

大庆长垣西部基底断裂复活对油气运移控制作用分析

张 威

大庆油田有限责任公司第九采油厂, 黑龙江 大庆

收稿日期: 2024年2月19日; 录用日期: 2024年3月18日; 发布日期: 2024年3月28日

摘 要

大庆长垣西部高台子油层组蕴含丰富的油气资源潜力, 齐家地区A区块是典型实例。勘探、评价实践表明: 该区含油砂体均集中在高四油层组下部, 高三油层组发育较少, 成藏机理尚不清晰。因此, 本文基于三维地震、测井、试油等资料, 在构造地质学理论上, 应用构造解析方法, 分析研究区断裂系统形态特征及成因机制, 对高台子油层油气成藏认识具有重要意义。研究表明: 1) 基底先存深大断裂晚期发生走滑位移、且纵向存在多套非能干性软弱岩层, 导致上覆地层中形成“基底诱导、纵向断续、平面雁列”的断裂体系特征; 2) 基底断裂走滑复活, 应力向上传导, 导致上覆地层变形自下而上由强变弱, 应力场强度决定纵向上变形的影响范围; 3) 基底断裂走滑复活, 走滑变形诱导上覆地层雁列式断裂带发育, 形成“横向密集、纵向短距”的油气疏导体系, 即为油气纵向运移提供了良好的疏导通道, 又避免断穿层位过多导致油气资源溃散, 更有利于油气藏形成。

关键词

构造解析, 雁列, 应力场强度

Analysis of the Control Effect of the Reactivation of Basement Faults in the Western Part of Daqing Changyuan on Oil and Gas Migration

Wei Zhang

No.3 Oil Production Plant of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing Heilongjiang

Received: Feb. 19th, 2024; accepted: Mar. 18th, 2024; published: Mar. 28th, 2024

Abstract

The Gaotaizi oil layer formation in the western part of Daqing placanticline contains rich potential for oil and gas resources, and the region A is a typical example. Exploration and evaluation practices have shown that the oil-bearing sand in this area are concentrated in the lower part of the GIV oil layer group, while the GIII oil layer group is less developed, and the reservoir formation mechanism is still unclear. Therefore, based on three-dimensional seismic, lost of logging and oil testing data, this article applies structural analysis methods on the basis of structural geology theory to analyze the morphological characteristics and genetic mechanisms of fault systems in this area, which is of great significance for understanding the oil and gas accumulation in the Gaotaizi oil layer. Research has shown that: 1) When the deep and large faults formed in the early stage of the basement experience strike slip displacement in the later stage, and there are multiple sets of weak rock layers in the longitudinal direction, it can lead to the formation of a fault system characteristic of “basement induction, longitudinal discontinuity, and planar echelon” in the overlying strata; 2) The strike slip revival of the basement fault causes stress to propagate from bottom to top, resulting in the deformation of the overlying strata becoming weaker from bottom to top. The strength of the stress field determines the range of influence of longitudinal deformation; 3) The basement fault is reactivated through strike slip, and the strike slip deformation induces the development of an echelon-fault zone in the overlying strata, forming a “horizontally dense and vertically short distance” oil and gas diversion system. This provides a good diversion channel for the vertical migration of oil and gas, while avoiding the collapse of oil and gas resources caused by too many faults penetrating the strata, which is more conducive to the formation of oil and gas reservoirs.

Keywords

Construction Analysis, En Echelon, Stress Field Strength

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

松辽盆地北部，大庆长垣以西地区自 1983 年以来，经过多年的深入勘探评价研究，发现黑、萨、葡、高、扶、青六套含油层系[1]，高产探评井多点开花，开发动用初具规模，证实了该区具有丰富的油气资源储量。前人研究表明，该区坐落于齐家 - 古龙大型生油凹陷之上[2]，青山口、嫩江两套烃源岩穿插于六套层系之间，且具有厚度大、有机质丰度高、类型好、成熟度适中的特征，烃源条件优越[3][4][5][6]。烃源岩与六套层系形成了“上生下储”、“下生上储”、以及“自生自储”等多种生储组合，断层无疑是最主要的油气运移通道之一。但不同性质的断层在油气藏形成的过程中起到的作用各异，断层开启，则可作为流体运移通道，断层封闭，对流体具有遮挡作用，而且自断层形成开始，断层性质并非一成不变，断层活动时开启，停止活动后逐渐趋于封闭，由于晚期构造运动亦可使早期形成的断层重新复活，因此，断层对油气运聚起到的作用十分复杂[7]，本文将从 A 井区断裂系统特征研究出发，搞清断层形成机理及活动特征，及其在油气运聚过程中起到的关键作用，从而指导大庆长垣西部探区油气资源勘探。

2. 油田概况

松辽盆地是在前中生代基底上发育起来的裂谷—坳陷型盆地，晚中生代，松辽盆地位于活动大陆边缘，构造运动十分强烈且复杂，经历了裂谷期前火山喷发(晚侏罗世)、裂谷期岩石圈伸展(早白至世沙子—营城期)、裂谷期后坳陷(早白垩世登娄库期—晚白至世嫩江期)和构造反转等几个主要演化阶段[8]。裂陷期以北西—南东方向应力场为主，形成北东向主干断裂，断距一般较大，中白垩纪时期断陷阶段结束，进入沉陷阶段，形成中央深坳陷，也就是现今齐家—古龙凹陷雏形，晚白垩纪时期为萎缩均衡沉降阶段，整体地层厚度变化不大。齐家地区青二、三段覆于青一段大套烃源岩之上[9] [10]，为与烃源岩最近的地层之一，具有得天独厚的优势。沉积上，受北部物源控制，发育三角洲内前缘亚相沉积。多年来经过深入勘探、评价研究，证实了齐家—古龙凹陷高台子油层组蕴含丰富的油气资源潜力，2014年齐A井区投产，打开齐家南地区开发新局面，2021年B区块开钻，目前部分开发井已经完钻，钻井效果较好，正待投产，为该区增添开发动用新活力，预示该区规模效益开发大好前景。

勘探评价研究过程中发现，该区高台子油层产出层位较为集中，统计A井区附近试油井，高四下砂岩组多口达工业油流井，高四中、上以及高三所获工业油流井较少，油气产出层位规律性较强，但其形成机理尚未探清，亟需进一步深入研究。

3. 断裂系统空间展布形态研究

断层作为油气运移的主要通道，其切穿地层及其在成藏关键期的活动性对油气成藏起着至关重要的作用。因此，通过精细构造解释，精细刻画研究区断层形态特征是该区成藏研究的基础。研究表明，纵向上断层多数仅断穿高四油层组，仅有极少数部分断穿了高三油层组，从现今所观测到的断层发育特征即可断定油气向上运移距离必然很难到达高三组地层。源于剖面上的这个发现，为了寻求断裂系统在不同深度处平面上的变化，精细绘制了多套平面断裂系统图，其中包括高四油层组顶面、高三油层组顶面，同时也绘制了青一段烃源岩之下的扶余油层顶面断裂系统图(图1，图2)。

通过三套平面断裂系统图的绘制，不仅证实了纵向上断层大多只断穿至高四油层组、未断穿高三油层组，还发现了断层的平面展布具有明显的规律性，区内主要发育2条由密集的北北西向小断层组成的北东向雁列式断裂带。雁列式断裂带的发现，表明研究区很可能存在走滑拉张变形特征存在。

在发现了平面断裂系统雁列式组合特征，以及走滑拉张应力存在后，通过构造解析的方法，对研究区构造格架进行深入研究，发现断陷期地层存在若干条深大断裂，延伸方向为北北东向，与上覆地层中雁列式断裂带展布方向基本一致，由此可知上覆雁列式断裂带明显受控于基底深大断裂(图3)。

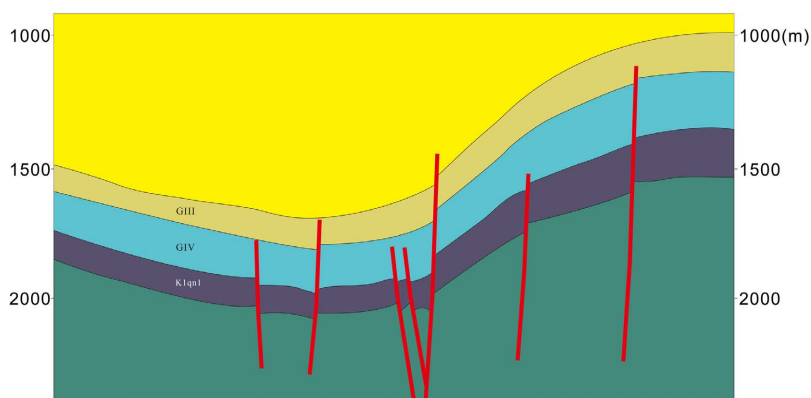


Figure 1. Geological profile map in the east-west direction of region A

图1. A地区东西向地质剖面图

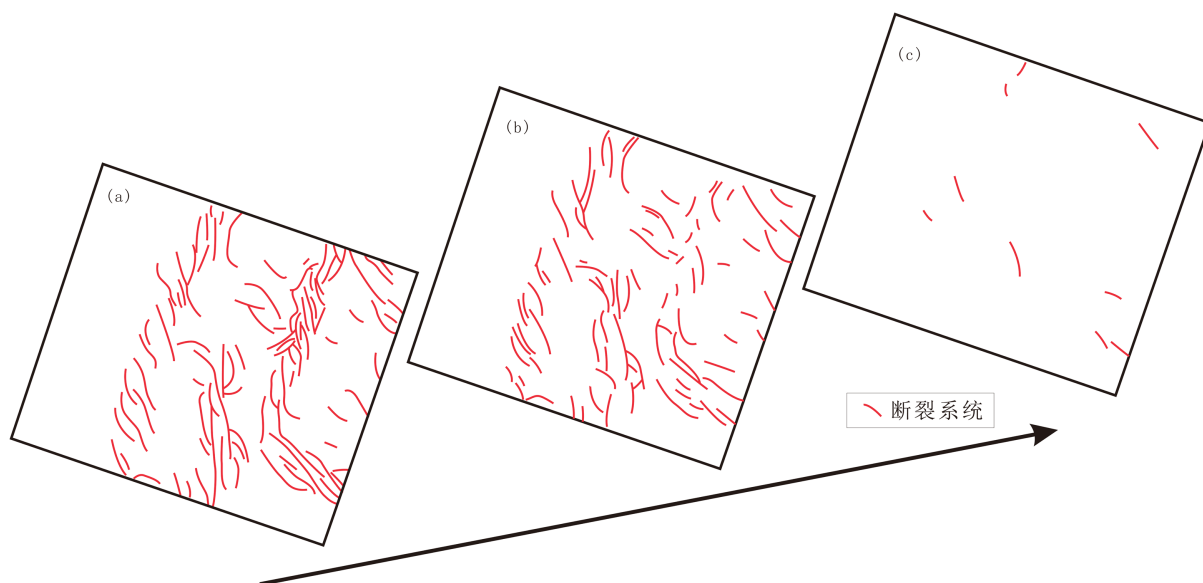


Figure 2. Comparison of Fault Systems from Fuyu oil formation to GIII oil formation in region A. (a) Diagram of top surface fracture system in Fuyu oil formation; (b) Diagram of top surface fracture system in GIV oil formation; (c) Diagram of top surface fracture system in GIII oil formation

图 2. A 地区自扶余油层组至高三油层组顶面断裂系统对比图。(a) 扶余油层组顶面断裂系统图; (b) 高四油层组顶面断裂系统图; (c) 高三油层组顶面断裂系统图

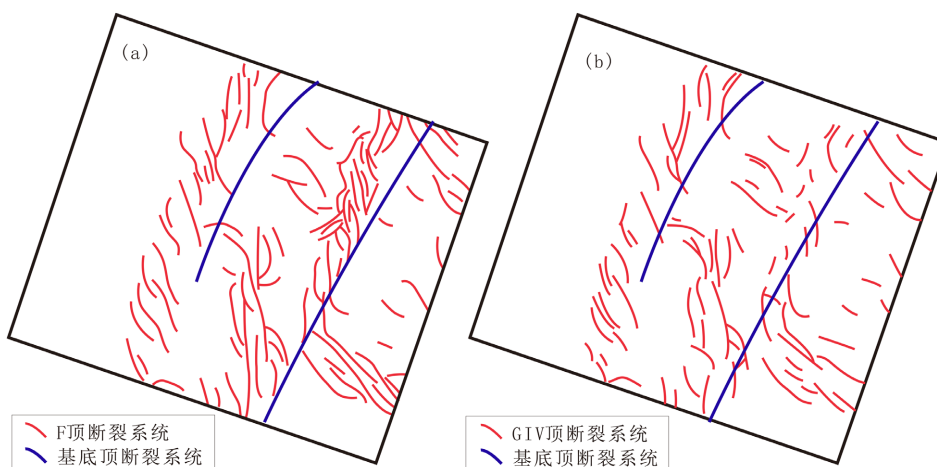


Figure 3. Overlapping diagram of fault system between overlying strata and basement in region A. (a) Overlap diagram of the fault system between the top surface of the Fuyu oil formation and basement; (b) Overlap diagram of the fault system between the top surface of the GIV oil formation and basement

图 3. A 地区上覆地层与基底断裂系统叠合图。(a) 扶余油层组顶面与基底断裂系统叠合图; (b) 高四油层组顶面与基底断裂系统叠合图

4. 断裂系统形成机制研究

从雁列式断裂带与基底先存断裂走向特征不难看出, 雁列式断裂带是由基底先存断裂“诱导”形成的, 前人对盆地演化研究结果表明, 断陷期应力场方向为北西—南东方向, 先存断裂以北北东向为主; 到了拗陷期, 应力场方向转为近东西向, 应力场方向发生变化, 由于构造活动易于沿着地层薄弱面发生, 先存深大断裂无疑为最好的应力释放点, 因此沿着先存断裂面发生走滑位移分量。

另一方面, 该区存在非能干性软弱泥岩隔层, 大量的室内试验和野外露头证明(图 4), 非能干性软弱

泥岩隔层对断层的纵向发育影响较大。能干性脆性岩层以断裂的形式向上传导应力，而非能干性软弱岩层主要以流动塑性变形为主向上传导应力。因此，就出现了该区晚期断层受基底断裂影响，但基底断裂却并未断穿上覆地层的特征。

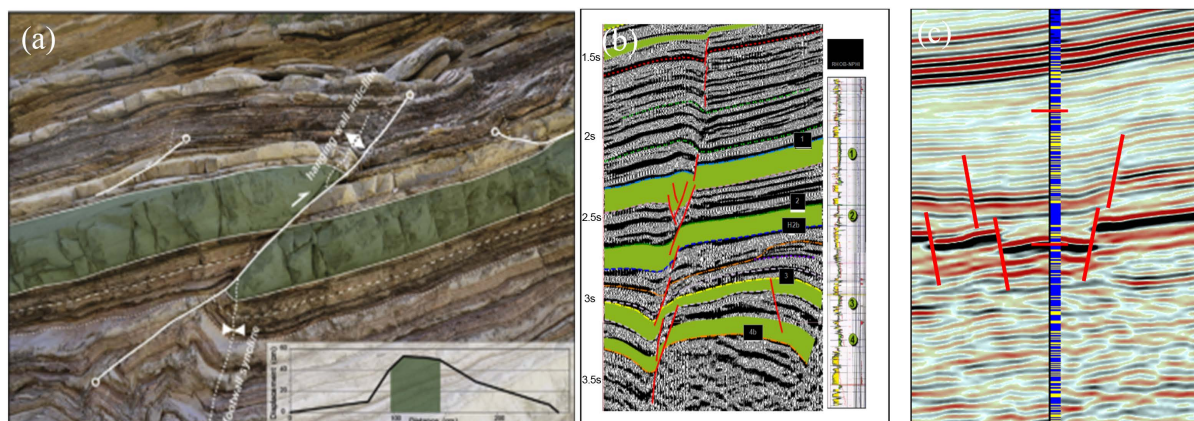


Figure 4. Longitudinal development characteristics of fractures under the influence of weak rock layers. (a) Field outcrops with discontinuous fault development due to the influence of weak rock layers; (b) Seismic profiles with discontinuous fault development; (c) Typical seismic profile through well

图 4. 软弱岩层影响下断裂纵向发育特征图。(a) 软弱岩层导致断层发育不连续野外露头；(b) 断续发育断层实例剖面；(c) 过井典型地震剖面

同时，应力本身的大小也对断裂发育规模起到了至关重要的作用。由于基底断裂晚期走滑形成的应力对上覆地层的破坏作用是自下而上发生的，因此，应力场强度越大，断层向上切穿地层越多，反之，应力场强度越小，加之非能干性软弱岩层的应力吸收作用导致向上切穿地层能力变差。而 A 区块断裂系统无疑为后者，在扶余油层顶面断裂系统最为发育，高四顶面稍微次之，高三顶面断裂发育极少，揭示了应力向上传到迅速减弱，多因素共同作用，导致该区形成“基底诱导、纵向断续、平面雁列”的断裂发育特征(图 5)。

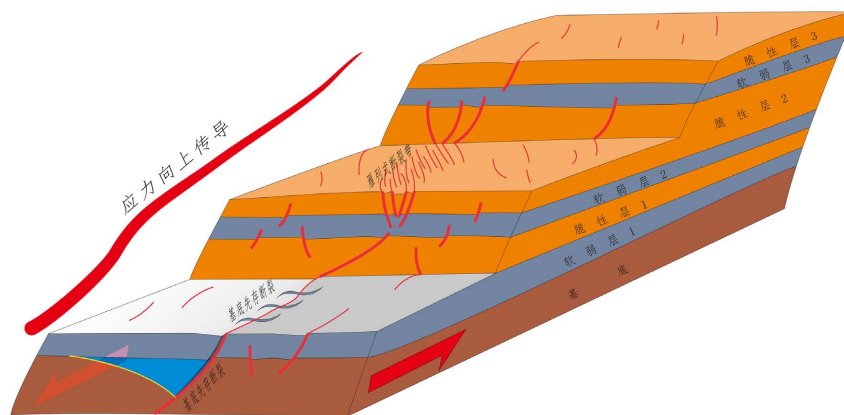
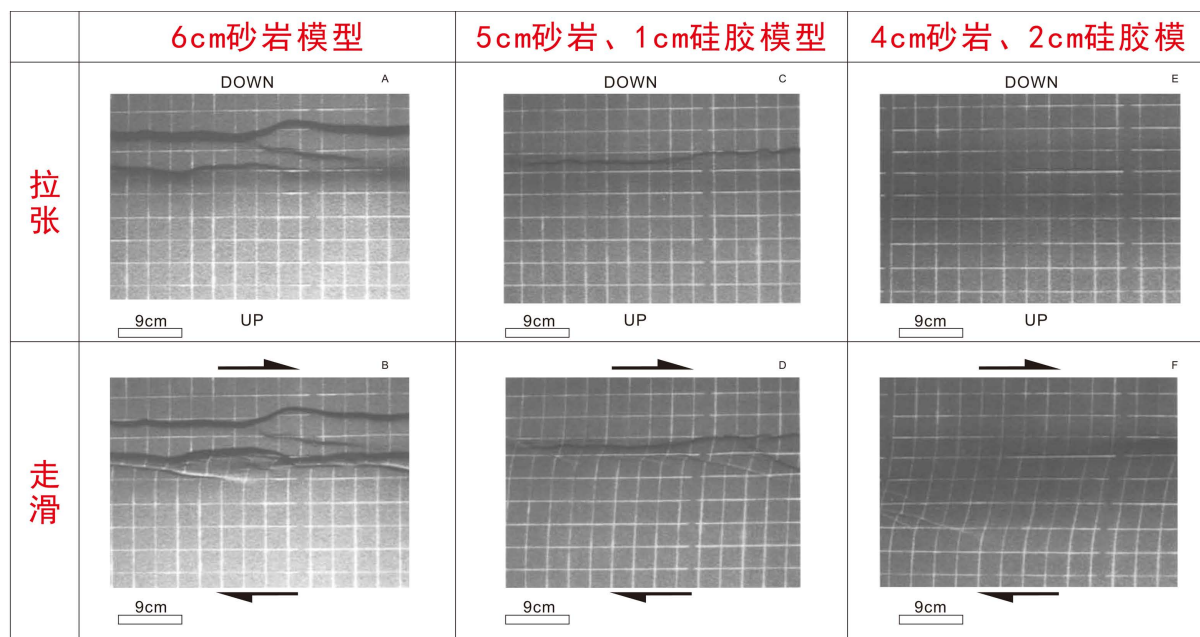


Figure 5. Pattern diagram of strike slip reactivation of basement faults

图 5. 基底断裂走滑复活模式图

为了证实非能干性软弱泥岩隔层对应力向上传导方式，早在 1991 年法国科学家 Pascal Richard 和 Robert W. Krantz 已经用构造物理模拟试验得到了一部分的证实(图 6)，他们做了三个试验模型，一是 6 cm 厚砂岩模型，二是 5 cm 厚砂岩、1 cm 厚硅胶模型，三是 4 cm 厚砂岩、2 cm 厚硅胶模型，试验分两步进

行，第一步是纯拉张，形成先存断裂，第二步纯剪切，观察变形特征。试验结果表明，模型 1 断裂特征明显，模型 2 受到硅胶的影响断裂程度变弱，模型 3 变形主要以褶皱变形为主，说明软弱岩层对应力吸收衰减作用较强，与我们研究区的实际情况基本一致。由此可知，软弱岩层是该区晚期地层断裂系统受先存断裂控制，且先存断裂又未能断穿上覆地层的关键因素。



Pascal Richard, Robert W. Krantz, 1991

Figure 6. Photos of the experimental results of the structural physical simulation of the strike slip reactivation model of the basement fault

图 6. 基底断层走滑复活模式构造物理模拟实验成果照

5. 基底断裂复活对油气运聚的作用

由前文可知，该区生排烃期断层活动是油气运聚的重要疏导通道。由于基底先存断裂发生走滑位移，使上覆地层出现密集分布的雁列式断裂带，为油气运移提供丰富的疏导通道，并且由于应力场本身强度不大，且存在非能干性层，导致断裂向上延伸能力不足，即为油气运移提供了通道，又确保油气不会因断裂规模过大而导致溃散，油气成藏条件更加有利(图 7)。

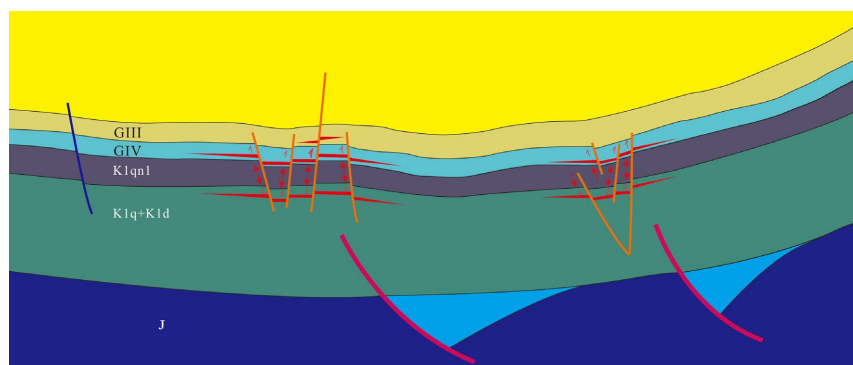


Figure 7. Oil and gas reservoir formation pattern diagram in region A

图 7. A 地区油气成藏模式图

此观点在 A 井区得到了很好的验证, 雁列式断裂带仅切穿了高四油层组, 油气向上运移能力有限, 仅在高四油层组下部成藏。从完钻井看, 全区砂岩厚度均较为发育, 但有效厚度等值图厚值区明显具有沿密集断裂带发育或与之接近的构造上倾向方向发育特征, 表明该区雁列式断裂带形成了“横向密集、纵向短距”的油气疏导体系, 是该区油气成藏的关键因素之一(图 8)。

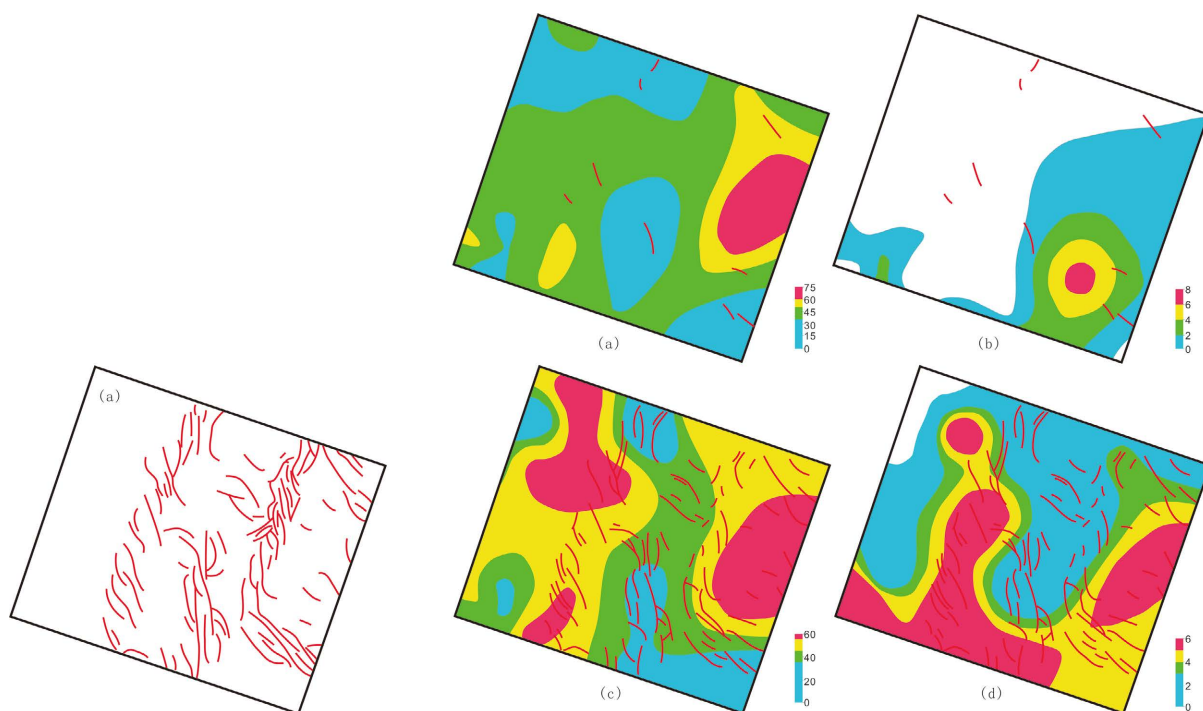


Figure 8. Sandstone thickness map and effective thickness map of GIII and GIV oil formation in region A

图 8. A 区块高三、高四油层组砂岩、有效厚度图

根据以上认识, 在区域扶余油层顶面断裂系统图上识别雁列式断裂带及与其具有相同成因机制的复杂构造变换带, 发现大量探明储量区、以开发区和试油工业油流井分布其间。由此可见, 长垣西侧雁列式断裂带、复杂构造变换带在成藏期受基底断层复活影响开启, 提供了油气疏导通道, 若与较好的储层砂体有效组合, 即可形成油气藏, 对未来长垣西部高台子、扶余油层油气勘探发现具有深远指导意义。

6. 结论

长垣西部基底先存深大断裂在晚期应力场方向变化条件下发生走滑位移, 且地层中存在多套非能干性软弱岩层, 可在上覆地层中形成“基底诱导、纵向断续、平面雁列”的断裂体系特征。

基于走滑应力机制, 上覆地层变形自下而上由强变弱, 断裂自下向上切穿地层, 形成“横向密集、纵向短距”的油气疏导体系, 即为油气纵向运移提供了良好的疏导通道, 又避免断穿地层过多导致油气资源溃散, 为油气勘探的重要目标区, 这与热地幔物质上涌形成地表拉张应力不同, 地表拉张导致上覆地层变形自上而下由强变弱, 易于形成“通天断层”, 对油气藏可能起到破坏作用,

因此, 长垣西部高台子、扶余油层雁列式断裂带及复杂构造变换带发育区为油气成藏有利指向区。

参考文献

- [1] 谢明举. 大庆油田长垣以西地区中下部含油层系成藏互补性浅析[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(20): 36-39.

- [2] 陈方文, 卢双舫, 丁雪. 松辽盆地齐家-古龙凹陷中浅层烃源岩生烃量评价[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1181-1187.
- [3] 高瑞琪, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [4] 卢双舫, 李娇娜, 刘绍军, 等. 松辽盆地生油门限重新厘定及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 166-173.
- [5] 付秀丽, 庞雄奇. 松辽盆地北部青一段烃源岩排烃特征研究[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(1): 166-169.
- [6] 马中振, 庞雄奇, 付秀丽, 等. 松辽盆地北部嫩江组一段源岩排烃特征及潜力评价[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(3): 24-28.
- [7] 刘玉娟, 张静, 郑彬, 等. 断层在油田不同开发阶段的封闭能力及对剩余油分布的影响——以渤海 L 油田为例[J]. 新疆石油天然气, 2021, 17(2): 53-58+4.
- [8] 刘德来, 陈发景, 温详泉. 松辽盆地坳陷期 T2 断层成因机制分析[J]. 大庆石油学院学报, 1996, 20(1): 23-27.
- [9] 马媛媛, 申家年, 于浩淼, 等. 松辽盆地齐家凹陷北部地区油源分析[J]. 复杂油气藏, 2009, 2(3): 1-4.
- [10] 杨慧钰. 古龙凹陷高台子油层致密油成藏主控因素研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2016.