

塔里木盆地与威利斯顿盆地古生界海相碳酸盐岩 油气成藏特征对比

陶崇智^{1,2},白国平^{1,2},王大鹏^{1,2},张明辉^{1,2},牛新杰^{1,2},郑妍^{1,2},白建朴^{1,2}

(1. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心,北京 102249; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249)

摘要:塔里木盆地和威利斯顿盆地均以古生界海相碳酸盐岩为主要勘探层系。基于对构造沉积背景和油气成藏条件的对比分析,探讨了两个盆地古生界海相碳酸盐岩油气成藏的异同。威利斯顿盆地所处的北美板块规模较大,构造相对稳定,沉积主要受海平面升降的控制。塔里木盆地所处的塔里木板块规模较小,构造变动强烈,沉积受构造运动影响较大。威利斯顿盆地发育了高丰度的烃源岩、良好的孔隙型储层和蒸发岩盖层。而塔里木盆地古生界发育高-过成熟度烃源岩、岩溶型和白云岩储层及泥岩和蒸发岩主导的盖层。二者均发育有多种类型圈闭的古隆起,可作为盆地油气富集的主要区带。威利斯顿盆地发育的多套蒸发岩盖层使得含油气系统概念在该盆地能够得到有效的应用,而油气成藏体系则可以更有效地指导以塔里木盆地为代表的多源、多灶和多成藏期盆地的油气勘探。白云岩-蒸发岩构成了威利斯顿盆地重要的储-盖组合类型。以此类比,塔里木盆地巴楚和塔中地区的中、下寒武统白云岩-中寒武统膏盐岩储-盖组合是未来勘探的有利目标区。

关键词:油气成藏特征;海相碳酸盐岩;古生界;威利斯顿盆地;塔里木盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

A comparison of hydrocarbon accumulation characteristics of the Paleozoic marine carbonates in Tarim Basin and Williston Basin

Tao Chongzhi^{1,2}, Bai Guoping^{1,2}, Wang Dapeng^{1,2}, Zhang Minghui^{1,2}, Niu Xinjie^{1,2}, Zheng Yan^{1,2}, Bai Jianpu^{1,2}

(1. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The Paleozoic marine carbonates are the main exploration targets in both Tarim and Williston basins. Based on a comparative analysis of both tectonic-depositional setting and conditions for the formation of hydrocarbon accumulations, this paper discusses the similarities and differences of hydrocarbon accumulation in the Paleozoic marine carbonates of the two basins. Williston Basin locates within the large North America Plate with relatively stable tectonic setting. The sedimentation within the basin was mainly controlled by eustasy. In contrast, Tarim Basin locates in the much smaller Tarim Plate and experienced frequent and intensive structural deformations. As a result, the sedimentation within the basin was mainly controlled by the tectonic movements. Williston Basin has high-TOC effective source rocks, good porous-type reservoirs and evaporite cap rocks, while Tarim Basin has high-mature to overmature source rocks, karst and dolomite reservoirs, and mudstone and evaporite cap rocks. Different kinds of traps are developed on the paleo-highs in both basins, which constitute the main carbonate play fairways. Williston Basin has multiple evaporite sequences, which makes it possible to effectively apply the petroleum system concept to the basin. In comparison, the hydrocarbon accumulation system concept can provide effective guidance for the hydrocarbon exploration in basins such as Tarim Basin featuring in multiple source rocks, multiple kitchens and multiple episodes of hydrocarbon charging. The favorable reservoir-seal assemblage in Williston Basin is dolomite reservoir and evaporite seal. The comparative analyses indicate that the favorable carbonate play fairways are the areas with the assemblage of the Lower-Middle Cambrian dolomite reservoirs and the Middle Cambrian evaporite seals in the Bachu and Tazhong areas.

Key words: hydrocarbon accumulation characteristics, marine carbonate rock, Paleozoic, Williston Basin, Tarim Basin

收稿日期:2013-04-20;修订日期:2013-07-08。

第一作者简介:陶崇智(1986—),男,博士研究生,油气地质。E-mail: taocz99@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-001-010HZ)。

塔里木盆地是我国西部大型叠合盆地,在古生代海相克拉通之上又叠加的中新生代前陆盆地^[1]。塔里木盆地在古生界海相碳酸盐岩层系内发现了塔河、塔中和哈拉哈塘等多个大、中型油气田。北美威利斯顿盆地是典型的内克拉通盆地,古生界碳酸盐岩是其主要油气产层,该盆地的油气勘探经验对塔里木盆地的油气勘探可能有一定的借鉴作用。塔里木盆地与国外盆地类比研究主要集中在特提斯构造域^[2-5],尚未见系统阐述塔里木盆地与威利斯顿盆地对比研究的公开文献。基于两个盆地有着类似油气勘探层系,本文对二者开展区域地质背景及油气成藏条件的对比研究,分析两个盆地古生界碳酸盐岩油气成藏的相似性和差异性,为丰富海相碳酸盐岩油气勘探理论和推进塔里木盆地海相碳酸盐岩的油气勘探实践提供参考依据。

1 区域地质背景对比

1.1 构造特征

威利斯顿盆地位于北美板块内部,靠近北美克拉通西部边缘(图 1)。盆地于晚寒武世或早奥陶世开始发育^[6]。古生代期间,北美板块西缘构造相对稳定,威利斯顿盆地主要以大陆边缘拗陷沉降为特征。科迪勒拉造山运动开始于早侏罗世,此后一系列小地块开始向北美板块西缘增生,太平洋板块向北美板块俯冲碰撞,影响了北美板块西缘的构造演化^[7]。由于北美克拉通板块规模比较大,威利斯顿盆地位于克拉通内,远离科迪勒拉造山带,因此构造背景相对稳定、变形微弱(图 2)。造山运动引起的构造挤压和基底断裂的反转活动,仅在盆地内形成了一系列的南北向和北西—南东向大型低幅背斜构造(图 1)。

塔里木盆地古生界克拉通也具有地层平缓、地壳

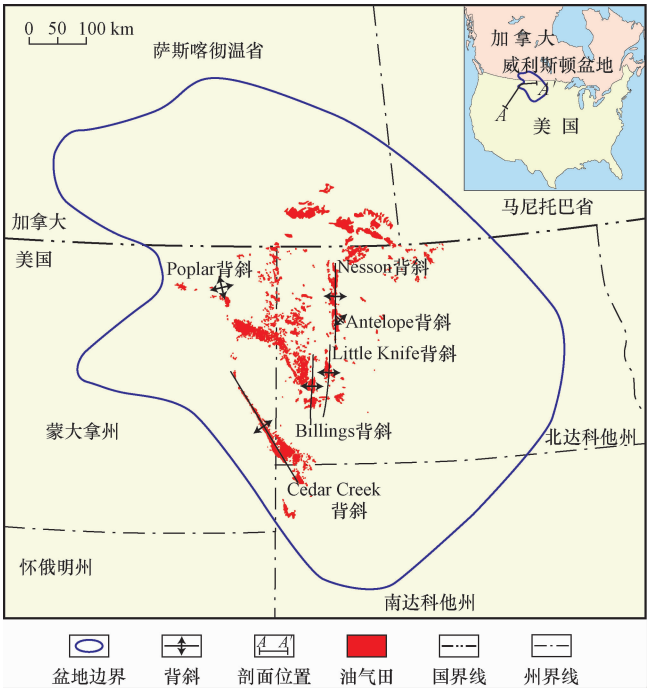


图 1 威利斯顿盆地地理位置和构造概况
Fig. 1 Location and structural outline of Williston Basin

运动以升降为主的特征。盆地亦发育了基底断裂和挤压运动共同作用的继承性古隆起。中、新生代,塔里木盆地的构造演化主要受新特提斯洋北部构造带的影响,碰撞挤压造成了前陆逆冲褶皱变形叠加在古生代克拉通之上(图 3)。与威利斯顿盆地相比,塔里木板块规模要小得多,在与周边板块碰撞汇聚时,应力对盆地影响范围较大,构造变形程度大。体现在以下 3 个方面特征:①盆地隆起和拗陷幅度大,隆、拗格局明显,发育了较大规模的继承性古隆起(图 3);②地层隆升剥蚀量较大,三叠纪末,受南部特斯特构造带影响,造成盆地东部的最大剥蚀量达 4 000 m^[9];③新生代以来,盆地周缘变形强烈,发育了库车前陆冲断带、塔西南前陆冲断带和塔东南大型走滑构造系^[9]。

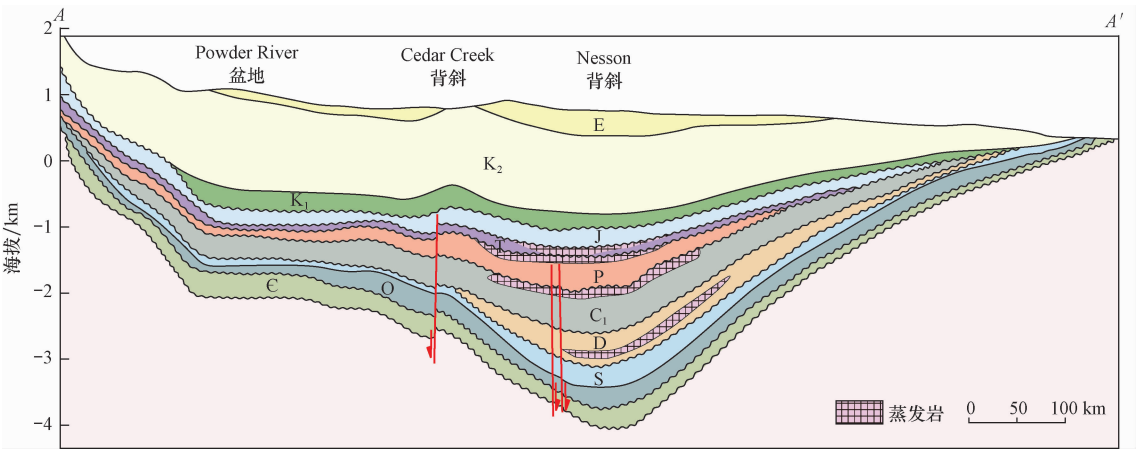


图 2 威利斯顿盆地构造剖面^[8](剖面位置见图 1)
Fig. 2 Structural cross section of the Williston Basin^[8](see Fig. 1 for the location)

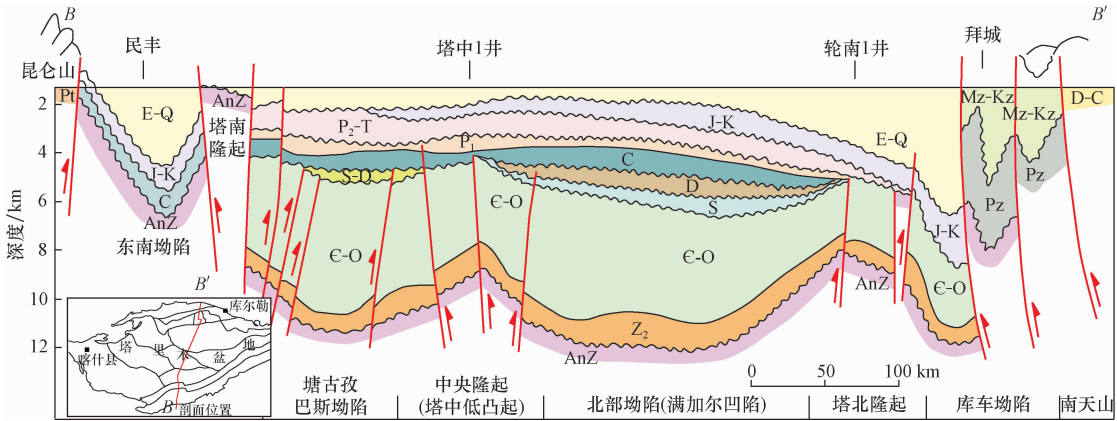


图3 塔里木盆地构造剖面^[9]

Fig. 3 Structural cross section of the Tarim Basin^[9]

1.2 沉积特征

塔里木盆地的沉积开始于震旦纪,而威利斯顿盆地是在前寒武纪结晶基底上发育的沉积盆地,两个盆地都沉积充填了寒武纪—第四纪地层(表1)。威利斯顿盆地的地层以古生界和中生界为主,新生界沉积厚度薄,盆地中部沉积厚度较大,最大沉积厚度达4 900 m(图2)。塔里木盆地中部发育了较厚的寒武系—奥陶

系,新生界遍及整个盆地、沉积厚度大(图3)。与威利斯顿盆地相比,塔里木盆地的地层沉积厚度非常大,最厚可达16 000 m。

古生代两个盆地都位于较低的纬度^{[8]①}(图4),温暖的气候有利于碳酸盐岩的发育,古生代均沉积了多套碳酸盐岩层系(图5)。威利斯顿盆地位于北美克拉通内部,构造运动相对较弱,沉积相的发育主要受海平面的控制。盆地古生代长期处于陆架至潮上带的沉

表1 威利斯顿盆地与塔里木盆地构造和沉积特征对比

Table 1 Comparison of tectonic and sedimentary features between Williston Basin and Tarim Basin

盆地	板块	板块规模	盆地类型	构造演化	沉积充填	后期叠加改造
塔里木盆地	塔里木	小	Mz—Kz:前陆	T—Q 复合前陆盆地及陆内拗陷	震旦系—新生界	北部、东南和西南边缘变形强烈
				O—T 稳定克拉通内拗陷及裂谷盆地		
			Pz:克拉通	Z—O 克拉通内拗陷及拗拉槽		
威利斯顿盆地	北美	大	克拉通	J—Q 陆内拗陷,挤压变形	寒武系—新生界	微弱
				O ₂ —T 大陆边缘拗陷(稳定沉降)		
				Є—O ₁ 大陆边缘拗陷(初始沉降)		

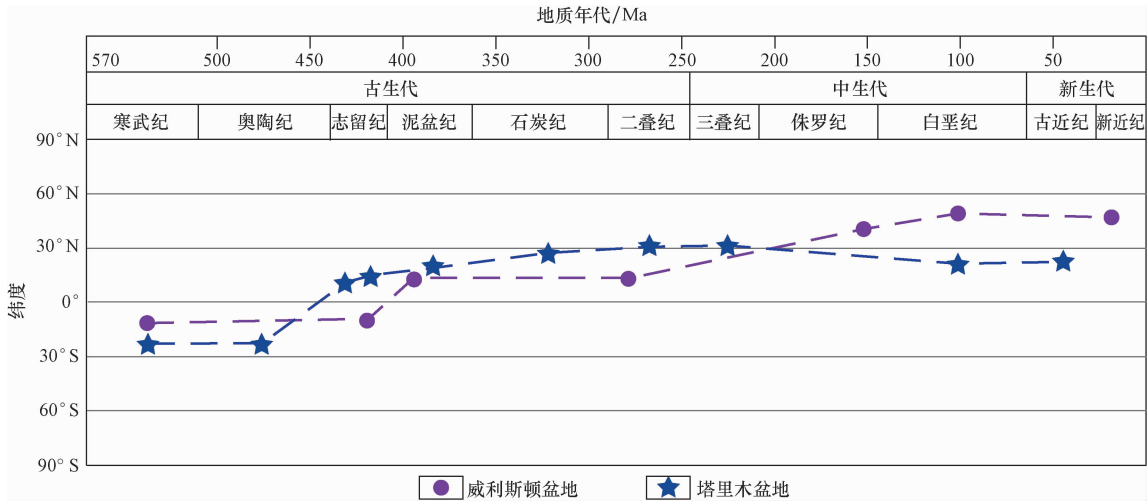


图4 威利斯顿盆地与塔里木盆地古地理位置演化

Fig. 4 Comparison of paleo-geographic location evolution between Williston Basin and Tarim Basin

(塔里木盆地和威利斯顿盆地古纬度数据分别源自贾承造^[9]和 Scotese^[10]。)

① Scotese C R. Paleogeographic atlas. Texas:University of Texas at Arlington,1997:1-37.

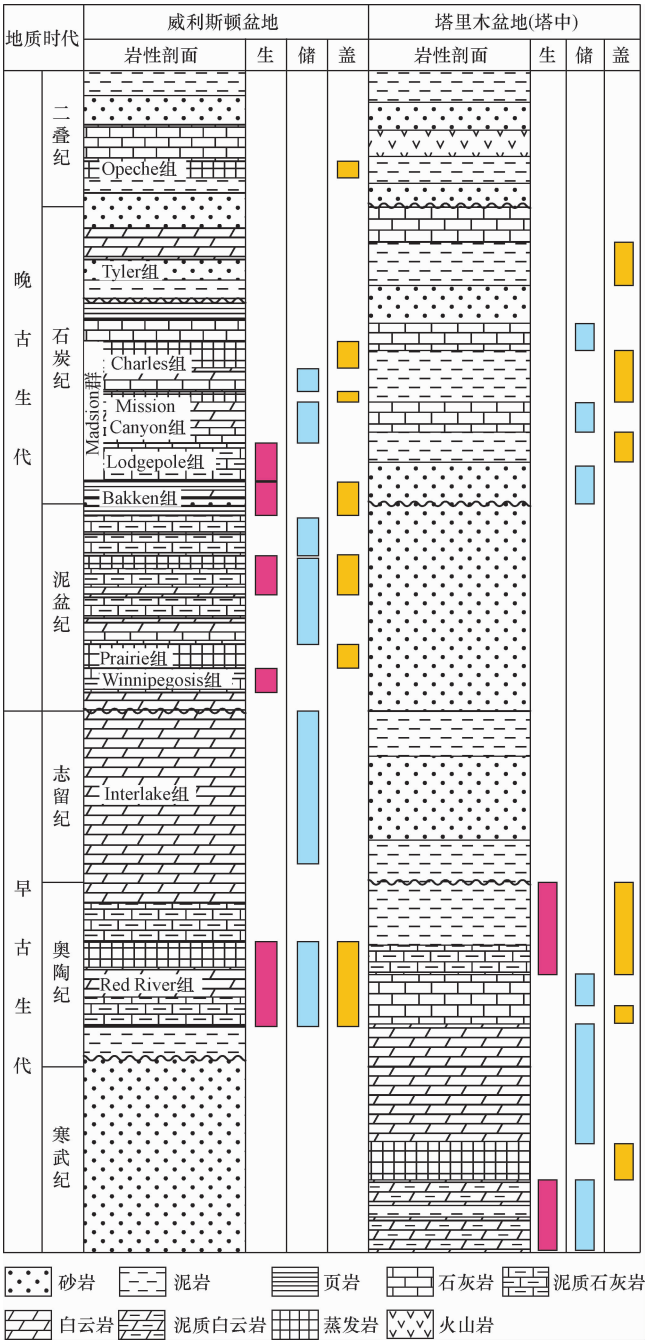


图 5 威利斯顿盆地与塔里木盆地古生代地层对比

Fig. 5 Paleozoic stratigraphy columns of Williston Basin and Tarim Basin

积环境,以发育碳酸盐岩-蒸发岩沉积旋回为特征(图 5)。塔里木盆地沉积相的发育受构造变动影响非常大。寒武纪和奥陶纪是塔里木盆地碳酸盐岩最发育的时期,盆地内发育碳酸盐岩台地、深水陆棚和深水盆地相环境^[11-12]。奥陶纪末以后,盆地经历了大规模构造抬升,主要发育河流、三角洲和滨浅海沉积。塔里木盆地的地层沉积具有寒武系和奥陶系以碳酸盐岩沉积为主,志留系至二叠系以海相碎屑岩为主的特征(图 5)。

2 油气成藏条件对比

2.1 生烃条件

古生代两个盆地所处低纬度温暖湿润的气候有利于烃源岩沉积,发育多套烃源岩层系,有泥岩、页岩和碳酸盐岩等多种岩性(表 2)。受古纬度影响,两者主力烃源岩发育层系有所不同。晚泥盆世和早石炭世期间,威利斯顿盆地所在的北美板块处于较低的纬度,更有利于优质烃源岩的形成,沉积的黑色页岩构成了盆地主力烃源岩层系^[13]。塔里木盆地晚古生代烃源岩发育条件有限,主力生烃层系为下古生界的寒武系和奥陶系。

威利斯顿盆地烃源岩的有机质丰度明显高于塔里木盆地(表 2)。威利斯顿盆地烃源岩的总有机碳含量(TOC)平均都在 5% 以上,而塔里木盆地中、下寒武统和中、上奥陶统烃源岩的总有机碳含量一般都小于 5%。威利斯顿盆地泥盆纪末期至石炭纪早期沉积了 Bakken 组页岩,其 TOC 高达 6%~20%,平均为 10.33%,不仅为盆地提供了大量的常规油气资源,还有可观的页岩油非常规资源。该组在威利斯顿盆地美国部分的待发现页岩油可采资源量为 5.2×10^8 t,约占该盆地待发现石油总可采资源量的 95%^①。

两个盆地烃源岩的有机质类型都以 I 型和 II 型干酪根为主(表 2)。塔里木盆地经历了多期构造抬升和沉降,烃源岩具有多期生排烃的特点,有加里东晚期—海西早期、海西晚期和喜马拉雅期 3 个成藏期^[13]。塔

表 2 威利斯顿盆地与塔里木盆地主要烃源岩特征对比^[14-17]

Table 2 Comparison of the main source rock characteristics between Williston Basin and Tarim Basin ^[14-17]						
盆地	时代	地层	岩性	TOC/%	干酪根类型	热演化程度
威利斯顿盆地	C ₁	Lodgepole 组	页岩	4.00	II 型	成熟
	D ₃ —C ₁	Bakken 组	页岩	10.33	II 型	成熟
	D ₂	Winnipegosis 组	泥质石灰岩	7.38	II 型	成熟
	O ₃	Red River 组	泥质碳酸盐岩	1.00~14.00(平均 8.00)	I 型	成熟—过成熟
	O ₂₊₃	中、上奥陶统	泥灰岩、灰泥岩、泥岩	0.50~5.54	II 型	高成熟、过成熟
塔里木盆地	Є ₁₊₂	中、下寒武统	泥质白云岩、泥质灰岩、泥页岩	0.50~12.50	I 型、II 型	高成熟、过成熟

① US Geological Survey Williston Basin Province Assessment Team. Executive summary —assessment of undiscovered oil and gas resources of the Williston Basin Province of North Dakota, Montana, and South Dakota. USA Geological Survey: Geological Survey Digital Data Series 69-W, 2011.

里木盆地古生界烃源岩埋藏深度较大,现今多已达到高成熟或过成熟演化程度^[14]。威利斯顿盆地一直处于相对稳定的沉降过程,烃源岩不具有“二次生烃”的特点,生烃一般从白垩纪开始并持续到现今。威利斯顿盆地的烃源岩多处于成熟生油阶段,仅盆地深部的烃源岩处于过成熟生气阶段。

2.2 储集条件

威利斯顿盆地从奥陶纪至二叠纪多个时期都发育碳酸盐岩储层。这些碳酸盐岩储层主要沉积于潮坪和浅滩环境,岩性主要为白云岩和白云质灰岩,储集孔隙类型以晶间孔为主(表3)。塔里木盆地碳酸盐岩储层主要发育于寒武系和奥陶系,其次为石炭系,主要沉积于台地潟湖、潮坪和台地边缘礁滩相环境,主要岩性为灰岩、生屑灰岩和白云岩(表3)。塔里木盆地古生界

碳酸盐岩储集空间不仅有孔洞,裂缝也是有效的储集类型,例如塔中的下奥陶统鹰山组^[18]。

威利斯顿盆地碳酸盐岩储层的埋深较浅,一般小于4 000 m,而塔里木盆地储层埋深较大,多在5 000 m以下;威利斯顿盆地储层以白云岩为主,而塔里木盆地储层主要以灰岩和白云岩为主;相比而言,威利斯顿盆地储层的物性要明显好于塔里木盆地(表3)。威利斯顿盆地储层的孔隙度一般都大于10%,高于对应的全球碳酸盐岩孔隙度中值,塔里木盆地储层的孔隙度基本都低于对应的孔隙度中值,一般小于10%(图6)。两个盆地的储层渗透率都低于 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要属于中到差储层,这可能与碳酸盐岩的强非均质有关。

塔里木盆地的构造抬升导致奥陶系碳酸盐岩发生隆升剥蚀,受风化淋滤作用影响,发育了岩溶缝洞系统,形成具有良好储集条件的岩溶型储层,例如油气储

表3 威利斯顿盆地与塔里木盆地主要碳酸盐岩储层特征对比^{①②}
Table 3 Comparison of the main reservoir characteristics between Williston Basin and Tarim Basin^{①②}

盆地	时代	岩性	孔隙类型	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
威利斯顿盆地	C ₁	白云质灰岩、白云岩	晶间孔、印模孔	9.0~22.0	0.10~266.00
	D	白云质灰岩	晶间孔、印模孔	7.0~14.0	0.10~200.00
	S	白云岩	晶间孔、印模孔	6.0~23.0	5.00
	O	白云岩、白云质灰岩	晶间孔、溶孔	1.0~25.0	0.10~142.00
塔里木盆地	C	生屑灰岩	孔隙、溶蚀孔、裂缝	3.0~28.0	1.00~250.00
	O	石灰岩、白云岩	孔洞、裂缝	<10.0	<121.00
	Є	白云岩	孔、缝、洞	平均3.3	平均3.34

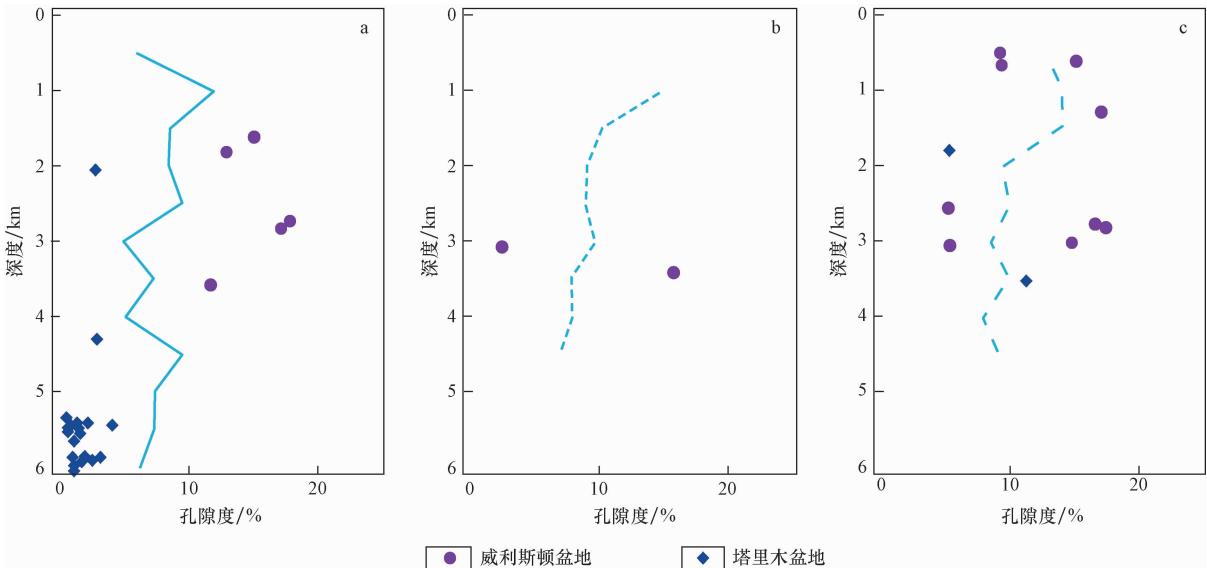


图6 威利斯顿盆地和塔里木盆地古生界碳酸盐岩油气田储层平均孔隙度与深度关系

Fig.6 Average porosity vs. depth plots of the Paleozoic carbonate reservoirs in Williston Basin and Tarim Basin

a. 前寒武系—志留系;b. 泥盆系;c. 石炭系

(图中,塔里木盆地油田储层数据源自 IHS^①,威利斯顿盆地油田储层数据源自 C & C^②;曲线引自 Ehrenberg^[19],分别表示全球前寒武系—志留系、泥盆系和石炭系碳酸盐岩储层在不同深度的孔隙度中值变化趋势。)

① IHS Energy Group. International petroleum exploration and production database. USA:IHS Energy Group,2012.
② C & C Reservoirs. Reservoir evaluation report, Williston Basin. USA:The Analog Company,1998.

量规模在 15×10^8 t 以上的塔河油田^[19-20]。岩溶型储层主要发育于塔北、塔中和巴-麦地区,叠合面积达 16×10^4 km²^[21],在塔里木盆地有着可观的勘探前景。威利斯顿盆地孔隙型储层所经历的构造活动时间短和幅度小,岩溶作用有限。

2.3 油气保存条件

威利斯顿盆地古生代沉积旋回内发育了多套沉积于潮上带——萨布哈环境的蒸发岩层。蒸发岩具有致密、流动和低渗透率等特点,是封盖性能极好的盖层^[22]。盆地主要有上奥陶统 Red River 组、中泥盆统 Prairie 组、下石炭统 Charles 组和中二叠统 Opeche 组 4 套区域性蒸发岩盖层(图 5)。这些蒸发岩主要分布在盆地中部,与下伏储层构成了优质的储、盖组合,阻隔了油气的垂向运移,有效控制了油气的层系和平面分布,大部分已发现的油气田都位于这些蒸发岩盖层之下(图 7)。此外,泥盆纪沉积旋回内的其他蒸发岩层和泥页岩也为油气提供了局部的盖层条件。

塔里木盆地古生界碳酸盐岩最主要的区域性盖层是上奥陶统和石炭系层内泥岩及中寒武统的膏盐岩。石炭系泥岩盖层可封盖之下的东河砂岩储层或奥陶系风化壳岩溶储集层,上奥陶统桑塔木组泥岩封盖了之下的良里塔格组及鹰山组油气,中寒武统膏盐岩很好地封盖了之下的油气。志留系沥青砂的存在表明志留系泥岩盖层对油气的早期成藏没有起到很好的封盖作用^[17]。塔北隆起等构造高部位地区经历了多期剥蚀,在缺少古生界泥岩盖层时,中生代三叠系和侏罗系陆相泥岩盖层可为古生界碳酸盐岩提供封盖条件。

2.4 圈闭条件

古隆起带是两个盆地碳酸盐岩油气藏最富集的地区,也影响了油气藏圈闭类型。威利斯顿盆地发育的 Nesson, Billings, Cedar Creek 和 Little Knife 背斜是盆地主要的产油气带(图 1),而塔里木盆地海相碳酸盐岩油气田主要位于塔北和塔中两个隆起带。古隆起独特的构造和沉积特征,致使古隆起带可以发育多种类型

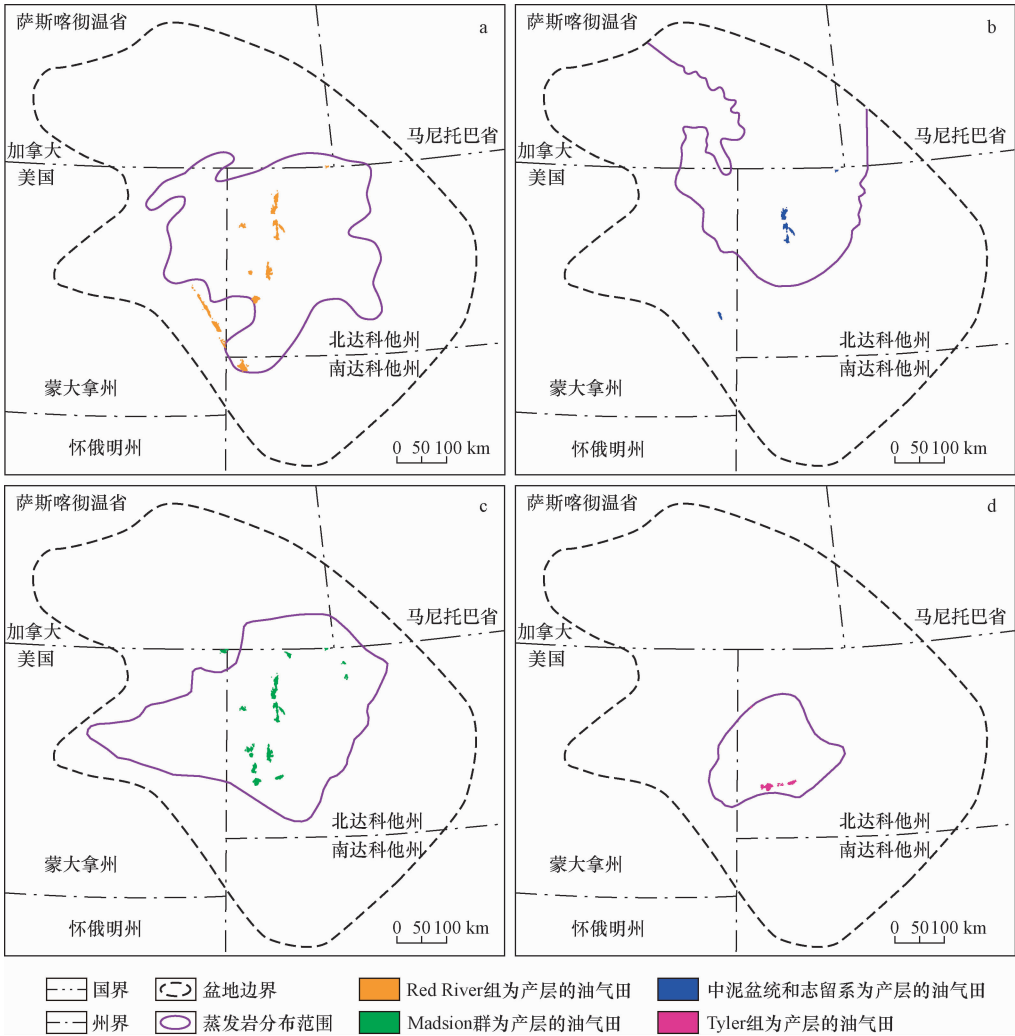


图 7 威利斯顿盆地盖层与油气田分布

Fig. 7 Cap rock and field distribution in Williston Basin

a. 上奥陶统 Red River 组蒸发岩分布;b. 中泥盆统 Prairie 组蒸发岩分布;c. 下石炭统 Charles 组蒸发岩分布;d. 中二叠统 Opeche 组蒸发岩分布

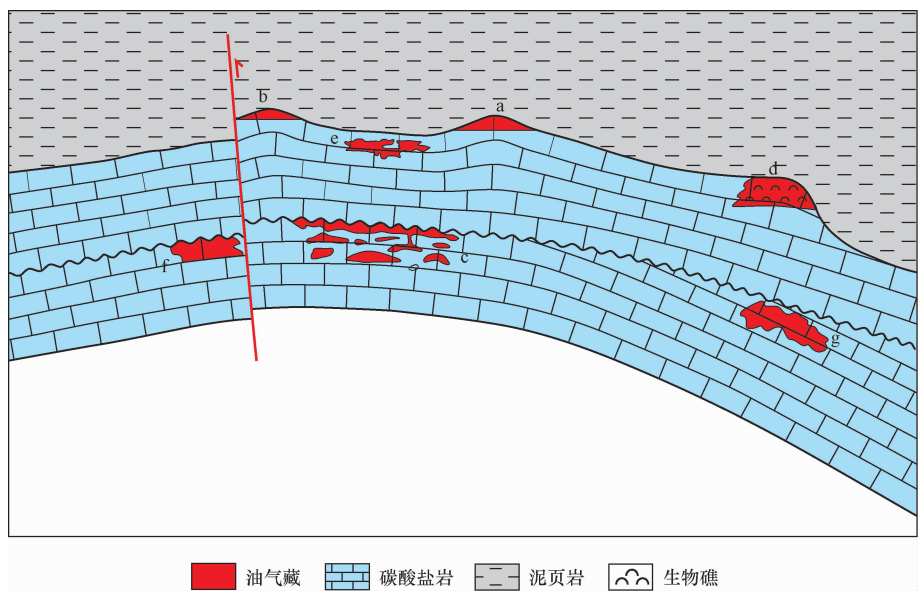


图 8 碳酸盐岩主要圈闭类型示意图

Fig. 8 Schematic map showing the main carbonate trap types in rocks

a. 背斜型油气藏; b. 断背斜型油气藏; c. 岩溶型油气藏; d. 礁滩型油气藏; e. 缝洞型油气藏;
f. 构造-地层复合型油气藏; g. 构造-岩性复合型油气藏

的油气藏^[23]。古隆起发育的背斜带和断裂带为油气藏提供了构造圈闭要素,隆起顶部剥蚀不整合面提供了地层圈闭要素,由成岩作用等造成的碳酸盐岩空间非均质性为油气藏提供了岩性圈闭要素。因此,碳酸盐岩油气藏可划分为构造型、地层岩性型和复合型三大类^[24]。构造型包括:①背斜型,如英买 7 油藏(图 8a);②断背斜型,如英买 32 油藏和 Cabin Creek 油藏(图 8b)。地层岩性型包括:①岩溶风化壳型,如塔中鹰山组岩溶油气藏和轮南-塔河奥陶系油气藏(图 8c);②礁滩型,如塔中良里塔格组礁滩体和 Dickinson 油藏(图 8d);③缝洞型,如塔中 162 气藏(图 8e)。复合型包括:①构造-地层岩性复合型,如英买 2 油藏(图 8f);②构造-岩性复合型,如中古 43 凝析气藏和 Charlson 油藏(图 8g)。古隆起长期处于构造高部位,是油气运移的指向区^[25-27]。不整合和断裂作为有利的油气运移通道。因此,古隆起带是碳酸盐岩盆地的有利油气富集区。

3 油气勘探启示

3.1 油气勘探方法的应用

威利斯顿盆地是含油气系统分析的起源地,Dow 应用油源对比的方法,提出威利斯顿盆地存在 3 种类型的原油对应了 3 个“石油系统”^[28]。此后很多学者对含油气系统进行了完善,现今含油气系统分析已广泛应用于油气勘探理论与实践,取得了非常好的勘探效果。含油气系统分析的思路是“从烃源岩到圈闭”,

油源对比是含油气系统分析的关键。含油气系统很好的应用于威利斯顿盆地主要得益于盆地以下 3 个方面特征:①烃源岩主要分布于盆地中部,具有单一的生烃灶和生烃期;②盆地构造运动相对简单,油气藏形成后没有经历大规模的调整;③盆地内多套区域分布的蒸发岩盖层有效阻止了油气垂向长距离运移,油源对比相对简单。蒸发岩层使得烃源岩、输导层和油气藏等要素处于一个相对独立的系统内。

塔里木盆地的烃源岩沉积环境复杂,具有多个生烃期,油气藏发生过多期调整改造,不同生烃层系的油气常发生混聚^[29-30]。盆地内油气的混源现象常见,油源对比困难,很难从确定油气藏的有效烃源岩进而划分出单一的含油气系统。因此,含油气系统的应用在塔里木盆地存在一定的局限性。针对塔里木盆地等叠合盆地复杂的地质特征以及出现的混源现象,国内学者提出了油气成藏体系的概念,即油气成藏体系是地表以下油气成藏的自然体系,它包括形成油气藏的一切必要元素,即烃源岩、输导体和圈闭,以及这些要素之间的有效配置,油气成藏体系必须具备这一结果才能形成油气藏^[30]。油气成藏体系研究以油气藏为中心,强调流体历史分析,关注油气藏的调整改造,表征复杂成藏条件下的油气运移过程,该方法可有效地解决塔里木盆地等叠合盆地的油气混源问题,是表征多源、多灶和多成藏期盆地油气成藏特征的一种有效研究手段。金之钧等人通过解剖塔里木盆地已发现油气成藏特征,理清油气藏成藏体系结构类型,提出了“源盖控烃,斜坡枢纽控聚”的新思想^[31]。基于该勘探理

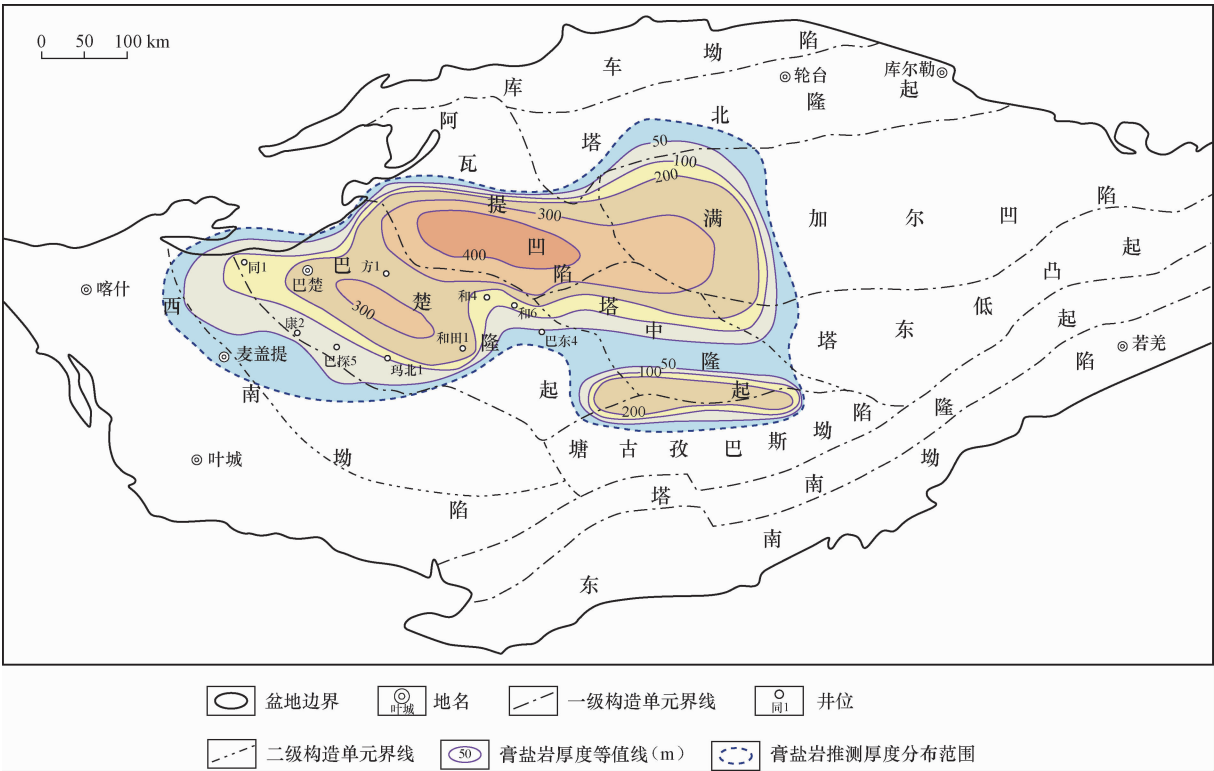


图 9 塔里木盆地中寒武统膏盐岩厚度分布^[36]

Fig.9 Isopach map of gypsum-salt layers in the Middle Cambrian of Tarim Basin^[36]

念,在塔里木盆地麦盖提斜坡上钻探的玉北 1 井获得了工业油气发现。

3.2 有利勘探目标的预测

威利斯顿盆地古生界发育了多个碳酸盐岩-蒸发岩沉积旋回,旋回内的白云岩和白云质灰岩有良好的储集条件,旋回顶部的蒸发岩能为油气提供优质的封盖条件,白云岩-蒸发岩构成了盆地重要的储盖-组合类型。盆地油气最富集的 Madsion 群就是该类型储-盖组合的典型。Madsion 群自下向上依次为 Lodgepole 组、Mission Canyon 组和 Charles 组(图 5)。Mission Canyon 组内的白云岩和白云质灰岩是最主要的油气产层,其次为 Charles 组底部发育的白云岩,Madsion 群的孔隙度为 9%~22%,有较好的储集物性。区域性分布的 Charles 组蒸发岩提供了优质的油气保存条件,下伏的 Bakken 组页岩和 Lodgepole 组优质烃源岩为 Madsion 群提供了大量的油气来源。因此,Madsion 群成为威利斯顿盆地油气发现最多的层系。

塔里木盆地在巴楚和塔中地区发育的中、下寒武统白云岩-中寒武统膏盐岩储-盖组合具有良好的油气成藏条件。早、中寒武世塔里木盆地中西部发育蒸发碳酸盐岩台地、局限碳酸盐岩台地相沉积环境,大规模沉积了中、下寒武统白云岩;中寒武世气候干旱、水体变浅,沉积了中寒武统膏盐岩。这套储-盖组合与

威利斯顿盆地高效聚集油气的白云岩-蒸发岩储-盖组合类似。由于中、下寒武统白云岩储层埋藏深度较大,至今研究程度还不高。目前的钻井揭示下寒武统白云岩主要分布于巴楚地区的康 2 井、和 4 井、方 1 井和塔参 1 井一带,中寒武统白云岩在巴楚、塔中和塔北地区均有分布^[32]。郑剑锋等对寒武系白云岩储层物性进行了统计^[33],其中 156 个潮坪白云岩储层中孔隙度大于 2.5% 的样品约占总样品数的 32%,76 个渗透回流白云岩储层中孔隙度大于 2.5% 的样品约占总样品数的 24%,这表明寒武系白云岩储层具备储集油气的条件。塔里木盆地经历了多期地质事件,地热流体沿着断裂、不整合、裂缝和其他孔隙进入储集层,热液作用会在碳酸盐岩内形成溶蚀孔洞,使得储层物性得到明显改善,因此,中、下寒武统白云岩仍可形成良好的油气储集层^[5,32,34-35]。中寒武世时期,在塔中、巴楚、阿瓦提中南部和满加尔凹陷西部等地区发育了台内膏盐潟湖相环境^[36],沉积了膏盐岩,厚度一般为 100~300 m,阿瓦提中部沉积厚度最大、可达 400 m(图 9)。蒸发岩可塑性强,能有效封盖下伏的中、下寒武统油气藏。

中、下寒武统白云岩-中寒武统膏盐岩储-盖组合所在的巴楚和塔中古隆起区,是油气长期运移聚集的有利区,盆地西部的中、下寒武统台地相烃源岩和东部的盆地相烃源岩都能为该储-盖组合提供油气来源。目前该储-盖组合已在巴楚地区的和 4 井、方 1

井和塔中地区的塔参1井的发现了大量的油气显示^[32]。考虑到中、下寒武统白云岩-中寒武统膏盐岩储-盖组合具有良好的油气成藏条件以及现今的油气显示情况,预测该储-盖组合在巴楚和塔中地区是未来油气勘探的有利目标区。

4 结论

1) 盆地所在板块规模决定着盆地内的构造和沉积发育特征。威利斯顿盆地所处北美板块规模较大,构造挤压对盆地构造影响较弱,沉积主要受海平面的控制,以发育多套碳酸盐岩和蒸发岩沉积旋回为主要特征;塔里木盆地所处的塔里木板块规模相对较小,板块碰撞挤压造成盆地构造活动强烈,沉积具有寒武纪和奥陶纪发育海相碳酸盐岩、志留纪至晚古生代发育海相碎屑岩的特征。

2) 盆地油气成藏条件有一定的对比性。威利斯顿盆地由于烃源岩丰度高,不仅有较丰富的常规油气资源,而且页岩油等非常规资源亦相当可观;塔里木盆地烃源岩具有埋藏深度大、多期生排烃和成熟度高的特征;威利斯顿盆地储集层以白云岩为主,而塔里木盆地以奥陶系岩溶型储集层及寒武系白云岩为主;蒸发岩作为威利斯顿盆地的优质盖层,而塔里木盆地区域盖层以泥岩和膏盐岩为主;发育多种类型圈闭的古隆起均为两个盆地油气富集的主要区带。

3) 威利斯顿盆地古生界发育的多套区域性蒸发岩盖层阻隔了油气的垂向运移,使得各含油气层系形成相对独立的系统,因此,含油气系统能够得到很好的应用。多期的生排烃和强烈的构造运动造成塔里木盆地出现复杂的油气混源现象,以油气藏为中心的油气成藏体系可以更有效地指导油气勘探。

4) 白云岩-蒸发岩是威利斯顿盆地油气最富集的储-盖组合类型。类似的,塔里木盆地在巴楚和塔中地区发育的中、下寒武统白云岩-中寒武统膏盐岩储-盖组合具有良好的油气成藏条件,是塔里木盆地未来油气勘探的有利目标区。

参 考 文 献

- [1] 张光亚,王红军,李洪辉.塔里木盆地克拉通区油气藏形成主控因素与油气分布[J].科学通报,2002,47(增刊):24-29.
Zhang Guangya, Wang Hongjun, Li Honghui. Main controlling factors for hydrocarbon reservoir formation and petroleum distribution in Cratonic Area of Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(S0):24-29.
- [2] 贾承造,杨树锋,陈汉林,等.特提斯北缘盆地群构造地质与天然气[M].北京:石油工业出版社,2001:1-161.
Jia Chengzao, Yang Shufeng, Chen Hanlin, et al. Basins structures geology and natural gas in Northern Tethys [M]. Beijing: Petroleum

Industry Press, 2001:1-161.

- [3] 雷振宇,杜社宽,张朝军.中亚地区与中国西部盆地类比及其油气勘探潜力[J].地球学报,2004,25(1):67-72.
Lei Zhenyu, Du Shekuan, Zhang Chaojun. A comparison of the basins in Western China with those in Central Asia and the oil-gas exploration potential of Western China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(1):67-72.
- [4] 罗金海,周新源,邱斌,等.塔里木-卡拉库姆地区的油气地质特征与区域地质演化[J].地质论评,2005,51(4):409-415.
Luo Jinhai, Zhou Xinyuan, Qiu Bin, et al. Petroleum geology and geological evolution of the Tarim-Karakum and adjacent areas[J]. Geological Review, 2005, 51(4):409-415.
- [5] 吕修祥,白忠凯,付辉.从东西伯利亚看塔里木盆地寒武系盐下碳酸盐岩勘探前景[J].新疆石油地质,2009,30(2):157-162.
Lü Xiuxiang, Bai Zhongkai, Fu Hui. Probe into exploration prospect of Cambrian subsalt carbonate rocks in Tarim Basin from East Siberia Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(2):157-162.
- [6] Gerhard L C, Anderson S B, Lefever J A, et al. Geological development, origin, energy and mineral resources of the Williston Basin, North Dakota[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(8):989-1020.
- [7] Miall A D, Blakey R C. Phanerozoic tectonic and sedimentary evolution of North America[C]//Miall A D. The sedimentary basins of the United States and Canada; sedimentary basins of the world. Amsterdam: Elsevier, 2008:1-30.
- [8] Bally A W. Phanerozoic basins of North America[C]//Bally A W, Palmer A R. The geology of North America; an overview. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 1989:397-446.
- [9] 贾承造.中国塔里木盆地构造特征与油气[M].北京:石油工业出版社,1997:1-438.
Jia Chengzao. Tectonic characteristics and petroleum of the Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997:1-438.
- [10] 林杨松,李思田,刘景彦,等.塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化[J].岩石学报,2011,27(1):210-218.
Lin Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, et al. Tectonic framework and paleogeographic evolution of the Tarim basin during the Paleozoic major evolutionary stages[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1):210-218.
- [11] 肖朝晖,王招明,姜仁旗,等.塔里木盆地寒武系碳酸盐岩层序地层特征[J].石油与天然气地质,2011,32(1):1-16.
Xiao Zhaohui, Wang Zhaoming, Jiang Renqi, et al. Sequence stratigraphic features of the Cambrian carbonate rocks in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1):1-16.
- [12] Klemme H D, Ulmishek G F. Effective petroleum source rocks of the world: stratigraphic distribution and controlling depositional factors [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(12):1809-1851.
- [13] 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):653-662.
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.
- [14] Qiu Nansheng, Chang Jian, Zuo Yinui, et al. Thermal evolution and maturation of lower Paleozoic source rocks in the Tarim Basin, northwest China [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(5):789-821.
- [15] Burrus J, Osadetz K, Wolf S, et al. A two-dimensional regional basin model of Williston basin hydrocarbon systems [J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(2):265-291.

- [16] 张水昌,梁狄刚,张宝民,等. 塔里木盆地海相油气的生成[M]. 北京:石油工业出版社,2004:95-103.
Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Baomin, et al. Marine oil and gas genesis in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004:95-103.
- [17] 牟书令. 中国海相油气勘探理论技术与实践[M]. 北京:地质出版社,2009:1-378.
Mou Shuling. Theories, techniques and practices of petroleum exploration in marine sequences in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009:1-378.
- [18] 吕修祥,张艳萍,焦伟伟,等. 断裂活动对塔中地区鹰山组碳酸盐岩储集层的影响[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(3):244-249.
Lü Xiuxiang, Zhang Yanping, Jiao Weiwei, et al. Effect of fault activity on carbonate reservoir of Yingshan Formation in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(3):244-249.
- [19] Ehrenberg S N, Nadeau P H, Steen Ø. Petroleum reservoir porosity versus depth: influence of geological age [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(10):1281-1296.
- [20] 何治亮,彭守涛,张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6):743-752.
He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhangtao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):743-752.
- [21] 杜金虎,王招明,李启明,等. 塔里木盆地寒武-奥陶系碳酸盐岩油气勘探[M]. 北京:石油工业出版社,2010:66-75.
Du Jinhui, Wang Zhaoming, Li Qiming, et al. Oil and gas exploration of Cambrian-Ordovician carbonate in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010:66-75.
- [22] Warren J K. Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons [M]. Heidelberg, Berlin: Springer, 2006:708-711.
- [23] 何登发,谢晓安. 中国克拉通盆地中央古隆起与油气勘探[J]. 勘探家, 1997, 2(2):11-19.
He Dengfa, Xie Xiaolan. Petroleum exploration in central paleo-uplifts of cratonic basins in China [J]. Petroleum Explorationist, 1997, 2(2):11-19.
- [24] 杜金虎,邬光辉,潘文庆,等. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩油气藏特征及其分类[J]. 海相油气地质, 2011, 16(4):39-46.
Du Jinhui, Wu Guanghui, Pan Wenqing, et al. Classification and examples of Lower Paleozoic carbonate reservoirs in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(4):39-46.
- [25] 吕修祥,金之钧,皮学军,等. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩油气聚集与分布[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(4):358-361.
Lü Xiuxiang, Jin Zhijun, Pi Xuejun, et al. Hydrocarbon accumulation and distribution in Lower Paleozoic carbonates in Tarim Basin [J]. Science in China (Series D), 1999, 29(4):358-361.
- [26] 周兴熙. 复合叠合盆地油气成藏特征——以塔里木盆地为例[J]. 地学前缘, 2000, 7(3):39-47.
Zhou Xingxi. The petroleum reservoir-forming characteristics of the composite superimposed basin—an example from Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3):39-47.
- [27] 何登发,周新源,杨海军,等. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型[J]. 地学前缘, 2008, 15(2):207-221.
He Dengfa, Zhou Xinyuan, Yang Haijun, et al. Formation mechanism and tectonic types of intracratonic paleo-uplifts in the Tarim basin [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2):207-221.
- [28] Dow W G. Application of oil-correlation and source-rock data to exploration in Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(7):1253-1262.
- [29] 庞雄奇,金之钧,姜振学,等. 叠合盆地油气资源评价问题及其研究意义[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1):9-13.
Pang Xiongqi, Jin Zhijun, Jiang Zhenxue, et al. Evaluation of hydrocarbon resources of superimposed basin and its significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(1):9-13.
- [30] 金之钧,张一伟,王捷,等. 油气成藏机理与分布规律[M]. 北京:地质出版社,2003:73-94.
Jin Zhijun, Zhang Yiwei, Wang Jie, et al. Hydrocarbon accumulation mechanisms and oil/gas distribution [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:73-94.
- [31] Jin Zhijun. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate sequences in Chinese sedimentary basins [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(3):368-385.
- [32] 郑和荣,吴茂炳,邬兴威,等. 塔里木盆地地下古生界白云岩储层油气勘探前景[J]. 石油学报, 2007, 28(2):1-8.
Zheng Herong, Wu Maobing, Wu Xingwei, et al. Oil-gas exploration prospect of dolomite reservoir in the Lower Paleozoic of Tarim Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2007, 28(2):1-8.
- [33] 郑剑锋,沈安江,刘永福,等. 塔里木盆地寒武系与蒸发岩相关的白云岩储层特征及主控因素[J]. 沉积学报, 2013, 31(1):89-98.
Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Main controlling factors and characteristics of Cambrian dolomite reservoirs related to evaporite in Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1):89-98.
- [34] 何治亮,魏修成,钱一雄,等. 海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4):489-498.
He Zhiliang, Wei Xiucheng, Qian Yixiong, et al. Forming mechanism and distribution prediction of quality marine carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4):489-498.
- [35] 赵文智,沈安江,胡素云,等. 塔里木盆地寒武-奥陶系白云岩储层类型与分布特征[J]. 岩石学报, 2012, 28(3):758-768.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Type and distributional features of Cambrian-Ordovician dolostone reservoirs in Tarim Basin, northwestern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3):758-768.
- [36] 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.