

文章编号: 0253-2697(2022)06-0727-33 DOI:10.7623/syxb202206001

全油气系统定量评价:方法原理与实际应用

庞雄奇^{1,2} 贾承造^{1,3} 宋岩^{1,4} 陈君青^{1,2} 施砍园^{1,2} 庞礴^{1,2} 姜林^{1,3} 姜福杰^{1,2}
陈冬霞^{1,2} 庞宏^{1,2} 胡涛^{1,2} 张思玉^{1,2} 孙耀玺^{1,2}

(1. 油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;
3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 4. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院 北京 102249)

摘要:人类对油气的勘探开发和利用已超过 150 年,油气勘探进展大致划分为油气苗找油气、圈闭找油气、油气系统理论找油气和非常规油气藏勘探 4 个阶段。非常规油气勘探是对常规油气勘探的重大突破,在经典油气地质理论认为不可能形成油气藏的禁区发现了大量连续分布的非常规油气藏。非常规油气藏虽然需要采取特殊措施才能获得有效产能,但具有广泛连续的分布特征且资源潜力巨大,与常规油气藏的最大差异在于其运聚成藏不受浮力主导和圈闭控制。当前,非常规油气勘探在实践中遇到了一系列重大挑战,包括非常规与常规油气藏的差异性表征困难、无统一分类方案、分布边界不清、无量化判别标准、关联性不明、尚未建立起联合成因模式等。全油气系统概念的提出为复杂地质条件下常规和非常规油气资源的勘探开发提供了全新思路和新的理论指导,其研究内容涉及油气成藏全要素、形成演化全过程、资源分布全系列、预测评价全方位。基于全油气系统的学术思想,在国家重点基础研究发展计划(“973”计划)等项目课题的资助下,以油气门限控藏研究为切入点,重点剖析了中国 6 个代表性盆地(塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和松辽盆地)12 237 口探井中 80 762 个常规和非常规油气藏的钻探结果,并与北美地区已发现的常规和非常规油气藏进行对比,结合全球 1 186 个盆地已探明的 52 926 个油气藏的差异性统计分析,在全油气系统定量评价研究中取得了 4 方面成果:①发现全油气系统内普遍存在 3 类 10 种油气门限,揭示其成因机制和控油气特征,提出了研究方法和判别标准;②建立了油气运聚门限联合控油气资源形成分布模式,提出了有效资源量预测评价新方法;③建立了动力场控油气藏分布模式,提出了有利成藏领域和成藏区带预测评价新技术;④建立了分布门限组合控藏模式,研发了有利成藏区带和钻探目标优选新技术。全油气系统定量评价方法在常规和非常规油气藏成因分类、剩余资源预测、全球天然气水合物资源潜力评价等方面的应用成效展示了未来全油气系统研究的发展方向。

关键词:油气系统;全油气系统;油气门限;油气成藏;油气勘探;油气资源;含油气盆地

中图分类号:TE122.3 文献标识码:A

Quantitative evaluation of whole petroleum system: principle and application

Pang Xiongqi^{1,2} Jia Chengzao^{1,3} Song Yan^{1,4} Chen Junqing^{1,2} Shi Kanyuan^{1,2} Pang Bo^{1,2} Jiang Lin^{1,3}
Jiang Fujie^{1,2} Chen Dongxia^{1,2} Pang Hong^{1,2} Hu Tao^{1,2} Zhang Siyu^{1,2} Sun Yaoxi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China; 2. College of Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. PetroChina Research Institute of Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. Research Institute of Unconventional Oil and Gas Science and Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Human beings have been exploring, developing, and utilizing oil and gas resources for more than 150 years. The progress of oil and gas exploration can be roughly divided into four stages: oil and gas exploration from seepage situations, trap exploration, exploration by petroleum system theory, and unconventional oil and gas reservoir exploration. Unconventional oil and gas exploration is a breakthrough to conventional oil and gas accumulation, by which a lot of continuously distributed unconventional oil and gas reservoirs have been discovered in the forbidden area where it is impossible to form oil and gas reservoirs according to the classical petroleum geological theory. The unconventional oil and gas reservoir is characterized with extensive and continuous distribution and great potential for resources, but from which the effective capacity should be obtained by special measures. The biggest difference between unconventional and conventional oil and gas reservoirs is that unconventional migration and accumulation are neither dominated by buoyancy nor controlled by traps. At present, unconventional oil and gas exploration has encountered a series of major challenges in practice, including the difficulty in characterizing the differences between unconventional and conventional oil and gas reservoirs, unclear distribution boundary, unclear correlation, and the lack of a unified classification scheme, quantitative criteria, and a joint ge-

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB201100)资助。

第一作者:庞雄奇,男,1961年8月生,1991年获中国地质大学博士学位,现为中国石油大学(北京)教授、博士生导师、学术委员会副主任,主要从事油气藏形成机制与分布规律、油气资源评价与油气田勘探的教学与科研工作。Email: pangxq@cup.edu.cn

通信作者:贾承造,男,1948年3月生,1987年获南京大学博士学位,现为中国科学院院士,主要从事构造地质学、石油地质学研究和油气勘探工作。Email: jiacz@petrochina.com.cn

netic model. The concept of the whole petroleum system provides new ideas and new theoretical guidance for the exploration and development of conventional and unconventional oil and gas resources under complex geological conditions. The research of the whole petroleum system includes the total factors of hydrocarbon accumulation, the whole process of formation and evolution, the full range of resource distribution, as well as the all-around prediction and evaluation. Based on the academic thought of the whole petroleum system, with the support of the National Basic Research Program of China (973 Program) and other projects, and taking the research of oil and gas thresholds-controlling accumulation as the breakthrough point, the drilling results of 80 762 conventional and unconventional oil and gas reservoirs in 12 237 exploratory wells in 6 representative basins in China (Tarim Basin, Junggar Basin, Sichuan Basin, Ordos Basin, Bohai Bay Basin, and Songliao Basin) are analyzed and compared with those of the conventional and unconventional oil and gas reservoirs found in North America. Further, in combination with the statistical analysis of the differences of 52 926 proven oil and gas reservoirs in 1 186 basins around the world, four achievements have been made in the quantitative evaluation of the whole petroleum system. (1) It has been found that there are three categories and 10 types of oil and gas thresholds in the whole petroleum system, the genetic mechanism and oil and gas control characteristics are revealed, and the research method and discrimination criteria are also put forward. (2) The formation and distribution model of hydrocarbon resources jointly controlled by oil and gas migration and accumulation thresholds is established, and a new method for predicting and evaluating effective resources is proposed. (3) A model of oil and gas reservoir distribution controlled by dynamic field is established, and a new technology for predicting and evaluating favorable accumulation fields and zones is also put forward. (4) A reservoir-controlling model based on the combination of distribution thresholds is established, and a new optimized technology of favorable accumulation zones and drilling targets is developed. The application results of the quantitative evaluation method of the whole petroleum system in the genetic classification of conventional and unconventional oil and gas reservoirs, the prediction of residual resources, and the evaluation of the potential of natural gas hydrate resources around the world show a development direction of the research of the whole petroleum system in the future.

Key words: petroleum system; whole petroleum system, oil and gas threshold; hydrocarbon accumulation; oil and gas exploration; oil and gas resources; petroliferous basin

引用: 庞雄奇, 贾承造, 宋岩, 陈君青, 施砍园, 庞礴, 姜林, 姜福杰, 陈冬霞, 庞宏, 胡涛, 张思玉, 孙耀玺. 全油气系统定量评价: 方法原理与实际应用[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 727-759.

Cite: PANG Xiongqi, JIA Chengzao, SONG Yan, CHEN Junqing, SHI Kanyuan, PANG Bo, JIANG Lin, JIANG Fujie, CHEN Dongxia, PANG Hong, HU Tao, ZHANG Siyu, SUN Yaoli. Quantitative evaluation of whole petroleum system: principle and application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 727-759.

1 油气勘探面临的重大挑战

1.1 油气勘探研究进展

自 1080 年发现并开始利用石油以来, 人类就在不断地研究石油的成藏机制与分布规律, 并利用相关研究成果指导勘探和提高勘探成效。油气资源的不断发现和应用带来了人类工业文明与社会繁荣。依据油气勘探理论的不同, 勘探研究进展可粗略分为油气苗找油气、圈闭找油气、油气系统理论找油气、非常规油气藏勘探 4 个阶段(图 1)。

1.1.1 油气苗找油气阶段(1080—1861 年)

这一阶段发生的具有历史意义的大事包括: 1080 年发现和利用石油和天然气^[1]; 1854 年, Frances Brewer 医生买下了发现油苗的西巴德农场, 并与其合伙人成立了世界上第一个石油公司——宾夕法尼亚岩石油公司(Pennsylvania Rock Oil Company), 于 1859 年 8 月 27 日在钻进到 21 m 深度时用蒸汽动力泵抽出石油。尽管石油界将美国的德雷克(Drake)油井看作世界上第一口油井, 并将其作为近代石油工业的

开端, 但实际上在中国、俄罗斯、罗马尼亚等国都有早于德雷克井的气井和油井, 如中国早在 1835 年就钻成了世界上超过千米的深井^[2]。油气苗是油气藏在形成演化过程中被溢散到地表的油气, 可为寻找油气藏提供直接线索。

1.1.2 圈闭找油气阶段(1861—1934 年)

这一阶段发生的具有历史意义的大事包括: 发现油气藏分布在构造高点, 提出背斜控藏学说^[3]; 从动力学原理上揭示背斜成藏机制, 提出浮力成藏理论^[4]; 系统地分析油气藏形成条件, 提出圈闭控藏模式^[5]; 提出油气藏和圈闭的分类方案^[6], 其中包括构造油气藏、地层或岩性油气藏、复合油气藏等不同类型, 这与后来较为完整的 Levorsen 等^[7]的分类大同小异。圈闭控藏理论为油气勘探提供了科学依据, 提高了勘探成效, 但该理论没有考虑油气来源等关键条件, 在指导油气勘探的过程中遇到了不少挑战和困难。

1.1.3 油气系统理论找油气阶段(1934—2000 年)

这一阶段发生的具有历史意义的大事包括: 系统地提出了石油有机成因学说^[8]; 建立了较为完整的干

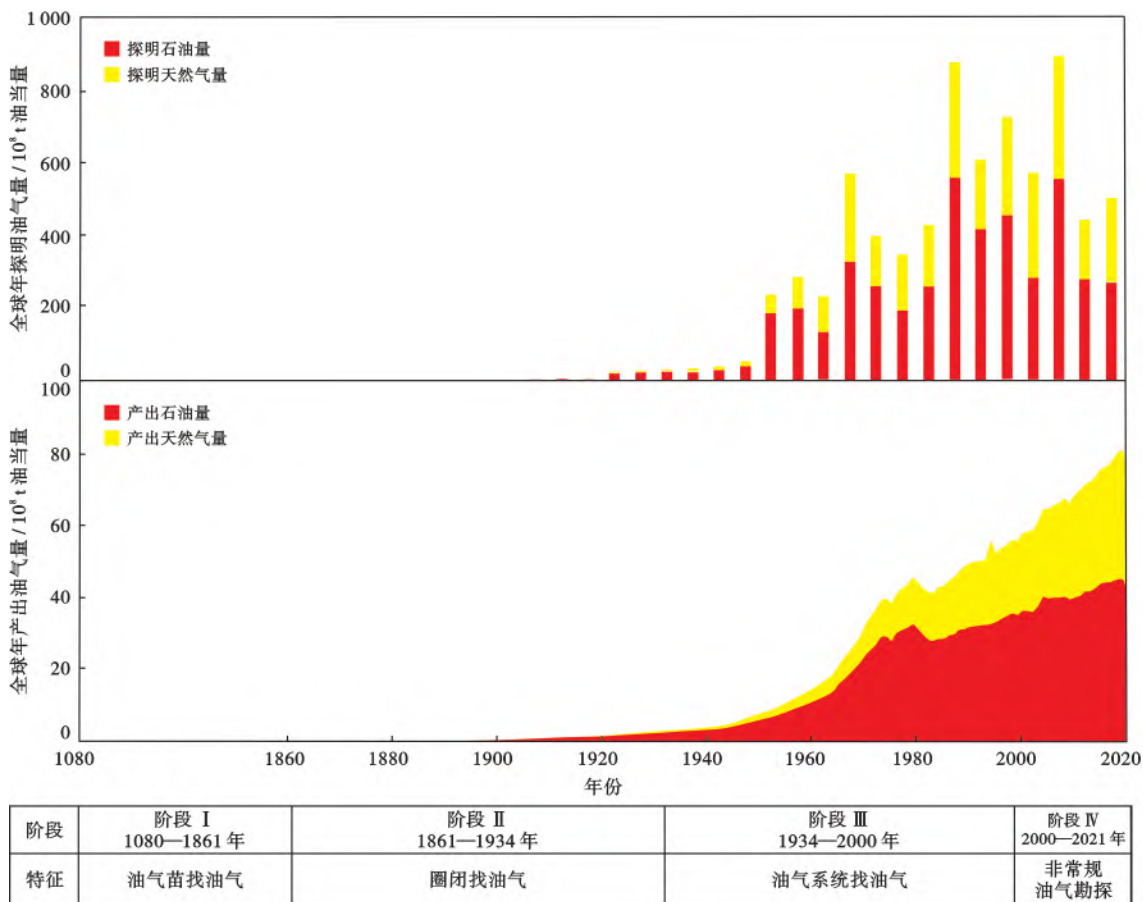


图 1 全球油气勘探的主要进展、阶段划分及不同时期发现与产出的油气量比较

Fig. 1 The main progress of global oil and gas exploration, stage division and comparison of oil and gas discovered and produced in different periods

酪根成烃模式^[9];提出了含油系统概念^[10];建立了油气系统成藏模式^[11]。油气系统理论将浮力成藏机制、圈闭控藏特征、有机生烃模式和源控油气藏分布理论等结合起来,较为完整地阐述了油气生成后从源岩到圈闭的成藏过程、动力机制和分布规律,奠定了现代油气地质理论的基础,为高效快速地勘探和发现油气资源提供了理论指导。然而,从源岩到圈闭的油气系统理论并不能阐述非常规油气资源的形成与分布特征,在常规和非常规油气资源深化勘探过程中也面临着一系列新的挑战。

1. 1. 4 非常规油气藏勘探阶段(2000—2020 年以后)

这一阶段的油气勘探发生了革命性变化。随着非常规油气资源的发现越来越多且在 2000 年随着水平井钻探而获得突破性进展[图 2(a)],其形成分布越来越不能依赖从源岩到圈闭的含油气系统理论进行阐述和指导。在进入这一阶段之前,继苏联学者对全球水合物资源潜力^[12]开展评价之后,美国成功实现了煤层气的商业试产^[13],加拿大学者在 Al-

bert 盆地发现了致密深盆气藏^[14]。而进入这一阶段之后,美国进一步实现了 Barnett 等页岩气的大规模开发^[15],非常规油气资源储量的增长已开始超过常规油气资源储量。这些变化使得勘探家们逐渐意识到地球上还存在更大规模的不受浮力控制的非常规油气资源。大规模开发非常规油气资源的大事还包括:提出了连续型非常规致密油气藏概念^[16],初步统一了非常规油气概念和术语;在 Bakken 页岩中段钻探的水平井发现了 Alm Coulee 油田^[17],并且应用水平井的分段压裂获得了 $110 \times 10^4 \text{t}$ 产量^[18];美国页岩油气产量在 2017 年第 1 次超过常规油气产量^[19]。非常规油气的发展是一个缓慢的过程,可以划分为探索发现、技术突破和快速发展 3 个阶段^[20][图 2(a)]。在近 20 年中,页岩油气的总产量增加了 20 多倍[图 2(b)],在这一过程中探井呈现数量不断减少、单井产量不断增加的总趋势[图 2(c)],反映出科学技术进步对非常规油气资源生产的巨大促进作用。

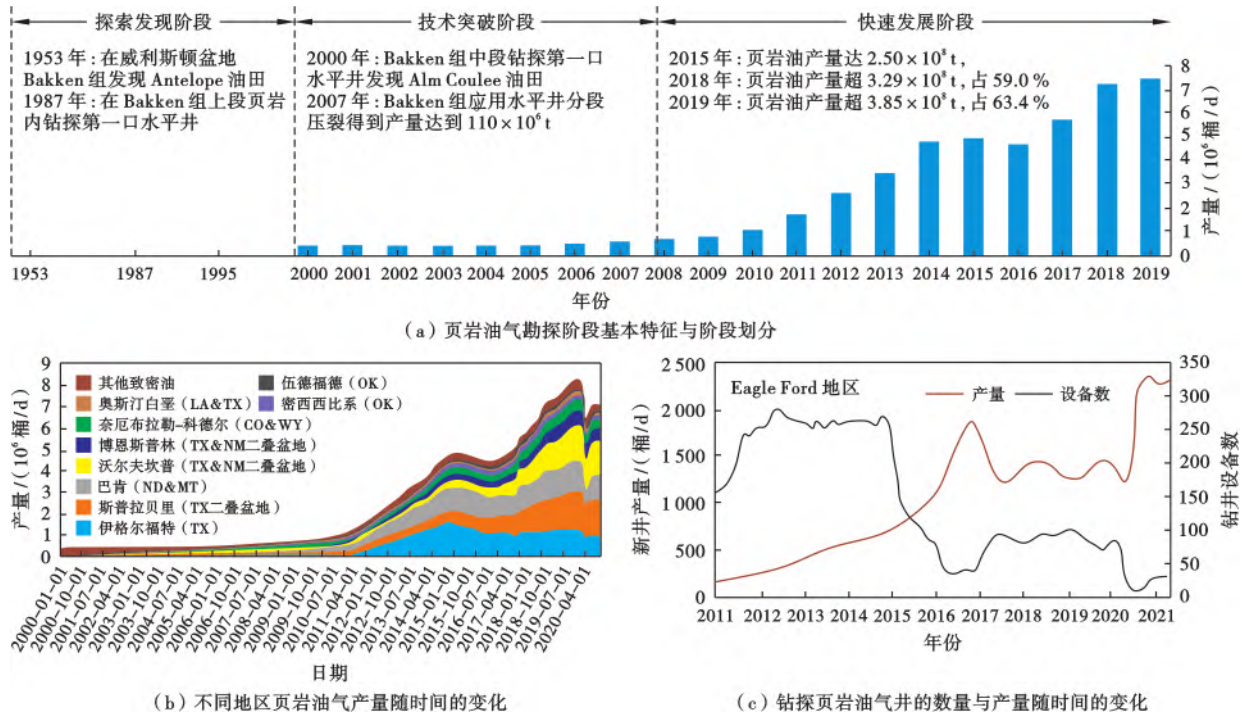


图2 美国页岩油勘探开发阶段与不同地区的产量变化(据文献[20]修改)

Fig. 2 Shale oil exploration and development stages in the United States and production variation in different regions

1.2 非常规油气勘探理论相较常规油气理论的重大突破

非常规油气的发现和大规模开采相较于常规油气勘探理论产生了重大突破^[21],拓展了油气勘探领域,使得油气资源量增加了2~5倍,展现出广阔的发展前景。

1.2.1 非常规油气勘探和非常规油气藏的基本概念

非常规油气勘探是指在经典油气地质理论认为不可能形成油气藏的领域开展的找油气活动,主要寻找非常规油气藏。非常规油气藏泛指与常规油气藏特征不同且需要采取特殊措施才能获得工业产能的油气藏^[22],包括致密深盆油气藏^[14]、盆地中心油气藏^[23]、向斜油气藏^[24]、致密油气藏^[25]、根源油气藏^[26]、页岩油气藏^[27]、稠油沥青^[28-29]、煤层油气藏^[30]、天然气水合物^[31]等。这些油气藏与常规油气藏相比有3个特点:①产能非常低,通常需要采取特殊的工艺措施才能获得商业产能;②介质条件通常非常致密,需要采取压裂等改造措施才能使内部的油气得到释放和开采;③在自然界中的分布呈现出与常规油气藏完全不同的特征,主要表现为不受圈闭构造控制。基于这些特征,有学者给其取了一个容易理解和记忆的名称——连续型油气藏^[32]。连续型油气藏是一个泛指的俗称,依据动力学机制的不同还可以进行细分^[33]。

1.2.2 非常规油气成藏理论相较常规油气勘探理论的重大突破

非常规油气藏相较于常规油气藏的突破表现在油

气藏产状特征、形成条件、成因机制、分布规律等多个方面^[34-35]。常规与非常规油气藏的形成分布至少表现出4方面21点差异(表1)。

(1) 产状特征差异

常规油气藏通常具有“四高一分离”的产状特征,即高点汇聚、高位封盖、高孔富集、高压成藏、源与藏彼此分离;非常规致密油气藏具有“四低一紧邻”的产状特征,即低凹汇聚、低位倒置、低孔聚集、低压稳定、源与藏彼此紧邻;非常规页岩油气藏具有“源-储一体、广泛致密、连续分布、低渗低产”等基本特征。常规油气藏的开发在一般地质条件下可以获得自然产能,而非非常规油气藏的开发通常需要采取酸化和压裂等改造措施。

(2) 形成条件差异

常规油气藏的形成条件可以概括为“生、储、盖、运、圈、保”6方面,缺一不可。非常规油气藏的形成同样受这6方面条件影响,但重要性有很大不同,且有些并非必不可少。例如,盖层对常规油气藏的形成起保护作用,但对深盆油气藏的形成有时并非必不可少;运移对常规油气成藏非常重要,但对页岩油气藏的形成有时也并非必不可少;圈闭对常规油气成藏有重要作用,但对致密油气藏和页岩油气藏的形成有时也并非必不可少。

(3) 动力机制差异

常规油气藏的形成受浮力主导,而非非常规油气藏

表 1 含油气盆地内常规与非常规油气藏形成的地质特征、环境条件及动力机制的差异性对比
Table 1 Comparison of geological characteristics, environmental conditions, and dynamic mechanism between conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs formation in petroliferous basins

比较内容		常规油气藏	非常规油气藏
产状特征	构造	主要分布在构造高部位	主要分布在构造低部位
	盖层	没有盖层不能形成	没有盖层有时也可以形成
	压力	普遍呈现出高压特征	压力变化大, 负压有利于油气藏保存
	孔渗性	储层普遍具有高孔高渗特征	储层普遍具有低孔低渗特征
	源岩	源与藏通常呈现分离状态	源与藏通常呈现紧邻接触状态
形成条件	油气生成	储层致密前源岩排烃量形成常规油气藏	储层致密后源岩排烃量形成非常规油气藏
	油气储集	分布在高孔高渗储层内	分布在低孔低渗储层内
	油气封盖	盖层对油气藏形成起决定性作用	盖层对油气藏形成不起决定性作用
	油气运移	油气发生较长距离运移导致源/藏分离	油气没有发生长距离运移而导致源/藏紧邻
	油气圈闭	油气分布受圈闭构造控制	油气分布不受圈闭控制
	油气保存	构造变动破坏圈闭完整性从而破坏油气藏	构造变动破坏储层致密性从而破坏油气藏
动力机制	浮力	起主导作用	不起主导作用
	流体压力	辅助有利	不利于成藏
	水动力	辅助有利	不利于成藏
	毛细管力差	不起主导作用	起重要作用
	分子间互作用	不利于成藏	起主导作用
分布规律	构造变动强度	有构造变动但不强烈	构造稳定
	介质孔渗条件	高孔渗介质	致密介质
	目的层埋深	埋深较浅	埋深较大
	距源灶中心的距离	通常距离较大	通常相互紧邻
	温压环境	正常温压环境	异常温压环境

的形成受非浮力主导。不同类别非常规油气藏在形成时主导的非浮力类型有很大不同:稠油沥青因分子黏滞力主导表现为自封闭成藏;页岩油气和煤层油气因分子吸附力主导表现为自封闭成藏;致密油气因分子界面张力主导表现为自封闭成藏。早期形成的常规油气藏因后期压实可以转变为致密常规油气藏,而后期形成的致密油气藏因构造变动的应力改造可以转变为裂缝类常规油气藏或改造类常规油气藏。

(4) 分布规律差异

常规油气藏既可以分布在构造稳定的含油气盆地,也可以分布在构造不稳定的含油气盆地;而非常规致密油气藏通常分布在构造稳定的含油气盆地。常规油气藏主要分布在埋深较浅的高孔高渗储层内,而非常规油气藏主要分布在埋深较大或非常致密的储层内。常规油气藏通常离源岩中心或源岩层较远,而非常规油气藏则紧邻源岩层或在源岩层内分布。常规油气藏主要分布在常温常压条件和还原环境,而非常规油气藏则主要分布在高压低温、高压高温、低压低温、极端氧化等异常条件。

1.3 油气勘探实践面临的重大挑战

基于常规油气地质理论指导非常规油气勘探面临系列难题,主要涉及 4 个领域。解决这些难题不但可以完善和发展油气成藏理论、推动当前油气勘探进程、提高油气资源勘探成效,还可以回答油气领域长期以来困扰人类的世界性难题。

1.3.1 常规与非常规油气藏之间关联性不明,无统一成因模式和分类方案

从 1885 年至今,历经一百多年的努力,常规油气藏的形成条件、动力机制、主控因素和分布规律已被逐步揭示;而自 1978 年发现致密深盆油气藏开始,非常规油气藏的类别、形成条件、成藏机制和分布特征等也被逐渐展示出来。目前,关于常规与非常规油气藏之间的差异性和关联性及其形成原因并不清楚。事实上,有些非常规油气藏的概念术语尚未统一,同一类油气藏因研究者不同而给出了不同的名称,同一专业术语被应用到不同类别的油气藏。在这种情况下,厘清常规与非常规油气藏之间的差异性和关联性并揭示其成因机制,提出统一的成因分类方案,对于深化学术交流和推动不同类别油气资源的高效勘探具有重大的现实意义。

1.3.2 常规与非常规油气藏形成分布的边界领域不清,判别标准仍处于探索中

常规与非常规油气资源虽然都来自含油气盆地中的有效源岩层,但二者的形成条件、主控因素、动力机制和分布特征有着很大不同。目前,研究者尚无法完全阐明常规和非常规油气资源的成因机制和内在规律。例如,对于为何常规油气资源的埋深通常较非常规致密油气资源更浅,其临界深度尚不清楚;对于为何非常规油气藏主要形成于孔隙度低于 10% 和渗透率

低于 1 mD 的致密砂岩储层中,其动力机制尚不清楚;此外,还存在不同类别油气资源是否存在最大埋深以及受哪些因素控制、地球上的油气资源潜力有多大等问题。这些问题表明,搞清楚不同类别油气资源之间的差异性并厘定其形成时的边界和范围、揭示不同领域内油气资源的富集条件和动力机制并建立定量模式,对深化理解油气资源潜力并预测剩余资源分布具有重大的理论意义。

1.3.3 常规与非常规油气藏形成分布的主控因素不明,联合成因模式尚未建立

由于常规和非常规油气在成因上都受源岩层控制,在成藏机制和时空分布上又相互关联甚至存在叠加复合和相互转化,因此其预测和评价非常困难,至今尚无可靠、有效、成熟的方法和技术。例如,常规油气资源的形成和分布受源岩层、储集层、低势区、封盖层 4 个功能要素控制,而非常规致密油气藏的形成和分布受源岩层、储集层、浮力下限和构造稳定性 4 个功能要素控制,二者既有相同的形成条件也有完全不同的主导因素。非常规致密油气藏的形成和分布紧邻源岩层,其源-储之间的毛细管力差对油气成藏起着关键作用;而非常规页岩油气藏则形成、分布于源岩层内,其吸附作用和毛细管力对油气的自封闭成藏非常关键。因此,揭示各类油气资源形成、分布的主控因素并建立定量模式、研发剩余资源潜力预测评价方法和关键技术,对于越来越复杂条件下的油气资源高效勘探具有十分重要的现实意义。

1.3.4 常规与非常规油气资源量和剩余资源潜力分布不明,发展方向难以预测

地球上到底有多少油气资源?面对这一科学难题,不同时期不同学者给出的答案可能完全不同。在经济萧条期,由于油气供过于求,人们对油气资源的前景是乐观的;而在经济繁荣期,由于油气供不应求,人们对油气资源的前景是悲观的,甚至出现了油气枯竭论。在人们感到油气短缺的情况下为什么全球剩余油气资源量的评价结果越来越多?在人们对天然气水合物寄予厚望的情况下为什么全球天然气水合物资源量的评价结果越来越少?从含油气盆地整体出发,研究和揭示常规与非常规油气之间的关联性和差异性,客观科学地评价全球常规油气、致密油气、页岩油气在当前技术条件下、未来技术条件下和最终技术条件下的三级资源潜力,对于深化理解化石能源的形成分布规律、剩余潜力分布领域和未来发展具有重大而深远的现实意义。

上述讨论说明,当前被广泛应用的含油气系统理论或常规油气地质理论并不能很好地阐述当前复杂地

质条件下各类非常规油气资源的形成与分布规律,需要进一步完善和发展。

2 全油气系统的概念与研究思路

2.1 全油气系统概念的起源与基本内涵

2.1.1 油气藏的形成分布受多种地质条件控制

油气成藏是一个复杂过程,受多种地质条件控制,而研究者对这一过程的认识经历了漫长的时间。首先,基于地下油气的运移、富集和成藏受浮力作用控制的认识,提出了浮力成藏理论^[4]。该理论认为:在浮力主导下,油气始终趋于从盆地深层向浅层、从盆地中心深坳区向边缘斜坡区运移,其输导体系由高渗透层、断裂带、不整合面和微裂缝构成,且优势通道周边最有利于油气运移和成藏。其后,基于油气藏形成分布受圈闭构造控制的认识,提出了圈闭控藏理论^[36]。该理论的主要内容包括:油气在浮力主导下运移并进入圈闭后富集成藏;圈闭形成时间越早、离油气运移通道越近,油气成藏的概率越大;圈闭规模越大、在演化过程中受保护的条件越好,油气聚集量越多。再往后,基于含油气盆地中油气绝大多数来源于沉积有机质降解作用的认识,提出了有机生油理论^[37-38]。该理论认为:含有机质源岩层的厚度和面积越大、有机质丰度越高、母质类型越好,有机质在演化过程中生成和排出的油气量就越多,圈闭构造聚集的油气资源量就越大。最后,基于油气藏的形成分布受富含有机质源岩层控制的认识,提出了烃源灶控藏分布理论^[9]。其中,烃源灶系指源岩层生、排油气的强度中心。生气强度越大、圈闭构造越多、距离源灶中心越近,则研究区的油气勘探前景越好。不难看出,与油气生、储、盖、运、圈、保等有关的所有地质条件都影响油气资源的形成和分布。

2.1.2 油气系统理论概述了浮力主导下多因素联合的成藏作用

油气系统概念涵盖了上述不同要素的控藏作用,目前已被国内外学者广泛接受和使用,但其提出和完善则经历了一个漫长的过程。在这一过程中,最先提出的是含油系统(Oil System)概念,该概念于 1972 年在美国丹佛举行的美国石油地质家协会(AAPG)会议上被提出来,并于 1974 年发表于《AAPG Bulletin》^[39],主要用于表征美国 Williston 盆地的源岩-储层-盖层之间的关联性。油气系统(Petroleum System)概念于 1984 年和 1992 发表于《Journal of Petroleum Geology》^[40-41],是指一系列地质现象的有序组合,即从油气生成开始、然后运移、最终油气在圈闭中聚集成藏,而这一系列地质事件则与全球板块构造决定的沉积盆地动力学过程密切相关。目前较为公认的油气系统概念

发表于1994年AAPG专辑《The petroleum system—from source to trap》^[42](油气系统——从源岩到圈闭)中,且被清晰地定义为:一套有效烃源体和与此相关的所有保存至今的油气藏及其形成所需的必要地质要素和地质过程的自然系统。Magoon等^[42]不仅给出了油气系统的定义,还提出了研究方法:通过油源对比确定烃源岩与储集层的关系,并以此为基础用“四图一表”来表征源-储关系,进而指导油气勘探。其中,“四图”是指关键时刻的埋藏史曲线图、含油气系统区域展布图、油气系统剖面特征图、含油气系统事件关联图(图3);“一表”系指烃源岩及其与之相关的油气藏分布统计表。油气系统在指导常规油气勘探的实践中发挥了重要作用并被不断丰富和发展,其地质含义也在不断被拓展和外延。由油气系统派生出来的相关术语和概念包括:复合油气系统(Composite Petroleum System)^[43]、总油气系统(Total Petroleum System, TPS)^[44]、改造类复合总油气系统(Reformed Composite Total Petroleum System)^[45]、油气成藏体系(Hydrocarbon Accumulation System)^[46]、复合总油气系统(Composite Total Petroleum System)^[47]、烃源岩层系含油气系统^[48]等。总油气系统是指以一个正在生烃或曾经生烃的烃源岩透镜状聚集区为源,所有已发现和未发现的相关油气(油气苗、油气显示、油气藏)以及对油气聚集至关重要的所有地质要素(烃源岩、储集岩、围岩和盖层)和过程(油气生、运、聚以及圈闭的形成)的总和。相比之下,油气系统和复合含油气系统只包括已发现的油气田、油气苗、油气显示等,而总油气系统则是将原有的含油气系统概念扩大化,纳入了未发现的油气田、油气苗和油气显示,提高了科学性及其对潜在油气资源勘探的指导作用。复合总油气系统在美国地质调查局(USGS)的报告中提出,用以指示同一研究区内存在的数个油气系统,包含多套叠合的烃源岩、储集层和广泛的断层系统,断层可导致不同来源的烃类混合。该概念的提出是为了方便开展工作而将数个油气系统组合成一个复合总油气系统进行统一评价。事实上,与油气系统相关的术语和概念还有不少,这些术语和概念或相互关联或相互补充,推动了油气系统概念在油气勘探和开发中的广泛应用。

2.1.3 油气系统理论及其在研究和应用中面临的挑战

油气系统理论经过不同学者完善和发展,在阐述中国复杂油气地质条件下油气成藏特征和分布规律中发挥了重要的作用,但仍存在诸多问题^[49-52]。概括起来有3个方面:①油气系统理论强调一套独立的有效源岩层及其形成的油气藏,因此不太适合中国叠合盆地含有多套源岩层的情况。尽管应用复合油气系统理

论能够解决部分问题,但在多套油气系统复合的情况下很难将各系统区分开来,尤其是在一些源岩层被剥蚀掉而油气藏还存在的复杂情况下。②油气系统强调研究油气来源并以有效源岩层为中心划分油气系统,因此,在勘探程度较低或油气来源不明的情况下很难应用,因为这一阶段对有效烃源岩层的分布知之甚少。③当研究油气从源岩运移到圈闭中聚集成藏时,虽然总油气系统考虑了页岩油气和煤层油气等非常规油气,但并没有阐述非常规与常规油气之间的关联性和差异性,更没有将其他类别的非常规油气藏,例如后期压实致密的油气藏、稠油沥青、水合物等包括进来,因此很难用于指导非常规油气勘探。

金之钧等^[46]在详细讨论了油气系统理论及其在应用中存在的问题后,依据系统论思想提出了油气成藏体系(Hydrocarbon Accumulation System)新概念,并对其结构特征开展了研究;提出了分类方法和命名原则;根据大量实例应用形成了油气成藏体系的研究方法和指导油气勘探的工作流程,提出了油气成藏体系成熟度指数(Petroleum System Mature Index, PS-MI),为油气系统从定性分析向定量评价发展创造了条件。目前,油气成藏体系概念已被国内外学者应用于油气资源定量评价中并得到了业界肯定^[53-55]。

非常规油气的发现及其随之而来的大规模勘探开发突破了常规油气地质理论^[56]。其中,总油气系统理论拓展了经典油气系统理论的内涵,将潜在的未发现油气藏和部分非常规油气资源包括在内,为全油气系统概念的提出奠定了基础并提供了启迪^[57]。

2.1.4 全油气系统新概念与研究意义

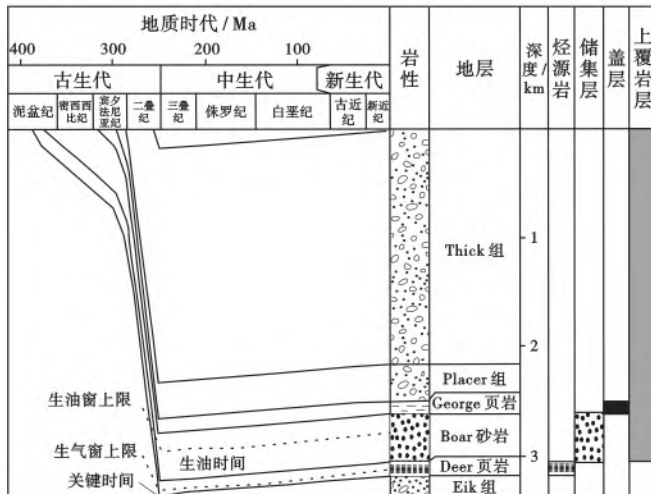
全油气系统(Whole Petroleum System, WPS)新概念是在油气系统、总油气系统、复合油气系统、油气成藏体系等概念的基础上完善和发展起来的。全油气系统既适用于研究常规油气藏的形成分布,也适合于研究各类非常规油气藏的形成分布,为复杂地质条件下油气勘探开发提供了新的理论框架和方法指导。

(1) 全油气系统基本概念

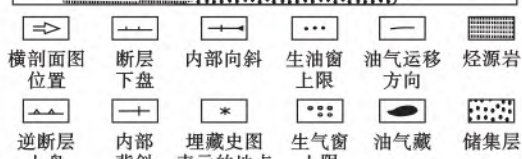
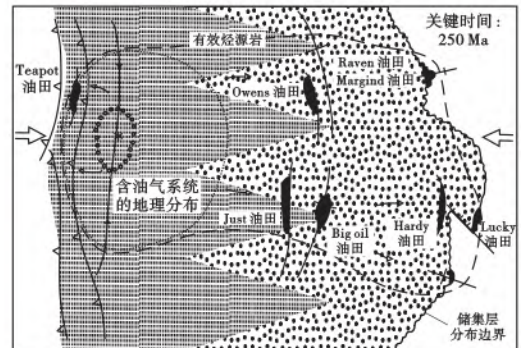
贾承造^[56]提出了全油气系统概念模型并认为:“未来石油天然气地质学应该是一个新的全油气系统理论模型,不局限于‘从源岩到圈闭’的视角,而是从‘源储耦合、有序聚集’的新视角,包括长距离运移烃、近距离运移烃、滞留烃等常规与非常规两种油气资源的聚集成藏。全油气系统研究包括烃类生成演化全过程、常规油气运移成藏及调整破坏、非常规油气原地成藏或运移成藏及调整,统一的常规与非常规油气分布富集规律等”。依照这一学术思想,笔者将全油气系统概念定义为“含油气盆地相互关联的源岩层形成的全

地层		岩性及描述	预测排出油量/10 ⁸ 桶	主要含油气系统
白垩系			3.0	Tyler系统
侏罗系	Spearfish组	盐岩		
宾夕法尼亚系	Tyler组	烃源岩 III型原油	0.1	Bakken-Madison系统
密西西比系	Charles组	盐岩		
	Mission Canyon组			
	Lodgepole组			
泥盆系	Bakken组	烃源岩 II型原油	6.0	Winnipeg-Red River系统
志留系	Prairie组	盐岩		
	Winnepogosis组			
奥陶系	Red River组	烃源岩 I型原油		
寒武系	Winnipeg组			
	下寒武统			

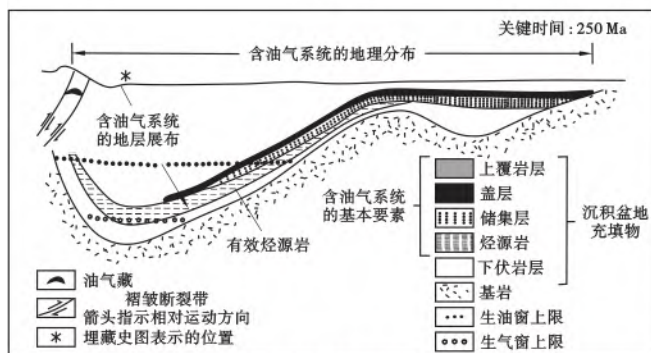
(a) 烃源岩-储集层-蒸发岩盖层油系统 (Oil System) 的划分 (据文献[39]修改)



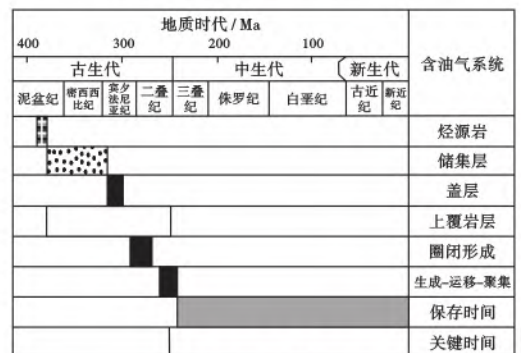
① 含油气系统关键时间 (250 Ma) 和石油生成时间 (260~240 Ma) 的埋藏史



② 含油气系统在关键时间的地理展布



③ 含油气系统在关键时间地层分布的地质横剖面



④ 含油气系统事件

(b) 油气系统 (Petroleum System) 及其研究方法 (据文献[42]修改)

图3 含油气系统和油气系统初始概念模型与研究内容

Fig. 3 Initial conceptual models and research contents of oil system and petroleum system

部油气、油气藏、油气资源及其形成演化过程和分布特征在内的自然系统”。全油气系统是由成藏要素及其相互作用构成的、包含各类油气藏在内的自然地质系统;全油气系统研究涵盖了油气成藏全要素、相互作用全过程、资源分布全系列、研究评价全方位。全油气系统既包括油气生成后从源岩到圈闭形成常规油气藏的作用过程和从源岩到非圈闭形成非常规油气藏的作用过程,也包括这两种成藏作用形成的两类油气资源在成藏过程中的叠加、复合和相互转换,还包括在地质历史过程中的形成及被破坏、涉及到已发现及尚未发现的所有油气藏和油气资源。总之,全油气系统是所有成藏要素、成藏作用、成藏过程、成藏产物及其时空领域的总和。

(2) 全油气系统与相关概念术语的区别和联系

这里主要指全油气系统与总油气系统概念的区别和联系。由于总油气系统的英文名称 Total Petroleum System(TPS)在中文有时也被翻译成“全油气系

统”,但与 Whole Petroleum System(WPS)的意义有很大不同。WPS 与 TPS 在概念上存在 3 个显著差异:①有效源岩层系在 WPS 中指一套或多套在成因上相互关联的源岩层系,而在 TPS 中通常指一套有效源岩层;②WPS 包含由源岩层系形成的全部常规和非常规油气藏,包括已发现和没有发现的,已经认识到的和尚未认识到的,而 TPS 仅包含常规油气藏和部分已经认识到的页岩油气和煤层油气等非常规油气藏;③WPS 中既包含当前地质条件下的源岩-储层-盖层-油气藏-围岩组合,也包含地质历史过程中形成的源岩-储层-盖层-油气藏-围岩组合及其演化,而 TPS 通常仅包含当前条件下的源岩-储层-盖层-油气藏-围岩组合。TPS 主要强调油气藏类别和数量之间的关联性,而 WPS 同时强调油气藏类别和数量在空间上[图 4(a)]和时间上[图 4(b)]分布的规律性和关联性。图 4 为 WPS 的概念模型,从两个不同侧面反映了油气系统的整体性和系统性。

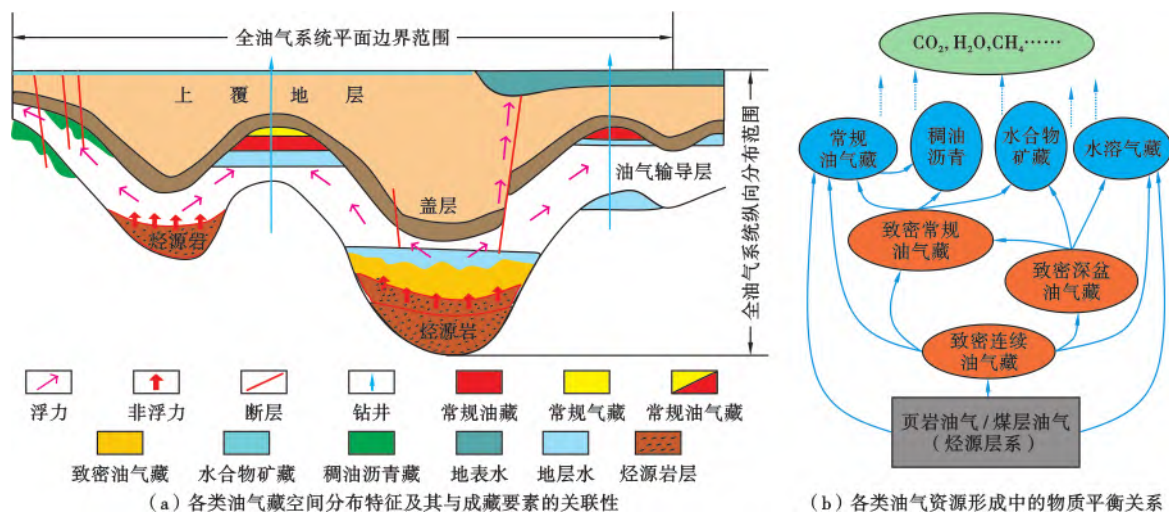


图 4 全油气系统概念模型及油气资源在空间上和类型上的关联性

Fig. 4 Conceptual model of whole petroleum system and the spatial and quantitative relationships of oil and gas resources

(3) 开展全油气系统研究的意义

全油气系统研究的指导意义主要表现在 3 个方面:①从各类油气藏或油气资源之间的关联性出发研究全油气系统的形成演化,有利于深入剖析常规与非常规油气藏之间的关联性,建立统一的成因模式和分类方案,完善和发展油气地质理论,为复杂地质条件下的油气勘探提供新的理论指导;②从油气藏或油气资源之间的差异性出发研究全油气系统的形成演化,有利于揭示不同类别油气藏或油气资源的成因特征、动力机制、主控因素和分布规律,并确定各自形成分布的边界条件和领域范围,为复杂地质条件下的油气资源预测评价提供新的技术支撑;③从油气藏或油气资源

之间的聚散平衡原理出发研究全油气系统的形成演化,有利于预测评价全球油气的生成总量、损耗总量、聚集总量以及不同技术条件下的剩余资源潜力,为未来油气勘探开发指明方向。

2.2 全油气系统定量评价的内容与思路

2.2.1 全油气系统定量评价研究的基本内容

全油气系统定量评价研究的基本内容主要包括当前油气勘探研究中面临的 4 方面挑战和 11 个关键科学问题(表 2)。涉及常规油气、致密油气和页岩油气之间的关联性和差异性研究及其动力学成因分类;常规油气藏、致密油气藏和页岩油气藏的形成条件、动力机制、分布规律与内在联系;常规油气、致密油气和页

表2 含油气盆地内常规和非常规油气资源勘探开发研究面临的挑战和难题

Table 2 Challenges and problems faced by exploration and development of conventional and unconventional oil and gas resources in petroliferous basins

研究内容	主要挑战
特征差异 成因机制	1 常规与非常规油气藏的差异性和关联性
	2 常规和非常规油气藏的地质特征与统一的成因分类方案
	3 常规油气藏形成分布的临界条件和最大埋深
边界领域 成藏规律	4 致密油气藏形成分布的临界条件和最大埋深
	5 页岩油气藏形成分布的临界条件和最大埋深
	6 常规油气藏、致密油气藏、页岩油气藏等形成分布在时空上的关联性
预测方法 关键技术	7 常规油气藏形成分布的主控因素、基本模式、预测评价方法和技术
	8 致密油气藏形成分布的主控因素、基本模式、预测评价方法和技术
	9 页岩油气藏形成分布的主控因素、基本模式、预测评价方法和技术
	10 成藏期后构造破坏程度的主控因素、基本模式、预测评价方法和技术
资源潜力 发展方向	11 全球不同类别油气资源总量、剩余潜力分布和未来发展方向
	12 全球天然气水合物资源能否构成人类未来发展的主要能源

岩油气3类油气资源量预测评价的关键技术、软件研发及实际应用;全球油气资源总量和剩余资源量的分布特征和发展方向等。

2.2.2 全油气系统定量评价研究的基本思路

全油气系统定量评价涉及内容广、面临挑战多、深化难度大。基本思路是通过3条不同途径分别展开研究,最后通过综合分析进行总结。

(1) 基于“三层课题”研究全油气系统的地质特征和演化特征

“三层课题”分别指国家层面、油公司层面和油田公司层面的研究课题,不同层级的课题解决不同层面的关键问题。国家层面课题包括国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目,国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目,国家自然科学基金重大、重点及面上项目,国家重点科技攻关计划和重点研发计划等;主要解决油气勘探领域一些重大基础理论难题,揭示宏观背景下油气资源的形成分布规律,为确定勘探方向和评价潜在资源提供理论指导。油公司层面的项目课题主要包括油公司重大应用基础研究项目、中青年创新基金项目、联合基金项目等;主要揭示含油气盆地内油气资源的形成和富集规律,为确定勘探区带和评价资源储量提供理论指导。油田公司层面的项目课题主要涉及具体盆地和含油气区带内油气藏成因机制和分布模式研究,为有利区带评价和钻探目标优选提供理论指导。笔者团队在承担上述所列三层次项目和课题的研究过程中已涉及到松辽盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地、四川盆地、吐哈盆地、渤海湾盆地、苏北盆地、江汉盆地、鄂尔多斯盆地和南海珠江口盆地等,还包括一些海外含油气盆地。这些项目和课题的研究不仅提供了充足的科研经费,更提供了丰富的第一手资料,为全油气系统科学问题的研究创造了条件。

(2) 基于“三方面结合”研究常规与非常规油气藏的差异性和关联性

“三方面结合”分别指国内研究与国外研究相结合、室内研究与室外研究相结合、理论研究与应用研究相结合。在国内研究与国外研究相结合的过程中,以国内含油气盆地为重点剖析对象,以国外含油气盆地为重点比较对象,笔者团队通过将二者相结合,较为客观地阐述不同地区含油气盆地内常规与非常规油气藏地质特征的差异性和关联性,并在此基础上统计分析全球1186个盆地52926个油气藏^[58]地质特征的差异性和关联性,将国外含油气盆地已发现油气藏的共性特征与中国代表性盆地(包括塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和松辽盆地)发现的80762个油气藏的地质特征进行分析和对比研究,揭示这些油气藏之间或之中油气成藏的差异性和关联性机制并找出主控因素。在室内研究与室外研究相结合的过程中,通过广泛组织调研建成了“油气生成和排运一维物理模拟实验装置”、“油气运移与水岩相互作用二维物理模拟实验装置”、“构造变动与油气藏调整改造二维物理模拟实验装置”、“砂岩透镜体成藏三维物理模拟实验装置”和“浮力成藏下限与临界条件物理模拟实验装置”等^[59],此外还购置了与油气成藏研究相关的一系列高精度测试仪器以及获赠一批油气勘探应用软件,建成了油气资源与探测国家重点实验室,为相关科学难题的解决创造条件。

(3) 基于油气藏剖析结果和统计模拟结果研究常规与非常规油气藏的差异性和关联性

选取中国西部的塔里木盆地和准噶尔盆地、中部的四川盆地和鄂尔多斯盆地、东部的渤海湾盆地和松辽盆地6个代表性盆地^[60](图5)为重点剖析对象,研究这些盆地中已发现的常规与非常规油气藏之间的差

异性、关联性及其成因机制,并在此基础上确定常规和非常规油气藏形成分布的主控因素,建立“多动力-多期次-多要素”成藏模式、研发各类不同的油气资源分布预测与评价技术,为提高油气勘探成效提供技术支撑。重点剖析的中国上述 6 个含油气盆地具有代表性意义:①常规和非常规油气藏都广泛发育,勘探程度最高;②探明储量和预测资源量大,占中国已探明油气储量的 76.9%和资源总量的 62.6%;③地质条件在中国和世界含油气盆地中具有代表性。从中国西部到中部再到东部,盆地的构造属性由以发育挤压构造为主的

复杂叠合盆地,向以发育拉伸构造为主的剪切叠合盆地,再向以发育拉伸构造为主的断陷盆地转变;地温梯度从低地温梯度的冷盆转变为较高地温梯度的温盆,再转变为高地温梯度的热盆;盆地沉积厚度从超过 10 km 转变为 7~8 km,再到 4~5 km;沉积体系从碳酸盐岩-碎屑岩-煤系地层组合向碳酸盐岩-煤系地层-碎屑岩地层转变,再向以发育碎屑岩沉积为主转变;含油气层系从震旦系-一新近系发育较为完整的含油气层系向以发育中生界-新生界含油气层系为主转变。中国主要含油气盆地的石油地质特征和油气勘探情况详见文献[60]。

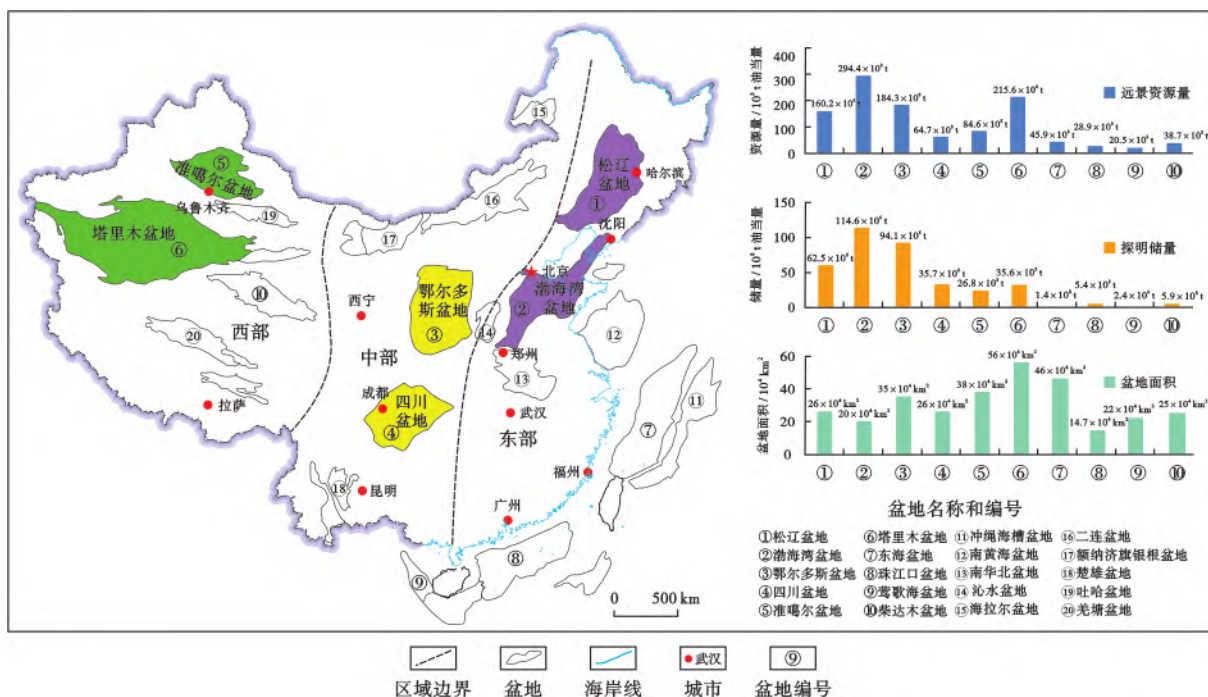


图 5 中国主要含油气盆地和 6 个代表性盆地的分布以及 10 个盆地远景资源量、探明储量和盆地面积比较(资料主要来自文献[60])
 Fig. 5 Distribution of major petroliferous basins and 6 representative basins in China, as well as the comparison of prospective resources, proved reserves and basin area of 10 basins

2.3 定量评价的方法原理与工作流程

笔者通过近 20 多年的努力发现含油气盆地内普遍存在 10 个油气门限,代表了全油气系统内油气在生、排、运、聚和成藏过程中的临界地质条件。基于对不同类别油气门限开展控藏特征与控藏机制的关联性研究,揭示出常规与非常规油气藏形成分布之间的差异性和关联性,建立了油气门限联合控藏模式,为全油气系统定量评价开拓了新途径。

2.3.1 依据油气门限概念剖析全油气系统内油气的运聚成藏机制和特征

油气门限(hydrocarbon threshold)是指油气在生、排、运、聚和成藏过程中遇到的临界地质条件。其中,生烃门限是指源岩层内的有机母质(干酪根)经热降解而大量生烃的临界地质条件,通常与 $R_o \approx 0.5\%$

对应,并随有机母质类型不同而有变化^[9]。排烃门限是指源岩层在热演化过程中开始以游离态大量向外排运油气的临界条件,这一概念最早在解释煤热降解排烃物理模拟实验结果时提出^[61],后来在研究中国海拉尔盆地源岩排烃特征并评价其有效性时正式发表^[62]。相关研究内容在《排烃门限理论研究与应用》^[63]和《煤系源岩排烃门限理论研究与应用》^[64]两本专著中有具体介绍,后来又在《Organic Geochemistry》杂志上发表^[65]。图 6 例举了一些常见的油气门限,包括与生烃和排烃有关的油气门限^[9][图 6(a)、6(b)];与油气在储层内聚集有关的油气门限^[66][图 6(c)、6(d)];与油气成藏后在时空中分布有关的油气门限^[67][图 6(e)、6(f)]。事实上,在实际地质条件下,油气藏在形成过程中遇到的油气门限较图 6 中列举的多,情况也更

加复杂。油气门限的分类因研究目的不同而有所不同,但都是油气在生、排、运、聚成藏过程中的行为特征由量变到质变的集中体现。判别油气门限的存

在、揭示其成因机制、研究不同油气门限之间的关联性,对于揭示和阐述油气藏成因机制和分布规律具有关键作用。

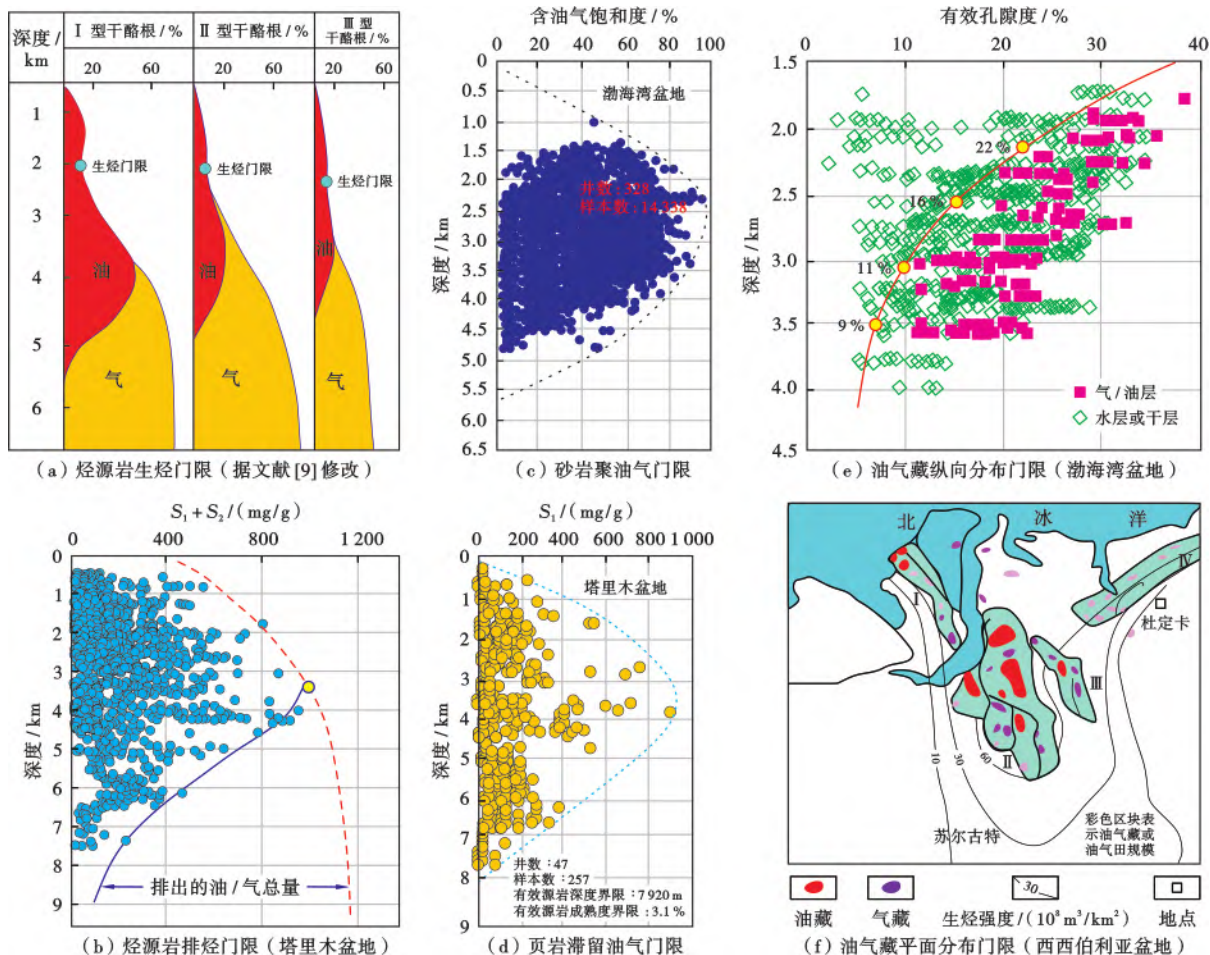


图6 全油气系统内与油气藏形成和分布有关的临界条件或油气门限概念模型和研究实例

Fig. 6 Conceptual models and examples of critical conditions or hydrocarbon threshold related to hydrocarbon reservoir formation and distribution in whole petroleum system

2.3.2 依据油气门限的控藏作用研究全油气系统内油气藏的形成分布特征

油气门限控藏作用的研究通常采用5种方法:实例剖析、统计分析、物理模拟、数值模拟和应用检验(图7)。这5种方法既相互独立,又彼此关联和相互验证,在逻辑上缺一不可。第1种为实例剖析法,主要通过剖析案例或分析实际地质条件来确认油气门限的存在并提出判别标准[图7(a)],其最大特点是直观可见。第2种为统计分析法,主要是在实例剖析所获得认识的基础上,通过对全油气系统内不同研究区或诸多案例的剖析结果进行统计分析,来判识油气门限是否具有普遍意义[图7(b)]及其变化特征,最大特点是能够确认油气门限存在的普遍意义,并揭示油气门限随埋深等地质条件不同而变化的特征。第3种为物理模拟实验法,通过开展物理实验揭示油气门限形成的动力机制,

从原理上揭示油气门限的形成条件、主控因素与变化规律。例如,通过物理模拟实验能清晰地了解地下分散的油气为何能够聚集在粗粒砂岩中而不能聚集在细粒砂岩中[图7(c)],并揭示出毛细管力差控制油气运聚的成藏机制。第4种为数值模拟法,通过数值模拟研究将微观物理模拟实验所揭示出来的油气门限控藏机制和模式展示在宏观尺度的地质体中,并用已知的实际地质条件进行标定,从而展示出宏观尺度上油气藏的形成分布特征[图7(d)]。第5种为应用检验法,是基于油气门限研究的最终结果来指导油气勘探和部署科学探井,通过钻井结果对理论模型进行检验[图7(e)],在检验的基础上再进行修正和完善。通常有两种途径检验理论预测结果的可靠性:①在成藏概率不同的区域内统计已发现油气藏或成功探井所占比率,如果实际发现的油气藏数和成功探井数所占比

率随有利成藏概率值增大而增加,表明预测结果可信,二者具有正向关联性;这一比率在成藏概率超过 50% 的有利区域内越大,表明理论模型越可靠,否则相反;②在

成藏概率小于 50% 的不利区域内,统计实际未发现油气藏的目标数或失利井数所占比率,这一比率越大,表明预测结果越可信,否则相反。

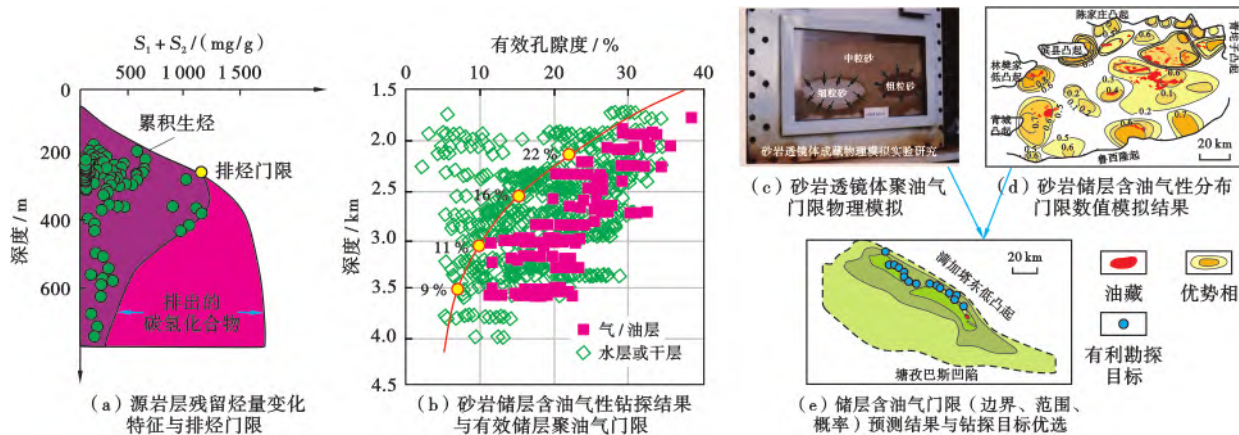


图 7 油气门限研究用于全油气系统定量评价的 5 种基本方法和技术

Fig. 7 Five basic methods and techniques of hydrocarbon threshold study for quantitative evaluation of whole petroleum system

2.3.3 依据油气门限的联合控藏作用研究全油气系统内油气藏形成的主控因素与分布规律

油气门限联合控藏作用是指全油气系统内多种油气门限通过时间上和空间上的关联作用控制着油气藏的形成分布。源岩排油气门限、油气聚集门限以及油气藏规模门限的相互联合作用决定着全油气系统内油气资源总量与剩余资源潜力分布。为了说明相关原理,图 8 展示了高压和低温两类油气门限组合控制着水合物藏的形成分布门限^[68];永久冻土区可燃冰的分布由最小压力门限(红线)和最大温度门限(蓝线)共同

围合的范围所控制 [图 8(a)],海洋可燃冰的分布由最小压力门限(红线)和最大温度门限(蓝线)共同围合控制[图 8(b)]。可以看出,水合物形成的高压门限和低温门限所包围的红色区域有利于水合物矿藏的形成和分布,其他地区不利于水合物形成分布。这是一个简单的双要素门限联合控制天然气水合物形成分布的实例。在实际地质条件下,常规和非常规油气藏的形成分布可能是多个油气门限通过联合、围合、叠合、组合而构成。例如,常规油气藏的形成分布受生、储、盖、运、圈、保等多个要素控制,其最终的形成分布门限受

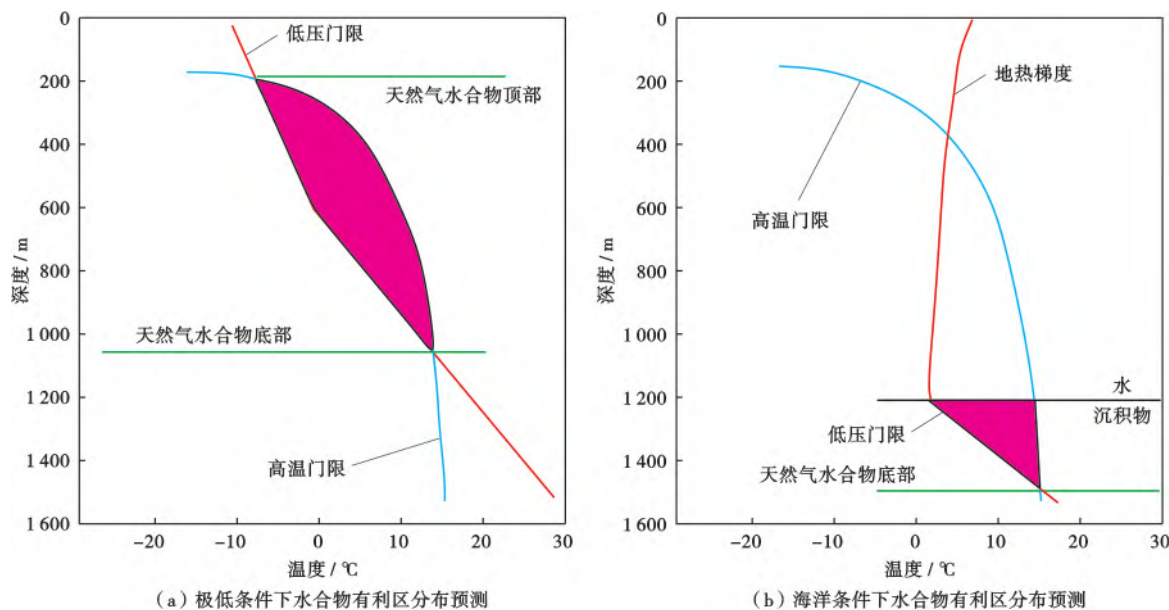


图 8 全油气系统内高压低温复合门限联合控制天然气水合物的形成分布(据文献^[68]修改)

Fig. 8 Formation and distribution of gas hydrate jointly controlled by combination of high pressure threshold and low temperature threshold in whole petroleum system

这6个要素单独作用下的油气门限综合作用所控制。研究不同要素控油气门限之间的关联性,对于揭示油气资源在复杂地质条件下的形成和分布规律具有重大的现实意义。

2.3.4 基于油气门限联合控藏模式实现全油气系统油气资源潜力定量预测和评价

通过研究油气门限多形式的联合作用来实现全油气系统定量评价可分为5个阶段(图9)。第1阶段,广泛收集研究区的地质资料和油气钻探成果,建立油气门限的判别标准;第2阶段,对已发现的代表性油气藏进行实例剖析,并对所有已探明的油气藏特征进行统计分析,明确常规与非常规油气藏之间的差异性和

关联性,包括流体和介质的内部特征、油气的垂向和平面分布特征、油气的来源特征、驱动力和油气成藏的期次特征、油气藏的调整改造特征等多方面的差异性和关联性;第3阶段,从多方面识别不同类别油气资源形成分布的油气门限,揭示其主控因素和形成机理,定量表征这些门限随主控因素的变化特征;第4阶段,研究油气门限之间的关联性,建立多要素联合控藏分布模式;第5阶段,建立常规与非常规油气藏联合成因理论模式,应用新模式研发预测不同类别油气藏形成分布的新方法和新技术,并通过实际应用检验新方法新技术的可靠性。

3 全油气系统定量评价方法原理与研究实例

3.1 全油气系统的3类10种油气门限

通过对中国6个代表性含油气盆地中的常规和非常规开展油气藏地质特征剖析、成因机制揭示、分布规律总结,结合物理模拟实验和数值模拟分析,最后与北美地区和全球已发现常规和非常规油气藏进行比较发现,全油气系统普遍存在3类10种油气门限(图10),包括3种运聚门限、3种动力门限、4种分布门限,这些油气门限在时空上的联合、围合和组合决定着全油气系统内油气藏的形成分布。

3.1.1 油气运聚门限与地质意义

油气运聚门限系指油气在成藏体系内运聚过程中遇到的临界条件^[69],主要有3个,包括:①源岩排烃门限(hydrocarbon expulsion threshold, HET)^[69];②油气聚集门限(hydrocarbon accumulation threshold, HAD);③油气藏规模门限(reservoir scale threshold, RST)。源岩排烃门限系指源岩层内生烃量满足了各种形式的存留

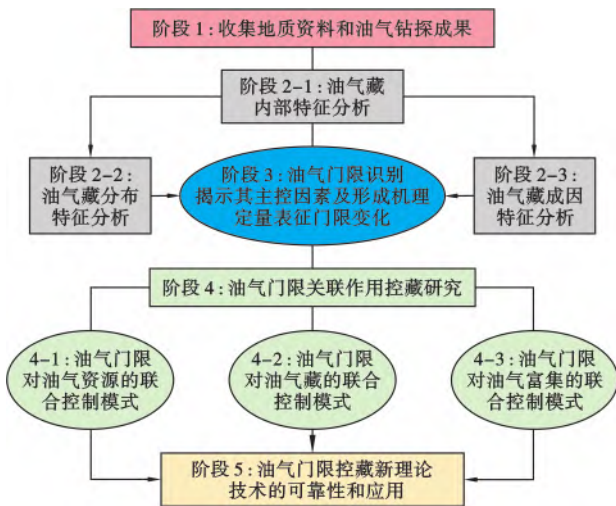


图9 基于油气门限研究定量评价全油气系统的工作步骤及技术流程

Fig. 9 Work steps and technical process of quantitative evaluation of whole petroleum system based on oil and gas threshold research

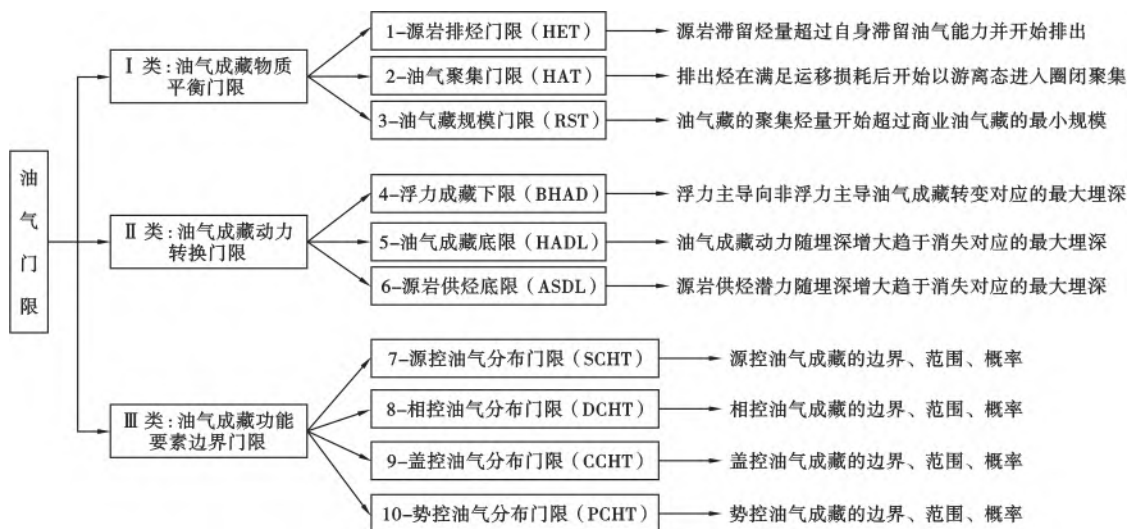
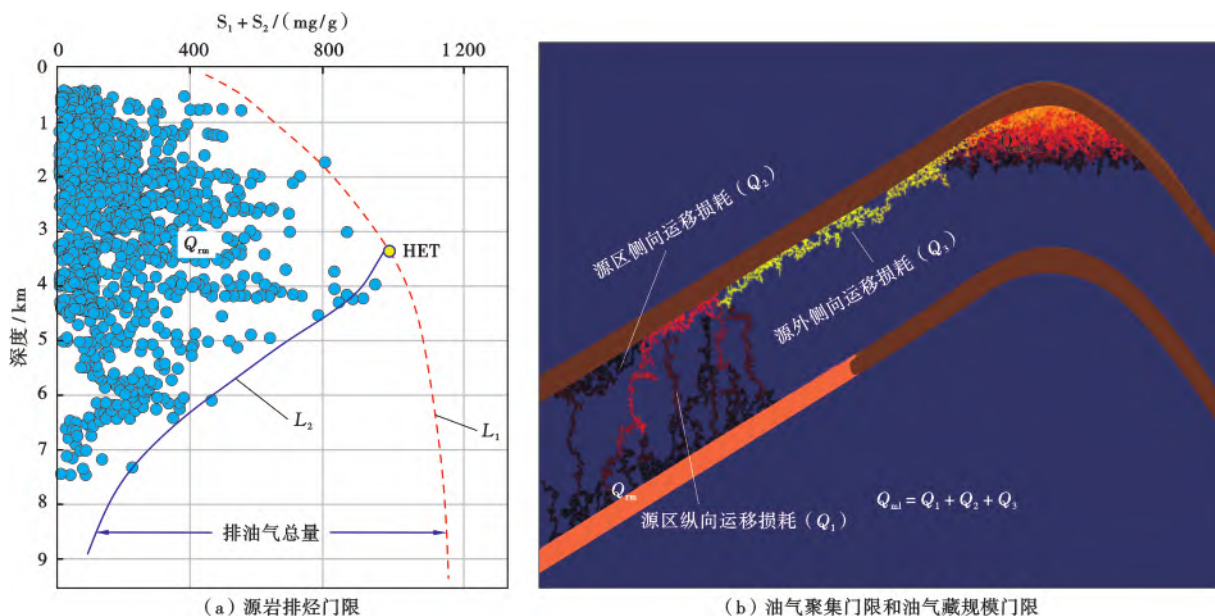


图10 全油气系统内3类10种油气门限之间的关联性及其控油气成藏特征

Fig. 10 Correlation between 10 hydrocarbon thresholds of 3 types and controlling hydrocarbon accumulation characteristics in whole petroleum system

需要后开始以游离相态排出的临界条件,源岩进入排烃门限后被判定为有效源岩,判别标准为生烃量(Q_p)等于或大于源岩滞留油气总量(Q_r),即 $Q_p \geq Q_r$; 油气聚集门限系指源岩层排出烃量满足了运移过程中各种形式损耗需要并开始以游离相态形式聚集的临界条件,成藏体系进入聚油气门限后被判定为有效成藏体系,判别标准为体系内源岩的排出烃量(Q_e)等于或大于运移过程的损耗量(Q_l),即 $Q_e \geq Q_l$; 油气藏规模门限系指聚集的烃量达到了研究区商业油气藏最小标准,聚集烃量超过规模门限后被判定为有效资源量,判别标准为聚集烃量(Q_a)等于或大于商业油气藏最小规模(Q_{cm}),即 $Q_a \geq Q_{cm}$ 。图 11 是全油气系统内油

气运聚门限概念模型,油气运聚门限的发现为油气资源量科学评价创造了条件。基于排烃门限判别有效源岩层、基于聚油气门限判别有效成藏体系、基于油气藏规模门限判别有效资源量,这些避免了人为主观因素的影响。运聚门限概念的提出突破了长期以来基于源岩残留烃量[氯仿沥青“A”含量或热解游离烃量(S_1)]和残留有机质(TOC)含量判别有效源岩和评价有效资源量的逻辑错误,为建立客观科学的有效源岩判别标准和有效资源量评价方法提供了理论依据和方法指导。有关油气运移损耗烃量(聚集门限)和无价值聚集烃量(规模门限)研究可参考文献[70-71]。



注: $S_1 + S_2$ —生烃潜力; Q_{cm} —源岩层滞留油气临界最大饱和量和; L_1 —理论上源岩层的生烃潜力; L_2 —实际测试的剩余生烃潜力; HET—源岩排烃门限; Q_{cm} —油气运移过程中最低损耗烃量或油气聚集门限(HAT)。

图 11 全油气系统内油气运聚门限概念模型

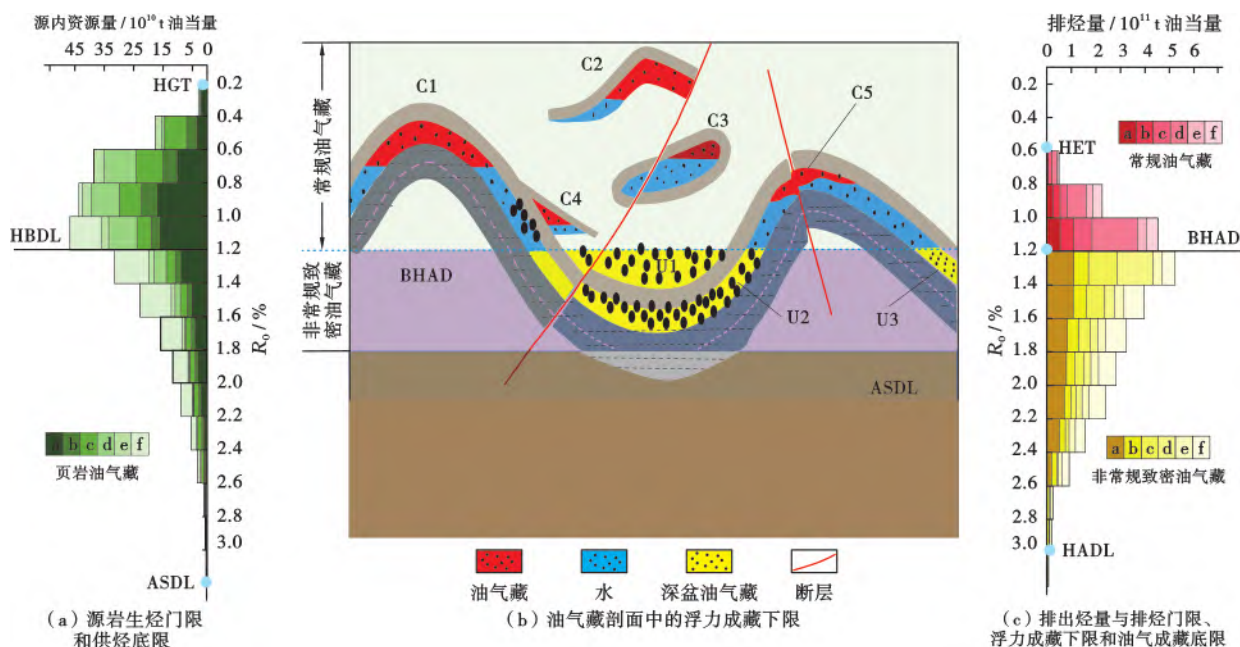
Fig. 11 Conceptual model of hydrocarbon migration and accumulation threshold in the whole petroleum system

3.1.2 油气动力门限与地质意义

油气动力门限系指油气运聚成藏过程中动力边界或突发性变化对应的临界条件,主要有 3 个,包括: ①浮力成藏下限(buoyancy-driven hydrocarbon accumulation depth, BHAD)^[72]、②油气成藏底限(hydrocarbon accumulation depth limit, HADL)^[73]、③源岩供烃底限(active source-rock depth limit, ASDL)^[74]。其概念模型如图 12 所示。

ASDL 是源岩的生、排油气潜力随埋深增大而趋于消失时对应的临界条件[图 12(a)],理论上控制着全油气系统内页岩油气藏的最大埋深,通常情况下与源岩层孔隙度小于等于 $(1.0 \pm 0.5)\%$ 、渗透率小于等于 0.001 mD 、孔喉半径小于等于 $0.01 \mu\text{m}$ 、热演化程度

大于等于 $(3.5 \pm 0.5)\%$ 的临界条件对应,但随着岩性、油气组分等地质条件不同而变化。BHAD 是油气运聚动力随埋深增大由浮力主导向非浮力主导转变的临界条件[图 12(b)],控制着全油气系统内常规油气藏的最大埋深,通常情况下在砂岩目的层内与孔隙度为 $(10 \pm 2)\%$ 、渗透率为 1 mD 、孔喉半径为 $1 \mu\text{m}$ 、热演化程度约等于 1.1% 的临界条件对应,在实际地质条件下随岩性、油气组分、地层年代等不同而变化。HADL 是油气富集动力随目的层埋深增大趋于消失时对应的临界条件[图 12(c)],控制着全油气系统内非常规致密油气藏的最大埋深,通常情况下在砂岩目的层内与孔隙度为 $(3.0 \pm 1.0)\%$ 、渗透率约等于 0.01 mD 、孔喉半径约等于 $0.25 \mu\text{m}$ 、热演化程度约等于 3.0% 的



注: a—塔里木盆地; b—准噶尔盆地; c—鄂尔多斯盆地; d—四川盆地; e—渤海湾盆地; f—松辽盆地; HGT—油气生成门限; HET—源岩排烃门限; BHAD—浮力成藏下限; HADL—油气成藏底限; ASDL—源岩供烃底限; C1—常规背斜油气藏; C2—常规断块油气藏; C3—常规岩性油气藏; C4—常规地层油气藏; C5—常规复合油气藏; U1—致密常规油气藏(与源岩不接触); U2—致密深盆油气藏(与源岩接触); U3—其他类别致密油气藏。

图 12 全油气系统内油气动力门限及其控油气特征(据文献[70-72]修改)

Fig. 12 Dynamic threshold and controlling characteristics of oil and gas in whole petroleum system

临界条件对应,但随岩性、油气组分、地层周边环境等地质条件不同而变化。

除供烃底限之外,源岩在演化过程中还将遇到源岩生烃门限(HGT)、排烃门限(HET)、源岩生烃高峰期(HGPT)和排烃高峰期(HEPT)等临界地质条件,这些条件对研究区油气的运聚和成藏研究都具有重要意义,值得关注和重视。

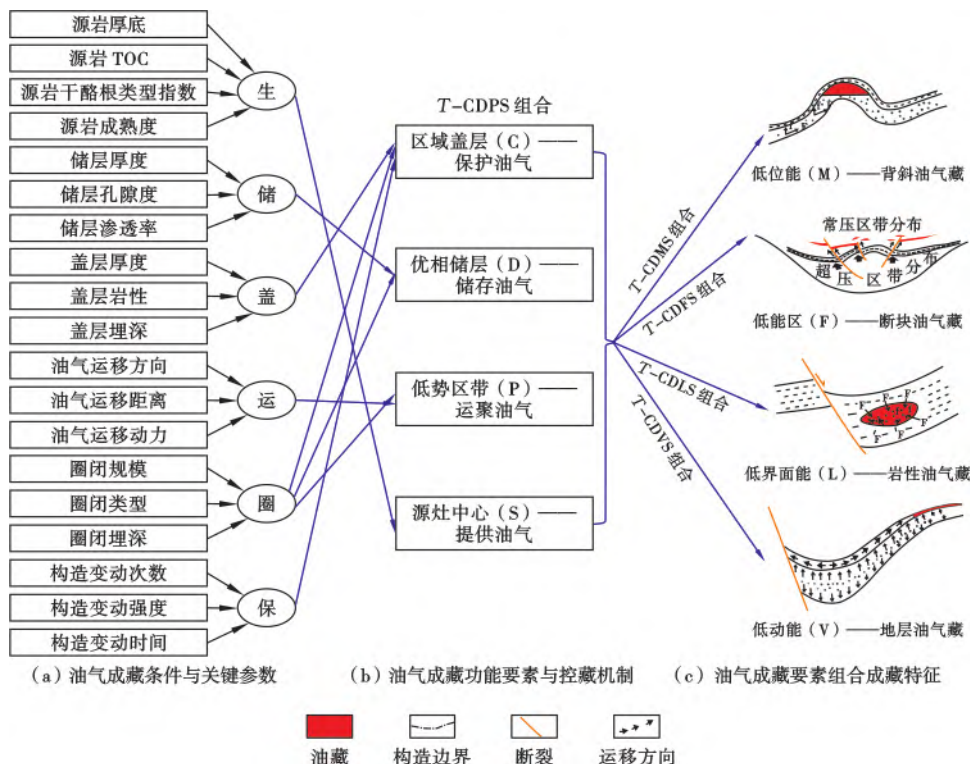
3.1.3 油气分布门限与地质意义

油气分布门限系指关键地质要素控制下油气藏或油气资源在时空中形成分布的临界条件(图 13),包括边界(boundary)、范围(area)和概率(probability)。油气分布门限有 4 个,包括:①源控油气分布门限(source-rock controlling hydrocarbon-reservoirs threshold, SCHT);②相控油气分布门限(depositional-facies controlling hydrocarbon-reservoirs threshold, DCHT);③盖控油气分布门限(cap-rock controlling hydrocarbon-reservoirs threshold, CCHT);④势控油气分布门限(potential controlling hydrocarbon-reservoirs threshold, PCHT)。油气的生、排、运、聚、成藏所涉及到的地质参数共计超过上百个,包括:盆地温度、压力、埋深,源岩层厚度、有机质丰度、类型、热演化程度,储层孔隙度、渗透率,盖层突破压力、可逆性等,这些都被包含在生、储、盖、运、圈、保这几方

面内容中[图 13(a)]。进一步研究发现,油气成藏的关键要素可以进一步概括为源灶中心、优相储层、区域盖层、低势区带。源灶中心即“源”(S),为油气成藏提供物质基础;优相储层即“储”(D),为油气成藏提供孔隙空间;区域盖层即“盖”(C),为油气成藏提供保护;低势区带即“势”(P),为油气成藏提供富集的动力。这些要素在油气成藏过程中必不可少、相互独立、能够定量表征,被称之为功能要素[图 13(b)]。源-储-盖(CDS)与低位能区组合形成背斜类油气藏(CDMS)、与低压能区组合形成断块类油气藏(CDFS)、与低界面能区组合形成岩性类油气藏(CDLS)、与低动能区组合形成地层类油气藏(CDVS),反映了油气成藏动力机制的多样性和复杂性[图 13(c)]。通过剖析已经探明并得到开采的油气藏发现:油气藏主要分布在大量排烃中心或周边,最大距离通常不超过排烃边界至源灶中心距离的 2 倍,据此提出源控油气分布门限概念及定量表征模式;油气藏主要分布在目的层颗粒粒径不粗也不细(粒度为 0.1~1.0 mm)的优相带内,据此提出相控油气分布门限概念及定量表征模式;油气藏主要分布在盖层不太厚也不太薄的下部储集层内,据此提出盖控油气分布门限概念及定量表征模式;油气藏主要分布在构造高点、断裂带附近、高孔渗岩性体、地层超复带等区带,据此提出低

势(低位能、低压能、低界面能、低动力能)控油气分布门限概念及定量表征模式。尤其值得关注的是,在上述情形下,只有内、外毛细管力差较大的储层中

才能聚集油气成藏,内、外毛细管力差太小时不能形成油气藏,界面低势区对于各种不同类型的油气藏都具有普遍意义^[75-76]。



注: T-CDPS—成藏期自由动力场内常规油气藏功能要素组合; T-CDMS—成藏期低位能区功能要素组合形成背斜类油气藏; T-CDFS—成藏期低压能区功能要素组合形成断块类油气藏; T-CDLS—成藏期低界面能区功能要素组合形成岩性类油气藏; T-CDVS—成藏期低动能区功能要素组合形成地层类油气藏。

图 13 全油气系统内功能要素组合控油气藏分布门限与定量表征

Fig. 13 Distribution threshold and quantitative characterization of functional elements controlling oil and gas reservoirs in whole petroleum system

3.2 运聚门限联合控油气资源形成模式

3种油气运聚门限联合控制着油气资源的形成与分布(图 14)。油气成藏体系^[46,77]是全油气系统内相对独立的最小油气运聚单元,其中,源岩生成的油气在通常情况下不能运移到成藏体系之外,而外部成藏体系中的油气也难以运移进来。在油气成藏体系内,油气的聚散遵守物质平衡原理,即油气的总生成量等于源岩层滞留油气量、体系散失油气量、现有聚集油气量和早前破坏油气量的总和。因此,依据生烃总量,在扣除源岩滞留烃量、运移损耗烃量、无价值聚集烃量、构造变动破坏烃量之后,剩余的烃量即为油气资源总量;依据油气资源总量,在扣除已探明的油气储量后,即为剩余资源潜力^[78]。详细内容可参见《油气运聚门限与资源潜力评价》^[69]等著作。

3.2.1 源岩生烃总量评价

源岩生烃量被称之为原始烃量,其大小决定着全油气系统内常规油气、致密油气和页岩油气的资源潜

力[图 11(a)]。源岩生油气总量在数值上为源岩内滞留烃量与排出烃量之和,可以通过物理模拟实验获取^[80],也可以通过有机母质降解动力学过程的模拟计算获得^[81];源岩滞留烃量可以通过岩样实测的热解参数 S_1 (游离烃量)或氯仿抽提得到的沥青“A”含量等相关参数进行计算,但需考虑轻烃的补偿校正。

3.2.2 源岩排出烃量评价

源岩排出烃量系指源岩在演化过程中以多种相态形式向外提供的烃量。源岩排出烃量除可以通过生成烃量和滞留烃量相减得到外,还可以通过物理模拟实验^[82]和分析源岩生烃潜力随埋深的变化特征^[83]等多种方法获得。当源岩层生成的烃量达到或超过各种形式的滞留烃量后开始进入排烃门限。排出烃量在满足运移途中各种损失烃量后开始进入聚集门限。油气可以扩散、水溶、油溶(气)和游离 4 种相态形式排出源岩层外。其中,游离相态烃对油气运聚成藏的意义最大,水溶相和扩散相排出的烃量只有在条件改变后才具有聚集的可能。

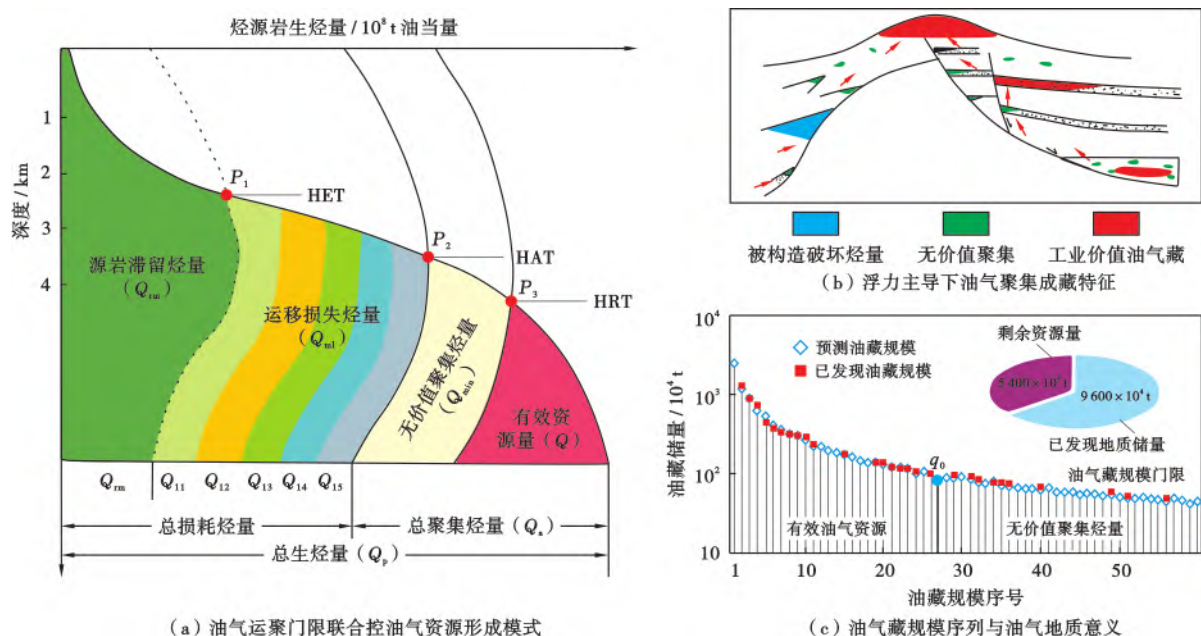


图 14 全油气系统内油气运聚门限联合控油气资源形成模式(据文献[79]修改)

Fig. 14 Formation model of hydrocarbon resources jointly controlled by hydrocarbon migration and accumulation threshold in whole petroleum system

3.2.3 油气聚集量评价

油气聚集量是源岩排出烃量在运移过程中满足各种形式损耗后最终在圈闭中的聚集量。当油气聚集量超过商业油气藏规模时构成有效资源量。不同地质条件下的油气藏规模门限不同[图 11(b)]。在中国周边海洋环境,开展油气勘探的油气藏规模门限约为 $200 \times 10^4 \text{t}$;在中国西部复杂叠合盆地,开展油气勘探的油气藏规模门限约为 $100 \times 10^4 \text{t}$;在中国东部成熟探区,开展油气勘探的油气藏规模门限为 $(10 \sim 50) \times 10^4 \text{t}$ 。在评价有效资源量时,对于油气在运移过程中聚集规模小于商业油气藏的无价值聚集量和构造变动破坏烃量通常难以获得,需要采用专门的方法和技术。

3.2.4 无价值聚集烃量评价

无价值聚集烃量指全油气系统内小于油气藏规模门限的聚集量,通常采用油气藏规模序列模型进行计算。图 11(b)展示了自然条件下不同规模序列油气藏伴生或共存的地质特征。加拿大科学家 Lee 等^[84]发现并建立了油气藏规模序列模型,这一模型在实际应用中得到了修正和完善^[85],模型中的参数可以依据实际情况进行修正以达到理论预测结果与实际情况最大限度地吻合^[71],且在美国 USGS 对全球油气资源进行评价时被采用。图 11(c)展示,油气藏规模序列模型在实用中不仅能够预测出潜在有效的油气藏规模序列和油气藏个数,还可以用来预测和评价规模小于商业

油气藏规模的无价值聚集烃量。

3.2.5 构造变动破坏烃量评价

构造变动破坏烃量系指全油气系统内油气成藏期后因构造变动导致的破坏量。构造变动破坏烃量受早前聚集烃总量、后期构造变动次数、各次构造变动强度、不同强度构造变动发生的顺序和盖层封油气能力等多方面因素控制。研究表明,当多期构造变动叠加时,“强强叠加”破坏油气藏、“弱弱叠加”保护油气藏、“强弱叠加”改造油气藏。基于这一原理可以定量预测和评价构造变动破坏烃量、潜在剩余烃量及其平面分布^[69,86]。

3.2.6 实用意义与研究实例

油气运聚门限联合控油气资源形成模式的建立突破了长期以来基于源岩滞留烃量(S_1 、氯仿沥青“A”含量)和残留有机质(TOC)含量判别有效源岩和评价资源量的逻辑错误,避免了人为主观因素选取运聚系数计算资源量可能带来的决策错误,为全油气系统内常规和非常规油气资源的客观定量评价提供了地质概念模型和物质平衡方程。下面列举 3 个方面的应用实例。

(1) 依据排烃门限排除高 TOC 含量假源岩,有效缩小勘探范围

松辽盆地滨北地区位于哈尔滨—满洲里铁路以东,面积超过 $7 \times 10^4 \text{km}^2$ 。由于青山口组和嫩江组主力源岩层 $\text{TOC} \geq 0.5\%$ 的面积高达 70% 以上,滨北地区的油气勘探前景一直被看好。大庆油田有限责任公司组织过 3 次大规模勘探,累积钻探超过 70 多口井,

但没有大的发现。通过开展油气运聚门限控藏研究发现,研究区进入大量排烃门限的有效源岩层分布面积仅局限在哈尔滨—满洲里铁路线附近,有利面积不足早前确认面积的 20%,勘探前景有限。松辽盆地滨北地区油气勘探前景不乐观的根本原因是地下水活跃,源岩以水溶相和扩散相排出烃量居多,以游离相态进入排烃门限较晚、排出有效烃量少。

(2) 依据排烃门限识别出低 TOC 含量有效源岩层,拓展有利勘探领域

柴达木盆地古近系主力源岩层为干柴沟组,但在当前条件下,滞留烃量(S_1 、氯仿沥青“A”含量)非常低,绝大多数样本达不到有效源岩层标准,勘探前景不被看好。通过多种方法研究发现,尽管源岩层中当前滞留烃的有机质少,但由于源岩已进入排烃门限并构成了有效源岩层,研究确定了有效源岩层的分布面积较之早前确定的面积扩大了数十倍,并得到钻探结果证实,由此重新确认了在新条件下的有效源岩体积,并评价出资源量较早前增大了 4~5 倍。这为深化勘探提供了科学依据并指明了有利方向和领域。

(3) 评价有效资源量并指导探井部署取得重大突破

渤海湾盆地八面河油气田是中国未成熟油和低成熟油成藏的典型实例并被广泛报道。笔者通过与中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司合作开展的油气运聚门限研究发现:八面河探区的原油不是未成熟

油,原油的生物标志化合物与周边埋深较浅的源岩之间没有亲缘关系,未成熟油的贡献不超过 12%,绝大多数油气为东营凹陷 2 700 m 之下成熟源岩层所排出的烃向南部斜坡运移聚集而成[图 15(a)];王家岗—八面河成藏体系被确认已相继进入了排烃门限(2300m)、成藏门限(2 700 m)和有效资源门限(3 200 m),有效资源量高达 4×10^8 t,扣除已发现的油气储量,得出剩余有效资源量超过 1.5×10^8 t。依据这些新认识,笔者团队在国际刊物上发表了一系列相关论文^[87-90]并与油田公司专家联合出版了专著《陆相成熟盆地油气挖潜勘探理论与实践——以渤海湾盆地八面河探区油气成藏研究与应用为例》^[91],认为八面河探区南坡是有利油气运聚成藏区和最现实的勘探领域[图 15(b)]。在这一认识指导下,油田公司在 4 年的勘探中相继发现了 3 个 1000×10^4 t 油藏,这证实油气运聚门限的存在及其在指导油气勘探中有重要作用,实现了油气储量快速增长[图 15(c)]。此外,笔者团队通过应用运聚门限控油气资源形成模式对济阳拗陷 29 个成藏体系进行了定量评价,不仅计算了生烃总量、损耗烃总量,还确定了各成藏体系的有效资源量以及当前条件下的剩余有效资源量,进而优选出 12 个勘探程度相对较低、剩余资源量最大的成藏体系,为油田公司在 3 年时间内部署探井 180 口,探明油气储量 1.6×10^8 t、探井成功率快速提高 29%做出了贡献^[92]。

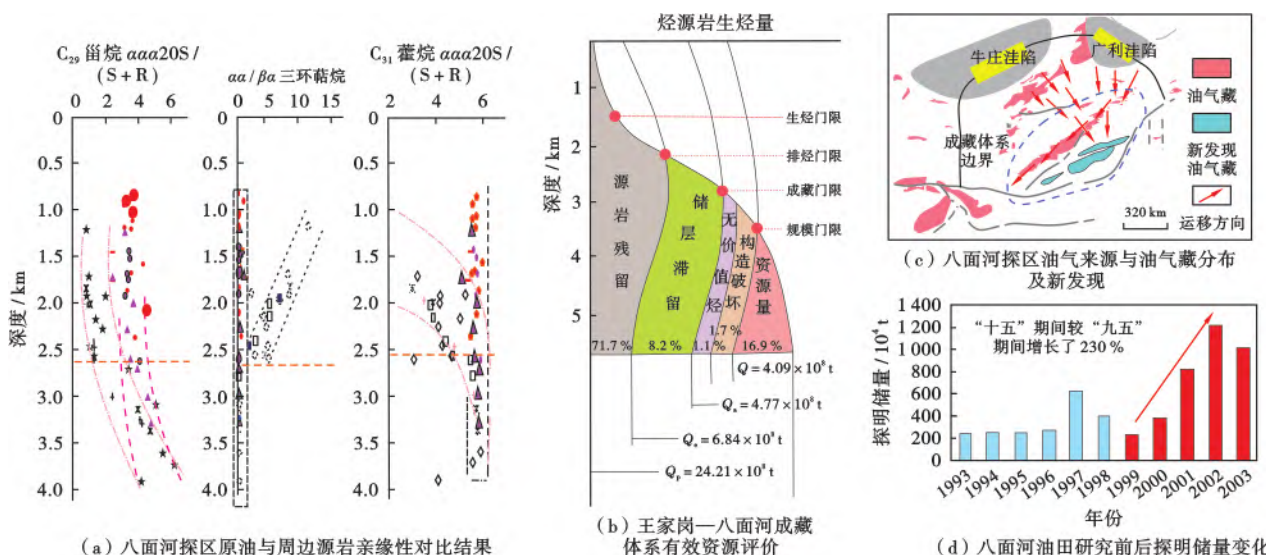


图 15 渤海湾盆地东营凹陷八面河探区油气运聚门限联合控油气资源研究及其勘探成效(据文献^[91]修改)

Fig. 15 Study on oil and gas resources and its exploration jointly controlled by hydrocarbon migration and accumulation threshold in Bamianhe exploration area of Dongying sag, Bohai Bay Basin

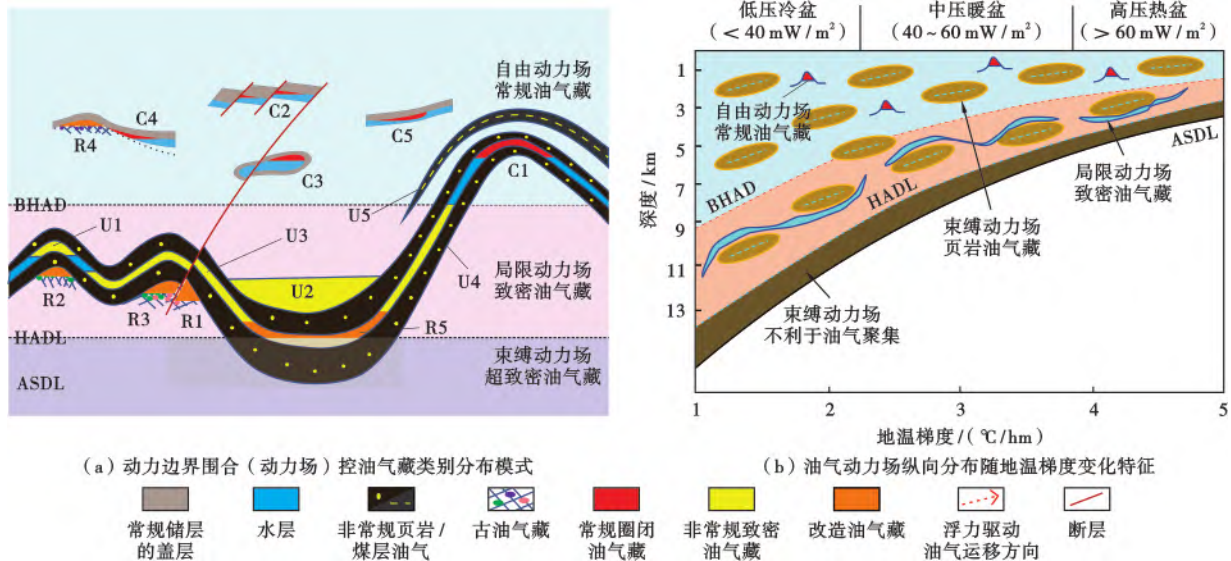
3.3 动力门限围合控油气藏分布模式

在盆地演化过程中,当油气运聚动力发生转变时其所形成的油气藏类型也将发生变化。依据浮力成藏下限、油气成藏底限、源岩供烃底限 3 种动力门限所围

合地层领域(动力场)的不同,可划分出油气自由动力场、局限动力场、束缚动力场,建立动力场控油气藏分布模式[图 16(a)]。油气动力场(hydrocarbon dynamic field)被定义为具有相同油气来源、相同介质条

件、相同动力机制且彼此相互沟通的有利油气运聚成藏的地层领域。动力场控油气藏分布模式的建立从动力学机制上阐述了常规与非常规油气藏之间的差异性和关联性,为定量“判别、预测、评价”常规和非常规油气藏提供了理论依据和方法指导。油气动力场边界条

件受多种地质条件控制,这导致不同盆地内浮力成藏下限(BHAD)、油气成藏底限(HADL)和源岩层供烃底限(ASDL)的差异性和多样性。图16(b)表示在其他条件不变的情况下,3个动力边界与3个动力场随地温梯度的变化情况。



注: C1—常规背斜油气藏;C2—常规断块油气藏;C3—常规岩性油气藏;C4—常规地层油气藏;C5—常规复合油气藏;U1—致密常规油气藏;U2—致密深盆油气藏;U3—致密连续油气藏;U4—致密页岩油气藏;U5—致密煤层油气藏;R1—裂缝改造油气藏;R2—孔洞改造油气藏;R3—裂缝孔洞复合改造油气藏;R4—氧化改造稠油沥青藏;R5—高温裂解改造干气藏;BHAD—浮力成藏下限;HADL—油气成藏底限;ASDL—源岩层供烃底限。

图 16 全油气系统内动力场控油气藏分布模式及其埋深随地温梯度的变化特征(据文献[13,35]修改)

Fig. 16 Distribution pattern of dynamic field controlling oil and gas reservoirs and its buried depth variation with geothermal gradient in whole petroleum system

3.3.1 自由动力场控制的常规油气藏形成分布

在地表与浮力成藏下限之间相互沟通的、以高孔高渗储层为媒介的自由动力场控制着常规油气藏和油气资源的形成分布。油气排出源岩层后主要在高孔高渗储层内运移和聚集。受浮力主导,油气藏的形成分布受圈闭构造控制,通常呈现出“高点汇聚、高位封盖、高孔富集、高压成藏、源藏分离”等基本特征。该类油气藏通常不需要采取任何措施就有望获得自然产能,其埋藏深度较浅。

3.3.2 局限动力场控制的致密油气藏形成分布

在浮力成藏下限与油气成藏底限之间相互沟通的、以致密储层为媒介的局限动力场控制着致密油气藏的形成分布。油气排出源岩层后主要在低孔低渗储层内运移和聚集。受非浮力主导,油气藏的形成分布不受圈闭构造控制,通常呈现出“低坳汇聚、低位倒置、低孔富集、低压稳定、源藏紧邻”等基本特征。该类油气藏通常需要采取酸化压裂等改造措施才能获得商业产能,油气藏的埋藏深度较大。

3.3.3 束缚动力场控制的页岩油气藏形成分布

在油气成藏底限之下或源岩层内部相互沟通的、以超致密储层为媒介的束缚动力场控制着页岩油气资源的形成分布。油气生成后,因一部分油气被吸附作用和毛细管力作用而滞留在源岩层内可构成页岩油气资源。在源岩层的束缚动力场内,油气成藏受非浮力主导,油气藏的形成分布不受圈闭构造控制,通常呈现出“源-储一体、普遍致密、广泛分布、低渗低产”等基本特征。油气藏需要采取酸化压裂等改造措施才能获得商业产能。这类油气藏的埋藏深度变化大,在热演化程度较低时通常为页岩油,在热演化程度较高时则转变为页岩气。在油气成藏底限之下的束缚动力场内一般难以发现具有商业价值的油气资源。

3.3.4 动力场控藏模式的研究意义与实际应用

研究动力场演化及其控藏作用不仅可以揭示深层油气藏的形成过程和复杂性,还可以展示出浅层与深层油气藏形成分布间、常规与非常规油气藏形成分布间的差异性和关联性,进而为全油气系统内不同类别

油气藏的定量预测和评价提供理论和方法指导。

浮力成藏下限、油气成藏底限和源岩供烃底限 3 种动力门限所对应的最大埋深具有随地层年代、地温梯度、岩性、有机母质类型和烃类组分等不同而变化的地质特征,进而影响着自由动力场、局限动力场和束缚动力场的边界条件、领域大小以及资源潜力[图 16(b)]。3 种不同的动力场控制了 3 种不同类别油气藏和油气资源的形成分布。在实际地质条件下,自由动力场内也可能因岩性变化在局部范围内出现局限动力带,从而形成小范围的致密非常规油气藏;局限动力场内也可能因构造裂缝和大孔洞存在而在局部出现自由动力带,形成小范围的常规油气藏或高产甜点^[72]。在构造变动复杂的含油气盆地,当不同类别动力场在演化过程中的叠加复合形成改造类复杂动力场时,应用动力场阐述油气藏的分布规律需要具体问题具体分析。以下列举动力场控油气藏分布模式在油气勘探中的 3 个应用实例。

(1) 构造稳定条件下,由局限动力场控制形成广泛连片的非常规致密油气藏

鄂尔多斯盆地上古生界石炭系—二叠系目前处于局限动力场阶段,山西组主力源岩层所生成的天然气在大量排出后形成就近聚集,并在热膨胀力等作用向上排驱孔隙水,在上部上石盒子组储层内聚集成藏。由于构造稳定、地层平缓,该套致密气藏形成大面积分布,在上倾方向因孔隙度和渗透率变大而出现浮力成藏下限。其中,下限之下形成大面积分布的非常规致密气藏、下限之上则在构造高点形成受圈闭控制的常规气藏。鄂尔多斯盆地上古生界受局限动力场控制在砂岩目的层内形成的广泛连续分布的致密气藏,其天然气资源总量累积超过 $100 \times 10^{12} \text{ m}^3$,目前的探明储量超过 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[93]。

(2) 构造活动较大条件下,局限动力场控制的含油气性随构造部位的不同而产生变化

塔里木盆地库车坳陷东部广泛发育侏罗系和三叠系。伊南 2 井曾获得的天然气产量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,但在更高圈闭高点钻探的伊南 4 井和伊深 4 井中均失利。通过研究动力场演化与油气富集关系后发现,伊南 2 井周边处于局限动力场,发育叠复连续型油气藏。该油气藏在上倾方向受到强烈构造变动影响,由此导致已形成的油气藏遭受破坏;在下倾方向,聚集的油气因构造变动较弱而得到保护,由此认定下倾方向应为继续深化勘探的有利方向和区带。中国石油塔里木油田公司在伊南 2 井下倾方向部署和钻探的迪西 1 井获得高产,发现了迪北气田。这不仅证实了叠复连续型

油气藏的存在,并使得塔里木盆地克拉苏构造带的天然气资源储量由原来的 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增加到 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$,而且开拓了库车坳陷东部 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的油气勘探新领域,展示出广阔的勘探前景。

(3) 不同盆地中油气动力场控藏基本特征的差异性比较^[35]

图 17 例举了全球几个不同盆地内关于常规和非常规油气藏基本特征与动力场关联性的研究实例。图 17(a)的研究表明,不同类型的常规油气藏在自由动力场内呈现出不同的地质特征,但也有一些普遍相同的共性,即均受正向构造隆起控制,具有“高点汇聚、高位封盖、高孔富集、高压成藏”以及“源-藏分离”的普遍地质特征。图 17(b)的研究表明,不同类型致密油气藏在局限动力场中的分布具有不同的产状特征,但也呈现出普遍相同的共性,如主要分布在负向构造单元内,普遍具有“低坳汇聚、低位倒置、低孔聚集、低压稳定”以及“源-藏紧邻”等特征。图 17(c)展示了中国渤海湾盆地古近系砂岩储层油气动力场划分及其与常规和非常规油气藏分布之间的关联性:在浮力成藏下限之上,发育自由动力场,形成的常规油气藏呈现出“四高一分离”特征;在浮力成藏下限之下,发育局限动力场,形成的非常规致密油气藏呈现出“四低一紧临”特征。图 17(d)展示了中国松辽盆地白垩系砂岩目的层油气动力场划分及其与常规和非常规油气藏分布特征之间的关联性:在浮力成藏下限之上,发育自由动力场并形成常规油气藏;在浮力成藏下限之下,发育局限动力场并形成非常规致密油气藏。研究实例表明,动力边界围合构成的油气动力场对油气藏类别及其产状特征具有显著的控制作用。

3.4 分布门限组合控油气成藏模式

油气藏的形成分布受 4 个功能要素控制。笔者依据功能要素中控油气分布门限的时空组合机制建立了分布门限组合成藏模式,为油气藏的定量预测与评价提供了新的理论依据和方法指导^[78]。

3.4.1 功能要素组合成藏模式的内涵

功能要素组合成藏模式包括 3 个层次[图 18(a)]:
①纵向上,4 个功能要素(S、D、P 和 C)自下而上依照源-势-储-盖(S-P-D-C)的有序组合决定了“储”是最有利于成藏的目的层位;
②依据地史时期,4 个功能要素在同一地质时期(T)的有效联合决定了最有利成藏时期($T=t_s=t_D=t_P=t_C$);
③平面上,4 个功能要素的控油气门限范围叠加复合区($A=A_s \cap A_D \cap A_P \cap A_C$)决定了最有利成藏的富集区带(边界、范围和概率)。不同盆地功能要素组合的统计结果表明,86%以上的已

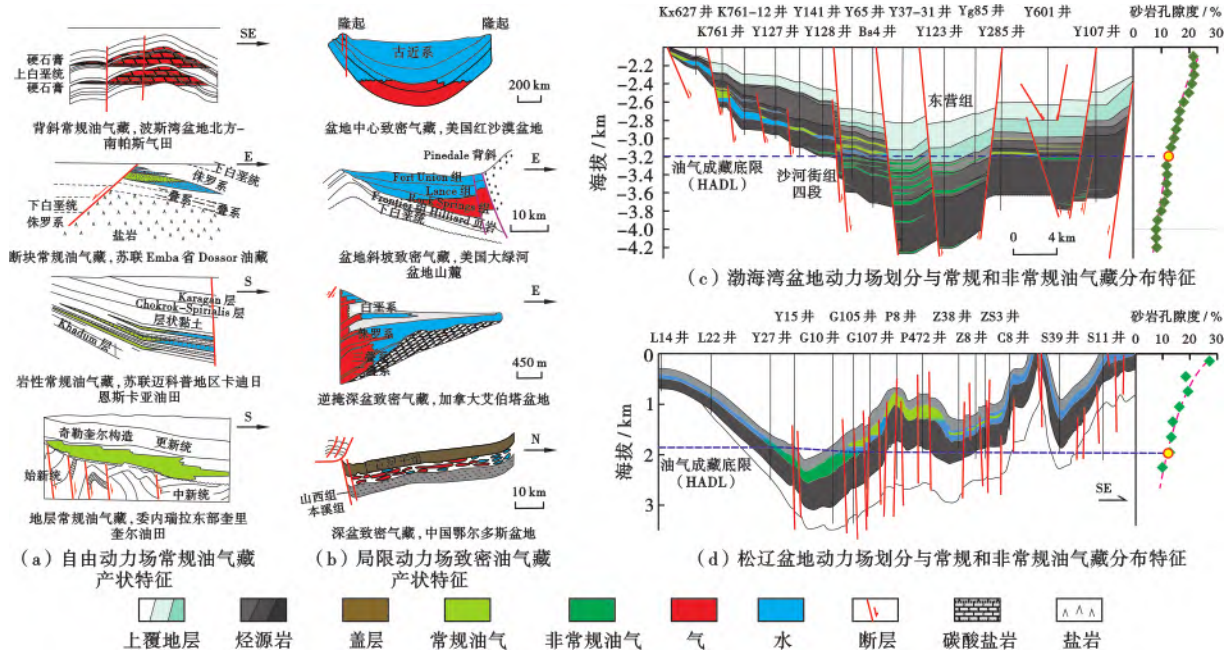
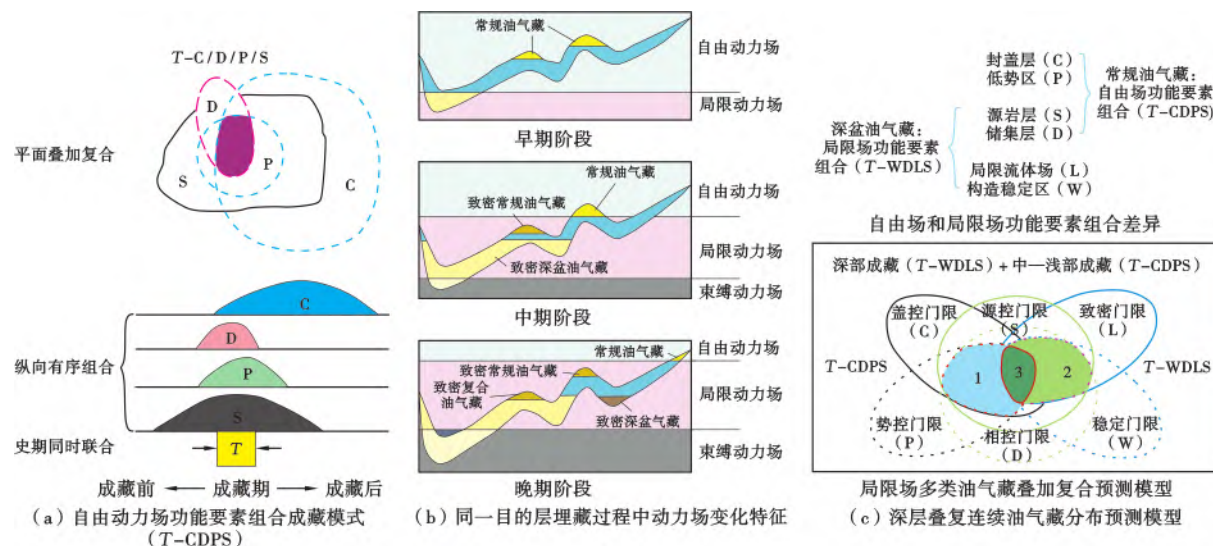


图 17 全球不同盆地油气动力场特征与油气藏类别之间的关联性研究实例(据文献[35]修改)
 Fig. 17 Correlation study of oil and gas dynamic field characteristics and reservoir types in global different basins



注: S—烃源灶控油气分布门限; D—储层相控油气分布门限; P—低势区控油气分布门限; C—区域盖层控油气分布门限; W—构造稳定区控油气分布门限; L—局限动力场控油气分布门限; T—功能要素同时联合有利成藏期; 1—致密常规油气藏有利分布区; 2—致密深盆油气藏有利分布区; 3—致密复合油气藏有利分布区。
 Fig. 18 Prediction of reservoir formation model of functional elements and superposition distribution of different reservoirs during the evolution of different dynamic fields in whole oil-gas system

探明油气藏分布在 4 个功能要素控油气门限的叠合区, 14% 的已探明油气藏分布在 3 个功能要素的叠合区, 没有油气藏分布在 2 个功能要素的叠合区或 1 个功能要素分布区。成藏模式的功能要素组合形式可以简化表达为 T-C/D/P/S。

3.4.2 功能要素组合成藏模式随动力场不同而变化
 在含油气盆地演化过程中, 由于同一目的层内的油气

动力场随埋深条件不同而演化, 因此功能要素组合成藏的形式也不同。在埋藏过程中, 早期主要经历自由动力场阶段, 形成常规油气藏; 中期主要经历局限动力场阶段, 形成致密深盆油气藏; 晚期主要经历局限动力场和束缚动力场阶段, 在局限动力场形成叠置连续油气藏[图 18(b)]。早期自由动力场内常规油气藏功能要素组合的模型为 T-CDPS; 中期阶段致密深盆油气藏功能要素组合的

模型为 T -WDLS; 晚期阶段叠复连续型油气藏, 功能要素组合的模型为 T -CDPS + T -WDLS [图 18(c)]。早期阶段的常规油气藏在晚期因深埋变化可转变为致密常规油气藏, 分布在连续型致密油气藏的 1 区和 3 区, 可依据 T -CDPS 模型预测其分布范围; 中期阶段的致密油气藏主要分布在连续型油气藏的 2 区和 3 区, 可基于 T -WDLS 模型预测其分布范围, 其中连续型油气藏的 3 区是浮力和非浮力叠加复合形成的油气藏, 概称为致密复合油气藏。同一目的层在当前深埋条件下形成的广泛叠复连续油气藏(致密常规油气藏区、致密深盆油气藏区、致密复合油气藏区)联合预测模式如图 18(c) 所示。晚期阶段主要发育束缚动力场, 不利于源外目的层形成油气藏。

3.4.3 功能要素组合成藏模式研究意义与应用实例

开展功能要素组合成藏模式研究具有三方面的现实意义。①能够将油气成藏的众多地质要素, 包括生、储、盖、运、圈、保的控制作用以 4 个功能要素高度概括并实现定量表征, 避免了人为主观因素的影响。②为揭示复杂地质过程中不同类别油气藏的形成演化机制创造了条件。4 个功能要素中变化最多的是低势区条件, 在背斜油气藏形成过程中表现为低位能、在断块油气藏形成过程中表现为低压能、在岩性油气藏形成过程中表现为低界面能、在地层油气藏形成过程中表现为低动能。目的层在演化过程中经历不同演化阶段和动力场控制作用, 进而形成不同类别油气藏在同一目的层内的叠加和复合。③为不同类别油气藏的分布预测与评价提供了新的理论依据和方法指导, 既可以用于预测单一成藏期油气分布的边界、范围、概率; 还可以预测多期成藏叠加和复合的边界、范围和概率。下面列举功能要素组合成藏模式的应用实例。

(1) 渤海湾盆地自由动力场多要素组合成藏预测评价

渤海湾盆地是中国最大的油气生产基地, 主要目的层为沙河街组、东营组、馆陶组砂岩储层, 主要源岩层为沙河街组四段、沙河街组三段、沙河街组一段以及东营组。继大背斜等显性油气藏被大量发现后, 油气勘探进入了隐蔽类油气藏勘探的新阶段, 预测和评价难度越来越大。在 2001—2008 年, 笔者团队分别与中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司、中国石油辽河油田公司和中海石油(中国)有限公司天津分公司分别联合开展了济阳拗陷、辽河拗陷西部凹陷、渤海盆地油气成藏机理重大应用基础研究, 通过剖析和统计分析, 确定了四大功能要素控油藏分布门限、建立了自由动力场源-储-盖(SDC)与低位能(M)、低压能(F)、低界面能(L)、低动力能(V)的组合成藏模式, 并利用相关

模式定量预测了油气的成藏层位、成藏时期和成藏区带。先后预测出 12 个目的层、4 类油气藏的 190 个有利成藏区带, 为油田公司部署 344 口探井、发现 13.16×10^8 t 油气储量以及探井成功率提高 18%~29% 发挥了理论指导和技术支撑作用^[92,94-95]。

(2) 塔里木盆地深层“多动力-多期次-多要素”叠加复合成藏区预测评价

塔里木盆地台盆区油气主要来源于寒武系和奥陶系两套源岩层, 源岩生成和排出的油气在运聚过程中的最大特点是经历了多期成藏和多期调整改造。研究表明, 台盆区古生界的寒武系、奥陶系、志留系、石炭系 4 套目的层先后至少经历过 4 期成藏作用, 分别发生于奥陶纪、志留纪、三叠纪、古近纪。不同时期不同目的层在不同区带的油气来源层位和源灶中心不同, 因此在当前条件下预测评价各目的层的油气成藏区带和最有利勘探区带非常困难。为解决相关难题, 在国家两个“973”计划项目的资助下, 笔者团队开展了各目的层主要成藏期的油气动力场恢复、功能要素控油藏分布门限模拟、功能要素组合成藏预测评价研究。图 19 展示了寒武系目的层 4 期成藏叠加复合有利区预测评价的研究结果^[96-97], 并在此基础上优选了最有利目标区。塔里木盆地台盆区油气藏主要分布在 6 000 m 以深, 总体具有非常规致密油气藏的特征, 连续分布并广泛含油气, 高产甜点区主要分布在断裂带附近、不整合面上下及二者交汇处。低孔低渗含油气层的钻遇比率最高, 超过 50%; 与断裂带形成有关的低孔高渗油气藏的钻遇比率较高, 达到 15%; 受不整合面控制的相对高孔低渗油气藏的钻遇比率为 19%。由于埋深大, 成本高, 塔里木盆地深层和超深层商业性油气藏的分布均与后期应力和流体作用下的裂缝改造和孔洞改造有关, 这与目的层在演化过程中先后受到早期浮力主导成藏、中期非浮力主导成藏、晚期应力主导成藏的多过程叠加复合有关, 是未来油气勘探的主要类型和方向^[96-97]。

(3) 四川盆地川西地区须家河组致密气多要素组合成藏过程预测评价

四川盆地川西地区三叠系须家河组广泛发育致密气藏, 须家河组一段、三段、五段泥质源岩层为天然气主要来源, 须家河组二段、四段砂岩层为主力含气目的层。钻探结果表明, 须家河组砂岩目的层段内的含气性非常复杂, 表现出高点和低点含气共存、高孔渗和低孔渗储层含气共存、早成和晚成含气层共存、高产和低产含气层共存, 天然气产状特征非常复杂。须家河组致密气藏既不像深盆气藏那样呈广泛致密连片, 也不像常规气藏那样集中在构造高点。深入剖析须家河组

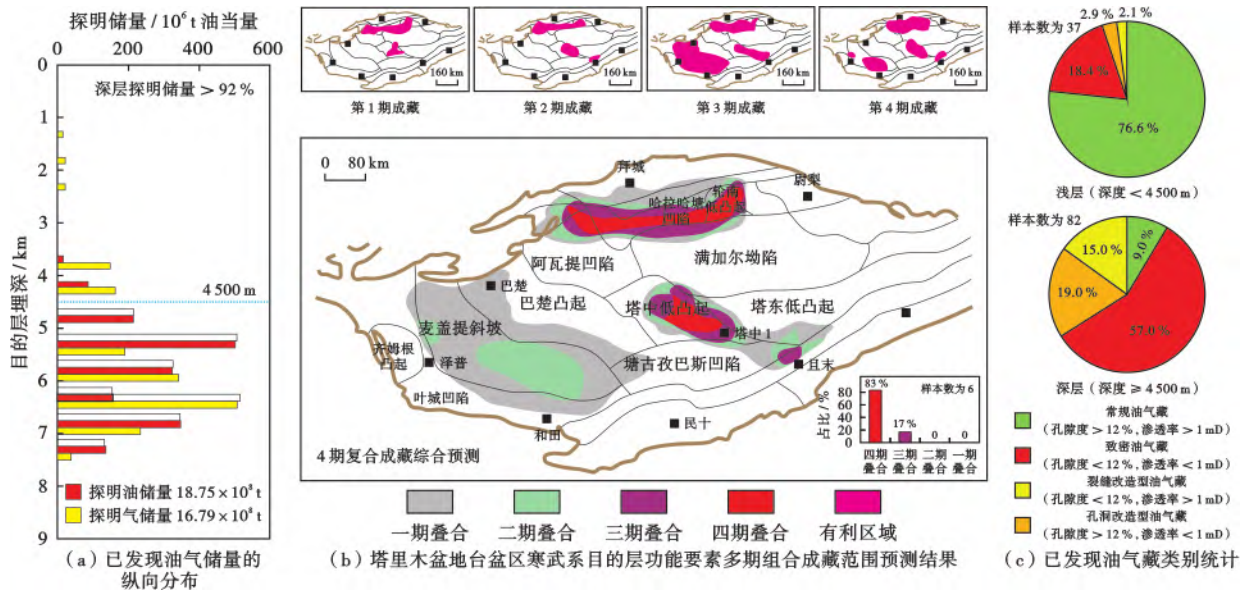


图 19 塔里木盆地深层油气藏地质特征、功能要素组合成藏模式及其在寒武系目的层有利成藏区预测评价中的应用(据文献[96-97]修改)

Fig. 19 Geological characteristics of deep oil and gas reservoirs, combination of functional elements and their application to prediction and evaluation of favorable reservoir forming areas in Cambrian target strata in Tarim Basin

二段、四段天然气的成藏历史发现,气藏早期在自由动力场阶段形成了常规气藏,分布在构造高点,晚期在局限动力场阶段形成了深盆气藏,分布在构造低部位。这两类气藏在当前埋深较大条件下的叠加和复合形成了复杂的产状特征。依据自由动力场功能要素组合成藏模式(T-CDPS)和局限动力场功能要素组合成藏模式(T-WDLS)预测了须家河组主要目的层须家河组二段在3个不同时期的油气藏分布特征(图20):早期地层埋藏浅,发育自由动力场,油气在圈闭高点聚集成藏,平面上主要分布在构造高部位[图20(a)];中期地层埋藏较深,主要发育局限动力场,油气在深拗区形成深盆油气藏,部分早期常规油气藏转变为致密常规油气藏,主要分布在深拗区及周边[图20(b)];晚期地层埋深大,广泛发育局限动力场,部分进入束缚动力场,致密油气藏叠复连片成复杂油气藏,剖面上构造高部位和低部位形成的油气藏共存复合成一体,平面上呈叠复连片分布[图20(c)];当埋深过大进入束缚动力场后则不利于油气勘探^[98]。

(4) 油气富集门限研究与有利钻探目标优选

在确定有利成藏区带后需要部署探井并力求获得勘探发现,这一工作需要在更加细小的尺度上进行^[99]。首先,基于对有利区带内已发现油气藏的富油气特征剖析,确定油气富集程度与源岩排烃中心距离、排烃强度等之间的定量关系,建立源控油气富集指数(I_S);确定油气富集程度与沉积岩相之间的定量关系,建立相控油气富集指数(I_F);确定油气富集程度与

储层内外毛细管力差之间的定量关系,建立势控油气富集指数(I_P)。然后,依据 I_S 、 I_F 、 I_P 的关联作用提出“相势源”复合指数(I_{FPS}),进而依据 I_{FPS} 的大小判别和评价有利目标的含油气性:

$$I_{FPS} = \frac{1/\sqrt{2} + I_F^2(1 - I_P)^2 + I_S}{2} \quad (1)$$

渤海湾盆地发育大量的断块油气藏,含油气性变化大,不仅与源岩的生、排烃特征有关,还与源岩中心距断裂带的距离和储层内外势差等条件有关。依照上述方法确定,这些断块油气藏依据“相势源”复合指数判别商业油气藏的标准为 $I_{FPS} \geq 0.6$,对应油气富集饱和度大于等于40%。 I_{FPS} 越大,有利目标的成藏概率越高,含油气饱和度越大[图21(a)、图21(b)]。依据 I_{FPS} 预测东营凹陷沙河街组三段中亚段油气富集程度平面分布特征,其中,图21(c)中红色区块为已经发现的油气藏,非红色区块的 I_{FPS} 高值区为潜在有利勘探目标,并在应用相关研究成果指导下使得探井成功率提高20%。

“相势源”复合指数不仅可用于常规油气藏潜在有利目标的预测评价和优选,也可以用于非常规致密油气藏潜在目标的预测评价和优选。图21(b)显示了鄂尔多斯盆地苏里格庙已发现油气区的钻探结果经剖析后建立的 I_{FPS} 分布特征。检验表明: $I_{FPS} \leq 0.25$,探井失利率为100%,成功井为0; I_{FPS} 为0.25~0.50,探井失利率为79.2%,成功井占20.8%; I_{FPS} 为0.50~0.75,探井失利率为11.8%,成功井占88.2%; $I_{FPS} \geq$

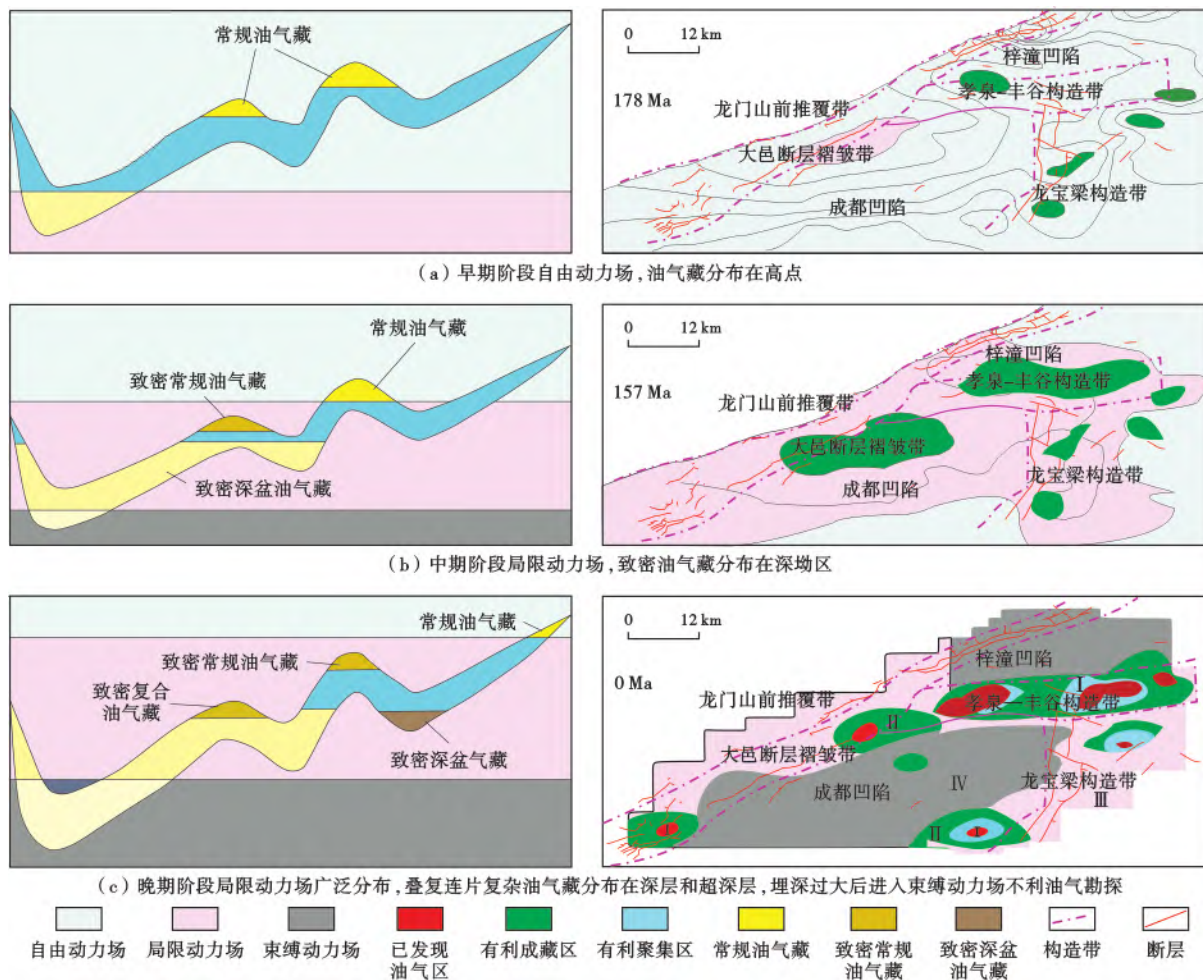


图 20 基于功能要素组合成藏模式预测四川盆地川西须家河组不同演化阶段的动力场内有利成藏区带与分布特征 (据文献[98]修改)

Fig. 20 Favorable accumulation zones and distribution characteristics of hydrocarbon accumulations in dynamic fields at different evolution stages of Xujiache Formation in western Sichuan Basin based on the accumulation model of functional elements combination

0.75, 探井失利率为 0, 成功井占 100.0%。图 21(d) 为依据 I_{FPS} 对苏里格庙主力目的层的富气程度进行预测评价的结果, 优选出 3 个最有利钻探目标, 并在应用相关成果指导钻探后使得商业性探井的比率超过 87%, 较早前其他方法提高了 17%。

4 全油气系统定量评价研究发展方向

以油气门限研究为切入点剖析油气生、排、运、聚、成藏等过程, 能够实现全油气系统定量评价, 预测常规类、致密类、页岩类油气资源的有效勘探区, 并对一些世界性难题进行探索, 给出新认识。

4.1 基于油气门限组合的差异性和关联性对全油气系统内常规和非常规油气藏进行统一成因分类
全油气系统内能够形成多少种油气藏? 这一问题长期困扰着油气地质学家, 也影响着油气勘探成效。

目前, 国内外学者大都将常规油气和非常规油气当成两种不同类别的油气藏和油气资源进行研究并分别指导勘探和生产, 有些国家还对开采非常规油气资源给予财政补贴, 列为专门的新矿种。事实上, 常规与非常规油气藏并非完全独立, 更不能视为两个不同的油气系统进行研究, 二者都是全油气系统演化过程中的产物。在一个完整的全油气系统内, 可以通过开展常规油气成藏机制研究(从源岩到圈闭成藏)、致密油气成藏机制研究(从源岩到源外非圈闭成藏)和页岩油气成藏机制研究(从源内到源内非圈闭成藏), 依据各类油气成藏不同功能要素的组合关系可以推定全油气系统内可能存在的油气藏种类和样式(图 22)。Pang 等^[35]依据不同动力场内不同类别功能要素的时空组合关系推定全油气系统内能够发育 3 大类 6 亚类 15 种 49 样油气藏, 从而为不同地质条件下寻找不同类别油气资

源提供了科学依据。

第1大类为自由动力场内浮力作用主导形成的常规油气藏,普遍具有“四高一分离”的地质特征。依据圈闭的成因机制和形态特征可将常规油气藏分为构造

和岩性-地层2个亚类;再依据各类圈闭的成因特征可将常规油气藏分为5种,包括背斜油气藏、断块油气藏、地层油气藏、岩性油气藏和特殊封闭机制油气藏;最后,进一步依据圈闭的形态或样式还可进行细分。

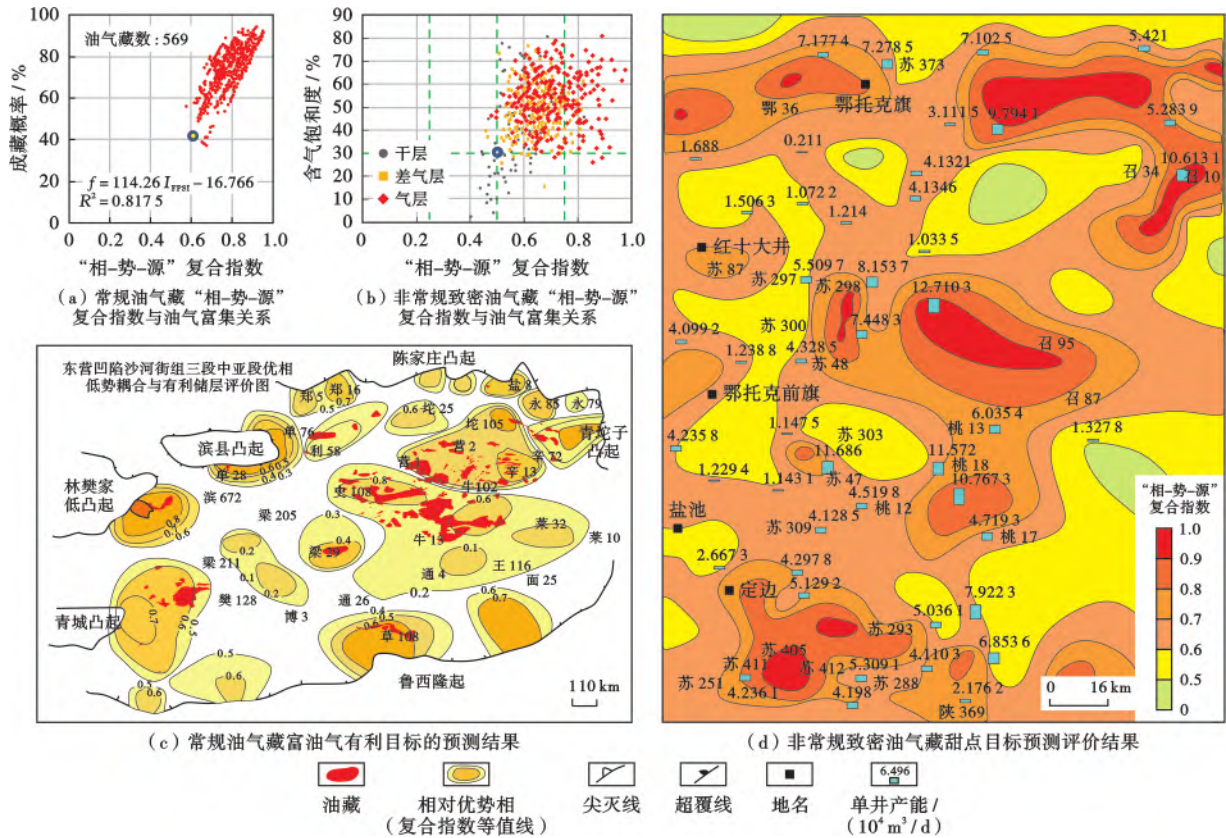


图 21 “相-势-源”复合指数预测评价全油气系统内目的层富气程度并优选钻探目标的研究实例(据文献[99]修改)
Fig. 21 Case study of “phase-potential-source” composite index prediction and evaluation of oil and gas enrichment degree of target layer and optimized drilling targets in whole petroleum system

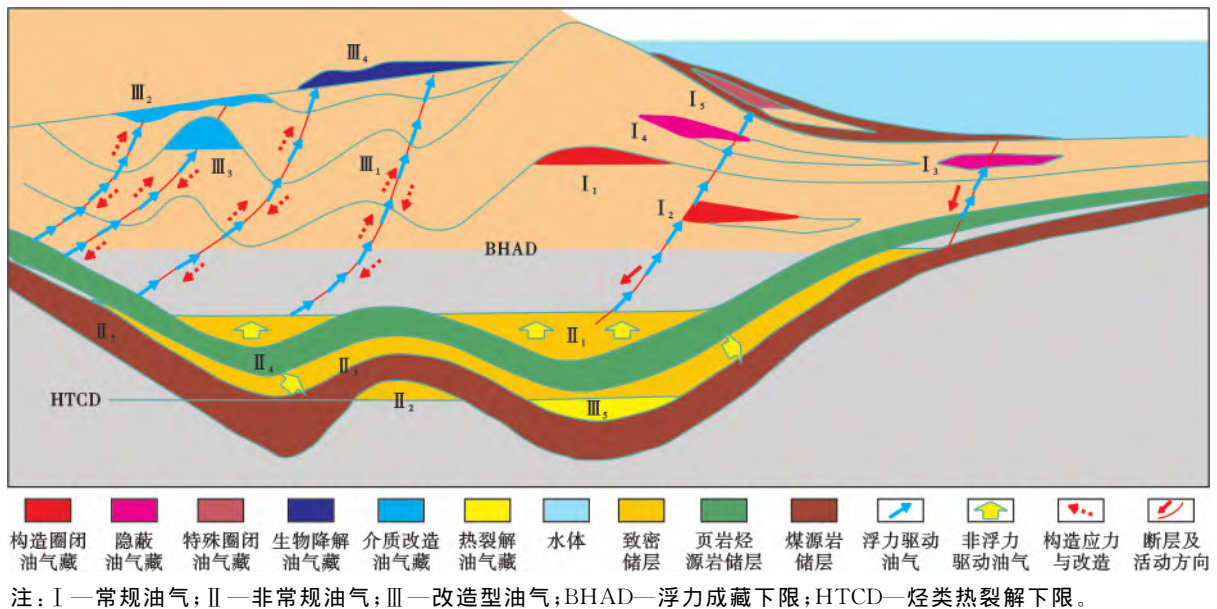


图 22 常规与非常规油气藏之间的差异性与关联性及动力学分类(据文献[35]修改)
Fig. 22 Difference, correlation and dynamic classification between conventional and unconventional oil and gas reservoirs

第 2 大类为局限动力场和束缚动力场非浮力主导形成的致密油气藏,普遍具有“广泛致密、连续分布”的地质特征。依据致密油气藏与源岩层的关系可将其分为源外致密和源内超致密 2 个亚类;再依据致密储层的成因机制和特性可分为致密常规油气藏、致密深盆油气藏、致密复合油气藏、煤层油气藏和页岩油气藏 5 种;最后,依据致密油气藏分布的形态特征还可进一步细分出不同样式。

第 3 大类为改造动力场外力作用主导形成的改造类油气藏,普遍具有“位置迁移、规模改造、组分破坏、相态异常”等基本地质特征。依据被改造的内容可将改造类油气藏分为介质改造和组分改造 2 个亚类;再依据成因机制将改造类油气藏分为断层改造油气藏、不整合改造油气藏、断层不整合复合改造油气藏、生物降解改造稠油沥青藏和热裂解改造干气藏 5 种;最后,依据改造后的形态特征还可进一步细分出不同样式。

4.2 基于油气门限研究全球油气系统剩余资源潜力

未来油气资源发展的方向在哪里?进入 21 世纪后,《Science》期刊将接替油气的新能源列为了人类 21 世纪面临的 125 个最大难题之一^[100]。通过全油气系统定量评价研究发现,剩余油气资源主要形成分布于非常规致密油气藏内、深层和超深层油气藏内以及未来高新技术能够开采的油气藏内。

(1) 剩余油气资源主要为非常规油气资源。全球现实油气资源中,常规油气分布最多($9\,555 \times 10^8$ t),次为致密油气($7\,109.6 \times 10^8$ t)和页岩油气($5\,113.9 \times 10^8$ t),其探明率分别约为 48.1%、2.4%和 0.7%[图 23(a)];剩余资源量自多到少分别为致密油气($6\,939 \times 10^8$ t)、页岩油气($5\,080 \times 10^8$ t)和常规油气($4\,963 \times 10^8$ t)。现实剩余的非常规油气(致密油气+页岩油气)资源量是常规油气资源量的 2.42 倍,占总量的 71%,而现实剩余的常规油气资源量仅占 29%,这表明未来油气资源的发展方向为非常规油气。

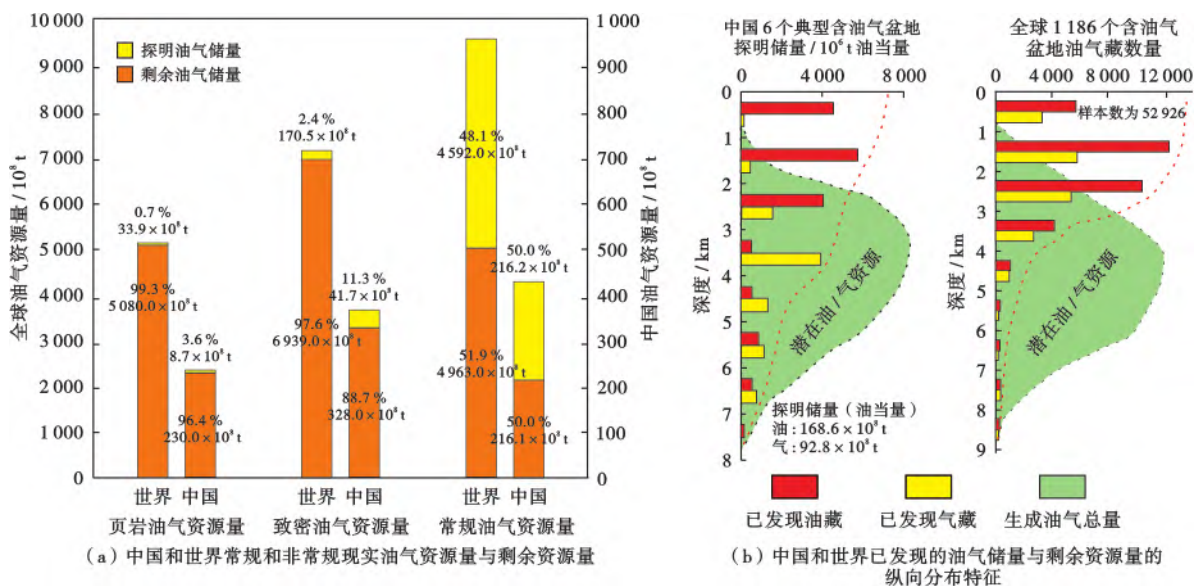


图 23 基于油气门限研究预测和评价中国和世界现实油气资源量与剩余资源量及其分布特征

Fig. 23 Prediction and evaluation of realistic and remaining oil and gas resources and their distribution characteristics in China and the world based on hydrocarbon threshold research

(2) 剩余油气资源主要分布在深层和超深层。全球已探明油气主要分布在埋深较小的中—浅层,在全球已发现的 52 926 个油气藏中 87% 以上的埋深浅于 4 000 m[图 23(b)]。中国 6 个代表性含油气盆地的已探明石油储量(168.6×10^8 t)有 90% 以上分布在埋深浅于 3 000 m 的地层内,已探明天然气储量(92.8×10^8 t 油当量)有 65% 以上的埋深分布在 2 000~5 000 m。中—浅层已发现的油气藏数量和储量远超 50%,而源岩层在这一地层领域内实际生成和排出的烃量远低于 50%,这表明中—浅层油气藏的勘探开发潜力有限。

目前,尽管在深层和超深层(深度 $>4\,500$ m)领域发现的油气藏数量和油气储量远少于 50%,但这一领域源岩层中已生成和排出的油气量远远超过总量的 50%,且由于深层源岩生成和排出的油气处于局限动力场内,油气只能就地聚集成藏。统计结果表明,深层有待进一步探明的剩余资源储量远远高于中—浅层,是未来油气资源发展的主要方向。

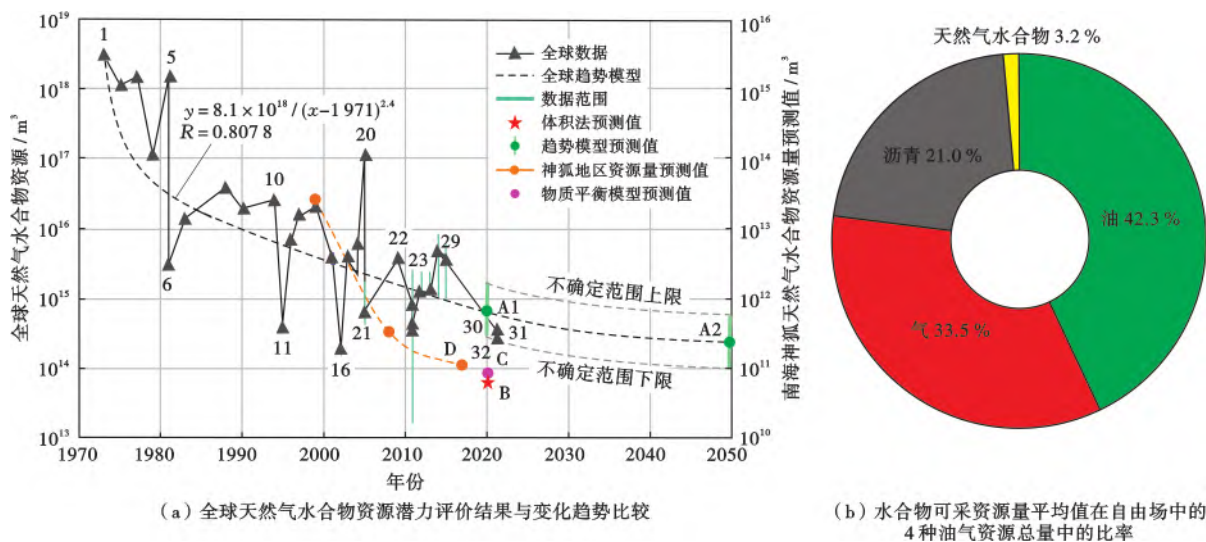
(3) 剩余油气资源主要分布在未来高新技术能够触及的地层领域。人类近 200 年来已商业开发了 0.4×10^{12} t 油当量的油气,现有技术条件下的采收率平均约

为 8.4%。如果这些技术能够全面展开应用且不考虑商业成效,那么能够最大限度采出的油气可以达到 2.18×10^{12} t 油当量;如果油气开采的技术水平能够使得采收率达到 50%,则能够采出的油气可以达到 12.93×10^{12} t 油当量;如果油气开采的技术水平能够使得地下的剩余油气资源全部开采出来,即采收率达到 100%,则能够采出的油气可达到 25.84×10^{12} t 油当量。统计结果表明,可采油气资源集中富集在未来高技术水平领域。

4.3 基于油气门限研究评价全球水合物资源潜力

天然气水合物能否构成未来全球发展的主要能源?自 1973 年苏联学者第一次评价全球水合物资源潜力高达 $3 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 以来^[101],人类对于这一高密度、

低碳、清洁能源寄予了厚望,并将其视为接替常规油气的新能源,以解决未来能源短缺的问题^[102-103]。21 世纪以来,美国^[104]、日本^[105]、加拿大^[106]、印度^[107]、韩国^[108]和中国^[109]启动了天然气水合物研究项目,每年发表的天然气水合物论文数量也在快速增加。截至 2020 年,至少有 29 个科研团队对全球水合物资源潜力进行过评价,不同学者的评价结果差异大,最大差别高达 10 000 多倍。庞雄奇等^[110]基于油气门限控藏研究提出了天然气水合物资源潜力评价新方法并获得了完全不同的新认识,天然气水合物资源所占比率平均小于 5% 并认为全球天然气水合物不可能构成人类未来的主要能源(图 24)。



(a) 全球天然气水合物资源潜力评价结果与变化趋势比较

(b) 水合物可采资源量平均值在自由场中的 4 种油气资源总量中的比率

注: A1、A2—趋势分析法预测结果(2020 年、2050 年);B—体积法评价结果;C—物质平衡法(油气门限控藏模式)评价结果;D—中国南海神狐地区评价结果。

图 24 基于动力场控油气资源形成模式评价全球天然气水合物资源潜力及其与其他方法评价结果比较(据文献^[110]修改)

Fig. 24 Evaluation of global gas hydrate resource potential based on dynamic field controlling oil and gas resource formation model and its comparison with other evaluation methods

通过剖析全球已发现 13 个水合物矿藏的烃类氢碳同位素等地质和地球化学特征发现,天然气水合物中的甲烷气等组分与常规和非常规油气一样,均来自沉积有机质降解作用。通过地质类比发现,天然气水合物的形成条件与常规油气藏的形成条件相同。天然气水合物除温压条件形成于高压低温的相平衡环境外,其他形成条件诸如油气来源、储集、运聚和保存等均与常规油气藏一样。由此可知,天然气水合物为一种特殊形式的常规油气资源,形成分布于浮力成藏下限之上的自由动力场内,受浮力主导和圈闭控制。天然气水合物的资源潜力受自由动力场内已发现的常规油气资源量和稠油沥青资源量综合控制,水合物资源量所占自由动力场内所形成油气资源总量的比率与有利于水合物形成分布的高压低温稳定带(GHSZ)的岩

体体积与自由动力场内岩体总体积的比率相关。依据这一原理建立了自由动力场内天然气水合物资源潜力与常规油气资源和稠油沥青资源之间的物质平衡方程,在已知常规油气资源量(圈闭内的油气量)和稠油沥青资源量(受改造后圈闭内的油气量)等地质参数的情况下,反演出全球天然气水合物的资源量(特殊圈闭内的油气量)为 $(11 \sim 46) \times 10^{12} \text{ m}^3$,约占全球常规油气资源总量的 1.9%~4.2% [图 24(a)中物质平衡法评价结果]。

基于其他两种方法获得的结果与自由动力场油气物质平衡法获得的结果接近,反映了新方法的可靠性。全球天然气水合物资源潜力不断减少的评价结果反映了随着地质调查资料积累和认识程度加深,评价结果也越来越接近实际。基于早前 29 个科研团队获得的

全球水合物资源量及其变化趋势,全球 2050 年的水合物可采资源量预测为 $(41\sim 91)\times 10^{12}\text{ m}^3$,约占全球常规油气资源总量的 3.2%~6.4% [图 24(b)]。根据中国南海神狐探区的钻探结果,将其与全球沉积盆地进行类比,借助体积法和蒙德卡洛模拟技术定量评价全球天然气水合物的可采资源量为 $(22\sim 63)\times 10^{12}\text{ m}^3$ [图 24(a)中体积法评价结果],约占全球常规油气资源总量的 1.6%~4.4%。

5 结 论

(1) 油气系统理论概括了浮力成藏、圈闭控藏、有机生烃、源控油气分布等方面的研究结果,奠定了现代油气地质学理论基础,虽然经过了不断完善和发展,但仍不能完全适合指导多动力-多期次-多要素复合下的非常规油气资源勘探。

(2) 全油气系统概念的提出为完善和发展复杂条件下的油气地质理论指明了方向,其研究内容涉及油气成藏全要素、形成演化全过程、资源分布全系列、预测评价全方位,既可用于指导常规油气勘探,也可用于指导非常规油气勘探。

(3) 基于全油气系统学术思想剖析国内外代表性盆地内常规和非常规油气藏的地质特征,发现了 3 类 10 种油气门限,建立了运聚门限联合控油气资源形成模式、动力场控油气藏分布模式、分布门限组合成藏模式,为常规和非常规油气藏的分布预测提供了新的理论指导和技术支撑并在实际应用中取得显著成效。

(4) 开展全油气系统研究可以解决油气领域长期以来没有解决的一些世界性难题,包括常规和非常规油气藏统一成因分类、常规和非常规油气资源剩余潜力分布预测、全球天然气水合物发展前景评价等等,展示出巨大的发展潜力。

参 考 文 献

- [1] 杜君立. 石油:一部现代史[J]. 企业观察家,2017(10):110-111.
DU Junli. Oil: a modern history[J]. Corporate Observer, 2017(10):110-111.
- [2] 吴凤鸣. 石油地质学百年历史回顾与展望——从 1859 年德瑞克“世界第一口油井”140 年谈起[J]. 石油科技论坛,1999(6):59-65.
WU Fengming. Retrospect and prospect of a century of petroleum geology—from the 140 years of Drake’s “World’s First Oil Well” in 1859[J]. Forum on Petroleum Science and Technology, 1999(5):59-65.
- [3] TENNEY L D. Thomas sterry hunt (1826-1892)[J]. Journal of Chemical Education, 1936, 13(10):451.
- [4] WHITE I C. The geology of natural gas[J]. Science, 1885, 5(125):521-522.
- [5] MCCOLLOUGH E H. Structural influence on the accumulation of petroleum in California[M]// WRATHER W E, LAHEE F H. Problems of petroleum geology. Tulsa: AAPG, 1934.
- [6] WILSON W B. Proposed classification of oil and gas reservoirs [M]// WRATHER W E, LAHEE F H. Problems of petroleum geology. Tulsa: AAPG, 1934:433-445.
- [7] LEVORSEN A I. Stratigraphic versus structural accumulation [J]. AAPG Bulletin, 1936, 20(5):521-530.
- [8] HUNT J M. Petroleum geochemistry and geology [M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1979.
- [9] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence [M]. New York: Springer-Verlag, 1978.
- [10] DOW W G. Application of oil correlation and source rock data to exploration in Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 1972, 58(7):615.
- [11] MAGOON L B, DOW W G. The petroleum system—status of research and methods[J]. USGS Bull, 1992, 20(7):98.
- [12] TROFIMUK A A, CHERSKIY N V, TSAREV V P. Accumulation of natural gases in zones of hydrate formation in the hydrosphere [J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1973, 212:931-934.
- [13] 杨立雄. 美国煤层气产业成功发展浅析[J]. 中国煤炭, 2003(10):61-62.
YANG Lixiong. Analysis on the successful development of coalbed methane industry in the United States[J]. China Coal, 2003(10):61-62.
- [14] MASTERS J A. Deep Basin gas trap, western Canada[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(2):152-181.
- [15] 李欣, 段胜楷, 孙扬, 等. 美国页岩气勘探开发最新进展[J]. 天然气工业, 2011, 31(8):124-126.
LI Xing, DUAN Shengkai, SUN Yang, et al. Advances in the exploration and development of U. S. shale gas[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8):124-126.
- [16] SCHMOKER J W. Method for assessing continuous-type (unconventional) hydrocarbon accumulations [M]// GAUTIER D L, DOLTON GL, TAKAHASHI KI, et al. National assessment of United States oil and gas resources—results, methodology, and supporting Data. Tulsa: USGS, 1995.
- [17] IEA. World energy outlook 2010[R]. Paris: IEA, 2010.
- [18] IEA. World energy outlook 2007[R]. Paris: IEA, 2007
- [19] IEA. World energy outlook 2018[R]. Paris: IEA, 2018.
- [20] EIA. International energy outlook[R]. Washington: U. S. Energy Information Administration, 2020.
- [21] JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geology theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1):1-10.
- [22] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2):173-187.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas

- in China as an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187.
- [23] ROSE P R, EVERETT J R, MERIN I S. Possible basin centered gas accumulation, Roton Basin, Southern Colorado[J]. *Oil & Gas Journal*, 1984, 82(10): 190-197.
- [24] 吴河勇, 王跃文, 梁晓东, 等. 向斜成藏理论及其石油地质意义[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 181-188.
WU Heyong, WANG Yuewen, LIANG Xiaodong, et al. Theory of petroleum accumulation in syncline and its significance to petroleum geology[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 181-188.
- [25] SPENCER C W. Geologic aspects of tight gas reservoirs in the rocky mountain region[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1985, 37(7): 1308-1314.
- [26] 张金川. 从“深盆气”到“根缘气”[J]. *天然气工业*, 2006, 26(2): 46-48.
ZHANG Jinchuan. Source-contacting gas: derived from deep basin gas or basin-centered gas[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(2): 46-48.
- [27] CLAYPOOL G E. Kerogen conversion in fractured shale petroleum systems[C]// American Association of Petroleum Geologists, 1998 Annual Meeting. Salt Lake City: AAPG, 1998.
- [28] RUBINSTEIN I, STRAUSS O P, SPYCKERELLE C, et al. The origin of the oil sand bitumens of Alberta: a chemical and a microbiological simulation study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41(9): 1341-1353.
- [29] MEYER R F, ATTANASI E D, FREEMAN P A. Heavy oil and natural bitumen resources in geological basins of the world[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2007.
- [30] RIGHTMIRE C T, EDDY G E, KIRR J N. Coalbed methane resources of the United States[M]. Midland: American Association of Petroleum Geologists, 1984.
- [31] COLLETT T S. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [32] SCHMOKER J W, OSCARSON S A. Descriptions of continuous-type (unconventional) plays of the U. S. Geological Survey 1995 National Assessment of United States oil and gas resources[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1995: 95-97.
- [33] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 437-452.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: hydrocarbon self-containment and intermolecular forces[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 437-452.
- [34] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(4): 385-399.
ZOU Caineng, ZHANG Guosheng, YANG Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: on unconventional petroleum geology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4): 385-399.
- [35] PANG Xiongqi, SHAO Xinde, LI Maowen, et al. Correlation and difference between conventional and unconventional reservoirs and their unified genetic classification[J]. *Gondwana Research*, 2021, 97: 73-100.
- [36] LEVORSEN A I. *Geology of petroleum*[M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1956.
- [37] BROOKS B T. Origin of petroleum[J]. *Science*, 1935, 81(2094): 176.
- [38] DURAND B. Kerogen: insoluble organic matter from sedimentary rocks[M]. Paris: Editions Technip, 1980: 35-53.
- [39] DOW W G. Application of oil-correlation and source-rock data to exploration in Williston Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1974, 58(7): 1253-1262.
- [40] PERRODON A, MASSE P. Subsidence, sedimentation and petroleum systems[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1984, 7(1): 5-25.
- [41] PERRODON A. Petroleum systems: models and applications[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1992, 15(2): 319-325.
- [42] MAGOON L B, DOW W G. The petroleum system—from source to trap[M]. American Association of Petroleum Geologists, 1994.
- [43] 何登发, 赵文智, 雷振宇, 等. 中国叠合型盆地复合含油气系统的基本特征[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 23-37.
HE Dengfa, ZHAO Wenzhi, LEI Zhenyu, et al. Characteristics of composite petroleum systems of superimposed basins in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 23-37.
- [44] MAGOON L B, SCHMOKER J W. The total petroleum system: the natural fluid network that constrains the assessment unit[R]. Reston: U. S. Geological Survey World Petroleum Assessment, 2000.
- [45] 赵文智, 何登发, 池英柳, 等. 中国复合含油气系统的基本特征与勘探技术[J]. *石油学报*, 2001, 22(1): 6-13.
ZHAO Wenzhi, HE Dengfa, CHI Yingliu, et al. Major characteristics and exploration technology of multi-source petroleum systems in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(1): 6-13.
- [46] 金之钧, 张一伟, 王捷. 油气成藏机理与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
JIN Zhijun, ZHANG Yiwei, WANG Jie. *Hydrocarbon accumulation mechanisms and oil/gas distribution*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [47] WANDREY C J, LAW B E, SHAH H A. Patala-nammal composite total petroleum system, Kohat-Potwar geologic province, Pakistan[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2004.
- [48] 唐勇, 曹剑, 何文军, 等. 从玛湖大油区发现看全油气系统地质理论发展趋势[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(1): 1-9.
TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, et al. Development tendency of geological theory of total petroleum system: insights from the discovery of mahu large oil province[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(1): 1-9.
- [49] 李贤庆, 潘继平, 许晓宏. 含油气系统基本理论与实践[J]. *断块油气田*, 2000, 7(1): 1-5.
LI Xianqing, PAN Jiping, XU Xiaohong. The fundamental theories and practice of petroleum system[J]. *Fault-Block Oil &*

- Gas Field, 2000, 7(1):1-5.
- [50] 刘静江,刘池洋,王震亮.从含油气系统到成藏油气系统——油气系统研究新动向[J].地质论评,2008,54(6):801-806.
LIU Jingjiang, LIU Chiyang, WANG Zhenliang. Advances from petroleum system to accumulating petroleum system[J]. Geological Review, 2008, 54(6):801-806.
- [51] 周晓,陈琦.含油气系统研究在中国的应用[J].内蒙古石油化工,2008,34(20):116-117.
ZHOU Xiao, CHEN Qi. Application of system research containing oil and gas in China[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 34(20):116-117.
- [52] 魏恒飞,李秋媛,毕建军,等.论烃源岩层系含油气系统[J].大庆石油地质与开发,2020,39(6):1-12.
WEI Hengfei, LI Qiuyuan, BI Jianjun, et al. Discussion on the petroleum system of hydrocarbon source-rock series[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(6):1-12.
- [53] 庞雄奇,罗晓容,姜振学,等.中国典型叠合盆地油气聚散机理与定量模拟[M].北京:科学出版社,2007.
PANG Xiongqi, LUO Xiaorong, JIANG Zhenxue, et al. Mechanism and quantitative simulation of oil and gas convergence and dispersion in China's typical superimposed basins[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [54] JIANG Fujie, PANG Xiongqi, LI Longlong, et al. Petroleum resources in the Nanpu sag, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(7):1213-1237.
- [55] CHEN Junqing, PANG Xiongqi, WANG Xulong, et al. A new method for assessing tight oil, with application to the Lucaogou Formation in the Jimusaer depression, Junggar Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2020, 104(6):1199-1229.
- [56] 贾承造.论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J].石油勘探与开发,2017,44(1):1-11.
JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geology theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1):1-11.
- [57] 贾承造.准噶尔盆地二叠系油气系统玛湖凹陷常规油-致密油-页岩油序列成藏特征与机理[C]//2019年度学术委员会年会暨学术交流会.北京:中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,2019.
JIA Chengzao. Accumulation characteristics and mechanism of conventional oil-tight oil-shale oil sequence in Mahu sag, Permian oil and gas system, Junggar Basin[C]//2019 Annual Meeting of Academic Committee and Academic Exchange Meeting. Beijing: State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, 2019
- [58] IHS Energy Group. International petroleum exploration and production database. Englewood, Colorado: IHS Energy Group, 2010.
- [59] 曾焜辉,金之钧.油气二次运移和聚集物理模拟[M].北京:石油工业出版社,2000.
ZENG Jianhui, JIN Zhijun. Physical simulation of secondary migration and accumulation of oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [60] 中华人民共和国自然资源部.2016年全国油气勘探与开发报告[R].北京:中华人民共和国自然资源部,2016.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2016 national oil and gas exploration and development report[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2016.
- [61] 庞雄奇,陈章明,方祖康.煤化模拟实验中产物量与温度、时间的关系及其地质意义[J].大庆石油学院学报,1985(4):40-53.
PANG Xiongqi, CHEN Zhangming, FANG Zukang. The relationship between product quantity and temperature and time in coal chemical simulation experiment and its geological significance [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1985(4):40-53.
- [62] 庞雄奇,陈章明,方祖康,等.海拉尔盆地源岩排油量计算及其定量评价[J].石油学报,1992,13(4):10-19.
PANG Xiongqi, CHEN Zhangming, FANG Zukang, et al. Estimation of the amount of oil and gas expelled from source rocks in the Hlr Basin and their quantitative evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13(4):10-19.
- [63] 庞雄奇.排烃门限控油气理论与应用[M].北京:石油工业出版社,1995.
PANG Xiongqi. Theory and application of hydrocarbon expulsion threshold control[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [64] 庞雄奇.煤系源岩排烃门限理论研究与应用[M].北京:石油工业出版社,2001.
PANG Xiongqi. Research and application of hydrocarbon expulsion threshold theory of coal measure source rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [65] PANG Xiongqi, LI Maowen, LI Sumei, et al. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang south slope of Bohai Bay Basin, part 3. estimating hydrocarbon expulsion from the Shahejie Formation[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(4):497-510.
- [66] YAN Jianzhao, LUO Xiaorong, WANG Weimin, et al. An experimental study of secondary oil migration in a three-dimensional tilted porous medium[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(5):773-788.
- [67] RONOVA B. Organic carbon in sedimentary rocks (in relation to the presence of petroleum)[J]. Geochemistry, 1958, 5:497-509.
- [68] CHONG Zhengrong, YANG S H B, BABU P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: prospects and challenges[J]. Applied Energy, 2016, 162:1633-1652.
- [69] 庞雄奇.油气运聚门限与资源潜力评价[M].北京:科学出版社,2014.
PANG Xiongqi. Hydrocarbon migration and accumulation threshold and the resource potential evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [70] LUO Xiaorong, ZHANG Likun, LEI Yuhong, et al. Petroleum migration and accumulation: modeling and applications [J]. AAPG Bulletin, 2020, 104(11):2247-2265.
- [71] 姜振学,庞雄奇,周心怀,等.油气资源评价的多参数约束改进油

- 气田(藏)规模序列法及其应用[J]. 海相油气地质, 2009, 14(3): 53-59.
- JIANG Zhenxue, PANG Xiongqi, ZHOU Xinhui, et al. Multiparameter constrained reservoir size sequential method for petroleum resource estimation and the application[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(3): 53-59.
- [72] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, WANG Wenyang, et al. Buoyance-driven hydrocarbon accumulation depth and its implication for unconventional resource prediction[J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(4): 101133.
- [73] PANG Xiongqi, HU Tao, LARTER S, et al. Hydrocarbon accumulation depth limit and implications for potential resources prediction[J]. Gondwana Research, 2022, 103: 389-400.
- [74] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, ZHANG Kun, et al. The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(1): 577-590.
- [75] 庞雄奇, 陈冬霞, 张俊, 等. 相势-源复合控油气成藏机制物理模拟实验研究[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 575-592.
- PANG Xiongqi, CHEN Dongxia, ZHANG Jun, et al. Physical simulation experimental study on mechanism for hydrocarbon accumulation controlled by facies-potential-source coupling[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 575-592.
- [76] WANG Wenyang, PANG Xiongqi, CHEN Zhangxin, et al. Improved methods for determining effective sandstone reservoirs and evaluating hydrocarbon enrichment in petroliferous basins[J]. Applied Energy, 2020, 261: 114457.
- [77] 金之钧, 张金川, 唐玄. 非常规天然气成藏体系[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 58-68.
- JIN Zhijun, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan. Unconventional natural gas accumulation system[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 58-68.
- [78] 庞雄奇. 油气分布门限与成藏区带预测[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- PANG Xiongqi. Hydrocarbon distribution threshold and accumulation areas prediction[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [79] 庞雄奇. 油气藏调整改造与构造破坏烃量模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- PANG Xiongqi. Alteration and reformation of hydrocarbon reservoirs and simulation of the hydrocarbon loss through major tectonic events[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [80] 周丽, 柳忠泉. 生烃岩热模拟实验及其结果应用[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(9): 45-48.
- ZHOU Li, LIU Zhongquan. Introduction and application of the thermal simulation experiment of hydrocarbon source rocks[J]. West-China Exploration Engineering, 2011, 23(9): 45-48.
- [81] 钱家麟, 李术元, 王剑秋. 应用化学动力学计算生油岩生烃量[J]. 勘探家, 1998(2): 31-35.
- QIAN Jialin, LI Shuyuan, WANG Jianqiu. Calculating hydrocarbon generation quantity of source rock using chemical kinetic modeling[J]. Petroleum Explorationist, 1998(2): 31-35.
- [82] 侯读杰, 林壬子, 王培荣. 烃源岩排烃的模拟实验研究[J]. 新疆石油地质, 1991, 12(4): 307-315.
- HOU Dujie, LIN Renzi, WANG Peirong. Simulating experimental study of hydrocarbon expulsion from source rocks[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1991, 12(4): 307-315.
- [83] 祝厚勤, 刘平兰, 庞雄奇, 等. 生烃潜力法研究烃源岩排烃特征的原理及应用[J]. 中国石油勘探, 2008, 13(3): 5-9.
- ZHU Houqin, LIU Pinglan, PANG Xiongqi, et al. Principle of hydrocarbon-generation potential method studying hydrocarbon expulsion characteristics of source rocks and its application[J]. China Petroleum Exploration, 2008, 13(3): 5-9.
- [84] LEE P, KAUFMAN G M, WANG P C. Statistical methods for estimating petroleum resources[M]. United States: Mathematical Geology, 1985.
- [85] 金之钧. 五种基本油气藏规模概率分布模型比较研究及其意义[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 6-13.
- JIN Zhijun. A comparison study of five basic oil and gas pool size probability distribution models and its significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(3): 6-13.
- [86] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, PANG Hong, et al. Destruction of hydrocarbon reservoirs due to tectonic modifications: conceptual models and quantitative evaluation on the Tarim Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 91: 401-421.
- [87] PANG Xiongqi, LI Sumei, JIN Zhijun, et al. Origin and accumulation of the oils from Bamianhe oilfield, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Science in China Series D Earth Science, 2004, 47(S2): 177-189.
- [88] PANG Xiongqi, LI Sumei, JIN Zhijun, et al. Quantitative assessment of hydrocarbon expulsion of petroleum systems in the Niuzhuang sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Acta Geologica Sinica, English Edition, 2004, 78(3): 615-625.
- [89] LI Sumei, PANG Xiongqi, LI Maowen, et al. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang south slope of Bohai Bay Basin—part 1: source rock characterization[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(3): 389-412.
- [90] PANG Xiongqi, LI Maowen, LI Sumei, et al. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang south slope of Bohai Bay Basin. Part 2: evidence for significant contribution of mature source rocks to “immature oils” in the Bamianhe field[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(7): 931-950.
- [91] 徐义卫, 庞雄奇, 李雪, 等. 陆相成熟盆地油气挖潜勘探理论与应用: 以渤海湾盆地八面河探区油气成藏研究与应用为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- XU Yiwei, PANG Xiongqi, LI Xue, et al. Theory and practice of oil and gas potential exploration in mature continental basin: a case study of Bamianhe River[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [92] 李丕龙, 庞雄奇. 陆相断陷盆地隐蔽油气藏形成: 以济阳拗陷为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- LI Pilong, PANG Xiongqi. Formation of subtle reservoirs in continental faulted basins: a case study of Jiyang depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [93] 王涛. 中国深盆气田[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.

- WANG Tao. Deep basin gas fields in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [94] 孟卫工, 庞雄奇, 李晓光, 等. 辽河坳陷油气藏形成与分布[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- MENG Weigong, PANG Xiongqi, LI Xiaoguang, et al. Formation and distribution of hydrocarbon reservoirs in Liaohe depression[M]. Beijing: Geology Press, 2016.
- [95] 王涛, 庞雄奇, 郝芳. 渤海盆地油气藏形成富集与分布预测[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- WANG Tao, PANG Xiongqi, HAO Fang. Hydrocarbon accumulation and distribution prediction in Bohai Basin[M]. Beijing: Geology Press, 2016.
- [96] 庞雄奇, 周新源, 姜振学, 等. 叠合盆地油气藏形成、演化与预测评价[J]. 地质学报, 2012, 86(1): 1-103.
- PANG Xiongqi, ZHOU Xinyuan, JIANG Zhenxue, et al. Hydrocarbon reservoirs formation, evolution, prediction and evaluation in the superimposed basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(1): 1-103.
- [97] 杨海军, 庞雄奇. 塔里木盆地油气藏形成演化与分布预测[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2016.
- YANG Haijun, PANG Xiongqi. Formation, evolution and Distribution prediction of oil and gas reservoirs in Tarim Basin[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2016.
- [98] 杨克明, 庞雄奇. 致密砂岩气藏形成机制与预测方法: 以川西拗陷为例[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- YANG Keming, PANG Xiongqi. Formation mechanism and Prediction method of tight sandstone gas reservoir: a case study of western Sichuan depression[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [99] 庞雄奇. 油气富集门限与勘探目标优选[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- PANG Xiongqi. Hydrocarbon enrichment threshold and exploration targets evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [100] KENNEDY D, NORMAN C. What don't we know? [J]. Science, 2005, 309(5731): 75.
- [101] TROFIMUK A A, CHERSKIY N V, TSAREV V P. Accumulation of natural gases in zones of hydrate formation in the hydrosphere [J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1973, 212: 931-934.
- [102] JOHNSON A H. Global resource potential of gas hydrate[C]// AAPG Annual Convention and Exhibition. Houston: AAPG, 2011.
- [103] WADHAM J L, ARNDT S, TULACZYK S, et al. Potential methane reservoirs beneath Antarctica[J]. Nature, 2012, 488(7413): 633-637.
- [104] BOOTH J S, ROWE M M, FISHER K M. Offshore gas hydrate sample database with an overview and preliminary analysis[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1996.
- [105] KONNO Y, FUJII T, SATO A, et al. Key findings of the world's first offshore methane hydrate production test off the coast of Japan: toward future commercial production[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(3): 2607-2616.
- [106] HANCOCK S, DALLIMORE S, COLLETT T, et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well[J]. Mackenzie Delta: Geological Survey of Canada Bulletin, 2005: 585.
- [107] SAIN K, GUPTA H. Gas hydrates in India: potential and development[J]. Gondwana Research, 2012, 22(2): 645-657.
- [108] NING Fulong, YU Yibing, KJELSTRUP S, et al. Mechanical properties of clathrate hydrates: status and perspectives[J]. Energy & Environmental Science, 2012, 5: 6779-6795.
- [109] YANG Shengxiong, ZHANG Ming, LIANG Jinqing, et al. Preliminary results of China's third gas hydrate drilling expedition: a critical step from discovery to development in the South China Sea[J]. Fire in the Ice, 2015, 15(2): 1-5.
- [110] PANG Xiongqi, CHEN Zhuoheng, JIA Chengzao, et al. Evaluation and re-understanding of the global natural gas hydrate resources[J]. Petroleum Science, 2021, 18(2): 323-338.

(收稿日期 2021-06-10 改回日期 2021-09-16 编辑 雷永良)