

一种特殊的储集空间成因机制:断裂—地震—高压水射流作用



Pre-pub. on line: [www.
geojournals.cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev)

沈华¹⁾, 陆鹿²⁾, 史原鹏¹⁾, 李壮福²⁾, 陈树光¹⁾, 曹兰柱¹⁾, 胡延旭¹⁾, 李明桦¹⁾

1) 中国石油华北油田公司勘探开发研究院, 河北任丘, 062550;

2) 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州, 221116

内容提要: 本文以河套盆地临河坳陷扇三角洲相砂砾岩储层为研究对象, 揭示一种与断裂构造相关的储集空间形成的潜在机制。研究表明, 河套盆地临河坳陷扇三角洲相砂砾岩纵向上往往表现为破碎段和完整段相间分布的特征。破碎段砂砾岩破碎严重, 仅残留少量疏松易碎的岩石碎块, 其中碎屑颗粒发生明显碎裂, 而碎屑颗粒之间的填隙物多已缺失。完整段砂砾岩在宏观上未发生明显破碎, 但镜下分析表明, 在靠近破碎段的砂砾岩中不均匀地发育一些粒间孔和粒内裂缝孔, 并以条带状、不规则斑块状、近圆形或椭圆形斑点状等多种形态集中分布。这些特殊储集空间的形成很难由简单的“断裂破碎”模式加以解释。基于宏—微观岩相学的系统研究, 本文提出“断裂—地震—高压水射流”成因机制: ① 原生沉积的扇三角洲相巨厚层状砂砾岩为泥质或同生泥晶—粉晶方解石填隙, 致密无孔, 后因盆内断裂切割而发生破碎, 形成构造破碎带这一最为主要的储集空间。② 后期断裂活动促使地震活动频发, 引起断裂带内地下水的激荡性运动, 形成断裂带内及向两侧的高压流体射流。高压流体射流的冲洗作用使碎屑颗粒间泥质及泥晶—粉晶方解石填隙物被带走, 形成冲洗粒间孔, 同时使得碎屑颗粒通过撞击而发生碎裂。③ 高压流体充注使得颗粒脆性碎裂得以保留。

关键词: 储集空间; 油气储层; 断裂构造; 地震作用; 高压水射流; 河套盆地; 临河坳陷

探究断裂构造对于含油气盆地形成和油气运聚成藏的控制规律和机理, 一直是油气地质学家们所关注的热点问题, 也由此产生各种相关的理论和假说。例如, 张文佑 (1984, 1995) 论述了断裂对油气的控制, 指出“大庆长垣的形成, 黑鱼泡—孤店断裂起了决定性作用”、“要特别重视研究盆地在基底断裂控制下的形成和发育特征”、“油气沿断裂带运移和富集, 各断块内的油气具有不同的特征和独立的系统, 成为断块油田”; 陈义贤 (1985)、朱夏 (1990)、陆克政和漆家福 (1997) 从多角度较为系统地提出了断裂控制油气藏形成与分布的认识和观点; 在充分掌握断裂控制油气生成、运移、聚集、散失和分布的证据之上, 罗群 (2010, 2011) 提出了断裂控烃模式, 并运用大地构造理论、石油地质理论寻找支持断裂控烃的科学依据, 在充分吸取前人成果的基础上, 结合中国陆相含油气盆地和油气藏的特点, 提出了以“断裂是控制油气生成、运移、聚集、保存

和分布的根本原因”为基本观点的“断裂控烃理论”。除此之外, 还有很多相关的文章和论著 (王平, 1994; 郭占谦等, 1996; 庄培仁和常志忠, 1996; 罗群和白新华, 1998; 譙汉生, 1999; 雷茂盛和林铁锋, 1999; 张善文等, 2003; 孙向阳和任建业, 2004; 张君峰和兰朝利, 2006; 罗群等, 2007; 汪泽成等, 2008; 董月霞等, 2008; 吴松涛, 2020; 吕文雅等, 2021; 王越等, 2021)。纵观现有研究, 研究者们主要关注以下几个方面问题: ① 断裂构造如何控制盆地的形成、演化以及对应生储盖的沉积配置; ② 断裂如何控制油气的输导和运移; ③ 断裂如何控制油气圈闭的形成和分布。相比而言, 目前对于断裂构造如何影响储层发育, 从而形成有效储集空间的关注较少, 且多停留在“断裂破碎”这一相对简单和粗犷的认知层面。事实上, 断裂构造对于储集空间形成的影响还存在诸多细微机理, 而对于这些细微机理的深入挖掘, 将有效推进油气储层和成藏理论的发展。

注: 本文为中国石油天然气股份有限公司科技攻关课题“河套盆地新区新领域勘探潜力与高效勘探关键技术研究” (编号: 2019D-0815) 的成果。

收稿日期: 2020-12-18; 改回日期: 2021-06-10; 网络首发: 2021-06-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.06.101

作者简介: 沈华, 男, 1970年生, 博士, 教授级高工, 主要从事地质综合研究和管理工作的; Email: shenhua@petrochina.com.cn。通讯作者: 陆鹿, 男, 1989年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石大地构造、能源盆地沉积—构造演化研究工作; Email: geollulu@cumt.edu.cn。

河套盆地位于内蒙古自治区黄河河套地区,东西方向长约 600 km,南北方向宽约 30~90 km,整体呈弧形分布,面积约 40000 km²,是华北地块内部重要含油气盆地之一(赵重远等,1984)。该盆地油气勘探始于 20 世纪 70 年代末期,但勘探成效并不理想,一直未获工业性突破。2017 年矿权流转后,华北油田公司在对前期地质认识快速消化和关键地质问题深化研究的基础上,优选临河拗陷吉兰泰潜山

及其围斜的断裂构造带部署多口钻井,获工业油流,实现了临河拗陷油气勘探的重要突破。前期勘探实践和石油地质综合研究表明,临河拗陷有效储层主要为扇三角洲相砂砾岩,并且储集空间的发育与断裂构造的后期改造作用密切相关。然而,通过对该类储层内部储集空间的细致观察,笔者等发现很难用简单的“断裂破碎”模式来解释储集空间的形成。基于此,本文在系统岩相学研究的基础上,结合区域

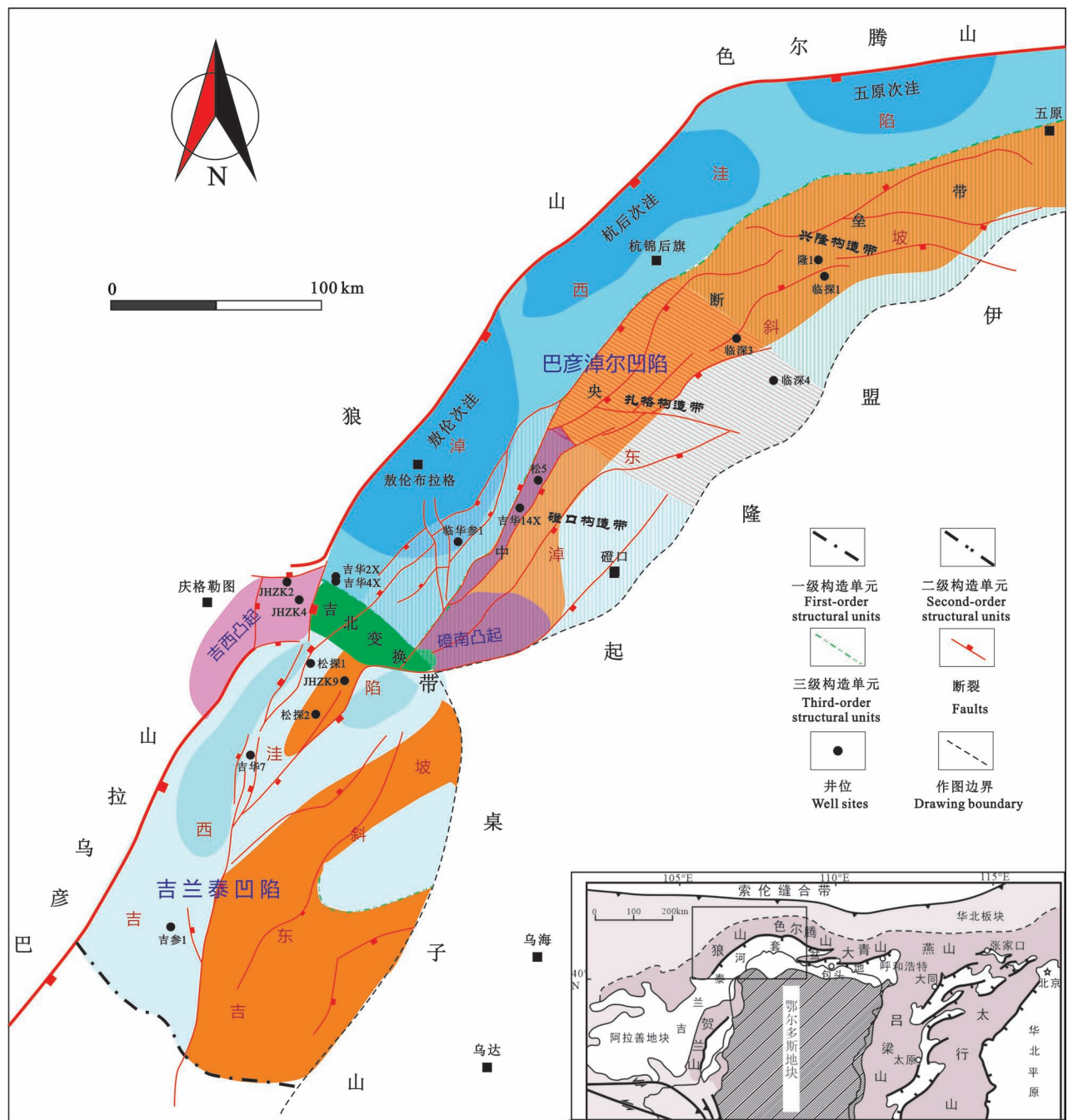


图 1 内蒙古河套盆地临河拗陷构造单元图(据张锐锋等,2020)

Fig. 1 Structural units of the Linhe Depression, Hetao Basin(from Zhang Ruifeng et al. , 2020&)

地质背景分析,提出“构造—地震—高压水射流”这一特殊的储集空间成因模式,以期与国内外同行专家交流探讨,丰富储层发育断裂控制机理的研究,并为河套盆地油气地质勘探和开发提供借鉴与参考。

1 研究区地质背景

河套盆地是一个整体轮廓呈弧形的中—新生代陆相拗陷—断陷叠合沉积盆地(图 1),呈北西陡深而南东缓浅的箕状形态(赵重远等,1984)。在区域构造位置上,该盆地夹持于华北板块和阿拉善地块之间(Darby and Ritts,2007),西以阴山弧形断裂带的西段(巴彦乌拉山断裂、狼山山前断裂)为界与巴彦乌拉山、狼山相接,北以阴山弧形断裂带东段(色尔腾山山前断裂、乌拉山山前断裂、大青山山前断裂)为界与阴山(色尔腾山、乌拉山、大青山)相接,南以黄河隐伏断裂带为界与鄂尔多斯盆地北缘伊盟隆起相接(赵重远等,1984;赵孟为,1988;郭忠铭和于忠平,1990;图 1)。根据基底隆升幅度、沉积厚度以及主要断裂构造的分布特征,河套盆地自西向东可划分为“三拗两隆”5 个一级构造单元,依次是临河拗陷、乌拉山隆起、乌前拗陷、包头隆起、呼和拗陷(张以明等,2020)。

临河拗陷位于河套盆地西南部,总体呈 NE 向展布,北东方向长约 320 km,北西方向宽约 70 km,面积约 24300 km²(付锁堂等,2018;张以明等,

2020)。通过系统勘探和总结,华北油田公司近期将临河拗陷构造单元进行了详细划分,以吉北变换带为界,将其划分为南部的吉兰泰凹陷和北部的巴彦淖尔凹陷,整体具有东西分带、南北分区的结构特征(图 1)。其中,巴彦淖尔凹陷东西方向可划分为淖西洼槽、中央断裂构造带和黄河洼槽;吉兰泰凹陷东西方向划分为吉西洼槽和吉东斜坡(图 1)。该拗陷的基底为太古界—元古界变质岩系,而沉积盖层自下而上主要发育下白垩统李三沟组、固阳组、古近系始新统乌拉特组、渐新统临河组、新近系中新统五原组、上新统乌兰图克组以及第四系河套群,总体厚度 3000~8000 m,最厚处可达 14000 m(内蒙古自治区地质矿产局,1991;张昊址,2015;孙六一等,2018;王飞等,2019;表 1)。其中,共识别追踪出 5 大层序界面,分别为基底(即白垩系底)界面、固阳组底界面、古近系底界面、新近系底界面和第四系底界面(赵重远等,1984;张锐锋等,2020;刘天顺等,2021;表 1)。白垩系和古近系是河套盆地内部主要烃源岩和储集层所在层系,其中下白垩统固阳组和渐新统临河组发育湖相暗色泥岩,构成主要生烃层系(张以明等,2020;门相勇等,2006)。

2 储层产出特征

2.1 储层沉积—岩石学特征

扇三角洲相砂砾岩为现今河套盆地主要高产储

表 1 内蒙古河套盆地临河拗陷地层组成(据杜晓宇等,2019,有修改)

地层系统				地震反 射界面	厚度(m)		主要岩性及接触关系
系	统	组	段		层厚	段厚	
第四系		河套群		T1	261~1753		以黄灰、浅灰色黏土层为主,夹粉砂、细砂层
新近系	上新统	乌兰图克组	上段			209~797	以黄灰、浅灰色粉细砂岩为主,夹棕红、浅灰色泥岩
			下段		360~2962	628~2290	中上部为棕红—棕褐色泥岩与黄灰、棕灰色粉细砂岩互层,底部以浅灰、黄灰色块状粉细砂岩为主
	中新统	五原组			458~1015		以棕紫、棕褐、棕灰色泥岩为主,夹浅灰色粉细砂岩
古近系	渐新统	临河组	一段	T3		259~442	棕红、棕紫、浅灰、灰绿色砂泥岩互层
			二段		354~1227	250~358	以深灰、绿灰、褐灰色泥岩为主,夹浅灰色粉细砂岩
			三段			351~427	以浅灰色、棕灰色厚层状细砂岩、含砾砂岩为主,夹泥岩
	始新统	乌拉特组		T5	55~289		下部为棕红色、棕褐色含砾砂岩、不等粒砂岩为主;上部为棕红、浅灰、灰绿色砂泥岩互层
白垩系	下统	固阳组	一段	T7			以深灰色、灰黑色泥岩为主,夹粉细砂岩、灰岩薄层;
			二段		489~1125	200~1000	顶部为棕红色、浅灰色砂泥岩互层
		李三沟组		Tkg		153~306	以棕灰、棕紫、棕黄色砾岩及含砾砂岩为主
					100~1000		顶底部粒度粗,为砾岩及砂砾岩,中部为泥岩和砂泥岩互层;整体表现为由下向上变细然后变粗的旋回特征
前寒武系		太古宙—古元古界变质岩系结晶基底		Tg			片麻岩、片岩、变质砂砾岩、石英岩、混合花岗岩等

层,主要见于JH井区,包括JH2X井临三段1油组、JH4X井固一段1油组、JH2-4X井临二段、JH16X井固一段2油组、JH22X井固一段1油组等,其中以JH2X井和JH4X井最具代表性。

对于JH2X井和JH4X井取芯段岩芯的观察发现,扇三角洲相砂砾岩整体为浅紫红色、浅棕红色(油浸后色变暗),其中夹浅棕红色—浅棕灰色(油浸之后呈暗灰色)砂岩和棕红色泥岩,垂向上构成正粒序沉积旋回。砂砾岩主体以块状层理为主,部分可见平行层理、正粒序层理和冲刷面构造,交错层理不发育。碎屑颗粒分选差,粒度为0.5~5 mm,多含1~5 cm的砾石或角砾;磨圆度差,次棱角状为主,细砾级碎屑的磨圆度一般为次棱角状—次圆状;颗粒支撑为主,少量为杂基支撑,填隙物多为泥质杂基,其次为同生沉积的泥晶—粉晶方解石,见少量分散亮晶方解石。碎屑成分包括长石、石英及岩屑,岩屑以花岗片麻岩和石英岩为主(尤其是砾石级碎屑),部分为云英岩和糜棱岩,偶见火山岩。

扇三角洲相砂砾岩低结构成熟度以及宏观沉积构造特征反映了近物源、浅水体、强水流、快速沉积的特征,为扇三角洲前缘亚相沉积产物。砂砾岩、砂岩及泥岩在垂向上构成多个正粒序旋回,为扇三角洲前缘水下分流河道沉积的反复叠置而成。

2.2 储层储集空间特征

从JH2X井和JH4X井来看,砂砾岩取芯段岩芯表现出共同特征,即破碎段和完整段在纵向上相间分布,其中破碎段油气显示整体好于完整段(图2)。破碎段岩芯破碎程度严重,仅残留少量疏松易碎的岩石碎块(图2),而在这些残余岩石碎块中,碎屑颗粒也发生了严重破碎,颗粒间的填隙物多已消失(图2a,b),反映整体孔隙非常发育,为该区主要的储集空间。相比破碎段岩芯而言,完整段岩除了少量微裂隙以外,宏观上未见明显的破碎现象(图2)。然而,镜下薄片观察表明,在靠近破碎段的完整砂砾岩中,无论填隙物是泥质还是同生泥晶—粉晶方解石,孔隙实则均较为发育,油浸非常明显(图2c—e,h),而远离破碎段的完整砂砾岩以及作为夹层的砂岩(尤其是分选较好、粒度较细的钙质胶结砂岩)和泥岩则孔隙发育不佳或致密无孔(图2f,g)。除此之外,在靠近破碎段的完整砂砾岩内部,孔隙发育在微观尺度上往往呈现出以下特征:①孔隙发育在薄片尺度上具有很强的非均一性,孔隙集中区往往呈多种形态,常见或宽或窄的条带状(图3a)、不规则斑块状(图3b),在相对细粒的岩石中甚至呈近圆形

或椭圆形的斑点状(图3c,d)。②孔隙类型以粒间孔和粒内裂缝孔为主(图2a—f,h;图3),极少见长石粒内溶孔或铸模孔发育。粒间孔和粒内裂缝孔往往伴生出现,即碎屑颗粒破碎形成粒内裂缝孔的同时,粒间填隙物不同程度缺失(图2a—e,h;图3)。少数情况下,可见二者单独出现(图2f;图3d)。③颗粒的碎裂在分选较差的砂砾岩中最容易发生,尤其是大颗粒之间的小颗粒(图2a;图3a,b,e)。无论是石英还是长石,均发育程度不等的碎裂,但长石由于解理发育,更容易沿解理发生碎裂。④不同于常规微裂缝,颗粒的破碎仅局限于颗粒内部,很少有穿越颗粒边界(图2a—f,h;图3)。⑤粒内裂缝总体上定向性差,部分定向性较好,尤其是在较大的碎屑中,可表现为不太规则的X形(图3f),少部分为单方向发育(图2d)。在X形粒内裂缝孔中,经常是其中一个方向裂缝较为发育,另一个方向裂缝发育较差(图3f)。颗粒接触处,可见粒内裂缝呈扇状分布的现象(图3g,h)。另外,粒内缝的分布存在多—少—多的相间现象。

3 讨论

3.1 储集空间发育机理——断裂—地震—高压水射流作用

从吉华2X井和吉华4X井取芯段来看,砂砾岩在纵向上表现为破碎段和完整段相间分布,明显是由断裂带切割而成。地震相剖面显示吉华2X井临三段和吉华4X井固一段均有若干断层切过,进一步证明了岩芯破碎与该区断裂构造之间的相关性(图4)。除了由断裂构造切割而形成的岩芯破碎以外,在靠近破碎段的完整砂砾岩中发育一些微裂缝以及具有特殊产出特征的粒间孔和粒内裂缝孔,具有较好的油气显示。微裂缝作为常见的储集空间,在一定范围内连续贯穿,与断裂构造的机械破碎有关。然而,对于具有特殊产出特征的粒间孔和粒内裂缝孔来说,其起因究竟为何,仍需进一步的探讨。前文对于该套储层内部具有特殊产出特征的粒间孔和粒内裂缝孔进行了较为详细的观察和描述,其中众多证据表明这些粒间孔并非简单的化学溶蚀孔,而粒内裂缝孔也非简单的由断裂破碎作用而成,主要包括:①粒间孔发育的砂砾岩填隙物既有泥质,也有泥晶—粉晶方解石。泥质填隙物难以被酸性孔隙水溶蚀,颗粒之间填隙物的缺失不可能由化学溶蚀导致。②与常规构造微裂缝不同,粒内裂缝孔一般局限于颗粒内部,很少穿越颗粒边界。碎屑颗粒

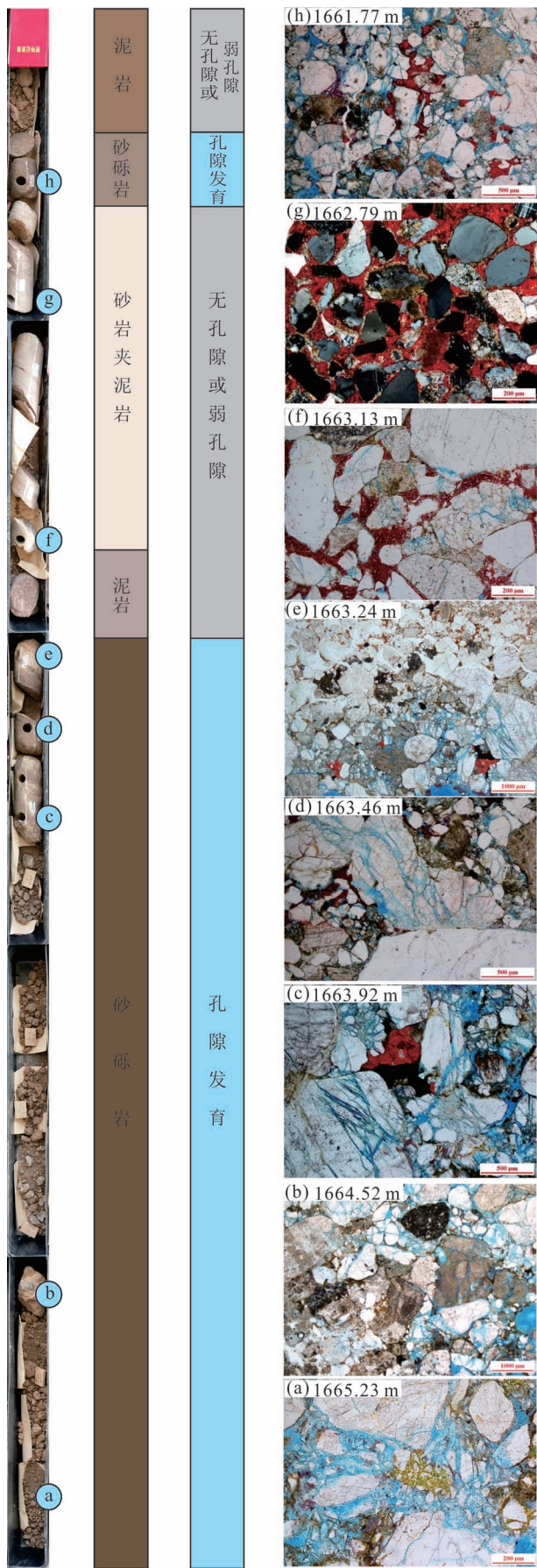


图 2 内蒙古河套盆地 JH2X 井临三段 1 油组代表性取芯段宏观—微观岩相学特征

Fig. 2 Macroscopic and microscopic petrographic characteristics of the typical coring interval of the oil group 1, the 3rd Member of Linhe Foramntion in the Well JH2X

(a) 1665.23 m: 颗粒破碎严重, 尤其是大颗粒之间的小颗粒, 粒间泥质填隙物缺失殆尽; (b) 1664.52 m: 左下方为致密原岩, 泥质填隙, 右上方粒间孔和粒内裂缝孔集中发育; (c) 1663.92 m: 粒间孔和粒内裂缝孔发育, 局部见零散亮晶方解石胶结; (d) 1663.46 m: 颗粒碎裂, 碎裂逢近于单向分布, 粒间泥质填隙物部分缺失, 形成粒间孔。局部见零散亮晶方解石胶结; (e) 1663.24 m: 岩石整体完整, 局部发育粒间孔和粒内裂缝孔。见零散亮晶方解石胶结; (f) 1663.13 m: 砂砾岩为方解石胶结, 部分颗粒发育碎裂, 形成粒内裂缝孔; (g) 1662.79 m: 钙质胶结的细粒长石砂岩, 致密无孔; (h) 1661.77 m: 砂砾岩发育粒间孔及粒内裂缝孔, 粒间局部被后期亮晶方解石胶结

(a) 1665.23 m: particle fragmentation is serious, especially the small particles between large particles, and the argillaceous interstitial material is completely missing; (b) 1664.52 m: the rock in lower left is dense with argillaceous interstitial material; the rock in upper right shows concentrated pores and intragranular fractures; (c) 1663.92 m: intergranular pores and intragranular fractures are present, with local scattered sparry calcite cementation; (d) 1663.46 m: particle fragmentation is nearly unidirectional, and the argillaceous interstitial material is partially missing, forming intergranular pores. Scattered sparry calcite cementation is observed locally; (e) 1663.24 m: the rock is completely intact, with locally developed intergranular pores and intragranular fractures. Scattered sparry calcite cementation is observed; (f) 1663.13 m: the conglomerate is cemented by calcite, and some of the grains are fractured and form intragranular fractures; (g) 1662.79 m: dense and non-porous fine grained feldspar sandstone with calcareous cementation; (h) 1661.77 m: intergranular pores and intragranular fractures are developed in the sandy conglomerate, and the intergranular pores are partially cemented by late sparry calcite

的脆性碎裂方式既有显示挤压—剪切构造作用形成的 X 形裂缝, 也有撞击成因的放射状裂缝, 显示了快速应力作用。③ 粒内裂缝孔与粒间孔集中的区域可呈毫米级斑块状或近椭圆—圆形的斑点状, 并且无微裂缝的直接导通, 显然不是断裂作用直接破碎而形成的。

基于已有现象, 本文提出断裂—地震—高压水射流相结合的成因机制 (图 5), 可定性描述为: ① 扇三角洲相巨厚层状砂砾岩本为致密无孔的岩石, 后因断裂切割而发生破碎, 形成构造破碎带这一最为主要的储集空间。由于分选差、杂基含量高、硬度较低, 断裂很容易切割砂砾岩, 并优先造成该类岩石强烈破碎。相比而言, 作为夹层的钙质胶结砂岩分

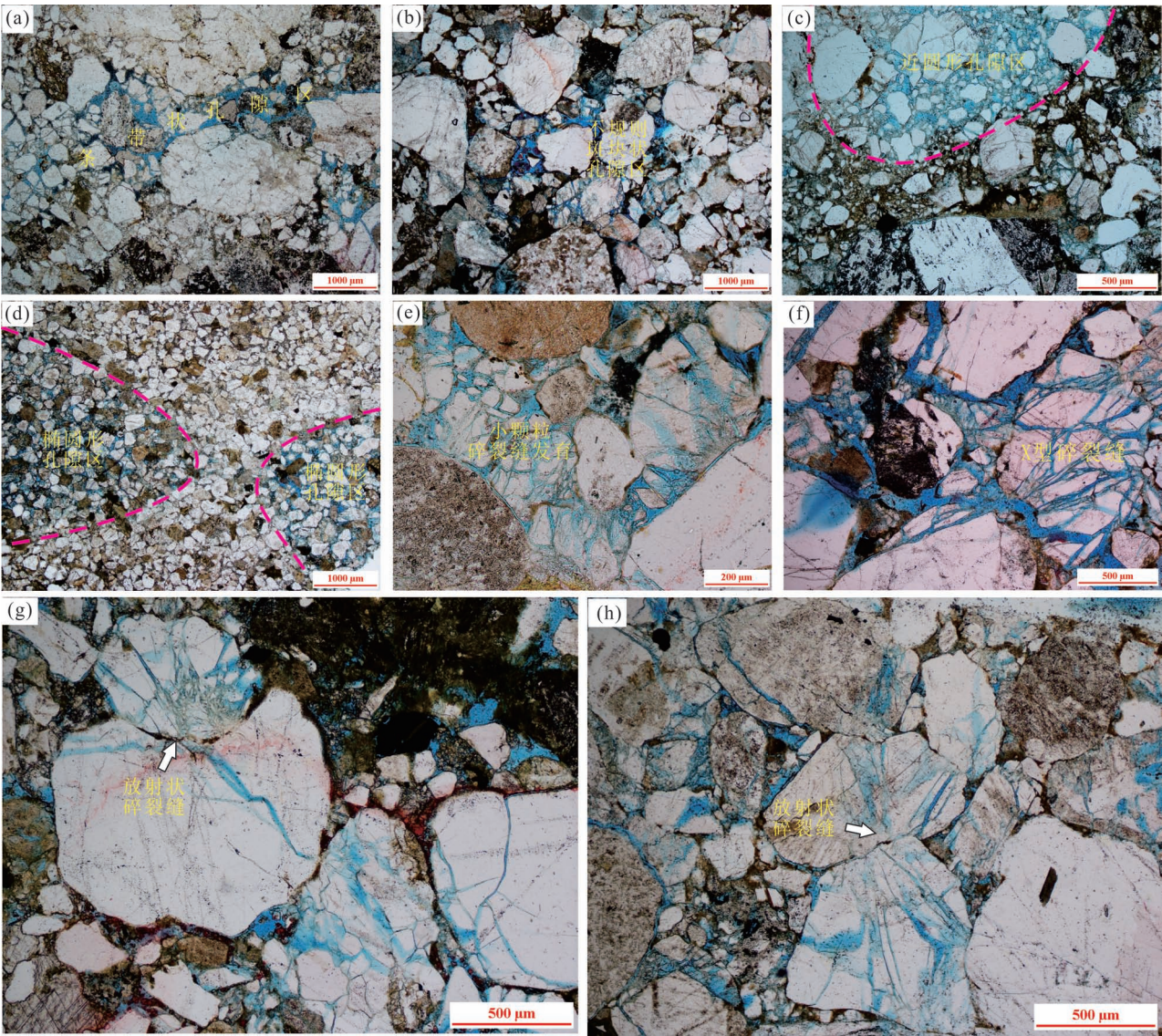


图3 内蒙古河套盆地吉华2X和吉华4X井完整段岩芯孔隙发育特征

Fig. 3 Porosity characteristics of the intact cores in the Well JH 2X and JH 4X

(a) 吉华2X井;1411.23 m,临二段。窄条带状的孔隙区,宽度1~2 mm,粒间孔和粒内裂缝孔发育,大碎屑颗粒未发生碎裂;(b) 吉华4X井;2611.25 m,固二段。近圆形的孔隙区,直径3 mm左右,粒间孔及粒内裂隙孔较发育,大碎屑颗粒未发生碎裂;(c) 吉华2X井;1412.23 m,临一段。孔隙区呈圆形斑点,与周围界线明显,其中粒间孔和粒内裂隙孔发育;(d) 吉华2X井;1663.24 m,临三段。钙质胶结致密的中粒长石砂岩中呈椭圆形分布的孔隙发育区域,其中发育粒间孔,部分碎屑发生碎裂;(e) 吉华4X井;2608.80 m,固组二段。较大碎屑间的小颗粒裂缝孔发育,大碎屑则不发育;(f) 吉华2X井;1663.92 m,临一段。石英碎屑中发育的碎裂缝,大致呈X形,其中一个方向发育;(g) 吉华2X井;1663.46 m,临一段。颗粒接触处碎裂缝呈扇状分布;(h) 吉华4X井;2063.62 m,固一段。颗粒接触处碎裂缝呈扇状分布

(a) the Well Jihua 2X; 1411.23 m, the 2nd Member of Linhe Formation. The narrow banded pore zone (width of 1~2 mm) with intergranular pores and ingranular fractures is well developed. Large clastic grains did not underwent fragmentation; (b) the Well Jihua 4X; 2611.25 m, the 2nd Member of Guyang Formation. The pore area is nearly round, with a diameter of about 3 mm. The intergranular pores and fractures in grains are relatively developed, and the large clastic grains do not fragment; (c) the Well Jihua 2X; 1412.23m, the 1st Member of Linhe Formation. The pore area is circular with obvious boundaries with the surrounding rocks, in which intergranular pores and intragranular fractures are developed; (d) the Well Jihua 2X, 1663.24 m, the 3rd Member of Linhe Formation. In the dense medium-grained feldspar sandstones with calcareous cementation, there are elliptical pore areas with intergranular pores and some clastic grains underwent fragmentation; (e) the Well Jihua 4X; 2608.80 m, the 2nd Member of Guyang Formation. Small particles between large ones underwent extensive fragmentation. Large particles did not underwent fragmentation; (f) the Well Jihua 2X; 1663.92 m, the 1st Member of Linhe Formation. Fractures developed in quartz clasts, and show roughly X-shaped; (g) the Well Jihua 2X; 1663.46 m, the 1st Member of Linhe Formation. Fractures are fan-shaped; (h) the Well Jihua 4X; 2063.62 m, the 1st Member of Guyang Formation. Fractures are fan-shaped

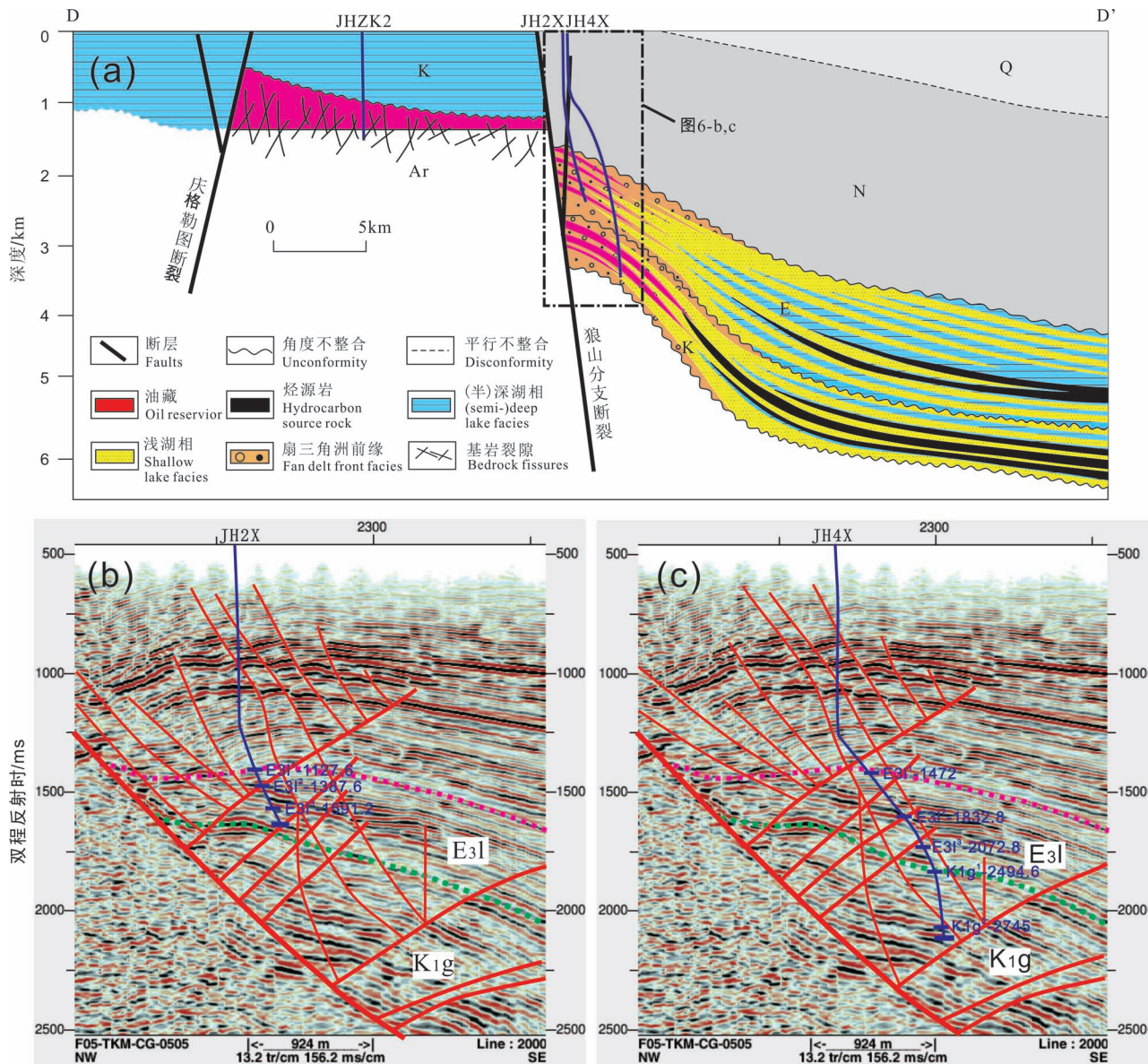


图 4 内蒙古河套盆地临河坳陷吉华井区油气成藏模式图(a,剖面位置见图 1)及 JH2X 和 JH4X 过井地震剖面图(b,c)
Fig. 4 Hydrocarbon accumulation model of Jihua region in the Linhe Depression (a, see Fig. 1 for section location) and cross-well seismic profiles of JH2X and JH4X (b—c)

选较好、杂基含量低、硬度较高,在断裂切割的时候不易破碎,从而保存相对完整。② 盆地内部强烈的构造活动导致地震作用的频繁发生,引起断裂带内地下水的激荡性活动,形成具有强烈冲击力的高压流体,作用于断裂带内部及两侧的岩石。高压流体的冲洗作用不仅使得断裂带内部破碎岩石的粒间孔隙物(泥质及泥晶—粉晶方解石)被带走,同时也以高压水射流的形式强有力地作用于靠近断裂带的完整岩石,甚至以圆形液柱的形式进入完整岩石内部,形成完整段砂砾岩内部椭圆—圆形孔隙区。③ 高压流体射流的冲击作用也可导致碎屑颗粒因相互撞

击而发生碎裂,形成放射状的冲击裂纹。部分碎屑内部近于 X 形的微裂隙,反映了地震活动造成的定向构造应力作用。④ 颗粒碎裂后,高压流体的充注使得裂缝得以保留。相反,如果缺乏高压流体的充注,在应力释放后,颗粒内部的张裂缝将因压实作用而发生闭合。

尽管目前有关“断裂—地震—高压水射流作用”的具体机理尚需实验验证,但其合理性和可行性可通过以下两方面加以论证。一方面,高压水射流可具备足够强的冲击力,从而对储层岩石进行改造,增加储层岩石的孔渗条件。利用高压水射流强

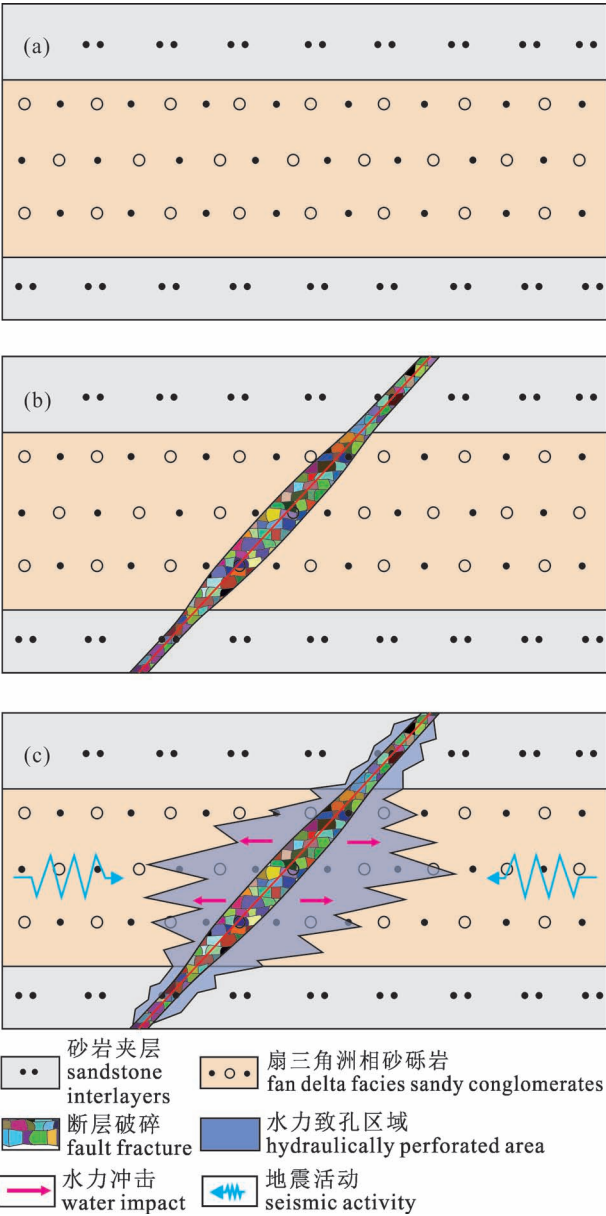


图 5 “断裂—地震—高压水射流作用”示意图
Fig. 5 Schematic of “Fault—Earthquake—High Pressure Water Jet Process”

(a) 未受断层影响的扇三角洲相砂砾岩、砂岩，致密无孔；(b) 断裂切割形成构造破碎带，其中泥质胶结砂砾岩强烈破碎，钙质胶结砂岩不易破碎，保存相对完整；(c) 地震作用引起断裂带内地下水的激荡性活动，形成具有强烈冲击力的高压流体，作用于断裂带内部及两侧的岩石

(a) Dense and non-porous sandy conglomerate and sandstone of fan-delta facies, which are not affected by faults; (b) a structural fracture zone, in which the sandy conglomerate with argillaceous cementation was strongly broken while the sandstone with calcareous cementation was not easily broken and relatively intact; (c) the seismic action causes the agitation of the water in the fault zone, forming the high-pressure fluid with strong impact force, acting on the rocks inside and on both sides of the fault zone

冲击属性，目前已开发了煤层水力增孔增渗、水力破岩破煤、钻孔水力开采等技术(廖华林等, 2005; 王耀锋等, 2014; 张煜晖等, 2018; 赵勇龙, 2019; 程树范, 2019; 王伟等, 2019)。另一方面, 前人针对狼山—河套地区的构造地质特征开展了深入研究, 其成果表明该区中—晚新生代发育了多期构造活动, 并且形成不同性质的断裂系统(Shi Wei et al., 2019; 赵衡等, 2019)。例如, Shi Wei 等(2019)认为该区中—晚新生代包括两大构造演化阶段, 即始新世晚期—中新世早期太平洋板块向北西俯冲主导的伸展断陷和中新世晚期以来青藏高原北东向扩展主导的走滑拉分活动; 赵衡等(2019)认为该区中—晚新生代发育 3 期构造变形, 分别是渐新世之后 NW—SE 向挤压产生的逆断层, NNE—SSW 向挤压产生的左行走滑断层以及最新的 NW—SE 向伸展产生的正断层系统; 张锐锋等(2020)认为该区中—晚新生代经历 2 期构造活动, 分别是新近纪强烈的伸展断陷作用和第四纪的走滑改造作用。尽管不同学者对于该区中—晚新生代构造演化期次的划分方案不尽相同, 但有一共同认识是: 狼山—河套地区中—晚新生代构造活动非常强烈。强烈的构造活动在形成不同性质断裂系统的同时, 无疑将导致该区地震频发, 进而通过“断裂—地震—高压水射流作用”对储层进行改造。

3.2 断裂—地震活动的重要性及油气勘探意义

临河坳陷内部主要生烃层系是下白垩统固阳组 and 渐新统临河组, 为坳陷内部提供了大量的油气来源, 而浅层中新统、上新统、第四系多套致密泥页岩作为封闭性较好的盖层又可阻止了油气的垂向逸散, 从而在生储盖合理配置的情况下为油气成藏提供了基本保障(门相勇等, 2006)。然而, 从储层沉积学和岩石学特征来看, 目前有效高产的扇三角洲相棕红色巨厚层状砂砾岩在受到断裂构造改造之前, 其原始岩性均表现出致密胶结(泥质或钙质)的特征, 原始孔渗条件较差。因此, 砂砾岩储层中有利储集空间的形成并非前期沉积作用和成岩作用的产物, 而是取决于其他地质作用。

从储层产出特征来看, 断裂构造应该是临河坳陷砂砾岩储层中有利储集空间形成的至关重要因素。前文述及 JH2X 井和 JH4X 井不同层段砂砾岩的储集空间发育具有明显差异, 这种差异性很大程度上取决于储层是否受到断裂构造的影响, 体现出断裂构造对于单一钻井内部不同层段储层发育的控制。另外, 临河坳陷不同钻井之间储层储集空间的

发育也存在明显差异,而这种差异同样决定是否受到断裂构造的影响。例如,目前已获得高产工业油流的 JH2X 井、JH4X 井、JH2-4X 井、JH10X 井、JH16X 井等均位于断裂构造集中发育的部位,所钻遇储层均不同程度地受到断裂构造后期改造。相反,JH7 井并未经过规模较大的断层,取芯段岩芯较为完整,薄片镜下观察皆为压实—胶结致密岩石;JH6X 井和 JH16X 井仅有临一段被断层切割,其他地层无较大断层经过,故总体上不发育良好的储层。

不同性质断裂系统切割储层的同时,通过机械破碎以及地震—高压水射流作用使得原本致密的砂砾岩产生大量孔—裂隙。除此之外,深大断裂的发育沟通固阳组和临河组油源,为油气的长距离运移提供了有利通道。现今临河凹陷内部发育 3 条 NE—SW 向延展的主控断裂(带),自北西向南东依次为狼山断裂(带)、中央断裂(带)以及黄河断裂(带),其中狼山断裂(带)和中央断裂(带)均为断穿基底的具有走滑性质的伸展断裂,从北部的巴彦淖尔凹陷一直延伸至南部的吉兰泰凹陷(付锁堂等,2018)。这些断裂带为临河凹陷内部的储层改造、油气运移和成藏创造了相当有利的条件。例如,在由狼山分支断层控制的碎屑岩断鼻构造上部署的 JH2X 井和 JH4X 井,分别揭示古近系临河组和白恶系固阳组厚层砂砾岩储层,孔渗条件好,含油丰富,试油分别获 201.90m³ 和 301.80m³ 的高产工业油流。油源对比表明,原油均来自北部巴彦淖尔凹陷淖西洼槽南部固一段烃源岩,表明狼山分支断层不仅起到储层改造作用,其早期开启也向浅层输导油气。上述特征表明,未来临河凹陷油气勘探应在源—储关系及油气成藏模式或规律综合分析的基础上重视断裂构造的作用。

4 结论

(1)构造破碎的扇三角洲相棕红色巨厚层状砂砾岩是河套盆地临河凹陷最主要的储层类型,储集空间的形成为“断裂—地震—高压水射流”作用的结果。

(2)断裂构造是临河凹陷油藏能否高产稳产的主控因素。深大断裂不仅沟通油源,为油气长距离运移提供有利通道,同时通过机械破碎以及地震—高压水射流作用,使得致密储层产生大量储集空间。

(3)未来临河凹陷油气勘探应在圈—源关系及油气成藏模式综合分析的基础上重视断裂构造的作用。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 陈义贤. 1985. 辽河裂谷盆地断裂演化序次和油气藏形成模式. 石油学报, 6(2): 1~12.
- 程树范. 2019. 水环境中高压水射流成孔的数值模拟. 煤矿爆破, 37(a): 16~19.
- 董月霞, 汪泽成, 郑红菊, 徐安娜. 2008. 走滑断层作用对南堡凹陷油气成藏的控制. 石油勘探与开发, 35(4): 424~430.
- 杜晓宇, 丁文龙, 焦保程, 周志成, 薛明旺. 2019. 河套盆地临河凹陷流体势特征及油气运聚单元划分. 特种油气藏, 26(4): 9~14.
- 付锁堂, 付金华, 喻建, 姚泾利, 张才利, 马占荣, 杨亚娟, 张艳. 2018. 河套盆地临河凹陷石油地质特征及勘探前景. 石油勘探与开发, 45(5): 5~18.
- 郭占谦, 萧德铭, 唐金生. 1996. 深大断裂在油气藏形成中的作用. 石油学报, 17(3): 27~31.
- 郭忠铭, 于忠平. 1990. 石油勘探与开发—平河套弧形地堑系构造特征和演化机制及其油气勘探. 石油勘探与开发, 3: 11~19.
- 雷茂盛, 林铁锋. 1999. 松辽盆地断裂纵向导流性浅析. 石油勘探与开发, 11(1): 24~28.
- 廖华林, 李根生, 易灿. 2005. 水射流作用下岩石破碎理论研究进展. 金属矿山, 349: 1~6.
- 刘天顺, 张锐锋, 丁文龙, 焦保程, 王少春, 吴晨林, 杜晓宇, 周志成, 薛明旺. 2021. 河套盆地临河凹陷下白垩统内部不整合的发现及对构造演化的启示. 中国地质, 48(2): 593~604.
- 陆克政, 漆家福. 1997. 渤海湾盆地新生代含油气盆地构造模式. 北京: 地质出版社: 200~234.
- 吕文雅, 曾联波, 陈双全, 吕鹏, 董少群, 惠晨, 李睿琦, 王浩南. 2021. 致密低渗透砂岩储层多尺度天然裂缝表征方法. 地质论评, 67(1): 543~555.
- 罗群, 白新华. 1998. 断裂控烃理论与实践——断裂活动与油气聚集研. 武汉: 中国地质大学出版社: 6~34.
- 罗群, 姜振学, 庞雄奇. 2007. 断裂控藏机理与模式. 北京: 石油工业出版社: 8~45.
- 罗群. 2010. 断裂控烃理论的概念、原理、模式与意义. 石油勘探与开发, 37(3): 316~324.
- 罗群. 2011. 断裂带的输导与封闭性及其控藏特征. 石油实验地质, 33(5): 474~479.
- 门相勇, 赵文智, 张研, 李小地. 2006. 河套盆地临河凹陷油气地质特征. 天然气工业, 26(1): 20~24.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 譙汉生. 1999. 中国东部大陆裂谷与油气. 北京: 石油工业出版社: 96~109.
- 孙六一, 蒲仁海, 马占荣, 王飞. 2018. 河套盆地吉兰泰凹陷烃源岩展布与勘探潜力. 地球科学与环境学报, 40(5): 112~126.
- 孙向阳, 任建业. 2004. 东营凹陷北带转换带构造与储集体分布. 石油勘探与开发, 21(1): 73~77.
- 汪泽成, 张文智, 李宗银, 江兴福, 李军. 2008. 基底断裂在四川盆地须家河组天然气成藏中的作用. 石油勘探与开发, 35(5): 541~547.
- 王 伟, 张德全, 刘学宁, 张煜晖, 李桂峰, 寇子顺, 闻磊, 许凤廷. 2019. 碳硅泥岩型铀矿床钻孔水力开采相似律及相似材料研究. 铀矿冶, 38(1): 1~7.

- 王飞, 马占荣, 蒲仁海, 张才利. 2019. 河套盆地吉兰泰地区白垩系地层划分及地质特征. 西安科技大学学报, 39(4): 656~664.
- 王平. 1994. 为什么二、三级断层对油气聚集起控制作用——复杂断块油气田形成条件系列论文之四. 断块油气田, 1(5): 1~5.
- 王耀锋, 何学秋, 王恩元, 李艳增. 2014. 水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势. 煤炭学报, 39(10): 1945~1955.
- 王越, 于洪洲, 熊伟, 张奎华, 张关龙, 肖雄飞, 汪誉新, 薛雁. 2021. 博格达地区上二叠统梧桐沟组储层特征与主控因素. 地质论评, 67(Supp. 1): 1125~1126.
- 吴松涛, 朱如凯, 崔景伟, 毛治国, 刘可禹, 王晓琦. 2020. 非常规储层孔隙结构表征: 思路、思考与展望. 地质论评, 66(s1): 151~154.
- 张吴址. 2015. 河套盆地临河坳陷油气成藏. 导师: 杨友运. 西安: 石油大学硕士学位论文.
- 张君峰, 兰朝利. 2006. 鄂尔多斯盆地榆林—神木地区上古生界裂缝和断层分布及其对天然气富集区的影响. 石油勘探与开发, 33(2): 172~177.
- 张锐锋, 何海清, 陈树光, 李国欣, 刘喜恒, 郭绪杰, 王少春, 范土芝, 王会来, 刘静, 曹兰柱. 2020. 河套盆地临河坳陷石油地质新认识与重大发现. 中国石油勘探, 25(6): 1672~7703.
- 张善文, 王永诗, 石砥石, 徐怀民. 2003. 网毯式油气成藏体系——以济阳坳陷新近系为例. 石油勘探与开发, 30(1): 1~10.
- 张文佑. 1984. 断块构造导论. 北京: 石油工业出版社: 305~334.
- 张文昭. 1995. 中国陆相盆地油气勘探实践. 北京: 石油工业出版社: 165~170.
- 张以明, 张锐锋, 王少春, 刘喜恒, 李拥军, 刘静, 王会来, 汪剑, 吴晨林, 谈伟宁. 2020. 河套盆地临河坳陷油气勘探重要发现的实践与认识. 中国石油勘探, 23(5): 1~11.
- 张煜晖, 张德全, 寇子顺. 2018. 砂岩铀矿床钻孔水力冲采模拟试验研究. 铀矿冶, 37(4): 227~246.
- 赵衡, 张进, 李岩峰, 曲军峰, 张北航, 张义平, 云龙, 王艳楠. 2019. 内蒙古狼山地区新生代断层活动特征: 对正断层生长的限定. 中国地质, 46(6): 1433~1453.
- 赵孟为. 1988. 河套盆地断裂活动的特征及其与油气的关系. 西北大学学报, 18(2): 85~94.
- 赵勇龙. 2019. 高压水射流破煤机制和技术应用研究. 煤炭与化工, 42(10): 106~109, 113.
- 赵重远, 郭忠铭, 惠斌耀. 1984. 河套弧形构造体系及其形成和演化机制. 石油天然气地质, 5(4): 349~361.
- 朱夏. 1990. 中国中生代沉积盆地. 北京: 石油工业出版社: 23~34.
- 庄培仁, 常志忠. 1996. 断裂构造研究. 北京: 地质出版社: 11~28.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. 1991#. Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House.
- Chen Yixian. 1985#. The evolution of faults and formation of oil and gas reservoirs in the Liaohe rift valley. Acta Petrolei Sinica, 6(2): 1~12.
- Cheng Shufan. 2019#. Numerical simulation of pore formation of high pressure water jet in water environment. Coal Mine Blasting, 37(1): 16~19.
- Darby B J, Ritts B D. 2007. Mesozoic structural architecture of the Lang Shan, North—Central China: Intraplate contraction, extension, and synorogenic sedimentation. Journal of Structural Geology, 29: 2006~2016.
- Dong Yuexia, Wang Zecheng, Zheng Hongju, Xu Anna. 2008#. Control of strike-slip faulting on reservoir formation of oil and gas in Nanpu sag. Petroleum Exploration and Development, 35(4): 424~430.
- Du Xiaoyu, Ding Wenlong, Jiao Baocheng, Zhou Zhicheng, Xue Mingwang. 2019#. Fluid Potential and Hydrocarbon Migration—Accumulation Unit Classification in Linhe Depression of Hetao Basin. Special Oil and Gas Reservoirs, 26(4): 9~14.
- Fu Suotang, Fu Jinhua, Yu Jian, Yao Jingli, Zhang Caili, Ma Zhanrong, Yang Yajuan, Zhang Yan. 2018#. Petroleum geological features and exploration prospect of Linhe Depression in Hetao Basin, China. Petroleum Exploration and Development, 45(5): 5~18.
- Guo Zhongming, Yu Zhongping. 1990#. Structural characteristics, mechanism of evolution and petroleum prospecting of Hetao graben system. Petroleum Exploration and Development, 3: 11~19.
- Guo Zhanqian, Xiao Deming, Tang Jinsheng. 1996#. Function of discordogenic faults during forming of hydrocarbon pools. Acta Petrolei Sinica, 17(3): 27~31.
- Hu Xia. 1990#. Meso—cenozoic sedimentary basins in China. Beijing: Petroleum Industry Press: 23~34.
- Li Duohong, Yang Lifang, Wu Zhaohui, Zhou Zhibo, Tan Xizao, He Lixia. 2019#. Measurement of uranium enrichment by HpGe infinite thickness method. Uranium Mining and Metallurgy, 38(1): 1~7, 63.
- Lei Maosheng, Lin Tiefeng. 1999#. A preliminary analysis of the vertical flow conductivity of fault systems in Songliao basin. Petroleum Exploration and Development, 11(1): 24~28.
- Lu Kezheng, Qi Jiafu. 1997#. Tectonic model of Cenozoic petroliferousbasin, Bohai Bay province. Beijing: Geological Publishing House: 200~234.
- Luo Qun, Bai Xinhua. 1998#. Theory and practice of fault controlling on hydrocarbon——study on fault activity and hydrocarbon accumulation. Wuhan: China University of Geosciences Press: 6~34.
- Luo Qun, Jiang Zhenxue, Pand Xiongqi. 2007#. Mechanism and model of fault controlling petroleum accumulation. Petroleum Industry Press: 8~45.
- Luo Qun. 2010#. Concept, principle, model and significance of the fault controlling hydrocarbon theory. Petroleum Exploration and Development, 37(3): 316~324.
- Luo Qun. 2011#. Transporting and sealing capacity of fault belt and its controlling on reservoir. Petroleum Geology & Experiment, 33(5): 474~479.
- Liu Tianshun, Zhang Ruifeng, Ding Wenlong, Jiao Baocheng, Wang Shaochun, Wu Chenlin, Du Xiaoyu, Zhou Zhicheng, Xue Mingwang. 2020#. Discovery of Lower Cretaceous Unconformity in Linhe Depression of Hetao Basin, Inner Mongolia and its Impact on Hydrocarbon Accumulation. Geology in China. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200312.1036.002.html>
- Liao Hualin, Li Gengsheng, Yi Can. 2005#. Advance in study on theory of rock breaking under water jet impact. Metal Mine, 349(7): 1~5, 66.
- Lü Wenya, Zeng Lianbo, Chen Shuangquan, Lü Peng, Dong Shaoqun, Hui Chen, Li Ruiqi, Wang Haonan. 2021#. Characterization methods of multi-scale natural fractures in tight and low-permeability sandstone reservoirs. Geological Review, 67(1): 543~555.
- Qiao Hansheng. 1999#. Continental rift valley and oil—gas in eastern China. Beijing: Petroleum Industry Press: 96~109.
- Shi Wei, Dong Shuwen, Hu Jianmin. 2019. Neotectonics around the Ordos Block, North China: A review and new insights. Earth-

Science Reviews, 200; <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102969>

Sun Xiangyang, Ren Jianye. 2004&. Transfer zone and its relative reservoir distribution in northern zone of Dongying Sag. *Petroleum Exploration and Development*, 21(1): 73~77.

Sun Liuyi, Pu Renhai, Ma Zhanrong, Wang Fei. 2018&. Source rock distribution and exploration prospect of Jilantai Sag in Hetao Basin, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(5): 112~126.

Wang Ping. 1994&. The controlling mechanism of second or third-class faults on hydrocarbon migration and accumulation. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 1(5): 1~5.

Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Li Zongyin, Jiang Xingfu, Li Jun. 2008&. Role of basement faults in gas accumulation of Xujiahe Formation, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 35(5): 541~547.

Wang Yaofeng, He Xueqiu, Wang Enyuan, Li Yanzeng. 2014&. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams. *Journal of China Coal Society*, 39(10): 1945~1955.

Wang Fei, Ma Zhanrong, Pu Renhai, Zhang Caili. 2019&. Division of Cretaceous strata and analysis of geological characteristics in the Jilantai area of Hetao Basin. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 39(4): 656~664.

Wang Yue, Yu Hongzhou, Xiong Wei, Zhang Kuihua, Zhang Guanlong, Xiao Xiongfei, Wang Yuxin, Xue Yan. 2021&. Reservoir characteristics and main controlling factors of upper Permian Wutonggou Formation in Bogda area. *Geological Review*, 67(Suppl. 1): 67s1125~67s1126.

Wu Songtao, Zhu Rukai, Cui Jingwei, Mao Zhiguo, Liu Keyu, Wang Xiaoqi. 2020&. Ideas and prospect of porous structure characterization in unconventional reservoirs. *Geological Review*, 66(s1): 151~154.

Zhao Chongyuan, Guo Zhongming, Hui Binyao. 1984&. Hetao arcuate tectonic system and their mechanism of formation and evolution. *Oil and Gas Geology*, 5(4): 349~361.

Zhao Mengwei. 1988&. Characteristics of the fault activity in Hetao Basin and its relation with oil and gas. *Journal of Northwest University*, 18(2): 85~94.

Zhang Wenzhao. 1995&. *Petroleum exploration practice in continental basin of China*. Beijing: Petroleum Industry Press: 165~170.

Zhuang Peiren, Chang Zhizhong. 1996&. *Research on fault structures*. Beijing: Petroleum Industry Press: 11~28.

Zhang Shanwen, Wang Yongshi, Shi Dishu, Xu Huaimin. 2003&. Meshwork—carpet type oil and gas pool-forming system—Taking Neogene of Jiyang depression as an example. *Petroleum Exploration and Development*, 30(1): 1~10.

Zhang Junfeng, Lan Chaoli. 2006&. Fractures and faults distribution and its effect on gas enrichment areas in Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33(2): 172~177.

Zhang Haozhi. 2015&. *Research of Hydrocarbon Accumulation Conditions in Linhe depression of Hetao basin*. Xi'an: Master's degree thesis of petroleum university.

Zhao Heng, Zhang Jin, Li Yanfeng, Qu Junfeng, Zhang Beihang, Zhang Yiping, Yun Long, Wang Yannan. 2019&. Characteristics of Cenozoic faults in Langshan area, Inner Mongolia: Constraint on the development of normal faults. *Geology in China*, 46(6): 1433~1453.

Zhang Yiming, Zhang Ruifeng, Wang Shaochun, Liu Xiheng, Li Yongjun, Liu Jing, Wang Huilai, Wang Jian, Wu Chenlin, Dan Weining. 2020&. Practice and understanding of great discovery in oil and gas exploration in Linhe depression of Hetao Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 23(5): 1~11.

Zhang Ruifeng, He Haiqing, Chen Shuguang, Li Guoxin, Liu Xiheng, Guo Xujie, Wang Shaochun, Fan Tuzhi, Wang Huilai, Liu Jing, Cao Lanzhu. 2020&. New understandings of petroleum geology and great discovery in the Linhe depression, Hetao Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(6): 1~12.

Zhao Yonglong. 2019&. Study on the mechanism of coal and high pressure water jet technology. *Coal and Chemical Industry*, 42(10): 106~113.

Zhang Yuhui, Zhang Dequan, Kou Zishun. 2018&. Simulation experiment of borehole hydraulic mining in sandstone uranium deposit. *Uranium Mining and Metallurgy*, 37(4): 227~246.

A special reservoir space genesis mechanism: Fault—earthquake
—high pressure water jet process

SHEN Hua¹⁾, LU Lu²⁾, SHI Yuanpeng¹⁾, LI Zhuangfu²⁾, CHEN Shuguang¹⁾,
CAO Lanzhu¹⁾, HU Yanxu¹⁾, LI Minghua¹⁾

1) *Exploration and Development Research Institute of Huabei Oil Field Company, PetroChina, Renqiu, Hebei, 062550;*
2) *School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116*

Objectives: Reservoir research is an important part in the petroleum exploration and development, and unraveling the formation mechanism of the reservoir space as well as determining the dominant controlling factors (such as structure, deposition, diagenesis, etc.) is essential. For the formation of reservoir space, most of the previous studies have focused on the mechanisms in terms of deposition and diagenesis, while the understanding to the mechanisms in terms of faulting mainly stays at a simple level of "fracture", lacking a further discussion on the detailed processes. This paper focuses on the sandy conglomerates of fan-delta facies in the Linhe depression of Hetao Basin, west China, and aims at exploring a reservoir space formation mechanism related to fractures.

Methods: Based on the seismic profile analysis, through the drilling core and microscopic petrographic observation under polarizing microscope of the fan-delta facies sandy conglomerates.

Results: The results indicate that the fan-delta facies sandy conglomerates consist of broken and intact sections vertically alternative. The sandy conglomerates in the broken sections are broken severely with a small amount of loose and fragile rock fragments remained, among which the debris particles are mostly crazed, and the original argillaceous interstitial materials among the particles are mostly disappeared. The sandy conglomerates in the intact sections have no significant fracture, but the ones near the broken sections unevenly have intergranular pores and clastic fracture pores, which are present locally in rocks in various forms (e. g. , strips, irregular patches, subcircular or elliptic spots).

Conclusions: Based on the systematic study of macroscopic and microscopic petrology, this paper gives a genesis mechanism of " fault—earthquake—high-pressure water jet process " as follows. ① The extremely thick sandy conglomerates of fan-delta facies are originally cemented by argillaceous materials (or micrite calcalites) and are dense with no or rare pores. They are fractured due to the cutting of faults within the basin, forming the most important reservoir spaces, i. e. , fracture zones. ② With the occurrence of seismic activities, the faulting will cause rapid structural stress action, and result in brittle fractures within the debris particles of the rocks. At the same time, the earthquakes will cause agitation of groundwater in the fault zones, thus forming high-pressure fluid jet in and to both sides of the fault zones. The impingement of liquid columns can form pore areas in the intact sandy conglomerates near the broken sections, and, at the same time, cause the particles to break by the impact between them. ③ The brittle fractures of particles will be preserved by high pressure fluid injection.

Keywords: reservoir space; petroleum reservoir; fault structure; earthquake; high pressure water jet; Hetao Basin; Linhe depression

Acknowledgements: This article is preliminary research achievement of a scientific and technological research project of PetroChina "Exploration potentials in new areas and key technologies in efficient exploration in Hetao Basin" (2019D-0815)

First author: SHEN Hua, male, born in 1970, professorate senior engineer, mainly working on geological comprehensive research and management;Email: shenhua@petrochina. com. cn

Corresponding author: LU Lu, male, born in 1989, lecturer, mainly working on lithogeotectonics and evolution of energy basins; Email: geollulu@ cumt. edu. cn

Manuscript received on: 2020-12-18; Acceptedon: 2021-06-10; Network published on: 2021-06-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 06. 101

Edited by: LIU Zhiqiang