

吐哈盆地水西沟群“近生近储”型致密砂岩气藏特征及其成藏机制

杨玉平¹, 钟建华^{1,2}, 孙玉凯³, 王劲松³, 范莉红¹, 倪良田¹, 赵勇生¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640;
3. 中石油吐哈油田分公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009)

摘要:通过对多种地化指标的分析、对气藏与煤层关系的统计对比以及储层物性的测定,在野外露头观测、精细岩心观察和区域沉积剖面对比的基础上,总结吐哈盆地水西沟群的沉积模式,并结合气藏剖面实例对水西沟群致密砂岩气藏进行研究。结果表明:研究区致密气与其煤系源岩密切相关;成藏的有利因素主要来自于砂岩与煤层的大面积直接接触,以及决口扇体及构造裂缝这种“烟囱”状通道对源储的有效连通,其在本质上是一种源、储皆在水西沟群内的煤系源岩和致密砂岩储层间产生、运移和聚集的“近生近储”型气藏。

关键词:致密砂岩;煤系烃源岩;决口扇;近生近储;成藏机制

中图分类号: TE 122.1 文献标志码: A

引用格式: 杨玉平, 钟建华, 孙玉凯, 等. 吐哈盆地水西沟群“近生近储”型致密砂岩气藏特征及其成藏机制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(4): 34-41.

YANG Yuping, ZHONG Jianhua, SUN Yukai, et al. Discussion on characteristics and accumulation mechanisms of "proximal-generation and proximal-storage" type tight sandstone gas accumulations in Shuixigou Group, Turpan-Hami Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 34-41.

Discussion on characteristics and accumulation mechanisms of "proximal-generation and proximal-storage" type tight sandstone gas accumulations in Shuixigou Group, Turpan-Hami Basin

YANG Yuping¹, ZHONG Jianhua^{1,2}, SUN Yukai³, WANG Jinsong³,
FAN Lihong¹, NI Liangtian¹, ZHAO Yongsheng¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, Tuha Oilfield Company, PetroChina, Hami 839009, China)

Abstract: Based on field outcrops and fine core observations, as well as contrasting regional sedimentary profiles, a sedimentary model was summarized in the Shuixigou Group, Turpan-Hami Basin by combining a series of analyses of a variety of geochemical indexes, the statistics and contrast of the relationship between the gas layer and the coal strata, and the survey of reservoir physical properties. With examples of gas accumulation profiles, the tight sandstone gas accumulations in the Shuixigou Group were studied. The results show that there are genetic relationships between the Jurassic gas and the coal series source rock in the Shuixigou Group. The favorable accumulation factors of the Jurassic tight sandstone strata in Turpan-Hami Basin mainly include the direct contact of the sandstones with the coal layers in large areas, as well as so-called "chimney-like" channels as crevasse splay bodies and structural fractures serving as an effective connecting medium between sources and reservoirs. Tight sandstone gas accumulations of Shuixigou Group in Turpan-Hami Basin is a "proximal-generation and proximal-storage" type in nature whose generation, migration and accumulation are all confined to the Shuixigou Group itself.

收稿日期: 2013-11-20

基金项目: 国家自然科学基金石油化工重点基金项目(U1262203); 国家油气重大专项(2011ZX05009-002)

作者简介: 杨玉平(1981-),女,博士研究生,主要从事石油地质学和沉积学研究。E-mail: 379707644@qq.com。

Key words: tight sandstone; source rocks of coal series; crevasse splay; proximal-generation and proximal-storage; accumulation mechanism

致密砂岩气是中国近年来开发最为成功的非常规气藏,主要来自于煤系,从著名的鄂尔多斯盆地苏里格气田到川西气田均是煤系致密砂岩气藏^[1-2]。吐哈盆地水西沟群有丰富的致密砂岩气资源,气藏地质条件复杂,前人在各方面已取得了大量成果。柳益群等^[3]根据实测镜煤反射率及包裹体测温研究,计算侏罗纪时期台北凹陷古地温梯度约为 3.2 °C/100 m;刘江涛等^[4-5]通过对不同岩性烃源岩产气率变化特征的实验模拟研究,认为水西沟群烃源岩在侏罗纪末期就已经进入早期生气阶段;李成明^[6]认为吐哈盆地台北凹陷气藏运聚成藏模式独特,构成比较全面的油气差异运聚模式库;此外,杨镜婷等^[7]在对吐哈盆地源储配置关系的研究中,引入了配置系数的概念,进而对成藏的有效性作出评价;姜福杰等^[8-11]则着眼于源岩生排烃高峰期天然气充注史与储层致密演化史之间的动态时序关系,将“先成型”和“后成型”概念模型和“三明治”源储叠合、“甜点”等概念引入水西沟群致密气藏研究;俞益新等^[11]估算了储层的致密化时间,并通过油气伴生盐水包裹体均一化测温确定了致密砂岩气藏烃类注入的大致时间。但是,上述成藏模式的研究对沉积作用之于成藏物质基础(源储盖层)形成及其相互配置的影响存在欠缺,也未能总结适合研究区沉积地层特征的典型沉积模式。因此,笔者依据致密砂岩气藏烃源岩特征、源储配置条件,对吐哈盆地这一大型富煤陆相盆地的主要成藏机制进行研究。

1 区域地质概况

吐哈盆地是中国新疆维吾尔自治区境内三大沉积盆地之一,发育在西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块的交接部位,盆地四周群山环绕,呈长条状近东西向展布。吐哈盆地致密砂岩气藏主要发现于台北凹陷,该凹陷位于盆地中部,属于吐鲁番拗陷,面积 9 600 km²,由北向南可分为北部山前构造带、中央凹陷带和南部斜坡带三大次级构造单元。研究参考的主要钻井就位于台北凹陷北部山前构造带的柯柯亚地区和南部斜坡带的温吉桑地区^[12]。

吐哈盆地致密砂岩气主要发育在侏罗系水西沟群(西山窑组、三工河组和八道湾组)中,其中,煤系是主要的生烃层系,而夹在两套煤系烃源岩之间的大型冲积扇和扇三角洲砂岩、砾岩是主要储集层^[12-13]。目前已有多个探井见到丰富的油气显示,

北部山前带的巴喀地区、南部斜坡区的温吉桑地区已相继获得突破,发现了巴喀、丘东气田及多个含气构造,储集层单层厚度 20 ~ 50 m,累积厚度 300 ~ 500 m。孔隙度一般为 4% ~ 10%,渗透率一般小于 $(0.05 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属致密砂岩气藏^[13]。

2 气藏地质特征

2.1 天然气同位素组成具煤型气特征

天然气烃类气体的碳同位素特征是判断天然气成熟度及成因类型的重要指标。吐哈盆地水西沟群天然气系列碳同位素分布特点为:① $\delta^{13}\text{C}_1$ 和 $\delta^{13}\text{C}_2$ 间差较大,为 11.1‰ ~ 16.2‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 和 $\delta^{13}\text{C}_4$ 间差较小,表现为陆相湿气特征^[14];② $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -50.0‰ ~ -33.1‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 稍轻,为 -31‰ ~ -23.5‰, $\delta^{13}\text{C}_3$ 为 -28‰ ~ -20.5‰,表现为偏腐泥型的腐殖型天然气^[14-15],成烃母质为Ⅲ型干酪根;③总体而言,天然气同位素组成样品有较重的碳同位素组成,天然气成熟度为 0.82%和 0.78%,与其他已知的煤型气组成一致。

气源对比研究证实,吐哈盆地已发现水西沟群致密砂岩气藏中的油气均与中、下侏罗统煤系有良好的亲缘关系,且油、气的 R_0 值为 0.54% ~ 0.74%,与煤系烃源岩的 R_0 值(0.49 ~ 0.87%)吻合很好。

2.2 其他有机地化指标证据

从 $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 与 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 的关系可以看出,所有样品烃源岩样品的有机质类型均属于Ⅲ型(图 1(a))。较高 Pr/Ph 比值等指示环境的参数具有一致性,说明它们的早期沉积环境相同,都是水质偏淡的弱氧化、弱还原环境。

研究区 C_{29} 甾烷在甾烷类化合物中占绝对优势, C_{27} 含量为 3% ~ 21%,源岩有机质以陆源高等植物输入为主(图 1(b))。甾烷异构化参数明显的高比值以及苯丙甾烷的检出,表明吐哈盆地中下侏罗统煤系古环境中细菌微生物比较发育,细菌微生物作用导致煤岩和炭质泥岩在成岩早期就开始生烃和排烃,细菌微生物的自身降解作用也为煤成烃做出贡献。

据前人研究,在对样品有机酸的研究过程中曾检测出丰富的有机芳香酸系列化合物,它是腐植酸的降解产物,为高等植物母质来源的特征生物标志化合物^[15-16]。所有这些证据都表明水西沟群致密砂岩气藏与煤系烃源岩具密切亲缘关系。

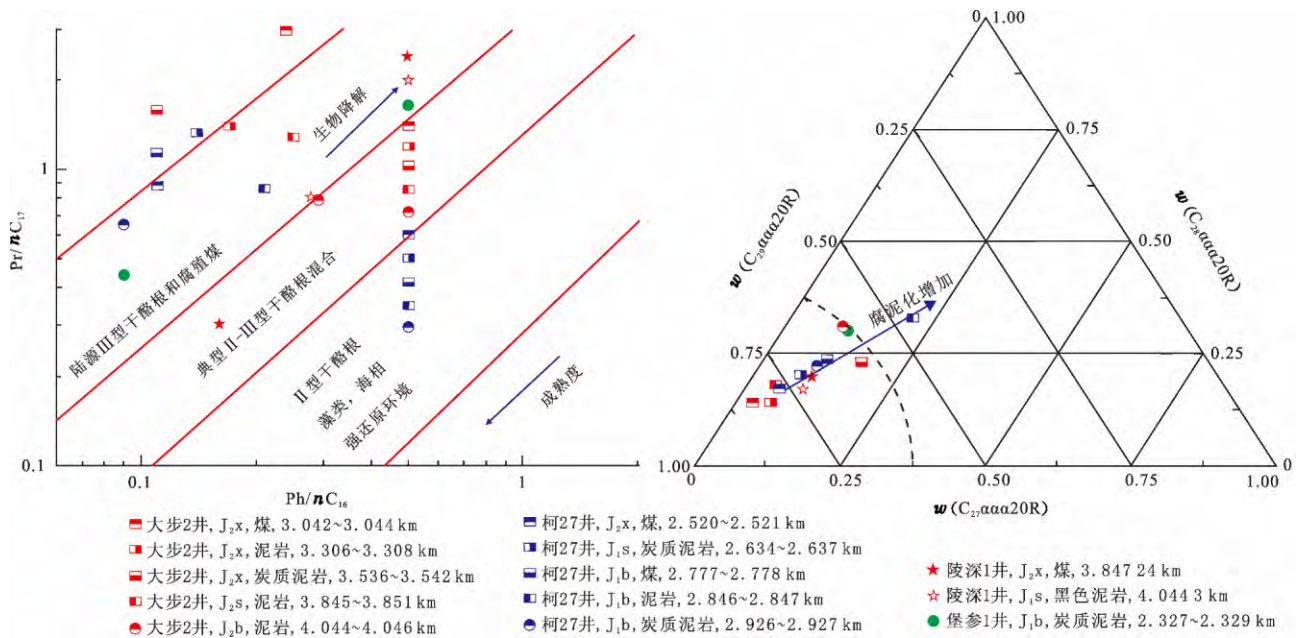
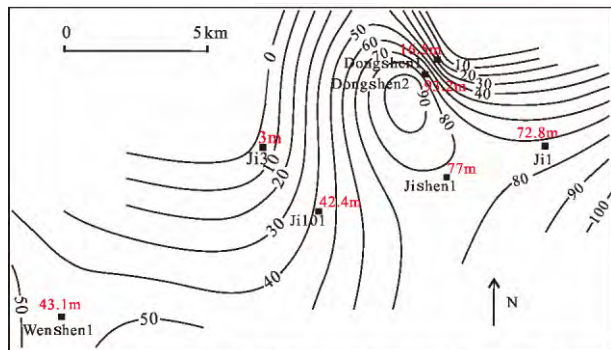


图1 水西沟群天然气多种有机地化指标特征示意图(据中科院兰地所)

Fig. 1 Schematic plot of a variety of organic geochemical indexes of natural gas in Shuixigou Group

2.3 气藏与煤层的关系

宏观上,吐哈盆地特别是台北凹陷油气藏分布与煤层有两种关系:一种是存在一定的共生关系,如温吉桑地区吉深一区块,其煤层累积厚度与各井单层日产气量存在某种程度的正相关性,说明在储层物性和构造高点等其他控藏因素稳定的情况下,煤层形成的天然气供烃确实是控制气藏的主导因素(图2);第二种是两者关系不大,说明煤层形成的天然气充注不是唯一控制气藏单井产量的主因,还有其他因素在起作用。



注:东深2井单井产气 $8.3755 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;深1井单井产气 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$

图2 温吉桑地区吉深1区块J₂x煤层累积厚度等值线图
Fig. 2 Isopach map of coalbed in Late Jurassic Xishanyao Formation, Jishen 1 block of Wenjishang area

对柯柯亚与温吉桑地区各口主力产气井进行单井产气量与气藏-煤层间距的统计,发现产气量与气藏-煤层间距呈反向变化关系(图3),这也再次说明气藏与煤层的关系非常密切,砂砾岩直接与煤

层接触有利于煤层气向致密砂岩充注形成气层。

综合以上各种特征,可以看出吐哈盆地水西沟群致密砂岩气藏与其煤系烃源岩间具有密切的亲缘关系。

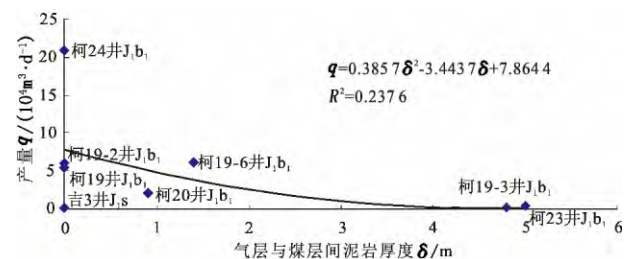


图3 致密砂岩产气量与煤层间距的关系
Fig. 3 Relationship between gas production of tight sandstone and coal seam spacing

2.4 高炭屑含量对于决口扇沉积的物性改善现象

岩心观察可见西山窑组与八道湾组上部煤层发育,且在中一粗砂岩储层中亦发育大量的煤条带和炭质碎屑,伴生丰富的波状交错层理与冲刷面(图4),沉积环境主要为辫状河三角洲平原的决口扇相。对研究区7口探井不同层位且炭屑含量不同的水西沟群岩心取样117块做物性测定与统计。结果表明,吐哈盆地水西沟群致密砂岩储层的物性与其炭屑含量关系非常密切,含炭屑较多的岩性(多为决口扇相)孔隙度和渗透率明显偏高。含炭屑较高的岩心(30块)其孔隙度平均为5.33%,含炭屑较少(53块)的孔隙度平均为4.69%,不含炭屑(34块)的孔隙度平均为4.05%,其相对数值差别为12.0%~24.01%;含炭屑较高的岩心渗透率平均值

为 $0.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含炭屑较少的为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 而不含炭屑的仅为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 相对数值差别为 45.45% ~ 68.18% (图 5)。总之, 物性测定

表明高炭屑含量对于决口扇沉积的物性具有很好的改善作用, 这将十分利于其作为“烟囱”状通道实现对源储的有效连通。

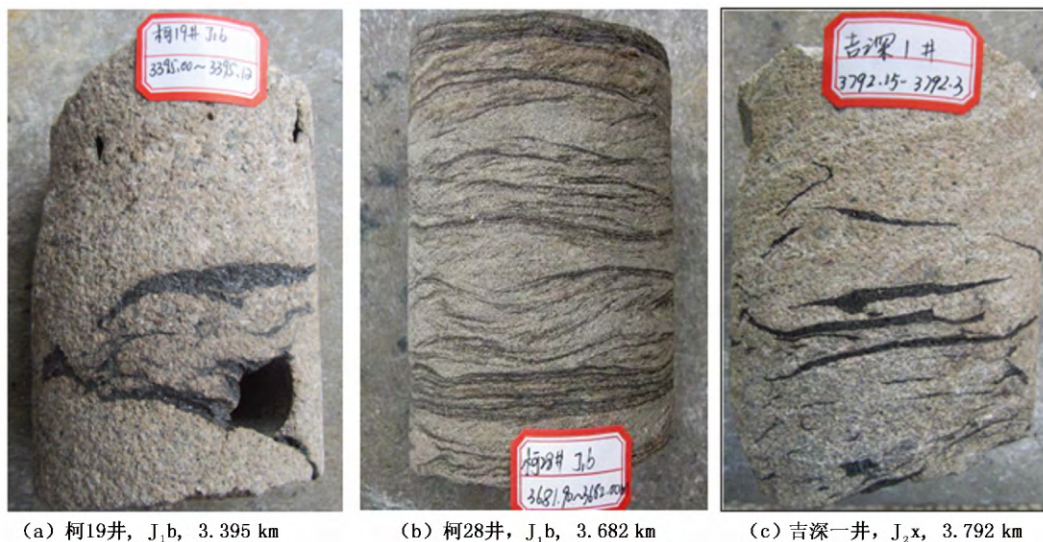


图 4 高炭屑含量水西沟群致密砂岩储层岩心照片

Fig. 4 Core images of tight sandstone reservoir with high carbon dust content in Shuixigou Group

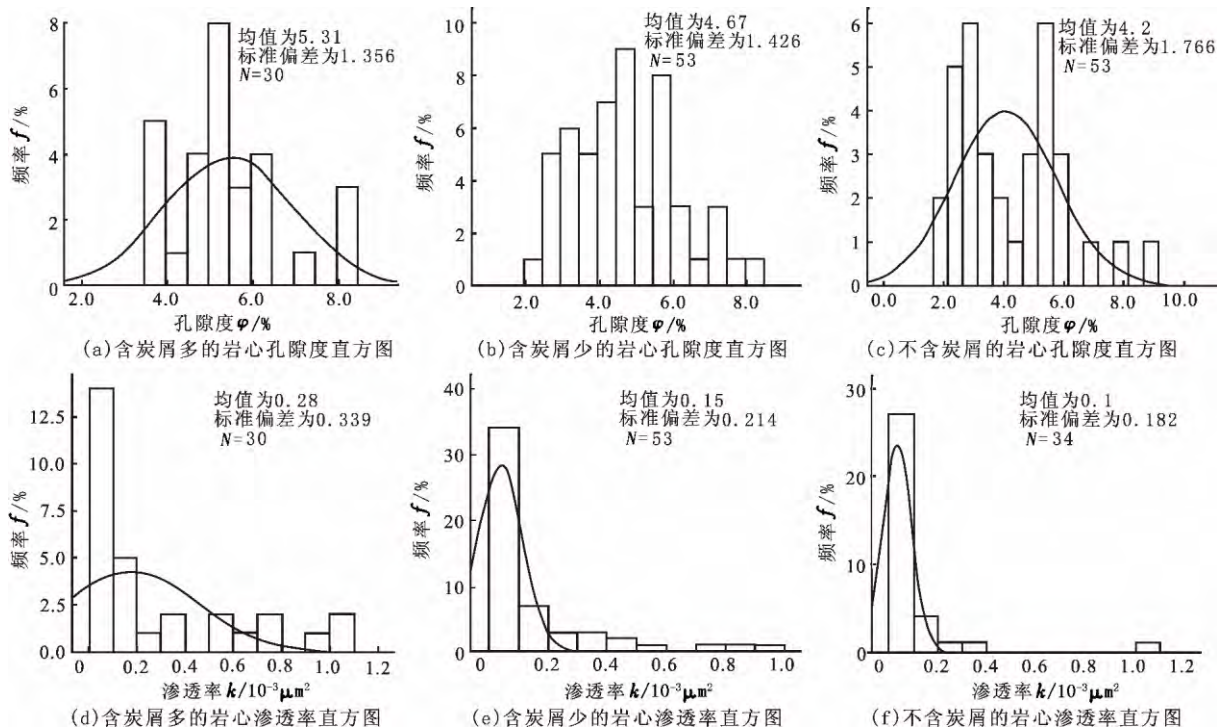


图 5 水西沟群致密砂岩储层炭屑含量与孔、渗分布关系

Fig. 5 Relationship between carbon dust content and property or permeability in tight sandstone reservoir in Shuixigou Group

3 气藏“近生近储”成藏机制与模式

研究认为, 吐哈盆地水西沟群致密砂岩气藏是一种“近生近储”型气藏。“近生近储”是一个相对的概念, 在这种类型的源储关系下, 气藏既不像“自

生自储”的页岩气那样烃源岩与储层是同一层系, 又不像长距离侧向运移的松辽盆地西部斜坡带、塔里木盆地、淮南前陆盆地斜坡带等那样气藏与烃源灶距离为 40 ~ 60 km^[17], 而具体到吐哈盆地绝大部分地区, 这种“近生近储”型致密气藏其实特指源、

储层系皆在水西沟群内(分别为煤系地层与冲积-河流相砂体)且呈大面积直接接触(或通过决口扇体、裂缝等通道有效连通),而天然气只在它们之间产生、运移和聚集的气藏,其运移方式以短距离垂向运移为主^[18]。探讨此类成藏机制,对于储层和盖层条件较差下(致密砂岩储层、缺少区域性良好盖层等)“先成型”致密气藏(烃源岩在低熟状态下早于储层致密化和构造裂缝与圈闭形成前大量生气)形成的研究,具有一定的普适意义。

从岩性及其组合来看,吐哈盆地水西沟群煤系烃源岩形成于湿润气候条件下^[12-13]。侏罗纪吐哈盆地内地形分异很大,盆地与物源区距离也很近,且坡降较大,再加上季节性洪水泛滥,大量的泥沙极易注入到盆地中,当进入盆地内部的三角洲后,坡度骤减、河道曲率加大,河水极易溢出河岸,形成大量决

口扇(粗粒的碎屑岩中含有大量泥屑或炭屑、冲刷面发育、明显的正粒序性等)。河道发生决口或侧向迁移,冲刷作用使煤层变薄甚至缺失,河道相或决口扇相粗-中粒砂岩往往形成煤层的直接顶板,为煤层气垂向运移提供了逸散通道^[19]。此外,有的决口扇水道直接演化成河道,使得厚层或巨厚的砂砾直接覆盖在泥炭上(图6)。野外考察中在大尺度纵向剖面上往往可以看到很多大小不一的决口扇扇体像“吸管”一样插在其上覆或下伏的煤系气源灶内(图7)。经过成岩和煤化作用后,泥炭转变成煤层并释放出大量煤成气,由于砂砾(岩)直接覆盖在泥炭或煤层上,煤成气便可以比较容易地通过决口扇体这种“烟囱”状通道注入到砂岩储层中,形成“近生近储”型的致密砂岩气藏。

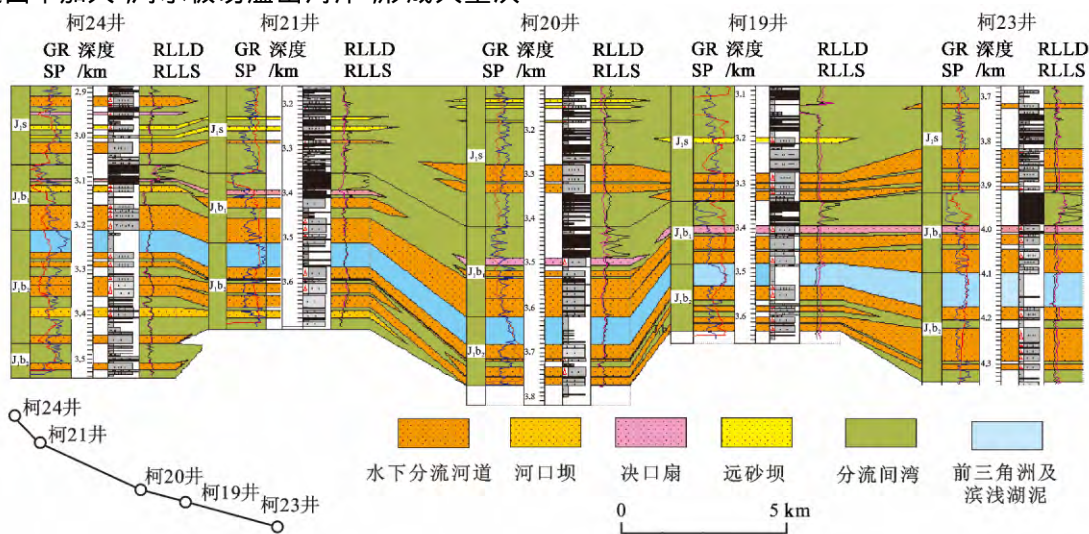


图6 中下侏罗统(水西沟群)沉积剖面图

Fig. 6 Sedimentary section in middle-lower Jurassic(Shuixigou Group)

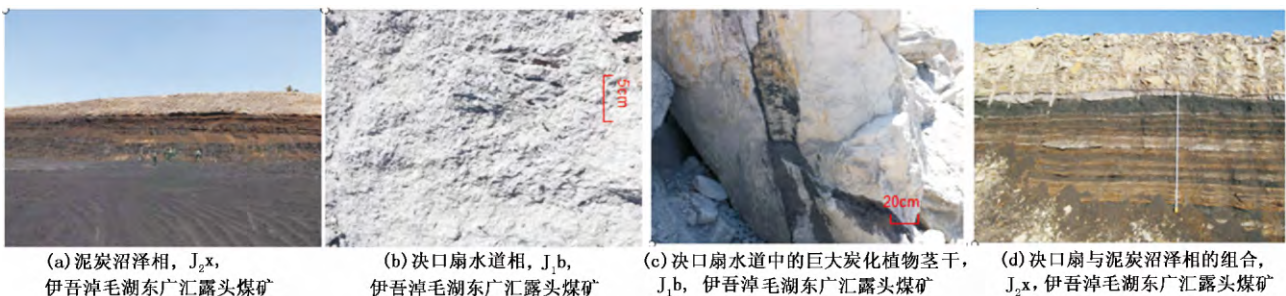


图7 水西沟群“近生近储型”致密砂岩气藏形成的典型沉积环境(野外露头)

Fig. 7 Typical sedimentary environment of forming "proximal-generation and proximal-storage" type tight sandstone gas accumulations in Shuixigou Group(field outcrop)

在气藏剖面 and 单井剖面上可以看出,决口扇砂体沉积层既可以作为“烟囱”或“吸管”成为连接烃源岩与储层的通道,又可以作为较优质储层直接形成气藏(图8、9)。

研究区煤系“近生近储”型成藏首先得益于大面积分布且“三明治式”叠合的源储直接接触,以及源储盖层的优良区域配置^[9-10],其次得益于生烃高峰期与构造圈闭形成的良好匹配。吐哈盆地几个沉

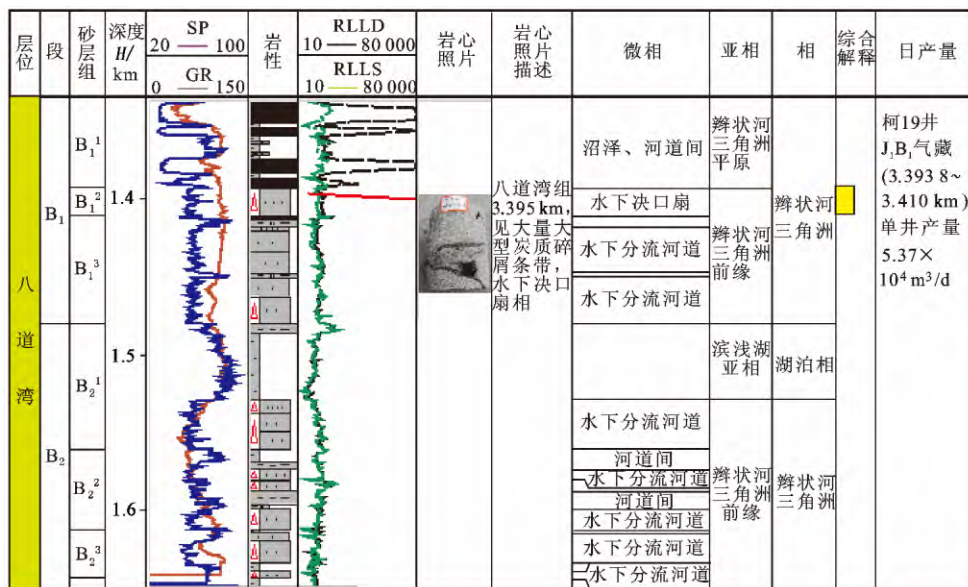


图 8 柯 19 井高产气藏段与水下决口扇相在岩心柱状图上的良好响应

Fig. 8 Good response of high yield gas accumulation section and underwater crevasse splay phase in core bar chart of Ke19

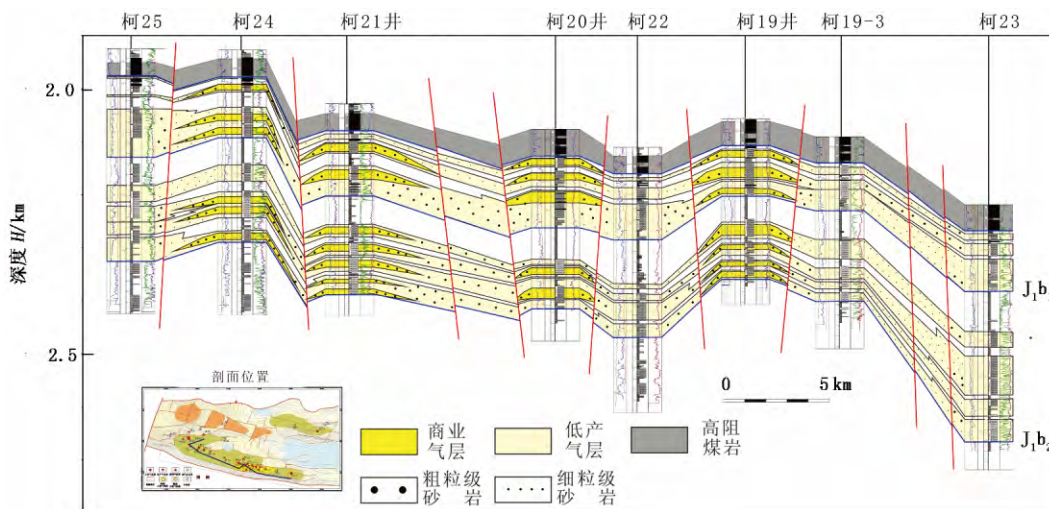


图 9 柯柯亚构造带八道湾组气藏剖面图

Fig. 9 Gas accumulations section of Badaowan Group in Kekeya tectonic belt

降中心在中生代稳定发展,发育了巨厚的以含Ⅲ型干酪根为主的河湖沼泽相稳定煤系烃源岩,有机质含量高,并在侏罗世末期进入生烃门限。与此同时,随着博格达山的隆起,在北部山前带形成了一套巨厚的冲积扇相、扇三角洲相为主的碎屑沉积砂体,而南高北低的坡地地形使盆地南部斜坡带也普遍接受了一套以辫状河三角洲相为主的冲积-河流相的砂体沉积,这些物性相对较好的中粗粒沉积含有大量可转变为炭屑的植物碎屑,作为未来气藏的主力储层和源储连接通道在盆地内广泛分布。在沉降中心处形成了一种“三明治式”大面积紧密相邻叠置的有利源储组合,既有烃源充足供给作为“气泵”,又有相对规模的适宜储集体发育,还避免了天然气长

距离运移可能导致的逸失,使其可以最大限度地为天然气所饱和,构成了“近生近储”的有利成藏条件。煤系烃源岩从凹陷中心区开始成熟,其生成的天然气首先进入紧邻的水下分流河道与决口扇砂体储集层并在当地成藏。随着烃源岩向斜坡上倾方向的逐渐成熟,生气作用亦从构造低部位向高部位逐渐推进。由于储集层砂体也有围绕凹陷坡折带呈条带状分布的趋势,且其物性由下向上亦逐渐变好(与烃源岩热演化方向一致),同时储层致密化也主要在此时完成,但稍晚于致密气^[11]。因此,此时形成的煤成气可以通过直接充注或是经由物性良好的决口扇高炭屑含量粗粒级砂体通道向储层中运移,最终在构造圈闭高点及决口扇和分流河道粗粒级砂

体本身中形成连续性较好、压力系数也较大的连续性气藏。随着燕山期构造活动逐渐到达高峰期,与生烃高峰期产生良好匹配,断裂和裂缝开始发育,早期形成的油气藏进入调整阶段。这些裂缝系统不但极大地改善了已致密化储集层的物性条件,也同样形成了天然气运移的高速通道^[20],使天然气向渗透性更好的决口扇与分流河道粗粒级储集层和背斜圈闭中运移,常以高阻泥岩层或者煤层作为顶板,而以后期断层面作为侧向封堵构造(图9)。这是水西沟群典型的“近生近储”型成藏机制,也是研究区最主要的致密气藏成藏模式。

得益于裂缝和决口扇扇体的排气通道输运作用,“近生近储型”成藏机制在构造作用改造、抬升强烈,裂缝发育的北部山前带地区与沉积相对稳定、决口扇大量发育的南部斜坡带温吉桑地区最为典型,且最好的产气远景区是与煤层累积厚度分布对应良好的凹陷中心边缘之物性较好砂体附近的构造高点以及圈闭的褶皱中心部位等处。

4 结 论

(1) 吐哈盆地水西沟群致密砂岩气藏与其煤系烃源岩间具有密切的亲缘关系。

(2) 水西沟群致密气藏的有利成藏因素导致砂岩与煤层大面积直接接触,煤成气通过决口扇体这种“烟囱”状通道或者直接注入到砂岩储层中,形成“近生近储”型的致密砂岩气藏。

(3) “近生近储”型致密砂岩气藏成藏模式是研究区水西沟群致密砂岩气的主要成藏模式;其成藏条件在北部山前带和南部斜坡带温吉桑地区部分井区尤其完备。

致谢 本文得到了国土资源部与吐哈油田合作“致密砂岩气国家示范基地”项目的资助;文中资料由吐哈油田勘探开发研究院提供。借此机会一并致谢。

参考文献:

- [1] 董晓霞,梅廉夫,全永旺.致密砂岩气藏的类型和勘探前景[J].天然气地球科学,2007,18(3):351-355.
DONG Xiaoxia, MEI Lianfu, QUAN Yongwang. Types of tight sand gas accumulation and its exploration prospect [J]. Natural Gas Geosciences, 2007, 18(3): 351-355.
- [2] 王劲松.巴喀气藏特征与吐哈盆地致密砂岩气勘探前景[J].石油天然气学报,2010,32(6):373-375.
WANG Jinsong. The characteristics of Baka gas reservoir and the prospects of tight sandstone gas exploration in Turpan-Hami Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(6): 373-375.
- [3] 柳益群,吴涛,崔旱云,等.新疆吐鲁番—哈密盆地的古地温梯度及地质热历史[J].中国科学: D 辑,1997,27(5):431-436.
LIU Yiqun, WU Tao, CUI Hanyun, et al. The geothermal gradient and geothermal history in the Hami Basin, Turpan, Xinjiang [J]. Science China (ser D), 1997, 27(5): 431-436.
- [4] 刘江涛,黄志龙,涂小仙,等.吐哈盆地台北凹陷西部弧形带油气远距离运聚规律[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(5):1887-1893.
LIU Jiangtao, HUANG Zhilong, TU Xiaoxian, et al. Distant migration and accumulation of oil and gas in western arc-like zone of Taibei Sag in Turpan-Hami Basin [J]. Journal of Zhongnan University (Natural Science Edition), 2010, 41(5): 1887-1893.
- [5] 吴涛,张世焕,王武和.吐鲁番-哈密成煤盆地构造与油气聚集[J].石油学报,1996,17(3):12-18.
WU Tao, ZHANG Shihuan, WANG Wuhe. The structural characteristics and hydrocarbon accumulation in Turpan-Hami coal-bearing basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(3): 12-18.
- [6] 李成明.台北凹陷气藏典型运聚成藏模式[J].吐哈油气,1998,3(2):8-13.
LI Chengming. Typical transport and accumulation model of Taibei sag reservoir [J]. Tuha Oil and Gas, 1998, 3(2): 8-13.
- [7] 杨懿婷,张金川,黄卫东,等.吐哈盆地致密砂岩气成藏条件与分布预测[J].断块油气田,2012,19(4):440-444.
YANG Yiting, ZHANG Jinchuan, HUANG Wei-dong, et al. Accumulation conditions and distribution prediction of the tight sandstone gas in Turpan-Hami Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Fields, 2012, 19(4): 440-444.
- [8] 姜福杰,庞雄奇,姜振学,等.致密砂岩气藏成藏过程的物理模拟实验[J].地质论评,2007,53(6):844-849.
JIANG Fujie, PANG Xiongqi, JIANG Zhen-xue, et al. Physical simulation experiment of gas charging in tight sandstone [J]. Geological Review, 2007, 53(6): 844-849.
- [9] 范谭广.吐哈盆地台北凹陷水西沟群致密砂岩气成藏条件[J].天然气工业,2011,31(7):21-23.
FAN Tanguang. Gas accumulation conditions of the Shuixigou tight sand formations in the Taibei trough, Turpan-Hami Basin [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(7): 21-23.
- [10] 王劲松,王文慧,牟兰昇,等.吐哈盆地致密砂岩气成

- 藏特征及勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(1): 14-17.
- WANG Jinsong, WANG Wenhui, MU Lansheng, et al. Characteristic of tight sandstone gas reservoir in Tuha Basin and its exploration target [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(1): 14-17.
- [11] 俞益新, 张金川, 尹腾宇, 等. 吐哈盆地致密砂岩气藏特征及模式[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(3): 283-287.
- YU Yixin, ZHANG Jinchuan, YIN Tengyu, et al. Characteristic and model for tight sandstone gas accumulation in Tuha Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(3): 283-287.
- [12] 邵龙义, 高迪, 罗忠, 等. 新疆吐哈盆地中、下侏罗统含煤岩系层序地层及古地理[J]. 古地理学报, 2009, 11(2): 215-224.
- SHAO Longyi, GAO Di, LUO Zhong, et al. Sequence stratigraphy and palaeogeography of the lower and middle jurassic coal measures in Turpan-Hami Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(2): 215-224.
- [13] 戴金星, 何斌, 孙永祥, 等. 中亚煤成气聚集域形成及其源岩——中亚煤成气聚集域研究之一[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(3): 1-6.
- DAI Jinxing, HE Bin, SUN Yongxiang, et al. Formation of the central-Asia coal-formed gas accumulation domain and its source rocks—among study series on the central-Asia coal-formed gas accumulation domain [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(3): 1-6.
- [14] 王作栋, 孟仟祥, 房嬛, 等. 低演化烃源岩有机质微生物降解的生标组合特征[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1244-1249.
- WANG Zuodong, MENG Qianxiang, FANG Xuan, et al. The combination characteristics of the biomarkers of microbial degradation of organic matter in low-evolution source-rock [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1244-1249.
- [15] 王志勇, 孟仟祥, 王作栋, 等. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系煤系源岩地球化学分类及意义[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1238-1243.
- WANG Zhiyong, MENG Qianxiang, WANG Zuodong, et al. The geochemical classification and significance of the Jurassic coal measures source rocks in Taibei sag, Turpan-Hami Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1238-1243.
- [16] SHEN Ping, WANG Xiaofeng, WANG Zhiyong, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in natural gases from the Turpan-Hami Basin and identification of low-mature gas [J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(29): 3324-3328.
- [17] 刘江涛, 黄志龙, 王海. 吐哈盆地西部弧形带油气远距离运移成藏主控因素[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(2): 24-30.
- LIU Jiangtao, HUANG Zhilong, WANG Hai. Dominant control factors of hydrocarbon distance accumulating in western arc-like zone of Turpan-Hami Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(2): 24-30.
- [18] 李伟, 赵文智, 牛嘉玉, 等. 吐哈盆地煤系地层中烃类的独特运聚风格初探[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 8-12.
- LI Wei, ZHAO Wenzhi, NIU Jiayu, et al. A study on hydrocarbon migration and accumulation in coal measures of Turpan-Hami Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2): 8-12.
- [19] 秦勇, 傅雪海, 岳巍, 等. 沉积体系与煤层气储盖特征之关系探讨[J]. 古地理学报, 2000, 2(1): 77-84.
- QIN Yong, FU Xuehai, YUE Wei, et al. Relationship between depositional systems and the characteristics of coal bed gas [J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(1): 77-84.
- [20] 谭丽娟, 郭松. 东营凹陷博兴油田沙四上亚段滩坝砂岩油气富集特征及成藏主控因素[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(2): 25-31.
- TAN Lijuan, GUO Song. Hydrocarbon accumulation features and main controlling factors of beach bar sandstone in upper Es₄ formation in Boxing Oilfield, Dongying depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(2): 25-31.

(编辑 徐会永)