Chinese with English abstract).
- Yerkin, D., 2012. Energy Reshaping the World. Zhu, Y. B., Yan, Z. M., eds., Translation. Petroleum Industry Press, Beijing.
- Yu, G., Lu, R.Q., Liu, J., et al., 2023. Energy Transition and Energy Cooperation under the New Situation—Review of International Energy Executive Forum 2022. *International Petroleum Economics*, 31(2): 23–29(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.C., Jin, Z.J., Yuan, M.S., 2004. Reservoiring Mechanism of Shale Gas and Its Distribution. *Natural Gas Industry*, 24(7): 15–18, 131(in Chinese with English abstract).
- Zhao, W.Z., Bian, C.S., Li, Y.X., et al., 2023. Organic Matter Transformation Ratio, Hydrocarbon Expulsion Efficiency and Shale Oil Enrichment Type in Chang 7-3 Shale of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(1): 12–23(in Chinese with English abstract).
- Zhao, W.Z., Hu, S.Y., Hou, L.H., et al., 2020. Types and Resource Potential of Continental Shale Oil in China and Its Boundary with Tight Oil. *Petroleum Exploration and Development*, 47(1): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Z., Zhou, L.H., Pu, X.G., et al., 2020. Geological Characteristics and Exploration Breakthrough of Shale Oil in Member 3 of Shahejie Formation of Qibei Subsag, Qikou Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 41(6): 643–657(in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.K., Zou, C.N., Wu, S.T., et al., 2019. Mechanism for Generation and Accumulation of Continental Tight Oil in China. *Oil & Gas Geology*, 40(6): 1168–1184(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., 2017. Unconventional Petroleum Geology (2nd Edition). Petroleum Industry Press, Beijing.
- Zou, C.N., Ding, Y.H., Lu, Y.J., et al., 2017a. Concept, Technology and Practice of “Man-Made Reservoirs” Development. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 144–154(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Zhao, Q., Dong, D.Z., et al., 2017b. Geological Characteristics, Main Challenges and Future Prospect of Shale Gas. *Natural Gas Geoscience*, 28(12): 1781–1796 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Dong, D.Z., Wang, Y.M., et al., 2016. Shale Gas in China: Characteristics, Challenges and Prospects (II). *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 166–177.
- Zou, C.N., Feng, Y.L., Yang, Z., et al., 2022a. What are the Lacustrine Fine-Grained Gravity Flow Sedimentation Process and the Genetic Mechanism of Sweet Sections for Shale Oil? *Earth Science*, 47(10): 3864–3866(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Ma, F., Pan, S.Q., et al., 2022b. Earth Energy Evolution, Human Development and Carbon Neutral Strategy. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2): 411–428(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Yang, Z., Dong, D.Z., et al., 2022c. Formation, Distribution and Prospect of Unconventional Hydrocarbons in Source Rock Strata in China. *Earth Science*, 47(5): 1517–1533(in Chinese with English abstract).

- Zou, C.N., Yang, Z., Li, G.X., et al., 2022d. Why Can China Realize the Continental “Shale Oil Revolution”? *Earth Science*, 47(10):3860–3863(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Guo, Q., Yang, Z., et al., 2019. Resource Potential and Core Area Prediction of Lacustrine Tight Oil: The Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, China. *AAPG Bulletin*, 103(6): 1493–1523. <https://doi.org/10.1306/11211816511>
- Zou, C.N., Feng, Y.L., Yang, Z., et al., 2023a. Fine-Grained Gravity Flow Sedimentation and Its Influence on Development of Shale Oil Sweet Intervals in Lacustrine Basins in China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(3):1–15(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Ma, F., Pan, S.Q., et al., 2023b. Global Energy Transition Revolution and the Connotation And Pathway of the Green and Intelligent Energy System. *Petroleum Exploration and Development*, 50(3):1–15(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Ma, F., Pan, S.Q., et al., 2023c. Formation and Distribution Potential of Global Shale Oil and the Developments of Continental Shale Oil Theory and Technology in China. *Earth Science Frontiers*, 30(1):128–142(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Wu, S.T., Yang, Z., et al., 2023d. Progress, Challenge and Significance of Building a Carbon Industry System in the Context of Carbon Neutrality Strategy. *Petroleum Exploration and Development*, 50(1): 190–205(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Pan, S.Q., Jing, Z.H., et al., 2020a. Shale Oil and Gas Revolution and Its Impact. *Acta Petrolei Sinica*, 41(1):1–12(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Yang, Z., Sun, S.S., et al., 2020b. “Exploring Petroleum Inside Source Kitchen”: Shale Oil and Gas in Sichuan Basin. *Scientia Sinica (Terrae)*, 50(7):903–920(in Chinese).
- Zou, C.N., Qiu, Z., Poulton, S.W., et al., 2018a. Ocean Euxinia and Climate Change “Double Whammy” Drove the Late Ordovician Mass Extinction. *Geology*, 46(6): 535–538. <https://doi.org/10.1130/g40121.1>
- Zou, C.N., Yang, Z., He, D.B., et al., 2018b. Theory, Technology and Prospects of Conventional and Unconventional Natural Gas. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4):575–587(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Qiu, Z., Zhang, J.Q., et al., 2022. Unconventional Petroleum Sedimentology: A Key to Understanding Unconventional Hydrocarbon Accumulation. *Engineering*, 18:62–78. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.06.016>
- Zou, C.N., Tao, S.Z., Hou, L.H., et al., 2014a. Unconventional Petroleum Geology (2nd Edition). Geology Press, Beijing(in Chinese).
- Zou, C.N., Yang, Z., Zhang, G.S., et al., 2014b. Conventional and Unconventional Petroleum “Orderly Accumulation”: Concept and Practical Significance. *Petroleum Exploration and Development*, 41(1): 14–27(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Tao, S.Z., Yuan, X.J., et al., 2009. The Formation Conditions and Distribution Characteristics of Continuous Petroleum Accumulations. *Acta Petrolei Sinica*, 30(3):324–331.
- Zou, C.N., Yang, Z., Cui, J.W., et al., 2013a. Formation Mechanism, Geological Characteristics and Development Strategy of Nonmarine Shale Oil in China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1): 14–26(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Zhang, G.S., Yang, Z., et al., 2013b. Geological Concepts, Characteristics, Resource Potential and Key Techniques of Unconventional Hydrocarbon: On Unconventional Petroleum Geology. *Petroleum Exploration and Development*, 40(4): 385–399, 454(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Yang, Z., Dai, J.X., et al., 2015. The Characteristics and Significance of Conventional and Unconventional Sinian–Silurian Gas Systems in the Sichuan Basin, Central China. *Marine and Petroleum Geology*, 64:386–402. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.005>
- Zou, C.N., Yang, Z., Huang, S.P., et al., 2019a. Resource Types, Formation, Distribution and Prospects of Coal-Measure Gas. *Petroleum Exploration and Development*, 46(3):433–442(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Yang, Z., Wang, H.Y., et al., 2019b. “Exploring Petroleum Inside Source Kitchen”: Jurassic Unconventional Continental Giant Shale Oil & Gas Field in Sichuan Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 93(7): 1551–1562(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Yang, Z., Zhang, G.S., et al., 2019c. Establishment and Practice of Unconventional Oil and Gas Geology. *Acta Geologica Sinica*, 93(1):12–23(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Yang, Z., Tao, S.Z., et al., 2012a. Nano-Hydrocarbon and the Accumulation in Coexisting Source and Reservoir. *Petroleum Exploration and Development*, 39(1): 13–26(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Zhu, R.K., Wu, S.T., et al., 2012b. Types, Characteristics, Genesis and Prospects of Conventional and Unconventional Hydrocarbon Accumulations: Taking Tight Oil and Tight Gas in China as an Instance. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2): 173–187(in Chinese with English abstract).

- stract).
- Zou, C. N., Yang, Z., Tao, S. Z., et al., 2013. Continuous Hydrocarbon Accumulation over a Large Area as a Distinguishing Characteristic of Unconventional Petroleum: The Ordos Basin, North-Central China. *Earth-Science Reviews*, 126: 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.ear-scirev.2013.08.006>
- Zou, C. N., Yang, Z., Zhu, R. K., et al., 2015. Progress in China's Unconventional Oil & Gas Exploration and Development and Theoretical Technologies. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 979–1007(in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhao, Q., Cong, L. Z., et al., 2021. Development Progress, Potential and Prospect of Shale Gas in China. *Natural Gas Industry*, 41(1):1–14(in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhu, R. K., Bai, B., et al., 2011. First Discovery of Nano-Pore Throat in Oil and Gas Reservoir in China and Its Scientific Value. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1857–1864(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 戴金星,倪云燕,吴小奇,2012.中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义.石油勘探与开发,39(3):257–264.
- 窦立荣,温志新,王建君,等,2022.2021年世界油气勘探形势分析与思考.石油勘探与开发,49(5):1033–1044.
- 杜金虎,胡素云,庞正炼,等,2019.中国陆相页岩油类型、潜力及前景.中国石油勘探,24(5):560–568.
- 郭旭升,胡东风,李宇平,等,2017.涪陵页岩气田富集高产主控地质因素.石油勘探与开发,44(4):481–491.
- 胡素云,赵文智,侯连华,等,2020.中国陆相页岩油发展潜力与技术对策.石油勘探与开发,47(4):819–828.
- 贾承造,2017.论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义.石油勘探与开发,44(1):1–11.
- 贾承造,庞雄奇,宋岩,2021.论非常规油气成藏机理:油气自封闭作用与分子间作用力.石油勘探与开发,48(3):437–452.
- 贾承造,邹才能,杨智,等,2018.陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展.石油勘探与开发,45(4):546–560.
- 焦方正,邹才能,杨智,2020.陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践.石油勘探与开发,47(6):1067–1078.
- 金之钧,白振瑞,高波,等,2019.中国迎来页岩油气革命了吗?石油与天然气地质,40(3):451–458.
- 金之钧,朱如凯,梁新平,等,2021.当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题.石油勘探与开发,48(6):1276–1287.
- 匡立春,侯连华,杨智,等,2021.陆相页岩油储层评价关键参数及方法.石油学报,42(1):1–14.
- 黎茂稳,马晓潇,蒋启贵,等,2019.北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示.油气地质与采收率,26(1):13–28.
- 李国欣,朱如凯,2020.中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题.中国石油勘探,25(2):1–13.
- 李宁,冯周,武宏亮,等,2023.中国陆相页岩油测井评价技术方法新进展.石油学报,44(1):28–44.
- 李阳,赵清民,吕琦,等,2022.中国陆相页岩油开发评价技术与实践.石油勘探与开发,49(5):955–964.
- 刘合,匡立春,李国欣,等,2020.中国陆相页岩油完井方式优选的思考与建议.石油学报,41(4):489–496.
- 马新华,谢军,2018.川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景.石油勘探与开发,45(1):161–169.
- 马永生,蔡勋育,赵培荣,2018.中国页岩气勘探开发理论认识与实践.石油勘探与开发,45(4):561–574.
- 马永生,冯建辉,牟泽辉,等,2012.中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展.中国工程科学,14(6):22–30.
- 全国石油天然气标准化技术委员会,2014.致密砂岩气地质评价方法:GB/T30501-2014.北京:中国标准出版社.
- 全国石油天然气标准化技术委员会,2015.页岩气地质评价方法:GB/T31483-2015.北京:中国标准出版社.
- 全国石油天然气标准化技术委员会,2018.致密油地质评价方法:GB/T34906-2017.北京:中国标准出版社.
- 全国石油天然气标准化技术委员会,2020.页岩油地质评价方法:GB/T38718-2020.北京:中国标准出版社.
- 宋岩,柳少波,马行陟,等,2016.中高煤阶煤层气富集高产区形成模式与地质评价方法.地质前缘,23(3):1–9.
- 孙焕泉,蔡勋育,周德华,等,2019.中国石化页岩油勘探实践与展望.中国石油勘探,24(5):569–575.
- 孙金声,许成元,康毅力,等,2020.致密/页岩油气储层损害机理与保护技术研究进展及发展建议.石油钻探技术,48(4):1–10.
- 孙龙德,2020.古龙页岩油(代序).大庆石油地质与开发,39(3):1–7.
- 孙龙德,邹才能,贾爱林,等,2019.中国致密油气发展特征与方向.石油勘探与开发,46(6):1015–1026.
- 孙赞东,贾承造,李相方,等,2011.非常规油气勘探与开发.北京:石油工业出版社.
- 王双明,王虹,任世华,等,2022.西部地区富油煤开发利用潜力分析和技术体系构想.中国工程科学,24(3):49–57.
- 杨华,牛小兵,徐黎明,等,2016.鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力.石油勘探与开发,43(4):511–520.
- 杨智,侯连华,陶士振,等,2015a.致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价.石油勘探与开发,42(5):555–565.
- 杨智,邹才能,2019a.“进源找油”:源岩油气内涵与前景.石油勘探与开发,46(1):173–184.
- 杨智,邹才能,2022a.论常规—非常规油气有序“共生富集”:兼论常规—非常规油气地质学理论技术.地质学报,96(5):1635–1653.

- 杨智,邹才能,陈建军,等,2021a.“进(近)源找油”:油气地质理论创新与重点领域勘探思考.石油学报,42(10):1310—1324.
- 杨智,邹才能,付金华,等,2019b.大面积连续分布是页岩层系油气的标志特征:以鄂尔多斯盆地为例.地球科学与环境学报,41(4):459—474.
- 杨智,邹才能,吴松涛,等,2015b.含油气致密储层纳米级孔隙特征及意义.深圳大学学报(理工版),32(3):257—265.
- 杨智,邹才能,吴松涛,等,2021b.从源控论到源储共生系统:论源岩层系油气地质理论认识及实践.地质学报,95(3):618—631.
- 杨智,邹才能,吴松涛,等,2022b.造缝产烃还是改质造烃?——论含油气源岩层系的储集层属性和烃源岩属性.地质学报,96(1):183—194.
- 余国,陆如泉,刘佳,等,2023.新形势下的能源转型与能源合作:“2022年国际能源发展高峰论坛”综述.国际石油经济,31(2):23—29.
- 张金川,金之钧,袁明生,2004.页岩气成藏机理和分布.天然气工业,24(7):15—18,131.
- 赵文智,卞从胜,李永新,等,2023.鄂尔多斯盆地三叠系长7-3亚段页岩有机质转化率、排烃效率与页岩油富集类型.石油勘探与开发,50(1):12—23.
- 赵文智,胡素云,侯连华,等,2020.中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界.石油勘探与开发,47(1):1—10.
- 赵贤正,周立宏,蒲秀刚,等,2020.歧口凹陷歧北次凹沙河街组三段页岩油地质特征与勘探突破.石油学报,41(6):643—657.
- 朱如凯,邹才能,吴松涛,等,2019.中国陆相致密油形成机理与富集规律.石油与天然气地质,40(6):1168—1184.
- 邹才能,丁云宏,卢拥军,等,2017a.“人工油气藏”理论、技术及实践.石油勘探与开发,44(1):144—154.
- 邹才能,赵群,董大忠,等,2017b.页岩气基本特征、主要挑战与未来前景.天然气地球科学,28(12):1781—1796.
- 邹才能,冯有良,杨智,等,2022a.湖盆细粒重力流沉积作用过程及甜点层发育机制是什么?地球科学,47(10):3864—3866.
- 邹才能,马锋,潘松圻,等,2022b.论地球能源演化与人类发展及碳中和战略.石油勘探与开发,49(2):411—428.
- 邹才能,杨智,董大忠,等,2022c.非常规源岩层系油气形成分布与前景展望.地球科学,47(5):1517—1533.
- 邹才能,杨智,李国欣,等,2022d.中国为什么可以实现陆相“页岩油革命”?地球科学,47(10):3860—3863.
- 邹才能,冯有良,杨智,等,2023a.中国湖盆细粒重力流沉积作用及其对页岩油“甜点段”发育的影响.石油勘探与开发,50(3):1—15.
- 邹才能,马锋,潘松圻,等,2023b.世界能源转型革命与绿色智慧能源体系内涵及路径.石油勘探与开发,50(3):1—15.
- 邹才能,马锋,潘松圻,等,2023c.全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展.地学前缘,30(1):128—142.
- 邹才能,吴松涛,杨智,等,2023d.碳中和战略背景下建设碳工业体系的进展、挑战及意义.石油勘探与开发,50(1):190—205.
- 邹才能,潘松圻,荆振华,等,2020a.页岩油气革命及影响.石油学报,41(1):1—12.
- 邹才能,杨智,孙莎莎,等,2020b.“进源找油”:论四川盆地页岩油气.中国科学:地球科学,50(7):903—920.
- 邹才能,陶士振,侯连华,等,2014a.非常规油气地质学.北京:地质出版社.
- 邹才能,杨智,张国生,等,2014b.常规—非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义.石油勘探与开发,41(1):14—27.
- 邹才能,杨智,崔景伟,等,2013a.页岩油形成机制、地质特征及发展对策.石油勘探与开发,40(1):14—26.
- 邹才能,张国生,杨智,等,2013b.非常规油气概念、特征、潜力及技术:兼论非常规油气地质学.石油勘探与开发,40(4):385—399,454.
- 邹才能,杨智,何东博,等,2018.常规—非常规天然气理论、技术及前景.石油勘探与开发,45(4):575—587.
- 邹才能,杨智,黄士鹏,等,2019a.煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景.石油勘探与开发,46(3):433—442.
- 邹才能,杨智,王红岩,等,2019b.“进源找油”:论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田.地质学报,93(7):1551—1562.
- 邹才能,杨智,张国生,等,2019c.非常规油气地质学建立及实践.地质学报,93(1):12—23.
- 邹才能,杨智,陶士振,等,2012a.纳米油气与源储共生型油气聚集.石油勘探与开发,39(1):13—26.
- 邹才能,朱如凯,吴松涛,等,2012b.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望:以中国致密油和致密气为例.石油学报,33(2):173—187.
- 邹才能,杨智,朱如凯,等,2015.中国非常规油气勘探开发与理论技术进展.地质学报,89(6):979—1007.
- 邹才能,赵群,丛连铸,等,2021.中国页岩气开发进展、潜力及前景.天然气工业,41(1):1—14.
- 邹才能,朱如凯,白斌,等,2011.中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值.岩石学报,27(6):1857—1864.