

海相深层油气富集机理与 关键工程技术基础研究进展

马永生^{1,2}, 黎茂稳^{1,3}, 蔡勋育², 徐旭辉⁴, 胡东风⁵, 曲寿利³,
李根生⁶, 何登发⁷, 肖贤明⁷, 曾义金⁸, 饶莹⁶, 马晓潇^{1,3}

- (1. 马永生科学家工作室, 北京 100083;
2. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728;
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206;
4. 中国石化石油物探技术研究院, 南京 211103;
5. 中国石化勘探分公司, 成都 610000;
6. 中国石油大学(北京), 北京 100100;
7. 中国地质大学(北京), 北京 100084;
8. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:针对塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究的需求, 国家自然科学基金委员会于 2020 年初启动了企业创新发展联合基金集成项目。该文简要回顾了项目在古克拉通盆地原型—改造作用分析、海相深层碳酸盐岩油气和深层页岩气富集与流动机理、深层复杂构造成像与多类型储层预测原理、高温高压深层钻井工程与控制原理等方面取得的初步研究进展, 并介绍了在塔里木和四川盆地的部分初步应用和推广情况。

关键词:海相碳酸盐岩; 海相深层油气成藏; 深层页岩气; 深层复杂构造成像; 深层复杂储集层预测; 安全钻完井

中图分类号: TE1

文献标识码: A

Advances in basic research on the mechanism of deep marine hydrocarbon enrichment and key exploitation technologies

MA Yongsheng^{1,2}, LI Maowen^{1,3}, CAI Xunyu², XU Xuhui⁴, HU Dongfeng⁵, QU Shouli³,
LI Gensheng⁶, HE Dengfa⁷, XIAO Xianming⁷, ZENG Yijin⁸, RAO Ying⁶, MA Xiaoxiao^{1,3}

- (1. Ma Yongsheng's Laboratory, Beijing 100083, China;
2. SINOPEC Company Limited, Beijing 100728, China;
3. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China;
4. SINOPEC Geophysical Research Institute, Nanjing, Jiangsu 211103, China;
5. SINOPEC Exploration Company, Chengdu, Sichuan 610000, China;
6. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 100100, China;
7. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100084, China;
8. SINOPEC Petroleum Engineering Institute, Beijing 100101, China)

Abstract: A basic research program on deep hydrocarbon resource accumulation mechanisms and key exploitation technologies was initiated by the National Natural Science Foundation of China at the beginning of 2020, to meet the theoretical and technological demands of deep hydrocarbon exploration and development in the Tarim, Sichuan and Ordos basins. This paper provided a review of the recent program progresses on (1) the reconstruction of prototypes and the transformation histories of three ancient cratons in China; (2) the petroleum accumulation and flow mechanisms in deep marine carbonate reservoirs and deep shale gas systems; (3) the geophysical theories and methods for imaging the deep structures and predicting the deep petroleum reservoirs; and (4) the new protocols

收稿日期: 2021-07-12; 修订日期: 2021-08-20。

作者简介: 马永生(1961—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 中国工程院院士, 从事石油地质研究。E-mail: mays@sinopetec.com。

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003)和中国石化科技部攻关项目(P19032)联合资助。

and downhole tools for deep well drilling and completion. Brief comments were also made on the preliminary application of the recent program results in facilitating several breakthroughs in the deep petroleum exploration of the Tarim and Sichuan basins.

Key words: marine carbonate; deep marine hydrocarbon accumulation; deep shale gas; deep complicated structure imaging; deep complicated reservoir prediction; safety drilling and completion

在国家自然科学基金委员会和中国石油化工股份有限公司的大力支持下,以中国石化石油勘探开发研究院为依托单位、产学研结合、多学科交叉融合的联合研究团队,针对海相深层油气富集机理与关键工程技术面临的基础科学问题,于 2020 年 1 月启动了国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(编号 U19B6003)。本文将对该项目在前期工作的基础上取得的初步研究进展和应用情况做简要介绍,期望对国内外从事海相深层油气勘探开发的同行有一定的借鉴意义。

1 海相深层油气勘探开发面临的问题

塔里木、四川和鄂尔多斯等三大克拉通盆地海相深层油气是实现中国能源接替的现实领域^[1-13]。该领域在国际上受到普遍关注,但需要持续攻关解决诸多基础地质科学和工程技术问题^[14-15]:

一是在海相深层油气富集与开采机理方面,需要针对中国三大克拉通盆地构造演化的差异性、古老成烃有机质生源和白云岩—膏盐岩沉积的特殊性以及多旋回盆地油气成藏的多期性,从盆地、油气藏和纳微米等多个尺度,加强海相深层碳酸盐岩和海相深层页岩气形成机理与分布规律的研究;

二是在深层复杂介质波场理论与多类型目标判识方法方面,针对深层目标发现与评价对钻前预测的需求,以提高地球物理技术的精度为目标,深化深层高温高压储层的岩石物理性质规律和变化特征认识,揭示深层多类型复杂储层测井识别的机理,以期有效解决深层地震资料低信噪比和低分辨率、成像不准确、地震资料不保幅、以及复杂油藏环境引起的综合评价问题;

三是在高温高压岩体—井筒变形机理及安全高效钻井控制方法方面,需要针对深层高温、高压、高应力、强非均质性的特点,通过机理研究和技术攻关,解决钻井工程和控制技术面临的钻井速度慢、井筒完整性失效高、压裂效率低等突出问题。

2 初步研究进展

2.1 克拉通盆地建造—改造与控油气作用

研究项目在盆地尺度上加强了多期叠加改造

盆地充填过程及构造—沉积分异作用、多期构造活动及其对多类型变形样式形成的控制机理研究。

通过对三大克拉通盆地前期野外和岩心观测结果梳理,开展了古生界地层对比、井—震标定和层位追踪,识别出主要的古生界地层层序界面。通过整合近期采集的重磁电、深反射地震和深井等油气勘探资料,结合区域地质资料,分析了三大克拉通盆地及周缘山前带的地质结构与构造演化^[16-17]。将盆地与周缘造山带分析相结合,通过沉积充填过程、古环境、古地理、古气候系统的对比分析,重建了三大克拉通盆地元古代、寒武纪、奥陶纪、志留纪的构造—古地理环境,复原了不同地质时期的盆地原型,探讨了原型盆地的演化过程。开展了塔里木克拉通奥陶系地层格架和沉积体系的详细研究,揭示了主要层序发育期区域构造作用、古地貌形态、海平面变化、物源体系等对沉积体系发育分布和古地理的控制作用。重新定位了三大克拉通中—新元古代超大陆聚、散背景下原型盆地古位置,在汇编中—新元古代三大克拉通原型盆地分布图件的基础上,分析了控制三大克拉通生成物质基础的共性及差异性。

分别针对四川和塔里木盆地震旦—寒武系黑色页岩层系开展了野外露头剖面和钻井岩心观测、高精度磁化率和元素地球化学分析^[18-19]。通过典型剖面天文周期旋回分析,明确了四川盆地上震旦统陡山沱组和下寒武统筇竹寺组的沉积持续时间和沉积速率变化特征。在沉积非均质性和高频地层层序划分的基础上,探讨了塔里木盆地震旦纪—寒武纪转折期古海洋的碳、硫循环系统与成因机制,揭示了“周期性缺氧+热液+洋流”共同作用对寒武系玉尔吐斯组烃源岩空间展布和南北双陆棚沉积模式的控制作用。在塔里木盆地新元古界两套潜在烃源岩层系岩相特征及发育情况分析的基础上,初步明确南华系贝义西组细粒沉积岩主要形成于潮坪环境,而震旦系扎摩克提组为一套上覆于盖帽白云岩之上的深水斜坡相沉积。

三大克拉通盆地中新元古代—早古生代经历了被动陆缘伸展期的“台地—斜坡—盆地”和克拉通汇聚期的“隆—拗”等 2 个分异阶段,而沉积分

异作用受控于克拉通内裂陷、克拉通边缘裂陷、克拉通内缓坡与克拉通内坳陷等四类构造背景,在宏观尺度上初步明确了三大盆地构造—沉积分异主要类型^[20-23]。通过对四川盆地震旦纪克拉通内裂陷构造演化过程及其对优质储集体发育的控制作用分析,明确绵阳—长宁古裂陷槽为南华纪以来继承性发育的陆内裂陷,经历了幕式拉张和阶段性侵蚀2个发育阶段,提出了震旦系优质储层“一高三早”成因模式,即受构造分异的控制,优质储层沿裂陷槽边缘呈带状分布,其发育与保持受高能相带、早期溶蚀、早期白云岩化和早期油气充注的控制。同时,通过塔里木盆地基底结构和新元古代盆地充填过程分析,明确了盆地的克拉通断块基底特征,揭示了基底深大断裂对新元古代裂谷和中浅层磁性异常体分布的重要控制作用,并在此基础上划分了大陆裂解背景下新元古代盆地的3个演化阶段(南华纪裂谷、早震旦世裂—拗转换和晚震旦世拗陷),其中晚震旦世拗陷阶段是台盆区储集体的主要发育期。

克拉通盆地内部稳定构造带走滑断裂体系是三大克拉通盆地海相深层近期油气勘探突破的重要领域。通过对塔里木盆地顺北及邻区走滑断裂体系的解剖,初步揭示了顺北及邻区走滑断裂体系展布、构造活动期次的差异性及其对油气富集的控制作用^[24]。通过400余组断裂剖面解析和2 000 km²地震资料解释,发现顺北走滑断裂体系呈“带状”发育,而顺南和塔北走滑断裂体系呈“网状”分布。托普39断裂体系经历了加里东中期—海西早期、印支期和喜马拉雅期3个活动阶段,而顺北1号和顺北5号断裂带的活动期分别在加里东中期Ⅲ幕、加里东晚期和海西中晚期。这些断裂带的对比研究表明,主活动期与油气成藏期匹配的主干断裂带是油气富集的有利部位。同时,上覆雁列正断层活动越强,对应的深部平移走滑段和叠接拉分段对储层改造程度越高,油气在相应部位就越富集。在主干断裂研究方面,针对顺北5号断裂南段提出的“中部主走滑断面+两侧地堑断面”复合构造样式得到了实钻证实,并且在中部主走滑断面获得高产油气突破;明确了顺北4号断裂具有“纵向分层、平面分段、垂向多期”空间结构与发育演化特征;建立了顺北11号断裂碳酸盐岩目的层“北部压隆段、南部拉分段”地质结构。

克拉通盆地边缘逆冲断裂带是海相深层油气勘探突破的另一个重要领域。在构造挤压作用下,盆缘造山楔往往沿多层次软弱层向盆内发生阶梯

式滑脱^[25-26]。在复合山前冲断带变形机制研究的基础上,建立了“以主滑脱层深度为主、兼顾变形样式”的冲断结构分带分类模式,并提出了厚皮带、过渡带(过渡Ⅰ带、过渡Ⅱ带)和薄皮带的划分依据。龙门山前过渡带构造应力分布模式研究表明,龙门山前1号断裂带是油气运移的主要通道,而断裂带根部下盘古生界与断裂前缘末端之间的应力差是油气运移的主要动力。此外,项目团队还针对米仓山前构造带开展了构造解析工作,初步建立了“早期多层滑脱变形、晚期基底隆升冲断掀斜改造”两期变形模式,揭示了米仓山前和龙门山前变形结构特征的差异性。

2.2 海相深层油气富集与开采机理研究

海相深层油气是中浅层烃源演化和深部地质过程综合作用的产物。由于深部地层经历了多期构造演化和烃类生排运聚过程,深部烃源判识和有效性评价面临着一系列挑战。初步模拟实验和物质平衡计算结果表明^[27],热裂解对干酪根碳同位素分馏作用的影响有限,海相干酪根生成天然气的成熟度(R_o)上限大致为3.0%。热演化进程中烃类的聚集是一个不断向零自由能趋势发展的过程,受动力学控制,终极产物包括甲烷和石墨碳(焦沥青)。不同类型和不同热演化程度生烃母质(Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型干酪根)物质平衡理论计算结果显示,干酪根碳同位素分馏主要发生在热降解生排烃阶段($\delta^{13}C_{\text{干酪根}}$ 变化幅度小于1‰),而原油裂解成气,同位素分馏可达到1.4‰。这一认识得到了美国鹰滩页岩自然演化系列观测结果的证实,从未成熟到过成熟阶段(R_o 从0.4%~2.75%)的富有机质页岩干酪根碳同位素增加幅度不超过2‰,且对应的饱和烃和芳烃的 $\delta^{13}C$ 值分别比干酪根轻1.5‰和2.5‰。选择不同热演化程度的典型烃源岩和原油开展热演化模拟实验,发现尽管在不同阶段形成的天然气碳同位素有明显分馏现象,实验得到的干酪根同位素值从中低成熟到高过成熟阶段并没有明显的分馏效应。因此,高过成熟烃源岩稳定碳同位素和相对组成可以提供页岩层系形成的古环境信息。中国南方震旦—寒武纪过渡期有机碳和无机碳同位素负异常,反映了古海洋碳循环的突变;碳酸盐台地到大陆斜坡—盆地相干酪根 $\delta^{13}C$ 值变低,与热液硅质岩相关的黑色页岩有机质往往具有极低的 $\delta^{13}C$ 值。塔里木盆地台盆区原油碳氢同位素和分子标志物多种分布模式,揭示了复杂的烃类生源和成藏改造效应^[28-29]。

深埋过程中多类型碳酸盐岩储集体形成发育与断裂—流体耦合改造作用机理研究取得重要进

展^[30-32]。顺北北部断裂带检测出低温—中低温富 CO₂ 流体与富 H₂S 流体存在的证据,黄铁矿硫同位素组成显示出微生物硫酸盐还原作用(BSR)与高温热化学硫酸盐还原作用(TSR)两种类型,它们的成因可能与岩溶流体深循环和中基性火山活动相关。在顺北南部断裂带发现多种类型深部来源的溶蚀性富硅富氟热液流体,导致在古城 18、顺北 53x 与顺南 4 等井区所处的断裂带发育规模性热液成因储层。开放体系、封闭体系和封闭—半开放—封闭体系碳酸盐岩溶蚀—沉淀热力学计算结果表明,近地表开放体系是早期孔隙形成的重要环境,而封闭体系提供了孔隙后期有效保存的重要条件。微生物岩是海相深层重要烃类储集类型之一,近年来受到了广泛关注。项目组围绕四川盆地灯影组微生物岩开展了初步工作,将灯影组划分为 4 个三级层序(SQ1—SQ4)和 12 个四级层序(sq1—sq12),并通过实际样品解剖结果和模拟实验结果对比,提出了其中存在原始微生物介导的纳米级原生白云石球粒的证据。

针对深层油气赋存相态和转化机理研究,在详细的文献调研基础上,初步建立了制备原油熔融毛细管样品的实验方法,为下一步开展原油可视化温压演化研究打下了基础。同时,系统梳理了塔里木盆地钻井系统稳态测温、试油温度、岩石热导率和生热率数据。研究表明,塔里木库车北缘和塔东南温度最高,塔西南和阿瓦提地区最低,顺托果勒地区总体上由顺北至顺南逐渐升高。顺托果勒地区油气藏流体相态复杂多变,原油在具有大体相似的地球化学特征背景上,不同断裂带原油在气油比和分子组成上存在着细微差异,指示原始烃源岩沉积有机相、烃源灶和次生改造历史的差异性^[33-35]。在四川盆地,初步梳理了重点研究区现今和古地温分布基础数据,发现川西南和川中地区地温梯度较高,而川西和川东北地区地温梯度较低,为后续油气赋存相态和转化机理研究奠定了基础。

深层碳酸盐岩油气成藏动力机制与碎屑岩体系存在显著差异。潜在发育区预测方法是油气成藏研究的难点之一。顺北地区发现的油气以轻质油—挥发油为主,油气藏均未饱和,平面上呈现出“北重南轻”、轻质油气藏—挥发油气藏依次分布的特征,走滑断裂几何学分段性控制了储集体的独立性与油藏的分割性。针对川中地区寒武系龙王庙组断层—储层复合输导体系,分别定量确定了断层垂向输导体系和储层横向输导体系的输导效率,并在此基础上完成了断层—储层复合输导体系输

导效率的定量评价工作。初步确定四川盆地海相地层孔隙型储集体浮力成藏下限对应的孔隙度为 5%、渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、镜质体反射率 R_o 为 1.3%。针对裂缝型碳酸盐岩储层相应的研究工作尚处于早期探索阶段。现有证据表明,四川盆地二叠系长兴组—三叠系飞仙关组天然气存在原油裂解气和烃源岩裂解气两种成因类型,主要来源为上二叠统龙潭组/吴家坪组烃源岩。现今工作的重点是建立有效烃源发育模式、有机相展布及其与天然气成藏系统非均质性的成因联系^[36-38]。

海相深层碳酸盐岩油气开采机理研究,聚焦在四川盆地以普光 and 元坝为代表的酸性气藏和塔里木盆地以顺北为代表的断缝型碳酸盐岩油藏。针对酸性气藏开发,液态硫和固体硫的析出是目前普光和元坝等气藏开发中面临的重要技术挑战。项目开展过程中,测定了元坝气藏硫溶解度图,明确了元坝气田液态硫析出条件为 150 ℃ 和 24.8 MPa。测定了毛坝 502 井单质硫析出曲线,绘制了气体相图,并确定大湾地区地层固硫析出条件为 100 ℃ 和 19.2 MPa。完成了水—液态硫和水—固态硫等两相流动规律实验设计方案。采用溶质溶解法获得的实验结果表明,随着含硫饱和度的增加,岩心的分选系数和平均半径减少。H₂O—CO₂ 体相扩散实验结果表明,CO₂ 在地层水中的溶解度随压力升高而呈非线性增加,压力越高增幅越小,而 CO₂ 溶解度随矿化度升高呈非线性减小。利用压力—浓度监测双系统搭建了 CO₂—CH₄ 扩散系数测试实验装置,体相条件下 CO₂ 在地层水中的扩散系数呈现出先增加后降低的趋势。

针对塔里木盆地顺北深层海相碳酸盐岩油藏流动机理与开发方法研究^[39],推导了油—气—水三相平衡 Rachford—Rice 方程,提出了求解油—气—水三相平衡方程的复合求解算法。该算法稳定性好、适用性广,既可用于油—气—水三相平衡求解,又可用于多相平衡及具有相同方程形式的非线性方程组的求解。通过模拟实验,揭示了海相深层碳酸盐岩油藏单相和两相流流动规律,探索了温压变化对油水两相相对渗透率的微观制约机制。基于“离散溶洞裂缝+多重介质+EDFM”的复合介质模型,建立了复合介质流体流动—温度—应力多场耦合的数学模型,形成了流体流动—温度—应力耦合的 FEM—FVM 混合数值离散方法。探索了深层碳酸盐岩油藏人工智能开发方法,实现了对串珠储集体的三维表征。以缝洞油藏数模软件 KarstSim 为核心,在 KIModels 平台中首次实现了地

球物理模型、地质模型、油藏动态模型的全流程构建和加载,初步形成了缝洞储集体“三模合一”方法。

2.3 海相深层页岩气富集与开采机理研究

初步查明了富有机质页岩的排油效率及其影响因素,揭示了高一过成熟海相页岩中原生水赋存机理^[40-42]。低成熟湖相页岩样品的黄金管热模拟实验结果表明,页岩的排油效率主要受控于有机质类型和热成熟度,有机质类型越好(I型有机质)、成熟度越高,其生排滞油量越多,排油效率越高。而且,页岩滞留油量与生油量呈现很好的线性正相关关系。高一过成熟龙马溪组页岩的孔隙度、原生水量、原地气量和气体组分分析结果显示,高一过成熟页岩中原生水主要赋存于黏土矿物孔隙中,原生水的存在大幅度降低了页岩的吸附性能。在此基础上,探讨了有机质丰度对页岩孔隙度、孔隙结构和原地含气量的制约作用。

建立了深层页岩孔隙结构全孔径多尺度定量表征方法^[43-45]。优选 QSDFT 法模型作为处理气体吸附数据的首选模型,建立了 CO₂、N₂ 吸附和高压压汞法联合表征深层页岩孔隙结构的全孔径表征方法;相对于常规盖层微孔联合分析技术,表征出的微孔隙比原测定值高出数倍。应用该方法确定的深层页岩微孔在总孔隙中的占比超过三分之一。搭建了页岩孔隙分析的核磁共振分析平台,建立了深层页岩孔/缝一体化综合分析技术。根据获取的深层页岩 T2 截止值、表面弛豫率参数及孔隙流体束缚特征,识别出页岩孔隙中的自由流体孔隙、束缚流体孔隙和不可动流体孔隙特征,建立了深层页岩孔/缝一体化综合分析技术,准确获取深层页岩孔隙度和孔隙与微裂缝占比,有效地评估了微裂缝的储集贡献,在所分析的样品中微裂缝在总孔隙体积的占比达到 15% 左右。开发了场发射扫描电镜大面积图像拼接分析技术(MAPS),发现在分析视域达到 50 μm×50 μm 时,微观结构分析结果才具有较好的代表性。

通过对现今埋深在 6 000 m 左右的五峰组—龙马溪组岩心分析,发现了高孔和有机孔发育的超深层深水陆棚相优质页岩。普顺 1 井优质页岩厚度达 44 m,平均 TOC 和孔隙度分别为 3.66% 和 5.22%;蜂窝状有机质孔发育,孔径范围在 2~80 nm 之间,孔隙结构与 4 500 m 以浅的黑色页岩相似,具有较好的页岩气生成和储集能力。通过与北美海相页岩气对比分析,明确了深层发育“高孔”优质储层的发育与保持机理,即深水陆棚相页

岩生物成因硅质是深层页岩孔隙发育的基础,原生蛋白石随地温增高转化成高硬度石英,伴生大量粒间孔,石英及粒间孔抗压实作用强,为油气生成、有机孔的发育和保持提供了空间和保护;储层高流体压力可以减缓作用在页岩储层的有效应力,有利于深层页岩孔隙深埋和后期抬升过程中孔隙的保持;“石英抗压保孔”和“储层流体超压”的联合作用,有利于深层发育“高孔”优质储层。在此基础上,初步建立了深层优质页岩储层发育模式^[46-48]。

深层页岩气多相态多机制流动机理研究取得初步进展^[49]。综合利用室内甲烷吸附解吸特性实验和分子动力学模拟联测,获得了深层页岩在 100 MPa 和 150 °C 全温度压力域内的吸附解吸特性曲线和预测模型,分别明确了干酪根、石英和伊利石等对甲烷分子吸附、解吸的作用机制以及控制游离和吸附气相对比例的规律。根据四川盆地典型深层页岩气藏的温压条件,建立了高温高压条件下干酪根纳米孔隙中甲烷分子流动模型;根据牛顿定律和化学势理论,构建了有机质纳米孔中驱动压差数学表征模型。提出了流—覆压梯次协同恢复测定深层页岩原位应力敏感实验方法,研发了耐压 180 MPa 和耐温 200 °C 的超高压实验系统,形成的实验系统比传统方法更能真实地反映原始受力状态和衰竭开采过程。川南深层页岩原位应力敏感测试结果表明,残余渗透率在地层压力接近废弃压力(10 MPa)时,仅为初始渗透率的 10%~20%。创建了页岩数字岩心网络模型,改进格子玻尔兹曼方法,建立了刻画页岩气流动的微尺度流动 LBM 模型。针对深层页岩微纳米尺度孔隙中的多相流动,建立了孔隙结构分形模型,探究了孔隙结构与流体微观运移速率的关系。

针对深层页岩气开发动态评价与数值模拟方法研究,建立了深层页岩气流—固—热多场耦合数学模型,初步形成了两种深层页岩压裂水平井动态产能预测方法。开展高温高压岩石三轴应力实验,确定了深层页岩储层岩石力学参数,发现深层页岩的杨氏模量和泊松比高于中浅层,由此建立了深层页岩储层岩石力学本构方程。考虑页岩气藏的吸附与解吸、克努森扩散效应和热效应,初步建立了深层页岩气藏气水两相的渗流场—应力场—温度场耦合数学模型,并进行求解。考虑压裂缝网不同支撑程度,建立了页岩气变裂缝导流能力压裂水平井产能预测方法,编制了产能评价模块,实现了“近井支撑裂缝”和“远井未支撑裂缝”的定量区分。分析了不同缝网参数对产能的影响,定量评价

了永川区块 5 口井的压后缝网参数,水平井压后裂缝半缝长 30~80 m,其中支撑裂缝半长 20~40 m,占裂缝长度比例 50%~66%。支撑裂缝半长反映了有效改造范围的大小,对气井产能具有重要的影响。在这些工作的基础上,预测永川区块气井 30 年单井可采储量为 $(0.6 \sim 1.1) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。建立了页岩气压裂水平井气—水两相渗流模型,采用物质平衡方法和逐次迭代替换法,对模型进行线性化处理和迭代求解,初步形成了深层页岩气、水两相动态产能预测方法。实例计算分析了气、水两相渗流对压裂水平井产能的影响,认识到产能模型如果不考虑气、水两相渗流,就无法拟合早期流动阶段,反演得到的裂缝长度就会偏小,改造区物性偏差,预测的产能偏差较大。

2.4 海相深层复杂构造成像与储层预测方法研究

深层复杂构造与储层地震波场传播机理研究取得重要进展^[50-52]。通过 7 个不同特征的沙漠近地表 2D 模型构建和对比分析,发现顺北地区沙漠近地表的多次波及其散射噪音是该区地震资料信噪比低的主要原因,由此开发了张量属性和蚂蚁体属性相结合的断缝体刻画建模技术。通过两点与多点地质统计学的结合,开发了基于多点模式相关性的储层建模方法,充分发挥了两点地质统计学在连续型参数建模和多点地质统计学在模拟复杂地质体方面的优势。自主开发的快速地质统计学方法,在后验概率分布函数的计算过程中,避免了大型矩阵求逆或无数次的地震正演迭代过程,从而大大减少了随机反演的计算量。形成了格子玻尔兹曼波场模拟方法(LBM),推导了单、多松弛时间的稳定性条件。基于大量不同松弛参数组合波场模拟结果,借助统计分析方法,获得了多松弛时间 LBM 中松弛参数估算的稳定性条件。

针对深层复杂目标建模与成像方法研究,开展了基于波场传播过程的多次波正演技术研发,形成了多次波识别的有效方法^[53]。发展了基于波场延拓的层间多次波模拟与消除技术。面向海相深层复杂地质体,形成了浅—中—深全层系地震速度建模体系。研发了高斯束层析近地表速度建模技术,针对小尺度火成岩,实现对异常体的精细刻画;针对超深层断裂速度精细建模引入断裂属性特征,实施定量地质信息导引下的高斯束层析;针对沙漠地表强吸收衰减,通过品质因子 Q 建模技术反演得到高质量的 Q 值模型,结合粘声介质 Q-RTM 技术实现精确成像。开展了各向异性速度/参数建模方法和各向异性逆时偏移成像方法等研究,基本建立

各向异性介质的速度和参数建模和叠前偏移成像处理的技术流程,具备了实际数据处理能力。研发了支持大规模计算以满足生产需求的全波形反演技术及处理流程,并开展了针对顺北地区深层构造的全波形反演应用测试。

在深层多类型储层与流体识别机理研究方面,完成了碳酸盐岩台缘和台内礁滩相沉积模式的地质调查,完成了典型样品的基础孔渗、超声与低频变压弹性参数和电参数实验测量。基于超声波实验数据,明确了孔渗、密度分布、孔隙类型和孔隙结构特征以及孔隙度渗透率相关性,速度随有效压力变化的非线性特征。依据岩样微观结构特征和速度随有效压力的非线性变化,将孔隙体系转化为不同形状的硬孔隙(纵横比 $\alpha > 0.01$)与软孔隙(纵横比 $\alpha < 0.01$)的组合(双孔隙结构);并在此基础上,利用岩石速度—压力实验观测结果,求取介质中两类孔隙纵横比及其相对含量分布特征。在微观尺度上,研究了复杂孔隙分布特征对岩石喷射流作用的影响机理。通过岩石物理弹性参数对裂缝、非均质体及含流体性质的敏感性研究,构建了介观尺度裂缝与流体斑块影响的岩石物理理论模型,并应用于岩石裂缝中含不同流体时弹性参数的频散和衰减特性预测,以及流体/裂缝参数对 VTI 介质各向异性弹性参数频变规律预测^[54-56]。

在深层多类型储层预测与识别技术研究方面,开发了基于波动方程的宽带阻抗反演方法,提高了阻抗反演分辨率。开发的广义子波提取方法,对岩溶串珠边界和页岩薄层的分辨率提升显著,在裂缝和各向异性较强区域与裂缝密度曲线的吻合度较高。针对不同断裂宽度、垂向断距的断裂带,开展了地质模型构建和正演模拟分析;针对不同尺度的断裂,开展了属性分析和断裂增强技术测试;对不同方式构建的低频模型进行了反演测试和迭代反演初步研究。通过基于动态字典的地震数据提高分辨率方法研究,形成了原子最优中心时间、最优频率快速搜索、最优振幅与相位反演等技术,在重构信号时增加了高频原子的比例,提高了地震数据分辨率。建立了方位宽带阻抗与各向异性流体因子的关系,融合了测井、地震、地质和岩石物理信息;开展了分方位的阻抗反演敏感性分析,基于全局的共轭梯度算法获得流体因子确定性解,验证了方位各向异性流体因子反演的可行性。研发了基于 KNN 的储层分类标签扩展技术和异常样本标签自动清洗技术,为满足深度网络训练标签需求奠定了基础^[57-62]。

为了建立深层页岩气甜点识别与压裂监测方法,开展了深层页岩实验岩石物理测试分析^[63-64]。模拟了实际地层条件下测定不同页岩样品的储层物性参数、岩石力学参数和动静态弹性参数,明确参数间关系。开展了深层页岩理论岩石物理模型构建及分析,建立了基于地质条件约束的页岩各向异性岩石物理自适应模型,构建了针对深层页岩的单井破裂和坍塌压力的预测模型,实现了单井岩石力学关键参数的构建。开展了深层页岩脆性指数直接预测技术研究及应用,综合考虑岩石矿物组分和弹性参数,合理地描述了岩石的脆性随矿物、孔隙度、微观结构等的变化特征,实现了优质脆性页岩的良好表征。开展稀疏台站微地震采集和处理技术研究,建立了稀疏台站布设准则。基于稀疏站点采集端有效信号的触发机制,开发了无线通信模块,实现了监测数据至云服务器的4G有效传输,形成了针对稀疏台站微地震数据的P、S波联合事件识别和定位方法。开展了震源机制反演技术研究,在稀疏的三维观测情况下,推导了矩张量震源应力加载方程,提出了震源机制反演方法,实现了压裂破裂震源矩张量及人工裂缝走向、倾向和滑动角的反演。

2.5 高温高压油气安全高效钻完井工程基础理论与方法研究

以认识深部储层物性和压力体系为研究目标,分析了川东北等地区的海相碳酸盐岩地层地质、开发等资料,发现其层系的超压分布与储层岩性和储层类型密切相关,孔隙型储层(主要岩性为白云岩)基本不发育超压,而裂缝型储层(主要岩性为灰岩)则会发育超压和强超压。研制了一套碳酸盐岩声力学响应测试系统,并根据川东北等地区的盐岩特征,制备了一批人工岩样,开展碳酸盐岩地层声力学响应特征物理模拟实验,分析了孔隙度、围压、孔隙压力、孔隙介质等参数对岩样声力学响应特性的影响规律^[65-66]。基于非常规储层的传统孔隙压力预测模型,针对传统方法对于混合生烃作用的异常高压页岩油气储层预测精度低这一问题,对有机质处于高一过成熟阶段的页岩储层,建立了新的物理意义明确的高一过熟I型干酪根生烃增压模型。

以高温高压条件下高效破岩为研究目标,以传统振动模型为基础,建立了添加Abel阻尼器的新型钻进振荡模型,研究了冲击钻进中钻头与岩石之间的动态相互作用,发现高温地层比常规地层更适用于冲击钻井,矩形冲击载荷的钻进效果最佳。通

过物理实验和数值模拟结合,探索了轴向冲击和轴扭耦合冲击作用下硬岩的破碎机理,分别模拟计算了冲击输入端的轴向和扭力冲击应力波,分析了冲击参数对冲击能量传递效率的影响规律^[67]。通过对比国内外扭力冲击工具、旋冲螺杆钻具技术现状及应用情况,利用螺杆钻具马达试验机与整机试验台架,制定了扭冲工具和旋冲工具工作性能参数室内试验测试方案。建立了单齿常规切削、扭转冲击切削和复合冲击切削等三种方式的三维数值计算模型,对比研究了三种切削破岩方式下岩屑形成、破岩比功和破岩效果等问题。

以深层—超深井井壁稳定性为研究目标,对丁山地区龙马溪组深浅层页岩岩心开展XRD、SEM和孔渗等测试,初步明确了海相深层页岩的基础理化性能及非连续结构特征。表征了海相深层页岩的微裂隙萌生扩展和矿物溶蚀等两种水岩损伤模式,揭示了深层页岩水岩作用损伤的各向异性特征和井壁围岩劣化的微观机制。提出了应力多物理场动态响应模式,构建了地应力及井周应力动态响应模型,初步分析了地应力的时空演化规律及井周应力动态响应规律。通过统计分析,明确了顺北地区志留系和奥陶系缝洞地层漏失特征。通过模拟分析,揭示了钻井液环境与地层环境条件差异性,明确了地层驱动因素^[68-69]。根据形态模拟、特征信号监测和热力学计算,构建了环境响应型封堵固壁材料结构模型。

以井筒完整性为研究目标,测试了常温和高温下油井水泥石单轴和三轴力学性能,揭示了水泥石力学变形特性和强度破坏模式,测试了循环荷载下水泥石应力应变特征,建立了水泥石本构模型和损伤变量表征方法^[70]。建立了多因素耦合下套管受力模型,分析了套管载荷变化规律。综合考虑页岩各向异性、温度剧变和岩性界面对套管变形的影响,建立了各向异性页岩储层岩性界面处热—流—固耦合作用下的套管—水泥环—页岩地层数值模型。开展了高温高压下单一酸性气体及其组合对油井水泥石的腐蚀实验,分析了腐蚀后的产物、微观结构、力学性能和渗透率变化规律,初步形成了酸性气体对水泥石的腐蚀规律。明确了满足动载条件下的水泥环密封完整性智能水泥浆性能,初步筛选和开发了配制该型智能水泥浆体系的关键材料。

以储层改造为研究目标,调研了国内外压裂缝网体形成的宏观和微观机理相关研究进展,开展了深层页岩温度应力条件下拟三轴岩石力学实验,初步揭示了深层页岩温度—应力作用下岩石非线性

变形的力学机制。通过模拟四川盆地龙马溪组层状页岩储层水力裂缝起裂扩展,明确了高应力条件下深层页岩裂缝扩展规律,并根据扩展形态将深层页岩水力裂缝在垂向上划分为四种典型类型^[71]。基于相场法建立了酸压裂缝扩展模型,开展了酸压裂缝与随机孔洞沟通机制的模拟实验,揭示了缝洞型碳酸盐岩的酸压裂缝起裂与扩展规律^[72]。在不同应力加载条件下页岩裂缝导流能力变化规律研究的基础上,明确了高导流铺砂模式^[73-74]。

以装置方法构建为研究目标,开展了随钻远探测与常规方位探测的适用性研究,并基于 1D 解析数值算法和 3D 有限元数值仿真平台,对随钻远探测电磁波测井仪器进行了理论与仿真计算。围绕耐温 200 ℃ 样机构建这一核心目标,完成了超高温轨迹测量仪系统整体方案设计,开展了耐温不低于 200 ℃ 的电子元器件优选,确定了封装、焊接等超高温电路设计工艺,设计了部分超高温随钻测量关键模块,并构建了试制方法。开发了压裂装备数据管理平台,初步构建了电动压裂装备运行故障数据库,开发了压裂全流程自动化控制系统,形成了三维虚拟标准化井场设计软件。建立了净压力计算分析模型,在此基础上提出了压裂施工实时净压力计算方法,完成了净压力计算分析模型校正,并在威远工区开展了井筒净压力监测先导性试验。

3 应用推广情况

近年来,我国海相深层油气勘探开发取得了一系列重要进展。勘探开发实践中遇到的认识问题和技术瓶颈为本领域的应用基础理论和关键技术研究提出了新的挑战。海相深层联合基金项目组贴近中国西部和南方油气生产需求,开展深层次的基础研究和针对性的技术攻关,力求把油气勘探开发的研究成果写在祖国的大地上,并在以下四个方面见到了初步成效。

3.1 塔里木盆地走滑断裂多带多类型目标研究

系统总结前期研究成果,提出了加快整体控制顺北的思路,加大塔里木盆地走滑断裂多带多类型目标研究,部署了 9 口探井。实施后,在顺北 71X、52A 和隆 1 井获得高产,实现了主干二级、分支断裂、以及断裂带间穹窿新类型突破;顺北 41 井突破落实了 4 号断裂带含油气长度 60 km;顺北 57X 井证实了 5 号带南段整体富油气,向南拓展有利带 53.2 km,实现了 5 号带整体控制;新增三级储量超过 2×10^8 t 油当量,新建产能 105×10^4 t。

3.2 四川盆地川东高陡构造带油气成藏条件研究

项目实施过程中,进一步聚焦川东及鄂西渝东地区海相下组合保存条件、优质储层、源储匹配和目标评价研究。在前期针对寒武系含膏盐层系盖层研究的基础上,创新提出川东高陡构造带存在寒武系洗象池群高能颗粒滩有利相带,发育盐间优质白云岩储层,并具有志留系侧向对接供烃的有利成藏条件。部署了风险探井平桥 1 井,在洗象池群测试获日产天然气 25.1×10^4 t,取得了川东海相战略性突破,初步评价有利圈闭资源量 $5\,000 \times 10^8$ t。

3.3 四川盆地盆缘复杂构造区油气保存条件研究

进一步加强盆缘复杂构造区以保存条件为核心的选区评价和目标研究,在南川东胜构造带部署实施焦页 10、胜页 2 井获得高产气流,实现了常压页岩气突破。随后整体部署实施 13 口评价井,获得 $(10 \sim 20) \times 10^4$ t 的商业产量,并按照储量探明、井组评价、产能建设相结合的思路,开展地质工程攻关,单井成本控制在 4 500 万元内。2020 年提交探明储量 $1\,918 \times 10^8$ t,启动了 5×10^8 t 产能建设。

3.4 海相深层油气勘探开发工程技术研究

在前期工作积累的基础上,集成“井身结构优化+个性化提速工具+井筒强化技术+安全控制技术”序列,中国石化初步具备了 8 000 m 超深井钻探能力;利用地震资料精准预测顺北 41X 井漏失层段和厚含灰泥层段,降低工程风险,钻井提速 28%;探索了多种高效压裂技术,推广“全电压裂+趾端滑套”压裂工艺,页岩气单井日产同比提高 10%,焦页 10(扩)平台最高压裂效率 8 段/天。

致谢:本文综述的研究工作由国家自然科学基金集成项目(U19B6003)依托和合作单位马永生科学家工作室、中国石化石油勘探开发研究院、中国石油大学(北京)、中国地质大学(北京)、成都理工大学、北京大学、中国石化勘探分公司、中国石化石油工程技术研究院、中国石化物探技术研究院、中国石化休斯顿研究中心、中国石化工程公司等联合研究团队共同完成,路保平、何治亮、庞雄奇、邱楠生、黄中伟、金衍、曾大乾、丁士东、王峻乔、康志江、樊太亮、王卫红、赵培荣、宁正福、李双建、申宝剑、周辉、朱成宏、马中高、邓尚、张殿伟、方成名、朱东亚、刘若冰、曹辉兰、亢武臣及团队承担了部分研究工作。文中采用了项目单位和多位其他相关研究人员的宝贵资料,在此一并表示诚挚的谢意!

参考文献:

- [1] 白国平,曹斌风.全球深层油气藏及其分布规律[J].石油与天然气地质,2014,35(1):19-25.
BAI Guoping, CAO Bin Feng. Characteristics and distribution patterns of deep petroleum accumulations in the world[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):19-25.
- [2] 马永生,陈洪德,王国力.中国南方层序地层与古地理[M].北京:科学出版社,2009.
MA Yongsheng, CHEN Hongde, WANG Guoli. Sequence stratigraphy and paleogeography in southern China [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] 刘树根,孙玮,罗志立,等.兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(5):511-520.
LIU Shugen, SUN Wei, LUO Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(5):511-520.
- [4] 汪泽成,赵文智,胡素云,等.克拉通盆地构造分异对大油田形成的控制作用:以四川盆地震旦系—三叠系为例[J].天然气工业,2017,37(1):9-23.
WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, HU Suyun, et al. Control of tectonic differentiation on the formation of large oil and gas fields in craton basins: a case study of Sinian-Triassic of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1):9-23.
- [5] 何登发,马永生,刘波,等.中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题[J].地质前缘,2019,26(1):1-12.
HE Dengfa, MA Yongsheng, LIU Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1):1-12.
- [6] 何治亮,彭守涛,张涛.塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合—联合成因机制[J].石油与天然气地质,2010,31(6):743-752.
HE Zhiliang, PENG Shoutao, ZHANG Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):743-752.
- [7] 金之钧.我国海相碳酸盐岩层系石油地质基本特征及含油气远景[J].前沿科学,2010,4(1):11-23.
JIN Zhijun. Petroliferous features of marine carbonate strata and hydrocarbon resource prospects in China[J]. Frontier Science, 2010, 4(1):11-23.
- [8] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式:以四川普光气田为例[J].地质学报,2010,84(8):1087-1094.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Formation Mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: a case study from the Puguang Oilfield in Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(8):1087-1094.
- [9] 焦方正.塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J].石油与天然气地质,2017,38(5):831-839.
JIAO Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5):831-839.
- [10] 马永生,蔡勋育,赵培荣.深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J].地质前缘,2011,18(4):181-192.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4):181-192.
- [11] 何治亮,金晓辉,沃玉进,等.中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J].中国石油勘探,2016,21(1):3-14.
HE Zhiliang, JIN Xiaohui, WO Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1):3-14.
- [12] 金之钧,王清晨.中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展:以塔里木盆地为例[J].中国科学(D辑 地球科学),2004,34(S1):1-12.
JIN Zhijun, WANG Qingchen. Recent developments in study of the typical superimposed basins and petroleum accumulation in China: exemplified by the Tarim Basin[J]. Science in China (Series D Earth Science), 2004, 47(S2):1-15.
- [13] 曾义金.深层页岩气开发工程技术进展[J].石油科学通报,2019,4(3):233-241.
ZENG Yijin. Progress in engineering technologies for the development of deep shale gas [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(3):233-241.
- [14] 李阳,薛兆杰,程喆,等.中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J].中国石油勘探,2020,25(1):45-57.
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1):45-57.
- [15] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等.中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J].石油与天然气地质,2020,41(4):655-672.
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4):655-672.
- [16] CHEN Jiajun, HE Dengfa. Propagation growth of en echelon detachment folds: case from the Nankalayuergun fold zone, north Tarim Basin, NW China[J]. Journal of Structural Geology, 2021, 143:104253.
- [17] LI Di, HE Dengfa, SUN Min, et al. The role of arc-arc collision in accretionary orogenesis: insights from ~320 Ma tectono-sedimentary transition in the Karamaili area, NW China[J]. Tectonics, 2020, 39(1):e2019TC005623.
- [18] ZHANG Tan, LI Yifan, FAN Tailiang, et al. Marine carbon and sulfur cycling across the Ediacaran-Cambrian boundary in Tarim block and its implications for paleoenvironmental changes[J]. Palaeogeography,

- Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 560: 110011.
- [19] WU Jun, FAN Tailiang, GOMEZ-RIVAS E, et al. Fractal characteristics of pore networks and sealing capacity of Ordovician carbonate cap rocks; a case study based on outcrop analogues from the Tarim Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2021, 105(2): 437-479.
- [20] LI Shuangjian, LI Yingqiang, HE Zhiliang, et al. Differential deformation on two sides of Qiyueshan Fault along the eastern margin of Sichuan Basin, China, and its influence on shale gas preservation [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 121: 104602.
- [21] LI Yingqiang, LI Shuangjian, HE Dengfa, et al. Middle Triassic tectono-sedimentary development of Sichuan Basin: insights into the cratonic differentiation [J]. Geological Journal, 2021, 56(4): 1858-1878, doi: 10.1002/gj.4033.
- [22] 高平, 李双建, 何治亮, 等. 四川盆地广元—梁平古裂陷构造—沉积演化 [J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 784-799.
- GAO Ping, LI Shuangjian, HE Zhiliang, et al. Tectonic-sedimentary evolution of Guangyuan-Liangping paleo-rift in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 784-799.
- [23] 何治亮, 李双建, 刘全有, 等. 盆地深部地质作用与深层资源: 科学问题与攻关方向 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 767-779.
- HE Zhiliang, LI Shuangjian, LIU Quanyou, et al. Deep geological processes and deep resources in basins: scientific issues and research directions [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 767-779.
- [24] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例 [J/OL]. 大地构造与成矿学, 2020, 45: 1-16 (2020-11-19). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLA&ST&filename=DGYK20201117000>.
- DENG Shang, LIU Yuqing, LIU Jun, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and appraisal: a case study of the Shunbei area, Tarim Basin [J/OL]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 45: 1-16 (2020-11-19). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLA&ST&filename=DGYK20201117000>.
- [25] 李英强, 何登发, 李双建. 湘鄂西—渝东褶皱带多重滑脱构造变形特征与构造模型 [J]. 地质科学, 2020, 55(3): 894-908.
- LI Yingqiang, HE Dengfa, LI Shuangjian. Deformation characteristics and structural model of multi-layer detachment structures in the western Hu'nan and Hubei to eastern Chongqing fold belt [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 894-908.
- [26] 徐旭辉, 方成名, 陆建林, 等. 原型控源、迭加控藏: 油气盆地资源分级评价与有利勘探方向优选思维及技术 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 824-836.
- XUN Xuhui, FANG Chengming, LU Jianlin, et al. Hydrocarbon sources controlled by basin prototype and petroleum accumulation controlled by basin superposition: thoughts and technology of resource grading evaluation and exploration optimization in petroliferous basins [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 824-836.
- [27] 马晓潇, 黎茂稳, 陈强路, 等. 中国古克拉通盆地黑色页岩中碳酸盐岩和有机碳稳定碳同位素变化及其指示意义 [C]// 第九届中国石油地质年会. 海口, 2021: 446.
- MA Xiaoxiao, LI Maowen, CHEN Qianglu, et al. Stable carbon isotopic variations of carbonate and organic carbon in black shale from paleo-craton basins in China and their implications [C]// 9th Chinese Association of Petroleum Geologists Annual Meeting. Haikou, 2021: 446.
- [28] MA Xiaoxiao, LI Maowen, LIU Peng, et al. Combined source and maturity influence on molecular tracers and implications for oil-source correlation in deep reservoirs [C]// 30th International Meeting on Organic Geochemistry. [S.l.]: European Association of Geoscientists & Engineers, 2021.
- [29] 陈强路, 席斌斌, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺托果勒地区超深层油藏保存及影响因素: 来自流体包裹体的证据 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 121-133.
- CHEN Qianglu, XI Binbin, HAN Jun, et al. Preservation and influence factors of ultra-deep oil reservoirs in Shuntuoguole area, Tarim Basin: evidence from fluid inclusions [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 121-133.
- [30] LIU Shugen, YANG Yu, DENG Bin, et al. Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 213: 103470.
- [31] WANG Jingbin, HE Zhiliang, ZHU Dongya, et al. Petrological and geochemical characteristics of the botryoidal dolomite of Dengying Formation in the Yangtze Craton, South China: constraints on terminal Ediacaran "dolomite seas" [J]. Sedimentary Geology, 2020, 406: 105722.
- [32] ZHU Dongya, LIU Quanyou, HE Zhiliang, et al. Early development and late preservation of porosity linked to presence of hydrocarbons in Precambrian microbialite gas reservoirs within the Sichuan Basin, southern China [J]. Precambrian Research, 2020, 342: 105694.
- [33] 马安来, 金之钧, 晏继发, 等. 煤中金刚烷的分布与演化 [J]. 石油学报, 2020, 41(7): 796-808.
- MA Anlai, JIN Zhijun, YAN Jifa, et al. Distribution and evolution of diamondoids in coals [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 796-808.
- [34] 马安来, 金之钧, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系超深层油藏蚀变作用及保存 [J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1737-1753.
- MA Anlai, JIN Zhijun, LI Huili, et al. Secondary Alteration and preservation of ultra-deep Ordovician oil reservoirs of north Shuntuoguole area of Tarim Basin, NW China [J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1737-1753.
- [35] 邱楠生, 何丽娟, 常健, 等. 沉积盆地热历史重建研究进展与挑战 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 790-802.
- QIU Nansheng, HE Lijuan, CHANG Jian, et al. Research progress and challenges of thermal history reconstruction in sedimentary basins [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 790-802.

- [36] CHEN Junqing, ZHANG Xingang, CHEN Zhuoheng, et al. Hydrocarbon expulsion evaluation based on pyrolysis Rock-Eval data: implications for Ordovician carbonates exploration in the Tabei Uplift, Tarim[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107614.
- [37] CHEN Junqing, PANG Xiongqi, WU Song, et al. Method for identifying effective carbonate source rocks: a case study from Middle–Upper Ordovician in Tarim Basin, China[J]. Petroleum Science, 2020, 17: 1491–1511.
- [38] LI Pingping, ZOU Huayao, HAO Fang, et al. Using clumped isotopes to determine the origin of the Middle Permian Qixia Formation dolostone, NW Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 122: 104660.
- [39] 王敬, 赵卫, 刘慧卿, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏注水井间干扰特征及其影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 990–999.
- WANG Jing, ZHAO Wei, LIU Huiqing, et al. Inter-well interferences and their influencing factors during water flooding in fractured–vuggy carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 990–999.
- [40] 肖贤明, 周秦, 程鹏, 等. 高—过成熟海相页岩中矿物—有机质复合体(MOA)的显微激光拉曼光谱特征作为成熟度指标的意义[J]. 中国科学(地球科学), 2020, 50(9): 1228–1241.
- XIAO Xianming, ZHOU Qin, CHENG Peng, et al. Thermal maturation as revealed by micro-Raman spectroscopy of mineral–organic aggregation (MOA) in marine shales with high and over maturities[J]. Science China Earth Sciences, 2020, 63(10): 1540–1552.
- [41] SUN Jian, XIAO Xianming, WEI Qiang, et al. Gas in place and its controlling factors of the shallow Longmaxi shale in the Xishui area, Guizhou, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 77: 103272.
- [42] SUN Jian, XIAO Xianming, CHENG Peng, et al. The relationship between oil generation, expulsion and retention of lacustrine shales: based on pyrolysis simulation experiments[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107625.
- [43] 刘伟新, 卢龙飞, 魏志红, 等. 川东南地区不同埋深五峰组—龙马溪组页岩储层微观结构特征与对比[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 378–386.
- LIU Weixin, LU Longfei, WEI Zhihong, et al. Microstructure characteristics of Wufeng–Longmaxi shale gas reservoirs with different depth, southeastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 378–386.
- [44] 卢龙飞, 刘伟新, 俞凌杰, 等. 生物蛋白石早期成岩相变特征及对硅质页岩孔隙发育与孔径分布的影响[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 363–370.
- LU Longfei, LIU Weixin, YU Lingjie, et al. Early diagenesis characteristics of biogenic opal and its influence on porosity and pore network evolution of siliceous shale[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 363–370.
- [45] SHEN Baojian, LI Zhiming, ZHENG Zili, et al. Status and relative content of water in shale determined by thermogravimetry–mass spectrometry analysis[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107739.
- [46] GAO Ping, LI Shuangjian, LASH G G, et al. Silicification and Si cycling in a silica-rich ocean during the Ediacaran–Cambrian transition[J]. Chemical Geology, 2020, 552: 119787.
- [47] GE Xun, HU Wangshui, MA Yongsheng, et al. Quantitative evaluation of geological conditions for shale gas preservation based on vertical and lateral constraints in the Songkan area, northern Guizhou, southern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 124: 104787.
- [48] JIA Aoji, HU Dongfeng, HE Sheng, et al. Variations of pore structure in organic-rich shales with different lithofacies from the Jiangdong block, Fuling shale gas field, SW China: insights into gas storage and pore evolution[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(10): 12457–12475.
- [49] LI Caixiong, XIAN Chenggang, WANG Jun, et al. The spontaneous imbibition of micro/nano structures in tight matrix and the influence on imbibition potential[J]. Micromachines, 2020, 11(9): 794.
- [50] YU Bo, ZHOU Hui, WANG Lingqian, et al. Prestack Bayesian statistical inversion constrained by reflection features[J]. Geophysics, 2020, 85(4): R349–R363.
- [51] CHEN Hanming, ZHOU Hui, RAO Ying. An implicit stabilization strategy for Q -compensated reverse time migration[J]. Geophysics, 2020, 85(3): S169–S183.
- [52] FANG Jinwei, ZHOU Hui, LI Yunyue, et al. Data-driven low-frequency signal recovery using deep-learning predictions in full-waveform inversion[J]. Geophysics, 2020, 85(6): A37–A43.
- [53] 郑小鹏. 基于反泄露傅里叶变换和凸集映射的 OVT 域数据重建方法[J]. 内蒙古石油化工, 2020(4): 29–35.
- ZHENG Xiaopeng. OVT domain data reconstruction method based on Anti Leakage Fourier transform and convex set mapping[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2020(4): 29–35.
- [54] HE Yanxiao, WANG Shangxu, WU Xinyu, et al. Influence of frequency-dependent anisotropy on seismic amplitude-versus-offset signatures for fractured poroelastic rocks[J]. Geophysical Prospecting, 2020, 68(7): 2141–2163.
- [55] HE Yanxiao, WANG Shangxu. Analysis of reservoir heterogeneity-induced amplification effect on time-lapse seismic responses of fluid substitution: a physical modelling study[J]. Geophysical Prospecting, 2020, 68(6): 1906–1926.
- [56] HE Yanxiao, WANG Shangxu, WU Xinyu. Effects of patch size changes on the time-lapse seismic reflections of highly attenuating reservoirs[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 172: 103878.
- [57] WANG Yanghua, LIU Xiwu, GAO Fengxia, et al. Robust vector median filtering with a structure-adaptive implementation[J]. Geophysics, 2020, 85(5): V407–V414.
- [58] WANG Ruo, WANG Yanghua, RAO Ying. Seismic reflectivity inversion using an L1-norm basis-pursuit method and GPU parallelisation[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2020, 17(4): 776–782.

- [59] LI Shengjie, RAO Ying. Poroelastic property analysis of seismic low-frequency shadows associated with gas reservoirs[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2020, 17(3): 463-474.
- [60] HE Faqi, RAO Ying, WANG Weihong, et al. Prediction of hydrocarbon reservoirs within coal-bearing formations[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2020, 17(3): 484-492.
- [61] ZHU Tong, WANG Yu, SUN Zhentao. PML absorbing boundary condition for structure-preserving seismic wave modeling[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 558: 032012.
- [62] 谢玮, 毕臣臣, 胡华锋, 等. 基于绕射波的碳酸盐岩储层缝洞识别方法及应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 453-457.
XIE Wei, BI Chenchun, HU Huafeng, et al. Development and application of an identification method for fracture and cave in carbonate reservoir based on diffracted wave[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 453-457.
- [63] ZHANG Feng, LI Xiangyang. Inversion of the reflected SV-wave for density and S-wave velocity structures[J]. Geophysical Journal International, 2020, 221(3): 1635-1639.
- [64] DING Pinbo, WANG Ding, LI Xiangyang. An experimental study on scale-dependent velocity and anisotropy in fractured media based on artificial rocks with controlled fracture geometries[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 3149-3159.
- [65] 王志战, 朱祖扬, 李丰波, 等. 便携式岩屑声波录井系统研制与测试[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 109-115.
WANG Zhizhan, ZHU Zuyang, LI Fengbo, et al. development and testing of a portable acoustic logging system on cuttings[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(6): 109-115.
- [66] ZENG Yijin, CHEN Junhai, LI Dandan, et al. Study on rock burst behavior and tendency identification of surrounding rocks in hard and brittle formations of deep and ultra-deep wells[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570: 032056.
- [67] SONG Hengyu, SHI Huaizhong, LI Gensheng, et al. Numerical simulation of the energy transfer efficiency and rock damage in axial-torsional coupled percussive drilling[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107675.
- [68] 吴雄军, 林永学, 宋碧涛, 等. 顺北油气田奥陶系破碎性地层油基钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(6): 701-708.
WU Xiongjun, LIN Yongxue, SONG Bitao, et al. Oil base drilling fluid technology for drilling broken Ordovician formation in Shunbei block[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(6): 701-708.
- [69] 张杜杰, 金军斌, 康毅力. 工作液顺序接触诱发超致密砂岩气藏液相圈闭损害评价[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(6): 114-121.
ZHANG Dujie, JIN Junbin, KANG Yili. Evaluation of comprehensive liquid trapping damage of ultra-tight sandstone gas reservoir induced by sequential contact of working fluids[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(6): 114-121.
- [70] LIU Kui, DING Shidong, ZHOU Shiming, et al. Analysis and test on stress-strain of cement sheath in shale gas wells with hydraulic fracturing[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570: 032032.
- [71] ZENG Yijin, LIU Kui, DING Shidong, et al. Effect of the hydraulic fracturing-induced slippage of regional natural fracture on casing deformation in horizontal shale gas wells: a case study on the Weiyuan block[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570: 022011.
- [72] 王燚钊, 侯冰, 张鲲鹏, 等. 碳酸盐岩储层酸压室内真三轴物理模拟实验[J]. 石油科学通报, 2020, 5(3): 412-419.
WANG Yizhao, HOU Bing, ZHANG Kunpeng, et al. Laboratory true triaxial acid fracturing experiments for carbonate reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(3): 412-419.
- [73] ZHANG Qixing, LIN Botao, KAO Jiawei, et al. Characterization of stress field around a reverse fault based on a constraint stress model[C]//54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. [S.l.]: American Rock Mechanics Association, 2020: 1734.
- [74] SHENG Mao, MA B, LI P, et al. Effects of brittleness and bedding plane on shear strength and fracture morphology of shales[C]//54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. [S.l.]: American Rock Mechanics Association, 2020: 1539.

(编辑 徐文明)