

文章编号: 1000-0747(2013)06-0641-09

DOI: 10.11698/PED.2013.06.01

中国深层油气形成、分布与潜力分析

孙龙德¹, 邹才能², 朱如凯², 张云辉¹, 张水昌², 张宝民², 朱光有², 高志勇²

(1. 中国石油天然气股份有限公司; 2. 中国石油勘探开发研究院)

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05001-002); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB219304)

摘要: 近年来中国陆上油气勘探不断向深层—超深层拓展, 在深层油气生成与保存条件、储集层形成机理、勘探潜力与油气资源评价及勘探工程技术方面取得了一系列新认识、新进展。深层油气储集层包括碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩等, 油层温度可高达 295 °C, 深层碎屑岩在长期浅埋、晚期快速深埋背景下利于孔隙保持, 溶蚀与裂缝作用改善了储集层物性; 受断裂作用、岩溶热液作用、白云石化作用及早期油气充注影响, 碳酸盐岩在 8 000 m 以深仍有良好的储集性能; 深层火山岩受构造作用、火山作用、成岩作用及表生期和埋藏期成岩改造控制, 发育原生型和次生风化型两类储集层。中国石油深层油气资源主要分布在碳酸盐岩、碎屑岩和火山岩 3 大领域, 以气为主, 已形成塔里木、鄂尔多斯、四川、准噶尔、松辽、三塘湖、渤海湾盆地等现实领域。中国深层油气已进入突破发现期, 超深井钻井及超高温钻井液技术等工程技术已初步具备发现深层—超深层油气藏的能力。图 5 参 32

关键词: 深层油气; 储集层形成机理; 资源潜力; 勘探工程技术

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China

Sun Longde¹, Zou Caineng², Zhu Rukai², Zhang Yunhui¹, Zhang Shuichang², Zhang Baomin²,
Zhu Guangyou², Gao Zhiyong²

(1. PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: The onshore exploration realm has been expanded to (ultra-) deep oil and gas in China. New cognition and significant breakthroughs have been made in generation and preservation conditions, reservoirs formation mechanism, exploration potential, petroleum resources assessment, and exploration engineering technology of deep oil and gas. Deep oil and gas reservoirs include clastics, carbonates, volcanics, etc. The temperature of deep oil can be up to 295 °C. A context of long time of shallow burial and rapid deep burial in late stage helps preserve the pores of deep clastic rocks, and dissolution and fracturing improve their reservoir properties. Affected by faulting, karst hydrothermal process, dolomitization and early oil and gas injection, carbonate rocks have good reservoir properties even at the depth of over 8 000 m. Controlled by tectonism, volcanism, diagenesis and diagenetic reconstruction during supergene and burial stages, deep volcanic reservoirs develop primary and secondary weathering types of reservoirs. Deep oil and gas resources in China are distributed within three main practical areas of carbonate, clastic and volcanic reservoirs. Dominated by gas, some practical areas were formed including the Tarim Basin, Ordos Basin, Sichuan Basin, Junggar Basin, Songliao Basin, Santanghu Basin and Bohai Bay Basin. Deep oil and gas in China have entered an age of breakthrough and discovery. Relevant engineering technologies, such as ultra deep well drilling and ultra high temperature drilling fluid techniques, have the ability to find (ultra-) deep oil and gas.

Key words: deep oil and gas; reservoir formation mechanism; resources potential; exploration engineering technology

0 引言

随着全球油气工业的发展, 油气勘探地域由陆地向深水、目的层由中浅层向深层和超深层、资源类型由常规向非常规快速延伸, 水深大于 3 000 m 的海洋超深水等新区、埋深超过 6 000 m 的陆地超深层等新层系、储集层孔喉直径小于 1 000 nm 的超致密油气等新

类型, 将成为石油工业发展具有战略性的“三新”领域^[1]。深层将是石油工业未来最重要的发展领域之一, 也是中国石油引领未来油气勘探与开发最重要的战略现实领域。本文基于前人及笔者研究成果, 梳理在深层油气生成与保存条件、储集层形成机理、勘探潜力与油气资源评价及勘探工程技术方面取得的一系列新认识、新进展, 并从地质认识和技术需求两方面指出深

层油气勘探开发需要解决的关键问题。

1 全球深层油气勘探重大发现

关于深层的定义,不同国家、不同机构的认识差异较大。目前国际上相对认可的深层标准是其埋深大于等于 4 500 m^[2-3];2005 年,中国国土资源部发布的《石油天然气储量计算规范》将埋深为 3 500~4 500 m 的地层定义为深层,埋深大于 4 500 m 的地层定义为超深层^[4];钻井工程中将埋深为 4 500~6 000 m 的地层作为深层,埋深大于 6 000 m 的地层作为超深层^[5]。

尽管对深层深度界限的认识还不一致,但其重要性日益显现。目前,已有 70 多个国家在深度超过 4 000 m 的地层中进行了油气钻探^[6],80 多个盆地和油区在 4 000 m 以深的层系中发现了 2 300 多个油气藏,共发现 30 多个深层大油气田(大油田:可采储量大于 6.85×10^4 t;大气田:可采储量大于 850×10^8 m³),其中,在 21 个盆地中发现了 75 个埋深大于 6 000 m 的工业油气藏^[7]。美国墨西哥湾 Kaskida 油气田是全球已发现的最深海上砂岩油气田,目的层埋深 7 356 m,如从海平面算起,则深达 9 146 m,可采储量(油当量)近 1×10^8 t^[2,8]。

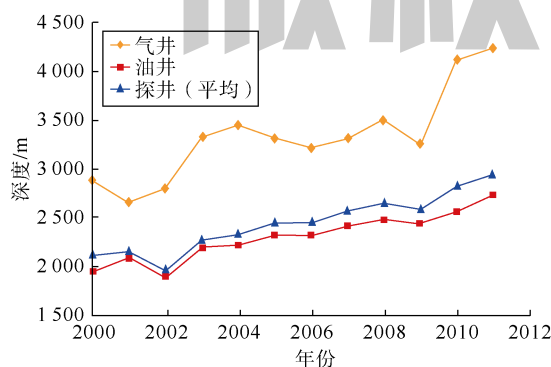
在成熟探区,深部层系是重要的接替领域。如中东地区,近年来多数油气重大发现均位于深层,近 10 年来在 3 000 m 以深的地层中发现了 Pars、Masjid、Esoleiman、Shaikan1、Kurdamir-1、Ferdows 等一批巨型、特大型油气田^[7];墨西哥湾近海浅水区深层勘探近年来也有大发现,利用高精度地震改善盐下构造成像质量,对第三系 Wilcox 组进行解剖分析,逐步查明该区超深层含油气构造特征,于 2009 年在超深层发现了 Davy Jones 气藏^[7]。

目前,全球已开发了 1 000 多个目的层埋深在 4 500~8 103 m 的油气田^[2-4,6-8],其中,美国湾岸(Gulf

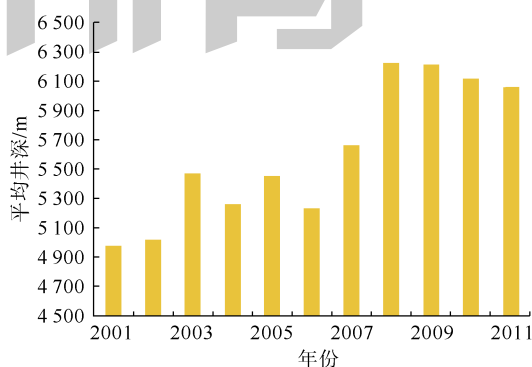
Coast)盆地 Augur 油田是世界上已开发的最深油藏(埋深 6 511~6 540 m)^[2];美国西内盆地阿纳达科凹陷米尔斯奇气田(Mills Ranch Field)是世界上已开发的最深气藏^[2],目的层下奥陶统白云岩埋深 7 663~8 103 m,孔隙度为 5%~8%,平均渗透率为 7×10^{-3} μm²,单井产气量为 6×10^4 m³/d,可采储量 365×10^8 m³。

中国陆上油气勘探不断向深层—超深层拓展^[9],进入 21 世纪,深层勘探获得一系列重大突破:在塔里木发现轮南—塔河、塔中等海相碳酸盐岩大油气区及大北、克深等陆相碎屑岩大气田;在四川发现普光、龙岗、高石梯等碳酸盐岩大气田;在鄂尔多斯、渤海湾与松辽盆地的碳酸盐岩、火山岩和碎屑岩领域也获得重大发现。东部地区在 4 500 m 以深、西部地区在 6 000 m 以深获得重大勘探突破,油气勘探深度整体下延 1 500~2 000 m,深层已成为中国陆上油气勘探重大接替领域^[9]。

中国石油天然气股份有限公司(以下简称中国石油)的探井平均井深由 2000 年的 2 119 m 增长到 2011 年的 2 946 m,其中,塔里木油田勘探井深已连续 4 年超过 6 000 m(见图 1),且突破了 8 000 m 深度关口(克深 7 井井深 8 023 m);东部盆地勘探井深突破 6 000 m(牛东 1 井井深 6 027 m)。中国近 10 年来完钻井深大于 7 000 m 的井有 22 口,其中,2006 年以来完钻 19 口,占 86%。目前钻探最深的井是塔深 1 井,完钻井深 8 408 m,在 8 000 m 左右见到了可动油,产微量气,钻井取心证实有溶蚀孔洞,储集层物性较好,地层温度为 175~180 ℃。最深的工业气流井是塔里木盆地库车坳陷的博孜 1 井,7 014~7 084 m 井段在 5 mm 油嘴、64 MPa 油压条件下日产气 251×10^4 m³,日产油 30 t,属典型的碎屑岩凝析气藏;最深的工业油流井是塔里木盆地的托普 39 井,6 950~7 110 m 井段日产油 95 t、气 1.2×10^4 m³。



(a) 中国石油探井的平均井深变化



(b) 塔里木油田探井的平均井深变化

图 1 中国石油探井平均井深变化图

2 深层油气生成与保存条件认识新突破

2.1 关于烃源灶的新认识

近年来,在单一烃源灶常规生烃模式基础上,研究扩展了中国深层海相烃源岩的生烃模式:①针对常规海相烃源灶,将单峰式生烃模式完善为完整的双峰式,即包括“生油”和“生气”两个高峰;②提出源岩中滞留的分散液态烃在高—过成熟阶段能裂解成气、使烃源岩仍具有良好成气潜力的新观点^[10]。基于上述观点,海相烃源岩热演化和生烃历史应比以往认定的更长,资源总量更大。

基于大量地质样品的模拟实验确定煤系源岩的生气界限和潜力。实验结果表明煤的生气界限可以由以往认为的 $R_o=2.5\%$ 延伸到 $R_o=5.0\%$,在 $R_o>2.5\%$ 的阶段仍具有约 20% 的生气潜力;认为煤的最大生气量可达 300 mL/g,比过去提出的 150 mL/g 增加 1 倍。

2.2 关于油层温度的新认识

传统观点认为,原油在 160 °C 开始裂解,200 °C 之前基本完全裂解^[2-3],然而近期一些新的地质发现对传统观念提出了挑战:中国渤海湾盆地发现的牛东 1 井蓟县系雾迷山组潜山凝析油层底部温度达 201.1 °C (对应深度 6 027 m);美国瓦勒维尔杰盆地帕凯特油气田和特拉华盆地戈麦斯油气田在 4 575~6 100 m 深度范围内发现了大量凝析油气,部分生产层温度高达 232 °C^[2,7];波斯湾马伦油田产层温度超过 230 °C,俄罗斯滨里海盆地布拉海油藏在 7 550 m 深度、295 °C 条件下仍有液态烃聚集^[2]。笔者近期通过大量原油裂解金管模拟实验发现,原油的热稳定性很大程度上受控于原油的组成;塔里木原油裂解实验和地质推演结果证实,受控于原油性质和该盆地特殊的热史条件,塔里木正常原油完全裂解的温度门限可延伸至近 230 °C (见图 2),深度可达 6 000 m 以上。上述地质发现和

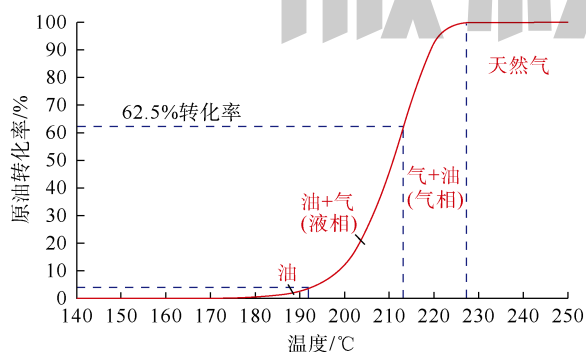


图2 塔里木正常原油(哈得逊原油)升温条件下的裂解转化曲线

模拟实验结果表明,液态石油的保存深度大于传统认识深度。

3 深层油气储集层形成机理的新认识

深层油气储集层包括碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩、变质岩等。深层储集层在埋藏过程中通常经历了较长的地质历史时期,多次成岩事件的叠加使储集层发育控制因素更加复杂。

3.1 深层碎屑岩储集层发育和保持机理

国内外研究表明,5类主要因素控制深层储集层孔隙的发育^[11-14]:①压实、压溶、胶结及矿物体积增大的交代作用是使深层储集层减孔的主要因素;②溶解、破裂、收缩及矿物体积缩小的交代作用是使深层储集层增孔的主要因素;③颗粒包膜、油气充注、流体超压作用是使深层储集层孔隙保存的主要因素;④早期成藏、构造抬升、快速深埋等因素抑制了成岩效应,对孔隙保存具有重要作用;⑤盆地动力场对深层储集层成岩作用有重要影响。上述5类因素对深部储集层形成均有控制作用,但对于不同地质背景、不同岩性的储集层,各种因素对孔隙影响程度差异很大,因此,确定不同地质背景、不同岩性储集层保孔、增孔主控因素是深层储集层研究的核心问题。

3.1.1 早期浅埋—晚期快速深埋

埋藏压实作用是孔隙度降低的一个重要因素,其主要发生于早成岩期及中成岩早期^[11,14]。根据埋藏方式,可以把深层优质碎屑岩储集层分为早期浅埋晚期快速深埋型、长期缓慢逐渐埋藏型和短期快速深埋埋藏型3种,其中早期浅埋—晚期快速深埋型储集层物性好,利于原生粒间孔保存,优质储集层厚度大,分布广,成岩演化程度低,油气储量丰度大,成岩物理模拟实验也证实了这一认识。

实验过程中,根据研究区储集层岩石组成特征(如石英含量、岩屑成分及含量、长石含量等),按相似配比制成人造砂岩岩心。利用成岩物理模拟实验装置,设计不同的温压条件,模拟储集层沉积成岩后经受的早期慢速压实—后期快速压实作用,再现不同沉降阶段储集层孔隙的演化特征,量化不同孔隙类型及含量。实验结果显示,砂岩面孔率的变化呈现出明显的4段性特征(见图3):第1阶段为埋深0~2 000 m的早成岩阶段,即长期的浅埋藏阶段,砂岩面孔率由40%迅速减小到18%左右,该阶段的减孔率($(S_i - S_p) / S_i$,其中, S_i 为初始面孔率, S_p 为当前面孔率)为55%,孔

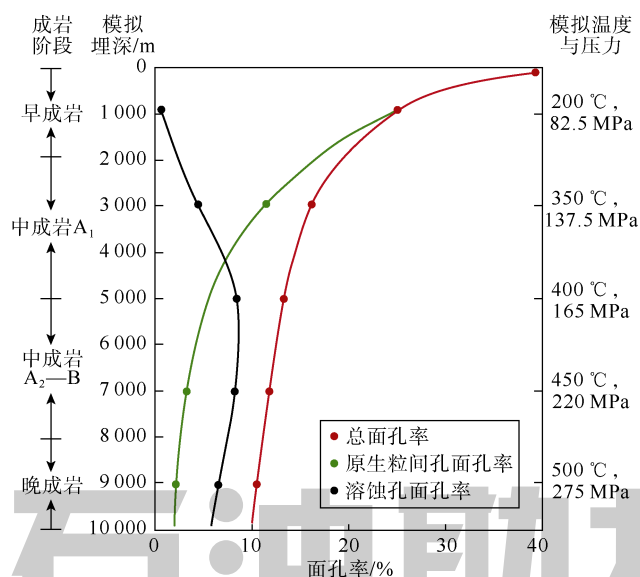


图3 地质过程约束的成岩物理模拟深部储集层孔隙类型与演化特征

隙以原生孔为主,溶蚀孔含量自埋深 1 000 m 开始逐步增加;第 2 阶段为埋深 2 000~5 000 m 的中成岩 A_1 阶段,处于储集层长期浅埋—后期快速深埋的过渡阶段,面孔率由 18%左右减小至 13%左右,减孔率为 27.8%,此阶段原生孔快速减小、溶蚀孔快速增加,砂岩颗粒间以点—线状接触为主,孔隙类型以原生粒间孔为主,见较多溶蚀孔;第 3 阶段为埋深 5 000~8 000 m 的中成岩 A_2-B 阶段,处于晚期快速深埋阶段,此阶段由于压实作用的逐渐增强原生孔面孔率持续降低,溶蚀孔面孔率处于最大发育阶段,总面孔率由 13%降低到 11%左右,减孔率为 15.4%,自埋深 5 000 m 开始出现大量颗粒裂纹,砂岩碎裂对颗粒溶蚀具有促进作用并有利于孔隙连通;第 4 阶段为埋深 8 000~10 000 m 的晚成岩阶段,碎屑颗粒达到稳定堆积状态,随埋深增加堆积紧密程度进一步增加,原生孔含量及溶蚀孔含量逐渐降低,导致砂岩总面孔率持续降低,一般为 10%左右甚至更低。

3.1.2 深埋溶蚀作用

深层储集层溶蚀作用有两种类型,即埋藏溶蚀和近地表风化淋滤溶蚀,且以前者为主,其对孔隙的发育贡献最大。

埋藏溶蚀作用的产生主要与有机质成熟过程中产生的酸性水或有机酸有关,深层烃源岩成熟度一般较高(成熟—高成熟), R_o 值普遍大于 1.0%。在有机质成熟过程中,干酪根热裂解生成大量 CO_2 ,降低了地层水的 pH 值,使其成为酸性水,或形成大量的有机酸。酸性水或有机酸随泥岩的压实而进入相邻的砂岩中,

使砂岩中的某些组分产生强烈溶蚀,形成大量的粒内溶孔和铸模孔,并对原有粒间孔进行改造和溶蚀扩大,利于形成次生孔隙。高温(180 °C)高压(53 MPa)溶蚀实验表明,高温高压条件下砂岩快速溶蚀(温度超过 150 °C后溶蚀速率增大 2~3 倍),有效储集层深度界限下移,塔里木盆地克深地区的勘探实践证明埋深超过 7 900 m 的白垩系仍发育优质碎屑岩储集层。

近地表风化溶蚀作用主要与构造运动有关,沉积物受构造运动影响抬升、暴露于大气水环境中,发生大气淡水溶蚀作用,形成次生溶蚀孔,改善了深层储集层物性,溶蚀作用程度取决于风化暴露时间和地形坡度。塔里木盆地库车克深 202 井研究结果表明,溶蚀作用纵向发育范围距不整合面可达 290 m(150 m 内最好),其中浅层风化带溶蚀孔隙度为 0~1.0%,垂向淋滤带溶蚀孔隙度为 2.0%~5.0%,径向潜流带溶蚀孔隙度为 1.0%~2.0%,底部滞留带溶蚀孔隙度为 0~1.0%,横向具有成层性。

3.1.3 裂缝作用

根据岩心观察和对井剖面裂缝分布特征的分析,发现深层储集层中主要发育以下几种类型裂缝,利于改善低孔砂岩储集层物性:①局部构造变形裂缝;②断裂带裂缝;③区域性裂缝。大量生产实践和研究结果表明,深层储集层中发育的裂缝对储集层孔隙度贡献极小,但其对储集层渗透性的改善作用十分明显。当储集层中发育裂缝时,渗透率显著增加,如大北 202 井目的层裂缝发育,砂岩储集层未经改造,日产气 $110 \times 10^4 m^3$;如果没有裂缝对储集层渗透性的有效改善,许多深部地层将难以成为有效储集层,充分显示了由于微裂缝系统的发育,使致密储集层内相对“僵滞”的气藏重新“活动”形成高产的作用^[15-16]。

3.2 深层碳酸盐岩储集层形成机理

中国海相沉积盆地主要发育在古生代,经过多旋回叠合和改造,油气分布十分复杂^[17-19],尤其是碳酸盐岩层系埋藏深,储集层较致密,非均质性强^[20-25]。礁滩、白云岩、风化壳型储集层是碳酸盐岩中最重要的储集层,其最大特点是次生孔隙发育。从储集层物性随深度演化关系看(见图 4),总体上孔隙度和渗透率较为稳定^[20-21]。由于受断裂活动、岩溶热液作用和白云石化作用的影响,碳酸盐岩在 8 000 m 以深仍具有很好的储集性能。轮东 1 井在 6 800 m 深度仍发育高达 4.5 m 的大型溶洞;塔深 1 井在 8 408 m 深度仍见可动油,并产少量气。深部碳酸盐岩优质储集层孔隙的形成与保持受多种因素控制。

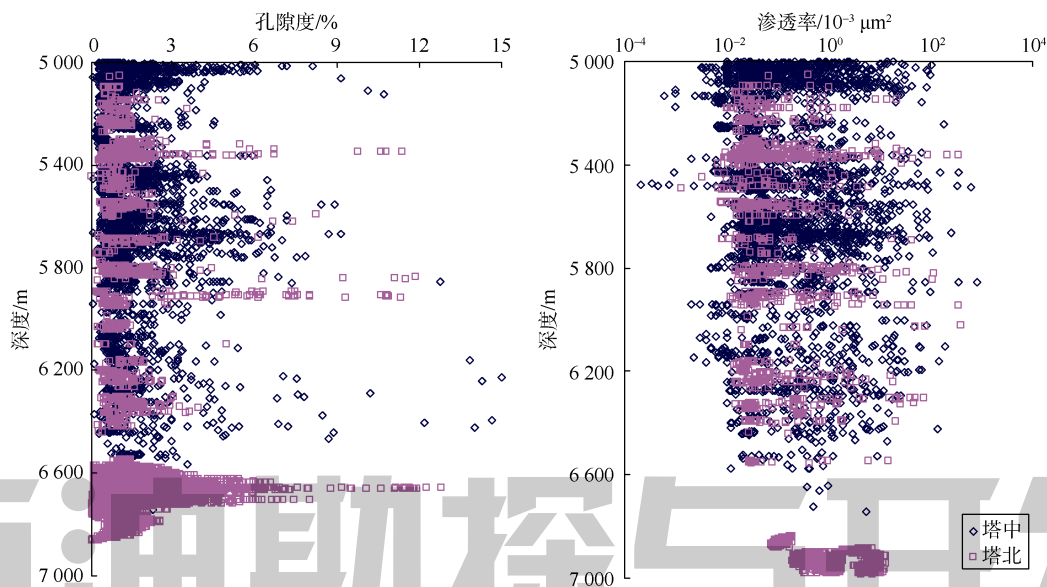


图4 塔里木盆地碳酸盐岩储集层物性随埋深递变规律

3.2.1 白云岩储集层白云石化模式和成孔机制

白云岩储集层的研究主要包括白云石化机理模式和孔洞成因两方面内容。目前可识别出 4 类共 6 种白云石化模式和 6 类成孔机制。6 种白云石化模式分别为：相控型的萨布哈蒸发和回流-渗透 2 类，成岩型的埋藏压实排挤流和热对流循环 2 类，以及构造型的断裂-热液和生物型的微生物白云石化。古老白云岩多经历多期白云石化作用，如埋藏云化、构造-热液云化可以叠合于先期所有白云石化类型之上。白云石化与溶蚀（同生期大气淡水溶蚀、表生期岩溶和埋藏溶蚀）构造作用的叠合更利于优质白云岩储集层的形成^[26]。在中国中西部含油气盆地，目前可识别出 6 类成孔机制：矿物体积减小的云化作用；同生期大气淡水溶蚀作用；晚期（岩溶风化壳）大气淡水溶蚀作用；埋藏期含硫化物的热裂解作用（TDS）；埋藏期硫酸盐热化学还原作用（TSR）与有机酸溶蚀作用；埋藏期热流体作用。

3.2.2 古岩溶储集层成因类型

古岩溶包括浅部岩溶与深部岩溶两大成因类型^[27]。浅部岩溶细分为潜山岩溶、礁滩体岩溶和层间岩溶；深部岩溶细分为顺层岩溶、垂向岩溶和热流体岩溶。目前可作为勘探对象的古岩溶储集层包括 3 种类型：①保存较完好的溶洞，成串珠状发育，钻井既放空、又漏失；②剖面上呈柱状/墙状、平面上呈带状的陷落柱，钻井有漏失、无放空；③剖面上规模大、平面上呈面状的塌陷体，钻井有漏失、无放空。对顺层、层间和垂向岩溶等新类型岩溶储集层的识别，拓展了塔

里木盆地油气勘探领域，勘探深度增加了 1 000～2 000 m，勘探面积增加数倍^[28-29]。

3.2.3 早期油气充注保存孔隙机理

塔里木盆地海相原油的充注主要发生在晚加里东期和晚海西期。该时期奥陶系储集层整体埋深为 3 000～4 000 m，该深度范围内原生孔隙和次生孔隙保存较好，存在足够的储集空间接受油气的注入。由于岩石孔隙中已充注油气，故难以被压实，孔隙得以保存。塔里木盆地碳酸盐岩储集层经历了多期多类成岩作用，油气的早期充注对储集层孔隙度的保存具有重要意义。

3.2.4 断裂改善深层碳酸盐岩储集层性能机理

从塔里木盆地深井来看，埋深大于 5 700 m 时，碳酸盐岩储集层中裂缝型储集层已逐渐占据优势，其厚度不断增大，在 7 000 m 以深，裂缝型储集层已成主体。储集层中裂缝的形成与断裂关系十分密切：深大断裂附近一般发育裂缝型储集层，且厚度大、分布广，形成规模储集层；深大断裂也是重要的油气输导通道，沟通了深部的烃源岩，易于成藏。塔中 I 号断裂带及其派生的走滑断裂是重要的油气源断裂，同时断裂形成的裂缝系统又沟通了岩溶层的孔洞，改善了储集性能^[24-25]，形成了高产区，目前高产油气井主要分布在断裂发育区。

3.3 深层火山岩储集层形成主控因素

中国沉积盆地内火山岩广泛发育，且大部分位于盆地深层。火山岩储集层是构造作用、火山作用、成岩作用和表生—埋藏改造作用等多种因素综合作用的

结果^[30-31]。中国东、西部盆地深层火山岩储集层在发育构造背景、时代、主控因素等方面均存在较大差异，形成了原生型火山岩储集层和次生风化型两类火山岩储集层。

松辽盆地下白垩统营城组火山岩喷发于大陆断陷—拗陷期，位于断陷内，构造环境单一，火山活动受断裂控制。岩性包括流纹岩、玄武岩、火山碎屑岩等，早期为中基性岩，后期为大规模酸性火山岩。火山喷发环境以陆上为主，主要表现为中心式喷发模式。深层火山岩经历了短期的风化作用，或未经受风化作用，火山机构保存较完整，形成原生型火山岩储集层，储集层主要发育于爆发岩相类组合带中，控制火山岩储集性的主要因素为岩性岩相、构造裂缝和酸性流体的溶蚀作用^[30-31]。

准噶尔盆地古生代火山喷发环境差异较大，有残余洋盆、岛弧—弧后、裂谷、山间盆地、前陆盆地等

构造单元^[32]。火山岩以中基性为主，发育少量的酸性流纹岩，岩石类型以熔岩为主，其次为火山碎屑熔岩、火山碎屑岩以及沉火山岩。火山岩储集层的分布规律与优质火山岩相带、风化淋滤带、有利成岩部位密切相关：①火山岩相分布控制了有利储集层分布，溢流相顶部自碎角砾岩发育带以及气孔发育带决定了火山岩储集层的分布及火山喷发的期次性，决定了纵向上储集层发育的韵律性；②风化淋滤作用决定了优质储集层的发育带，风化淋滤作用对储集层具有积极的改善作用，增大了储集空间，提高了储集性能，优质储集层主要分布在风化壳以下以及每期沉积间断期旋回的顶部（见图 5）；③有利成岩部位是火山岩优质储集层分布区，生烃中心和风化淋滤斜坡带是有利储集层的发育区，断裂发育区是火山岩储集层油气的高产区，裂缝极大地改善了储集层渗透率，提高了储集性能。

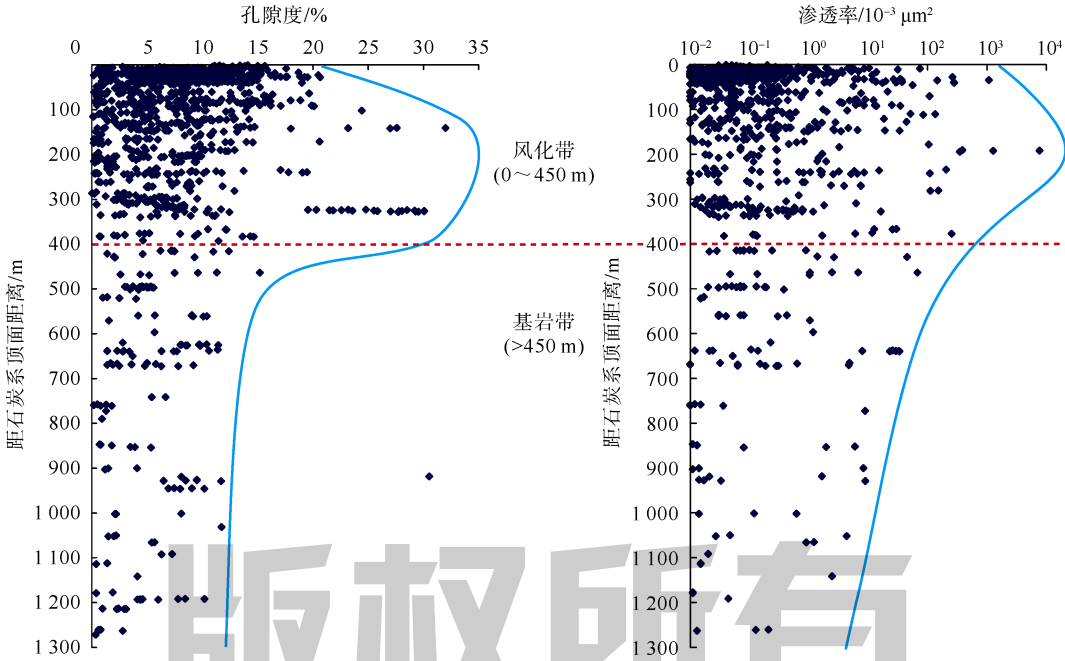


图 5 火山岩风化带和基岩带物性对比（数据来自准噶尔盆地石炭系 1 605 块钻井岩心样品分析测试结果）

4 深层油气勘探潜力与油气资源评价的新进展

深层油气资源潜力大，尤其是天然气资源，随着中浅层勘探程度的不断提高，油气勘探目标逐渐转向深层，是否发育有效储集层是制约深层、超深层领域资源勘探的关键因素，深层油气的勘探效益取决于油气的富集程度及规模。

本文以 4 500~6 000 m 为深层标准，大于 6 000 m

为超深层标准，初步预测，中国石油探区范围内深层油气资源潜力为 $220 \times 10^8 \sim 300 \times 10^8$ t 油当量，主要分布于碳酸盐岩、碎屑岩和火山岩 3 大领域，以气为主。

深层—超深层碳酸盐岩是未来勘探发展的重要接替领域，当前有塔里木盆地塔北南缘奥陶系岩溶发育区、塔里木盆地塔中奥陶系礁滩与岩溶发育区、鄂尔多斯盆地靖边气田周缘奥陶系岩溶发育区、四川盆地川东北二叠系—三叠系礁滩体发育区、四川盆地川东北石炭系白云岩富气区 5 大现实领域，勘探面积约

$10 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；有塔里木盆地麦盖提斜坡奥陶系岩溶发育区、塔中—塔北下奥陶统白云岩、环满加尔凹陷寒武系台缘带，四川盆地川西二叠系白云岩区、雷口坡组风化壳区、震旦系—寒武系岩溶—白云岩区，鄂尔多斯盆地东部盐下白云岩及渤海湾盆地潜山 8 大接替领域，有利勘探面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

深层碎屑岩资源潜力大，是未来深层油气勘探重要领域，当前有库车坳陷深层天然气、四川盆地须家河组天然气、准噶尔盆地腹部岩性地层油气 3 大现实领域，勘探面积 $9 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；接替领域有渤海湾盆地深层碎屑岩油气、塔里木盆地海相砂岩油气、准噶尔盆地深层致密砂岩气、塔里木盆地塔西南深层油气、吐哈盆地台北凹陷致密气、三塘湖盆地致密油、松辽盆地深层致密气，勘探面积约 $34 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

深层火山岩具备规模成藏的基础和条件，具有较好的油气勘探前景。现实领域有准噶尔盆地石炭—二叠系、松辽盆地侏罗系—白垩系、三塘湖盆地石炭—二叠系、渤海湾盆地侏罗系—古近系，勘探面积 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；接替领域有塔里木盆地二叠系、吐哈盆地石炭—二叠系、四川盆地二叠系，勘探面积 $17.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

5 深层油气勘探工程技术重大进展

近年来，针对深层油气勘探开发技术需求，对超高温钻井液进行了重点研究，形成了超高温钻井液技术体系。国内泡沫钻井液抗高温能力从 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 提高到 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ，形成了抗温 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 的水基泡沫钻井液技术，其抗温能力比国外聚合物成膜增黏泡沫钻井液技术高 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。研发了超高温条件下成胶率高的抗超高温纳米有机土及配套的油基钻井液关键处理剂，形成了抗温 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 、密度 2.60 g/cm^3 的油基钻井液技术，达到国外同类技术水平，实现了国内油基钻井液处理剂基本配套，并且钻井液可回收利用。同时研发了分子结构中含有高电荷官能团的高温保护剂，将水基钻井液抗温能力从 $180 \text{ }^\circ\text{C}$ 提高到 $240 \text{ }^\circ\text{C}$ ，形成了抗温 $240 \text{ }^\circ\text{C}$ 的水基钻井液技术，其抗温能力比国外同类技术系列高 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ，成本仅为国外技术的 30%。

此外，中国钻机已适应超深井钻井需求。2006 年生产出 9 000 m 钻机，2007 年又生产出 12 000 m 钻机，钻机生产能力为超深井勘探开发提供了条件。

6 结论

目前关于深层油气的理论认识只是阶段性研究结果，仍存在很多未知领域。从地质认识看，深层—超

深层埋藏演化历史、烃源岩演化历史与成藏历史长，过程复杂，资源潜力和成藏机理认识不清；深层—超深层有效储集层成因复杂，规模有效储集层发育主控因素与分布规律不明确；油气勘探方向、勘探目标预测、深层有效储集层裂缝和溶蚀孔洞成因机制及评价预测、深层高温高压环境与低孔渗介质条件及多种运聚动力影响导致的成藏理论问题等都有待深入研究。从技术需求看，深层—超深层埋深大，地震资料信噪比和分辨率普遍偏低，勘探目标成像精度不够，针对性的深层—超深层地震预测技术、流体评价技术、深层复杂储集层深度改造与开发配套技术、安全快速钻井技术需要发展和完善。目前针对深层油气勘探开发的工程技术亦刚起步，国内埋深达 7 000 m 的油气藏尚未投入开发，实现高效、规模开发难度更大。

中国含油气盆地经过多期叠加改造，深层—超深层仍发育良好储集层，埋深可达 8 000 m，单井产量较高、油气藏规模大。中国深层油气目前已进入突破发现期。今后应把深层油气勘探开发作为实现可持续发展、影响未来的战略领域和现实工程来组织实施。

参考文献：

- [1] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 2013.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional oil and gas geology[M]. 2nd Edition. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [2] 庞雄奇. 中国西部叠合盆地深部油气勘探面临的重大挑战及其研究方法之意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 517-541.
Pang Xiongqi. Key challenges and research methods of petroleum exploration in the deep of superimposed basins in western China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 517-541.
- [3] 胡海燕. 深部油气成藏机理概论[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 24-26.
Hu Haiyan. Deep hydrocarbon reservoir formation mechanism survey[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(6): 24-26.
- [4] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0217-2005 石油天然气储量计算规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0217-2005 Regulation of petroleum reserves estimation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [5] 王永生. 深井超高温钻井液技术综述[J]. 中国高新技术企业, 2012(32): 129-131.
Wang Yongsheng. Technical summarize of drilling fluid in deep and ultra-deep well[J]. China High-Tech Enterprises, 2012(32): 129-131.
- [6] 妥进才. 深层油气研究现状及进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 565-571.
Tuo Jincai. Research status and advances in deep oil and gas

- exploration[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(4): 565-571.
- [7] 翟光明, 王世洪, 何文渊. 近十年全球油气勘探热点趋向与启示[J]. *石油学报*, 2012, 33(增刊 1): 14-19.
Zhai Guangming, Wang Shihong, He Wenyuan. Hotspot trend and enlightenment of global ten-year hydrocarbon exploration[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 14-19.
- [8] 克拉尤什金 B A, 任俞. 深成油气田[J]. *新疆石油地质*, 2009, 30(1): 136-141.
Krayushkin B A, Ren Yu. The plutonic oil-gas fields[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(1): 136-141.
- [9] 孙龙德, 方朝亮, 李峰, 等. 中国沉积盆地油气勘探开发实践与沉积学研究进展[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(4): 385-396.
Sun Longde, Fang Chaoliang, Li Feng, et al. Petroleum exploration and development practices of sedimentary basins in China and research progress of sedimentology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(4): 385-396.
- [10] 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(2): 1-7.
Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Zhang Shuichang, et al. Successive generation of natural gas from organic materials and its significance in future exploration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(2): 1-7.
- [11] 黄洁, 朱如凯, 侯读杰, 等. 深部碎屑岩储层次生孔隙发育机理研究进展[J]. *地质科技情报*, 2007, 26(6): 76-82.
Huang Jie, Zhu Rukai, Hou Dujie, et al. The new advances of secondary porosity genesis mechanism in deep clastic reservoir[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(6): 76-82.
- [12] 朱如凯, 郭宏莉, 高志勇, 等. 碎屑岩储层成岩流体演化与储集性及油气运移关系探讨: 以塔里木盆地满西地区上奥陶统—石炭系海相碎屑岩储层为例[J]. *地质学报*, 2008, 82(6): 835-843.
Zhu Rukai, Guo Hongli, Gao Zhiyong, et al. Relationship of diagenetic fluid evolution, reservoir physical properties and migration of oil and gas: A case of marine clastic reservoirs from Upper Ordovician to Carboniferous in west Manjiaer Sag, Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 835-843.
- [13] 朱如凯, 郭宏莉, 高志勇, 等. 中国海相储层分布特征与形成主控因素[J]. *科学通报*, 2007, 52(增刊 1): 40-45.
Zhu Rukai, Guo Hongli, Gao Zhiyong, et al. Main controlling factors of distribution and genetics of marine reservoirs in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(Supp. 1): 40-45.
- [14] 朱如凯, 邹才能, 张磊, 等. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理: 以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2009, 39(3): 327-339.
Zhu Rukai, Zou Caineng, Zhang Nai, et al. Diagenetic fluids evolution and genetic mechanism of tight sandstone gas reservoirs: A case study of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin, China[J]. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(9): 1340-1353.
- [15] 任康绪, 肖中尧, 曹少芳, 等. 库车坳陷致密裂缝孔隙型砂岩储层评价的物性界限探讨[J]. *地球科学前沿*, 2012(2): 187-192.
Ren Kangxu, Xiao Zhongyao, Cao Shaofang, et al. Discussion on evaluation scheme of physical property boundary for tight fractured porous sandstone reservoirs in Kuqa Depression[J]. *Advances in Geosciences*, 2012(2): 187-192.
- [16] 王波, 张荣虎, 任康绪, 等. 库车坳陷大北—克拉苏深层构造带有效储层埋深下限预测[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 212-218.
Wang Bo, Zhang Ronghu, Ren Kangxu, et al. Prediction of the lower limit of burial depth for effective reservoirs in the Dabai-Kelasu deep structural belt of Kuqa Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 212-218.
- [17] 贾承造. 中国叠合盆地形成演化与中下组合油气勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2006(1): 1-4.
Jia Chengzao. Forming, evolution and petroleum exploration of the deep of superimposed basins in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2006(1): 1-4.
- [18] 赵文智, 汪泽成, 张水昌, 等. 中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带[J]. *科学通报*, 2007, 52(增刊 1): 9-18.
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Zhang Shuichang, et al. Analysis on forming conditions of deep marine reservoirs and their concentration belts in superimposed basins in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(Supp. 1): 9-18.
- [19] 朱光有, 张水昌. 中国深层油气成藏条件与勘探潜力[J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 793-802.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of deep reservoirs in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 793-802.
- [20] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR 对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造: 四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2182-2194.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: An important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2182-2194.
- [21] 朱光有, 张水昌, 王欢欢, 等. 塔里木盆地北部深层风化壳储层的形成与分布[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2384-2398.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Wang Huanhuan, et al. The formation and distribution of deep weathering crust in North Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2384-2398.
- [22] 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]. *地学前缘*, 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.
- [23] 赵文智, 朱光有, 张水昌, 等. 天然气晚期强充注与塔中奥陶系深部碳酸盐岩储集性能改善关系研究[J]. *科学通报*, 2009, 54(20): 3218-3230.
Zhao Wenzhi, Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, et al. Relationship between the later strong gas-charging and the improvement of the reservoir capacity in deep Ordovician carbonate reservoir in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(20): 3218-3230.
- [24] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 1-12.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 1-12.
- [25] 黄捍东, 罗群, 赵迪. 深层高孔渗碳酸盐岩储层岩相识别模式与应用: 以普光气田为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(2):

- 275-280.
Huang Handong, Luo Qun, Zhao Di. Lithofacies identification model for deep high-porosity and high-permeability carbonate reservoir and its applications: Examples in Puguang Gas Field[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(2): 275-280.
- [26] 张静, 胡见义, 罗平, 等. 深埋优质白云岩储集层发育的主控因素与勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 203-210.
Zhang Jing, Hu Jianyi, Luo Ping, et al. Master control factors of deep high-quality dolomite reservoirs and the exploration significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 203-210.
- [27] 杨生超, 贾继成, 姜嘉诚. 古岩溶储层形成模式对比研究[J]. 地球科学前沿, 2012(2): 217-223.
Yang Shengchao, Jia Jicheng, Jiang Jiacheng. Comparative study on the formation pattern of palaeokarst reservoir[J]. Advances in Geosciences, 2012(2): 217-223.
- [28] 张宝民, 刘静江, 边立曾, 等. 礁滩体与建设性成岩作用[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 270-289.
Zhang Baomin, Liu Jingjiang, Bian Lizeng, et al. Reef-banks and reservoir-constructive diagenesis[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 270-289.
- [29] 张水昌, 张宝民, 李本亮, 等. 中国海相盆地跨重大构造期油气成藏历史: 以塔里木盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 1-15.
Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Li Benliang, et al. History of hydrocarbon accumulations spanning important tectonic phases in marine sedimentary basins of China: Taking the Tarim Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 1-15.
- [30] 朱如凯, 毛治国, 郭宏莉, 等. 火山岩油气储层地质学: 思考与建设[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(2): 7-13.
Zhu Rukai, Mao Zhiguo, Guo Hongli, et al. Volcanic oil and gas reservoir geology: Thinking and forecast[J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(2): 7-13.
- [31] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 257-271.
Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.
- [32] 邹才能, 侯连华, 陶士振, 等. 新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制[J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2011, 41(11): 1613-1626.
Zou Caineng, Hou Lianhua, Tao Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China[J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2012, 55(2): 221-235.
- 第一作者简介: 孙龙德 (1962-), 男, 山东寿光人, 中国工程院院士, 中国石油天然气股份有限公司教授级高级工程师, 主要从事中国石油天然气股份有限公司科研生产管理工作。地址: 北京市东城区东直门北大街 9 号, 中国石油天然气股份有限公司, 邮政编码: 100007。E-mail: sunld-tlm@petrochina.com.cn
- 联系作者: 朱如凯 (1968-), 男, 湖南双峰人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事沉积学与储集层地质学方面的研究工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 邮政编码: 100083。E-mail: zrk@petrochina.com.cn
- 收稿日期: 2013-02-24 修回日期: 2013-08-28
- (编辑 林敏捷 王大锐 绘图 刘方方)

《石油勘探与开发》2014 年第 1 期部分文章预告

- 中国大气田的地质和地球化学特征 戴金星, 于聪, 黄士鹏, 等
- 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义 邹才能, 杨智, 张国生, 等
- 再论“压吸充注”油气成藏模式 张善文, 郝运轻, 张守鹏
- 四川盆地焦石坝龙马溪组页岩气田高产与成藏模式 郭彤楼, 张汉荣
- 地震沉积学在湖盆缓坡滩坝砂体预测中的应用——以准噶尔盆地车排子地区下白垩统为例 赵东娜, 朱筱敏, 董艳蕾, 等
- 古气候与古海洋对碳酸盐岩储集层发育的控制 张静, 张宝民, 单秀琴
- 矩形油藏多段压裂水平井不稳态压力分析 王晓冬, 罗万静, 侯晓春, 等
- 轻质油藏空气驱机理数值模拟 贾虎, 赵金洲, 杨怀军, 等
- 缝洞型油藏溶洞-裂缝组合体内水驱油实验 王敬, 刘慧卿, 宁正福, 等
- 特低渗油藏 CO₂ 非混相驱生产特征与气窜规律 高云丛, 赵密福, 王建波, 等
- 裂缝性地层钻井液漏失模型及漏失规律 贾利春, 陈勉, 孙振, 等
- 多弱面地层水平井裸眼井壁垮塌量分析 刘志远, 陈勉, 金衍, 等
- 中东地区已发现大油田储量增长特征和潜力 边海光, 田作基, 吴义平, 等