

中国早古生代海相碳酸盐岩层系油气地质研究进展

刘文汇^{1,2}

1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 西北大学 地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

摘要:中国叠合盆地下古生界广泛发育碳酸盐岩层系, 具有巨大的油气资源潜力, 但由于沉积时代老、构造改造强、埋藏深度大, 导致传统的油气地质理论、资源评价和成藏示踪方法失效, 严重制约对海相和深层油气分布规律的认识。基于油气勘探向更深空间、更老层系的拓展, 在国家需求主体目标之下, 凝练了中国早古生代海相碳酸盐岩层系油气形成机理与分布规律关键科学问题, 提出了下古生界油气地质研究思路与技术方法, 基于下古生界烃源、储盖层和油气藏普遍经历多期构造运动叠加和演化的特殊性, 应用油气地球化学分析手段, 取得了显著的理论和技術进展, 形成了适用于下古生界油气勘探的成烃成藏地球化学示踪体系和以储盖层预测为核心的地质-地球物理综合预测技术。解剖了塔里木盆地差异构造演化与下古生界油气成藏、四川盆地新元古界和下古生界油气形成与分布, 总结出下古生界油气分布的特点。针对复杂地质条件下海相“深层-富气”等特殊地质背景, 深化对沉积盆地烃源、成烃和油气富集理论认识。

关键词:早古生代; 海相碳酸盐岩; 油气成藏; 油气勘探; 分布规律

中图分类号: P618. 130. 2⁺7 **文章编号:** 1007-2802(2019)05-00871-10 **doi:** 10. 19658/j. issn. 1007-2802. 2019. 38. 131

Advances in Oil and Gas Geology of the Early Paleozoic Marine Carbonate Strata in China

LIU Wen-hui^{1,2}

1. *Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*

2. *Department of Geology/State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China*

Abstract: The Lower Paleozoic carbonate strata, widely developed in superimposed basins in China, have great potential for prospecting oil and gas resources. However, due to the old sedimentation age, strong tectonic transformation, and large burial depth of these strata, the traditional petroleum geology theories, resource evaluation and reservoir tracing methods are ineffective for studying those strata. This has severely constrained the understanding on distribution regularity of oil and gas in marine strata in depth. Based on the expansion of oil and gas exploration into deeper space and older stratigraphic layers under the main national targeting demand, the key scientific questions on the oil formation mechanism and distribution of the Early Paleozoic marine carbonate strata in China have been condensed, and the ideas and technical methods for studying oil and gas geology of the Lower Paleozoic strata have been put forward. Based on special characteristics of the superposition and evolution of the Lower Paleozoic hydrocarbon sources, reservoir and cap rocks, and oil and gas reservoirs by multi-period tectonic movements, the significant theoretical and technological progresses of the research on oil and gas geology of the Early Paleozoic marine carbonate strata have been made by using means of petroleum geochemical analysis, and the geochemical tracing system for exploring hydrocarbon in the Early Paleozoic marine carbonate strata and the geological-geophysical comprehensive prediction technology on the basis of reservoir-cap rock prediction have been developed. The relationship between the differential tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in Lower Paleozoic strata of the Tarim Basin, and the oil and gas formation and distribution in Neoproterozoic and Lower Paleozoic strata of the Sichuan Basin have been studied in details and then the distribution characteristics of oil and gas in Lower Paleozoic strata have been summarized in this paper. In view of the special geological background of marine facies under complex geolog-

ical conditions, such as “deep stratum and rich gas”, the theoretical understanding on the source, generation, and enrichment of hydrocarbon in sedimentary basins has been improved.

Key words: Early Paleozoic; marine carbonate; hydrocarbon accumulation; oil and gas exploration; distribution regularity

0 引言

油气是关系国家社会经济发展的重要战略资源,随着中国经济的快速发展,油气对外依存度逐年增加,直接影响了国家能源战略保障。能源安全已成为中国社会各界关注的重大问题。油气勘探立足国内、拓展领域、挖掘潜力、增加储产量,是攸关中国经济持续发展的重要因素,也是中国能源战略发展的重要方向(牟书令,2009)。然而,中国油气勘探工作正朝着更深、更老、更复杂的领域发展,面临勘探目标日趋复杂、勘探难度不断加大的严峻形势(金之钧,2005)。多年来,中国古生代海相层系发现了一批大中型油气田,但其油气探明率仍不足 10%,下古生界资源潜力巨大,勘探程度更低。因此,加大勘探力度、创新油气地质理论、发展勘探技术、发现更多大油气田,对中国油气工业可持续发展具有重要意义(贾承造,2011, 2012)。

根据第三次油气资源评价报告,中国油气地质资源量为 1135 亿吨,其中海相油气资源量为 359 亿吨,而海相油气中 69.1% 的油气赋存在下古生界层系中(国土资源部,2008)。就油气探明率而言,国外海相层系探明率高达 70%,中国陆相油气探明率也近 40%,而中国下古生界海相油气探明率仅为 6.3%,因此,下古生界海相碳酸盐岩层系是中国重要的资源潜力区与现实的战略接替区(贾承造,2006;刘文汇等,2017)。中国海相层系具有盆地类型多样、岩相古地理背景繁多、多期构造活动、热演化程度总体较高背景下的多变、成盆-成烃-成藏过程复杂等特点(金之钧和蔡立国,2006;贾承造等,2007),下古生界尤其显著。在多旋回构造运动背景下,塔里木盆地、扬子地台区和鄂尔多斯盆地等下古生界普遍经历了多期抬升剥蚀和沉降过程,导致成烃成藏过程更加复杂,储集层多期改造强烈、非均质性强,油气保存条件差异大,对长期以来指导油气勘探的一些经典理论和传统认识提出了新的挑战,面临一些亟待解决的地质基础和技术问题(赵文智,2002;贾承造等,2006, 2007;何登发等,2007;金之钧和蔡立国,2007)。

自 20 世纪 60 年代四川盆地威远气田的发现和 中国油气勘探从陆相向海相层系的战略转移以来,经过 20 多年的勘探,发现了塔里木盆地塔河-轮南

储量大于十亿吨的大油田和鄂尔多斯四千多亿方的靖边大气田,证实了下古生界的巨大潜力,同时也证实了叠合盆地中-下部组合下古生界的巨大潜力(贾承造,2006)。叠合盆地中-下部组合是指盆地较深部位发育的、时代较老的一套或多套沉积-构造组合,是上叠原型盆地之下的构造地层层序(赵文智,2002)。叠合盆地中-下部组合最主要的特点是目的层埋藏偏深,多以碳酸盐岩和火山岩等特殊类型储集层为主,具有较强的非均质性,且历经多次构造运动改造与破坏,油气成藏历史与油气分布极为复杂。叠合盆地中-下部组合发育碳酸盐岩、火山岩两类优质储集层。碳酸盐岩储集层非均质性强,物性不受埋深控制,古地貌控制下的白云岩化作用形成的缝洞发育带往往是油气高产富集带(金之钧和蔡立国,2007)。火山岩储集层主要是中酸性和碱性火山岩、少量基性岩和花岗(斑)岩,储集层分布受深大断裂和火山岩岩相控制,构造运动、风化淋滤作用对火山岩储集物性改善明显。火山岩作为一种特殊类型储集层,当与烃源岩、烃源断裂及区域盖层构成良好配置时,就可以聚烃成藏。

从地质特征来看,中国的碳酸盐岩相较于世界上其他地区的碳酸盐岩形成时代老(中国多是古生界,其他地区的碳酸盐岩一般是中生界和新生界的)。古生界古老的碳酸盐岩储集层非常复杂,一般储集层都要经过后期改造,不改造则无好储集层。生油岩成熟度高,一般具有多期成藏、多油源等诸多复杂性,根据中国目前的地质条件,应以气为主。因此,中国叠合盆地中、下部海相碳酸盐岩层系具有时代老、改造强、埋藏深度大、高温高压等特点,导致原型盆地恢复困难,影响了有效勘探范围的确定,储集层非均质性强,油气分布规律和储集层预测难度大,从而影响了有利区带的评价和勘探。

1 中国下古生界海相油气地质特征及关键科学问题

海相碳酸盐岩油气勘探领域是中国陆上常规油气勘探的第二大领域,在塔里木盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地的碳酸盐岩中均发现了海相大型油气田。叠合盆地中、下部经历了多期次的生烃、充注和成藏,以晚期成藏为主,富油更富气,油气分布

复杂。中国大地构造演化的长期性和复杂性决定了古生界海相含油气盆地的特殊性(何登发等, 2005; 贾承造等, 2007)。在元古代就已经固结的塔里木、华北、扬子三大板块奠定了中国陆上古生代海相盆地形成与演化的构造基础。震旦纪-早古生代漂移于大洋中的塔里木、扬子、华北等板块稳定沉降, 板块内部以台地相碳酸盐岩沉积为主, 板块边缘以拗拉槽、被动陆缘或边缘拗陷的盆地相或盆地斜坡沉积为主, 沉积了一套深水环境下的陆缘海相碳酸盐岩夹砂页岩的组合。晚石炭世-晚三叠世古大洋逐步消亡, 板块逐渐拼贴聚合, 在板内拗陷盆地和板缘的裂陷盆地中普遍接受了含煤的海陆交互相沉积。中国古生界海相含油气盆地的地质结构特征明显, 其平面上以小型克拉通为核心, 边缘环绕褶皱或冲断变形的前陆冲断带, 从边缘向克拉通内部, 构造变形越来越平缓, 纵向上为海相克拉通层序经受中生代前陆盆地或冲断带的叠加改造。古生界海相沉积层序与中生界陆相前陆盆地(冲断带)的叠合复合, 决定了油气分布受古生界克拉通古隆起和中生界前陆冲断带控制, 油气勘探主要以克拉通古隆起和中生界前陆冲断带为主要领域(贾承造等, 2007)。

在地质历史演化过程中, 由于板块构造背景、沉积环境及深部地球动力学特征等的变化, 形成了沉积体系与构造变形样式各异的沉积盆地。长期的多阶段演化, 导致不同阶段的沉积盆地在纵向上的叠合, 随着构造环境的变化, 相应出现不同叠合样式的盆地类型, 其具有复杂的叠加地质结构。盆地多旋回叠合的动力学过程与复杂的叠加地质结构决定了油气聚集与分布的特点, 也决定了油气勘探应遵循的基本规律(何登发等, 2005)。中国的小克拉通, 各有各的漂移史, 具有多样性、特殊的结构和层序。构造变动多期、多次, 虽然叫克拉通, 实际上变化很大, 有倾斜、抬升、沉降, 另外边部的冲断也很发育, 中部稳定区周围变化非常大。

中国海相地层分布的总面积为 $455 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中陆上的海相沉积区就达 $330 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。海相地层具有较大的油气勘探潜力, 中国石油工业的发展史一直伴随着海相油气勘探行进的步履(牟书令等, 2009)。20 世纪 50 年代中国天然气勘探蓬勃发展, 60 年代四川盆地威远气田的发现证实四川是个大型海相含气盆地, 80 年代在鄂尔多斯盆地和塔里木盆地勘探取得突破, 90 年代以来海相盆地勘探呈现良好势头(贾承造等, 2007)。至 21 世纪初, 经过 20 多年的勘探, 发现了塔里木盆地塔河-轮南储量

大于 10 亿吨大油田和鄂尔多斯 4000 多亿方的靖边大气田, 证实了下古生界的巨大潜力。“十一五”期间, 海相碳酸盐岩油气地质理论研究取得较大进展, 揭示出中国高-过成熟热演化阶段海相烃源岩仍具有良好的天然气勘探潜力。然而, 由于中国经济飞速发展, 能源需求日益增加, 油气供需矛盾加大, 中国油气勘探面临勘探目标日趋复杂、勘探难度不断加大的严峻形势。近年来, 油气勘探正朝着更深、更老、更复杂的领域发展。正确判断中国当前油气勘探的关键问题, 拓宽石油地质学研究新视野与油气勘探开发新领域, 尝试从新的途径、新的方法寻找大油气田, 是中国油气地质的关键所在。

1.1 早古生代生烃物质的特殊性与生烃演化过程

早古生代海相碳酸盐岩层系在漫长的地史时期经历了多期构造叠加与演化, 决定了早古生代海相烃源成源、成烃过程十分复杂。首先, 在成烃生物方面, 早古生代以海生藻类为主, 形成的烃源岩有机质类型较好, 在中国南方和塔里木盆地形成了多套海相泥质烃源岩, 还可能存在有效的碳酸盐岩烃源岩。其次, 在多期构造运动 and 不同埋深条件下, 下古生界普遍存在多种类型烃源共存且动态转化接替供烃的特点: ①除了传统的干酪根外, 以分散和富集状态赋存的原油、固体沥青等可溶有机质, 以及以有机酸盐形式存在的化学烃源, 在适当条件下还可以裂解成气, 总体表现出成烃物质的多样性; ②在构造升降作用下, 下古生界烃源(岩)通常经历了多期次生排烃和调整过程, 导致部分地区原油聚集成藏并保存至今, 如塔里木盆地地下古生界中的油气并存; 有些地区原油形成后继续深埋裂解成气, 如川东北长兴组-飞仙关组天然气藏中发育大规模储集层固体沥青, 印证了原油充注后的裂解成气过程; 有些地区则经过构造抬升导致油气藏发生破坏和调整, 如南方大量分布的古油藏, 印证了古油藏的破坏过程, 但可作为可溶有机质继续裂解成气。③通过国家“九五”以来多年的攻关研究, 国内学者对海相碳酸盐岩烃源岩评价标准形成了基本共识(梁狄刚等, 2000; 钟宁宁等, 2004; 秦建中等, 2007; 彭平安等, 2008; 张家利和腾格尔, 2013)。但现今下古生界烃源岩及衍生物都经历了高-过成熟阶段, 尤其在南方, 早期由干酪根形成的原油均已裂解成气和固体沥青, 其分子和同位素组成均发生了显著变化, 使得大量的地球化学参数失去了原始指示意义。加之, 分散可溶有机质和古油藏等再生烃源已成为下古生界深层油气成藏的重要来源, 其油气源对比、成藏示踪及资源潜力评价尚无完善

的指标体系。因此,厘清早古生代烃源的原始特征,揭示多元生烃机制,建立相应的油气示踪标志体系,是查明下古生界油气地质特征的重要基础。

1.2 下古生界碳酸盐岩优质储集层形成机理

“九五”以来,在 5000 m 左右的下古生界海相碳酸盐岩中发现了塔河-轮南、塔中、英买、田河等大油气田,塔深 1 井在埋深 8400 m 仍发育含液态烃的溶蚀孔洞缝等储集空间(翟晓先等,2007),四川盆地海相深层则发现了普光、元坝等天然气田(Ma *et al.*, 2007),都突破了传统的深度控制储集层发育的认识,显示了深部古生界海相层系具备有效的成藏组合,但经历过埋深大于 8400 m、温度 160 ℃、压力 80 MPa 的环境,碳酸盐岩如何形成和保存高达 9% 的孔隙度、如何进一步刻画深层白云岩、岩溶、礁滩相及裂缝型优质碳酸盐岩储集层的发育、保持与分布,已成为深化海相油气地质理论的关键问题。中国下古生界以碳酸盐岩储集层为主,多分布于古隆起与古斜坡上。在四川盆地上二叠统中发育了台缘与台内的礁滩型储集层,而震旦-寒武系则主要发育白云岩储集层;塔里木盆地奥陶系以风化壳岩溶型灰岩储集层为主,近台缘带或局部台内则发育中-上奥陶统礁滩相储集层(顾家裕等,2005),而在沙雅隆起北部、西北部及巴楚北部寒武系则发育白云岩储集层(翟晓先等,2007;王招明和何爱东,2009)。总之,由于台地-台缘带沉积相及沉积背景、多期次差异性构造、不同成岩环境下的地质流体作用对碳酸盐岩储集层的影响程度、方式不尽一致,造成了不同的白云石化、溶蚀充填、剥蚀与保存等不同。因此,对下古生界优质储集层的形成演化、保存与分布机制有待深入研究(黄思静等,2009;钱一雄等,2009)。针对下古生界碳酸盐岩层系复杂储集层形的形成与分布的研究,既要强调同一类型储集层之间共性的分析和类比,更要关注不同类型的内在联系以及不同地区、类型、层系储集层地质差异性的研究,突出下古生界碳酸盐岩储集层的特点及制约问题,解析不同成因流体对储集层影响、优质储集层与白云岩的内在联系,是揭示下古生界碳酸盐岩储集层形成机理的关键所在。

1.3 下古生界油气藏保存条件的动态评价

中国下古生界因后期构造活动强度大,导致早期形成的原生油气藏有些完全被破坏,有些被调整改造并保存至今,如塔河油田和威远气田,因此,有效保存是大油气田形成的关键。油气藏破坏方式多样,但大多是因为构造活动导致盖层封盖能力变差甚至丧失。因此,盖层是形成大型油气田的必要

条件。研究表明,最常见的盖层是泥岩(金之钧和蔡立国,2007)。作为下古生界重要的泥岩盖层,其埋藏深、成岩演化高、可塑性变差,受应力作用或构造抬升过程容易产生裂缝,造成封盖能力降低,油气发生逸散,如鄂尔多斯盆地刘家庄气田的天然气散失(金之钧,2010)。膏盐盖层的渗透率和扩散性小,具可塑性,断缝体系快速愈合,是优质的区域盖层。世界上许多大油气田的形成均与膏盐层封盖有关,如波斯湾、滨里海、西伯利亚的大油气田。中国西部、南方海相层系中的膏盐岩层对强烈构造变形的海相层系油气的保存具有重要作用(Dai *et al.*, 1997; 金之钧等,2009)。静态评价的有效盖层在地史时期可能并非为盖层,从综合物性参数对盖层的封闭性、水动力环境、断层的封堵性、构造作用等方法已不再完全适用于下古生界油气藏的勘探。因此,如何动态评价不同地质背景的油气藏保存条件是目下下古生界海相油气勘探面临的难题之一。

1.4 论证古生代海相碳酸盐岩层系油气成藏有效性及规模聚集机制

世界范围内的大油气田占了全球探明储量的 67%(Halbouty, 2003),其形成与分布一直是国内外的研究热点(蔡希源,2007;邹才能等,2010)。其中,油气系统的形成与演化过程是揭示油气成藏有效性及规模聚集机制的核心,前人针对中国海相盆地提出了“复式油气系统”(何治亮,2001)、“成藏体系”(金之钧和王清晨,2004)、“复合含油气系统”(赵文智等,2005)和“多元复合-过程叠加”(何治亮,2001)等诸多理念及方法。近年来,以层系为基础的成藏组合备受关注,作为商业性勘探单元多适用于多旋回盆地(童晓光,2009)。这些认识对预测大型油气田的有利勘探区提供了理论指导,但因中国下古生界不同地区、不同层系在油气形成、聚集、保存和分布预测等方面存在明显的差异。所以,重点对碳酸盐岩油气成藏过程中烃源、储集体、保存及其成藏组合的有效性以及规模聚集的控制因素展开研究,是探索下古生界大型油气田富集与分布规律的重要环节。

根据中国下古生界的特殊性,油气勘探需要关注以下问题:①早古生代有机质多元成烃机理与油气示踪标志。由于早古生代具有成烃母质的独特性、成烃物质多元性及成烃过程的多期性特点,因此与国外油气源较为单一相比,我们必须从物质、时间、过程多方面,利用多种手段来探讨油气源的有效性,特别是对复杂成烃成藏过程的反演。②对下古生界碳酸盐岩储集层的多期改造机理与分布

预测。对下古生界主要发育的白云岩来说,构造裂隙和热液改造的白云岩具有更高的面孔率,是优质的储集层。因此我们应重点关注与其相关的流体动力学条件和白云岩化模式。对于碳酸盐岩储集层中广泛发育的缝洞型和裂缝性储集层,如何利用地震-地球物理方法进行精细刻画和精细预测仍是急需解决的科学难题。③下古生界大型油气藏的保存机理与分布规律。如何评价油气的保存条件,主要集中在对盖层的物性静态评价上,也有人提出将盖层的封闭性与烃源岩的生烃过程进行动态匹配评价,但苦于一直未找到动态研究的技术手段。近年来,在工程领域广泛使用的岩石力学实验技术,使研究盖层油气动态封闭性的评价成为可能。近期已初步完成技术移植,对下古生界而言,主要技术问题包括盖层地质历史过程中封盖性能恢复、泥岩有效盖层的成岩阶段及控制盖层性能的物理化学条件以及在此基础上有利封盖区的分布预测。只有综合解决了上述3个关键科学问题,才能有效回答中国早古生代海相碳酸盐岩层系油气多期成藏机理与大型油气田分布规律的重大问题。

2 下古生界油气地质研究思路与技术

基于中国海相碳酸盐岩层系的发育特征,选择资源潜力大、研究较多、勘探程度相对高的塔里木盆地和四川盆地及其周缘的中-上扬子地区为重点研究区,结合鄂尔多斯盆地,围绕关键科学问题,以成藏要素及其动态演化过程为主线开展研究工作。

从包括油气来源、储集空间和保持条件的物质基础以及动态演化两个方面来开展研究。物质基础包括有效烃源、优质储集层和有效盖层三方面,通过地球化学、岩石学、地球物理等多学科的分析测试技术,建立成烃、成藏示踪评价体系与优质储、盖层发育模式与预测方法。结合成烃、成藏、保持过程的动态演化研究,理清中国早古生代海相碳酸盐岩层系大型油气田形成机理与分布规律。

地质理论和勘探技术创新对油气勘探起着决定性的作用。新一代油气勘探地质理论是对中国陆相油气地质理论的发展与超越,是随着中国油气勘探程度不断提高、勘探领域不断扩展、勘探认识不断深化而逐步形成的(贾承造,2012)。新一代勘探地质理论主要包括岩性地层油气藏勘探地质理论、海相碳酸盐岩油气勘探地质理论、前陆盆地冲断带油气勘探地质理论、火山岩油气勘探地质理论、富油气凹陷油气精细勘探地质理论、边缘海油气勘探地质理论、连续性非常规油气勘探地质理

论、石油地质学基础理论、石油天然气勘探工程理论等。中国油气资源勘探的现实是勘探对象日趋复杂、勘探目标隐蔽性增强、勘探难度日益加大。中国南部海相叠合盆地构造演化表现为多旋回性,具有时代老、埋藏深、多期叠加、改造明显、结构复杂等特点,对油气的聚集与保存非常不利。然而,在如此复杂的海相地层系统中却发现了丰富的油气资源,油气勘探也取得了很大的成果,但地质情况复杂、研究程度较低。总体看,叠合盆地中下部组合具有时代老、改造强、埋藏深度大、高温高压等特点,导致原型盆地恢复困难,影响了有效勘探范围的确定,为此,在国家重点基础研究发展计划项目“中国海相碳酸盐岩层系油气富集机理与分布预测”(金之钧等,2005)的基础上,“中国早古生代海相碳酸盐岩层系大型油气田形成机理与分布规律”项目聚焦中国早古生代海相碳酸盐岩领域,突出大型油气田,探索中国早古生代海相碳酸盐岩层系大型油气田形成机理,揭示大型油气田分布规律,建立和发展下古生界油气勘探评价理论和方法。

下古生界烃源、储盖层和油气藏普遍经历多期构造运动叠加和演化,导致很多传统的评价和示踪方法失效。针对古生界海相碳酸盐岩层系油气勘探开发两类重要技术体系,即成藏过程重建的成烃成藏的地质-地球化学示踪技术和油气藏分布预测的储集层与盖层地质-地球物理综合预测技术。成藏过程重建思路是围绕确定成藏物质来源、成藏时间和成藏过程的目标研究,建立了沥青质温和氧化分析技术来解决高演化烃源的对比问题,利用极性大分子高分辨质谱分析技术,分析微量-极性-大分子关键示踪油气来源,发展多组分气包裹体古温压恢复技术,确定成藏过程,建立以放射性同位素年代学为基础的定年技术方法,形成K-Ar、Re-Os等定年技术系列,最终集成建立示踪油气成藏的物质-时间-过程的成藏示踪体系,其中有针对下古生界成藏示踪的新指标。利用指标体系,重建塔河油田奥陶系油气成藏关键时间,结果表明其时代为寒武-奥陶系,与烃源对比结果一致,并有三期成藏充注,和喜马拉雅期的定型调整。

储集层与盖层的地质-地球物理综合预测技术是油气勘探的关键。早古生界碳酸盐岩礁滩储集层孔隙结构复杂,用传统均匀孔隙结构方法预测精度低;而盖层地球物理预测研究程度低,评价参数多,预测难度更大。盖层地球物理预测需考虑泥岩盖层岩石物理等效介质理论和有效反演方法。为此,建立了复杂介质岩石物理等效理论,研发了一

套完整的以突出盖层封闭能力为目标的地球物理预测技术,形成了拥有自主知识产权的软件系统,实现了有效盖层空间刻画。传统储集层方法解决了泥岩盖层的非均匀孔隙结构、各向异性岩石介质等效问题。利用新的岩石等效理论,建立地震弹性参数与岩石封闭能力参数关系,为地震反演盖层有效性参数奠定基础。在模型指导下,形成厚度地震反演技术、岩石塑性地震反演技术、排替压力地震反演技术、应力地震反演技术和微裂缝地震反演技术;考虑地质不同方位新的密度反演,实现了对有效盖层的空间刻画。把这些技术集成软件平台,应用于塔里木、四川盆地,展示了良好的应用前景。

油气成藏示踪技术方法、定年方法和油气分布预测方法的建立和完善,为开展烃源岩评价、油气源对比、油气成藏定年等提供丰富可靠的手段,而且对中国下古生界油气勘探提供了技术指导。

3 下古生界海相碳酸盐岩层系油气地质研究主要进展

近期的研究成果集中体现在:①对下古生界古老有机质的深入认识,同时对多元成烃、多期成藏过程的示踪手段,由过去的分子化石向同位素指纹技术,由定性向定量,由单一指标向综合体系发展,定量评价多元生烃;②对构造流体作用下白云岩缝洞型储集层形成与保持机理的认识,在预测上实现从传统反射波到绕射波进行溶洞识别,从传统纵波向纵横波裂缝预测的多播多分量储集层预测技术;③创建和实现油气盖层的动态有效性评价体系,引入岩石力学评价参数,建立盖层封闭性宏观-微观参数组合动态评价方法,并结合烃源岩的演化过程,实现源盖匹配关系的动态评价,再从基础地质理论、勘探应用和技术方法 3 个方面对中国早古生代海相碳酸盐岩层系大型油气田形成机理与分布规律进行论述和总结。

3.1 理论层面

形成和完善中国早古生代海相碳酸盐岩层系大型油气田的形成与分布预测理论,在基础地质方面,主要从沉积盆地的演化和油气地质基本要素两个层面对中国早古生代海相碳酸盐岩层系大型油气田形成地质基础进行了系统研究。

中国大地构造演化的长期性和复杂性决定了古生界海相含油气盆地的特殊性。在元古代就已经固结的塔里木、华北、扬子三大板块奠定了中国陆上古生代海相盆地形成与演化的构造基础。下古生界沉积之后,三大克拉通盆地均经历了早古生

代晚期、海西期、燕山期和喜马拉雅期区域隆升剥蚀、变形改造,形成多期的叠合、复合盆地(多旋回)或残留盆地。但由于克拉通盆地所处构造环境发生了巨大差异,因此不整合的发育时间、变形规模不尽相同。盆地多旋回叠合的动力学过程与复杂的叠加地质结构决定了油气聚集与分布的基本特点及油气勘探应遵循的基本规律(金之钧,2011)。

系统分析了早古生代发育的构造和沉积背景,从成烃生物和多元生烃母质角度对中国下古生界海相层系烃源岩生烃进行定量研究,阐述早古生代烃源岩成源和成烃演化过程,明确了下古生界烃源岩的成烃生物构成,建立了沉积与生物组合分布模式,基于沉积环境-成烃生物-有机质丰度-干酪根碳同位素的内在联系,确定了浮游生物组合是下古生界原油的主要贡献者;提出了早古生代碳酸盐岩烃源的关键证据,建立了针对碳酸盐岩成烃有机质测定方法,论述了海相碳酸盐岩层系烃源形成与演化;完善了早古生代多元生烃机理及其地球化学特征,提出了油气多期运聚和保持的地球化学示踪指标,揭示了下古生界发育有效烃源岩及其对油气藏的重要贡献(胡广等,2014)。

首先,对下古生界古老有机质的深入认识,同时对多元成烃、多期成藏过程的示踪手段,从过去的分子化石向同位素指纹技术发展,由定性向定量,由单一指标向综合体系发展,定量评价多元生烃。早古生代发育碳酸盐岩烃源及浮游生物的重要作用,包括 4 个要点:①确定了碳酸盐岩烃源对塔里木海相油气贡献;②提出了下古生界碳酸盐岩烃源的生烃机理;③查明了早古生代烃源生物组合特征;④明确了浮游生物为下古生界油气的主力烃源。关于塔里木盆地下古生界的油气来源,一直存在争议而悬而未决的。勘探家根据地质背景认为寒武系和下奥陶统是较为有利的来源,地球化学家用萘烷生标也予以支持,但由于钻井揭示少而难确定;油气地球化学家根据生物标志化合物,特别是甾烷而持中-上奥陶统观点,但在目前揭示的钻井中,还未发现规模的泥质烃源岩。因此,烃源岩的确定就成为了勘探的关键。为此,我们建立了针对碳酸盐岩成烃有机质测定方法,结果表明,在一些碳酸盐岩烃源岩中,传统针对泥质烃源岩的评价方法会低估成烃物质。但是,并非所有的碳酸盐岩都含有酸溶有机质,这些物质在碳酸盐岩中主要以盐的形式(有机酸盐)存在,而有机酸盐在高演化阶段可裂解成烃类。用新、老方法对比碳酸盐岩烃源成烃模拟过程有机质变化,结果发现生烃转化率高达

47%;含酸溶有机质的降低率最大处与生烃峰值相对应;高演化阶段两者的 TOC 相同,反映碳酸盐岩烃源的生烃特征(刘全有等,2013;刘文汇等,2016)。传统烃源评价主要关注 TOC 的丰度和类型,关注成烃生物组合的较少,但对生物演化主要处于低等阶段的早古生界,生物组合可能决定着生烃潜力。为此,我们建立了识别古老成显微-超显微烃生物组合的识别方法:主要包括底栖藻类(褐藻、红藻类等和浮游藻(硅藻、颗石藻、疑源类等)及菌类,其中藻类对油气贡献最大,而在藻类中,浮游藻类的产烃率是底栖藻类一倍以上。根据 Stephen (2005)研究,早古生成烃生物发育于以单细胞藻为主的低等生物(真细菌、单细胞藻、多细胞藻、真菌、蓝绿藻等)。而浮游藻类则主要发育于潟湖、台内凹陷或深水陆棚;底栖藻类主要发育于浅海陆棚。我们系统分析了早古生界泥质烃源岩中的生物组合,结果发现该组合中多以底栖生物为主,主要发育于斜坡陆棚。而碳酸盐岩层系中的成烃生物与沉积环境相当一致,主要发育浮游生物,重点发育在潟湖、台内凹陷或深水陆棚。我们批量分析了中-上扬子和塔里木盆地下古生界成烃生物与 TOC 的关系,发现底栖藻类是下寒武统泥质烃源岩有机质的主要保持者。有意思的是,同时代两类藻类的碳同位素组成明显不同:以底栖藻为主的烃源岩,干酪根的 $\delta^{13}\text{C} < -34\text{‰}$;以浮游藻为主的烃源岩,干酪根的 $\delta^{13}\text{C} > -30\text{‰}$ 。这为用较为简单的方法确定成烃生物类型提供了有力的理论基础(胡广等,2014)。塔里木盆地主体原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 $-34\text{‰} \sim 31\text{‰}$ 之间,而不同生物组合烃源的碳同位素组成不同,依据原油与烃源岩之间碳同位素的继承效应,浮游藻是塔里木盆地下古生界油气的主要贡献者,尚未发现以底栖藻为主的碳同位素组成较轻的油气。因此可以认为,塔里木下古生界油源具有泥质岩和碳酸盐岩多种烃源,但以碳酸盐岩烃源为主,浮游生物也具有重要贡献。

深化了上古生界碳酸盐岩多类型储集体形成的区域地质条件、形成与保持机理,揭示了不同类型储集层的成因机制和分布规律。集成上古生界碳酸盐层系规模储集层形成的早期低温溶蚀控制,成岩过程的溶蚀窗调整,深埋高温热液改造和构造裂缝增容的复合成储机理;在储集层形成地质条件方面,针对塔里木早-中寒武世古构造地理格局,明确了台地结构、微生物和岩相特征及其控储作用,对四川盆地重点论述了拉张槽及其对下组合优质储集层形成和保持的控制作用;在储集层成因机理

方面,进一步证实了碳酸盐岩溶蚀-沉淀过程中“溶蚀窗”的存在,探讨了深层-超深层白云岩储集层形成与保持的机理(朱东亚等,2015a,2015b);通过典型解剖,建立了岩溶型、断裂-热液型、白云岩 3 种优质碳酸盐岩储集层地质发育模式,丰富和完善了深层碳酸盐岩储集层形成机理(何治亮等,2014;王凯等,2016)。同时,在碳酸盐岩储集层地质-地球物理评价预测方法方面,探索建立了成岩流体活动性质和时限的碎屑锆石 U-Pb、古地磁、Rb-Sr、非均一包裹体等判识方法,基于分形理论的非均质碳酸盐岩储集层的定量表征和基于孔隙结构约束的物性参数反演算法,技术标志性强(朱东亚等,2014)。在预测上实现从传统反射波到绕射波进行溶洞识别,从传统纵波向纵横波裂缝预测的多播多分量储集层预测技术。

对盖层条件进行了重点研究,基本查明了泥页岩和膏盐岩盖层的类型、特征和演化规律,提出了泥页岩微孔结构模型和界面粗糙度等新概念,深化了对泥页岩和膏盐岩内在特点和性质的认识;利用计算模拟揭示了泥岩主要矿物的润湿性,研究了油气分子在泥页岩微孔中的状态、性质和行为,深入探讨了微观封盖机理;提出了盖层评价基本思路和研究方案,重点分析了盖层整体性和地层封闭性特征,提出了油气保存条件评价流程和指标(Jin *et al.*, 2012);为创建和实现盖层的动态有效性评价体系,引入岩石力学评价参数,建立盖层封闭性宏观-微观参数组合动态评价方法,并结合烃源岩的演化过程,实现源盖匹配关系的动态评价。

中国三大板块在早古生代是位于赤道附近的,具有良好的烃源条件,富含浮游藻类的碳酸盐岩和泥质岩都是优质的海相烃源岩。其中,中-上扬子以泥质烃源为主,塔里木盆地具有泥质和碳酸盐岩两类烃源,鄂尔多斯盆地以碳酸盐岩烃源为主,但对烃源而言,原始生物数量决定规模,浮游生物组合控制质量。下古生界碳酸盐岩储集层的规模发育主要受长期暴露开放体系下同生期的规模溶蚀控制,而间接性开放体系和断裂活动可以扩容,封闭体系是保持的关键。因此,主体储集层发育于区域性不整合发育的时间和空间。膏岩和泥岩都是最主要的区域盖层,碳酸盐岩因气脆性可以作为局部盖层,区域盖层控制油气规模及区带,在下古生界中国的几大盆地中均有多层膏岩和泥质岩的盖层分布。碳酸盐岩层系具有储集空间的不均质性和连通性差的特征,决定了油气的近源成藏。同时近源早期成藏也成为储集层保持的关键。而多期的

构造运动,使得下古生界隆起区受到多种因素破坏,油气主要分布在次高位置,包括沉积和构造斜坡的次隆位置,事实上,构造枢纽也属斜坡范畴。

3.2 勘探应用

主要系统解剖了塔里木盆地差异构造演化与下古生界油气成藏和四川盆地新元古界和下古生界油气形成与分布,结合基础地质研究,形成中国早古生代海相碳酸盐岩层系大型油气田形成机理和分布预测,主要进展有:

(1)从沉积盆地的演化和油气成藏要素入手,建立了塔里木盆地构造演化与油气聚集成藏的关系,发现差异性构造演化对油气成藏的控制作用在各构造带不同,揭示了塔北、塔中和巴-麦等三个构造带差异构造演化对晚期储集层和成藏的控制作用,认识到古隆起-古斜坡和走滑断裂带控制下古生界油气成藏,明确了三个构造带奥陶系岩溶储集体均发生过“三期”油和一期天然气充注;断裂为油气的注入点,构造脊为相应期次油气的汇聚区。海西晚期的斜向不对称挤压作用和印支期-喜马拉雅期区域性张扭性雁列断裂是晚期深成岩溶作用和复式油气运聚的输导体系。张扭性断裂垂向上的分层性和走向上的分段性控制着油气分块富集。

(2)依据四川盆地早古时代油气地质发育特征,系统阐明了绵阳-长宁拉张槽的发现及其对油气成藏效率和规模的影响,拉张槽的形成演化对优质烃源岩和优质碳酸盐岩储集岩发育的控制,优质烃源岩-碳酸盐岩储集岩组合的油气成藏效应,克拉通盆地内油气分布最富集区是环拉张槽周缘地区。完善了四川叠合盆地碳酸盐岩油气形成和分布,指出川西中北段深层-超深层是未来四川叠合盆地海相碳酸盐岩天然气勘探最主要的地区。

(3)在分析全球古老海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型与分布特征的基础上,总结了下古生界大型油气田油气的保存条件和富集规律,深化了“源盖控烃、斜坡-枢纽富集”的勘探评价方法,理清了塔北-塔中连片地区油气成藏条件,明确不同时期盖层空间展布和油气保存条件的差异性,动态恢复了塔北南坡和塔中北坡油气聚集和保存过程。梳理了塔里木盆地构造演化与油气聚集成藏的关系,揭示了塔河油田、塔中地区和巴-麦地区的下古生界油气均存在三期成藏,发现了塔里木盆地古生界油气主要是沿古隆起-斜坡和走滑断裂带规律性分布。揭示了绵阳-长宁拉张槽的发现历程及其对油气成藏效率和规模的影响,拉张槽的形成演化不仅控制了优质泥质烃源岩和优质碳酸盐岩储集岩的

发育,而且为优质泥质烃源岩-优质碳酸盐岩储集岩组合的形成和油气成藏效应及规模的提高创造了条件,致使环拉张槽周缘地区是克拉通盆地内油气分布最丰富的地区(刘树根等,2016)。同时,剖析了下古生界海相碳酸盐岩大油气田有利勘探区带,提出了重要准备领域。优选出12个有利勘探区带,实现了塔河的南延和向深层扩展,培育了阿满过渡带、塔河深层和塔中北坡3个亿吨级战略突破区带,提出塔里木盆地寒武系盐下、巴麦地区、鄂西渝东下组合、四川盆地寒武系盐下、鄂尔多斯南缘奥陶系5个重要准备领域。综上所述,中国下古生界油气分布具有“多元成烃,原生定量;开放成储,有效保持;动态成藏,斜坡富集”的特点。

3.3 技术层面

形成了适用于下古生界油气勘探的成烃成藏地球化学示踪体系和以储盖层预测为核心的地质-地球物理综合预测技术。鉴于下古生界烃源、储盖层和油气藏普遍经历多期构造运动叠加和演化,导致很多传统的评价和示踪方法失效,从而系统介绍了针对下古生界海相碳酸盐岩层系油气勘探的技术方法和评价预测手段,技术成果包括:

(1)深入认识下古生界古老有机质及多元成烃、多期成藏过程的示踪手段,由过去的分子化石向同位素指纹技术,由定性向定量,由单一指标向综合体系发展。成藏过程重建思路是围绕确定成藏物质来源、成藏时间和成藏过程的目标研究,建立了针对碳酸盐岩成烃有机质测定方法,弥补对碳酸盐岩烃源中成烃物质的低估。建立了识别古老成显微-超显微烃生物组合的识别方法。建立了沥青质温和氧化分析技术来解决高演化烃源的对比问题,利用极性大分子高分辨质谱分析技术,分析微量-极性-大分子关键示踪油气来源。发展了超显微成烃生物识别、碳酸盐岩成烃物质测定、非烃极性大分子分析、稀有气体定年等海相油气成源-成烃-成藏研究技术;明确了下古生界烃源岩的成烃生物构成,建立了沉积与生物组合分布模式,基于沉积环境-成烃生物-有机质丰度-干酪根碳同位素的内在联系,确定了浮游生物组合是下古生界原油的主要贡献者,提出了早古生代碳酸盐岩烃源的关键证据;完善了早古生代多元生烃机理及其地球化学特征,提出了油气多期运聚和保持的地球化学示踪指标,建立了海相叠合盆地成源成烃成藏示踪和定年体系;解剖了下古生界典型油气藏,提出了塔河油田三期成藏、中、上扬子地区差异成藏、鄂尔多斯盆地存在下古生界源岩的地质地球化学证据。

(2)建立了示踪油气成藏的物质-时间-过程的成藏示踪体系,其中有针对下古生界成藏示踪的新指标。发展多组分气包裹体古温压恢复技术,确定成藏过程。建立以放射性同位素年代学为基础的定年技术方法,形成 K-Ar、Re-Os 等定年技术系列。利用指标体系,重建塔河油田奥陶系油气成藏关键时间,确定其烃源时代为寒武-奥陶系,与烃源对比结果一致,并有三期成藏充注和喜马拉雅期的定型调整(刘文汇等,2012,2013a,2013b)。

我们从包括塔河油田在内的塔里木盆地油气地球化学研究入手,系统分析了大批油气样品的藿烷和甾烷类化合物特征,利用 Peter 等(1993)对全球不同类型源岩生标研究建立的模板进行对比,发现塔河主体区原油主要来自碳酸盐岩烃源岩;同时,傅里叶回旋共振磁质谱仪的精细分析结果揭示,塔河原油富含噻吩类藿烷和噻吩类胡萝卜烷等含硫生物标志化合物,是成岩早期 BSR 作用产物,进一步证实了碳酸盐岩烃源岩的贡献。但是,塔里木盆地油气具有碳酸盐岩和泥质岩多种烃源,除主体区原油具有典型碳酸盐岩烃源岩特征外,外围南部原油具有泥质烃源岩特征,外围东部原油具有碳酸盐岩烃源岩特征,这种差异说明塔河及其外围至少存在两期不同性质原油充注,主体区原油具有碳酸盐岩烃源特征,外围为后期充注的高熟轻质油。

(3)探索建立了成岩流体活动性质和时限的碎屑锆石 U-Pb、古地磁、Rb-Sr、非均一包裹体等判识方法,基于分形理论的非均质碳酸盐岩储集层的定量表征和基于孔隙结构约束的物性参数反演算法,构造流体作用下形成与保持机理,以及在白云岩缝洞型储集层预测上实现从传统反射波到绕射波进行溶洞识别,从传统纵波向纵横波裂缝预测的多播多分量储集层预测技术。考虑到储盖层岩性复杂、孔隙结构复杂、强各向异性特征,建立了复杂介质岩石物理等效理论,解决了非均匀孔隙结构、各向异性岩石介质等效问题。创建和实现盖层的动态有效性评价体系,引入岩石力学评价参数,建立盖层封闭性宏观-微观参数组合动态评价方法,并结合烃源岩的演化过程,实现源盖匹配关系的动态评价。总结早古生界海相碳酸盐岩层系油气藏形成机理,建立评价预测标准,深化了“源盖控烃、斜坡-枢纽富集”勘探评价方法。

4 结语

鉴于中国海相层系油气来源的复杂性和演化的特殊性,利用油气地质、地球化学技术,提出海相

层系存在多种烃源(岩)共存且相互转化、连续或叠置生烃特征,在高演化区海相烃源岩普遍存在生气母质的物质状态转换和生烃过程与贡献的接替,呈现多源生烃动态转化,构成海相高演化层系多源生烃特征。揭示早古生代烃源形成机制,建立下古生界油气成藏保持示踪体系;集成下古生界碳酸盐层系规模储集层形成的早期低温溶蚀控制,成岩过程的溶蚀窗调整,深埋高温热液改造和构造裂缝增容的复合成储机理;揭示古生界盖层类型及其封闭机理,建立不同类型盖层动态演化的封闭性能评价技术,发展保存条件的地球物理预测技术;形成评价体系,确定有利领域和区块,支撑勘探突破。

最新研究紧密结合勘探实践,近年来在研究区四川盆地环高石梯-磨溪地区获得勘探突破,发现世界上目前最大的下古生界海相整装大气田——安岳特大气田,这是中国下古生界油气勘探突破的重大事件,打破了威远气田发现后下古生界及以下层系沉寂了 50 多年的局面。指出了在塔里木盆地阿满过渡带与塔中、塔北为下古生界寒武系-奥陶系泥质烃源岩和碳酸盐烃源岩油气来源背景统一的油气富集区,阿满过渡带油气获得突破,呈连片分布。这些勘探实践表明,对中国早古生界海相层系研究部署是超前和必要的,同时这些研究成果和资料的积累也为中国深地计划提供了强有力的理论指导和技术支撑。

深化与完善复杂地质条件下海相油气地质理论,针对海相“深层、富气”等特殊地质背景,深化沉积盆地烃源、成烃和油气富集理论,必将对我国油气资源开拓新的勘探领域可持续发展战略提供更大的支持。

致谢: 本文是根据国家 973 项目“中国早古生代海相碳酸盐岩层系大型油气田形成机理与分布规律”主要成果编撰而成,项目组全体人员都有贡献,卢龙飞、腾格尔、王晓锋、王杰和罗厚勇参与本文编撰,在此一并致谢!

参考文献(References):

- Dai J X, Song Y, Zhang H F. 1997. Main factors controlling the foundation of medium-giant gas fields in China. Science in China Series D: Earth Sciences, 40(1): 1-10
- Halbouty, M T. 2003. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990-1999. Tulsa: AAPG
- Jin Z J, Liu Q Y, Qiu N S, Ding F. 2012. Phase states of hydrocarbons in Chinese marine carbonate strata and controlling factors for their formation. Energy Exploration & Exploitation, 30(5): 753-773
- Ma Y S, Guo X S, Guo T L, Huang R, Cai X Y, Li G X. 2007. The

Puguang gas field: New giant discovery in the mature Sichuan Basin, southwest China. AAPG Bulletin, 91(5): 627-643

Stephen D K, Vanessa J K. 2005. An introduction to organic geochemistry. wiley Blackwell, 408

蔡希源. 2007. 塔里木盆地大中型油气田成控因素与展布规律. 石油与天然气地质, 28(6): 693-702

顾家裕, 张兴阳, 罗平, 罗忠, 方辉. 2005. 塔里木盆地奥陶系台地边缘生物礁、滩发育特征. 石油与天然气地质, 26(3): 277-283

国土资源部. 2008. 关于新一轮全国资源评价和储量产量趋势预测报告

何登发, 贾承造, 李德生, 张朝军, 孟庆任, 石昕. 2005. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化. 石油与天然气地质, 26(1): 64-77

何治亮. 2001. 塔里木多旋回叠合盆地与复式成藏系统. 北京: 中国地质大学出版社

何治亮, 高志前, 张军涛, 丁茜, 焦存礼. 2014. 层序界面类型及其对优质碳酸盐岩储集层形成与分布的控制. 石油与天然气地质, 35(6): 853-859

胡广, 刘文汇, 腾格尔, 陈强路, 谢小敏, 王杰, 卢龙飞, 申宝剑. 2014. 塔里木盆地寒武统泥质烃源岩成烃生物组合的构造-沉积环境控制因素. 石油与天然气地质, 35(5): 685-695

黄思静, 张雪花, 刘丽红, 郇金来, 黄可可. 2009. 碳酸盐成岩作用研究现状与前瞻. 地学前缘, 16(5): 219-231

贾承造. 2006. 中国叠合盆地形成演化与中下组合油气勘探潜力. 中国石油勘探, 11(1): 1-4

贾承造, 何登发, 石昕, 杨庚, 张朝军. 2006. 中国油气晚期成藏特征. 中国科学(D辑), 36(5): 412-420

贾承造, 李本亮, 张兴阳, 李传新. 2007. 中国海相盆地的形成与演化. 科学通报, 52(S1): 1-8

贾承造. 2011. 中国能源前景与能源科技前沿. 高校地质学报, 17(2): 151-160

贾承造. 2012. 关于中国当前油气勘探的几个重要问题. 石油学报, 33(S1): 6-13

金之钧, 王清晨. 2004. 中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展: 以塔里木盆地为例. 中国科学(D辑), 34(S1): 1-12

金之钧. 2005. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题. 地学前缘, 12(3): 15-22

金之钧, 蔡立国. 2006. 中国海相油气勘探前景、主要问题与对策. 石油与天然气地质, 27(6): 722-730

金之钧, 蔡立国. 2007. 中国海相层系油气地质理论的继承与创新. 地质学报, 81(8): 1017-1024

金之钧, 云金表, 周波. 2009. 塔里木斜坡带类型、特征及其与油气聚集的关系. 石油与天然气地质, 30(2): 127-135

金之钧. 2010. 中国海相碳酸盐岩层系石油地质基本特征及含油气远景. 前沿科学, 4(1): 11-23

金之钧. 2011. 中国海相碳酸盐岩层系油气形成与富集规律. 中国科学: 地球科学, 41(7): 910-926

梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 王飞宇. 2000. 从塔里木盆地看中国海相生油问题. 地学前缘, 7(4): 534-547

刘全有, 金之钧, 刘文汇, 卢龙飞, 孟仟祥, 陶冶, 韩品龙. 2013. 鄂尔多斯盆地海相层系中有机酸盐存在以及对低丰度高演化烃源岩生烃潜力评价的影响. 中国科学: 地球科学, 43(12): 1975-1983

刘树根, 王一刚, 孙玮, 钟勇, 洪海涛, 邓宾, 夏茂龙, 宋金民, 文应初, 吴娟. 2016. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作

用. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(1): 1-23

刘文汇, 王杰, 腾格尔, 秦建中, 饶丹, 陶成, 卢龙飞. 2012. 中国海相层系多元生烃及其示踪技术. 石油学报, 33(S1): 115-125

刘文汇, 王杰, 陶成, 胡广, 卢龙飞, 王萍. 2013a. 中国海相层系油气成藏年代学. 天然气地球科学, 24(2): 199-209

刘文汇, 王晓峰, 腾格尔, 张殿伟, 王杰, 陶成, 张中宁, 卢龙飞. 2013b. 中国近十年天然气示踪地球化学研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 32(3): 279-289

刘文汇, 腾格尔, 王晓锋, 黎茂稳, 胡广, 王杰, 卢龙飞, 赵恒, 陈强路, 罗厚勇. 2017. 中国海相碳酸盐岩层系有机质生烃理论新解. 石油勘探与开发, 44(1): 155-164

牟书令. 2009. 中国海相油气勘探理论与技术. 北京: 地质出版社: 1-752

彭平安, 刘大永, 秦艳, 于赤灵, 张善文, 隋凤贵, 李钜源. 2008. 海相碳酸盐岩烃源岩评价的有机碳下限问题. 地球化学, 37(4): 415-422

钱一雄, 蔡习尧, 刘忠宝, 尤东华, 陈跃. 2009. 塔里木盆地卡塔克南缘中2井里塔格组碳酸盐岩沉积地球化学特征. 现代地质, 23(4): 631-637

秦建中, 郑伦举, 腾格尔. 2007. 海相高演化烃源岩总有机碳恢复系数研究. 地球科学—中国地质大学学报, 32(6): 853-860

童晓光. 2009. 论成藏组合在勘探评价中的意义. 西南石油大学学报(自然科学版), 31(6): 1-8

王凯, 关平, 邓世彪, 刘沛显, 金亦秋. 2016. 塔里木盆地寒武统微生物礁储集性研究及油气勘探意义. 沉积学报, 34(2): 386-396

王招明, 何爱东. 2009. 塔北隆起中西部油气富集因素与勘探领域(为庆祝塔里木油田石油会战20周年而作). 新疆石油地质, 30(2): 153-156

翟晓先, 顾忆, 钱一雄, 贾存善, 王杰, 蔺军. 2007. 塔里木盆地塔深1井寒武系油气地球化学特征. 石油实验地质, 29(4): 329-333

张家利, 腾格尔. 2013. 下古生界生烃理论研究进展及面临的挑战. 科技资讯, (14): 120-121

赵文智. 2002. 中国叠合盆地和海相油气地质. 北京: 石油工业出版社

赵文智, 张光亚, 汪泽成. 2005. 复合含油气系统的提出及其在叠合盆地油气资源预测中的作用. 地学前缘, 12(4): 458-467

钟宁宁, 卢双舫, 黄志龙, 张有生, 薛海涛, 潘长春. 2004. 烃源岩生烃演化过程 TOC 值的演变及其控制因素. 中国科学(D辑), 34(S1): 120-126

朱东亚, 金之钧, 张荣强, 张殿伟, 何治亮, 李双建. 2014. 震旦系灯影组白云岩多级次岩溶储集层叠合发育特征及机制. 地学前缘, 21(6): 335-345

朱东亚, 张殿伟, 刘全有, 何治亮, 李双建, 张荣强. 2015a. 多种流体作用下的白云岩储集层发育过程和机制. 天然气地球科学, 26(11): 2053-2062

朱东亚, 张殿伟, 张荣强, 冯菊芳, 何治亮. 2015b. 深层白云岩储集层油充注对孔隙保存作用研究. 地质学报, 89(4): 794-804

邹才能, 张光亚, 陶士振, 胡素云, 李小地, 李建忠, 董大忠, 朱如凯, 袁选俊, 侯连华, 瞿辉, 赵霞, 贾进华, 高晓辉, 郭秋麟, 王岚, 李新景. 2010. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质. 石油勘探与开发, 37(2): 129-145