

引用格式:隋博雨,王忠伟,占王忠,等.2026.羌塘盆地中部江爱达日那地区上三叠统沉积特征、演化及油气地质意义[J].沉积学报,44(2):707-733.

SUI BoYu, WANG ZhongWei, ZHAN WangZhong, et al. 2026. Sedimentary Characteristics and Evolution of the Upper Triassic in the Jiang'ai Darina Area, Central Qiangtang Basin and Their Hydrocarbon Geological Significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(2): 707-733.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.008

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.008

# 羌塘盆地中部江爱达日那地区上三叠统沉积特征、演化及油气地质意义

隋博雨<sup>1,2</sup>,王忠伟<sup>1,2,3</sup>,占王忠<sup>2</sup>,王剑<sup>1</sup>,韦恒叶<sup>1</sup>,李磊<sup>1</sup>,戚俊<sup>1</sup>

1.西南石油大学地球科学与技术学院,羌塘盆地研究院,成都 610500

2.中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心),成都 610218

3.现代古生物学和地层学国家重点实验室(中国科学院南京地质古生物研究所),南京 210008

**摘要** 【目的】晚三叠世是中生代羌塘盆地演化的关键时期,但前人对盆地上三叠统的沉积学研究相对薄弱,不利于进一步认识晚三叠世沉积演化过程及预测源—储分布。【方法】在剖面实测基础上,结合薄片观察、砂岩粒度分析及典型沉积构造划分江爱达日那剖面上三叠统甲丕拉组、波里拉组及巴贡组沉积相,并建立盆地中部晚三叠世沉积演化模式;另外,结合全岩及黏土矿物、物性及总有机碳(TOC)含量初步评价研究区源—储特征。【结果】(1)江爱达日那剖面甲丕拉组—波里拉组—巴贡组向上经历了扇三角洲→无障壁海岸→碳酸盐缓坡→浅海陆棚→三角洲的演化过程,共识别出10个亚相和8个微相;(2)研究区上三叠统构成了向上变深再变浅的海侵—海退序列,其中海侵序列由甲丕拉组碎屑岩序列和波里拉组碳酸盐岩序列构成,海退序列由巴贡组碎屑岩序列构成;(3)研究区甲丕拉组及巴贡组砂岩均为超低孔超低渗储层,巴贡组泥岩为非一般烃源岩,但向北烃源岩品质变好,结合最新古地理资料推测江爱达日那和沃若山之间洼地可能发育优质烃源岩,具有较好的勘探前景,但仍需予以证实。【结论】以上认识可为羌塘盆地晚三叠世沉积—构造演化研究及油气资源评价提供参考。

**关键词** 沉积相划分;沉积演化模式;源—储评价;上三叠统;羌塘盆地中部

**第一作者** 隋博雨,男,2002年出生,硕士研究生,沉积学,E-mail: 1165925494@qq.com

**通信作者** 王忠伟,男,副教授,中生代羌塘盆地演化及油气资源综合评价,E-mail: wzwdg@sina.com;

占王忠,男,高级工程师,羌塘盆地岩相古地理与能源地质调查,E-mail: zhanwangzhong@qq.com

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-0550(2026)02-0707-27

## 0 引言

羌塘盆地位于油气资源最为丰富的特提斯构造域东段,与之毗邻的西段是中东油气区,东南段则是东南亚油气区,是我国陆上新区面积最大的中生代海相沉积盆地,这一特殊的大地构造背景使得其备受石油地质工作者的高度重视(谭富文等,2002;王剑等,2004,2020;丘东洲等,2007;吴珍汉等,2014)。随着近年来羌塘盆地油气地质调查工作的不断深入,通过地表露头调查及地质调查井部署,在上三叠统中发现了分布较广且较好的泥质烃源岩及油气显示,逐渐确

立了以上三叠统为主要目的层的油气勘探思路(王剑等,2020;占王忠和谭富文,2020)。另外,北羌塘坳陷腹地最新完成的羌科1井在4 246.0 m~4 253.7 m井段的上三叠统那底岗日组火山碎屑岩中发现显著气测异常(全烃由0.044%上升至3.544%),其气源可能来自下伏的上三叠统(王剑等,2022)。

晚三叠世是中生代羌塘盆地演化的关键时期,受北部可可西里—金沙江古特提斯洋和中部龙木措—双湖古特提斯洋关闭的影响,自下而上依次充填了上三叠统甲丕拉组( $T_3j$ )、波里拉组( $T_3b$ )和巴贡

收稿日期:2024-12-07;修回日期:2025-02-20;录用日期:2025-04-01;网络出版日期:2025-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(42372129);四川省自然科学基金项目(2024NSFSC0833);现代古生物学和地层学国家重点实验室开放基金项目(223130);中国地质调查局项目(DD20230266)

组( $T_3bg$ ),表现出“两碎屑岩夹一灰岩”的特点,这一序列可能完整记录了羌塘盆地晚三叠世沉积演化过程(沈安江等,2024)。以往对羌塘盆地上三叠统研究多集中在油气地质条件评价方面(陈文彬等,2015;程乐利等,2020;刘中戎等,2022),而系统的沉积学研究工作相对薄弱,这对于认识羌塘盆地晚三叠世沉积演化过程、约束盆地属性及预测源一储空间分布等显然不足。江爱达日那剖面出露最完整的上三叠统,因而被学者建议作为盆地上三叠统正层型剖面(朱同兴等,2005)。该剖面良好的露头,清晰的地层界限及保存完整的沉积构造,为开展系统的沉积学研究提供了天然素材,是研究羌塘盆地上三叠统沉积演化的重要窗口。

基于此,本文以羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统甲丕拉组、波里拉组及巴贡组为重点研究对象,在剖面实测的基础上,结合岩石薄片观察、碎屑岩粒度分析(粒度曲线、萨胡判别函数、C-M图及结构参数散点图等)、典型原生沉积构造及古生物化石等相标志,系统分析了研究区甲丕拉组、波里拉组及巴贡组沉积相;综合前人研究成果,建立了羌塘盆地中部上三叠统沉积充填序列及演化模式;同时,结合研究区上三叠统储层物性特征及烃源岩生烃潜力,对盆地中部上三叠统油气勘探前景进行了初步评价。

## 1 区域地质背景及研究剖面

### 1.1 区域地质概况

羌塘盆地位于青藏高原中北部,在大地构造上与塔里木地块、昆仑地块、可可西里地块、松潘—甘孜地块和拉萨地块相邻,其形成、演化与北部可可西里—金沙江缝合带、中部龙木措—双湖缝合带和南部班公湖—怒江缝合带密切相关(李才等,2007;熊盛青等,2020;Wang *et al.*, 2022)。盆地自北向南可进一步划分为北羌塘坳陷、中央隆起带和南羌塘坳陷3个Ⅱ级构造单元(王剑等,2004, 2009),具有“两坳夹一隆”的构造格局(图1a)。最新高精度航空重、磁资料发现羌塘盆地并不存在统一的前寒武系变质基底,北羌塘坳陷整体表现为磁力高、重力低的特点,而南羌塘坳陷则与之相反,并可以进一步划分为31个凸起区和9个凹陷区(熊盛青等,2020;周道卿等,2021)。

近年来,基于对盆地演化研究取得的一些新认

识,特别是北羌塘晚三叠世不整合界面和古风化壳的发现,表明该时期盆地存在明显的沉积间断(付修根等,2007),证实中生代羌塘盆地具有不连续的沉积充填序列,是一个典型的叠合盆地,且南北羌塘演化存在明显差异。其中,北羌塘可能经历了从前陆盆地( $T_1-T_3$ )到裂谷盆地( $T_3-J_1$ )、被动大陆边缘盆地( $J_1-J_2$ )、最终转化为活动大陆边缘盆地( $J_2-J_3$ )并萎缩消亡( $J_3-K_1$ )的演化过程(王剑和付修根,2018);而南羌塘可能经历了被动大陆边缘盆地( $T_3-J_1$ )到弧前盆地( $J_1-J_2$ )、弧后盆地( $J_3$ )并逐渐消亡( $K_1$ )的演化过程(Ma *et al.*, 2017, 2023;沈安江等,2024)。羌塘盆地的形成与演化与其周缘古、新特提斯洋开启、扩张及消亡密切相关:石炭纪末—早二叠世早期,羌塘地块从冈瓦纳大陆分离,致使班公湖—怒江特提斯洋打开,北部可可西里—金沙江古特提斯洋和中部龙木措—双湖古特提斯洋则向北部俯冲并消减(Song *et al.*, 2017)。至晚三叠世早—中期(卡尼期—诺利期),可可西里—金沙江和龙木措—双湖古特提斯洋闭合,伴随着陆陆碰撞和褶皱造山,北羌塘地块处于强烈的挤压环境之下,发育复合前陆盆地(沈安江等,2024);随着古特提斯洋闭合引发的大规模海退,北羌塘前陆盆地逐渐萎缩,自下而上依次充填了上三叠统甲丕拉组、波里拉组和巴贡组(王剑等,2009)。晚三叠世晚期(诺利期—瑞替期),受造山带垮塌、板块回撤及班公湖—怒江特提斯洋快速扩张等作用的影响(Wang *et al.*, 2023),盆地内部发育广泛分布的火山喷发和火山沉积作用(Wang *et al.*, 2008;Fu *et al.*, 2010;Wang *et al.*, 2019),可能标志着新一轮盆地演化的开启。

### 1.2 研究剖面概况

江爱达日那剖面位于中央隆起带的北缘(图1a),出露的地层包括下三叠统康鲁组、硬水泉组,中三叠统康南组,上三叠统甲丕拉组、波里拉组及巴贡组(图1b)。

康鲁组与下伏上二叠统热觉茶卡组煤系地层呈整合接触,以发育向上变细的碎屑岩序列为特征,其与上覆下三叠统硬水泉组呈整合接触;硬水泉组下、中部以碳酸盐岩序列为主,上部过渡为细碎屑岩序列,与上覆中三叠统康南组呈整合接触;康南组下部为细碎屑岩序列,中部以发育碳酸盐岩序列为特征,向上过渡为粒度较粗的碎屑岩序列(朱同兴等,2005;朱同兴和李宗亮,2010)。上三叠统甲丕拉组

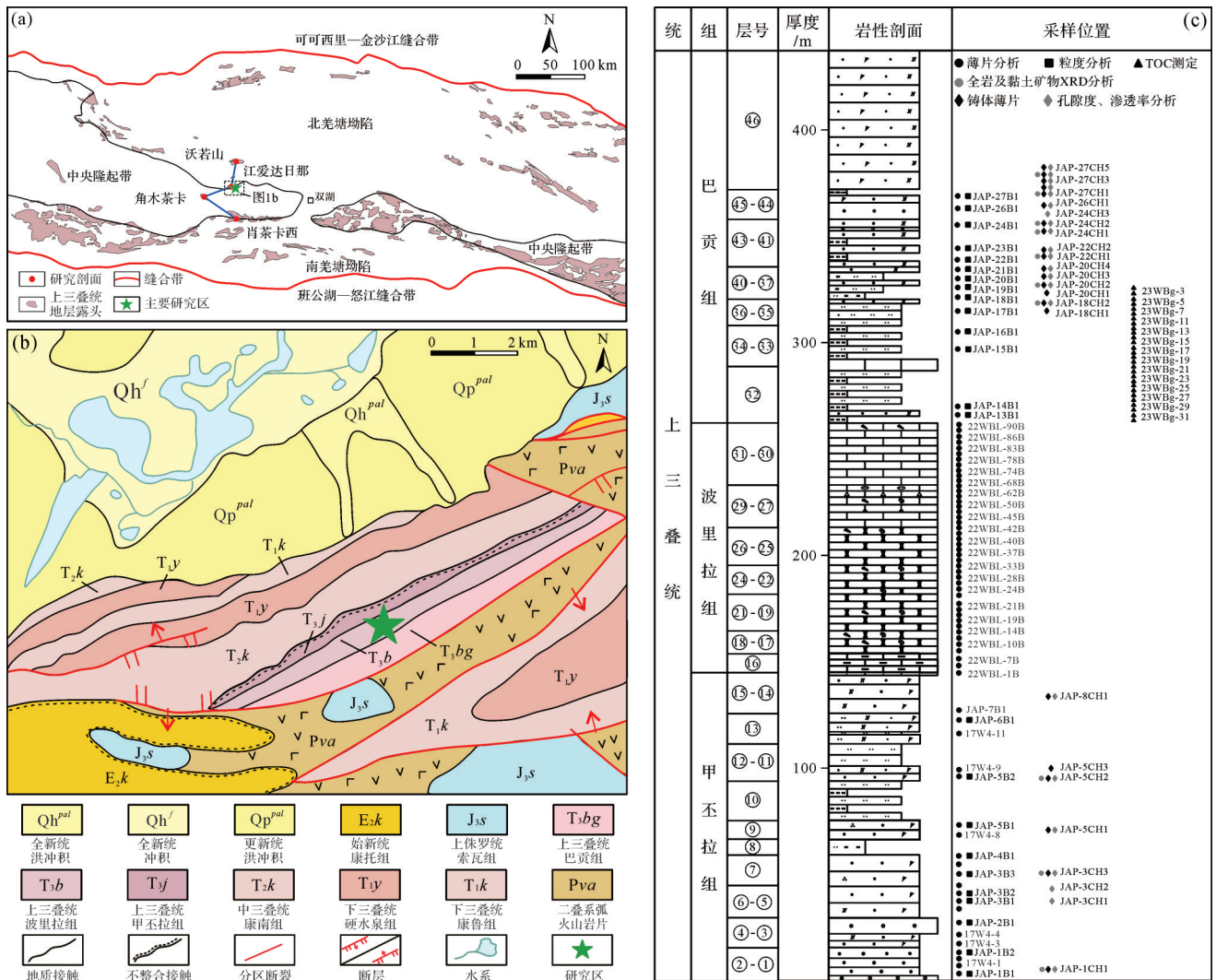


图1 研究区构造背景简图及江爱达日那剖面采样位置

(a)羌塘盆地构造单元图(据王剑等,2009修改);(b)江爱达日那地区简要地质图(据朱同兴和李宗亮,2010修改);(c)上三叠统柱状图及样品采集层位

Fig.1 Geotectonic setting map of study area and samples location in Jiang'ai Darina section

(a) tectonic unit map of Qiangtang Basin (modified from Wang et al., 2009); (b) geological map of Jiang'ai Darina area (modified from Zhu and Li, 2010); (c) stratigraphic column of the Upper Triassic and samples location

与下伏康南组呈平行不整合接触,底部为青灰色厚层成分细砾岩,向上为灰色、深灰色薄—中层状细砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质页岩和碳质页岩,与上覆波里拉组呈整合接触;波里拉组下部主要为深灰色—灰黑色薄层状泥质灰岩,中部为薄—中层瘤状灰岩与泥晶灰岩,上部为厚层块状角砾状灰岩,顶部为中层状浅灰色泥晶灰岩,其与上覆巴贡组呈整合接触;巴贡组下部为深灰色、灰色极薄层状泥岩夹少量粉砂岩,向上过渡为含砾粗砂岩及粉砂岩(朱同兴和李宗亮,2010),其与上覆上侏罗统索瓦组呈角度不整合接触(刘中戎等,2022)。本研究主要聚焦上三叠统甲丕拉组、波里拉组及巴贡组。

## 2 研究样品与方法

研究区江爱达日那剖面上三叠统厚约437.19 m,根据岩性变化特征可细分46层。本研究在上三叠统中共采集样品140余件,主要用于岩石薄片显微特征观察,碎屑岩颗粒粒度、物性、孔隙类型及有机质丰度分析(采样位置见图1c)。

首先,选取78件碎屑岩和碳酸盐岩样品磨制薄片用于岩石显微特征观察,其中碎屑岩主要观察岩石的碎屑岩颗粒组成、填隙物成分、结构、粒度、形状、圆度、表面特征及成熟度等特征;碳酸盐岩样品主要观察岩石中基质、颗粒组成、成岩作用、沉积组

构以及生物化石组合等。以上工作采用德国徕卡DM750P偏光显微镜并在西南石油大学天然气地质四川省重点实验室完成。

其次,选取10件甲丕拉组和14件巴贡组砂岩样品用于薄片粒度分析,该实验由四川省科源工程技术测试中心分析完成。利用显微镜测量样品中100~450个碎屑颗粒的最大视粒径,并换算成 $\Phi$ 值,运用Origin软件绘制相关的粒度曲线(如频率曲线、累积曲线、概率值累积曲线等),应用福克和沃德公式(Folk and Ward, 1957)计算碎屑颗粒平均粒径值、标准偏差、偏度、尖度、峰度等粒度参数,绘制C-M图及结构参数散点图等。

另外,选取55件甲丕拉组和巴贡组样品用于储层特征评价。其中,22件砂岩样品用于测定储层孔隙度和渗透率,将岩石样品钻成直径2.5 cm,长度4.0 cm的圆柱体,通过AP-608覆压孔隙度渗透率测量仪测定;23件铸体薄片用于储层孔隙类型观察,采用ZEISS光学显微镜完成;10件砂岩样品用于全岩和黏土矿物粉晶X射线衍射(XRD)分析,利用SmartLab SE型X射线衍射仪测定,测试流程参照中华人民共和国石油天然气行业标准SY/T 5163—2018。以上实验在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室完成。

最后,选取28件巴贡组泥岩样品用于总有机碳(TOC)含量测定,其通过TL851-6K高频红外碳硫分析仪在西南石油大学天然气地质四川省重点实验室完成,具体测试流程按照国家标准流程GB/T 19145—2003。

### 3 结果

#### 3.1 上三叠统岩石类型及特征

江爱达日那剖面出露的上三叠统甲丕拉组、波里拉组和巴贡组整体表现为“碎屑岩—碳酸盐岩—碎屑岩”的特征,岩石类型丰富。

##### 3.1.1 甲丕拉组岩石类型

甲丕拉组厚约142.16 m,岩石类型(按由粗到细的顺序)主要为砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂质砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩等碎屑岩,顶部发育少量砂质灰岩(图2,3)。

砾岩与含砾砂岩:青灰色—灰绿色,中—厚层状构造,主要分布在层①、②和④,累计厚约21.91 m。砾岩中砾石含量介于40%~50%,大小多分布在

15~40 mm,多为石英岩、安山岩、火山碎屑岩、灰岩和泥岩砾石,为复成分砾岩(图3a);砾石主要为次圆状—一次棱角状,少数呈棱角状,分选中等,排列无明显定向性。相比而言,含砾砂岩中砾石含量明显降低,占10%~15%,砾径变细,多分布在2~10 mm(图3b),主要为含砾岩屑中—粗砂岩及含砾长石岩屑粗砂岩,表面可见杂乱分布的自形黄铁矿(图3c)。

砂岩:灰色—深灰色,中层状构造,是甲丕拉组的主体,累计厚约68.57 m。根据薄片砂岩碎屑颗粒组分差异可将其进一步划分为岩屑砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑石英砂岩(图2)。岩屑砂岩多为中—细粒砂状结构,岩屑占碎屑颗粒的25%~45%,石英为40%~70%,长石为5%~15%(图3d,e);长石岩屑砂岩多为中粒砂状结构,相比岩屑砂岩而言,长石含量明显增多,占碎屑颗粒的10%~30%,岩屑为20%~40%,石英为35%~60%(图3f,g);岩屑石英砂岩多为中—粗粒砂状结构,石英约占75%,长石为2%~9%,岩屑为15%~20%(图3h)。石英可见波状消光现象(图3i),长石表面蚀变严重(图3f,g),岩屑则以沉积岩与变质岩岩屑为主,还含有少量岩浆岩岩屑(安山岩、花岗岩岩屑等,图3j~l),碎屑颗粒分选磨圆差—中等。地层底部—下部的岩屑砂岩及长石岩屑砂岩中

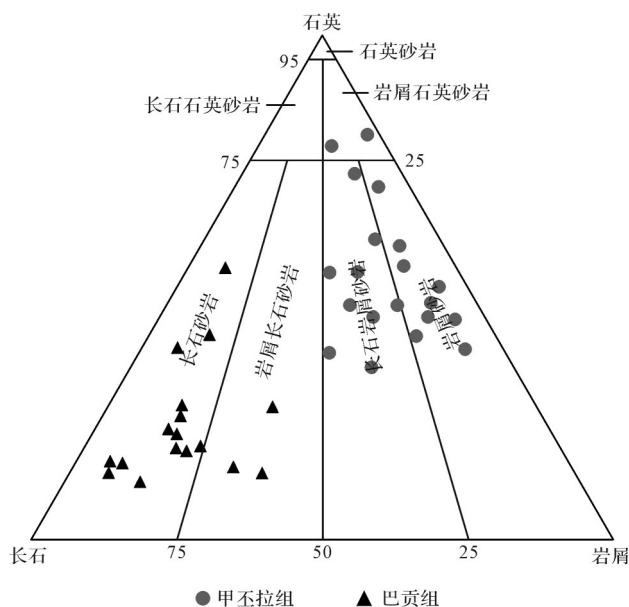


图2 羌塘盆地中部江爱达日那剖面甲丕拉组及巴贡组砂岩成分分类图

Fig.2 Sandstone composition classification of the Jiapila Formation and Bagong Formation in Jiang'ai Darina section, central Qiangtang Basin

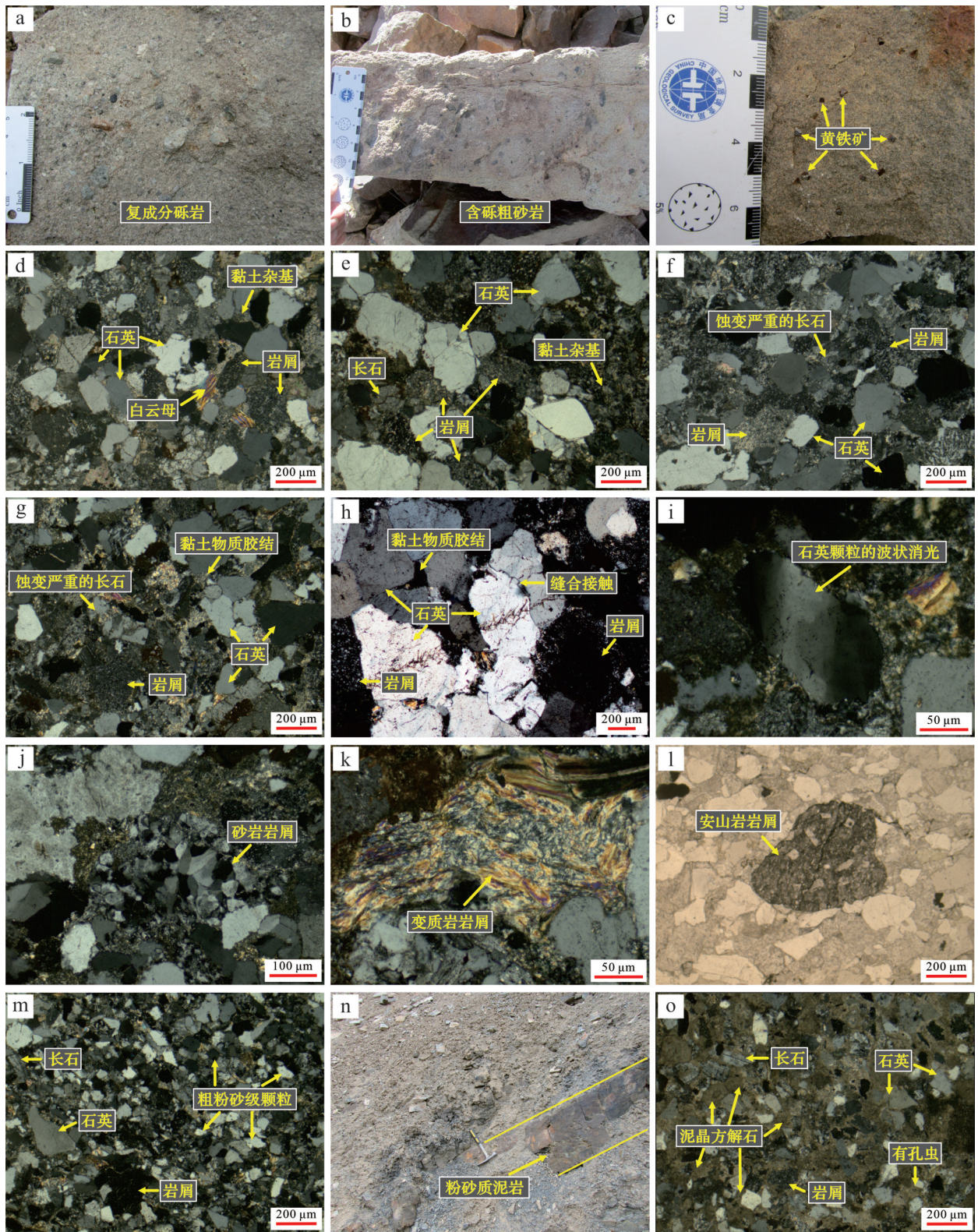


图3 羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统甲丕拉组岩性特征

(a)复成分砾岩,层④;(b)含砾粗砂岩,层②;(c)含砾粗砂岩中发育的自形状黄铁矿,层②;(d,e)岩屑砂岩镜下特征,正交偏光,层③、层⑤;(f,g)长石岩屑砂岩镜下特征,部分长石表面蚀变严重,正交偏光,层③、层⑤;(h)岩屑石英砂岩镜下特征,部分颗粒间呈缝合状接触,正交偏光,层⑨;(i)石英颗粒表面的波状消光,正交偏光,层⑨;(j)砂岩岩屑镜下特征,正交偏光,层⑨;(k)变质岩岩屑镜下特征,正交偏光,层⑦;(l)安山岩岩屑镜下特征,单偏光,层①;(m)粉砂质砂岩镜下特征,层⑬;(n)粉砂质泥岩,层⑧;(o)砂质灰岩镜下特征,正交偏光,层⑮

Fig.3 Lithologic characteristics of the Upper Triassic Jiapila Formation in Jiang'ai Darina section, central Qiangtang Basin

黏土杂基含量介于15%~20%，岩石多呈杂基支撑结构，基底式胶结(图3d)；中部—顶部的长石岩屑砂岩及岩屑石英砂岩等则为颗粒支撑结构，颗粒间多呈线接触—缝合接触，以孔隙式和接触式胶结为主(图3g)，胶结物多为黏土物质。总体上，甲丕拉组砂岩的成分成熟度与结构成熟度均较低，且向上颜色逐渐变深、粒度逐渐变细，反映水体逐渐变深的趋势。

**粉砂质砂岩：**灰色—深灰色，薄—中层状构造，分布在层⑬，厚约12.84 m。根据碎屑颗粒组分可将其进一步划分为粉砂质长石岩屑细砂岩，粉砂级颗粒含量介于25%~30%，粒径多为0.05~0.10 mm(图3m)。

**粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩：**深灰色，薄层状构造。其中粉砂岩主要分布在层⑩和⑫，累计厚约21.91 m，向上则多以4~6 cm厚的夹层产出于顶部砂岩间(层⑬)。相比而言，粉砂质泥岩发育较少，分布在层⑧，累计厚约7.21 m(图3n)。泥岩主要发育在层⑩，向上至层⑭、⑮也有零星分布，累计厚度约8.72 m，多以夹层形式产出于砂岩或粉砂岩间，单层厚度较小，介于5~10 cm。

**砂质灰岩：**深灰色，分布在层⑮顶部，厚约1 m，其是向上覆波里拉组过渡的一种特殊岩石类型。主要由陆源碎屑颗粒(含量约45%)和泥晶方解石(含量约50%)构成，可见少量生物化石和黏土成分(图3o)。岩石中陆源碎屑颗粒杂乱分布在泥晶方解石基质中，其中陆源碎屑颗粒以石英为主，还含有少量岩屑和长石，颗粒分选较差，磨圆棱角状—次棱角状，粒径多分布在0.09~1.50 mm。

### 3.1.2 波里拉组岩石类型

波里拉组厚约118.54 m，岩石类型主要为砾屑灰岩、颗粒质灰泥石灰岩(粒泥灰岩)、粉晶灰岩、泥晶灰岩及泥灰岩等碳酸盐岩(图4a~h)。

**砾屑灰岩：**灰色，中—厚层状构造，分布在层⑳，累计厚约1 m，按砾石形态可进一步划分为竹叶状灰岩和角砾状灰岩。竹叶状灰岩中砾石含量约70%，形态似竹叶状(图4a)，大小多分布在15~40 mm，分选中等。相比而言，角砾状灰岩中砾石含量有所降低，约占60%，几乎均为棱角状，大小多分布在30~50 mm，分选较差。砾石成分为深灰色泥晶灰岩，排列均无明显定向性，可能反映了风暴作用的沉积结果。

**颗粒质灰泥石灰岩：**浅灰色—灰色，薄—中层状构造，累计厚约32.3 m，按照颗粒类型可细分为：(1)生屑质灰泥石灰岩：见于层⑱、㉓、㉔、㉕和㉖，其中除层㉖外均呈瘤状产出，累计厚约21.27 m。岩石结构组分主要为泥晶方解石、生物碎屑和粪球粒(图4b)。泥晶方解石基质含量为60%~80%；生物碎屑为10%~30%；粪球粒为0~3%。(2)粪球粒质灰泥石灰岩：见于层⑰、㉑和㉒，其中在层㉑呈瘤状产出，累计厚约3.75 m。岩石结构组分主要为泥晶方解石、粪球粒、生物碎屑及陆源碎屑(图4c)。泥晶方解石基质含量为60%~70%；粪球粒为10%~35%，形状多为球形、卵形，分选好；生物碎屑为5%；陆源碎屑含量小于1%。(3)生屑、生物质灰泥石灰岩：见于层㉗，呈瘤状产出，厚约2.82 m。岩石结构组分主要为泥晶方解石、生物化石及生物碎屑(图4d)。泥晶方解石基质含量为65%；生物化石为20%；生物碎屑约15%。(4)内碎屑质灰泥石灰岩：见于层㉘，厚约4.46 m。岩石结构组分主要为泥晶方解石、内碎屑及生物碎屑。泥晶方解石基质含量为60%~70%；内碎屑为15%~40%，分选中等，形状多为次圆状，粒径为0.1~0.4 mm；生物碎屑为1%~3%(图4e)。岩石中生物类型丰富，常见介壳类、腹足类及海百合茎等生物碎屑和保存较完好的有孔虫、介形虫、腹足类及双壳类等生物化石，生物颗粒内部(包括生物化石及生物碎屑)重结晶作用较严重。

**粉晶灰岩：**灰色—深灰色，薄—中层状构造，分布在层㉙，呈瘤状产出，厚约6.65 m。岩石结构组分主要为粉晶方解石、泥晶方解石、黏土物质、生物颗粒及陆源碎屑。其中粉晶方解石含量为70%~75%；泥晶方解石为20%~30%；黏土物质为5%~7%；生物颗粒为3%~5%；陆源碎屑为1%(图4f)。

**泥晶灰岩：**灰色—深灰色，薄—中层状构造，是波里拉组的主体，累计厚约69.57 m，在层⑰、⑲、㉚和㉛呈瘤状产出。岩石结构组分主要为泥晶方解石、生物颗粒及粪球粒(图4g)。其中泥晶方解石含量为90%~95%；粪球粒和生物颗粒总含量为3%~5%。根据薄片观察结果，岩石中生物种类丰富，可见介形虫、有孔虫、双壳类、海百合及腹足类。

**泥灰岩：**灰色—深灰色，薄—中层状构造，分布在层⑰，厚约9.02 m，其是下伏甲丕拉组碎屑岩向碳酸盐过渡的岩石类型。岩石结构组分主要为泥晶方解石、黏土物质、生物碎屑及陆源碎屑(图4h)。其中泥

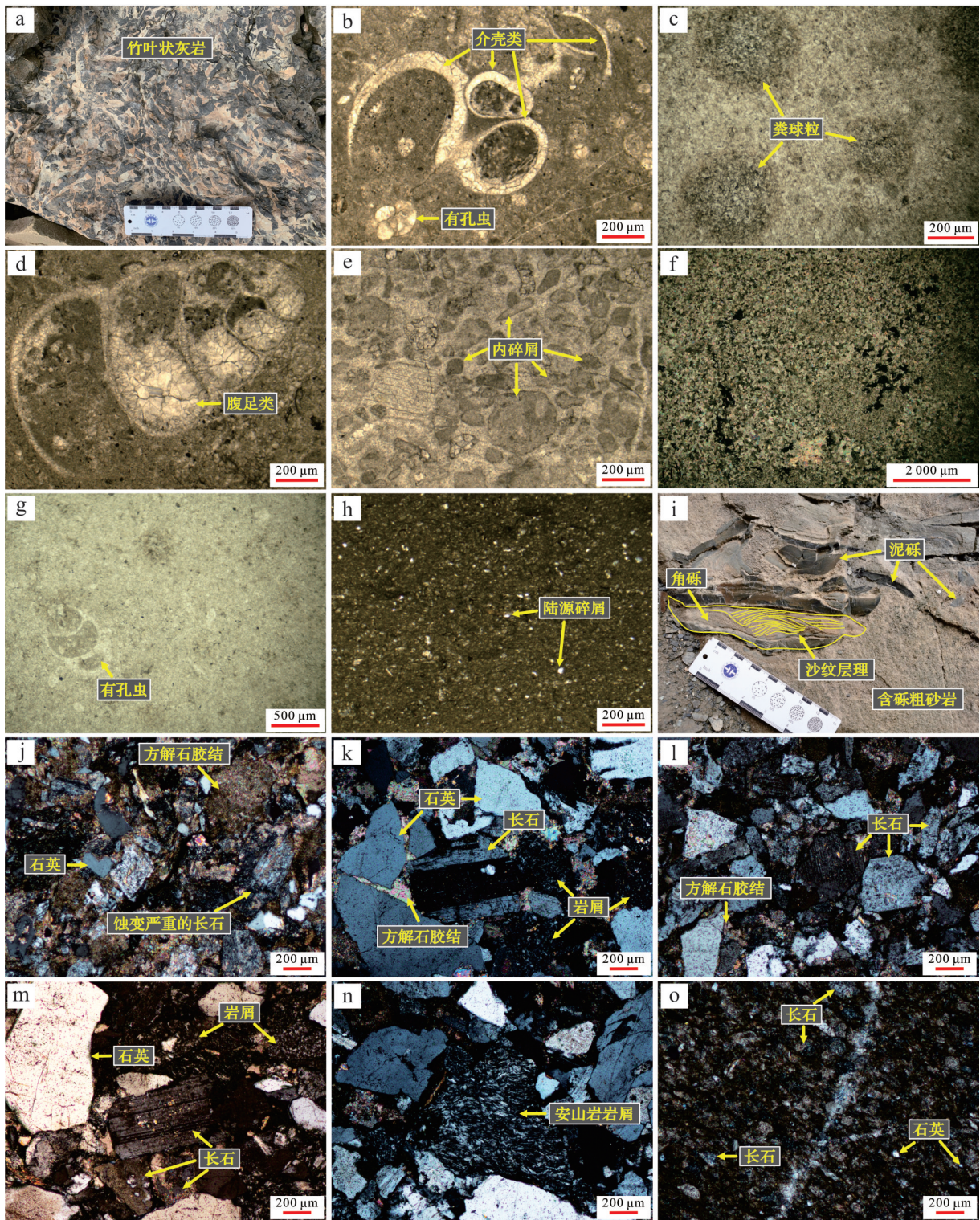


图4 羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统波里拉组和巴贡组岩性特征

(a)竹叶状灰岩特征,层⑩;(b)生屑质灰泥石灰岩镜下特征,单偏光,层⑩;(c)粪球粒质灰泥石灰岩镜下特征,单偏光,层⑩;(d)生屑、生物质灰泥石灰岩中保存较完整的腹足类化石,单偏光,层⑩;(e)内碎屑质灰泥石灰岩镜下特征,单偏光,层⑩;(f)粉晶灰岩镜下特征,正交偏光,层⑩;(g)泥晶灰岩镜下特征,发育保存较为完整的有孔虫化石,单偏光,层⑩;(h)泥灰岩镜下特征,发育较多陆源碎屑,正交偏光,层⑩;(i)含砾砂岩中发育沙纹层理的砾石,层⑩;(j)长石砂岩镜下特征,发育大量方解石胶结,正交偏光,层⑩;(k,l)长石砂岩镜下特征,正交偏光,层⑩、层⑩;(m)岩屑长石砂岩镜下特征,正交偏光,层⑩;(n)安山岩岩屑镜下特征,正交偏光,层⑩;(o)含砂粉砂岩镜下特征,正交偏光,层⑩

Fig.4 Lithologic characteristics of the Upper Triassic Bolila Formation and Bagong Formation in Jiang'ai Darina section, central Qiangtang Basin

晶方解石含量为50%~60%;黏土物质为40%~45%;生物碎屑为3%~5%;陆源碎屑含量为2%~4%,且向上呈现逐渐减少的趋势。在野外露头还能观察到保存较为完好的腹足类、海百合及双壳类生物化石。

### 3.1.3 巴贡组岩石类型

巴贡组厚约176.49 m,岩石类型主要为含砾砂岩、砂岩、含砂粉砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩等碎屑岩,底部发育少量泥晶灰岩(图2、图4i~o)。

含砾砂岩:深灰色—灰色,厚层状—块状构造,分布在层⑫和⑭,累计厚约8.39 m。岩石中砾石含量为15%~20%,大小多分布在20~100 mm,多为深灰色泥岩、粉砂岩砾石;形态多呈棱角状且分选较差,排列无明显定向性(图4i),可能由滑塌作用所形成。

砂岩:灰色—深灰色,中—厚层状构造,是巴贡组的主体,累计厚约88.24 m,在地层中部(层⑳—层㉑)多与粉砂岩、泥岩等互层出现,向上砂岩逐渐增多(层㉒—层㉓)。根据薄片中心砂岩碎屑颗粒组分差异可将其进一步划分为长石砂岩和岩屑长石砂岩(图2)。长石砂岩多为中—粗粒砂状结构,其中长石为碎屑颗粒的50%~80%,石英为10%~35%,岩屑为5%~19%(图4j~l);岩屑长石砂岩多为细—中粒砂状结构,岩屑含量明显升高,为25%~35%,石英为10%~25%,长石为45%~60%(图4m)。碎屑颗粒中,长石表面蚀变严重(图4j),岩屑主要为变质岩岩屑和岩浆岩岩屑(图4n),颗粒整体分选中等,磨圆棱角状—次棱角状。地层中部的长石砂岩发育大量方解石胶结物,呈现基底式胶结(图4j);而上部—顶部的长石砂岩及岩屑长石砂岩则多为颗粒支撑结构,颗粒间多呈线接触,以孔隙式和接触式胶结为主,胶结物多为方解石和黏土物质(图4k~m)。总体上,巴贡组砂岩成分成熟度与结构成熟度均较低,且向上颜色逐渐变浅,反映水体逐渐变浅的趋势。

含砂粉砂岩:灰色—深灰色,薄—中层状构造,分布于层㉔,累计厚度约为4.55 m。砂级颗粒含量为15%~20%,主要为表面发生蚀变的长石(图4o),粒径多为0.15~0.20 mm;颗粒分选较差,磨圆棱角状—次棱角状。

粉砂岩、泥质粉砂岩:深灰色—灰黑色,薄层状构造。其中粉砂岩主要分布在层㉕、㉖和㉗,向上则以夹层形式产出于含砾粗砂岩之间(层㉘),累计厚度约为26.39 m,多为钙质粉砂岩。泥质粉砂岩分布

在层㉙和㉚,累计厚度约为9.13 m。

粉砂质泥岩、泥岩:深灰色—灰黑色,薄层状构造。其中粉砂质泥岩分布在层㉛,厚约3.49 m,与泥质粉砂岩呈互层状出现。相比而言,泥岩在巴贡组的分布较为广泛,自地层底部—上部均有发育(层㉜、㉝、㉞和㉟),累计厚度约为30.86 m,向上泥岩逐渐减少,反映水体逐渐变浅,水动力逐渐增强。

泥晶灰岩:深灰色,薄—中层状构造,分布于层㊱,厚度约为5.44 m,见双壳类化石。

## 3.2 上三叠统砂岩粒度特征

砂岩的粒度分布特征是衡量沉积介质能量的重要参数,也是判别沉积环境及水动力条件的良好标志(林春明等,2021)。本文以甲丕拉组和巴贡组砂岩粒度曲线、粒度参数、萨胡判别函数及C-M图解等恢复晚三叠世沉积环境。

### 3.2.1 粒度曲线特征

粒度曲线是碎屑岩粒度表征的重要内容,其能够为沉积环境的分析提供可靠依据(朱筱敏,2020)。基于甲丕拉组和巴贡组砂岩碎屑颗粒粒度特征绘制了直方图、频率曲线、累积曲线及概率值累积曲线,具体特征如下。

#### 1) 甲丕拉组砂岩粒度曲线特征

甲丕拉组砂岩碎屑颗粒粒度直方图及频率曲线主要呈单峰形态,少数为双峰,粒径分布范围为 $-1.0\sim 5.5\Phi$ ,峰值范围为 $0.6\sim 3.8\Phi$ ,主要集中在 $0.9\sim 1.2\Phi$ ,少数样品峰值在 $2.5\Phi$ 左右,表明样品以中砂级颗粒为主。粒度累积曲线斜率较高( $65^\circ\sim 70^\circ$ ),反映样品粒度分布相对集中,即颗粒分选整体较好。粒度概率值累积曲线总体上可分为二段式、三段式和四段式,具体特征如下。

二段式:该类型主要见于JAP-3b1、JAP-4b1及JAP-6b1样品,包含1段跳跃次总体和1段悬浮次总体(图5a,b),粒径范围为 $-0.3\sim 3.8\Phi$ 。其中,跳跃次总体占比为89.6%~99.3%,斜率为 $42^\circ\sim 45^\circ$ ;悬浮次总体占比小,为0.7%~10.4%,斜率波动大(为 $35.9^\circ\sim 62.5^\circ$ )。另外,细截点变化范围较大,为 $1.2\sim 3.1\Phi$ 。该曲线类型可能代表扇三角洲前缘的河道环境(高丽坤等,2010)(图5a)及滨岸环境(图5b)。

三段式:该类型可进一步划分为2个亚类。亚类1主要见于JAP-1b1、JAP-1b2、JAP-2b1及JAP-3b2样品,包含1段滚动次总体、1段跳跃次总体和1段悬浮次总体(图5c,d),粒径范围为 $-0.3\sim 4.5\Phi$ 。其中,跳

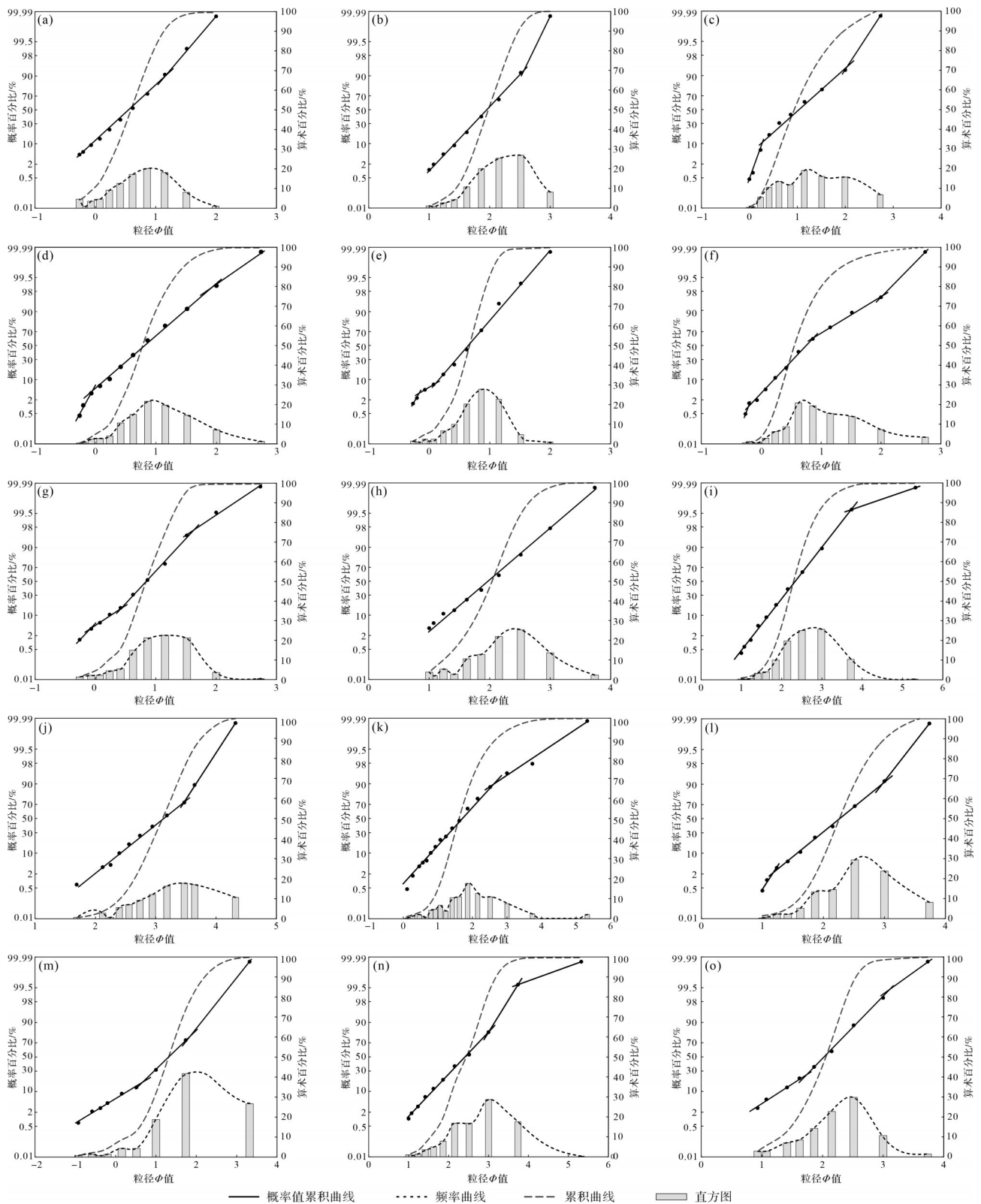


图5 羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统甲丕拉组和巴贡组砂岩碎屑颗粒粒度曲线特征

(a)JAP-3b1;(b)JAP-6b1;(c)JAP-1b2;(d)JAP-3b2;(e)JAP-5b1;(f)JAP-3b3;(g)JAP-5b2;(h)JAP-16b1;(i)JAP-19b1;(j)JAP-23b1;(k)JAP-27b1;(l)JAP-17b1;(m)JAP-22b1;(n)JAP-14b1;(o)JAP-24b1

Fig.5 Clastic grain-size curves characteristics of sandstone from the Upper Triassic Jiapila Formation and Bagong Formation in Jiang'ai Darina section, central Qiangtang Basin

跃次总体为主体,含量为76%~94%,斜率为 $40^{\circ}$ ~ $55^{\circ}$ ;滚动次总体占比低(为4.5%~15%),但斜率较高( $60^{\circ}$ ~ $75^{\circ}$ );悬浮次总体占比多为3%~5%,斜率为 $40^{\circ}$ ~ $50^{\circ}$ 。粗截点和细截点分别集中在 $-0.1\sim 0.3\Phi$ 和 $1.6\sim 2.3\Phi$ 。该曲线类型可能代表扇三角洲平原(图5c)及扇三角洲前缘的河道环境(邹妞妞等,2015)(图5d)。亚类2仅见于JAP-5b1样品,包含1段滚动次总体和2段跳跃次总体(图5e),粒径范围为 $0.3\sim 2.0\Phi$ 。跳跃次总体占比高达96%,因波浪冲刷回流作用表现为不同斜率(分别为 $28^{\circ}$ 和 $50^{\circ}$ )的两段,占比分别为4.3%和91.7%。滚动次总体含量约4%,斜率约 $60^{\circ}$ 。粗截点和细截点分别为 $-0.16\Phi$ 和 $0.11\Phi$ ,反映水动力作用较强,且波浪冲刷回流作用较为明显。该曲线类型可能代表扇三角洲前缘河口环境(图5e)。

四段式:该类型主要见于JAP-3b3和JAP-5b2样品,包含1段滚动次总体、2段跳跃次总体和1段悬浮次总体(图5f,g),粒径分布范围为 $-0.3\sim 2.8\Phi$ ,反映波浪冲刷回流作用较为明显。另外,滚动—跳跃次总体的截点为 $-0.2\sim -0.1\Phi$ ,两段跳跃次总体的截点为 $0.4\sim 0.9\Phi$ ,跳跃—悬浮次总体的截点为 $1.6\sim 2.0\Phi$ ,反映水动力较强。该类型中,滚动次总体及悬浮次总体占比均较低(低于4%),斜率分别为 $60^{\circ}$ ~ $70^{\circ}$ 和 $35^{\circ}$ 。跳跃次总体占比为93%~95%,同样表现为两段不同斜率的跳跃次总体,但可能反映了不同的沉积环境。JAP-3b3样品第一段跳跃次总体含量及斜率(分别为60%和 $45^{\circ}$ )大于第二段跳跃次总体(分别为35%和 $30^{\circ}$ )(图5f),可能代表了扇三角洲前缘的河口环境;JAP-5b2样品则相反,第一段跳跃次总体的占比及斜率(分别为12%和 $30^{\circ}$ )小于第二段跳跃次总体(分别为81%和 $48^{\circ}$ )(图5g),反映波浪的回流作用较为明显,可能代表了滨岸环境(赵鲁阳等,2015)。

## 2) 巴贡组砂岩粒度曲线特征

巴贡组砂岩粒度直方图及频率曲线呈单峰形态,粒径分布范围为 $-1.0\sim 5.5\Phi$ (主要集中在 $0\sim 3.8\Phi$ ),峰值分布范围为 $1.5\sim 3.5\Phi$ ,多集中在 $2.5\sim 3.0\Phi$ ,表明样品以细砂级颗粒为主。粒度累积曲线斜率较高( $60^{\circ}$ ~ $70^{\circ}$ ),反映样品粒度分布相对集中,即颗粒分选较好。巴贡组砂岩粒度概率值累积曲线总体上可分为一段式、二段式和三段式,具体特征如下。

一段式:该类型主要见于JAP-15b1和JAP-16b1样品,粒径范围为 $1\sim 4\Phi$ ,粒度曲线为一条斜率中等(约 $40^{\circ}$ )的直线(图5h),反映重力流沉积特征,可能代表了三角洲前缘局部发生的滑塌作用(占王忠等,2019)。

二段式:该类型主要见于JAP-19b1、JAP-23b1、JAP-26b1和JAP-27b1样品,包含1段跳跃次总体和1段悬浮次总体(图5i~k),粒径范围为 $0\sim 5.5\Phi$ 。跳跃次总体为主体部分,占比为74.5%~99.6%,斜率为 $36^{\circ}$ ~ $50^{\circ}$ ;悬浮次总体占比较低且变化范围大(为0.4%~25.5%),斜率分布范围为 $20^{\circ}$ ~ $57^{\circ}$ 。另外,细截点较细,为 $2.6\sim 3.7\Phi$ 。该类型曲线可能代表了三角洲前缘(图5i,j)及三角洲平原(图5k)的分流河道环境(张妍等,2017)。

三段式:该类型同样包含2个亚类。亚类1主要见于JAP-17b1、JAP-18b1、JAP-20b1和JAP-22b1样品,包含1段滚动次总体、1段跳跃次总体和1段悬浮次总体(图5l,m),粒径范围为 $-1\sim 4\Phi$ 。其中,跳跃次总体占比为55%~87%,斜率约为 $40^{\circ}$ ;滚动次总体占比较低(为2%~16.5%),斜率为 $30^{\circ}$ ~ $50^{\circ}$ ;悬浮次总体占比波动较大(4%~37%),斜率约为 $50^{\circ}$ 。粗截点和细截点变化范围分别为 $0.2\sim 1.5\Phi$ 和 $1.7\sim 3.0\Phi$ ,该曲线类型可能代表三角洲前缘河道环境(图5l,m)(厚刚福等,2019)。亚类2主要见于JAP-13b1、JAP-14b1和JAP-24b1样品,包含2段跳跃和1段悬浮次总体(图5n,o),粒径范围为 $0\sim 5.5\Phi$ 。跳跃次总体占比高,其中第一段跳跃次总体占比为25%~82%,斜率为 $30^{\circ}$ ~ $50^{\circ}$ ;第二段跳跃次总体占比为17%~73%,斜率为 $45^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$ 。悬浮次总体占比较低(为0.3%~1.5%),斜率为 $20^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$ 。粗截点和细截点变化范围分别为 $1.25\sim 2.95\Phi$ 和 $2.00\sim 3.75\Phi$ 。该类型曲线可能代表浅海陆棚环境(图5n)及三角洲前缘的河口环境(图5o)。

## 3.2.2 粒度参数特征

粒度参数能够定量地表示碎屑颗粒的粒度特征,可用于判别沉积环境特征(Folk and Ward, 1957)。本文主要采用福克和沃德公式计算平均粒径( $M_z$ )、标准偏差( $\sigma_1$ )、偏度( $SK_1$ )及峰度( $K_c$ )等粒度参数。

### 1) 平均粒径和中值粒径

平均粒径和中值粒径反映了砂岩碎屑颗粒粒径的集中趋势(陈嘉诺等,2024),主要由沉积介质的平

均动力能及来源物质的原始大小两方面所控制(朱筱敏, 2020)。甲丕拉组砂岩的平均粒径和中值粒径分布范围分别为 0.25~0.66 mm(均值为 0.49 mm)和 0.23~0.67 mm(均值为 0.51 mm),综合判断其碎屑颗粒粒径主要介于细砂到粗砂间,以中砂为主。巴贡组砂岩的平均粒径和中值粒径分布范围分别为 0.12~0.43 mm(均值为 0.25 mm)和 0.12~0.44 mm(均值为 0.26 mm),其粒径则介于细砂到中砂,以细砂为主。

### 2) 标准偏差和分选系数

标准偏差和分选系数是衡量沉积物分选程度的参数,其有助于解释沉积物搬运的水动力机制,根据分选系数  $S_0$  大小可划分为 3 个分选等级:即分选好 ( $S_0=1\sim 2.5$ ),分选中等 ( $S_0=2.5\sim 4.0$ )和分选差 ( $S_0>4.0$ );根据标准偏差  $\sigma_1$  的大小可划分为 7 个分选等级:即分选极好 ( $\sigma_1<0.35$ ),分选好 ( $\sigma_1=0.35\sim 0.50$ ),分选较好 ( $\sigma_1=0.50\sim 0.71$ ),分选中等 ( $\sigma_1=0.71\sim 1.00$ ),分选较差 ( $\sigma_1=1.00\sim 2.00$ ),分选差 ( $\sigma_1=2.00\sim 4.00$ )及分选极差 ( $\sigma_1>4.00$ )(朱筱敏, 2020)。

甲丕拉组砂岩分选系数  $S_0$  和标准偏差  $\sigma_1$  的分布范围分别为 1.38~2.25 和 0.39~0.93,除 JAP-1b1 砂岩样品分选中等外,其余样品碎屑颗粒分选为较好—好。巴贡组砂岩分选系数  $S_0$  和标准偏差  $\sigma_1$  的分布范围分别为 1.54~2.01 和 0.47~0.92,除 JAP-22b1 及 JAP-27b1 砂岩样品分选中等外,其余样品分选为好—较好。

### 3) 偏度和峰度

偏度 ( $SK_1$ ) 和峰度 ( $K_c$ ) 常用于反映沉积物频率曲线的双峰性质及尾部变化,在判断沉积环境时有重要意义 (Folk and Ward, 1957)。偏度主要反映粒度分布的不对称程度,其中正偏态指频率曲线中峰偏向粗粒度一侧,而负偏态则指频率曲线中峰偏向细粒度一侧,可划分为 5 个等级,即当  $SK_1=-1.0\sim -0.3$  时为很负偏态,  $SK_1=-0.3\sim -0.1$  时为负偏态,  $SK_1=-0.1\sim +0.1$  时近于对称,  $SK_1=+0.1\sim +0.3$  时为正偏态,  $SK_1=+0.3\sim +1$  时为很正偏态;峰度是衡量频率曲线尖锐程度的粒度参数,对非正态曲线的衡量有重要意义,其中当  $K_c<0.67$  时反映曲线很平坦,  $K_c=0.67\sim 0.9$  时则为平坦,  $K_c=0.90\sim 1.11$  时则为中等(正态),  $K_c=1.11\sim 1.56$  为尖锐,  $K_c=1.56\sim 3.00$  为很尖锐,  $K_c>3.00$  时为非常尖锐 (Folk and Ward, 1957)。

甲丕拉组砂岩样品偏度值  $SK_1$  的分布范围为 -0.029~0.357,反映大部分样品的粒度频率曲线近于

对称,少数显示为正偏态—很正偏态;样品峰度值  $K_c$  的分布范围为 0.93~1.27,反映频率曲线尖锐程度为中等(正态)—尖锐。巴贡组样品偏度值  $SK_1$  的分布范围为 -0.056~0.21,反映大部分样品频率曲线近于对称,少数为正偏态;样品峰度值  $K_c$  的分布范围为 0.95~1.29,反映频率曲线尖锐程度同样为中等(正态)—尖锐。

### 3.2.3 萨胡判别函数

Sahu (1964) 利用粒度参数建立了多变量判别函数,其可定量区分相似能量条件的沉积环境。本文选用鉴别海滩与浅海、浅海与河流/三角洲、河流与浊流的 3 个萨胡判别函数来进一步区分甲丕拉组与巴贡组的沉积环境(判别公式及相应粒度参数见表 1)。其中,在判别函数  $Y_{\text{海滩与浅海}}$  中,当  $Y_{\text{海滩与浅海}}<65.365$  为海滩,  $Y_{\text{海滩与浅海}}>65.365$  为浅海;在判别函数  $Y_{\text{浅海与河流/三角洲}}$  中,当  $Y_{\text{浅海与河流/三角洲}}>-7.419$  0 为浅海,  $Y_{\text{浅海与河流/三角洲}}<-7.419$  0 为河流/三角洲;在判别函数  $Y_{\text{河流与浊流}}$  中,当  $Y_{\text{河流与浊流}}>9.843$  3 为河流,  $Y_{\text{河流与浊流}}<9.843$  3 为浊流 (Sahu, 1964)。

甲丕拉组 10 件砂岩样品  $Y_{\text{海滩与浅海}}$  值变化范围为 34.943 0~85.193 7(均值为 48.306 4),  $Y_{\text{浅海与河流/三角洲}}$  值变化范围为 -8.332 9~-1.018 9(均值为 -2.952 0),属于浅海环境,  $Y_{\text{河流与浊流}}$  值变化范围为 4.854 8~9.055 6(均值为 6.398 5)。甲丕拉组砂岩除样品 JAP-1b1 外,其他样品  $Y_{\text{海滩与浅海}}$  值均小于 65.365 且  $Y_{\text{浅海与河流/三角洲}}$  值均大于 -7.419 0,而全部样品的  $Y_{\text{河流与浊流}}$  值均小于 9.843 3,反映浅海海滩并伴随着浊流的环境。巴贡组 14 件砂岩样品  $Y_{\text{海滩与浅海}}$  值变化范围为 37.248 2~88.007 6(均值为 47.178 3),  $Y_{\text{浅海与河流/三角洲}}$  值变化范围为 -7.90 4~-1.772 8(均值为 -3.120 4),  $Y_{\text{河流与浊流}}$  值变化范围为 5.136 4~6.889 8(均值为 5.891 4)。巴贡组砂岩除样品 JAP-22b1 外,其他样品的  $Y_{\text{海滩与浅海}}$  值均小于 65.365 且  $Y_{\text{浅海与河流/三角洲}}$  值均小于 -7.419 0,全部样品的  $Y_{\text{河流与浊流}}$  值均小于 9.843 3,同样反映浅海海滩并伴随着浊流的环境。

### 3.2.4 C-M 图解及结构参数散点图解

C-M 图解是运用砂岩样品碎屑颗粒粒径的 C 值和 M 值在双对数坐标系中投点绘制而成,其中 C 值大致与样品中最粗颗粒的粒径相当,能够较好地反映沉积物在搬运中所受到的最大水动力,而 M 值则反映水动力的平均能量 (Passega, 1964)。C-M 图能

表1 羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统甲丕拉组和巴贡组砂岩粒度参数及萨胡判别函数  
 Table 1 Grain-size parameters and Sahu discriminant function of the Upper Triassic Jiapila Formation and Bagong Formation in Jiang'ai Darina section, central Qiangtang Basin

样品编号	岩性	粒度参数					C值/ mm	M值/ mm	判别函数		
		平均粒径 $M_z$ /mm	标准偏差 $\sigma_1$	分选系数 $S_0$	偏度 $SK_1$	峰度 $K_C$			$Y_{\text{海滩与浅海}}$	$Y_{\text{浅海与河流/三角洲}}$	$Y_{\text{河流与浊流}}$
JAP-1b1	长石岩屑砂岩	0.34	0.93	2.25	0.190	1.07	1.00	0.37	85.193 7	-8.332 9	6.603 1
JAP-1b2	长石岩屑砂岩	0.49	0.63	1.85	0.241	0.93	0.95	0.52	55.656 1	-4.515 2	6.415 6
JAP-2b1	长石岩屑砂岩	0.63	0.39	1.38	0.353	1.27	1.00	0.66	49.852 4	-2.848 2	9.055 6
JAP-3b1	长石岩屑砂岩	0.66	0.47	1.55	0.025	1.04	1.21	0.67	44.672 3	-1.835 3	5.606 6
JAP-3b2	岩屑砂岩	0.57	0.49	1.61	0.131	0.95	1.16	0.59	44.697 3	-2.538 6	5.845 7
JAP-3b3	岩屑石英砂岩	0.57	0.48	1.47	0.357	1.26	1.17	0.60	53.607 6	-3.504 3	9.042 1
JAP-4b1	岩屑砂岩	0.23	0.45	1.51	0.064	1.06	0.48	0.23	37.855 5	-1.981 8	5.987 0
JAP-5b1	岩屑石英砂岩	0.63	0.39	1.46	-0.015	0.94	1.21	0.64	36.867 1	-1.018 9	4.854 8
JAP-5b2	岩屑砂岩	0.55	0.45	1.53	-0.029	0.99	1.21	0.56	39.718 7	-1.412 2	5.030 6
JAP-6b1	粉砂质长石岩屑砂岩	0.25	0.42	1.47	0.024	1.03	0.69	0.26	34.943 0	-1.532 8	5.544 3
JAP-13b1	长石砂岩	0.43	0.47	1.58	0.023	0.95	0.92	0.44	38.969 1	-1.838 0	5.136 4
JAP-14b1	长石砂岩	0.19	0.66	1.85	0.069	1.01	0.51	0.19	51.619 2	-4.067 2	5.659 8
JAP-15b1	粉砂岩	0.25	0.50	1.54	0.068	1.11	0.55	0.25	41.689 6	-2.358 0	6.242 7
JAP-16b1	粉砂岩	0.25	0.54	1.62	-0.026	1.09	0.51	0.25	42.391 5	-2.257 2	5.492 1
JAP-17b1	含砂粉砂岩	0.21	0.54	1.65	0.056	1.02	0.48	0.21	42.561 9	-2.748 0	5.696 8
JAP-18b1	长石砂岩	0.40	0.54	1.67	0.019	0.99	0.93	0.41	43.806 6	-2.451 7	5.263 6
JAP-19b1	粉砂岩	0.20	0.55	1.61	0.103	1.12	0.45	0.20	45.429 5	-3.018 8	6.525 5
JAP-20b1	长石砂岩	0.22	0.57	1.68	0.013	1.04	0.64	0.23	44.087 8	-2.752 0	5.504 3
JAP-21b1	粉砂岩	0.17	0.50	1.58	0.210	1.05	0.30	0.17	42.279 8	-3.117 1	6.889 8
JAP-22b1	长石砂岩	0.37	0.92	2.01	0.124	1.29	1.81	0.40	88.007 6	-7.904 1	7.365 6
JAP-23b1	长石砂岩	0.12	0.54	1.65	0.004	1.00	0.29	0.12	39.457 5	-2.470 6	5.232 1
JAP-24b1	长石砂岩	0.25	0.50	1.54	-0.056	1.18	0.55	0.25	40.953 3	-1.772 8	5.776 1
JAP-26b1	长石砂岩	0.17	0.48	1.55	-0.017	1.07	0.46	0.17	37.248 2	-1.824 8	5.472 5
JAP-27b1	岩屑长石砂岩	0.31	0.73	1.90	0.112	1.07	0.87	0.33	61.994 8	-5.104 7	6.221 9

注: 粒度参数计算公式为平均粒径  $M_z = \frac{(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})}{3}$ 、标准偏差  $\sigma_1 = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6}$ 、偏度  $SK_1 = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$ 、峰度  $K_C = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})}$  (Folk and Ward, 1957); 分选系数  $S_0 = \frac{\Phi_{25}}{\Phi_{75}}$  (朱筱敏, 2020); 萨胡判别函数计算公式为  $Y_{\text{海滩与浅海}} = 15.654 3M_z + 65.709 1\sigma_1^2 + 18.107 1SK_1 + 18.504 3K_C$ 、 $Y_{\text{浅海与河流/三角洲}} = 0.285 2M_z - 8.760 4\sigma_1^2 - 4.893 2SK_1 + 0.048 2K_C$ 、 $Y_{\text{河流与浊流}} = 0.721 5M_z - 0.403 0\sigma_1^2 + 6.732 2SK_1 + 5.292 7K_C$  (Sahu, 1964); C值为累积曲线上颗粒含量1%处对应的粒径、M值为累积曲线上50%处对应的粒径 (Passega, 1964)。

够较好地反映沉积物类型及其搬运介质的能量特征,为判断沉积环境提供依据(Hakro *et al.*, 2021)。

C-M图表明大部分甲丕拉组砂岩样品主要分布在牵引流沉积的NO段及OP段,少量样品分布在浊流沉积部分(图6a)。其中NO段基本由滚动颗粒组成;而OP段则以滚动搬运为主,同时混有悬浮组分导致M值明显变化;少量样品分布在浊流沉积部分则代表局部发育重力流作用。以上特征反映了甲丕拉组砂岩形成于水动力强、以牵引流为主但局部发育重力流的环境,综合判断其可能形成于扇三角洲的河道环境。相比而言,巴贡组砂岩样品则主要分布在牵引流沉积的PQ段,少部分样品分布在牵引流沉积的QR段及浊流沉积部分(图6a)。其中PQ段以悬浮搬运为主,含有少量的滚动搬运组分,此段表现为M值基本没有变化而C值减小;QR段则代表递变悬浮沉积,C与M成比例的变化;浊流沉积部分代表沉积期间局部的重力流作用。以上特征反映了巴贡组沉积时的水动力较甲丕拉组更弱,且局部仍发育重力流沉积,综合判断其可能形成于三角洲前缘—三角洲平原的河道环境。

结构参数散点图是运用粒度参数中标准偏差和偏度绘制而成,其能够明显地区分河砂、海滩砂及湖砂(Friedman, 1961)。在结构参数散点图中,甲丕拉组既有形成于海滩环境的砂也有形成于河流环境的砂,少数样品则分布在河砂与海滩砂的分界线附近(图6b),可能反映了其形成经历了由河流环境—海

陆过渡环境—海滩环境的演变过程;相比而言,巴贡组砂岩样品主要分布在河砂与海滩砂的分界线附近,少量样品分布在河砂区(图6b),结合样品的偏度值 $SK_1$ 几乎均为正,可能反映巴贡组砂岩主要形成于受河流影响较强的海陆过渡环境。

### 3.3 沉积构造特征

江爱达日那剖面上三叠统甲丕拉组、波里拉组及巴贡组中沉积构造较为发育,常见平行层理、板状交错层理、粒序层理及生物遗迹等,是恢复研究区晚三叠世沉积环境的重要标志,具体特征如下。

**平行层理:**由平行且近乎水平的纹层状砂组成,主要分布在甲丕拉组砂岩或底部含砾砂岩中,纹层厚度为1~5 mm,横向延伸为5~30 cm(图7a, b),常与交错层理等相伴生,反映沉积时水动力较强。

**丘状交错层理:**呈向上隆起的圆丘状,纹层与层系界面近乎平行,分布在甲丕拉组顶部砂岩中,层系厚度约为6 cm,属于中型层理(图7a)。同一层位可观察到冲刷—介壳层—丘状交错层理—介壳层—平行层理的组合,厚度约为20 cm,可能是小型风暴作用的沉积响应(蔡雄飞等, 2016)。

**板状交错层理:**纹层斜交于层系界面,层系顶底界面为平面且彼此相互平行,主要分布在甲丕拉组中部的砂岩中,常与平行层理共同发育(图7b)。层系厚度约为5 cm,以约20°的倾角斜交于层系界面,为中型层理。

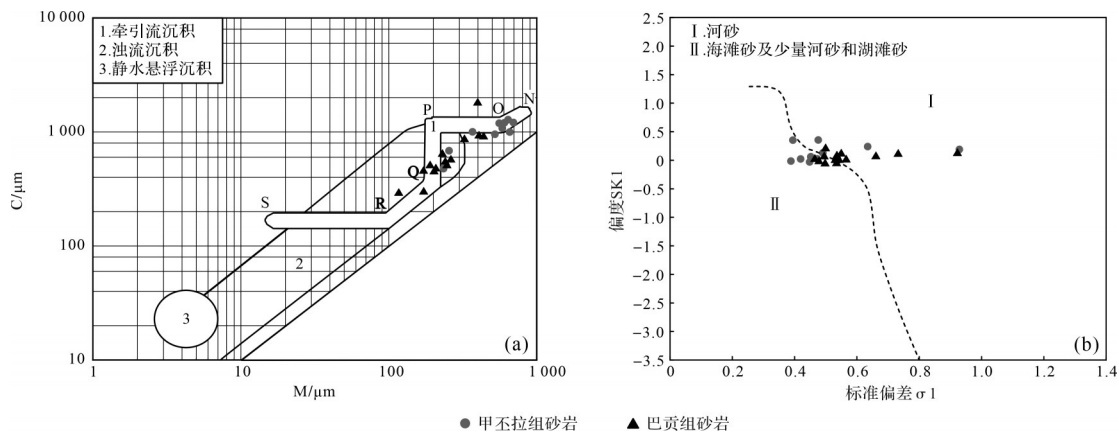


图6 羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统甲丕拉组、巴贡组砂岩C-M图解(a)及偏度—标准偏差结构参数散点图解(b)

C-M图解中NO段基本由滚动颗粒组成,OP段以滚动搬运为主,滚动组分与悬浮组分相混合,PQ段以悬浮搬运为主含少量滚动搬运组分,QR段代表底边悬浮沉积,RS段为均匀悬浮沉积(Passega, 1964)

Fig.6 C-M pattern (a) and skewness-standard deviation structural parameter (b) of sandstone from the Upper Triassic Jiapila Formation and Bagong Formation in Jiang 'ai Darina section, central Qiangtang Basin

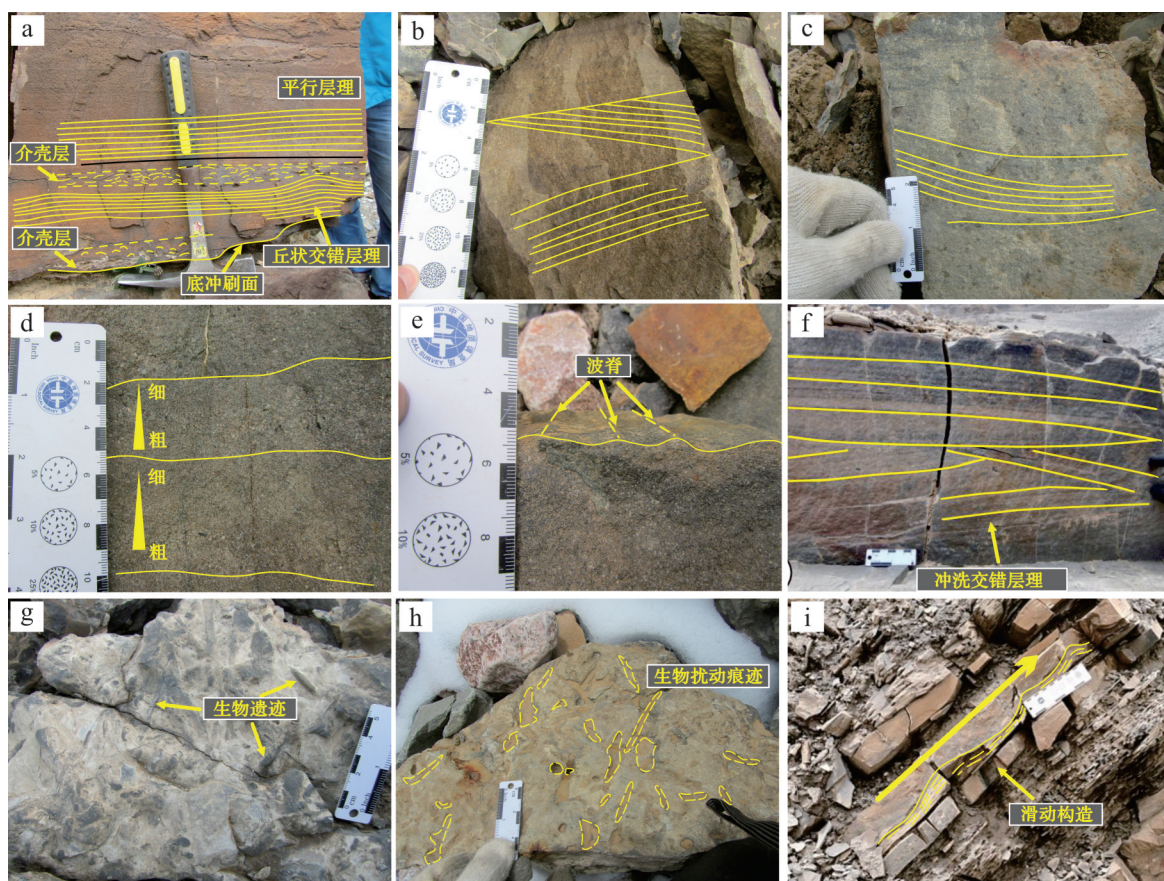


图7 羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统沉积构造特征

(a)小型风暴作用形成的沉积构造组合,层⑨;(b)板状交错层理,层⑩;(c)浪成交错层理,层⑬;(d)粒序层理,层③;(e)浪成波痕,层⑩;(f)冲刷交错层理,层⑩(图片据刘中戎等,2022修改);(g)生物遗迹构造,层⑩;(h)生物扰动构造,层⑩;(i)滑动构造,层⑩

Fig.7 Sedimentary structure characteristics of the Upper Triassic in Jiang'ai Darina section, central Qiangtang Basin

**浪成交错层理:**层系顶底界面呈不规则的缓波状,纹层斜交于层系界面且具有向上收敛的趋势,分布在甲丕拉组上部的砂岩中,保存得不完整,可能属于具有人字形纹理的浪成交错层理(图7c)。纹层厚度约为5 mm,层系厚度约为7 cm,属于中型层理。

**粒序层理:**在甲丕拉组及巴贡组砂岩中均发育规模较小的粒序层理,单个粒序层的厚度为2~5 cm,为粗→中砂的正粒序(图7d)。

**波痕:**发育在甲丕拉组砂岩中,形状对称,波峰和波谷均较为圆滑,波高约为3 mm,波长约为20 mm,波脊平直,不对称度近于1,波痕指数为6,为浪成波痕(图7e)。

**冲刷交错层理:**发育在甲丕拉组上部的砂岩中,层系界面与纹层平直,延伸范围广(约60 cm),层系厚度为12~15 cm,以10°~15°的低角度呈楔状相交,为大型层理(图7f)。

**生物遗迹构造:**主要分布在甲丕拉组顶部砂岩及波里拉组底部泥灰岩中,形态多呈直线型,延伸长度为1.5~2.0 cm,宽度为0.3~0.5 mm,表面可观察到较模糊的生物足面/腹面形态,排列无明显定向性,根据形态特征判断其可能为生物爬行痕迹或停息痕迹(图7g)。

**生物扰动构造:**发育在波里拉组的泥晶灰岩中,伴随有少量生物潜穴。其形态主要为近直线型,为3~10 cm,生物潜穴直径为0.5~1.0 cm,深度较浅(图7h)。

**滑动构造:**发育在巴贡组的细砂岩中,表现为较细的砂质沉积物在层内发生了揉皱、变形,形成扭曲的纹层。横向上延伸约为50 cm,纹层厚度约为10 mm,反映沉积过程中可能有局部的重力流作用(图7i)。

## 4 讨论

### 4.1 上三叠统沉积相划分

通过江爱达日那剖面上三叠统甲丕拉组、波里拉组和巴贡组岩石显微特征观察,结合砂岩粒度分析、典型原生沉积构造及古生物化石等相标志,对研究区上三叠统沉积相类型进行了系统划分(表2)。

#### 4.1.1 甲丕拉组沉积相类型

江爱达日那剖面甲丕拉组(层①—层⑮)共识别出扇三角洲和无障壁海岸2种沉积相及扇三角洲平原、扇三角洲前缘、前扇三角洲、前滨和临滨5个亚相(图8),具体特征如下。

##### 1) 扇三角洲相

扇三角洲是以冲积扇为物源在盆地边缘快速堆积形成的近源砂砾质三角洲。晚三叠世早期,受古特提斯洋关闭的影响,北羌塘发育前陆盆地,而江爱达日那剖面位于该前陆盆地的前渊带,构造活动强烈、物源供给充足且地形较陡,具有形成扇三角洲的条件。层①—层⑩为扇三角洲环境,可进一步划分为扇三角洲平原、扇三角洲前缘和前扇三角洲3个亚相。

扇三角洲平原:位于扇三角洲的陆上部分,研究区见于层①—层④,主体发育辫状分流河道微相(图8)。岩石类型以复成分砾岩(图3a)、含砾砂岩(图3b)及中—粗粒岩屑砂岩(图3d)和长石岩屑砂岩(图3f)为主,岩石中黏土杂基含量相对较高,颗粒分选磨圆差—中等,成分成熟度与结构成熟度均较低。砂岩中发育平行层理、“粗→中砂”的正粒序层理(图7d)及中—大型交错层理等沉积构造,其中含砾粗砂岩中还可可见较多粒径分布在2~3 mm的自形黄铁矿(图3c)。概率累积曲线主要为“滚动—跳跃—悬浮”三段式,滚动次总体含量相对较高(图5c),反映近源水动力相对较强,能够搬运粒度较大的物质。

扇三角洲前缘:位于岸线与正常浪基面之间的较浅水区,研究区见于层⑤—层⑨,发育水下分流河道、水下分流河道间及河口砂坝3个微相(图8)。在水下分流河道微相中,岩石类型以中粒长石岩屑砂岩和岩屑砂岩(图3e, g)为主,黏土杂基含量较扇三角洲平原辫状分流河道砂岩有所降低,主要为颗粒支撑结构,分选磨圆中等,成熟度较低,发育碳屑植物碎片,概率累积曲线主要为二段式(图5a)和“滚动—跳跃—悬浮”三段式(图5d),滚动次总体及悬浮

次总体含量相对较低,C-M图亦反映了牵引流的特征(图6a);水下分流河道间微相以发育深灰色薄层状粉砂质泥岩(图3n)及泥岩为主要特征,且多呈厚度不大的夹层产出于水下分流河道砂体之间(图8);在河口砂坝微相中,岩石类型以中粒岩屑石英砂岩为主,黏土杂基含量较低,颗粒支撑结构,颗粒分选磨圆中等,岩石成熟度相对较高,发育平行层理,概率累积曲线以“滚动—跳跃—跳跃”三段式(图5e)和“滚动—跳跃—跳跃—悬浮”四段式(图5f)为主,反映了河口区波浪的冲刷回流作用。

前扇三角洲:位于正常浪基面以下,研究区见于层⑩,以发育薄层状深灰色粉砂岩夹泥岩为特征(图8),厚度不大,可见水平层理,反映水动力条件相对较弱。

##### 2) 无障壁海岸相

无障壁海岸是无障壁岛遮挡、海水循环良好的开阔海岸带,介于海岸线和正常浪基面之间,研究区见于层⑪—层⑮,可进一步划分为前滨和临滨2个亚相(图8)。

前滨:介于平均高潮线与平均低潮线之间的海滩带下部,研究区见于层⑭—层⑮(图8),岩石类型以细—中粒长石岩屑砂岩为主,局部发育深灰色粉砂岩,顶部见砂质灰岩(图3o)。其中,砂岩为颗粒支撑结构,颗粒分选、磨圆次棱角状,发育平行层理等反映水动力较强的沉积构造,同时还能观察到前滨环境的典型冲洗交错层理(图7f)以及小型风暴沉积作用形成的“底冲刷→介壳层→丘状交错层理→介壳层→平行层理”沉积构造组合(图7a),且介壳生物碎屑具有顺层分布、定向性明显的特征,层面可见双壳类及海百合等生物化石。

临滨:介于平均低潮线与正常浪基面之间,研究区见于层⑪—层⑬(图8),岩石类型以细粒长石岩屑砂岩、中粒岩屑砂岩及粉砂质砂岩(图3m)为主,局部见深灰色粉砂岩。砂岩为颗粒支撑结构,分选较好,磨圆次棱角状,发育中型浪成交错层理(图7c)及对称波痕(图7e)等沉积构造。概率累积曲线为二段式(图5b)及“滚动—跳跃—跳跃—悬浮”四段式(图5g),跳跃次总体占比超过95%。

#### 4.1.2 波里拉组沉积相类型

江爱达日那剖面波里拉组(层⑯—层⑲)为碳酸盐缓坡相,可进一步划分为中缓坡和外缓坡2个亚相(图8),具体特征如下。

表2 羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统相标志及沉积相特征

Table 2 Facies markers and sedimentary facies characteristics of the Upper Triassic in Jiang'ai Darina section, central Qiangtang Basin

组	厚度/m	岩石类型	概率累积曲线	沉积构造及化石特征	微相	亚相	相
甲丕拉组	142.16	复成分砾岩、 含砾中—粗砂岩、 中—粗粒岩屑砂岩、 长石岩屑砂岩	“滚动—跳跃— 悬浮”三段式	平行层理、正粒序层理、 楔状交错层理	辫状分流河道	扇三角洲平原	
		中粒长石岩屑砂岩、 岩屑砂岩	二段式 “滚动—跳跃—悬浮” 三段式	碳屑植物碎片	水下分流河道		扇三角洲
		泥岩、粉砂质泥岩			水下分流河道间	扇三角洲前缘	
		中粒岩屑石英砂岩、 岩屑砂岩	“滚动—跳跃—跳跃” 三段式 “滚动—跳跃—跳 跃—悬浮”四段式		河口砂坝		
		粉砂岩夹泥岩				前扇三角洲	
波里拉组	118.54	细—中粒长石岩屑砂岩、 岩屑砂岩、 粉砂质砂岩、粉砂岩	二段式、 “滚动—跳跃—跳 跃—悬浮”四段式	板状交错层理、浪成交错层理、 对称波痕		临滨	无障壁海岸
		细—中粒长石岩屑砂岩、 粉砂岩、砂质灰岩		冲洗交错层理、底冲刷、丘状交错层 理、平行层理；介壳类、海百合化石		前滨	
		瘤状泥晶灰岩、瘤状颗粒 质灰泥石灰岩、 瘤状粉晶灰岩、泥灰岩、 泥晶灰岩		水平层理、生物扰动构造、虫迹 腹足类、双壳类、介形虫、有孔虫化 石		中缓坡	碳酸盐缓坡
巴贡组	176.49	泥晶灰岩、 生屑质灰泥石灰岩、 内碎屑质灰泥石灰岩、 砾屑灰岩		生物扰动构造 海百合、有孔虫、介形虫化石		外缓坡	
		泥岩、粉砂岩、泥晶灰岩、 细粒长石砂岩	“跳跃—跳跃—悬浮” 三段式	水平层理、微粒序层理；双壳类化石		混积陆棚	浅海陆棚
		细—中粒长石砂岩、 含砾粗砂岩	二段式、 “滚动—跳跃—悬浮” 三段式	滑动构造	水下分流河道		
		含砂粉砂岩、粉砂岩、 泥质粉砂岩、粉砂质泥 岩、泥岩	一段式		支流间湾	三角洲前缘	三角洲
		中粒长石砂岩	“跳跃—跳跃—悬浮” 三段式		河口砂坝		
		细—中粒长石砂岩、 岩屑长石砂岩	二段式	平行层理、板状交错层理	分流河道	三角洲平原	

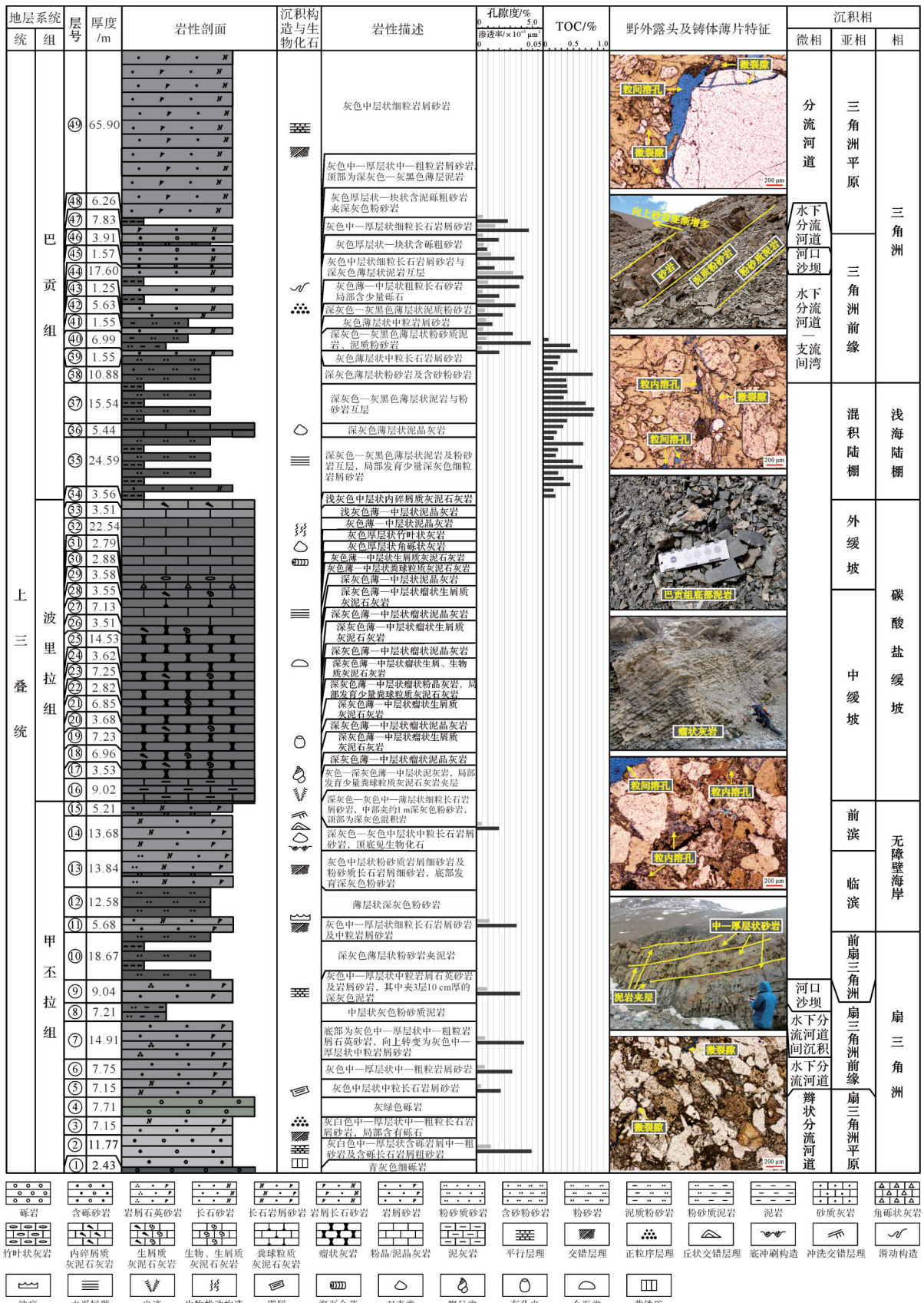


图8 羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统综合柱状图

Fig.8 Comprehensive stratigraphic column of the Upper Triassic in Jiang'ai Darina section, central Qiangtang Basin

中缓坡:位于正常浪基面和风暴浪基面之间,研究区见于层⑬—层⑲(图8),该相带中岩石类型以深灰色瘤状灰岩为主,其底部为生物扰动较强的泥灰岩,顶部则过渡为深灰色泥晶灰岩。其中,瘤状灰岩按照碳酸盐岩结构组分进行分类,可进一步划分为瘤状泥晶灰岩(图4g)、瘤状生屑质灰泥石灰岩(图4b)、瘤状粪球粒质灰泥石灰岩(图4c)及瘤状粉晶灰岩(图4f)等。岩石中灰泥为主要组分,颗粒组分含量不超过40%(多集中在5%~30%),发育水平层理、生物遗迹(图7g)等沉积构造,同时可见保存较为完整的腹足类、有孔虫、双壳类、介形虫等生物化石,反映水动力相对较弱。外缓坡:位于风暴浪基面以下,研究区见于层⑳—层㉑(图8),该相带岩石类型以泥晶灰岩为主,局部发育生屑质灰泥石灰岩、粪球粒质灰泥石灰岩及内碎屑质灰泥石灰岩(图4e)(灰泥为主,颗粒含量约20%~30%)及竹叶状灰岩(图4a)、角砾状灰岩等砾屑灰岩。其中,砾屑灰岩的砾石主要为深灰色泥晶灰岩,其可能是由于风暴作用将原本半固结或已固结的深水环境泥晶灰岩破碎、磨蚀、搬运后形成。泥晶灰岩中发育生物扰动构造(图7h),同时见保存完整的海百合、有孔虫及介形虫等化石,反映水动力整体较弱,局部发育风暴作用。

#### 4.1.3 巴贡组沉积相类型

江爱达日那剖面巴贡组(层㉒—层㉔)共识别出浅海陆棚和三角洲2种沉积相及混积陆棚、三角洲前缘和三角洲平原3个亚相(图8),具体特征如下。

##### 1) 浅海陆棚相

浅海陆棚位于正常浪基面与风暴浪基面之间,研究区主要见于层㉒—层㉔,根据岩石组合特征可进一步划分为混积陆棚亚相(图8)。

混积陆棚:以深灰色泥岩与粉砂岩不等厚互层为特征,局部发育泥晶灰岩及细粒长石砂岩。其中,泥岩和粉砂岩中钙质含量高,发育水平层理和微粒序层理;泥晶灰岩中可见保存较为完整的双壳类化石;夹层砂岩为颗粒支撑结构,杂基含量较低,颗粒分选较好,磨圆棱角状一次棱角状,概率累积曲线为“跳跃—跳跃—悬浮”三段式,峰值粒径(1.5~3.0  $\Phi$ )及细截点(2.00~3.75  $\Phi$ )均较细(图5n)。混积陆棚中整体表现为“泥多砂少”,向上砂质增多,泥质减少,过渡为三角洲环境。

##### 2) 三角洲相

三角洲相主要见于层㉕—层㉗,自下而上可进

一步识别出三角洲前缘和三角洲平原2个亚相(图8)。

三角洲前缘:该亚相见于层㉕—层㉗(图8),研究区发育水下分流河道、支流间湾及河口砂坝3个微相。在水下分流河道微相中,岩石类型以细—中粒长石砂岩为主(图4j,k),向上发育多层含砾粗砂岩(图8)。砂岩碎屑颗粒分选中等,磨圆棱角状一次棱角状,发育滑动构造(图7i)、正粒序层理等沉积构造,概率累积曲线主要为二段式(图5i,j)及“滚动—跳跃—悬浮”三段式(图5l,m)。含砾粗砂岩中,砾石主要是泥岩和发育砂纹层理的粉砂岩(图4i),可能由滑塌作用形成等;在支流间湾微相中,岩石类型以粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩为主,发育少量含砂粉砂岩(图4o),粒度相比水下分流河道砂体明显变细,概率累积曲线呈反映三角洲前缘局部重力流作用一段式(图5h);在河口砂坝微相中,岩石类型主要为中粒长石砂岩(图4l),岩石为颗粒支撑结构,杂基含量较低,颗粒分选中等,磨圆棱角状一次棱角状,概率累积曲线为“跳跃—跳跃—悬浮”三段式(图5o),悬浮次总体含量极低,反映河口环境水动力较强。

三角洲平原:主要见于层㉘—层㉚(图8),岩石类型以细—中粒岩屑长石砂岩(图4m)为主,颗粒支撑结构,胶结物主要为泥晶方解石和黏土物质,颗粒分选较差,磨圆棱角状一次棱角状,成熟度较低,发育平行层理、大型交错层理等沉积构造,概率累积曲线主要为二段式(图5k),跳跃次总体含量大于70%,细截点较细(为2.6~2.9  $\Phi$ ),多形成于分流河道环境。

#### 4.2 羌塘盆地中部上三叠统沉积充填序列及其演化

在江爱达日那剖面上三叠统甲丕拉组—波里拉组—巴贡组沉积特征系统研究的基础上,结合其南缘肖茶卡西和角木茶卡剖面及北缘沃若山剖面上三叠统研究成果(剖面位置见图1a),建立了羌塘盆地中部上三叠统沉积充填序列及演化模式。研究表明,羌塘盆地中部上三叠统构成了1个向上变深再变浅的完整海侵—海退沉积序列,其中海侵序列由甲丕拉组和波里拉组构成,而海退沉积序列由巴贡组构成。

海侵序列自下而上可归结为以下沉积组合:江爱达日那剖面甲丕拉组底部和下部为复成分砾岩、含砾粗砂岩及中—粗砂岩,见正粒序层理和交错层理,砾石成分复杂,呈次棱角状一次圆状,分选中等,磨圆棱角状一次棱角状,与下伏中三叠统康南组呈

平行不整合接触,为扇三角洲平原沉积;中下部为中粒长石岩屑砂岩、岩屑石英砂岩和岩屑砂岩,见碳屑植物碎片,为扇三角洲前缘沉积;中部以薄层状粉砂岩、泥岩为主,为前扇三角洲沉积;上部以细粒长石岩屑砂岩、中粒岩屑砂岩及粉砂质砂岩为主,见浪成交错层理及对称波痕,为临滨沉积;上部至顶部主要为细—中粒长石岩屑砂岩和砂质灰岩,见平行层理、冲洗交错层理和小型丘状交错层理,为前滨沉积。波里拉组底部为生物扰动较强的深灰色泥灰岩,向上过渡为瘤状灰岩,组分以灰泥为主,生物化石保存较为完整,反映水动力条件较弱,为中缓坡沉积;上部主要发育具有竹叶状灰岩等砾屑灰岩夹层的泥晶灰岩、内碎屑质灰泥石灰岩,可能与风暴作用有关,为外缓坡沉积。沉积环境自下而上经历了扇三角洲平原—扇三角洲前缘—前扇三角洲—临滨—前滨—碳酸盐中缓坡—碳酸盐外缓坡的演化过程,水体向上变深(图8)。向南至角木茶卡地区,甲丕拉组厚度增厚,未见底,下部主要由中层状—块状沉火山角砾岩、玄武岩和安山岩构成3个大的水下喷发—沉积旋回;上部过渡为砾岩,砾石成分多为下伏的安山岩和玄武岩砾石,分选差,呈次圆状,为扇三角洲沉积(刘中戎等,2022)。波里拉组下部主要为厚层状—块状角砾灰岩,角砾成分主要为玄武岩、安山岩及礁灰岩,具有明显滑塌现象,为碳酸盐台地边缘斜坡沉积;向上过渡为珊瑚、海绵等造架生物组成的礁灰岩,为台地边缘生物礁沉积(刘中戎等,2022)。沉积环境自下而上经历了扇三角洲平原—扇三角洲前缘—台地边缘斜坡—台地边缘生物礁的演化过程(图9)。向南至肖茶卡地区,甲丕拉组厚度减薄,未见底,但其序列与角木茶卡地区相似,下部为中层状—块状玄武岩、安山岩夹火山角砾岩和微晶灰岩,为水下喷发沉积;上部为厚层状—块状砾岩,砾石成分以岩浆岩为主,为扇三角洲沉积(朱同兴和李宗亮,2010)。波里拉组底部为泥灰岩、向上过渡为微晶灰岩、生物碎屑灰岩和藻屑细晶灰岩,颜色整体较浅,为开阔台地沉积(朱同兴和李宗亮,2010;沈安江等,2024)。沉积环境自下而上由扇三角洲过渡为开阔台地(图9)。该充填序列表明,晚三叠世早期,受可可西里—金沙江和龙木措—双湖古特提斯洋闭合的影响,北羌塘双弧后前陆盆地快速挠曲拗陷,角木茶卡及肖茶卡地区处于构造薄弱带,发育火山沉积,同时盆地处于饥饿状态,龙木措—双湖造山带的

剥蚀和夷平作用提供了充足的物源,前渊带靠陆地区发生甲丕拉组近源快速堆积,向北至江爱达日那水体逐渐变深,砾岩厚度明显减小,主要发育成熟度较低的砂岩及含砾砂岩,由扇三角洲过渡为无障碍海岸环境(图10a)。随着造山作用减弱,挠曲拗陷也随之减弱,盆地从饥饿状态向平衡状态转换,快速的海侵作用导致剥蚀区减少、沉积区扩张,形成稳定的碳酸盐岩沉积体系,根据构造位置不同由南向北形成肖茶卡西开阔台地、角木茶卡台地边缘及江爱达日那缓坡沉积(图10b)。

海退沉积序列自下而上可归结为以下沉积组合:在江爱达日那剖面,巴贡组底部为泥岩与粉砂岩不等厚互层,局部发育泥晶灰岩及细粒长石砂岩,砂泥比低,见水平层理和微粒序层理,与下伏波里拉组泥晶灰岩呈整合接触,向上粉砂岩比例增多,砂泥比增加,颜色变浅,反映水体向上变浅,为浅海陆棚沉积;中部主要为灰色细—中粒长石砂岩,向上发育多层含砾粗砂岩,粒度逐渐变粗,见正粒序层理及滑动构造等,为三角洲前缘沉积;上部以细—中粒岩屑长石砂岩为主,颗粒分选较差,磨圆棱角状—次棱角状成熟度较低,见平行层理和大型交错层理,为三角洲平原沉积。沉积环境自下而上经历了浅海陆棚—三角洲前缘—三角洲平原的演化过程,水体向上变浅(图8)。向北至沃若山剖面,巴贡组未见底,下部和中下部以泥岩夹少量粉砂岩、细砂岩和煤线为特征,向上粉砂岩夹层变厚,见韵律层理、透镜状层理、脉状层理、波痕、小型交错层理及包卷层理等,为三角洲前缘沉积;中部及上部以泥岩、粉砂岩及细—中砂岩为特征,顶部逐渐过渡为粉砂岩和砾岩,见泥砾、植物叶片、平行层理、小型交错层理、波状层理及底冲刷构造,为三角洲平原沉积(王忠伟,2019)。沉积环境自下而上经历了三角洲前缘—三角洲平原的演化过程,水体向上变浅(图9)。向南至肖茶卡西剖面,巴贡组下部由细粒长石岩屑砂岩、粉砂岩和凝灰质泥岩等组成(下粗上细),见沟模、水平虫孔构造、正粒序层理、平行层理及底冲刷构造,为浅海陆棚相;中部由钙质泥岩、钙质粉砂岩及中—细砂岩组成(下细上粗),见平行层理、低角度交错层理和小型砂纹层理,为三角洲沉积;上部由细砂岩、粉砂质泥岩和钙质泥岩组成,发育正粒序层理、平行层理和底冲刷构造,为浅海陆棚相(朱同兴和李宗亮,2010)。沉积环境自下而上经历了浅海陆棚—三角洲—浅海陆棚的



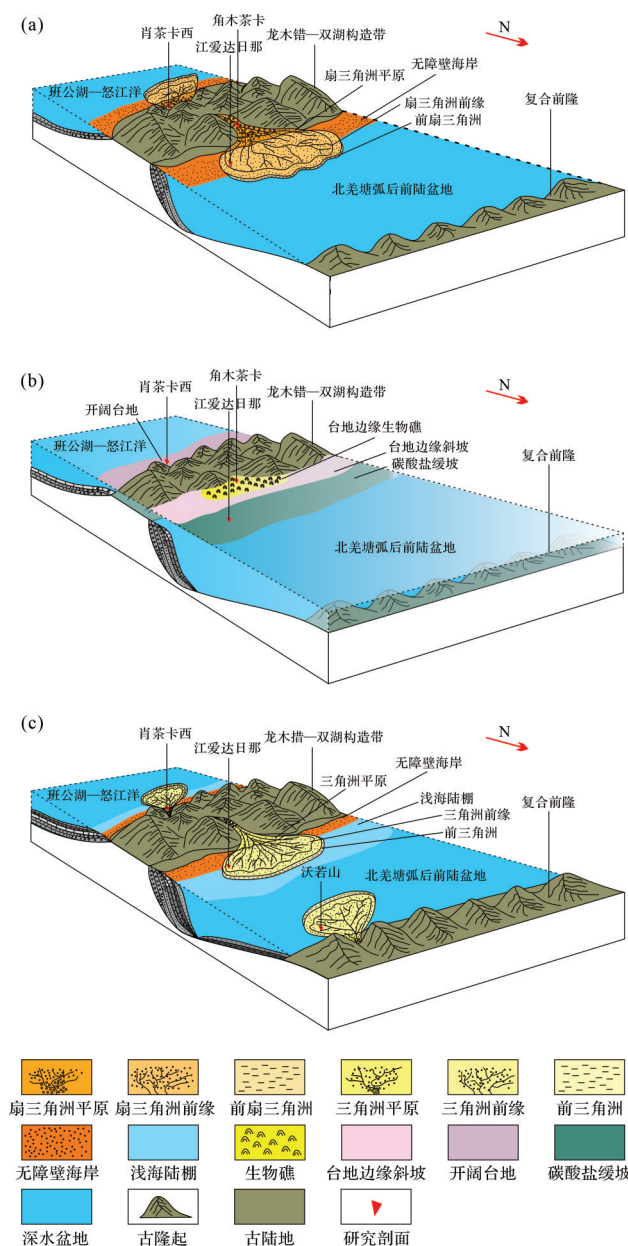


图10 羌塘盆地中部江爱达日那地区上三叠统沉积演化模式

(a)甲丕拉组沉积期;(b)波里拉组沉积期;(c)巴贡组沉积期

Fig.10 Sedimentary evolution model of the Upper Triassic in Jiang'ai Darina area, central Qiangtang Basin

(a) sedimentary period of the Jiapila Formation; (b) sedimentary period of the Bolila Formation; and (c) sedimentary period of the Bagong Formation

特征及最新岩相古地理资料对羌塘盆地中部上三叠统油气勘探前景进行了初步评价。

江爱达日那剖面甲丕拉组储层主要为岩屑砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,具体特征见3.1.1。全岩矿物及黏土XRD结果显示,岩石主要由石英(67.7%~70.8%)组成,其次为黏土矿物(14.2%~

26%)和钠长石(2.6%~18.1%),个别样品见少量钾长石(0.7%)和方解石(0.6%),其中黏土矿物主要为伊利石和绿泥石,伊蒙混层(9%~19%)和高岭石(3%)含量较少(表3)。巴贡组储层以长石砂岩和岩屑长石砂岩为主,具体特征见3.1.3。相比而言,巴贡组碎屑岩储层中钠长石(31.7%~44.9%)及方解石(13.3%~40.4%)含量明显增多,石英(7.2%~31.5%)含量显著降低,黏土矿物含量波动不大(7.1%~23.4%),方解石含量显著增加,与镜下观察到的大量钙质胶结相一致。另外,黏土矿物组分与甲丕拉组相比也存在较大差异,其以伊蒙混层(18%~61%)和绿泥石(15%~46%)为主,其次为伊利石(10%~20%),高岭土含量显著增加(9%~17%)(表3)。研究区甲丕拉组和巴贡组砂岩储层孔隙类型主要为次生粒间孔隙、次生粒内溶孔及微裂隙(图8),物性差,其中孔隙度分别为1.98%~4.88%(均值为3.41%)和0.89%~4.85%(均值为2.83%),渗透率分别为 $0.0033 \times 10^{-3} \sim 0.0123 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (均值为 $0.0078 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )和 $0.0024 \times 10^{-3} \sim 0.0326 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (均值为 $0.0105 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),均属于超低孔超低渗储层(国家能源局,2011)(表3)。

向北至沃若山剖面,主要发育上三叠统巴贡组砂岩储层,其岩石类型以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主,分选较好,磨圆次棱角状一次圆状;孔隙类型主要为原生粒间孔、溶蚀孔隙、微孔隙及微裂隙,但物性差,孔隙度和渗透率分别为0.85%~8.50%(均值为2.84%)和 $0.001 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (均值为 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),同样为超低孔超低渗储层(程乐利,2018)。造成上三叠统碎屑岩储层差的原因复杂,涉及物源性质、构造活动及成岩作用改造等方面,但其主控因素目前还存在一定的争议(胡俊杰等,2014;程乐利等,2020)。向南至角木茶卡剖面,上三叠统波里拉组发育礁灰岩(属于圆丘礁和骨架礁)(刘中戎等,2022),可能是潜在的重要储层,但目前缺少相关定量数据支撑,后续应加强生物礁储层特征及其分布规律研究。

烃源岩主要发育在上三叠统巴贡组泥页岩中。研究区江爱达日那剖面上三叠统巴贡组28件浅海陆棚—三角洲前缘深灰色—灰黑色泥岩TOC均较低,为0.08%~0.85%(均值为0.40%),其中21件样品TOC低于0.50%,7件样品介于0.50%~1.00%(图8),整

表3 羌塘盆地中部江爱达日那剖面上三叠统碎屑岩储层孔—渗特征及全岩矿物及黏土XRD结果

Table 3 Porosity-permeability characteristics and X-ray diffraction (XRD) of whole rock minerals and clays of the Upper Triassic clastic reservoir in Jiang'ai Darina section, central Qiangtang Basin

层位	样品名称	岩性	物性特征			孔隙类型	矿物组成及含量/%					黏土矿物相对含量/%				
			孔隙度/%	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	储层评价		石英	钾长石	钠长石	方解石	黄铁矿	黏土矿物	伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石
甲 丕 拉 组	JAP-1CH1	长石岩屑砂岩	4.88	0.012	超低孔超低渗储层	微裂缝	69.9	0.7	11.3	—	—	18.1	9	86	3	2
	JAP-3CH1	长石岩屑砂岩	2.13	0.003	超低孔超低渗储层	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	JAP-3CH2	岩屑砂岩	3.15	0.007	超低孔超低渗储层	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	JAP-3CH3	岩屑石英砂岩	4.22	0.007	超低孔超低渗储层	次生粒间孔隙、次生粒内溶孔	70.8	—	2.6	0.6	—	26	19	16	—	65
	JAP-5CH1	岩屑石英砂岩	3.89	0.009	超低孔超低渗储层	次生粒内溶孔	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	JAP-5CH2	长石岩屑砂岩	3.58	0.011	超低孔超低渗储层	次生粒间孔隙、次生粒内溶孔	67.7	—	18.1	—	—	14.2	13	75	—	12
	JAP-8CH1	长石岩屑砂岩	1.98	0.005	超低孔超低渗储层	次生粒内溶孔、微裂缝	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
巴 贡 组	JAP-18CH1	长石砂岩	1.99	0.004	超低孔超低渗储层	次生粒间孔隙、次生粒内溶孔	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	JAP-18CH2	长石砂岩	4.85	0.008	超低孔超低渗储层	微裂缝	7.2	—	34.3	37.3	0.8	20.4	48	20	13	19
	JAP-20CH2	长石砂岩	3.21	0.006	超低孔超低渗储层	次生粒内溶孔	24.2	—	44.9	13.3	—	17.6	41	14	—	45
	JAP-20CH3	长石砂岩	1.38	0.008	超低孔超低渗储层	次生粒间孔隙	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	JAP-20CH4	长石砂岩	2.30	0.007	超低孔超低渗储层	微裂缝	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	JAP-22CH1	长石砂岩	3.46	0.016	超低孔超低渗储层	微裂缝	31.5	—	39.1	21.3	1	7.1	43	10	11	36
	JAP-22CH2	长石砂岩	1.99	0.005	超低孔超低渗储层	微裂缝	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
JAP-24CH1	长石砂岩	3.80	0.010	超低孔超低渗储层	次生粒间孔隙、微裂缝	13.7	—	35.3	36.2	—	14.8	61	15	9	15	

续表

层位	样品名称	岩性	物性特征		储层评价	孔隙类型	矿物组成及含量/%					黏土矿物相对含量/%				
			孔隙度/%	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$			石英	钾长石	钠长石	方解石	黄铁矿	黏土矿物	伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石
	JAP-24CH2	长石砂岩	4.18	0.033	超低孔超低渗储层	微裂缝	18.4	—	32.5	25.7	—	23.4	18	19	17	46
	JAP-26CH1	长石砂岩	1.59	0.002	超低孔超低渗储层	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	JAP-27CH1	长石砂岩	3.37	0.013	超低孔超低渗储层	微裂缝	9.4	—	31.7	40.4	2.3	16.2	50	14	13	23
	JAP-27CH2	长石砂岩	0.89	0.006	超低孔超低渗储层	次生粒内溶孔	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	JAP-27CH3	岩屑长石砂岩	1.95	0.005	超低孔超低渗储层	次生粒间孔隙	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	JAP-27CH4	岩屑长石砂岩	4.66	0.016	超低孔超低渗储层	微裂缝、次生粒内溶孔	21.1	3.4	35.7	24.3	0.4	15.1	25	15	17	43
	JAP-27CH5	岩屑长石砂岩	2.77	0.005	超低孔超低渗储层	次生粒间孔隙、次生粒内溶孔	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

体为非一般烃源岩(国家能源局,2019)。向南至肖茶卡西剖面,浅海陆棚—前三角洲的泥页岩有机质丰度极低,其中TOC为0.17%~0.49%(均值为0.36%),氯仿沥青“A”含量为 $1 \times 10^{-6}$ ~ $18 \times 10^{-6}$ (均值为 $7.4 \times 10^{-6}$ ),生烃潜量 $S_1+S_2$ 含量为0.001~0.385 mg/g(均值为0.036 mg/g),均为非烃源岩(陈文彬等,2015)。然而,向北至沃若山剖面,三角洲前缘的泥页岩有机质丰度相对较高,其中TOC为0.54%~3.29%(均值为1.14%),整体为一般—好烃源岩(陈文彬等,2015; Wang *et al.*, 2017)。通常情况下,正常浪基面以下的浅海陆棚环境中形成的烃源岩品质要优于三角洲环境(李天义等,2008)。然而,羌塘盆地中部位于中央隆起带两侧的江爱达日那及肖茶卡西剖面浅海陆棚—前三角洲的巴贡组泥页岩烃源岩品质明显低于沃若山剖面(离中央隆起带较远)三角洲前缘的泥页岩。这可能与晚三叠世龙木措—双湖古特提斯洋关闭造山使得造山带两侧泥页岩热演化程度过高及有机质类型较差有关,紧邻造山带的肖茶卡西和江爱达日那剖面泥页岩 $R_o$ 均明显高于2.0%,且有机质受陆源有机质输入影响较大(陈文彬等,2015)。相比

而言,离造山带稍远的沃若山地区有机质类型虽然受陆源有机质输入影响,但其成熟度明显偏低( $R_o$ 均值为1.62%)(陈文彬等,2015),使得残余有机质丰度高于肖茶卡及江爱达日那剖面。

最新构造—岩相古地理资料显示,受晚三叠世早期(甲丕拉组沉积期)可可西里—金沙江古特提斯洋和龙木措—双湖古特提斯洋同时闭合的影响,北羌塘坳陷受南北对冲挤压演化为双弧后前陆盆地,而南羌塘坳陷北缘演化为周缘前陆盆地(沈安江等,2024),其形成的前渊坳陷带是优质烃源岩发育的重要构造—沉积单元。研究区江爱达日那和沃若山剖面分别位于龙木措—双湖前渊坳陷带的南、北边缘,前者紧邻造山带,使得有机质经历了早期过成熟的演化阶段,在后期基本不具生烃潜力;后者远离造山带,有机质经后期生烃演化达到高成熟阶段,具备较好的生烃潜力。最新古地理资料显示龙木措—双湖前渊坳陷带具有南深北浅的特点(沈安江等,2024),推测沉降中心位于江爱达日那和沃若山之间的洼地区,该区水体更深且受造山带影响较小,是优质烃源岩发育的理想场所(张水昌

等,2005)。羌塘盆地中部由南至北发育的碳酸盐台地边缘—扇三角洲—洼地—三角洲沉积体系构成了良好的“上生下储”源—储配置关系,同时洼地区被侏罗系覆盖,保存条件相对较好,推测其可能具有较好的勘探前景,但需要后续更多的研究工作予以证实。

## 5 结论

(1) 江爱达日那剖面甲丕拉组可划分为扇三角洲相和无障壁海岸相,自下而上可进一步识别出辫状分流河道—水下分流河道—水下分流河道间—河口沙坝—前扇三角洲—临滨—前滨环境;波里拉组可划分为碳酸盐缓坡相,向上可进一步识别出中缓坡和外缓坡环境;巴贡组可划分为浅海陆棚相和三角洲相,向上可进一步识别出混积陆棚—水下分流河道—支流间湾—河口沙坝—水下分流河道—分流河道环境。

(2) 垂向上,羌塘盆地中部上三叠统构成了向上变深再变浅的完整海侵—海退沉积序列,海侵序列由甲丕拉组向上变细的碎屑岩序列和波里拉组碳酸盐岩序列构成,海退序列由巴贡组向上变粗的碎屑岩序列构成。平面上,甲丕拉组沉积期由江爱达日那向南至角木茶卡和肖茶卡西,水下火山活动频繁,整体为近源的扇三角洲环境;波里拉组沉积期,由江爱达日那碳酸盐缓坡环境向南逐渐过渡为角木茶卡碳酸盐台地边缘和肖茶卡西开阔台地环境;巴贡组沉积期,由江爱达日那浅海陆棚—三角洲环境向北过渡为沃若山浅水三角洲环境。

(3) 研究区甲丕拉组和巴贡组碎屑岩储层矿物组成存在较大差异(前者以石英和黏土矿物为主,后者则以钠长石和方解石为主),但均为超低孔超低渗透层,角木茶卡剖面波里拉组礁灰岩可能是潜在的重要储层。研究区巴贡组泥岩有机质丰度低,为非一般烃源岩,但向北至沃若山烃源岩品质变好。最新构造—岩相古地理资料显示江爱达日那和沃若山之间的洼地可能是优质烃源岩发育的理想场所,碳酸盐台地边缘—扇三角洲—洼地—三角洲沉积体系构成的“上生下储”源—储配置关系可能具有较好的勘探前景,但仍需予以证实。

致谢 感谢三位评审专家及编辑部老师对本文提出的宝贵意见!

## 参考文献(References)

- 蔡雄飞,廖群安,王富明,等. 2016. 新疆卡拉麦里碰撞带南缘志留—泥盆纪沉积学研究新进展[J]. 华东地质, 37(2): 113-119. [Cai Xiongfei, Liao Qun'an, Wang Fuming, et al. 2016. New research progress on Silurian and Devonian sedimentation in the southern margin of the Kalamaili collision belt, Xinjiang[J]. East China Geology, 37(2): 113-119.]
- 陈嘉诺,孙高远,温永祥,等. 2024. 长江三角洲QDQ2钻孔晚更新世以来沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 华东地质, 45(4): 466-477. [Chen Jianuo, Sun Gaoyuan, Wen Yongxiang, et al. 2024. Grain sizes characteristics of sediments from QDQ2 borehole in the Yangtze River Delta since the Late Pleistocene and their paleoenvironmental significance[J]. East China Geology, 45(4): 466-477.]
- 陈文彬,付修根,谭富文,等. 2015. 藏北羌塘盆地上三叠统典型剖面烃源岩地球化学特征研究[J]. 中国地质, 42(4): 1151-1160. [Chen Wenbin, Fu Xiugen, Tan Fuwen, et al. 2015. Geochemical characteristics of Upper Triassic source rocks from typical sections in Qiangtang Basin, northern Tibet[J]. Geology in China, 42(4): 1151-1160.]
- 程乐利. 2018. 羌塘盆地上三叠统巴贡组储层特征及形成机理研究[D]. 成都:成都理工大学:1-98. [Cheng Leli. 2018. The study on reservoir characteristics and formation mechanism of the Upper Triassic Bagong Formation in the Qiangtang Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-98.]
- 程乐利,印森林,万友利,等. 2020. 羌塘盆地北羌塘坳陷上三叠统巴贡组致密储层成岩作用与孔隙演化[J]. 石油实验地质, 42(1): 60-68. [Cheng Leli, Yin Senlin, Wan Youli, et al. 2020. Diagenesis and pore evolution of tight sandstone reservoirs in Upper Triassic Bagong Formation, North Qiangtang Depression, Qiangtang Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 42(1): 60-68.]
- 付修根,王剑,汪正江,等. 2007. 藏北羌塘盆地上三叠统那底岗日组与下伏地层沉积间断的确立及意义[J]. 地质论评, 53(3): 329-336. [Fu Xiugen, Wang Jian, Wang Zhengjiang, et al. 2007. Identification of sedimentary gap between the Late Triassic Nadi Kangri Formation and its underlying strata in the Qiangtang Basin northern Xizang (Tibet) and its geological significance[J]. Geological Review, 53(3): 329-336.]
- 高丽坤,林春明,姚玉来,等. 2010. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组沉积相及沉积演化[J]. 沉积学报, 28(4): 706-716. [Gao Likun, Lin Chunming, Yao Yulai, et al. 2010. Sedimentary facies and evolution of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 28(4): 706-716.]
- 国家能源局. 2011. SY/T 6285-2011 油气储层评价方法[S]. 北京:石油工业出版社:1-2. [National Energy Administration. 2011. SY/T 6285-2011 Evaluating methods of oil and gas reservoir[S]. Beijing: Petroleum Industry Press: 1-2.]
- 国家能源局. 2019. SY/T 5735-2019 烃源岩地球化学评价方法[S]. 北京:石油工业出版社:1-5. [National Energy Administration. 2019. SY/T 5735-2019 Geochemical method for source rock evalu-

- ation[S]. Beijing: Petroleum Industry Press: 1-5. ]
- 厚刚福,孙靖,王力宝,等. 2019. 不同古地貌单元水下分流河道沉积特征及其意义:以准噶尔盆地夏盐地区三工河组二段为例[J]. 沉积学报,37(4):825-833. [Hou Gangfu, Sun Jing, Wang Libao, et al. 2019. Sedimentary characteristics and significance of underwater distributary channel in different paleogeomorphic units: A case study of the Second member of the Sangonghe Formation in Xiayan district, Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(4): 825-833. ]
- 胡俊杰,李琦,张慧,等. 2014. 北羌塘坳陷沃若山剖面上三叠统土门格拉组碎屑岩储集特征与主控因素[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),37(4):403-408. [Hu Junjie, Li Qi, Zhang Hui, et al. 2014. Characteristics and controlling factors of Upper Triassic Tumengela Formation clastic rocks reservoir in Woruo Mountains, North Qiangtang Basin[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 37(4): 403-408. ]
- 李才,翟庆国,董永胜,等. 2007. 青藏高原龙木错—双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录[J]. 地质通报,26(1):13-21. [Li Cai, Zhai Qingguo, Dong Yongsheng, et al. 2007. Lungmu Co-Shanghu plate suture in the Qinghai-Tibet Plateau and records of the evolution of the Paleo-Tethys Ocean in the Qiangtang area, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(1): 13-21. ]
- 李天义,何生,杨智. 2008. 海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析[J]. 地质科技情报,27(6):63-70. [Li Tianyi, He Sheng, Yang Zhi. 2008. The marine source rock formation conditions and control factors[J]. Geological Science and Technology Information, 27(6): 63-70. ]
- 林春明,张霞,赵雪培,等. 2021. 沉积岩石学的室内研究方法综述[J]. 古地学报,23(2):223-244. [Lin Chunming, Zhang Xia, Zhao Xuepei, et al. 2021. Review of laboratory research methods for sedimentary petrology[J]. Journal of Palaeogeography, 23(2): 223-244. ]
- 刘中戎,杨平,张国常,等. 2022. 北羌塘坳陷上三叠统沉积模式及对油气勘探的启示[J]. 沉积与特提斯地质,42(3):465-480. [Liu Zhongrong, Yang Ping, Zhang Guochang, et al. 2022. Sedimentary model and its implications for oil and gas exploration of Upper Triassic in northern Qiangtang Depression[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(3): 465-480. ]
- 丘东洲,乃东专,李晓清,等. 2007. 羌塘盆地与特提斯域油气盆地类比及其含油气远景[J]. 沉积与特提斯地质,27(3):1-13. [Qiu Dongzhou, Nai Dongzuan, Li Xiaoqing, et al. 2007. Analog and hydrocarbon potential of the Qiangtang Basin and other petroleum basins in the Asian Tethys[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 27(3): 1-13. ]
- 沈安江,熊绍云,胡安平,等. 2024. 羌塘盆地中生代岩相古地理研究新进展[J]. 海相油气地质,29(1):30-44. [Shen Anjiang, Xiong Shaoyun, Hu Anping, et al. 2024. New progress in the study of Mesozoic lithofacies and paleogeography in Qiangtang Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 29(1): 30-44. ]
- 谭富文,王剑,王小龙,等. 2002. 西藏羌塘盆地:中国油气资源战略选区的首选目标[J]. 沉积与特提斯地质,22(1):16-21. [Tan Fuwen, Wang Jian, Wang Xiaolong, et al. 2002. The Qiangtang Basin in Xizang as the target area for the oil and gas resources in China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 22(1): 16-21. ]
- 王剑,丁俊,王成善,等. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京:地质出版社:164-424. [Wang Jian, Ding Jun, Wang Chengshan, et al. 2009. Investigation and evaluation of the strategic selection of oil and gas resources on the Qinghai—Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House: 164-424. ]
- 王剑,付修根. 2018. 论羌塘盆地沉积演化[J]. 中国地质,45(2):237-259. [Wang Jian, Fu Xiugen. 2018. Sedimentary evolution of the Qiangtang Basin[J]. Geology in China, 45(2): 237-259. ]
- 王剑,付修根,沈利军,等. 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景[J]. 地质论评,66(5):1091-1113. [Wang Jian, Fu Xiugen, Shen Lijun, et al. 2020. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet) [J]. Geological Review, 66(5): 1091-1113. ]
- 王剑,谭富文,李亚林,等. 2004. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析[M]. 北京:地质出版社:32-52. [Wang Jian, Tan Fuwen, Li Yalin, et al. 2004. Analysis of hydrocarbon potential in key sedimentary basins of Qinghai—Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House: 32-52. ]
- 王剑,王忠伟,付修根,等. 2022. 青藏高原羌塘盆地首口油气科探井(QK-1)新发现[J]. 科学通报,67(3):321-328. [Wang Jian, Wang Zhongwei, Fu Xiugen, et al. 2022. New discoveries on the first petroleum scientific drilling (QK-1) of the Qiangtang Basin, Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 67(3): 321-328. ]
- 王忠伟. 2019. 北羌塘西南缘上三叠统—中下侏罗统沉积特征及古气候演化研究[D]. 武汉:中国地质大学:1-115. [Wang Zhongwei. 2019. Sedimentary characteristics and paleoclimate evolution of the Upper Triassic to Middle-Lower Jurassic in the southwest of the North Qiangtang Basin, Tibet[D]. Wuhan: China University of Geosciences: 1-115. ]
- 吴珍汉,高锐,卢占武,等. 2014. 羌塘盆地结构构造与油气勘探方向[J]. 地质学报,88(6):1130-1144. [Wu Zhenhan, Gao Rui, Lu Zhanwu, et al. 2014. Structures of the Qiangtang Basin and its significance to oil-gas exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 88(6): 1130-1144. ]
- 熊盛青,周道卿,曹宝宝,等. 2020. 羌塘盆地中央隆起带的重磁场证据及其构造意义[J]. 地球物理学报,63(9):3491-3504. [Xiong Shengqing, Zhou Daoqing, Cao Baobao, et al. 2020. Characteristics of the central uplift zone in Qiangtang Basin and its tectonic implications: Evidences from airborne gravity and magnetic data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(9): 3491-3504. ]
- 占王忠,彭清华,陈文彬. 2019. 羌塘盆地东部冬曲地区上三叠统巴贡组沉积环境分析[J]. 海相油气地质,24(1):27-34. [Zhan Wangzhong, Peng Qinghua, Chen Wenbin. 2019. Analysis of depositional environment of the Upper Triassic Bagong Formation in Dongqu area of the eastern Qiangtang Basin[J]. Marine Origin

- Petroleum Geology, 24(1): 27-34. ]
- 占王忠, 谭富文. 2020. 羌塘盆地晚三叠世岩相古地理特征与烃源岩[J]. 沉积学报, 38(4): 876-885. [Zhan Wangzhong, Tan Fuwen. 2020. Lithofacies palaeogeography and source rock of the Late Triassic in the Qiangtang Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 38(4): 876-885. ]
- 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 2005. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地学前缘, 12(3): 39-48. [Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Bian Lizeng, et al. 2005. Development constraints of marine source rocks in China[J]. Earth Science Frontiers, 12(3): 39-48. ]
- 张妍, 石永红, 宋传中, 等. 2017. 大别山东南缘侏罗系磨山组沉积环境及地质意义[J]. 岩石学报, 33(2): 639-652. [Zhang Yan, Shi Yonghong, Song Chuanzhong, et al. 2017. Sedimentary environments and its geological significance of Jurassic Moshan Formation in the northeastern margin of Dabie Mountain[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(2): 639-652. ]
- 赵鲁阳, 吕大炜, 刘海燕, 等. 2015. 安徽巢北地区五通组沉积环境分析[J]. 沉积学报, 33(3): 470-479. [Zhao Luyang, Lü Dawei, Liu Haiyan, et al. 2015. The analysis on the depositional environment of Wutong Formation in northern Chaohu area, Anhui[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33(3): 470-479. ]
- 周道卿, 曹宝宝, 赵睿, 等. 2021. 羌塘盆地高精度航空重磁调查对盆地基底性质与构造格局的启示[J]. 地质学报, 95(11): 3178-3191. [Zhou Daoqing, Cao Baobao, Zhao Rui, et al. 2021. High-precision airborne gravity and magnetic survey analysis of the Qiangtang Basin: Implications for basin basement properties and tectonic framework[J]. Acta Geologica Sinica, 95(11): 3178-3191. ]
- 朱同兴, 董瀚, 李才, 等. 2005. 青藏高原北羌塘地区晚三叠世地层展布和沉积型式[J]. 沉积与特提斯地质, 25(3): 18-23. [Zhu Tongxing, Dong Han, Li Cai, et al. 2005. Distribution and sedimentary model of the Late Triassic strata in northern Qiangtang on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 25(3): 18-23. ]
- 朱同兴, 李宗亮. 2010. 中华人民共和国区域地质调查报告: 比例尺 1:250000: 江爱达日那幅[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 12-54. [Zhu Tongxing, Li Zongliang. 2010. Regional geological survey report of the People's Republic of China (1: 250, 000 scale Jiangai Darina area)[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 12-54. ]
- 朱筱敏. 2020. 沉积岩石学[M]. 5版. 北京: 石油工业出版社: 1-479. [Zhu Xiaomin. 2020. Sedimentary petrology[M]. 5th ed. Beijing: Petroleum Industry Press: 1-479. ]
- 邹妞妞, 史基安, 张大权, 等. 2015. 准噶尔盆地西北缘玛北地区百口泉组扇三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 33(3): 607-615. [Zou Niuniu, Shi Ji'an, Zhang Daquan, et al. 2015. Fan delta depositional model of Triassic Baikouquan Formation in Mabei area, NW Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33(3): 607-615. ]
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 27(1): 3-26.
- Friedman G M. 1961. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 31(4): 514-529.
- Fu X G, Wang J, Tan F W, et al. 2010. The Late Triassic rift-related volcanic rocks from eastern Qiangtang, northern Tibet (China): Age and tectonic implications[J]. Gondwana Research, 17(1): 135-144.
- Hakro A A A D, Xiao W J, Mastoi A S, et al. 2021. Grain size analysis of the Oligocene Nari Formation sandstone in the Laki Range, southern Indus Basin, Pakistan: Implications for depositional setting[J]. Geological Journal, 56(11): 5440-5451.
- Ma A L, Hu X M, Garzanti E, et al. 2017. Sedimentary and tectonic evolution of the southern Qiangtang Basin: Implications for the Lhasa-Qiangtang collision timing[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(7): 4790-4813.
- Ma A L, Hu X M, Garzanti E, et al. 2023. Paleogeographic and tectonic evolution of Mesozoic Qiangtang basins (Tibet)[J]. Tectonophysics, 862: 229957.
- Passega R. 1964. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 34(4): 830-847.
- Sahu B K. 1964. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 34(1): 73-83.
- Song P P, Ding L, Li Z Y, et al. 2017. An early bird from Gondwana: Paleomagnetism of Lower Permian lavas from northern Qiangtang (Tibet) and the geography of the Paleo-Tethys[J]. Earth and Planetary Science Letters, 475: 119-133.
- Wang J, Fu X G, Chen W X, et al. 2008. Chronology and geochemistry of the volcanic rocks in Woruo Mountain region, northern Qiangtang Depression: Implications to the Late Triassic volcanic-sedimentary events[J]. Science China Earth Sciences, 51(2): 194-205.
- Wang Z W, Shen L J, Wang J, et al. 2022. Organic matter enrichment of the Late Triassic Bagong Formation (Qiangtang Basin, Tibet) driven by paleoenvironment: Insights from elemental geochemistry and mineralogy[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 236: 105329.
- Wang Z W, Wang J, Fu X G, et al. 2017. Organic material accumulation of Carnian mudstones in the North Qiangtang Depression, eastern Tethys: Controlled by the paleoclimate, paleoenvironment, and provenance[J]. Marine and Petroleum Geology, 88: 440-457.
- Wang Z W, Wang J, Fu X G, et al. 2019. Sedimentary successions and onset of the Mesozoic Qiangtang rift basin (northern Tibet), Southwest China: Insights on the Paleo- and Meso-Tethys evolution[J]. Marine and Petroleum Geology, 102: 657-679.
- Wang Z W, Zhan W Z, Wang J, et al. 2023. Geochemistry and zircon geochronology of the Late Triassic volcanic-sedimentary successions in northern Tibet: Implications for the provenance and tectonic evolution of the Mesozoic Qiangtang Basin[J]. Gondwana Research, 117: 321-343.

# Sedimentary Characteristics and Evolution of the Upper Triassic in the Jiang' ai Darina Area, Central Qiangtang Basin and Their Hydrocarbon Geological Significance

SUI BoYu<sup>1,2</sup>, WANG ZhongWei<sup>1,2,3</sup>, ZHAN WangZhong<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, WEI HengYe<sup>1</sup>, LI Lei<sup>1</sup>, QI Jun<sup>1</sup>

1. Qiangtang Institute of Sedimentary Basin, School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China

3. State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy (Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, CAS), Nanjing 210008, China

**Abstract:** [Objective] The Late Triassic was a crucial period for the Mesozoic Qiangtang Basin evolution. However, the previous research concentrating on the sedimentology of the Upper Triassic strata is rare in the Qiangtang Basin, making it not conducive for elaborately analyzing the characterization of Late Triassic sedimentary evolution and predicting the distribution of source and reservoir rocks. [Methods] Based on the measured section, we synthesized the thin section, grain size of detrital particle, and typical primary sedimentary structure to identify the sedimentary facies of the Jiapila Formation, Bolila Formation, and Bagong Formation in the Jiang' ai Darina section and then establish the Late Triassic sedimentary evolution model in the central Qiangtang Basin. In addition, the whole-rock and clay minerals, physical properties, and total organic carbon (TOC) contents of sandstone and mudstone samples were analyzed to evaluate the characteristics of source and reservoir rocks. [Results] (1) In the Jiang' ai Darina section, the sedimentary facies of the Upper Triassic strata have experienced the evolution of the fan-delta facies → barrier-free coastal facies → carbonate ramp facies → neritic shelf facies → delta facies upward, and ten subfacies and eight microfacies were identified. (2) The Upper Triassic strata in the study area constitute an upward deepening transgressive succession and then a shallower regressive succession. The transgressive succession is mainly composed of the Jiapila Formation and Bolila Formation, whereas the regressive succession is primarily composed of the Bagong Formation. (3) The sandstone samples from the Jiapila Formation and Bagong Formation are ultra-low porosity and permeability reservoirs with secondary pores primarily. The mudstone samples of the Bagong Formation from the Jiang' ai Darina section are poor source rocks and non-source rocks, whereas they improve to the north (Woruoshan section). We inferred that the depression between Jiang' ai Darina and Woruoshan may develop well source rocks and have a good exploration prospect based on the latest tectono-lithofacies paleogeographic data, but confirmation is required. [Conclusions] These results would provide a valuable reference for the researches of Late Triassic sedimentary-tectonic evolution and oil and gas resource evaluation in Qiangtang Basin.

**Key words:** sedimentary facies division; sedimentary evolution model; source-reservoir evaluation; Upper Triassic; central Qiangtang Basin

**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No. 42372129; Natural Science Foundation of Sichuan Province, No. 2024NSFSC0833; Opening Foundation of State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, No. 223130; China Geological Survey Project, No. DD20230266

**Corresponding author:** WANG ZhongWei, E-mail: wzwcgd@sina.com; ZHAN WangZhong, E-mail: zhanwangzhong@qq.com