

DOI: 10.12401/j.nwg.2022021

鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组 岩石特征及沉积环境

葛稳稳, 李华*, 谈梦婷, 孙玉玺, 冯斌, 于星

(长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

摘要: 为研究鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组岩石特征及沉积环境, 基于沉积学相关理论和方法, 根据野外露头、古生物及粒度分析等资料, 对研究区岩石特征、沉积相及主控因素开展了研究。结果表明: ①研究区平凉组可划分 3 种岩相和 2 种岩相组合。②通过综合研究岩性、古生物、沉积构造及粒度参数等资料, 确定平凉组沉积环境为深水斜坡。③沉积相为海底扇, 在此基础上可划分为中扇和下扇 2 个亚相, 近端朵叶和远端朵叶 2 个微相。④海底扇的主控因素为相对海平面升降、构造运动和物源供给。

关键词: 浊流沉积; 海底扇; 深水斜坡; 平凉组; 上奥陶统; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P512.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0119-14

Petrological Characteristics and Sedimentary Environment of the Upper Ordovician Pingliang Formation in the Southwestern Margin of Ordos Basin

GE Wenwen, LI Hua*, TAN Mengting, SUN Yuxi, FENG Bin, YU Xing

(School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China)

Abstract: In order to study the petrological characteristics and sedimentary environment of the Upper Ordovician Pingliang Formation in the southwest margin of Ordos basin, the petrological characteristics, sedimentary facies, and main controlling factors of the study area were studied by using sedimentology theories and methods based on outcrops, paleontology and grain-size analysis data. The result shows that: ① The Pingliang Formation in the study area can be divided into three lithofacies and two lithofacies associations. ② Based on an analysis of the lithologic character, sedimentary structure, palaeobiologic fossils and grain size parameters, it is believed that the sedimentary environment of Pingliang Formation is mainly deep-water slope. ③ The sedimentary facies is submarine fan, which can be further divided into two subfacies (middle fan and lower fan) and two microfacies (proximal lobe and distal lobe). ④ The main controlling factors of submarine fan include relative sea level, tectonic movement and provenance supply.

Keywords: turbidites; submarine fan; deep-water slope; Pingliang Formation; Upper Ordovician; Ordos basin

收稿日期: 2022-05-30; 修回日期: 2022-06-30; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目“鄂尔多斯盆地西南缘中—上奥陶统深水斜坡—海槽区等深流—重力流混合沉积形成机理”(42272113)和“内蒙古乌海地区奥陶系深水复合型及迁移型重力流水道形成机理”(42272115)联合资助。

作者简介: 葛稳稳(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事沉积学研究工作。E-mail: 1965024070@qq.com。

* 通讯作者: 李华(1984-), 男, 博士, 副教授, 长期从事深水沉积学教学和科研工作。E-mail: 501026@yangtzeu.edu.cn。

海底扇是由沉积物重力流发育在大陆斜坡及深海盆地的复合沉积体(Shanmugam et al., 1985),同时也是深水区油气主要储集体。海底扇既是重要的产油气储层和勘探重点,也是深海常规油气及天然气水合物的重要富集相带(Piper et al., 2001; 李祥辉等, 2009; 曾小明等, 2015; Portnov et al., 2019; 于兴河等, 2019; 谈明轩等, 2022)。海底扇朵叶沉积作为深水沉积体系中主要的沉积储层类型之一,具有重要的科研价值和极大的油气资源潜力,一直是深水沉积研究的热点(张佳佳等, 2019)。但是,海底扇的分类问题比较复杂,划分依据众多(Shanmugam, 2016)。经典的非限制性海底扇通常为放射状的平面分布形态,部分显示为长条状、指状展布特征(Spychala et al., 2017)。前人将海底扇朵叶边缘划分为正面和侧面 2 种类型,比较它们的沉积相、构造和流动过程的差异(Spychala et al., 2017),而朵叶边缘是研究最少的水底扇朵叶沉积亚环境。

前人在鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系进行过大量的研究,认为鄂尔多斯盆地西缘和南缘奥陶纪符合重力流的沉积特征,主要发育海底扇(张抗, 1992; 吴胜和等, 1994; 高振中等, 1995, 2006)。何幼斌等(2007)报道陇县平凉组三段的内潮汐沉积,认为其可能处于深水水道环境。周书昌等(2011)和梁积伟等(2019)分析了岐山奥陶系平凉组的沉积环境,认为其主要为深水沉积。李华等(2016, 2017, 2018, 2022)认为鄂尔

多斯盆地西南缘平凉组深水沉积类型丰富,发育重力流、等深流沉积,同时伴有交互作用沉积。然而,关于平凉组沉积环境研究尚存在一定的分歧,且沉积微相研究不充分。

笔者通过对野外实测剖面观察,并对剖面进行系统取样测试,主要结合岩性特征、沉积构造、粒度分析等方面综合研究陇县地区奥陶系平凉组的沉积特征和沉积演化,分析其形成机理,建立沉积模式,以期更加清楚认识陇县地区晚奥陶世沉积演化特征,并形成理论指导。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是中国最为重要的含油气盆地之一,横跨陕、甘、宁、蒙、晋 5 个省级行政区,面积约 320 000 km²(Song et al., 2013; 王振涛等, 2015)。鄂尔多斯盆地西南缘西起陇县,东到蒲城,区域内涵盖宝鸡、泾阳、铜川、富平等地级市。大地构造位置属于华北克拉通和秦祁造山带的交汇区域(吴胜和等, 1994; 王振涛等, 2015)。受祁连运动影响,晚奥陶世鄂尔多斯盆地整体抬升为陆地(马晓军等, 2019),仅在西南缘沉积,从北向南沿鄂尔多斯古陆依次发育开阔台地、台缘生物礁、台地前缘斜坡以及深水斜坡(李文厚等, 2012)(图 1a)。

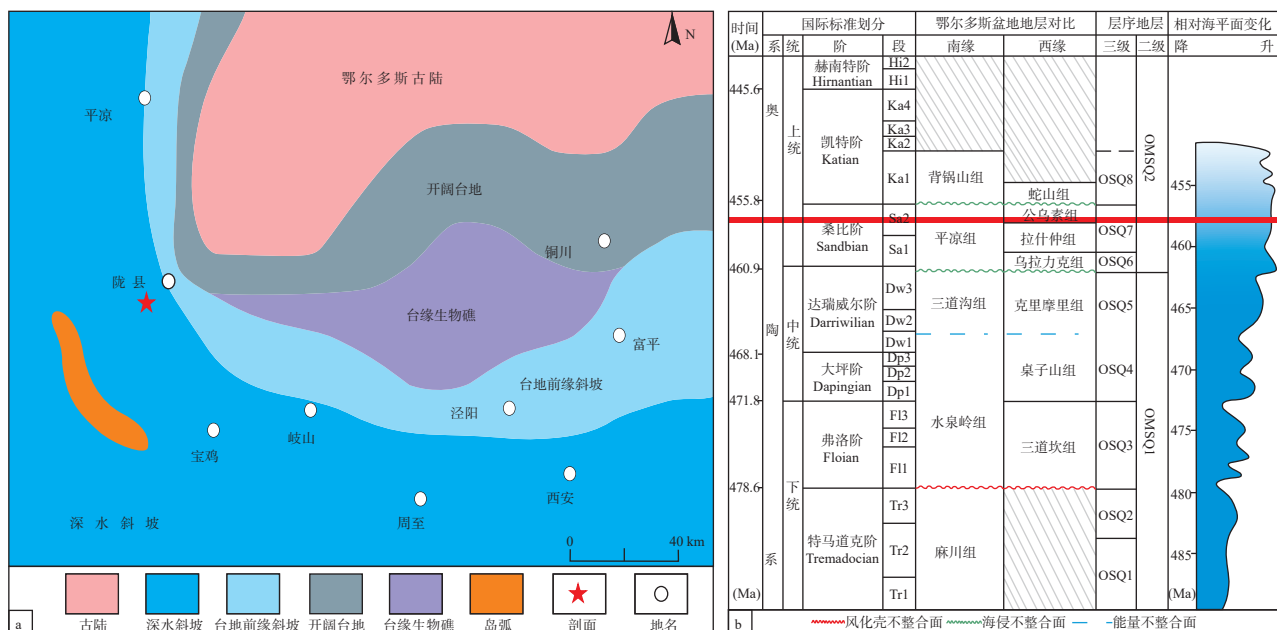


图 1 鄂尔多斯盆地西南缘构造位置及地层示意图(据李文厚等, 2012; 郭彦如等, 2014 修改)

Fig. 1 Tectonic location and stratigraphy on the southwestern margin of the Ordos Basin

研究区位于鄂尔多斯盆地西南缘,属于陕西陇县段家峡村。陇县地区奥陶系发育齐全,自下而上依次为水泉岭组、三道沟组、平凉组和背锅山组(郭彦如等, 2014)(图 1b)。在奥陶系沉积时期,相对海平面处于整体上升的趋势(郭彦如等, 2014)。研究区平凉组厚约为 500 m,前人根据岩性和沉积构造将平凉组划分为 3 段(何幼斌等, 2007)。本次研究测得平凉组第三段下部厚度为 22.57 m,主要表现为砂岩和页岩互层,向上砂岩减少,页岩增加。沉积构造大量发育,常见波痕、冲刷面、平行层理、粒序层理以及交错层理,发育有大量不完整的鲍马层序(Bouma, 1962)。

2 岩相及岩相组合

研究区奥陶系发育深水沉积,实测剖面处在平凉组第三段的底部位置,根据下粗上细沉积序列将其划分成 15 层(图 2)。研究区平凉组岩石种类比较简单,主要为细砂岩、页岩,其次为粉砂岩、细砂质页岩和粉砂质页岩。

2.1 岩相

通过对野外露头的实际观察,对照镜下薄片的观察结果,并使用 Miall(1989)的岩相划分标准,将研究区平凉组共划分出 3 种岩相(图 3),分别为粒序层理砂岩相(Sg)、平行层理砂岩相(Sp)和水平层理页岩相(Sh)。

2.1.1 岩相 1—粒序层理砂岩相

岩相 1 的岩性主要是细砂岩,细砂岩在研究区平凉组各个层位都有出现。该类岩相主要出现在剖面底部,岩石颜色为深灰色,一般为中层细砂岩,单层砂岩厚度为 20~48 cm,平均岩厚约为 30 cm;沉积构造类型较多,主要发育粒序层理和平行层理,少数层位也出现交错层理(第 12 层),发育不完整的鲍马层序,如 T_{ab} 、 T_{ac} 、 T_{abce} (图 3a);底部发育有冲刷面、槽模、沟模(图 3b、图 3c),顶部常出现波痕。镜下观察发现:颗粒成分含量为 70%~82%,主要为石英,石英>75%;岩屑含量次之,岩屑约占 20%;见极少量长石,长石<5%;颗粒粒径为 0.15~0.35 mm,平均为 0.2 mm,分选中等-较好,磨圆程度较差,多为次棱角状-棱角状(图 3g);填隙物约占 10%~15%,杂基以泥质为主,胶结物以方解石为主。

研究认为岩相 1 是浊流沉积,主要依据包括:

①岩相 1 发育不完整的鲍马层序(T_{ab} 、 T_{ac} 、 T_{abce})。

②岩相 1 底面出现冲刷面、槽模和沟模。③岩性主要为砂岩,颗粒以石英为主,分选较好,磨圆较差,说明沉积物经过较短距离搬运,然后迅速沉积。

2.1.2 岩相 2—平行层理砂岩相

岩相 2 的岩性主要是细砂岩,该类岩相主要出现在剖面中部和上部;颜色为灰绿色,一般是薄-中层细砂岩和少量粉砂岩,单层砂岩厚度为 2~20 cm,平均岩厚约为 6 cm;主要发育平行层理、粒序层理、交错层理(图 3b、图 3d),顶部常发育波痕,底部发育有冲刷面、沟模(图 3b、图 3c),与上覆以及下伏泥岩呈突变接触,少数砂岩底部可见生物遗迹化石;发育不完整的鲍马层序,如 T_{bc} 、 T_{bce} 。镜下观察表明:岩相 2 与岩相 1 的颗粒成分含量基本一致,但是岩相 2 颗粒粒径为 0.10~0.30 mm,平均粒径约为 0.15 mm,比岩相 1 更细;分选较好,磨圆程度较差,多为次棱角状(图 3h)。

通过上述沉积特征来看,认为岩相 2 同样也是浊流沉积。主要原因如下:①岩相 2 发育有不完整的鲍马层序(T_{bc} 、 T_{bce})。②岩相 2 底面出现冲刷面、槽模和沟模。③岩相 2 发育粒序层理,砂岩自下而上变细变薄。但岩相 2 与岩相 1 相比有以下不同点:①岩相 2 比岩相 1 的颗粒粒径更细,出现粉砂岩。②岩相 2 的单层砂岩厚度更薄,主要为薄层。③岩相 2 中可见砂泥互层现象。这些说明岩相 2 的流体能量比岩相 1 的要减弱,岩相 2 到物源区的距离比岩相 1 也要远。因此,认为岩相 2 是发育在水道末端的远源浊流沉积。

2.1.3 岩相 3—水平层理页岩相

岩相 3 的岩性为页岩,存在剖面的各个部位;该类岩石颜色主要为深灰色,页岩厚度一般为 8~20 cm;水平层理发育(图 3e),表示沉积物悬浮沉降,水动力条件较弱;其中可见笔石,笔石指示深水环境(张元动等, 2008);砂岩底部存在生物扰动现象(图 4a),也可见 *Helminthorhapha*(蠕形迹)遗迹化石(图 4b),属于深水遗迹相(晋慧娟等, 2005)。综上所述,认为岩相 3 为深水原地沉积。

2.2 岩相组合

2.2.1 岩相组合 1—近端朵叶沉积

岩相组合 1 主要由岩相 1、岩相 2 和岩相 3 组成,一般产生在实测剖面的底部,在整个剖面中大概占到 40%。岩相组合 1 下部主要是中层细砂岩夹页岩,砂岩厚度一般约为 30 cm,主要发育粒序层理、平行层理(图 3a),砂岩底部出现冲刷面、槽模及沟模(图 3b、

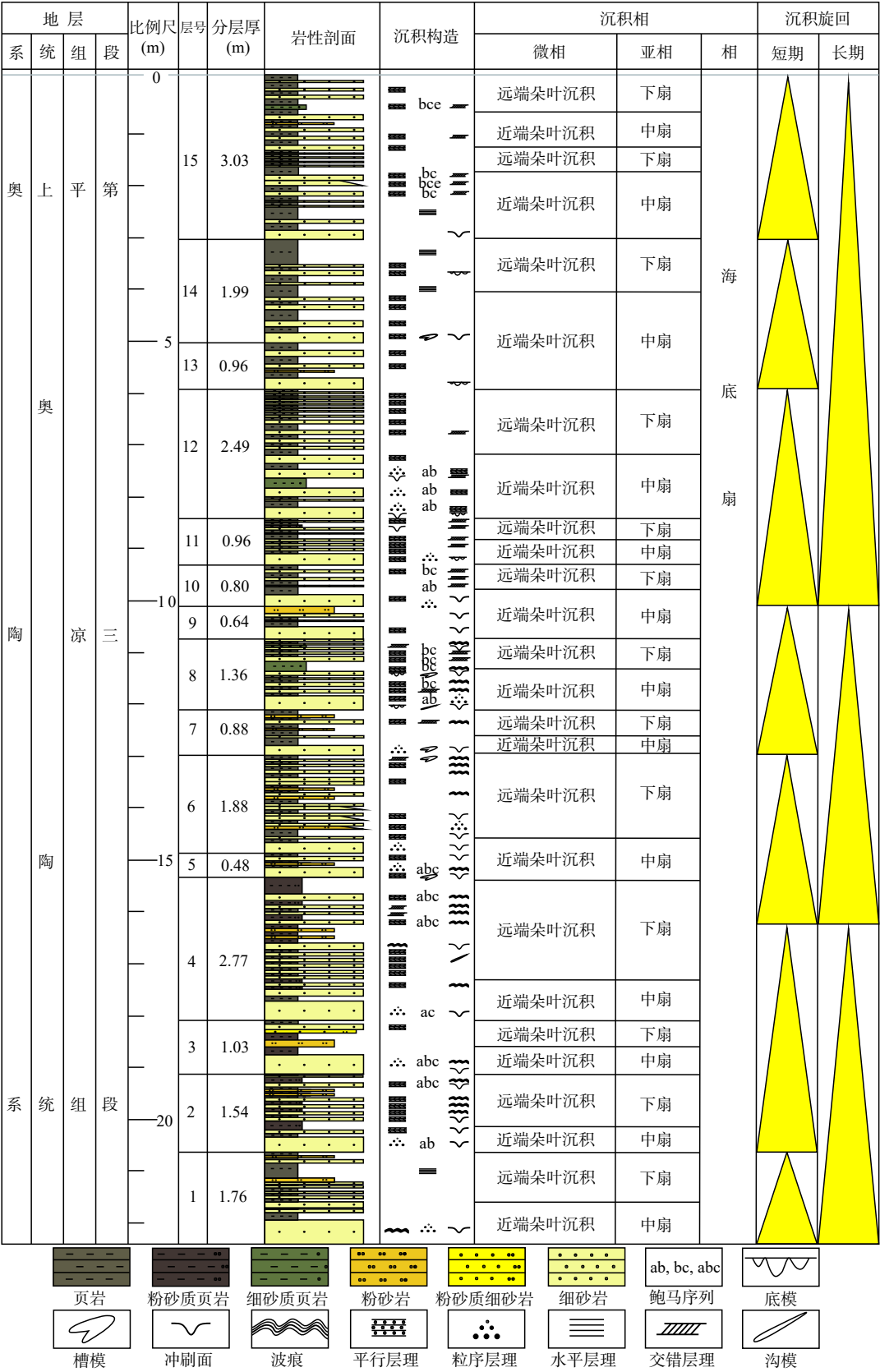
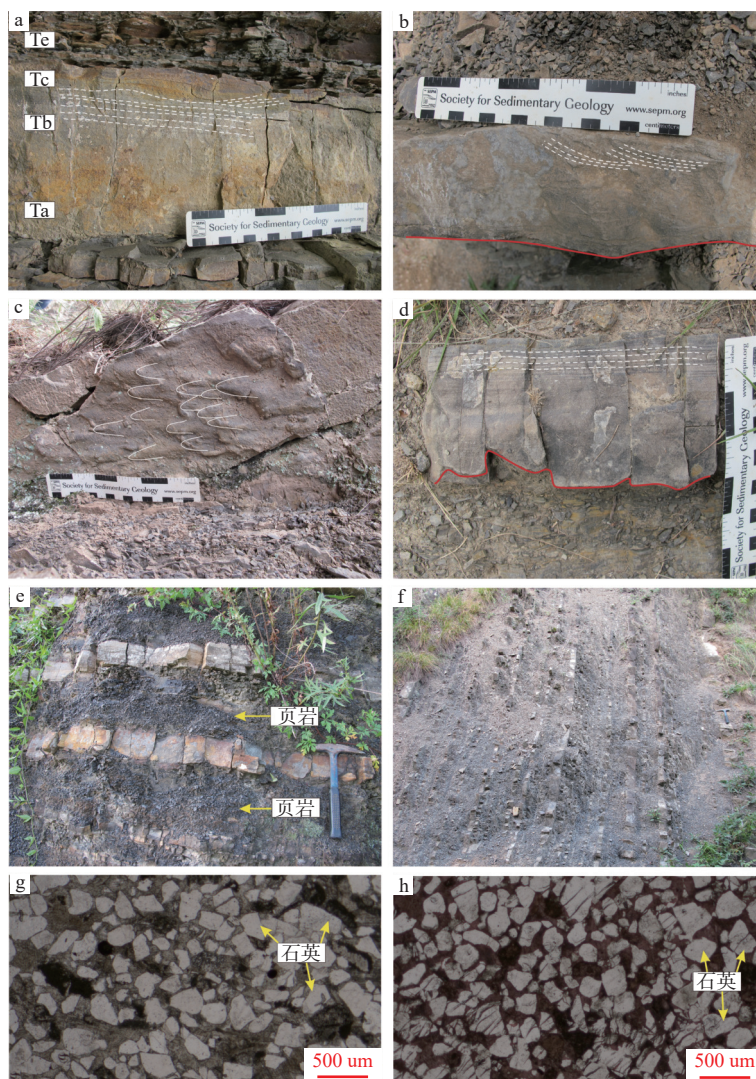


图 2 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区平凉组三段下部岩性柱状图

Fig. 2 Lithological column of the lower part of the third member of Pingliang Formation in Longxian area, southwest margin of Ordos basin



a.灰色中层砂岩,发育粒序层理、平行层理及交错层理等,构成不完整的鲍玛序列;b.灰色薄层砂岩,发育交错层理,底部发育冲刷面;c.灰色中层砂岩,底部发育槽模;d.灰色薄层砂岩,发育平行层理,底部发育冲刷面;e.中层页岩,发育水平层理,侵蚀后呈破碎状;f.薄层砂岩与页岩互层,反映远端朵叶沉积;g. S1-1-1 细砂岩,有中砂岩,颗粒主要为石英,分选中等-较好,次棱角状-棱角状;h. S1-12-1 细砂岩,粒度较g 图片中的稍细,以石英为主,分选较好,多为次棱角状

图3 岩相沉积特征图

Fig. 3 Sedimentary characteristics of lithofacies

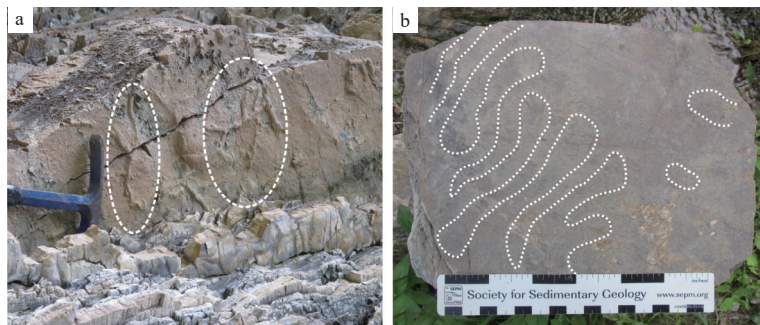
图3c),顶部有波痕,发育鲍马层序;中-上部主要为薄层细砂岩夹页岩,主要发育平行层理(图3d)。从整体看,自下而上砂岩同样含有变细变薄的特点;相反地,页岩含量在增多(表1)。

笔者认为岩相组合1应为近端朵叶沉积,主要原因如下:①砂岩主要是细砂岩和粉砂岩,粒度和厚度向上变细变薄。②页岩厚度向上增加。③发育平行层理、交错层理、槽模和沟模。④底部中层细砂岩夹页岩应为BE层序典型浊积岩,对应的是少量水道末端的浊流沉积,中上部的薄层细砂岩夹页岩应为CE层序典型浊积岩,对应的是席状砂沉积。综上所述,

此时该段沉积可能与物源区距离较远,浊流能量逐渐减弱,应为近端朵叶沉积。

2.2.2 岩相组合2—远端朵叶沉积

岩相组合2主要由岩相2和岩相3组成,主要集中在实测剖面的中-上部,在整个剖面中大概占到60%,是研究区2个岩相组合中含量最多、最为发育的组合。该组合下部主要为薄层细砂岩夹页岩(图3f),发育平行层理、粒序层理、交错层理,顶部常发育波痕,少数层位底部出现冲刷面、沟模,发育不完整的鲍马层序;上部为发育水平层理的粉砂岩夹页岩,粉砂岩底面比较平整。从整体来看,砂岩向上变细变



a.生物扰动, 出现在砂岩底部; b. *Helminthorhapse*(蠕形迹)遗迹化石, 出现在砂岩底部

图4 古生物标志图

Fig. 4 Paleontologic evidence

表1 近端朵叶沉积与远端朵叶沉积特征表

Tab. 1 Characteristics of proximal lobe deposition and distal lobe deposition

组合类型	沉积类型	岩相组成	岩性	沉积构造	占比	沉积层序
岩相组合1	近端朵叶沉积	Sg、Sp、Sh	细砂岩、 页岩、 细砂质页岩	粒序层理、平行层理、 冲刷面、槽模、 水平层理	40%	下粗上细正粒序 鲍马层序(T_{ab} , T_{ac} , T_{abce})
岩相组合2	远端朵叶沉积	Sp、Sh	细砂岩、 粉砂岩、 页岩、 粉砂质页岩	平行层理、交错层理、 水平层理、冲刷面、 砂泥互层层理	60%	下粗上细正粒序 鲍马层序(T_{bc} , T_{bce})

薄, 页岩增多变厚, 发育砂泥互层层理(表1)。

笔者认为岩相组合2是远端朵叶沉积, 且岩相组合2与岩相组合1相比具有以下不同: ①砂岩粒度和厚度更细更薄, 泥岩含量比组合1明显增加。②该组合整体呈现出砂泥互层现象。上述特征表明, 岩相组合2为远端朵叶沉积。

3 沉积环境分析

3.1 岩性标志和古生物标志

结合研究区剖面的野外实测露头观察, 主要根据岩性、沉积构造、古生物等进行分析, 认为研究区沉积环境为深水斜坡。

研究区平凉组岩石类型较多, 主要有细砂岩、页岩, 其次为粉砂质页岩、细砂质页岩和粉砂岩, 含有少量粉砂质细砂岩; 岩石颜色一般为深灰色、灰绿色和灰黑色; 岩石层段主要为中薄层—中厚层, 以及砂泥互层(图3f); 沉积构造极为发育, 剖面底部常见粒序层理、波痕、冲刷面, 中—上部发育大量平行层理、交错层理、水平层理、冲刷面(图3b、图3d), 局部层段可见沟模、底模、槽模、粒序层理(图3b~图3d), 发育不完整的鲍马层序(T_{ab} 、 T_{bc} 、 T_{abce} 、 T_{bce})(图3a)。生物

化石较为发育, 页岩中可见笔石, 少数砂岩底部可见 *Helminthorhapse*(蠕形迹)遗迹化石(图4b), 其归属于 *Nereites* 遗迹相。

岩石颜色一般对当时沉积环境具有指示意义, 含低价铁会表现为绿色, 含分散状硫化铁则会表现为灰色、黑色, 这3种颜色反映岩石当时处于还原环境; 沉积物粒度较细则可能反映沉积物距物源区较远并有很长的搬运距离, 最终在较为安静的水下沉积形成, 而研究区剖面中页岩中夹杂着砂岩和粉砂岩, 则进一步表明其经历过深水异地沉积; 水平层理通常表示水动力条件较为微弱, 一般指示为深水环境; 粒序层理、平行层理、交错层理、底部冲刷面和鲍马层序在深水中则象征浊流沉积的重要标志(张兴阳等, 2001); 页岩中见笔石则一般反映为深水滞留环境(张元动等, 2008); 砂岩底部发育的 *Helminthorhapse*(蠕形迹)遗迹化石通常认为是深水遗迹相(晋慧娟等, 2005)。

笔者认为研究区平凉组形成于深水斜坡环境, 既发育正常沉积, 也发育事件沉积。正常沉积通常发育水平层理; 事件沉积通常为浊流沉积, 主要发育交错层理和粒序层理, 底部见冲刷面。

3.2 粒度分析

为了判别研究区的沉积环境, 对陇县段家峡地区

平凉组剖面进行采样,采用薄片显微粒算法视长径线计算抽样做粒度分析研究。粒度分析主要从粒度参数、频率曲线图、概率累计曲线图以及 C-M 图来分析研究区平凉组剖面的粒度分布特征和沉积相的关系,从而对研究区的沉积环境进行解释。

3.2.1 粒度参数特征

粒度分析主要通过平均粒径(Mz)、标准偏差(δ)、峰度(KG)、偏度(SK)、中值(Md)5 种参数进行研究(Friendman et al., 1982),单个粒度参数及其组合特征可作为判别沉积水动力条件及沉积环境的参考依据(马伟, 2013)。

通过对研究区剖面划分 15 个层中的砂体采集的 23 个样品进行测试求出其粒度参数,并根据福克和沃

德的粒度参数等级划分,对这 5 种粒度参数进行分析如下:研究区剖面砂体的平均粒径为 2.26~3.28 Φ ,中值为 2.22~3.29 Φ ,与平均粒径基本一致,说明研究区砂岩粒度总体较细,主要为细砂岩,推测沉积物经过较长距离搬运;标准偏差为 0.54~0.82,平均为 0.69,表明沉积物分选中等偏好,标准偏差较小也指示研究区沉积物和物源区距离较远;峰度为 0.89~1.14,表明峰态较为中等,极窄和极宽的样品很少,根据样品的峰态特征,判断研究区沉积环境是总体上较为稳定,水动力条件相对较强;偏度为-0.07~0.26,表明样品偏度以近对称和正偏为主,同时反映了沉积物的分选较好,主要是细粒组分(表 2)(陈飞等, 2010)。

表 2 粒度参数特征表
Tab. 2 Characteristics of particle size parameters

样品编号	平均粒径(Φ)	中值(Md)	标准偏差(δ)	偏度(SK)	峰度(KG)
S1-15-1	3.26(细砂)	3.22(细砂)	0.67(分选较好)	0.09(近对称)	0.95(中等)
S1-14-1	3.06(细砂)	2.99(细砂)	0.78(分选中等)	0.14(正偏)	0.98(中等)
S1-13-1	3.11(细砂)	3.10(细砂)	0.72(分选中等)	0.05(近对称)	1.00(中等)
S1-12-1	2.33(细砂)	2.29(细砂)	0.64(分选较好)	0.11(正偏)	1.06(中等)
S1-11-1	2.82(细砂)	2.74(细砂)	0.75(分选中等)	0.17(正偏)	1.01(中等)
S1-10-1	3.22(细砂)	3.20(细砂)	0.66(分选较好)	0.06(近对称)	1.02(中等)
S1-9-1	2.98(细砂)	3.01(细砂)	0.76(分选中等)	-0.08(近对称)	0.89(中等)
S1-8-1	2.85(细砂)	2.74(细砂)	0.73(分选中等)	0.26(正偏)	1.13(尖锐)
S1-7-1	3.28(细砂)	3.29(细砂)	0.82(分选中等)	-0.04(近对称)	1.14(尖锐)
S1-6-3	2.90(细砂)	2.91(细砂)	0.55(分选较好)	0.03(近对称)	1.08(中等)
S1-6-1	2.47(细砂)	2.45(细砂)	0.65(分选较好)	0.07(近对称)	0.93(中等)
S1-5-1	2.52(细砂)	2.52(细砂)	0.62(分选较好)	-0.01(近对称)	0.97(中等)
S1-4-6	2.99(细砂)	2.90(细砂)	0.69(分选较好)	0.20(正偏)	1.04(中等)
S1-4-5	2.62(细砂)	2.60(细砂)	0.54(分选较好)	0.10(近对称)	1.14(尖锐)
S1-4-4	3.17(细砂)	3.15(细砂)	0.58(分选较好)	0.08(近对称)	1.02(中等)
S1-4-2	2.85(细砂)	2.86(细砂)	0.60(分选较好)	-0.02(近对称)	0.97(中等)
S1-4-1	2.62(细砂)	2.60(细砂)	0.54(分选较好)	0.10(正偏)	1.14(尖锐)
S1-3-1	2.30(细砂)	2.31(细砂)	0.64(分选较好)	0.03(近对称)	1.12(尖锐)
S1-2-2	2.65(细砂)	2.62(细砂)	0.74(分选中等)	0.08(近对称)	0.90(中等)
S1-2-1	2.42(细砂)	2.41(细砂)	0.62(分选较好)	0.02(近对称)	0.99(中等)
S1-1-3	3.94(粉砂)	3.94(粉砂)	0.73(分选中等)	-0.01(近对称)	1.01(中等)
S1-1-2	2.89(细砂)	2.85(细砂)	0.77(分选中等)	0.09(近对称)	0.91(中等)
S1-1-1	2.52(细砂)	2.44(细砂)	0.74(分选中等)	0.18(正偏)	0.91(中等)

3.2.2 频率分布曲线特征

此次测试 23 件样品,频率分布曲线有 2 种样式:

对称单峰、近对称单峰。符合对称单峰的样品有 15 件,符合近对称单峰的样品有 8 件,主要为对称

单峰,表示研究区沉积物成分较为简单(彭芳, 2014)。

对称单峰形态时(图 5a),样品沉积物只有一个主要粒级,位于中央,主要粒级为 $2\sim 3\Phi$,说明沉积物粒级较粗,水动力条件较高,代表了中高能

的沉积环境,对应前文所描述的近端朵叶沉积;近对称单峰形态时(图 5c),沉积物位于中央的主要粒级稍微负偏,粒度中值为 $2.5\sim 3.5\Phi$,说明沉积物的粒级比对称单峰的要细,水动力条件变弱,代表中能的沉积环境,对应远端朵叶沉积。

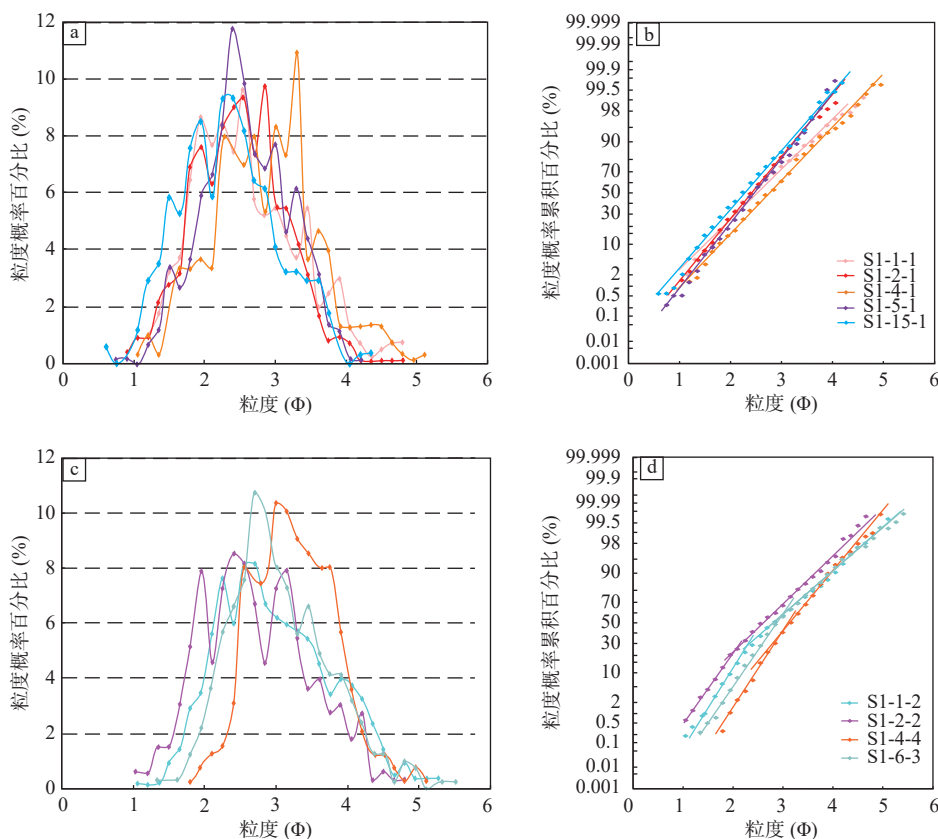


图 5 频率分布曲线和概率累计曲线图

Fig. 5 Frequency curves and cumulative frequency curves

3.2.3 概率累积曲线特征

通过对研究区剖面采集的 23 件样品的概率累积曲线统计分析,将概率累积曲线主要划分为 2 种:一段式和两段式。

一段式(图 5b):整体为悬浮搬运方式,曲线斜率约为 45° ,说明其分选中等,水动力条件较高,整体粒径在 $1\sim 6\Phi$,沉积物粒度分布范围较广,主要为细砂岩。表明沉积物的移动距离较长,水体能量相对较高的特征。与前文划分的近端朵叶沉积特征相对应。

两段式(图 5d):为跳跃搬运和悬浮搬运。截点为 $2\sim 3\Phi$,跳跃组分约占 $20\%\sim 40\%$,主体为悬浮组分。跳跃组分曲线 Φ 值为 $1\sim 3$,主要为细砂岩,曲线斜率大于 45° ,说明其分选比一段式好一些,水动力条件相对变弱;悬浮组分曲线 Φ 值为 $3\sim 6$,主要为粉砂岩,曲

线斜率约为 45° ,分选中等。总体来说,该类型沉积物以细砂岩和粉砂岩为主,水动力条件相对较为低能,对应为远端朵叶沉积。

3.2.4 C-M 图解

粒度分析 C-M 图解是一种具有综合性成因解释且能反映出沉积物结构与沉积作用关系的图解(陈欢庆等, 2014)。通过对陇县石湾沟平凉组采集的样品做粒度分析,进而做出累积频率曲线图。将野外采集所有样品的 C 值和 M 值分别投点成图,最终得到研究区平凉组的 C-M 图。

研究认为平凉组的 C-M 图为浊流沉积所形成,平凉组 C-M 图主要为一段完全平行 $C=M$ 线的长形带(图 6),这一段表示递变悬浮沉积,其最明显的特点就是 C 和 M 成比例地增加,构成平行于 $C=M$ 基线的

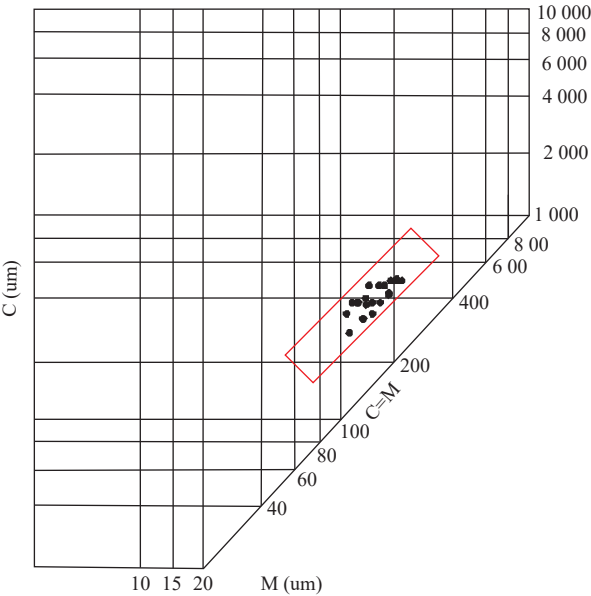


图 6 陇县地区平凉组三段下部 C-M 图特征

Fig. 6 C-M diagram characteristics of the lower part of the third member of Pingliang Formation in Longxian area

长条形,是浊流沉积最为典型的特征。

结合粒度参数特征、频率曲线特征、概率累积曲线特征和 C-M 图解等分析,认为研究区平凉组沉积环境为深水斜坡,水动力条件较强,发育浊流沉积。

3.3 沉积微相类型及特征

结合研究区剖面的野外实测露头观察,主要根据岩性、沉积构造、古生物标志以及粒度分析等资料进

行研究,认为研究区沉积环境应该为深水斜坡。在前人所做工作的基础上,笔者着重对研究区平凉组的亚相和微相进行细致划分。

笔者认为陇县段家峡中奥陶统平凉组沉积相为海底扇,进一步可以划分出中扇和下扇 2 个亚相,近端朵叶沉积和远端朵叶沉积 2 个微相(表 3)。研究区平凉组沉积类型主要为海底扇朵叶沉积,近端朵叶沉积位于海底扇朵叶沉积的中前端,距离物源区相对较近,水动力条件相对较强。岩性主要为薄-中层细砂岩,发育泥岩夹层,主要发育粒序层理、平行层理、交错层理以及不完整的鲍马层序。顶部出现波痕,底部可见冲刷面、槽模和沟模,少数砂岩底部可见 *Helminthorhapse*(蠕形迹)遗迹化石。频率曲线为对称单峰形态,概率累积曲线为以悬浮搬运为主的一段式,C-M 图解主要为反应浊流沉积的一段平行 C=M 线的长形带;远端朵叶沉积位于海底扇朵叶沉积的边缘,距离物源区相对较远,水动力条件相对较弱。岩性主要为细砂岩和粉砂岩,主要发育砂泥互层层理、平行层理、交错层理、粒序层理以及不完整的鲍马层序。顶部出现波痕,底部可见冲刷面、槽模、沟模。频率曲线为近对称单峰形态,概率累积曲线为包含跳跃和悬浮搬运方式的两段式,C-M 图解同样为主要反应浊流沉积的一段平行 C=M 线的长形带。综上所述,认为研究区平凉组沉积相为海底扇。

表 3 沉积微相类型及特征表

Tab. 3 Types and characteristics of sedimentary microfacies

相	亚相	微相	水动力	与物源区距离	岩性	沉积构造	频率曲线	C-M图解	概率累积曲线
海底扇	中扇	近端朵叶沉积	相对较强	相对较近	细砂岩、粉砂岩、页岩、细砂质页岩	粒序层理、平行层理、冲刷面、槽模水平层理	对称单峰	平行 C=M线	一段式
	下扇	远端朵叶沉积	相对较弱	相对较远	细砂岩、粉砂岩、页岩、粉砂质页岩	平行层理、交错层理、水平层理、冲刷面、砂泥互层层理	近对称单峰	平行 C=M线	两段式

4 沉积演化

根据岩性、粒度参数等特征,将研究区平凉组从垂向上划分为 3 个层段(图 7)。整体自下而上,砂岩变细变薄,平均粒径 Φ 变大,标准偏差变小,偏度主要为 0.1,峰度主要集中在 0.9~1.1,划分 3 个长期沉积旋回。

P3-a: 0~6.01 m,样品从 S1-1-1 到 S1-4-4。平均粒径为 2.30~3.17,粒度变细,变化幅度较小。标准偏差为 0.54~0.77,变化趋势为由大到小,分选在变好。偏度为-0.2~0.18,变化趋势为由大到小,主要为 0~0.1,为近对称,说明沉积物分选较好,粒径较细。峰度为 0.90~1.14,变化趋势为由小到大,主要为 0.9~1.1,峰度中等,沉积环境较为稳定,频率曲线形态表现为单峰对称。岩性主要为细砂岩、页岩和粉砂岩,沉积构

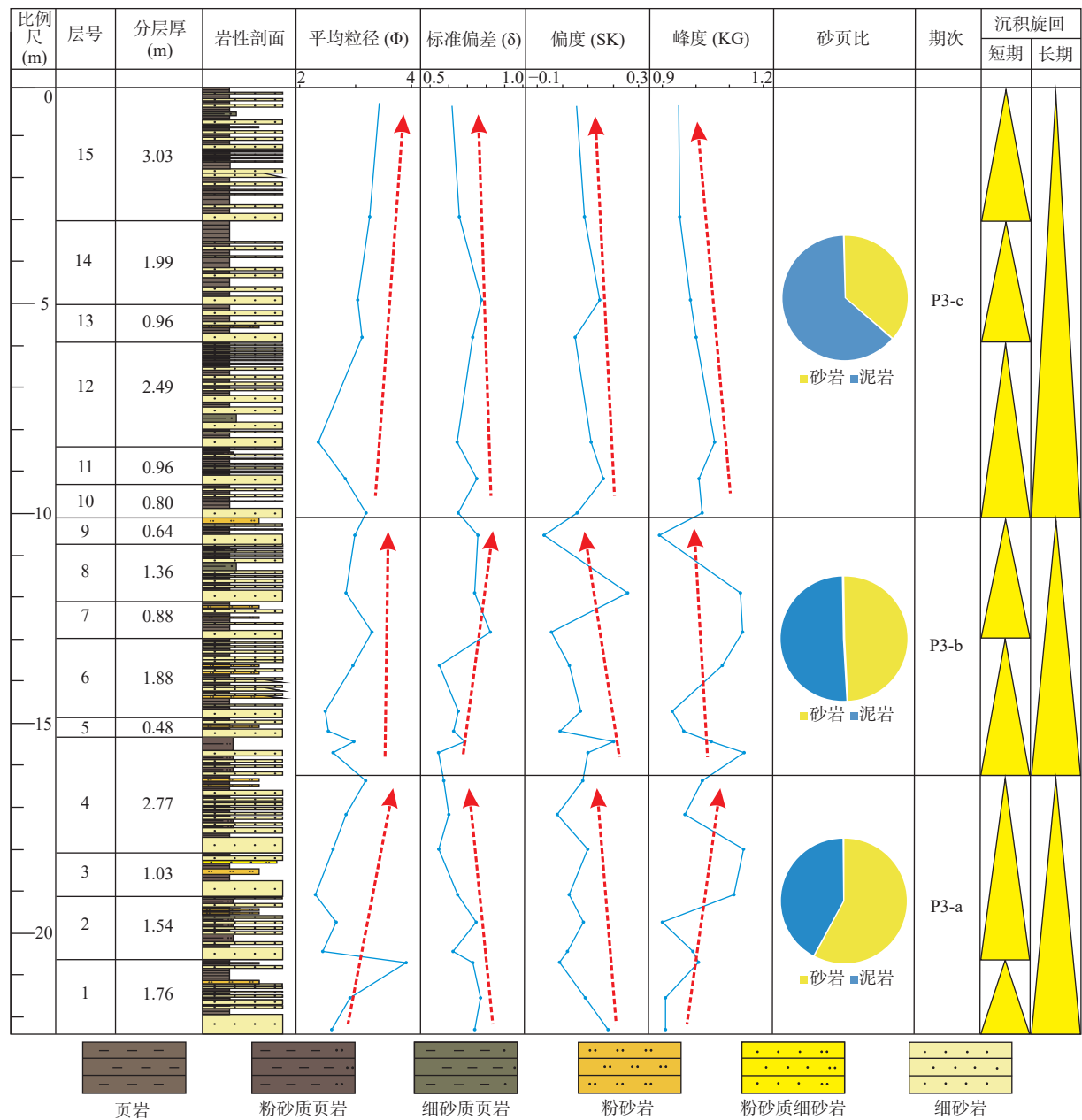


图 7 陇县地区平凉组三段下部垂向分布特征图

Fig. 7 Vertical distribution characteristics of the lower part of the third member of Pingliang Formation in Longxian area

造多为平行层理、粒序层理、波痕以及冲刷面,发育不完整的鲍马层序。发育一个下粗上细的长期沉积旋回,并可划分 2 个短期旋回。总体反映中高能的水动力条件且比较稳定的沉积环境。

P3-b: 6.01~12.66 m, 样品从 S1-4-5 到 S1-10-1。平均粒径为 2.47~3.22, 粒度相比上段变细且变化较小。标准偏差在 0.54~0.82, 变化趋势为由小到大, 分选相对较好。偏度为-0.08~0.26, 变化趋势为由大到小, 主要为-0.1~0.1, 为近对称, 说明沉积物分选较好, 粒径相对变细。峰度为 0.89~1.14, 变化趋势为由大

到小且集中为 0.9~1.1, 峰度中等, 沉积环境也比较稳定, 频率曲线形态表现为单峰对称。岩性主要为细砂岩、页岩和粉砂岩且粉砂岩含量增加, 沉积构造多为平行层理、交错层理、粒序层理、波痕、槽模以及冲刷面, 发育不完整的鲍马层序。发育一个下粗上细的长期沉积旋回, 同样划分 2 个短期旋回。代表中能水动力条件的沉积环境。

P3-c: 12.66~22.79 m, 样品从 S1-11-1 到 S1-15-1。平均粒径为 2.26~3.11, 粒度相比上段无明显变化。标准偏差为 0.64~0.78, 变化趋势为由大到小, 分选相

对较好。偏度为 0.05~0.17,变化趋势为由小到大,主要为 0~0.1,为近对称,说明沉积物分选较好。峰度为 0.95~1.06,变化趋势为由大到小且集中在 0.95~1,峰度中等,沉积环境比较稳定,频率曲线形态表现为单峰对称。岩性主要为细砂岩、页岩以及少量粉砂岩,沉积构造多为平行层理、交错层理、槽模以及冲刷面,发育不完整的鲍马层序。发育一个下粗上细的长期沉积旋回,划分 3 个短期旋回。为中低能水动力条件的沉积环境。

结合砂泥比参数表做出的砂泥比饼状图得出(表 4),从 P3-a 段到 P3-c 段,砂岩厚度先变薄然后变厚,总体来说变化不大;泥岩厚度一直在增大,越往上变厚趋势越明显;砂泥比由大到小更明显反应了砂岩变细变薄,泥岩越来越厚的趋势。说明在垂向上沉积背景能量逐渐减弱的趋势,在 P3-a 段到 P3-b 段水动

表 4 各期次砂泥厚度及砂泥比

Tab. 4 Sand-mud thickness and sand-mud ratio of each period

期次	砂岩厚度(cm)	泥岩厚度(cm)	砂泥比	水动力
P3-c	365	648	0.56	中低能
P3-b	325	340	0.95	中能
P3-a	348	253	1.37	中高能

力条件从中高能到中能,在 P3-b 段到 P3-c 段水动力条件从中能到中低能。整体沉积环境是从高能向相对低能转化,反应了研究区平凉组以来,此处从近端朵叶沉积变为远端朵叶沉积。

5 形成机理

5.1 沉积模式

陇县石湾沟平凉组属于浊流主导的深水斜坡海底扇模式(图 8),发育斜坡扇朵叶体系。有以下原因:①研究区平凉组沉积特征相符。陇县地区具有垂向上正粒序充填的特征,即自下而上砂岩变细变薄,页岩逐渐增厚;发育有粒序层理、平行层理、交错层理、底部冲刷面以及大量不完整的鲍马层序(T_{ab} 、 T_{bc} 、 T_{abc} 、 T_{abce})。②沉积类型符合。在研究区平凉组主要发育浊流沉积,这样的沉积类型也与以浊流主导的海底扇模式相符。因此认为,陇县地区属于海底扇模式,其沿斜坡向下呈放射状的平面展布形态。

结合前文总结的野外露头沉积特征等资料,建立了陇县地区的深水沉积模式:在平面上,依次发育近端朵叶沉积和远端朵叶沉积;在剖面上,近端朵叶沉积以浊流沉积为主,以薄-中层细砂岩为主,主要发育

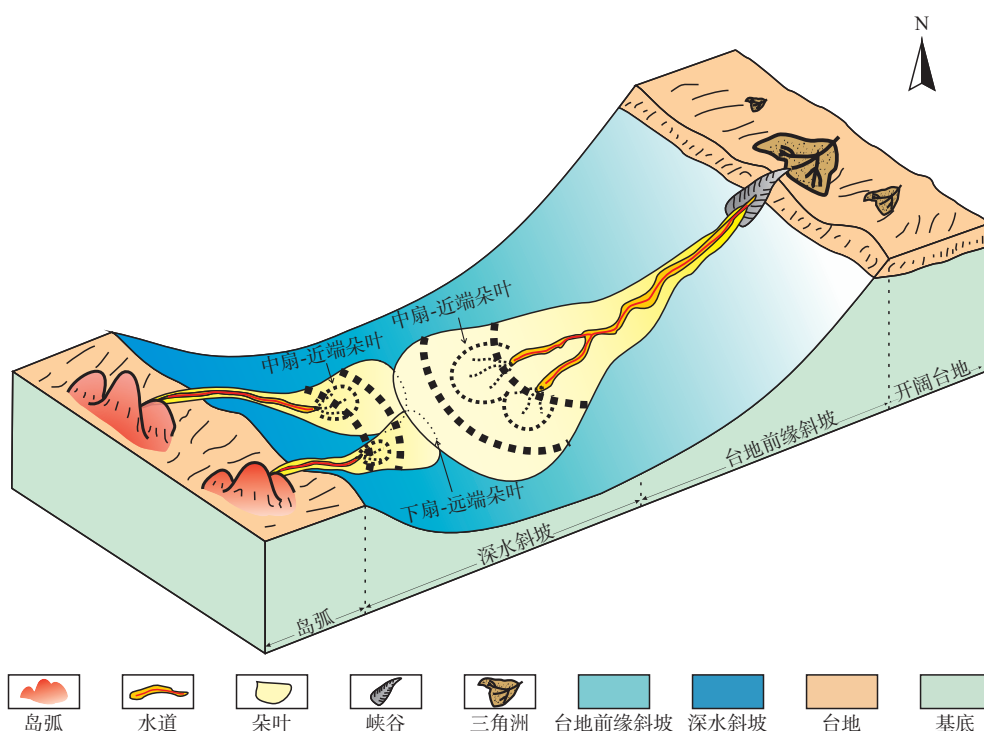


图 8 鄂尔多斯盆地西南缘陇县地区沉积模式图

Fig. 8 Sedimentary model in Longxian area, southwest margin of Ordos Basin

平行层理、交错层理、粒序层理;远端朵叶沉积主要是远源浊流沉积,以薄层细砂岩和粉砂岩为主,主要发育砂泥互层层理。整个剖面在垂向上具有自下而上变细变薄的特征。

5.2 主控因素

5.2.1 物源供给

物源供给对重力流沉积规模和种类影响很大。研究区平凉组北部为鄂尔多斯古陆,其陆源碎屑物质搬运到深水斜坡,在重力作用下顺坡向下发育浊流沉积(李华等,2018)。刘朱睿等(2020)通过分析陇县段家峡剖面的微量元素数据,发现研究区晚奥陶世平凉组源区表现为大陆岛弧的构造特征,认为其物源来自北祁连-北秦岭岛弧,处于残余边缘海盆的环境。中朝板块南缘和西缘的沉积相在中—晚奥陶世发生了明显的转变,除了原地沉积物外,还存在滑塌、岩屑、浊积岩和等深流沉积,通过野外和钻井岩心中发现,在鄂尔多斯盆地西南缘发现了深海页岩、浊积岩、凝灰岩、碳酸盐岩等岩石类型(Yang et al., 2019)。因而,认为研究区物源可能来自鄂尔多斯古陆和北祁连-北秦岭岛弧以及深海原地沉积。

5.2.2 相对海平面升降

相对海平面的升降对重力流的规模产生重要影响。研究区重力流发育初期,相对海平面较低,此时发育海退,沉积物粒度变粗,水动力较强,更容易在斜坡处发育浊流沉积。相反地,在重力流末期,相对海平面升高,此时发育海侵,水动力逐渐衰减,沉积物粒度变细,在斜坡处发育朵叶沉积。陇县地区早奥陶世到晚奥陶世时期,相对海平面逐渐上升(郭彦如等,2014; Li et al., 2021),重力流沉积也随之减弱。

5.2.3 构造运动

鄂尔多斯盆地西南缘早奥陶世早、中期,大部分为开阔台地环境;受秦岭洋俯冲的影响,到中奥陶世,自东而西分别发育着鄂尔多斯古陆、碳酸盐台地、碳酸盐斜坡、深水盆地、阿拉善古陆和西华山古陆(高振中等,1995)。Yang 等(2019)认为在中奥陶世至晚奥陶世期间,中朝板块沿其南缘和西缘由分叉向汇聚转变,这导致了鄂尔多斯盆地沉积相的转变:环境由陆表海碳酸盐台地向深海斜坡和深海盆地转变。由于板块之间构造活动比较强烈,一方面有可能引发火山和地震,从而产生了重力流;另一方面形成了高低差异的深水斜坡沉积环境,进而发育了以浊流沉积为主的大规模的重力流沉积。

6 结论

(1)研究区平凉组岩性比较简单,以细砂岩和页岩为主。沉积构造主要发育粒序层理、平行层理、交错层理、水平层理、波痕、槽模以及冲刷面。发育大量不完整的鲍马层序。划分了3种岩相和2种岩相组合。岩相1为粒序层理砂岩相,表示浊流沉积;岩相2为平行层理砂岩相,代表远源浊流沉积;岩相3为水平层理页岩相,反映深水原地沉积。岩相组合1为近端朵叶沉积,岩相组合2为远端朵叶沉积。

(2)综合分析岩性、沉积构造、古生物及粒度参数等资料,明确了研究区平凉组沉积环境为深水斜坡;沉积相为海底扇,亚相为中扇和下扇,微相为近端朵叶和远端朵叶。

(3)研究区平凉组在垂向上根据岩性、粒度参数等特征划分了3个层段。P3-a段反映中高能的水动力条件且比较稳定的沉积环境,P3-b段代表中能水动力条件的沉积环境,P3-c段为中低能水动力条件的沉积环境。

(4)建立了研究区平凉组以浊流主导的深水斜坡海底扇模式,分析了相对海平面升降、构造运动和物源供给等主控因素对重力流沉积的影响。

致谢:研究生黄伟、刘朱睿、苏帅亦参加了野外及部分室内工作,在此表示衷心的感谢。评审专家对稿件提出宝贵的意见和建议,对此表示真诚的感谢!

参考文献(References):

- 陈飞,罗平,张兴阳,等.陕北地区上三叠统延长组三角洲骨架砂体粒度特征[J].沉积学报,2010,28(01):58-67.
- CHEN Fei, LUO Ping, ZHANG Xingyang, et al. Characteristics of Grain Size of Delta Sandbody Framework in Yanchang Formation Upper Triassic, North Shanxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(01): 58-67.
- 陈欢庆,舒治睿,林春燕,等.粒度分析在砾岩储层沉积环境研究中的应用-以准噶尔盆地西北缘某区克下组冲积扇储层为例[J].西安石油大学学报(自然科学版),2014,29(06):6-12+34+112.
- CHEN Huanqing, SHU Zhirui, LIN Chunyan, et al. Application of grain-size analysis in research of sedimentary environment of conglomerate reservoir: taking alluvial fan reservoir in the lower member of Kelamayi Formation in some area of the northwest-

- ern margin of Zhunger Basin as an example[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(06): 6-12+34+112.
- 高振中, 罗顺社, 何幼斌, 等. 鄂尔多斯西缘奥陶纪海底扇沉积体系[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(02): 119-125.
- GAO Zhenzhong, LUO Shunshe, HE Youbin, et al. Ordovician submarine fan systems in west margin of Ordos[J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(02): 119-125.
- 高振中, 彭德堂. 鄂尔多斯盆地南缘铁瓦殿剖面发现大规模重力流沉积[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(4): 18-24.
- GAO Zhengzhong, PENG Detang. The Massive Gravity Flow Sediments Revealed at Tiewadia Outcrop Section in Southern Margin of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 28(4): 18-24.
- 郭彦如, 赵振宇, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架[J]. 沉积学报, 2014, 32(01): 44-60.
- GUO Yanru, ZHAO Zhenyu, XU Wanglin, et al. Sequence Stratigraphy of the Ordovician System in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(01): 44-60.
- 何幼斌, 高振中, 罗顺社, 等. 陕西陇县地区平凉组三段发现内潮汐沉积[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(4): 28-33.
- HE Youbin, GAO Zhenzhong, LUO Shunshe, et al. Discovery of Internal-tide Deposits from the Third Member of Pingliang Formation in Longxian Area, Shaanxi Province[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 29(4): 28-33.
- 晋慧娟, 孙明良, 李育慈. 内蒙古桌子山中奥陶统的“特殊”浊积岩系[J]. 沉积学报, 2005, 23, (01): 34-40.
- JIN Huijuan, SUN Mingliang, LI Yuci. The “Special” Turbidite Measure of the Middle Ordovician Series in Zhuozishan Area, Inner Mongolia[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23, (01): 34-40.
- 李文厚, 陈强, 李智超, 等. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理[J]. 古地理学报, 2012, 14(01): 85-100.
- LI Wenhui, CHEN Qiang, LI Zhichao, et al. Lithofacies Palaeogeography of the Early Paleozoic in Ordos Area[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2012, 14(01): 85-100.
- 李华, 何幼斌, 黄伟, 等. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系平凉组等深流沉积[J]. 古地理学报, 2016, 18(04): 631-642.
- LI Hua, HE Youbin, HUANG Wei, et al. Contourites of the Ordovician Pingliang Formation in Southern Margin of Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2016, 18(04): 631-642.
- 李华, 何幼斌, 刘朱睿鹭, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系平凉组重力流沉积特征[J]. 中国科技论文, 2017, 12(15): 1774-1779.
- LI Hua, HE Youbin, LIUZHU Ruizhi, et al. Characteristic of gravity flow deposit in Pingliang Formation of Ordovician in the southwest margin of the Ordos Basin[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(15): 1774-1779.
- 李华, 何幼斌. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系平凉组改造砂沉积特征及意义[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(02): 384-397.
- LI Hua, HE Youbin. Sedimentary Characteristics and Significance of Reworked Sands in the Ordovician Pingliang Formation, Southwestern Margin of Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(02): 384-397.
- 梁积伟, 马晓军, 刘亚兰, 等. 鄂尔多斯盆地南部岐山地区上奥陶统平凉组深水沉积特征及古地理分析[J]. 西北地质, 2019, 52(1): 66-74.
- LIANG Jiwei, MA Xiaojun, LIU Yalan, et al. Deep-water Sedimentary Characteristics and Paleogeographic Analysis of the Pingliang Formation in Qishan Area, Southern Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(1): 66-74.
- 刘朱睿鹭, 何幼斌, 李华, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组砂岩微量元素特征及构造背景: 以陇县段家峡剖面为例[J]. 古地理学报, 2020, 22(02): 333-348.
- LIUZHU Ruizhi, HE Youbin, LI Hua, et al. Geochemical Characteristics of Trace Elements and Tectonic Setting of Sandstones from the Upper Ordovician Pingliang Formation, Southwestern Margin of Ordos Basin: A Case Study of the Duanjiexia Profile, Longxian County[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(02): 333-348.
- 李华, 何明薇, 邱春光, 等. 深水等深流与重力流交互作用沉积(2000-2022年)研究进展[J]. 沉积学报, 2022: 1-25.
- LI Hua, HE Mingwei, QIU Chunguang, et al. Research Processes on Deep-water Interaction between Contour Current and Gravity Flow Deposits, 2000 to 2022[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022: 1-25.
- 李祥辉, 王成善, 金玮, 等. 深海沉积理论发展及其在油气勘探中的意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 77-86.
- LI Xianghui, WANG Chengshan, JIN Wei, et al. A review on deep-sea sedimentation theory: significances to oil gas exploration[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(1): 77-86.
- 马伟. 新疆滴水砂岩型铜矿沉积物粒度特征及沉积体系研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- MA Wei. Sediments Grain-size Characteristics and Depositional System Research of Dishui Sandstone-hosted Copper Ore in Xinjiang[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- 马晓军, 梁积伟, 李建星, 等. 鄂尔多斯盆地中西部中生代构造抬升及演化[J]. 西北地质, 2019, 52(4): 127-136.
- MA Xiaojun, LIANG Jiwei, LI Jianxing, et al. Meso-cenozoic Tectonic Uplift and Evolution of Central and Western Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(4): 127-136.
- 彭芳. 邢台地区晚更新世以来沉积环境分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- PENG Fang. The Sedimentary Environment Analysis since the late Pleistocene in Xingtai City[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- 谈明轩, 吴峰, 马皓然, 等. 海底扇沉积相模式、沉积过程及其

- 沉积记录的指示意义[J]. 沉积学报, 2022, 40(02): 435–449.
- TAN Mingxuan, WU Feng, MA Haoran, et al. Facies Model, Sedimentary Process and Depositional Record of Submarine Fans, and Their Implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(02): 435–449.
- 吴胜和, 冯增昭. 鄂尔多斯盆地西缘及南缘中奥陶统平凉组重力流沉积[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(3): 226–234.
- WU Shenghe, FENG Zengzhao. Sedimentology of Gravity Flow Deposits of Middle Ordovician Pingliang Formation in West and South Margins of Ordos[J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(3): 226–234.
- 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 鄂尔多斯盆地西、南缘奥陶纪地质事件群耦合作用[J]. *地质学报*, 2015, 89(11): 1990–2004.
- WANG Zhentao, ZHOU Hongrui, WANG Xunlian, et al. Ordovician Geological Events Group in the West and South Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 1990–2004.
- 于兴河, 付超, 华柑霖, 等. 未来接替能源: 天然气水合物面临的挑战与前景[J]. *古地理学报*, 2019, 21(1): 107–126.
- YU Xinghe, FU Chao, HUA Ganlin, et al. Future Alternative Energy: Challenges and Prospects of Natural Gas Hydrate[J]. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 2019, 21(1): 107–126.
- 曾小明, 潘燕, 于佳, 等. 陵水凹陷北坡低密度浊流海底扇沉积特征[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(33): 48–53+78.
- ZENG Xiaoming, PAN Yan, YU Jia, et al. Low-density turbidity submarine fan sedimentary characteristics in north slope of Lingshui sag[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(33): 48–53+78.
- 张抗. 鄂尔多斯盆地西、南缘奥陶系滑塌堆积[J]. *沉积学报*, 1992, 10(1): 11–18.
- ZHANG Kang. Olistostrome in Ordovician System, West and Southern Margin of Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(1): 11–18.
- 张兴阳, 罗顺社, 何幼斌. 沉积物重力流-深水牵引流沉积组合-鲍玛序列多解性探讨[J]. *江汉石油学院学报*, 2001, (01): 1–4+6.
- ZHANG Xingyang, LUO Shunshe, HE Youbin. Deposit Assemblage of Gravity Flow and Traction Current in Deep Water-A Study of the Multiple interpretation of the Bouma Sequence[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2001, (01): 1–4+6.
- 张元动, 陈旭. 奥陶纪笔石动物的多样性演变与环境背景[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2008, (01): 10–21.
- ZHANG Yuandong, CHEN Xu. Diversity Evolution and Environmental Background of Ordovician Graptolites[J]. *Sciences China- Earth Sciences*, 2008, (01): 10–21.
- 周书昌, 冯乔, 赵伟, 等. 鄂尔多斯盆地南缘岐山剖面中奥陶统平凉组沉积环境分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2011, 31(4): 28–33.
- ZHOU Shuchang, FENG Qiao, ZHAO Wei, et al. Sedimentary Environments of the Middle Ordovician Pingliang Formation in the Qishan Section, Southern Ordos Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2011, 31(4): 28–33.
- 张佳佳, 吴胜和. 海底扇朵叶沉积构型研究进展[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(05): 88–106.
- ZHANG Jiajia, WU Shenghe. Research Progress on the Depositional Architecture of Submarine-fan Lobes[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(05): 88–106.
- Bouma H A. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation[M]. Amsterdam: Elsevier Pub., 1962: 168–169.
- Friendman G M, Johnson K G. Exercises in Sedimentology[M]. New York: John Wiley and Sons, 1982.
- Li Hua, Zhao Hongyan, Xu Yanxia, et al. Characteristics of debrites, turbidites, and contourites in the Upper Ordovician Pingliang Formation along southwestern margin of the Ordos Basin, western China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(17): 1–15.
- Miall A D, Turner-Peterson C E. Variations in fluvial style in the Westwater Canyon Member, Morrison formation (Jurassic), San Juan basin, Colorado plateau[J]. *Sedimentary Geology*, 1989, 63(1–2): 21–60.
- Yang Renchao, A J (Tom) van Loon, Jin Xiaohui, et al. From divergent to convergent plates: Resulting facies shifts along the southern and western margins of the Sino-Korean Plate during the Ordovician[J]. *Journal of Geodynamics*, 2019, 129: 149–161.
- Shanmugam G, Moiola R J. Submarine fan models: Problems and solutions[A]. In: Bouma A H, Normark W R, Barnes N E. Submarine fans and related turbidite systems[M]. New York, NY: Springer, 1985: 29–35.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1378–1401.
- Shanmugam G. Submarine fans: A critical retrospective (1950–2015)[J]. *Journal of Palaeogeography (English Edition)*, 2016, 5(2): 110–184.
- Spychala Y T, Hodgson D M, Prelat A, et al. Frontal and lateral submarine lobe fringes: Comparing sedimentary facies, architecture and flow processes[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(1): 75–96.
- Piper D J W, Normark W R. Sandy fans-from Amazon to Hueneme and beyond[J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(8): 1407–1438.
- Portnov A, Cook A E, Sawyer D E, et al. Clustered BSRs: Evidence for gas hydrate-bearing turbidite complexes in folded regions, example from the Perdido Fold Belt, northern Gulf of Mexico[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 528: 115843.