



· 鄂尔多斯盆地岩相古地理与沉积演化 ·

鄂尔多斯盆地西南部下三叠统刘家沟组重力流沉积特征及其成因分析

马瑶^{1,2}, 雷迅³, 李嘉玮^{1,2}, 周迅³, 张森垚^{1,2}, 陈强⁴, 袁珍^{1,2}

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 中国石油长庆油田分公司 天然气评价项目部, 甘肃 庆阳 745099;
4. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要 通过岩心观察、薄片鉴定、X衍射矿物分析,对鄂尔多斯盆地西南部刘家沟组重力流沉积的岩石类型及特征、成因进行研究。结果表明,刘家沟组取心段发育灰紫色粉砂岩、砾屑混积岩以及薄层黑色泥岩。粉砂岩主要组分为石英、岩屑、长石、泥晶方解石及杂基,具杂基支撑结构,发育沟模、粒序层理、火焰状构造、包卷层理、鲍马序列等浊流沉积特征,为浊积岩。砾屑混积岩发育大量砾屑及填隙物,填隙物由陆源碎屑颗粒、内碎屑及基质组成,发育泥质撕裂屑、基质支撑结构、颗粒无定向排列、与上下泥岩突变接触等沉积特征,为碎屑流沉积。研究认为,早三叠世勉略洋盆并未完全闭合,对鄂尔多斯盆地西南缘产生海侵影响,形成混积岩层,在正宁一带发育潟湖沉积,并存在斜坡,在C3钻井处发育碎屑流-浊流为主的重力流沉积。

关键词 重力流沉积;混积岩;海侵;刘家沟组;早三叠世;鄂尔多斯盆地

中图分类号: P531; P558.2 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-06-011

Characterization of gravity flow deposition of the Lower Triassic Liujiagou Formation in the southwestern Ordos Basin and analysis of its genesis

MA Yao^{1,2}, LEI Xun³, LI Jiawei^{1,2}, ZHOU Xun³, ZHANG Senyao^{1,2},
CHEN Qiang⁴, YUAN Zhen^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

3. Natural Gas Evaluation Project Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang 745099, China;

4. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract Through core observation, thin section identification, and X-ray diffraction mineral analysis, the rock types and characteristics, and the genesis were studied. The results show that the core section of Liujiagou Formation develops grayish purple siltstone, rudaceous mixed rock and black mudstone. The siltstone was mainly composed of quartz, rock debris, feldspar, micrite calcite, and matrix, with a matrix-supported fabric, and developed turbidite sedimentary characteristics such as groove casts, graded bedding, flame structures,

收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(41702117); 陕西省科协青年人才托举计划资助项目(20240701)。

第一作者: 马瑶, 女, 博士, 副教授, 从事沉积学与储层地质学研究, mayao90s@163.com。

convolute bedding, and Bouma sequences, identifying it as turbidite. The mixed rock contained a large amount of gravel intraclast and interstitial material, with the latter composed of terrigenous clastic particles, intraclasts, and matrix. It exhibited sedimentary characteristics such as muddy tear-shaped clasts, matrix-supported structure, randomly oriented particles, and abrupt contact with the overlying and underlying mudstones, suggesting it was debris flow deposition. The study suggests that the Mianlue Ocean during the Early Triassic was not completely closed and had a marine transgression impact on the southwestern margin of the Ordos Basin, forming mixed rock strata. Lagoon sediments developed in the Zhengning area, with slopes present, and gravity flow sediments dominated by debris flow-turbidity current were developed at the place of Well C3.

Keywords gravity flow deposition; mixed rocks; transgression; Liujiagou Formation; Early Triassic; Ordos Basin

下三叠统刘家沟组在鄂尔多斯盆地全区稳定发育,以大规模交错层理极发育的红层建造为特征。因其缺乏有利油气成藏条件,不发育大规模油气藏,一直未受到油气勘探领域的重视,又因其缺少生物化石及相关资料,缺乏综合研究。针对鄂尔多斯盆地刘家沟组开展的少量研究集中在其红层的成色机制^[1],或基于野外露头的物源判别及沉积环境分析^[2-3],或其作为钻探防漏工艺重点层位及煤田开采回注水优选层位开展的岩石学特征分析^[4]。

前人研究认为,下三叠统刘家沟组以紫红色、砖红色、灰绿色细砂岩与泥岩互层为主,形成于干旱炎热气候下的河流-湖泊-三角洲相沉积,尚未有鄂尔多斯盆地刘家沟组发育重力流沉积的报道(鄂尔多斯盆地三叠系重力流沉积的研究多见于中上三叠统)。前人在华北板块豫西地区刘家沟组中下部发现了多层砾岩,具有“砂球构造”,并对其成因进行了研究。早期观点认为豫西地区下三叠统刘家沟组的“砂球”为原地同生分异作用形成,形成于海相滨岸至滨外沉积环境^[5]。张利伟等认为,豫西地区刘家沟组砾岩层的砾石与微生物席有关,而砾岩的形成受控于重力流作用形成的碎屑流沉积^[6],这是首次在华北板块下三叠统地层中提出重力流沉积的观点。但此后学者给出豫西地区刘家沟组发育风暴岩的解释,认为其形成于干旱炎热气候条件下的短期湖泊风暴沉积^[7]。

在对鄂尔多斯盆地西南部钻井进行岩心观察的过程中,发现刘家沟组地层中发育具泥质撕裂屑的灰紫色砾岩与纹层状粉砂岩、黑色泥岩互层以及粒序层理、火焰状构造、沟模等重力流沉积特征,肉眼观察砾岩致密,粉砂岩及砾岩滴酸均剧烈

起泡,钙质含量高。这些特征与刘家沟组常见的岩石特征及地质认识不相匹配。为明确刘家沟组的岩石类型及成因,本研究通过对 C3 钻井刘家沟组岩石学、沉积学特征的分析,开展盆地西南部刘家沟组重力流沉积类型、沉积特征及成因研究,在首次提出鄂尔多斯盆地范围下三叠统存在重力流沉积的基础上,重新刻画鄂尔多斯盆地早三叠世刘家沟组西南部的古地理格局,并探讨其为华北盆地南部及秦岭造山带早三叠世构造演化提供的地质意义。

1 地质概况

发现重力流沉积的钻井 C3 井位于鄂尔多斯盆地西南部,地理位置位于正宁—合水之间、麟游紫石崖剖面以北,距麟游紫石崖剖面直线距离约 100 km(见图 1)。早三叠世沉积期的构造位置属于华北克拉通南部,南邻秦岭造山带。秦岭造山带自北向南分为华北南缘、北秦岭、南秦岭和华南北缘构造带等 4 个构造单元。而晚古生代至三叠纪,秦岭造山带最主要的构造事件是勉略洋盆的打开扩张与演化,勉略洋盆是由秦岭造山带南部的华南海南板块北缘原消减的被动陆缘扩张裂谷持续扩张裂解形成的一支有限洋盆,属于古特提斯洋域北部的分支^[8]。洋盆自古生代泥盆纪开始扩张打开,至二叠纪中晚期俯冲消减,直至三叠纪中晚期碰撞造山闭合^[9]。这次重要的构造事件改变了秦岭早古生代板块的构造格局,也对晚古生代至三叠纪华北板块南缘及华北克拉通南部的构造格局产生大的影响^[10]。但是,勉略洋盆俯冲闭合的精确时限尚有争议^[11-15],因此勉略洋盆在三叠纪早期是否会对华北南缘乃至盆地南部的下三叠

This geological map illustrates the tectonic and structural features of the Ordos Basin and its surroundings. The map includes a coordinate grid with longitudes from 102°E to 126°E and latitudes from 32°N to 40°N. Key tectonic units are color-coded: yellow for the North China Block (华北板块), pink for the Early Triassic protobasin (早三叠世原型盆地), and green for the White Jurassic basin range (白垩纪盆地范围). The Ordos Basin (鄂尔多斯盆地) is centrally located within the pink area. Major faults are shown as solid lines with arrows: a strike-slip fault (走滑断层) in the northwest, a thrust fault (逆冲断层) along the southern margin of the North China Block, and a fault along the southern margin of the Early Triassic protobasin. The map also shows the location of the C3 well (C3井) near Zhengning (正宁) and the Lijiaogou Group (刘家沟组) in the northwest. Other labeled features include the Alashan (阿拉善), Hua (华), and Shan (山) blocks, the North Qinling (北秦岭) and South Qinling (南秦岭) mountains, and the Yangtze Block (扬子板块) to the south. A scale bar indicates 250 km.

Fig. 1 Tectonic location of Ordos Basin of and location of Well C3 during Early Triassic

鄂尔多斯盆地西南缘麟游紫石崖剖面资料显示,刘家沟组地层厚度为 206 m。西南部 C3 井的钻井资料显示刘家沟组地层厚度为 365 m,地层埋深为 2 950 ~ 3 315 m,取心段为 3 200 ~ 3 232 m,取心长度 32 m,为刘家沟组的中段地层。对取心段粉砂岩进行碎屑锆石 U-Pb 定年,获得的最小谐和锆石年龄为 (255.3 ± 5.4) Ma,依据最年轻的碎屑锆石约束最大沉积年龄的观点,该地层沉积原岩年龄应为晚二叠世末期或晚于晚二叠世。这与钻井分层将其归为刘家沟组的认识并不冲突。

C3 钻井刘家沟组取心段岩石整体以灰紫色为,主夹少量暗色泥岩,与露头下三叠统红层相比颜色偏暗。整段粒度较细,除底部发育约 3 m 厚的砾岩外,其余均以泥质粉砂岩、粉砂岩及泥岩为主。粉砂岩及砾岩滴酸均剧烈起泡。为明确刘家沟组取心段的岩石类型及特征,采集粉砂岩及砾岩样品各 4 块,进行普通薄片镜下观察及 X 衍射全岩矿物分析。X 衍射全岩矿物成分分析使用日本理学 RigakuXRD 智能多功能 X 射线衍射仪

SmartlabSE 作为检测仪器,采用 SYT5163-2018 标准中沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法。

2.1 矿物学特征

根据 X 射线衍射全岩矿物分析数据(见表 1),刘家沟组砂岩、砾岩主要矿物成分包括石英、方解石、斜长石、黏土矿物,另发育黄铁矿以及少量钾长石。陆源碎屑总质量分数平均为 68.05%,石英平均质量分数 47.7%,斜长石平均

质量分数 16.1%;碳酸盐组分主要为方解石,平均质量分数为 25%,砾岩中方解石组分最高,最高质量分数可达 33.85%,这是岩石滴稀盐酸起泡的原因;黏土矿物平均质量分数为 9.86%;次要矿物黄铁矿平均质量分数为 1.26%,为强还原环境下形成的产物,含量虽少,但在每块样品中皆有发育,对沉积环境的判别有一定指示意义。钾长石质量分数极低,仅在个别样品中检测到,平均质量分数不足 0.01%,可忽视。

表1 C3井刘家沟组取心段岩石X衍射全岩矿物含量特征

Tab.1 Xray diffraction characteristics of whole rock mineral content in the core section of Liujiagou Formation in Well C3											
样号	深度/m	层位	矿物质量分数/%								定名
			石英	斜长石	钾长石	方解石	黄铁矿	黏土矿物	陆源碎屑组分	碳酸盐矿物	
C3-10	3 201.50	刘家沟组	52.0	19.3	0.0	10.0	1.9	16.7	71.4	10.0	
C3-15	3 205.10		50.8	18.3	0.0	12.8	1.3	16.8	69.1	12.8	灰紫色
C3-30	3 212.47		47.9	18.0	0.0	26.4	1.8	5.9	65.9	26.4	粉砂岩
C3-58	3 226.10		58.3	16.8	0.0	15.8	1.3	7.8	75.1	15.8	
C3-70	3 227.97		38.4	18.8	0.0	35.4	1.0	6.3	57.3	35.4	
C3-73	3 228.60		45.4	12.4	0.0	25.8	1.0	15.4	59.8	25.8	灰紫色砾
C3-78	3 229.63		44.6	13.1	0.1	36.2	0.9	5.2	58.8	36.2	屑混积岩
C3-80	3 230.00	刘家沟组 延长组 长7段	44.2	12.2	0.0	38.0	0.7	4.9	57.3	38.0	
L11	平均值		54.5	6.4	7.1	3.3	0	28.25	96.7	3.3	
H269	平均值		31.5	6.3	2.4	0	5.1	54.7	100	0	

注:盆地 L11 钻井刘家沟组及 H269 钻井延长组长 7 段 X 衍射全岩矿物平均质量分数数据引自文献[21]

对比已发表的文献数据,鄂尔多斯盆地东北部刘家沟组样品全岩矿物成分以石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、浊沸石及黏土矿物为主,未检测出黄铁矿^[4];其主要发育河流-三角洲相,以氧化-弱还原沉积环境为主。据鄂尔多斯盆地二叠—三叠系各地层井下碎屑岩样品中主要的非黏土矿物含量显示,仅在中晚三叠世延长组长 7 段样品中检测到平均质量分数为 5.1% 的黄铁矿,形成于长 7 期半深湖—深湖沉积环境中,具有可形成黄铁矿的强还原环境^[21]。据此推断,盆地西南缘刘家沟组沉积期存在一定的还原性水体环境。

根据 Mount、杨朝青等及张雄华的定义,刘家沟组样品应属于混积岩的范畴^[22-24],但也要排除成岩作用形成的方解石胶结物,其不应作为混积碳酸盐组分,需要结合薄片镜下观察进一步确定。薄片镜下特征显示,刘家沟组碳酸盐组分的赋存

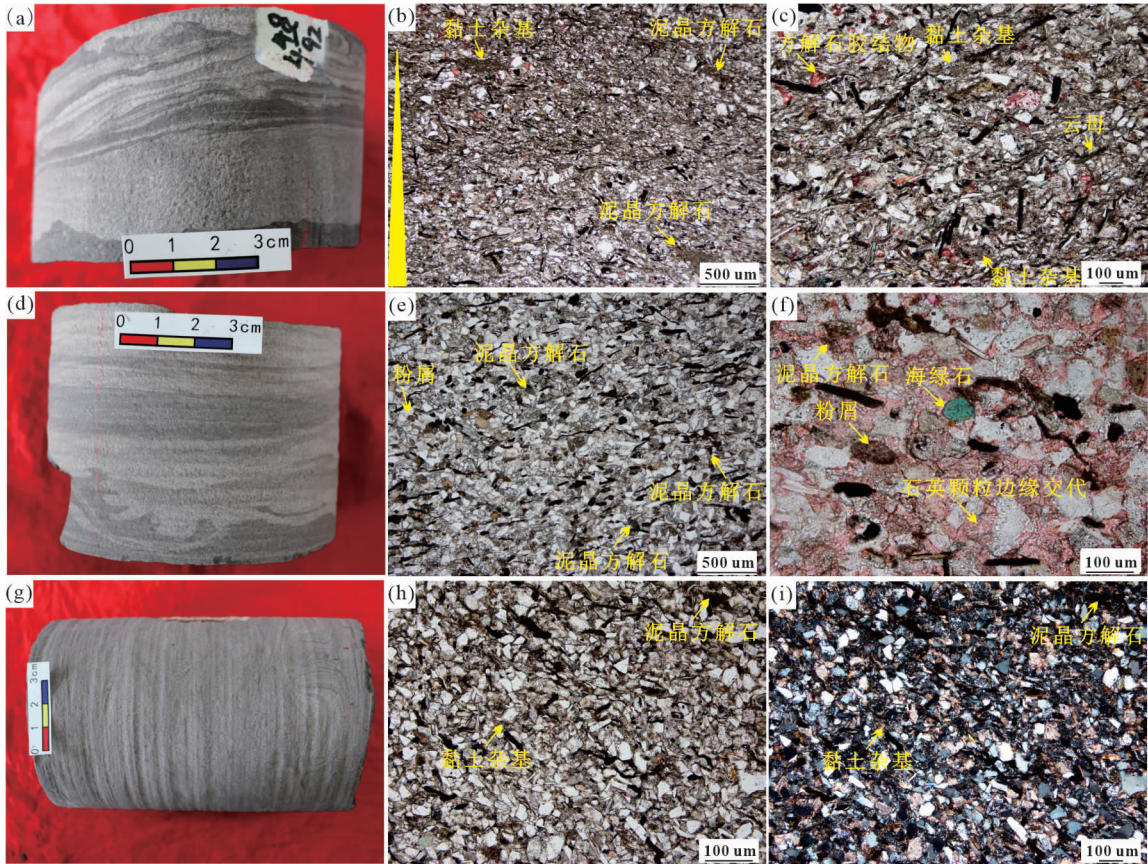
状态主要包括内碎屑(砾屑、砂屑、粉屑及生屑)、灰泥以及方解石胶结物等,在不同岩性中含量变化较大,从而最终将岩石类型总结为 2 类:粉砂岩类及砾屑混积岩类。

2.2 粉砂岩

粉砂岩为刘家沟组取心段的主要岩石类型,颜色主要为灰紫色;发育水平层理、块状层理、递变层理及变形构造(火焰状构造、包卷层理)等沉积构造〔见图 2(a)、(d)、(g)〕;其主要由石英、岩屑、长石、云母、杂基、方解石胶结物和泥晶方解石组成;陆源碎屑颗粒质量分数 55% ~ 75%,呈棱角状、次棱角状,分选中等—差,基质质量分数高,9% ~ 25%,具基质支撑结构〔见图 2(b)、(c)〕,反映快速沉积特点;可见碎屑颗粒由下而上的粒序递变特征〔见图 2(b)〕。石英以单晶石英为主,少量燧石,质量分数 15% ~ 30%,粒径分布在 0.01 ~ 0.2 mm,分选差。岩屑含量较高,多为变

质石英岩岩屑,少量灰岩岩屑[见图2(i)],质量分数为10%~25%,粒径为0.02~0.15 mm。长石主要为斜长石,质量分数为5%~15%,可见溶蚀及双晶,粒径分布在0.02~0.06 mm。云母多呈板条状,质量分数为1%~5%;纹层状粉砂岩中云母可见定向排列特征[见图2(e)],块状粉砂岩中的云母多杂乱分布[见图2(c)],几乎无塑性变形特征,部分蚀变。基质以黏土杂基为主,部分为碳酸盐灰泥。发育盆内碎屑,主要为由泥

晶方解石构成的粉砂屑,质量分数1%~5%,粒径为0.05~1.5 mm[见图2(c)、(e)、(h)]。方解石胶结物在部分粉砂岩中十分发育,质量分数为1%~30%,为沉积后成岩作用阶段形成,多交代碎屑颗粒,可见石英、岩屑等颗粒边缘被其交代蚕食呈港湾状的现象[见图2(f)]。发育少量海绿石碎屑,单偏光下呈亮绿色[见图2(f)],正交镜下可见无数细小晶粒,干涉色受其自身颜色影响,呈暗绿色。



(a) C3-57, 3 225.9 m, 灰紫色变形层理构造粉砂岩; (b) C3-57, 3 225.9 m, 基质含量高, 基质支撑结构, 颗粒分选差, 具微观粒序递变特征, 单偏光; (c) C3-57, 3 225.9 m, 颗粒分选差, 无定向排列, 基质含量高, 云母未见明显塑性变形, 单偏光; (d) C3-30, 3 212.47 m, 灰紫色具火焰状构造粉砂岩, 上部发育水平纹层; (e) C3-30, 3 212.47 m, 石英等颗粒呈棱角-次棱角状, 可见泥晶方解石构成的粉屑, 基质含量高, 主要为黏土杂基及碳酸盐灰泥, 云母略呈定向性; (f) C3-29, 3 211.8 m, 可见椭圆状、扁圆状粉屑级盆内碎屑, 海绿石碎屑呈亮绿色, 大量方解石胶结, 且对石英等颗粒产生强烈交代作用, 单偏光; (g) C3-10, 3 201.5 m, 灰紫色粉砂岩, 上部发育水平纹层, 下部发育包卷层理; (h) C3-10, 3 201.5 m, 基质含量高, 包括黏土杂基和泥晶方解石, 单偏光; (i) 与(h)同视域, 岩屑以变质岩岩屑为主, 可见灰岩岩屑, 正交偏光

图2 刘家沟组灰紫色钙质粉砂岩显微镜下特征

Fig. 2 Microscopic characterization of grayish-purple calcareous siltstone from the Liujiagou Formation

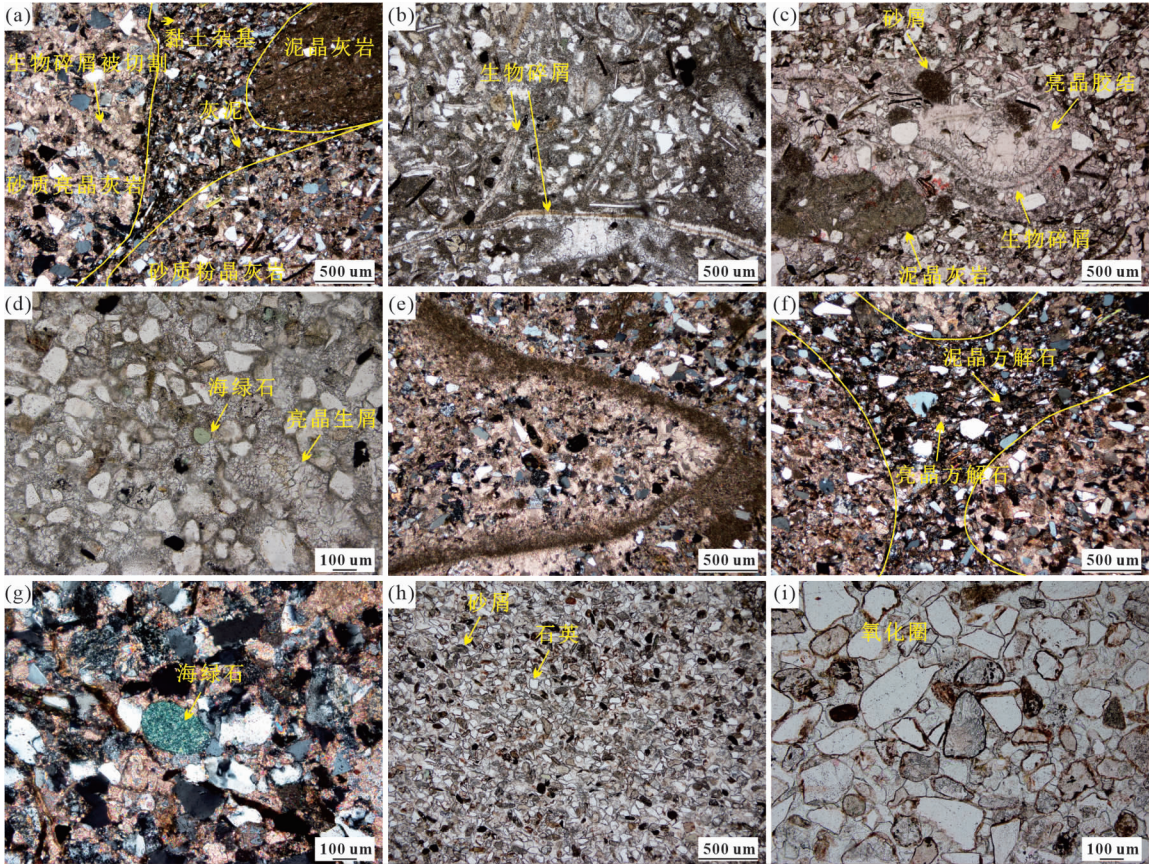
2.3 砾屑混积岩

岩中观察时, 根据颗粒大小(主体大于2 mm)将刘家沟组取心段底部岩石定为砾岩。但是, 砾岩多指陆源碎屑来源, 薄片观察发现这些砾

岩中的颗粒成分较为复杂, 为碳酸盐组分与陆源碎屑组分结构混积而成, 可见颗粒内部化石、颗粒等多边缘被磨蚀或切割的现象[见图3(a)]。综合分析认为, 这些颗粒均为沉积盆地内部形成, 内

碎屑粒径多为 3 ~ 30 mm,按照粒度大小,主要为砾屑 (>2 mm),质量分数平均 70%,因此不应称为砾岩。填隙物组分以基质为主,其次为粉砂级陆源碎屑颗粒及粉屑级内碎屑,三者含量均等,质量分数不超过 50%,综合对比混积岩的分类方案,选择叶茂松等的混积岩岩石命名原则^[25]:当

3 类组构质量分数均不超过 50%,该类岩石被定义为多组分混积岩或正混积岩。结合主要颗粒为内碎屑(质量分数超过 70%)的特征,颜色主要为灰紫色,将岩石定名为灰紫色砾屑混积岩。其沉积构造较为单一,主要为块状构造。



(a) C3-78, 3 229.63 m, 可识别出 3 个砾屑边界, 分别为砂质亮晶灰岩、砂质粉晶灰岩和泥晶灰岩, 正交偏光; (b) C3-70, 3 227.97 m, 生物碎屑灰岩砾屑, 单偏光; (c) C3-80, 3 230 m, 生物碎屑灰岩砾屑, 左下角为泥晶灰岩砾屑, 单偏光; (d) C3-78, 3 229.63 m, 亮晶生屑, 重结晶作用强烈, 可见生物结构, 发育海绿石, 单偏光; (e) C3-78, 3 229.63 m, 含内碎屑砂质亮晶灰岩砾屑, 视域中大小约 3.5 mm, 正交偏光; (f) C3-78, 322 9.63 m, 可识别出 3 个砂质亮晶灰岩砾屑的颗粒边界, 中部填隙物杂基含量较高, 具杂基支撑结构, 正交镜下整体颜色偏暗, 正交偏光; (g) C3-75, 3 228.73 m, 钙质粉砂岩中发育海绿石碎屑, 粒径约 0.15 mm, 呈椭圆颗粒状, 由无数细小晶粒组成, 单偏镜下呈橄榄色, 正交偏光; (h) C3-76, 3 229.4 m, 砂质灰岩砾屑内部, 粒径大, 视域下无法显示颗粒边界, 石英分选磨圆均较好, 单偏光; (i) C3-76, 3 229.4 m, 砂质灰岩砾屑, 成分以亮晶方解石及单晶石英为主, 含少量变质岩岩屑及长石, 石英次圆状, 多具红褐色氧化圈, 反映曾暴露于海平面之上, 氧化后再沉积而成, 单偏光

图 3 刘家沟组灰紫色砾屑混积岩显微镜下特征

Fig. 3 Microscopic characterization of grayish-purple conglomerate mixed sediments from the Liujiagou Formation

岩心观察,砾屑磨圆较好。薄片镜下观察显示,砾屑颗粒成分复杂,可识别到泥灰岩、砂质泥-粉晶灰岩、砂质亮晶灰岩、生屑灰岩等砾屑〔见图 3(a) ~ (e)〕以及部分泥质、粉砂质砾屑〔见图 3(e)〕。砂质亮晶灰岩及亮晶生屑灰岩砾屑多为亮晶方解石胶结,灰泥含量低〔见图 3(c)、(d)、

(e)〕,反映砾屑原岩沉积时存在高能淘洗环境;含砂级石英、岩屑、长石等陆源碎屑颗粒及少量粉-泥晶砂屑级内碎屑颗粒〔见图 3(a)、(e)、(f)〕;可见少量椭圆状海绿石碎屑〔见图 3(d)、(g)〕,砂级(约 0.25 mm),单偏镜下呈亮绿色,正交镜下由大量细小颗粒组成,干涉色因矿物自身

颜色不易显示,反映受海相沉积影响。生屑灰岩砾屑多呈亮晶胶结,生物碎屑破碎程度大〔见图 3(b)、(c)、(d)〕,难以识别原化石的属性,反映异地沉积的特征。砾屑内颗粒粒度相对大,分选中等一好,部分砾屑中石英呈次圆状,含量高,分选好〔见图 3(h)〕,且具褐红色氧化圈〔见图 3(i)〕,反映石英颗粒曾暴露于海平面之上,氧化后再沉积而成。砾屑内整体基质含量低。

填隙物组分分选差,由基质、陆源碎屑颗粒及内碎屑颗粒组成,基质支撑结构。基质主要包括碳酸盐灰泥及黏土杂基,部分亮晶;颗粒组分主要为石英、岩屑、长石、云母等陆源碎屑及泥-粉晶砂屑、粉晶生屑等内碎屑,分选差,磨圆度低,石英颗粒呈棱角状一次棱角状。符合碎屑流快速堆积、沉积物分散搬运的沉积特征。

部分砾屑内部结构组分与填隙物成分接近,但薄片下可识别出砾屑颗粒边界,可见砾屑内颗粒被切割磨蚀的现象〔见图 3(a)〕。正交镜下,砾屑内因基质含量低,以亮晶胶结为主,整体偏亮,而填隙物组分因基质含量高,正交镜下颜色整体偏暗〔见图 3(a)、(e)〕。在内碎屑颗粒内部可观察到砂屑。

从砾屑混积岩不同组分的特征来看,砾屑原岩为混积岩,形成于高能动荡的水体环境,先沉积成岩后,在盆地内因地质作用,被打碎、搬运、磨蚀,再与填隙物组分共同沉积而成。根据沉积特征,这种地质作用应为重力流作用。

3 重力流沉积特征

根据颗粒支撑机理可将重力流分为碎屑流、颗粒流、液化沉积物流和浊流 4 种类型。根据岩心观察及薄片镜下鉴定,结合沉积构造等特征,在刘家沟组取心段中识别出非牛顿流体的碎屑流和牛顿流体的浊流 2 种重力流类型。

3.1 碎屑流

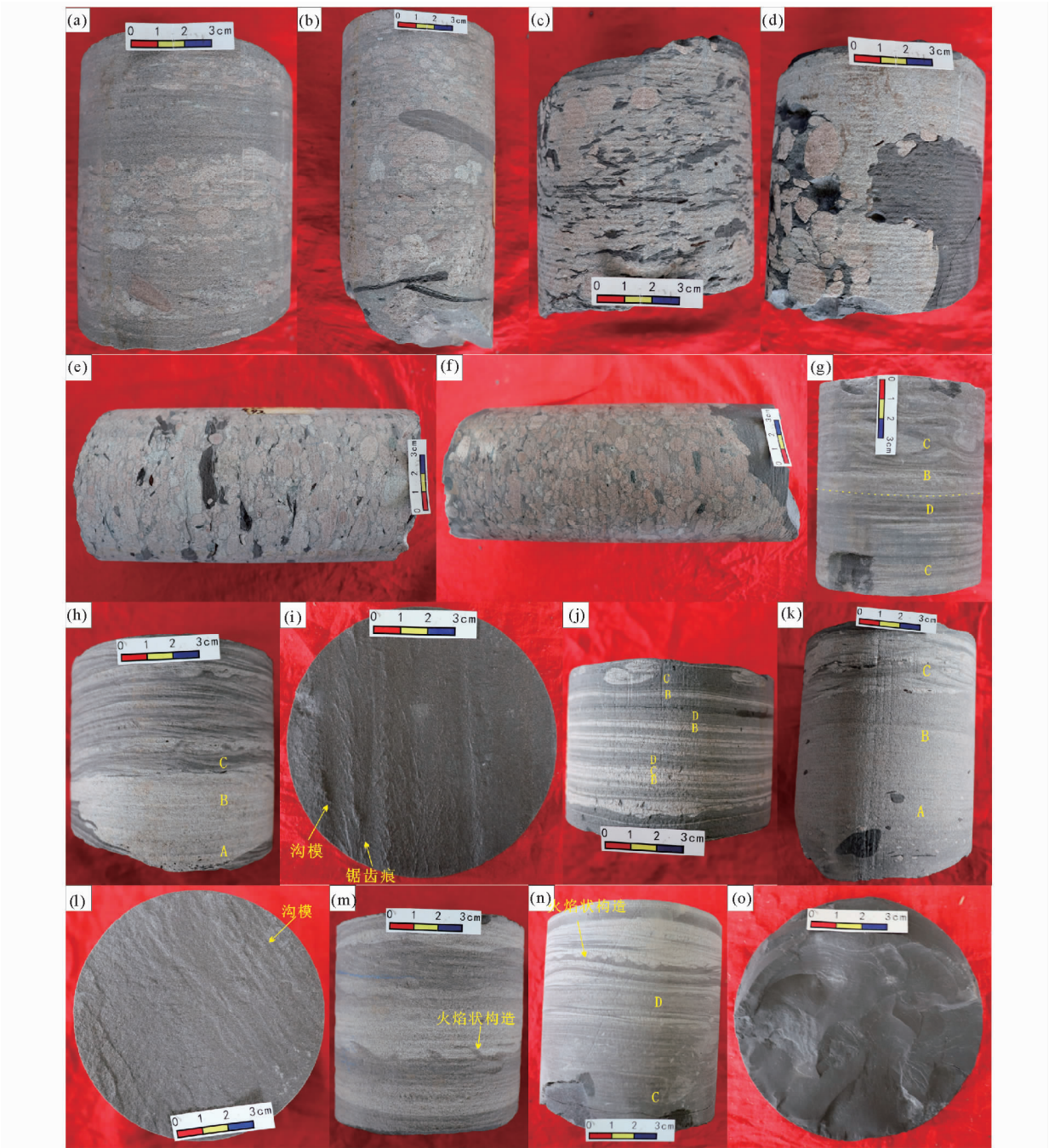
经典重力流理论认为碎屑流是含水的砾石级碎屑碰撞和杂基联合支撑的块体流^[26],分为以泥质杂基为主的泥流和粗碎屑含量为主、细砂级物质支撑的碎屑流。在 C3 井刘家沟组岩心中观察到以砾屑为主、基质支撑的砾屑混积岩碎屑流沉积。基质主要为灰泥、黏土杂基及粉砂级碎屑颗粒等细粒沉积物,基质组分分选差,砾屑互不直接接触;其主要存在于取心段底部,碎屑流沉积层总

厚度约 2.6 m,可分为 2 段,每段由一期重力流作用控制形成,底部伴随薄层滑塌现象,向上块体流动能量逐渐衰减,顶部均转变为浊流沉积;多具块状构造及不规则的粒序性〔见图 4(a)、(b)〕;与顶底粉砂岩或暗色泥岩呈突变接触〔见图 4(a)、(c)〕,部分可见底部冲刷构造或滑塌变形构造〔见图 4(d)、(f)〕;砾屑多为细砾—中砾,成分在前文已论述;砾屑磨圆较高,多呈圆状—扁圆状,无明显定向性〔见图 4(d)、(e)〕;可见大量近水平排列的不规则泥岩撕裂屑,部分泥屑呈板条状〔见图 4(b)、(c)、(e)〕,反映整体呈块体沉降的特点。

3.2 浊流

根据浊流沉积物的密度和力度,可将浊流分为低密度浊流和高密度浊流。刘家沟组主要发育低密度浊流沉积,即经典浊流沉积,主要以粉细砂级和黏土等细粒沉积物为主。刘家沟组浊流沉积的典型识别标志包括鲍马序列、泥底构造、粒序递变层以及无大型牵引流形成的交错层理(见图 4)。

经典浊积岩发育完整的或部分的鲍马序列,这是判别浊流沉积的最可靠标志。C3 井刘家沟组浊流沉积由灰紫色纹层状和块状粉砂岩与泥岩互层,可见 ABC, BCD, BC, BD 等组合〔见图 4(g)、(h)、(j)、(k)〕,A 段主要由灰紫色粉—细砂岩组成,可见向上粒度变细的递变层理〔见图 4(h)、(k)〕。识别出 2 类泥底构造:第一类是在黏结性泥底形成的冲刷痕,在刘家沟组粉砂岩底面识别出沟模、槽模、锯齿痕等冲刷痕〔见图 4(j)、(l)〕,沟模的典型特征是岩层底面上发育稍微突起的平直小脊,高度约 2 mm 且均一,成平行状排列,沟模长轴平行于水流方向〔见图 4(i)、(l)〕;可见若干连续排列的 V 字形脊,为锯齿痕,锯齿痕的 V 形脊尖端指向下游〔见图 4(i)〕。第二类是湍流悬浮液和塑性泥底相互作用形成的沉积同生变形构造,主要为火焰状构造及少许泥岩撕裂屑〔见图 4(k)、(m)、(n)〕;可见由垂向重力沉降作用伴随微弱牵引形成的沉积构造,包括平行层理、沙纹层理、包卷层理和水平层理,主要见于鲍马序列的 BCD 段,不发育由浅水牵引流沉积为主要动力形成的大型交错层理;该段发育的泥岩主要为黑色—灰黑色的暗色泥岩,为浊积岩 E 段,形成于深水强还原环境,区别于刘家沟组常见的红色或反映浅水沉积的浅灰色—灰绿色〔见图 4(o)〕。



碎屑流沉积物:(a)3 227.87 m,基质支撑,砾屑无明显粒序性,与其上部中段粉砂岩及下部底段粉砂岩均呈突变接触;(b)3 228.2 m,基质支撑,砾屑不直接接触,略呈现下段反粒序上段正粒序,最大砾屑见于中部,另可见板条状泥质砾屑近水平状分布其中;(c)3 228.5 m,基质支撑,岩石顶部可见与暗色泥岩突变接触,上段发育砾屑漂浮于细粒基质中,不规则状近平行排列的泥岩撕裂屑;(d)3 228.6 m,滑塌变形现象;(e)3 229.4 m,基质支撑,砾屑间发育近平行排列的不规则泥岩撕裂屑;(f)3 229.63 m,基质支撑,底部与黑色泥岩呈突变接触,底部具冲刷构造。浊流沉积:(g)3 204.8 m,发育 2 期鲍马序列,分别为 CD 段和 BCD 段,C 段具明显的包卷层理;(h)3 213.9 m,由多个粒序层理段(A) - 包卷层理段(C) - 水平层理段(D)构成的浊积岩,底部粒序层理段底部发育伴随重荷模形成的火焰状构造;(i)3 205.57 m,灰紫色粉砂质泥岩,层面发育沟模和锯齿痕,岩层底面上可见稍微突起的平直小脊,成平行状排列,为沟模。若干连续排列的 V 字形脊,为锯齿痕,锯齿痕的 V 形脊尖端指向下游;(j)3 222.8 m,多期鲍马序列叠置;(k)3 226.91 m,发育鲍马序列 ABC 段,下为粒序层理段,中为平行层理段,上为包卷层理段;(l)3 216.6 m,沟模;(m)3 215.02,火焰状构造;(n)3 217.55,底部为包卷层理(C) - 水平层理段(D),顶部为另一期浊积岩,发育火焰状构造;(o)3 307.1 m,黑色块状泥岩,属于鲍马序列 E 段,为刘家沟组炎热气候背景水体深处还原环境形成

图 4 C3 井刘家沟组碎屑流沉积、浊流沉积特征

Fig. 4 Sedimentary characteristic of debris flow and turbidite deposit of Liujiagou Formation in Well C3

3.3 垂向沉积序列

C3 井刘家沟组重力流类型主要识别出碎屑流、浊流沉积及少量滑塌变形沉积,前两者分别由宾汉塑性体和紊流两种不同性质的流体驱动。两种重力流沉积在垂向上呈上下叠置发育,碎屑流发育于底部,层厚相对较小,浊流发育于上部,厚度大。该段碎屑流沉积以发育泥岩撕裂屑、基质支撑大量砾屑、砾屑无定向排列等为特征,区别于正常牵引流砾岩。碎屑流沉积层下伏地层为刘家沟组灰绿色泥岩,为浅水沉积形成。浊流沉积覆于碎屑流沉积之上(见图 5)。这种垂向叠置关系反映了沉积作用机制及流体性质的转化。取心段

沉积早期为三角洲前缘或浅湖沉积,形成取心段底部灰绿色泥岩;至沉积中期,水体加深,存在斜坡环境,流体性质转化为碎屑流,形成取心段下部碎屑流沉积;至取心段沉积后期,水体持续加深,沉积环境由斜坡转化为深湖亚相,流体转化为浊流,形成取心段中上部厚层浊积岩,期间发育多期叠置牵引流成因的水平纹层泥岩、粉砂岩。结合前人提出的混合岩的沉积类型,认为刘家沟组取心段的混积岩属于重力流成因的间断混合或事件性突变混合类型,其形成指示一段时间的沉积环境突变^[27]。

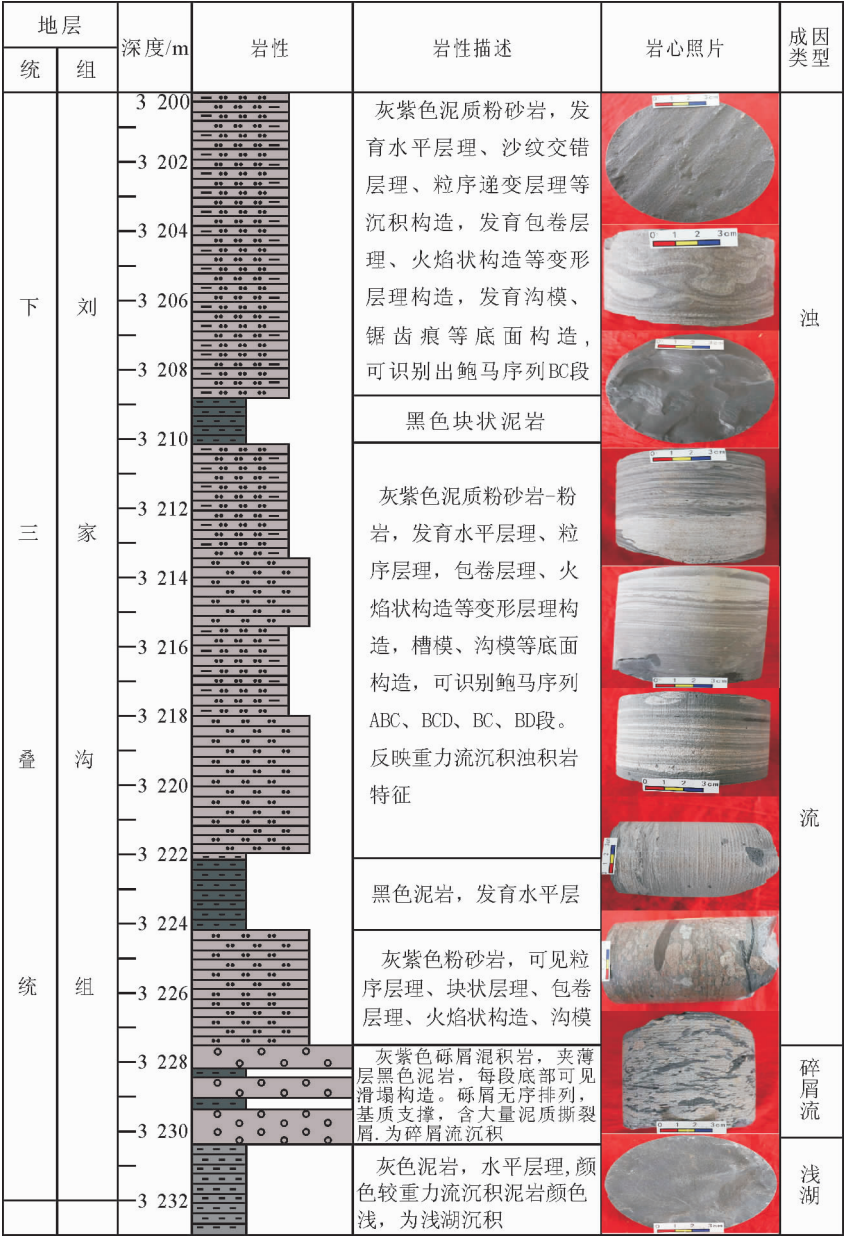


图 5 C3 井刘家沟组重力流垂向沉积序列
Fig. 5 Sedimentary sequence of gravity flow of Liujiagou Formation in Well C3

4 刘家沟组沉积环境讨论

鄂尔多斯原型盆地演化一直是研究热点,刘溪等认为,中晚三叠自华北盆地萎缩出来形成独立盆地,且中晚三叠世不发育封闭式内陆湖盆^[28]。早三叠世同样不发育封闭式湖盆,早在 20 世纪 80 年代已有学者提出,早三叠世在鄂尔多斯盆地西南侧至南侧的岐山—铜川一带存在海侵,发育一个由西南向东北方向伸进的海湾^[29-31]。在宝鸡南 80 km 的秦岭留凤关一带有早三叠世复理石^[32]。在陕西宝鸡岐山后周公庙和麟游紫石崖刘家沟组地层剖面中均发现有海相双壳类化石,紫石崖刘家沟组发育 *Pteria cf. munchisoni* 双壳类化石,岐山后周公庙发育岐山组 *Pteria cf. munchisoni* 化石(岐山组后被停用,与刘家沟组同期沉积)^[29],前人认为其发育与华北克拉通陆相刘家沟组同期异相的滨、浅海沉积。而后在麟游紫石崖剖面,下三叠统和尚沟组钙质砂岩中发现大量腕足类、腹足类及灰岩岩屑等海相沉积层的证据^[33]。王仁农提出河南东部永城一带刘家沟组发育的海侵夹层为海相滨岸沉积^[31]。楚道亮等对渭北地区石川河剖面和后周公庙剖面的叶肢介化石进行地层对比研究,认为早三叠世

陕西渭北地区存在多期次海侵事件^[34]。张抗提出,从早三叠至晚三叠世,鄂尔多斯盆地并非一个封闭湖盆,其南侧存在一个特提斯洋相连接的海湾,导致鄂尔多斯盆地南缘地区始终存在海侵,发育滨海-近海沉积区^[30]。笔者认同早期提出的观点,但过去发现的早三叠世华北板块南缘存在海侵的证据均来自野外剖面,始终缺乏钻井资料的证据。

本研究在鄂尔多斯盆地西南部 C3 井刘家沟组取心段中发现的碳酸盐岩矿物及大量存在盆内碎屑、海绿石等现象,为早三叠世盆地南缘存在海侵带来了钻井证据。结合秦岭造山带的地质演化背景,认为早三叠世秦岭造山带勉略洋盆并未完全闭合,对华北板块南缘产生海侵的影响。当时的沉积过程为,早三叠世鄂尔多斯盆地西南缘发育三角洲-浅湖沉积,当海平面快速上升时形成区域海侵,带来大量碳酸盐组分,在盆地西南缘宝鸡一带形成滨浅海沉积(见图 6),水体能量较强,同时接受三角洲提供的陆源碎屑补给与滨浅海碳酸盐沉积,发育砂泥质-碳酸盐混合沉积。同时,推断宝鸡北部正宁一带发育早三叠世华北盆地南部的一个沉积中心,海退时发育浅湖亚相,海侵时发育水体较深的潟湖沉积,具备还原性水体环境,且存在一定的坡度。

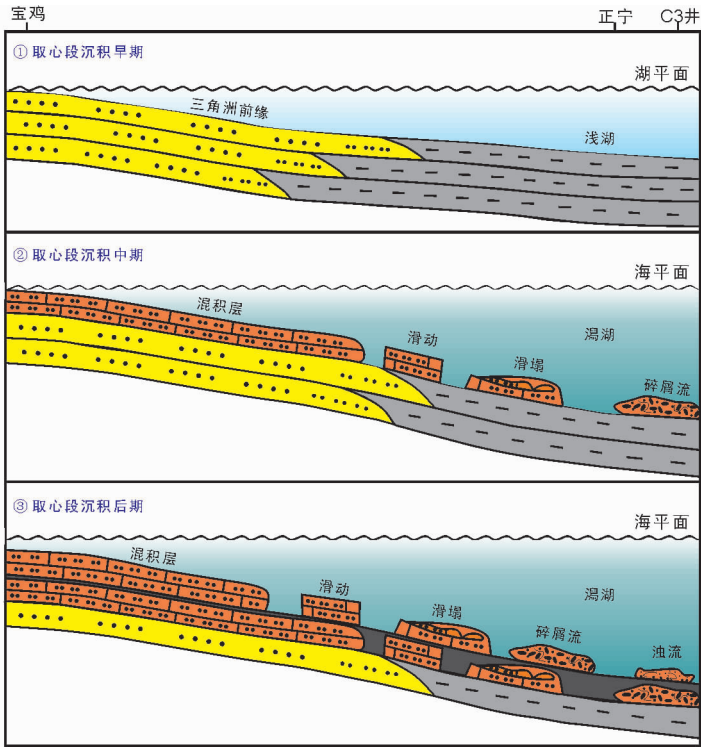


图 6 鄂尔多斯盆地西南部 C3 钻井刘家沟组取心段沉积模式图

Fig. 6 Sedimentary model of the Liujiagou Formation coring section of Well C3 in the southwestern Ordos Basin

当风暴浪或地震等诱导性事件发生时,盆地西南缘海侵作用形成的混积岩层发生垮塌、搬运,在有利的地形坡度条件下,与水体混合形成重力流。C3 钻井处发育斜坡-湖底环境,接受重力流沉积,随着水体持续加深,形成少量滑塌-碎屑流-浊流的沉积转化(见图6)。碎屑流中的砾屑组分即来源于西南缘滨浅海沉积形成的固结、半固结混积层。

这一发现为早三叠世华北板块南缘存在海侵提供新的钻井证据,为重新认识早三叠世鄂尔多斯盆地区域刘家沟组的沉积演化及古地理格局提供可靠的依据,也为秦岭构造带二叠纪—三叠纪的构造特征、勉略洋盆的地质演化研究提供思路。

5 结论

1)通过岩心观察、薄片观察、X 衍射分析,认为鄂尔多斯盆地西南部 C3 钻井刘家沟组取心段发育灰紫色粉砂岩、灰紫色砾屑混积岩以及薄层黑色泥岩。粉砂岩的主要组分为石英、岩屑、长石、泥晶方解石以及大量杂基,具杂基支撑结构。砾屑混积岩发育大量砾屑及填隙物,填隙物由含量均等的粉砂级陆源碎屑颗粒、粉屑级内碎屑及基质组成,具基质支撑结构。

2)通过沉积特征分析,认为 C3 钻井刘家沟组取心段发育重力流成因的碎屑流及浊流沉积。灰紫色粉砂岩及黑色泥岩为浊流成因的浊积岩,识别出沟模、工具模、粒序层理、火焰状构造、包卷层理、鲍马序列等浊流沉积标志。砾屑混积岩为碎屑流沉积,识别出泥质撕裂屑、基质支撑结构、颗粒无定向排列、与上下泥岩或粉砂岩突变接触等碎屑流沉积标志。取心段垂向上发育水体逐渐变深的碎屑流-浊流沉积的叠置组合。

3)早三叠世刘家沟组沉积期勉略洋盆并未完全闭合,对华北板块南缘产生海侵影响。海侵作用在盆地西南缘宝鸡一带形成滨浅海混积岩层,在其北部形成潟湖沉积,且存在斜坡。当风暴浪或地震等诱导性事件发生时,形成重力流沉积,在 C3 钻井处刘家沟组发育碎屑流-浊流沉积。

参考文献

[1] 谭聪,于炳松,袁选俊,等. 鄂尔多斯盆地地下三叠统刘家沟组与和尚沟组红层成色机制 [J]. 现代地质, 2020, 34(4): 769-783.

TAN C, YU B S, YUAN X J, et al. Color origin of the Lower Triassic Liujiagou and Heshanggou formations red beds in the Ordos Basin [J]. Geoscience, 2020, 34(4): 769-783.

[2] 冯志强,刘永江,王权,等. 华北板块中部晚二叠世—早三叠世砂岩碎屑锆石 U-Pb 定年及物源判别 [J]. 地球科学, 2023, 48(4): 1288-1306.

FENG Z Q, LIU Y J, WANG Q, et al. Detrital zircon U-Pb dating and provenance analysis for Late Permian-Early Triassic sandstone in central north China craton [J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1288-1306.

[3] 谭聪,袁选俊,于炳松,等. 鄂尔多斯盆地南缘上二叠统一中下三叠统地球化学特征及其古气候、古环境指示意义 [J]. 现代地质, 2019, 33(3): 615-628.

TAN C, YUAN X J, YU B S, et al. Geochemical characteristics and paleoclimatic implications of the Upper Permian and Middle-Lower Triassic strata in southern Ordos Basin [J]. Geoscience, 2019, 33(3): 615-628.

[4] 张志军. 鄂尔多斯盆地东北部下三叠统刘家沟组砂岩岩石学特征研究 [J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(9): 18-26.

ZHANG Z J. Study on the characteristics of sandstone in the Lower Triassic Liujiagou formation in the north-eastern of the Ordos Basin [J]. Coal Geology of China, 2022, 34(9): 18-26.

[5] 叶李胜,张碧龙,覃家琪,等. 济源盆地地下三叠统刘家沟组“砂岩球”之成因及其沉积环境浅析 [J]. 地质论评, 2013, 59(增刊1): 225-226.

YE L S, ZHANG B L, QIN J Q, et al. Origin and sedimentary environment of sandstone ball in Liujiagou formation of Lower Triassic in Jiyuan Basin [J]. Geological Review, 2013, 59(S1): 225-226.

[6] 张利伟,姚建新,牛永斌. 豫西地区下三叠统刘家沟组砾岩成因 [J]. 地质通报, 2017, 36(6): 1056-1063.

ZHANG L W, YAO J X, NIU Y B. The genesis of conglomerate in Lower Triassic Liujiagou Formation of western He'nan Province [J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(6): 1056-1063.

[7] 张景业,杨秋玲,朱彦彦,等. 新安地区刘家沟组风暴岩沉积特征及地质意义 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 250-254.

ZHANG J Y, YANG Q L, ZHU Y Y, et al. Sedimentary characteristics and geological implications of storm deposition in the Liujiagou formation of Xin'an Area [J]. Journal of East China University of Technology

- (Natural Science), 2018, 41(3): 250-254.
- [8] 张国伟. 秦岭勉略构造带与中国大陆构造 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [9] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 关于秦岭造山带 [J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 746-768.
ZHANG G W, GUO A L, DONG Y P, et al. Rethinking of the Qinling Orogen [J]. Journal of geomechanics, 2019, 25(5): 746-768.
- [10] YANG W T, PENG S Y, WANG M, et al. Provenance of upper Permian—Triassic sediments in the south of North China: Implications for the Qinling orogeny and basin evolution [J]. Sedimentary Geology, 2021, 424: 106002.
- [11] 杨文涛, 付强, 方特. 华北板块南缘洛南地区二叠系石盒子组沉积物源特征及其隆升过程 [J]. 古地理学报, 2024, 26(3): 655-670.
YANG W T, FU Q, FANG T. Provenance characteristics of the Permian Shihezi formation in Luonan Area, southern margin of north China block and its uplift process [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2024, 26(3): 655-670.
- [12] 祁凯, 任战利, 张梦婷, 等. 渭河地区及周缘晚古生代—中生代碎屑锆石年代学、地球化学及构造-沉积意义 [J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1897-1912.
QI K, REN Z L, ZHANG M T, et al. Characteristics of geochronology, geochemistry of Late Paleozoic and Mesozoic in Weihe region and its tectonic-sedimentary significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1897-1912.
- [13] LAI S C, QIN J F. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition of the Diabase Dike Swarm from Sanchazi area, Mianlue suture: Chronology evidence for the paleo-Tethys oceanic crust subduction [J]. Journal of Earth Science and Environment, 2010, 32(1): 27-33.
- [14] WANG Y P, YANG W T, ZHENG D S, et al. Detrital zircon U-Pb ages from the Middle to Late Permian strata of the Yiyang Area, southern North China Craton: Implications for the Mianlue oceanic crust subduction [J]. Geological Journal, 2019, 54: 3527-3541.
- [15] ZHU X Q, ZHU W B, GE R F, et al. Late Paleozoic provenance shift in the south-central North China Craton: Implications for tectonic evolution and crustal growth [J]. Gondwana Research, 2014, 25(1): 383-400.
- [16] 刘绍龙. 华北地区大型三叠纪原始沉积盆地的存在 [J]. 地质学报, 1986(2): 128-138.
LIU S L. The existence of a large-scale Triassic sedimentary basin in north China [J]. Acta Geologica Sinica, 1986(2): 128-138.
- [17] 马润华, 尹鹏英, 王振东, 等. 陕西省岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998: 158-159.
- [18] 李文厚, 陈强, 李克永, 等. 鄂尔多斯盆地野外剖面沉积相图集 [M]. 北京: 地质出版社, 2023.
- [19] 李玉宏, 李文厚, 张倩, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘沉积相图册 [M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- [20] 郭艳琴, 赵灵生, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区下二叠统沉积特征 [J]. 古地理学报, 2021, 23(1): 65-80.
GUO Y Q, ZHAO L S, GUO B C, et al. Sedimentary characteristics of the lower Permian in Ordos Basin and its adjacent areas [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(1): 65-80.
- [21] 谭聪. 鄂尔多斯盆地上二叠统一中上三叠统沉积特征及古气候演化 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [22] MOUNT J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments [J]. Geology, 1984, 12(7): 432-435.
- [23] 杨朝青, 沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境: 一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积 [J]. 沉积学报, 1990, 8(2): 59-66.
YANG Z Q, SHA Q A. Sedimentary environment of the middle devonian Qujing formation, Qujing, Yunnan province: A kind of mixing sedimentation of terrigenous, clastics and carbonate [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(2): 59-66.
- [24] 张雄华. 混积岩的分类和成因 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 31-34.
ZHANG X H. Classification and origin of mixed sediment [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(4): 31-34.
- [25] 叶茂松, 解习农, 徐长贵, 等. 混积岩分类命名体系探讨及对混积岩储层评价的启示——以渤海海域混积岩研究为例 [J]. 地质论评, 2018, 64(5): 1118-1131.
YE M S, XIE X N, XU C G, et al. Discussion for classification-designation system of mixed siliciclastic-carbonate sediments and the implication for their reservoir prediction: A case study of mixed sediments from Bohai Sea area [J]. Geological Review, 2018, 64(5): 1118-1131.
- [26] MIDDLETON G V, BOUMA A H. Turbidites and

- deep-water sedimentation [M]. California: SEPM Pacific Section, 1973: 1-38.
- [27] 冯进来, 胡凯, 曹剑, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义 [J]. 高校地质学报, 2011, 17(2): 297-307.
- FENG J L, HU K, CAO J, et al. A review on mixed rocks of terrigenous clastics and carbonates and their petroleum-gas geological significance [J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(2): 297-307.
- [28] 刘溪, 李艳广, 杨喜彦, 等. 三叠纪鄂尔多斯盆地东南边缘的扩张——来自南召地区沉积及碎屑锆石年代学的证据 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 620-628.
- LIU X, LI Y G, YANG X Y, et al. The extension of southeastern margin of Ordos Basin in Triassic: The evidences from sedimentation and detrital zircon chronology of Nanzhao area [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2018, 48(4): 620-628.
- [29] 程政武, 曲立范, 侯静鹏, 等. 陕西岐山产 Eumorphotis 的“石千峰组”地层问题 [J]. 地层学杂志, 1983, 7(3): 161-168, 245.
- CHENG Z W, QU L F, HOU J P, et al. Stratigraphic problems of the "Shiqianfeng Formation" of Eumorphotis in Qishan, Shaanxi [J]. Journal of Stratigraphy, 1983, 7(3): 161-168, 245.
- [30] 张抗. 鄂尔多斯盆地南缘三叠纪海相层及有关问题的讨论 [J]. 科学通报, 1983(1): 41-43.
- ZHANG K. Discussion on the Triassic marine strata in the southern margin of the Ordos Basin and related issues [J]. Chinese Science Bulletin, 1983(1): 41-43.
- [31] 王仁农. 河南永城及其相邻地区的“石千峰组” [J]. 地层学杂志, 1981, 5(3): 180-189.
- WANG R N. "Shiqianfeng Formation" in Yongcheng, Henan Province and its adjacent areas [J]. Journal of Stratigraphy, 1981, 5(3): 180-189.
- [32] 张抗. 晚二叠世至中侏罗世鄂尔多斯盆地与海区关系的讨论 [J]. 岩相古地理, 1990(5): 8-12.
- ZHANG K. Relationship between the Ordos Basin and sea area from late Permian to mid-Jurassic [J]. Petrographic Paleogeography, 1990(5): 8-12.
- [33] 杨华, 付金华, 袁效奇, 等. 鄂尔多斯盆地南缘地质剖面图集 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- [34] 楚道亮, 缪雪, 吴玉祥, 等. 陕西渭北二叠纪—三叠纪之交叶肢介化石及其地层对比 [J]. 地球科学, 2018, 43(11): 3910-3921.
- CHU D L, MIU X, WU Y X, et al. Conchostracans from the Permian-Triassic transition in Weibei area of Shaanxi Province and its biostratigraphic [J]. Earth Science, 2018, 43(11): 3910-3921.

(编辑 雷雁林)