

张鹏辉,梁 杰,陈建文,等. 中国叠合盆地深部海相地层油气保存条件剖析[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(1): 1-11.

中国叠合盆地深部海相地层 油气保存条件剖析

张鹏辉¹, 梁 杰^{2,3,4*}, 陈建文^{2,3}, 鲍衍君¹,
龚建明^{2,3}, 张银国^{2,3,5}, 袁 勇^{2,3}, 王建强^{2,3}

(1 河海大学海洋学院, 南京 210098; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071; 4 中国海洋大学海洋地球
科学学院, 青岛 266100; 5 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580)

摘 要:中国叠合盆地的形成演化主要经历了海相盆地形成和盆地叠加改造两大构造期, 发生了多期构造变动下的多期油气成藏及后期不同程度的改造和破坏。构造运动决定了叠合盆地海相层系成藏条件与油气保存的差异性, 盆地及其周缘造山带构成的盆山结构决定了中国西部叠合盆地油气保存条件的优劣。膏盐岩和泥页岩是叠合盆地中最主要的两类盖层, 多期构造变动背景下盖层的封盖有效性是油气保存的重要条件。岩浆活动时间与油气生成、运移时间的先后配置关系同油气保存密切相关。地下水水文和古流体地球化学特征可作为油气保存条件的判识性指标来指示油气运移、聚集及破坏。油气的聚集和散失量模拟提供了一种油气保存条件定量研究的新思路。油气保存单元和保存系统的概念及相关评价体系能够很好地反映油气保存条件的分割性。以构造演化为主线, 全面分析油气保存条件各影响因素的多维时空配置关系, 多角度系统评价叠合盆地海相地层油气保存条件将成为重要研究方向, 对于圈闭评价优选及海相油气勘探部署具有重要的参考指导意义。

关键词: 油气保存; 海相地层; 成藏; 叠合盆地

中图分类号: P736, P618.13 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2019.01001

0 引言

叠合盆地是指由若干不同盆地(不同构造层)纵向叠置的一种复杂结构的盆地, 是地壳多旋回

发展的产物, 基于盆地性质、结构和叠合方式等方面的差异, 叠合盆地可划分为多种不同的类型^[1-4]。我国沉积盆地中典型叠合盆地包括四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地以及苏北—南黄海盆地等。叠合盆地深部海相层系是我国分布最广的含油气层系, 具有发育时代老、时间跨度大、含油气层系多等特点^[5,6], 目前在四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等盆地内相继发现了一批海相大中型油气田, 勘探已取得了巨大成效。海相盆地主要发育在中、新元古代至三叠纪, 经海西和印支运动后, 海水大规模退出中国大陆而结束了海相沉积盆地发育史, 由此转入陆相盆地为主的演化阶段, 在燕山、喜马拉雅期等多次构造运动作用下海相盆地原型面貌受到后期改

收稿日期: 2018-12-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41702162); 山东省自然科学基金博士基金(ZR2017BD034); 中央高校基本科研业务费项目(2018B02914); 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金(PLC201712); 中国地质调查局“海域油气资源调查”工程项目(DD20160152); 刘宝珺地学青年科学基金(DMSM2018044)

作者简介: 张鹏辉(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事沉积学、储层地质学与石油地质学方面的研究工作。E-mail: zph010@163.com

* 通讯作者: 梁 杰(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋油气地质调查与研究工作。E-mail: lj_100@163.com

造^[6-13]。根据中—新生代盆地类型及其与下伏克拉通叠置关系,叠合盆地叠加样式分为2种主要类型^[2,6]:①以塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地等为主要代表的克拉通与中—新生代前陆盆地叠加样式;②以苏北—南黄海盆地、江汉盆地、渤海湾盆地等为主要代表的克拉通与中—新生代裂谷盆地叠加样式。实际上,中国叠合盆地深层海相地层在生排烃机理与成藏、油气运聚与分布等方面具有较为独特、复杂的石油地质特征,其叠加过程并不能简单理解为沉积地层在垂向上的堆叠,或是多套生储盖组合的集中发育^[6,14,15]。叠合盆地多期构造变动和多期多区生排烃作用导致多旋回的成藏作用^[15-20],且各期成藏的范围和规模各异。

我国叠合盆地海相地层油气显示层位多、分布广,但在已发现油气田的盆地或尚未发现工业油气流的地区普遍可见一些早期形成的油气藏在后期遭受调整、改造和破坏的证据,如钻遇的沥青脉、沥青砂、稠油和地表的沥青砂、油气苗等,表明早期部分良好的油气保存条件在后期受到不同程度的改造或破坏。而油气保存条件是决定油气富集的第一级控制因素^[21-24],是制约叠合盆地海相地层油气勘探突破的关键。本文从叠合盆地构造运动、盖层条件、岩浆活动、流体系统地球化学、油气聚散定量模拟与油气保存的关系以及油气保存单元、保存系统等几个方面进行了系统地剖析,并展望未来油气保存条件的研究方向,以期对叠合盆地圈闭评价优选及海相油气勘探部署提供参考。

1 叠合盆地构造运动与油气保存

1.1 构造运动决定了成藏条件与油气保存的差异性

海相沉积盆地在构造演化过程中发育多套区域烃源岩,奠定了油气藏形成的物质基础。在该海相地层建造阶段烃源岩分布广泛,以泥质烃源岩(泥页岩、煤系、炭质泥岩、泥岩、泥灰岩等)为主,烃源物质丰富^[15,24-27],如在扬子地块的下寒武统、下志留统、上二叠统,塔里木盆地的寒武系、奥陶系,鄂尔多斯盆地的石炭—二叠系等均有发育。刘树根等^[28,29]结合对四川叠合盆地拉张槽和古

隆起的认识认为,峨眉和兴凯地裂运动分别对应形成的开江—梁平拉张槽和绵阳—长宁拉张槽控制烃源岩和储层的分布,而加里东期和印支期古隆起则控制了油气运聚及古油藏、古气藏的分布。

中—新生代陆相盆地叠加改造决定了油气成藏方式的保存与破坏。整个扬子地块海相盆地发育期具有相似的沉积演化史,但自印支期至今区域构造与沉积格局各异,海相原型盆地的后期保存程度在齐岳山断裂以西的上扬子地块与齐岳山断裂以东的中、下扬子地块不一致,海相地层在构造改造上表现为上扬子地块弱而中、下扬子地块强。其中在晚侏罗世(J_3)—早白垩世(K_1)构造事件(燕山Ⅱ幕)时期,扬子地块的这种改造强弱差异最为显著,在上扬子地块表现为持续沉降,海相地层未发生明显的褶皱变形,而在中、下扬子地块大部分海相地层发生不同程度的褶皱冲断改造及抬升剥蚀^[11,30-33],该期对中、下扬子地块海相地层前期形成的油气藏保存总体较为不利,而在上扬子地块则较有利于油气保存。根据地质地球物理资料初步解释,陈建文等^[27]认为在下扬子地块向海域的延伸——南黄海盆地基底之上发育2套变质岩,构成了刚性古陆核,其中盆地中部的崂山隆起古生界褶皱比较平缓,构造相对简单,是海相中—古生界的油气远景区。华北板块印支—燕山期的拉张构造应力自东向西传递时依次递减,使得东部的华北古克拉通海相盆地成为支离破碎的断陷盆地,而在西部的鄂尔多斯盆地特别是盆地腹部影响较小,其海相地层实体的完整性得以保留,油气保存条件相对较好^[10,34]。塔里木盆地海相地层目前已发现的大型油气藏主要集中分布于多期构造变动条件下每一次构造变动相对较弱部位的复合叠加区,为此,庞雄奇等^[15]提出了“强强叠加破坏、弱弱叠加保护、强弱叠加调整”的多期构造变动叠加改造油气藏的基本模式。

1.2 盆山结构对中国西部叠合盆地油气保存条件具有重要影响

沉积盆地与大陆造山带形成于统一的地球动力学系统中,其时空耦合关系控制了相邻盆地的结构和演化,是导致盆地内油气差异成藏的一个重要原因^[35-38]。燕山—喜马拉雅期四川盆地周缘隆升造山,四川盆地及其周缘的造山带(龙门山、

米仓—大巴山、齐岳山、大娄山和大凉山)形成一个典型的复合盆山体系。受控于构造变形在平面上和纵向上的差异性,四川盆地复合盆山体系划分出 3 种不同的盆山结构(突变型盆山结构区、渐变型盆山结构区和原地隆起—盆地)和 5 大盆山结构区(川北突变型盆山结构区、川西突变型盆山结构区、川东渐变型盆山结构区、川西南渐变型盆山结构区和川中原地隆起—盆地)^[38,39];突变型盆山结构区的周缘造山带具有强烈的抬升剥蚀作用,而构造变形强度向盆内方向快速减弱,至盆地内抬升剥蚀幅度较小;渐变型盆山结构区抬

升剥蚀作用自盆缘至盆内具有渐变性,总体上叠加构造变形较为显著,特别是晚白垩世以来剥蚀量较大;原地隆起—盆地地区抬升剥蚀幅度普遍较小,构造变形最弱。盆山结构对油气保存条件有重要影响,并决定了油气的最终分布,突变型盆山结构区和原地隆起—盆地地区构造变动小,油气保存条件好,其中川北突变型盆山结构区和川中原地隆起—盆地地区探明储量分别占盆地海相油气储量的 47.83% 和 31.4%,而渐变型盆山结构区油气保存条件较差,不利于油气成藏^[28,29,38](表 1)。

表 1 四川盆地突变型盆山结构和渐变型盆山结构基本特征(据文献[28,38,39]整理修改)
Table 1 Basic features of plate margin basin-mountain system and inner-plate basin-mountain system in the Sichuan Basin (modified from references [28,29,38])

类别	突变型盆山结构	渐变型盆山结构
地貌特征	山—盆地地貌反差大,地形坡度陡,盆山边界明晰	山—盆地地貌反差小,盆山边界不明晰
结构特征	盆山深部岩石圈结构具差异性,浅部具典型的冲断带(山)—前陆盆地(盆)二元结构	盆山深部岩石圈结构相似,不发育典型的山—盆地二元结构和控盆边界(线性)主断裂
动力学特征	板缘地壳俯冲碰撞	邻区(盆外)的构造变形和盆内沉积盖层多次滑脱
构造特征	以边界主断裂控制,具典型分带性,岩层缩短以逆冲叠覆为主	具过渡性、分带性,岩层缩短以(滑脱)褶皱缩短为主
盆地沉降与抬升特征	造山带抬升与前陆盆地沉降呈同步性和镜像关系,盆内抬升剥蚀幅度较低,具较厚的陆相地层分布	造山带抬升与盆地抬升呈一致性,盆内抬升剥蚀作用较强,残存陆相地层厚度较薄
结构单元(四川盆地)	川北突变型盆山结构区,川西突变型盆山结构区	川东渐变型盆山结构区,川西南渐变型盆山结构区
油气保存条件	具较好的区域油气保存条件	油气保存条件相对较差
油气分布特征	圈闭油气充满度较高,大中型油气田分布频率较大	圈闭油气充满度较低,大中型油气田分布频率较低

2 断裂系统与油气保存

海相残留盆地的断裂系统具有构造样式的多样性、形成演化的多期性、构造发育的继承性及平面展布的区段性,对油气分布的控制作用较为明显^[40-42],断层的封闭性对于油气保存具有重要意义。结合三维地震与区域地质资料研究,邬光辉等^[42]认为塔里木盆地塔中隆起海相地层的断裂系统经历了 4 个阶段的差异发育演

化史,以挤压断裂与走滑断裂发育为主,多期多类型断裂造成油气保存和分布的差异性。断层封闭在空间上表现为垂向封闭和侧向封闭 2 个方面。付广和孟庆芬^[43]分析了断层封闭性的各种影响因素指出:断层面压力越大,断裂带填充物破碎程度越高,泥岩变形程度越高,垂向封闭性越强;断层面倾角越缓,断层面压力越大,垂向封闭性越好;压性和压扭性断层紧闭程度高,垂侧向封闭性好;张性和张扭性断层开启程度高,垂侧向封闭性差。

3 盖层条件与油气保存

3.1 盖层主要类型及发育特征

叠合盆地的多期构造变动,使得盖层对下伏油气藏的封盖性能成为油气保存的重要条件。膏盐岩和泥页岩是中国叠合盆地中最主要的2类盖层,此外致密碳酸盐岩也具有一定的封盖能力。

膏盐岩具有较高的突破压力和较大的塑性系数、压缩系数,其在高温、高压条件下变形较大也不易产生裂缝,即使厚度较薄的膏盐岩盖层仍具备封闭油气藏的能力,是最有效的一类盖层^[44-49]。膏盐岩除具有直接封盖作用外,由于其在构造变形挤压作用下具有一定的塑性特征,即使在构造强烈地区断层和裂缝也很难穿过膏盐层,因此对断层有重要的封闭性^[24,50-52]。

泥页岩的突破压力及力学性质参数要低于膏盐岩但高于致密碳酸盐岩,因而其封盖性能也介于二者之间^[45,46]。以扬子地区寒武系、志留系泥页岩为代表的高演化泥页岩,虽然其埋藏深度大、成岩作用强、有机质热演化程度高,但只要在后期构造改造过程中未受破坏或未受到后期岩溶改造,仍可以作为封闭性很好的盖层^[52-57]。

对四川叠合盆地现有油气藏统计表明,区域盖层膏盐岩 $>20\sim 40$ m或泥页岩累计厚度 $>100\sim 300$ m时,有利于大中型气田的保存;而在存在区域盖层的情形下,5~10 m的膏盐岩和10~20 m的泥页岩直接盖层也能使天然气有效成藏和保存^[24]。

3.2 盖层封盖能力动态评价

盖层封盖能力易受后期构造改造的影响,此外还因埋深、成岩作用、岩石物性、岩石力学性质的变化而发生显著变化。单纯依靠宏观分布特征以及孔隙度、渗透率、突破压力等常规物性参数并不能全面反映盖层的封盖性能,目前部分学者已经注意到盖层封盖性能会随地质演化过程而动态变化,并就埋深变化^[55,58]、岩石力学性质变化^[59,60]等对盖层封盖的有效性开展了一些初步的研究与探索。综合考虑影响盖层封盖性能的多个因素,秦建中等^[61]提出泥页岩盖层动态评价的

流程(图1),除物性参数评价外,还应该考虑不同温压条件下脆延转换点、成岩作用阶段等参数对是否产生裂缝进行一系列评价。张仲培等^[62]基于盖层在沉降埋藏阶段封闭能力的形成、力学性质的变化、抬升阶段裂缝化的出现均与盖层埋深存在密切关系的认识,确定了影响盖层封盖性能的3个关键参数:盖层封盖能力形成的临界深度(D_{P0})、脆延转换的临界深度(D_{B-P})和隆升阶段开始裂缝化深度(D_F),以单井盖层古埋深去量化上述3个临界深度参数,并据此建立了塔里木盆地巴—麦地区石炭系泥岩盖层及中—下寒武统膏盐岩盖层的封盖性分级评价标准。

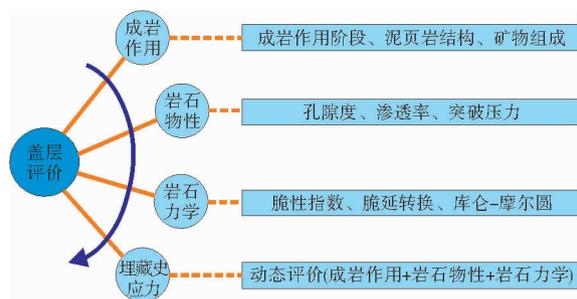


图1 泥页岩盖层动态评价流程(据文献[61]修改)

Fig. 1 A flowchart for dynamic evaluation of mudstone and shale cap rocks (modified from reference [61])

3.3 盖层封盖强度与圈闭闭合高度耦合关系评价

盖层封盖强度与圈闭闭合高度耦合关系能够反映油气保存条件及油气充注程度,并具体控制了规模性油气田的分布。这种耦合关系近年来已为部分学者所关注^[29,63],其认识主要为以下3个方面:

(1) 封盖强度小于圈闭闭合高度

以威远构造为例,印支期以来(特别是100 Ma以来),四川叠合盆地持续抬升剥蚀,致使中、下三叠统膏盐岩区域盖层封盖能力减弱,由古油藏原油裂解形成的灯影组古气藏中的部分天然气从构造顶部(地表下三叠统嘉陵江组)逸散,现今威远构造圈闭闭合高度为895 m,而仅能封盖气柱高度240 m的天然气,灯影组天然气圈闭充满度仅为25%。

(2) 封盖强度大于圈闭闭合高度

以四川盆地中部的高石梯构造为例,区域盖层保存完好,构造圈闭天然气充满度达 100%。

(3) 封盖强度为零

以四川盆地东南缘丁山—林滩场构造为例,受晚白垩世以来的大规模抬升剥蚀的影响,丁山构造地表出露下三叠统,林滩场构造地表出露二叠系,盖层条件遭受完全破坏而致使灯影组古气藏未能得以保存。

4 岩浆活动与油气保存

岩浆活动能够产生高热流,并对围岩、烃源岩、圈闭等有明显影响,表明岩浆活动与油气藏形成、保存密切相关。岩浆活动时间与油气生成、运移时间的先后配置关系对油气保存有重要影响,岩浆活动形成于油气大量生成之前,岩浆热事件对烃源岩的增熟作用有助于油气生成,对油气保存并无不利影响^[64,65];而当岩浆活动晚于油气聚集时,其对油气保存的影响与产状分布有关,若岩浆体上侵使上覆盖层因拉张产生一系列张性断裂或裂缝而降低封闭能力,若岩浆岩与地层平行呈层状分布则对油气保存的影响较小,若岩浆岩直接穿过已发生聚集的油气藏则会使油气变质破坏,同时对油气破坏的范围受岩浆岩体的形态及规模的支配^[46,64,65]。如中、下扬子地块和江南雪峰隆起以及滇黔桂地区等局部地区发生的岩浆侵入,部分岩体直接穿过早期形成的油气藏而具有一定的破坏作用^[66]。岩浆岩侵入体可形成一些特殊类型的圈闭,特别是与火山岩有关的披盖构造,对油气聚集保存较为有利^[64,67]。此外,岩浆岩本身及其蚀变带可以具备孔、洞、缝而成为油气的较好储集层^[67,68]。

5 流体系统地球化学与油气保存

5.1 水文地质地球化学条件与油气保存

叠合盆地的古气候、构造演化及沉积环境控制了地下水动力场的形成、演化^[46,69-72],地下水水文地球化学特征对油气运移、聚集及破坏具有重要的指示作用,受盖层条件、目的层埋深和断裂等影响,可作为油气保存条件的一种判识性指标。

在沉积埋藏阶段,地下水往往处于相对封闭环境中,地下水化学性质常表现为矿化度、 Cl^- 、 Na^+ 和盐化系数($[\text{Cl}^- / (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)]$)增加,而与此同时 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、变质系数($r_{\text{Na}^+ / r_{\text{Cl}^-}}$)、脱硫系数($[\text{rSO}_4^{2-} \times 100 / (\text{rSO}_4^{2-} + r_{\text{Cl}^-})]$)降低^[72,73];在抬升剥蚀时期,大气降水淡化沉积埋藏水,地下水化学参数也会相应发生反转。受水文地质开启程度的影响,依据地下水与地表水的相互联系,而在纵向上将地层水划分为 3 个不同的区带^[46,72,74]:

(1) 自由交替带

地下水主要为 Na_2SO_4 型,其化学性质与地表水相似,矿化度较低,表明地层水长期受大气水下渗影响,属于不利于油气保存的活跃、开启的氧化环境;

(2) 交替停滞带

地下水以 CaCl_2 型为主,矿化度高,属于不受地表水影响的封闭环境,有利于油气保存;

(3) 交替阻滞带

上部水型以 Na_2SO_4 为主而下部主要为 CaCl_2 、 MgCl_2 型,较长期受大气水下渗影响,属介于上述 2 个区带之间的过渡带,该带下部具备一定的油气保存条件。

以塔里木盆地塔河油田奥陶系岩溶油藏为例,据 26 块样品分析表明,其地层水矿化度介于 133.51~248.76 g/L 之间, Cl^- 介于 80 339~155 292 mg/L,脱硫系数 > 63.64,变质系数 < 0.90,为高矿化度的 CaCl_2 型水^[46,72],反映出一个利于油气保存的相对较封闭的地下水动力环境。通过对四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地海相典型油气田地下水化学参数与油气保存之间关系的研究总结,初步形成了一套适用于叠合盆地海相地层油气保存条件的水文地质地球化学判别指标体系^[46,72](表 2)。

5.2 古流体地球化学与油气保存

叠合盆地的多期构造运动可能导致多期古流体的释放,目前,锶、碳、氧等同位素及金、汞、铋、铅、锌等金属元素地球化学特征可用于确定流体来源及流体流动路径,进而反映油气保存条件的动态变化。王国芝和刘树根^[75]选取四川盆地中部位于威远古隆起北东侧的安平 1 井和合 12 井

表2 叠合盆地海相地层油气保存条件的水文地质地球化学判别指标体系(据文献[46,72]修改)
Table 2 Hydrogeological evaluation system for discriminating hydrocarbon preservation conditions of marine strata in superimposed basins (modified from references [46,72])

保存条件	很好(I类)	好(II类)	中等(III类)	差(IV~V类)
地下水成因	沉积埋藏水	短暂受大气水下渗影响	较长期受大气水下渗影响	长期受大气水下渗影响
矿化度/(g/L)	>40	30~40	20~30	<20
变质系数	<0.87	0.87~0.95	0.95~1.0	>1.0
脱硫系数	<8.5	8.5~15	15~30	>30
盐化系数	>20	1~20	0.2~1	<0.2
苏林水型	CaCl ₂ 为主, MgCl ₂ 次之, 偶见 NaHCO ₃ 、Na ₂ SO ₄	以 CaCl ₂ 为主, 常见 Na ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄ 、NaHCO ₃	
水文地质分布	交替停滞带	交替阻滞带	自由交替带	

震旦系灯影组、寒武系、奥陶系和二叠系围岩与样品孔缝洞中充填物锶和碳、氧同位素配对分析,在生油窗、生气窗期寒武系泥页岩具有较好的封盖能力,保存条件较好;而在生气窗之后,震旦系—寒武系—奥陶系孔缝洞中充填物锶同位素(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)略有降低,表明古流体存在自下而上垂向跨层流动的特征,部分流体进入二叠系,下组合内部对流体封盖能力减弱,保存条件随之变差;在

稍晚于该期二叠系又具备封盖能力而使其晚期保存条件较好(图2)。锶等同位素示踪进一步研究认为,受下三叠统嘉陵江组和中三叠统雷口坡组膏盐岩的封盖作用,在未遭受强烈剥蚀情况下,四川叠合盆地下部海相地层流体很难向上跨层进入上部陆相层系中^[24](图2)。金、汞、铋、铅、锌等金属元素地球化学异常往往指示断裂作用和古流体活动强烈,盖层封闭性减弱,油气保存条件相对较差^[46]。

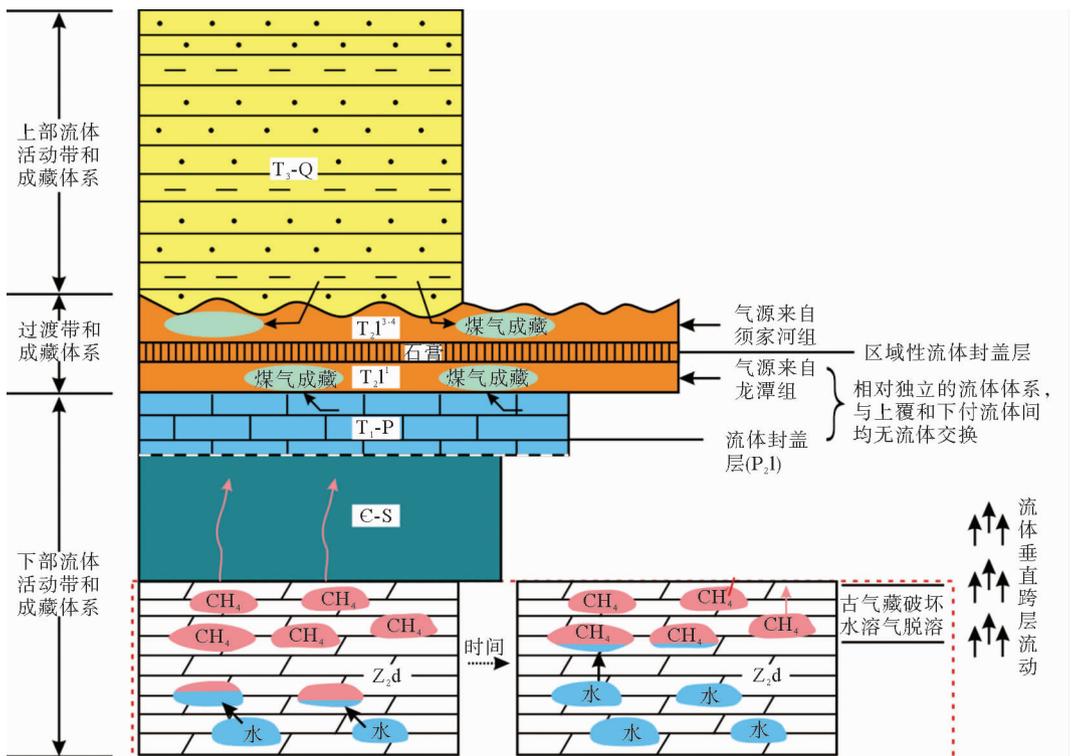


图2 四川盆地中部古流体活动及油气保存条件动态变化(据文献[24,75]修改)

Fig. 2 Fluid activity and dynamic changes of hydrocarbon preservation in the Central Sichuan Basin (modified from references [24,75])

6 油气聚散定量模拟与油气保存

油气的运聚和散失是一个动态过程,油气的聚集量能够直观地反映油气保存情况,因而可作为油气保存条件定量评价的依据。基于这一认识,国内外已就油气聚集量模拟开展了初步的研究与探索^[65,76,77]。李明诚等^[65]提出一种基于生、

排烃模拟的聚集量模拟系统,计算排烃量和散失量来判断油气是否聚集。以聚气量模拟为例^[65,77](图 3),运用正演模拟的方法,基于水溶相、油溶相、游离相和扩散相等不同相态的排气量模拟,考虑了二次运移通道空间的残余量、侧向与垂向的渗漏量、扩散的散失量,进而得出聚气量,可作为油气保存条件定量评价的一种值得借鉴的思路。

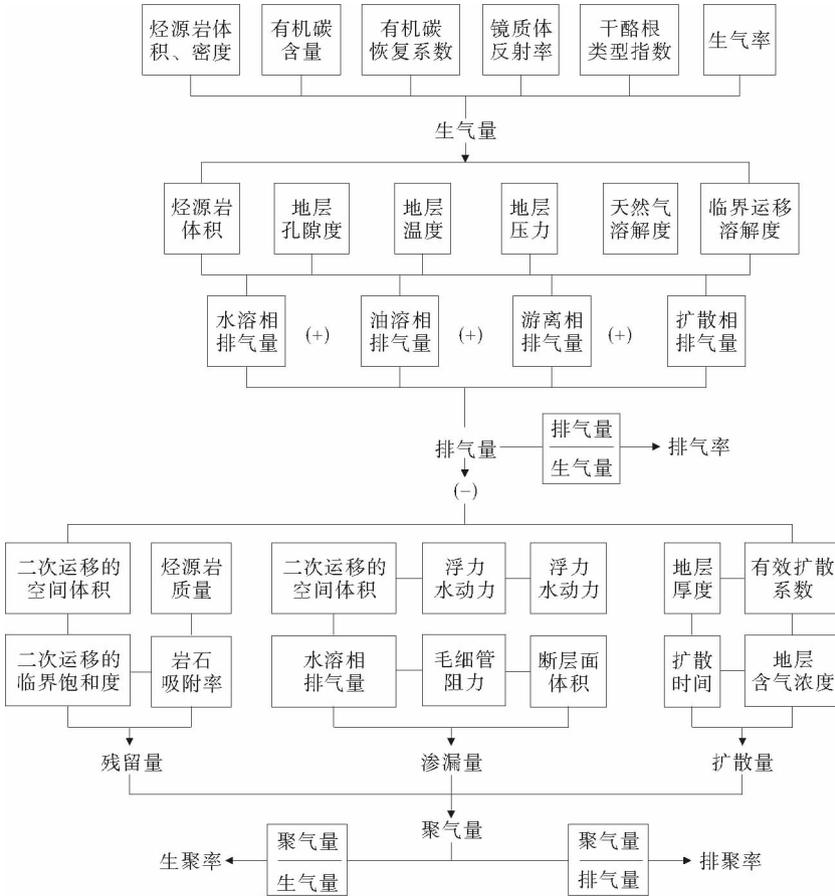


图 3 聚气量模拟流程(据文献[65]修改)

Fig. 3 Simulation procedure of gas accumulation (modified from reference [65])

剥蚀、断裂及褶皱作用使得区域盖层受到破坏,渗漏、扩散、溢散、氧化、降解和裂解这 6 种微观机制直接导致了油气的损耗^[15],对构造演化过程中油气散失的模拟可以间接反映油气聚集之后的保存情况。在多期构造作用下,剥蚀厚度和有效盖层厚度揭示了构造运动强度(TMI)^[78],而构造事件中油气散失比例(DHP)是表征油气散失

量的重要参数,可以由古今油水界面变化来求得^[79,80],对塔里木盆地塔中地区研究证明,TMI和 DHP 这 2 个参数存在很好的负相关关系($R^2 \approx 0.9$)^[81]。基于这一相关性认识,Pang 等^[81]提出了通过 TMI 参数来合理预测 DHP 的值来定量估算油气经历多期构造运动后的散失量,从而间接确定了塔中地区油气保存的分区差异。

7 油气保存单元及保存系统

叠合盆地海相地层经历了多期构造变动、多源多期成藏,油气地质与保存条件呈现分割性,过多强调盆地或区域上的共性已不适宜。近年来,油气保存单元和保存系统的概念及相关评价体系应运而生,旨在更准确地开展区块优选评价。油气保存单元是具有整体封闭保存条件的含一个或数个现今含油气系统的三维空间地质单元,单元内部具备整体封闭保存条件,存在有效的充注烃源和现今的含油气系统^[82-84],强调了三维地质边界及现今的油气赋存状态。与之相对应的,沃玉进等^[85]认为油气保存条件的评价应同时注重影响油气藏保存的地质要素和作用过程,提出油气保存系统的概念,认为保存系统是某一地质单元内与保存条件相关的地质要素、地质作用与过程、成藏功能的有机统一体系。这一认识强调保存系统是油气的一个勘探单元,在范围上相当于一个盆地的二级或三级构造单元,具有统一的源-盖条件和唯一的区域盖层,相同或相似的地质结构和流体特征,以及基本一致的油气保存或破坏过程^[85]。按照保存系统的功能,沃玉进等^[85]将南方海相盆地保存系统进一步划分为3种基本类型:已知型(保持性、重建型)、不确定型和破坏型,形成了一套保存系统的初步评价体系。

8 叠合盆地油气保存条件研究展望

(1)国内外的不同学者提出了多种油气保存条件的评价方法,而单纯借助一种评价方法来分析油气保存条件已不太适用于多期构造变动的叠合盆地,多角度系统评价油气保存条件将成为今后重要研究方向,能够更可信地反映各构造圈闭油气地质条件的优劣。

(2)当前油气保存条件的研究主要是一种静态的定性研究,针对性的定量模拟能够更好地反映各期构造事件油气的运聚与散失情况,因而基于各构造事件并结合地质、地球物理和地球化学等数据,一方面开展油气的运聚与散失定量模拟,另一方面盖层封盖能力的模拟实验分析技术也有待深入,并与钻井实际情况相互印证,能够提高定

量模拟的真实性。

(3)以构造演化为主线,宏观与微观相结合、定性与定量相结合,从系统、全面、动态和演化的研究视角全面分析油气保存条件各影响因素的多维时空配置关系,构建适合叠合盆地的油气保存研究的动态评价分析技术,有助于揭示油气的聚集及保存机制,提高圈闭评价和海相油气勘探部署的准确性。

参考文献:

- [1] Miall A D. Principles of sedimentary basin analysis[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [2] 赵文智,张光亚,王红军,等.中国叠合含油气盆地石油地质基本特征与研究方法[J].石油勘探与开发,2003,30(2): 1-8.
- [3] 何登发,贾承造,童晓光,等.叠合盆地概念辨析[J].石油勘探与开发,2004,31(1): 1-7.
- [4] 刘池洋.叠合盆地特征及油气赋存条件[J].石油学报,2007,28(1): 1-7.
- [5] 王清晨,金之钧.叠合盆地与油气形成富集[J].中国基础科学,2002(6): 4-7.
- [6] 赵文智,汪泽成,张水昌,等.中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带[J].科学通报,2007,52(增刊):9-18.
- [7] 张渝昌.中国含油气盆地原型分析[M].南京:南京大学出版社,1997.
- [8] 张抗.盆地的改造及其油气地质意义[J].石油与天然气地质,2000,21(1):38-41.
- [9] 翟光明,宋建国,靳久强,等.板块构造演化与含油气盆地形成和评价[M].北京:石油工业出版社,2002.
- [10] 贾承造,李本亮,张兴阳,等.中国海相盆地的形成与演化[J].科学通报,2007,52(增刊):1-8.
- [11] 陈建文.全国油气资源战略选区调查与评价专项项目成果报告:南黄海前第三系油气前景研究[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2010.
- [12] 梁杰,张鹏辉,陈建文,等.南黄海盆地中-古生代海相地层油气保存条件[J].天然气工业,2017,37(5): 10-19.
- [13] 许振强,梁杰,陈建文,等.南黄海崂山隆起中、古生界油气保存条件分析[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(3):125-133.
- [14] 赵文智,张光亚,何海清,等.中国海相石油地质与叠合含油气盆地[M].北京:地质出版社,2002.
- [15] 庞雄奇,周新源,姜振学,等.叠合盆地油气藏形成、演化与预测评价[J].地质学报,2012,86(1):1-103.
- [16] 马永生,郭彤楼,付孝悦,等.中国南方海相石油地质特征及勘探潜力[J].海相油气地质,2002,7(3):19-27.
- [17] 戴春山,李刚,蔡峰,等.黄海前第三系及油气勘探方向[J].中国海上油气(地质),2003,17(4):225-231.

- [18] 郭彤楼. 下扬子地区中古生界叠加构造特征与多源多期成藏[J]. 石油实验地质, 2004, 26(4): 319-323.
- [19] 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等. 南方多旋回构造作用制约下的中、古生界海相油气构造—成藏旋回[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 589-597.
- [20] 陈建文, 雷宝华, 梁杰, 等. 南黄海盆地油气资源调查新进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 1-23.
- [21] 朱起煌. 从世界古生界油气保存条件看我国海相盆地的勘探潜力[J]. 海相油气地质, 2001, 6(2): 33-43.
- [22] 李大成, 赵宗举, 徐云俊. 中国海相地层油气成藏条件与有利勘探领域分析[J]. 中国石油勘探, 2004, 9(5): 3-11.
- [23] 沃玉进, 肖开华, 周雁, 等. 中国南方海相系油气成藏组合类型与勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 11-16.
- [24] 刘树根, 孙玮, 王国芝, 等. 四川叠合盆地油气富集原因剖析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40(5): 481-497.
- [25] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1-16.
- [26] 朱光有, 杨海军, 苏劲, 等. 中国海相油气地质理论新进展[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 722-738.
- [27] 陈建文, 龚建明, 李刚, 等. 南黄海盆地海相中—古生界油气资源潜力巨大[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(1): 1-7.
- [28] 刘树根, 孙玮, 宋金民, 等. 四川盆地海相油气分布的构造控制理论[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 146-160.
- [29] 刘树根, 孙玮, 钟勇, 等. 四川叠合盆地深层海相碳酸盐岩油气的形成和分布理论探讨[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 15-27.
- [30] 付孝悦, 肖朝晖, 陈光俊, 等. 晚印支期以来中国南方大陆的构造演化与油气分布[J]. 海相油气地质, 2002, 7: 37-43.
- [31] 何治亮, 汪新伟, 李双建, 等. 中上扬子地区燕山运动及其对油气保存的影响[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 1-11.
- [32] 金之钧, 袁玉松, 刘全有, 等. J_3-K_1 构造事件对南方海相源盖成藏要素的控制作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1791-1801.
- [33] 徐旭辉, 周小进, 彭金宁. 从扬子地区海相盆地演化改造与成藏浅析南黄海勘探方向[J]. 石油实验地质, 2014, 36(5): 523-531.
- [34] 杨帆, 周小进, 倪春华, 等. 华北古生界油气保存条件分析[J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 527-531.
- [35] 王清晨, 李忠. 盆山耦合与沉积盆地成因[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 24-30.
- [36] 刘少锋, 张国伟. 盆山关系研究的基本思路、内容和方法[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 101-111.
- [37] Cloetingh S, Thybo H, Faccenna C. Topo-Europe: Studying continental topography and deep earth-surface processes in 4D[J]. *Tectonophysics*, 2009, 474: 4-32.
- [38] 刘树根, 邓宾, 李智武, 等. 盆山结构与油气分布——以四川盆地为例[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 621-635.
- [39] Liu S G, Deng B, Li Z G, et al. Architecture of basin-mountain systems and their influences on gas distribution: A case study from the Sichuan basin, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47(1): 204-215.
- [40] Faulkner D R, Jackson C A L, Lunn R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32: 1557-1575.
- [41] 苏劲, 张水昌, 杨海军, 等. 断裂系统对碳酸盐岩有效储层的控制及其成藏规律[J]. 现代地质, 2010, 31(2): 196-203.
- [42] 郭光辉, 杨海军, 屈泰来, 等. 塔里木盆地塔中隆起断裂系统特征及其对海相碳酸盐岩油气的控制作用[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 793-805.
- [43] 付广, 孟庆芬. 断层封闭性影响因素的理论分析[J]. 天然气地球科学, 2012, 13(3/4): 40-44.
- [44] Grunau H R. Worldwide review of seals for major accumulations of natural gas[J]. *AAPG Bulletin*, 1981, 65: 933.
- [45] 潘国恩, 杨传忠. 中国南部海相碳酸盐岩油气保存条件[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 333-343.
- [46] 马永生, 楼章华, 郭彤楼, 等. 中国南方海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 406-417.
- [47] Dewing K, Obermajer M. Lower Paleozoic thermal maturity and hydrocarbon potential of the Canadian Arctic Archipelago[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2009, 57(2): 141-166.
- [48] 金之钧, 周雁, 云金表, 等. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 715-724.
- [49] 康玉柱. 全球主要盆地油气分布规律[J]. 中国工程科学, 2014, 16(8): 14-25.
- [50] McIntyre J F. Presence and control of evaporite top seals on occurrence and distribution of hydrocarbon traps: main fairway, central overthrust belt, Wyoming and Utah. (abs.)[C]// Annual meeting of the American Association of Petroleum Geologists, Houston, TX, USA, 1988, 72: 2.
- [51] 林小云, 刘建. 中、下扬子区构造演化与海相地层成藏主控因素分析[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(6): 23-26.
- [52] 周雁, 金之钧, 朱东亚, 等. 油气盖层研究现状与认识进展[J]. 石油实验地质, 2012, 34(3): 234-245.
- [53] 陈劲人, 彭秀美. 从三轴抗剪抗压实验看埋深对区域盖层遮挡性能的影响[J]. 石油实验地质, 1994, 16(3): 282-289.
- [54] 戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 473-480.
- [55] 袁玉松, 范明, 刘伟新, 等. 盖层封闭性研究中的几个问题[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 336-340.

- [56] 梁杰,陈建文,张银国,等.南黄海盆地中、古生界盖层条件[J].现代地质,2016,30(2):353-360.
- [57] 张鹏辉,梁杰,陈建文,等.海相页岩气储层特征研究进展与发展动态[J].海相油气地质,2017,22(4):69-76.
- [58] 刘伟新,承秋泉,范明.盖层、压力封盖和异常压力系统研究[J].石油实验地质,2011,33(1):74-80.
- [59] 杨传忠,张先普.油气盖层力学性质与封闭性关系[J].西南石油学院学报,1994,16(3):7-13.
- [60] 鲁雪松,蒋有录,宋岩.盖层力学性质及其应力状态对盖层封闭性能的影响——以克拉2气田为例[J].天然气工业,2007,27(8):48-51.
- [61] 秦建中,刘伟新,范明,等.泥岩研究与盖层评价技术[J].石油实验地质,2013,35(6):689-693.
- [62] 张仲培,王毅,李建交,等.塔里木盆地巴-麦地区古生界油气盖层动态演化评价[J].石油与天然气地质,2014,35(6):839-852.
- [63] Sales J K. Seal strength vs. trap closure; a fundamental control on the distribution of oil and gas[C]// Surdam R C. Seals, traps, and the petroleum system. AAPG Memoir, 1997, 67:57-83.
- [64] 冯乔,汤锡元.岩浆活动对油气藏形成条件的影响[J].地质科技情报,1997,16(4):59-65.
- [65] 李明诚,李伟,蔡峰,等.油气成藏保存条件的综合研究[J].石油学报,1997,18(2):41-48.
- [66] 李双建,高波,沃玉进,等.中国南方海相油气藏破坏类型及其时空分布[J].石油实验地质,2011,33(1):43-49.
- [67] Lee G H, Kwon Y I, Yoon C S, et al. Igneous complexes in the eastern Northern South Yellow Sea Basin and their implications for hydrocarbon systems[J]. Marine and Petroleum Geology 2006, 23: 631-645.
- [68] 戴诗华,赵辉,姜淑云.用于计算火成岩储层基质孔隙度的首选测井曲线[J].天然气工业,2014,34(1):58-63.
- [69] 刘崇禧.水化学找油的理论与应用效果[J].地球化学,1989(2):175-180.
- [70] 汪蕴璞,林锦璇,汪林.论含油气盆地含水系统和水文地质期的划分[J].地球科学:中国地质大学学报,1995,20(4):393-398.
- [71] 李明诚,李剑,万玉金,等.沉积盆地中的流体[J].石油学报,2001,22(4):13-17.
- [72] 楼章华,李梅,金爱民,等.中国海相地层水文地质地球化学与油气保存条件研究[J].地质学报,2008,82(3):387-396.
- [73] Yahia N, Schaefer R G, Littke R. Petroleum generation and accumulation in the Berkine basin, Eastern Algeria [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(8):1439-1467.
- [74] 刘方槐,颜婉荪.油气田水文地质学原理[M].北京:石油工业出版社,1991.
- [75] 王国芝,刘树根.海相碳酸盐岩区油气保存条件的古流体地球化学评价——以四川盆地中部下组合为例[J].成都理工大学学报:自然科学版,2009,36(6):631-643.
- [76] Ungerer P, Burrus J, Doligez B, et al. Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation and migration [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(3): 314-319.
- [77] Li Mingcheng. Characteristics and quantitative modeling of natural gas migration in a clastic rock series[J]. Organic Geochemistry, 1994, 21(3/4):351-358.
- [78] 牟中海,唐勇,崔炳富,等.塔西南地区地层剥蚀厚度恢复研究[J].石油学报,2002,23(1):40-44.
- [79] Lisk M, O'Brien G W, Eadington P. Quantitative evaluation of the oil-leg potential in the Oliver gas field, Timor Sea, Australia[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(9): 1531-1542.
- [80] Liu K Y, Eadington P J, Middleton H, et al. Applying quantitative fluorescence techniques to investigate petroleum charge history of sedimentary basins in Australia and Papuan New Guinea[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 57: 139-151.
- [81] Pang H, Chen J Q, Pang X Q, et al. Estimation of the hydrocarbon loss through major tectonic events in the Tazhong area, Tarim Basin, west China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012,38:195-210.
- [82] 马力,叶舟,梁兴.南方重点盆地海相油气勘探新进展[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [83] 梁兴,叶舟,马力,等.赋予含油气系统内涵的南方海相含油气保存单元及其类型分析[J].海相油气地质,2003,8(3/4):80-88.
- [84] 梁兴,叶舟,马力,等.中国南方海相含油气保存单元的层次划分与综合评价[J].海相油气地质,2004,9(1/2):59-76.
- [85] 沃玉进,汪新伟,袁玉松,等.中国南方海相层系油气保存研究的新探索——“保存系统”的概念与研究[J].石油实验地质,2011,33(1):66-73.

HYDROCARBON PRESERVATION ANALYSIS FOR MARINE STRATA IN SUPERIMPOSED BASINS OF CHINA

ZHANG Penghui¹, LIANG Jie^{2,3,4*}, CHEN Jianwen^{2,3}, BAO Yanjun¹,
GONG Jianming^{2,3}, ZHANG Yinguo^{2,3,5}, YUAN Yong^{2,3}, WANG Jianqiang^{2,3}

(1 College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;
4 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
5 School of Geosciences, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The formation and evolution of superimposed marine basins in China usually experience two main stages: the formation stage and the reconstruction stage. Tectonic movements determine the difference of hydrocarbon accumulation and preservation conditions of the marine strata in the basins. Architecture of the basin-mountain systems formed by the basin and its surrounding orogenic belts determine the superiority and inferiority of the oil and gas preservation conditions. Gypsolyte/saline rocks and shales are the two major caprocks in superimposed basins, and the sealing effectiveness of caprocks in the multi-stage tectonic changes is an important condition for oil and gas preservation. The temporal relationship between magmatic activity and hydrocarbon generation as well as migration is closely related to hydrocarbon preservation. Hydrogeochemical and paleo-fluid geochemical characteristics of groundwater can be used as the indexes for evaluation of oil and gas preservation conditions. The simulation of oil and gas accumulation and escape provides a new idea for the quantitative study of oil and gas preservation conditions. The concepts of oil and gas preservation unit and preservation system and related evaluation system can properly reflect the partition of hydrocarbon preservation conditions. Upon the basis of regional tectonic evolution to evaluate the hydrocarbon preservation conditions through multiple perspectives of marine strata in superimposed basins, has been improved of an efficient performance for trap selection and exploration strategy determination for marine oil and gas accumulations.

Key words: hydrocarbon preservation; marine strata; hydrocarbon accumulation; superimposed basin