

全油气系统的4种基本类型及其资源开发领域

贾承造^{1,2}, 庞雄奇^{2,3}, 宋岩^{1,2}, 崔新璇^{3,4}, 胡耀^{2,3}, 徐帆^{2,3}, 姜林¹, 蒲庭玉^{2,3},
姜福杰^{2,3}, 沈彬^{2,3}

[1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与工程国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 4. 石油工业出版社, 北京 100011]

摘要:全油气系统成藏与分布基本模式的基本原理虽具有普遍适用性,但在实际地质应用中常表现出不同程度的差异性,体现了理论普遍性与地质特殊性之间的辩证关系。为深入解决这一难题,系统分析了不同条件下全油气系统富油气特征的差异性,发现地球动力学背景、储层介质和油气烃源岩等3个基本条件及其耦合关系决定着油气成藏特征的差异性,并依据这3个条件之中关键成藏要素的组合关系将其分为48种类型并提出了命名原则;认识到由碎屑岩层系、碳酸盐岩层系、含煤层系、近地表特殊层系构成的4类全油气系统对油气资源深化发展具有现实意义,并系统阐述了4类全油气系统的基本特征、富油气规律和资源潜力,展示了各自的资源发展方向与主要领域。碎屑岩层系储层成岩作用致密化规律典型,浮力成藏下限埋深浅,深部非常规致密油气资源形成领域广,发展前景广阔;碳酸盐岩层系储层以表生风化孔洞型为主,优质储层可保存至深层-超深层,常规资源占比高,深层-超深层领域资源发展潜力大;含煤层系内煤岩生、排气能力强,外围储层天然气连续分布且范围广,处于高演化程度的煤岩割理发育多,孔隙度和渗透率异常高值,外围储层聚气后封闭能力强,有利于游离气富集;近地表特殊层系成藏条件复杂但稠油沥青、天然气水合物和水溶天然气等资源潜力大,加快关键技术研发并降低开采成本有利于这些资源高效利用和快速发展。

关键词:油气资源发展方向;分类方案;化石能源;常规油气;非常规油气;全油气系统;油气成藏

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Four basic types of whole petroleum systems and their major plays

JIA Chengzao^{1,2}, PANG Xiongqi^{2,3}, SONG Yan^{1,2}, CUI Xinxuan^{3,4}, HU Yao^{2,3}, XU Zhi^{2,3}, JIANG Lin¹,
PU Tingyu^{2,3}, JIANG Fujie^{2,3}, SHEN Bin^{2,3}

[1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Petroleum Industry Press, Beijing 100011, China]

Abstract: Although the fundamental principles behind the basic hydrocarbon accumulation and distribution patterns within a whole petroleum system (WPS) are universal, these patterns tend to vary in actual geological settings, reflecting the dialectical relationship between theoretical universality and geological particularity. To address this challenge, we systematically analyze the differences in the hydrocarbon enrichment characteristics of WPSs under varying conditions. The results indicate that the differences in the hydrocarbon accumulation characteristics are determined by three fundamental conditions, i. e., geodynamic setting, reservoir medium, and source rocks, as well as their coupling relationships. Based on the combinations of key hydrocarbon accumulation factors in the three conditions, we classify WPSs into 48 types and propose a nomenclature rule. The results highlight four practically significant WPS types: those with clastic rock sequences, carbonate sequences, coal-bearing sequences, and near-surface special sequences as reservoirs, which are particularly important for further hydrocarbon resource development. Accordingly, we systematically elucidate the fundamental characteristics, hydrocarbon enrichment patterns, and resource potential of the four types of WPSs, demonstrating their respective resource development directions and major plays. Specifically,

收稿日期:2025-07-02;修回日期:2025-07-16。

第一作者简介:贾承造(1948—),男,中国科学院院士,构造地质学、石油地质学和油气勘探。E-mail:jiaacz@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油科学研究与技术开发项目(2021DJ0101);国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2006CB202300,2011CB201100);国家自然科学基金青年基金项目(42402161)。

reservoirs of clastic sequences are governed by diagenesis dominated by typical tightening laws and exhibit shallow buoyancy-driven hydrocarbon accumulation depths (BHADs). In these reservoirs, deep unconventional tight hydrocarbon resources show extensive plays, suggesting broad exploration prospects. Carbonate reservoirs are primarily of the hypergene weathering-related vuggy type, with high-quality intervals potentially preserved in deep to ultra-deep strata. These reservoirs contain a high proportion of conventional resources and hold huge potential for deep to ultra-deep resource development. In coal-bearing sequences, coals exhibit high gas generation and expulsion capacities, while natural gas in peripheral reservoirs shows a wide and continuous distribution. Furthermore, coals with high thermal maturity develop abundant cleats and exhibit anomalously high porosity and permeability, while their peripheral reservoirs demonstrate high sealing performance after gas accumulation. These factors are conducive to free gas enrichment in coal-bearing sequences. The near-surface special sequences, although characterized by complex hydrocarbon accumulation conditions, hold vast resource potential, including heavy oil bitumen, natural gas hydrates, and water-soluble natural gas. Advancing research and development of key technologies, alongside reducing exploitation costs, will facilitate the efficient utilization and rapid development of these resources.

Key words: hydrocarbon resource development direction, classification scheme, fossil fuel, conventional hydrocarbon, unconventional hydrocarbon, whole petroleum system (WPS), hydrocarbon accumulation

引用格式:贾承造,庞雄奇,宋岩,等. 全油气系统的4种基本类型及其资源开发领域[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1019–1038. DOI: 10. 11743/ogg20250401.

JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan, et al. Four basic types of whole petroleum systems and their major plays[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1019–1038. DOI: 10. 11743/ogg20250401.

1 全油气系统分类的必要性及其初步分类方案

1.1 全油气系统分类的必要性

全油气系统理论框架的建立^[1-8]得益于近20年来中国诸多学者在研究常规和非常规油气藏联合共生机制和分布规律^[9-16]方面积累的成果,它是国内学者基于国内油气勘探实践取得的创新成果与共识。全油气系统理论有3个方面的重要贡献:①创立了全油气系统的科学概念,基于一个整体开展常规和非常规油气成藏研究,实现了常规和非常规油气地质理论的统一;②揭示和阐述了常规和非常规油气藏联合共生机制及其有序分布规律,为联合预测评价不同类别油气资源提供了科学依据;③发现了不同地质条件下全油气系统成藏特征具有差异性和多样性,为寻找不同类别油气资源指明了方向与前景。然而,当前构建的全油气系统理论框架还不够完善,其主要制约因素在于完善的全油气系统分类方案尚未建立起来。尽管已有理论框架能够从原理上阐述常规和非常规油气藏有序分布的基本特征和规律,但受地球动力学背景、储层介质及油气来源条件的影响,不同类型全油气系统的富油气特征存在显著差异,如低地温梯度与高地温梯度盆地、碎屑岩层系与碳酸盐

岩层系以及不同烃源岩层形成的全油气系统,在成藏领域和资源潜力等方面都各有不同,这导致现有理论难以精细指导油气资源勘探的深化。开展全油气系统分类研究,对于完善和发展全油气系统理论并有效指导勘探实践具有十分重要的现实意义。通过研究不同构造背景、储层介质及油气来源条件下形成的全油气系统在富油气成藏特征上的差异,提出科学分类方案,阐述主要类型全油气系统的富油气特征与资源发展前景,指出未来油气资源深化发展的方向和领域,能为提高中国复杂地质条件下油气勘探成效提供更精准的、切合实际的理论和方法指导。

1.2 全油气系统分类的基本原则

全油气系统演化过程中,多种地质要素的耦合作用导致高孔-高渗、低孔-低渗以及超低孔-低渗等储集岩体都能富集油气成藏^[17],其形成与分布主要受盆地地球动力学背景、储层介质和烃源岩等3个方面控制。基于此,本文从3个方面对全油气系统进行初步分类研究:①烃源岩是分类的核心构成条件,作为全油气系统的核心要素,它是油气资源形成的基础,其生成油气的总量、厚度及分布范围、地质年代及其在系统中的位置等,分别决定着系统内油气资源的最大规模、油气藏的形成和分布领域、各类油气藏形成后的时空分布规律。②分类研究以提出方便指导油气勘探实践的方案为目

标,这与创立全油气系统理论的根本目的一致,即通过揭示含油气盆地的大地构造背景、油气运移和聚集的介质条件、油气来源等对各类油气藏形成机制和分布特征的控制作用,结合实际地质条件下不同类别全油气系统的富油气特征,研发针对性更强、适用性更高的方法和技术,从而实现不同类别油气资源的高效勘探和开采。③分类需遵循分类学的方法原理和基本要求,以系统分析与归纳事物特征为基础,坚持穷尽性和互斥性原则,确保沉积盆地内所有全油气系统都能被归入相应类别且不重复,保证分类结果科学严谨。

1.3 全油气系统分类的初步方案

1.3.1 突出全油气系统中关键要素独特的成藏作用对全油气系统进行分类

突出关键要素时,可依据油气烃源岩条件(Ⅰ)将全油气系统分为4类:即泥质烃源岩供烃全油气系统、云灰质烃源岩供烃全油气系统、含煤层烃源岩供烃全油气系统和近地表有机质烃源岩供烃全油气系统;依据储层介质条件(Ⅱ)将全油气系统分为4类:即碎屑岩层系全油气系统、碳酸盐岩层系全油气系统、含煤层系全油气系统和近地表特殊层系全油气系统;根据地球动力学背景(Ⅲ)将全油气系统分为3类:即低热流场/低地温场盆地全油气系统、中热流场/中地温场盆地全油气系统和高热流场/高地温场盆地全油气系统。

但在实际地质条件下,全油气系统形成和分布更加复杂。例如,准噶尔盆地二叠系-三叠系碎屑岩层系风城组全油气系统包含火山岩储层形成的油气藏;塔里木盆地碳酸盐岩层系寒武系-奥陶系烃源岩全油气系统包含碎屑岩(砂岩)油气藏;塔西南坳陷存在多源混合、多沉积层系复合形成的复杂全油气系统^[18]。早期形成的全油气系统因后期构造变动而面目全非^[19],其在演化过程中常规油气藏与非常规油气藏相互转换^[20],甚至在系统内出现既无法归于常规类、也无法归于致密类的特殊成因复杂油气藏^[21]等。正如油气圈闭分类一样,理论上它们被分成背斜圈闭、断块圈闭、岩性圈闭和地层圈闭等,但在实际工作中遇到的几乎都是多种因素作用形成的复合型圈闭。

1.3.2 考虑成藏背景-储层介质-油气烃源岩3个条件中的关键要素组合关系对全油气系统进行分类

仅突出某一关键要素对全油气系统进行分类虽然简单但常难以反映全油气系统的基本特征,这种分类并不科学。因此,需考虑地球动力学背景、储层介质和

油气烃源岩3个条件中的关键要素组合关系,1种成藏背景、1种储层介质和1种油气烃源岩条件组合形成1种全油气系统。依照关联组合作用,3种成藏背景、4种储层介质和4种油气烃源岩条件共计能够形成48种($3 \times 4 \times 4$)全油气系统。若考虑更细层次的地质因素及其组合则种类更多,但工作量大,且难以直接解决实际问题,因此在当前条件下本文暂未考虑更细层次的分类。

1.3.3 全油气系统分类方案与主要成因类型

依据上述方法,可将全油气系统分为不同类别。对组合而成的全油气系统命名需遵循全油气系统成藏的地球动力学条件(盆地类型及温压环境)—储层介质条件—油气来源条件的先后顺序,还可补充修饰词体现多个全油气系统在地质历史过程中的叠加复合或调整改造等情况。表1为全油气系统的分类、命名原则及部分研究实例。

基于含油气盆地储层介质特征差异对全油气系统进行分类能够最大限度地反映全油气系统的组成特征和成藏差异。为此,本文以碎屑岩层系全油气系统、碳酸盐岩层系全油气系统、含煤层系全油气系统和近地表特殊层系全油气系统4种基本类型为例,阐述其各自的油气地质特征、油气富集规律与资源发展前景,并以此为科学依据预测油气资源深化发展的方向和领域。

2 碎屑岩层系全油气系统

全球70%以上的油气储量赋存于砂岩储层,波斯湾和西西伯利亚等巨型含油气盆地的主力产层多为砂岩,其资源潜力直接影响全球能源供给格局。研究碎屑岩层系全油气系统可揭示不同沉积背景,如三角洲和河流相等砂岩沉积体系的成藏规律,精准锁定有利勘探靶区,降低勘探成本与风险,提升资源发现效率。

2.1 碎屑岩层系全油气系统基本特征

2.1.1 碎屑岩层系全油气系统沉积体系与岩相

碎屑岩层系全油气系统由滨海、湖泊和河流等环境条件下形成的以砂、泥岩为主要岩层的沉积地层构成^[22]。沉积体系在平面规模上可以延伸达数万至数十万平方公里,纵向上厚度可达数百米到数千米,在一些较小的构造单元内其规模也可以很小。油气烃源岩

表1 全油气系统分类基本方案与命名原则
Table 1 Basic classification scheme and nomenclature rule for WPSs

全油气系统 分类方法		油气成藏关键要素	分类结果	研究实例与命名
突出单一 要素作用	I. 油气来源 条件	1. 黏土质烃源岩; 2. 云灰质烃源岩; 3. 含煤层烃源岩; 4. 近地表有机质烃源岩	I-1. 泥质烃源岩供烃全油气系统; I-2. 云灰质烃源岩供烃全油气系统; I-3. 含煤层烃源岩供烃全油气系统; I-4. 近地表有机质烃源岩供烃全油气系统	①胜利油田古近系-新近系泥质烃源岩全油气系统; ②塔里木寒武系-奥陶系烃源岩全油气系统; ③吐哈油田含煤层烃源岩全油气系统; ④辽西凹陷西斜坡古油藏破坏供烃全油气系统; ⑤南海近地表有机质微生物降解供烃全油气系统;
	II. 储层介质 条件	1. 砂岩与泥岩; 2. 碳酸盐岩; 3. 煤岩与砂泥岩等; 4. 高孔渗介质+特殊环境	II-1. 碎屑岩层系全油气系统; II-2. 碳酸盐岩层系全油气系统; II-3. 含煤层系全油气系统; II-4. 近地表特殊层系全油气系统	①松辽盆地碎屑岩层系(白垩系)全油气系统; ②塔里木盆地碳酸盐岩层系(寒武系-奥陶系)全油气系统; ③鄂尔多斯盆地含煤层系(石炭系-二叠系)全油气系统; ④珠江口盆地近地表特殊层系(新近系)全油气系统
	III. 成藏背景 条件	1. 低热流场/低地温梯度; 2. 中热流场/中地温梯度; 3. 高热流场/高地温梯度;	III-1. 低热流场/低地温场盆地全油气系统; III-2. 中热流场/中地温场盆地全油气系统; III-3. 高热流场/高地温场盆地全油气系统	①西部低热流场/低地温场(冷盆)全油气系统; ②中部中热流场/中地温场(温盆)全油气系统; ③东部高热流场/高地温场(热盆)全油气系统
考虑3个 方面要素 组合	IV. 3种条件 关联组合	油气来源条件+储层介质 条件+成藏背景条件	突出全油气系统3种条件中关键成藏要素作用,将全油气系统分为11种; 考虑含油气盆地成藏3种条件关联组合,将全油气系统细分为 $4 \times 4 \times 3=48$ 种; 考虑更细层次的地质因素及其组合则种类更多	
全油气系统 分类命名 基本原则		成藏背景条件放在前面; 储层介质条件放在中间; 油气来源条件置于结尾	①低热流叠合盆地准噶尔二叠系-侏罗系碎屑岩层系风城组全油气系统; ②四川复杂叠合盆地二叠系-三叠系碳酸盐岩层系二叠系全油气系统; ③中国鄂尔多斯中热流简单叠合盆地石炭系-二叠系含煤层系全油气系统; ④中国南海深水盆地近地表特殊层系深浅天然气混源全油气系统; ⑤塔里木低热流叠合盆地寒武系-奥陶系碳酸盐岩-碎屑岩混合层系全油气系统	

主要由富含有机质的细粒泥岩或页岩组成,油气储层既可以是粗粒的不含有机质的砾岩和砂岩(含粉-细砂岩)等,也可以是富含有机质的细粒泥岩或页岩。

2.1.2 碎屑岩层系全油气系统石油地质基本特征

碎屑岩储层以孔隙型为主,压实和胶结等物理化学作用贯穿于整个成岩阶段,其孔隙度和渗透率会随着埋深增加而因压实作用等逐渐降低,导致储层接纳烃类的效率在深埋后有所下降。源-储耦合方面,空间上烃源岩与储层叠置或互层,时间上二者同步演化,烃源岩随埋深进入不同阶段,提供源内滞留烃、早期排出烃和晚期排出烃3类原始烃。源-储时空上的关联耦合促使碎屑岩层系全油气系统演化过程中通常发育有3个油气动力边界、3个油气动力场、3类原始烃、3类储集岩体和3类油气资源^[4-5]。浮力成藏下限^[6]、油气成藏底限^[23]和源岩供烃底限^[24]3个动力边界分别控制着全油气系统内常规、致密和页岩油气藏形成和分

布的最大埋深;3个油气动力边界围合而成的自由、局限和束缚3个油气动力场分别控制着常规、致密和页岩油气藏形成和分布的有利领域^[25];早期自由场排出烃、晚期局限场排出烃和源内束缚场滞留烃3类原始烃量分别控制着常规、致密和页岩油气藏资源潜力的形成分布及其理论上限^[8];这3类油气藏在全油气系统形成演化过程中分别赋存于高孔-高渗砂岩和砾岩、低孔-低渗砂岩和砾岩及超低孔-低渗砂岩和砾岩或细粒泥岩或页岩储集体内^[7]。

2.2 碎屑岩层系全油气系统油气富集规律

2.2.1 碎屑岩层系全油气系统油气有序成藏与分布

碎屑岩层系全油气系统构成条件与石油地质特征决定了油气富集成藏机制与有序分布基本规律,其序列成藏及分布规律表现为典型的常规油气—致密油气—页岩油气由浅至深叠置的特征并受湖盆沉积体系控

制,各具特点。如准噶尔盆地浅层常规油—中层下三叠统百口泉组致密油—深层风城组页岩油,鄂尔多斯盆地侏罗系常规油—长(延长组)4+5段—长6段致密油—长7段页岩油—长8段致密油等(图1)。与此同时,储层受岩相与埋深控制,表现为“全粒序成藏”,常规和非常规序列分布规律受沉积序列控制。图2是准噶尔盆地二叠系风城组全油气系统内风城组目的层常

规和非常规油气藏有序分布的基本特征:烃源岩层自东向西颗粒变粗,东部深凹区为细粒烃源岩,主要形成页岩油气藏;向西转变成斜坡带上的粉—细砂岩,主要形成致密油气藏;再向西过渡至盆地边缘的砂砾岩,主要形成常规油气藏。有关准噶尔盆地二叠系风城组全油气系统油气藏有序分布的基本规律已经有不少学者进行过详细论述^[4,11-12]。

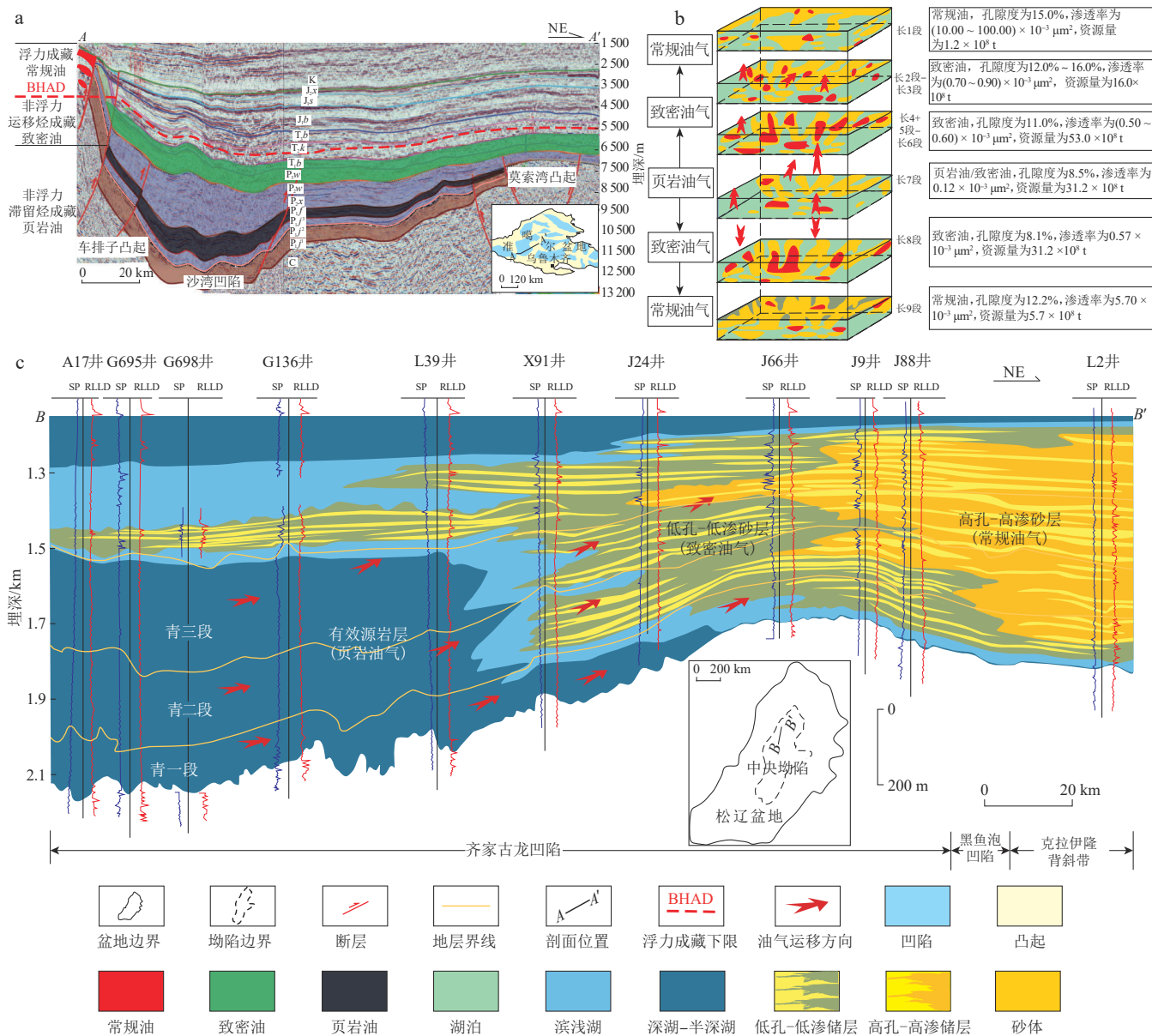


图1 碎屑岩层系常规与非常规油气有序分布模式及其对油气勘探的启示意义^[4]

Fig. 1 Orderly distribution pattern of conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs in clastic rock sequences and its implications for hydrocarbon exploration^[4]

a. 准噶尔盆地碎屑岩层系二叠系风城组全油气系统致密油气与页岩油气分离分布模式;b. 鄂尔多斯盆地碎屑岩层系三叠系长7段全油气系统常规与非常规油气双向有序分布模式;c. 松辽盆地碎屑岩层系白垩系青山口组全油气系统常规与非常规油气侧向有序分布模式

C. 石炭系;P₁下二叠统佳木河组下段;P₂下二叠统佳木河组中段;P₃下二叠统佳木河组上段;P₄下二叠统风城组;P₅中二叠统夏子街组;P₆中二叠统下乌尔禾组;P₇上二叠统上乌尔禾组;T₁下三叠统百口泉组;T₂中三叠统克拉玛依组;T₃上三叠统白碱滩组;J₁下侏罗统八道湾组;J₂下侏罗统三工河组;J₃中侏罗统西山窑组;K. 白垩系

表明,相同条件下,碎屑岩层系常规、致密、页岩油气藏埋深普遍浅于碳酸盐岩层系,对应镜质体反射率(R_o)分别为1.10%,2.75%,3.50%(碳酸盐岩层系分别为1.50%,3.00%,4.00%)。

2.3.2 碎屑岩层系全油气系统内非常规油气富集成藏的原始烃量相对更大

研究结果表明,风城组烃源岩为砂岩储层形成致密油气资源提供的原始烃量约为常规油气的4.5倍,为云灰质砂岩储层形成致密油气资源提供的原始烃量约为常规油气的2.2倍,为碳酸盐岩层系中形成致密油气资源提供的原始烃量约为常规油气的1.0倍左右。基于中国6个代表性盆地碎屑岩地层烃源岩的供烃量研究获得的认识相同^[26],表明碎屑岩层系内非常规油气资源(包括源外致密油气资源和源内页岩油气资源)的原始烃量约为碳酸盐岩层系内非常规油气资源原始烃量的4~5倍,深化勘探与发展前景更为广阔。

3 碳酸盐岩层系全油气系统

全球超60%的大型油气田赋存于碳酸盐岩中,其分布与板块演化和古环境变迁密切相关,其精准预测有助于明确全球勘探重点区域,减少勘探盲目性,提升资源发现效率。对中国而言,该研究能为海外油气合作提供科学依据,助力锁定中东、北美以及南美等富油气区的有利靶区,保障海外资源获取的稳定性,缓解能源对外依存压力。同时,通过对比不同构造背景(如被动大陆边缘和前陆盆地)的碳酸盐岩成藏规律,可完善全球尺度的成藏理论体系,为复杂地质条件下的勘探提供指导。

3.1 碳酸盐岩层系全油气系统基本特征

3.1.1 碳酸盐岩层系全油气系统沉积体系与岩相

碳酸盐岩层系全油气系统主要由清洁、安静且水体相对较浅的海洋环境条件下形成的碳酸盐岩为主要岩层的沉积地层构成^[27]。通常情况下,其沉积体系规模远大于碎屑岩沉积体系:平面上可延伸至数万至数百万平方千米,纵向上厚度可达数千米到数万千米;在大型湖泊中也可以发育碳酸盐岩层系,但其规模通常较小。油气烃源岩主要由深水陆棚相富含有机质的细粒白云质灰岩、泥质灰岩或硅质页岩组成;油气储层既可以是生物碎屑岩、浅成的风化淋滤孔洞层和白云岩等,也可以是富含有机质的细粒白云质灰岩、泥质灰岩或硅质页岩等。

3.1.2 碳酸盐岩层系全油气系统油气地质特征

碳酸盐岩层系全油气系统石油地质特征与碎屑岩层系既有相似性又具显著独特性。其烃类演化过程与碎屑岩层系类似,但储层演化过程与后者截然不同。碳酸盐岩储层可分为孔洞型和白云岩型两类且以前者为主。与碎屑岩相比,碳酸盐岩孔洞型储层具有完全不同的成岩史和孔隙演化史,其生物与化学作用发生在早期成岩阶段。孔洞型储层包括生物碎屑岩和浅成的风化淋滤孔洞层,主要形成于浅层近地表。在深埋过程中,碳酸盐岩的岩石骨架具有很好的承托性,加上后期的溶蚀及构造破裂作用,储层孔隙度和渗透率几乎不受致密化影响,因此可以从浅至深自始至终地高效率接受烃源岩排出的烃类。源-储耦合方面,碳酸盐岩层系在空间上存在同时期深水陆棚高总有机碳含量(TOC)页岩与碳酸盐岩台地相储层平面邻接、断层连接,或早期深水陆棚烃源岩与晚期碳酸盐岩台地相储层叠置等模式;时间上源-储异步演化,与碎屑岩层系源-储空间叠置/互层且时间同步演化的模式形成鲜明对比,因此碳酸盐岩层系全油气系统油气成藏不完全符合自由、局限和束缚动力场特点,而是表现为改造型动力场特征:储层被应力和流体改造后发育大量的裂缝和孔洞,油气成藏既不完全受浮力主导,也不完全受非浮力主导,而受浮力、非浮力、应力和流体活动等多种动力的联合控制。

3.2 碳酸盐岩层系全油气系统油气富集规律

3.2.1 碳酸盐岩层系全油气系统油气有序成藏与分布

全油气系统烃类与储层演化中的源-储耦合关系决定了碳酸盐岩层系油气富集成藏机制与有序分布基本规律明显区别于碎屑岩层系全油气系统。如鄂尔多斯盆地油气以致密油气为主,其次为页岩油气和常规油气;而碳酸盐岩盆地(如四川盆地南华系一下三叠统)则以常规油气为主,其次为页岩油气,致密油气普遍不发育。碳酸盐岩层系全油气系统序列成藏及分布规律表现为页岩油气—碳酸盐岩礁滩—裂缝型常规气的特征并受沉积体系与岩相控制。以四川盆地二叠系全油气系统为例,其成藏组合以中-上二叠统为主力烃源岩、中-下三叠统为区域盖层,其形成和演化受控于扬子板块晚古生代区域性伸展和聚敛构造旋回,呈现出陆棚页岩气藏(自生自储)—台缘相控型气藏(棚生缘储)—台内断-相共控型气藏(下生上储)序列成

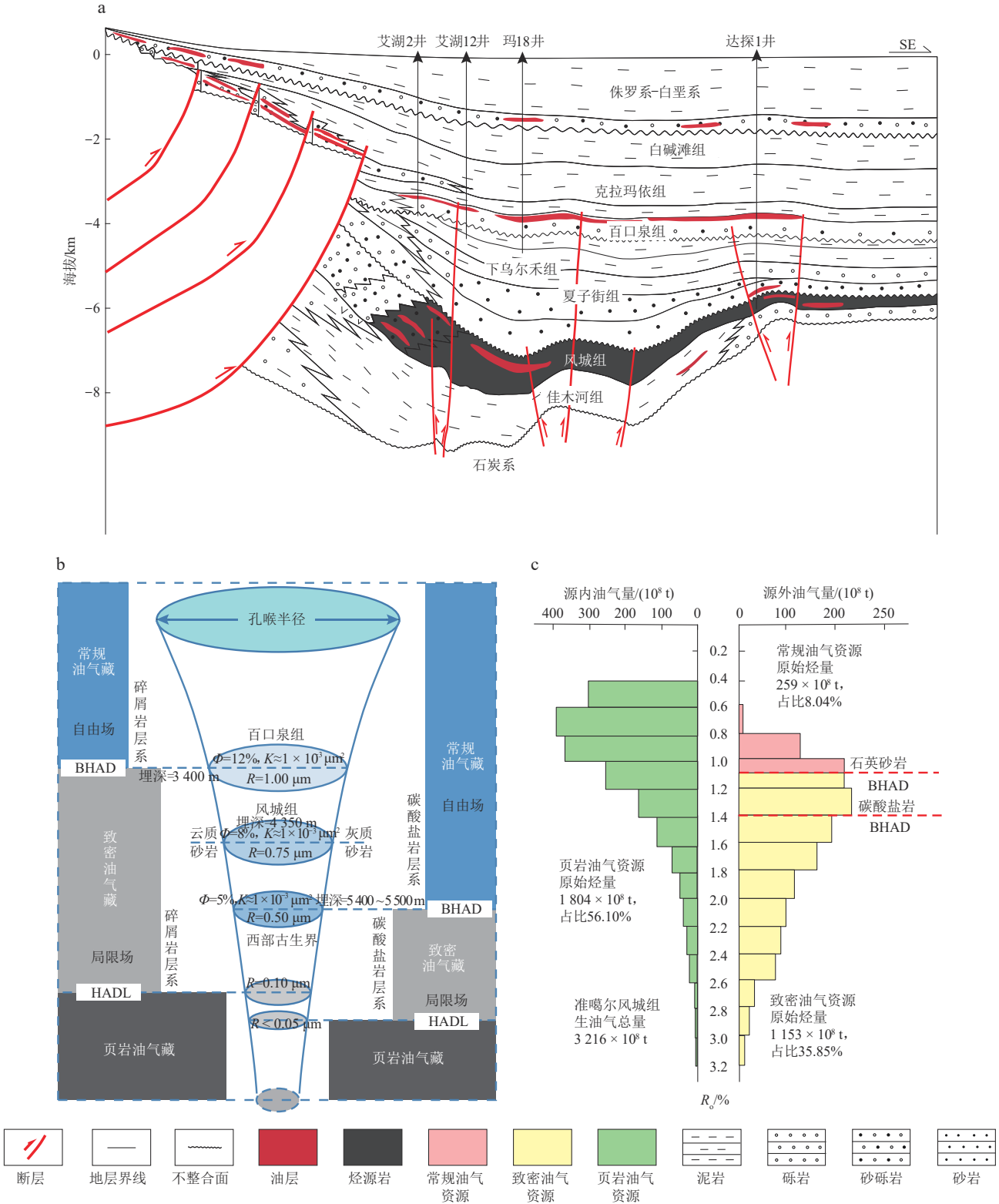


图3 碎屑岩层系全油气系统油气资源发展前景与主要领域

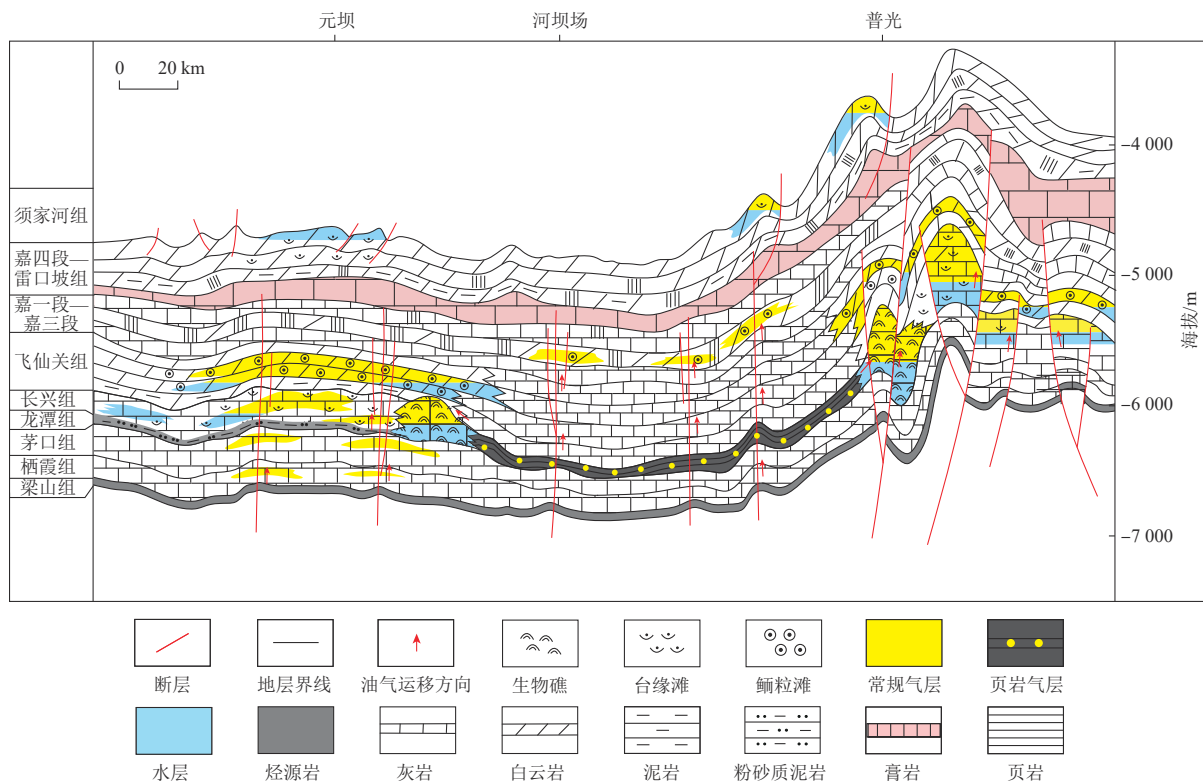
Fig. 3 Prospects and major plays of hydrocarbon resources in the WPS of clastic rock sequences, Junggar Basin

a. 准噶尔盆地二叠系全油气系统剖面, 修改自文献[12]; b. 碎屑岩和碳酸盐岩层系全油气系统差异性比较; c. 准噶尔盆地二叠系全油气系统3类原始烃量纵向分布

BHAD. 浮力成藏下限; HADL. 油气成藏底限; φ. 孔隙度; K. 渗透率; R. 孔喉半径

藏模式^[28](图4)。盆地北部开江-梁平裂陷的深水陆棚区, 发育孤峰段/吴家坪组/大隆组高 TOC 硅质页岩,

形成“自生自储”页岩气藏; 沿裂陷和南部德阳-武胜台洼两侧的台缘带, 长兴组-飞仙关组礁滩相储层与

图4 四川盆地二叠系全油气系统成藏序列分布模式^[28]Fig. 4 Distribution pattern of hydrocarbon accumulation sequences in the WPS of the Permian strata, Sichuan Basin^[28]

陆棚相烃源岩侧向对接,发育“棚生缘储”常规气藏;台内区中-下三叠统滩体受通源断裂控制,形成“下生上储”气藏,如河坝场气田因燕山晚期断裂与干酪根裂解期匹配形成干气藏。

3.2.2 碳酸盐岩层系全油气系统更容易形成改造类油气藏

碳酸盐岩层系主要为化学沉积物,它们自沉积后不久即固结成岩,脆性强,易在应力作用下产生裂缝,在全油气系统演化过程中形成裂缝类油气藏;同时它们主要由碳酸盐岩矿物构成,易受地下富含二氧化碳等流体改造而形成孔洞,在全油气系统演化过程中形成孔洞类油气藏。通过油气藏的产状特征和孔、渗特征(图5),可以识别出这些改造类油气藏的形成与分布:裂缝类油气藏主要分布在断裂带内及周边,孔洞类油气藏主要分布在侵蚀不整合面附近,且通常以不整合面之下为主要分布区。在孔隙度和渗透率交汇图上,以浮力成藏下限对应的临界条件可以把油气藏分为高孔-高渗、低孔-低渗、高孔-低渗和低孔-高渗4类。常规和非常规油气藏主要呈现出高孔-高渗和低孔-低渗特征,而应力裂缝改造和流体孔洞改造的油气藏主要呈现出低孔-高渗和高孔-低渗特征。在塔里木盆地分布的碳酸盐岩油气藏之中,高孔-低渗与

低孔-高渗特征显著,裂缝改造类和孔洞改造类油气藏所占比例超过50%。在 multi-period 构造变动形成的叠合盆地中进行油气勘探时,尤其需要关注这些改造类油气藏的形成机制及其分布特征。

3.2.3 碳酸盐岩层系全油气系统内形成油气藏的领域范围更深、更广

碳酸盐岩优质储层可保存至深层-超深层,有效储层下限较低,最大埋深大,有利油气分布范围广(图5a₁)。碳酸盐岩有效储层判别临界条件远较碎屑岩有效储层对应的孔隙度和孔喉半径下限低、油气藏有效储量分布范围更大(图5a₂, a₃)。依据对全球已经发现的碳酸盐岩常规油气藏和致密油气藏的孔隙度、渗透率和孔喉半径进行统计分析比较,确定碳酸盐岩层系全油气系统内浮力成藏下限对应的临界条件为 Φ (孔隙度) $\approx 5\%$, K (渗透率) $\approx 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, R (孔喉半径) $\approx 0.5 \mu\text{m}$ (图5b₁, b₂);在相同条件下,碎屑岩层系有效砂岩储层的临界条件为 $\Phi \approx 12\%$, $K \approx 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $R \approx 1.0 \mu\text{m}$ (图5b₃, b₄)。这表明,碳酸盐岩层系浮力成藏下限对应的临界条件更低、埋深更大、分布领域更广、资源储量更多^[29]。在碳酸盐岩地层内,致密油气藏形成的底限对应的最大埋深也远大于碎屑岩地层,表明同样条件下有望发现碳酸盐岩油气资源的深度

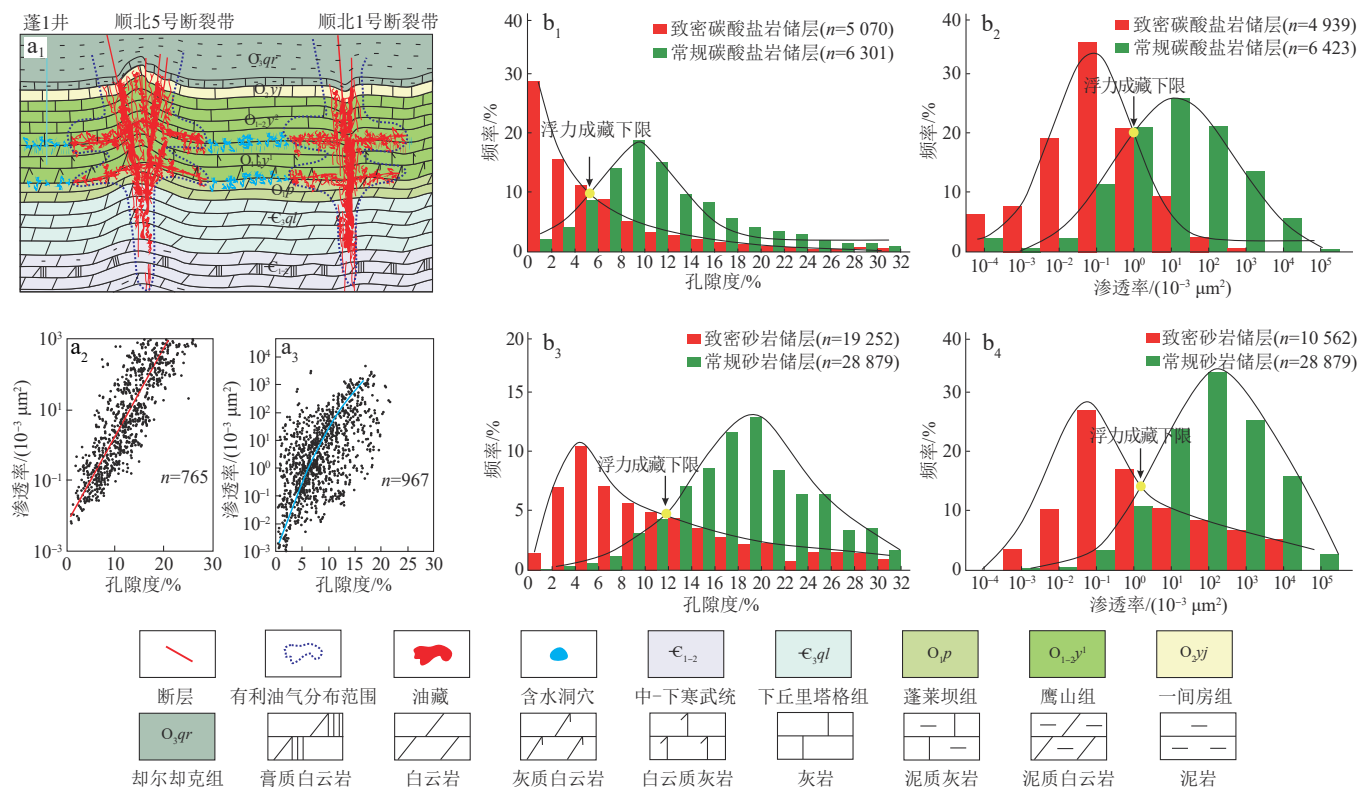


图5 碎屑岩层系和碳酸盐岩层系全油气系统差异性及其分布边界预测方法

Fig. 5 Differences between WPSs in clastic rock sequences and carbonate sequences and methods for predicting distribution boundaries of conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs

a_1 — a_3 . 碎屑岩和碳酸盐岩储层分布发育的差异性比较; a_1 . 顺北断裂带碳酸盐岩储层分布特征剖面^[30]; a_2 . 塔中碎屑岩储层孔隙度与渗透率关系; a_3 . 塔中碳酸盐岩储层孔隙度与渗透率关系; b_1 — b_4 . 全球碎屑岩和碳酸盐岩层系常规和非常规油气浮力成藏下限储层判别标准预测结果^[29]; b_1 . 碳酸盐岩储层, 孔隙度 $\approx 5\%$; b_2 . 碳酸盐岩储层, 渗透率 $\approx 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; b_3 . 碎屑岩储层, 孔隙度 $\approx 12\%$; b_4 . 碎屑岩储层, 渗透率 $\approx 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

边界更深, 领域更为广阔。

3.3 碳酸盐岩层系全油气系统油气资源深化发展方向

3.3.1 碳酸盐岩层系全油气系统深化勘探需关注油气成藏多样性与改造类常规油气藏形成与分布

碳酸盐岩强脆性及易被地下酸性流体溶解的特性, 使其在全油气系统演化过程中, 既能够形成常规类油气藏, 也容易形成形式多样的改造类油气藏。此外, 在叠合盆地多期构造变动的演化过程中, 常规与非常规油气藏可相互转化, 因此需关注不同类别油气藏之间的关联、共生及其分布特征。图6为塔里木盆地深层-超深层寒武系-奥陶系碳酸盐岩层系全油气系统研究实例: 寒武系-奥陶系致密云灰质碳酸盐岩既是盆内重要的烃源岩层, 也因构造变动与应力改造形成了裂缝改造型和流体改造型储集层。油气不仅在埋深较浅的礁滩体和潜山顶部溶蚀孔洞体内聚集成藏, 也

在深层-超深层不整合面上以及走滑断裂带内形成了多种改造类油气藏。改造类碳酸盐岩油气藏是中国西部叠合盆地油气富集的最主要形式, 体现了其成藏的基本规律, 需要在油气资源深化发展中给予特别关注。

3.3.2 碳酸盐岩层系全油气系统深化勘探需关注冷盆油气成藏最大埋深与超深层油气勘探

碳酸盐岩层系全油气系统成藏的最大特点是碳酸盐岩储层以孔洞型为主, 这使得在浮力主导作用下, 油气运移与聚集成藏的范围显著扩大, 有效储层临界条件低, 油气运移阻力较小, 表明即使在更深的领域和更致密的储层内仍有可能发现常规类碳酸盐岩油气资源。含油气盆地若地温梯度较低, 油气能够在更深的领域形成分布, 这使得碳酸盐岩油气成藏的深度范围更大, 有利勘探领域更广阔。依据动力场控藏模式, 基于浮力成藏下限、油气成藏底限和源岩供烃底限, 从理论上分别预测了深层-超深层碳酸盐岩层系内常规、致密和页岩油气藏形成和分布的最大埋深^[31], 同时, 基于较浅地层钻探结果随埋深的变化趋势, 预测了探

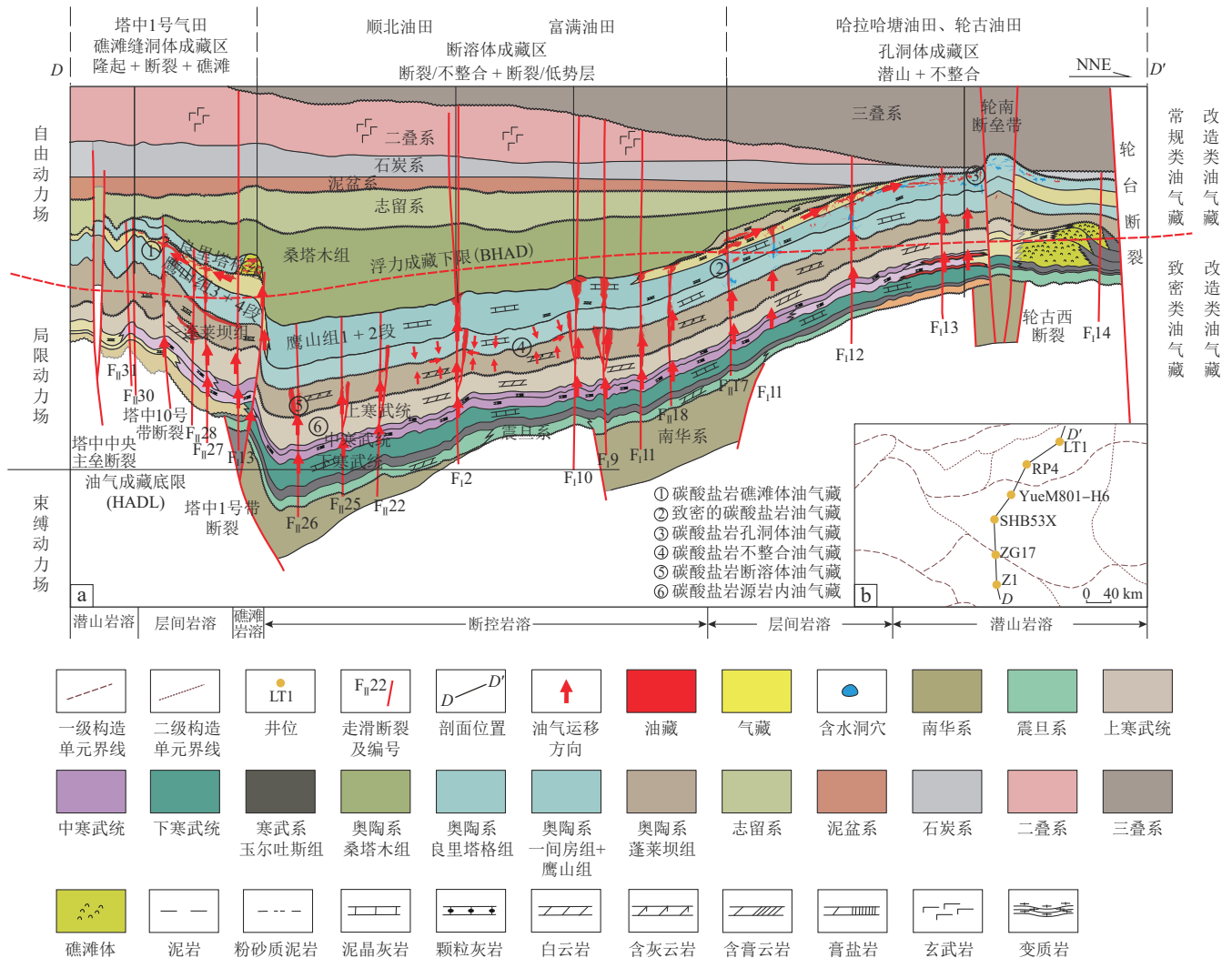


图6 塔里木盆地碳酸盐岩层系全油气系统油气资源主要类型与分布规律

Fig. 6 Primary types and distribution pattern of hydrocarbon resources in the WPS of carbonate sequences in Tarim Basin

a. 碳酸盐岩层系全油气系统油气资源分布剖面; b. 剖面位置

区内油气藏形成和分布的最大埋深。结果表明,塔里木盆地富满探区和顺北探区断溶体油藏和气藏的最大埋深分别超过9 500 m和10 500 m^[31]。深层-超深层是中国西部叠合盆地碳酸盐岩油气资源深化发展的主要领域。

4 含煤层系全油气系统

全球煤层气地质资源量超过 $200 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 主要分布于北美、澳大利亚和中国等煤炭富集区, 是潜力巨大的非常规清洁能源^[32]。研究含煤层系全油气系统可揭示不同煤阶和不同构造背景下的资源分布规律, 精准锁定有利勘探靶区, 降低勘探成本与风险, 提升资源开发效率。对中国而言, 能够推动深层煤岩气快速发展, 开拓能源发展新领域。

4.1 含煤层系全油气系统基本特征

4.1.1 含煤层系全油气系统沉积体系与岩相

含煤层系全油气系统主要由海-陆过渡带或湖泊边缘区的沼泽湿地沉积地层构成^[33]。其沉积体系规模通常变化范围大: 平面上可延伸数万至数十万平方千米, 纵向上厚度可以达数百米到数千米。油气烃源岩主要由煤岩有机质和富含有机质的细粒泥灰岩或泥岩组成; 油气储层既可以是砂岩和泥岩, 也可以是富含有机质的煤岩等。

4.1.2 含煤层系全油气系统油气地质特征

含煤层系全油气系统油气地质特征与碎屑岩层系既有相似性又具显著独特性。相同的地方是含煤层内

部存在3个油气动力边界、3个油气动力场、3类原始烃、3类储集岩层以及3类煤成油气资源,包括煤成远源常规气藏、煤成近源致密气藏以及煤层内部吸附气藏;不同的是煤层或煤岩在深埋演化过程中自身还能形成3个油气动力场,并形成常规、致密和吸附等3类煤成气藏。煤岩在自由动力场条件下排出的气在浮力主导下向周边及上方运移,在各类远源圈闭中形成常规气藏;而晚期在局限动力场条件下排出的气在非浮力主导下进入煤层围岩内,形成连续型致密砂岩气藏,如鄂尔多斯盆地C-P(石炭系-二叠系)砂岩层内形成的苏里格等大气田就属于这类连续型致密气藏(图7),相关研究已有详细论述^[34]。含煤层系全油气系统形成油气藏的独特性主要在于煤岩演化过程中形

成的源内气藏与页岩演化过程中形成的页岩油气藏差异显著:页岩演化过程中早期形成页岩油藏,晚期形成页岩气藏^[35],而煤层在演化过程主要形成煤层气或煤岩气藏;页岩在演化过程中其内部超致密,主要处于束缚动力场,而煤岩在演化过程中除早期处于超致密束缚动力场外,在热演化程度处于焦煤-瘦煤-贫煤阶段($R_o \approx 1.5\% \sim 2.5\%$)时,其内部发育大量割理^[36-37]且存在孔隙度异常增大层段^[38-39],导致其内部从束缚动力场转变为局限动力场甚至自由动力场,有利于游离相态的天然气富集成藏(图8)。

图9a和图9b是依据国内外学者针对煤岩割理和孔隙度分布的统计结果,表明其在自然界客观存在,但成因机制目前还处于探索中。一般解释为煤岩在演化

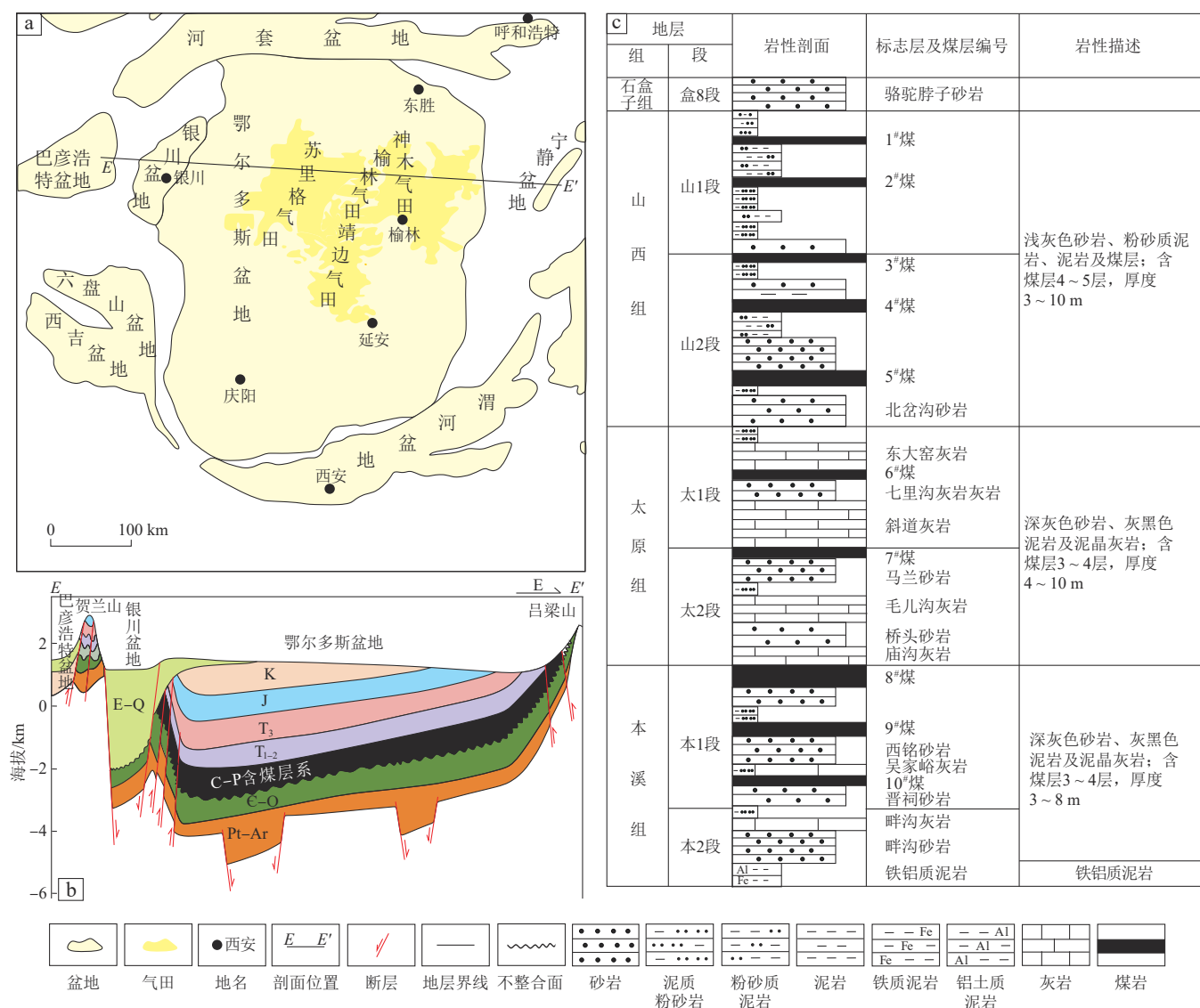


图7 鄂尔多斯盆地构造位置及上古生界含煤层系全油气系统分布特征

Fig. 7 Tectonic location of the Ordos Basin and distribution of the WPS in the Upper Paleozoic coal-bearing sequences

a. 盆地构造位置; b. 盆地东西向大剖面及地层发育特征; c. C-P(石炭系-二叠系)含煤层系地层柱状图

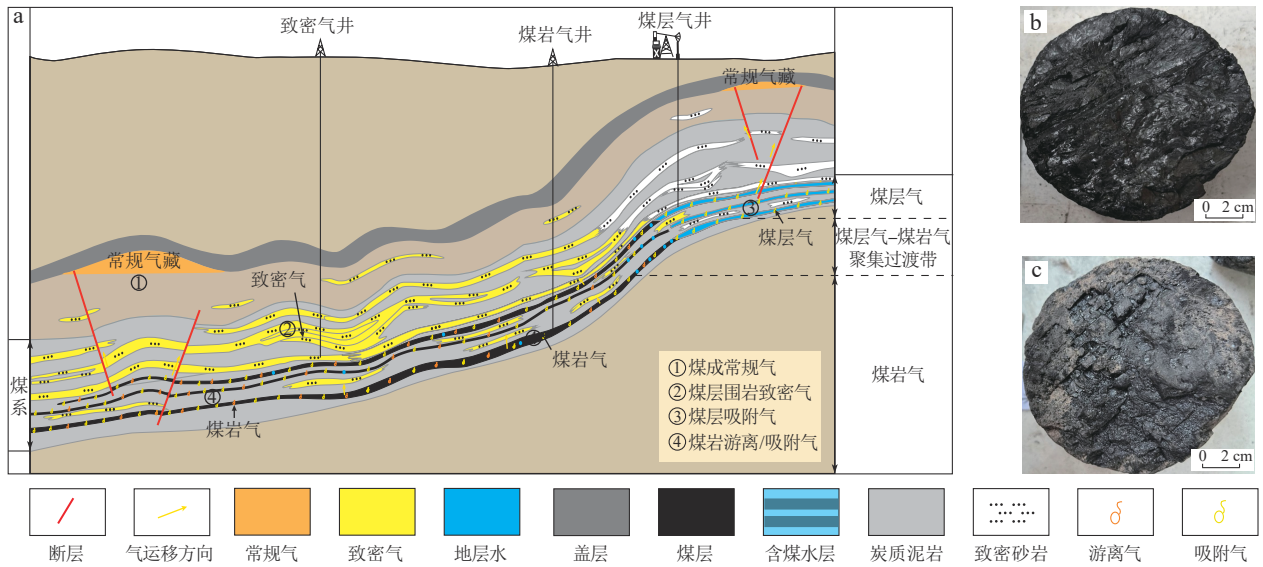


图8 鄂尔多斯盆地C-P含煤层系全油气系统常规和非常规天然气有序分布模式

Fig. 8 Orderly distribution pattern of conventional and unconventional natural gas in the WPS of the Carboniferous-Permian coal-bearing sequences in the Ordos Basin, China

a. 含煤层系全油气系统分布模式^[40]; b. 煤岩, 苏29H井, 埋深3 659.99~3 660.23 m, 本溪组, $R_o=2.70\%$, 面割理线密度8条/(5 cm), 端割理线密度3条/(5 cm), 岩心照片; c. 煤岩, 榆阳2井, 埋深2 583.34~2 583.58 m, 本溪组, $R_o=1.79\%$, 面割理线密度9条/(5 cm), 端割理线密度6条/(5 cm), 岩心照片

过程中, 孔、渗变化可分成3个阶段。

1) 第一阶段($R_o < 1.0\%$)

孔隙度和渗透率因压实作用而快速降低。煤中大孔隙因沥青化、物理压实和脱氢脱氧等作用急剧减少, 芳环缩合度增加, 热成因气孔逐渐增多。在此过程中, 相对于微孔的增加, 大孔的减少占绝对优势, 因此煤的孔隙度整体呈降低趋势。

2) 第二阶段($1.0\% \leq R_o \leq 2.0\%$)

孔隙度和渗透率因煤化作用增强而升高。煤的芳

环逐渐增大, 排列逐渐有序, 微孔含量增加, 另外煤层内部滞留的油量因高温裂解转变成天然气而导致孔隙增大。大孔含量减少趋势变缓, 煤的热变质作用产生气孔, 微孔增加逐渐占据优势; 煤的孔隙度随微孔含量的增高呈上升趋势, 加上割理的大量发育, 煤岩孔隙度达到二次高峰。

3) 第三阶段($R_o > 2.0\%$)

孔隙度和渗透率因持续压实而再次不断降低。热成因气孔减少, 继续压实, 可能存在次生矿物充填以及

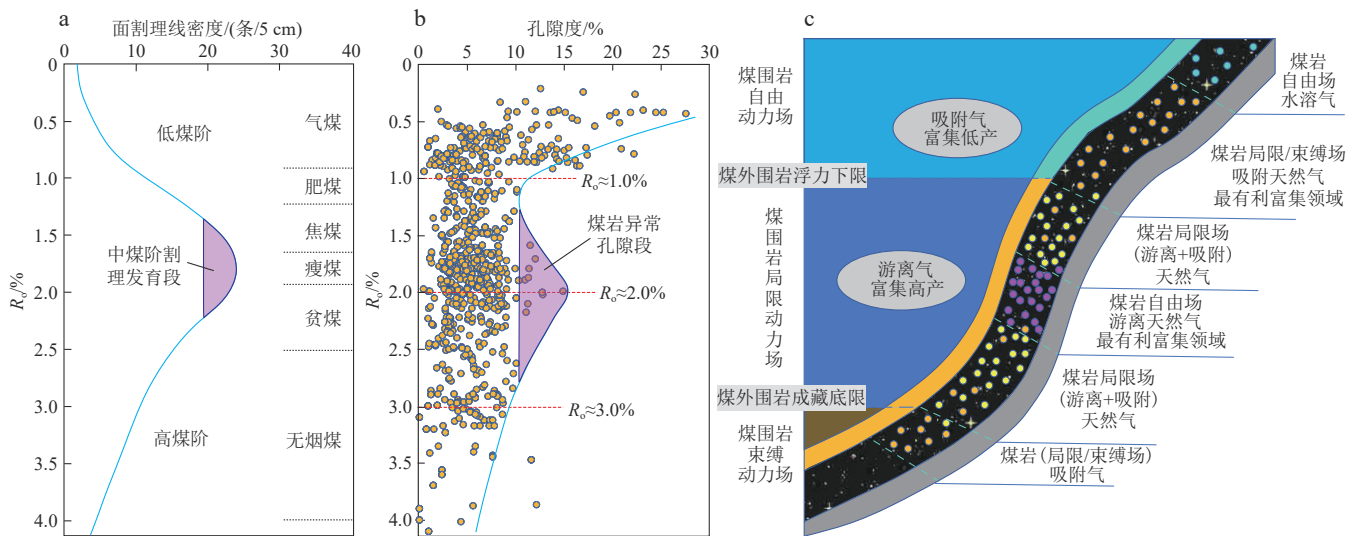


图9 含煤层系全油气系统天然气资源发展前景与煤岩气主要赋存领域($R_o=1.5\% \sim 2.5\%$)

Fig. 9 Prospects of natural gas resources and primary plays of coal-rock gas in the WPS of coal-bearing sequences ($R_o=1.5\% \sim 2.5\%$)

a. 全球煤岩割理发育统计初步结果; b. 全球煤岩孔隙度发育统计结果; c. 煤层天然气纵向资源发展前景预测、评价

割理发生闭合,导致孔隙度持续降低。

4.2 含煤层系全油气系统油气富集规律

4.2.1 含煤层系全油气系统天然气来源多样且资源潜力巨大

含煤层系全油气系统的天然气既可以来源于煤岩自身,也可来自煤岩周边细粒泥岩或泥灰岩,还可来自泥岩和煤岩内部滞留液态烃的热裂解降解。单位体积煤岩在单位时间内生成和排出的天然气量远高于其他全油气系统中的烃源岩,在煤层厚度大和分布范围广的情况下,这些短时间内生成和排出的天然气在适宜地质条件下易表现出高效成藏特征,形成规模巨大的天然气资源。鄂尔多斯盆地C-P含煤层系生成和排出的天然气不仅在其上部构造圈闭内形成了大量的常规气藏,更在含煤层系围岩层内形成了大面积致密砂岩气藏(图8a),包括苏里格气田和榆林气田等,分布面积高达 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,天然气远景资源量约 $50 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

4.2.2 含煤层系全油气系统天然气富集形式多样且分布复杂

含煤层系全油气系统天然气富集形式多样且分布复杂,主要表现在3个方面:①其与碎屑岩层系全油气系统一样,可在远源构造圈闭中形成常规气藏,在近源围层中形成致密非常规气藏,还可在煤岩周边细粒泥岩中形成页岩气藏;②煤岩在全油气系统演化过程的不同阶段形成不同类别的天然气资源:早期因煤岩大量吸附天然气形成以吸附气为主的煤层气资源,中期因煤岩滞留油裂解导致孔、渗增大形成以吸附气与游离气并存的煤层混合气资源,晚期因煤岩孔、渗进一步增大形成以游离气为主的煤岩气资源;③煤层远源游离常规气、煤岩内部游离常规气、煤岩内部吸附气和煤岩周边围岩吸附气等联合共存。鄂尔多斯盆地C-P含煤层系总体热演化程度高,实测 R_o 大多超过1.5%,有利于割理和裂缝发育(图8b)。2021年,鄂尔多斯盆地东部钻探深层煤岩气取得重大突破,平均日产气量超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中游离气占比超过30%;目前已经提交的探明储量超过 $3\,392.43 \times 10^8 \text{ m}^3$,展示出广阔的发展前景^[40]。根据初步评价结果显示,鄂尔多斯盆地煤层气资源量超过 $40.86 \times 10^{12} \text{ m}^3$,中国全部盆地煤层气远景资源量可达 $115.91 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[32]。依照相关资料,预测全球煤层气资源量可达 $270 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[41]。深层游离态煤层气的发现和大规模勘探为整个化石能源发展开拓了一个前景广阔的新领域。

4.3 含煤层系全油气系统油气资源深化发展方向和领域

4.3.1 含煤层系全油气系统煤层围岩致密天然气

含煤层系全油气系统天然气深化发展中的煤层围岩致密天然气需要予以特别关注。国内外煤层气勘探长期以来主要聚焦于煤层内部吸附气,因此多将煤层厚度和吸附气能力等作为主要因素予以考虑和研究,而对于煤层周边围岩或夹层之内的天然气聚集未予以重视,或即便考虑,也仅将其作为煤层吸附气开采过程中的附加气,尤其是在煤层厚度较薄的情况下,煤层围岩气或夹层气则被完全忽视。此外,煤层埋深较浅或热演化程度较低时,生成的天然气量规模有限,在自身吸附、油溶和水溶之后剩余不多,滞留气量还会通过扩散和水溶向外排出,因此难以以游离态聚集。当围岩储层因埋深增大进入浮力成藏下限之后,可大量聚集煤层排出的天然气。鄂尔多斯盆地苏里格等特大型天然气藏即由该机制形成,这类天然气资源是含煤层系全油气系统内油气资源的主体,应该持续予以关注(图7a,图8a)。

4.3.2 含煤层系全油气系统煤岩游离天然气

经典的煤层气理论主要关注到中-浅层煤层吸附气。此类天然气早期开发主要出于煤炭开采的安全需求;后续因开发成本过高,且更经济适用的页岩油气等资源得到有效开发,其研究一度被搁置。随着深层煤岩游离气勘探取得突破,相关研究重新受到广泛重视,然而目前的认识主要基于钻探结果,尚未从机制上完全阐明深层-超深层煤岩游离(天然)气成因与分布规律,尽管如此,仍认为其发展前景十分广阔。研究表明,预测和评价深层-超深层煤岩游离气甜点分布时需要特别考虑4个关键条件:①煤岩内部是否发育割理及其空间分布(图9a);②煤岩内部是否发育异常孔隙及其空间分布(图9b);③煤岩围岩是否已经进入浮力成藏下限及目前所处动力场类型及其含气性(图9c);④全油气系统演化过程中,煤岩割理-异常孔隙-局限动力场三者关联耦合及其对煤岩气调整、改造和破坏的影响。中国煤岩气的突破和大规模勘探开发丰富了世界油气地质理论,开拓了化石能源勘探新领域,必将为缓解中国油气资源短缺问题发挥重要作用。

5 近地表特殊层系全油气系统

全球稠油沥青资源量为 $(6 \sim 9) \times 10^{12} \text{ bbl}$ ^[42],天然

气水合物可采资源量折合气当量达 $68 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[48], 是未来能源的重要接替资源。这些特殊形式的资源主要分布在近地表特殊沉积层系内, 其分布与板块活动、早期油气藏破坏、微生物氧化降解作用以及高压-低温固相平衡稳定带的形成和分布等特殊地质条件有关。对此类资源的精准预测可揭示不同地质背景下的特征异常的油气资源富集成藏规律, 为全球勘探指明方向, 降低勘探的盲目性与成本风险。对中国而言, 研究近地表特殊沉积层系全油气系统富油气成藏规律, 能通过对比不同构造单元的成藏差异, 完善特殊油气成藏理论体系, 推动开采技术迭代。此外, 明确清洁能源水合物的分布, 有助于全球能源结构低碳转型, 助力实现“双碳”目标。

5.1 近地表特殊层系全油气系统基本特征

5.1.1 近地表特殊层系全油气系统沉积体系与岩相

近地表沉积层系全油气系统主要由近地表沉积地层和温压环境构成。近地表沉积层系的规模因地理条件差异较大, 平面上可延伸至数万至数十万平方千米, 纵向厚度可达数百米至近千米。油气主要来自现代沉积有机质的微生物降解和原生油气藏的破坏, 形成的烃类物质既可以是微生物改造现代沉积有机质形成的甲烷气, 也可以是早期油气藏被破坏后形成的稠油沥青; 油气储层类型多样, 包括现代沉积砂泥岩、砂泥岩在特殊温压环境中形成的特殊储集体以及早期沉积岩体裸露后经风化剥蚀形成的地层。

5.1.2 近地表特殊层系全油气系统油气地质特征

近地表特殊层系全油气系统油气地质特征的特殊性主要表现在3个方面: ①沉积层系独特。部分新沉积物未固结成岩, 油气生成量少, 富集成藏后保存难度大; 永久冻土区上部被积雪覆盖, 有利于下部天然气聚集但勘探环境恶劣; 古老沉积物受风沙剥蚀易破坏早期油气藏。②环境条件独特。油气主要来源于微生物氧化降解和改造沉积有机质生成的甲烷气, 其运移后进入圈闭构造, 形成浅层生物甲烷气藏; 处于高压-低温固相平衡稳定带的甲烷气能够与水分子发生笼合作用形成甲烷水合物^[44]; 早前形成的天然气藏因埋深增大进入高压-低温固相平衡稳定带导致部分或全部转变成天然气水合物藏^[45], 二者共存时构成以微生物改造沉积有机质为来源的全油气系统。③近地表原生油气藏经氧化改造后被破坏^[46], 一部分转变成高分子稠油沥青, 另一部分转变为低分子甲烷气并聚集成藏, 二

者联合共存时形成以原生油气藏为来源的全油气系统。此外, 深部来源的热降解油气或热裂解干气, 常向上运移进入近地表沉积层系, 构成混源型全油气系统。中国南海神狐探区天然气水合物, 即由近地表沉积有机质降解生成的甲烷气与深部来源的热解天然气混合成藏^[47]。图10为近地表特殊层系全油气系统综合概念模型, 各类油气的形成与分布及资源潜力取决于各地质要素的耦合作用(图10a)及深部与浅部烃源岩提供的原始烃量及其规模(图10b)。

5.2 近地表特殊层系全油气系统油气富集规律

5.2.1 近地表特殊层系全油气系统油气富集成藏的基本规律

目前在近地表特殊层系发现的油气资源主要包括稠油沥青、天然气水合物和水溶态天然气。这些特殊环境能够富集油气资源, 归纳起来主要有4个方面原因: ①成藏环境的特殊性促成天然气水合物资源的形成与分布。天然气水合物之中的天然气既来自现代沉积物中有机质的微生物改造, 也来自深层沉积有机质的热降解或裂解, 它们在浮力主导下进入圈闭构造中聚集, 由于处于高压-低温固相平衡稳定带内, 聚集的天然气与水分子耦合后形成固态水合物并得以保存。②储层介质条件的特殊性促成水溶气资源的形成与分布。常规地质条件下, 油气在水中的溶解度低而难以富集, 但在近地表特殊的高压、低温和低矿化度条件下, 天然气可大量溶解于水并形成具有开采价值的水溶气藏。③油气来源条件和保存条件的特殊性促成稠油沥青矿藏的形成与分布。近地表通常难以形成大规模油气藏, 根本原因是缺乏油气来源和保存条件, 但大型含油气盆地深部大量生成的油气通过浮力主导作用向上运移能够在盆地边缘稳定构造带的圈闭中聚集, 后期盖层受损导致天然气溢散, 同时原油经氧化改造形成稠油沥青, 地表稠油沥青的形成又能进一步促进下部油气聚集。④近地表层系无论哪类油气资源, 其形成和分布均与深部油气来源相关, 这由其位于盆地顶层的地质位置所决定。因此, “深浅混源”是近地表特殊层系全油气系统成藏的基本特征。

5.2.2 近地表特殊层系全油气系统成藏条件复杂但资源类型多、发展前景广阔

近地表油气资源虽有部分尚未大规模商业开采, 但随着现代技术的进步而展现出广阔的发展前景。加拿大阿尔伯塔盆地东斜坡边缘近地表发育了全球

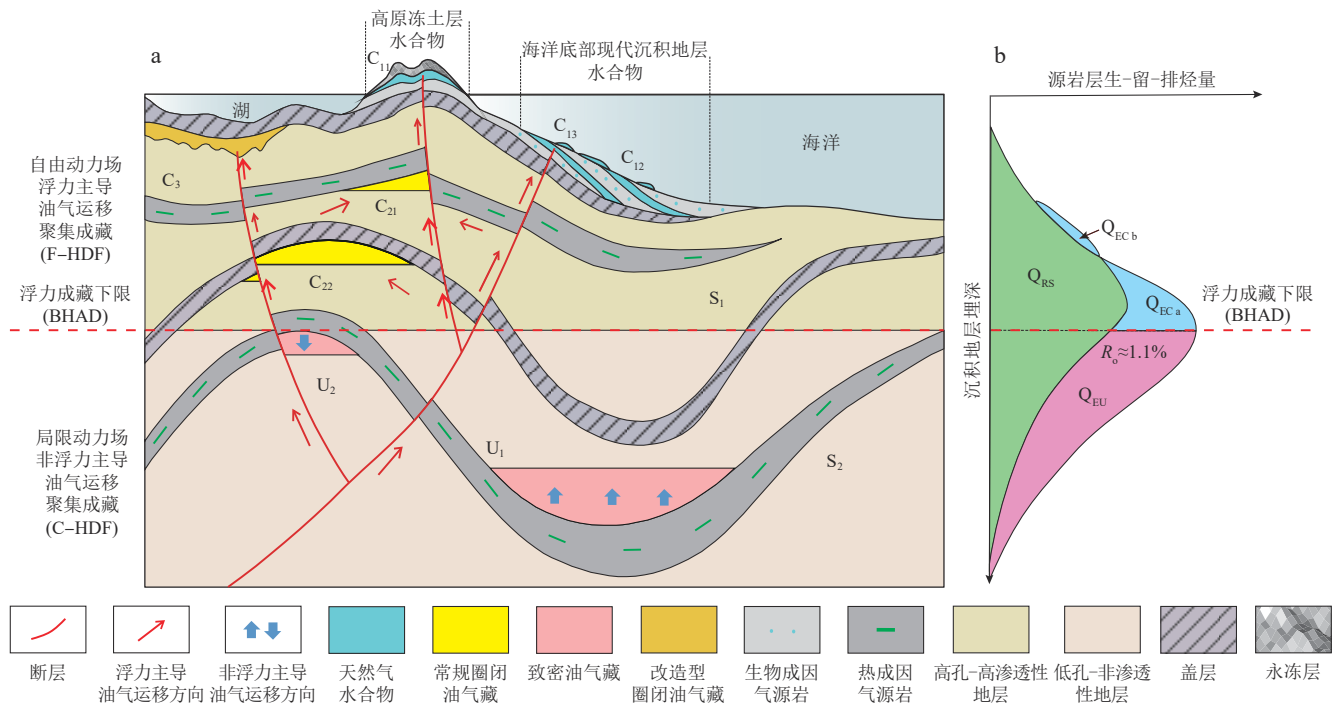


图10 近地表特殊层系(深、浅来源混合)全油气系统常规和非常规油气藏有序分布模式^[48]

Fig. 10 Ordered distribution pattern of conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs in the WPS of the near-surface special sequences (mixing of hydrocarbons from deep and shallow sources)^[48]

a. 全油气系统内常规和非常规油气藏有序分布概念模型; b. 全油气系统内3类原始烃量及其关联性

F-HDF. 自由动力场; C-HDF. 局限动力场; C₁₁. 热解成因水合物藏; C₁₂. 生物成因水合物藏; C₁₃. 混合成因水合物藏; C₂₁. 常规类断层圈闭油气藏; C₂₂. 常规类背斜圈闭油气藏; C₃. 常规类生物降解稠油/沥青油气藏; S₁. 非常规类煤系油气藏; S₂. 非常规类页岩油气藏; U₁. 非常规类致密型油气藏; U₂. 非常规类致密深盆油气藏; Q_{RS}. 源岩滞留原始烃量; Q_{EU}. 致密油气原始烃量; Q_{ECa}. 常规油气原始烃量(热解成因); Q_{ECb}. 常规油气原始烃量(生物成因)

最大的沥青矿藏,油砂主要分布在盆地东翼浅部下白垩统不整合面之上,油气来自上泥盆统 Duvernay 组及下石炭统 Exshaw 组海相页岩,储集层以下白垩统曼维尔群砂岩为主,厚 30 ~ 50 m,孔隙度在 20% ~ 35%,沥青储量在 $(1.5 \sim 2.5) \times 10^{12}$ bbl,约为全球总量的 70%^[49];东委内瑞拉盆地南部斜坡带形成了世界上规模最大的稠油油藏,其重油带油藏埋深在 350 ~ 1 200 m,储层主要为渐新统和中新统未固结砂岩,平均孔隙度为 33.4%,平均渗透率为 $4\,760 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,原油黏度介于 1 000 ~ 6 000 mPa·s,探明原始地质储量为 $1\,570.8 \times 10^8 \text{ t}$ ^[50],且这类资源分布广、埋深浅、易开采。天然气水合物资源因其低碳、高密度以及清洁等特征,长期受到国内外政府和企业关注,全球至少有 29 组科学家对全球水合物资源潜力进行过评价,可采资源量高达 $5\,500 \times 10^{12} \text{ m}^3$,当前可采资源量仅约常规类油气资源总量的 5%。尽管水合物潜在资源量规模较早期评价有所缩减,但作为化石能源的重要补充仍然值得关注^[48]。全球已经确认的水合物藏至少 14 个,其中 4 个进入试产并取得成功,然而至今未有一个进入商

业性开采,降本增效是实现水合物资源产业化发展的关键^[51],其常与浅层常规油气藏伴生,通过联合开采可以大幅降低成本。浅层水溶气也是近地表重要的清洁能源,在全球分布广泛,资源潜力高达 $3\,380 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[52],随着技术水平不断提高也有望在未来实现商业开采。

5.3 近地表特殊层系全油气系统油气资源深化发展方向和领域

5.3.1 近地表特殊层系全油气系统稠油沥青资源

稠油沥青资源主要分布在大型含油气盆地边缘且深部存在大规模发育的优质烃源岩地层。已经发现的大型稠油和沥青矿藏均为早期巨型油气藏因圈闭构造受损后形成,大型含油气盆地较为稳定且平缓的边缘区域是有利勘探区。除前文介绍的全球规模最大的稠油沥青资源外,中国松辽盆地西部边缘、渤海湾盆地辽河凹陷西部边缘和准噶尔盆地西北缘等也都发现有大量的稠油沥青。目前全球已探明可采稠油沥青资源量

约 1.085×10^{12} bbl, 目前采出率为 27.6%。在积极勘探稠油沥青资源的同时, 大力发展高效开发利用技术将有力推动这类资源的快速开发。

5.3.2 近地表特殊层系全油气系统天然气水合物资源

天然气水合物藏主要形成和分布于高原近地表冻土区和深海(水深 ≥ 500 m)大陆斜坡近地表沉积地层的高压-低温固相平衡稳定带内, 且深部天然气来源稳定持续。图 11 是依据高压-低温固相平衡稳定带理论(图 11a)预测南海天然气水合物有利发育区及其可能最大厚度的结果(图 11b, c)^[53]。研究表明, 南海天然气水合物可采资源总量介于 $(10 \sim 26) \times 10^8$ t 油当

量^[51]; 全球天然气水合物可采资源总量高达 $(30 \sim 68) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[48]。天然气水合物可采资源量虽较早期评价结果小, 但结论更为可靠, 加快这类资源的开发利用对于缓解中国油气资源短缺压力具有重大的现实意义。

6 结论

1) 全油气系统成藏特征差异主要受油气烃源岩、储层介质和地球动力学背景 3 个方面条件及其耦合关系控制, 碎屑岩层系、碳酸盐岩层系、含煤层系和近地表特殊层系构成的 4 类全油气系统在油气成藏特征与分布规律上具有代表性。依据 3 个条件关键要素的关

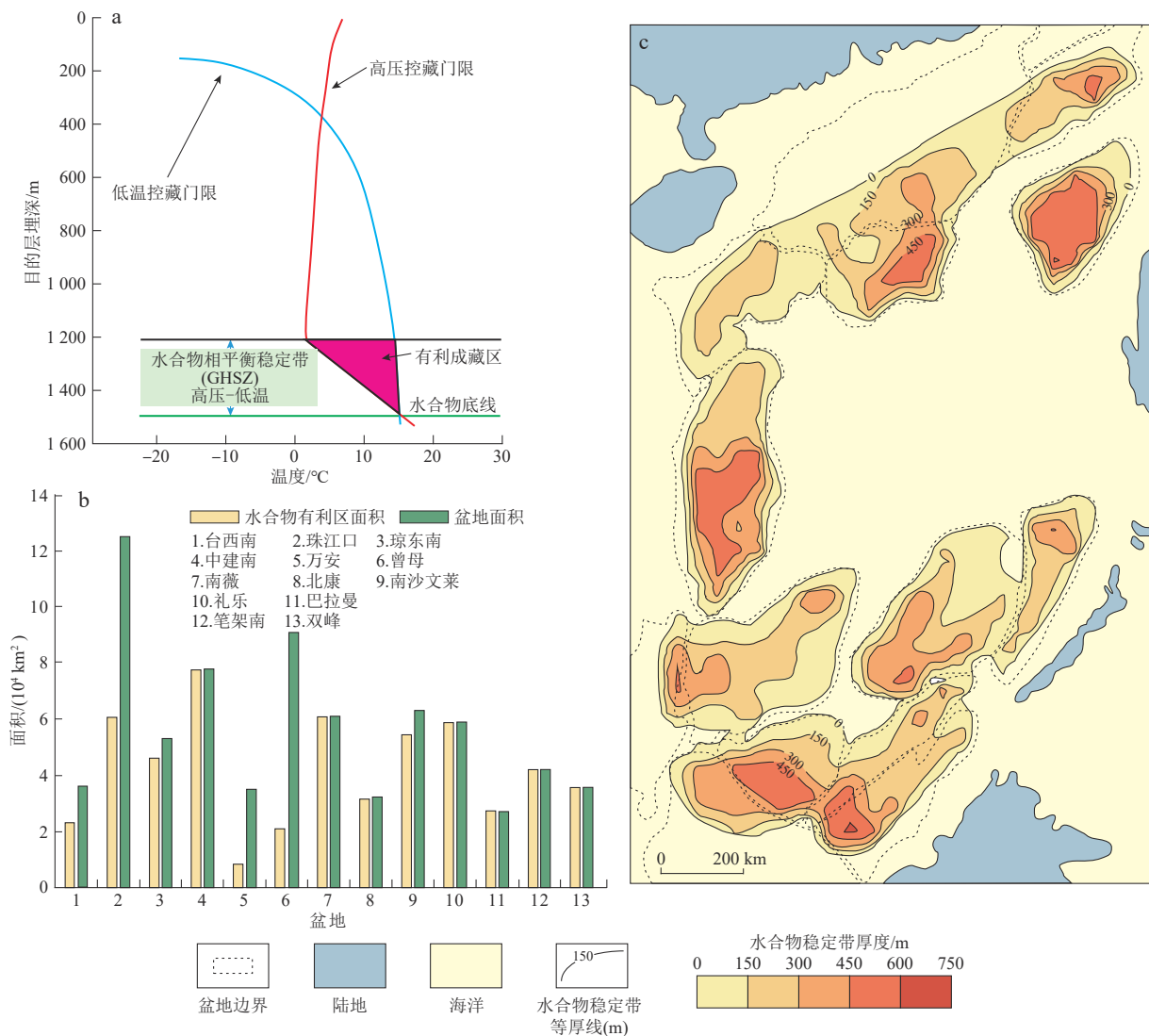


图 11 天然气水合物资源有利发育区预测、评价研究实例(中国南海)

Fig. 11 Example of the prediction and assessment of play fairways for natural gas hydrate resources (South China Sea)

a. 海洋沉积环境下天然气水合物形成和分布领域^[45]; b. 南海深水区不同盆地面积及其水合物有利区面积柱状图^[53]; c. 南海深水区水合物稳定带厚度等值线图^[53]

联组合将全油气系统分为48种类型。

2) 碎屑岩层系全油气系统主要由砂泥岩地层构成,发育有3个动力边界、3个动力场、3类原始烃以及3类储集岩体,其耦合作用形成了常规、致密和页岩3类油气资源并决定了自浅向深的有序分布。局限场致密油气和束缚场页岩油气的原始烃量约为常规油气的8~9倍,资源潜力大,是深化勘探的主要方向。

3) 碳酸盐岩层系全油气系统主要由碳酸盐岩地层构成,其油气地质基本特征与油气藏有序分布规律与碎屑岩层系类同但有其独特性:碳酸盐岩储层以孔洞型为主且矿物脆性高,有效储层孔隙度和渗透率下限低,且易受应力和流体改造,有利油气成藏的领域广、资源潜力大,改造类油气藏以及冷盆超深层是深化勘探的主要方向。

4) 含煤层系全油气系统主要由含煤地层构成,其油气地质特征和有序分布规律与碎屑岩层系类同但有其独特性:煤岩在深埋过程中形成不同动力场,自浅而深富集表面吸附气、微孔束缚气和孔缝游离气;在焦煤-瘦煤-贫煤形成阶段,煤岩割理发育、孔渗异常高、围岩封气能力强,是拓展煤岩气勘探的最有利领域。

5) 近地表特殊层系全油气系统主要由近地表特殊成藏背景、储层介质和油气烃源岩等条件构成。大型含油气盆地边缘带早期油气藏被破坏后形成稠油沥青;深、浅来源天然气在高压低温环境中聚集形成水合物;高压、低温和低矿化度水体在圈闭中富集形成水溶气藏。加快关键技术研发并降低开采成本,有利于资源的高效利用与快速发展。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,郑民,张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 1-10.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 1-10.
- [2] 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 geological theory [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.
- [3] 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.
- [4] JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Whole petroleum system and ordered distribution pattern of conventional and unconventional oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Science, 2023, 20(1): 1-19.
- [5] 贾承造,庞雄奇,宋岩. 全油气系统理论基本原理[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 679-691.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Basic principles of the whole petroleum system [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 679-691.
- [6] 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.
- [7] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, CHEN Junqing, et al. A unified model for the formation and distribution of both conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs [J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(2): 695-711.
- [8] 庞雄奇,贾承造,宋岩,等. 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.
PANG Xiongqi, JIA Chengzao, SONG Yan, et al. Quantitative evaluation of whole petroleum system: Principle and application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 727-759.
- [9] 邹才能,杨智,张国生,等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHANG Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: Concept and practical significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-27.
- [10] ZHAO Jingzhou, LI Jun, WU Weitao, et al. The petroleum system: a new classification scheme based on reservoir qualities [J]. Petroleum Science, 2019, 16(2): 229-251.
- [11] 支东明,唐勇,何文军,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规-非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 38-51.
ZHI Dongming, TANG Yong, HE Wenjun, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 38-51.
- [12] 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.
- [13] 彭光荣,庞雄奇,徐帜,等. 珠江口盆地陆丰南地区古近系全油气系统特征与油气藏有序分布[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 2494-2508.
PENG Guangrong, PANG Xiongqi, XU Zhi, et al. Characteristics of Paleogene whole petroleum system and orderly distribution of oil and gas reservoirs in south Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2494-2508.
- [14] 何文军,宋永,汤诗棋,等. 玛湖凹陷二叠系风城组全油气系统成藏机理[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(6): 663-673.
HE Wenjun, SONG Yong, TANG Shiqi, et al. Hydrocarbon

- accumulation mechanism of total petroleum system in Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(6): 663–673.
- [15] 张水昌, 张斌, 王晓梅, 等. 松辽盆地古龙页岩油富集机制与常规—非常规油有序分布[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 911–923.
- ZHANG Shuichang, ZHANG Bin, WANG Xiaomei, et al. Gulong shale oil enrichment mechanism and orderly distribution of conventional-unconventional oils in the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 911–923.
- [16] 姜福杰, 贾承造, 庞雄奇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 250–261.
- JIANG Fujie, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 250–261.
- [17] 鲍李银, 庞雄奇, 邹亮, 等. 全油气系统油气成藏动力判别与贡献量评价——以准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组为例[J/OL]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1236–1249.
- BAO Liyin, PANG Xiongqi, ZOU Liang, et al. Identification and contribution assessment of hydrocarbon accumulation dynamics in the whole petroleum system: A case study of the Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J/OL]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1236–1249.
- [18] 金玉洁, 王雷, 庞雄奇, 等. 塔里木盆地西南坳陷全油气系统多源复合成藏特征与有序分布模式[J/OL]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1285–1301.
- JIN Yujie, WANG Lei, PANG Xiongqi, et al. Multi-sourced composite hydrocarbon accumulation and ordered distribution pattern of the whole petroleum system in the Southwestern Depression, Tarim Basin[J/OL]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1285–1301.
- [19] 曹鹏, 赵振丞, 庞雄奇, 等. 塔里木盆地台盆区下古生界全油气系统碳酸盐岩油气藏改造特征与成因模式[J/OL]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1268–1284.
- CAO Peng, ZHAO Zhencheng, PANG Xiongqi, et al. Transformations and genetic models of the Lower Paleozoic carbonate reservoirs interpreted by the whole petroleum system in the platform-basin area, Tarim Basin[J/OL]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1268–1284.
- [20] 肖惠译, 庞雄奇, 李才俊, 等. 全油气系统形成演化过程中常规与非常规油气藏转化机制及模式[J/OL]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1318–1332.
- XIAO Huiyi, PANG Xiongqi, LI Caijun, et al. Mechanisms and models of conversion between conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs during the formation and evolution of the whole petroleum system[J/OL]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1318–1332.
- [21] 胡耀, 庞雄奇, 贾承造, 等. 远源型致密油气藏运聚动力与成藏模式——以准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系百口泉组砂砾岩油藏为例[J/OL]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1250–1267.
- HU Yao, PANG Xiongqi, JIA Chengzao, et al. Hydrocarbon migration and accumulation dynamics and model of distal tight hydrocarbon reservoirs: A case study of sandy conglomerate oil reservoirs in the Triassic Baikouquan Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J/OL]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1250–1267.
- [22] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- YU Xinghe. Sedimentology of oil and gas reservoirs in detrital rock series[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] PANG Xiongqi, LIU Keyu, MA Zhongzhen, et al. Dynamic field division of hydrocarbon migration, accumulation and hydrocarbon enrichment rules in sedimentary basins[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2012, 86(6): 1559–1592.
- [26] PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of the whole petroleum system: Hydrocarbon thresholds and their application[M]. Cham: Springer, 2023.
- [27] 金之钧, 马永生. 海相碳酸盐岩大中型油气田分布规律及勘探评价[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- JIN Zhijun, MA Yongsheng. Distribution and exploration assessment of large-medium marine carbonate oil/gas fields[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [28] 郭旭升, 黄仁春, 张殿伟, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩全油气系统成藏特征与有序分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 743–758.
- GUO Xusheng, HUANG Renchun, ZHANG Dianwei, et al. Hydrocarbon accumulation and orderly distribution of whole petroleum system in marine carbonate rocks of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 743–758.
- [29] 庞雄奇, 崔新璇, 贾承造, 等. 全油气系统理论在实用中面临的几个问题与解决方法[J/OL]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1039–1054.
- PANG Xiongqi, CUI Xinxuan, JIA Chengzao, et al. Challenges and solutions in the application of the whole petroleum system theory[J/OL]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1039–1054.
- [30] 韩俊, 黄诚, 张继标, 等. 顺北超深断控缝洞型储集体成因机制、地质建模与应用[Z]. 新疆维吾尔自治区, 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 2021–06–16.
- HAN Jun, HUANG Cheng, ZHANG Jibiao, et al. Genetic mechanism, geological modeling, and application of the Shunbei ultra deep fault controlled fracture cave type reservoir[Z]. Xinjiang Uygur Autonomous Region, Northwest Oilfield Branch of China Petroleum & Chemical Corporation, 2021–06–16.
- [31] 庞雄奇, 李才俊, 贾承造, 等. 基于全油气系统理论预测深层——超深层油气资源最大埋深[J]. 中国石油勘探, 2025, 30(3): 126–139.
- PANG Xiongqi, LI Caijun, JIA Chengzao, et al. Prediction of the maximum depth of deep to ultra-deep resources based on the theory

- of whole petroleum system [J]. *China Petroleum Exploration*, 2025, 30(3): 126–139.
- [32] 丁蓉, 庞雄奇, 贾承造, 等. 基于全油气系统理论评价深部煤层气的方法原理和研究实例[J]. *石油学报*, 2025, 46(3): 532–546.
- DING Rong, PANG Xiongqi, JIA Chengzao, et al. Methods, principles and case study of evaluating deep coalbed methane based on Whole Petroleum System theory [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(3): 532–546.
- [33] 宋岩, 张新民, 柳少波, 等. 中国煤层气地质与开发基础理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- SONG Yan, ZHANG Xinmin, LIU Shaobo, et al. *Geology and fundamental theory of coalbed methane development in China* [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [34] 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.
- [35] LU Jiamin, ZENG Huasen, WANG Qingzhen, et al. Phase behavior of nanoconfined continental shale oil and reservoir fluid phases in the Gulong shale of the Songliao Basin [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 16210.
- [36] 樊明珠, 王树华. 煤层气勘探开发中的割理研究[J]. *煤田地质与勘探*, 1997, 25(1): 29–32.
- FAN Mingzhu, WANG Shuhua. Study on the cleats in coalbed methane development [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1997, 25(1): 29–32.
- [37] 毕建军, 苏现波, 韩德馨, 等. 煤层割理与煤级的关系[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(4): 346–349.
- BI Jianjun, SU Xianbo, HAN Dexin, et al. The relation between cleat frequency and coal rank [J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(4): 346–349.
- [38] 刘大锰, 姚艳斌, 蔡益栋, 等. 华北石炭–二叠系煤的孔渗特征及主控因素[J]. *现代地质*, 2010, 24(6): 1198–1203.
- LIU Dameng, YAO Yanbin, CAI Yidong, et al. Characteristics of porosity and permeability and their geological control of Permian–Carboniferous coals in North China [J]. *Geoscience*, 2010, 24(6): 1198–1203.
- [39] CHEN Yue, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Pore and fracture characteristics of different rank coals in the eastern margin of the Ordos Basin, China [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 26: 1264–1277.
- [40] 李国欣, 贾承造, 赵群, 等. 煤层气成藏机理与煤系全油气系统[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(1): 29–43.
- LI Guoxin, JIA Chengzao, ZHAO Qun, et al. Coal-rock gas accumulation mechanism and the whole petroleum system of coal measures [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(1): 29–43.
- [41] 丁蓉, 庞雄奇, 贾承造, 等. 鄂尔多斯盆地石炭纪–二叠纪煤系全油气系统天然气成藏特征与有序分布模式[J/OL]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(4): 1302–1317.
- DING Rong, PANG Xiongqi, JIA Chengzao, et al. Natural gas accumulation characteristics and orderly distribution pattern of gas reservoirs in the whole petroleum system of the Carboniferous–Permian coal measures, Ordos Basin [J/OL]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(4): 1302–1317.
- [42] MEYER R F, ATTANASI E D, FREEMAN P A. Heavy oil and natural bitumen resources in geological basins of the world: Open-File Report 2007–1084 [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2007.
- [43] XU Zhi, HU Tao, PANG Xiongqi, et al. Research progress and challenges of natural gas hydrate resource evaluation in the South China Sea [J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(1): 13–25.
- [44] SLOAN E D Jr. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates [J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 353–363.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] ZHANG Wei, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. Accumulation features and mechanisms of high saturation natural gas hydrate in Shenhu area, northern South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 708–719.
- [48] 庞雄奇, 贾承造, 徐帜, 等. 全油气系统理论在全球天然气水合物资源评价中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(2): 267–278.
- PANG Xiongqi, JIA Chengzao, XU Zhi, et al. Application of the whole petroleum system in the evaluation of the global natural gas hydrate resource [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(2): 267–278.
- [49] MACQUEEN R W, LECKIE D A. 前陆盆地和褶皱带 [M]. 黄忠范, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2001. MACQUEEN R W, LECKIE D A. Foreland basins and fold belts [M]. HUANG Zhongfan, et al, translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [50] MANIKI T. The Orinoco heavy oil belt in Venezuela [M]. Houston: The James A. Baker III Institute for Public Policy of Rice University, 2007.
- [51] 庞雄奇, 胡涛, 蒲庭玉, 等. 中国南海天然气水合物资源产业化发展面临的风险与挑战[J]. *石油学报*, 2024, 45(7): 1044–1060.
- PANG Xiongqi, HU Tao, PU Tingyu, et al. Risks and challenges of the industrial development of methane hydrate resources in the South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(7): 1044–1060.
- [52] KOLCHINSTANKIN V A. Natural gas hydrates and Water-Soluble gas resources [M]. Moscow: Nedra Publishing, 1989.
- [53] WANG Tong, HU Tao, PANG Xiongqi, et al. Distribution and resource evaluation of natural gas hydrate in South China Sea by combining phase equilibrium mechanism and volumetric method [J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(1): 26–36.

(编辑 张玉银)