

## 柴达木盆地多种能源矿产同盆共存及其地质意义

王 丹, 吴柏林, 寸小妮, 孙 莉, 徐梓皋, 詹 杰, 袁 康

(西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

**摘 要:**柴达木盆地是中国石油、天然气、煤和铀等多种能源矿产同盆共存的盆地之一。在平面分布上,目前已进入勘探开发阶段的油气藏分布于柴达木盆地西部、北缘及东部地区,煤和砂岩型铀矿分布在盆地北缘;在赋存层位上,石油及部分天然气(油型气、煤成气)以侏罗系煤系地层为源岩,以侏罗系、古近系—新近系为储层,煤赋存于侏罗系大煤沟组和小煤沟组,已知的铀矿化位于侏罗系、古近系—新近系地层。结合单种能源矿产的时空分布特征以及相互之间的组合形式,柴达木盆地石油、天然气、煤和砂岩型铀矿等多种能源矿产在空间上有明显的同盆共存关系,且在成藏成矿中相互作用。柴达木盆地西北地区石油与天然气、柴达木盆地北缘煤与煤成气呈同盆共存关系;柴达木盆地北缘铀矿化发育在煤层之上且在油气运移指向的边部有多个铀矿化点,油气及煤系地层为其提供还原剂。通过柴达木盆地北缘烃源岩生烃模拟试验,元素 U 及其伴生元素(Mn、Mo、V 和 Cs)的富集对烃源岩生烃有明显的催化作用,表现为生烃量大幅度增加和生烃高峰提前。综上所述,有机矿产对无机铀矿的形成起到了重要的还原作用,无机铀矿及其伴生元素对于有机油气的生成有明显的催化作用。

**关键词:**能源矿产;共存富集;石油;天然气;煤;铀矿;时空分布;柴达木盆地

**中图分类号:**P618.1

**文献标志码:**A

## Coexistence of Multiple Energy Minerals in Qaidam Basin and Its Geological Significance

WANG Dan, WU Bai-lin, CUN Xiao-ni, SUN Li, XU Zi-gao, ZHAN Jie, YUAN Kang

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

**Abstract:** Qaidam Basin is one of coexistence basins of multiple energy minerals including oil, natural gas, coal and uranium in China. According to the plane distribution, petroleum reservoirs developed distribute in the west, north margin and east of Qaidam Basin, coal and sandstone type of uranium deposit distribute in north margin; according to the occurrence layer, the hydrocarbon source rocks of oils and part gases including oil-type gas and coal-bed gas are from Jurassic coal strata, and the reservoirs are mainly Jurassic and Paleogene-Neogene, and coal is hosted in Jurassic Dameigou Formation and Xiaomeigou Formation, and uranium mineralization develops in Jurassic and Paleogene-Neogene. Combined with the temporal-spatial distribution of single energy mineral and the composition form between them, multiple energy minerals including oil, natural gas, coal and sandstone type of uranium deposit have significant coexistence in Qaidam Basin and have interaction between them. There are coexistence between oil and gas in the northwest of Qaidam Basin and between coal and coal-bed gas in the north margin; uranium mineralization

收稿日期:2014-08-01

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212011221045);国家自然科学基金项目(41173060)

作者简介:王 丹(1990-),女,陕西合阳人,工学硕士研究生,E-mail:wangdan0927@126.com。

通讯作者:吴柏林(1967-),男,江西赣州人,教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail:wubailin@126.com。

develops above coal-bearing strata in the north margin of Qaidam Basin, and there are several uranium mineralized points in the edge directed by petroleum migration, and petroleum and coal strata provide reductant for uranium metallogeny. Based on the hydrocarbon-generating simulated experiment of hydrocarbon source rocks in north margin of Qaidam Basin, the accumulation of U and the associated elements (Mn, Mo, V and Cs) has significant catalytic action on hydrocarbon-generating, indicating that the quantity of hydrocarbon-generating increases drastically, and the peak of hydrocarbon-generating is moved forward. In general, organic minerals have important reducing action on the formation of inorganic uranium deposit, and the inorganic uranium deposit and the associated elements have significant catalytic action on the formation of organic petroleum.

**Key words:** energy mineral; coexistence and accumulation; oil; natural gas; coal; uranium deposit; temporal-spatial distribution; Qaidam Basin

## 0 引言

柴达木盆地位于青藏高原北缘青海省境内,面积  $12.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是中国西部一个重要的中生代大型陆相沉积盆地,资源储量极为丰富,目前发现的能源矿产主要有石油、天然气、煤和砂岩型铀矿。

柴达木盆地石油勘探潜力巨大,截至 2006 年,石油探明率仅为 15.3%<sup>[1]</sup>。王永卓等在前人研究的基础上明确了柴达木盆地含油气系统及其分布范围,认为侏罗系含油气系统分布在柴达木盆地北缘(简称“柴北缘”)块断带 EW 向展布的条带,第三系含油气系统以茫崖坳陷为主,第四系含油气系统以三湖坳陷为主;并对柴北缘侏罗系煤系烃源岩演化历史进行了模拟和油气源对比<sup>[2-3]</sup>。徐凤银等认为柴达木盆地烃源岩的分布演化,圈闭的形成以及油气运移、成藏和保存都受构造演化的影响,构造演化控制了油气的分布<sup>[4-6]</sup>。曾春林等对柴北缘侏罗系烃源岩的微量元素进行了分析测试,认为柴北缘侏罗系烃源岩中 Mo、Sc、Ti、Cs、Ni 等元素含量明显高于其克拉克值<sup>[7]</sup>。

天然气在柴达木盆地西北部、北缘和三湖地区均富集成藏<sup>[8-11]</sup>。张晓宝等认为柴达木盆地西北地区具备深层气藏形成的条件,因为该区有 4 套有机质丰度中等到好的气源岩且气源岩均达到高过熟阶段,气源充足等,并且其源岩主要为下侏罗统地层,储层为古近纪—新近纪<sup>[12]</sup>。田光荣等提出柴北缘煤成气具有晚期成藏的特征<sup>[13]</sup>;马峰等分析了柴北缘煤成气的成藏条件和勘探领域<sup>[14]</sup>。

柴达木盆地可开采的煤炭资源主要分布于柴北缘地区。曹代勇等分析了煤田构造特点,并结合煤系基底构造特征、主干断裂构造特征及煤系赋存特

征,确定了柴北缘煤系展布具有南北分带、东西分区的基本规律,有利的成煤环境主要有湖侵过程中古隆起、断陷台地和废弃的辫状河冲积平原等<sup>[15]</sup>。占文锋等运用构造控煤分析方法,探讨了柴北缘煤系赋存的基本规律,并圈定柴北缘东西分区的中、东段为勘探开发的重点区段<sup>[16]</sup>。邓文诗等对柴北缘中下侏罗统含煤岩系沉积特征、聚煤作用以及含煤性等进行了分析,指出中下侏罗统大煤沟组、小煤沟组为主要含煤段<sup>[17-18]</sup>。

路耀祖对柴北缘冷湖地区古近系—新近系的可地浸砂岩型铀矿进行了研究,分析了成矿的有利因素,包括来源于周边高山蚀源区的铀以及泥砂泥互层产出铀的迁移富集等<sup>[19]</sup>。刘林等指出柴北缘层间氧化带主要发育在鱼卡、北大滩等地区的中侏罗统大煤沟组和石门沟组,厚度较大,比较稳定,具明显的氧化带、过渡带、还原带特点,铀矿化主要分布在层间氧化带的上、下翼及前锋线附近,呈板状或薄层状产出<sup>[20-22]</sup>;在此基础上,刘林等明确了铀矿化层位主要是中侏罗统的大煤沟组、石门沟组,另外还有下侏罗统湖西山组和渐新统下干柴沟组,并预测柴北缘鱼卡、北大滩地区是砂岩铀矿的有利远景区<sup>[23]</sup>。杜善青等指出柴达木盆地西北缘铀矿化发育在油气藏顶部的渐新统下干柴沟组岩层中,铀矿化与油气还原作用有着密切的联系<sup>[24]</sup>。

柴达木盆地石油、天然气、煤和砂岩型铀矿等单种能源矿产的研究已日趋成熟,但各能源矿产之间的相互关系和作用、铀矿与油气煤的关系是该区能源矿产研究的一个弱点。前人对于盆地有机-无机能源矿产共存的研究也取得了一些成果。杜乐天等认为美国、中亚和中国北方的砂岩型铀矿产区是和油气盆地上下叠合的<sup>[25]</sup>。陈广坡等指出油气藏和

沉积金属矿产有相同的物源,一些金属的存在对有机质转化为烃类有催化作用,同时烃类有机酸有利于金属元素随烃类和成矿流体析出,二者之间有着密切的联系<sup>[26]</sup>。近年来,随着大规模砂岩型铀矿的勘探开发,砂岩型铀矿常常与石油、天然气、煤产在同一盆地中<sup>[27]</sup>。刘池洋等首次提出多种能源矿产成藏成矿系统的理论,并研究了鄂尔多斯盆地多种能源矿产同盆共存及相互作用<sup>[28-29]</sup>。王毅等以鄂尔多斯盆地为例,研究了多种能源矿产之间的相互联系及协同勘探<sup>[30]</sup>。这些研究成果均表明多种能源矿产有着密切的联系,因此,本文从柴达木盆地多种能源矿产的相互作用出发,根据盆地内单种能源矿产的时空分布特征、赋存规律和成藏(矿)机理,结合其勘探实践总结了柴达木盆地多种能源矿产同盆共存特征和有机-无机能源矿产之间的相互作用,并阐述了多种能源矿产同盆共存的地质意义。

## 1 沉积构造背景

柴达木盆地位于欧亚大陆腹地,隶属于塔里木—中朝板块,可能是由塔里木—中朝古板块分离出来的微型古陆,夹持在秦—祁—昆古生代地槽褶皱带之间<sup>[31]</sup>,是在前古生代基底上发育起来的中新生代内陆山间盆地。其被昆仑山、阿尔金山和祁连山所环绕,盆地内主要发育NW向和NE向深大断裂。这些断裂控制盆地构造的分区性和分带性,使得盆地在构造上具有东西分区与南北分带的特征。柴达木盆地可划分出北部块断带、茫崖坳陷、德令哈

坳陷和三湖坳陷4个一级构造单元。北部块断带位于盆地北部,倾向NE的逆断层起主要构造作用,地层完整;主要发育有中—下侏罗统和新生界的烃源岩。茫崖坳陷位于盆地西南部,发育有巨厚的古近系—新近系地层,为石油的生储盖层。三湖坳陷位于盆地东南部,是第四系的沉积中心和沉降中心,也是盆地生物气的主要生烃坳陷。

柴达木盆地主要发育有古生界、中生界和新生界三套地层,其中中、新生界地层厚6~10 km,最厚达17 km;发育有下侏罗统,中侏罗统,上侏罗统一白垩系,古近系的路乐河组、下干柴沟组,新近系的上干柴沟组、下油砂山组、上油砂山组、狮子沟组和第四系地层(图1)。下侏罗统分布于柴北缘西段、祁连山和阿尔金山交汇处,发育牛东、昆特依、伊北和冷湖4个局部沉降中心,是柴北缘的主力生油凹陷;中侏罗统在下侏罗统之上沉积,并向东扩展至整个祁连山前,西部地区遭剥蚀,因此,中侏罗统主要沿赛什腾—鱼卡一线分布;上侏罗统一白垩系在柴达木盆地东部(简称“柴东”)的沉积范围与中侏罗统相近,而在柴北缘西段范围有所收缩,主要分布于鱼卡地区;经燕山晚期构造运动的剥蚀夷平作用后,路乐河组大面积超覆于中生界或更老的地层之上,柴达木盆地南部及东部开始接受沉积,路乐河组主要分布于柴达木盆地西部(简称“柴西”)和柴北缘西段,沿乌图美仁—大柴旦一线向东超覆尖灭,发育有一里坪凹陷、昆特依凹陷和茫崖坳陷3个沉降中心;下干柴沟组下段基本继承路乐河组沉积时的基本格

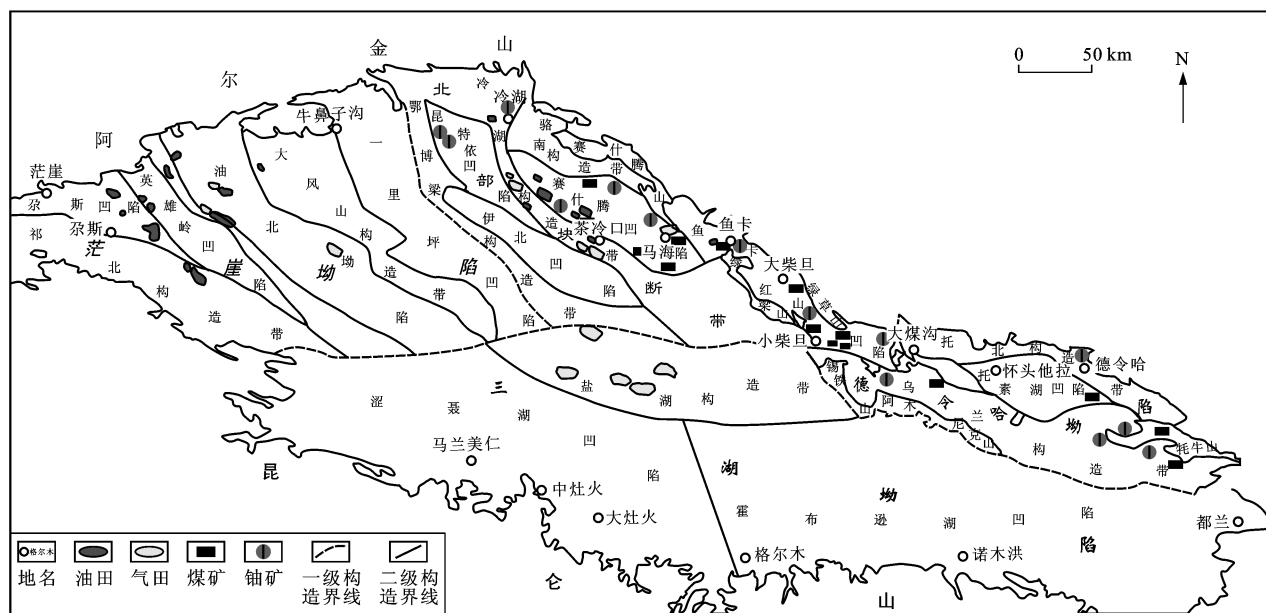


图1 柴达木盆地多种能源矿产平面分布

Fig. 1 Plane Distribution of Multiple Energy Minerals in Qaidam Basin

局,主要沉降中心为茫崖坳陷和一里坪凹陷,是柴西古近系主力生油凹陷;上干柴沟组的沉积分布基本与下干柴沟组相同;下油砂山组在分布上继承上干柴沟组,凹陷形态也相似,在柴达木盆地边缘隆起更加明显;受下油砂山组沉积后晚喜山运动影响,上油砂山组时期柴达木盆地周缘遭受剥蚀,柴达木盆地西部和柴北缘西段残余厚度较小,在三湖以东地区发育数个串珠状小型沉降中心;狮子沟组时期,三湖坳陷形成;狮子沟组沉积后晚喜山及新构造运动期间,柴达木盆地构造活动强烈,基本未见第四系,在柴西和柴北缘的阿拉尔、小梁山、赛什腾等次凹有相对较厚的第四系。

## 2 多种能源矿产时空分布特征

在平面上(图 1),石油、天然气、煤、铀矿主要分布在柴达木盆地周缘和柴东。石油主要分布在柴北缘和柴西;第四系生物气分布在柴东三湖地区,侏罗系煤成气则在柴北缘的伊北凹陷和鱼卡凹陷存在数

个气田,第三系油型气在柴西茫崖坳陷也有富集;目前已开采的煤炭资源分布在柴北缘,主要有木里煤田(祁连山中部)、尕斯煤田、赛什腾煤田、鱼卡煤田、全吉煤田、德令哈煤田等;已发现的砂岩型铀矿异常孔和矿化孔分布在柴达木盆地北部的冷湖、鱼卡、北大滩、德令哈等地区。

在赋存层位(表 1)上,石油赋存层位在柴北缘主要为古近系、新近系以及侏罗系中下统层位,烃源岩主要为中一下侏罗统煤岩;在柴西地区,主力烃源岩层为  $N_1^1$ ,储层主要是  $N_2^1-N_2^2$ ,另外还有  $E_1^1$ 、 $E_2^1$ 、 $E_3$ 。柴东三湖地区生物气储层和气源岩层均为第四系;柴北缘煤成气主要在中下侏罗统。煤主要赋存在中侏罗统大煤沟组,部分在下侏罗统小煤沟组。砂岩型铀矿主要分布于中下侏罗统煤系地层的砂岩中,此外在冷湖地区的油气藏顶部新近系砂岩层中也有发现。对比这些能源矿产的赋存层位,石油、天然气在层位上大部分重叠,煤和砂岩型铀矿层位相近,且含煤层位同时也是油气的源岩层,共存特征明显(图 2、3)。

表 1 柴达木盆地多种能源矿产赋存层位

Tab. 1 Occurrence Layers of Multiple Energy Minerals in Qaidam Basin

地层系统					年代/Ma	构造运动	沉积环境	赋存层位						
界	系	统	组(群)	代号				石油	天然气	煤	砂岩型铀矿			
新生界	第四系	全新统	达布逊盐桥组		Q <sub>3+4</sub>	0.025	喜山晚期	河流泛滥平原相						
		更新统	七个泉组		Q <sub>1+2</sub>				✓					
	新近系	上新统	狮子沟组		N <sub>2</sub>	3		河流泛滥平原相		✓	✓		✓	
		中新统	上油砂山组		N <sub>1</sub> <sup>2</sup>	5.1	喜山中期	河流泛滥平原相浅湖相		✓	✓		✓	
			下油砂山组		N <sub>1</sub> <sup>1</sup>	15.09		半深湖深湖相河流泛滥平原相		✓	✓		✓	
	古近系	渐新统	上干柴沟组	上段	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	24.6		三角洲前缘相河流泛滥平原相		✓	✓			
				下段	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	三角洲前缘相河流泛滥平原相		✓	✓					
		始新统	下干柴沟组	上段	E <sub>2</sub> <sup>2</sup>	40		喜山中期	三角洲前缘相滨湖相					
				下段	E <sub>2</sub> <sup>1</sup>	三角洲前缘相滨湖相								
			古新统	路乐河组		E <sub>1</sub>			50.5	燕山晚期	河流泛滥平原相			
	中生界	白垩系	上统	犬牙沟组		K <sub>1</sub>	65		河流冲积平原相					
下统							河流冲积平原相滨湖相							
侏罗系		上统	红水沟组、采石岭组		J <sub>3</sub>	135	印支晚期	滨湖相冲击扇		✓	✓	✓	✓	
		中统	石门沟组、大煤沟组		J <sub>2</sub>	161		滨湖相冲击扇		✓	✓	✓	✓	
		下统	小煤沟组		J <sub>1</sub>	178		深湖半深湖相		✓	✓	✓	✓	
三叠系						208								

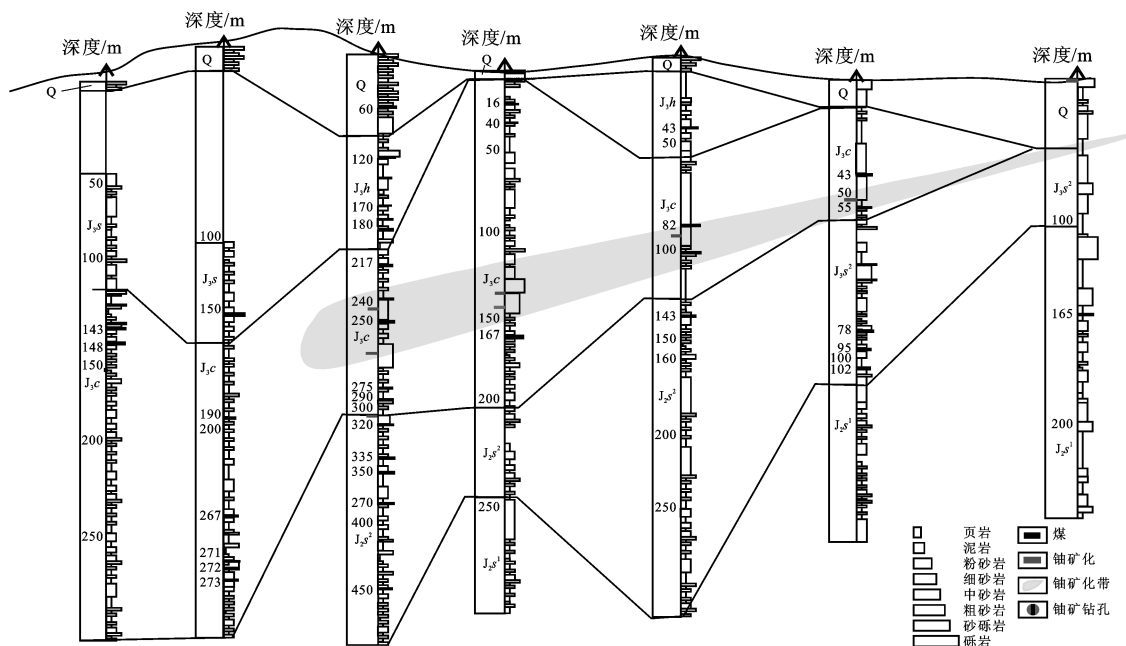
### 2.1 石油

柴达木盆地有柴北缘、柴西以及柴东三湖 3 个主要含油气区,其中柴北缘油气区根据烃源岩层位又可分为昆特依凹陷含油气区和赛什腾—鱼卡凹陷含油气区。

昆特依凹陷含油气区主要位于柴北缘西南部,

以下侏罗统煤系地层为源岩,以侏罗系和古近系—新近系为储层,盖层以路乐河组和上干柴沟组上段泥岩为主。该生烃凹陷在  $E_3$  末期形成了系列圈闭和原生油气藏,在  $N_2^1$  末期可能有较大规模的油气运聚,在  $N_2^3$  末期—Q 期高成熟干气藏形成,同时破坏了部分原生油气藏,形成许多次生油气藏。柴西





$J_3h$  为上侏罗统红水沟组;  $J_3c$  为上侏罗统采石岭组;  $J_3s$  为上侏罗统石门沟组

图2 德令哈地区多种能源矿产赋存层位剖面对比

Fig. 2 Comparison of Occurrence Layer Profiles of Multiple Energy Minerals in Delingha Area

地区由于地层抬升、剥蚀及断裂多断至地表,油气逸散程度高,保存条件差。

赛什腾—鱼卡凹陷含油气区位于柴北缘西北部,以中侏罗统为烃源岩。钻井揭示该油气系统鱼卡地区储层为上侏罗统采石岭组( $J_3^1$ ),潜西地区主要是  $E_3$ ,其次是  $J_2$ 、 $E_{1+2}$ ,个别井在  $N_1$  也有油气显示;盖层为储层之上的泥质岩类。赛什腾凹陷热演化程度具有由西向东逐渐增高的趋势,生烃门限时间早,有机质成熟度高,在  $E_3$  末期进入生烃门限,在  $N_2$  中期进入生烃高峰,现今达到高成熟—过成熟阶段;鱼卡凹陷和近山前带生烃门限时间晚,由于喜山中晚期的构造抬升,现今基本处于低成熟阶段。断裂是该区油气主要的垂向运移通道,砂体和不整合面作为疏导层使油气发生较短距离的横向运移。喜山晚期构造运动对该区油气的聚集保存具有重要影响,在为油气运移提供动力导致油气藏形成的同时,地层抬升遭受剥蚀,致使油藏受到破坏和改造,发生油气逸散,在圆顶山、马海尕秀构造地面均发现有地表沥青和油气苗。

柴西含油气区夹持于祁漫塔格山和阿尔金山之间,构造上位于茫崖坳陷,油气主要分布于古鼻隆倾没端及凹陷内。上干柴沟组、下油砂山组是本区主要烃源岩层,储层为  $E_3^1$ 、 $E_3^2$ 、 $N_1$  和  $N_2^1$ ,有深部  $E_3^2$ — $N_1$  和浅部  $N_2^2$ — $Q$  两套区域性盖层,油气总体上以低成熟油为主。由于埋藏史及古地温梯度不同,柴

西不同地区烃源岩的热演化进程差异明显,一般在  $N_2^1$ 、 $N_2^2$ 、 $N_2^3$ — $Q$  层位不同地区相继进入生油门限,圈闭一般形成于  $N_2^1$ 、 $N_2^2$ 。  $N_2^1$  末期构造运动提供的动力使油气发生运移、聚集并首次成藏;  $N_2^3$  末期—喜山晚期和新构造运动期间形成了大量的圈闭,同时油气发生大规模的运移、聚集;该区发生第2次成藏事件,也是柴西地区最重要的成藏期<sup>[23]</sup>。该区油气成藏具有2个显著特点:一是油气以垂向运移为主;其二是经历了两期成藏并以晚期成藏为主。

## 2.2 天然气

柴达木盆地天然气主要有生物气、煤成气、油型气三类<sup>[32]</sup>(表2)。生物气分布于柴东三湖地区,以第四系七个泉组和新近系狮子沟组( $N_3^2$ )为气源层、储层和盖层,与盆地其他能源矿产没有明显的相关性。

煤成气主要分布在柴达木盆地西北缘冷湖—南八仙构造带上,生烃凹陷有伊北凹陷和赛什腾凹陷,气源岩为中下侏罗统含煤岩系,储层为古近系—新近系。侏罗系源岩于古近系晚期进入生排烃高峰期,通过断裂运移至上部地层,并于下干柴沟组末期聚集形成古近系原生油气藏;同时,古近纪末期柴北缘发生强烈的构造运动,使原有油气藏遭到破坏和调整<sup>[33]</sup>并形成新的断裂,生成的油气再次沿断裂向上部地层运移,于古近系—新近系末期部分油气再次聚集形成新近系次生油气藏。

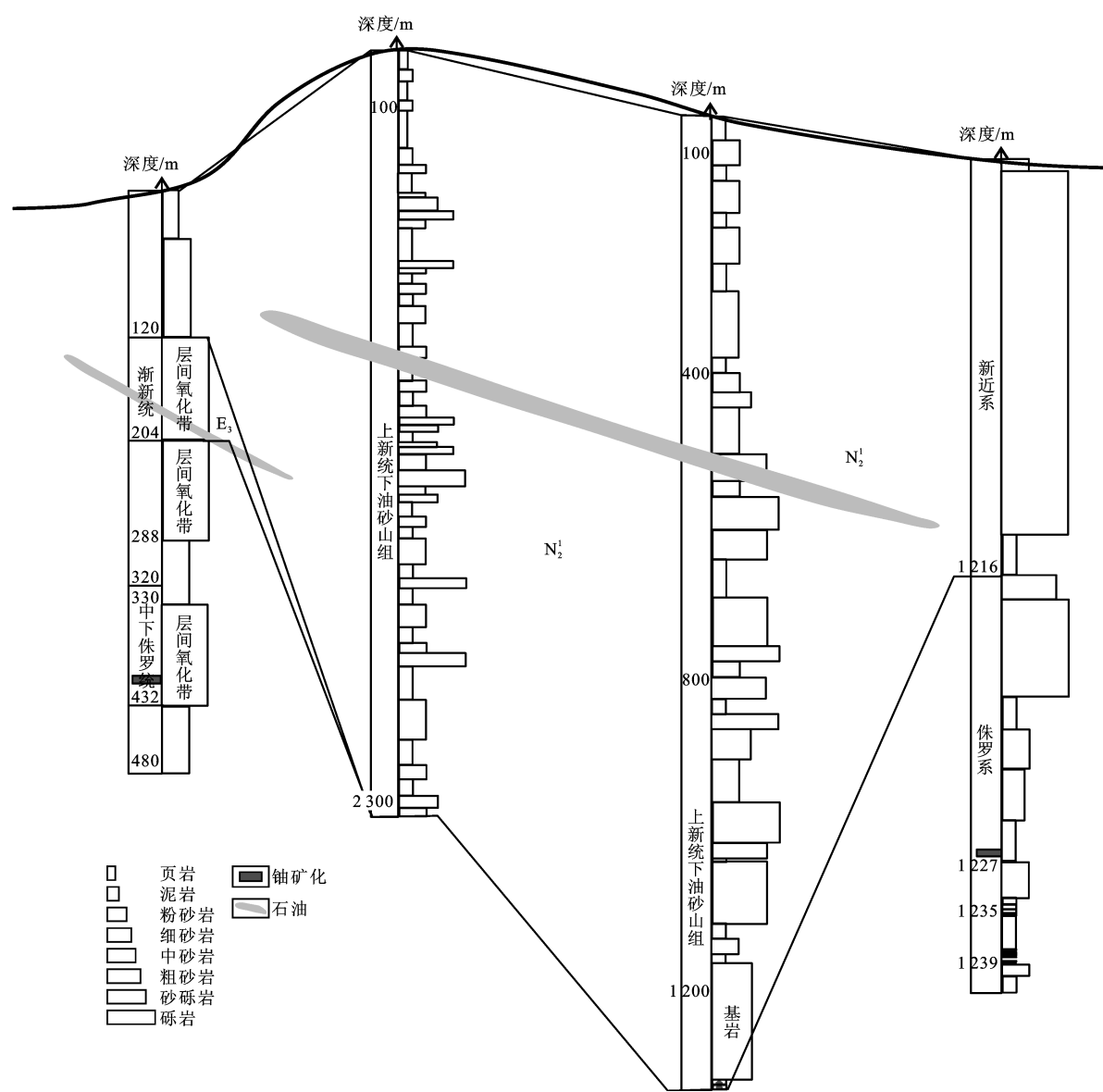


图 3 冷湖地区多种能源矿产赋存层位剖面对比

Fig.3 Comparison of Occurrence Layer Profiles of Multiple Energy Minerals in Lenghu Area

表 2 柴达木盆地天然气分类

Tab.2 Classification of Natural Gas in Qaidam Basin

地区	构造名称	CH <sub>4</sub> 中 δ( <sup>13</sup> C)值/10 <sup>-3</sup>	CH <sub>4</sub> 质量分数/%	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 质量分数/%	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> 质量分数/%	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 质量分数/%	天然气类型
柴西	狮子沟	-44.44	69.930	7.730 0	4.990	1.830 0	油型气
	南翼山	-38.57	79.230	6.750 0	5.400	2.830 0	
	小梁山		91.670	4.010 0	1.270	0.510 0	
	开特米里克	-32.60	74.800	2.810 0	1.470	0.840 0	
	油泉子		86.990	5.280 0	3.120	1.980 0	
柴北缘	南八仙	-29.40	89.776	3.472 8	1.110	1.165 8	煤成气
	马海	-30.40	85.730	1.590 0	0.640	0.320 0	
柴东	涩北一号	-68.51	99.260	0.080 0	0.010		生物气
	涩北二号	-67.20	98.430	0.060 0	0.020		
	台南	-66.05	99.400	0.009 0	0.026		
	伊克雅乌汝	-67.30	98.010	0.128 0	0.039		

注:表中数据引自文献[11]和[32]、[34]和[35];δ(·)为同位素组成。

油型气分布于柴西的北区,构造上位于茫崖坳陷和大风山鼻隆,主要富集在油泉子构造、南翼山构造、油墩子构造和开特米里克构造。本区有  $E_{1+2}$ 、 $E_3^1$ 、 $E_3^2$  和  $N_1^4$  等 4 套烃源岩,储层有  $E_3^1$ 、 $E_3^2$ 、 $N_1$ 、 $N_2^1$ 、 $N_2^2$ <sup>[35]</sup>,气源岩于  $N_2^1$  初期(距今 23.5 Ma)进入生气阶段,于  $N_2^2$  时期(距今 7 Ma)进入生气高峰期。从成藏时期来看,柴西地区石油两次成藏均与油型气生烃时间相近;从富集层位来看,该区气源岩层和储层均与石油的生储层基本相同,二者有明显的成生关系。

### 2.3 煤

煤炭资源在柴北缘和柴达木盆地中南部均有分布。后期构造运动导致柴北缘煤层出露,柴达木盆地中南部煤层埋藏较深,尚未开采。柴北缘基本特征为南北分带、东西分区、西部收敛、东部撒开的构造格局。依据基底构造特征及含煤岩系展布特征,以斜向走滑断裂为界,将柴北缘自西向东划分为西、中、东 3 个构造分区<sup>[15]</sup>:①柴北缘东部构造分区呈现三隆夹两凹的构造格局,3 条隆起带南麓受逆冲推覆构造作用,煤系抬升变浅,但多遭受断裂破坏,德令哈、乌兰凹陷带内煤系大面积沉积,但埋藏较深;②柴北缘中部构造分区呈现两隆两凹的构造格局,隆起带南麓遭受断裂破坏,煤系支离破碎,分布零星,而鱼卡—红山凹陷带内煤系埋深较浅,是柴北缘含煤区保存最丰富的区段;③柴北缘西部构造分区呈现出一隆一凹的构造格局,煤矿床主要沿赛什腾山及其山前分布,赛南凹陷带内煤系埋深过大,不宜开发。受基底和深部断裂控制,柴北缘以赛什腾山—达肯达坂山—大煤山—中吾农山和绿梁山—欧龙布鲁克山—布赫特山为界划分为 3 条含煤带,在南北方向上形成三隆三凹的构造格局;3 条隆起带南麓受逆冲推覆构造作用,含煤地层抬升变浅,但多遭受断裂破坏,煤系支离破碎,分布零星;3 条凹陷带内含煤地层大范围沉积,一般埋藏较深,但其浅部可形成较大面积的勘探开发区,尤其是鱼卡—乌兰凹陷一线为勘探开发的重点区域<sup>[15]</sup>。

柴北缘主要聚煤沉积体系包括辫状河及辫状河三角洲体系、曲流河三角洲体系和湖泊沉积体系,沉积体系聚煤特征表现为:①辫状河及辫状河三角洲体系主要发育于构造活动期,沉积环境不稳定,一般不利于成煤;②曲流河三角洲体系中,河流三角洲平原以河流作用为主,河道边缘沼泽是最重要的聚煤场所,成煤环境可分为岸后沼泽和泛滥盆地沼泽。早中侏罗世最有利的成煤环境为湖侵过程中的古隆起、断陷台地和废弃的辫状河冲积平原,大煤沟组是

该区最大成煤地层;聚煤环境有广阔山间盆地、小型山间盆地和山前坳陷等<sup>[17]</sup>。晚侏罗世至白垩纪,柴北缘西段发生构造热事件,促进煤转化为最高级煤,为生成煤成气做准备。

### 2.4 砂岩型铀矿

柴达木盆地铀矿化主要分布在冷湖、鱼卡、北大滩、德令哈以北等地区,区域构造上位于北部断块带的赛什腾山前构造斜坡带、鱼卡凹陷东部以及德令哈坳陷的乌兰构造带等接近物源的地区。铀源为元古界变质岩、古生代火山岩及蚀源区广泛分布的中酸性侵入岩<sup>[23]</sup>,具有多期性。目前所勘探的矿化孔含矿层位主要为中侏罗统大煤沟组和石门沟组,少量在渐新统,受层间氧化带控制。鱼卡、北大滩地区铀矿化产于中侏罗统石门沟组浅灰色粗砂岩中,位于古层间氧化带上翼及前锋线附近,具有较好的找矿前景;冷湖地区铀矿化赋存于下侏罗统湖西山组浅灰黑色泥质粉砂岩、砂岩中,铀矿化主要层位为渐新统下干柴沟组底部及中侏罗统顶部砾岩中,区内含矿砂体中含大量碳屑,铀矿化的形成与有机碳含量关系密切。早中侏罗世,柴北缘形成了一套有利于层间氧化带发育及砂岩型铀矿形成的目的层;晚侏罗世—白垩世是古层间氧化带发育时期,在鱼卡、德令哈、北大滩地区均发现古层间氧化带;古近纪—中新世早期形成次要附矿层  $E_3^2$ ,古近纪的超覆作用使得中下侏罗统被掩埋,目的层中发育的层间氧化作用停止,目的层被掩盖<sup>[21,23]</sup>;中新世晚期—第四纪是含矿目的层发生层间氧化的阶段,也是盆地铀矿的主要成矿期<sup>[36-37]</sup>。

## 3 多种能源矿产同盆共存及其相互作用

### 3.1 多种能源矿产同盆共存或运移逸散

(1)石油和油型气的同盆共存:柴西地区石油和天然气在构造上都位于茫崖坳陷和古鼻隆起,不管是成藏时期还是富集层位,二者都有密切联系,有明显的同盆共存关系。

(2)侏罗系煤和煤成气的同盆共存:柴北缘烃源岩为中下侏罗统地层,干酪根类型为Ⅱ、Ⅲ型,以生气为主,以生油为辅,因此,该区主要富集煤成气。

(3)砂岩型铀矿与油气逸散:柴北缘为油气发育区,形成一个较为闭合的还原环境<sup>[24]</sup>,喜山晚期构造运动使得该区地层抬升造成剥蚀,致使油藏受到破坏和改造,发生油气渗漏或散失,在地表可见到地表沥青和油气苗,同时在多个钻孔中见到黑色的油浸砂岩和鲜绿色泥岩。在含油气的地下水沿断裂由

深部向上运移过程中,遇到从地表向下运移的含铀含氧水发生氧化-还原反应,形成氧化-还原过渡带,也就是可地浸砂岩型铀矿的富存部位;在铀矿钻孔中所见铀矿石为黄绿色粗砂岩和细砂岩,就是油气还原所致。这些现象都表明砂岩型铀成矿与该区油气逸散有着一定的内在联系。

(4)砂岩型铀矿与煤成气运移逸散:柴北缘存在煤成气向北运移逸散(图 4)的标志以及柴北缘侏罗系中厚层白色砂岩的形成等,因此,可以推断柴北缘为侏罗系煤成气或页岩气向北逸散的指向区。这一特点有利于砂岩型铀矿的形成,油气再向北逸散还有利于柴北缘北侧冻土带中天然气水合物的形成。

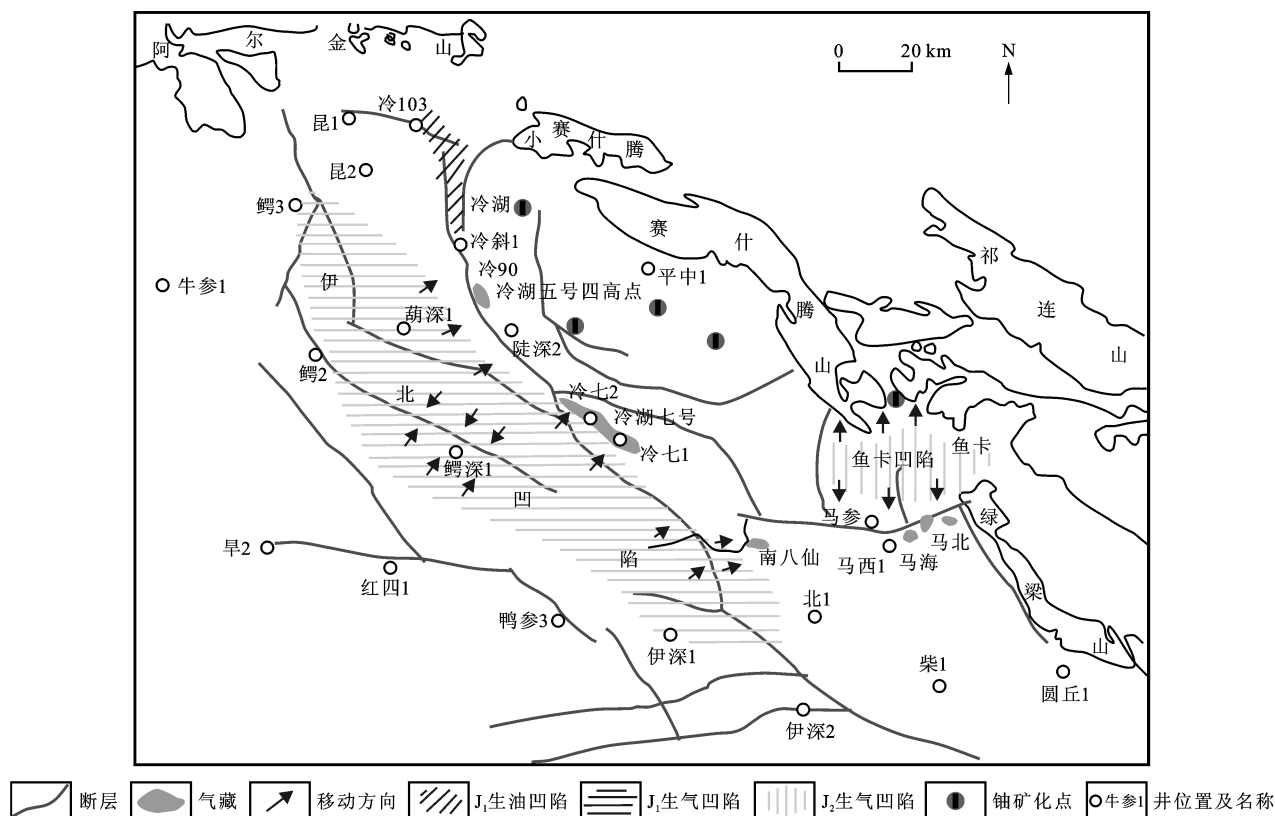


图 4 柴北缘西段生烃凹陷分布与油气运移方向

Fig. 4 Direction of Hydrocarbon Migration and the Distribution of Hydrocarbon-generating Sag in the Western Part of North Margin of Qaidam Basin

(5)砂岩型铀矿与煤的弱相关关系:柴达木盆地铀矿化发育在煤系地层及其上部(图 2、3),中下侏罗统煤系地层生成的煤成气在向上运移成藏过程中,使地层中铀元素被还原成矿,因此,煤与砂岩型铀矿有着弱相关关系和共存关系。

(6)天然气水合物与煤成气运移逸散:柴北缘北部尤其是鱼卡—德令哈以北一带,是长年冻土带,而柴北缘西段又具有较好的煤成气条件,一部分气体大规模向北运移(图 4),因而有可能在柴北缘北部地区寻找到天然气水合物,尤其是德令哈以北地区有望成为远景地带。

### 3.2 有机与无机矿产之间的相互作用

有机与无机矿产之间没有亲缘关系,但 Vorlice 等认为无机元素对有机能源(油气等)的形成

和演化存在一定的地质催化作用<sup>[38-39]</sup>,在沉积盆地中它们相互依存并且相互作用,从而构成了多种能源矿产同盆共存的局面<sup>[40]</sup>。从柴北缘侏罗系烃源岩样品中铀及其伴生元素的平均含量(表 3)来看,元素 U 以及 Mn、Mo、V、Cs 等伴生元素的平均含量远远高于对应的克拉克值,因此,选取柴北缘侏罗系烃源岩(煤、碳质泥岩和油页岩)进行有机质模拟催化生烃试验。向烃源岩样品中加入元素 Mn、Mo、V、Cs、U 等进行加热生烃试验,测试侏罗系烃源岩在不同温度点烃类气体  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$  和  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  以及还原性气体( $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等)的产气率。试验结果表明,元素 U 及其伴生元素(Mn、Mo、V、Cs 等)均在不同程度上影响了有机质的生烃率,对其有明显的催化作用。



表3 柴北缘侏罗系烃源岩元素 U、Mn、Mo、V 和 Cs 含量  
Tab.3 Contents of Elements U, Mn, Mo, V and Cs of  
Jurassic Source Rocks in North Margin of Qaidam Basin

元素	采样数	样品层位	含量平均值/ $10^{-6}$	克拉克值/ $10^{-6}$
U	8	J <sub>1</sub> 、J <sub>2</sub>	4.85	2.2
Mn	9	J <sub>1</sub> 、J <sub>2</sub>	930.40	840.0
Mo	8	J <sub>2</sub>	4.62	1.1
V	8	J <sub>2</sub>	161.37	120.0
Cs	8	J <sub>2</sub>	9.44	1.6

注:元素 Mn 数据引自文献[7];其余元素数据源自西北大学大陆动力学国家重点实验室。

从图 5(a)可以看出:在加热时加入元素 U,与未加元素相比其总生烃量( $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$  和  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )明显增加,尤其是温度在  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,这一规律十分明显;在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,生烃量的增加达到高峰,之后累计生烃量趋于平缓。这一现象在煤和油页岩样品的试验中也很明显。从图 5(b)可以看出:试验中加入元素 Cs 和 V 对于碳质泥岩气体  $\text{CH}_4$  的生成有促进作用,生气量明显增加,未加元素时进入生气高峰期的温度为  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而加入元素 Cs 和 V 后提前到  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图 5(c)可以看出:加入元素 Mn 后,碳质泥岩样品  $\text{CH}_4$  产气量增加,相比未加元素其也提前进入生烃高峰。从图 5(d)可以看出:加入元素 V 和 Mo 后,碳质泥岩总生烃量增加,同时元素 V 的促进作用要强于元素 Mo。从图 5(e)可以看出:加入元素 Cs 不仅可以影响烃源岩烃类气体的产气率,对无机的还原性气体  $\text{H}_2\text{S}$  同样有促进作用,生气高峰与未加元素时相同,但生成量增加幅度较大。从图 5(f)以看出:煤中加入元素 Mo 对  $\text{C}_2\text{H}_6$  和  $\text{C}_3\text{H}_8$  的产气率都有不同程度的促进作用,且促进作用在温度为  $200\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  区间内最为显著,增加量最大。

从图 5 还可以看出,通过加入金属元素 Mn、Mo、V、Cs、U 等,元素 U 及其伴生元素的富集能使烃源岩的烃类气体和非烃类还原性气体的生成量增加,同时还使烃源岩生烃高峰提前。由此可以推断,柴北缘侏罗系地层中元素 U 及其伴生重金属元素的富集可以促使该区油气烃源岩生烃量增加并提早进入生烃阶段,而伴生生成的还原性气体又反过来作用于含 U 物质使其还原成矿。

### 3.3 多种能源矿产同盆共存的地质意义

石油、天然气、煤和砂岩型铀矿在同一盆地的沉积演化-改造过程中形成、富集和成藏(矿),其成因、分布、赋存层位相互联系和影响<sup>[41]</sup>。柴达木盆地单

种能源矿产的研究已日渐完善,各能源矿产之间的相互作用是该盆地能源矿产研究的弱点和难点。从能源矿产的平面和赋存特征可以看出,石油、天然气、煤和砂岩型铀矿之间有着明显的同盆共存现象,其中柴西地区油气同盆共存,柴北缘煤和煤成气、石油和天然气、煤成气和砂岩型铀矿等均有不同程度的共存和成生关系。这些发现对于协同找矿和勘探具有一定的理论和实践意义。除此之外,一种能源矿产的发现可能隐含有其他能源矿产存在与否的重要信息<sup>[41]</sup>。柴北缘北部尤其是鱼卡—德令哈以北一带,是长年冻土带<sup>[42]</sup>,而柴北缘西段具有较好的煤成气成藏条件,煤成气来自柴达木盆地西南部的伊北凹陷下侏罗统和鱼卡—赛什腾凹陷中侏罗统烃源岩,一部分气体大规模向北运移(图 4),因而可能在柴北缘北部寻找到天然气水合物,尤其是在德令哈以北地区有望成为天然气水合物勘探的远景地带。另外,柴西地区和柴北缘有可观的油砂资源,柴北缘也发现了大量的页岩气和数个砂岩型铀矿化点和异常点<sup>[43]</sup>。

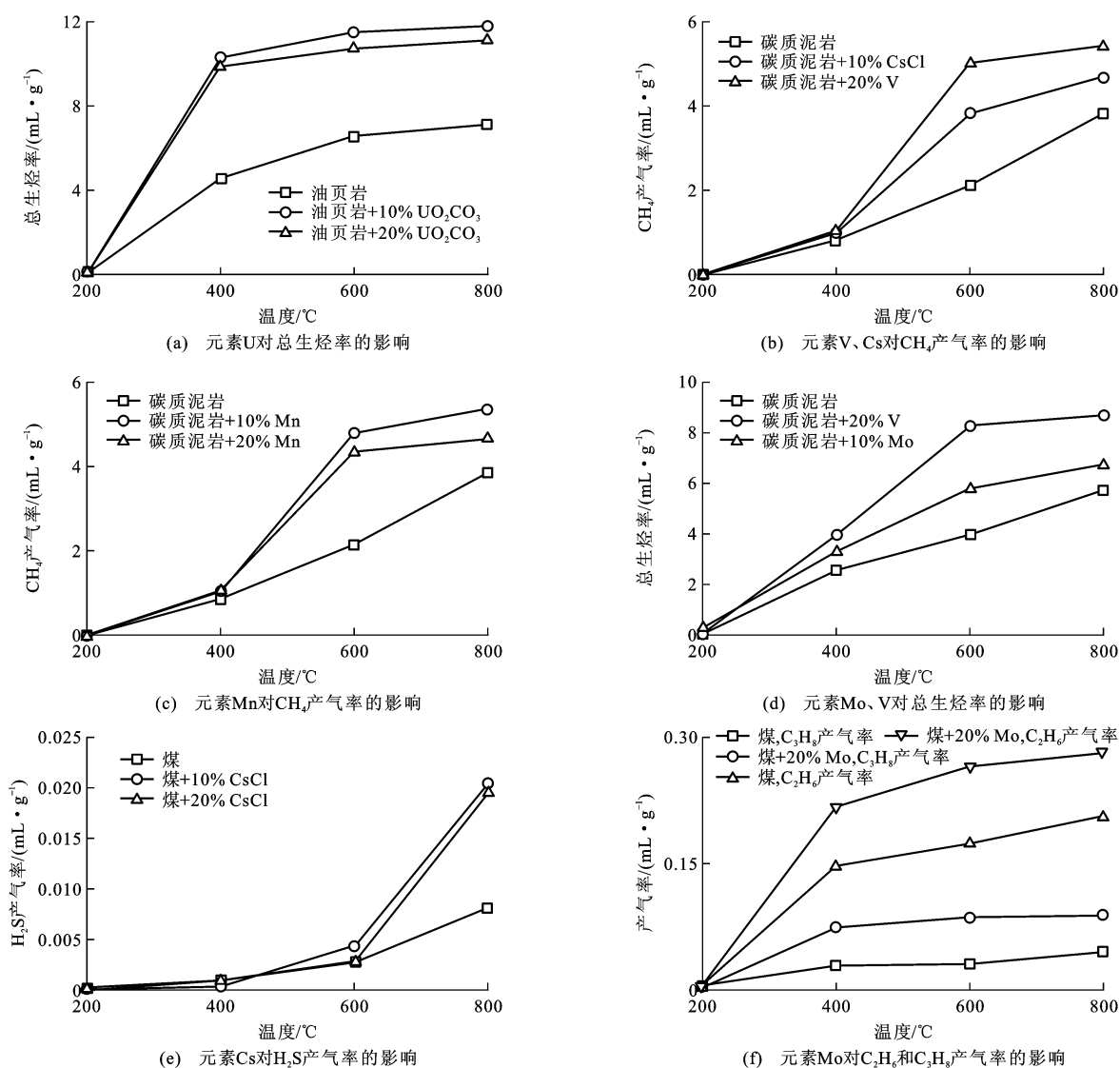
## 4 结 语

(1)石油、天然气、煤、砂岩型铀矿主要分布在柴达木盆地周缘和东部地区。石油主要分布在柴达木盆地西北部;第四系生物气分布在盆地东部的三湖地区,侏罗系煤成气则在柴北缘的伊北凹陷和鱼卡凹陷存在数个气田,第三系油型气在盆地西部茫崖坳陷也有富集;目前已开采的煤炭资源分布在柴北缘;砂岩型铀矿分布在盆地北部的冷湖、鱼卡、北大滩、德令哈等地区。

(2)在地层层位的纵向分布上,石油赋存层位主要是古近系、新近系以及侏罗系中下统层位;柴东三湖地区生物气储层和气源岩层均为第四系;柴北缘煤成气主要在中下侏罗统;煤主要赋存在中侏罗统大煤沟组,部分在下侏罗统小煤沟组。铀矿化层位主要为中下侏罗统煤系地层和渐新统地层。

(3)从多种能源矿产时空分布来看,油气相伴生于柴西和柴北缘;柴北缘煤成气是侏罗系煤聚集成藏后期煤化作用形成的,与煤有着密切的成生关系;铀矿化发育在煤系地层的上部,也具有明显的空间共存关系。石油、天然气在层位上大部分重叠,煤和砂岩型铀矿层位相近,且含煤层位同时也是油气的源岩层,共存特征明显。

(4)柴北缘中下侏罗统是油气源岩层、煤和砂岩型铀矿的赋存层位,同时富含元素 U、Mn、Mo、V、



油页岩、煤、碳质泥岩为生烃试验样品;油页岩+10% UO<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>表示油页岩中加入质量分数为10%的碳酸铀酰(UO<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>);  
油页岩+20% UO<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>表示油页岩中加入质量分数为20%的UO<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>;其他图例依此类推

图5 元素U及其伴生元素对烃源岩生烃的影响

Fig. 5 Effects of U and Associated Elements on the Hydrocarbon-generating

Cs等。通过侏罗系烃源岩生烃模拟试验,元素U、Mn、Mo、V和Cs对烃源岩生烃均有不同程度的促进作用。加入元素U使油页岩的总生烃量增加,在温度为400 °C时作用更加明显;加元素Mo使碳质泥岩总烃生成量增加且提前进入生烃高峰;加元素Mn使碳质泥岩甲烷产气量增加,在温度为600 °C时达到生气高峰,较未加元素时提前;加元素Cs碳质泥岩生烃量增加,并提前进入生烃高峰,同时使H<sub>2</sub>S的产气量增加;加元素V也使碳质泥岩总生烃量增加,生烃高峰提前。

(5) 柴北缘有机和无机矿产相互作用,有机的石油和煤型气在运移、逸散过程中使含U的层间氧化带还原成矿,对柴北缘砂岩型铀矿起到重要的还原

作用;同时,含U层间氧化带中的元素U及其伴生元素(Mn, Mo, V, Cs等)的富集又对柴北缘烃源岩生烃演化有着明显的催化作用。目前勘探发现的柴北缘侏罗系丰富的页岩气资源可能与该区元素U富集有关。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 尹成明,江波,韩秦鹏,等.柴达木盆地石油勘探潜力及勘探方向[J].中国石油勘探,2006(6):38-42.  
YIN Cheng-ming, JIANG Bo, HAN Qin-peng, et al. Potential and Direction of Petroleum Exploration in Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2006 (6):38-42.

- [2] 王永卓,孙德军,徐景祯.柴达木盆地北缘地区含油气系统划分与成藏历史分析[J].石油学报,2003,24(5):21-25.  
WANG Yong-zhuo, SUN De-jun, XU Jing-zhen. Petroleum System Division and Reservoir-forming History Analysis on the Northern Edge in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(5): 21-25.
- [3] 王明儒.柴达木盆地中、新生界含油气系统演化[J].新疆石油地质,2003,24(1):24-27.  
WANG Ming-ru. Formation and Evolution of Mesozoic Petroleum Systems in Qaidam Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(1): 24-27.
- [4] 徐凤银,彭德华,侯恩科.柴达木盆地油气聚集规律及勘探前景[J].石油学报,2003,24(4):1-6.  
XU Feng-yin, PENG De-hua, HOU En-ke. Hydrocarbon Accumulation and Exploration Potential in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 1-6.
- [5] 吴光大.柴达木盆地构造特征及其对油气分布的控制[D].长春:吉林大学,2007.  
WU Guang-da. Study on the Tectonic in Qaidam Basin and Its Control to the Hydrocarbon Distribution[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [6] 翟志伟,张永庶,杨红梅,等.柴达木盆地北缘侏罗系有效烃源岩特征及油气聚集规律[J].天然气工业,2013,33(9):36-42.  
ZHAI Zhi-wei, ZHANG Yong-shu, YANG Hong-mei, et al. Characteristics of Effective Source Rocks in the Jurassic and Hydrocarbon Accumulation Patterns in the Areas near the Northern Margin of the Qaidam Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(9): 36-42.
- [7] 曾春林,姜波,尹成明,等.柴达木盆地北缘微量元素含量及油气地质意义[J].新疆石油地质,2009,30(5):566-568.  
ZENG Chun-lin, JIANG Bo, YIN Cheng-ming, et al. Trace Element Contents and Their Oil-gas Geological Significance in Northern Margin of Qaidam Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(5): 566-568.
- [8] 李江涛,李志军,贾永禄,等.柴达木盆地东坪基岩气藏的特殊地质条件及其开发模式探讨[J].天然气工业,2014,34(8):75-81.  
LI Jiang-tao, LI Zhi-jun, JIA Yong-lu, et al. Special Geological Conditions and Development Modes of the Dongping Basement Gas Reservoirs in the Qaidam Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(8): 75-81.
- [9] 仰云峰,饶丹,付小东,等.柴达木盆地北缘石炭系克鲁克组页岩气形成条件分析[J].石油实验地质,2014,36(6):692-697.  
YANG Yun-feng, RAO Dan, FU Xiao-dong, et al. Generation Conditions of Shale Gas in Carboniferous Keluke Formation, Northern Qaidam Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(6): 692-697.
- [10] 邵龙义,李猛,李永红,等.柴达木盆地北缘侏罗系页岩气地质特征及控制因素[J].地学前缘,2014,21(4):311-322.  
SHAO Long-yi, LI Meng, LI Yong-hong, et al. Geological Characteristics and Controlling Factors of Shale Gas in the Jurassic of the Northern Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 311-322.
- [11] 梅建森,康毅力,张永高,等.柴达木盆地生物气源岩评价及勘探方向[J].天然气工业,2007,27(9):17-21.  
MEI Jian-sen, KANG Yi-li, ZHANG Yong-gao, et al. Biogas Source Rock Evaluation in the Qaidam Basin and Its Exploration Target[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(9): 17-21.
- [12] 张晓宝,徐自远,段毅,等.柴达木盆地三湖地区第四系生物气的形成途径与运聚方式[J].地质论评,2003,49(2):168-174.  
ZHANG Xiao-bao, XU Zi-yuan, DUAN Yi, et al. Metabolic Pathway of the Quaternary Biogenetic Gases and Their Migration and Accumulation in the Qaidam Basin, China[J]. Geological Review, 2003, 49(2): 168-174.
- [13] 田光荣,阎存凤,妥进才,等.柴达木盆地柴北缘煤成气晚期成藏特征[J].天然气地球科学,2011,22(6):1028-1032.  
TIAN Guang-rong, YAN Cun-feng, TUO Jin-cai, et al. Late Hydrocarbon Accumulation Characteristic of Coal Related Gas in Northern Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 1028-1032.
- [14] 马峰,乐幸福,王朴,等.柴达木盆地煤型气成藏条件及勘探领域[J].中国石油勘探,2014,19(3):87-94.  
MA Feng, LE Xing-fu, WANG Pu, et al. Accumulation Conditions and Exploration Domain of Coal-type Gas in Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 87-94.
- [15] 曹代勇,占文锋,刘天绩,等.柴达木盆地北缘构造分区与煤系赋存特征[J].大地构造与成矿学,2007,31(3):322-327.  
CAO Dai-yong, ZHAN Wen-feng, LIU Tian-ji, et al. Tectonic Divisions and Distribution Rules for Coal Measures in Northern Qaidam Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(3): 322-327.
- [16] 占文锋,曹代勇,刘天绩,等.柴达木盆地北缘控煤构造样式与赋煤规律[J].煤炭学报,2008,33(5):500-504.

- ZHAN Wen-feng, CAO Dai-yong, LIU Tian-ji, et al. Coal-controlled Structural Styles and Coal Occurrence Regularity in Northern Qaidam Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5): 500-504.
- [17] 邓文诗, 张丽霞, 成永盛. 青海省下中侏罗统含煤岩系沉积特征及聚煤作用[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(增2): 14-18, 56.
- DENG Wen-shi, ZHANG Li-xia, CHENG Yong-sheng. Coal-bearing Strata Sedimentary Features and Coal Accumulation Process in Lower Middle Series, Jurassic System, Qinghai Province[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(S2): 14-18, 56.
- [18] 杨德寿, 范文科, 林文良. 柴达木盆地北缘侏罗系含煤研究[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(12): 4-10.
- YANG De-shou, FAN Wen-ke, LIN Wen-liang. A Study on Jurassic System in Northern Qaidam Basin [J]. Coal Geology of China, 2011, 23(12): 4-10.
- [19] 路耀祖. 柴达木盆地冷湖地区古近—新近系可地浸砂岩型铀矿成矿前景[J]. 四川地质学报, 2007, 27(2): 104-106.
- LU Yao-zu. Ore Potentiality of In-situ Leaching Sandstone-type Uranium Deposits in the Lower and Upper Tertiary in Lenghu, Qaidam[J]. Acta Geologica Sichuan, 2007, 27(2): 104-106.
- [20] 刘林, 宋哲, 宋宪生, 等. 柴达木盆地北缘新生代地质构造演化与砂岩型铀成矿关系[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4): 306-312.
- LIU Lin, SONG Zhe, SONG Xian-sheng, et al. Study on Relationships Between the Structural Evolution and Sandstone-type Uranium Mineralization in Mesozoic Era and Cenozoic Era in the Northern of Chaidam Basin[J]. Journal of East China Institute of Technology: Natural Science Edition, 2008, 31(4): 306-312.
- [21] 权志高, 徐高中, 付成铭, 等. 柴北缘地区古层间氧化作用及古层间氧化带型铀矿化[J]. 西北地质, 2012, 45(1): 159-164.
- QUAN Zhi-gao, XU Gao-zhong, FU Cheng-ming, et al. The Paleo-interlayer Oxidation and the Paleo-interlayer Oxidation Type Uranium Mineralization in the North Area of Qaidam Basin [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(1): 159-164.
- [22] 权志高, 宋哲, 傅成铭, 等. 柴达木盆地北缘地区砂岩型铀矿成矿条件与成矿潜力[J]. 铀矿地质, 2014, 30(3): 155-160, 192.
- QUAN Zhi-gao, SONG Zhe, FU Cheng-ming, et al. Metallogenic Condition and Potential of Sandstone-type Uranium Deposits in the Northern Margin of Qaidam Basin [J]. Uranium Geology, 2014, 30(3): 155-160, 192.
- [23] 刘林, 宋宪生, 冯伟. 柴达木盆地北缘砂岩型铀矿地质特征和找矿前景分析[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告: 第二卷. 北京: 中国核学会, 2011: 210-217.
- LIU Lin, SONG Xian-sheng, FENG Wei. Prospect Analysis for Sandstone-type Uranium Mineralization in the Northern Margin of Qaidam Basin[C]// Chinese Nuclear Society. Progress Report on China Nuclear Science and Technology: Vol. 2. Beijing: Chinese Nuclear Society, 2011: 210-217.
- [24] 杜善青, 张玉龙. 柴达木盆地西北缘砂岩铀矿成矿条件分析与典型铀矿化特征[J]. 甘肃地质, 2013, 22(3): 53-57.
- DU Shan-qing, ZHANG Yu-long. On Sandstone Type Uranium Mineralization in the Northwest Margin of Qaidam Basin [J]. Gansu Geology, 2013, 22(3): 53-57.
- [25] 杜乐天, 欧光习. 盆地形成及成矿与地幔流体间的成因联系[J]. 地学前缘, 2007, 14(2): 215-224.
- DU Le-tian, OU Guang-xi. Genetic Relationship Between Basin Formation, Associated Mineralization and Mantle Fluids [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(2): 215-224.
- [26] 陈广坡, 徐国盛, 王天奇, 等. 论油气成藏与金属成矿的关系及综合勘探[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 200-206.
- CHEN Guang-po, XU Guo-sheng, WANG Tian-qi, et al. The Relationship Between Hydrocarbon Accumulation and Metallization and a Discussion on Intergrated Exploration [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 200-206.
- [27] SPIRAKIS C S. The Roles of Organic Matter in the Formation of Uranium Deposits in Sedimentary Rocks [J]. Ore Geology Reviews, 1996, 11(1/2/3): 53-69.
- [28] 刘池洋. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 1-23.
- LIU Chi-yang. Dynamics of Sedimentary Basin and Basin Reservoir (Ore) Forming System [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(1): 1-23.
- [29] 刘池洋, 赵红格, 谭成仟, 等. 多种能源矿产赋存与盆地成藏(矿)系统[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 131-142.
- LIU Chi-yang, ZHAO Hong-ge, TAN Cheng-qian, et al. Occurrences of Multiple Energy Mineral Deposits and Mineralization Reservoiring System in the Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2006, 27(2): 131-142.
- [30] 王毅, 杨伟利, 邓军, 等. 多种能源矿产同盆共存



- 富集成矿(藏)体系与协同勘探:以鄂尔多斯盆地为例[J]. 地质学报, 2014, 88(5): 815-824.
- WANG Yi, YANG Wei-li, DENG Jun, et al. Accumulation System of Cohabiting Multi-energy Minerals and Their Comprehensive Exploration in Sedimentary Basin: A Case Study of Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5): 815-824.
- [31] 李春昱, 王 荃, 刘雪亚. 亚洲大陆构造图及说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1982.
- LI Chun-yu, WANG Quan, LIU Xue-ya. Manual of Asian Geotectonic Map[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982.
- [32] 宋成鹏, 张晓宝, 汪立群, 等. 柴达木盆地北缘天然气成因类型及气源判识[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 90-96.
- SONG Cheng-peng, ZHANG Xiao-bao, WANG Li-qun, et al. A Study on Genetic Types and Source Discrimination of Natural Gas in the North Margin of the Qaidam Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2009, 30(1): 90-96.
- [33] 曲江秀, 高长海, 查明. 柴达木盆地北缘天然气成藏模式及勘探方向[J]. 新疆地质, 2008, 26(4): 377-381.
- QU Jiang-xiu, GAO Chang-hai, ZHA Ming. Natural Gas Pool Formation Models and Exploration Direction in the Northern Margin of Qaidam Basin[J]. Xinjiang Geology, 2008, 26(4): 377-381.
- [34] 焦贵浩, 张 林, 李 剑, 等. 柴达木盆地三湖地区生物气资源潜力及勘探方向[J]. 石油地质, 2009(2): 1-5.
- JIAO Gui-hao, ZHANG Lin, LI Jian, et al. Biogenic Gas Resource Potential and Exploration Direction in Sanhu Region Qaidam Basin[J]. Petroleum Geology, 2009(2): 1-5.
- [35] 张晓宝, 殷启春, 马达德, 等. 柴达木盆地西北区深层气成藏条件与有利勘探目标[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 201-211.
- ZHANG Xiao-bao, YIN Qi-chun, MA Da-de, et al. Deep Gas Pool-forming Conditions in the Northwestern Qaidam Basin and Their Favorable Exploration Targets[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 201-211.
- [36] 潘语录. 柴北缘含煤区地层测井物性特征分析[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(12): 42-45.
- PAN Yu-lu. Strata Well Logging Characteristic Analysis of Coal-bearing Area on North Margin of Qaidam Basin[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(12): 42-45.
- [37] 乔建学, 赵希刚, 刘 林, 等. 柴达木盆地北缘逆冲构造与砂岩型铀矿的关系初析[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2010, 33(3): 252-256.
- QIAO Jian-xue, ZHAO Xi-gang, LIU Lin, et al. The Relationship Analysis of Thrust Structure and Sandstone Type Uranium Deposits at Northern Margin of Qaidam Basin[J]. Journal of East China Institute of Technology: Natural Science Edition, 2010, 33(3): 252-256.
- [38] VORLICEK T P, HELZ G R. Catalysis by Mineral Surfaces: Implications for Mo Geochemistry in Anoxic Environments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(21): 3679-3692.
- [39] MURRAY H H. Traditional and New Applications for Kaolin, Smectite, and Palygorskite: A General Overview[J]. Applied Clay Science, 2000, 17(5/6): 207-221.
- [40] 刘池洋, 毛光周, 邱欣卫, 等. 有机-无机能源矿产相互作用及其共存成藏(矿)[J]. 自然杂志, 2013, 35(1): 47-55.
- LIU Chi-yang, MAO Guang-zhou, QIU Xin-wei, et al. Organic-inorganic Energy Minerals Interactions and the Accumulation and Mineralization in the Same Sedimentary Basins[J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(1): 47-55.
- [41] 刘池洋. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- LIU Chi-yang. Review on Coexistence Reservoir(Ore) of Multiple Energy Mineral Deposits[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [42] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 7-16.
- ZHU You-hai, ZHANG Yong-qin, WEN Huai-jun, et al. Gas Hydrates in the Qilian Mountain Permafrost and Their Basic Characteristics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(1): 7-16.
- [43] 王兆明, 罗晓容, 汪立群, 等. 柴达木盆地北缘西段不整合发育特征及其油气地质意义[J]. 中国石油勘探, 2010(4): 19-26.
- WANG Zhao-ming, LUO Xiao-rong, WANG Li-qun, et al. Unconformity Characteristics of West Segment of Northern Margin in Qaidam Basin and Its Significance in Petroleum Exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2010(4): 19-26.