

# 盆地深部地质作用与深层资源

## ——科学问题与攻关方向

何治亮<sup>1,2</sup>, 李双建<sup>1,3</sup>, 刘全有<sup>1,3</sup>, 杨天博<sup>4</sup>, 张 英<sup>3</sup>

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 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 100083; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:**向地球深部进军是我国重要的资源战略,同时也是地质学科发展的重要方向。随着油气勘探认识和技术不断进步,全球范围内深层—超深层已成为油气勘探开发的重点领域,更是中国常规油气勘探的主战场之一。我国许多含油气盆地中都发现了与深部地质作用相关的 H<sub>2</sub>、He、CO<sub>2</sub>、地热等共生资源的规模聚集。因而,探究深部地质作用及其对深层资源的影响具有重要的意义。分析梳理了盆地深部地质作用对深层烃源岩生烃与演化、储层发育与保存、油气运移与聚集及油气共生资源富集的控制作用,总结了研究进展和面临的科学问题,提出了进一步科技攻关的方向。盆地深部地质作用与深层资源形成分布面临的主要科学问题有:深部地质作用下有机质成烃化学动力学与多元生烃潜力;深部高温高压超临界体系流体—岩石—烃类相互作用机理及超深层储层的有效性;深部油气系统中烃类相态转化、运聚成藏及保存机制;深部特殊地质环境下油气共生资源的形成与富集。深入开展深部地质作用与深层油气资源研究,需要从沉积盆地深部构造演化入手,围绕深部地质过程与资源效应这一核心科学问题,选择深部流体活跃的典型盆地为解剖对象,揭示深部层系物理化学作用机理,阐明不同深部地质过程对不同类型资源(油气、H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、He、地热及干热岩)形成与聚集的控制机制,探索深部资源新领域。未来的主要攻关方向包括:深部地质动力学背景与地质作用机制;深层生烃动力学与生烃量估算;深层储层发育与保持机理;深层油气运移与聚集机理;深层共生资源差异性富集机理。通过攻关,丰富完善盆地深部地质作用影响下油气富集理论与评价方法,也为深部其他战略性共生资源的评价与勘探提供科学依据。

**关键词:**深部地质作用;深层资源;烃源岩;储层;运移;聚集;保存;共生资源

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

## Deep geological processes and deep resources in basins: scientific issues and research directions

HE Zhiliang<sup>1,2</sup>, LI Shuangjian<sup>1,3</sup>, LIU Quanyou<sup>1,3</sup>, YANG Tianbo<sup>4</sup>, ZHANG Ying<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;  
2. SINOPEC, Beijing 100728, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083,  
China; 4. College of Energy Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Marching deeper into the earth is of great significance for domestic resource strategy and tends to be an inevitable research direction in geoscience. With theoretical and technological progress achieved in recent years, hydrocarbon resources in deep or ultra-deep reservoirs have become a major exploration field for targets at home and abroad. Various discoveries of large-scale geological resources, such as H<sub>2</sub>, He, CO<sub>2</sub> and geothermal resources, are proved to be related to deep geological processes, and therefore it is important to reveal the impact of these on deep accumulations. In this paper, the effects of basinal deep processes on hydrocarbon generation and evolution of source rocks, formation and preservation of reservoirs, migration and accumulation of hydrocarbon and its associated resources were discussed. Besides, some research progress and key scientific issues were summarized, and subsequently several research directions were proposed. Presently main scientific issues regarding deep geological processes and deep resources include: a) chemical kinetic models and multiple hydrocarbon generation potential of source rocks in deep geological processes; b) interaction mechanism of water-rock-hydrocarbon in high-pressure and high-temperature supercritical systems and effectiveness of ultra-deep reservoirs;

收稿日期:2020-05-06;修订日期:2020-07-21。

作者简介:何治亮(1963—),男,教授级高级工程师,从事沉积地质与油气盆地分析研究。E-mail:hezhihang@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金重点基金(U19B6003,91755211)和国家科技重大专项(2017ZX05005)联合资助。

c) phase transformation, accumulation and preservation of hydrocarbon in deep oil and gas systems; d) generation and accumulation of hydrocarbon-associated resources in specific deep geological environments. To carry out research on deep geological processes and deep hydrocarbon resources, it is necessary to start with the geological evolution of sedimentary basins, centering on the key issues of deep geological processes and resource effects and taking typical basins with active deep fluids as research objects, and revealing the mechanism of physical and chemical functions of deep formation, finally clarifying the impact of deep geological processes on the formation and accumulation mechanism of deep resources (oil and gas, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, He, geothermal resources and hot dry rocks) and exploring the frontiers of deep resources. The main research directions in the future include: a) deep geodynamic settings and mechanism of geological processes; b) deep hydrocarbon generation kinetics and quantities; c) formation and preservation mechanisms of deep reservoirs; d) migration and accumulation mechanisms of deep hydrocarbons; e) differential enrichment mechanism of deep hydrocarbon-associated resources. Based on the above research, the accumulation theories and evaluation methods of hydrocarbon under the influence of deep geological processes were improved, and some scientific evidence for the exploration and evaluation of deep hydrocarbon-associated resources were provided.

**Key words:** deep geological processes; deep resources; hydrocarbon source rock; reservoir; migration; accumulation; preservation; hydrocarbon-associated resources

### 1 深层资源勘探现状

关于深层的定义,国际上还没有严格、统一的标准,不同国家、不同机构对深层的界定存在一定差异。目前国内外油气行业相对认可的深层标准是地层埋深大于4 500 m。基于我国东西部地区地温场的变化及勘探实践,目前普遍将西部盆地埋深4 500~6 000 m 定义为深层,大于6 000 m 定义为超深层;将东部盆地埋深3 500~4 500 m 定义为深层,大于4 500 m 为超深层。

随着油气勘探认识和技术的不进步,全球范围内深层—超深层领域已成为油气勘探开发的重要发展方向<sup>[1-5]</sup>。近年来,我国在深层—超深层油气领域连续获得重要发现,相继在塔里木、准噶尔、四川、松辽等盆地埋深4 500~8 000 m 的深层古老层系中发现油气,揭示了我国深层—超深层具有巨大的油气资源潜力。从深层探井数量和勘探活跃程度上看,中国已经走在了世界的前列。特别是在

深层海相油气领域,继靖边、塔河、普光等大油气田发现之后,最近几年又相继取得了元坝、安岳、川西气田和顺北油气田等一系列的重大发现(图1)。新一轮资源评价表明,中国海相油气资源占总量30%以上,其中,超过三分之二分布在深层—超深层。因此,深层油气资源的勘探开发将成为我国未来油气增储上产的重要领域。

我国许多含油气盆地中都发现了与深部地质作用相关的H<sub>2</sub>、He、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>等非生物气的规模聚集<sup>[6-7]</sup>。在我国东部地区,受晚中生代以来构造及火山活动影响,沿郯庐大断裂带周缘的主要含油气盆地中,大都发现了大量来源于深部的H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>等气体的聚集成藏,但从北向南不同盆地不同油气藏中主要气体类型存在显著差异。如在松辽盆地庆深气田有深部非生物CH<sub>4</sub>的规模聚集,松辽盆地长岭断陷、渤海湾盆地济阳坳陷、苏北黄桥等发现深部幔源CO<sub>2</sub>与油气共生成藏,松辽、渤海湾等盆地发现了相对含量较高的H<sub>2</sub>产出<sup>[8]</sup>。

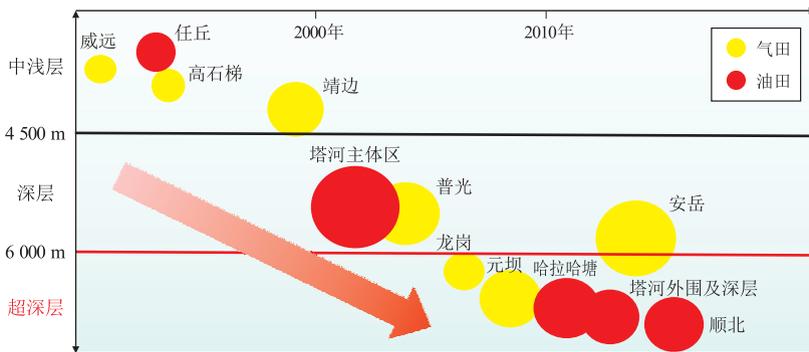


图1 中国深层—超深层油气田发现时间序列示意

Fig.1 Discovery time series of deep and ultra-deep oil and gas fields in China

在中西部古老克拉通盆地中,近年来一系列的重要油气发现与深部地质作用影响有密切关系。如四川盆地安岳震旦系—寒武系天然气成藏与深大断裂控制的裂陷槽发育具有密切相关性<sup>[9]</sup>,二叠纪地幔柱活动和玄武岩的喷发,不但改变了中、晚二叠世岩相古地理格局,而且高热流促进了烃源岩的快速生烃,相关热液流体作用也促使了二叠系热液白云岩的发育,成为新的油气储量增长领域。塔里木盆地在顺北地区奥陶系断控储集体领域获得了勘探突破,揭示了多期活动的深部断裂对油气成藏具有控制作用<sup>[10-11]</sup>。古老克拉通盆地花岗岩基底 U、Th 的衰变提供了丰富 He 的来源,四川盆地威远灯影组中发现了我国首个 He 气藏,塔里木盆地和田河气田也发现了丰富 He 资源。

深部热能的输入也为我国东部中—新生代盆地带来丰富的地热资源。其中,渤海湾盆地 3~10 km 埋深干热岩资源基数折合标煤达到 13.4 万亿吨,松辽盆地达到 46.8 万亿吨,苏北盆地 3~8 km 埋深干热岩资源基数折合标煤达到 438 亿吨,具有广阔的开发利用前景<sup>[12-14]</sup>。

我国东、西部各种类型沉积盆地具有不同的深部动力学背景,深部地质作用的过程和方式各不相同,不同盆地深部流体的活动特征及其对油气资源富集成藏的影响也表现出明显差异性。开展深部地质作用过程及其对深部油气成藏影响的研究,探索深部地质作用对不同类型沉积盆地中油气资源形成与分布的影响机制,阐明深部流体携带物质与能量的成藏效应和资源潜力,对于完善和丰富沉积盆地深层油气形成、聚集理论与评价方法具有重要意义,并能够为深部油气资源及共伴生资源(非生物成因烃气、二氧化碳、氦气、氢气和地热资源)的分布预测和勘探开发提供有力依据。

## 2 面临的科学问题

深部地质作用有哪些特殊性?这些地质作用是如何影响和控制深层油气成烃、成储、成藏的?盆地深层油气及其他共伴生资源形成与分布和中浅层究竟有什么不同?这些问题已开始得到业界的重视。盆地深部地质作用是地球各圈层相互作用的组成部分,包括高温高压环境下深埋过程中的成岩与变质作用,放射性矿物衰变,深部岩浆及热流体直接、间接作用,断裂活动及对物质能量输导等。深部地质作用与其所处的构造背景具有紧密的联系,大陆裂谷区常与地幔柱分布相关联,大陆地壳减薄区的伸展断裂带,深大断裂带特别是大型

走滑断裂带都是深部地质作用的活跃区域<sup>[15]</sup>。由于深部地质作用的影响长期存在,控制着深部的物质和能量源源不断地向盆地内部进行输入和交换,即使在构造稳定区,深层—超深层由深埋作用引起的温、压场和流体地球化学性质转变,也会对油气成藏条件产生一系列重要的影响。本文拟从深部地质环境的特殊性入手,简要分析盆地深部地质作用影响深层油气生、储、运、聚等各个成藏要素中的科学问题,进而展望未来重点科技攻关方向。

### 2.1 深部地质作用下有机质成烃化学动力学与多元生烃潜力

深部地质作用对烃源岩生烃演化的影响主要体现在 2 个方面:一方面深部高温、高压可以加快或抑制烃源岩的热演化;另一方面深部富含 C、H 组分并携带大量热能的深部流体可以通过有机—无机相互作用影响生烃过程。

传统的油气成因理论认为温度和时间对油气生成的作用是第一位的,压力的作用是次要的,大多数情况下可以忽略。根据化学动力学原理可确立石油、天然气生成温度和保持化学结构稳定的深度下限。TISSOT 和 WELTE<sup>[16]</sup>提出了烃源岩生烃量对应深度或成熟度阶段的演化模式,在这一模式中,生物成因气生成于未成熟阶段,进入生油窗后,石油产量迅速增加至峰值后迅速减小并与湿气阶段重叠;天然气的生成同样在生油窗后缓慢增加,生油高峰过后天然气产率迅速增加,天然气最大产率远大于石油最大产率。DIECKMANN 等<sup>[17]</sup>跟踪了巴黎盆地托阿尔阶(Toarcian) II 型页岩封闭热解烃类产物的生成过程,结合化学计量法计算了油裂解气和初次裂解气的相对比例,推导出地质条件下石油的生成主要在 100~220 °C,对应  $EasyR_0 = 0.65\% \sim 2.5\%$  成熟阶段,天然气生成则对应 150~220 °C,对应  $EasyR_0 = 1.2\% \sim 2.5\%$  成熟阶段,暗示  $EasyR_0 = 2.5\%$  可能已到天然气的生成下限。我国学者认为,深层—超深层的埋藏背景下,古老烃源岩多处于高成熟—过成熟阶段,但是在此阶段的烃源岩内仍存在生烃过程,有机质的“接力生气”模式使分散在烃源岩中的液态烃进一步热裂解从而具有良好的生气潜力。湖相、海相 I、II 型有机质最早生油(600 mg/g),干酪根生气和源内残留烃生气紧随其后,且两者生成天然气量大致相当(120~100 mL/g),储层油裂解气可达源内天然气的两倍多(230 mL/g)<sup>[18]</sup>。

盆地深层—超深层存在的超压也是影响和限制烃源岩生排烃的重要因素。早期学者认为超压

可能会促进有机质热演化<sup>[19]</sup>。随着超压盆地油气勘探的深入,在越来越多的沉积盆地中发现了超压系统中有机质热演化出现“低”异常,如意大利 Lombard 盆地<sup>[20]</sup>、英国北海盆地<sup>[21]</sup>、美国 Unita 盆地<sup>[22]</sup>、中国准噶尔盆地<sup>[23]</sup>等。因此,有学者提出超压对干酪根的热降解生烃以及烃类的高温裂解都能起到有效的抑制作用<sup>[24-26]</sup>,在勘探实践和生烃动力学上相继得到证实。对于具有较低地温梯度和较大烃源岩埋深的沉积盆地,超压的持续作用可以明显抑制烃源岩热演化程度, $R_0$ 相较于正常值低 0.5% 以上<sup>[27]</sup>,因此超压推迟并拓宽了烃源岩生烃高峰期的范围。

如果盆地深部存在富含 C、H 组分并携带大量热能的流体,它们可以通过有机—无机相互作用影响生烃过程<sup>[28]</sup>。深部流体带来的  $H_2$  等物质能够有效促进高演化烃源岩生烃。有机质生烃过程是一个去氧聚氢富集碳的过程,因此,如果外部来的含  $H_2$  物质能够向干酪根提供 H 元素,则可促进有机质生烃。 $H_2$ 、水和富含 H 元素的深源岩石都可以作为外部氢源<sup>[29-30]</sup>。JIN 等<sup>[31]</sup>通过有机质热解模拟实验表明,加入  $H_2$  后  $II_2$  型干酪根的生烃率可以提高 147% 以上。

基于上述观点,深部地质作用对于深层油气生成总体上具有积极的意义。同时也引申出一系列新的问题。如烃源岩可以持续生烃最高温度是多少?液态石油存在的最大埋深或者最大温度—压力是多少?深源流体如何进入致密的烃源岩来促进生烃过程?来自于深部的  $H_2$  有多少量,能对生烃量产生根本性的影响吗?不同地质背景的深部物质和能量影响下的生烃机理和模式有哪些?不同深部地质作用背景下生烃潜力如何定量估算?深部地质作用对生烃的负面影响有没有,是什么?这些问题的解决对落实深层油气资源规模和明确勘探方向均具有非同寻常的意义。

## 2.2 深部高温高压超临界体系流体—岩石—烃类相互作用机理及超深层储层的有效性

深层储层在埋藏过程中往往遭受了盆地多阶段的构造运动改造和多期次的流体活动影响,与中浅层存在明显差异。大量资料的统计表明,随着埋深增加,深层储层物性整体较差,但仍存在物性较好的有效储层<sup>[32]</sup>。深层储层孔隙结构与成因复杂,成岩后生作用类型多且差异大,非均质性更强<sup>[33-34]</sup>。近年来,随着钻井深度越来越大,深部碎屑岩和碳酸盐岩有效储层的深度下限被不断刷新。在塔里木盆地库车坳陷克深和大北地区,已发现超

过 8 000 m 的超深层碎屑岩储层。在塔里木盆地塔中和塔北<sup>[35-36]</sup>、四川盆地元坝、鄂尔多斯盆地靖边等地区均发现了埋深超过 6 000 m(最深为 LT1 井达 8 882 m)超深层碳酸盐岩储层。深部储层的形成和长期保持宏观上受控于盆地深部不同动力学背景下的流体驱动和循环机制,微观上深部多类型地质流体与盆内沉积围岩地层发生的广泛水—岩相互作用,也在不同程度地影响着深部储层的储集性能<sup>[37]</sup>。

对于碎屑岩储层,随着埋深的增大,孔隙度和渗透率呈指数级降低<sup>[38-39]</sup>。但是勘探实践已经证实,在一定条件下,深层碎屑岩储层仍可以保持较好的物性<sup>[40-41]</sup>。研究表明,沉积条件仍然是深层有效储层形成的基础,埋藏过程中储层储集空间能够得到多大程度的保存是深层有效储层发育的关键。各种成岩作用在时空上的匹配对深层碎屑岩储集空间的保存至关重要,如早期的胶结作用、颗粒包壳生长、油气充注等都有利于孔隙的保存<sup>[42-44]</sup>。地层流体封存箱内的异常高压可以有效地抑制后期的压实压溶和胶结作用从而保存孔隙<sup>[25,45-46]</sup>。低地温场盆地碎屑岩中水岩反应速率会明显降低,砂岩的机械压实速率也会减缓<sup>[47]</sup>。另外,埋藏方式对深层碎屑岩储层的形成也有重要影响,早期长期缓慢浅埋藏、晚期快速深埋藏有利于储层孔隙的保存<sup>[48-49]</sup>。塔里木盆地库车坳陷深层碎屑岩储层在超过 7 000 m 埋深,孔隙度仍可超过 8%,主要得益于以上几种因素的叠加,低地温梯度、晚期快速埋藏和储层流体超压,有效地延缓了储层致密化。深部条件下储集空间的新生主要受溶蚀作用和构造破裂作用的影响,溶蚀性流体的主要来源是干酪根热演化过程形成的酸性流体,如有机酸、 $H_2S$  和  $CO_2$  等,除此之外还有来自幔源或壳源的  $CO_2$ ,沿深大断裂—输导层运移的深循环流体等。碎屑岩中相对不稳定的长石、云母、碳酸盐矿物及火山岩和变质岩岩屑等都是主要的被溶蚀对象,如在东营凹陷北带古近系沙河街组碎屑岩储层中,长石颗粒和碳酸盐胶结物都较为发育,在存在超压且成岩体系相对封闭的区域,以有机质脱羧形成的酸性流体和生烃过程产生的  $CO_2$ ,通过选择性溶蚀储层中长石颗粒,形成储集空间;在断裂发育且成岩体系相对开放的区域,下渗的大气淡水和有机质脱羧产生的酸性流体,共同导致储层中长石和碳酸盐矿物同时发生溶解作用,形成有效储集空间<sup>[50]</sup>。

与碎屑岩相比,碳酸盐岩特别是白云岩具有更

强的抗压实和压溶能力,随着埋深的增加,碳酸盐岩孔隙度不会持续降低。世界范围内统计深度超过 5 000 m 的碳酸盐岩储层,有 10% 以上样品孔隙度超过 10%<sup>[32]</sup>。四川盆地元坝气田碳酸盐岩储层,埋深超 7 000 m 最高孔隙度可达 30%,塔里木盆地塔深 1 井碳酸盐岩储层在 8 408 m 深处孔隙度可达 9.1%。因此,对深层碳酸盐岩储层而言,业界更关心的是深埋过程中或者深部流体参与下,碳酸盐岩储层是否有增孔机制。

深部地质作用促使深部富  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等多种类型热液流体沿着基底深大断裂向浅部运移,与沉积地层发生广泛的水—岩相互作用,在国内外的研究中均得到了关注。一些学者通过对不同地质环境下溶蚀模拟实验和岩心观察,认为深部溶蚀可以大规模提高碳酸盐岩储集性能<sup>[51-54]</sup>。特别是在开放—半开放成岩系统内,碳酸盐岩存在着“溶蚀窗”效应(在某个深度、温度范围内,碳酸盐岩具有更高的溶蚀率)<sup>[54-56]</sup>。也有些学者认为在绝大多数情况下深部溶蚀难以形成大规模优质储层<sup>[57-58]</sup>,碳酸盐岩在浅部发生大量表生和准同生岩溶,一旦埋藏到中深层,即使地层中有大量的有机酸,但是难以运移到储层中产生规模性溶蚀。许多学者认为,深层 TSR 反应形成大量  $\text{H}_2\text{S}$  有助于形成有效储层<sup>[59-60]</sup>。也有学者认为,深层 TSR 更多的是一个减孔的过程, $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  会消耗烃类产生大量沉淀,不会产生规模性溶蚀<sup>[61]</sup>。

直接与深部地质作用相关的热液改造型储层,其成因机理和储层改造意义也广受争议。部分学者认为,热液活动可使碳酸盐岩储层发生显著次生溶蚀作用,使储集空间进一步扩大<sup>[53,62]</sup>,热液改造型储集体多呈墙状、准层状、透镜状等分布<sup>[63]</sup>。深部热液对碳酸盐岩最具代表性的改造作用是热液白云岩化,已发表的大量数据和事实表明,中东地区世界最大的一批油气藏不同程度存在构造控制的热液白云岩化和溶蚀改造作用<sup>[64]</sup>。四川盆地震旦系灯影组、二叠系茅口组等层位中都发育有构造—热液改造型白云岩储层<sup>[65-66]</sup>。塔里木盆地顺南、顺北、玉北等地区发现了深度超过 7 000 m 的热液改造型碳酸盐岩储层<sup>[4,67-68]</sup>。构造作用产生的断裂、深部热液对灰岩和白云岩的溶解以及热液白云化后岩石抗压强度的增加,都可以有效地改善储层<sup>[69-70]</sup>。也有些学者认为热液白云岩中发育的晶间孔主要是对原岩孔隙的继承和调整,部分来自埋藏溶蚀作用,但溶蚀产物未必能及时带出成岩系统,鞍状白云石的沉淀肯定是破坏孔隙的<sup>[58,74]</sup>。

尽管存在储层成因机理上的争议,但是对于深层—超深层能够发育和保存优质碳酸盐岩优质储层,已经成为产业界和学术界的共识。由于碳酸盐岩特别是深层白云岩储层具有良好的易破裂、抗压实、抗压溶和高温条件下易酸溶改造能力,乐观地预计万米以内都存在有效储层<sup>[5]</sup>。

无论碎屑岩还是碳酸盐岩,埋深超过 6 000 m 的超深层仍然发育优质规模储层已经成为不争的事实。但是,深部地质作用在储层形成过程中是起正面还是负面作用学界尚有分歧,对其动力学机制和作用过程的研究仍然非常有限。主要体现在:孔隙主要是早期形成还是后期形成?热液是以建设性为主还是以破坏性为主?高温条件究竟是有助于溶蚀还是有助于沉淀?深部流体主要是碱性还是酸性?储层形成主控因素是以建造性的沉积、成岩作用为主还是以构造改造作用为主?高温高压条件下哪些岩石或矿物更有利于形成储层?深层—超深层储层类型与地质模式及其组合与中浅层有本质性差别吗?如何针对深层特点形成有效的地震预测和建模技术?这些问题已经引起学术界和产业界的关注,具有较强的理论价值和勘探实践意义。

### 2.3 超深油气系统中烃类相态转化、运聚成藏及保存机制

在深层—超深层高温高压条件下,盆地的温—压场、流体场和地球化学环境与盆地中浅部具有明显区别,主要表现为:地温普遍超过 150 °C,储层中的石油开始或者完全裂解;储层致密程度和非均质性增加,油气运移阻力变大,浮力对油气聚集的影响变小;部分流体进入超临界状态,其自身运移能力改变的同时,也会对其他流体产生影响;深部断裂和深部流体增多也会对油气运、聚起到重要的控制作用。因此,与中浅层相比,深层—超深层油气赋存状态的差异较大,油气运移、聚集和保存的动力和方式也会发生重大改变。

石油能够稳定存在的温度一般在 60~160 °C 范围内,而高于 220 °C 烃类的相态以气为主<sup>[2]</sup>。与四川盆地及世界上绝大多数深层—超深层碳酸盐岩地层中全为气藏不同,塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩储层中发现了大量的油藏,显示其具有特殊的形成与保持机理。以往认为,成熟度适中的中上奥陶统烃源岩的发育是主要因素<sup>[27]</sup>。近年来,在更深层位上发现了埋深 8 000 m 以下的油藏,油源只能是来自于寒武系烃源岩或者更深的地层。尽管这些油藏经历过 220 °C 以上的高温改造,

其液态烃仍能稳定存在,这说明塔里木盆地海相油藏表现出很高的热稳定性。仅仅通过宏观的低地温梯度或者高的储层压力来解释塔里木盆地海相油藏具有高的热稳定性,说服力显然不够,因为不同介质条件下甲烷的生成活化能分布有差异,碳酸盐岩对油裂解条件影响最大,另外,模拟实验也显示原油的烃类组分差异是影响其裂解温度的重要因素<sup>[2]</sup>。因此,原油烃类组成、油田水分布特征、烃—水—岩相互作用等微观物理化学过程和特征可能是塔里木盆地深层—超深层原油保持的重要制约因素。

由于深层油气运移介质所处理深大,孔、渗性总体较差,而且非均质性很强,导致地层水动力不活跃,浮力对油气运移充注的影响较小,异常压力、断裂、裂缝在深层油气运移中起到了更重要的作用。异常压力,即源—储间的剩余压差驱动着油气的短距离运移和充注,或者通过断层发生较大距离的垂向运移。无论是烃源岩排烃的初次运移,还是油气在输导层中的二次运移,超压的作用都不容忽视<sup>[75-77]</sup>。幕式排烃和穿层运移是超压流体流动的最重要特征之一,幕式瞬态流动可发生在流体的初次排烃和二次排烃中,可产生大量的微裂缝、形成超压流体释放的通道,超压流体通过断裂突发性释放。在油气藏早期成藏和快速埋藏的超压盆地中,幕式排烃和运移的实例较多<sup>[78]</sup>,但在长期构造稳定的深层盆地中,储层致密化之前形成的古油藏对晚期的油气藏分布具有重要的控制作用,如四川盆地的普光、元坝和安岳气田等都是早期古油藏转变为古气藏,晚期进一步调整定型形成的<sup>[79]</sup>。

对深层油气长距离运移和聚集最显著的影响可能主要来自于深部断裂,以及由断裂带来的深部流体对烃类物质的萃取。深部断裂活动不仅形成了规模性的储集空间,也是油气运移的优势通道。塔里木盆地顺北地区,主要目的层(奥陶系一间房组—鹰山组上段)主要为潮下带碳酸盐岩沉积,不发育高能环境下的礁滩相,也缺乏准同生期的暴露溶蚀改造。近期,沿顺北 1、5 号断裂带的一系列钻井获得高产,揭示了深层断裂对储集空间的形成和油气运移聚集所起的决定性作用<sup>[10,80]</sup>。沿走滑断裂发育的裂缝带和孔洞提供了优越的储集体和特殊的运移通道和圈闭条件。

一些深大断裂输送的 CO<sub>2</sub> 在地下往往处于超临界状态<sup>[81]</sup>,对有机组分具有较强的溶解萃取能力<sup>[82]</sup>。通过对苏北盆地黄桥气田的解剖<sup>[83]</sup>,发现大规模超临界 CO<sub>2</sub> 沿着断裂、裂缝等构成的通道体

系自深部向盆地浅部地层运移,当经过烃源岩层系和致密储集体时,通过溶解萃取烃源岩层系和致密储集体中油气并携带其向浅部运移,可以有效地增强油气聚集能力<sup>[83]</sup>。

总体来看,深层油气成藏要素和过程与中浅层可能存在显著差别,但还是遵从了基本的油气地质规律。深层油气系统的静态要素中,源岩、储层、盖层差别不大,但运移通道和圈闭差别明显。动态要素中,特殊热源和热流体作用下的生烃机理需要阐释,古油藏和储层分散烃类二次生烃贡献需要重视。因为高温高压流体相态的改变,加之储层致密或非均质性,导致排烃、运移、聚集方式发生显著改变;深埋条件下盖层性能总体会变好,但膏盐岩塑性流动会导致局部加厚或减薄,特别是断裂活动和活跃的流体,使深层保存条件异常复杂。因此,深层油气面临的 3 大问题,包括资源类型和规模问题,深层油气成藏机制与模式问题,深层油气富集、贫化和分布规律问题,均有待深入研究和解决。

#### 2.4 深部特殊地质环境下油气共伴生资源的形成与富集

一方面,盆地深部地质和流体作用能够以物质或能量输入的形式对深层油气的聚集成藏产生显著影响,如深部的岩浆或热液相关流体能够作为热能传输的媒介,加速烃源岩的成熟,可以使未熟或低熟烃源岩中的有机质“瞬时”生烃,形成“热液石油”<sup>[84-85]</sup>;另一方面,深部地质作用过程中,还向盆地输入了大量的非生物成因气体,如氦气、二氧化碳、氢气等资源常常与油气藏相伴生,如果能够规模聚集,其本身便具备开发价值,同时也会影响油气的运聚成藏和调整破坏过程。

氦气作为一种低分子量气体具有较强的化学稳定性,由于其特殊的物理化学性质,被广泛应用在国防、军工以及化学分析等科研生产的各个方面,如航天发射、低温超导、激光技术、红外线探测、核工业、国防和医疗等领域,是重要战略性稀有气体资源,被誉为“黄金气体”。氦气的形成与深部地质作用密切相关,主要来源于地壳放射性矿物衰变或地幔流体<sup>[6]</sup>。我国氦气资源分布较广,在新生代和古老克拉通盆地均有发现。松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地、四川盆地、塔里木盆地、渭河盆地氦气资源较为丰富,其分布状态主要受深层古老放射性岩体和深大断裂所控制<sup>[86-88]</sup>。中西部古老克拉通盆地普遍发育花岗岩基底,其中的 U、Th 放射性衰变为氦气的主要来源。四川盆地的威远气田和塔里木盆地和田河、雅克拉气田中氦气含量均

达到了工业利用标准<sup>[89]</sup>。其中,四川盆地威远气田是我国首个实现氦气商业化利用的气田,产层为震旦系灯影组,天然气井中氦气含量一般为0.1%~0.342%。塔里木盆地沙雅隆起和麦盖提斜坡西北部,发现了富集氦气的凝析油气藏,和田河气田中氦气含量为0.30%~0.37%(平均0.32%),折算氦气探明储量 $1.9591 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,具有较好的氦气资源勘探前景。

我国中东部的松辽、渤海湾、苏北、莺歌海等盆地内都发现了大量与油气藏伴生的CO<sub>2</sub>气体或纯气藏(图2),按成因机制可分为壳源型、壳幔混合型 and 火山幔源型,其中火山幔源型CO<sub>2</sub>在我国中东部油气藏中最为常见。CO<sub>2</sub>从深部向上运移主要是软流圈上涌导致的壳—幔相互作用和断裂活动的结果<sup>[7]</sup>,其运移、充注过程主要受控于基底深大断裂及晚期次生活动断裂的发育和分布。

深部岩浆和深部流体沿深大断裂向浅部迁移过程中与围岩发生热交换,形成了丰富的地热资源<sup>[90]</sup>。干热岩是地热资源的重要类型之一,干热岩指内部不存在或仅存在少量流体,温度高于180℃的异常高温岩石,岩石类型多为深部的岩浆岩,也

有变质岩和致密碎屑岩、碳酸盐岩。世界上干热岩的发育主要位于一些离散/汇聚型板块边缘,如环太平洋地震—火山带,包括日本的Hijori和Ogachi干热岩发育区,美国的The Geysers地热田;地中海—喜马拉雅地震—火山带,包括意大利拉德瑞罗地热田、中国西藏羊八井地热田等;以及东非裂谷的肯尼亚等构造活动强烈的地区<sup>[91-93]</sup>。我国东部滨太平洋构造带的一系列裂谷盆地自中—新生代以来经历了广泛的岩浆侵入和喷发,通过大型张性断裂源源不断的热源传输和盆地中—新生代沉积盖层的保温等共同作用,在不同类型地热储层中富集并形成了丰富的地热资源。汪集旻等<sup>[12]</sup>根据稳态热流数据圈定了松辽盆地、渤海湾盆地为中国干热岩资源开发的有利靶区。何治亮等<sup>[13,94]</sup>认为这些东部盆地属于西太平洋汇聚板缘型地热域,渤海湾盆地济阳拗陷潜山分布带,干热岩资源条件相对最好,地质认识与资源分布较为清楚,具备开发干热岩的工程技术条件,资源开发依托的经济及市场条件较好,可以作为增强型地热系统试验的有利目标区。张英等<sup>[14]</sup>研究发现,渤海湾盆地中南部的冀中拗陷、黄骅拗陷、临清拗陷和济阳拗陷是干热

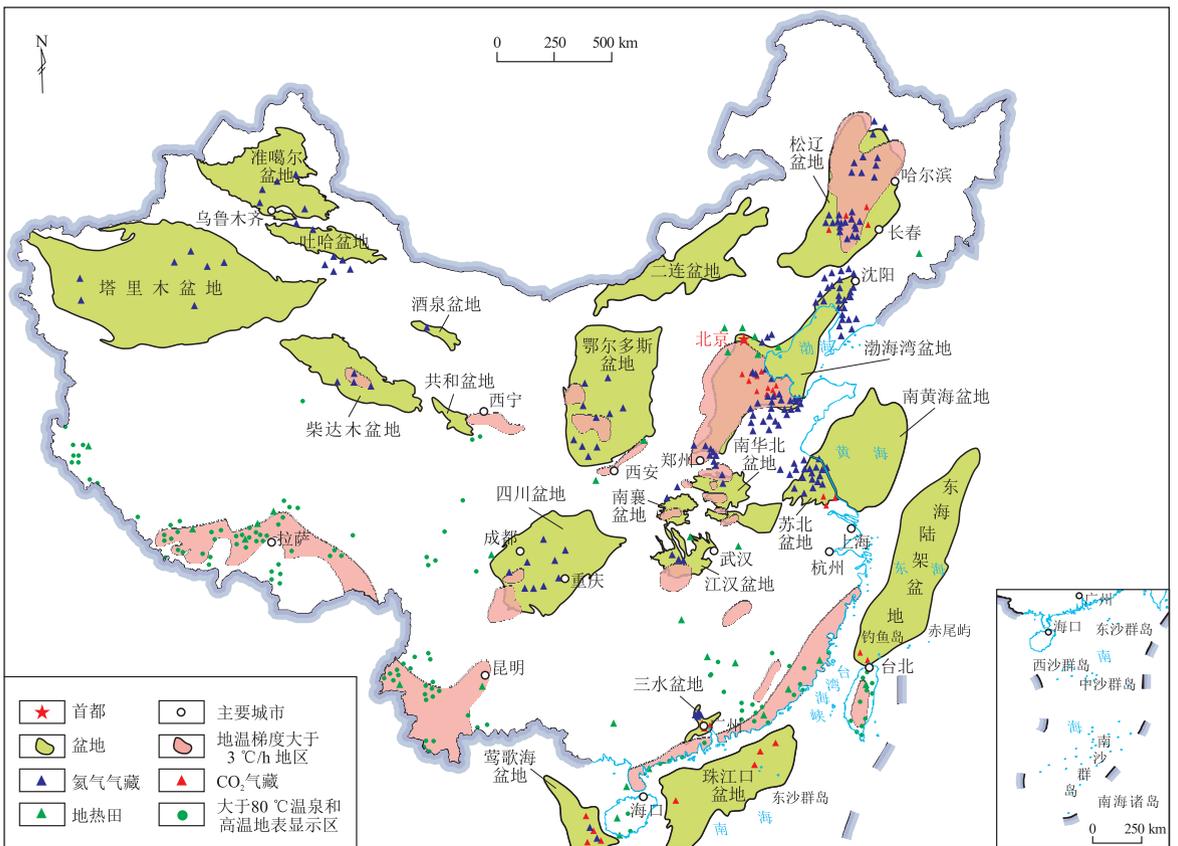


图2 中国氦气、二氧化碳与地热资源分布  
据文献[6,86-96]修改。

Fig.2 Distribution of helium, CO<sub>2</sub> and geothermal resources in China

岩地热资源的主要富集区,其中下古生界、中元古界和太古宇 3 套热储是渤海湾盆地中南部最具开发利用潜力的干热岩热储类型。我国沉积盆地型地热资源主要分布于东部中、新生代盆地,包括华北平原、江淮平原、松辽盆地等地区,这些大型沉积盆地热储多、厚度大且分布较广,随深度增加热储温度升高,赋存有大量的中低温热水资源,地热资源量折合标准煤 1.06 万亿吨,是我国重要的地热开发潜力区。京津冀地区基岩相关地热面积可达  $12 \times 10^4 \text{ km}^2$  [95],在黄河三角洲、长江三角洲等经济发达地区也都有分布(图 2),为能源清洁利用奠定了基础。

中国油气盆地中的共伴生资源尽管早已被关注,但投入的研究力度非常有限。对于这些资源的成因、分布、富集规律研究尚未系统展开,也缺乏针对性的勘察与评价方法,有效开发和规模利用明显不够。面临的科学问题包括:不同大地构造背景下的盆地深部,各种共伴生资源的成因机理是什么?成藏或成矿的主控因素是什么,如何建立地质模式?资源规模性聚集和高产条件有哪些?与油气存在什么共生、伴生关系?

### 3 科技攻关方向

深部地质作用是影响沉积盆地形成与演化过程的重要因素。在一些特殊大地构造背景与地质环境的盆地中,来自地壳深部或地幔的物质和能量以多种方式向盆地输入。来自沉积盆地基底以下幔源挥发性的流体以及板块俯冲过程中岩石脱水所产生的流体、深变质过程中脱水作用形成的流体或者受幔源热源以及壳内岩浆热源驱动的深循环流体中既包括 C、H、O、N、S 等稳定元素,也包含 He、Ne、Ar、Kr、Xe、Rn 等稀有气体。同时,深部流体既富含 Si、Al、Fe、Mn、Mg、P 等主量元素,也包含 V、Ni、Cr 等微量元素。源自壳、幔的深部流体从盆地外部迁移到盆地内部并与盆内围岩或流体发生的物理化学作用,表现出多种多样的有机—无机相互作用形式。这些深部物质和能量不但影响盆地中油气的资源规模与聚集效率,而且还对盆地中多种战略性的共、伴生的资源形成、富集产生显著的影响,如非生物气、氦气、干热岩等。这些资源对国家经济、社会发展和人民生活起着重要的作用。

随着国内外对深部地质资源的勘探开发逐渐取得了一系列的重大突破和发现,关于深层地质作用的研究得到的关注和重视也与日俱增。国际深部碳组织(DCO)2009 年开设深部能源专题(四大

专题之一),欧洲研究理事会(ERC)于 2019 年 12 月开始资助深部碳氢资源研究,彰显深部油气资源的探索仍然是国际前缘热点,也是研究地球深部地质过程的重要内容。根据《2014—2015 年深层油气地质学科发展报告》,我国陆上深层石油资源量 304 亿吨,占比 28%,天然气资源量 29.12 万亿方,占比 52%,截至 2015 年底,资源探明率分别是 8.8%和 9.6%,深层油气勘探程度低,勘探潜力巨大,是未来实现突破的重点领域,但同时也面临着巨大的挑战。深部地质作用对深层油气成藏和调整具有重要的影响,需要运用新的理论思路结合新的技术方法对以下几个方面的问题进行更深入的研究和探索。总体攻关思路为:从沉积盆地深部地质动力演化入手,围绕深部地质过程与资源效应这一核心科学问题,选择深部流体活跃的典型盆地为解剖对象,揭示深部层系物理化学作用机理,阐明不同深部地质过程对不同类型资源(油气、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、He、地热及干热岩)形成与聚集的控制机制,探索深部资源新领域。未来的主要攻关方向包括但不限于以下几个方面:

#### 3.1 深部地质动力学背景与地质作用机制研究

针对新生代受深大断裂影响的盆地和古老克拉通盆地,明确不同构造体制下的深部地质作用类型;明确制约盆地深部物质与能量传输的深部动力学过程与机制,以及在不同地质背景下表现出的差异性,尤其是对于深大断裂的区域构造样式、大地构造属性、形成时代、演化特征、动力学机制进行深入讨论,以探究深部断裂活动、岩浆活动等深部地质作用与深部壳幔活动的关联,及其对盆地的改造效应和改造机制;明确控制深部物质和能量向盆地输入的构造几何学、运动学和动力学特征。开展深部物质和能量向盆地输入的物理模拟和数值模拟,探讨盆地深层—超深层温压场和物质对油气及共伴生资源成藏、富集的影响。

#### 3.2 深层生烃动力学与生烃量定量研究

开展深部流体—岩石相互作用下烃源岩生烃仿真模拟实验,明确各种深层高温高压条件下生、排、滞、散烃机制。通过富氢流体( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2$ )与高演化烃源(干酪根、沥青)催化生烃实验和数值模拟,探索深部富氢流体参与下有机—无机复合生烃机理,对盆地中富氢流体的来源和形成机制进行深入探讨。同时,分析生烃模拟产物的地球化学特征,厘定加氢生烃机理,建立地球化学鉴别指标。定量分析深部富氢流体对古老高演化烃源加氢生烃贡献,重新认识、评价我国重点深层油气资源潜力。

### 3.3 深层储层发育与保持机理研究

探索深部流体沿深大断裂、不整合面和输导层自深部向浅部运移过程中Ca、Mg、Si等组分活化迁移机制,阐释热液溶蚀、白云岩化、硅化等储层发育机理和模式。通过针对高温高压条件下储层成岩作用的物理模拟和数值模拟实验,揭示富含CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S等不同热液流体参与下储层中方解石、白云石、长石等溶蚀—沉淀机制;明确不同矿物“溶蚀窗”(高溶蚀率优势深度范围)温度、压力和流体介质条件;明确高温高压流体—岩石相互作用对储层发育与保存的控制机理。通过成岩矿物流体溯源与定年研究,厘定成岩流体的阶段性演化规律,分析各期次成岩矿物的形成时间与区域应力场方向及构造运动的耦合关系,建立深层储层评价与预测方法。

### 3.4 深层油气运移与聚集机理研究

结合区域构造演化背景、古地温场和沉积埋藏史恢复结果,明确油气转化的关键时期和基本规律。开展深部异常热事件和深埋过程对油气相态转化和液态油保存的控制机理研究,通过深层油气运移动力学物理与数值模拟实验,进一步明确深层油气运移输导体系和主要动力。开展深层温压场预测与古温压场恢复技术研究,有效预测深层油气相态。开展典型深层油气成藏过程解剖,恢复油气生成与运移的动力学过程。建立深部地质作用活跃区针对性的地质分析与目标评价方法。

### 3.5 深层共伴生资源差异性富集机理研究

开展深部构造动力环境、深部地质过程、深部流体属性、资源类型与富集程度等多方面的综合对比分析,揭示不同类型资源在盆内富集的深部地质过程及其差异性富集机理。开展深部流体示踪与深部有机—无机相互作用模拟研究,明确深部地质作用对He、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、地热及干热岩等资源形成和富集的影响机制;明确资源潜力、分布规律和有利区带,建立预测与评价方法体系。

我国不同沉积盆地具有不同的深部构造环境和深部地质作用过程,其深部流体特征及对油气资源富集成藏影响也因而具有显著的差异性。通过开展深部地质作用过程与资源效应方面的研究,探索深部地质作用对沉积盆地中多类型资源形成与分布的控制机制,阐明深部流体携带物质与能量的成藏效应和资源潜力。通过攻关,不但能够丰富完善深部流体影响下盆地油气形成和聚集理论与评价方法,而且为深部其他战略性资源(非生物气、氦气和干热岩)的评价与勘探提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孙龙德,邹才能,朱如凯,等.中国深层油气形成、分布与潜力分析[J].石油勘探与开发,2013,40(6):641-649.  
SUN Longde, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.
- [3] 贾承造,庞雄奇.深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J].石油学报,2015,36(12):1457-1469.  
JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [4] 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.
- [5] 何治亮,张军涛,丁茜,等.深层—超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J].石油与天然气地质,2017,38(4):633-644.  
HE Zhiliang, ZHANG Juntao, DING Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 633-644.
- [6] 徐永昌,沈平,陶明信,等.中国含油气盆地天然气中氦同位素分布[J].科学通报,1994,39(16):1505-1508.  
XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Helium isotope distribution of natural gases in oil and gas bearing basins of China[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(16): 1505-1508.
- [7] 戴金星,戴春森,宋岩,等.中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征[J].中国海上油气(地质),1994,8(4):215-222.  
DAI Jinxing, DAI Chunsen, SONG Yan, et al. Inorganic genetic carbon dioxide gas accumulations and their characteristics in east part of China[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, 8(4): 215-222.
- [8] LIU Quanyou, DAI Jinxing, JIN Zhijun, et al. Abnormal carbon and hydrogen isotopes of alkane gases from the Qingshen gas field, Songliao Basin, China, suggesting abiogenic alkanes? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 115: 285-297.
- [9] ZHAO Wenzhi, WEI Guoqi, YANG Wei, et al. Discovery of Wanyuan-Dazhou intracratonic rift and its significance for gas exploration in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 697-707.
- [10] 焦方正.塔里木盆地顺托果勒地区北东走向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.
- [11] 顾忆,黄继文,贾存善,等.塔里木盆地海相油气成藏研究进

- 展[J].石油实验地质,2020,42(1):1-12.
- GU Yi, HUANG Jiwen, JIA Cunshan, et al. Research progress on marine oil and gas accumulation in Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 1-12.
- [12] 汪集喏, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
- WANG Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25-31.
- [13] 何治亮, 张英, 冯建赞, 等. 基于工程开发原则的干热岩目标区分类与优选[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 81-93.
- HE Zhiliang, ZHANG Ying, FENG Jianyun, et al. Classification of geothermal resources based on engineering considerations and HDR EGS site screening in China [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 27(1): 81-93.
- [14] 张英, 冯建赞, 罗军, 等. 渤海湾盆地中南部干热岩选区方向[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 35-47.
- ZHANG Ying, FENG Jianyun, LUO Jun, et al. Screening of hot dry rock in the south-central part of the Bohai Bay Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 35-47.
- [15] 毛景文, 李晓峰. 深部流体及其与成矿成藏关系研究现状[J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 520-532.
- MAO Jingwen, LI Xiaofeng. Mantle-derived fluids in relation to ore-forming and oil-forming processes [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(4): 520-532.
- [16] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence [M]. 2nd ed. New York: Springer, 1984.
- [17] DIECKMANN V, SCHENK H J, HORSFIELD B, et al. Kinetics of petroleum generation and cracking by programmed-temperature closed-system pyrolysis of Toarcian Shales [J]. Fuel, 1998, 77(1/2): 23-31.
- [18] 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.
- [19] BRAUN R L, BURNHAM A K. Mathematical model of oil generation, degradation, and expulsion [J]. Energy and Fuels, 1990, 4(2): 132-146.
- [20] CHIARAMONTE M A, NOVELLI L. Organic matter maturity in northern Italy: some determining agents [J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/3): 281-290.
- [21] MCTAVISH R A. Pressure retardation of vitrinite diagenesis, offshore north-west Europe [J]. Nature, 1978, 271(16): 648-650.
- [22] FOUCH T D, NUCCIO V F, ANDERS D E, et al. Green River petroleum system, Uinta Basin, Utah, U.S.A [C]//MAGOON L B, DOW W G. The petroleum system from source to trap: AAPG memoir 60. Tulsa: AAPG, 1994: 399-421.
- [23] 查明, 曲江秀, 张卫海. 异常高压与油气成藏机理[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 19-23.
- ZHA Ming, QU Jiangxiu, ZHANG Weihai. The relationship between overpressure and reservoir forming mechanism [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(1): 19-23.
- [24] PRICE L C, WENGER L M. The influence of pressure on petroleum generation and maturation as suggested by aqueous pyrolysis [J]. Organic Geochemistry, 1992, 19(1/3): 141-159.
- [25] 郝芳, 邹华耀, 方勇. 隐蔽油气藏研究的难点和前沿[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 481-488.
- HAO Fang, ZOU Huayao, FANG Yong. The difficulties and frontiers of subtle oil/gas reservoir research [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 481-488.
- [26] 彭金宁, 罗开平, 刘光祥, 等. 四川盆地热演化异常成因及热场演化特征分析[J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 605-612.
- PENG Jinning, LUO Kaiping, LIU Guangxiang, et al. Causes of abnormal thermal evolution and characteristics of thermal evolution in Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(5): 605-612.
- [27] 任战利, 崔军平, 祁凯, 等. 深层、超深层温度及热演化历史对油气相态与生烃历史的控制作用[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 22-30.
- REN Zhanli, CUI Junping, QI Kai, et al. Control effects of temperature and thermal evolution history of deep and ultra-deep layers on hydrocarbon phase state and hydrocarbon generation history [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 22-30.
- [28] LIU Quanyou, ZHU Dongya, MENG Qingqiang, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(3): 507-528.
- [29] SCHIMMELMANN A, BOUDOU J P, LEWAN M D, et al. Experimental controls on D/H and <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratios of kerogen, bitumen and oil during hydrous pyrolysis [J]. Organic Geochemistry, 2001, 32(8): 1009-1018.
- [30] 刘文汇, 张殿伟, 王晓锋. 加氢和 TSR 反应对天然气同位素组成的影响[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2237-2242.
- LIU Wenhui, ZHANG Dianwei, WANG Xiaofeng. Influence of hydrogenation and TSR (thermochemical sulfate reduction) to natural gas isotopic composition [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2237-2242.
- [31] JIN Zhijun, ZHANG Liuping, YANG Lei, et al. A preliminary study of mantle-derived fluids and their effects on oil/gas generation in sedimentary basins [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 41(1/3): 45-55.
- [32] EHRENBERG S N, NADEAU P H. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: a global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(4): 435-445.
- [33] 蒋凌志, 顾家裕, 郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 13-18.
- JIANG Lingzhi, GU Jiayu, GUO Bincheng. Characteristics and mechanism of low permeability elastic reservoir in Chinese petroliferous basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 13-18.
- [34] 庞雄奇, 汪文洋, 汪英勋, 等. 含油气盆地深层与中浅层油气成藏条件和特征差异性比较[J]. 石油学报, 2015, 36(10):

- 1167-1187.
- PANG Xiongqi, WANG Wenyang, WANG Yingxun, et al. Comparison of otherness on hydrocarbon accumulation conditions and characteristics between deep and middle-shallow in petroliferous basins [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(10): 1167-1187.
- [35] 顾忆, 万晓璐, 黄继文, 等. “大埋深8 高压力”条件下塔里木盆地超深层油气勘探前景 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(2): 157-164.
- GU Yi, WAN Yanglu, HUANG Jiwen, et al. Prospects for ultra-deep oil and gas in the “deep burial and high pressure” Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(2): 157-164.
- [36] 尚凯. 塔中北坡超深层灰岩储集空间类型及储层分类 [J]. *特种油气藏*, 2018, 25(5): 65-70.
- SHANG Kai. Reservoir space characterization and classification of the ultra-deep limestone reservoirs in the northern slope of central Tarim Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(5): 65-70.
- [37] 罗晓容, 张立宽, 付晓飞, 等. 深层油气成藏动力学研究进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(5): 876-889.
- LUO Xiaorong, ZHANG Likuan, FU Xiaofei, et al. Advances in dynamics of petroleum migration and accumulation in deep basins [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(5): 876-889.
- [38] LANDER R H, WALDERHAUG O. Predicting porosity through simulating sandstone compaction and quartz cementation [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(3): 433-449.
- [39] 操应长, 蕙克来, 王健, 等. 砂岩机械压实与物性演化成岩模拟实验初探 [J]. *现代地质*, 2011, 25(6): 1152-1158.
- CAO Yingchang, XI Kelai, WANG Jian, et al. Preliminary discussion of simulation experiments on the mechanical compaction and physical property evolution of sandstones [J]. *Geoscience*, 2011, 25(6): 1152-1158.
- [40] 钟大康, 朱筱敏, 王红军. 中国深层优质碎屑岩储层特征与形成机理分析 [J]. *中国科学(D辑 地球科学)*, 2008, 38(S1): 11-18.
- ZHONG Dakang, ZHU Xiaomin, WANG Hongjun. Characteristics and genetic mechanism of deep-buried clastic reservoir in China [J]. *Science in China (Series D Earth Sciences)*, 2008, 51(2): 11-19.
- [41] 王招明. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律 [J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(2): 153-166.
- WANG Zhaoming. Formation mechanism and enrichment regularities of Kelasu subsalt deep large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(2): 153-166.
- [42] BARCLAY S A, WORDEN R H. Geochemical modelling of diagenetic reactions in a sub-arkosic sandstone [J]. *Clay Minerals*, 2000, 35(1): 57-57.
- [43] 黄思静, 谢连文, 张萌, 等. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(3): 273-281.
- HUANG Sijing, XIE Lianwen, ZHANG Meng, et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2004, 31(3): 273-281.
- [44] 钟大康, 朱筱敏, 李树静, 等. 早期碳酸盐胶结作用对砂岩孔隙演化的影响: 以塔里木盆地满加尔凹陷志留系砂岩为例 [J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 885-890.
- ZHONG Dakang, ZHU Xiaomin, LI Shujing, et al. Influence of early carbonate cementation on the evolution of sandstones: a case study from Silurian sandstones of Manjiaer Depression, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 885-890.
- [45] BLOCH S, LANDER R H, BONNELL L. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: origin and predictability [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(2): 301-328.
- [46] 石良, 金振奎, 闫伟, 等. 异常高压对储集层压实和胶结作用的影响: 以渤海湾盆地渤中凹陷西北次凹为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 310-318.
- SHI Liang, JIN Zhenkui, YAN Wei, et al. Influence of overpressure on reservoir compaction and cementation: a case from northwestern subsag, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 310-318.
- [47] 李会军, 吴泰然, 吴波, 等. 中国优质碎屑岩深层储层控制因素综述 [J]. *地质科技情报*, 2004, 23(4): 76-82.
- LI Huijun, WU Tairan, WU Bo, et al. Distribution and controlling factors of high quality clastic deeply buried reservoirs in China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4): 76-82.
- [48] 林潼, 李文厚, 孙平, 等. 新疆准噶尔盆地南缘深层有利储层发育的影响因素 [J]. *地质通报*, 2013, 32(9): 1461-1470.
- LIN Tong, LI Wenhou, SUN Ping, et al. Factors influencing deep favorable reservoirs on the southern margin of Junggar Basin, Xinjiang Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(9): 1461-1470.
- [49] 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等. 超深层裂缝—孔隙型致密砂岩储集层表征与评价: 以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2): 158-167.
- ZHANG Huiliang, ZHANG Ronghu, YANG Haijun, et al. Characterization and evaluation of ultra-deep fracture-pore tight sandstone reservoirs: a case study of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kelasu Tectonic Zone in Kuqa Foreland Basin, Tarim, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 158-167.
- [50] 远光辉, 操应长, 蕙克来, 等. 东营凹陷北带古近系碎屑岩储层长石溶蚀作用及其物性响应 [J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 853-866.
- YUAN Guanghui, CAO Yingchang, XI Kelai, et al. Feldspar dissolution and its impact on physical properties of Paleogene clastic reservoirs in the northern slope zone of the Dongying Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 853-866.
- [51] MOORE C H, DRUCKMAN Y. Burial diagenesis and porosity evolution, Upper Jurassic Smackover, Arkansas and Louisiana [J]. *AAPG Bulletin*, 1981, 65(4): 597-628.
- [52] JAMESON J. Models of porosity formation and their impact on

- reservoir description, Lisburne Field, Prudhoe Bay, Alaska [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(11): 1651-1678.
- [53] HE Zhiliang, DING Qian, WO Yujin, et al. Experiment of carbonate dissolution; implication for high quality carbonate reservoir formation in deep and ultradeep basins [J]. Geofluids, 2017, 2017(2): 8439259.
- [54] 丁茜, 何治亮, 沃玉进, 等. 高温高压条件下碳酸盐岩溶蚀过程控制因素 [J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 784-791. DING Qian, HE Zhiliang, WO Yujin, et al. Factors controlling carbonate rock dissolution under high temperature and pressure [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 784-791.
- [55] 范明, 何治亮, 李志明, 等. 碳酸盐岩溶蚀窗的形成及地质意义 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 499-505. FAN Ming, HE Zhiliang, LI Zhiming, et al. Dissolution window of carbonate rocks and its geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 499-505.
- [56] 何治亮, 魏修成, 钱一雄, 等. 海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 489-498. HE Zhiliang, WEI Xiucheng, QIAN Yixiong, et al. Forming mechanism and distribution prediction of quality marine carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 489-498.
- [57] TAYLOR T R, GILES M R, HATHON L A, et al. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction; models, myths, and reality [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1093-1132.
- [58] EHRENBERG S N, WALDERHAUG O, BJØRLYKKE K. Carbonate porosity creation by mesogenetic dissolution; reality or illusion? [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(2): 217-233.
- [59] CAI Chunfang, HE Wenxian, JIANG Lei, et al. Petrological and geochemical constraints on porosity difference between Lower Triassic sour- and sweet-gas carbonate reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 56: 34-50.
- [60] 马永生, 郭彤楼, 朱光有, 等. 硫化氢对碳酸盐储层溶蚀改造作用的模拟实验证据: 以川东飞仙关组为例 [J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 136-141. MA Yongsheng, GUO Tonglou, ZHU Guangyou, et al. Simulated experiment evidences of the corrosion and reform actions of H<sub>2</sub>S to carbonate reservoirs; an example of Feixianguan Formation, east Sichuan [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1): 178-183.
- [61] HAO Fang, ZHANG Xuefeng, WANG Cunwu, et al. The fate of CO<sub>2</sub> derived from thermochemical sulfate reduction (TSR) and effect of TSR on carbonate porosity and permeability, Sichuan Basin, China [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 141: 154-177.
- [62] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响 [J]. 地质学报, 2006, 80(2): 245-253. JIN Zhijun, ZHU Dongya, HU Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2): 245-253.
- [63] 赵文智, 沈安江, 郑剑锋, 等. 塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义 [J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(9): 1925-1939. ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, et al. The porosity origin of dolostone reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos basins and its implication to reservoir prediction [J]. Science China (Earth Sciences), 2014, 57(10): 2498-2511.
- [64] CANTRELL D, SWART P, HAGERTY R. Genesis and characterization of dolomite, Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia [J]. GeoArabia, 2004, 9(2): 11-36.
- [65] LIU Shugen, HUANG Wenming, JANSAN L F, et al. Hydrothermal dolomite in the Upper Sinian (Upper Proterozoic) Dengying Formation, East Sichuan Basin, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5): 1466-1487.
- [66] 蒋裕强, 谷一凡, 李开涛, 等. 四川盆地中部中二叠统热液白云岩储渗空间类型及成因 [J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 16-24. JIANG Yuqiang, GU Yifan, LI Kaihong, et al. Space types and origins of hydrothermal dolomite reservoirs in the Middle Permian strata, central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 16-24.
- [67] 何治亮, 马永生, 张军涛, 等. 中国的白云岩与白云岩储层: 分布、成因与控制因素 [J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 1-14. HE Zhiliang, MA Yongsheng, ZHANG Juntao, et al. Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 1-14.
- [68] 何治亮, 云露, 尤东华, 等. 塔里木盆地阿—满过渡带超深层碳酸盐岩储层成因与分布预测 [J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 13-21. HE Zhiliang, YUN Lu, YOU Donghua, et al. Genesis and distribution prediction of the ultra-deep carbonate reservoirs in the transitional zone between the Awati and Manjiaer depressions, Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 13-21.
- [69] ZHU Dongya, MENG Qingqiang, JIN Zhijun, et al. Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim Basin, northwestern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 232-244.
- [70] 胡安平, 潘立银, 郝毅, 等. 四川盆地二叠系栖霞组、茅口组白云岩储层特征、成因和分布 [J]. 海相油气地质, 2018, 23(2): 39-52. HU Anping, PAN Liyin, HAO Yi, et al. Origin, characteristics and distribution of dolostone reservoir in Qixia Formation and Maokou Formation, Sichuan Basin, China [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2018, 23(2): 39-52.
- [71] LAVOIE D, CHI Guoxiang, BRENNAN-ALPERT P, et al. Hydrothermal dolomitization in the Lower Ordovician romaine formation of the Anticosti Basin; significance for hydrocarbon exploration [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2005, 53(4): 454-471.
- [72] DAVIES G R, SMITH JR L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies; an overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [73] 陈代钊. 构造—热液白云岩化作用与白云岩储层 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 614-622. CHEN Daizhao. Structure-controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 614-622.
- [74] MACHEL H G, LONNEE J. Hydrothermal dolomite: a product of poor definition and imagination [J]. Sedimentary Geology, 2002,

- 152(3/4):163-171.
- [75] SVERJENSKY D A, GARVEN G. Tracing great fluid migrations[J]. *Nature*, 1992, 356(6369):481-482.
- [76] GARVEN G. Continental-scale groundwater flow and geologic processes[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1995, 23(1):89-117.
- [77] 包友书. 济阳拗陷超压和应力场对页岩油富集的影响[J]. *断块油气田*, 2018, 25(5):585-588.  
BAO Youshu. Influence of overpressure and stress on shale oil enrichment in Jiyang Depression[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(5):585-588.
- [78] 郝芳, 邹华耀, 方勇, 等. 断—压双控流体流动与油气幕式快速成藏[J]. *石油学报*, 2004, 25(6):38-43.  
HAO Fang, ZOU Huayao, FANG Yong, et al. Overpressure-fault controlled fluid flow and episodic hydrocarbon accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(6):38-43.
- [79] 朱联强, 袁海锋, 林雪梅, 等. 四川盆地安岳构造寒武系龙王庙组成岩矿物充填期次及油气成藏[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(6):812-820.  
ZHU Lianqiang, YUAN Haifeng, LIN Xuemei, et al. Diagenesis and hydrocarbon accumulation of the Cambrian Longwangmiao Formation in Anyue, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(6):812-820.
- [80] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5):878-888.  
DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5):878-888.
- [81] MCKIRDY D M, CHIVAS A R. Nonbiodegraded aromatic condensate associated with volcanic supercritical carbon dioxide, Otway Basin; implications for primary migration from terrestrial organic matter[J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18(5):611-627.
- [82] BONDAR E, KOEL M. Application of supercritical fluid extraction to organic geochemical studies of oil shales[J]. *Fuel*, 1998, 77(3):211-213.
- [83] ZHU Dongya, MENG Qingqiang, LIU Quanyou, et al. Natural enhancement and mobility of oil reservoirs by supercritical CO<sub>2</sub> and implication for vertical multi-trap CO<sub>2</sub> geological storage[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 161:77-95.
- [84] SIMONEIT B R T, LONSDALE P F. Hydrothermal petroleum in mineralized mounds at the seabed of Guaymas Basin [J]. *Nature*, 1982, 295(5846):198-202.
- [85] HU Wenxuan, JIN Zhijun, SONG Yucai, et al. Theoretical calculation model of heat transfer for deep-derived supercritical fluids with a case study[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1):221-229.
- [86] 徐永昌. 天然气中氮同位素分布及构造环境[J]. *地学前缘*, 1997, 4(3/4):185-190.  
XU Yongchang. Helium isotope distribution of natural gasses and its structural setting [J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(3/4):185-190.
- [87] 张雪, 刘建朝, 李荣西, 等. 中国富氦天然气资源研究现状与进展[J]. *地质通报*, 2018, 37(2/3):476-486.  
ZHANG Xue, LIU Jianchao, LI Rongxi, et al. President situation and progress in the study of helium gas resources in China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(2/3):476-486.
- [88] WANG Yibo, HU Shengbiao, WANG Zhuting, et al. Heat flow, heat production, thermal structure and its tectonic implication of the southern Tan-Lu Fault Zone, East-Central China[J]. *Geothermics*, 2019, 82:254-266.
- [89] 陶小晚, 李建忠, 赵力彬, 等. 我国氦气资源现状及首个特大型富氦储量的发现: 和田河气田[J]. *地球科学*, 2019, 44(3):1024-1041.  
TAO Xiaowan, LI Jianzhong, ZHAO Libin, et al. Helium resources and discovery of first supergiant helium reserve in China: Hetianhe Gas Field[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3):1024-1041.
- [90] 毛翔, 国殿斌, 罗璐, 等. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析[J]. *地质论评*, 2019, 65(6):1462-1472.  
MAO Xiang, GUO Dianbin, LUO Lu, et al. The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background[J]. *Geological Review*, 2019, 65(6):1462-1472.
- [91] LLANOS E M, ZARROUK S J, HOGARTH R A. Simulation of the habanero enhanced geothermal system (EGS), Australia [C]//Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 2015.
- [92] RUTQVIST J, JEANNE P, DOBSON P F, et al. The northwest geysers EGS demonstration project, California-part 2: modeling and interpretation[J]. *Geothermics*, 2016, 63:120-138.
- [93] KOELBEL T, GENTER A. Enhanced geothermal systems: the Soutz-sous-Forêts project [C]//Proceedings in Energy. Cham: Springer International Publishing, 2017:243-248.
- [94] 何治亮, 冯建赞, 张英, 等. 试论中国地热单元分级分类评价体系[J]. *地学前缘*, 2017, 24(3):168-179.  
HE Zhiliang, FENG Jianzan, ZHANG Ying, et al. A tentative discussion on an evaluation system of geothermal unit ranking and classification in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3):168-179.
- [95] 王晓东, 李祥新, 宫进忠, 等. 京津冀基岩区地热资源远景的地球化学区划[J]. *物探与化探*, 2019, 43(6):1246-1253.  
WANG Xiaodong, LI Xiangxin, GONG Jinzhong, et al. Geochemical regional planning of geothermal resource prospect in Beijing-Tianjin-Hebei bedrock region[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(6):1246-1253.
- [96] 赵斐宇, 姜素华, 李三忠, 等. 中国东部无机CO<sub>2</sub>气藏与(古)太平洋板块俯冲关联[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4):370-384.  
ZHAO Feiyu, JIANG Suhua, LI Sanzhong, et al. Correlation of inorganic CO<sub>2</sub> reservoirs in East China to subduction of (Paleo-) Pacific Plate [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4):370-384.