

全油气系统:油气地质学研究新方向和油气勘探新范式

刘可禹^{1,2},张思佳^{3,4},刘建良^{1,2},赵振丞^{3,4},金玉洁^{3,4},张婷^{3,4},林昊^{3,4}

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580;2. 深层油气全国重点实验室,山东 青岛 266580;3. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;4. 油气资源与工程全国重点实验室,北京 102249]

摘要:全油气系统理论的创立受到了学术界和产业界的广泛关注,相关成果已被评为“中国石油十大科技进展”及“全国油气勘探开发十大标志性成果”,并被业界确认为一项重大基础理论创新,引领了油气地质理论发展新方向。该理论为复杂地质条件下油气资源预测评价提供了有效的方案,完善了经典的“浮力运聚”和“圈闭控藏”的范式,其核心要素包括:①实现了常规和非常规油气地质理论的统一;②揭示了全油气系统联合成藏机制并建立了统一成因模式和预测方法,为不同类别油气资源预测评价提供了科学依据;③总结了全油气系统成藏规律并建立分类方案和定量评价体系。全油气系统理论在实际勘探实践中取得了显著成效,并为油气资源评价预测指明了进一步发展方向。目前,全油气系统的理论框架还在不断深化发展中,在未来油气资源勘探应用中,其主要研究方向包括全油气系统内油气资源的形成、演化与分布,油气资源分类、相互转化与共生规律,以及基于全油气系统理论的新一代盆地模拟系统和油气资源预测评价关键技术研发等,为复杂地质条件下油气勘探提供有效指导,最终实现油气资源的高效勘探和开发。

关键词:含油气系统;油气地质学;油气勘探;全油气系统;成藏机制;油气资源评价;常规和非常规油气

中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

The whole petroleum system: An emerging direction for petroleum geology and an innovative paradigm for oil and gas exploration

LIU Keyu^{1,2}, ZHANG Sijia^{3,4}, LIU Jianliang^{1,2}, ZHAO Zhencheng^{3,4}, JIN Yujie^{3,4}, ZHANG Ting^{3,4}, LIN Hao^{3,4}

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, Qingdao, Shandong 266580, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing 102249, China]

Abstract: The newly established whole petroleum system (WPS) theory has attracted wide attention from both academic and industrial communities. Its related achievements have ranked among the Top 10 Scientific and Technological Advances of PetroChina and the Top 10 Landmark Achievements in China's Oil and Gas Exploration and Development. Recognized as a major fundamental theoretical innovation in the industry, the WPS theory has prompted new directions for petroleum geology research in theory. Additionally, it provides effective solutions for predicting and evaluating hydrocarbon resources under complex geological conditions, improving the classic paradigms of “buoyancy-driven hydrocarbon migration and accumulation” and “trap-controlled hydrocarbon accumulation”. This WPS theory has several core connotations. First, it contributes to the unification of conventional and unconventional petroleum geology theories. Second, it reveals the mechanisms behind the joint hydrocarbon accumulation of the WPS and offers a unified genetic model and prediction method, laying scientific foundation for predicting and evaluating diverse oil and gas resources. Third, it summarized the hydrocarbon accumulation pattern of the WPS, along with a classification scheme and a quantitative evaluation system. The application of the WPS theory has led to significant achievements in exploration practices, while offering new directions for the evaluation and prediction of oil and gas resources. Currently, the theoretical framework of the WPS is still being constantly refined and developed. In its application to future hydrocarbon

收稿日期:2025-05-20;修回日期:2025-07-14。

第一作者简介:刘可禹(1963—),男,教授,沉积学及油气成藏分析研究。E-mail:liukeyu@upc.edu.cn。

基金项目:中国石油科学研究与技术开发项目(2021DJ0101);国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003-02,U24B6001-2)。

exploration practices, the major research directions include the formation, evolution, and distribution of hydrocarbon resources within a WPS, as well as their classification, mutual transformation, and symbiotic pattern. Besides, it is advisable to develop both new-generation basin simulation systems and key technologies for predicting and evaluating hydrocarbon resources based on the WPS theory. These efforts will provide effective guidance for hydrocarbon exploration under complex geological conditions, ultimately facilitating efficient exploration and exploitation of oil and gas resources.

Key words: petroleum system, petroleum geology, whole petroleum system (WPS), hydrocarbon exploration, hydrocarbon accumulation mechanism, oil and gas resources, conventional and unconventional oil and gas resources

引用格式:刘可禹,张思佳,刘建良,等. 全油气系统:油气地质学研究新方向和油气勘探新范式[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1055–1070. DOI: 10. 11743/ogg20250403.

LIU Keyu, ZHANG Sijia, LIU Jianliang, et al. The whole petroleum system: An emerging direction for petroleum geology and an innovative paradigm for oil and gas exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1055–1070. DOI: 10. 11743/ogg20250403.

全油气系统理论是贾承造等学者历经10多年的探索提出的用于阐述常规和非常规油气藏联合共生机制和分布规律的石油成藏模式^[1-3]。这一理论框架提出后在中国学术界和产业界产生了广泛影响,推动了中国油气勘探向“常-非一体化研究”方向发展。中国石油界将其作为重大应用基础研究予以立项支持,强化理论研究与实际应用;全油气系统理论研究的相关论文被中国科协评为全国百篇优秀创新论文^[4];该理论研究的相关成果已经被评为“中国石油十大科技进展”^[5]及“中国油气勘探开发十大标志性成果”^[6]。全油气系统理论从提出到目前的发展,为什么能够在较短时间内发挥有如此影响力?这是同行学者和企业界们关注的热点问题。本文试图通过对该理论产生的背景条件及主要进展进行详细调研和梳理回答这个问题,目的是引起同行学者们对这一根植于中国油气勘探实践和研究中取得的这一重大创新成果予以关注并加入这一研究行列,去进一步完善和发展这一理论,使其成为中国石油地质工作者继“陆相生油学说”之后,再次为世界石油地质学百年进展贡献的中国智慧。

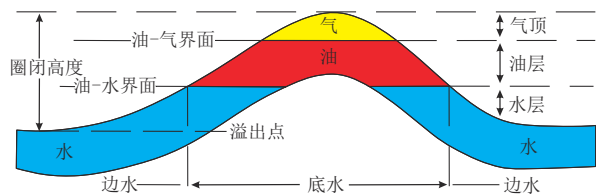
1 全油气系统理论产生的背景条件和过程特征

1.1 圈闭控藏理论:勘探实践成效与资源预测困境

圈闭控藏理论的提出可以划分为3个阶段。①第一阶段为早期探索与背斜理论提出:19世纪末—20世纪初,油气勘探主要依赖地表油气苗和背斜构造。例如,1885年美国地质学家White提出“背斜学说”^[7],认为背斜构造是油气聚集的主要场所。②第二阶段为圈闭概念的诞生:圈闭这一概念于1934年由美国地质学

家McCullough在油气勘探领域首次正式提出并系统阐述,首次将“圈闭”定义为能够阻止油气继续运移并使其聚集的地质体,强调其核心要素为储集层、盖层和遮挡条件^[8]。他进一步将圈闭分为构造圈闭(如背斜和断层)和非构造圈闭(如岩性尖灭和不整合),并在此基础上提出“圈闭学说”,这一理论突破了此前以背斜构造为核心的“背斜学说”,极大扩展了油气勘探的理论框架。③第三阶段为圈闭理论的后续发展与分类完善:1940年,Hubbert从流体动力学角度提出“水动力圈闭”^[9]概念,强调地下水动力对油气聚集的影响;1956年,Levorsen在其所著的《Geology of Petroleum》中建立了较为完善的圈闭分类体系,将圈闭划分为构造、地层和复合圈闭,并进一步将地层圈闭细分为原生地层圈闭(岩性圈闭)和次生地层圈闭(不整合圈闭)两类^[10]。Levorsen随后给出了简明的定义(图1),即“阻止石油和天然气进一步运移的地方”^[11]。20世纪中后期,随着复合圈闭和隐蔽圈闭等概念的提出,圈闭理论更趋完善,指导了全球油气勘探实践。

圈闭概念的提出彻底改变了油气勘探的思路:理论突破上,从单一背斜构造拓展至岩性变化、断层和不整合等多元地质条件,为发现非构造油气藏奠定了基础;勘探效率上,通过系统分析圈闭的封闭条件和储集性能,显著提高了油气田发现的成功率(如北美东德克萨斯油田和阿拉斯加普鲁德霍湾油田);学科发展上,圈闭理论成为石油地质学的核心内容,推动了构造地质学、沉积学和地球物理学等多学科交叉发展。但基于背斜指导油气勘探虽能提高钻探成效,却无法直接评价油气资源潜力——圈闭中油气赋存复杂(或充满、或未充满、甚至大多数情况下不含油气),如何预测区域油气资源远景成为勘探难题,在这种情况下有学者提出了源灶控藏理论并解决了相关难题。

图1 圈闭控藏概念模型及其基本特征^[11]Fig. 1 Conceptual model and general characteristics of trap-controlled hydrocarbon accumulation^[11]

1.2 源灶控藏理论: 勘探边界的厘定与深层突破的瓶颈

源灶控藏理论起源于20世纪40—60年代对沉积有机质生烃机制的科学探索,其发展历程与有机地球化学和盆地分析技术的进步紧密相关,随着研究的深入,石油地质学家逐渐认识到油气藏在地下的形成分布受富含有机质烃源岩层的控制。Tissot(1971)在研究巴黎盆地中侏罗统生油层问题时,发现所有油田及出油点均位于有利生油区内,生油率小于500 g/t的区域没有油气井分布^[13];Evamy等(1978)指出尼日尔三角洲油区被许多同生区域断层所分割,每个分割区都

是一个相对独立的地质和油气运聚单元,内部生成的油气很难运移到另一个单元中^[14];1978年,Tissot与Welte共同完善了生烃演化模式^[15],形成系统的干酪根热降解理论。这一理论为源控论提供了核心科学依据,标志着源控油气成藏理论的正式形成。20世纪80年代,源控论在全球油气勘探中得到广泛应用。例如,渤海湾盆地通过研究烃源岩分布与断裂系统的关系,发现油气藏主要围绕生烃洼陷呈环带状分布,验证了源控论的普适性。Demaison(1984)对世界上12个典型成油盆地的油气分布规律进行了分析,得出了与“源控论”相似的结论^[16]。国际上,含油气系统理论的提出^[17]将源控论纳入更宏观的地质框架,强调“有效烃源岩控制油气藏分布”是含油气系统的核心特征。同时,源控论在非常规油气领域(如页岩油)的应用也取得突破,强调“甜点区”与烃源岩热演化程度和有机质丰度的直接关联。源灶控藏理论颠覆了早期以构造圈闭为核心的勘探思路,确立了烃源岩在油气成藏中的主导地位,指导着全球80%以上的油气发现,并在复杂盆地、深层-超深层及非常规领域持续发展。源控油气理论(图2)能够预测一些含油气盆地平面上的

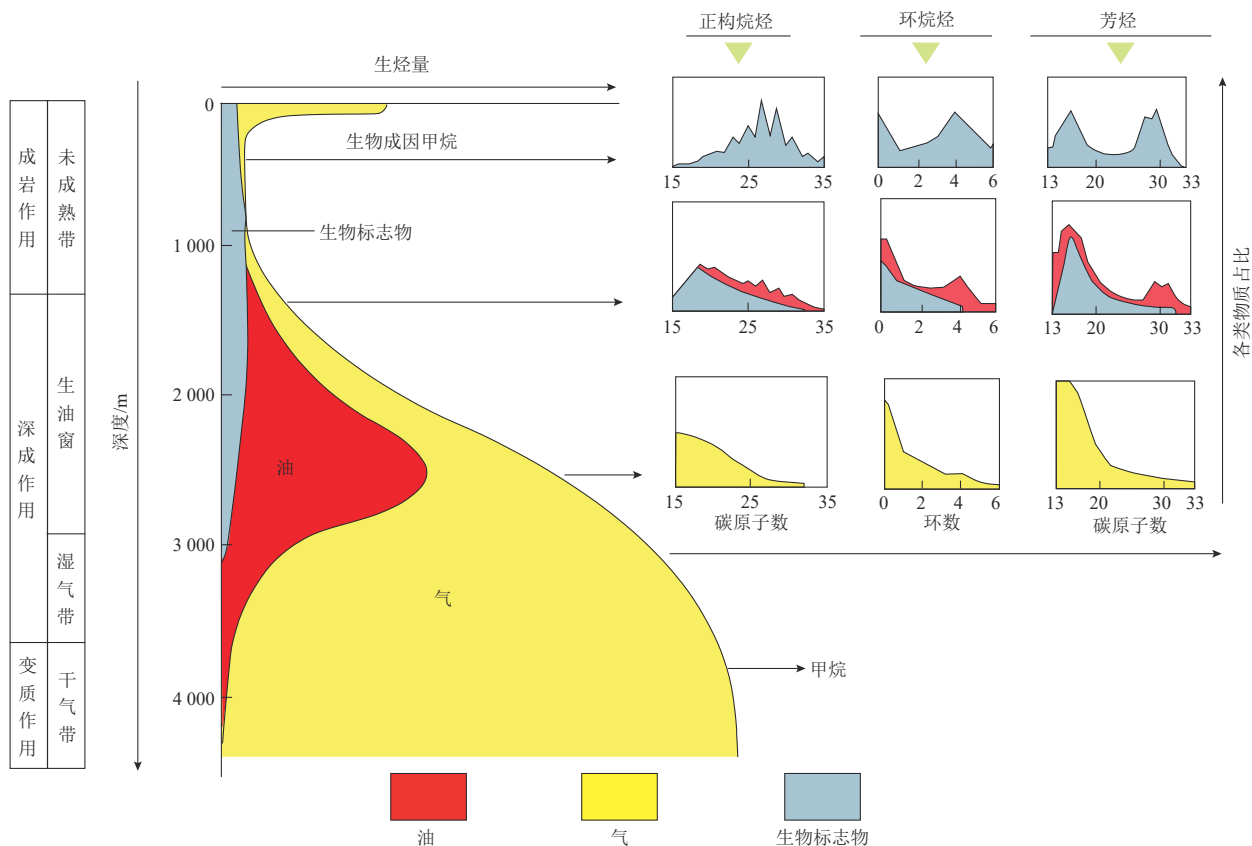


图2 源岩演化生烃概念模型及其分布基本特征(据文献[15]修改)

Fig. 2 Conceptual model of hydrocarbon generation from source rock evolution and its basic distribution characteristics (modified after reference [15])

油气分布特征并评价油气资源潜力,但无法评价无探井或探井深度未达到烃源岩的盆地和区域,在这种情况下有学者提出含油气系统理论并对未知区域进行油气分布预测和评价。

1.3 从源到圈闭:含油气系统理论在非常规油气勘探中的应用瓶颈

含油气系统理论是油气地质学中整合多要素和多过程的核心理论框架,其起源与发展可划分为4个阶段。①第一阶段为理论雏形探索(20世纪初—70年代):20世纪初,油气勘探以构造圈闭为核心,但学者们逐渐意识到烃源岩的重要性。1972年,美国学者Dow首次提出“生-储油系统”(source-reservoir system)概念^[18],通过油-源对比将威利斯顿盆地划分为3个含油系统,标志着含油气系统理论的萌芽。②第二阶段为理论形成(1980—1990年):Perrodon进一步提出含油气系统是“控制油气藏分布的地质要素组合”^[19-20],强调源岩、储层和盖层的空间匹配。1994年,Magoon与Dow在经典的《The Petroleum System—From Source to Trap》一文中系统定义含油气系统为“一个有效烃源岩与相关油气藏的天然系统,包含所有必要地质要素和作用”,并提出“关键时刻”(critical moment)概念^[17],强调油气生成、运移和聚集的时空匹配。该理论整合了烃源岩、储层、盖层、圈闭、运移路径和保存条件6大要素,建立了从源岩到圈闭的完整成藏链条,标志着含油气系统理论的正式形成。③第三阶段为理论发展(1990年—21世纪初):美国威利斯顿盆地巴肯组油气系统的发现是典型案例,通过源-储配置,结合水平井压裂技术,在低孔-低渗储层中实现大规模非常规油气开发,证实了含油气系统理论在非常规领域的应用潜力^[21]。与此同时,中国学者针对陆相盆地特点,提出“源-盖控烃”及“断控复合全油气系统”等创新模型,如塔里木盆地寒武系盐下油气藏的发现,通过烃源岩与区域性盖层的配置关系,突破了传统勘探禁区^[22]。④第四阶段为理论深化及其面临的挑战(21世纪初至今):含油气系统理论确立了“源岩控制、要素匹配、过程耦合”的系统思维(图3),但其核心局限于从源岩到圈闭,难以指导非浮力主导及非圈闭控制形成的非常规油气资源的分布预测^[1-2]。

1.4 全油气系统理论创立前的基础探索:常规和非常规油气藏联合共生机制与分布规律

自从加拿大西部Alberta盆地发现全球超大型深盆气藏后,学界随即展开了对常规油气和致密非常规

油气之间差异性、关联性及其联合共生机制与分布规律的研究,为全油气系统理论的建立奠定了重要基础(表1)。

1.4.1 油气门限控藏模式

庞雄奇等学者于1992年最早提出排烃门限概念^[23],并于1993年第一次系统阐述了排烃门限控藏机制,将排烃门限定义为“源岩生成烃量在满足了自身各种形成存留需要后开始以游离态大量排出对应的临界条件”^[24],揭示出不同地质条件下源岩排烃特征的差异性与排烃门限的变化规律并出版相关成果专著^[25-26]。这一概念的确立突破了长期以来将镜质体反射率 $R_o \approx 0.5\%$ 作为有效源岩判别标准的局限性,被用作页岩油气藏形成分布的判别标准和源外油气藏开始形成的临界条件,为油气资源精细化评价开拓了新途径。深入研究发现,源岩生-排-运-聚油气过程中还存在油气聚集门限(源岩排出烃量在运移过程中满足了各种形式的滞留烃量需要并开始以游离态聚集的临界条件)和油气藏规模门限(油气聚集量超过了研究区最小商业油气藏规模对应的临界条件),它们的相互联合控制着研究区不同类别油气资源潜力的大小:滞留于源岩内部的油气构成页岩油气资源的原始烃量;在源岩进入排烃门限前较早排出的油气构成了常规油气的原始烃量;进入排烃门限之后较晚排出的油气构成了致密非常规油气的原始烃量。各原始烃量转化成现实资源的比率取决于后期构造变动强度及其对早前形成油气藏的调整、改造与破坏。据此,出版了《油气运聚门限与资源潜力评价》专著^[27]。在后续的实际应用中,研究者进一步识别出源控、相控、势控和保控4个油气分布门限,揭示4个要素在不同地质条件下的组合特征差异如何控制油气成藏的边界范围、成藏概率以及富集油气程度,基于相关成果出版了《油气分布门限与成藏区带预测》^[28]和《油气富集门限与勘探目标优选》^[29]专著。油气门限的发现及其控藏机制的揭示反映了含油气盆地油气成藏条件的差异性、非均一性以及关联作用,形成油气资源的多样性。

1.4.2 油气动力场控藏模式

在国家973项目资助下,庞雄奇等学者们基于油气门限理论的深化研究获得另一项创新成果——发现油气动力场控制着油气藏的形成与分布^[30],这一认识经过后来持续深入研究得到不断完善。康永尚等最早提出流体动力系统概念:系指具有特定的功能和相对稳定的边界与相对统一的压力体系,其中的所有油气

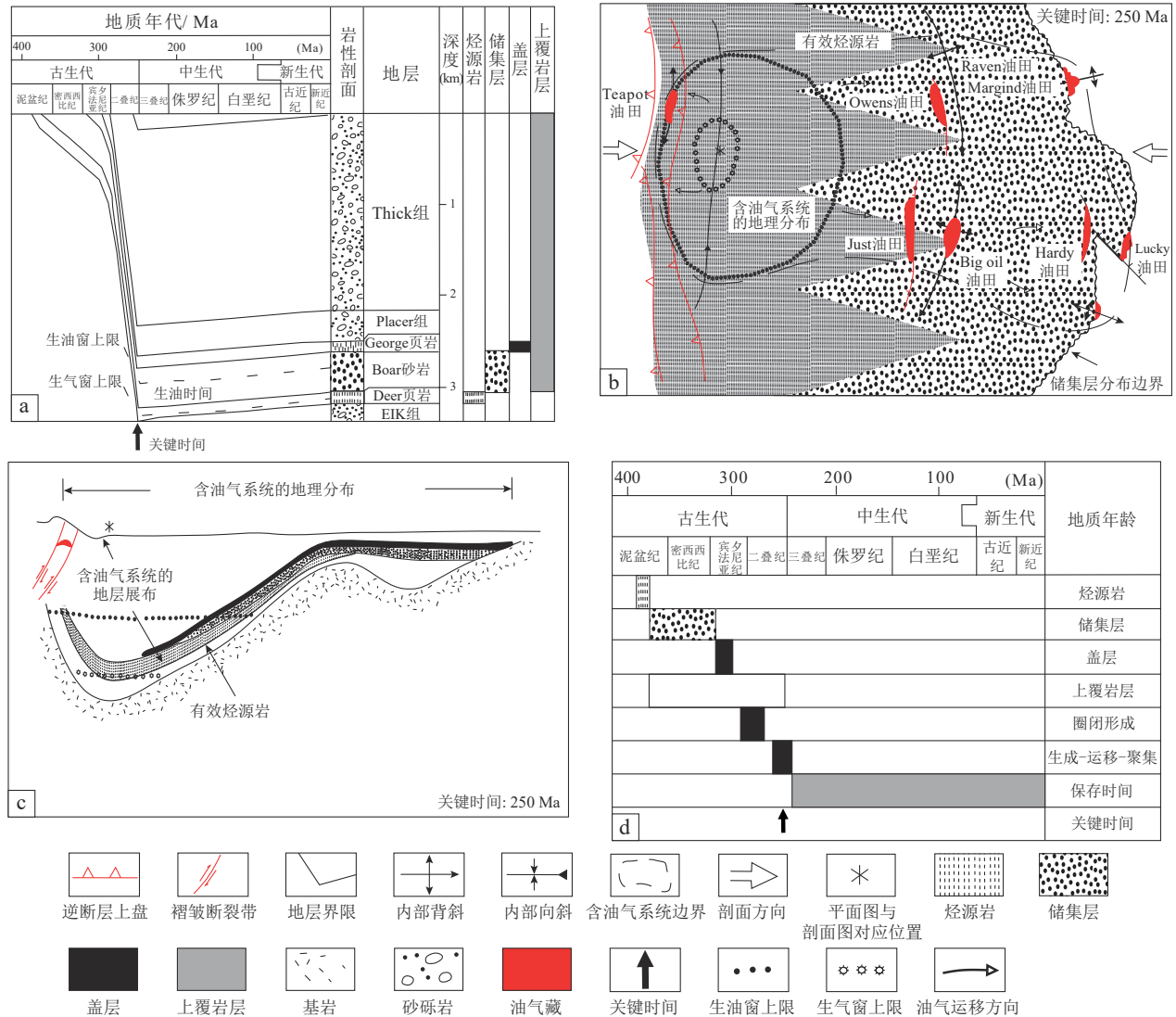


图3 含油气系统概念模型及其控油气成藏规律(据文献[17]修改)

Fig. 3 Conceptual model and hydrocarbon accumulation patterns of the petroleum system (modified after reference [17])

a. 含油气系统关键时间和石油生成时间的埋藏史图; b. 含油气系统关键时间的地理展布平面图; c. 含油气系统关键时间地层分布的地质剖面; d. 含油气系统事件图

藏具有类似可比的成藏条件和成藏动力^[31]。但其对地下流体的浮力以及毛细管等非浮力的研究不足,缺少对地下流体动力场的精细划分。因此庞雄奇等通过对中国塔里木、准噶尔、鄂尔多斯、四川、松辽和渤海湾盆地等6个代表性含油气盆地以及全球含油气盆地油气藏的研究,发现不同深度地层中油气成藏过程受控于不同主导动力,提出油气动力场的概念并建立相应的成藏模式^[32]。油气动力场被定义为“含油气盆地内油气来源条件相同、运聚动力相同、成藏类型相同、彼此相互沟通且连续分布的储集岩体之和”。依据含油气盆地储集岩体孔隙度和渗透率等相关特征的差异,油气动力场被归为3类,它们决定着常规和非常规油气藏的形成和分布:①第1类为自由动力场,储集岩

体高孔-高渗,浮力主导油气长距离运聚,形成常规油气藏;②第2类为局限动力场,储集岩体低孔-低渗,毛细管力差等非浮力主导油气短距离运聚,形成非常规致密油气藏;③第3类为束缚动力场,储集岩体超低孔-低渗,吸附与扩散等非浮力主导油气微距离运聚,形成源内油气藏。油气动力场概念的提出及其控制油气藏分布模式^[32]的建立基于3个油气动力边界的发现及其控油气机制的揭示。第1个油气动力边界是浮力成藏下限^[32],被定义为“随着埋深增大,含油气盆地内储集岩体孔喉半径因压实作用不断减少,油气运移由浮力主导向非浮力主导转变对应的临界条件”,它们是判别常规和非常规油气藏形成分布的临界标准。最早发现浮力成藏下限的是中国石油大学(北京)庞雄奇和

表1 全油气系统常规和非常规油气之间差异性、关联性、共生机制和联合分布规律研究进展及主要参考文献

Table 1 Advances and major references for research on the differences, correlations, symbiotic mechanisms, and joint distribution patterns between conventional and unconventional oil and gas resources in the WPS

内容	研究学者	出版年份	论文/专著	题目	期刊/出版社	对全油气系统研究的贡献
油气门限控藏模式	庞雄奇,陈章明,方祖康,等	1992	论文	海拉尔盆地源岩排油气量计算及其定量评价	《石油学报》	最早提出排烃门限概念
	庞雄奇,陈章明,陈发景	1993	专著	含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价	地质出版社	第一次详细阐述排烃门限概念
	庞雄奇	1995	专著	排烃门限控油气理论与应用	石油工业出版社	第一本源岩排烃门限专著
	庞雄奇,IAN Lerche,王雅春	2001	专著	煤系源岩排烃门限理论研究与应用	石油工业出版社	第一本煤系源岩排烃门限专著
	庞雄奇	2014	专著	油气运聚门限与资源潜力评价	科学出版社	发现运聚门限控藏规律
	庞雄奇	2014	专著	油气富集门限与勘探目标优选	科学出版社	发现富集门限控藏规律
	庞雄奇	2015	专著	油气分布门限与成藏区带预测	科学出版社	发现分布门限控藏规律
油气动力场控藏模式	康永尚,庞雄奇	1998	论文	油气成藏流体动力系统分析原理及应用	《沉积学报》	最早提出流体动力系统
	庞雄奇,金之钧,曾溅辉,等	2002	论文	Prediction of the Distribution Range of Deep Basin Gas Accumulation and Application in the Turpan-Hami Basin	《Energy Exploration & Exploitation》	第一次提出常规和非常规油气成藏力平衡边界(后来的浮力成藏下限)
	PANG Xiongqi, LIU Keyu, MA Zhongzhen, 等	2012	论文	Dynamic Field Division of Hydrocarbon Migration, Accumulation and Hydrocarbon Enrichment Rules in Sedimentary Basins	《Acta Geologica Sinica》	第一次提出油气动力场概念并阐述控油气成藏规律
	庞雄奇,姜振学,黄捍东,等	2014	论文	叠复连续油气藏成因机制、发育模式及分布预测	《石油学报》	第一次提出浮力成藏下限概念
	PANG Xiongqi, JIA Cheng-zao, ZHANG Kun, 等	2020	论文	The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction	《Earth System Science Data》	第一次提出源岩供烃底限概念并揭示控油气机制
	PANG Xiongqi, JIA Chengzao, WANG Wenyang, 等	2021	论文	Buoyance-driven hydrocarbon accumulation depth and its implication for unconventional resource prediction	《Geoscience Frontiers》	第一次阐述浮力成藏下限概念与控油气分布规律
	PANG Xiongqi, HU Tao, Larter S, 等	2022	论文	Hydrocarbon accumulation depth limit and implications for potential resources prediction	《Gondwana Research》	第一次提出油气成藏底限概念并揭示控油气规律
油气藏有序分布与统一分类	邹才能,杨智,张国生,等	2014	论文	常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义	《石油勘探与开发》	常规-非常规统一
	贾承造	2017	论文	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	《石油勘探与开发》	第一次阐述经典理论局限性
	ZHAO Jingzhou, LI Jun, WU Weitao, 等	2019	论文	The petroleum system: a new classification scheme based on reservoir qualities	《Petroleum Science》	油气系统分类
	贾承造,庞雄奇,宋岩	2021	论文	论非常规油气成藏机理:油气自封闭作用与分子间作用力	《石油勘探与开发》	提出非常规自封闭成藏机制
	PANG Xiongqi, SHAO Xinhe, LI Maowen, 等	2021	论文	Correlation and difference between conventional and unconventional reservoirs and their unified genetic classification	《Gondwana Research》	油气藏统一成因分类
	PANG Xiongqi, JIA Cheng-zao, CHEN Junqing, 等	2021	论文	A unified model for the formation and distribution of both conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs	《Geoscience Frontiers》	常规-非常规统一
	张水昌,张斌,王晓梅,等	2023	论文	松辽盆地古龙页岩油富集机制与常规——非常规油有序分布	《石油勘探与开发》	松辽盆地全油气系统有序成藏

金之钧等^[33],他们最初将其称之为深盆油气藏在向斜储集岩体中形成分布的力平衡边界:边界之上浮力大于毛细管力,有利浮力主导油气运移形成常规油气藏;边界之下浮力小于毛细管力,有利非浮力主导油气就地聚集形成非常规致密深盆油气藏。随着研究深入以及这一边界条件在含油气盆地普遍存在就将它们称之为浮力成藏下限^[34],目前普遍用英文缩写 BHAD (buoyancy-driven hydrocarbon accumulation depth)表示。

第2个油气动力边界是油气成藏底限(hydrocarbon accumulation depth limit, HADL)^[35],系指向深部领域勘探油气时目的层钻遇干层的比率随埋深增大趋于100%时对应的临界条件,指示源外油气成藏最大埋深。第3个油气动力边界是源岩供烃底限(active source depth limit, ASDL)^[36],系指源岩层生烃潜力随埋深不断增大而最终趋于消失对应的临界条件,理论上指示源内油气成藏的最大埋深。基于BHAD, HADL和ASDL这3个油气动力边界或门限的围合成藏作用,建立了油气动力场联合控藏模式,从动力学原理上阐明了常规和非常规油气藏联合共生机制及其有序分布规律,为全油气系统理论创立奠定了理论基础。

1.4.3 油气藏有序分布与统一成因分类

全油气系统理论被正式提出之前,诸多学者为之做出过贡献。贾承造最早在文献中提到全油气系统概念,他明确指出^[1]:未来油气系统的研究应该是一个全油气系统,既要包括从源岩到圈闭形成的常规油气藏,也要包括从源岩到致密储层内形成的连续油气藏,还要包括源岩内微运移形成的页岩油气藏。他们后来针对非常规油气成藏机制进行研究,认识到非常规油气藏的发现和大规模勘探是对经典石油地质理论在储层、盖层、圈闭和运聚动力等4个方面的全面突破,详细阐述了它们与常规油气成藏之间的差异性和关联性^[2,37],并在全性大会上与代表们分享了这方面的成果^[38-40]。邹才能等很早就关注了非常规油气成藏与常规油气成藏之间的差异性和关联性,首次提出了常规-非常规油气“有序聚集”概念并详细阐述了这一理论认识及其实践意义^[41]。赵靖舟等依据储层特征不同,提出了常规和非常规油气藏统一分类方案,将它们细分为高孔-高渗常规油气藏、低孔-低渗致密油气藏和超低孔-低渗的页岩油气藏等多种类型^[42]。庞雄奇等依据油气成藏动力机制及其形成条件差异,提出了常规和非常规油气藏统一分类方案,将它们分为3大类6亚类15种49样^[43]。结合油气动力边界和油气动力场联合控藏规律研究,庞雄奇等建立了常规和非常规油气藏统一成因模式^[44]。张水昌等开展松辽盆地古龙页岩油富集机制研究,建立了常规-非常规油有序分布模式^[45]。这些方面的研究成果还有很多,虽然没有提到全油气系统概念,但所涉及到的内容均与全油气系统研究相关,成果的取得为全油气系统理论的创立奠定了基础、创造了条件、开拓了途径,起到了积极的推动和促进作用。

2 全油气系统理论的核心要点及其创新意义

中国地质学家在20世纪40年代创立了陆相生油理论^[46],突破“唯海相生油论”的认知,指导发现了大庆和胜利等一批世界级大油气田,保障了中国近30年原油自给,为油气地质理论的发展贡献了中国智慧。当前,全球油气勘探面临常规向非常规转型,美国依靠页岩油气革命实现了能源独立,而中国却正面对分别超70%和40%的油、气对外依存度。要实现中国能源安全的战略发展目标,中国石油地质亟需基础理论再创新。全油气系统理论是以贾承造为代表的中国油气地质研究者们基于中国油气地质研究和油气勘探实践创立的新理论范式,再次丰富了油气地质理论。表2梳理了这一理论研究的发展时序和主要进展,核心要点可以概括为以下3方面。

2.1 创建了全油气系统科学概念,并确定了其结构特征

全油气系统理论框架的创立以贾承造等学者2023年在《Petroleum Science》杂志上发表的“全油气系统与常规和非常规油气藏有序分布模式”论文为标志^[3]。尽管此前提出过全油气系统概念模型^[1]、有过全油气系统理论研究学术报告^[38-40]、甚至发表过有关全油气系统学术论文^[2,4,47,50],但它们尚处于探讨阶段或涉及到的内容和研究区有限而难以将认识向外拓展。贾承造等^[3]从4个方面构建了全油气系统理论的基本框架:①严谨地给定了全油气系统的科学概念、英文表达为“whole petroleum system(WPS)”,WPS被定义为含油气盆地相互关联的源岩层形成的全部油气、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^[3],虽然后来有过修正和完善^[51],但常规和非常规油气资源的形成与分布及其后期调整-改造-保存等核心内涵没有改变;②详细阐述了全油气系统概念与前人提到的总油气系统(total petroleum system, TPS)概念的区别和联系,TPS只包括已经发现的和有待发现的常规油气藏,不包括非常规油气藏;③提出了全油气系统研究的基本思路和方法^[52],通过剖析中国和全球已有典型油气钻探结果,确定了全油气系统的结构特征:存在浮力成藏下限、油气成藏底限和源岩供烃底限3个动力边界,存在自由、局限和束缚3个油气动力场,存在高孔-高渗、低孔-低渗和超低孔-低渗3类储集岩体,存在源岩滞留烃、自由动力场排出烃和

表2 全油气系统理论框架创立与发展的时序进度及主要参考文献

Table 2 Timeline for the establishment and development of the WPS theoretical framework and major references

研究学者	出版年份	论文/专著/报告	题目	期刊/出版社/会议	对全油气系统的贡献
贾承造,郑民,张永峰	2014	论文	非常规油气地质学重要理论问题	《石油学报》	首次提出全油气系统概念模型
贾承造	2017	论文	Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory	《石油勘探与开发》	首次提出全油气系统研究思路
贾承造	2021	报告	全油气系统(WPS)——从烃源岩到非常规油气连续型聚集与常规油气圈闭聚集	第六届非常规油气地质评价暨新能源学术研讨会	剖析全油气系统研究实例和研究意义
贾承造	2021	报告	全油气系统(WPS)——从烃源岩到非常规油气连续型聚集与常规油气圈闭聚集	第十届中国石油系统与储层学术会议	剖析全油气系统研究实例和研究意义
支东明,唐勇,何文军,等	2021	论文	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	《石油勘探与开发》	准噶尔全油气系统有序成藏模式
唐勇,曹剑,何文军,等	2021	论文	从玛湖大油区发现看全油气系统地质理论发展趋势	《新疆石油地质》	全油气系统理论发展分析
庞雄奇,贾承造,宋岩,等	2022	论文	全油气系统定量评价:方法原理与实际应用	《石油学报》	建立全油气系统定量评价方法
彭光荣,庞雄奇,徐帜,等	2022	论文	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	《地球科学》	阐述南海全油气系统成藏特征
何文军,唐勇,郭旭光,等	2023	论文	准噶尔盆地玛湖凹陷常规-非常规全油气系统成藏模式研究	《新疆地质》	探讨准噶尔盆地全油气系统成藏模式
贾承造,庞雄奇,宋岩	2023	论文	Whole petroleum system and ordered distribution pattern of conventional and unconventional oil and gas reservoirs	《Petroleum Science》	建立全油气系统概念与常规和非常规油气藏有序分布模式
贾承造,庞雄奇,郭秋麟,等	2023	论文	基于成因法评价油气资源:全油气系统理论和新一代盆地模拟技术	《石油学报》	阐述全油气系统理论用于新一代盆地模拟系统研发思路和技术
庞雄奇,贾承造,郭秋麟,等	2023	论文	全油气系统理论用于常规和非常规油气资源评价的盆地模拟技术原理及应用	《石油学报》	阐述全油气系统理论用于盆模资源评价方法原理与关键技术
张水昌,张斌,王晓梅,等	2023	论文	松辽盆地古龙页岩油富集机制与常规-非常规油有序分布	《石油勘探与开发》	建立松辽盆地全油气系统成藏模式
姜福杰,贾承造,庞雄奇,等	2023	论文	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	《石油勘探与开发》	建立鄂尔多斯全油气系统成藏模式
贾承造	2023	报告	全油气系统理论基本原理	第一届全油气系统理论与石油地质学发展方向学术研讨会	阐述全油气系统理论的基本原理
庞雄奇	2023/2024	专著	Quantitative Evaluation of the Whole Petroleum System: Hydrocarbon Thresholds and Their Application	Springer, 2023; Springer & Science Press, 2024	建立全油气系统定量评价方法原理
贾承造	2024	报告	全油气系统理论及研究进展	第一届全油气系统理论与准噶尔盆地超深层油气勘探研讨会	介绍全油气系统理论研究主要进展
贾承造,庞雄奇,宋岩	2024	论文	Basic principles of the whole petroleum system	《石油勘探与开发》	阐述全油气系统理论的基本原理
宋岩,贾承造,姜林,等	2024	论文	全油气系统内涵与研究思路	《石油勘探与开发》	介绍全油气系统研究的基本方法
郭旭升,黄仁春,张殿伟,等	2024	论文	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	《石油勘探与开发》	阐述碳酸盐岩全油气系统成藏规律
支东明,李建忠,杨帆,等	2024	论文	吐哈盆地台北凹陷侏罗系煤系全油气系统特征	《石油勘探与开发》	阐述含煤层系全油气系统成藏特征
TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, 等	2024	论文	The whole petroleum system with ordered coexistence of conventional and unconventional hydrocarbons: Case from the Junggar Basin, China	AAPG Bulletin	刊载全油气系统理论研究成果
贾承造	2024	报告	全油气系统与油气运移	全国油气运移学术研讨会	阐述全油气系统内油气运移基本特征
李国欣,贾承造,赵群,等	2025	论文	煤岩气成藏机理与煤系全油气系统	《石油勘探与开发》	阐述煤岩全油气系统控藏机制
庞雄奇,贾承造,徐帜,等	2025	论文	全油气系统理论在全球天然气水合物资源评价中的应用	《石油勘探与开发》	全油气系统理论用于水合物资源评价
赵贤正,蒲秀刚,罗群,等	2025	论文	陆相断陷盆地全油气系统圈层结构与油气有序成藏——以沧东古近系孔二段为例	《石油勘探与开发》	建立断陷盆地全油气系统成藏模式

局限动力场排出烃3类原始烃量以及存在常规、致密和页岩3类油气资源;④揭示动力边界-动力场-储层类型-原始烃量之间相互耦合形成3类油气藏,建立了全油气系统内常规和非常规油气藏有序分布基本模式和特殊模式(图4)。这一理论的提出突破了经典理论的局限,实现了常规和非常规油气地质理论的统一。

2.2 揭示了全油气系统联合成藏机制,并建立了统一成因模式和预测方法

油气成藏涉及烃源岩生成、滞留、排运和聚集油气全过程^[27],包括浮力主导下油气长距离运移形成常规油气藏^[17]、非浮力主导下油气短距离运移自封闭形成致密油气藏^[37]以及源岩层吸附作用滞留烃形成页岩油气藏^[44]。此外,各类油气藏形成后,还会因构造变动而发生调整、改造与破坏。从动力机制角度揭示了常规和非常规油气藏联合共生机制并建立统一成因模式^[44]。随着含油气盆地埋深增大以及各种地质条件发生规律性变化,它们之间耦合在全油气系统内形成形式多样的油气藏(图5):源岩在自由动力场排出的油气受浮力主导进入背斜、断块、岩性、地层和复合等圈闭,形成5种常规油气藏;源岩在局限动力场排出油气受非浮力主导形成深盆、圈闭和复合3种致密油气藏;而源内束缚动力场滞留油气形成页岩油气和煤层油气2种超致密油气藏。此外,油气成藏前或成藏后,因构造变动导致储层介质应力-应变、流体活动或温-压环境等变化容易形成裂缝、孔洞、缝洞、微生物降解和高温裂解等5种改造类油气藏。如果更细致地考虑地质条件的差异性,全油气系统演化过程中能够形成的油气藏可达3大类6亚类15种49样^[43]。全油气系统演化及其成藏机制的揭示与成因分类方案的建立为寻找不同类别油气资源提供了科学依据。

2.3 发现了全油气系统成藏规律,并建立分类方案和定量评价体系

全油气系统内油气成藏受控于系统内3个油气动力边界、3个油气动力场、3类原始烃量和3类储集岩体在演化过程中的时空耦合作用。不同沉积体系形成的储集岩体不同,不同储集岩体因矿物组分及其润湿性、界面张力和孔喉半径等不同,导致它们成藏特征和富油气规律存在显著差异。据此,将自然界已经发现的全油气系统初步分为4种基本类型(图6):第Ⅰ类为碎屑岩层系(自源)全油气系统^[51,54,55](图6a),储层和源岩孔隙度与渗透率随埋深增大不断减少,因砂岩储层矿物组成主要为石英和长石,且亲水性强,浮力成藏下

限对应埋深相对较浅,深部非常规油气资源分布领域较广,发展潜力大。第Ⅱ类为碳酸盐岩层系(自源)全油气系统^[56](图6b),储层和源岩孔隙度与渗透率随埋深增大而减少的规律性不强,因碳酸盐岩储层矿物组成主要为方解石和白云石,且亲油性强,浮力成藏下限对应埋深相对较深,浅部常规油气资源分布领域较广,发展潜力大。第Ⅲ类为含煤层系(自源)全油气系统^[57,59](图6c),展现出显著的资源潜力,既发育远源常规气藏,也发育近源致密气藏,还发育大量煤层气藏;煤岩储层和煤岩源岩一体,其孔隙度和渗透率随埋深变化规律复杂;因煤岩矿物主要为有机质且亲油性极强,浮力成藏下限对应埋深非常浅;中浅层致密吸附气比率高但开采吸附气效益差,中深层节理和裂缝发育,能够大量滞留游离气,发展前景广阔。第Ⅳ类为近地表特殊层系(自源)全油气系统^[60](图6d),油气主要来源为浅层原生油气藏和欠压实富有机质沉积地层,微生物氧化改造使原生油气藏转变为稠油或沥青、微生物氧化改造使沉积有机质转变为生物甲烷气并在地质条件合适的情况下聚集起来成藏,在高压-低温环境下早前形成的微生物气藏可以进一步转变为天然气水合物藏。对于近地表特殊层系全油气系统,它还可能接收深部运移上来的油气而形成独立的源外油气藏,或与其他微生物改造而成的油气藏混合。将全油气系统成藏原理与油气门限成藏模式和油气动力场成藏研究相结合,应用盆地模拟方法和技术形成了全油气系统定量评价方法体系^[53,61],用于对实际研究区常规和非常规油气藏有利发育区预测和资源量评价,大幅提升勘探成效并指明深化发展方向和领域^[62-63]。

3 全油气系统理论深化研究意义及其发展方向

全油气系统理论的创立丰富了油气地质理论,从发展的眼光看它目前还仅是一个理论框架,在未来油气资源发展应用中还需要不断完善和发展,下列3个方面尤其迫切和必要。

3.1 基于全油气系统理论研究全球油气资源形成、演化与分布

人类自开始利用石油以来,就十分关注地球上油气资源的数量及其形成分布,但至今并不知道地球上到底有多少潜在的油气资源。供过于求时,油价大幅跌落;供不应求时,油价大幅上涨;为占有更多石油资源,经常诱发国与国之间的争斗甚至战争。作为地质

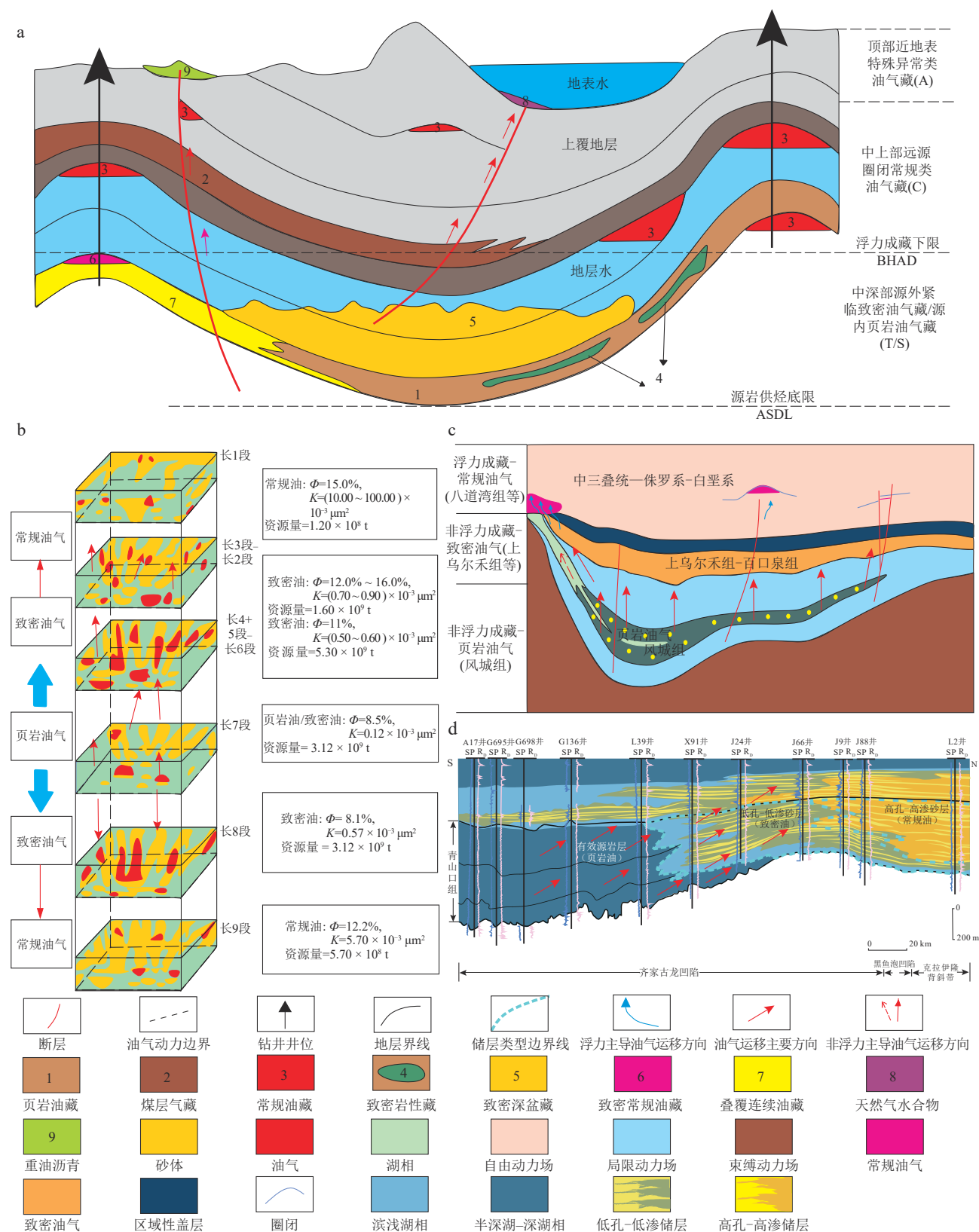


图4 全油气系统的基本概念与常规和非常规油气藏有序分布基本模式和特殊模式(据文献[3,53]修改)

Fig. 4 Basic concept of the WPS, as well as basic and special patterns for ordered distribution of conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs within (modified after references [3,53])

a. 全油气系统内常规和非常规油气藏有序分布基本模式; b. 特殊模式1: 纵向上油气向上和向下双向有序分布[鄂尔多斯盆地三叠系长(延长组)1段—长9段]; c. 特殊模式2: 页岩油气藏与致密油气藏彼此分离(准噶尔盆地二叠系); d. 特殊模式3: 油气藏侧向有序分布(松辽盆地白垩系)

SP. 自然电位; R_p . 电阻率

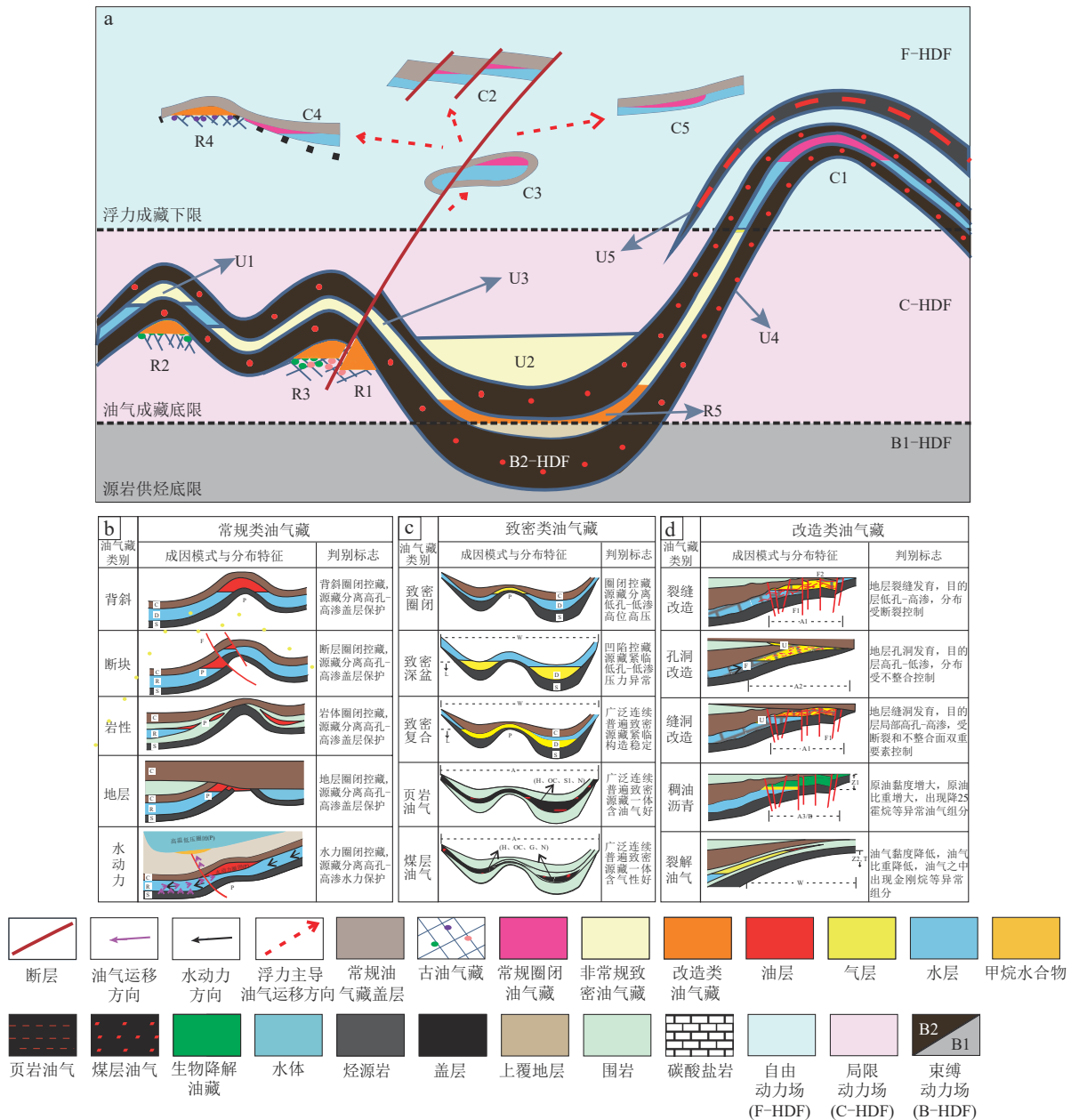


图5 全油气系统常规和非常规油气藏联合成因模式及统一成因分类方案(据文献[4,43]修改)

Fig. 5 Joint genetic model and unified classification scheme for conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs in the WPS (modified after references [4,43])

a. 全油气系统内流体动力场及其控油气藏分布模式;b—d. 含油气盆地中不同动力机制下常规和非常规油气藏统一成因分类

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;F-HDF. 自由动力场;C-HDF. 局限动力场;B-HDF. 束缚动力场;S. 烃源岩;D. 储层;C. 盖层;P. 圈闭;L. 深盆;W. 稳定地层;H. 厚度;A. 面积;OC. 有机碳;S1. 含油性;N. 脆性;G. 含气性;F. 流体活动带;F1. 断裂带;F2. 褶皱带;U. 不整合面;A1. 叠合改造构造;A2. 岩溶带;A3. 油气改造区;B. 近地表微生物活动带;Z1. 氧化带;Z2. 深层储层;T. 高温区

学家,客观准确地评价全球常规和非常规油气资源总量:现实资源量、接替资源量以及远景资源量,并厘清它们的分布特征,对于人类有计划利用这类不可再生资源并服务人类经济社会发展具有十分重要的现实意义。全球气候不断恶化被普遍地认为是人类近200年

过度消耗化石能源的结果,联合国成立气候应对组织并在采取系列措施。然而,有不少学者和国家予以反对,因为还有两个关键问题没有解决:①地球演化过程因早期形成油气藏的调整-改造-破坏而排放的温室气体量以及因火山喷发排放的温室气体量并不完全

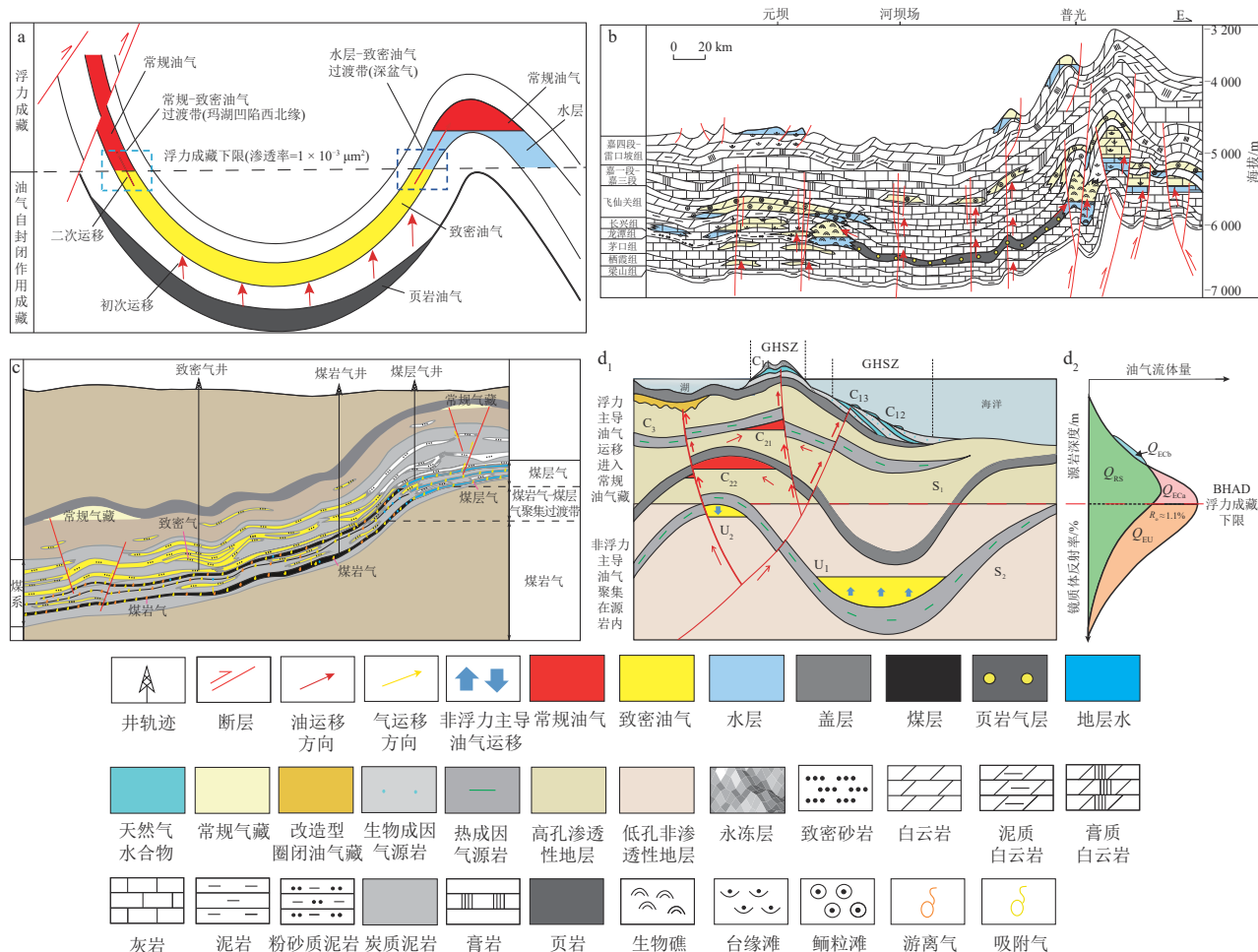


图6 全油气系统主要类型及其富油气特征差异比较(据文献[51,56,59-60]修改)

Fig. 6 Major types of the WPS and their differences in hydrocarbon enrichment characteristics (modified after references[51,56,59-60])

a. 准噶尔盆地二叠系风城组碎屑岩全油气系统有序成藏模式;b. 四川盆地二叠系碳酸盐岩全油气系统有序成藏模式;c. 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系地层全油气系统有序成藏模式;d₁. 全油气系统内常规和非常规油气藏有序分布概念模型;d₂. 全油气系统内3类原始烃量及其关联性

GHSZ. 水合物稳定带; Q_{EU} . 致密油气原始烃量; Q_{ECa} . 常规油气原始烃量(热成因); Q_{ECb} . 常规油气原始烃量(生物成因); Q_{RS} . 源岩滞留原始烃量; C_{11} . 热解成因水合物藏; C_{12} . 生物成因水合物藏; C_{13} . 混合成因水合物藏; C_{21} . 常规类断层圈闭油气藏; C_{22} . 常规类背斜圈闭油气藏; C_3 . 常规类生物降解稠油/沥青油气藏; U_1 . 非常规类致密型油气藏; U_2 . 非常规类致密深盆油气藏; S_1 . 非常规类煤系油气藏; S_2 . 非常规类页岩油气藏

清楚;②地球演化过程中自然排放温室气体量和消耗化石能源排放温室气体量及其相对贡献量与变化特征也并不完全清楚。因此,基于全球油气系统演化特征,研究地球生气总量、各地质历史时期形成的资源量、被改造和破坏烃量以及它们在不同地质历史时期产生的资源环境效应具有重大的现实意义。

3.2 基于全油气系统演化研究油气资源分类、相互转化与共生规律

全油气系统演化形成了常规和非常规油气资源,其成藏机理和赋存状态的不同决定了勘探方式与开采技术的差异。然而,在实际地质条件下它们的形成与分布相互关联并联合共生,彼此难以分离,呈现出复杂的产状特征。① 常规和非常规油气藏之间相互

转换。早期形成的高孔-高渗常规油气藏因埋深持续增大而转变成致密非常规油气藏;晚期形成的非常规连续致密油气藏因应力裂缝改造或流体孔洞改造而转变成常规构造裂缝类油气藏。此外,超致密页岩或煤层油气藏也会因构造变动和裂缝改造而转变为页岩裂缝油气藏或煤岩裂缝气藏。常规油气藏因上覆地层受到剥蚀后埋深变浅,在微生物氧化改造作用下可能转变成稠油沥青;常规油气藏因上覆地层加大被深埋,在更高温-高压条件下可能因裂解转变成气藏和干气藏。② 常规和非常规油气成藏相互叠加复合。同一目的层在早期阶段处于自由动力场,它们主要在浮力主导下形成常规油气藏;埋深增大后目的层变得致密,它们在非浮力主导下形成致密油气藏;两个阶段处于不同的动力场内形成的不同类别油气藏叠加

复合形成一种全新的叠复连续型油气藏。地表附近微生物改造有机质形成生物甲烷气,它们进入圈闭后形成常规生物甲烷气藏;如果深部来源的天然气向上运移进入同一个圈闭则形成混源型天然气藏;如果所处环境因构造变动,转变成高压-低温环境,则已经形成的气藏将会全部或局部转变成天然气水合物藏。③不同的全油气系统相互关联与叠加。近地表浅层微生物改造沉积有机质或早前形成的油气藏被微生物改造都可以构成独特的油气来源,从而形成一个完整的近地表全油气系统;除此之外,深层或超深层存在的源岩层生排的油气可以向上运移并进入浅层近地表全油气系统,形成混源型全油气系统。中国西部广泛发育叠合盆地,不同构造期形成的有效源岩层及其成藏领域构成独立的全油气系统,然而因后期构造变动导致它们形成的油气跨构造期运移和聚集成混源复合型全油气系统。研究全油气系统内油气资源分类、相互转化与联合共生规律,对于有效指导中国叠合盆地复杂油气资源勘探具有重大的现实意义。

3.3 基于全油气系统理论研发新一代盆地模拟系统和油气资源评价技术

油气地质学是一门应用基础学科,它的根本任务是为寻找油气资源提供理论和方法指导,全油气系统理论的创立为研发新一代盆地模拟系统和油气资源评价技术创造了条件,不少学者在这方面已经有很好的开拓性工作,基于相关理论和模型,结合5G、大数据和人工智能等现代技术研发应用软件,可实现油气资源预测评价定量化、自动化和智能化。①常规油气藏、致密油气藏和页岩油气藏对应的最大埋深预测:主要基于油气成藏之中的浮力下限、成藏底限和供烃底限3个动力边界。确定动力边界通常用热演化程度 R_o 指标,因此需要将其换算成对应埋深:地温梯度越低时相应 R_o 对应最大埋深越大。在实际应用时,需要注意3种情况:将后期油气进入到老地层中的情况排除在外,因其不能反映原生气藏的实际情况;储层不同其亲油性不同,油气进入储层内遇到的毛细管阻力不同,形成油气藏最大埋深不同,通常情况下碳酸盐岩储层富油气深度最大、砂岩储层次之、火山岩最浅;要考虑储层的欠压实特征和异常高压特征,在这些条件下目的层对应的 R_o 并不反映研究区的整体实际情况,由此预测的最大埋深需要进行校正。②油气资源类型判别与资源量评价:主要基于动力场成藏模式和油气运聚门限组合控藏模式预测资源

类型,自由动力场形成常规油气藏、局限动力场形成致密油气藏、束缚动力场形成页岩油气藏、浅层高压-低温固相平衡带区形成天然气水合物。全油气系统演化过程中不同动力场叠加复合形成特殊复杂类油气资源。各动力场资源量评价需要考虑5个关键要素:油气生成总量、原始烃量比率系数、油气运聚效率系数、储层内可动烃量比率系数以及油气藏内可采烃量比率系数,这些系数需要结合实际地质条件取样获取。③常规和非常规油气藏有利发育区联合预测评价:主要基于主控因素控油气分布门限之间的复合作用预测油气藏形成分布。依据源控、相控、盖控和势控油气分布门限的叠加复合预测常规类油气藏有利发育区,4要素分布门限圈定区叠加复合最有利;依据构造稳定区、非浮力成藏区、致密储层发育区和源-储有效毛细管力差分布区的叠加复合预测非常规致密类油气藏有利发育区,4要素分布门限圈定区叠加复合最有利;依据高总有机碳含量(TOC)分布区、有效厚度分布区、滞留烃富集区和脆性矿物发育区的叠加复合预测页岩油气有利富集区,4要素分布门限圈闭区叠加复合最有利。在上列工作基础上再开展油气富集程度与甜点分布预测研究,为钻探目标优选提供科学依据,最终实现油气资源高效勘探和开发。

4 结论

1) 全油气系统理论的创立丰富和发展了油气地质理论,是中国石油地质学家对石油地质学百年发展的新贡献,受到学术界和产业界广泛关注,属于重大基础理论创新,引领了油气地质理论发展新方向。

2) 全油气系统理论的核心要点在于:创建了全油气系统科学概念,确定了其结构特征,揭示了其成藏机制并建立了统一成因模式和分类方案,同时发现了其成藏规律并建立了相应的分类方案于定量评价体系。

3) 全油气系统理论的深化发展方向包括:研究全球油气资源的形成、演化与分布,研究油气资源的分类、相互转化与共生规律,研发新一代盆地模拟系统和油气资源评价技术,进而提高油气资源勘探开发成效。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 中国石油 2024 年十大科技进展[J]. *世界石油工业*, 2025, 32(1): 86.
- Top 10 scientific and technological advances of PetroChina in 2024 [J]. *World Petroleum Industry*, 2025, 32(1): 86.
- [6] 2024 年中国油气勘探开发十大标志性成果[J]. *世界石油工业*, 2025, 32(1): 119.
- Top 10 landmark achievements in China's petroleum exploration and development in 2024 [J]. *World Petroleum Industry*, 2025, 32(1): 119.
- [7] WHITE I C. The geology of natural gas [J]. *Science*, 1885, 5 (125): 521-522.
- [8] MCCOLLOUGH E H. Structural influence on the accumulation of petroleum in California [M]//WRATHER W E, LAHEE F H. *Problems of Petroleum Geology*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1934: 735-760.
- [9] HUBBERT M K. The theory of ground-water motion [J]. *The Journal of Geology*, 1940, 48(8, Part 1): 785-944.
- [10] WEEKS A W. Geology of petroleum. A. I. Levorsen [J]. *The Journal of Geology*, 1956, 64(1): 99.
- [11] LEVORSEN A I. *Geology of petroleum* [M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1967.
- [12] SELLEY R C, SONNENBERG S A. *Elements of petroleum geology* [M]. 3rd ed. Boston: Academic Press, 2015.
- [13] TISSOT B P. New data and digital simulation of petroleum generation and migration mechanisms and their applications in exploration [C]//Translated from the 8th World Petroleum Conference Papers. [S. l.]: [s. n.], 1971.
- [14] EVAMY B D, HAREMBOURE J, KAMERLING P, et al. Hydrocarbon habitat of Tertiary Niger Delta [J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62(1): 1-39.
- [15] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence: A new approach to oil and gas exploration [M]. Berlin: Springer, 1978.
- [16] DEMAISON G. The generative basin concept [M]//DEMAISON G, MURRIS R J. *Petroleum Geochemistry and Basin Evaluation*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1984: 1-14.
- [17] MAGOON L B, DOW W G. The petroleum system—from source to trap [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994.
- [18] DOW W G. Application of oil-correlation and source-rock data to exploration in Williston Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1974, 58(7): 1253-1262.
- [19] PERRODON A. Dynamics of oil and gas accumulations [M]. Pau: Elf Aquitaine, 1983: 187-210.
- [20] PERRODON A, MASSE P. Subsidence, sedimentation and petroleum systems [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1984, 7(1): 5-25.
- [21] SONNENBERG S A, PRAMUDITO A, 李会宪, 等. 威利斯顿盆地埃尔姆古力大油田石油地质研究[J]. *石油地质科技动态*, 2009(6): 1-22.
- SONNENBERG S A, PRAMUDITO A, LI Huixian, et al. Petroleum geology of the Elm Coulee giant oil field, Williston Basin [J]. *Science & Technology Development in Petroleum Geology*, 2009(6): 1-22.
- [22] 金之钧. 从源-盖控烃看塔里木盆地油气分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 763-770.
- JIN Zhijun. A study on the distribution of oil and gas reservoirs controlled by source-cap rock assemblage in unmodified foreland region of Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 763-770.
- [23] 庞雄奇, 陈章明, 方祖康, 等. 海拉尔盆地源岩排油气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.
- [24] 庞雄奇, 陈章明, 陈发景. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- PANG Xiongqi, CHEN Zhangming, CHEN Fajing. Numerical simulation of hydrocarbon generation, remaining and expulsion of source rocks in geohistory and their quantitative evaluation [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [25] 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. *Hydrocarbon expulsion threshold theory and applications* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [26] 庞雄奇, LERCHE I, 王雅春. 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, LERCHE I, WANG Yachun. *Threshold theory*

- for hydrocarbon expulsion from coal measures and applications [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [27] 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. The hydrocarbon migration and accumulation threshold and the resource potential evaluation [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 康永尚, 庞雄奇. 油气成藏流体动力系统分析原理及应用[J]. *沉积学报*, 1998, 16(3): 80–84.
- KANG Yongshang, PANG Xiongqi. Principles of oil and gas formation fluid dynamic system analysis and their applications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 80–84.
- [32] 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.
- [33] PANG Xiongqi, JIN Zhijun, ZENG Jianhui, et al. Prediction of the distribution range of deep basin gas accumulations and application in the Turpan-Hami Basin[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2002, 20(2/3): 253–286.
- [34] 庞雄奇, 姜振学, 黄捍东, 等. 叠复连续油气藏成因机制、发育模式及分布预测[J]. *石油学报*, 2014, 35(5): 795–828.
- PANG Xiongqi, JIANG Zhenxue, HUANG Handong, et al. Formation mechanisms, distribution models, and prediction of superimposed, continuous hydrocarbon reservoirs [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2014, 35(5): 795–828.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-sealing and intermolecular forces[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 507–526.
- [38] JIA Chengzao. New progress in unconventional oil and gas geology [C]//Report of the Annual Conference of China Petroleum Geology, Haikou, China, 2021. [S. l.]: [s. n.], 2021.
- [39] JIA Chengzao. Whole petroleum system: From source rocks to continuous accumulation of unconventional oil and gas and conventional oil and gas trap accumulation [C]//The 6th Unconventional Oil and Gas Geological Evaluation and New Energy Conference, Wuhan, China, 2021. [S. l.]: [s. n.], 2021.
- [40] JIA Chengzao. Whole petroleum system: From source rocks to unconventional hydrocarbon continuous accumulation and conventional hydrocarbon trap accumulation [C]//The 10th China Petroleum Systems and Reservoirs Academic Conference, Wuhan, China, 2021. [S. l.]: [s. n.], 2021.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] PANG Xiongqi, SHAO Xinhe, LI Maowen, et al. Correlation and difference between conventional and unconventional reservoirs and their unified genetic classification [J]. *Gondwana Research*, 2021, 97: 73–100.
- [44] 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.
- [45] 孙龙德, 王小军, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩纳米孔缝形成机制与页岩油富集特征[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1350–1365.
- SUN Longde, WANG Xiaojun, FENG Zihui, et al. Formation mechanisms of nano-scale pores/fissures and shale oil enrichment characteristics for Gulong shale, Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1350–1365.
- [46] PAN C H. Geological notes: Non-marine origin of petroleum in north Shensi, and the Cretaceous of Szechuan, China [J]. *AAPG Bulletin*, 1941, 25(11): 2058–2068.
- [47] 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.
- [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] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 宋岩, 贾承造, 姜林, 等. 全油气系统内涵与研究思路[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(6): 1199–1210, 1226.
- SONG Yan, JIA Chengzao, JIANG Lin, et al. Connotation and research strategy of the whole petroleum system [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1199–1210, 1226.
- [53] 庞雄奇, 贾承造, 郭秋麟, 等. 全油气系统理论用于常规和非常规油气资源评价的盆地模拟技术原理及应用[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1417–1433.
- PANG Xiongqi, JIA Chengzao, GUO Qiulin, et al. Principle and application of basin modeling technology for evaluation of conventional and unconventional oil-gas resource based on whole petroleum system theory [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1417–1433.
- [54] TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, et al. The whole petroleum system with ordered coexistence of conventional and unconventional hydrocarbons: Case from the Junggar Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2024, 108(7): 1261–1290.
- [55] 赵贤正, 蒲秀刚, 罗群, 等. 陆相断陷盆地全油气系统圈层结构与油气有序成藏——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(3): 526–536.
- ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, LUO Qun, et al. Circle structure and orderly hydrocarbon accumulation of whole petroleum system in a continental fault basin: A case study of Kong-2 Member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(3): 526–536.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 支东明, 李建忠, 杨帆, 等. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系煤系全油气系统特征[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(3): 453–466.
- ZHI Dongming, LI Jianzhong, YANG Fan, et al. Whole petroleum system in Jurassic coal measures of Taibei Sag in Tuha Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(3): 453–466.
- [59] 李国欣, 贾承造, 赵群, 等. 煤岩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.
- [60] 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.
- [61] 贾承造, 庞雄奇, 郭秋麟, 等. 基于成因法评价油气资源: 全油气系统理论和新一代盆地模拟技术[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1399–1416.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, GUO Qiulin, et al. Assessment of oil-gas resources based on genetic method: Whole petroleum system theory and new generation basin modeling technology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1399–1416.
- [62] PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of the whole petroleum system: Hydrocarbon thresholds and their application [M]. Singapore: Springer, 2023.
- [63] 庞雄奇. 全油气系统定量评价[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of the whole petroleum system: Hydrocarbon thresholds and their application [M]. Beijing: Science Press, 2024.

(编辑 刘格云)