

引用格式:陆加敏,林铁锋,李军辉,等. 2026. 古龙凹陷青山口组页岩中黄铁矿脉与凝灰岩脉特征及成因机制[J]. 沉积学报, 44(2): 481-495.

LU JiaMin, LIN TieFeng, LI JunHui, et al. 2026. Characteristics and Genetic Mechanism of Pyrite Dikes and Tuff Dikes in Shale Oil Reservoir of Qingshankou Formation, Gulong Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(2): 481-495.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.018

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.018

古龙凹陷青山口组页岩中黄铁矿脉与凝灰岩脉特征及成因机制

陆加敏¹, 林铁锋¹, 李军辉¹, 付秀丽¹, 苏杨鑫¹, 白月¹, 钟建华^{2,3,4}, 孙宁亮^{2,3,5}

1. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江大庆 163712

2. 东北大学秦皇岛分校资源与材料学院, 河北秦皇岛 066004

3. 海洋油气勘探国家工程研究中心, 北京 100028

4. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

5. 东北大学海洋工程研究院, 河北秦皇岛 066004

摘要 【目的】通过研究古龙青山口组页岩中黄铁矿脉和凝灰岩脉的几何学特征及形成机制, 探讨它们的形成时间、沉积环境、沉积过程、沉积物状态及成岩环境, 估算泥页岩的成岩压实率, 为同类型岩脉的形成机制及意义提供参考。【方法】基于精细的岩心观察、薄片分析及脉体形成的动力学计算, 发现了古龙页岩中发育黄铁矿脉和凝灰岩脉, 并探究了其成因机制及地质意义。【结果】古龙青山口组页岩中的黄铁矿脉和凝灰岩脉总体规模较小, 黄铁矿脉按规模可分为两种: 一种是较粗大的黄铁矿脉, 宽1~4 mm, 长数厘米; 另一种是较细的黄铁矿脉, 宽多在1 mm以下, 长数毫米到数厘米。凝灰岩脉的宽度多在1 mm以下, 长数毫米到数厘米, 大部分强烈弯曲成肠状、直立、倾斜或水平产出。推测可能是由于密度倒置引起的重力沉降形成, 并计算建立了黄铁矿脉和凝灰岩脉形成的动力学模型。【结论】古龙青山口组页岩油储层中的黄铁矿脉形态非常复杂, 是由重力沉降的砂脉经后期黄铁矿化形成的, 即先有粉砂岩脉而后有黄铁矿脉; 而凝灰岩脉则是由火山喷发形成的凝灰沉降于湖泊的未固结泥上, 由于密度倒置引起重力沉降的结果(下沉式), 而非地震液化形成高压由下向上充注。倾斜产出的黄铁矿脉和凝灰岩脉隔180°对称, 系顺层剪切作用, 内部多含围岩的粉砂级泥屑和较大的火焰状泥屑, 是砂脉和凝灰岩脉沉入到下部未固结, 甚至呈泥浆状的泥中被捕获而形成。

关键词 黄铁矿脉; 凝灰岩脉; 液化; 重力坠落; 页岩油; 古龙凹陷

第一作者 陆加敏, 男, 1979年出生, 博士, 教授级高级工程师, 油气勘探, E-mail: lujiamin@petrochina.com.cn

通信作者 钟建华, 男, 教授, 沉积学和构造地质学, E-mail: 957576033@qq.com

中图分类号: P612 P588.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550(2026)02-0481-15

0 引言

砂脉是一种常见而又特殊的沉积构造(钟建华等, 2018)。众所周知, 砂脉常用来识别地震成因的软沉积物变形构造(Sims, 1973; Obermeier *et al.*, 1989; Montenat *et al.*, 1991; Obermeier, 1996)。迄今为止, 关于砂脉能否作为地震识别的依据还存在争论。目前普遍认为砂脉的成因多与地震诱发的液化

和流化作用有关, 因此, 很多学者通过对砂脉的甄别并结合变形岩层的其他几何学及岩相学特征来识别古地震(Sims, 1973; Obermeier *et al.*, 1989), 但也有一些学者认为砂脉的成因很复杂(钟建华等, 2018)。此外, 目前国际上对砂脉的定义和理解也没有统一, 这也是影响砂脉成因研究及应用的主要障碍。

按照成因砂脉可以分为两大类: 一种是由超压形成的注入砂脉(injection dikes), 由液化砂在高压的

收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2024-01-23; 录用日期: 2024-05-08; 网络出版日期: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072138, 41572088); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2021ZZ10); 黑龙江省“百千万工程”科技重大专项(2020ZX05A01)

驱动下从下向上进入寄主层(围岩)。超高压的成因有四种:(1)上覆岩层或沉积物形成的超压。松散的沉积物在上覆压力突然增大的情况下会形成砂脉,如 De Machuca and Perucca (2015) 发现阿根廷 Precordillera 东部 La Chilca 地区的砂脉成因与上覆的巨厚岩层和火山岩形成的超高压有关。(2)构造应力形成的超压。如 Monnier *et al.* (2015) 详细研究了法国东南 Bevens 地区 Vocontian 盆地阿尔必期由异常的古应力场造成的超压形成的大型砂脉,明确指出其非地震成因,并认为这种砂脉的最大特点是延伸方向与最小主应力垂直,揭示了砂脉的形成受区域应力场控制。(3)超高压流体作用。Greb and Archer (2007) 研究认为,阿拉斯加 Turnagain Arm 地区河口潮汐起落幅度可达 9 m,在这种强大的潮汐作用(高压流体)下形成了一些包括砂脉在内的软沉积物变形构造。(4)水体剧烈动荡使刚沉积下来的松软沉积物发生超压,形成小型砂脉。如 Meshram *et al.* (2011) 发现印度西海岸 Dive Agar 海滩在 2004 年的海啸使软沉积物发生变形形成了砂脉。另一种是负压或超低压,即裂缝突然打开形成的小于周围环境或围岩的欠压。同生的超压孔隙流体促使断层活动形成裂缝,为负压砂脉的形成提供了孔隙空间(Scholz, 2010),此外充填和封闭的裂缝可以被重新打开和再次充填,因此通过砂脉的充注特征可以记录注入时间幕。此类成因的砂脉常形成于硬岩中,表现为碟状、柱状形态,一般成组成群出现,向各个方向充注。通过砂脉的成因及微结构研究可以反演砂脉的形成过程及形成动力,对古地理环境研究具有重要意义。

近几年,我国在页岩油勘探开发和理论研究上取得了重要进展(邱振和邹才能, 2020; 印森林等, 2022; 刘翰林等, 2023; 王小军等, 2023)。松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩油勘探取得了重要突破,预测资源量达 151 亿吨,是大庆油田重要的接替资源(孙龙德, 2020; 王广昫等, 2020; 庞彦明等, 2021; 何文渊等, 2022, 2023)。青山口组的页岩油源储比大于 95%(王广昫等, 2020),单砂体厚度一般小于 0.20 m, 偶见 1 m 厚的粉砂岩,属于典型的纯页岩型(III型)页岩油(何文渊等, 2023)。前人对古龙凹陷青山口组沉积环境、页岩储层孔缝、有机地球化学及有机质富集机理等开展了详细研究并取得了较多成果(邵红梅等, 2021; 王凤兰等, 2021; Sun *et al.*, 2023; 付秀丽等, 2024; 何文渊等, 2024a, 2024b, 2024c),但

一些基础地质问题仍存在争议,如其沉积环境是一个简单的深湖、半深湖相,还是有更复杂的环境分化和异化。近期,笔者通过精细的岩心观察发现古龙页岩中发育一些特殊的黄铁矿脉和凝灰岩脉,成为页岩储层中的独特构造,非其他盆地所有,至今仍无学者对此进行详细研究,它们的成因及形成意义有待于进一步揭示。因此,本研究聚焦古龙页岩的黄铁矿脉和凝灰岩脉,通过探究其岩石学特征与形成机制,旨在进一步揭示其沉积环境意义,也为国内外相似盆地中的同类型脉体研究提供借鉴。

1 地质概况

松辽盆地北部面积 $11.95 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是一个中生代内陆断拗叠合盆地,分为中央拗陷区、西部斜坡区、北部倾没区、东北隆起区、东南隆起区和西南隆起区六个一级构造单元(图 1)。研究区在松辽盆地北部一级构造单元中央拗陷区内,主体部分位于泰康隆起带和龙虎泡大安阶地上,西部与西部斜坡区相邻,东部与齐家—古龙凹陷相邻,龙虎泡—大安阶地为其主体部分,区内由深至浅构造格局基本一致,整体表现为西北高东南低的单斜构造。

松辽盆地是中新生代发育的以古生代和前古生代变质岩系为基底的大型含油气沉积盆地,其发展先后经历了断陷、拗陷和反转作用三个构造演化阶段,形成了一系列伸展、挤压、反转构造,构造变形的几何学、运动学特征对沉积作用产生了重要影响(陈昭年和陈发景, 1996)。嫩江组末期发生构造反转(陈昭年和陈发景, 1996),松辽盆地由伸展沉降转变为挤压隆起,使四方台组、明水组、依安组、大安组和泰康组隆起褶皱,并发育了四个不整合面。北西—南东向挤压导致松辽盆地发育了一系列以长垣和敖古拉为代表的北北东向背斜,在敖古拉和长垣背斜夹持的古龙凹陷中的青山口组遭受了强烈的北北西—南南东向侧向挤压,发育了一系列北西—南东向挤压形成的共轭剪切裂缝和顺页理滑动,形成了大量顺层页理缝,为提高青山口组页岩储集能力起到了重要的作用(何文渊等, 2022)。

古龙凹陷沉积时期发生两次大规模湖侵,盆地中部为较大面积的深湖—半深湖区,沉积了青山口组和嫩江组两套富有机质泥页岩,是盆地主要烃源岩。现阶段,青山口组页岩油已经获得规模开发,青一段主要是一套黑色—灰黑色泥页岩(图 2),从下至

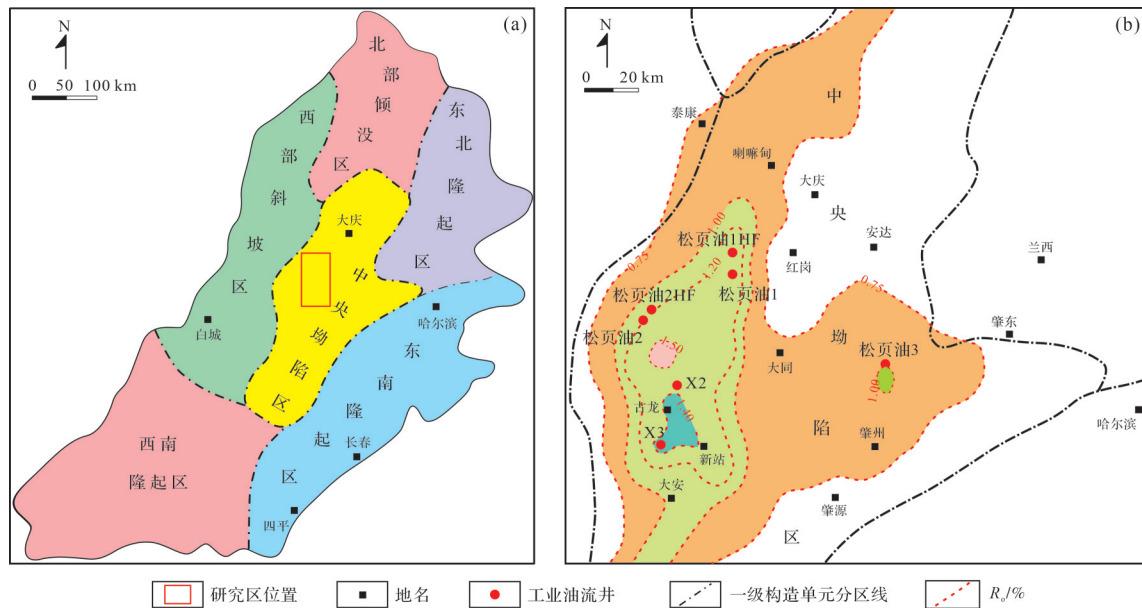


图1 研究区构造分区及位置图

(a) 松辽盆地构造单元划分; (b) 研究区位置图及井位分布

Fig.1 Structural zoning and location of the study area

上分为Q1~Q6六个油层组,有机质含量较高,底部有三四层油页岩,是主要的页岩油发育层段。

2 岩石学特征

2.1 黄铁矿脉的岩石学特征

2.1.1 较粗大的黄铁矿脉(脉宽>1 mm)

黄铁矿脉主要由黄铁矿组成(图3~6),目前仍未见其他文献报道,故本文进行重点介绍。概括起来有如下特点:(1)规模总体不大,宽1~4 mm,长1~4 cm(图3);(2)发育在黄铁矿薄层或薄层粉砂的底部(图3a,b,d);(3)强烈弯曲成肠状或“V”字形(图3b),具有180°对称;(4)多有粉砂级泥屑;(5)多倾斜(图3d),主要受顺层剪切作用;(6)主要发育在青一段,尤其是Q1~Q3油层组。

2.1.2 纤细的黄铁矿脉(脉宽<1 mm)

除了上述规模较大的黄铁矿脉以外,规模小的黄铁矿脉更加常见(图4~6),几乎发育在青一段Q1~Q3的各层中。青山口组中的黄铁矿脉一般都非常纤细,宽度多在1 mm以下,以竖直的黄铁矿脉最为发育(图4b、图5a~d),在三维上是一种近直立的凹凸不平的面,是富含 FeS_2 的流体沿竖直裂缝形成的。还有倾斜的黄铁矿脉(图5e,f),形态复杂的黄铁矿脉也常见(图5g~i),如图5g的黄铁矿脉如蛛网,粗细不均,总体似乎有些右倾斜产出,底部的一较粗黄铁矿

脉形态略微简单,最底部有一团黄铁矿化的泥页岩,可能是受控于一右倾的裂缝面。图5h的黄铁矿脉更为复杂,是由一团左倾斜的肠状黄铁矿脉组合而成,原先可能是一组近垂直的粉砂岩脉,经右行剪切发生了倾斜,后期再发生黄铁矿化,周围的泥页岩也发生了微弱的黄铁矿化。图5i是一团复杂的黄铁矿脉,可以看出是由一系列近垂直的肠状黄铁矿脉组合形成,从肠状黄铁矿脉的弯曲和叠合程度看,压实作用非常强烈,中间的黄铁矿脉压实率可达6~7,揭示了黄铁矿化发生极晚,是在成岩压实基本完成后发生的。水平黄铁矿脉也有所见,形态同样很复杂(图4c、图5j~k)。除了上述三种脉以外,还有团块状(图4d)、蛛网状黄铁矿脉(图5g)和组合的复杂肠状团。

2.2 凝灰岩脉的岩石学特征

凝灰岩脉由凝灰岩组成(图7~9),其特点是:(1)顶部必有一层很薄的凝灰岩(图7a,b),是形成凝灰岩脉的源,多厚1~2 cm,最厚可达5 cm,顶部很平,底部微参差;(2)普遍发绿黄或黄绿色荧光,多半含油(图7a);(3)凝灰岩脉主要物质成分是凝灰质,但常混入砂级泥屑(图9g,h);(4)规模很小,宽度多在1~2 mm,忽粗忽细,宽度变化极大,高度或长度多在数厘米(图8a,b);(5)形态极其复杂,多弯曲成纤细的肠状,或复杂弯曲的脉状。有的规则弯曲的成平

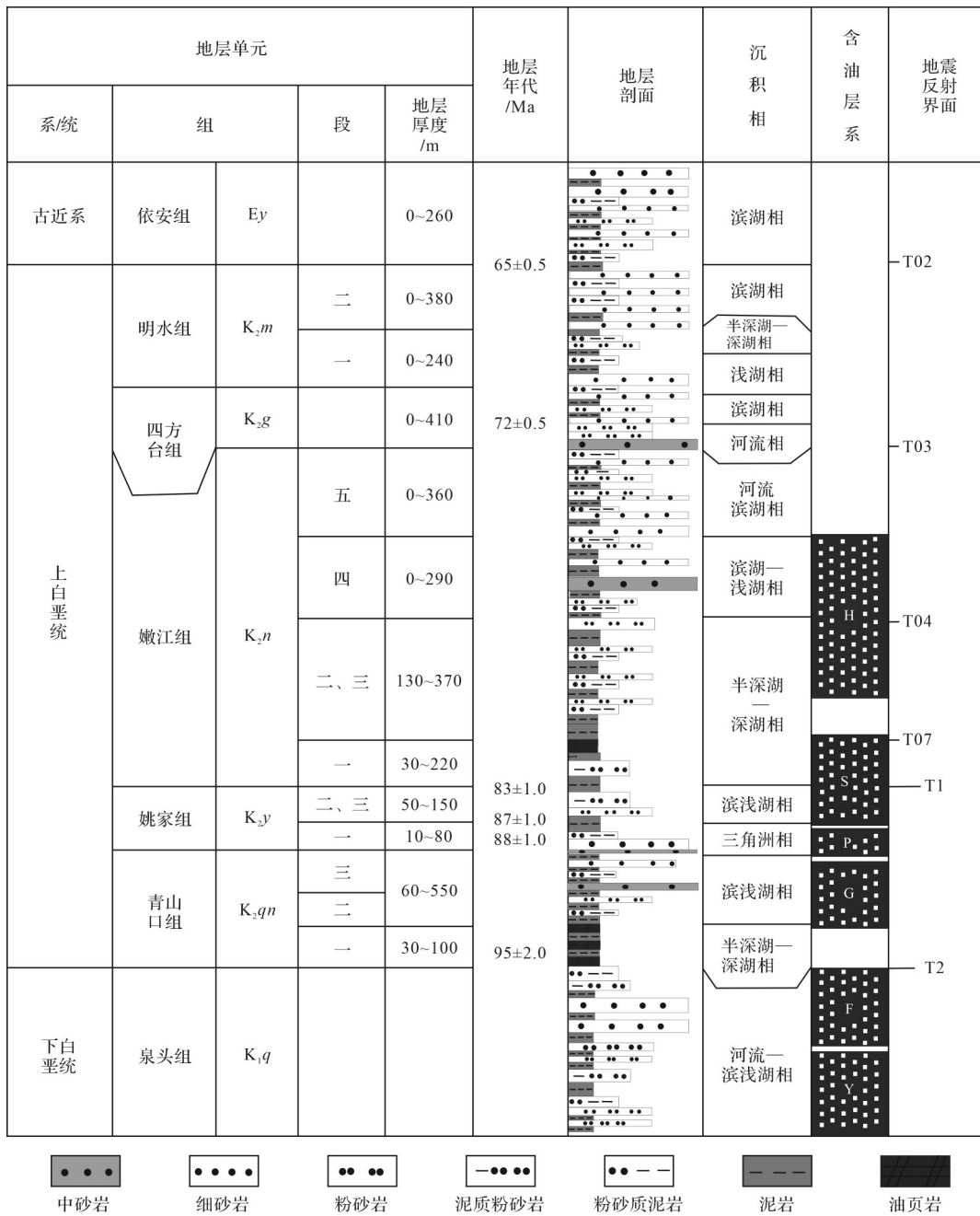


图2 研究区地层柱状图
Fig.2 Stratigraphic column of the study area

卧“V”字形(图8a,b、图9a);(6)在岩心层面上交织成不规则网格状(图7d~f),表明有多组脉系;(7)多产于灰黑色的泥页岩(图7~9);(8)底部常呈方网格状,或不规则网格状(图7d~f),揭示了三维也呈网格状;(9)显微镜下可见黄绿色半透明的凝灰岩中有大量黑色的泥屑(图9g~h)。

除了厚层凝灰岩层发育凝灰岩脉外,薄凝灰岩层也发育凝灰岩脉(图7h),在一层2~4 mm厚的凝灰

岩薄层底部发育了长5~6 cm的凝灰岩脉(图7h)。可以见到只有凝灰岩脉而没有上部的凝灰岩薄层,指示凝灰岩薄层被完全沉入泥浆转变成凝灰岩脉,揭示了当时的泥“稀如浆”。凝灰岩脉的显微形态和结构均非常复杂,呈团片状、火焰状和脉状等(图9)。通过放大,可以发现凝灰岩脉中有大量粉砂级泥屑(图9中的红色箭头),还有毫米级更大的被撕裂的黑色泥屑(图9b~c, e~g中的黄色箭头)和蒙脱石基质



图3 古龙凹陷青山口组页岩中的大 黄铁矿脉

(a)肠状黄铁矿脉(红色箭头)、黄铁矿透镜体(黄色箭头)和黄铁矿薄层(大红色箭头);(b)肠状黄铁矿脉(红色箭头)和黄铁矿化薄层(黄色箭头),还有少量没有完全黄铁矿化的砂脉(蓝色箭头);(c)黄铁矿化彻底的黄铁矿脉,三维视图揭示其为板片状;(d)部分黄铁矿化的脉体(蓝色箭头),强烈倾斜的黄铁矿脉

Fig.3 Large pyrite dikes in shale of the Qingshankou Formation, Gulong Sag

(图9h),揭示凝灰向下沉降时与周围的泥发生了混合,泥屑进入凝灰中。

3 形成机制探讨

3.1 脉体形成的岩石学证据

黄铁矿脉实际上是黄铁矿化砂脉,而非真正的全由黄铁矿组成的黄铁矿脉,是富含黄铁矿的流体沿砂脉矿化形成的,有以下几点证据:(1)经常可以见到黄铁矿脉与部分黄铁矿化的砂脉和未黄铁矿化的砂脉呈过渡关系(图3a,b,d);(2)黄铁矿脉在几何特点和结构及产出方式上与砂脉非常相似,且常共生(图3);(3)黄铁矿脉均是由粉砂级的泥屑和沿泥屑颗粒的外缘或粒间发育的微晶黄铁矿组成,而非由黄铁矿晶粒组成(图10);(4)从一些岩心中竖直和倾斜微裂缝充填的黄铁矿薄膜及其与黄铁矿脉的共生关系来看,黄铁矿脉形成于成岩中后期,即在泥页岩完全固结能够形成裂缝之后,而不是在沉积时形成的,因此,黄铁矿化可能与生排烃形成的富含 FeS_2 的还原性流体有关,也不排除与岩浆热流体有

关;(5)经常可以看到微晶黄铁矿沿介形虫(图6d)、藻(包括底栖藻)或植物碎屑发育,这些现象表明黄铁矿化发生于沉积后阶段;(6)在同层的岩心里找到了黄铜矿、闪锌矿、重晶石和粗粒的黄铁矿晶体等热液硫化物和硫酸盐矿物。除黄铁矿脉外,古龙凹陷青山口组页岩中还发育黄铁矿薄层和透镜体。总体来说,青山口组黄铁矿脉主要发育在青山口组下部有机质含量较高的层段。此外,黄铁矿化易沿藻、介形虫和植物碎屑等生物质发生,偶然可见沿鱼化石发生。

青一段普遍发育黄铁矿,有薄层状、结核状等,黄铁矿脉仅是其中一种赋存类型。黄铁矿脉的发育与黄铁矿密切相关,黄铁矿的发育又与还原性有关。岩心观察表明古龙凹陷青一段,尤其是Q1~Q3油层组黄铁矿特别发育,既可见单独的薄层,也可见充填在高角度裂缝中的黄铁矿透镜体,同时可见高度达2 m近直立的裂缝被黄铁矿薄膜充填。这些特征均表明青山口组的青一段还原性极强,是发育黄铁矿脉的重要层段。

凝灰岩脉是一种重力坠落岩脉,主要依据是:

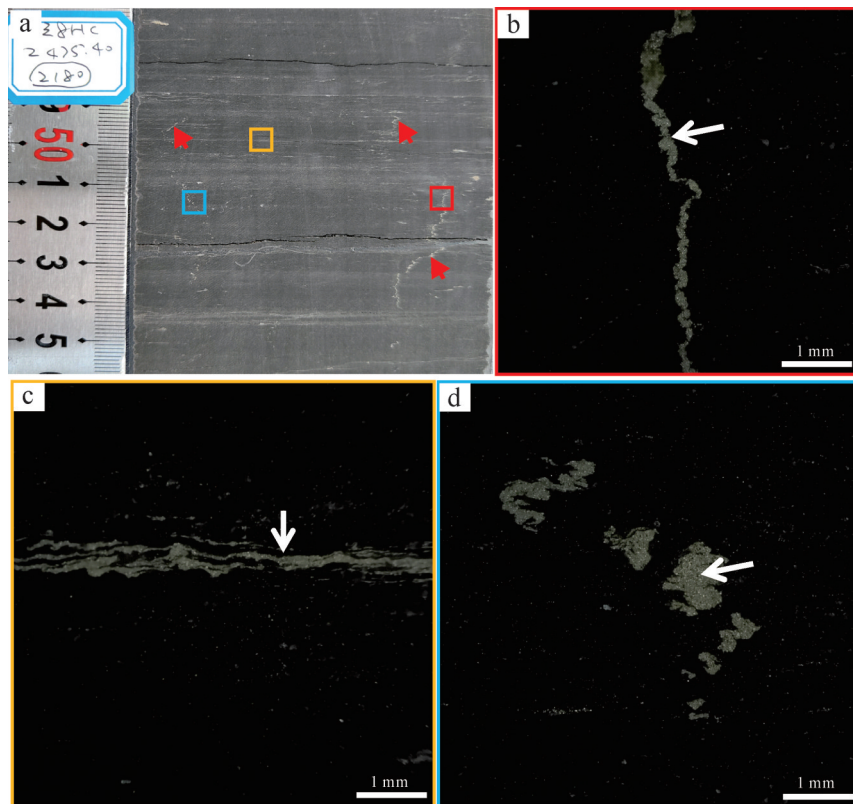


图4 古龙凹陷青山口组页岩中的纤细黄铁矿脉

(a)岩心上的丝发状黄铁矿脉,非常微弱(红色箭头),几乎观察不到;(b)图a红框的放大,可见呈锯齿状或肠状,竖直产出,宽度都不足1 mm;(c)图a中橙框的放大,近水平的黄铁矿脉,有1~3条次级脉,波浪状弯曲,顺页理产出;(d)图a中蓝框的放大,四团形态和结构均非常复杂的黄铁矿脉

Fig.4 Slender pyrite dikes in shale of the Qingshankou Formation, Gulong Sag

(1)凝灰岩脉的“根”在上部的薄凝灰岩中,向下尖灭消失,凝灰岩层上部没有脉(图7);(2)几何学特点与其他重力坠落砂脉相似。既然是重力坠落岩脉,那肯定符合一般重力坠落砂脉的形成动力过程(董万百等,2024)。

3.2 黏土与粉砂的(密度倒置)动力学研究

黄铁矿脉是由砂脉经黄铁矿化形成的,所以在讨论黄铁矿脉成因时首先要讨论砂脉的成因。黄铁矿脉和凝灰岩脉与古龙青山口组泥页岩中的砂脉的成因相同,均是由于密度倒置引起的重力坠落形成的,以下对动力学过程和机理进行分析。

3.2.1 瞬时沉积黏土的密度

河流将黏土以胶体的方式搬运到河口。由于黏土胶体带负电荷,进入河口后结合了湖水中的

$$500 \text{ g 黏土的体积(L)}=500 \div 2\ 300=0.217\ 39 \quad (1)$$

$$35 \text{ g 碳酸钙的体积(L)}=35 \div 2\ 700=0.012\ 96 \quad (2)$$

$$\text{图 11c 调和体总体积(mL)}: 1\ 500+250+50+217.39+12.96=2\ 030.35 \quad (3)$$

$$\text{图 11c 调和物的质量(g)}: 1\ 500+50+250+35+500=2\ 335 \quad (4)$$

$$\text{因此,调和体的密度(g/mL)}: 2\ 335 \div 2\ 035=1.15 \quad (5)$$

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等带正电的金属阳离子并吸附腐殖酸等有机质而发生聚沉,形成密度极小的黏土絮凝体。瞬时沉积的絮凝黏土密度极小,图11a中的絮凝黏土密度仅8 g/L,图11b中的絮凝黏土仅40 g/L(Schieber, 2015),图11c中的絮凝蒙脱石为本研究制备,其组成为水1 500 mL、蒙脱石500 g、脂肪甲酸50 mL、腐殖酸250 mL和碳酸钙35 g。用搅拌机充分搅拌形成如图11c的固液混合物,简称为“调和物或调和体”。

简单计算一下这种蒙脱石絮凝体的密度。蒙脱石的密度取2 300 g/L,碳酸钙的密度取2 700 g/L,因为古龙页岩中总是有藻屑或介形虫碎屑,以最稠的后者蒙脱石絮凝体(图11c)的密度作为计算依据,后者蒙脱石絮凝体(图11c)的密度为:

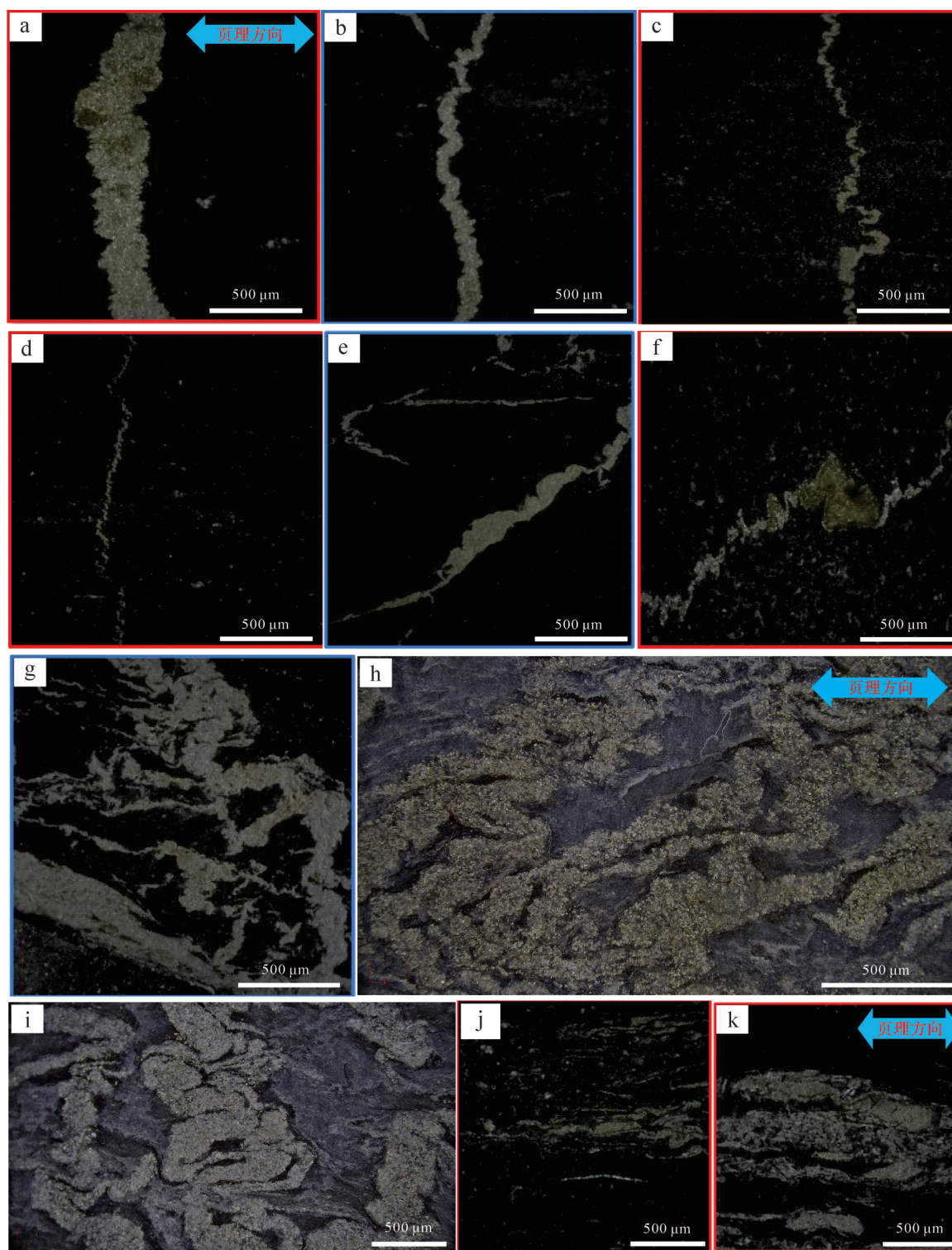


图5 古龙凹陷青山口组页岩中的细小黄铁矿脉

(a)灰黑色页岩发育了细小的黄铁矿脉,肠状,边缘参差不齐,近于垂直;(b)灰黑色页岩发育了细小的黄铁矿脉,肠状,边缘参差不齐,近于垂直;(c)灰黑色页岩发育了细小的黄铁矿脉,肠状,边缘参差不齐,近于垂直;(d)灰黑色页岩发育了极其微弱的黄铁矿脉,边缘参差不齐,近于垂直;(e)灰黑色页岩发育了细小的黄铁矿脉,中部膨大,边缘参差不齐,倾斜产出,左上角还有一弯钩状黄铁矿脉;(f)灰黑色页岩发育了细小的黄铁矿脉,呈复杂肠状,边缘参差不齐,倾斜产出;(g)非常复杂的黄铁矿脉,蜘蛛状,形态复杂到几乎无法描述,产于黑色泥页岩中;(h)非常复杂的黄铁矿脉,形态复杂到几乎无法描述,如同一堆肠子倾斜产出,周围都是星点状黄铁矿化的泥页岩;(i)形态复杂到几乎无法描述,如同一堆肠子近垂直叠合产出,周围都是星点状黄铁矿化的泥页岩;(j)不规则的黄铁矿脉,有些分散星点状黄铁矿颗粒,总体顺页理产出,产于黑色泥页岩中;(k)黄铁矿脉形态复杂,呈团状,总体顺页理分布,产于黑色泥页岩中

Fig.5 Small pyrite dikes in shale of the Qingshankou Formation, Gulong Sag

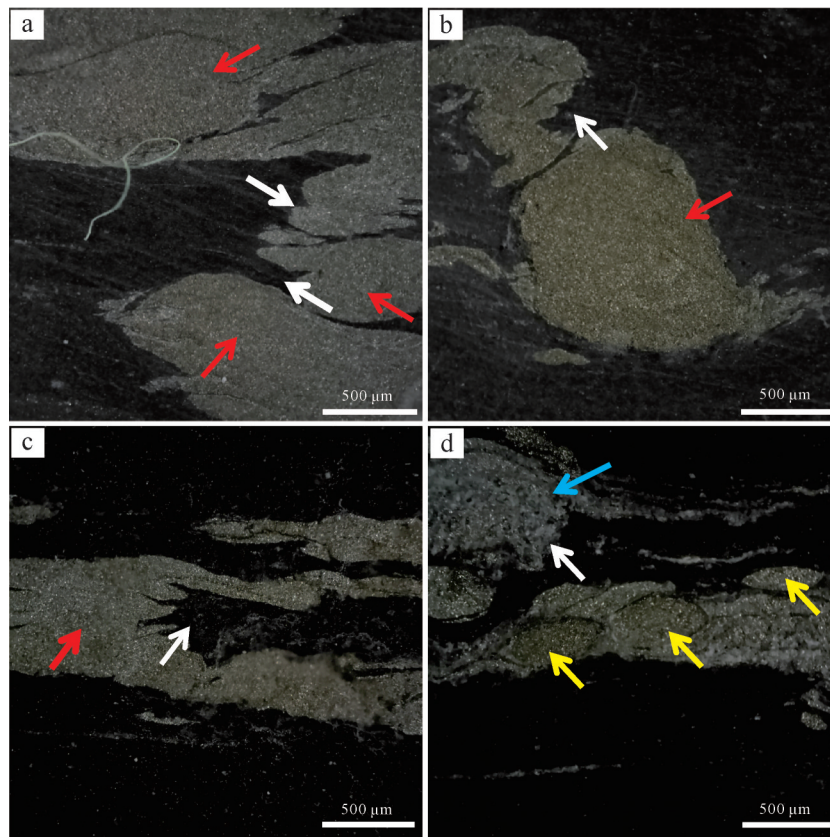


图6 古龙凹陷青山口组页岩中的膨胀成团的黄铁矿脉

(a)黄铁矿脉膨大呈团块(红色箭头),边缘的灰黑色页岩中发育了蟹状构造(白色箭头),系砂脉(黄铁矿脉)在侵入泥质挤压形成的;(b)黄铁矿脉膨大呈团块(红色箭头),边缘的灰黑色页岩中发育了蟹状构造(白色箭头),系砂脉(黄铁矿脉)在侵入泥质挤压形成的;(c)黄铁矿脉膨大呈团块(红色箭头),中心夹的灰黑色页岩中发育了蟹状构造(白色箭头),系砂脉(黄铁矿脉)在侵入泥质挤压形成的;(d)黄铁矿脉膨大呈团块(蓝色箭头),边缘的灰黑色页岩中发育了蟹状构造(白色箭头),系砂脉(黄铁矿脉)在侵入泥质挤压形成的,蓝色箭头指示黄铁矿脉含有很多未黄铁矿化的粉砂,黄色箭头指示黄铁矿化介形虫

Fig.6 Conglobate pyrite dikes in shale of the Qingshankou Formation, Gulong Sag

可见,调和体的密度略大于水,经计算含水率为77.08%。瞬时沉积的黏土水分含量极高,可达90%以上(Schieber, 2015),但会迅速失水,在100 min后,会失去10%的水分,在400 min后会失去15%的水分(Schieber, 2015)。所以,本文使用密度为1.15 g/mL的蒙脱石+有机质的调和体做实验,理由充分。

3.2.2 瞬时沉积的粉砂的密度

由于黄铁矿脉是由砂脉经黄铁矿化形成的,所以用粉砂的密度来代替。瞬时沉积的粉砂孔隙度约40%,取固体颗粒的密度为2 700 g/L,所以瞬时沉积粉砂的密度 $\rho_1=40\% \times 1\ 000+60\% \times 2\ 700=2\ 020$ (g/L)。

3.2.3 (密度倒置)动力学研究

在探讨黄铁矿脉和凝灰岩脉形成动力学时作者先建立一个物理模型(图12)。粉砂的密度取 $\rho_1=2\ 020$ g/L,作者实验获得的絮凝蒙脱石密度 $\rho_2=1\ 150$ g/L,两者的密度差为 $2\ 020-1\ 150=870$ (g/L)。如果粉砂沉积在这种絮凝状的黏土上就会出现上部密度

大、下部密度小的密度倒置现象,粉砂必然会沉到黏土中形成砂脉。所以,能够在古龙青山口组页岩中见到大量砂脉(董万百等, 2024)(包括黄铁矿脉和凝灰岩脉)。砂脉形成后,粉砂层底部的黏土密度会增加(暂不考虑失水),取发育砂脉的层粉砂占1/3,泥占2/3,所以通过简单计算获得了粉砂与泥的混合物的密度(ρ_3)为:

$$(2\ 020 \times 1/3) + (1\ 150 \times 2/3) = 1\ 440 \text{ g/L} \quad (6)$$

砂脉与泥和凝灰岩脉与泥的混合密度(ρ_3)是1 440 g/L(图12b),通过这种中间密度与底部密度较小的泥过渡而暂时的稳定,也可能会进一步向下坠落形成更复杂的砂(凝灰岩)—泥混合脉。经过成岩压实,砂脉和凝灰岩脉进一步(垂直)弯曲(图12c),密度均增大,粉砂层变为2 300 g/L(估计),砂脉与凝灰岩脉与泥的混合层密度变为2 200 g/L(估计),底部纯泥的密度为2 100 g/L(估计),结果形成了一个重力稳定系统(图12c),随着深度的加大,三种岩性

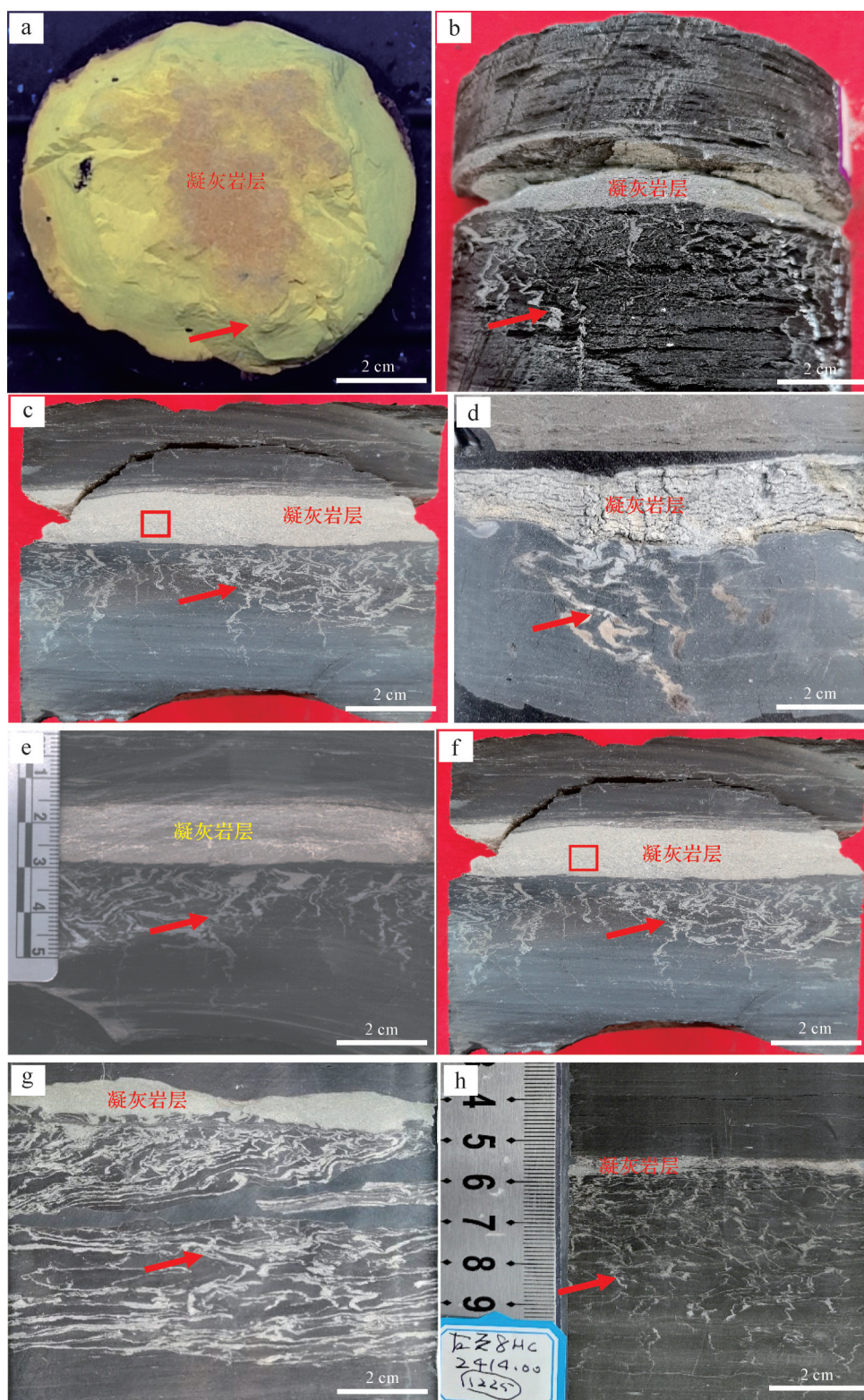


图7 古龙凹陷青山口组页岩中的凝灰岩及其脉

(a)薄层凝灰岩顶面,呈均匀块状,含油,发黄绿色荧光,厚2.4 cm;(b)薄层凝灰岩及凝灰岩脉,凝灰岩厚1.3 cm,其下发育了凝灰岩脉(红色箭头),弯曲强烈呈肠状;(c)凝灰岩薄层与凝灰岩脉,凝灰岩脉呈平卧“V”字形;(d)凝灰岩薄层与凝灰岩脉,凝灰岩薄层厚1.8 cm,嫩江组,在坠落部位明显加厚;(e)薄层凝灰岩及其凝灰岩脉,凝灰岩厚1.3 cm,其下发育了凝灰岩脉(红色箭头),弯曲强烈呈肠状;(f)薄层凝灰岩及其凝灰岩脉,凝灰岩厚1.4 cm,其下发育了凝灰岩脉(红色箭头),弯曲强烈呈肠状;(g)复杂的凝灰岩脉(红色箭头);(h)薄层凝灰岩及凝灰岩脉,凝灰岩厚3~4 mm,其下发育了宽毫米级的复杂凝灰岩脉(红色箭头),多不连续

Fig.7 Tuff and its dikes in shale of the Qingshankou Formation, Gulong Sag

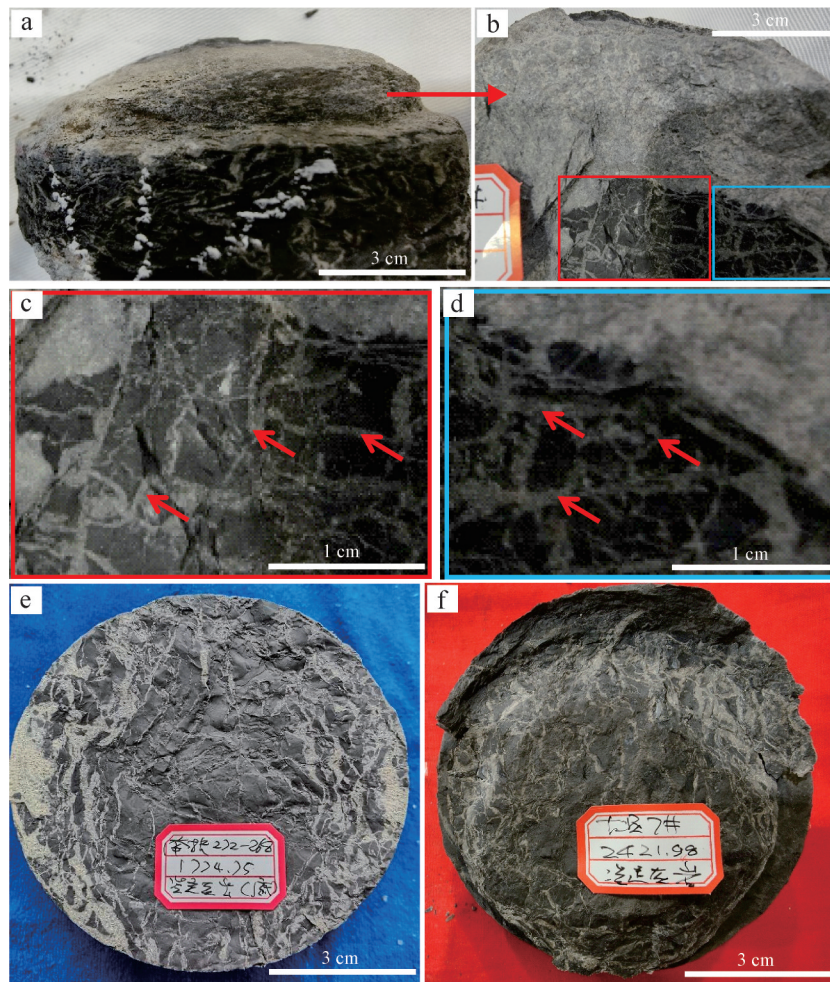


图8 古龙凹陷青山口组页岩中的凝灰岩薄层底面的凝灰岩脉

(a)凝灰岩薄层,黄绿色,致密块状,厚1~2 cm,下部发育了密集的纤细肠状凝灰岩脉,脉宽1~2 mm,高4~5 cm,侧向延伸观察整个岩心;(b)图a的背面;(c)图a中黑框的放大,可见内部有层状结构;(d)凝灰岩层底面,可见凝灰岩脉交织成网状;(e)图b中红框的放大,可见凝灰岩脉交织形成的网格(红色箭头);(d)图b中蓝框的放大,可见凝灰岩脉交织形成的网格(红色箭头);(e)凝灰岩薄层底面的脉,非常不规则,边缘较密集,中心较稀疏,系中心的泥较厚所致;(f)凝灰岩薄层底面的脉,非常不规则,同样边缘较密集,中心较稀疏,系中心的泥较厚所致

Fig.8 Tuff dike in shale of the Qingshankou Formation, Gulong Sag

还会不断加大,最终使三种岩性的重力达到彻底稳定。

由于侧向构造牵引和侧向重力滑动作用,使得古龙青山口组页岩普遍出现了顺层滑动,形成了大量的顺层摩擦镜面、擦痕和阶步等(何文渊等, 2022),使原先垂直的砂脉、凝灰岩脉及黄铁矿脉发生倾斜(图12d),这种现象在古龙凹陷青山口组页岩中非常普遍。

凝灰岩脉的“根”在上部,表明物质来源是上部,既然是上部就跟砂岩脉的动力成因相同,也是一种重力坠落。由于凝灰的密度未知,因此无法进行实际计算,根据凝灰岩坠入页岩中的事实,可以用砂脉的成因动力代替凝灰岩脉的成因动力(图12)。

3.3 风暴振荡的液化作用

古龙凹陷的风暴作用非常发育(He *et al.*, 2023),沉积的粉砂岩底部经常发育小型重力坠落砂脉。这种重力坠落砂脉的最大特点是从上向下坠落,表明是重力差驱动(董万百等, 2024),而不是像地震形成的液化砂脉是从下向上挤入,由压力差驱动,这两者在形成动力学上有本质差异。风暴振荡持续作用在沉积下来的细粉砂上,使其液化失去内黏性,产生流动形成液化变形,有三种结果:一是在砂层或凝灰层内部形成液化流动;二是泄水向上流动;三是因密度加大而向下部的絮凝沉积泥或粉砂层中坠落,形成重力坠落砂脉。很多液化重力沉降砂脉是从液化砂层的顶部开始发育,表明顶部液化

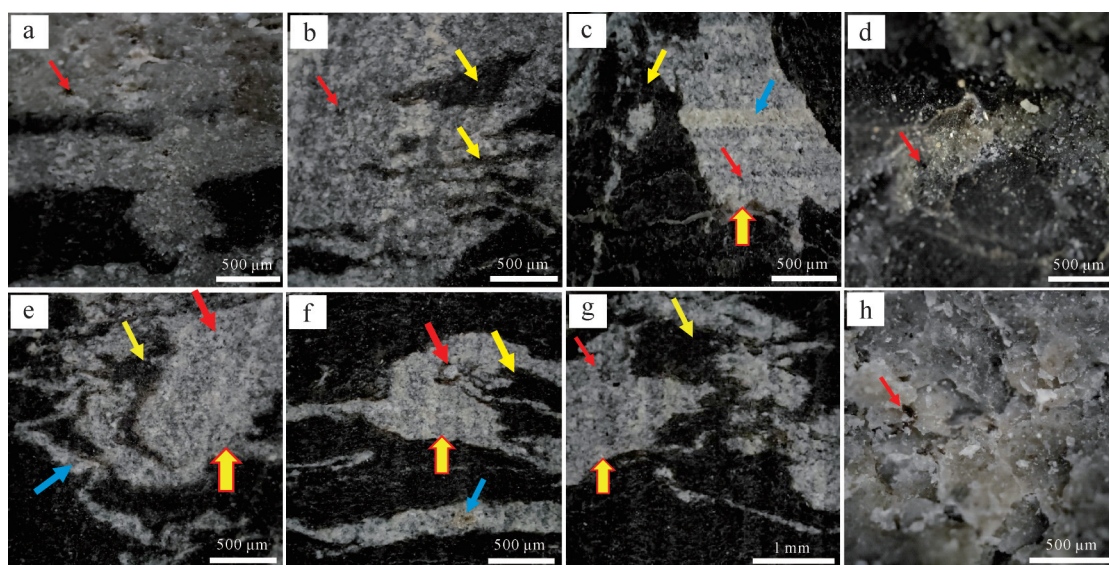


图9 古龙凹陷青山口组页岩中的凝灰岩脉的显微照片

(a)凝灰岩薄层下部发育了脉,与凝灰岩之间连续性很好,揭示了物源来自上部凝灰岩薄层,其中有一些黑色泥屑(红色箭头);(b)复杂的凝灰岩脉,其中有大量细小泥屑(红色箭头),还有大量撕裂的大泥屑(黄色箭头);(c)凝灰岩脉呈碎片状(大黄色箭头),其中有大量灰黑色泥屑(红色箭头),左侧的灰黑色泥呈火焰状(黄色箭头),其中还发育了水平层理(蓝色箭头),左侧还有一些稀疏的凝灰岩碎片;(d)凝灰岩脉被泥浆混合,显示很弱,其中有黑色泥屑(红色箭头);(e)复杂的凝灰岩脉,左侧呈肠状(蓝色箭头)和右侧呈碎片状(大黄色箭头),其中有大量泥屑(红色箭头),发育了火焰状的泥碎片(黄色箭头);(f)碎片状(大黄色箭头)和条带状凝灰岩脉(蓝色箭头),其中有大量黑色泥屑(红色箭头),其中发育了火焰状泥碎片(黄色箭头);(g)复杂的凝灰岩脉,呈火焰状,左侧呈碎片状(大黄色箭头),其中含大量泥屑(红色箭头),其中的黑色泥屑呈火焰状(黄色箭头);(h)凝灰岩脉内部的放大照片,其中含少量粉砂级泥屑(红色箭头)

Fig.9 Micrographs of tuff dyke in shale of the Qingshankou Formation, Gulong Sag

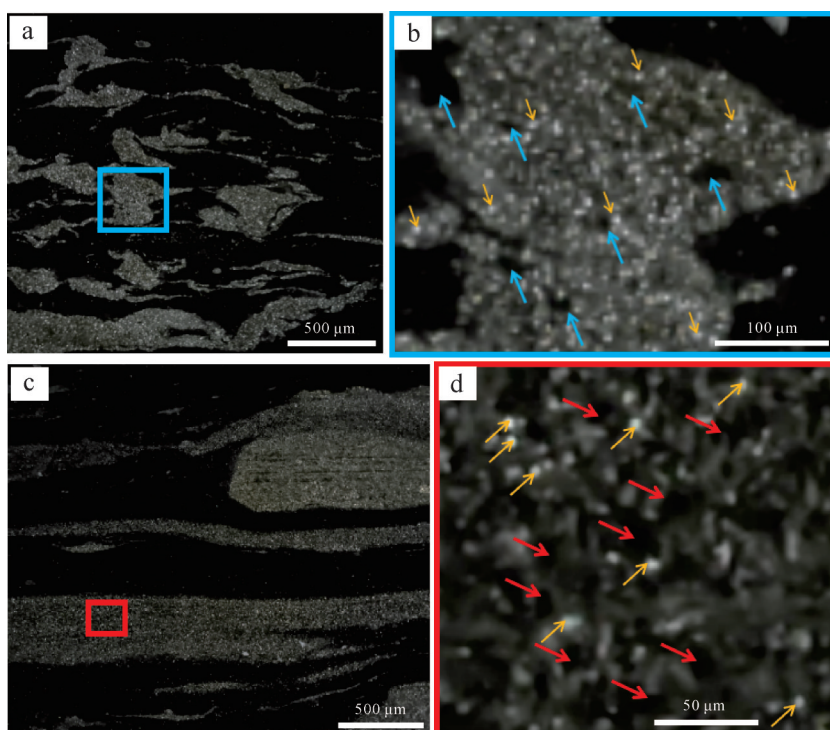


图10 古龙凹陷青山口组页岩中的黄铁矿脉及其内部组成与结构

(a)复杂火焰状黄铁矿团块和丝发状黄铁矿脉;(b)图a中蓝框的放大图,可见泥屑(蓝色箭头)和黄铁矿微晶(橙色箭头);(c)顺层条带状黄铁矿脉,放大30倍;(d)图c红框的放大,可见泥屑(红色箭头)和黄铁矿微晶(橙色箭头)

Fig.10 Pyrite dikes and their internal composition and structure of the Qingshankou Formation, Gulong Sag

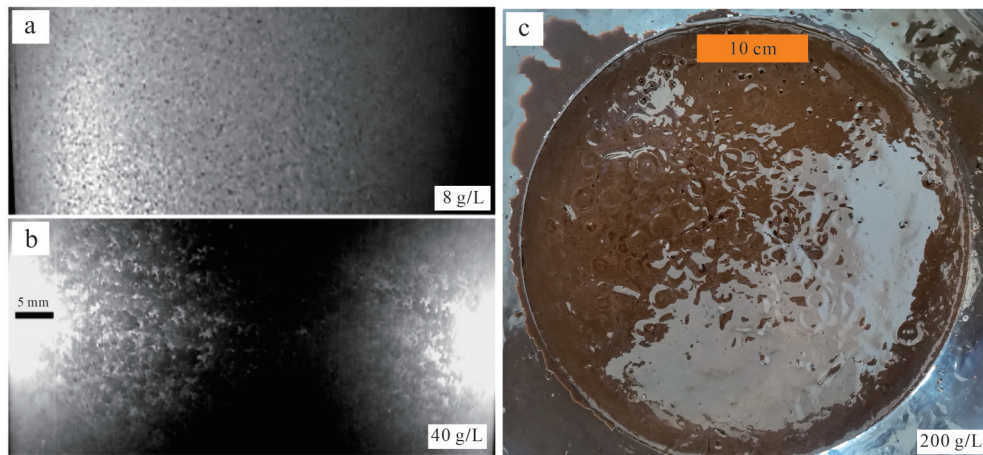


图 11 瞬时沉积形成的三种密度的蒙脱石黏土絮凝体

(a)人工沉积形成的絮凝黏土,密度 8 g/L(Schieber, 2015);(b)人工沉积形成的絮凝黏土,密度 40 g/L(Schieber, 2015);(c)人工沉积形成的絮凝黏土,密度 115 g/L,本文

Fig.11 Montmorillonite clay flocculates of three densities formed by fresh deposition

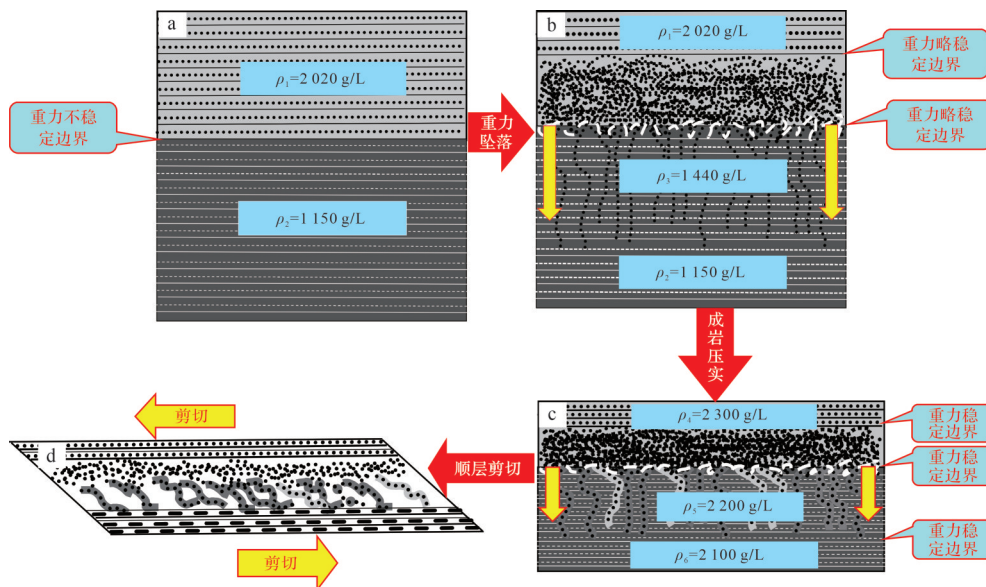


图 12 黄铁矿和凝灰岩重力坠落脉形成模式图

(a)液化前的密度倒置的粉砂—黏土序列,界面不稳定;(b)液化的密度倒置的粉砂与黏土序列,界面不稳定;(c)在压实作用下垂向缩短,砂脉进一步变成肠状,密度均加大,形成稳定的界面;(d)顺层剪切作用下,砂脉(包括黄铁矿脉和凝灰岩脉)发生倾斜

Fig.12 Formation model of the pyrite and tuff gravity falling dikes

比底部强烈,所以风暴振荡液化是重要动力。这种重力坠落砂脉与虫迹很像,往往被误认为虫迹。此外,这种重力坠落砂脉与地震重力坠落砂脉很像,所以往往又会误认为是震积岩,这种现象在其他地方很少见。一般认为砂脉的成因与液化有关,而大多数的砂脉的液化又与地震有关(钟建华等, 2020a, 2020b)。古龙凹陷青山口组页岩中的(细小)砂脉虽然可能与液化有关,但不是地震液化形成的,而与风暴振荡液化有关(董万百等, 2024)。

综合研究认为,古龙青山口组页岩储层中黄铁矿脉和凝灰岩脉与研究区的砂脉一样,其成因与风暴液化和重力沉降有关。风暴的振荡作用使粉砂或凝灰层更易于流动液化,由于粉砂和凝灰的密度大于其下覆泥质沉积物,所以会发生重力沉降,密度较大的粉砂和凝灰坠入密度较小的泥质絮凝沉积中,形成砂脉。

砂脉一直是一种很受关注的沉积构造(钟建华等, 2018, 2020a, 2020b),历来受到重视。古龙凹陷

青山口组页岩中的黄铁矿脉和凝灰岩脉的发现对于岩脉的研究无疑具有较重要的意义。以上介绍的两种最新发现的沉积岩脉,仅仅是初步研究成果。随着研究的深入,更多的信息可能会被发现,这两种特殊岩脉对于沉积环境的指示意义也将进一步被揭示。

4 结论

(1) 黄铁矿脉一般发育在薄层黄铁矿层底部,形态和结构复杂,总体规模很小,较宽的一般在1~2 mm,长(高)数厘米,略曲或弯曲如肠状;较小的黄铁矿脉宽度仅在数百微米到1 mm,高数毫米到数厘米,弯曲如肠状或交织成蛛网状,边缘参差不齐。黄铁矿脉内部多含围岩的泥屑。凝灰岩脉发育在薄层凝灰岩底部,形态和结构比黄铁矿脉更复杂,多弯曲如肠状,少数呈团块状或火焰状,边缘多参差不齐总体规模也很小,宽度一般在数百微米到1 mm,高数毫米到数厘米,多含有围岩的泥屑或火焰状的团块。

(2) 黄铁矿脉是一种由砂脉在成岩过程中经黄铁矿化形成的次生脉,不是沉积时形成的,所以它不能直接反映沉积环境,而是反映了在成岩过程中含黄铁矿的还原性流体作用很强。凝灰岩脉是一种重力沉积脉,由于火山喷发形成的凝灰密度较大,沉入到下部的泥质沉积中形成凝灰岩脉。下部的泥质沉积是一种絮凝状的胶体物质,密度和强度均很小,所以无法支撑上部的凝灰质物质而形成这种独特的凝灰岩脉。风暴震荡作用使粉砂或凝灰岩层更容易液化,促进了凝灰岩脉的形成。

参考文献(References)

陈昭年,陈发景. 1996. 松辽盆地反转构造运动学特征[J]. 现代地质, 10(3): 390-396. [Chen Zhaonian, Chen Fajing. 1996. Kinematic characteristics of inversion structures in Songliao Basin[J]. Geoscience, 1996, 10(3): 390-396.]

董万百,张祥国,钟建华,等. 2024. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩油储层中的重力坠落砂脉的发现及其意义[J]. 地质科学, 59(1): 180-198. [Dong Wanbai, Zhang Xiangguo, Zhong Jianhua, et al. 2024. Discovery and significances of gravity fall and dikes in shale oil reservoirs of Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 59(1): 180-198.]

付秀丽,蒙启安,文政,等. 2024. 松辽盆地白云岩沉积环境及成因机理[J]. 沉积学报, 42(1): 113-129. [Fu Xiuli, Meng Qi'an, Wen Zheng, et al. 2024. Sedimentary environment and genetic mechanism of dolomites in the Qingshankou Formation, Songliao Basin

[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(1): 113-129.]

何文渊,白雪峰,钟建华,等. 2024a. 松辽盆地古龙页岩油储层干酪根的有机元素组成及其N元素的地球化学意义[J]. 地质学报, 98(6): 1840-1866. [He Wenyuan, Bai Xuefeng, Zhong Jianhua, et al. 2024a. Organic element compositions and its N geochemical significances of the kerogen of Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 98(6): 1840-1866.]

何文渊,崔宝文,王凤兰,等. 2022. 松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组储集空间与油态研究[J]. 地质论评, 68(2): 693-741. [He Wenyuan, Cui Baowen, Wang Fenglan, et al. 2022. Study on reservoir spaces and oil states of the Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. Geological Review, 68(2): 693-741.]

何文渊,蒙启安,付秀丽,等. 2024b. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩沉积环境特征及其有机质富集机理[J]. 沉积学报, 42(5): 1799-1816. [He Wenyuan, Meng Qi'an, Fu Xiuli, et al. 2024b. Geochemical study of the sedimentary environment and its organic matter enrichment mechanism in Qingshankou Formation shale, Gulong Sag, Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(5): 1799-1816.]

何文渊,赵莹,钟建华,等. 2023. 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩油储层中有机质微孔特征[J]. 地质论评, 69(3): 1161-1183. [He Wenyuan, Zhao Ying, Zhong Jianhua, et al. 2023. Study on organic matter and micropores of Qingshankou Formation shale oil reservoir in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. Geological Review, 69(3): 1161-1183.]

何文渊,赵莹,钟建华,等. 2024c. 松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组页岩油储层中微米孔缝特征及油气意义[J]. 岩性油气藏, 36(3): 1-18. [He Wenyuan, Zhao Ying, Zhong Jianhua, et al. 2024c. Characteristics and significance of micron pores and micron fractures in shale oil reservoirs of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 36(3): 1-18.]

刘翰林,邹才能,邱振,等. 2023. 陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制:以鄂尔多斯盆地长7段为例[J]. 沉积学报, 41(6): 1810-1829. [Liu Hanlin, Zou Caineng, Qiu Zhen, et al. 2023. Sedimentary depositional environment and organic matter enrichment mechanism of lacustrine black shales: A case study of the Chang 7 member in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(6): 1810-1829.]

庞彦明,张元庆,蔡敏,等. 2021. 松辽盆地古龙页岩油水平井开发技术经济界限[J]. 大庆石油地质与开发, 40(5): 134-143. [Pang Yanming, Zhang Yuanqing, Cai Min, et al. 2021. Technical and economic limit of horizontal well development for Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 40(5): 134-143.]

邱振,邹才能. 2020. 非常规油气沉积学:内涵与展望[J]. 沉积学报, 38(1): 1-29. [Qiu Zhen, Zou Caineng. 2020. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 38(1): 1-29.]

- 邵红梅,高波,潘会芳,等. 2021. 松辽盆地古龙页岩成岩—孔隙演化[J]. 大庆石油地质与开发, 40(5): 56-67. [Shao Hongmei, Gao Bo, Pan Huifang, et al. 2021. Diagenesis-pore evolution for Gulong shale in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 40(5): 56-67.]
- 孙龙德. 2020. 古龙页岩油(代序)[J]. 大庆石油地质与开发, 39(3): 1-7. [Sun Longde. 2020. Shale oil in Gulong Sag[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 39(3): 1-7.]
- 王凤兰,付志国,王建凯,等. 2021. 松辽盆地古龙页岩油储层特征及分类评价[J]. 大庆石油地质与开发, 40(5): 144-156. [Wang Fenglan, Fu Zhiguo, Wang Jiankai, et al. 2021. Characteristics and classification evaluation of Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 40(5): 144-156.]
- 王广响,王凤兰,蒙启安,等. 2020. 古龙页岩油战略意义及攻关方向[J]. 大庆石油地质与开发, 39(3): 8-19. [Wang Guangyun, Wang Fenglan, Meng Qi'an, et al. 2020. Strategic significance and research direction for Gulong shale oil[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 39(3): 8-19.]
- 王小军,宋永,郭旭光,等. 2023. 陆相咸化湖盆细粒沉积岩分类及其石油地质意义[J]. 沉积学报, 41(1): 303-317. [Wang Xiaojun, Song Yong, Guo Xuguang, et al. 2023. Classification of fine-grained sedimentary rocks in saline lacustrine basins and its petroleum geological significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(1): 303-317.]
- 印森林,谢建勇,程乐利,等. 2022. 陆相页岩油研究进展及开发地质面临的问题[J]. 沉积学报, 40(4): 979-995. [Yin Senlin, Xie Jianyong, Cheng Leli, et al. 2022. Advances in continental shale oil research and problems of reservoir geology[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(4): 979-995.]
- 钟建华,曹梦春,倪良田,等. 2018. 砂脉的研究现状与进展[J]. 古地理学报, 20(1): 119-132. [Zhong Jianhua, Cao Mengchun, Ni Liangtian, et al. 2018. Situation of study and development tendency of sandy dykes[J]. *Journal of Palaeogeography*, 20(1): 119-132.]
- 钟建华,倪良田,汪立东,等. 2020a. 青岛灵山岛南背来石下白垩统大型砂脉的发现及其形成动力学研究[J]. 地质论评, 66(6): 1457-1476. [Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Wang Lidong, et al. 2020a. Discovery of large sand dykes in the Lower Cretaceous of southern Beilaishi, Lingshan Island, Qingdao, and their formation dynamics[J]. *Geological Review*, 66(6): 1457-1476.]
- 钟建华,孙宁亮,郝兵,等. 2020b. 山东灵山岛北背来石剖面下白垩统顺层砂脉的特征及其成因动力学分析[J]. 古地理学报, 22(4): 635-646. [Zhong Jianhua, Sun Ningliang, Hao Bing, et al. 2020b. Characteristics and dynamics origin of the Lower Cretaceous sill in northern Beilaishi section of Lingshan Island, Shandong province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 22(4): 635-646.]
- De Machuca B C, Perucca L P. 2015. Fault-related carbonate breccia dykes in the La Chilca area, eastern Precordillera, San Juan, Argentina[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 58: 100-110.
- Greb S F, Archer A W. 2007. Soft-sediment deformation produced by tides in a meizoseismic area, Turnagain Arm, Alaska[J]. *Geology*, 35(5): 435-438.
- He W Y, Zhong J H, Sun N L. 2023. Discovery and significance of tempestites and storm deposits in the Qingshankou Formation of the Gulong Sag, northeastern China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 999135.
- Meshram D C, Sangode S J, Gujar A R, et al. 2011. Occurrence of soft sediment deformation at Dive Agar beach, west coast of India: Possible record of the Indian Ocean tsunami (2004) [J]. *Natural Hazards*, 57(2): 385-393.
- Monnier D, Gay A, Imbert P, et al. 2015. Sand injectites network as a marker of the palaeo-stress field, the structural framework and the distance to the sand source: Example in the Vocontian Basin, SE France[J]. *Journal of Structural Geology*, 79: 1-18.
- Montenat C, Barrier P, D'Estevou P O. 1991. Some aspects of the recent tectonics in the strait of Messina, Italy[J]. *Tectonophysics*, 194(3): 203-215.
- Obermeier S F. 1996. Using liquefaction-induced features for paleoseismic analysis[J]. *International Geophysics*, 62: 331-396.
- Obermeier S F, Weems R E, And R B J, et al. 1989. Liquefaction evidence for repeated Holocene earthquakes in the coastal region of south Carolina[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 558(1): 183-195.
- Schieber J. 2015. Discussion: "Mud dispersal across a Cretaceous pro-delta: Storm-generated, wave-enhanced sediment gravity flows inferred from mudstone microtexture and microfacies" by Plint (2014), *Sedimentology* 61, 609-647[J]. *Sedimentology*, 62(1): 389-393.
- Scholz C H. 2010. A note on the scaling relations for opening mode fractures in rock[J]. *Journal of Structural Geology*, 32(10): 1485-1487.
- Sims J D. 1973. Earthquake-induced structures in sediments of Van Norman Lake, San Fernando, California[J]. *Science*, 182(4108): 161-163.
- Sun N L, He W Y, Zhong J H, et al. 2023. Widespread development of bedding-parallel calcite veins in medium-high maturity organic-rich lacustrine shales (Upper Cretaceous Qingshankou Formation, northern Songliao Basin, NE China): Implications for hydrocarbon generation and horizontal compression[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 158: 106544.

Characteristics and Genetic Mechanism of Pyrite Dikes and Tuff Dikes in Shale Oil Reservoir of Qingshankou Formation, Gulong Sag

LU JiaMin¹, LIN TieFeng¹, LI JunHui¹, FU XiuLi¹, SU YangXin¹, BAI Yue¹, ZHONG JianHua^{2,3,4}, SUN NingLiang^{2,3,5}

1. National Key Laboratory of Green Exploitation of Continental Shale Oil with Multi-Resource Collaboration, Daqing, Heilongjiang 163712, China

2. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

3. National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100028, China

4. School of Geosciences, China University of Petroleum (Eastern China), Qingdao, Shandong 266580, China

5. Institute of Ocean Engineering, Northeastern University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract: [Objective] By studying the geometric characteristics and formation mechanism of pyrite and tuff dikes in shales of the Qingshankou Formation in Gulong Sag, this paper discusses their formation time, sedimentary environment, sedimentary process, sediment state and diagenetic environment, and estimates the diagenetic compaction rate of shale, which provides reference for the formation mechanism and significance of the same type of dikes. [Methods] Based on detailed core observation, thin section analysis and dynamic calculation of dike formation, pyrite and tuff dikes are found in the Gulong shale, and their genetic mechanism and geological significance are explored. [Results] The pyrite and tuff dikes in shales of the Qingshankou Formation in Gulong Sag are small in scale, and pyrite dikes can be divided into two types according to their scale. One is the thick pyrite dikes with a width of 1-4 mm and a length of several centimeters; The other is a thin pyrite dike, which is less than 1 mm wide and several millimeters to several centimeters long. Tuff dikes are mostly less than 1 mm in width and several millimeters to several centimeters in length, and most of them are strongly bent into ptygmatite, erect, inclined or horizontally produced. It is speculated that gravity subsidence may be caused by density inversion, and the dynamic formation model of pyrite and tuff dike is established by calculation. [Conclusions] The shape of pyrite dike in shale oil reservoir of the Qingshankou Formation in Gulong Sag is very complex, which is formed by gravity subsidence sand dike after late pyritization, that is, there are silt dikes first and then pyrite dikes formation. The tuff formed by volcanic eruption settling on unconsolidated mud of lake, and then tuff dike formed due to gravity subsidence caused by density inversion, rather than overpressure filling from bottom to top caused by seismic liquefaction. The oblique pyrite dike and tuff dike are symmetrical at a distance of 180 degrees, which are subjected to bedding shear action. There are many silt-grade mud debris and large flame-like mud debris in the interior dikes, which are formed by the sand dike and tuff dike sinking into the unconsolidated or even muddy mud at the lower part and being captured.

Key words: pyrite dike; tuff dike; liquefaction; gravity fall; shale oil; Gulong Sag

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42072138, 41572088; Major Science and Technology Projects of China National Petroleum Corporation Limited, No. 2021ZZ10; "Million and Ten Million" Major Project in Science and Technology, Heilongjiang Province, No. 2020ZX05A01

Corresponding author: ZHONG JianHua, E-mail: 957576033@qq.com