

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.023

准东阜东斜坡区齐古组隔夹层特征与成因分析

杨中山¹, 马涛², 张宗斌³, 刘宇⁴, 朱勉⁴, 荣欣乐⁴, 陈博⁴, 于景维⁴

(1. 北京大地高科地质勘查有限公司, 北京 100043;

2. 中晋环境科技有限公司, 山西 太原 030032;

3. 新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000;

4. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 准噶尔盆地东部阜东斜坡区上侏罗统齐古组为重要的勘探层段, 隔夹层增强了储层非均质性, 是影响剩余油有效开采的重要因素。以岩心分析为基础, 发现研究区齐古组发育泥质隔夹层、灰泥质隔夹层和灰质隔夹层, 以灰质及灰泥质隔夹层为主。利用岩石和铸体薄片、阴极发光和碳氧同位素等手段对隔夹层内灰质胶结物进行分析, 发现至少存在三期胶结物, 其形成与相对更深部含有机酸的孔隙流体侵入有关。泥质隔夹层的形成由水下分流河道之间的细粒沉积形成, 受控于气候、物源及水动力条件的综合作用。

关键词: 准噶尔盆地; 阜东斜坡区; 上侏罗统; 齐古组; 灰质隔夹层

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0192-08

Genesis and Features Analysis on Inter-layers of Qigu Formation in Fudong Slope Area in East of Junggar Basin

YANG Zhongshan¹, MA Tao², ZHANG Zongbin³, LIU Yu⁴, ZHU Mian⁴,
RONG Xinle⁴, CHEN Bo⁴, YU Jingwei⁴

(1. Beijing Dadi High Tech Geological Exploration Co., Ltd., Beijing 100043, China;

2. Zhongjin Environmental Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030032, China;

3. Energy Saving Monitoring Center of Experiment & Detection Institute, Xinjiang Petroleum Company, Karamay, Xinjiang 834000, China;

4. Karamay Campus of China University of Petroleum, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Qigu Formation of Upper Jurassic is an important exploration layer in Fudong slope area in east of Junggar Basin. Based on cores and experimental analysis, there are three types of inter-layers in Qigu Formation, calcareous inter-layers, muddy-calcareous inter-layers and muddy inter-layers, former two of which are widely developed. At least three period cements are found with microscopic method like rock and casting thin sections, cathodoluminescence and carbon and oxygen isotopes in calcareous inter-layers, muddy-calcareous inter-layers. With geochemistry characters, the result shows that formation of calcareous cement has a relationship to intrusion of pore fluid containing organic acid in deeper layer. The formation of argillaceous interlayers results from the deposition of fine-grained sediments between subaqueous distributary channels, controlled by the combined effects of paleoclimate, provenance, and hydrodynamic conditions.

Keywords: Junggar Basin; Fudong slope area; upper Jurassic; Qigu formation; calcareous inter-layers

收稿日期: 2025-07-20

修稿日期: 2025-08-20

基金项目: 自治区天山英才项目(2023TSYCJC0010); 克拉玛依市创新人才项目(2025DB0156)

作者简介: 杨中山(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事煤炭地质等方面工作。E-mail: 747969419@qq.com

通讯作者: 于景维(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事储层沉积学等方面研究工作。E-mail: yyjjww-1985@163.com

作为准噶尔盆地东部重要的勘探层系,准东阜东斜坡区侏罗纪地层长期以来受到广泛关注。下侏罗统三工河组和中侏罗统头屯河组已通过多年的勘探实践与系统研究,获得了重大油气发现,并形成了系统的沉积储层理论认识。前人研究表明,斜坡区内三工河组沉积时为深水还原环境^[1-2],主要发育三角洲前缘至半深湖亚相^[3-4]。研究证实,受多级坡折带控制,局部地区广泛发育砂质碎屑流沉积,形成了优质的储集体^[5]。其储层物性受有利沉积微相(如水下分流河道、砂质碎屑流)与成岩作用(孔隙保存与溶蚀)共同控制,储层评价体系完善。在成藏方面,已明确二叠系下乌尔禾组烃源岩为三工河组油气藏提供油源,而深湖-半深湖相沉积的大套泥岩则构成了区域性的重要盖层,形成了良好的生储盖组合^[6]。对于头屯河组,前人认识到其沉积古气候向干旱化转变,沉积环境更为多样,包括辫状河三角洲、曲流河以及湖泊相等^[7-8]。储层物性主要受沉积相带和后期构造作用的联合控制^[9-10],其储层非均质性强,并普遍表现出较强的水敏和速敏特征,这一认识对开发方案设计具有重要指导意义^[11-12]。勘探证实,辫状河三角洲内的河道砂体是主要的储集砂体,而下伏大面积分布的石炭系烃源岩及通源断裂系统共同构成了该组油气成藏的关键要素^[13-15]。在侏罗系下、中统勘探取得丰硕成果的基础上,上侏罗统齐古组正成为新的重点勘探目标。研究认为,阜东斜坡区齐古组沉积时期延续了干旱气候背景,主要发育辫状河三角洲沉积体系,辫状河三角洲前缘和平原砂体大面积分布,为油气成藏提供了良好的储集基础。2012年,阜东16井在齐古组试获高产油流,实现了该区齐古组岩性油气勘探的重要突破。随后的老井复查中,阜东022井于齐古组再获工业油流。连续的勘探突破标志着齐古组已从潜力层系转变为现实的勘探对象,成为阜康东环带岩性地层油气藏最有利的接替领域,受到重点关注。

随着油藏的深入开发,油井产量不高、注水效果不好等一系列开发问题逐步显现,由于裂缝在研究区发育程度较低,排除裂缝的因素,认为是储层隔夹层对于开发效果影响较大。通过岩心观察,发现隔夹层将连续的(水下)分流河道砂体分割成较多连通性较差的流动单元,造成流体纵向难以沟通。同一套砂体在纵向上渗透率差异较大,驱油流体容易沿着高渗透层突进流动,造成流体波及效率较低,单井过早见水,产量下降较快。整体来看,隔夹层的发

育使得齐古组油层层间以及层内非均质性增强,增加开发技术难度和成本,导致储量动用不充分和采收率降低。因此加强对研究区齐古组砂岩储层段隔夹层特征及形成机理的分析,有助于目的层油藏开发方案设计的制定,同时为齐古组油藏开发的突破提供理论指导。

1 区域地质背景

研究区位于准噶尔盆地中央拗陷内阜康凹陷东部(图1),整体为一东北-西南向单斜构造,总面积大约600 km²。侏罗纪的准噶尔盆地处于振荡型陆内拗陷盆地演化阶段^[16-18],盆地经历印支运动和燕山运动,由于受到不均匀的挤压作用,研究区周围火山活动频繁^[19]。正是由于这些火山运动的发生,为研究区提供大量可溶火山物质,大量证据表明凝灰质成分在受溶液溶解后会形成大量K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺等离子,形成碱性溶液^[20-22]。富Ca²⁺的碱性溶液对于方解石的形成是十分有利的,因此凝灰质岩屑的溶蚀为灰质及灰泥质隔夹层的形成提供重要的物质基础。

研究目标层为上侏罗统齐古组,埋深较浅,一般分布在1 800~2 500 m(图1)。齐古组自下而上分为齐古组一段(J₃q₁)、齐古组二段(J₃q₂)和齐古组三段(J₃q₃),齐古组一段保存最为完整,其厚度范围在28~184 m,平均值为109 m。齐古组主要发育辫状河三角洲沉积,储集层主要为三角洲平原和前缘的(水下)分流河道砂体,岩性以细-中粒长石岩屑砂岩为主,石英含量为10.2%~62.5%,平均为23.4%;长石含量为0~25%,平均为14.3%;岩屑含量为36.2%~62.3%,平均为58.5%。岩屑成分为岩浆岩岩屑,主要为凝灰岩岩屑,少量为安山岩岩屑。齐古组一段孔隙度平均为18.7%,平均渗透率为369.4 mD,但渗透率范围为0.02~5000 mD,属于中、低孔型储层。

2 隔夹层类型及特征

针对隔夹层类型及特征的研究是分析隔夹层成因的基础,前人针对隔夹层分类主要采用三种划分方案,一是根据隔夹层的岩性、成分和物性等岩石物理特征进行划分^[23];二是基于隔夹层成因进行划分^[24];三是根据垂向和平面分布的连续性进行划分^[25]。第一种分类方案应用较为广泛。隔夹层的刻画方法往往基于现代沉积、古代露头、岩心资料、密井网、生产动态、地震和其它资料,岩心资料的刻

25.16%。在岩心中以斑块状、结核状或条带状出现,纵向上厚度最大能达到 15 cm,最小厚度近似 1 cm,滴盐酸剧烈起泡(图 2(a)、图 2(b)和图 2(c))。石英含量较高,集中于 41%~58%;长石含量在 10% 以上;岩屑含量集中于 37%~47%。颗粒粒径集中于 0.2~0.5 mm,最大粒径可达 0.85 mm;分选性中等,磨圆度主要为次棱角,成分成熟度和结构成熟度一般。填隙物主要为碳酸盐胶结物,含量都在 15% 以上,最高达到 37%(图 3(a));胶结类型主要为压嵌式,少量为孔隙型和基底型;可见少量黄铁矿、绿泥石以及钛铁质(图 3(b)、图 3(c));杂基含量较低,不到 3%。在常规测井曲线上,灰质隔夹层在声波时差(AC)曲线上表现比较敏感,因此常用 AC 和分辨薄层较好的冲洗带电阻率(R_{xo})进行综合识

别^[30]。通过对薄片和阴极发光分析,发现本区至少存在三期碳酸盐胶结物。第一期主要存在于早成岩 A 期阶段,由于压实作用很弱,颗粒悬浮于大片连晶碳酸盐胶结物(主要是无铁方解石)中(图 3(a)),方解石胶结物含量(负胶结物孔隙度)可高达 30%;第二期存在于早成岩 B 期阶段,压实作用加强,颗粒之间以点-线接触为主。铁方解石的存在使得方解石在阴极发光下发亮黄色光(图 3(d))。这期方解石胶结物存在比较普遍,反映出致密隔夹层形成受早成岩期碳酸盐的胶结作用所决定;第三期主要存在于中成岩 A 期阶段,成分主要是铁方解石,以充填自生粘土矿物包膜保存的原生粒间孔隙中(图 3(e)),或交代碎屑颗粒两种形式存在(图 3(f))。在阴极发光下,方解石发暗橙红色光。

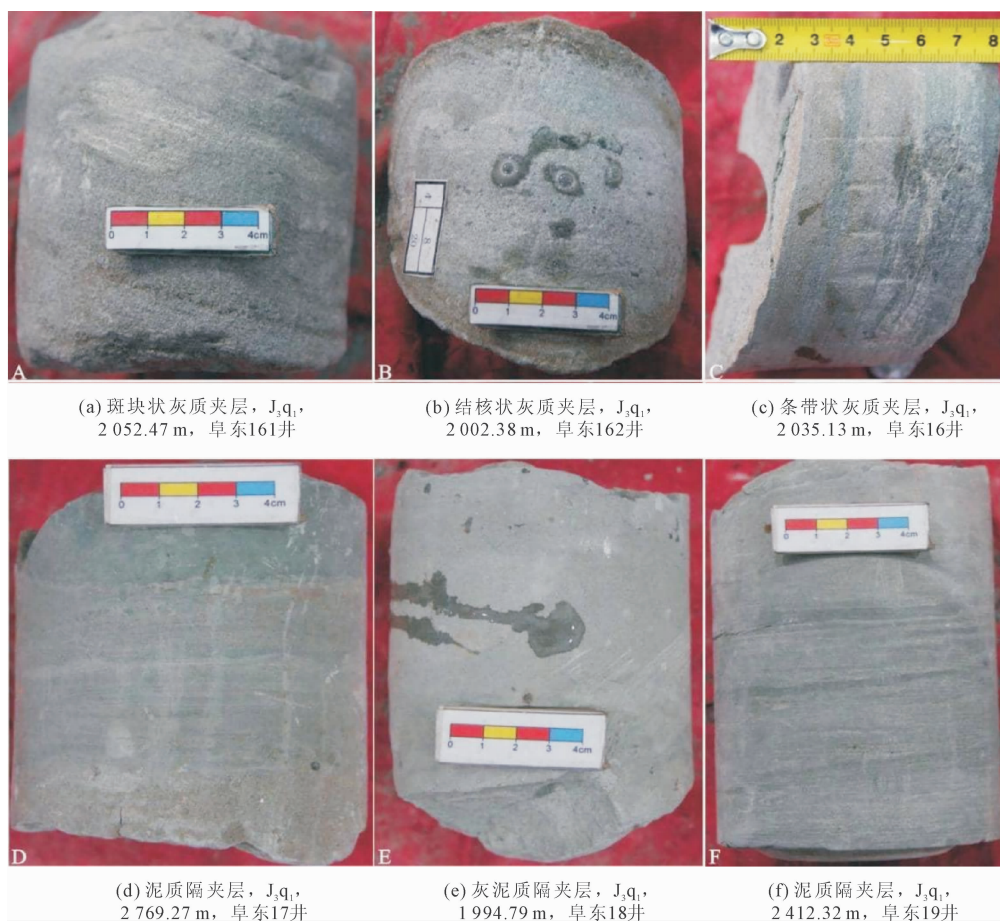


图 2 隔夹层的岩心特征

2.2 灰泥质隔夹层

该类型隔夹层在研究区较常见,各井油层内灰泥质夹层分布密度平均为 0.17 个/m,分布频率为 17.38%。在岩心中以块状或条带状出现,滴盐酸起泡,但由于灰质含量较低,明显不如灰质隔夹层反应

剧烈(图 2(e))。石英含量较低,平均不到 40%;长石含量在 10% 以下;岩屑含量较高,可达 61%。颗粒粒径集中于 0.05~0.125 mm,最大粒径可达 0.2 mm;分选相对较差,磨圆度和灰质隔夹层没太大差别。胶结物中的碳酸盐胶结物含量基本都小于

15%,且分布不均匀(图4(a)—图4(c));黏土矿物作为次生矿物,含量往往小于10%,存在于岩屑及长石颗粒周缘(图4(b))。胶结类型以压嵌式为主;杂基含量较低,不到7%。通过对薄片和阴极发光分析,该类隔夹层内灰质胶结物主要为第二期碳

酸盐胶结物。在常规测井曲线上,属于灰质和泥质隔夹层过渡,灰泥质隔夹层 AC 值没有灰质隔夹层低,在自然伽马测井(GR)曲线上的数值要小于泥质隔夹层,结合 R_{xo} 进行综合识别^[30]。

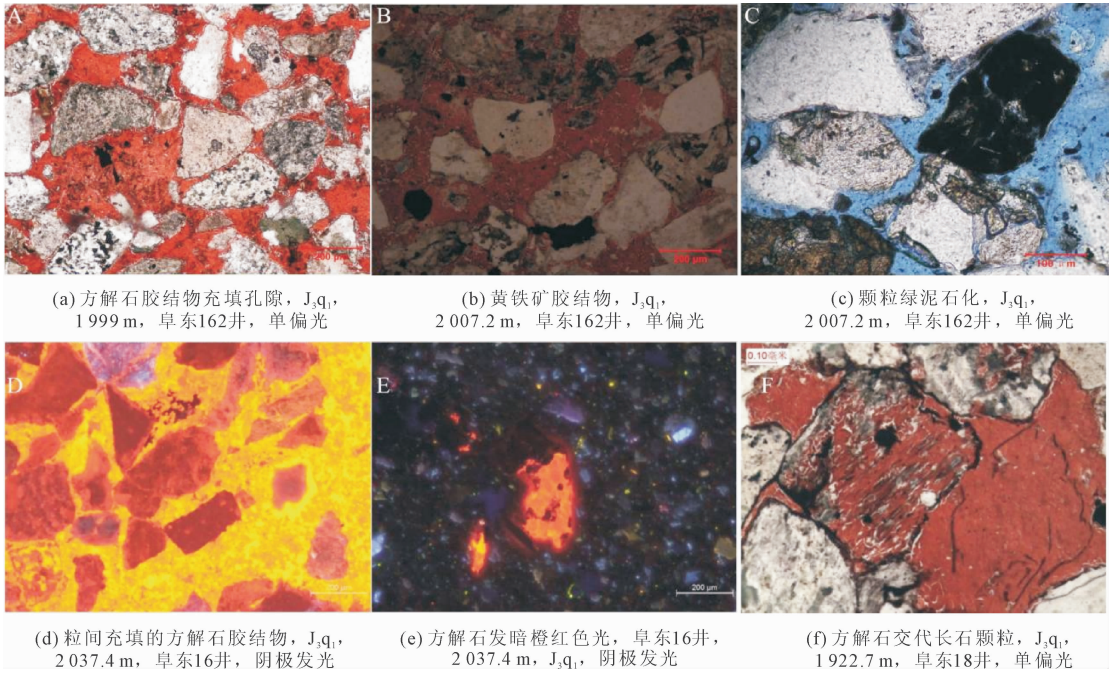


图 3 灰质隔夹层主要胶结类型

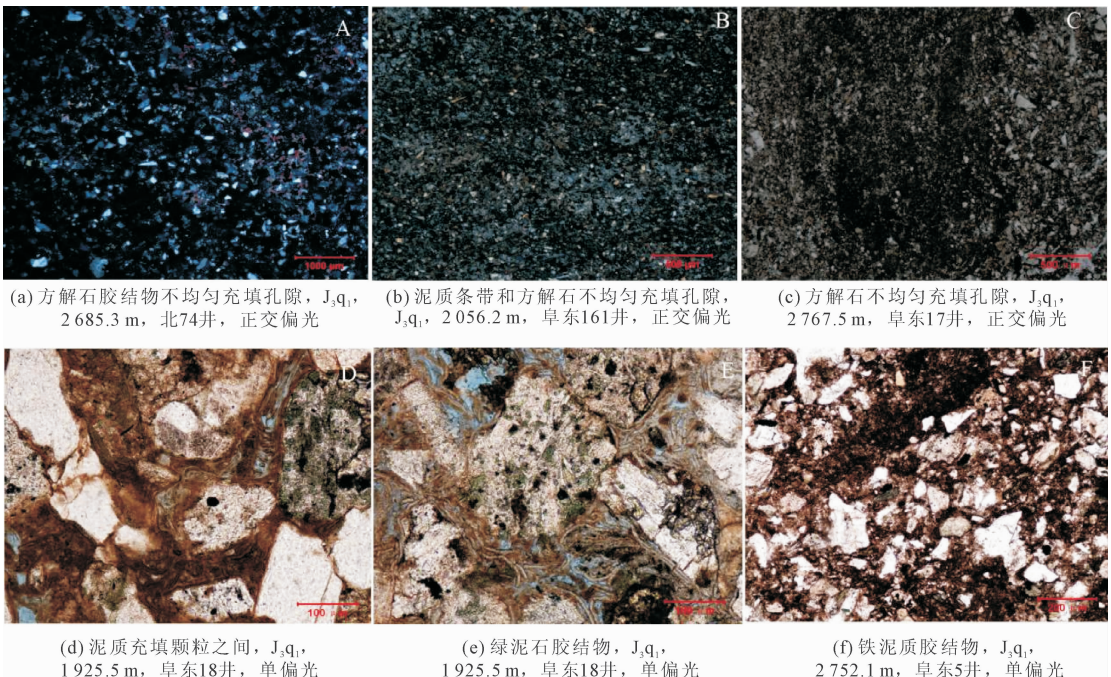


图 4 灰泥质和泥质隔夹层主要胶结类型

2.3 泥质隔夹层

此类隔夹层在研究区不如以上两种常见,各井

油层内泥质夹层分布密度平均为 0.06 个/m,分布频率为 6.29%。在岩心中常以条带状出现(图 2

(d)、图 2(f)),部分为砂层之间的泥岩,最厚达到 40 cm。石英含量较低,平均不到 35%;长石含量在 10% 以上;岩屑平均含量大于 40%。颗粒粒径集中于 0.0625 以下,最大粒径可达 0.1 mm;分选及磨圆度和灰质隔夹层无太大差别。胶结物基本以绿泥石为主,含量可达 10% 以上(图 4(d)—图 4(f)),胶结类型以薄膜型为主;杂基含量要比上两类要大,但不超过 10%(图 4(f))。在常规测井曲线上,泥质隔夹层在 GR 曲线上表现比较敏感,因此常用 GR 和分辨薄层较好的 Rxo 进行综合识别^[30]。

3 隔夹层形成机理

3.1 灰质及灰泥质隔夹层成因分析

灰质隔夹层分布最为广泛,前人对于砂岩储层中钙的来源进行深入探讨,认为钙质主要通过长石中钙长石的溶蚀、生物碎屑或碳酸盐岩屑的溶蚀、原始沉积水体沉淀、早期碳酸盐胶结物的溶解、黏土矿物的转化以及凝灰质的水解。基于岩心和薄片观察,主要分布于细中粒砂岩,石英含量相较于其它两种隔夹层较高,表明其成岩早期抗压实能力较强,原生孔隙相对保存较好,也反映出流体在岩石中流动性较强。由于钙长石、碳酸盐岩屑以及黏土矿物含量较低,基本上小于 5%,提供钙源条件不充足。结合碳酸盐胶结物常与凝灰质岩屑伴生,认为灰质隔夹层中的钙源来源于成岩早期凝灰质岩屑溶蚀,大量的 Ca^{2+} 在氧化环境中富集,为方解石大面积胶结提供充足的组织成分。灰质隔夹层中不仅有成岩早期方解石胶结物,还有早中期的铁方解石。前人对于砂岩储层中铁质来源进行分析,认为黏土矿物的转化、泥岩中铁还原、铁氧化物和硅酸盐矿物的溶蚀

或交代、沉积原始水体以及生物碎屑的溶解^[31-32]。结合上述成岩早期凝灰质的溶解也会释放出大量的铁和锰元素,铁、锰等元素在氧化环境中可形成稳定的氧化物,富集在矿物表面。随着埋深加大,颗粒之间的孔隙被进一步压缩,砂体内部流动环境逐渐为半封闭状态,此时有流体存在继续对凝灰质岩屑进行溶蚀,铁、锰等元素逐渐在这种环境中被保存下来,使方解石含铁量增加。

为了弄清灰质胶结过程中流体的演化,本次研究选取研究区齐古组 14 件代表早期灰质胶结作用的灰质砂岩样品进行碳氧同位素分析,结果显示大多具有明显偏负的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值,主要位于 -7.5‰ ~ -40.4‰ 之间,并伴有较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (-6.6‰ ~ -12.2‰) (图 5)。前人研究表明,海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值常在 0‰ (PDB) 附近变化,与淡水有关的碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 3‰ ~ -17‰ (PDB),而有机来源的 CO_2 具有最轻的碳同位素,可轻至 -18‰ ~ -33‰ (PDB)^[33]。在陆相碎屑岩中,由于缺少碳源,一般认为钙质胶结物明显受体系外二氧化碳来源的影响。大气水一般具有较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($+10\text{‰}$ ~ -45‰),而大洋海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般在 0 附近^[33]。总体指示这些砂岩中灰质胶结物形成过程中受到了较为强烈的有机影响,灰质胶结物的沉淀多与相对更深部含有机酸的孔隙流体侵入有关,推测孔隙酸来源于附近泥岩有机质的热演化;较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值指示样品可能经历了强烈的水岩相互作用。试验结果反映出由于深部含有机酸的孔隙流体侵入,同长石以及凝灰质岩屑继续发生反应,为铁方解石的形成提供物质条件。

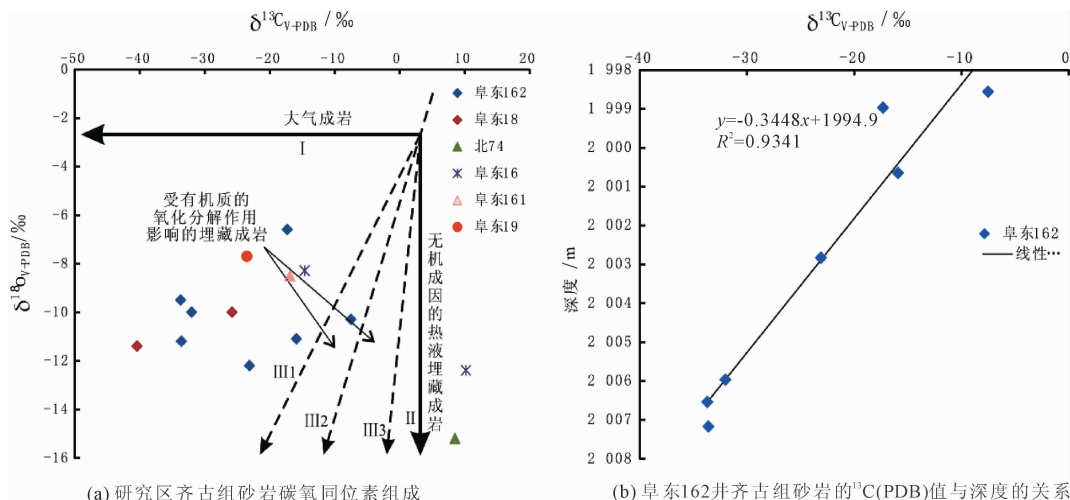


图 5 研究区齐古组砂岩碳氧同位素组成^[15]和阜东 162 井齐古组砂岩的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值与深度的关系

灰泥质隔夹层分布较为广泛,基于岩心和薄片观察,主要分布于粉细粒砂岩之中,石英含量较低,加之杂基含量较高,导致其抗压能力较弱,原始粒间孔隙保存较少,流体在孔隙间的流动较弱。钙质的来源主要为凝灰质岩屑的溶蚀,由于灰泥质隔夹层往往接近泥岩,因此铁元素的来源主要为泥岩中铁元素还原,在封闭状态下为铁方解石的形成奠定关键物质基础,部分为凝灰质岩屑同有机酸发生反应,形成铁方解石。

3.2 泥质隔夹层成因分析

泥质隔夹层主要形成于水下分流河道和分流间湾微相内部。受气候、物源等多方面的影响,齐古组发育的辫状河三角洲(水下)分流河道易变道,侧向间水动力较弱形成的细粒沉积,是单砂体侧向间最重要的泥质夹层成因。这类隔夹层在河道砂体中较为常见,但受潮水变化影响,厚度不均一,横向上对比较差。受水动力的影响,河道间的泥质沉积往往可以形成稍厚的隔挡层,发育率低,平面分布规模有限,但横向上只能进行局部对比,不能进行大范围追踪。阜东 19 井齐古组取心段中部显示为灰色粉砂质泥岩沉积,透镜状层理发育,分析为水下分流间湾沉积形成。

4 结 论

(1) 阜东斜坡区齐古组隔夹层类型可分为灰质隔夹层、灰泥质隔夹层以及泥质隔夹层,前两种类型发育比较普遍,泥质隔夹层多发育于水下分流河道和分流间湾微相。

(2) 在灰质及灰泥质隔夹层中发现三期灰质胶结物,灰质胶结物主要受早成岩期碳酸盐的胶结作用所决定。二者区别在于岩心上滴盐酸起泡的强烈程度,以及砂岩颗粒粒度。三类隔夹层在岩石组分以及沉积结构方面差异不大,可根据常规测井曲线进行识别。

(3) 灰质及灰泥质隔夹层中的灰质胶结物不仅与大气成岩作用有关,还和相对更深部含有机酸的孔隙流体侵入有关。泥质隔夹层的形成由水下分流河道之间的细粒沉积形成,受控于气候、物源及水动力条件的综合作用。

参考文献:

[1] 李国璞,宋 璠,焦国华,等. 准噶尔盆地腹部中 1 区侏罗系齐古组-三工河组地层界线探讨[J]. 测井技术,2025,49(5):721-733,772.
[2] 卢红刚,刁志龙,王志维,等. 玛南斜坡侏罗系三工河

组二段砂质碎屑流沉积特征及成藏条件[J]. 东北石油大学学报,2025,49(5):24-33.

- [3] 周栋华,麦地娜·努尔太,华晓琴,等. 准噶尔盆地西北缘三工河组坡折带形成机理及相关区域油气勘探方向[J]. 新疆地质,2025,43(2):279-286.
[4] 于文秀. 准噶尔盆地 1 井西凹陷三工河组二段深层储层成因研究[D]. 大庆:东北石油大学,2025.
[5] 曲彦胜,潘志强,何大祥,等. 准噶尔盆地莫西庄地区侏罗系三工河组原油芳烃地球化学特征及油源对比[J]. 现代地质,2025,39(3):814-824.
[6] 李 想,丁雅洁,李俊飞,等. 前陆盆地系统中隆后盆地沉积特征——以准噶尔盆地腹部侏罗系三工河组为例[J]. 石油实验地质,2024,46(6):1253-1264.
[7] 石新朴,刘泽民,张长瑞,等. 准噶尔盆地滴南凸起中段侏罗系头屯河组天然气成藏条件与勘探方向[J]. 大庆石油地质与开发,2025,44(4):31-41.
[8] 王 凯. 阜东斜坡区头屯河组油藏储层微观特征研究[D]. 西安:西安石油大学,2024.
[9] 刘 英. 头屯河组油藏水驱动用规律及产能主控因素分析[D]. 西安:西安石油大学,2024.
[10] 高志勇,崔京钢,樊小容,等. 流体异常高压对深层储集层物理性质的作用机理——以准噶尔盆地南缘侏罗系头屯河组为例[J]. 石油勘探与开发,2023,50(6):1221-1232.
[11] 李 琪,吴柏林,周 玉,等. 准噶尔盆地南缘硫磺沟地区头屯河组沉积特征及其铀成矿远景分析[J]. 西北大学学报(自然科学版),2023,53(4):635-654.
[12] 周 玉,刘 珉,朱永胜,等. 准噶尔盆地南缘硫磺沟地区侏罗系头屯河组物源分析[J]. 新疆地质,2023,41(S1):9.
[13] 职文栋,姚宗全,张博轩,等. 准噶尔盆地三台油田-阜东斜坡区侏罗系头屯河组沉积相特征[J]. 新疆地质,2023,41(2):218-225.
[14] 韩宗来,德勒恰提·加娜塔依,姚宗全,等. 辫状河转曲流河沉积特征分析——以阜康凹陷东缘头屯河组为例[J]. 断块油气田,2023,30(3):434-440.
[15] 靳 军,唐洪明,周基贤,等. 阜康凹陷头屯河组敏感性评价及主控因素[J]. 油气藏评价与开发,2022,12(6):935-944.
[16] 殷树铮,何登发,郭文建. 准噶尔盆地阜康凹陷二叠纪盆地属性与构造-沉积演化[J]. 地质学报,2024,98(12):3647-3661.
[17] 殷树铮,郭文建,李新宁,等. 准噶尔盆地西部坳陷带二叠系构造-地层层序与盆地演化[J]. 古地理学报,2024,26(1):132-149.
[18] 夏世威,马 强,黄传炎,等. 准噶尔盆地东部吉木萨尔-吉南凹陷构造演化及原型盆地恢复[J]. 地质科技通报,2024,43(3):170-179.

- [19] 罗官幸,潘虹,李世宏,等. 准噶尔盆地北三台凸起南斜坡石炭系火山岩储层特征及成藏模式[J]. 东北石油大学学报,2024,48(5):27-47,133.
- [20] 林斯雅. 德惠断陷白垩系火石岭组凝灰岩致密储层成因与成藏特征[D]. 西安:西安石油大学,2025.
- [21] 于景维,李璐璐,祁利祺,等. 阜东斜坡带头屯河组二段储集层控制因素[J]. 新疆石油地质,2014,35(1):34-38.
- [22] 陈思芮. 深层凝灰质碎屑岩储层成岩模拟研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2024.
- [23] 吴迪,李宁,李震,等. 辫状河三角洲储层隔夹层展布规律及剩余油分布研究[J]. 测井技术,2025,49(6):952-961.
- [24] 魏启任,谢明英,刘伟新,等. 番禺油田钙质夹层分布特征及剩余油挖潜[J]. 科学技术与工程,2025,25(29):12421-12429.
- [25] 赵瑞祥,安玉华,刘豪. BZ 油田隔夹层地震反射特征研究与应用[J]. 石油地质与工程,2025,39(6):38-43.
- [26] 陈雷,余涛,王冲,等. 砂岩油藏隔夹层识别及定量表征方法研究——以塔中 16 井区为例[J]. 地质论评,2025,71(S1):333-336.
- [27] 于景维,郑荣才,殷新花,等. 准东阜东斜坡区头屯河组储集层非均质性综合研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(5):567-576.
- [28] 柳妮,文华国,于景维,等. 准噶尔阜康东部斜坡区中侏罗统头屯河组高分辨层序地层格架内储集层宏观非均质性研究[J]. 地质论评,2014,60(5):1158-1166.
- [29] 林少玲. 陆梁油田陆 9 井区西山窑组四段钙质夹层表征与建模[D]. 荆州:长江大学,2025.
- [30] 王伟,代梦莹,陈俊凯,等. 塔里木盆地英买 35 井区志留系隔夹层识别及分布[J]. 新疆石油地质,2025,46(2):154-162.
- [31] 刘书燕,孙浩元,胡烁,等. 柳江盆地本溪组铁质鲕粒粉砂岩特征及成因[J]. 科学技术与工程,2024,24(27):11547-11557.
- [32] 朱世发,朱筱敏,刘学超,等. 油气储层火山物质蚀变产物及其对储集空间的影响——以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统为例[J]. 石油学报,2014,35(2):276-285.
- [33] 陈俊林,黄亚浩,郭小文,等. 方解石脉体形成时间与流体来源及其地质意义:以苏北盆地黄桥地区三叠系青龙组碳酸盐岩储层为例[J]. 地质科技通报,2024,43(3):157-169.

(上接第 149 页)

- [11] 卢建南. 大粒径水工沥青混凝土弯曲性能与断裂扩展轨迹研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2023:45-65.
- [12] 杨志豪. 大粒径水工沥青混凝土离析特性与静力本构关系研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2022:61-77.
- [13] SL-501—2010 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2010:5-6.
- [14] 李琦琦,何建新,张正宇,等. 大孔隙率下水泥作填料的沥青混凝土水稳定性分析[J]. 新疆农业大学学报,2017,40(4):308-312.
- [15] Du Shaowen. Interaction mechanism of cement and asphalt emulsion in asphalt emulsion mixtures[J]. Materials & Structures, 2014,47(7):1149-1159.
- [16] Qian Xiaou. The test analysis on cement to improve the adhesive of asphalt and acidic aggregate[J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Sciences), 2013,29(2):66-73.
- [17] 丁朴荣. 水工沥青混凝土材料选择与配合比设计[M]. 北京:水利电力出版社,1990:10-25.
- [18] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2011:224-229.
- [19] DL/T 5362—2018 水工沥青混凝土试验规程[S]. 北京:中国电力出版社,2018:124-143.
- [20] Al-Khateeb G G. Conceptualizing the asphalt film thickness to investigate the Superpave VMA criteria[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018,19(11):957-965.
- [21] Dong Mansheng, Sun Wei, Li Linglin, et al. Effect of asphalt film thickness on shear mechanical properties of asphalt-aggregate interface[J]. Construction and Building Materials, 2020,263:120208.
- [22] Oshone M, Ghosh D, Dave E V, et al. Effect of mix design variables on thermal cracking performance parameters of asphalt mixtures[J]. Transportation Research Record, 2018(28):471-480.
- [23] 郭乃胜,于安康,王志臣,等. 基于吸附沥青膜厚度的沥青与矿粉交互作用能力评价研究[J]. 材料导报,2023,37(17):137-144.