

引文: 黄福喜, 汪少勇, 李明鹏, 等. 中国石油深层、超深层油气勘探进展与启示[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 86-96.
HUANG Fuxi, WANG Shaoyong, LI Mingpeng, et al. Progress and implications of deep and ultra-deep oil and gas exploration in PetroChina[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 86-96.

中国石油深层、超深层油气勘探进展与启示

黄福喜 汪少勇 李明鹏 欧阳婧琳 刘超 刘航宇 曾繁迪 范晶晶 贾鹏

中国石油勘探开发研究院

摘要: 近年来, 中国石油天然气股份有限公司(以下简称中国石油)在陆上深层、超深层油气领域勘探持续获得突破, 形成了一批规模储量区, 展现出了巨大的油气勘探潜力。为了进一步明确未来中国石油深层、超深层油气勘探方向, 在对中国石油近期油气勘探发展形势和新进展分析的基础上, 将深层、超深层重点勘探突破进行了领域细分, 并系统梳理了中国石油未来油气勘探重点区带并开展了排队优选研究, 最后总结了各领域的勘探经验和启示。研究结果表明: ①深层、超深层领域可细分为海相碳酸盐岩、碎屑岩及复杂岩性地层、前陆冲断带、深层页岩气4大领域; ②向深层进军寻找突破是中国石油未来油气勘探的战略选择, 也是未来中国石油油气勘探的重点, 应分层次、突出重点部署, 积极寻找规模新发现和重大突破; ③中国石油深层、超深层4大领域勘探程度低、剩余资源潜力大, 根据目前勘探进展, 初步梳理出40个未来油气勘探重点区带, 其中石油地质资源量为 39.4×10^8 t, 天然气地质资源量为 39.6×10^{12} m³, 油气勘探潜力巨大。结论认为, 深层、超深层是规模油气发现的重大现实领域, 保持战略定力、持续加大技术攻关和新领域的探索力度、不断创新理论认识、突破技术瓶颈是加快深层、超深层油气规模勘探开发的重要举措。

关键词: 中国石油; 深层、超深层; 油气勘探进展; 启示; 勘探方向

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.01.008

Progress and implications of deep and ultra-deep oil and gas exploration in PetroChina

HUANG Fuxi, WANG Shaoyong, LI Mingpeng, OUYANG Jinglin, LIU Chao,

LIU Hangyu, ZENG Fandi, FAN Jingjing, JIA Peng

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

Natural Gas Industry, Vol.44, No.1, p.86-96, 1/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In recent years, PetroChina has achieved a series of breakthroughs in onshore deep and ultra-deep oil and gas exploration and has discovered a group of large-scale reserve areas, demonstrating enormous petroleum exploration potential. In order to point out PetroChina's future direction of deep and ultra-deep oil and gas exploration, this paper analyzes its recent development situations and new progress in oil and gas exploration. Based on this, the key breakthroughs in deep and ultra-deep exploration are subdivided, and PetroChina's future main petroleum exploration areas are systematically sorted out, ranked and selected. Finally, the exploration experience and enlightenment in different fields is summarized. And the following research results are obtained. First, the deep and ultra-deep reservoirs can be divided into four major domains, i.e., marine carbonate rocks, clastic rocks and complex lithological strata, foreland thrust belt, and deep-strata shale gas. Second, to achieve breakthroughs in deep reservoirs is PetroChina's strategic choice of future focus in oil and gas exploration. It is necessary to carry out hierarchical deployment and highlight the focuses to actively search for large-scale new discoveries and great breakthroughs. Third, PetroChina's four major deep and ultra-deep domains are less explored with large remaining resource potential. Based on the current exploration progress, 40 key areas of future oil and gas exploration are preliminarily identified, with 39.4×10^8 t OOIP and 39.6×10^{12} m³ OGIP, indicating enormous exploration potential. In conclusion, deep and ultra-deep reservoirs are significant practical domains of large-scale oil and gas exploration, and the important measures to speed up the large-scale exploration and development of deep oil and gas reserves include maintaining strategic focus, continuously strengthening technological research and new field exploration, continuously innovating theoretical understanding, and breaking through technical bottlenecks.

Keywords: PetroChina; Deep and ultra-deep; Petroleum exploration progress; Enlightenment; Exploration direction

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科研项目“重点盆地油气综合地质研究与勘探潜力评价”(编号: 2022KT0405)、“油气勘探效果跟踪评价”(编号: 2023YQX405)。

作者简介: 黄福喜, 1975年生, 正高级工程师, 博士; 主要从事沉积储层学、油藏分析与油气地质条件综合研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路20号。ORCID: 0009-0001-0294-9936。E-mail: huangfuxi@petrochina.com.cn

通信作者: 汪少勇, 1988年生, 高级工程师, 博士; 主要从事油气勘探部署及石油地质综合研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路20号。ORCID: 0000-0002-3540-9741。E-mail: wshy0127@petrochina.com.cn

0 引言

近10年来,随着油气勘探理论认识的不断深化和工程技术与装备的升级革新,全球油气勘探开发领域由浅层向深层、超深层,由常规向非常规,由浅水向深水、超深水,由中渗、高渗整装区块向低渗透、低品位、难动用领域不断延伸和拓展^[1-4]。特别是中国陆上油气在整体中等一较高勘探程度背景下,在深层、超深层油气领域取得一系列重要突破,集中勘探形成了一批规模储量区,为油气储量持续保持高速增长奠定了坚实基础^[3-5]。

深层、超深层领域既有深度的概念,又有层系的内涵,与中层、浅层油气藏相比有较大差别^[4]。从深度上看,随着地层埋深加大,地下温度、压力升高,油气成烃、成储、成藏机理与中层、浅层大不相同^[6]。从层系上看,正常地层层序中形成时代越老的地层埋藏深度越大,中国陆上含油气盆地多旋回叠加沉积,以中生界、新生界为主的上部陆相中层、浅层常规油气藏已经进入勘探开发中后期阶段,处于下构造层的古生代海相地层、前陆冲断带断层下掩伏地层和凹陷的洼槽区地层勘探程度还较低。笔者采用国内学者广泛认可的标准,考虑中国陆上东部、西部地温场、压力场、流体相态的差异与工程技术的适用性,将东部地区埋深介于3 500~4 500 m的地层划分为深层,超过4 500 m的地层划分为超深层,将中部、西部地区埋深介于4 500~6 000 m的地层划分为深层,大于6 000 m的地层划分为超深层^[2-4]。对于页岩气,综合中国石油天然气股份有限公司(以下简称中国石油)在四川盆地的勘探实践及东部地区关于深层的划分标准,将3 500 m作为深层页岩气和中浅层页岩气的埋藏深度界线。

为了进一步明确未来中国石油深层、超深层油气勘探方向,笔者在对近期中国石油油气勘探发展形

势分析的基础上,对中国石油近10年在深层、超深层领域取得的重点勘探突破进行了系统梳理与研究,将深层、超深层领域进行了细分,对未来中国石油勘探重点区带进行了排队优选研究,并总结出经验启示,以期为中国石油深层、超深层的下一步油气勘探开发提供参考和借鉴。

1 近年油气勘探发展形势

经济发展离不开充足的油气能源供给,随着中国经济的快速增长,油气产量增长远低于油气消费增长的矛盾日益突出。“双碳”目标背景下中国仍要加大增储上产力度,坚持“稳油增气”,保证国家油气长期供应安全^[7-8]。中国深层、超深层领域富油更富气,近年来深层、超深层持续获得突破发现,成为油气规模增储重点,加快深层、超深层油气勘探开发,是中国陆上油气勘探开发的必然战略选择^[4]。

1.1 油气勘探深度不断向深层、超深层拓展

21世纪以来,是中国深层油气勘探的规模发现阶段^[3]。深层探井井数逐年增加,钻井深度不断加大(图1)。2022年,中国石油钻探深度大于6 000 m的探井达77口,探井年度单井平均深度由2000年的2 580 m增加到2021年的3 628 m,增幅41%(图1)。其中,中国石油塔里木油田公司和西南油气田公司探井深度增幅最为显著,2021年探井单井平均深度分别达7 207 m和5 763 m,较2000年分别增加61%和153%(图1)。中国石油年度最深探井也主要位于塔里木盆地和四川盆地,1978年,在四川盆地老关庙钻探的关基井,钻井深度首度突破7 000 m,2011年,塔里木盆地库车坳陷克深7井钻探深度突破8 000 m,2019年轮探1井井深达8 882 m。四川盆地2023年2月完钻的蓬深6井,直井钻探深度达9 026 m,创造了当年亚洲最深直井纪录。

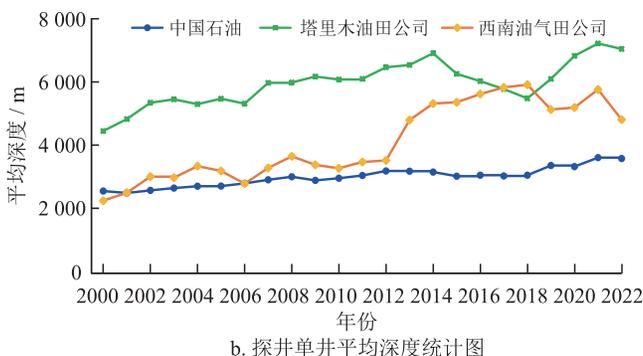


图1 中国石油及其重点油气田公司历年深探井数量及探井单井平均深度统计图

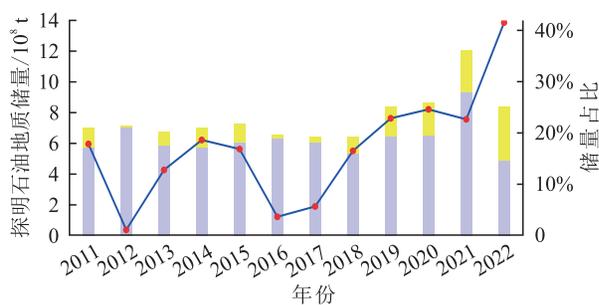
1.2 深层、超深层油气工业产层持续突破深度下限

传统石油地质理论认为,随着地层埋深加大,烃源岩随地层温度升高逐渐进入生烃高峰期,储层受上覆岩层压实影响有效孔隙不断减少,因此油气勘探存在“油气窗”和“死亡线”,地下温度 $60\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是油气富集的“黄金带”,埋深 $4\ 500\text{ m}$ 是碎屑岩有效储层的死亡线^[9-10]。然而,近年来深层油气勘探发现的工业油气产层不断突破传统认识的深度下限。碳酸盐岩类储层中,塔里木盆地富满地区在 $8\ 400\text{ m}$ 超深层发现了超 $10\times 10^8\text{ t}$ 大油田,储层主要为受走滑断裂控制的缝洞型石灰岩,优质储层平均孔隙度 7.0% , 62% 的井试油日产油超过 100 m^3 ,部分井试油日产油气当量超 $1\ 000\text{ t}^{[11]}$ 。四川盆地西部地区(以下简称川西地区)中二叠统发现了以颗粒白云岩为储层的双鱼石栖霞组气藏,气藏中部埋深介于 $7\ 100\sim 7\ 600\text{ m}$,储层平均孔隙度 3.5% ,部分井测试日产气量超过 $100\times 10^4\text{ m}^3^{[12]}$ 。碎屑岩类储层中,塔里木盆地库车坳陷博孜一大北区块发现万亿立方米级规模储量区,储层主要为下白垩统巴什基奇克组砂岩与巴西改组砂岩,埋藏深度介于 $7\ 500\sim 8\ 000\text{ m}$,基质孔隙度介于 $4.0\%\sim 13.0\%$,单井测试日产气量可达 $70\times 10^4\text{ m}^3^{[13]}$ 。准噶尔盆地南缘地区高探1井、呼探1井等相继获高产油气流,储层主要为下白垩统清水河组砂砾岩,埋藏深度介于 $6\ 000\sim 8\ 000\text{ m}$,基质孔隙度介于 $2.0\%\sim 11.0\%$,单井测试日产油量超过 $1\ 000\text{ t}$,日产气量超过 $60\times 10^4\text{ m}^3^{[14]}$ 。河套盆地临河坳陷河探1井(风险井)在超 $6\ 100\text{ m}$ 井段试油获日产 302 m^3 高产油流,储层主要为古近系临河组细砂岩,岩心孔隙度可达 18.0% ,证实断陷盆地洼槽

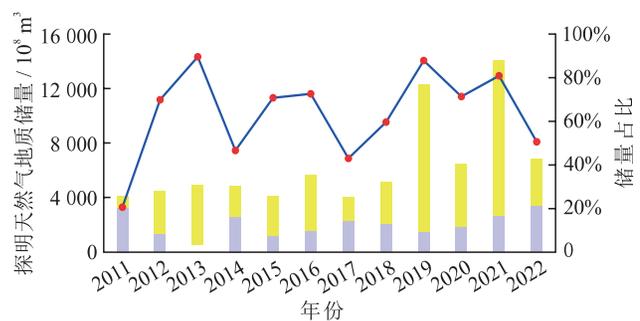
区超深层仍可发育优质碎屑岩储层^[15]。页岩储层中,四川盆地中浅层已探明页岩气地质储量超万亿立方米,2018年以来,中国石油针对四川盆地南部地区(以下简称川南地区)埋深介于 $3\ 500\sim 4\ 500\text{ m}$ 的下志留统龙马溪组深层页岩气持续开展攻关,在埋深 $3\ 800\text{ m}$ 的泸203井获日产量为 $138\times 10^4\text{ m}^3$ 的高产气流,在威远、泸州、渝西等深层页岩气区块多口井测试日产气量 $20\times 10^4\sim 50\times 10^4\text{ m}^3$,打开了深层页岩气勘探开发新局面^[16]。

1.3 深层、超深层新增储量占比不断攀升,已成为规模增储上产重要领域

“十二五”期间,中国石油深层、超深层探明石油地质储量占比年均 13% ,探明天然气地质储量占比年均 59% (图2)。“十三五”以来,中国石油加大了深层、超深层油气勘探力度,相继发现了塔里木盆地富满、博孜一大北,四川盆地中部地区(以下简称川中地区)古隆起北斜坡、合川—潼南、川南深层页岩气,河套盆地临河坳陷等规模增储领域,深层、超深层新增石油、天然气地质储量占比不断攀升,年均占比分别升至 20% 和 66% ,其中,2022年深层、超深层新增石油探明地质储量占比达 42% ,2019年深层、超深层新增天然气探明地质储量占比达 88% (图2)。特别是近五年来,塔里木盆地富满油田探明油气地质储量 $6.3\times 10^8\text{ t}$ 油当量,落实油气资源量超 $15\times 10^8\text{ t}$ 油当量,快速建成了年产 $300\times 10^4\text{ t}$ 大油田^[11]。河套盆地巴彦油田探明石油地质储量超 $2\times 10^8\text{ t}$,快速落实年产 $200\times 10^4\text{ t}$ 的资源基础^[15]。2022年,四川盆地泸州深层形成国内首个万亿立方米深层页岩气储量区^[16]。



a. 探明石油地质储量统计图



b. 探明天然气地质储量统计图

图例 中浅层 深层、超深层 深层、超深层储量占比

图2 近年中国石油深层、超深层探明石油、天然气地质储量统计图

2 近期深层、超深层油气勘探进展

近年来,中国石油通过持续加大新盆地、新区带、新层系和新类型等“四新”领域风险勘探,突

出大盆地重点领域甩开预探和集中勘探,加强深层、超深层勘探力度,强化地质研究与技术攻关,发展形成了深层、超深层海相碳酸盐岩“断溶体”控藏、古老碳酸盐岩“四古”控藏、前陆冲断带深层成藏、

凹陷区岩性控藏、深层火山岩“三元”控藏等地质理论与认识, 攻关形成了“双高”处理和“双复杂”区三维地震采集处理解释、深层与超深层钻完井、深层测试、长水平井压裂技术等配套技术, 为深层、超深层油气勘探发现提供了理论支撑和技术保障^[5]。深层、

超深层领域共获得 17 项勘探战略发现和突破(表 1)。从取得的突破成果看, 可划分为海相碳酸盐岩、碎屑岩及复杂岩性—地层(包括深层碎屑岩岩性—地层油气藏、火山岩及湖相碳酸盐岩等复杂岩性—地层油气藏 2 大类)、前陆冲断带、深层页岩气 4 大领域。

表 1 近年中国石油深层、超深层重大突破发现统计表

勘探领域	首次发现时间/年	代表井	油气藏埋深/m	突破及意义
海相碳酸盐岩	2012	高石 1 井	4 850 ~ 5 500	四川盆地探明了安岳超万亿立方米大气田
	2014	双探 1 井、合深 4 井	4 340 ~ 7 740	拉开了四川盆地中二叠统栖霞组—中二叠统茅口组勘探序幕
	2020	蓬探 1 井、蓬深 8 井	5 300 ~ 7 800	四川盆地川中古隆起北斜坡展现新的万亿立方米规模增储大场面
	2020	满深 1 井、满深 2 井	5 900 ~ 8 470	塔里木盆地落实 10×10^8 t 级原油规模增储大场面
碎屑岩及复杂岩性—地层	2013	玛湖 1 井、夏云 1 井	3 100 ~ 4 990	准噶尔盆地探明了玛湖超 10×10^8 t 大油田
	2018	永探 1 井	5 100 ~ 5 700	四川盆地发现西南地区二叠系火山岩新领域
	2020	临华 1X 井、河探 1 井	3 350 ~ 5 200	河套盆地形成亿吨级高效开发油田
	2020	长深 40 井、古龙 2 井	4 605 ~ 5 400	拓展了松辽盆地油气勘探新领域
	2020	康探 1 井	3 880 ~ 5 300	准噶尔盆地阜康东环带有望形成新的规模增储区
前陆冲断带	2021	狮 303 井	5 320 ~ 5 500	柴达木盆地英雄岭发现亿吨级高产高效油气田
	2018	中秋 1 井	5 900 ~ 6 400	塔里木盆地发现了秋里塔格天然气勘探新领域
	2020	博孜 9 井	7 800 ~ 8 150	塔里木盆地博孜一大北区块展现新的万亿立方米规模潜力
	2018	高探 1 井、呼探 1 井	6 200 ~ 8 100	准噶尔盆地南缘展现新的万亿立方米大气区潜力
深层页岩气	2022	克探 1 井	5 000 ~ 5 100	塔里木盆地实现克拉苏构造带新层系重大突破
	2019	泸 203 等井	3 700 ~ 4 200	四川盆地探明深层万亿立方米大气区
	2019	忠平 1 井、李 86 井	3 700 ~ 4 500	发现了鄂尔多斯盆地乌拉力克组海相页岩气勘探新领域
	2022	大页 1H 井、资 201 井	4 300 ~ 4 900	开辟了四川盆地页岩气规模增储新阵地

2.1 深层、超深层海相碳酸盐岩领域

中国陆上海相碳酸盐岩多分布于四川、塔里木、鄂尔多斯和渤海湾 4 大叠合盆地的下构造层, 以古生界和元古界为主, 埋深介于 5 000 ~ 7 000 m, 具有时代老、埋藏深的特点^[17]。预测石油地质资源量为 340×10^8 t, 天然气地质资源量为 24.3×10^{12} m³, 勘探潜力较大^[18]。

近年来, 中国石油在塔里木盆地富满地区发现了 10×10^8 t 级大油区, 在四川盆地发现和落实了安岳、川中古隆起北斜坡 2 个万亿立方米特大气区。

2.1.1 塔里木盆地富满地区发现 10×10^8 t 级大油区

塔里木盆地碳酸盐岩历经 40 余年油气勘探, 勘探对象从潜山岩溶、礁滩体岩溶、层间岩溶向断控岩溶转变, 勘探领域从古隆起、古斜坡向坳陷区扩展^[19]。近年来, 依托高精度三维地震, 发现并精确刻画了一批走滑断裂带。在走滑断裂控储、控藏、控

富集新认识的指导下, 2020 年部署的满深 1 井在富满地区获高产突破, 坚定了在塔里木盆地北部坳陷中间部位超深层寻找优质油气藏的信心^[19]。通过勘探开发一体化集中部署, 快速实现主干走滑断裂规模增储和建产, 落实 10×10^8 t 级石油地质储量规模。勘探实践证明, 富满断溶体油藏具有“大断裂大油藏, 小断裂小油藏”的特征, 面对次级断裂短而小、资源规模有限的严峻形势, 塔里木油田构建“寒武系供烃、次级网状断裂沟通油源、纵向输导、断控台缘高能滩复合油气成藏”新模式, 部署的富东 1 井在奥陶系碳酸盐岩断控台缘高能滩获得重大突破, 为推动富满油田进一步规模增储准备了接替资源^[19]。

2.1.2 四川盆地震旦系一下古生界发现和落实了安岳、古隆起北斜坡 2 个万亿立方米规模储量区

四川盆地震旦系一下古生界勘探始于 20 世纪 50 年代, 以往围绕威远背斜与乐山—龙女寺古隆起展开

多轮探索,除威远气田外未获重大发现。2006年以来,中国石油以寻找继承性古隆起古今构造叠合发育区岩性气藏为目标,在高石梯—磨溪地区开展风险勘探^[20]。2011年至2012年,高石1井上震旦统灯影组、磨溪8井下寒武统龙王庙组相继获高产气流,2013年底,快速探明龙王庙组特大型气藏,之后整体控制灯影组台缘带储量规模。2015年以来,针对台内滩薄储层开展工艺井提产试验攻关,磨溪129H水平井和大斜度井均获高产气流,储量规模由台缘带向台内滩进一步扩大^[21]。至2020年底,安岳气田已累计探明天然气地质储量 $1.15 \times 10^{12} \text{ m}^3$,建成 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$ 年生产能力^[21]。

继安岳超万亿立方米特大气田探明后,中国石油西南油气田公司按照斜坡区寻找岩性气藏勘探思路,强化层序地层格架精细对比、岩溶古地貌恢复、灯影组台缘丘滩体刻画等基础研究,在川中古隆起北斜坡部署风险探井角探1井、蓬探1井、东坝1井均获高产天然气突破,落实灯影组二段、灯影组四段、龙王庙组、下寒武统沧浪铺组4套规模孔隙型气层,发现了新的万亿立方米规模大气区^[22]。

2.2 深层、超深层碎屑岩及复杂岩性—地层领域

深层、超深层碎屑岩及复杂岩性—地层领域包括深层、超深层碎屑岩岩性—地层油气藏,火山岩及湖相碳酸盐岩等复杂岩性—地层油气藏2大类,主要分布在坳陷及断陷盆地富油气凹陷斜坡区及洼槽区。初步评价石油地质资源量约 $48 \times 10^8 \text{ t}$,天然气地质资源量约 $20 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[4]。重点领域包括准噶尔盆地斜坡区二叠系—三叠系砂砾岩、石炭系火山岩,渤海湾盆地富油气凹陷洼槽区砂岩及基岩潜山区砂岩、碳酸盐岩,松辽盆地早白垩世断陷区砂岩及火山岩,四川盆地二叠系火山岩及川西前陆须家河组砂岩,河套盆地洼槽区砂岩,柴达木盆地柴西坳陷古近系下干柴沟组湖相碳酸盐岩等。

近年来,中国石油在准噶尔盆地二叠系—三叠系探明了玛湖 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 大油区,发现了阜康东环带规模增储新领域,在河套盆地临河坳陷探明亿吨级高效油田,并拓展了四川盆地二叠系火山岩勘探新领域。

2.2.1 准噶尔盆地斜坡区二叠系—三叠系石油勘探取得重大突破

准噶尔盆地二叠系—三叠系沉积期处于盆地由断陷向坳陷转化时期,受西北缘抬升影响,盆地沉积中心和沉降中心由山前向盆内迁移,导致烃源岩

层自下而上迁移,形成西部、东部2大沉积中心^[23]。西部坳陷包括玛湖、沙湾、盆1井西等次级凹陷,下二叠统风城组是主力烃源岩层系,东部坳陷包括阜康、东道海子、吉木萨尔等次级凹陷,中二叠统芦草沟组是主力烃源岩层系。斜坡区发育大型退覆式扇三角洲沉积的规模储层,与中二叠统一下二叠统烃源岩源储配置,具备形成大面积岩性—地层油气藏的地质条件。

准噶尔盆地石油勘探长期集中在西北缘断裂带构造领域。1955年,在玛湖凹陷西北斜坡发现克拉玛依油田。20世纪80年代末,按照“跳出断裂带,走向斜坡区”的勘探思路,在退覆式扇三角洲沉积模式的指导下,发现玛湖十亿吨级大油田,拉开了盆地环中央坳陷带斜坡区岩性油气藏勘探序幕^[24]。近年来,借鉴玛湖凹陷勘探成功经验,准噶尔盆地斜坡区岩性领域下凹近源勘探成果斐然,在沙湾、东道海子等富烃凹陷连获重大突破^[25]。2020年,立足高精度三维地震资料,针对阜康凹陷开展新一轮综合地质研究,在阜中凹槽和阜南凹槽分别部署的风险探井康探1、康探2井均获高产突破,其中,康探1井在二叠系上乌尔禾组一段、上乌尔禾组二段,三叠系韭菜园组3层均获日产百立方米高产油流,新增预测石油地质储量超亿吨,突破了碎屑岩深埋条件下难以形成有效储层的传统认识,开辟了准东地区规模勘探新领域,展现出阜康凹陷多层系立体勘探潜力,阜康东环带有望成为准噶尔盆地规模增储的重大新战场^[25]。

2.2.2 河套盆地探明超亿吨级高效开发油田

河套盆地是在华北克拉通结晶基底之上发育的中生代—新生代断陷盆地,早期地震测网稀疏且资料品质较差、油气成藏规律不明确、圈闭不落实,勘探40余年未获实质性突破^[26]。2017年以来,华北油田借鉴渤海湾断陷盆地精细勘探经验,在系统油气成藏研究基础上,优选临河坳陷南部吉兰泰构造带加强物探部署,快速发现吉兰泰油田并实现增储上产^[15]。为扩大勘探成果,近2年积极探索临河坳陷洼槽区深层碎屑岩含油气性,针对北部光明构造、中部扎格构造部署的河探1井、扎格1井分别在5000 m、6000 m以深获得高产工业油流,快速发现并探明超亿吨级巴彦油田^[15]。勘探证实,临河坳陷古近系储层孔隙度随深度变大递减较小,临河组有效孔隙度埋深可达8000 m,极大拓展了河套盆地油气勘探潜力,对中小盆地油气勘探具有重要借鉴意义。

2.2.3 四川盆地西南地区二叠系火山岩天然气勘探新领域

四川盆地火山岩勘探始于 1966 年, 仅 1992 年钻探的周公 1 井获工业气流, 研究结果认为四川盆地二叠系火山岩虽然具备成藏条件, 但优质储层展布、成藏主控因素及有利勘探区尚不明确, 此后火山岩领域勘探基本停滞^[27]。2017 年以来, 中国石油针对二叠系火山岩再次系统开展攻关研究, 借助高精度三维地震资料, 认为成都—简阳地区发育爆发相火山碎屑岩沉积, 与寒武系烃源岩及上二叠统龙潭组泥岩、下三叠统区域膏岩等多套盖层配置良好, 具备形成大型构造—岩性复合圈闭气藏的条件, 部署了风险探井永探 1 井钻遇优质火山碎屑熔岩孔隙型储层, 中途测试获日产气 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流, 实现了四川盆地西南地区(以下简称川西南地区)火山岩天然气勘探重大突破, 打开了二叠系火山岩天然气勘探新局面^[27]。

2.3 前陆冲断带深层、超深层领域

前陆盆地是世界上发现深层油气田最多的盆地类型之一^[28]。中国中西部地区塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地、柴达木盆地、吐哈盆地、三塘湖盆地等发育 16 个前陆冲断带, 以陆相层系为主, 在整体挤压背景下形成背斜、断背斜、断块等多种类型构造, 多个构造连片形成大型构造带, 是寻找规模油气藏的重点领域^[29]。有利勘探面积约 $36 \times 10^4 \text{ km}^2$, 石油地质资源量 $33 \times 10^8 \text{ t}$, 天然气地质资源量 $21 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[4]。

近年来, 中国石油在塔里木盆地博孜一大北区块落实新的万亿立方米大气区, 在克拉苏构造带新层系、准噶尔盆地南缘下组合等领域取得新突破。

2.3.1 塔里木盆地博孜一大北区块有望形成新的万亿立方米大气区

博孜一大北区块位于塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带西段, 东部的克拉—克深区块已经建成万亿立方米大气区。博孜一大北区块具有“早期聚油、晚期聚气、超压充注、垂向输导、高效聚集”的特征, 成藏条件有利, 但由于砾石层、膏盐岩厚度更大, 地震成像、构造解释和圈闭落实难度大^[29]。2018 年以来, 通过加强地震攻关, 新落实一批圈闭, 集中勘探新发现博孜 9、大北 4 等含气构造, 落实天然气地质储量近万亿立方米^[13]。尤其是大北 4 井在埋深介于 8 022 ~ 8 143 m 井段获天然气日产量 $19 \times 10^4 \text{ m}^3$, 创国内碎屑岩工业油气流最深纪录, 解放了一批 8 000 m 超深层圈闭目标。

2.3.2 塔里木盆地克拉苏构造带克探 1 井亚格列木组新层系获重大突破

塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带巴什基奇克组勘探已进入精细勘探阶段, 目标圈闭构造更加复杂、面积变小、储量规模减小、埋藏深度增加, 寻找接替领域迫在眉睫。下白垩统亚格列木组在北部露头区以砾岩为主, 物性差, 长期未进行专层探索, 已钻井仅见显示或低产^[30]。近年来, 对亚格列木组进行重新研究认为, 向盆地内部该层系逐渐相变为扇三角洲、辫状河三角洲沉积, 三角洲前缘相带发育有效储层, 与上覆下白垩统舒善河组形成良好储盖组合, 且与巴什基奇克组相比更靠近三叠系—侏罗系烃源岩。2022 年, 在克拉 2 背斜深层部署克探 1 井获高产突破, 证实亚格列木组—舒善河组储盖组合的有效性, 发现一个全新的勘探层系, 8 000 m 以浅资源量超万亿立方米, 有望成为新的规模增储领域。

2.3.3 准噶尔盆地南缘下组合油气风险勘探取得重大战略突破

准噶尔盆地南缘自独山子油田发现以来, 经过多轮次的研究与勘探, 仅在浅层发现玛河等几个小型气田, 近年来瞄准深层大构造, 持续深化油气富集规律认识, 加强三维地震成像、钻井技术攻关。2019 年, 南缘高泉背斜高探 1 井清水河组获日产油 $1\ 213 \text{ m}^3$ 、日产气 $32.18 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产油气流, 实现了准噶尔盆地南缘深层大构造勘探历史性突破^[31]。随后针对呼图壁背斜、东湾背斜清水河组部署的呼探 1 井、天湾 1 井风险探井相继获高产油气流, 进一步坚定了南缘寻找大油气田的信心^[14]。

2.4 深层、超深层页岩气

中国中、浅层页岩气历经 10 余年发展, 已经实现了商业化规模开发。中国石油在川南地区龙马溪组已经建成万亿立方米储量、百亿立方米产量页岩气区。中国深层页岩气勘探潜力巨大, 在四川盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地、渤海湾盆地及松辽盆地等大中型盆地及其周缘地区均有分布^[32]。

2.4.1 四川盆地深层页岩气勘探获重大突破

2020 年以来, 中国石油持续创新完善页岩气富集高产地质理论, 加大三维地震部署和平台式工厂化水平井钻探力度, 川南地区龙马溪组深层页岩气再获重大突破, 落实了新的万亿立方米规模储量区。针对四川盆地上二叠统吴家坪组、下寒武统筇竹寺组页岩气部署的大页 1H 井、资 201 井又获高产气流,

发现了四川盆地页岩气接替新层系，为中国页岩气可持续发展奠定了扎实资源基础。

2.4.2 鄂尔多斯盆地乌拉力克组海相深层页岩气勘探取得突破

鄂尔多斯盆地西部地区中奥陶统乌拉力克组发育一套纹层状黑色页岩，分布范围横跨盆地西缘冲断带、天环坳陷，呈南北向长条状展布，东西宽 50 ~ 200 km，南北长 600 km，厚度介于 40 ~ 140 m，埋深 3 700 ~ 4 500 m，整体具有“北厚南薄、西厚东薄”的特征，自北向南可分为棋盘井（北段）、马家滩（中段）和银洞子（南段）3 段^[33-34]。2019 年以来，借鉴国内外页岩气勘探开发经验，在中段马家滩地区部署的忠平 1 水平井和李 86 直井获得无阻流量分别为 $26.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $15.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流；在北段棋盘井地区部署的棋探 10 井获得无阻流量为 $10.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流，实现了乌拉力克组深层页岩气勘探突破，落实有利含气面积 5 000 km^2 。目前研究结果表明，乌拉力克组海相深层页岩气具有“丰度低、埋深大、常压”的特征，与四川盆地龙马溪组页岩相比，乌拉力克组页岩含气量略低^[33]，下一步加强提产攻关和“甜点区”优选评价，有望形成新的页岩气勘探新领域。

3 深层、超深层油气资源潜力

截至 2022 年底，中国石油深层、超深层探明石油地质储量 $45 \times 10^8 \text{ t}$ ，探明天然气地质资源量 $5.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，探明率分别为 35%、7%，总体探明程度低，是规模油气发现的重大现实领域。

根据目前勘探进展，结合地质条件、资源潜力和资料现状，梳理出海相碳酸盐岩、碎屑岩及复杂岩性一地层、前陆冲断带、深层页岩气 4 大领域 40 个区带是未来勘探的重点（表 2）。其中，现实增储领域（集中勘探领域）19 个，规模接替领域（甩开预探领域）12 个，战略准备领域（风险勘探及研究准备领域）9 个，合计区带面积 $40.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，石油地质资源量 $39.4 \times 10^8 \text{ t}$ ，天然气地质资源量 $39.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

采用中国石油资源规划信息平台 UPLAN 中的区带排队优选模块对 40 个区带进行优选排队，区带评价考虑地质风险性、吸引力、经济性 3 个维度，取值从 0 ~ 1，值越大权重越大。其中，风险性表示区带的成藏风险，风险性越大表明含油气概率越低，包含烃源岩、储层、成藏有效性 3 大类具有一票否决权的参数，其中一项独立参数为 0，含油气概率就为 0，

对应的风险性就为 1，不参与评分排队。吸引力包含资源量，储量规模 2 类参数，反映资源规模与战略价值。经济性包含油气藏埋深、千米日产量、预期油气发现成本 3 项参数，表示区带勘探的经济价值。

评价结果表明（图 3），川中古隆起北斜坡（序号 1，排名 1）、川北地区茅口组—吴家坪组台缘带（序号 2，排名 3）、川南地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气（序号 36，排名 9）、川东—蜀南地区向斜区（序号 3，排名 4），塔里木盆地富满西低梁断裂带（序号 8，排名 5）、库车山前带（序号 30，排名 2）、轮南寒武系断控型台缘带（序号 9，排名 8）、古城奥陶系断控型台缘带（序号 10，排名 10），准噶尔盆地腹部岩性一地层（序号 24，排名 15）等排名靠前的重点领域风险普遍小于 0.5，吸引力大于 0.5、经济性好（气泡越大，经济性越好），是集中勘探重点领域；四川盆地川北裂陷区礁滩体（序号 4、排名 7），塔里木盆地北部山前带逆冲构造带（序号 31、排名 13）、秋里塔格逆冲构造带（序号 32、排名 17），准噶尔盆地淮南缘下组合深层大构造（序号 35、排名 6）等领域风险度适中（0.5 ~ 0.7），吸引力较大（0.4 ~ 0.7）、经济性较好，是甩开预探和规模突破重点领域，其他领域风险性普遍超过 0.6，吸引力低于 0.5，经济性较差，是风险勘探及研究准备领域。

4 油气勘探启示

中国石油深层、超深层地层时代普遍较老、构造演化复杂，与相对成熟且处于世界领先地位的陆相中层、浅层油气勘探相比，深层、超深层油气勘探尚处于早期阶段，勘探风险大、探索性强。笔者从管理机制、理论认识、工程技术等方面总结勘探突破启示，以期对中国深层、超深层油气勘探提供一定的指导和借鉴意义。

4.1 整合优势资源攻关研究，公司内外一体化合力创新是深层高质量勘探的有力保障

油气勘探是一项综合性极强的复杂系统工程，每一项勘探突破发现的取得，都离不开油气地质、地球物理、地球化学、钻完井工程等多学科联合攻关研究和多部门通力组织配合，勘探管理部门居中协调，通过不同学科、不同专业的有机结合与优势互补，可以全面、准确地获取地下地质信息，降低勘探风险，提高勘探成功率。“十三五”以来，中国石油勘探系统坚持高质量可持续发展理念，发挥公司整体优势，

表2 中国石油深层、超深层重点领域区带情况统计表

区带 序号	领域	盆地	有利区带	区带面积 / 10 ⁴ km ²	区带剩余资源量估算		领域类型	区带 排名
					油 /10 ⁸ t	气 /10 ¹² m ³		
1			川中古隆起北斜坡	0.8		2.5	现实	1
2			川北茅口组—吴家坪组台缘带	0.2		2.0	现实	3
3			川东—蜀南向斜区	2.2		0.5	现实	4
4		四川	川北裂陷区礁滩体	0.1		0.2	现实	7
5			扬子西北缘灯影组台缘	0.3		0.8	准备	30
6			川中古隆起南坡	0.3		0.8	准备	32
7			资阳—泸州裂陷内古残丘	0.4		0.3	准备	37
8			富满满西低梁断裂带	0.7	5.2		现实	5
9	海相碳 酸盐岩		轮南寒武系断控型台缘带	0.3		0.6	现实	8
10			古城奥陶系断控型台缘带	0.1		0.3	现实	10
11		塔里木	温宿周缘寒武系斜坡区	0.5		0.4	现实	16
12			塔北震旦系	1.4		1.1	准备	18
13			塔北—塔中蓬莱坝组	2.6	3.5		现实	19
14			塔中—古城寒武系白云岩	1.3		1.4	接替	23
15			麦盖提上斜坡寒武系	3.0		1.2	准备	39
16			东部奥陶系盐下深层	1.4		0.7	接替	11
17		鄂尔多斯	东部奥陶系中上组合	2.4		2.2	现实	12
18			西南缘奥陶系断控型礁滩	0.1		0.2	接替	33
19			川西南火山岩	1.5		0.9	接替	38
20		四川	川西坳陷带	1.3		0.4	接替	22
21		塔里木	塔西南山前深层	1.4	1.1	0.9	接替	31
22	碎屑岩 及复杂 岩性— 地层		冷湖—鄂博梁构造带	0.8		0.5	准备	28
23		柴达木	环扎哈泉新近系	0.1	2.5		接替	21
24		准噶尔	腹部岩性—地层	3.4	9.2		现实	15
25		松辽	古龙、长岭等断陷	0.5		1.2	接替	24
26			歧口凹陷滨海斜坡	0.1	6.5		现实	29
27		渤海湾	南堡凹陷南斜坡	0.1	3.1		现实	27
28			饶阳凹陷洼槽区	0.1	1.1		现实	14
29		四川	川西北—川北深层隐伏构造	1.5		0.5	准备	25
30			库车山前带	1.1	7.2	2.8	现实	2
31	前陆冲 断带		北部山前带逆冲构造带	0.3		0.3	现实	13
32		塔里木	秋里塔格逆冲构造带	1.0		0.5	现实	17
33			塔西南(柯东、喀什、齐姆根)	1.5		0.3	准备	26
34		柴达木	阿尔金山前、祁连山前	0.2		0.1	接替	34
35		准噶尔	淮南缘下组合深层大构造	1.3		2.1	现实	6
36			川南五峰组—龙马溪组	0.7		8.7	现实	9
37	深层页 岩气		德阳安岳裂陷槽箬竹寺组	1.5		2.1	接替	20
38		四川	川北吴家坪组—大隆组	0.3		1.2	接替	36
39			蜀南龙潭组	2.0		0.8	准备	40
40		鄂尔多斯	鄂尔多斯乌拉力克组	1.5		1.1	接替	35
合计				40.3	39.4	39.6		

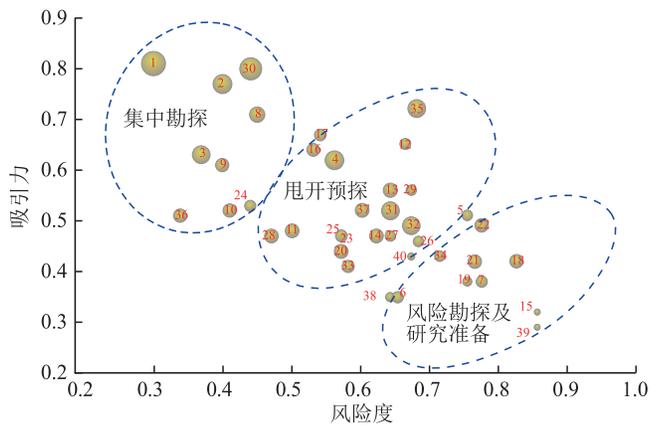


图 3 深层、超深层重点领域三维度综合评价图

注：图中红色序号与表 2 中区带序号一一对应。

整合国家、公司各级项目资源和内外多方研究力量，统一组织，优化资源配置，从人才、技术、资金等各个方面形成整体协同高质量发展合力，带动理论技术、人才队伍、物质装备升级和转型发展，为油气勘探高质量发展提供了强有力的支撑保障。

4.2 理论创新引领深度拓展，基础地质和勘探思路革新是突破传统的内在动力

深层、超深层领域在烃源岩生烃、成储、成藏等方面都与中、浅层显著不同，要不断取得突破发现，实现勘探可持续发展，就必须不断解放思想、突破传统，持续强化基础地质和综合地质革新，创新理论认识。深层、超深层成烃机理及演化研究明确深层、超深层油气源充足，且具备烃类稳定保存条件，具有形成规模油气藏的物质基础。成储机理及演化研究揭示深层、超深层不仅发育优质碳酸盐岩储层，在整体低渗一致密背景下发育相对高孔—高渗的碎屑岩储层，为规模油气聚集提供了充足的储集空间^[4]。这些油气地质及成藏研究新认识推动超深层领域持续拓展，引领油气勘探不断取得突破发现。

4.3 技术进步支撑勘探突破，地震看得清和探井打得成是深层勘探的技术保障

理论认识创新引领勘探向深层、超深度拓展，而实现深层、超深层勘探突破和规模增储，工程技术进步则是必不可少的手段。近年来，针对中国陆上深层油气复杂的工程地质环境，发展形成了深层复杂构造地震成像与储层预测、深层钻井提速增效工艺、深层高温高压测井评价、深层储层体积改造 4 大配套技术系列，支撑深层、超深层油气勘探开发快速发展^[3]。

准噶尔盆地南缘形成复杂山前带高密度地震采

集技术，通过井震联合采集，实现超深层目标地震成像从无到有，从有到好，从好到准，推动南缘下组合油气勘探取得重大突破^[35]。塔里木盆地富满地区形成超深层走滑断裂带碳酸盐岩高密度三维地震采集处理、超深层碳酸盐岩差异布井、深层碳酸盐岩钻井与酸压改造等勘探配套技术，支撑塔北超深层复杂碳酸盐岩油气藏不断取得突破发现^[19]。塔里木盆地库车坳陷山前带、川渝气区不断完善深井超深井优快钻完井配套技术，复杂事故不断下降，钻井周期大幅缩短，有效地支撑了气规模增储和快速上产^[36]。

5 结论与建议

1) 中国油气行业将进入全面高质量发展新时期，“油稳气增”的主基调下，深层、超深层领域油气领域是未来勘探重点，值得持续加大研究攻关和探索力度，建议分层次、突出重点部署，积极寻找规模新发现和大突破。

2) 根据目前取得的勘探成果，深层、超深层领域可进一步细分为海相碳酸盐岩、碎屑岩及复杂岩性—地层、前陆冲断带、深层页岩气等 4 大领域，在中国陆上各大盆地均有分布，初步梳理出 40 个重点区带，石油地质资源量 39.4×10^8 t，天然气地质资源量 39.6×10^{12} m³，勘探潜力巨大。

3) 深层、超深层是规模油气发现的重大现实领域，保持战略定力，持续加强深层探索和研究力度、不断创新理论认识、突破技术瓶颈，是加快深层油气规模勘探开发的重要举措。

参 考 文 献

- [1] 王宇, 苏劲, 王凯, 等. 全球深层油气分布特征及聚集规律[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 526-534.
WANG Yu, SU Jin, WANG Kai, et al. Distribution and accumulation of global deep oil and gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 526-534.
- [2] 徐春春, 邹伟宏, 杨跃明, 等. 中国陆上深层油气资源勘探开发现状及展望[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1139-1153.
XU Chunchun, ZOU Weihong, YANG Yueming, et al. Status and prospects of exploration and exploitation of the deep oil & gas resources onshore China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8): 1139-1153.
- [3] 姚根顺, 伍贤柱, 孙赞东, 等. 中国陆上深层油气勘探开发关键技术现状及展望[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1154-1164.
YAO Genshun, WU Xianzhu, SUN Zandong, et al. Status and prospects of exploration and exploitation key technologies of

- the deep oil & gas resources in onshore China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(8): 1154-1164.
- [4] 李剑, 余源琦, 高阳, 等. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力 [J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(4): 403-417.
LI Jian, SHE Yuanqi, GAO Yang, et al. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4): 403-417.
- [5] 何海清, 范土芝, 郭绪杰, 等. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略 [J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(1): 17-30.
HE Haiqing, FAN Tuzhi, GUO Xujie, et al. Major achievements in oil and gas exploration of PetroChina during the 13th Five-Year Plan period and its development strategy for the 14th Five-Year Plan[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(1): 17-30.
- [6] 李德生, 李伯华. “双碳”背景下石油地质学的理论创新与迈向能源发展多元化新时代 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(6): 1-9.
LI Desheng, LI Bohua. Towards a new era of diversified energy development: Innovation in theoretical petroleum geology to meet "dual carbon target"[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 1-9.
- [7] 赵文智, 梁坤, 王坤, 等. 油气安全战略与“双碳”战略: 关系与路径 [J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(1): 1-10.
ZHAO Wenzhi, LIANG Kun, WANG Kun, et al. Hydrocarbon security strategy and carbon peak and carbon neutral strategy: Relationship and path[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(1): 1-10.
- [8] 马永生, 蔡勋育, 罗大清, 等. “双碳”目标下我国油气产业发展的思考 [J]. *地球科学*, 2022, 47(10): 3501-3510.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, LUO Daqing, et al. Thoughts on development of China's oil and gas industry under "dual carbon" goals[J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3501-3510.
- [9] TISSOT B P, WELTE D H. *Petroleum formation and occurrence: A new approach to oil and gas exploration*[M]. Berlin: Springer, 1978: 185-188.
- [10] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展 [J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1156-1166.
ZHANG Guangya, MA Feng, LIANG Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1156-1166.
- [11] 韩剑发, 王彭, 朱光有, 等. 塔里木盆地超深层千吨井油气地质与高效区分布规律 [J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(5): 735-748.
HAN Jianfa, WANG Peng, ZHU Guangyou, et al. Petroleum geology and distribution law of high efficiency areas in ultra-deep kiloton wells in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(5): 735-748.
- [12] 杨雨, 姜鹏飞, 张本健, 等. 龙门山山前复杂构造带双鱼石构造栖霞组超深层整装大气田的形成 [J]. *天然气工业*, 2022, 42(3): 1-11.
YANG Yu, JIANG Pengfei, ZHANG Benjian, et al. Formation of ultra-deep integrated giant gas field in Qixia Formation of Shuangyushi structure in the foothill complex structural belt of Longmen Mountain[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(3): 1-11.
- [13] 魏国齐, 王俊鹏, 曾联波, 等. 克拉苏构造带盐下超深层储层的构造改造作用与油气勘探新发现 [J]. *天然气工业*, 2020, 40(1): 20-30.
WEI Guoqi, WANG Junpeng, ZENG Lianbo, et al. Structural reworking effects and new exploration discoveries of subsalt ultra-deep reservoirs in the Kelasu tectonic zone[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(1): 20-30.
- [14] 高崇龙, 王剑, 靳军, 等. 前陆冲断带深层储集层非均质性及油气差异聚集模式——以准噶尔盆地南缘西段白垩系清水河组碎屑岩储集层为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(2): 322-332.
GAO Chonglong, WANG Jian, JIN Jun, et al. Heterogeneity and differential hydrocarbon accumulation model of deep reservoirs in foreland thrust belts: A case study of deep Cretaceous Qingshuihe Formation clastic reservoirs in southern Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(2): 322-332.
- [15] 张锐锋, 何海清, 朱庆忠, 等. 河套盆地临河坳陷石油地质特征与油气富集规律 [J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 695-705.
ZHANG Ruifeng, HE Haiqing, ZHU Qingzhong, et al. Petroleum geological features and hydrocarbon enrichment of Linhe Depression in Hetao Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 695-705.
- [16] 邹才能, 赵群, 王红岩, 等. 中国海相页岩气主要特征及勘探开发主体理论与技术 [J]. *天然气工业*, 2022, 42(8): 1-13.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, WANG Hongyan, et al. The main characteristics of marine shale gas and the theory & technology of exploration and development in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(8): 1-13.
- [17] 赵文智, 胡素云, 刘伟, 等. 再论中国陆上深层海相碳酸盐岩油气地质特征与勘探前景 [J]. *天然气工业*, 2014, 34(4): 1-9.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, LIU Wei, et al. Petroleum geological features and exploration prospect in deep marine carbonate strata onshore China: A further discussion[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(4): 1-9.
- [18] 马永生, 何登发, 蔡勋育, 等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题 [J]. *岩石学报*, 2017, 33(4): 1007-1020.
MA Yongsheng, HE Dengfa, CAI Xunyu, et al. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4): 1007-1020.
- [19] 王清华, 杨海军, 张银涛, 等. 塔里木盆地富满油田富东 1 井奥陶系重大发现及意义 [J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(1): 47-58.
WANG Qinghua, YANG Haijun, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(1): 47-58.
- [20] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 268-277.
DU Jinhu, ZOU Caineng, XU Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan

- paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 268-277.
- [21] 李剑, 杨春龙, 谢武仁, 等. 四川盆地安岳气田震旦系台缘带和台内地区天然气成藏差异性及其勘探领域[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 34-45.
LI Jian, YANG Chunlong, XIE Wuren, et al. Differences of natural gas accumulation and play fairways in the marginal zone and interior of Sinian platform in Anyue Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 34-45.
- [22] 杨雨, 文龙, 宋泽章, 等. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J]. *石油学报*, 2022, 43(10): 1351-1368.
YANG Yu, WEN Long, SONG Zezhang, et al. Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi-layer system of Penglai gas area in the north of central Sichuan paleo-uplift[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(10): 1351-1368.
- [23] 唐勇, 雷德文, 曹剑, 等. 准噶尔盆地二叠系全油气系统与源内天然气勘探新领域[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(6): 654-662.
TANG Yong, LEI Dewen, CAO Jian, et al. Total petroleum system and inner-source natural gas exploration in Permian strata of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 654-662.
- [24] 张志杰, 周川闽, 袁选俊, 等. 准噶尔盆地二叠系源—汇系统与古地理重建[J]. *地质学报*, 2023, 97(9): 3006-3023.
ZHANG Zhijie, ZHOU Chuanmin, YUAN Xuanjun, et al. Source-to-sink system and palaeogeographic reconstruction of Permian in the Junggar Basin, northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(9): 3006-3023.
- [25] 何海清, 支东明, 唐勇, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷康探1井重大突破及意义[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(2): 1-11.
HE Haiqing, ZHI Dongming, TANG Yong, et al. A great discovery of Well Kangtan 1 in the Fukang sag in the Junggar Basin and its significance[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(2): 1-11.
- [26] 张锐锋, 何海清, 陈树光, 等. 河套盆地临河坳陷石油地质新认识与重大发现[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(6): 1-12.
ZHANG Ruifeng, HE Haiqing, CHEN Shuguang, et al. New understandings of petroleum geology and great discovery in the Linhe Depression, Hetao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(6): 1-12.
- [27] 马新华, 杨雨, 张健, 等. 四川盆地二叠系火山碎屑岩气藏勘探重大发现及其启示[J]. *天然气工业*, 2019, 39(2): 1-8.
MA Xinhua, YANG Yu, ZHANG Jian, et al. A major discovery in Permian volcanic rock gas reservoir exploration in the Sichuan Basin and its implications[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2): 1-8.
- [28] 蔚远江, 杨涛, 郭彬程, 等. 中国前陆冲断带油气勘探、理论与技术主要进展和展望[J]. *地质学报*, 2019, 93(3): 545-564.
YU Yuanjiang, YANG Tao, GUO Bincheng, et al. Major advances and outlook for oil and gas exploration, theory and technology of foreland thrust belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(3): 545-564.
- [29] 杨学文, 王清华, 李勇, 等. 库车前陆冲断带博孜一大北万亿方大气区的形成机制[J]. *地学前缘*, 2022, 29(6): 175-187.
YANG Xuwen, WANG Qinghua, LI Yong, et al. Formation mechanism of the Bozi-Dabei trillion cubic natural gas field, Kuqa foreland thrust belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 175-187.
- [30] 李国欣, 田军, 段晓文, 等. 大幅提高超深致密砂岩气藏采收率对策与实践——以塔里木盆地克拉苏气田为例[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 93-101.
LI Guoxin, TIAN Jun, DUAN Xiaowen, et al. Measures and practice for improving the recovery factor of ultradeep tight sandstone gas reservoirs: A case study of Kelasu Gas Field, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 93-101.
- [31] 杜金虎, 支东明, 李建忠, 等. 准噶尔盆地南缘高探1井重大发现及下组合勘探前景展望[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(2): 205-215.
DU Jinhu, ZHI Dongming, LI Jianzhong, et al. Major breakthrough of Well Gaotan 1 and exploration prospects of lower assemblage in southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(2): 205-215.
- [32] 张金川, 陶佳, 李振, 等. 中国深层页岩气资源前景和勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2021, 41(1): 15-28.
ZHANG Jinchuan, TAO Jia, LI Zhen, et al. Prospect of deep shale gas resources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 15-28.
- [33] 席胜利, 刘新社, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉力克组页岩油气富集条件及勘探方向[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 12-22.
XI Shengli, LIU Xinshe, HUANG Zhengliang, et al. Enrichment characteristics and exploration direction of shale oil and gas in Wulalike Formation of Middle Ordovician in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 12-22.
- [34] 于洲, 黄正良, 李维岭, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉力克组海相页岩岩相类型及优质储层发育特征[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 23-33.
YU Zhou, HUANG Zhengliang, LI Weiling, et al. Lithofacies types and high-quality reservoir development characteristics of marine shale in the Middle Ordovician Wulalike Formation, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 23-33.
- [35] 李献民, 徐文瑞, 杨万祥, 等. 准噶尔盆地南缘山前带地震采集技术及成效[J]. *新疆石油天然气*, 2021, 17(1): 6-14.
LI Xianmin, XU Wenrui, YANG Wanxiang, et al. The technology and development of seismic acquisition in southern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2021, 17(1): 6-14.
- [36] 汪海阁, 葛云华, 石林. 深井超深井钻完井技术现状、挑战和“十三五”发展方向[J]. *天然气工业*, 2017, 37(4): 1-8.
WANG Haige, GE Yunhua, SHI Lin. Technologies in deep and ultra-deep well drilling: Present status, challenges and future trend in the 13th Five-Year Plan period (2016-2020)[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(4): 1-8.

(修改回稿日期 2023-12-04 编辑 陈古明)



本文互动