

塔里木盆地叠合演化与油气聚集

郑孟林¹,王毅²,金之钧²,李京昌²,张仲培²,蒋华山³,谢大庆³,郭忻³

(1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依834000;2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京100083;3. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院,新疆乌鲁木齐830011)

摘要:根据前人成果和石油勘探资料,对塔里木盆地进行了解剖,认为自寒武纪以来,它经历了寒武纪—志留纪—泥盆纪、石炭纪—二叠纪、三叠纪—侏罗纪、白垩纪—新生代等四大构造演化阶段。寒武纪—泥盆纪盆地演化阶段受周缘板块裂离与汇聚的控制,以碳酸盐岩、膏盐岩和碎屑岩建造为特征,盆地基底整体由早期的西高、东低向东高西低翘倾转变,中奥陶世末的构造事件形成了沙雅、塔中和塔西南古隆起,志留纪晚期的构造事件导致了盆地的整体隆升与剥蚀。石炭纪—二叠纪进入陆表海盆地和陆内拗陷演化阶段,以碳酸盐岩和膏泥岩建造为主要特征,整体表现为西南降、东北抬的构造格局。二叠纪沉积末的构造事件导致了盆地隆升与剥蚀,北部构造变形、剥蚀强烈。三叠纪形成了南、北山前拗陷和台内拗陷盆地,侏罗纪沉积主要在山前拗陷。自白垩纪—古近纪,盆地整体沉降,发生了海侵,逐渐形成大型陆内拗陷盆地,白垩纪末构造事件导致了巴楚隆起的初步形成和地层的剥蚀,新近纪晚期的构造事件形成库车、塔西南前陆盆地和中央隆起带。盆地叠合演化形成了中—下寒武统、中—上奥陶统、三叠系—侏罗系等多套富含有机质的烃源岩,与盆地内叠合联片发育的中—下寒武统膏泥岩、上奥陶统泥岩、石炭系膏泥岩、三叠系—侏罗系泥岩、煤系和古近系—新近系膏盐岩、泥岩构成了盆地内最佳的源盖组合,成为油气富集的基础。碳酸盐岩岩溶储层、碎屑岩中的砂岩储层与构造作用形成的圈闭形成了盆地良好的储—圈组合,成为油气富集的必要条件。盆地的多期叠合演化形成了台盆区下组合、中组合和山前拗陷区上组合三大勘探层系。勘探成果显示,古隆起、古斜坡和烃源岩的分布控制盆地内油气分布。

关键词:古隆起;古斜坡;油气聚集;叠合演化;塔里木盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Superimposition, evolution and petroleum accumulation of Tarim Basin

Zheng Menglin¹, Wang Yi², Jin ZhiJun², Li Jingchang², Zhang Zhongpei², Jiang Huashan³, Xie Daqing³, Guo Xin³

(1. Petroleum Exploration and Development Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China 2. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China 3. Exploration and Production Research Institute, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: According to previous research and petroleum exploration data, Tarim Basin has experienced four evolution stages: the Cambrian-Devonian faulted basin, the Carboniferous-Permian basin, the Triassic-Jurassic intra-continental basin and the Cretaceous-Cenozoic large basin. The evolution of the Cambrian-Devonian basin was controlled by the peripheral plates splitting and convergence and was characterized by clastic, evaporite and carbonate build-ups. The basement had a structural pattern of west uplifting and east depressing from the Cambrian to Ordovician. The Late middle Ordovician tectonic events lead to the formation of the Shaya uplift, Tazhong uplift and Hetian paleo-uplift. The Late Silurian tectonic events led to the uplift and erosion of the basin as a whole. The Carboniferous - Permian basin was characterized by epicontinental sedimentary and intra-continental depression evolution of carbonates, gypsum-salt and clastic rocks. The basement had a structural pattern of southwest depressing and northeast uplifting in this stage. At the end of Permian, tectonic events led to the uplift and erosion of the basin. In the Triassic, the southern and northern piedmont depression and an intra-platform depression were formed. The Jurassic basin only existed on the front tectonic belt. From the Cretaceous to Paleogene, the Tarim gradually formed a large-scale intra-continental basin. The sea water invaded Basin again. At the end of Late Cretaceous, tectonic events led to the demise of the basin and the overall uplifting. The Late Cretaceous deposits were limited in the southwest and east Tarim. Kuche and southwest Tarim foreland basin formed because of tectonic event of the Late Neogene. Evolution of the superposed basins led to the formation of several sets of organic-rich source rocks,

收稿日期:2014-11-14;修订日期:2014-11-20。

第一作者简介:郑孟林(1968—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail: zhengmlbasin@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-001)、(2011ZX05-005-004)。

such as the Lower-Middle Cambrian, Middle-Upper Ordovician, Triassic, Jurassic. The gypsum, salt, mud and coal-bearing rocks developed in the Cambrian, Ordovician, Carboniferous, Triassic, Jurassic, Paleogene and Neogene are good seals. These seals and source rocks consist of high-quality combination within the basin. Carbonate karst reservoirs and sandstone reservoirs and the structural traps consist of favorable reservoir-trap combinations. The lower, middle and upper assemblages are favorable sequences for exploration in the basin. Exploration results show palaeohigh, paleoslopes and ancient source rocks control oil and gas distribution of the basin

Key words: paleo-uplift, paleo-slope, petroleum accumulation, superposed evolution, Tarim Basin

塔里木盆地现今在地貌上被天山、喀喇昆仑山、阿尔金山所围限,大致以新生界的残余分布为边界,面积约为 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。它是赋存于塔里木板块之上的多期叠合盆地^[1-5],盖层自南华系到新生界都有不同程度的发育。前人从板块构造演化及对盆地沉积的控制^[1,6]、盆地叠合演化及其对油气的控制^[7]以及叠合不整合对油气的控制作用^[8-10]等多方面进行了研究,对盆地与造山带的结合部位以及对盆地内古隆起、油气成藏的研究成果更是丰富^[11-15]。目前,盆地已经发现了中国最大的海相油气田——塔河油田,在震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系等都有工业油气发现,石油探明储量主要在台盆区的古生界,天然气的探明储量主要在山前的中、新生界。地质家们对塔里木盆地的复杂性基本达成了共识,明确了盆地多旋回的叠合性。笔者通过盆地钻井、地震资料重新进行编图,明确了盆地演化的关键构造

事件,对盆地叠合的迁移演化及油气聚集规律进行重新解剖、分析。

1 盆地地质结构

塔里木盆地被南天山造山带、西昆仑造山带和阿尔金构造带所围限(图1),表现为造山带(构造带)向盆地的逆冲推覆或冲断。盆地深层与浅层构造变形的差异,又显示了盆地演化的复杂性(图2)。

1.1 盆地山前构造特征

南天山造山带与盆地的接触关系复杂,走向上具有分段性,东段为造山带的志留系与库鲁克塔格隆起元古界的变质岩系和浅变质岩系之间的断裂接触,发育一组北西向—近东西向的走滑—逆冲断裂(图1),库鲁克塔格隆起与孔雀河斜坡为高角度逆冲接触,前者残存着寒武系、奥陶系,说明成盆演化期

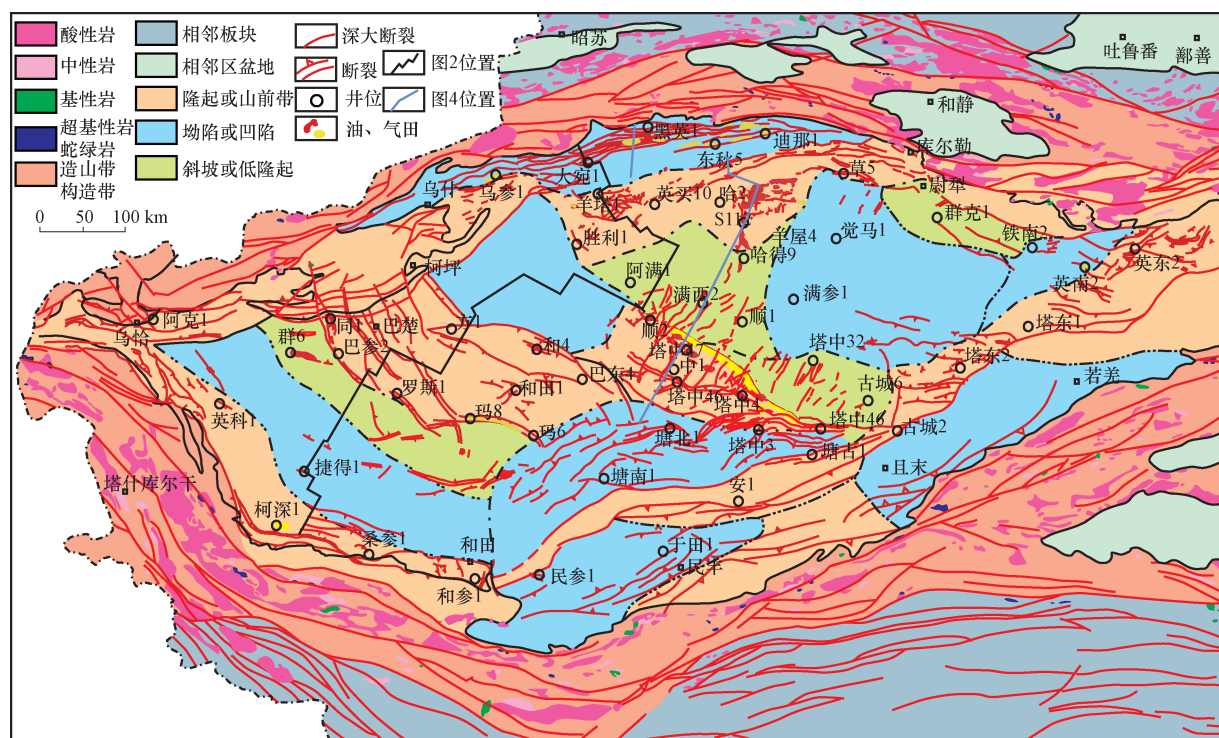


图1 塔里木盆地构造区划

Fig. 1 Tectonic division of Tarim Basin and its adjacent area

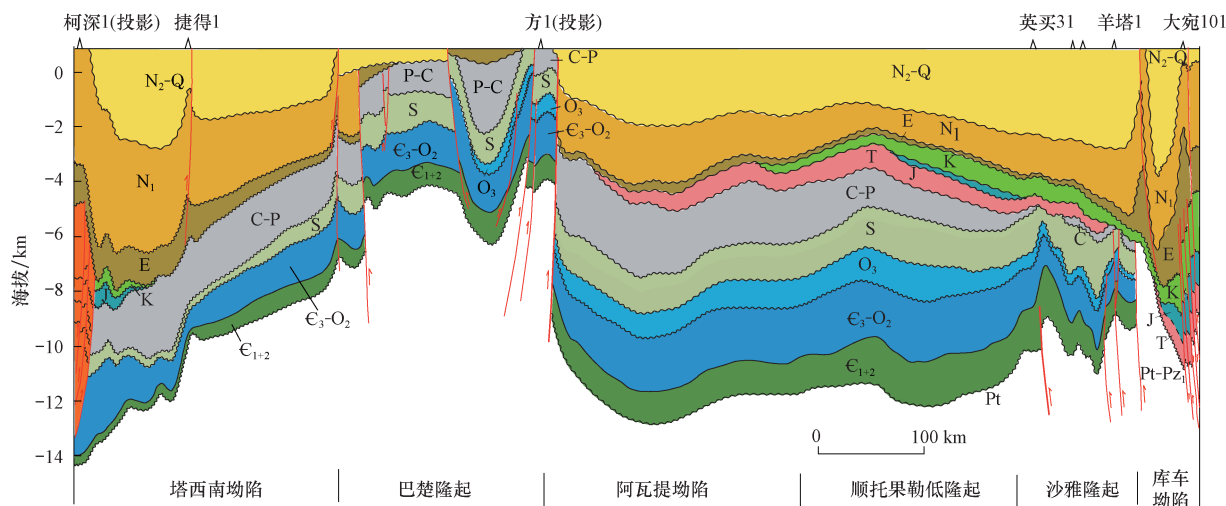


图2 塔里木盆地南北向地质结构剖面

Fig. 2 SN geological section of Tarim Basin

是盆地组成部分。中、东段为库车坳陷与造山带的接触区段,表现为造山带向盆地的逆冲推覆作用,呈北东东向展布,并见二叠系、三叠系、侏罗系与造山带的志留系、泥盆系不整合接触,逆冲作用导致库车坳陷内部地层变形(图2),形成了山前单斜带、克拉苏-依奇克里克构造带、秋里塔格构造带^[15],构造变形影响的最新地层为第四系^[12,16]。中、西段为南天山造山带、柯坪逆冲推覆带组成的叠瓦状褶断带,与巴楚隆起近于垂直相交,最新构造的活动时限为上新世-第四纪。西段近东西向展布于喀什北部,为一组由北向南的双重推覆构造组成,山前形成喀什凹陷,与西昆仑造山带的帕米尔构造结形成对冲作用。

西昆仑造山带与盆地之间整体表现为断裂冲断构造,并在山前形成坳陷带,构造变形最新时限与库车坳陷一致,形成的山前冲断带限于山前,坳陷区构造变形微弱(图2)。受印度板块向北俯冲形成的帕米尔构造结的影响,走向上分为3段,西段为帕米尔构造结的北部前端,近东西向展布,与南天山造山带形成对冲构造。中段为帕米尔构造结的东翼,北西向展布,在齐姆根见石炭系碳酸盐岩以低角度推覆于白垩系紫红色碎屑岩之上,二叠系褶皱构造被白垩系不整合覆盖。地震资料显示盆地在山前主要为双重构造模式。东段为近东西向展布的由南向北叠瓦状逆冲的推覆构造。泽普西南见变质岩之上不整合覆盖了奥陶系的石英砂岩,向上逐渐过渡为砂岩、碳酸盐岩互层、泥灰岩,铁克里克、皮亚曼、杜瓦南部变质岩系之上不整合覆盖着石炭系碎屑岩、碳酸盐岩和二叠系的砾岩、粗砂岩,说明塔里木盆地在不同的成盆期具有不同的隆坳构造背景。

阿尔金构造带的北缘断裂为车尔臣-星星峡断裂,南缘断裂为阿尔金断裂,其间所夹持的部分常称为

阿尔金构造带^[17-18]。近年的勘探资料显示,车尔臣-星星峡断裂呈北东向舒缓波状展布(图1),是塔东南坳陷与其它构造单元的一级构造区划线,表现为一组向盆地高角度逆冲的断裂带,走向具有分段性,塔中隆起以南区段构造活动性强,断裂由南东向北西逆冲,下盘地层保存完整,塘古孜巴斯坳陷上奥陶统向断裂方向楔型增厚,并在下盘形成次级逆冲带,断裂上盘残存的石炭系-二叠系、侏罗系及新生界不整合于元古宇之上。塔中隆起以东区段的断裂主要活动期在前石炭纪,见石炭系、侏罗系将断裂不整合覆盖,下盘形成的一组近东西向展布的次级断层主要发育在志留系及以下层位。

1.2 盆地地质结构

塔里木盆地的构造区划依据了现今前寒武系顶面的埋深,整体表现为三坳(库车坳陷、阿瓦提-满加尔坳陷、塔西南-塘古孜巴斯坳陷)夹两隆(沙雅隆起、巴楚-塔中-古城墟隆起)的构造格局(图1)。笔者根据钻井、地震资料,结合前人研究成果,应用回剥法对不同时期的地层残余分布进行了编图,以揭示盆地结构特征。①寒武系-中、下奥陶统剥蚀最为强烈地区为塔中-塔西南和沙雅隆起北部-库车坳陷地区,塔中隆起和巴楚隆起的南缘一间房组残存分布(图3a)。车尔臣-星星峡断裂右侧的元古宇与塔中隆起鹰山组、塘古孜巴斯坳陷一间房组断层接触。一间房组的在塘古孜巴斯的残存分布显示了上奥陶统沉积前塘古孜巴斯构造坳陷已经形成,为该区晚奥陶世前陆盆地的形成奠定了基础。在上奥陶统沉积前,塔中、塔西南和塔北地区大面积暴露为碳酸盐岩岩溶孔洞的发育奠定了基础。②根据年代学资料和地质勘探资料^[19-20],志留系沉积前,沙雅隆起北部断裂活动强烈,

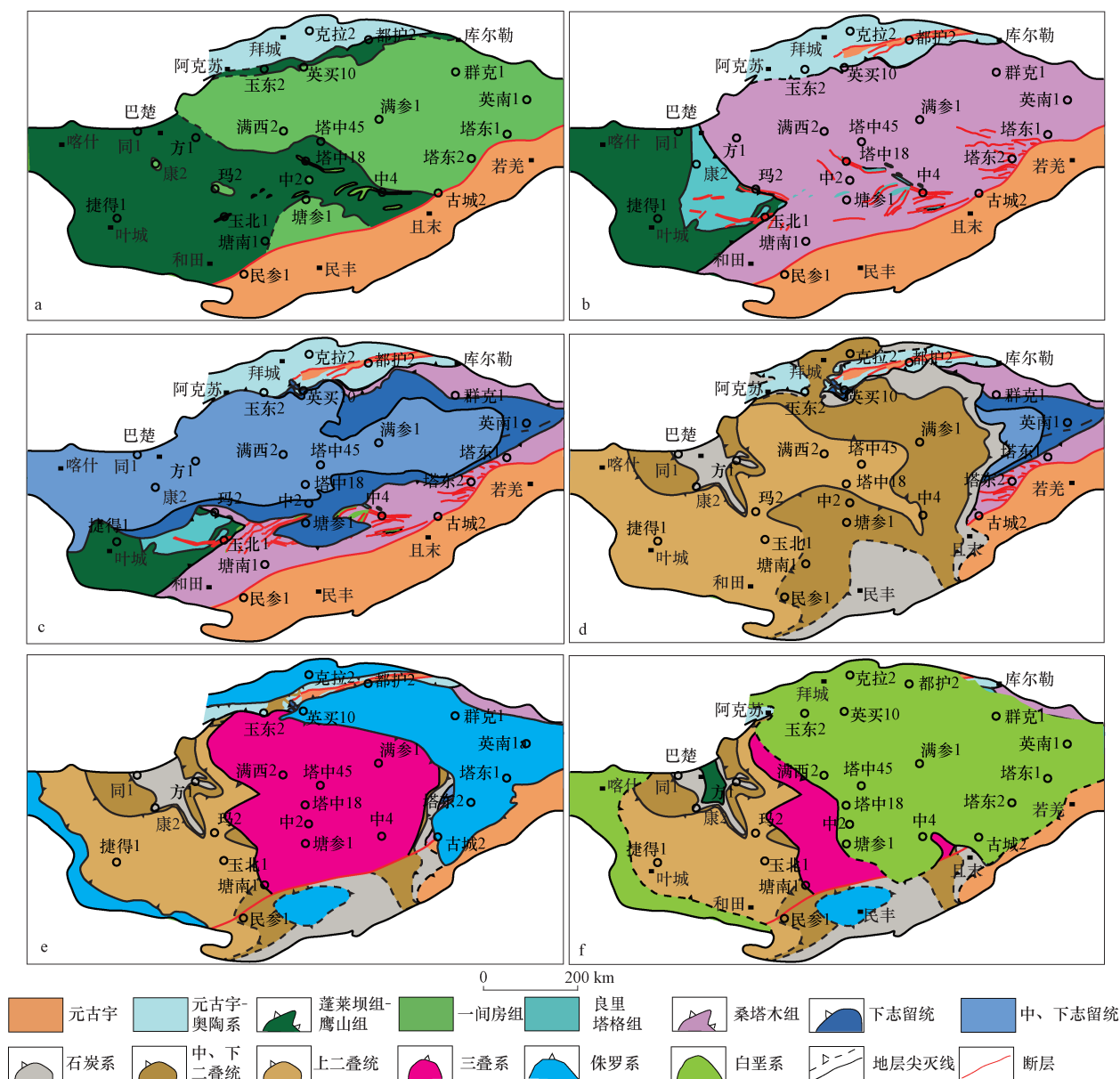


图3 塔里木盆地不同地层沉积前古地质图

Fig. 3 Paleogeological map of Tarim Basin

a. 前晚奥陶世; b. 前志留纪; c. 前石炭纪; d. 前三叠纪; e. 前白垩纪; f. 前新生代

元古宇已经抬升暴露,成为志留系的物源区。塔西南的西部奥陶系碳酸盐岩继续遭受了隆升剥蚀,塔西南部与塔中隆起地区的鹰山组被上奥陶统良里塔格组-桑塔木组覆盖(图3b),仅在断隆高部位暴露剥蚀。③钻井与地表露头资料证实克孜尔塔格组与依木干他乌组为整合接触,根据古生物和地层岩性^[21-22]及志留系沥青砂岩的广泛分布等综合分析,认为塔里木盆地内缺失了泥盆系,克孜尔塔格组为志留系。志留系残存于盆地中部(图3c),北、南部存在两个剥蚀区。塔西南的西部被志留系不整合覆盖,奥陶系在东部以及车尔臣-星星峡断裂的西侧广泛暴露,北部广泛见志留系不整合于中下奥陶统之上^[20]。④将中生界剥掉(图3d),下伏地层曾发生了自北东向南西的抬升、剥蚀,同时受到了北西向构造的控制,主要表现为

东部、北部、民丰、巴楚地区的隆升。另一重要认识是在库车-沙雅隆起区,二叠系沉积前的石炭系曾经遭受了抬升剥蚀,中、下二叠统不仅不整合在被剥蚀的石炭系之上,还不整合在下古生界碳酸盐岩层系之上(图3d)。地层的残存分布也说明三叠系与下伏地层之间完全表现为不整合接触。⑤三叠系残存于盆地中部和库车坳陷区,向巴楚方向表现为强烈的剥蚀尖灭,原始沉积具有向巴楚方向增厚的趋势,显示了侏罗系沉积前塔西南-巴楚地区的强烈隆升剥蚀。侏罗系仅残存于盆地边缘的山前,东部将车尔臣-星星峡断裂不整合覆盖(图3e),车尔臣-星星峡断裂的东段在侏罗纪后活动微弱。新生界沉积前,巴楚隆起、麦盖提斜坡和塘古孜巴斯南部以及民丰地区形成了北西向展布的剥蚀区,这可能是巴楚隆起的雏形。根据上述残存地层

的分布及所表现出的不整合面特征,塔里木盆地沉积盖层可划分为寒武系-中奥陶统、上奥陶统、志留系、石炭系-二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系-第四系等构造层序。

断裂构造是控制盆地隆坳格局的另一重要因素。盆地内部的断裂构造呈规律性分布,存在以下几组断裂(图1)。

1) 呈北西-近东西向展布的断裂,主要发育在巴楚隆起和塔中隆起,控制了二者的展布与发育特征。塔中隆起是受塔中Ⅰ号断裂带和南缘断裂带控制的复背斜构造带,上被良里塔格组、桑塔木组及以上地层不整合覆盖,中部被塔中Ⅱ号断裂带和塔中10井断裂带和一系列的北东向断层复杂化^[23-24]。巴楚隆起的断裂多数被上新统-第四系不整合覆盖,西段断裂为北西向,北部边界为阿恰断裂带,南部为色力布亚、海米罗斯断裂带。东段断裂呈近东西向,北部为吐木休克断裂带,南部为玛扎塔格断裂带。边界断裂都表现为自隆起向南、北拗陷的高角度冲断,南缘断裂带的浅层以古近系膏泥岩为滑脱层,在古近系-第四系形成自南而北的滑脱逆冲,叠加在深层断层之上。隆起内部发育的卡拉沙依断裂、古董山断裂、巴楚断裂等将隆起构造复杂化(图2)。

2) 北东东向断裂控制了沙雅隆起的展布,隆起北部的雅克拉断凸南、北分别受北东东向轮台断裂带-沙雅断裂带-红旗断裂带和提尔根北断裂带-亚南断裂带-大尤尔都斯断裂带-羊塔克断裂带的控制,两条边界断裂带在平面上都呈雁列式组合,控制了该区元古宇和下古生界的展布^[20]。隆起西部、南部发育了北西、近南北、近东西和北东向的高陡断裂构造。

3) 在塘古孜巴斯拗陷和塔中隆起南部发育一组与车尔臣-星星峡断裂近于平行的断裂,该组断裂以中、下寒武统的膏泥岩为滑脱层,自北西向南东叠瓦状逆冲^[25],与车尔臣-星星峡断裂形成对冲,该组断裂构造被志留系及以上地层不整合覆盖,后期活动微弱。另一组北北东向断裂构造发育在塔中隆起及其北部斜坡、顺托果勒低隆起,结合阿克库勒凸起、草湖地区发育的北北东向断裂,认为自塔中隆起向北到沙雅隆起南部,普遍发育了该组断裂,断裂陡直,具有走滑特征,可形成雁列组合,主要发育在志留系及以下层位,少数断至二叠系。

4) 在古城墟隆起发育一组近东西向展布与车尔臣-星星峡断裂大角度相交的断裂,该组断裂主要发育在桑塔木组及以下层位,是车尔臣-星星峡断裂活动形成的次生断层。

综上所述,塔里木盆地现今的沙雅、塔中、巴楚隆起都受断裂构造控制形成,但三大隆起断裂活动时代

存在差异,塔中隆起断裂的主要活动在中奥陶世末,后期活动较弱,沙雅隆起断裂主要活动在奥陶纪末,存在多期活动,巴楚隆起断裂的活动在上新统沉积前。与车尔臣-星星峡断裂相关的断裂主要活动在奥陶纪末。这些断裂的活动控制了盆地地层残存分布、构造变形,最终形成现今的地质结构。

2 盆地叠合演化

塔里木盆地多期叠合演化受到板块边缘构造活动的控制,根据上述盆地结构、构造的发育特征,结合区域演化和盆地演化旋回性特点,将早古生代以来盆地演化划分为寒武纪-泥盆纪、石炭纪-二叠纪、三叠纪-侏罗纪、白垩纪-第四纪等四大构造演化阶段。正是这种多阶段的演化导致了不同性质的盆地在空间上的叠合。

2.1 寒武纪-泥盆纪盆地演化

寒武纪一早、中奥陶世,塔里木板块在周缘伸展构造背景中整体沉降,形成了规模宏大的板内拗陷盆地,沉降中心在塔东地区。早、中寒武世,盆地中部形成蒸发岩台地,沉积了泥岩和数百米的膏泥岩,是下古生界重要的烃源岩-盖层发育层系。晚寒武世-中奥陶世全盆为碳酸盐岩建造,塔东地区为泥灰岩夹泥岩建造。

中奥陶世末,库地洋向塔里木板块的俯冲,导致盆地内发生强烈的构造变形,塔中隆起、沙雅隆起形成,塔西南地区整体强烈抬升,形成规模宏大的和田古隆起(图3a)。塔中地区寒武系-中奥陶统发生褶皱变形和断裂冲断作用,塘古孜巴斯构造拗陷形成。区域地层对比显示巴楚隆起区和塔中隆起主体部位都缺失恰尔巴克组,上奥陶统良里塔格组、桑塔木组直接覆盖在一间房组和鹰山组-蓬莱坝组之上,是该次构造运动的表现。

晚奥陶世,中昆仑地块、阿尔金地块向塔里木板块汇聚,盆地的沉积表现为自满加尔、塘古孜巴斯拗陷向隆起区的海侵,在和田古隆起、塔中隆起的边缘形成了环带状的礁滩相建造。北部的沙雅隆起区主体在南喀1-沙雅-沙3一线,呈北东东向展布,在南缘坡折带形成礁滩相建造。晚奥陶世末,阿尔金地块、中昆仑地块分别与塔里木板块拼贴,满加尔拗陷、塘古孜巴斯拗陷消亡,车尔臣-星星峡断裂带在塔里木盆地东南缘形成。塘古孜巴斯拗陷发育了与车尔臣-星星峡断裂带同向的塘北-玉北逆冲断裂构造,同时受中昆仑地块拼贴的挤压作用,玉北地区的断裂又兼有走滑特征。沙雅隆起的雅克拉断凸在这次构造事件中发生了

较为强烈冲断作用^[20],元古宇抬升至地表,成为志留纪盆地的物源区(图3b)。

志留纪与奥陶纪相比,盆地基底由早期的东降西升转变为西降东升的构造格局,沿柯坪—阿瓦提—满西1—尉犁南形成近东西向板内坳陷盆地,沙雅隆起—塔中东部—塘古孜巴斯东部以及塔西南东部环坳陷形成了隆起带。志留系向隆起区漫延沉积,到克兹尔塔格组沉积时期,现今的巴楚隆起区西段被海水淹没成为沉积区(图3c),克兹尔塔格组在方1井北的阿瓦提凹陷厚度为3 000 m,方1井南的夏河地区厚度小于1 600 m。志留纪晚期发生的构造事件,导致全区遭受了或超过37 Ma年的隆升剥蚀,直到东河砂岩沉积前,这一剥蚀作用导致了志留系油藏遭受破坏。在该构造事件中,早期形成的塔中I号断裂、主垒带断裂、塘北断裂带再次活动,塔中地区的北东向断裂形成。库鲁克塔格地区遭受了强烈的剥蚀。

2.2 石炭纪—二叠纪盆地演化

石炭系不整合覆盖在库尔勒北部隆起的老变质岩之上,南部的铁克里克和皮亚曼地区前石炭系变质岩系也被石炭系不整合覆盖。盆地内早期的隆起在石炭纪被海相碎屑岩、碳酸盐岩覆盖,整体为浅水陆表海盆地,沉积范围广泛,并在巴楚、塔河地区形成了膏泥岩建造,成为盆地的重要盖层层系。石炭纪末,盆地发生了区域性抬升作用,石炭系碳酸盐岩顶面遭受剥蚀^[26],古生物资料显示石炭系和二叠系之间缺失 *Pseudoschwagerina* 带、*Triticites* 带和 *Protriticites* 带^[27-28],盆地北部抬升剥蚀强烈。二叠纪是塔里木盆地海陆沉积转换重要时期,早二叠世早期沉积局限在塔西南、巴楚及和田河地区,为海相碳酸盐岩台地沉积(南闸组),随着甜水海、可可西里地块向北汇聚、南天山洋西段的逐渐关闭,海水退出塔里木盆地,早二叠世中、晚期形成湖相盆地,并向北部、东部超覆沉积覆盖在石炭系之上。中二叠世,盆地火山活动强烈,南部、西部以中基性火山岩、侵入岩为主,北部塔河地区以中酸性火山岩建造为主,在库车—沙雅地区的火山岩不整合在下古生界之上(图3d)。火山活动后,盆地发生了区域性沉降,大型湖泊盆地形成,以碎屑岩建造为主,该时期的沉降中心主要在塔西南地区,是盆地重要烃源岩形成区域。二叠纪末,甜水海地块、可可西里地块向北的拼贴作用,使得塔里木盆地发生隆升、剥蚀,北部构造隆升、变形比南部强烈,地层剥蚀受到北西向构造控制。

2.3 三叠纪—侏罗纪盆地演化

三叠系在沙雅隆起南北两侧形成了沉积坳陷,北

部为库车坳陷,是山前重要的烃源岩层系。南部在满加尔—阿瓦提—塔中—塘古孜巴斯—巴楚隆起的东北部形成沉积坳陷,北向沙雅隆起区超覆沉积,该时期的沙雅隆起涵盖了库车坳陷的南斜坡,是南北两大沉积坳陷的物源区。南部沉积边界无法准确圈定,根据地震资料,地层向南为削蚀减薄,地层趋势向南增厚。对盆地原始面貌进行恢复,三叠纪在塔西南地区应该存在沉积坳陷,当时的盆地格局应该是三坳(塔西南坳陷、台内坳陷和库车坳陷)夹两隆(沙雅隆起、巴楚隆起)的构造格局。三叠纪末盆地消亡。南部较北部隆升强烈,三叠系剥蚀殆尽。侏罗纪,盆地形成于周缘山前和满加尔坳陷区(图3e),以不同时期的老地层为盆地基底,形成了一套含煤岩系,成为库车坳陷的重要烃源岩系。侏罗纪末的构造事件导致了盆地的消亡。

2.4 白垩纪—新生代盆地演化

塔里木盆地下白垩统分布于塔北和塔西南地区,中间被隆起剥蚀区分隔(图3f),上白垩统残存于塔西南和塔东地区^[29],塔西南地区上、下白垩统整合接触,保存较全。其他地区下白垩统顶部也遭受了剥蚀^[29]。下白垩统为干旱环境冲积扇—辫状河三角洲粗碎屑岩沉积^[30-31],盆地内为相对较细的湖相—辫状河三角洲沉积^[29]。存在塔东北和塔西南两大沉积区,二者之间在沉积时期应为统一的沉积盆地。晚白垩世,塔西南地区自西向东发生海侵,沉积了灰色泥岩、砂岩、膏泥岩、泥灰岩、白云岩等。塔东地区的上白垩统古城组为陆相碎屑岩建造。尽管塔里木晚白垩世盆地地貌认识还不清楚,但白垩纪末的构造事件所导致的盆地区域性隆升剥蚀的状况清楚。

古近纪,印度板块与欧亚板块的碰撞作用还没有影响到塔里木地区^[32],塔里木盆地以巴楚隆起为界,形成了塔西南和库车两大坳陷区,地层向隆起超覆沉积。盆地内该时期广泛发育的正断层指示了处于弱伸展—剪切构造环境。盆地发生海侵,形成了一套蒸发环境的膏泥岩建造,成为山前坳陷区重要的盖层。新近纪,随着印度板块向欧亚大陆的俯冲加强,天山造山带和西昆仑造山带复活,山前坳陷持续加强,盆地中部沿巴楚和阿满坳陷南部形成了盆地中部巨大的隆起,分隔了南北两大坳陷区。中新世末是巴楚隆起的定型期,上新世后,山前冲断带构造活动强烈,柯坪隆起区的叠瓦状逆冲推覆构造形成。

3 盆地叠合对油气成藏的控制

塔里木盆地的叠合演化形成了具有油气勘探意义的下组合(下古生界)、具有油气封盖作用和勘探意义

的中组合(上古生界)、以及山前坳陷油气富集的上组合(中新生界)三大勘探层系(图4),构成了盆地复合油气成藏系统。盆地多期演化过程中形成的中、下寒武统、奥陶系、石炭系-二叠系、三叠系和侏罗系等多套烃源岩以及中、下寒武统、石炭系、古近系、新近系膏泥岩、泥岩等多套优质盖层,构成了盆地油气富集的基础,盆地多期改造过程中形成的古隆起、古斜坡以及山前冲断带构成盆地良好的储-圈条件。

3.1 多期叠合演化对优质源-盖组合及分布的控制

塔里木盆地存在台盆区中、下组合形成的优质源-盖组合(图4)。中、下寒武统和中上奥陶统烃源岩是台盆区油气富集的基础。寒武系烃源岩存在边缘坳陷欠补偿盆地浮游藻类有机相烃源岩和台内坳陷蒸发潟湖盐藻有机相烃源岩两类。下寒武统玉尔吐斯组磷质、硅质岩和黑色页岩厚32.7 m,见于西部柯坪露头区,有机碳含量(TOC)为7%~14%,镜质体反射率(R_o)为1.88%,属于高成熟烃源岩,该套烃源岩见于柯坪、库鲁克塔格露头区与盆地东部地区^[33],盆地内受巴探5-塔参1古隆起控制,分布于隆起内南、北部地区。中寒武统烃源岩与盆地内的膏泥岩共生共存,为泥质白云岩,含盐藻、球状甲藻等。巴楚隆起方1井、和4井均钻遇了该套烃源岩, TOC 值为0.5%~2.43%。盆地东部塔东1井中下奥陶统黑土凹组存在48 m厚的黑色页岩, TOC 为0.86%~2.67%, R_o 为2.13%,该套地层在塔中北坡、顺托果勒低隆起分布,属过成熟烃源岩。在柯坪地区中上奥陶统萨尔干组存在一套富含黄铁矿的黑色页岩,富含始球藻、波罗的球藻等浮游藻类, TOC 为0.5%~2.87%, R_o 为1.1%~1.3%,也是品质较好的烃源岩。上奥陶统良里塔格组灰泥丘相烃源岩在塔中北斜坡与轮南分布,为暗色泥灰岩、泥质条带灰岩及灰质泥岩等,富含各类底栖宏观藻、粘球形藻等, TOC 为0.5%~5.4%, R_o 为0.81%~1.3%,正处于生油高峰期^[33]。

对塔里木盆地地下古生界油气具有重要封盖意义的

区域盖层是中、下寒武统膏泥岩、上奥陶统泥岩和石炭系的膏泥岩、泥岩(图4)。中寒武统膏盐岩层分布于巴楚北部-塔中-顺托果勒低隆起以及阿瓦提坳陷等地区,最厚达400 m以上^[34],一般为100~300 m,对中、下寒武统烃源岩生成的天然气具有重要的封盖作用。上奥陶统泥岩在巴楚隆起、塔中隆起、阿瓦提坳陷、顺托果勒低隆起、满加尔坳陷以及沙雅隆起的南斜坡等广大地区连片发育,俗称“黑被子”,其厚度最厚可达8 000 m以上,在沙雅地区,厚度为50~200 m。卡塔克地区为0~200 m。塔西南地区缺失该套盖层。对塔中隆起、沙雅隆起中、下奥陶统碳酸盐岩岩溶油气藏具有重要的封盖作用。此外,志留系柯坪塔格组中下段暗色泥岩、柯坪塔格组上段泥岩和塔塔埃尔塔格组下段红色泥岩是盆地志留系油藏重要的盖层。对于盆地中组合,石炭系、二叠系烃源岩仅分布在塔西南地区,烃源岩对油气成藏的贡献还有待于进一步勘探与研究。对塔里木台盆区而言,石炭系的盖层对油气成藏具有重要作用。石炭系盖层主要发育在巴楚组下泥岩段、巴楚组中泥岩段及卡拉沙依组砂泥岩段,巴楚组下泥岩段粉砂质泥岩、泥岩和炭质泥岩分布在塔西南区和塔中西部地区,厚度达100 m。巴楚组中泥岩段的蒸发岩、泥岩等分布在塔河、满加尔坳陷、顺西以及巴楚隆起的南缘,厚度在100~500 m。卡拉沙依组泥岩、膏泥岩盖层厚度可达140 m。广泛发育于台盆区,对巴楚、塔中、沙雅三大隆起油气藏具有重要的封盖作用(图4)。

盆地上组合的源-盖组合主要发育在山前的库车坳陷、塔西南坳陷,以三叠系(库车坳陷)、侏罗系(库车坳陷、塔西南坳陷)煤系为烃源岩,以古近系、新近系的膏泥岩为主要盖层形成优质的源-盖组合。库车坳陷三叠系-侏罗系烃源岩分布面积超过 $2.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,基本覆盖了整个坳陷,沉积中心在克拉苏-依奇克里克一带,累积厚度超过900 m^[15],三叠系烃源岩 TOC 为0.36%~7.02%,侏罗系烃源岩 TOC 为0.35%~37.76%,西部成熟度较高, R_o 为1.35%~1.83%,东部

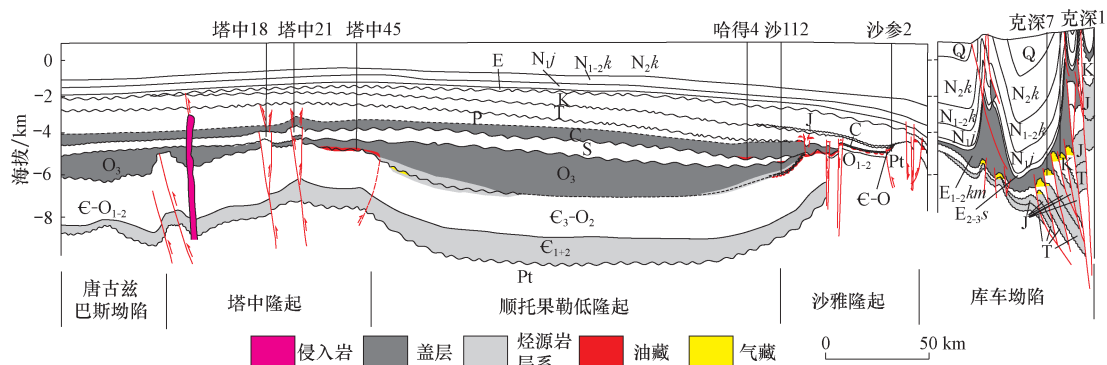


图4 塔里木盆地油藏剖面

Fig. 4 Reservoir profile of Tarim Basin

较低, R_o 为 0.56% ~ 0.79%^[35]。巨厚膏盐岩的发育是山前坳陷油气富集的重要原因(图4), 如克拉苏构造带古近系膏盐岩层厚度一般为 200 ~ 900 m, 局部超过 3 000 m。

3.2 叠合演化对圈-储及油气分布的控制

塔里木盆地自震旦系到第四系都发现了工业油气, 具有盆内富油, 山前富气的特征, 油气藏除受到烃源岩分布控制外, 由于碳酸盐岩储层形成的特殊性, 受到构造演化过程中形成的古构造和沉积相带(礁滩相)的控制。下组合发现的油气田主要受沙雅隆起、塔中隆起和田古隆起的控制, 中组合发现的油气受沙雅隆起、塔中隆起和顺托果勒低隆起的控制(图4), 具有次生油气藏的特征。上组合的油气主要聚集在库车、塔西南坳陷。

对塔里木盆地海相碳酸盐岩油气藏控制作用强烈的有上奥陶统沉积前形成的塔中古隆起、沙雅古隆起、和田古隆起以及在上新统沉积前定型的巴楚古隆起(图5), 前3个古隆起直到石炭纪才被埋藏。长期的隆升导致寒武系-奥陶系碳酸盐岩遭受了岩溶作用, 成为隆起区重要的岩溶储层。塔中隆起、沙雅隆起、巴楚隆起发现的油气田主要位于隆起的斜坡区(图4), 如塔河油田、塔中I号带相关油田都在隆起的翼部, 一方面与岩溶储层的非均质性有关, 另一方面与隆起高部位的封盖作用关系密切。在隆起的斜坡部位, 上奥陶统良里塔格组-中、下奥陶统碳酸盐岩岩溶储层与上奥陶统桑塔木组泥岩、石炭系泥岩、膏泥岩构成了良好的储盖组合, 形成构造-岩性-地层复合圈闭。在麦盖提斜坡的和田古隆起发育区, 中、下奥陶统碳酸盐

岩储层与石炭系泥岩盖层形成的储盖组合, 形成的圈闭受晚奥陶世末形成的断裂构造控制。

塔里木台盆区在石炭系-二叠系及三叠系-侏罗系-白垩系的成藏一般与断裂构造相关, 也与深层下组合碳酸盐岩大油田的存在密切相关, 如塔河油田的浅层发现的油藏都与断裂构造与深层油藏的连通有关(图4)。

上组合的油气主要在库车和塔西南山前坳陷区。特别是在库车坳陷, 发现了克拉2、大北、克深等大型气田, 具有满坳含气的趋势。这些大气田的富集除了受到了优质的源-盖条件的控制外, 山前构造带形成的与盐构造相关圈闭为天然气的富集提供了场所。克深-大北盐下深层发育一系列的逆冲断层(图5), 控制了构造圈闭的形成与展布, 并成为油气运移的重要的输导体, 膏盐岩使得这些断层在塑性盐层消亡, 被膏泥岩封盖(图4)。这些构造的形成与该区烃源岩的生烃高峰期具有良好匹配, 具备了生-储-盖-圈-运-保良好匹配优质条件, 形成了多个大型气田群^[15]。

4 结论

1) 塔里木盆地多期叠合演化受塔里木板块与周缘造山带的相互作用影响。从寒武纪-二叠纪, 盆地沉降中心经历了由东向西的翘倾转变。从侏罗纪到新生代, 经历了山前坳陷逐渐增强, 板内隆起由剥蚀区到沉降接受沉积, 大型盆地形成。正是这些复杂的多期的成盆演化过程导致了塔里木盆地地质结构的纵向分层性、横向分区性和构造变形的迁移性。

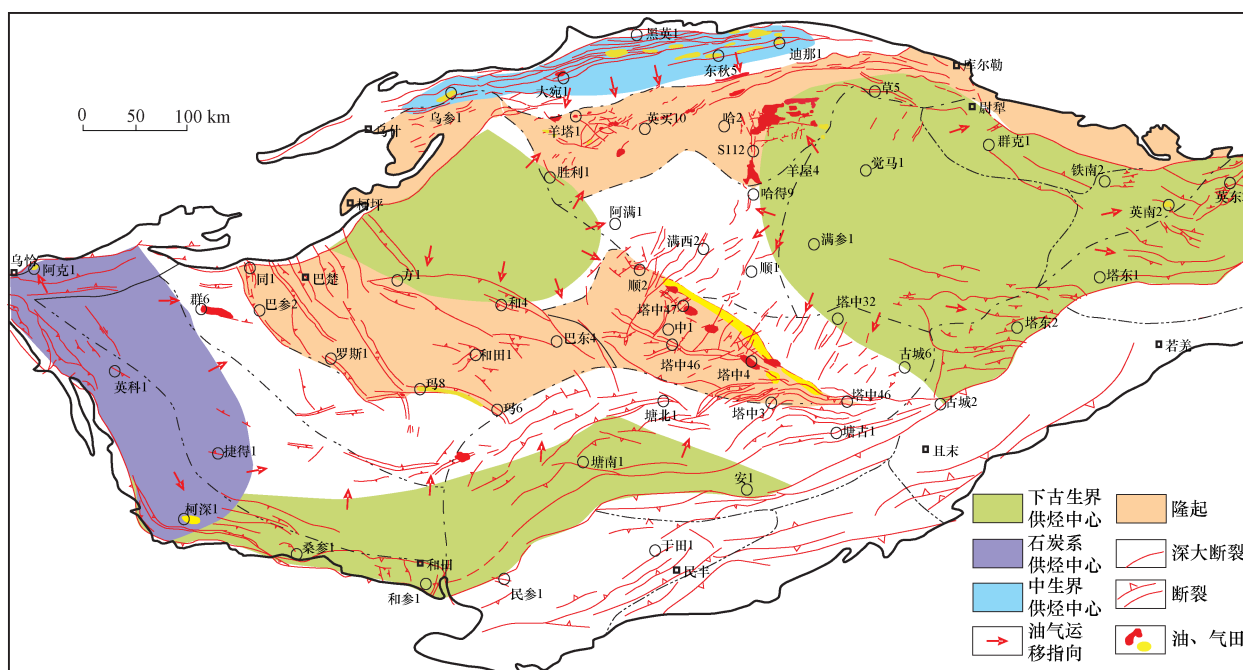


图5 塔里木盆地油气运聚

Fig. 5 Oil and gas migration and accumulation of Tarim Basin

2) 塔里木盆地在叠合演化过程中经历了中奥陶世末、奥陶纪末、志留纪晚期、二叠纪末和新近纪晚期等多期重要的构造事件,中奥陶世末的构造事件形成了塔中隆起、沙雅隆起、和田古隆起,控制了晚奥陶世的沉积与分布,奥陶纪末的构造事件导致了塘古孜巴斯坳陷断裂-褶皱带和雅克拉断凸的形成,志留纪晚期构造事件导致了塔里木盆地的区域隆升与剥蚀,二叠纪末的构造事件导致塔里木北部碳酸盐岩层系再次改造,新近纪-第四纪的构造事件使得巴楚隆起定型和山前冲断带的形成。

3) 通过对塔里木盆地叠合演化和油气聚集条件的分析,认为盆地的多期叠合演化过程中形成的优质的源-盖组合和储-圈配置是油气富集的重要因素,盆地演化的旋回性形成了下组合(寒武系-奥陶系-志留系)、中组合(石炭系-二叠系)和上组合(三叠系-第四系)三大勘探层系。其中台盆区以下组合、中组合为主要勘探层系,山前坳陷区以上组合为主要勘探层系。古隆起、古斜坡控制了中组合油气的聚集,山前冲断带控制了上组合的油气聚集。

参 考 文 献

- [1] 张恺. 论塔里木盆地类型、演化特征及含油气远景评价[J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(1): 1-15.
Zhang Kai. On the basin type, evolution feature and petroleum potential of Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 1990, 11(1): 1-15.
- [2] 何治亮, 毛洪斌, 周晓芬, 等. 塔里木多旋回盆地与复式油气系统[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 207-213.
He Zhiliang, Mao Hongbin, Zhou Xiaofen, et al. Complex petroleum system and multicycle basin in Tarim[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 207-213.
- [3] 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, 4(6): 4-7.
Wang Qingchen, Jin Zhijun. Superimposed basin and oil-gas formation and accumulation[J]. China Basic Science, 2002, 4(6): 4-7.
- [4] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油天然气地质, 2005, 26(1): 64-77.
He Dengfa, Jia Chengzao, Li Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 64-77.
- [5] 金之钧. 中国典型叠合盆地油气成藏研究新进展(之二)——以塔里木盆地为例[J]. 石油天然气地质, 2006, 27(3): 281-288.
Jin Zhijun. New progresses in research of China typical superimposed basins and reservoiring of hydrocarbons(Part II): taking Tarim basin as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 281-288.
- [6] 许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1-22.
Xu Zhiqin, Li Sitian, Zhang Jianxin, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 1-22.
- [7] 何登发, 周新源, 张朝军, 等. 塔里木多旋回叠合盆地地质结构特征[J]. 中国石油勘探, 2006, 5(1): 31-41.
He Dengfa, Zhou Xinyuan, Zhang Chaojun, et al. Characteristics of Geologic Framework of Multicycle Superimposed Basin in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2006, (1): 31-41.
- [8] 张光亚, 赵文智, 王红军, 等. 塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 653-663.
Zhang Guangya, Zhao Wenzhi, Wang Hongjun, et al. Multicycle tectonic evolution and composite petroleum systems in the Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(5): 653-663.
- [9] 刘景彦, 林畅松, 彭丽, 等. 构造不整合的分布样式及其对地层圈闭的制约——以塔里木盆地中泥盆世末为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 268-275.
Liu Jingyan, Lin Changsong, Peng Li, et al. Distribution patterns of the middle Devonian tectonic unconformity and their constrain on the development and distribution of favorable stratigraphic traps in the Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 268-275.
- [10] 何碧竹, 许志琴, 焦存礼, 等. 塔里木盆地构造不整合成因及对油气成藏的影响[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 253-265.
He Bizhu, Xu Zhiqin, Jiao Cunli, et al. Tectonic unconformities and their forming: implication for hydrocarbon accumulations in Tarim basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 253-265.
- [11] 易士威, 杜金虎, 杨海军, 等. 塔里木盆地古生界成藏控制因素及勘探思路[J]. 中国石油勘探, 2012, 6(3): 1-7.
Yi Shiwei, Du Jinhu, Yang Haijun, et al. Controlling factors and exploration idea about reservoir formation of Lower Palaeozoic, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2012, 6(3): 1-7.
- [12] 何登发, 李德生, 何金有, 等. 塔里木盆地库车坳陷和西南坳陷油气地质特征类比及勘探启示[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 201-218.
He Dengfa, Li Desheng, He Jinyou, et al. Comparison in petroleum geology between Kuqa depression and southwest depression in Tarim basin and its exploration significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(2): 201-218.
- [13] 李世臻, 康志宏, 邱海峻, 等. 塔里木盆地西南坳陷油气成藏模式[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 387-398.
Li Shizhen, Kang Zhihong, Qiu Haijun, et al. Hydrocarbon accumulation modes of the southwest depression in Tarim Basin[J]. Geology In China, 2014, 41(2): 387-398.
- [14] 谭广辉, 邱华标, 余腾孝, 等. 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组油藏成藏特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 26-32.
Tan Guanghui, Qiu Huabiao, Yu Tengxiao, et al. Characteristics and main controlling factors of hydrocarbon accumulation in Ordovician Yingshan Formation in Yubei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 26-32.
- [15] 王招明. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 153-166.
Wang Zhaoming. Formation mechanism and enrichment regularities of Kelasu subsalt deep large gas field in Kuqa depression, Tarim basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 153-166.
- [16] 刘志宏, 卢华复, 李西建, 等. 库车再生前陆盆地的构造演化[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 482-492.
Liu Zhihong, Lu Huafu, Li Xijian, et al. Tectonic evolution of Kuqa rejuvenated foreland basin[J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(4): 482-492.
- [17] 郑孟林, 曹春潮, 李明杰, 等. 阿尔金断裂带东南缘含油气盆地群

- 的形成演化[J]. 地质论评, 2003, 49(3): 277-285.
- Zheng Menglin, Cao Chunchao, Li mingjie, et al. Formation and evolution of petroliferous basins on the southeast side of the Altun fault belt[J]. Geological Review, 2003, 49(3): 277-285.
- [18] 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 等. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件[J]. 地质通报, 2009, 28(10): 1430-1438.
- Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xin Houtian, et al. Q. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China. Geological Bulletin of China[J], 2009, 28(10): 1430-1438
- [19] 赵文金. 中国古生代中期盔甲鱼类及其古地理意义[J]. 古地理学报, 2005, 7(3): 305-310.
- Zhao Wenjin. Galeaspid of the Middle Paleozoic in China and its palaeogeographic significance[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(3): 305-310.
- [20] 赵文金, 王士涛, 王俊卿, 等. 新疆柯坪—巴楚地区志留纪含鱼化石地层序列与加里东运动[J]. 地层学杂志, 2009, 33(3): 225-240.
- Zhao Wenjin, Wang Shitao, Wang Junqing, et al. The subdivision and correlation of the Silurian fish-bearing strata and Caledonian movement in Kalpin and Bachu regions, the Tarim basin, Xinjiang[J]. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(3): 225-240.
- [21] 郭光辉, 张宝收, 郭春利, 等. 塔里木盆地北部志留系碎屑锆石测年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 418-426.
- Wu Guanghui, Zhang Baoshou, Guo Chunli, et al. Detrital zircon U-Pb dating for the Silurian in northern Tarim basin and its significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(3): 418-426.
- [22] 谢大庆, 郑孟林, 蒋华山, 等. 塔里木盆地沙雅隆起形成演化与油气分布规律[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(3): 398-409.
- Xie Daqing, Zheng Menglin, Jiang Huashan, et al. Formation and evolution of the Shaya Uplift and Constraints on Oil and Gas Distribution in the Tarim Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(3): 398-409.
- [23] 张仲培, 王毅, 云金表, 等. 塔中地区断裂不同演化阶段对油气聚集的控制[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 316-323.
- Zhang Zhongpei, Wang Yi, Yun Jinbiao, et al. Control of faults at different evolution stages on hydrocarbon accumulation in Tazhong area, the Tairm basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 316-323.
- [24] 杨圣彬, 刘军, 李慧莉, 等. 塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 797-783.
- Yang Shengbin, Liu Jun, Li Huili, et al. Characteristics of the NE-trending strike-slip fault system and its control on oil accumulation in north peri-cline area of the Tazhong paleouplift[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 797-783.
- [25] 李曰俊, 吴根耀, 孟庆龙, 等. 塔里木西部地区古生代断裂活动的方式和机制[J]. 地质科学, 2008, 43(4): 727-745.
- Li Yuejun, Wu Gengyao, Meng Qinglong, et al. Active mode and mechanism of the Paleozoic faultings in western Tarim[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(4): 727-745.
- [26] 刘辰生, 郭建华, 张琳婷. 塔里木盆地巴楚及塔中地区二叠系层序地层学分析[J]. 地质科技情报, 2009, 28(4): 28-33.
- Liu Chensheng, Guo Jianhua, Zhang Linting. Analysis of sequence stratigraphy of Permian in Bachu and Tazhong of Tarim basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(4): 28-33.
- [27] 熊剑飞. 塔里木盆地东北地区石炭—二叠系牙形刺类序列[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 74-85.
- Xiong Jianfei. The Carboniferous-Permian conodont sequence in northeastern area of Tarim Basin[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 74-85.
- [28] 张现军, 王月华, 玛丽克, 等. 塔里木盆地麦盖提斜坡西段上石炭统研究新进展[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(1): 56-58.
- Zhang Xianjun, Wang Yuehua, Ma Like, et al. Novel Progress of Upper Carboniferous Study in West Section of Maqeti Slope, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(1): 56-58.
- [29] 贾进华. 库车前陆盆地白垩纪巴什基奇克组沉积层序与储层研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 133-143.
- Jia Jinhua. Depositional sequence and reservoir of Cretaceous Bashijike formation in Kuqa foreland basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 133-143.
- [30] 孙龙德. 塔里木盆地库车坳陷与塔西南坳陷早白垩世沉积相与油气勘探[J]. 古地理学报, 2004, 6(2): 252-260.
- Sun Longde. Sedimentary facies and exploration of petroleum of the early Cretaceous in Kuqa depression and southwest depression in Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(2): 252-260.
- [31] 贾进华. 塔里木盆地早白垩世沉积相特征与古地理[J]. 古地理学报, 2009, 11(2): 167-176.
- Jia Jinhua. Sedimentary characteristics and palaeogeography of the early Cretaceous in Tarim basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(2): 167-176.
- [32] 刘池洋, 赵红格, 张参, 等. 青藏—喜马拉雅构造域演化的转折时期[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 1-12.
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Zhang Can, et al. The important turning period of evolution in the Tibet Himalayan tectonic domain[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 001-012.
- [33] 高志勇, 张水昌, 张兴阳, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系海相烃源岩空间展布与层序类型的关系[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊1): 70-77.
- Gao Zhiyong, Zhang Shuichang, Zhang Xingyang, et al. The relationship of Tarim Basin Cambrian Ordovician marine source rock distribution and sequence types[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Suppl. 1): 70-77.
- [34] 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.
- Jin Zhijun, Zhou Yan, Yun Jinbiao, et al. Distribution of gypsum-salt cap rocks and near-term hydrocarbon exploration targets in the marine sequences of China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 715-724.
- [35] 赵孟军, 张宝民. 库车前陆坳陷形成大气区的烃源岩条件[J]. 地质科学, 2002, 27(增刊1): 35-44.
- Zhao Mengjun, Zhang Baomin. Source rocks for a giant gas-accumulating area in the Kuqa foreland depression[J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 27(Suppl.): 35-44.

(编辑 董立)