

# 咸水湖泊细粒重力流沉积及油气意义： 以柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段为例\*

王小妮<sup>1</sup> 杨智<sup>1</sup> 冯有良<sup>1</sup> 蒋文琦<sup>3</sup> 龙国徽<sup>2</sup> 伍坤宇<sup>2</sup>  
张洪<sup>1</sup> 侯鸣秋<sup>1</sup> 邢浩婷<sup>2</sup> 张天舒<sup>1</sup> 刘畅<sup>1</sup> 魏琪钊<sup>1</sup>

1 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2 中国石油青海油田分公司勘探开发研究院, 甘肃敦煌 736200

3 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

**摘要** 细粒重力流可以将滨浅湖的碎屑物质和有机质搬运至半深湖—深湖, 形成沉积粒度小于 0.0625 mm 的细粒重力流沉积物, 是深湖环境的重要搬运和沉积作用之一。柴达木盆地英雄岭地区西部下干柴沟组上段 ( $E_3^2$ ) 为咸水的半深湖—深湖环境, 发育了湖底扇—深湖化学沉淀碳酸盐岩沉积体系。研究表明下干柴沟组上段发育有 7 大类岩相: 云/灰质泥岩、粉砂质泥岩、白云岩、泥质白云岩、泥质粉砂岩、细粉砂岩以及粗粉砂岩岩相, 形成了 7 类细粒沉积岩相组合: (1) 泥流—泥质湍流—安静水体沉积岩相组合 (LA1); (2) 半深湖化学沉淀与事件沉积互层岩相组合 (LA2); (3) 滑塌—细粒碎屑流—泥流沉积岩相组合 (LA3); (4) 细粒异重流沉积岩相组合 (LA4); (5) 细粒浓缩密度流沉积岩相组合 (LA5); (6) 细粒碎屑流—细粒过渡流—细粒浊流沉积岩相组合 (LA6); (7) 细粒浓缩密度流—细粒湍流—细粒过渡流—泥流沉积岩相组合 (LA7)。细粒重力流作用及其相互转化, 形成了多样的岩相组合, 反映了复杂的沉积作用过程。湖盆细粒沉积物的形成和分布受古气候、盆地构造及湖平面变化的影响。在整体干旱的气候背景下, 气候湿润湖平面上升有利于优质烃源岩和细粒异重流的发育; 气候干热湖平面下降则有利于发育化学沉积的碳酸盐岩层和滑塌引起的细粒重力流沉积。咸水湖盆半深湖—深湖环境发育的代表泥流—泥质湍流—安静水体沉积的岩相组合 (LA1) 和化学沉淀碳酸盐岩与事件沉积碳酸盐岩互层的岩相组合 (LA2) 是优质的“甜点段”。

**关键词** 细粒重力流沉积 咸化湖泊 页岩油 下干柴沟组上段 英雄岭地区 柴达木盆地

**第一作者简介** 王小妮, 女, 1998 年生, 硕士研究生, 从事非常规油气地质研究。E-mail: wxnriped@163.com。

**通讯作者简介** 杨智, 男, 1980 年生, 博士, 教授级高级工程师, 从事非常规油气地质、常规油气风险勘探等研究。E-mail: yangzhi2009@petroChina.com.cn。

中图分类号: P512.32 文献标志码: A

## Fine-grained gravity flow deposits and their petroleum significance in saline lacustrine basins: a case study from the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area of Qaidam Basin, China

\* 中国石油天然气集团“十四五”前瞻性基础性重大科技项目“页岩油勘探开发理论技术研究”(编号: 2021DJ18)和“陆相页岩细粒沉积源储特征与页岩油有利区段评价研究”(编号: 2021DJ1802)联合资助。[Co-funded by the PetroChina's Shale Oil Major Science and Technology Project (No. 2021DJ18), and PetroChina's Reservoir Characteristics and Favorable Zone Assessments of the Continental Shale Fine-grained Sediments" (No. 2021DJ1802)]

收稿日期: 2023-07-17 改回日期: 2023-11-02

WANG Xiaoni<sup>1</sup> YANG Zhi<sup>1</sup> FENG Youliang<sup>1</sup> JIANG Wenqi<sup>3</sup> LONG Guohui<sup>2</sup> WU Kunyu<sup>2</sup>  
ZHANG Hong<sup>1</sup> HOU Mingqiu<sup>1</sup> XING Haoting<sup>2</sup> ZHANG Tianshu<sup>1</sup> LIU Chang<sup>1</sup> WEI Qizhao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

<sup>2</sup> Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company,  
Gansu Dunhuang 736200, China

<sup>3</sup> School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract** Fine-grained gravity flows can transport clastic sediments and particulate organic matter from shallow water to deep lakes, forming distinctive sediments finer than 0.0625 mm. During the depositional period of the upper section of the Lower Ganchaigou Formation ( $E_3^2$ ), a sub-lacustrine fan system and chemically precipitated carbonates developed in a saline semi-deep to deep lake in the Yingxiongling area of the Qaidam Basin. Seven types of lithofacies associations (LA) are identified in the fan fringe sub-environment on the basis of core observations: LA1: association of mud flow, mud turbulent flow, and suspension fallout deposits in quiet water; LA2: association of chemical deposits interbedded with event deposits in semi-deep lake; LA3: association of slump, fine-grained debris flow, and mud flow deposits; LA4: fine-grained hyperpycnal flow deposits; LA5: fine-grained concentrated density flow deposits; LA6: association of fine-grained debris flow, fine-grained transitional flow, and fine-grained turbidity current deposits; LA7: association of fine-grained concentrated density flow, fine-grained turbulent flow, fine-grained transitional flow, and mud flow deposits. These lithofacies associations are attributed to various fine-grained gravity flows and their transformations which are suggestive of complex flow processes. Our study also shows that the fine-grained deposits are influenced by paleoclimate, tectonic activity, and lake-level fluctuations. In an arid environment and during humid periods, lake-level rise promotes the formation of favorable source rocks and fine-grained gravity flow deposits. Conversely, in times of drought, lake-level decrease is more conducive to the development of chemically precipitated carbonates and slump-derived fine-grained gravity flow deposits. Mud flow, mud turbulent flow, and fallout deposits in quiet water (LA1) and chemical deposits interbedded with event deposits (LA2) are the most favorable “sweet sections” in the saline semi-deep to deep lake.

**Key words** fine-grained gravity flow deposits, salinized lacustrine basin, shale oil, the upper section of Paleogene Lower Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam basin

**About the first author** WANG Xiaoni, born in 1998, master, is engaged in unconventional oil and gas geology research. E-mail: wxnriped@163.com.

**About the corresponding author** YANG Zhi, born in 1980, doctor, professor of the Engineering of Research Institute of Exploration and Development, PetroChina, is engaged in unconventional petroleum geology and risk exploration of unconventional oil and gas. E-mail: yangzhi2009@petroChina.com.cn.

柴达木盆地作为目前青藏高原上唯一正在进行商业性油气勘探开发的盆地,发育全球性的独具特色的巨厚高原山地式咸化湖相页岩油,其勘探和开发历程具有重大意义(邹才能等,2022b,2023a,2023b;李国欣等,2022a,2022b,2022c,2023)。古近系为该盆地重点油气勘探层位,近期已获得油气勘探重大突破,展现出良好

的勘探潜力和开发前景(龙国徽等,2021;李国欣等,2022b)。下干柴沟组沉积时期湖盆范围扩大,沉积了一套数千米厚的地层;英西地区则以半深湖—深湖相沉积为主,碳酸盐岩、泥岩和粉砂岩类高频互层,为典型的混源沉积(李国欣等,2022c)。前人的研究重点在沉积相的识别划分(纪友亮等,2017;吴因业等,2019;刘占国

等, 2021)、岩盐成因及演化模式(夏志远等, 2017; 张世铭等, 2022; 朱超等, 2022)、源岩特征(张斌等, 2018; 舒豫川等, 2021)、储集层类型及评价(袁剑英等, 2016; 杜江民等, 2020; 崔俊等, 2022; 夏青松等, 2023)等方面。Song 等(2022)对柴西地区新近系和古近系的细粒沉积做了系统的分析, 认为该套细粒沉积是由季风引起的冬季风暴所致。然而这种认识不够全面, 把深湖区的沉积物一概视作浊流的作用产物, 忽视了其中沉积物浓度变化、微观结构所反映的沉积过程。细粒沉积作为深湖环境最重要的沉积方式之一, 能够将浅水的碎屑物质和有机质搬运至深湖, 形成非常重要的非常规油气资源(黎茂稳等, 2020; 姜在兴等, 2022; 邹才能等, 2022a, 2023a; 冯有良等, 2023)。然而受湖盆水体的局限性和古地貌的复杂性影响, 前人对下干柴沟组上段的细粒物质的沉积过程、控制因素以及咸化环境对页岩油甜点层发育的影响的研究还不够深入, 制约了研究区页岩油的勘探和开发(Yang *et al.*, 2020b; 邹才能等, 2022a, 2023c)。本研究利用中国石油青海油田分公司最新获取的岩心(柴平 2 井、柴 2-4 井、柴 12 井、柴 14 井、柴 906 井以及柴 908 井), 开展厘米级岩心描述(约 350 m)与系统取样(共计 214 块), 利用薄片鉴定、矿物 X 射线衍射分析、主量元素、微量元素以及碳氧同位素等分析手段对下干柴沟组上段页岩展开研究, 另选取了 4 块典型样品做扫描电镜矿物定量评价(QEMSCAN), 描述咸水湖盆细粒重力流及化学沉淀的沉积组合特征, 构建沉积模式, 探讨咸水湖盆细粒重力流和化学沉积作用过程是如何影响页岩油“甜点”发育的, 以期油田下一步勘探开发提供建议。

## 1 地质背景

### 1.1 构造

柴达木盆地地处青藏高原, 周缘被山脉围绕, 北接祁连山, 南邻昆仑山, 西部被阿尔金断裂阻挡, 东部为鄂拉山, 是青海省最大的山间盆地, 属于封闭内陆断陷盆地(图 1)。

柴达木盆地受到印度板块、西伯利亚板块、太平洋板块三大板块的共同影响(吕宝凤等,

2011), 先后经历了古近系挤压断陷和新近系挤压反转构造演化, 同时也受祁连山构造带、阿尔金构造带和东昆仑构造带的共同控制, 沉积了巨厚的新生代地层(潘家伟等, 2015)。盆地在北西、北东向断裂的控制作用下呈现“南北分带、东西分段”的特征(袁剑英等, 2016), 具有隆凹相间的构造格局。

按照基底性质、地层展布以及油气分布等特征, 可将盆地划分 5 个一级构造单元: 柴西拗陷、柴北拗陷、阿尔金山前带、柴东拗陷以及德令哈隆起。柴西拗陷内可分为昆北构造带、英雄岭构造带以及南翼山—碱石山构造带; 英雄岭地区地层褶皱强烈, 具有隆凹相间的古地貌, 此次研究区位于其西部, 与阿尔金山接壤(图 1)。

### 1.2 层序地层

英西地区新生界发育 7 套地层(图 1), 自下而上分别是路乐河组( $E_{1+2}$ ), 下干柴沟组、包括下干柴沟组下段( $E_1^1$ )和下干柴沟组上段( $E_2^1$ ), 上干柴沟组( $N_1$ ), 下油砂山组( $N_2^1$ ), 上油砂山组( $N_2^2$ ), 狮子沟组( $N_3^1$ )以及七个泉组( $Q_{1+2}$ )。下干柴沟组上段沉积期沉积中心位于茫崖—一里坪一带, 湖盆范围达到最大, 发育了一套数千米厚的湖相沉积。

根据岩相组合、测井曲线以及主、微量元素等相关特征, 可在柴西英雄岭地区古近系下干柴沟组上段识别出 6 个三级 T-R 层序, 其中在工区内柴 2-4 井上可识别出 6 个四级层序, 即 6 个四级 T-R 旋回( $Sq^{4th}$ )(图 2)。 $Sq^{4th}1$  表现为基本对称的缓慢湖侵—缓慢湖退的过程;  $Sq^{4th}2-Sq^{4th}6$  都是显著的湖退过程, 具有快速湖侵—缓慢湖退的不对称特征。湖侵过程中湖平面持续上升, 发育了多套厚层泥岩、云灰质泥岩, 并伴随有以细粉砂和粉砂为主的细粒异重流沉积, 在湖平面上升最高时其有机质含量最高, 是研究区的主要烃源岩, 以深湖—半深湖亚相为主; 湖退时期湖平面下降, 湖水盐度持续上升, 发育了以大套泥质云灰岩、云灰岩为主的白云质斜坡沉积和以细粉砂岩、粉砂岩为主的湖底扇沉积, 沉积相主要为半深湖—浅湖亚相, 其中  $Sq^{4th}6$  时期湖水咸化程度最高, 出现了大量的石膏斑点, 代表一个高盐度的盐湖沉积环境。

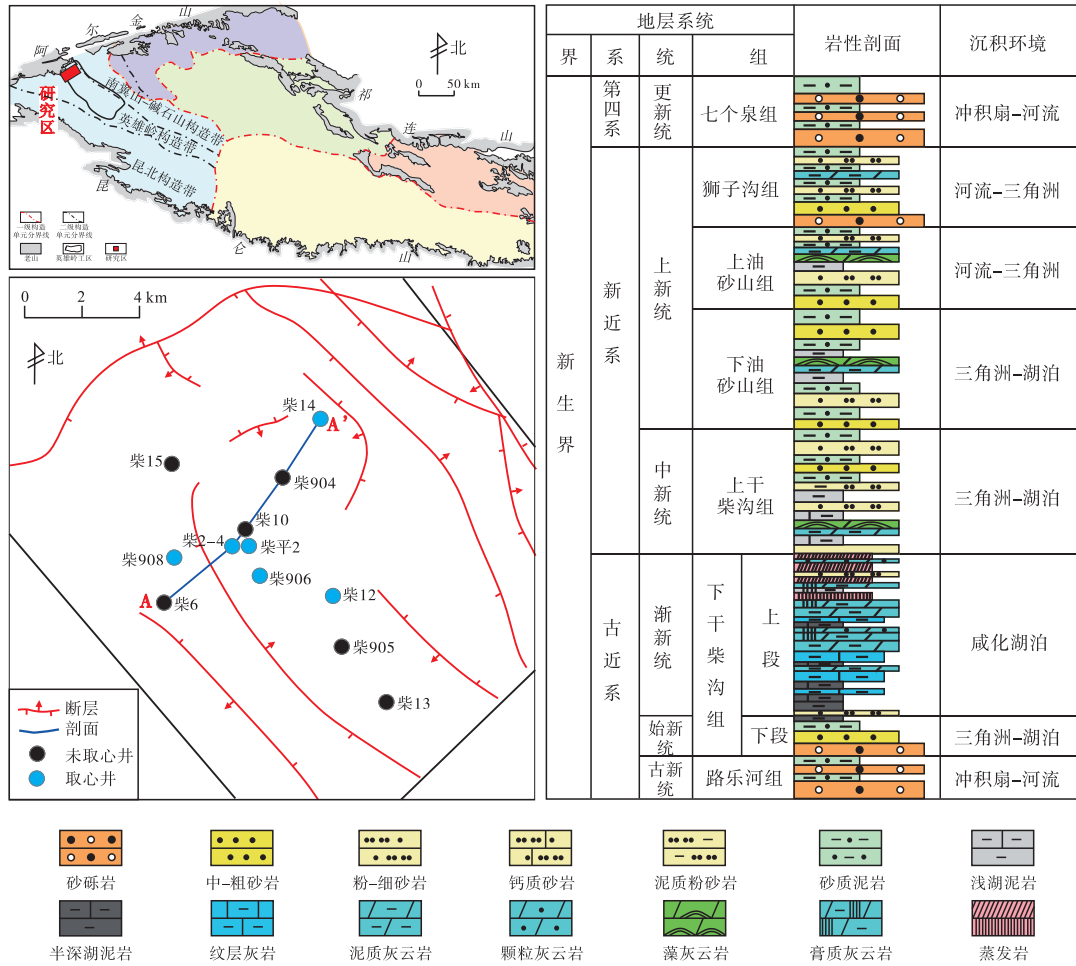


图 1 柴达木盆地英西地区位置与地层综合柱状图 (据李国欣等, 2022b; 刘占国等, 2021; 有修改)

Fig. 1 Location and comprehensive stratigraphic column of Yingxi area, Qaidam Basin

(modified from Li *et al.*, 2022b; Liu *et al.*, 2021)

## 2 岩相组合、沉积过程和环境解释

### 2.1 岩性特征

通过薄片观察以及矿物 X 射线衍射分析, 下干柴沟组上段沉积物矿物成分主要为石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、文石、黏土矿物, 含有少量黄铁矿和石膏, 其中长英质含量平均为 36.15%, 黏土矿物含量平均为 23.20%, 云灰质含量平均为 35.54%, 黄铁矿含量平均为 2.88%, 石膏含量平均为 2.22% (图 3)。以长石+石英、黏土矿物以及碳酸盐矿物为三端元投点分析, 表明研究区沉积物岩性多集中在内三角区域 (图 3), 即: 含泥质粉砂质碳酸盐岩、含灰/云质粉砂质碳酸盐岩、含灰/云质泥质粉砂岩以及含泥质灰/云质粉砂岩, 为典型的混源沉积。

### 2.2 岩相组合及其沉积过程

根据对柴平 2 井、柴 2-4 井、柴 12 井、柴 14 井、柴 906 井、柴 908 井的岩心观察, 在下干柴沟组上段识别出了 7 大类岩相组合 (LA), 用以解释沉积过程和沉积环境。本研究细粒重力流分类参考了 Mulder 和 Alexander (2001), Bass 等 (2009, 2011) 以及冯有良等 (2023) 的分类方案。

Mulder 和 Alexander (2001) 提出了一种新的分类方案, 该方案的分类原则基于沉积物浓度百分比由低到高将流体划分为: 浊流 (Turbidity currents)、浓缩密度流 (Concentrated density flows)、高浓缩密度流 (Hyperconcentrated density flows) 以及黏性流 (Cohesive flows); 根据单个流体类型中主要颗粒的支撑机制和速度剖面的差异, 进行进一



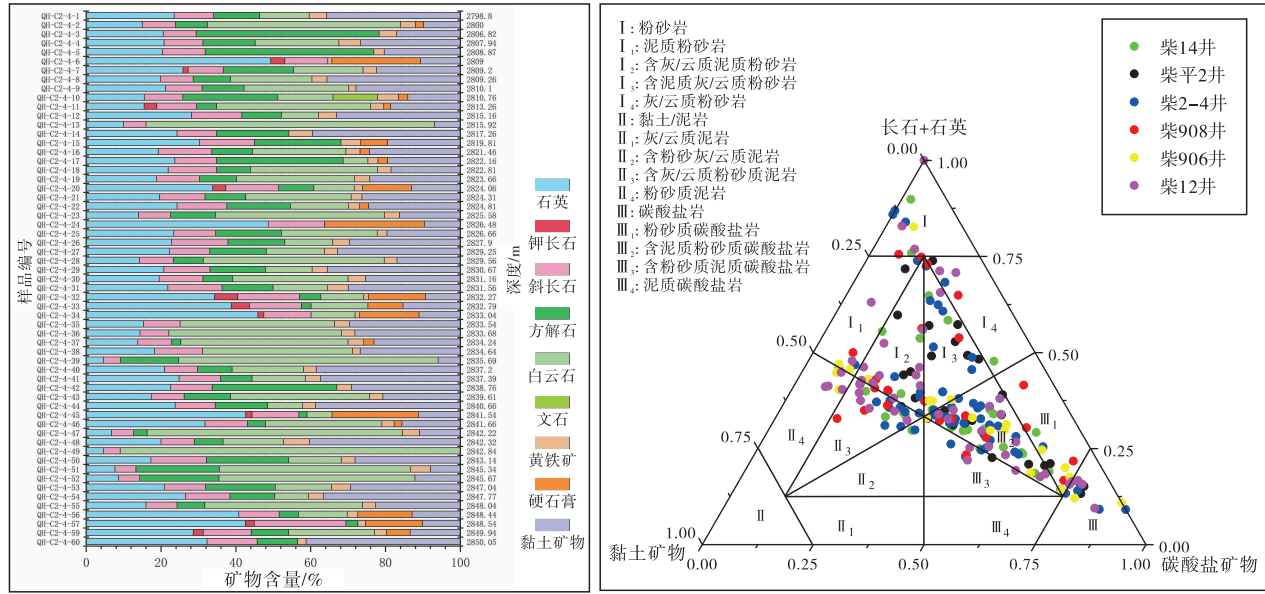


图 3 柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段矿物组成和岩性分类

Fig. 3 Mineral components and lithology classification of the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area of Qaidam Basin

步精细的划分，将浊流划分为异重流（准稳态浊流）、浪涌状浊流以及脉冲浊流，将黏性流按照砾石含量（5%）划分为碎屑流和泥流。在此次研究中，岩心样品上可见异重流、浓缩密度流、碎屑流和泥流，各流体类型的特征见表 1。

另外，在 Mulder 和 Alexander（2001）划分方案中并不包括过渡流体类型。故针对这一现象，采用 Bass 等（2009，2011）提出的过渡流分类方案，细分湍流流体随着黏土矿物含量的增加、不断向黏性流体转化过程中的几类流体类型，包括湍流（浊流）、湍流增强过渡流、下部过渡塞流、上部过渡塞流以及准层状塞流（本质上同泥流）。此次研究

中过渡流体类型发育较为全面，具体特征见表 2。

1) LA1: 泥流—泥质湍流—安静水体沉积岩相组合。该岩相组合由含有机质和粉砂屑的准层状粉砂质泥岩相（SSM1）、含有机质块状云灰质泥岩相（M2）以及富含有机质纹层状云灰质泥岩相（M1）组成(图 4-A；图 5-A)。SSM1 以泥屑和粉砂屑顺层分布为特征，可以解释为泥流沉积（Mulder and Alexander, 2001）；M2 以块状沉积为特征，可以解释为前三角洲滑塌或洪泛事件产生的湍流流体，使得泥质沉积物快速沉降形成（Feng *et al.*, 2021）；M1 以发育水平纹层为特征，可以解释为深湖安静水体静水沉降。因此该岩相组合代表了泥

表 1 柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段流体类型特征（据 Mulder and Alexander, 2001；有修改）

Table 1 Flow characteristics of the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area, Qaidam Basin (modified form Mulder and Alexander, 2001)

流体类型	特征描述
异重流	(1) 表现为明显(多个)的正、反递变层理的旋回组合,岩性以含砾粗粉砂岩为主,中间或可见冲刷面;(2) 粒度向上变细的正递变指示了流体能量的衰减,向上变粗的反递变则指示了流体能量的增强;(3) 异重流可能是由于洪泛事件产生的,在一个低量级洪水事件中,最大流量应大于连续产生异重流的临界流量
浓缩密度流	(1) 可见顺层或杂乱分布的撕裂屑,指示剪切层的存在;(2) 底部可见冲刷面,反映湍流流体对底床的侵蚀;(3) 偶尔可见火焰构造,指示沉积时的高含水量以及高沉积速率
碎屑流	(1) 砂质含量高,一般包括5%以上的砾石,以粉砂和泥质粉砂为主;(2) 可见大量的砂屑、泥屑顺层或杂乱分布,以及大量的软沉积物变形构造,其中混杂分布是由于流体对底床的侵蚀所产生的碎屑直接混入沉积物之中,而顺层分布则指示了剪切层的存在,变形构造是黏性流体运动的结果
泥流	(1) 砂质含量较低,但泥质含量高于砂质含量,以粉砂质泥岩为主;(2) 可见砂屑、泥屑顺层分布的特征,存在准层状构造和包卷层理

表 2 柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段过渡流流体类型特征 (据 Bass *et al.*, 2009, 2011; 有修改)

Table 2 Transition flow characteristics of the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area, Qaidam Basin  
(modified from Bass *et al.*, 2009, 2011)

流体类型	特征
湍流增强过渡流	(1) 仅少量黏土矿物混入湍流流体中; (2) 以大尺度沙纹层理为特征; (3) 岩性以粉砂质泥岩为主
下部过渡塞流	(1) 黏土含量较高, 优先于近水面形成, 并随着黏土矿物含量的增加向下部发展; (2) 以上下等厚的双层结构为特征, 下部为大型波状层理的粉砂岩段, 上部为粉砂质泥岩或泥岩段, 中间或可见薄层砂质与泥质明暗相间的条带
上部过渡塞流	(1) 黏土矿物含量进一步增加, 上部塞流段不断变厚; (2) 出现平行层理或砂泥互层现象, 发育低幅度波状层理, 岩性以粉砂质泥岩或含粉砂质泥岩为主

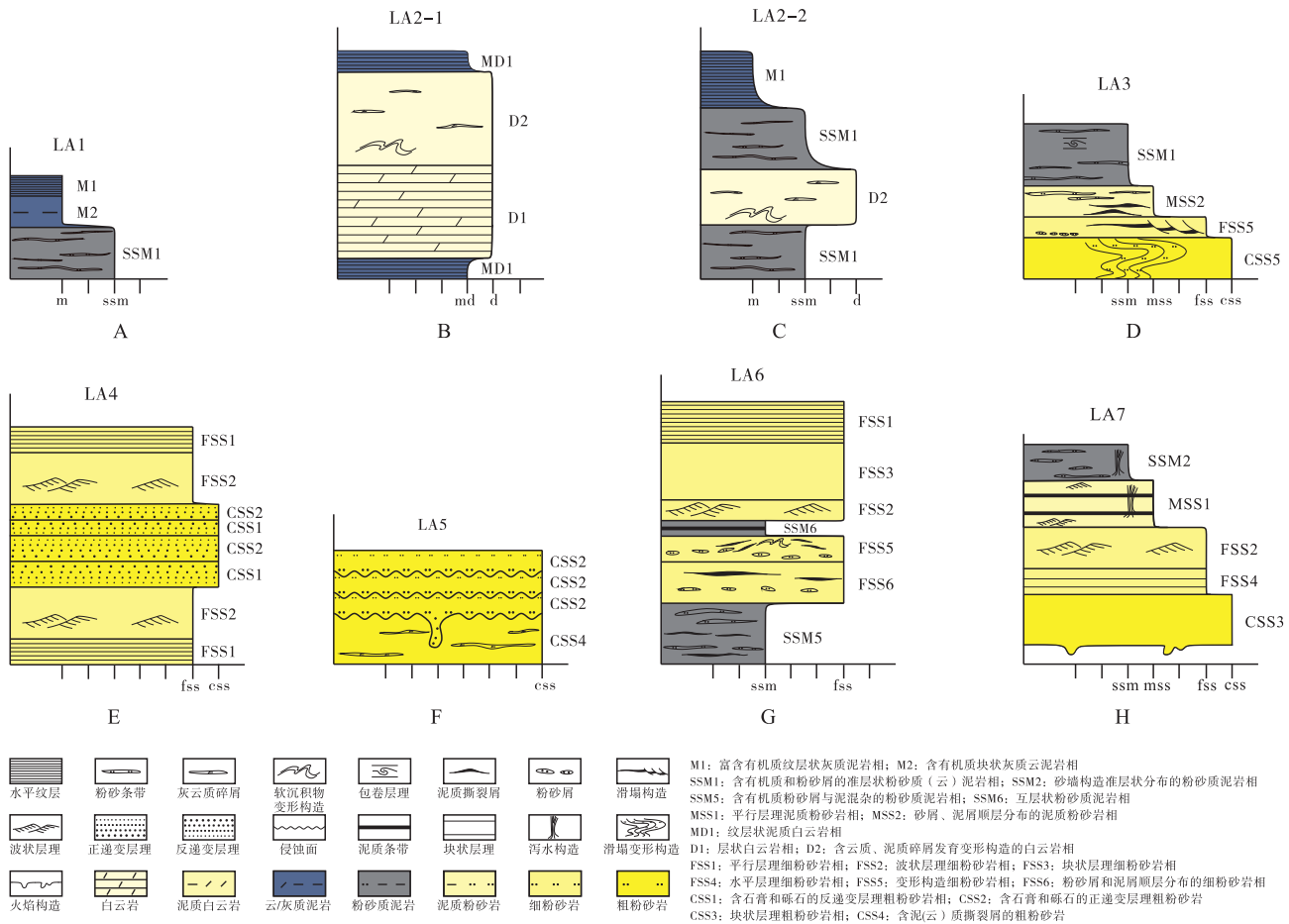


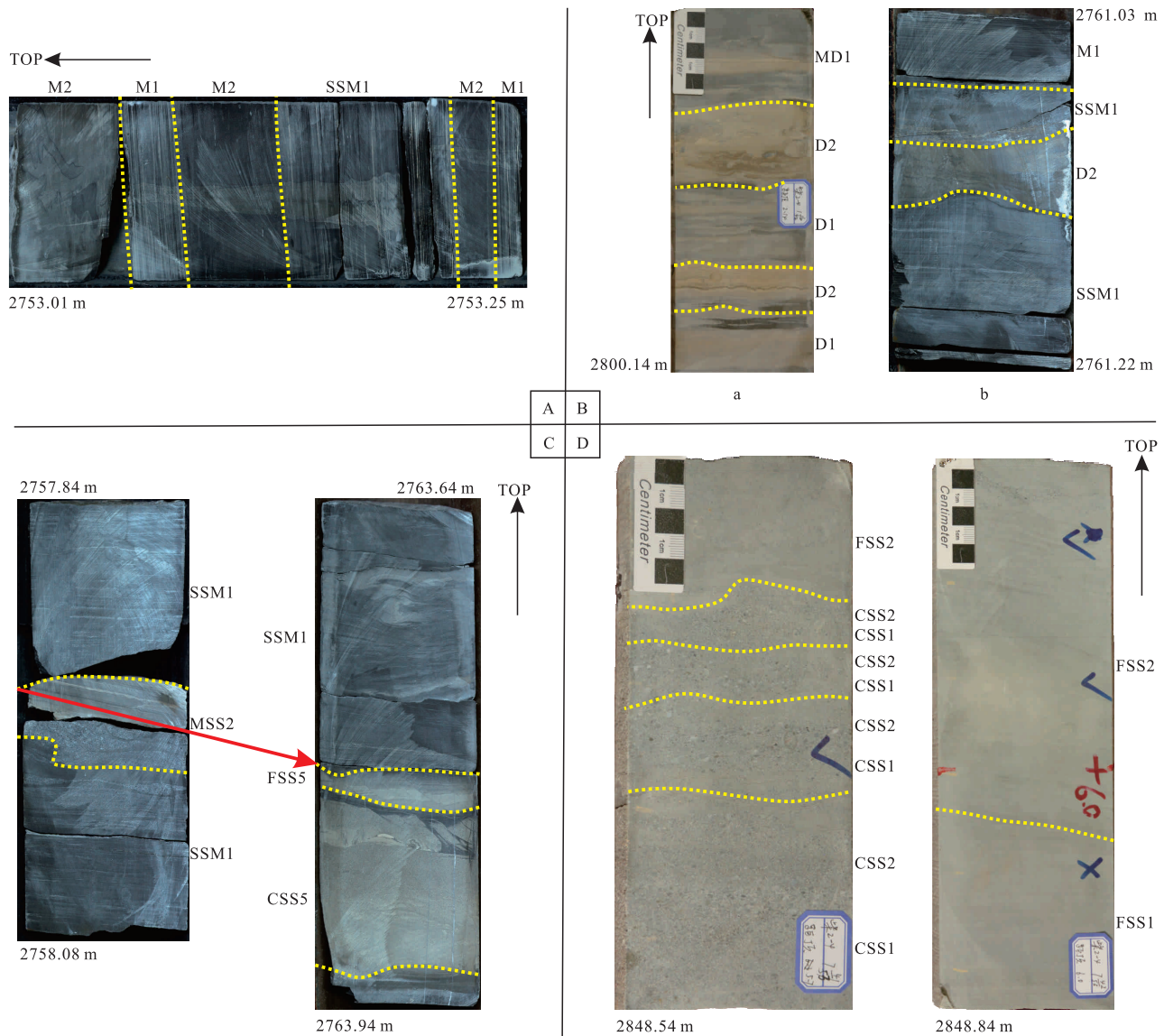
图 4 柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段细粒重力流沉积岩相组合示意图

Fig. 4 Lithofacies associations of fine-grained gravity flows of the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area, Qaidam Basin

流在运动过程中, 随着环境水的稀释, 逐渐由黏性流体向非黏性流体转变 (Sumner *et al.*, 2009), 整体沉积后在深湖中被悬浮物质静水沉降所覆盖。

2) LA2: 半深湖化学沉淀与事件沉积互层岩相组合。该岩相组合根据其沉积特征可进一步划分为 2 个岩相组合亚类: LA2-1 和 LA2-2。LA2-1 由纹层状泥质白云岩相 (MD1)、层状白云岩相 (D1) 以及含云质、泥质碎屑且发育变形构造的白

云岩相 (D2) 组成 (图 4-B; 图 5-B-a)。LA2-2 由含有机质和粉砂屑的准层状粉砂质泥岩相 (SSM1)、富含有机质纹层状云灰质泥岩相 (M1) 以及含云质、泥质碎屑且发育变形构造的白云岩相 (D2) 组成 (图 4-C; 图 5-B-b)。纹层状、层状的白云岩相 (MD1 以及 D1) 均可解释为半深湖的化学沉积。D2 以含云质、泥质碎屑、发育变形构造为特征, 可以解释为滑塌导致的内碎屑流侵蚀云灰



A—泥流—泥质湍流—安静水体沉积岩相，柴平 2 井，2753.01~2753.25 m；B—半深湖化学沉淀与事件沉积互层岩相，a—LA2-1，柴 2-4 井，2800.14 m；b—LA2-2，柴平 2 井，2761.03~2761.22 m；C—滑塌—细粒碎屑流—泥流沉积岩相，左—柴平 2 井，2757.84~2758.08 m；右—2763.64~2763.94 m；D—细粒异重流沉积岩相，左—柴 2-4 井，2848.54 m；右—柴 2-4 井，2848.84 m（右）。M1：富含有机质纹层状灰质泥岩相，M2：含有机质块状灰质泥岩相；SSM1：含有机质和粉砂屑的准层状粉砂质泥岩相；D1：层状白云岩相；D2：含云质、泥质碎屑发育变形构造的白云岩相；MD1：纹层状泥质白云岩相；MSS2：砂屑、泥屑顺层分布的泥质粉砂岩相；FSS1：平行层理细粉砂岩相；FSS2：波状层理细粉砂岩相；FSS5：变形构造细粉砂岩相；CSS1：含石膏和砾石的反递变层理粗粉砂岩相；CSS2：含石膏和砾石的正递变层理粗粉砂岩相；CSS5：含石膏变形构造白云质粗粉砂岩相

图 5 柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段沉积岩相照片（一）

Fig. 5 Lithofacies photos of the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area, Qaidam Basin ( I )

质的底床，产生云质、泥质的撕裂屑以及变形构造。撕裂屑的存在表明存在近底床的剪切力（Feng *et al.*, 2021）。SSM1 以泥屑和粉砂屑顺层分布为特征，可以解释为泥流沉积（Mulder and Alexander, 2001）；M1 以发育水平纹层为特征，可以解释为深湖水体静水沉降。该岩相组合反映了深湖区的化

学沉淀之上被 1 次或多次滑塌事件沉积所产生的沉积物覆盖的过程。

3) LA3：滑塌—细粒碎屑流—泥流沉积岩相组合。该岩相组合由含石膏变形构造白云质粗粉砂岩相（CSS5）、变形构造细粉砂岩相（FSS5）、砂屑、泥屑顺层分布的泥质粉砂岩相（MSS2）、以及

含有机质和粉砂屑的准层状粉砂质泥岩相 (SSM1) 组成(图 4-D; 图 5-C)。岩相 CSS5 和 FSS5 以滑塌、滑塌变形构造为特征, 可以解释为滑塌沉积 (Shanmugam, 2000), 岩相 MSS2 以砂屑、泥屑顺层分布为特征, 岩性以泥质粉砂岩为主, 可以解释为细粒碎屑流沉积, 岩相 SSM1 虽也存在砂屑、泥屑顺层分布的特征, 但其沉积物中泥质含量高于砂质含量, 且存在准层状的构造, 因此解释为泥流沉积 (Mulder and Alexander, 2001)。该岩相组合反映了斜坡区发生滑塌事件后, 流体不断侵蚀底床, 产生的砂屑、泥屑混入沉积物中, 随着砂质沉积的不断分离以及环境水的稀释, 泥质浓度逐渐升高, 使得细粒碎屑流逐渐转化为泥流的沉积过程 (Sumner *et al.*, 2009)。

4) LA4: 细粒异重流沉积岩相组合。该岩相组合由平行层理细粉砂岩相 (FSS1)、波状层理细粉砂岩相 (FSS2)、含石膏和砾石的正递变层理粗粉砂岩相 (CSS2) 以及含石膏和砾石的反递变层理粗粉砂岩相 (CSS1) 组成(图 4-E; 图 5-D)。岩相 FSS1 以平行层理为特征, 岩相 FSS2 以波状层理为特征, 岩相 CSS2 与 CSS1 组合重复多次出现, 呈现为正反递变的旋回沉积, 中间以冲刷面间隔, 这套岩相组合可以解释为细粒异重流沉积 (Lamb and Mohrig, 2009)。粒度向上变细的正递变指示了流体能量的衰减, 向上变粗的反递变则指示了流体能量的增强。异重流可能是由于洪泛事件产生的, 在一个低量级洪水事件中, 最大流量应大于连续产生异重流的临界流量, 从而形成异重流; 一个完整的异重流应该包括一个正递变和一个反递变 (Mulder *et al.*, 2003)。该岩相组合反映了 1 次或多次洪泛事件导致的细粒异重流沉积, 其持续时间较长且不断被环境水稀释, 常存在于水道远端或边缘位置。

5) LA5: 细粒浓缩密度流沉积岩相组合。该岩相组合由含泥(云)质撕裂屑的粗粉砂岩相 (CSS4) 以及多个含石膏和砾石的正递变层理粗粉砂岩相 (CSS2) 组成(图 4-F; 图 6-A)。岩相 CSS4 以顺层分布的泥(云)质撕裂屑为特征, 指示剪切层的存在, (泥)云质的撕裂屑可能是深湖环境中的软沉积物滑塌进入湍流形成的内碎屑。岩相 CSS2 为一个向上变细的正递变, 可以解释为湍流流体中存在重力分异的过程, 是湍流流体逐渐减

速的标志; 底部出现冲刷面可以解释为湍流流体对底床的侵蚀。该岩相组合反映细粒浓缩密度流的沉积过程 (Mulder and Alexander, 2001), 该类流体对底床有侵蚀能力, 产生的碎屑混入沉积物中, 并在剪切力的作用下呈现顺层分布的特征, 随着距离的增加, 流速减缓后便出现向上变细的正递变 (Talling *et al.*, 2012)。

6) LA6: 细粒碎屑流—细粒过渡流—细粒浊流沉积岩相组合。该岩相组合由含有机质粉砂屑与泥混杂的粉砂质泥岩相 (SSM5)、粉砂屑和泥屑顺层分布的细粉砂岩相 (FSS6)、变形构造细粉砂岩相 (FSS5)、互层状粉砂质泥岩相 (SSM6)、波状层理细粉砂岩相 (FSS2)、块状层理细粉砂岩相 (FSS3) 以及平行层理细粉砂岩相 (FSS1) 组成(图 4-G; 图 6-B)。粉砂屑与泥屑顺层分布、混杂分布以及变形构造均可解释为细粒碎屑流沉积 (Mulder and Alexander, 2001), 混杂分布是由于流体对底床的侵蚀所产生的碎屑直接混入沉积物之中, 而顺层分布则指示了剪切层的存在, 变形构造是黏性流体运动的结果。岩相 SSM6 以互层的粉砂质泥岩为特征, 可以解释为上部过渡塞流向下部过渡塞流的过渡 (Baas *et al.*, 2009, 2021); 岩相 FSS2 以波状层理为特征, 可以解释为湍流增强过渡流; 这 2 个岩相均属于细粒过渡流 (Baas *et al.*, 2009, 2021)。岩相 FSS3 以块状层理为特征, 表明湍流流体中粉砂质悬浮物的快速沉积, 岩相 FSS1 则以平行层理为特征, 指示湍流流体能量的进一步衰减; 这 2 个岩相均可以解释为细粒湍流(浊流)沉积 (Baas *et al.*, 2009, 2021)。该岩相组合反映了黏性流在运动过程中由于环境水的稀释向非黏性流转化的过程。

7) LA7: 细粒浓缩密度流—细粒湍流—细粒过渡流—泥流沉积岩相组合。该岩相组合由块状层理粗粉砂岩相 (CSS3)、水平层理细粉砂岩相 (FSS4)、波状层理细粉砂岩相 (FSS2)、平行层理泥质粉砂岩相 (MSS1) 以及砂墙构造准层状分布的粉砂质泥岩相 (SSM2) 组成(图 4-H; 图 6-C)。岩相 CSS3 以块状层理、分选良好的粗粉砂岩为特征, 指示湍流流体中粉砂质悬浮物的快速沉积 (Mulder and Alexander, 2001); 该岩相底部出现的火焰构造可以指示沉积时的高含水量以及高沉积速率。岩相 FSS4 的水平层理可以解

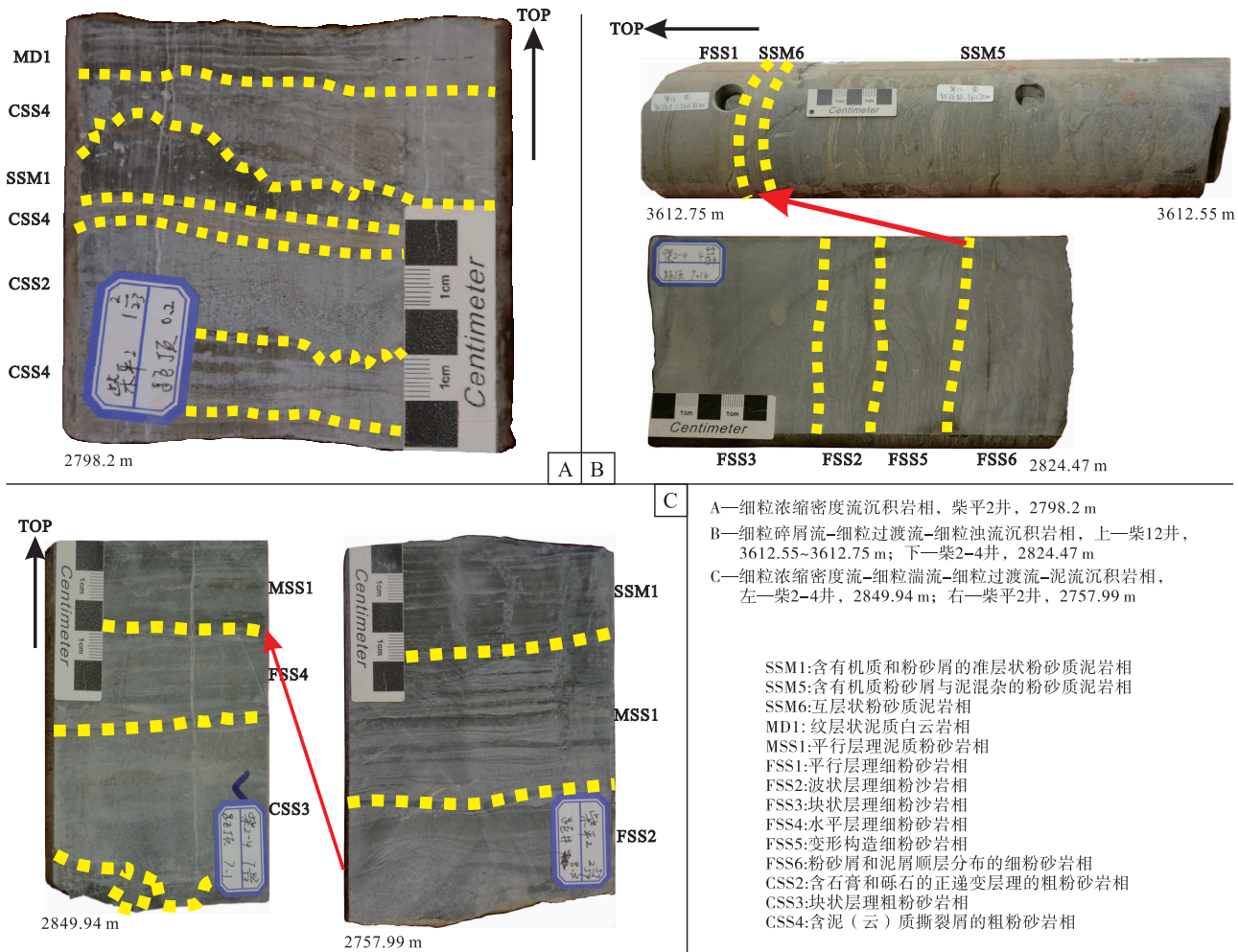


图 6 柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段沉积岩相照片 (二)

Fig. 6 Lithofacies photos of the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area, Qaidam Basin ( II )

释为细粒湍流沉积。岩相 FSS2 的波状层理是过渡流的标志，可以解释为湍流增强过渡流 (Baas *et al.*, 2009, 2021)；岩相 MSS1 以平行层理的细粉砂岩为特征，可以解释为下部过渡塞流—上部过渡塞流 (Baas *et al.*, 2009, 2021)；从 FSS2 到 MSS1 呈现出泥质含量逐渐增多的现象，均属于细粒过渡流的沉积。岩相 SSM2 以砂墙构造、准层状为特征，岩性以泥岩为主，可以解释为泥流沉积。该岩相组合反映了细粒浓缩密度流以及上部的湍流在运动过程中不断侵蚀底床，产生的泥质碎屑混入沉积物导致了湍流的调制 (Houghton *et al.*, 2009; Sumner *et al.*, 2009)，使其向细粒过渡流转化，随着泥质物质的不断加入、砂质物质的不断沉淀出去，细粒过渡流进一步向泥流转化的过程。

### 3 英西地区下干柴沟组上段沉积环境分析

此次研究通过对主量元素、微量元素、碳氧同位素进行分析，结合岩相、古生物等特征，明确下干柴沟组上段沉积期的古环境，以便进一步探讨该区细粒沉积物形成的主控因素。

#### 3.1 数据有效性检验

经分析发现，研究区样品的 Mn/Sr 值在 0.036~4.310 之间，平均值为 0.986，只有 3 个数据超过了 3 (周传明等, 1997)；另外研究区的云灰岩或泥质云灰岩均为泥晶颗粒，为典型的准同生交代成因 (袁剑英等, 2015)，未见明显的重结晶颗粒，说明研究区样品基本上未受到较大的成岩作用的影响。

### 3.2 古环境分析

1) 古气候：利用 Epstein 等 (1953) 提出的利用碳、氧同位素值计算碳酸盐岩沉积物形成的温度，目的层沉积期温度为 3.8~66.5℃，平均为 29.6℃，说明气候变化频繁；利用 Sr/Cu 值进行分析，按照比值为 1~10 为温湿气候，比值大于 10 为干热气候，结果表明 Sr/Cu 值大于 10 的占比 83.1%。总的来说目的层沉积期整体处于干热的气候之中，但是具有干—湿的旋回变化(表 3；图 2)。

2) 古盐度：利用 Epstein 等 (1953) 提出的利用碳、氧同位素值计算碳酸盐岩沉积物的盐度和 Z 值，结果表明：样品盐度范围为 26.9‰~38.3‰，平均值为 31.1‰，Z 值大于 120 的样品占比 57.5%，反映出咸化的水体环境；利用 Sr/Ba 值进行分析 (王益友等, 1979)，比值小于 0.6 为淡水/微咸水，大于 1 则为咸水，两者之间为半咸水。结果表明：比值小于 0.6 的占比 13%，比值介于 0.6~1 之间的占比 20%，比值大于 1 的样品占比 67%，反映出为半咸水—咸水环境；古生物特征 (李璇, 2020) 显示，下干柴沟组上段地层内发现的介形化石组合：*Eucypris-Ilyocypris errabundis-Austrocypris levis*，指示沉积水体具有半咸化—咸化的特征。整体而言，E<sub>3</sub> 时期整体处于咸水环境，具

有半咸水向咸水的演化趋势(表 3；图 2)。

3) 古水深：古水深变化规律复杂，受控于古气候、古构造和沉积物供给速率等因素的综合作用。利用 La 和 Co 对沉积水体的古水深进行恢复 (吴智平和周瑶琪, 2000)，计算公式为： $H_{古} = 3.05 \times 105 / (VS1.5)$ ，计算结果表明 6 口井的古水深范围大约为 3.5~40 m 左右，平均深度在 18.5 m；但各井之间存在差异，例如柴 2~4 井古水深在 6.1~58.2 m 之间，平均深度为 22.6 m，而柴平 2 井古水深在 3.9~28.8 m 之间，平均深度为 14.3 m (表 3.3)。古水深的恢复说明了沉积时期湖平面变化频繁、波动剧烈；较深的水体反映出半深湖—深湖沉积环境；不同井之间由于古地貌的高低存在水体深度的差异(表 3)。

4) 古氧化还原性：V/(V+Ni) 可以指示氧化—还原性，若比值大于 0.84 则代表一种水体分层较强的厌氧—还原环境，比值在 0.6~0.84 之间则为水体分层不强的厌氧—亚还原环境，比值在 0.46~0.6 之间的为水体分层弱的贫氧—氧化环境 (Hatch and Leventhal, 1992)；结果表明 V/(V+Ni) 平均值为 0.66，其中比值在 0.16~0.6 的占比 13%，比值在 0.6~0.84 的占比 87%，反映出水体为分层较弱的贫氧—亚还原环境。此外，黄铁矿可

表 3 柴西英雄岭地区下干柴沟组上段古环境分析数据

Table 3 Palaeoenvironment analysis data of the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxiang Ling area, western Qaidam

井号	Sr/Ba/%			Sr/Cu/%			V/(V+Ni)/%		
	<0.6	0.6~1	>1	1.3~5	>5	0.46~0.6	0.6~0.84	>0.84	
柴平2	0	11.5	88.5	0	100	0.15	0.85	0	
柴2~4	8	29	63	5	95	0.15	0.85	0	
柴12	23	21	56	4	96	0.15	0.85	0	
柴14	5	30	65	0	100	0.00	1.00	0	
柴906	19	5	76	0	100	0.05	0.95	0	
柴908	24	5	71	5	95	0.24	0.76	0	
整体	13	20	67	5	95	0.13	0.87	0	

井号	盐度/‰		Z 值/%		T/℃		古水深(H <sub>古</sub> )	
	范围	平均值	<120	>120	范围	平均值	范围/m	平均/m
柴平2	29.1~35.6	32.5	0	100	14~46.7	29.4	3.9~28.8	14.3
柴2~4	31.2~38.3	31.6	71	29	3.8~66.5	33.7	6.1~58.2	18.5
柴12	26.9~37.4	30.3	31	69	21.9~30	24.5	3.5~37.3	18.9
柴14	22.8~36.2	30.8	60	40	22.8~36.2	38.3	2.7~29.1	16.7
柴906	26.5~37.6	31.1	57	43	21.9~30	25.9	4.3~34.3	15.8
柴908	29~34.2	30.1	12.5	87.5	21.9~30	25.9	3.7~49.6	18.2
整体	26.9~38.3	31.1	42.5	57.5	3.8~66.5	29.6	2.7~58.2	18.6

以指示还原环境，而在测试样品中，黄铁矿数据变化差异较大（0%~8%），20%的样品未检测出黄铁矿，说明沉积环境的氧化性不强。另外，观察岩心发现，沉积物颜色多为深灰色、灰黑色、灰色等指示还原环境的颜色，少见有棕红色、红色等指示氧化环境的颜色。综合分析认为，目的层沉积期间存在水体分层现象，并伴随水深的改变，存在氧化—还原的变化，整体属于弱氧化—还原的沉积环境（表3；图2）。

### 4 影响细粒重力流沉积物发育的地质因素分析

英雄岭地区在 E<sub>3</sub> 时期的水体属于强蒸发的封闭环境（Song *et al.*, 2022；易定红等，2019），在西部物源不发育、东部物源较远的情况下（龙国徽等，2021），NW-SE 方向发育陡坡型冲积扇—近岸水下扇—湖泊以及扇三角洲—近岸水下扇—湖泊，沉积物粒度较粗，分选较差（王艳清等，2014）；在 SW-NE 方向则发育了缓坡型的曲流河—曲流河三角洲—湖底扇—湖泊沉积体系，沉积物具有粒度细、分选好、泥质含量高等特点（王艳清等，2014）。分析研究区岩心的特征，发现多数为泥岩、云灰岩、细粉砂岩以及粗粉砂岩，沉积物粒度细、分选好、胶结作用强，属于远源的细粒沉积。此外根据稀土元素的特征对比发现，新生代细粒沉积的物源供给主要来自阿尔金山西段以及祁漫

塔格（宋世骏，2022），因此柴西英雄岭古近系属于缓坡型曲流河三角洲—湖底扇—湖泊沉积体系，研究区主要发育湖泊沉积，以半深湖—深湖为主，发育细粒过渡流—泥流沉积、泥流—泥质湍流沉积、泥流—安静水体沉降等细粒重力流沉积，而在湖底扇近端和远端部分均发育有细粒浓缩密度流、细粒碎屑流、细粒过渡流、泥流以及细粒异重流等细粒重力流沉积。与海相盆地不同，湖相盆地受构造和气候的影响因素较多，影响因素包括古气候、湖平面变化、构造活动以及湖泊咸化等。

从剖面来看，柴14井—柴904井—柴10井—柴2-4井—柴6井的连井地层剖面图为 NE-SW 向（图7），其中柴2-4井缺失下段的测井数据。整体岩性以泥岩、云灰质泥岩、云灰岩以及泥质云灰岩为主，夹极薄层的细粉砂岩和粉砂岩。柴2-4井、柴10井以及柴14井的录井显示，发育厚层云灰岩与厚层云灰质泥岩/泥质云灰岩/泥岩互层，以泥流—半深湖化学沉淀沉积、安静水体沉降为主；柴904井发育较多的粉砂岩、砂岩、泥质砂岩层，主要为细粒浓缩密度流—细粒碎屑流—泥流沉积、细粒碎屑流—泥流沉积等；而柴6井地层最厚，碳酸盐岩层单层厚度小但层数多，以薄层频繁互层为特征，岩性以泥岩、云灰岩、细粉砂岩薄层为主，发育有细粒碎屑流—泥流沉积、细粒过渡流—细粒碎屑流—泥流沉积、细粒过渡流—泥流沉积、泥流—泥质湍流沉积等。这一现象反映了柴6井更靠近湖盆中心，属于一个深湖的沉积环境。深水区域一

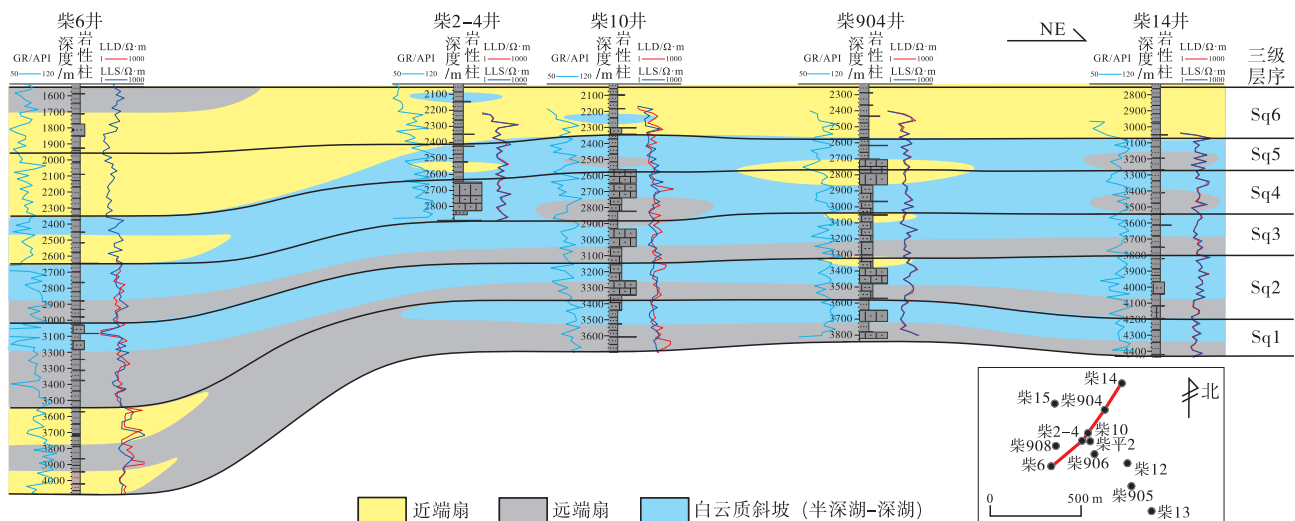


图 7 下干柴沟组上段过柴14井—柴904井—柴10井—柴2-4井—柴6井地层剖面

Fig. 7 Stratigraphic correlation profile of Wells C14-C904-C10-C2-4-C6

方面受物源影响较小，另外一方面气候对该区沉积作用的范围也有限，因此柴 6 井是在湖平面频繁波动的背景下，由细粒重力流作用不断携带滨浅湖的碎屑物质和有机质运抵深湖区域并沉积，与深湖区域内源化学沉淀形成的碳酸盐岩高频互层（陈世悦等，2017；张世铭等，2022）。

#### 4.1 气候变化

下干柴沟组上段沉积期的古气候受控于多个因素，其中青藏高原隆升对中国西北内陆带来的影响最为直接（Hahn and Manabe, 1975；An *et al.*, 2001；Hou *et al.*, 2021a），包括影响大气环流格局以及“冰室效应”（Ruddiman and Kutzbach, 1989）等等，该时期副特提斯洋西退导致中国西部水汽骤降也是一个重要的驱动因素（Popov *et al.*, 2006；Wang *et al.*, 2020）。另外，古近纪全球气候演化处在极热阶段（PETM）—气候适宜期（EECO）—气候升温期（MECO）这样较为温暖—炎热的阶段（Zachos *et al.*, 2001；Hou *et al.*, 2021b；Wu *et al.*, 2021），在不同程度上也加剧了中国西北内陆的干旱化。

整体而言，自古近纪始，柴达木盆地的气温开始逐渐升高，出现向干旱/温热变化的趋势，前文所述的古环境分析可以与之耦合，反映出  $E_3^2$  时期为温暖/炎热气候，存在干旱—湿润的气候变化旋回。气候湿润时期，湖平面上升，该时期的总有机碳含量增大，发育了富含泥质和有机质的沉积，包括泥流沉积、泥质湍流沉积以及细粒过渡流沉积，该时期还存在洪水引发的细粒异重流沉积，发育在水道—朵叶体系中。气候炎热时期，湖水强烈蒸发，湖平面下降，引发斜坡沉积物滑塌并形成细粒重力流沉积，包括细粒浓缩密度流、细粒浊流、细粒碎屑流和泥流沉积，发育在水下斜坡和湖底扇区域。

#### 4.2 构造活动

受印支运动、燕山运动、喜山运动的影响，强烈的碰撞挤压使得青藏高原不断隆升，柴达木盆地逐渐成型（潘裕生，1999；吕宝凤等，2011；潘家伟等，2015），呈现为断陷盆地的特征（付锁堂等，2015；Zhuang *et al.*, 2019；王伟涛等，2022）。随着构造持续挤压，始新世末期断陷盆地开始向坳陷盆地转变，抬升的山脉经风化剥蚀后为盆地提供了充足的物源，沉积中心也在构造作用下不断东移（王倩倩等，2022），沉积面积进一步扩充，在下

干柴沟组—上干柴沟组沉积期湖盆面积达到最大。在柴达木盆地形成以后，在阿尔金断裂带、昆仑断裂带以及祁连山断裂带的控制下，盆地处于挤压—走滑的构造环境中（付锁堂等，2015），英雄岭构造带在该时期发生了隆起，其西部反应尤为剧烈，表现为断裂系统发育，发育多条 NW、NE 向浅、中、深层断裂（龙国徽等，2021；吴磊等，2023）。在断裂的发展过程中，断块的差异性抬升和沉降控制着地层的沉降与沉积，形成了多个小凹陷，为沉积物提供了充足的容纳空间。

英雄岭地区强烈的构造变形，一次区域性沉降则可能导致湖平面下降，进而引发斜坡沉积物的滑塌以及形成一系列的细粒重力流沉积；体现在岩心上则为大量的软沉积物变形构造、砂墙构造、泻水构造、拉长或变形的泥质/粉砂质/云灰质条带杂乱或顺层分布。

#### 4.3 湖泊咸化

气候干旱、水体蒸发、盐度加大，碳酸盐岩—硫酸盐岩—岩盐依次沉淀，伴随细粒重力流沉积，在深水区域表现出混源沉积的特征。蒸发早期，水体深度较大、盐度较低，以物理沉积为主，深湖区域的沉积物多为云灰质细粉砂岩和泥岩，半深湖区域多为含云灰质粉砂岩—细粉砂—泥岩。随着蒸发强度进一步加大，水体逐渐变浅，盐度逐渐升高，此时既有物理沉积也有化学沉积，此时的沉积物中云灰质成分含量增大，深湖区域出现化学沉淀—安静水体沉降沉积（LA1、LA2）。伴随蒸发量的持续加大，咸水时期，水体最浅，几乎只接受化学沉积，沉积物多以云灰岩为主，并出现石膏斑点（夏志远等，2017；郭荣涛等，2019；张世铭等，2022）。该时期物源供给少，由细粒重力流搬运至半深湖—深湖的物质中，泥质含量显著减小，流体黏性降低，细粒重力流搬运能力在近端扇缘下降，发育细粒浓缩密度流—细粒过渡流—细粒碎屑流沉积、细粒浓缩密度流—细粒碎屑流—细粒泥流沉积、滑塌—细粒碎屑流—泥流沉积、细碎屑流—细粒过渡流—细粒浊流沉积的相互转化。随着砂质沉积物在近端扇缘的沉降，泥质含量增大，流体黏度增大，可在远端扇缘发育细粒过渡流—泥流—泥质湍流沉积、湍流—湍流增强过渡流—下部过渡塞流—上部过渡塞流—泥流沉积的相互转化。此时形成的细粒重力流沉积中，碳酸盐岩含量和硫酸盐岩含

量显著增大，有别于淡水湖盆的细粒重力流沉积，发育大量的富含有机质纹层状云灰质泥岩相 (M1)、含有机质块状云灰质泥岩相 (M2)、层状白云岩相 (D1)、含云质、泥质碎屑发育变形构造的白云岩相 (D2) 以及纹层状泥质白云岩相 (MD1)。另外研究表明，咸水介质对物质具有顶托作用 (Shi *et al.*, 2020)，在这个环境下，细粒碎屑物质和有机物相比淡水环境能够被搬运得更远、分布范围也更大，因此研究区深湖环境中能够发育各种各样的细粒重力流沉积物。

## 5 咸水湖泊的细粒重力流沉积模式及意义

### 5.1 沉积模式

作为干旱咸化封闭的内陆湖盆，下干柴沟组上段沉积期既受气候变化的影响，也受构造运动的影响。来自西部的远源物源在研究区形成了缓坡的曲流河三角洲—湖底扇—湖泊沉积体系，在强烈挤压的构造背景下，盆内坳陷并发育大范围的湖相沉积，干旱的气候条件使得沉积物具有混源沉积的特征。下干柴沟组上段沉积期整体气候干旱，但具有干—湿旋回的变化。气候干旱期间水体蒸发，此时湖盆水体变浅、盐度增加，沉积物中黏土矿物和长英质含量减小，在岩心上反映为开始出现泥质白云岩、云灰岩等。此时物源供给少，水动力也弱，在深湖区域主要以静水沉降为主。在这种环境下，若发生一次湖盆断陷或构造沉降，则会导致斜坡区发生滑塌作用产生细粒重力流沉积，形成湖底扇。在

其近端出现滑塌构造、细粒浓缩密度流—细粒碎屑流—泥流沉积、细粒过渡流—细粒碎屑流/泥流沉积和泥流—湍流等沉积 (包括 LA3、LA5、LA6)，因此会在沉积物中出现拉长的泥砾、泥屑泥条或云灰质条带等。在其远端及深湖区或凹槽区则会出现细粒过渡流以及细粒泥流等沉积 (LA1)，常表现为纹层状泥岩、云灰质泥岩、泥质云灰岩之上出现变形构造的粉砂质泥岩或泥质粉砂岩等。在整体干旱的背景下，也会出现气候温湿的情况，此时水体变深，盐度逐渐降低，沉积物中膏岩和碳酸盐岩含量开始下降，但深湖区域的沉积物中仍然含有较多云灰质成分。受季节性水流和物源供应的影响，在一次洪泛事件中就可能引发形成限定水道湖底扇，其中细粒异重流沉积 (LA4) 及其伴生的细粒浓缩密度流—细粒过渡流—细粒碎屑流/泥流沉积、细粒浓缩密度流—细粒碎屑流—泥流沉积、湍流—泥流沉积的相互转化出现在水道和扇的近端 (包括 LA5、LA6、LA7)，在湖底扇远端则会出现细粒浓缩密度流—细粒过渡流—泥流沉积、细粒浓缩密度流—湍流增强过渡流—下部过渡塞流—上部过渡塞流—泥流沉积的转化 (包括 LA6、LA7)，深湖区域也逐渐从静水沉降转变为事件沉积，包括泥流—泥质湍流—安静水体沉积、细粒碎屑流—泥流等沉积 (包括 LA1 和 LA2) (图 8) (Feng *et al.*, 2021; 杨田等, 2021, 2023; 冯有良等, 2023)。

### 5.2 油气地质意义

英雄岭页岩油干酪根为生油条件最佳的 I-II<sub>1</sub> 型干酪根，具有“两段式”的生烃模式，烃源岩

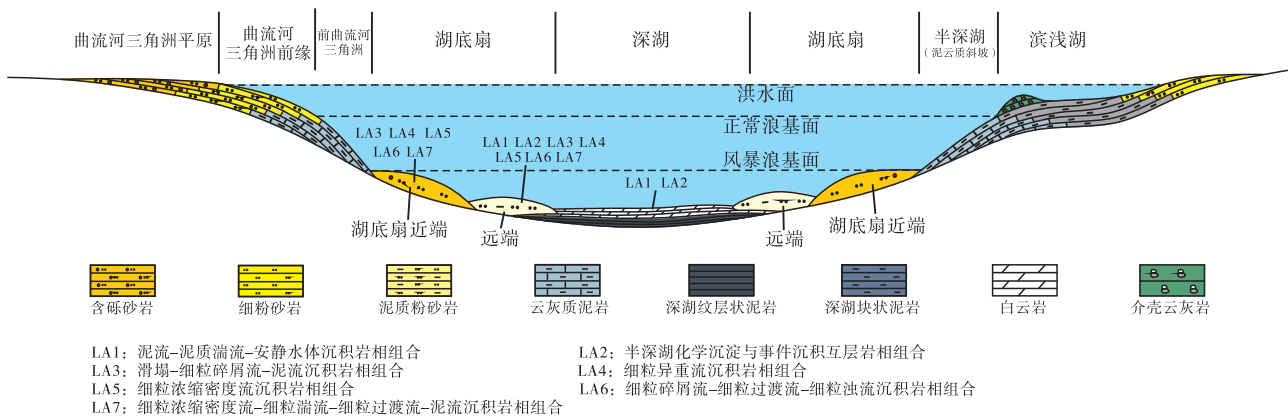


Fig. 8 Sedimentary model of fine-grained deposits in salinized lacustrine in the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area, Qaidam Basin

有机质丰度最低，但“富氢贫碳”，氢指数与松辽盆地青山口组、鄂尔多斯盆地长 7 段优质源岩相当，生烃能力较强（张斌等，2018；舒豫川等，2021；龙国徽等，2021；李国欣等，2022c）。究其原因主要是沉积时的古生产力不高、水体盐度过大等因素。沉积期古水体为分层不强的弱氧化—还原的过渡环境，并存在氧化—还原的旋回变化。而在咸化湖盆中，水体分层的沉积环境使得上部盐度较低的水体利于浮游藻类等水生生物的繁殖，而下部形成缺氧、高盐度的水体，一方面造成古生物种类较为单一，另一方面又使得早期形成的有机质得到了较好的保存（Kelts, 1988；Carroll and Bohacs, 1999；孙焕泉，2017；Li *et al.*, 2021；朱如凯等，2023）。此外，细粒重力流除了能将浅水的碎屑物质搬运至深湖沉积，也能将浅水的有机质搬运进深湖沉积形成富有机质层段（冯有良等，2023；邹才能等，2023a）。从图 3 中可以看出，低 V/Ni 值与 Sr/Ba 值往往对应着高泥质和 TOC 高含量段，反映出气候湿润、湖平面上升，形成四级水进体系域（TST），沉积物中泥质含量增加，有机质含量增大；而气候干旱时期湖平面下降，形成四级水退体系域（RST），对应着低泥质、低 TOC 含量和高碳酸盐岩含量段。说明气候湿润有利于形成富含有机质的“甜点”层段，而气候干旱时期则容易发育各类细粒重力流沉积，细粒重力流沉积形成的

“甜点”层段则是页岩油勘探的主要目标（Yang *et al.*, 2019a, 2019b, 2022c）。

从储集层方面来看，目的层发育大套厚层湖相碳酸盐岩，混积了薄层的粉砂岩。从形成和分布角度来看，研究区的粉砂岩主要由细粒重力流作用搬运至湖底扇的近端和远端，近端沉积物浓度大、砂质含量高、流体黏度低，遇扇缘斜坡区很容易发生沉降，形成细粒浓缩密度流—细粒碎屑流—泥流沉积、细粒浓缩密度流—细粒过渡流—细粒碎屑流/泥流沉积以及细粒异重流等沉积，该时期形成的沉积物以细粉砂岩和粗粉砂岩为主，发育砂墙、泻水构造、变形构造等，可见砂质条带/团块、泥质条带/团块等顺层或杂乱分布，不含或含少量云灰质矿物。而随着砂质成分的减少，沉积物泥质浓度加大、黏性增加，这就导致在远端形成以细粒过渡流—细粒碎屑流—泥流沉积、细粒过渡流—泥流沉积、细粒碎屑流—泥流沉积为主的细粒沉积。以柴平 2 井 2765.94 m 处样品的 QEMSCAN 测试结果为例（图 9-a），该样品岩性为云灰质粉砂岩，下部以长英质矿物为主，向上粒度变细后变粗，反映为细粒浓缩密度流—细粒碎屑流—泥流—细粒碎屑流沉积的岩相组合。下部颗粒粒径大（约 300  $\mu\text{m}$ ），属于细粉砂级别，分选较好，应当可作为优质储集层，然而其孔隙度很小，几乎都被后期的碳酸盐矿物充填胶结，降低了储集

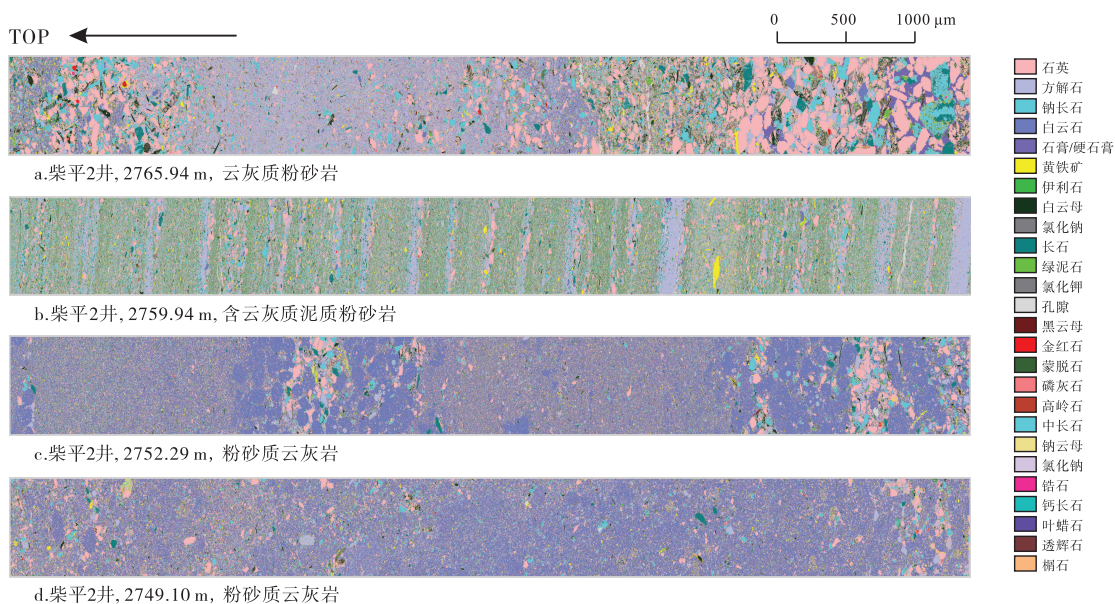


图 9 柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段典型样品 QEMSCAN 照片

Fig. 9 QEMSCAN photos of typical samples from the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area, Qaidam Basin

层质量 (Yang *et al.*, 2022a), 该块样品的实测孔隙度只有 0.6%。相反, 柴平 2 井 2759.94 m 处样品的 QEMSCAN 测试结果显示该块样品为含泥质云灰质粉砂岩(图 9-b), 发育长英质—云灰质纹层与黏土质纹层互层, 比起单一的细粉砂岩, 该块样品的实测孔隙度为 0.88%。另外 2 块样品 (2752.29 m 处样品, 图 9-c; 2749.10 m 处样品, 图 9-d) 均为粉砂质碳酸盐岩, 但是前者为泥流—泥质湍流沉积的组合, 其实测孔隙度只有 0.09%, 后者为泥流—化学沉积的组合, 实测孔隙度为 0.27%。分析认为, 纹层状岩相孔隙主要以晶间孔和纹层缝为主, 虽然孔喉半径小, 但是其连通性好, 连通体积大; 细粉砂岩原生孔隙较为发育。但在咸化的水体中, 既容易被碳酸盐矿物充填, 长石类矿物也容易被溶蚀后胶结, 导致其孔隙度不高(袁剑英等, 2016; 张道伟等, 2020; 刘占国等, 2021; 崔俊等, 2022)。而盐岩成分的变化也控制着孔隙度的分布与变化(Zhang *et al.*, 2020), 物性分析发现, 层状云灰岩孔隙度最高( $\Phi > 3\%$  占 60%,  $\Phi > 5\%$  超过 40%), 纹层状云灰岩渗透率最大( $K > 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  占 45%), 孔隙度随白云石含量增加而增大; 层状云灰岩为最佳储集层。而通过岩心的荧光扫描照片(图 10)也可看出, 层状和纹层状的云灰质泥岩以及泥质云灰岩具有更好的油气显示。另外, 云灰质页岩脆性矿物含量高、水

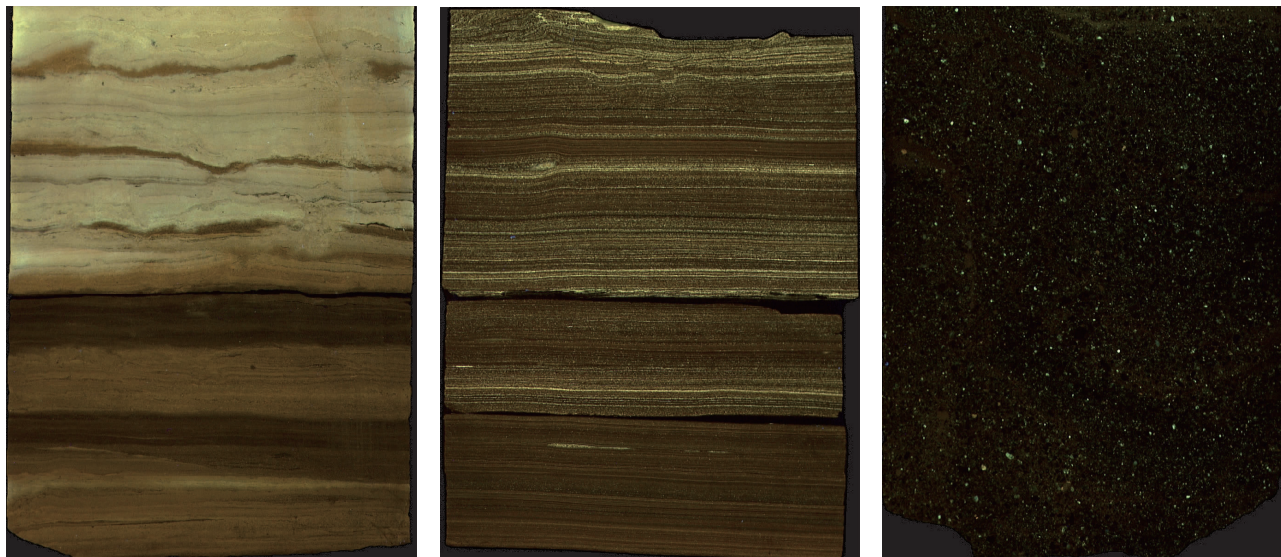
化膨胀率低, 有利于页岩油的压裂改造, 具有较高的工程品质(Wu and Zhao, 2022)。

## 6 结论

1) 柴达木盆地英雄岭地区西部下干柴沟组上段沉积期, 半深湖—深湖区域发育了一套缓坡型曲流河三角洲—湖底扇—湖泊沉积体系, 可识别出 7 大类岩相: 云/灰质泥岩、粉砂质泥岩、白云岩、泥质白云岩、泥质粉砂岩、细粉砂岩以及粗粉砂岩岩相, 存在多种细粒重力流沉积过程, 形成了 7 类细粒重力流岩相组合: (1) 泥流—泥质湍流—安静水体沉积岩相组合(LA1); (2) 半深湖化学沉淀与事件沉积互层岩相组合(LA2); (3) 滑塌—细粒碎屑流—泥流沉积岩相组合(LA3); (4) 细粒湍流—细粒异重流沉积岩相组合(LA4); (5) 细粒浓缩密度流沉积岩相组合(LA5); (6) 细粒碎屑流—细粒过渡流—细粒浊流沉积岩相组合(LA6); (7) 细粒浓缩密度流—细粒湍流—细粒过渡流—泥流沉积岩相组合(LA7)。

2) 研究区深湖区域形成的纹层状和层状白云岩油气显示好, 为优势“甜点层/段”, 其中纹层状云灰岩的渗透率最大, 层状云灰岩的储集性能最好。

3) 咸化湖盆细粒重力流沉积物和富含有机质的发育受气候和构造运动所控制的湖平面升降影响, 构造稳定、气候湿润时期湖平面上升, 有利于优质烃源岩



a. 柴平2-4井, 2801.74~2801.85 m, 层状云灰岩

b. 柴平2-4井, 2807.82~2807.93 m, 纹层状云灰岩

c. 柴平2-4井, 2809.71~2809.82 m, 含砾粗粉砂岩

图 10 柴达木盆地英雄岭地区下干柴沟组上段典型荧光照片照片

Fig. 10 Typical fluorescent photographs of the upper section of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area, Qaidam Basin

的形成；气候干旱或构造沉降导致湖平面下降，则有利于发育细粒重力流沉积和碳酸盐矿物的沉淀。

**致谢** 感谢 2023 年度 AAPG Grants-in-Aid 的资助。

### 参考文献 (References)

- 陈世悦,张顺,刘惠民,鄢继华. 2017. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨. 古地理学报, 19(2): 271-284. [Chen S Y,Zhang S, Liu H M,Yan J H. 2017. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water. Journal of Palaeogeography( Chinese Edition), 19(2): 271-284]
- 崔俊,毛建英,陈登钱,施奇,李雅楠,夏晓敏. 2022. 柴达木盆地西部地区古近系湖相碳酸盐岩储层特征. 岩性油气藏, 34(2): 45-53. [Cui J,Mao J Y,Chen D Q,Shi Q,Li Y N,Xia X M. 2022. Reservoir characteristics of Paleogene lacustrine carbonate rocks in western Qaidam Basin. Lithologic Reservoirs, 34(2): 45-53]
- 杜江民,龙鹏宇,杨鹏,丁强,胡秀银,李伟,柏杨,盛军. 2020. 中国陆相湖盆碳酸盐岩储集层特征及其成藏条件. 地球科学进展, 35(1): 52-69. [Du J M,Long P Y,Yang P,Ding Q,Hu X Y,Li W,Bai Y,Sheng J. 2020. Characteristics of carbonate reservoir and its forming conditions in continental lake basin of China. Advances in Earth Science, 35(1): 52-69]
- 冯有良,杨智,张洪,张天舒,李攀,侯鸣秋,蒋文琦,王小妮,朱吉昌,李嘉蕊. 2023. 咸化湖盆细粒重力流沉积特征及其页岩油勘探意义:以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例. 地质学报, 97(3): 839-863. [Feng Y L,Yang Z,Zhang H,Zhang T S,Li P,Hou M Q,Jiang W Q,Wang X N,Zhu J C,Li J R. 2023. Fine-grained gravity flow sedimentary features and their petroleum significance within saline lacustrine basins: a case study of the Fengcheng Formation in Mahu depression, Junggar Basin, China. Acta Geologica Sinica, 97(3): 839-863]
- 付锁堂,马达德,郭召杰,程丰. 2015. 柴达木走滑叠合盆地及其控油气作用. 石油勘探与开发, 42(6): 712-722. [Fu S T,Ma D D,Guo Z J,Cheng F. 2015. Strike-slip superimposed Qaidam Basin and its control on oil and gas accumulation, NW China. Petroleum Exploration and Development, 42(6): 712-722]
- 郭荣涛,张永庶,陈晓冬,张庆辉,王鹏,崔俊,姜营海,李亚峰,蒋启财,刘波. 2019. 柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段高频旋回与古地貌特征. 沉积学报, 37(4): 812-824. [Guo R T,Zhang Y S,Chen X D,Zhang Q H,Wang P,Cui J,Jiang Y H,Li Y F,Jiang Q C,Liu B. 2019. High-frequency cycles and paleogeomorphic features of the upper member of the lower Ganachaigou Formation in the Yingxi area, Qaidam Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 37(4): 812-824]
- 纪友亮,马达德,薛建勤,王鹏,吴颜雄,曾力,金力. 2017. 柴达木盆地西部新生界陆相湖盆碳酸盐岩沉积环境与沉积模式. 古地理学报, 19(5): 757-772. [Ji Y L,Ma D D,Xue J Q,Wang P,Wu Y X,Zeng L,Jin L. 2017. Sedimentary environments and sedimentary model of carbonate rocks in the Cenozoic lacustrine basin, western Qaidam Basin. Journal of Palaeogeography( Chinese Edition), 19(5): 757-772]
- 姜在兴,王运增,王力,孔祥鑫,杨叶芄,张建国,薛欣宇. 2022. 陆相细粒沉积岩物质来源、搬运—沉积机制及多源油气甜点. 石油与天然气地质, 43(5): 1039-1048. [Jiang Z X,Wang Y Z,Wang L,Kong X X,Yang Y P,Zhang J G,Xue X Y. 2022. Review on provenance, transport-sedimentation dynamics and multi-source hydrocarbon sweet spots of continental fine-grained sedimentary rocks. Oil & Gas Geology, 43(5): 1039-1048]
- 黎茂稳,金之钧,董明哲,马晓潇,李志明,蒋启贵,鲍云杰,陶国亮,钱门辉,刘鹏,曹婷婷. 2020. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展. 石油实验地质, 42(4): 489-505. [Li M W,Jin Z J,Dong M Z,Ma X X,Li Z M,Jiang Q G,Bao Y J,Tao G L,Qian M H,Liu P,Cao T T. 2020. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation. Petroleum Geology & Experiment, 42(4): 489-505]
- 李国欣,石亚军,张永庶,陈琰,张国卿,雷涛. 2022a. 柴达木盆地油气勘探、地质认识新进展及重要启示. 岩性油气藏, 34(6): 1-18. [Li G X,Shi Y J,Zhang Y S,Chen Y,Zhang G Q,Lei T. 2022a. New progress and enlightenment of oil and gas exploration and geological understanding in Qaidam Basin. Lithologic Reservoirs, 34(6): 1-18]
- 李国欣,张永庶,陈琰,张国卿,王波,周飞,吴志雄,张长好,雷涛. 2022b. 柴达木盆地油气勘探进展、方向与对策. 中国石油勘探, 27(3): 1-19. [Li G X,Zhang Y S,Chen Y,Zhang G Q,Wang B,Zhou F,Wu Z X,Zhang C H,Lei T. 2022b. Progress, orientation and countermeasures of petroleum exploration in Qaidam Basin. China Petroleum Exploration, 27(3): 1-19]
- 李国欣,朱如凯,张永庶,陈琰,崔景伟,姜营海,伍坤宇,盛军,鲜成钢,刘合. 2022c. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义. 石油勘探与开发, 49(1): 18-31. [Li G X,Zhu R K,Zhang Y S,Chen Y,Cui J W,Jiang Y H,Wu K Y,Sheng J,Xian C G,Liu H. 2022c. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiogling shale oil in Qaidam Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 49(1): 18-31]
- 李国欣,伍坤宇,朱如凯,张永庶,吴松涛,陈琰,申颖浩,张静,邢浩婷,李亚锋,陈晓冬,张闯,张斌,刘畅,鲜成钢,刘合. 2023. 巨厚高原山地式页岩油藏的富集模式与高效动用方式:以柴达木盆地英雄岭页岩油藏为例. 石油学报, 44(1): 144-157. [Li G X,Wu K Y,Zhu R K,Zhang Y S,Wu S T,Chen Y,Shen Y H,Zhang J,Xing H T,Li Y F,Chen X D,Zhang C,Zhang B,Liu C,Xian C G,Liu H. 2023. Enrichment model and high-efficiency production of thick plateau mountainous shale oil reservoir: a case study of the Yingxiogling shale oil reservoir in Qaidam Basin. Acta Petrolei Sinica, 44(1): 144-157]
- 李璇. 2020. 柴达木盆地西北部新生代介形类化石Sr/Ca比值特征及其古环境指示意义. 兰州大学硕士学位论文: 37-38. [Li X. 2020. Sr/Ca ratio of ostracoda and its paleoenvironmental significance in Cenozoic, northwest Qaidam basin. Masteral dissertation of Lanzhou University: 37-38]
- 刘占国,张永庶,宋光永,李森明,龙国徽,赵健,朱超,王艳清,宫清顺,夏志远. 2021. 柴达木盆地英西地区咸化湖盆混积碳酸盐岩岩相特征与控储机制. 石油勘探与开发, 48(1): 68-80. [Liu Z G,Zhang Y S,Song G Y,Li S M,Long G H,Zhao J,Zhu C,Wang Y Q,Gong Q S,Xia Z Y. 2021. Mixed carbonate rocks lithofacies features and reservoirs controlling mechanisms in the saline lacustrine basin in Yingxi Area, Qaidam Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 48(1): 68-80]

- 龙国徽,王艳清,朱超,夏志远,赵健,唐鹏程,房永生,李海鹏,张娜,刘健. 2021. 柴达木盆地英雄岭构造带油气成藏条件与有利勘探区带. 岩性油气藏, 33(1): 145-160. [Long G H, Wang Y Q, Zhu C, Xia Z Y, Zhao J, Tang P C, Fang Y S, Li H P, Zhang N, Liu J. 2021. Hydrocarbon accumulation conditions and favorable exploration plays in Yingxiqing structural belt, Qaidam Basin. Lithologic Reservoirs, 33(1): 145-160]
- 吕宝凤,张越青,杨书逸. 2011. 柴达木盆地构造体系特征及其成盆动力学意义. 地质论评, 57(2): 167-174. [Lü B F, Zhang Y Q, Yang S Y. 2011. Characteristics of structural system and its implication for formation dynamics in Qaidam Basin. Geological Review, 57(2): 167-174]
- 潘家伟,李海兵,孙知明,刘栋梁,吴婵,于常青. 2015. 阿尔金断裂带新生代活动在柴达木盆地中的响应. 岩石学报, 31(12): 3701-3712. [Pan J W, Li H B, Sun Z M, Liu D L, Wu C, Yu C Q. 2015. Response of Cenozoic activity of Altun fault zone in Qaidam Basin. Acta Petrologica Sinica, 31(12): 3701-3712]
- 潘裕生. 1999. 青藏高原的形成与隆升. 地学前缘, 6(3): 153-160, 162-163. [Pan Y S. 1999. Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau. Earth Science Frontiers, 6(3): 153-160, 162-163]
- 舒豫川,胡广,庞谦,胡朝伟,夏青松,谭秀成. 2021. 柴达木盆地咸湖相烃源岩特征: 以英西地区下干柴沟组上段为例. 断块油气田, 28(2): 179-186. [Shu Y C, Hu G, Pang Q, Hu C W, Xia Q S, Tan X C. 2021. Characteristics of source rocks of salt lake facies in Qaidam Basin: taking upper member of Xiaganchaigou Formation in Yingxi Region as an example. Fault-Block Oil & Gas Field, 28(2): 179-186]
- 宋世骏. 2022. 柴达木盆地新生代咸化湖盆细粒岩差异性发育机理及其地质意义. 西北大学博士学位论文: 80-106. [Song S J. 2022. Different developing mechanism of fine-grained sediments in Cenozoic saline lakes in the Qaidam Basin and its geological implications. Doctoral dissertation of Northwest University: 80-106]
- 孙焕泉. 2017. 济阳拗陷页岩油勘探实践与认识. 中国石油勘探, 22(4): 1-14. [Sun H Q. 2017. Exploration practice and cognitions of shale oil in Jiyang depression. China Petroleum Exploration, 22(4): 1-14]
- 王倩倩,袁四化,王亚东,李伟民,刘永江,郑世刚,赵英利. 2024. 柴达木盆地西部地区新生代盆地性质. 吉林大学学报(地球科学版), 54(1): 160-181. [Wang Q Q, Yuan S H, Wang Y D, Li W M, Liu Y J, Zheng S G, Zhao Y L. 2024. The nature of the Cenozoic Western Qaidam Basin. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 54(1): 160-181]
- 王伟涛,张培震,段磊,张博谥,刘康,黄荣,刘彩彤,张竹琪,郑德文,郑文俊,张会平. 2022. 柴达木盆地新生代地层年代框架与沉积-构造演化. 科学通报, 67(S2): 3452-3475. [Wang W T, Zhang P Z, Duan L, Zhang B X, Liu K, Huang R, Liu C C, Zhang Z Q, Zheng D W, Zheng W J, Zhang H P. 2022. Chronological framework and sedimentary-tectonic evolution of Cenozoic strata in Qaidam Basin. Chinese Science Bulletin, 67(S2): 3452-3475]
- 王艳清,刘云田,黄革萍,李森明,夏志远,宫清顺. 2014. 柴达木盆地西部地区古近-新近系沉积体系与油气分布. 北京: 石油工业出版社, 120-167. [Wang Y Q, Liu Y T, Huang G P, Li S M, Xia Z Y, Gong Q S. 2014. Paleogene Sedimentary System and Oil and Gas Distribution in Western Qaidam Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 120-167]
- 王益友,郭文莹,张国栋. 1979. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用. 同济大学学报, 7(2): 51-60. [Wang Y Y, Guo W Y, Zhang G D. 1979. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group(paleogene), Jin-hu depression, Kiangsue Province. Journal of Tongji University, 7(2): 51-60]
- 吴磊,杨惠童,张永庶,张军勇,魏岩岩,黄凯,曹冯威,葛梦佳,叶雨晖,陈琰,唐建超,林秀斌,肖安成,陈汉林,杨树锋. 2023. 新生代柴达木盆地与周缘造山带的构造耦合. 地质学报, 97(9): 2939-2955. [Wu L, Yang H T, Zhang Y S, Zhang J Y, Wei Y Y, Huang K, Cao F W, Ge M J, Ye Y H, Chen Y, Tang J C, Lin X B, Xiao A C, Chen H L, Yang S F. 2023. Structural coupling between the Qaidam Basin and bordering orogenic belts in the Cenozoic. Acta Geologica Sinica, 97(9): 2939-2955]
- 吴因业,吕佳蕾,方向,杨智,王岚,马达德,陶士振. 2019. 湖相碳酸盐岩-混积岩储层有利相带分析: 以柴达木盆地古近系为例. 天然气地球科学, 30(8): 1150-1157. [Wu Y Y, Lü J L, Fang X, Yang Z, Wang L, Ma D D, Tao S Z. 2019. Analysis of favorable facies belts in reservoir of lacustrine carbonate rocks-hybrid sediments: case study of Paleogene in Qaidam Basin. Natural Gas Geoscience, 30(8): 1150-1157]
- 吴智平,周瑶琪. 2000. 一种计算沉积速率的新方法: 宇宙尘埃特征元素法. 沉积学报, 18(3): 395-399. [Wu Z P, Zhou Y Q. 2000. Using the characteristic elements from meteoritic dust in strata to calculate sedimentation rate. Acta Sedimentologica Sinica, 18(3): 395-399]
- 夏青松,陆江,杨鹏,张昆,杨朝屹,聂俊杰,朱云舫,李立芳. 2023. 柴达木盆地英西地区渐新统下干柴沟组上段储层微观孔隙结构特征. 岩性油气藏, 35(1): 132-144. [Xia Q S, Lu J, Yang P, Zhang K, Yang C Y, Nie J J, Zhu Y F, Li L F. 2023. Microscopic pore structure characteristics of the upper member of Oligocene Xiaganchaigou Formation in Yingxi Area, Qaidam Basin. Lithologic Reservoirs, 35(1): 132-144]
- 夏志远,刘占国,李森明,王艳清,王鹏,管斌. 2017. 岩盐成因与发育模式: 以柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组为例. 石油学报, 38(1): 55-66. [Xia Z Y, Liu Z G, Li S M, Wang Y Q, Wang P, Guan B. 2017. Origin and developing model of rock salt: a case study of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in the west of Yingxiqing ridge, Qaidam Basin. Acta Petrologica Sinica, 38(1): 55-66]
- 杨田,操应长,田景春. 2021. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识. 沉积学报, 39(1): 88-111. [Yang T, Cao Y C, Tian J C. 2021. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin. Acta Sedimentologica Sinica, 39(1): 88-111]
- 杨田,操应长,王健,田景春,蔡来星,余文强. 2023. 陆相湖盆深水浊流与泥质碎屑流间过渡流沉积与沉积学意义. 沉积学报, 41(5): 1295-1310. [Yang T, Cao Y C, Wang J, Tian J C, Cai L X, Yu W Q. 2023. Deep-water deposition for transitional flow from turbidity current to muddy debris flow in lacustrine basins and its sedimentological significance. Acta Sedimentologica Sinica, 41(5): 1295-1310]
- 易定红,王建功,石兰亭,王鹏,陈娟,孙松领,石亚军,司丹. 2019. 柴达木盆地英西地区 E<sub>3</sub><sup>2</sup> 碳酸盐岩沉积演化特征. 岩性油气藏, 31(2): 46-55. [Yi D H, Wang J G, Shi L T, Wang P, Chen J, Sun S L, Shi Y J, Si D. 2019. Sedimentary evolution characteristics of E<sub>3</sub><sup>2</sup>

- carbonate rocks in Yingxi Area, Qaidam Basin. *Lithologic Reservoirs*, 31(2): 46-55]
- 袁剑英, 黄成刚, 曹正林, 李智勇, 万传治, 徐丽, 潘星, 吴丽荣. 2015. 咸化湖盆白云岩碳氧同位素特征及古环境意义: 以柴西地区始新统下干柴沟组为例. *地球化学*, 44(3): 254-266. [Yuan J Y, Huang C G, Cao Z L, Li Z Y, Wan C Z, Xu L, Pan X, Wu L R. 2015. Carbon and oxygen isotopic composition of saline lacustrine dolomite and its palaeoenvironmental significance: a case study of Lower Eocene Ganchaigou Formation in western Qaidam Basin. *Geochimica*, 44(3): 254-266]
- 袁剑英, 黄成刚, 夏青松, 曹正林, 赵凡, 万传治, 潘星. 2016. 咸化湖盆碳酸盐岩储层特征及孔隙形成机理: 以柴西地区始新统下干柴沟组为例. *地质论评*, 62(1): 111-126. [Yuan J Y, Huang C G, Xia Q S, Cao Z L, Zhao F, Wan C Z, Pan X. 2016. The characteristics of carbonate reservoir, and formation mechanism of pores in the saline lacustrine basin: a case study of the lower Eocene Ganchaigou Formation in western Qaidam Basin. *Geological Review*, 62(1): 111-126]
- 张斌, 何媛媛, 陈琰, 孟庆洋, 黄家旋, 袁莉. 2018. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩形成机理. *石油学报*, 39(6): 674-685. [Zhang B, He Y Y, Chen Y, Meng Q Y, Huang J X, Yuan L. 2018. Formation mechanism of excellent saline lacustrine source rocks in western Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 39(6): 674-685]
- 张道伟, 薛建勤, 伍坤宇, 陈晓冬, 王牧, 张庆辉, 郭宁. 2020. 柴达木盆地英西地区页岩油储层特征及有利区优选. *岩性油气藏*, 32(4): 1-11. [Zhang D W, Xue J Q, Wu K Y, Chen X D, Wang M, Zhang Q H, Guo N. 2020. Shale oil reservoir characteristics and favorable area optimization in Yingxi Area, Qaidam Basin. *Lithologic Reservoirs*, 32(4): 1-11]
- 张世铭, 张小军, 王建功, 张婷静, 崔俊, 王超, 伏珏蓉. 2022. 咸化湖盆混合沉积特征及控制因素分析: 以柴达木盆地西部地区古近系下干柴沟组为例. *中国矿业大学学报*, 51(1): 160-173. [Zhang S M, Zhang X J, Wang J G, Zhang T J, Cui J, Wang C, Fu J R. 2022. Characteristics and their controlling factors of mixed sediments in saline lakes: a case study of lower Ganchaigou Formation in the western Qaidam Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 51(1): 160-173]
- 周传明, 张俊明, 李国祥, 虞子治. 1997. 云南永善肖滩早寒武世早期碳氧同位素记录. *地质科学*, 32(2): 201-211. [Zhou C M, Zhang J M, Li G X, Yu Z Y. 1997. Carbon and oxygen isotopic records of early early Cambrian in Xiaotan, Yongshan, Yunnan. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 32(2): 201-211]
- 朱超, 刘占国, 宋光永, 龙国徽, 宫清顺, 赵健, 李森明, 夏志远, 吴颜雄, 田明智. 2022. 柴达木盆地英雄岭构造带古近系湖相碳酸盐岩沉积模式、演化与分布. *石油学报*, 43(11): 1558-1567, 1622. [Zhu C, Liu Z G, Song G Y, Long G H, Gong Q S, Zhao J, Li S M, Xia Z Y, Wu Y X, Tian M Z. 2022. Sedimentary model, evolution and distribution of Paleogene lacustrine carbonate rocks in Yingxi structural belt, Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 43(11): 1558-1567, 1622]
- 朱如凯, 张婧雅, 李梦莹, 蔡毅, 吴松涛, 刘畅, 张素荣, 康缘. 2023. 陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题. *地质学报*, 97(9): 2874-2895. [Zhu R K, Zhang J Y, Li M Y, Cai Y, Wu S T, Liu C, Zhang S R, Kang Y. 2023. Advances and key issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 2874-2895]
- 邹才能, 冯有良, 杨智, 蒋文琦, 潘松圻, 张天舒, 王小妮, 朱吉昌, 李嘉蕊. 2022a. 湖盆细粒重力流沉积作用过程及甜点层发育机制是什么? *地球科学*, (10): 3864-3866. [Zou C N, Feng Y L, Yang Z, Jiang W Q, Pan S Q, Zhang T S, Wang X N, Zhu J C, Li J R. 2022a. What are the lacustrine fine-grained gravity flow sedimentation process and the genetic mechanism of sweet sections for shale oil? *Earth Science*, (10): 3864-3866]
- 邹才能, 杨智, 董大忠, 赵群, 陈振宏, 冯有良, 李嘉蕊, 王小妮. 2022b. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望. *地球科学*, 47(5): 1517-1533. [Zou C N, Yang Z, Dong D Z, Zhao Q, Chen Z H, Feng Y L, Li J R, Wang X N. 2022b. Formation, distribution and prospect of unconventional hydrocarbons in source rock strata in China. *Earth Science*, 47(5): 1517-1533]
- 邹才能, 冯有良, 杨智, 蒋文琦, 张天舒, 张洪, 王小妮, 朱吉昌, 魏琪钊. 2023a. 中国湖盆细粒重力流沉积作用及其对页岩油“甜点段”发育的影响. *石油勘探与开发*, 50(5): 883-897. [Zou C N, Feng Y L, Yang Z, Jiang W Q, Zhang T S, Zhang H, Wang X N, Zhu J C, Wei Q Z. 2023a. Fine-grained gravity flow sedimentation and its influence on development of shale oil sweet spot intervals in lacustrine basins in China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5): 883-897]
- 邹才能, 杨智, 张国生, 朱如凯, 陶士振, 袁选俊, 侯连华, 董大忠, 郭秋麟, 宋岩, 冉启全, 邱振, 吴松涛, 马锋, 白斌, 王岚, 熊波, 潘松圻, 刘翰林, 王小妮. 2023b. 非常规油气地质学理论技术及实践. *地球科学*, 48(6): 2376-2397. [Zou C N, Yang Z, Zhang G S, Zhu R K, Tao S Z, Yuan X J, Hou L H, Dong D Z, Guo Q L, Song Y, Ran Q Q, Qiu Z, Wu S T, Ma F, Bai B, Wang L, Xiong B, Pan S Q, Liu H L, Wang X N. 2023b. Theory, technology and practice of unconventional petroleum geology. *Earth Science*, 48(6): 2376-2397]
- 邹才能, 马锋, 潘松圻, 张新顺, 吴松涛, 傅国友, 王红军, 杨智. 2023c. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展. *地学前缘*, 30(1): 128-142. [Zou C N, Ma F, Pan S Q, Zhang X S, Wu S T, Fu G Y, Wang H J, Yang Z. 2023c. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 128-142]
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, Porter S C. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411: 62-66.
- Baas J H, Best J L, Peakall J, Wang M. 2009. A phase diagram for turbulent, transitional, and laminar clay suspension flows. *Journal of Sedimentary Research*, 79: 162-183.
- Baas J H, Best J L, Peakall J. 2011. Depositional processes, bedform development and hybrid bed formation in rapidly decelerated cohesive (mud-sand) sediment flows. *Sedimentology*, 58: 1953-1987.
- Baas J H, Tracey N D, Peakall J. 2021. Sole marks reveal deep-marine depositional process and environment: implications for flow transformation and hybrid-event-bed models. *Journal of Sedimentary Research*, 91: 986-1009.
- Carroll A R, Bohacs K M. 1999. Stratigraphic classification of ancient lakes: balancing tectonic and climatic controls. *Geology*, 27: 99.
- Epstein S, Buchsbaum R, Lowenstam H A, Urey H C. 1953. Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *GSA Bulletin*, 64(11): 1315-1326.

- Feng Y L, Zou C N, Li J Z, Lin C S, Wang H J, Jiang S, Yang Z, Zhang S, Fu X L. 2021. Sediment gravity-flow deposits in Late Cretaceous Songliao postrift downwarped lacustrine basin, northeastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 34: 105378.
- Hahn D G, Manabe S. 1975. The role of mountains in the South Asian monsoon circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32: 1515–1541.
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A.. *Chemical Geology*, 99: 65–82.
- Haughton P, Davis C, McCaffrey W, Barker S. 2009. Hybrid sediment gravity flow deposits-Classification, origin and significance. *Marine and Petroleum Geology*, 26: 1900–1918.
- Hou M Q, Zhuang G S, Wu M H. 2021a. Isotopic fingerprints of mountain uplift and global cooling in paleoclimatic and paleoecological records from the northern Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 578: 110578.
- Hou M Q, Zhuang G S, Ji J L, Xiang S Y, Kong W W, Cui X Q, Wu M H, Hren M. 2021b. Profiling interactions between the Westerlies and Asian summer monsoons since 45 ka: insights from biomarker, isotope, and numerical modeling studies in the Qaidam Basin. *Geological Society of America Bulletin*, 133: 1531–1541.
- Kelts K. 1988. Environments of deposition of lacustrine petroleum source rocks: An introduction. *Geological Society of London Special Publications*, 40: 3–26.
- Lamb M P, Mohrig D. 2009. Do hyperpycnal-flow deposits record river-flood dynamics? *Geology*, 37: 1067–1070.
- Li Q Q, Xu S, Hao F, Shu Z G, Chen F L, Lu Y C, Wu S Q, Zhang L. 2021. Geochemical characteristics and organic matter accumulation of argillaceous dolomite in a saline lacustrine basin: a case study from the Paleogene Xingouzui Formation, Jiangnan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 128: 105041.
- Mulder T, Alexander J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48: 269–299.
- Mulder T, Syvitski J P M, Migeon S, Faugères J C, Savoye B. 2003. Marine hyperpycnal flows: Initiation, behavior and related deposits: a review. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 861–882.
- Popov S V, Shcherba I G, Ilyina L B, Nevekkaya L A, Paramonova N P, Khondkarian S O, Magyar I. 2006. Late Miocene to Pliocene palaeogeography of the Paratethys and its relation to the Mediterranean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 238: 91–106.
- Ruddiman W F, Kutzbach J E. 1989. Forcing of late Cenozoic Northern Hemisphere climate by plateau uplift in southern Asia and the American west. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94: 18409–18427.
- Shanmugam G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s—1990s): deep-water processes and facies models: a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17: 285–342.
- Shi Y J, Xu L, Huang C G, Wang L Q, Ma X M. 2020. The existence and significance of two kinds of effective reservoirs in deep water area of the western Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 94: 1726–1727.
- Song S J, Huang L, Zhang Q, Li X, Liu C Y. 2022. New insights for origin of fine-grained sediments from the early Neogene Qaidam Basin: wind and fluvial-lacustrine source-to-sink processes. *Marine and Petroleum Geology*, 145: 105853.
- Sumner E J, Talling P J, Amy L A. 2009. Deposits of flows transitional between turbidity current and debris flow. *Geology*, 37: 991–994.
- Talling P J, Masson D G, Sumner E J, Malgesini G. 2012. Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types. *Sedimentology*, 59: 1937–2003.
- Wang X, Carrapa B, Sun Y C, Dettman D L, Chapman J B, Caves Rugenstein J K, Clementz M T, DeCelles P G, Wang M, Chen J, Quade J, Wang F, Li Z J, Oimuhhammadzoda I, Gadoev M, Lohmann G, Zhang X, Chen F H. 2020. The role of the westerlies and orography in Asian hydroclimate since the late Oligocene. *Geology*, 48: 728–732.
- Wu M H, Zhuang G S, Hou M Q, Liu Z H. 2021. Expanded lacustrine sedimentation in the Qaidam Basin on the northern Tibetan Plateau: manifestation of climatic wetting during the Oligocene icehouse. *Earth and Planetary Science Letters*, 565: 116935.
- Wu S B, Zhao Z X. 2022. Controlling effect of saline sedimentary environment on enrichment and exploitation of shale gas and oil in lacustrine basin. *SN Applied Sciences*, 4: 223.
- Yang L L, Li X W, Zhuo Q G, Yu Z C, Yang Y L, Liu K Y. 2022a. Effects of gypsum-salt rock on mineral transformations in a saline lacustrine basin: significance to reservoir development. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 211: 110240.
- Yang Z, Zou C N, Hou L H, Wu S T, Lin S H, Luo X, Zhang L J, Zhao Z Y, Cui J W, Pan S Q. 2019a. Division of fine-grained rocks and selection of “sweet sections” in the oldest continental shale in China: taking the coexisting combination of tight and shale oil in the Permian Junggar Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 109: 339–348.
- Yang Z, Zou C N, Wu S T, Lin S H, Pan S Q, Niu X B, Men G T, Tang Z X, Li G S, Zhao J H, Jia X Y. 2019b. Formation, distribution and resource potential of the “sweet areas (sections)” of continental shale oil in China. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 48–60.
- Yang Z, Zou C N, Gu Z D, Yang F, Li J R, Wang X N. 2022b. Geological characteristics and main challenges of onshore deep oil and gas development in China. *Advances in Geo-Energy Research*, 6: 264–266.
- Yang Z, Zou C N, Wu S T, Pan S Q, Wang X N, Liu H T, Jiang W Q, Li J R, Li Q Y, Niu X B, Li G H, Tang Z X, Guo X G, Huang D, Wei Q Z. 2022c. Characteristics, types, and prospects of geological sweet sections in giant continental shale oil provinces in China. *Journal of Earth Science*, 33: 1260–1277.
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292: 686–693.
- Zhang X, Liu C L, Guo Z Q, Gui H R, Tian J X, Wu X P, Peng B, Sun Y K, Ping Y Q. 2020. Characteristics and influencing factors of unconventional hydrocarbon accumulation in saline lacustrine fine-grained sedimentary rocks in the northwestern Qaidam Basin. *Energy & Fuels*, 34: 2726–2738.
- Zhuang G S, Zhang Y G, Hourigan J, Ritts B, Hren M, Hou M Q, Wu M H, Kim B. 2019. Microbial and geochronologic constraints on the Neogene paleotopography of northern Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 46: 1312–1319.