

青海三露天井田天然气水合物成藏的构造控制作用

陈利敏¹, 曹代勇¹, 蒋艾林¹, 秦荣芳¹, 李靖^{1,2}, 李永红³, 王伟超³

1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083
2. 中化地质矿山总局化工地质调查总院, 北京 100013
3. 青海煤炭地质 105 勘探队, 西宁 810007

摘要 自2008年中国首次在青藏高原祁连山冻土区钻获天然气水合物实物样品, 木里煤田三露天井田已成为研究热点地区之一, 但对于天然气水合物形成及保存的控制因素及分布规律的研究尚浅, 阻碍了资源的勘探与开发。通过对三露天井田天然气水合物钻孔实际资料的统计, 分析了井田构造格局, 提出了研究区天然气水合物的形成过程, 综述了构造对其成藏的控制作用。结果表明: 1) 天然气水合物是由烃类气体聚集成藏后随着青藏高原的快速隆起而抬升进入温压稳定带后形成水合物藏; 2) 研究区的构造分区分带性控制了天然气水合物在平面上的展布规律, 构造运动决定了中侏罗煤系的沉降-生烃史和温压稳定带的形成, 构造形态则可以为烃类气体的聚集提供通道、盖层及储存空间, 而后期构造作用又会对前期形成的气藏及天然气水合物藏造成破坏。

关键词 三露天井田; 天然气水合物; 构造控制; 构造-岩性组合

中图分类号 TE13

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.06.015

Structural control of reservoir forming for natural gas hydrate in Sanlutian Well Field, Qinghai

CHEN Limin¹, CAO Daiyong¹, JIANG Ailin¹, QIN Rongfang¹, LI Jing^{1,2}, LI Yonghong³, WANG Weichao³

1. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety; China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China
2. General Institute of Chemical Geology Survey, China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100013, China
3. Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Team, Xining 810007, China

Abstract In 2008, practical samples of natural gas hydrate (NGH) were drilled out in the frozen soil region of the Qilian Mountain in the Qinghai-Tibetan Plateau for the first time in China, and since then the Sanlutian Well Field in the Muli Coalfield becomes a research focus. But the lack of studies of the controlling factors of the NGH's formation and storage and the NGH's distribution hinders the NGH's exploration and exploitation. An analysis of the materials taken out of the NGH's boreholes in the Sanlutian Well Field and the well field's structural framework reveals the NGH's formation process in the study area, including the structure's role in controlling the NGH reservoir forming. It is concluded that: 1) a reservoir of the NGH is formed by hydrocarbon gases first, and then the NGH enters the temperature-pressure stable zone with Qinghai-Tibetan Plateau's rapid uplift to form a hydrate reservoir; 2) the study area's structure features of partition and zoning control the NGH's flat spreading; the structural movement decides the middle Jurassic coal measures' sedimentation, the hydrocarbon generation and the temperature-pressure stable zone's formation; the structural shape provides the channels, the cap rocks and the storage areas for hydrocarbon gases' enrichment; the later tectonism destroys the earlier gas reservoir and the NGH reservoir.

Keywords Sanlutian Well Field; natural gas hydrate; structural control; structural-strata combines

收稿日期: 2014-11-18; 修回日期: 2015-01-14

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110023110003); 中央高校基本科研业务费专项(2010YD11); 神华青海能源开发有限责任公司项目(20131004)

作者简介: 陈利敏, 博士研究生, 研究方向为非常规油气, 电子信箱: clmsxl@163.com; 曹代勇(通信作者), 教授, 研究方向为构造地质学, 电子信箱: cdy@cumt.edu.cn

引用格式: 陈利敏, 曹代勇, 蒋艾林, 等. 青海三露天井田天然气水合物成藏的构造控制作用[J]. 科技导报, 2015, 33(6): 91-96.

天然气水合物因其能量密度高、燃烧污染小、数量巨大等特点,被誉为21世纪最有希望的新型接替能源^[1]。中国2008—2009年在青海祁连山南缘木里煤田成功钻获天然气水合物实物样品,成为世界上首个在中低纬度冻土区发现天然气水合物的国家^[2]。天然气水合物的成藏条件主要包括温压条件、气源条件、沉积条件、构造条件等^[2-5],其中,构造条件是天然气水合物富集成藏的重要控制因素。盆地-构造热演化决定了天然气水合物稳定带的形成和烃源岩的生烃作用,断裂格局及其性质构成烃类气体运移的重要通道,构造形态和储层裂隙发育构成水合物成矿空间^[6-10]。

虽然近些年祁连山南缘的天然气水合物成为科学研究

的热点,但其分布规律、主控因素等尚未清晰,制约了该矿藏的勘探及开发。本文对三露天井田天然气水合物钻孔岩心进行统计分析,研究构造对水合物富集的控制作用。

1 三露天井田构造格局

青海省木里煤田位于中祁连山褶皱带中,受到北部托莱山构造带和南部大通山构造带的相向逆冲控制,呈对冲型构造盆地产出。受区域性断裂带的控制和煤系基底构造的影响,煤田断裂构造十分发育,以北西西、东西向的逆冲断层为主^[11,12],常密集成带分布(图1)。

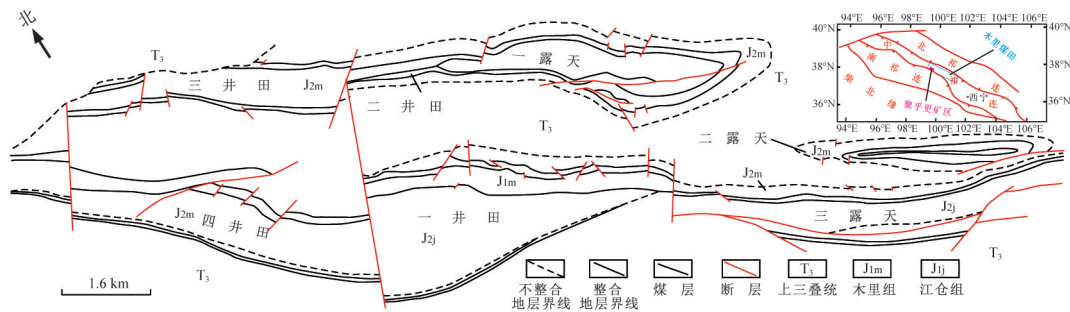
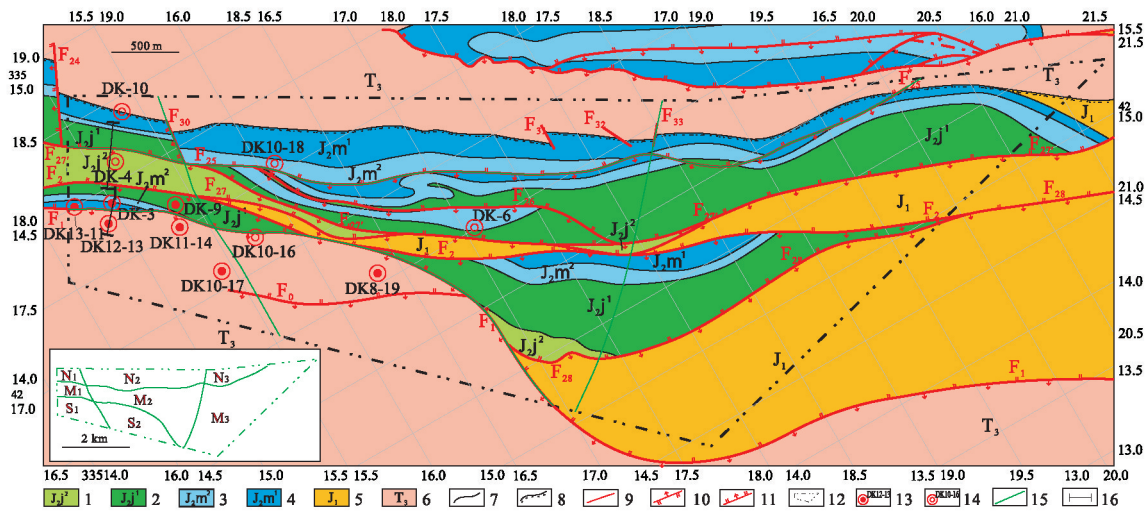


图1 中祁连山及其邻区构造略图

Fig. 1 Tectonic sketch map of central section of Qilian Mountain and the adjacent areas

三露天井田位于聚乎更煤矿区南向斜东部,总体构造形式原为一个含煤沉积向斜后被东西向延展的 F_{27} 逆冲断层推覆、破坏分割成为2个似单斜构造形态,区内断裂构造十分发育,常密集成带分布,以北西-南东向的逆冲断裂为主,形成井田的构造主体。构造要素的空间分布具有一定的差异性,根据主干

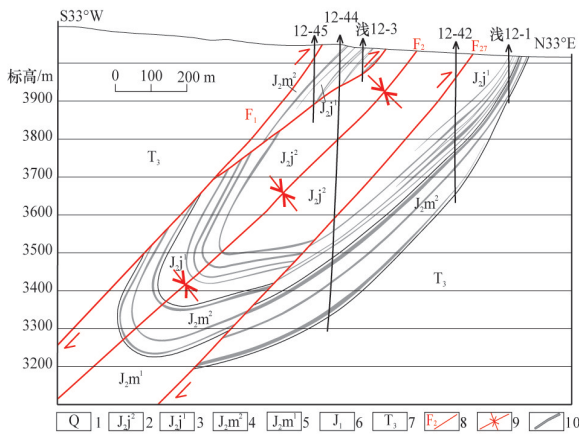
断裂的分布特征将井田划分为北、中、南3个构造带;另外,东西方向上构造的发育特征、程度、产状均有所变化,由西向东断裂发育程度有所降低,而且走向由北西-南东向转变为近南北-南东东向,据此可划分为东、中、西3段(图2、图3)。



1—江仓组上段;2—江仓组下段;3—木里组上段;4—木里组下段;5—下侏罗统;6—上三叠统;7—整合地层界线;8—不整合地层界线;9—推测断裂;10—逆断层及编号;11—正断层及编号;12—井田边界;13—见天然气水合物孔;14—未见天然气水合物孔;15—构造分区界线;16—剖面线

图2 三露天井田构造格局与区划

Fig. 2 Map of geological structure pattern of Sanlutian



1—第四系;2—江仓组上段;3—江仓组下段;4—木里组上段;5—木里组下段;6—早侏罗统;7—晚三叠统;8—断裂;9—向斜轴;10—煤层

图3 三露天井田构造剖面

Fig. 3 Cross-section of Sanlutian

1) 构造分带性。据 F_{25} 和 F_1 断裂井田可划分为北、中、南3带。北带(N)呈东西向条带展布,主要出露地层为晚三叠统,地层总体倾向为南西;褶皱构造不发育,断裂构造较发育,除边界断裂外,还发育走向为近南北、北西向的正断层,长300~500 m,倾角约80°,断距约300 m,是井田内唯一发育正断层的区域。中带(M)呈西窄东宽的楔状展布,出露地层均为侏罗系。断裂十分发育,均为北西—南东向,多为倾角45°左右向南倾,断距较大,贯穿井田延展,成为井田内的主干断裂。南带(S)呈条状展布,出露地层为晚三叠统。带内只发育1条走向北西的逆冲断层。

2) 构造分段性。据 F_{30} 和 F_{33} 断裂及南延,可将井田分为东西两段。西段(1)呈北窄南宽的梯形展布,发育褶皱与断裂构造。向斜位于段内中部,以侏罗系地层为核部,晚三叠世地层为翼;断裂构造集中分布于中部,走向均为北西—南东,且均为中—低角度的逆冲推覆,断距较大,是井田的主干断裂。中段(2)呈不规则四边形展布。褶皱与构造特征与西段相似,只是在北部发育3条近南北向、延展小于200 m的正断层。东段(3)呈倒梯形展布,断裂构造十分发育,均是主干断裂东延部分,但走向由中段的北西—南东向转变为近东西向。

2 构造格局对天然气水合物赋存的控制作用

到目前为止,三露天井田范围内共施工完成天然气水合物钻孔17口,其中探获实物样品的有11口。平面上,这11口钻孔均位于 F_2 断裂以南50~600 m范围内,其中更集中分布于 F_{30} 断裂向南延长线以西,即 M_1 南部、 S_1 北部及 S_2 北部;垂向上,天然气水合物均产出于 F_2 断裂下盘;空间格局上,实物样品均产出于上述两条断裂的共同下降盘,且集中分布于相对埋深更大的区域(图4)。因此,推测认为 F_2 和 F_{30} 断裂对天然气水合物的赋存具有重要的控制作用。

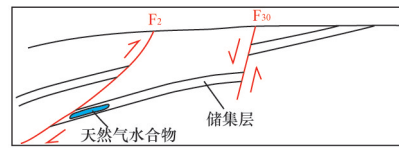


图4 井田天然气水合物富集示意

Fig. 4 Sketch map of natural gas hydrate

F_2 与 F_{30} 断裂的性质、特征等有很大差异。 F_2 为北西向延展的走向逆冲断层,横贯三露天中部,断裂面倾向南西,浅部倾角50°左右,向深部倾角逐渐变缓至35°左右,断距约700 m,局部破碎带厚度51.40 m,泥岩与粉砂岩和粗粒砂岩揉搓,岩心中可见镜面擦痕。而 F_{30} 正断层倾向南西,倾角78°,断距约300 m,形成于印支晚期,中侏罗时再次活动。

3 构造运动对天然气水合物形成的控制作用

研究区在地质历史上经历了以青藏高原快速隆升为代表的多次大规模的构造运动,对天然气水合物形成的控制作用主要体现在以下2个方面。

3.1 井田生烃史

研究区中侏罗系含煤岩系地层烃源岩有机质含量较高,生烃潜力较大,且大部分为II—III型干酪根^[13]。井田样品的最大镜质组反射率(R_o)为0.89%~0.99%,利用Thermodel for Windows^[14]软件进行热演化史反演,然后进行油气生成模拟,得到图5所示埋藏史与热演化史。

由图5和图6可知,中侏罗世至早白垩世井田快速沉降,在早白垩末,中侏罗系煤系埋深超过1500 m,温度最高近110°C,达到了生烃高峰,II₂—III型烃源岩进入低成熟—成熟阶段(R_o 平均值0.86%~1.13%)可生成湿气。晚白垩世以后,研究区构造抬升,地层埋深变浅、局部出露地表遭受剥蚀,煤系最高温度为90°C,生烃速率快速下降,直至停止生烃。因此,研究区中侏罗统煤系最晚生烃时间为晚白垩世早期(90~100 Ma)。

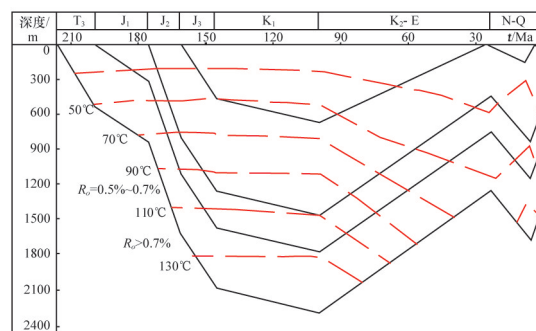


图5 井田4-24钻孔埋藏史与热演化史

Fig. 5 Burial history and thermal evolution diagram

3.2 温压稳定带的形成

永久冻土带是研究区天然气水合物温压稳定带形成的决定因素。祁连山区在第四系之前位于中低纬度地区,气候

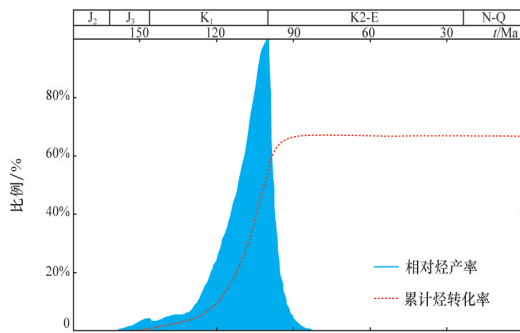


图6 三露天井田煤系生烃强度

Fig. 6 Hydrocarbon generation intensity of coal measure in Sanlutian

温热,不会形成冻土。进入第四系以来,虽然经历了多次冰期,但在晚更新世之前形成的冰川因后期经历了间冰期或持续较长的温暖期而消融殆尽^[15]。昆黄运动(1.2 Ma)使青藏高原大部快速隆升进入冰冻圈^[16],环境骤变,出现第四纪以来最大的冰川^[17],而且至今仍处于稳定的环境。因此,祁连山区永久冻土带的形成时间应不早于距今1.2 Ma左右。

综上所述,研究区中侏罗统煤系生烃高峰(90~100 Ma)早于永久冻土带的形成时间(1.2 Ma)。因此,天然气水合物形成的主要过程为:烃类气体进入合适的圈闭后形成气藏—构造隆升进入温压稳定带—天然气水合物藏。

4 构造形态对天然气水合物赋存的控制作用

井田内天然气水合物的形成过程是首先形成烃类气藏,然后隆升进入温压稳定带后成藏,所以,烃类气体的运移、聚集和良好圈闭是天然气水合物形成的关键。

构造条件是天然气水合物富集成藏的重要控制因素,总体来说,主要作用体现在:断裂构造与裂隙构成烃类气体运移的重要通道;构造变形或变位而形成良好的圈闭;断裂和裂隙构成了天然气水合物成藏空间。

4.1 断层和裂隙是气藏与储层的通道

喜山晚期研究区构造隆升,形成了大量的断裂和裂隙,古断层可能被激活,从而沟通了气藏与储层。

井田内大规模断裂构造发育,断距大(F_2 断裂约700 m),导通了以中侏罗煤系为主的多套烃源岩与储集层,深部气藏沿断裂带运移至浅部与煤型气混合成藏。但是,研究区主干断层均为逆冲性质,倾角较小(浅部为 50° ,深部为 35°),断面多被泥质充填且错断地层多为塑性地层,因此,断层的整体封闭性较好,难以作为气体远距离运移的通道,但局部(破碎带)可作为近距离运移的通道。

研究区裂隙十分发育,且近半数(49.23%)为高角度缝(倾角在 $71^\circ\sim 90^\circ$)(图7)。由于应力作用集中和岩性差异的影响,断裂附近和细粒岩层产生的裂隙^[18-20],以单独或组合形式沟通烃源岩层与储集层,使烃类气体进入合适空间从而富集。



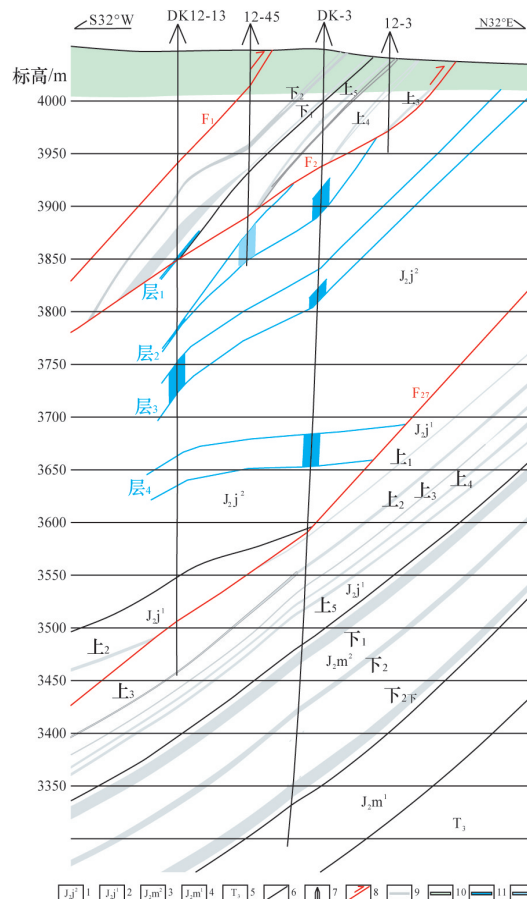
图7 天然气水合物钻孔岩心

Fig. 7 Drilling core image of natural gas hydrate

4.2 构造形成烃类气体的圈闭

三露天井田发育两组断裂,主干断层为北西西向延伸的走向逆冲断层,倾角较小,断层面多被泥质充填,形成泥质涂抹,与此同时,断层两盘绝大多数为塑性地层,且以泥岩、油页岩等低孔低渗的岩层为主,因此,这些断层的封闭性较好,可以为圈闭形成较好的遮挡。

由图8可见,层2段天然气水合物的形成主要是由于 F_2 断裂的封堵。



1—江仓组上段;2—江仓组下段;3—木里组上段;4—木里组下段;
5—上三叠统;6—地层界线;7—钻孔及编号;8—断裂;9—煤层及编号;
10—冻土层;11—天然气水合物;12—煤炭孔涌气层

图8 天然气水合物钻孔连井剖面

Fig. 8 Drilling well profile map of natural gas hydrate

烃类气体形成后赋集于低孔渗的油页岩中,由于构造运动的作用使地层产状发生变化,倾角增大。此时,烃类气藏顺岩层由深部向浅部运移,至F₂断层错断处遇到封堵而静止。后由于高原隆升作用,该气藏进行温压稳定带后形成天然气水合物藏。

4.3 断层破碎带和裂隙提供天然气水合物的有利储集空间

三露天井田内泥岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩、粗砂岩的平均孔隙度依次为0.92%、4.45%、4.56%、5.06%和9.26%,后两者相对来说有更大的孔隙度,可以形成较大空间保存烃类气体。而目前为止,三露天井田探获的天然气水合物主要富集在粉砂岩、暗色泥岩、油页岩等低孔渗岩层裂隙中^[21-23],可见天然气水合物富集并非依赖于岩层物性,相反,低渗透性岩层对于孔隙中的烃类气体逸散可以起到抑制作用。

根据储集空间的不同将研究区天然气水合物实物样品划分为3种类型:裂隙型、裂隙+孔隙型和孔隙型。根据目前钻探资料统计分析,裂隙型储层所占比例最高,达65.22%,该类储层累积厚度占储层总厚度的67.25%;孔隙型储层所占比例最低,为8.70%,累积厚度仅占总厚的4.29%(图9)。

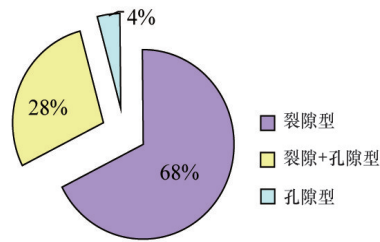


图9 三露天井田各储层厚度比例

Fig. 9 Reservoir thickness ratio of Sanlutian

通过对DK12-13钻孔岩心的观察可知,钻孔内多发育两组及以上不同角度裂隙(图10)。

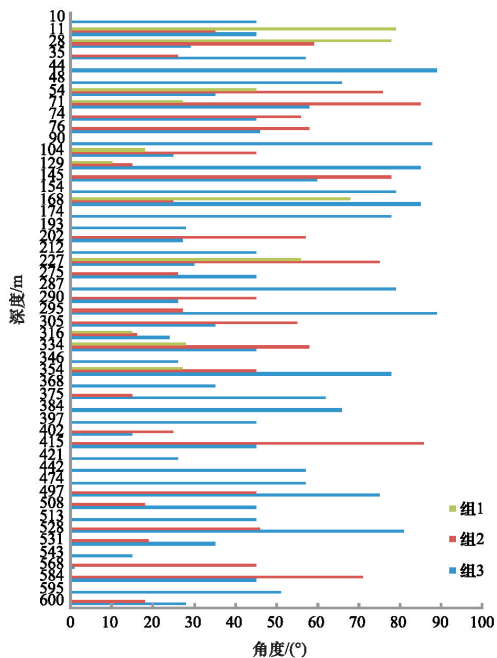


图10 天然气水合物钻孔裂隙倾角分布

Fig. 10 Distribution of borehole fissure angles in Sanlutian

在天然气水合物富集层位裂隙比较发育,且多发育高、低角度两组。其上覆层和下伏层裂隙发育情况不尽相同,上覆层中高角度裂隙不发育,以低角度裂隙为主;而下伏层中,高角度裂隙则十分发育。钻孔中295.60~325.01 m天然气水合物层段中,共发育两组裂隙,组1共1条,倾角为30°;组2共4条,倾角为85°~89°,裂隙多被方解石充填,线裂隙率为0.66~1.3条/cm,最大宽度可达9 mm。在140.93~151.17 m天然气水合物层段中,高角度裂隙也较发育,而上覆下伏岩层中裂隙发育情况不尽相同:下伏岩层中(至埋深180 m),高角度裂隙十分发育,且多发育两组;而上覆岩层中,高角度裂隙不发育,只见10°和15°两组低角度裂隙。

5 构造作用对天然气水合物的破坏

早更新世晚期(0.9~0.8 Ma)青藏高原快速隆升,使研究区地层产状发生变化;同时形成或激活了大量的断裂构造,对已形成的气藏起到破坏作用。

5.1 构造变形

构造变形指由于构造运动的作用,使原始水平的沉积地层发生变形,产状发生变化而形成的破坏作用。水平地层受不均抬升后,局部倾角加大上伏,原本稳定的烃类气体顺岩层向上运移,若无良好圈闭则逃逸而不能成藏(图11)。

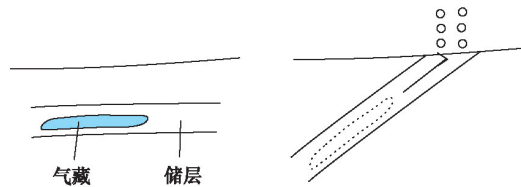


图11 构造变形对气藏的破坏作用示意

Fig. 11 Damage effect of tectonic deformation on the reservoir

如图8中层3天然气水合物段,由于构造运动的作用,使原来的烃类气体储层倾角增大,上伏端更加靠近地表,烃类气藏顺岩层向上运移,没有较好地封堵而未保存成藏。

5.2 构造变位

构造变位指后期形成的断裂切割沉积地层并发生位移变化而形成的破坏作用。断层切过已形成的气藏后,一部分随上升盘抬升,可能出露地表被剥蚀未成藏;一部分随下降盘埋深增大,超过钻孔深度,并未被钻获(图12)。

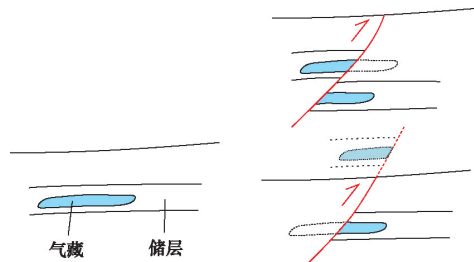


图12 构造变位对气藏破坏作用示意

Fig. 12 Damage effect of tectonic displacement on the reservoir

如图8中层4段,天然气水合物实物样品产出于F₂₇断层(倾角约60°,断距约500 m)上盘,是由于断裂作用而上升至现有深度。可能位于断层下盘的水合物或烃类气藏则随断层下降盘深埋,致使未被探获。

6 结论

1) 根据构造特征及断裂发育规律,三露天井田南北方向上可分为3带、东西方向上可分为3段,构造分区分带性控制了天然气水合物在平面上的展布规律。

2) 构造运动对于三露天井田天然气水合物的形成与保存具有重要的作用。天然气水合物是由烃类气体聚集成藏后随着青藏高原的快速隆起而抬升进入温压稳定带后形成水合物藏。

3) 研究区构造形态为烃类气体的聚集提供通道、盖层及储存空间,而后期构造作用又会对其造成破坏。

参考文献(References)

- [1] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y, et al. Russian field illustrates gas-hydrate production[J]. *Oil and Gas Journal*, 2005, 103(5): 43-47.
- [2] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. *地质学报*, 2009, 83(11): 1762-1771.
Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, et al. Natural gas hydrate found in the Qilian permafrost, Qinghai[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(11): 1762-1771.
- [3] 卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海祁连山冻土区天然气水合物存在的主要证据[J]. *现代地质*, 2010, 24(2): 329-336.
Lu Zhenquan, Zhu Youhai, Zhang Yongqin, et al. Major evidence for gas hydrate existence in the Qilian Permafrost, Qinghai[J]. *Geoscience*, 2010, 24(2): 329-336.
- [4] Lu Z, Zhu Y, Zhang Y. Gas hydrate occurrences in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai Province, China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 66(2/3): 93-104.
- [5] 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 Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, et al. Gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost and their basic characteristics[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(1): 7-16.
- [6] 余朝丰. 断裂与天然气水合物的依存关系[J]. *海洋地质动态*, 2006, 22(12): 34-37.
Yu Chaofeng. Dependence of fracture and gas hydrate[J]. *Marine Geology Letters*, 2006, 22(12): 34-37.
- [7] 张光学, 祝有海, 梁金强, 等. 青藏高原多年冻土形成时代的探讨[J]. *冰川冻土*, 1981, 3(1): 32-37.
Zhang Guangxue, Zhu Youhai, Liang Jinqiang, et al. Discussion on the time of formation of permafrost on Qingzang Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(1): 32-37.
- [8] 杨传胜, 李刚, 龚建明, 等. 断裂对天然气水合物成藏的控制作用[J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(6): 1-5.
Yang Chuansheng, Li Gang, Gong Jianming, et al. Fracture control on the gas hydrate accumulation[J]. *Marine Geology Letters*, 2009, 25(6): 1-5.
- [9] 王建, 邱文弦, 赵俐红. 天然气水合物发育的构造背景分析[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(2): 100-106.
Wang Jian, Qiu Wenxian, Zhao Lihong. Tectonic settings analysis of gas hydrate deposits development[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(2): 100-106.
- [10] 张光学. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征[J]. *现代地质*, 2006, 20(4): 605-612.
Zhang Guangxue. Tectonic controls on gas hydrate deposits and their

characteristics[J]. *Geoscience*, 2006, 20(4): 605-612.

- [11] 曹代勇, 孙红波, 孙军飞. 青海东北部木里煤田控煤构造样式与找煤预测[J]. *地质通报*, 2010, 29(11): 1696-1703.
Cao Daiyong, Sun Hongbo, Sun Junfei. Coal-controlled structural styles and looking for coal resources in Muli coalfield, northeastern Qinghai, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(11): 1696-1703.
- [12] 郭晋宁, 李猛, 邵龙义. 青海聚乎更矿区煤层气富集条件[J]. *中国煤炭地质*, 2011, 23(6): 16-32.
Guo Jinning, Li Meng, Shao Longyi. CBM enrichment conditions in Juhugeng Mine Area, Qinghai[J]. *Coal Geology of China*, 2011, 23(6): 16-32.
- [13] 李靖. 青海省两大赋煤区煤系非常规气形成条件及对比研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
Li Jing. Analyses and comparison of formation condition of coal-bearing unconventional gas of two coal-rich regions, Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.
- [14] 张文, 孙占学, 李文娟, 等. Thermodel for Windows 系统的模拟及实例研究[J]. *东华理工学院学报*, 2005, 4: 341-348.
Zhang Wen, Sun Zhanxue, Li Wenjuan, et al. Paleogeothermal modeling using Thermodel for Windows system with case study[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 2005, 4: 341-348.
- [15] 王绍令. 晚更新世以来青藏高原多年冻土形成及演化的探讨[J]. *冰川冻土*, 1989, 11(1): 69-75.
Wang Shaoling. Formation and evolution of permafrost on the Qinghai-Xizang Plateau since the late pleistocene[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, 11(1): 69-75.
- [16] 李吉均. 青藏高原隆升与晚新生代环境变化[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(2): 154-159.
Li Jijun. Tibetan Plateau uplift and Late Cenozoic environmental change[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition*, 2013, 49(2): 154-159.
- [17] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 7-17.
Li Jijun. Studies on the geomorphological evolution of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 7-17.
- [18] Narr W, Lerch I A. Method for estimating fracture density in core[J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(5): 637-648.
- [19] 曾联波, 田崇鲁. 伸展构造区低渗透储层构造裂缝的分布特征[J]. *石油实验地质*, 1997, 19(4): 344-347.
Zeng Lianbo, Tian Chonglu. Distribution characteristics of fractures in low permeable reservoirs in an extensional structural region[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1997, 19(4): 344-347.
- [20] 刘岩. 低渗透储层裂缝特征及其对油气富集的控制作用[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
Liu Yan. Fracture characteristics of low permeability reservoirs and the control action of the accumulation of oil and gas[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [21] 卢振权, Sultan Nabil, 金春爽, 等. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(1): 157-168.
Lu Zhenquan, Sultan Nabil, Jin Chunshuang, et al. Modeling on gas hydrate formation conditions in the Qinghai Tibet Plateau permafrost [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(1): 157-168.
- [22] 庞守吉. 祁连山木里天然气水合物钻孔沉积构造特征及与水合物分布关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
Pang Shouji. Relationship between tectonic, sedimentation characteristics and distribution of gas hydrate in Muli Coalfield of Qilian Mountain, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [23] 庞守吉, 苏新, 何浩, 等. 祁连山冻土区天然气水合物地质控制因素分析[J]. *地质前缘*, 2013, 20(1): 223-239.
Pang Shouji, Su Xin, He Hao, et al. Geological controlling factors of gas hydrate occurrence in Qilian Mountain permafrost, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 223-239.

(责任编辑 王媛媛)