# 湖南保靖地区下志留统重力流沉积特征及沉积模式

李 斌1,胡博文1,罗 群2,晋长昊1

(1.神华地质勘查有限责任公司,北京100022; 2.中国石油大学(北京),北京102249)

**摘要:**为揭示页岩气储层的形成机制,明确时空展布规律,指导页岩气的勘探部署,通过岩心观察和重力流理论分析,对湖南保靖地区下志留统重力流沉积特征及沉积模式进行研究。结果表明,湖南保靖地区下志留统主要发育 浊流、碎屑流和液化流3种重力流沉积类型。其中,浊流发育不完整的鲍马序列浊积岩,下部以多期次单段式或两 段式浊积岩叠加的进积型地层组合为主,上部以多期次三段式浊积岩叠加的加积型地层组合为主;碎屑流以块状 细砂岩为主;液化流以厚层的泥质粉砂岩或粉砂质泥岩为主,发育变形层理。从下志留统龙马溪组沉积时期到马 脚冲组沉积时期,湖南保靖地区断续发育海底扇、远岸水下扇和滑移-滑塌扇3种沉积模式。浊流主要发育海底扇 扇端亚相浊积砂、扇端泥微相,扇中亚相网状水道、水道侧缘、前缘席状砂微相以及远岸水下扇扇中亚相水道侧缘、 前缘席状砂微相,碎屑流发育远岸水下扇扇中亚相辫状水道微相,液化流发育滑移-滑塌扇扇中亚相滑移-滑塌水 道、水道间湾微相。

关键词:重力流 浊流 液化流 碎屑流 下志留统 湖南保靖地区中图分类号:TE112.2文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)06-0007-10

# Sedimentary characteristics and models of early Silurian gravity flow deposits in Baojing area of Hunan Province

Li Bin<sup>1</sup>, Hu Bowen<sup>1</sup>, Luo Qun<sup>2</sup>, Jin Changhao<sup>1</sup>

(1.Shenhua Geological Exploration Co., Ltd., Beijing City, 100022, China; 2.China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

**Abstract**: Based on cores data and gravity flow theory, the sedimentary characteristics and models of early Silurian gravity flow deposits were systematically analyzed in Baojing area of Hunan Province, which intends to reveal formation mechanism of shale gas reservoir and determine its temporal and spatial distribution and thus guide the shale gas exploration. The results show that there are three types of gravity flow developed during the early Silurian in Baojing area of Hunan Province, including turbidity currents, debris flow and liquid flow. Among them, the turbidite current results in incomplete Bouma sequence, which is composed mainly of progradational strata formed by superposition of multiple single-section or two-section turbidite at the bottom and aggradational strata formed by superposition of multiple three-section turbidite at the top. Massive fine sandstone is the dominant lithology developed from debris flow. Thick layer of argillaceous siltstone and silty mudstone are the dominant lithology developed from liquid flow, in which deformation bedding develops. From the deposition of Longmaxi Formation to the deposition of Majiaochong Formation in the early Silurian, submarine fan, off-shore underwater fan and slump-slip fan developed intermittently in Baojing area of Hunan Province. Turbidity current mainly results in fan-end turbidite sand and fan-end mud of submarine fan, braided channel, channel edge and front sheet sand at mid submarine fan and channel edge and front sheet sand at off-shore subaqueous fan. The debris flow results in braided channel at off-shore underwater fan. The liquid flow results in slump-slip channel at mid fan and bay at inter channels. **Key words**: gravity flow ;turbidity current; liquid flow ;debris flow ;early Silurian; Baojing area of Hunan Province

收稿日期:2017-07-11。

作者简介:李斌(1970—),男,内蒙古化德人,高级工程师,博士,从事页岩气地质研究工作。联系电话:15210419169,E-mail:libin9600@ sohu.com。

基金项目:国家自然科学基金项目"云质岩致密油储层微米-纳米孔喉网络体系及其流体耦合流动机理与流动下限"(41372145)。

自从20世纪60年代浊流理论问世以来,从理 论上解决了地质学研究过程中长期困扰的海底峡 谷的成因、海底砂体的形成以及正递变层理的形成 机制等问题<sup>[1]</sup>,推动了世界各国海相碎屑岩油气勘 探的进展,取得了巨大的经济效益。具有鲍马序列 的浊积岩是经典的浊流沉积序列,是识别浊流的直 接证据<sup>[2]</sup>。但一般很难发现完整的鲍马序列,导致 对于浊流及浊积岩的关系存在争议。随着深水牵 引流及其沉积物的发现,众多学者逐渐认识到浊流 为深水重力流的一种类型,根据沉积物搬运机制和 流变学特征,对深水重力流进行分类、定义和描述, 一般划分为碎屑流、颗粒流、液化流和浊流[3],但对 一些特殊的重力流沉积特征(如块状砂岩)则难以 解释,引起了长期的争论<sup>[4]</sup>,特别是关于高密度浊 流、低密度浊流和砂质碎屑流等概念的提出,一直 是国际学术界探讨的焦点和热点,推动了深水重力 流的研究进展<sup>[5]</sup>。深水重力流储层是近年来油气勘 探的新方向,揭示其沉积学成因与空间展布特征是 寻找高产油气藏的基础<sup>[6]</sup>,且已在油气勘探中得到 广泛验证,未来也必将应用于页岩气的地质勘探。

国际页岩气开发实践证明,全世界储量巨大的 页岩气田的储层均以海相碎屑岩为主<sup>[7]</sup>。海相碎屑 岩地层具有沉积厚度巨大、生烃能力强、热演化程 度高及保存条件好等特点,是页岩气勘探的主要层 位<sup>[8]</sup>。中国南方地区志留系龙马溪组海相碎屑岩是 近年来页岩气勘探的重要目的层系之一,且在四川 盆地及其周缘地区已获得页岩气工业气流<sup>[9]</sup>。随着 勘探程度的提高,中国页岩气勘探区域已扩展至湘 鄂西构造复杂地区,多个企业在此获得页岩气探矿 权,开展勘探工作并取得了良好效果。但页岩气储 层的含气性极不稳定,且对优质储层的横向分布规 律认识不清<sup>[10]</sup>,急需地质学理论研究的支持,明确 下一步的勘探方案。

目前,湖南保靖地区页岩气勘探仍处于起步阶 段,是油气地质研究的空白区。对比分析湖南保靖 地区探井岩心与实测地质剖面发现,下志留统海相 碎屑岩中多个层位发育海相深水重力流沉积特征, 部分层段出现具有不完整鲍马序列的浊积岩,也有 非浊积岩特征的重力流沉积序列,如块状细砂岩 体、不规则层理的粉砂岩及强烈变形的沉积体等。 前人仅在生物地层划分、岩石地层对比等方面进 行了详细的地质调查,积累了一定的基础地质资 料<sup>[10-11]</sup>,对于志留系沉积环境方面的研究还未深入 开展,尚缺乏对其碎屑岩储层形成机制的分析,且 未有浊流或重力流的相关研究报道。系统揭示重 力流沉积类型及其形成机制,是明确湖南保靖地区 沉积序列演化特征,认识页岩气储层沉积相时空展 布规律,进而进行地层对比、预测钻井目的层位、划 分有利区带的理论依据。为此,笔者通过阐述湖南 保靖地区下志留统重力流沉积特征,分析其沉积模 式,以期为研究区页岩气勘探开发提供理论依据。

## 1 区域地质概况

湖南保靖地区位于湖南省西北部,区域构造位 于湘鄂西隔槽式冲断褶皱带,主体位于北北东走向 的桑植—石门复向斜内(图1)<sup>[11]</sup>。湘鄂西隔槽式冲 断褶皱带东南以慈利断裂带为界与雪峰隆起毗连, 西北以齐岳山断裂为界与四川盆地边缘川东低缓 褶皱带相接,北侧与秦岭造山带大巴山前陆褶皱冲 断带黄陵背斜和官昌斜坡相临,向南延伸至滇黔桂 交界区。湘鄂西隔槽式冲断褶皱带由多个规模较 大的复向斜和复背斜构成,在背斜区地层剥蚀严 重,向斜区地层保存较好。湖南保靖地区主要是由 拔茅寨--野猪坪向斜、八面山向斜的--部分、比尔 背斜组成的复合褶皱,走向为北北东向。其背斜区 核部出露寒武系,向斜区中的拔茅寨向斜保存寒武 系一下三叠统,东南部保靖一慈利断裂带是由北东 向的逆断层组成,局部发育正断层,风化剥蚀严重, 地形平坦。



Fig.1 Structural division of Baojing area of Hunan Province

湘鄂西隔槽式冲断褶皱带位于中扬子地区,为 扬子板块与华夏板块2大地质单元的结合部,经历 了晋宁运动、加里东运动、海西运动、印支运动、燕 山运动和喜马拉雅运动等多期构造运动,形成现今 的复杂山区地形<sup>[12-13]</sup>。晋宁运动以后,研究区作为 扬子板块的组成部分,基底基本固结,并开始接受 盖层沉积。在南华纪一早古生代,在新元古代中期 Rodinia超大陆裂解的基础上,中扬子地区先后经历 了裂谷盆地(距今820~720 Ma)、被动大陆边缘盆 地(距今720~490 Ma)和前陆盆地(距今490~420 Ma)3个沉积充填演化阶段<sup>[14-17]</sup>。在志留纪,研究区 形成前陆盆地,沉积海相复理石,堆积了巨厚的海 相碎屑岩,龙马溪组沉积早期发育黑色炭质泥岩, 具备页岩气形成的物质条件<sup>[18-20]</sup>。

# 2 地层发育特征

神华地质勘查有限责任公司在湖南保靖地区 钻探的5口页岩气勘探井主要位于拔茅寨一野猪坪 向斜两翼及八面山向斜的一翼。钻遇地层自下而 上为奥陶系宝塔组,下志留统龙马溪组、新滩组、小 河坝组、马脚冲组、溶溪组和吴家院组,中志留统回 星哨组和小溪峪组。

### 2.1 奥陶系

研究区未钻穿奥陶系宝塔组顶部地层,其岩性 主要为浅红色—红棕色中厚层瘤状龟裂纹含生物 碎屑泥晶—泥质灰岩夹灰黄色钙泥质页岩,瘤体大 小为0.5 cm×0.7 cm~3 cm×5 cm,含量为30%~ 40%,形态呈椭球状、豆荚状,且长轴顺层展布。岩 石中含有较多的生物化石碎屑,主要为介形虫、头 足类和棘皮类,局部可以见到保存完整粗大的角石 化石。

### 2.2 志留系

#### 2.2.1 下志留统

龙马溪组 研究区龙马溪组厚度为29.4 m,与 上、下地层均为整合接触。其岩性主要为黑色块状 炭质泥岩、黑色纹层炭质粉砂岩、黑色纹层硅质泥 岩和黑色块状泥岩,发育笔石化石且种类繁多,黄 铁矿粉末条带及黄铁矿晶簇透镜体发育,为前陆盆 地初期海水迅速加深、与公海流通不畅以及缺氧环 境下形成的典型沉积。

新滩组 研究区新滩组厚度为74.6 m,与上、下 地层均为整合接触。其下部发育厚度为18 m的灰 白色高频率低振幅脉状层理粉砂岩,局部见笔石化 石;中部发育1套厚度为5 m的黑色泥岩,水平纹层 发育,可见笔石、黄铁矿沿层面分布;上部发育灰白 色脉状层理粉砂岩—灰黑色纹层状泥岩—黑色块 状炭质泥岩不等比例组成的多个韵律结构,自下向 上黑色炭质泥岩的厚度、夹层的频率逐渐减小,灰 白色脉状层理粉砂岩的厚度、夹层的频率逐渐增 加,脉状层理的振幅逐渐加大。在黑色炭质泥岩中 发育笔石化石及黄铁矿粉末圈层,灰黑色纹层状泥 岩中基本不发育笔石及黄铁矿。岩性分析结果反 映该时期的沉积环境较早期的水体变浅、开阔、循 环并逐渐畅通,沉积物供给量增加。

小河坝组 研究区小河坝组厚度为520 m,与 上、下地层均为整合接触。其下部发育38m灰白色 块状细砂岩夹多个灰色脉状层理粉砂岩--灰黑色 纹层状泥岩—黑色块状炭质泥岩组成的沉积韵律 结构,向上黑色炭质泥岩的厚度逐渐减小直至消 失,粉砂岩的厚度逐渐增大,目脉状层理的振幅逐 渐增大,纹层状泥岩逐渐转化为波状层理粉砂质泥 岩;中部主要发育灰白色脉状层理泥质粉砂岩与深 灰色纹层状泥岩不等比互层的沉积韵律结构,向上 粉砂岩厚度逐渐减小,泥岩厚度逐渐增大,粉砂岩 中脉状层理的振幅逐渐减小,向上逐渐过渡为波 状、透镜状层理,泥岩中水平纹层逐渐过渡为块状 层理或均匀层理;上部以深灰色块状泥岩为主,局 部发育波状层理、透镜状层理及沙纹层理,层理主 要为泥质粉砂岩夹层在泥岩中不均匀分布所形成 的纹层或条带构造,向上粉砂岩纹层或条带逐渐消 失,成为均匀的块状构造,局部发育包卷层理、旋卷 层理、高角度斜层理、水平层理及丘状、火焰状、不 规则斑点状、絮状砂丘枕构造;顶部主要为深灰色 泥岩,多个层位不均匀分布波状层理、水平层理,局 部见透镜状层理。岩性特征表明,小河坝组沉积时 期水体明显变浅,块状细砂岩底部的槽模反映发生 过较大的沟道侵蚀,为前陆盆地发展期地形高差较 大、物源区补给迅速增加所导致。

马脚冲组 研究区马脚冲组厚度为465 m,与 上、下地层均为整合接触。其下部为灰色块状泥 岩,发育波状层理、水平层理、沙纹层理,局部夹浅 灰色泥质粉砂岩,泥质粉砂岩中发育波状、透镜状 层理;中部发育2套厚度为10~20 m的灰白色生物 灰岩、生屑灰岩,可见完整的珊瑚、腕足化石,2套灰 岩之间为灰色块状一波状层理泥岩,受断层影响, 形成断层角砾岩;中上部为灰色块状泥岩,发育波 状、透镜状层理,局部夹灰白色泥质粉砂岩,且泥质 粉砂岩中发育脉状层理、旋卷层理和滑塌变形层 理;顶部为灰绿色块状泥岩,局部发育不完整的微 细沙纹层理、滑塌变形层理、透镜状层理和不规则 砂泥斑团。马脚冲组岩石的粒度明显减小、颜色变 浅,沉积环境较先前水体明显变浅,表明前陆盆地 进入萎缩期,地形高差变小,物源区供给减少。

溶溪组 研究区溶溪组厚度为641.5 m,与上、

下地层均为整合接触。其岩性组合简单,以紫红 色一黄绿色一蓝灰色粉砂质泥(页)岩为主,在区域 上以含紫红色岩系为典型特征,俗称下红层。综合 分析溶溪组的岩性组合特征,认为该时期的沉积环 境已转化为氧化环境,前陆盆地极大萎缩,形成三 角洲沉积环境,海水局部淡化、营养物质贫瘠、有机 质生产量低、沉积速率较快。

吴家院组 研究区吴家院组厚度为237.9 m,与 上、下地层均为整合接触。岩性主要为灰绿色一灰 黄色泥岩夹多层灰色泥晶灰岩。吴家院组沉积时 期,海平面进一步下降,前陆盆地消亡,外部物源供 给持续减少,形成潮坪-泻湖沉积环境,发育多套碳 酸盐岩与泥岩共生的岩性组合。

2.2.2 中志留统

回星哨组 研究区回星哨组厚度为139.3 m,与 上、下地层均为整合接触。其岩性组合特征为紫红 色一蓝绿色一灰绿色粉砂质泥岩,黄绿色与紫红色 粉砂质泥岩互层产出,俗称上红层。回星哨组沉积 时期,前陆盆地进一步消亡,泻湖面积缩小,发育氧 化环境泥岩。

小溪峪组 研究区小溪峪组厚度为237.9 m,与 下伏地层整合接触,与上覆泥盆系不整合接触。其 岩性主要为黄绿色泥质粉砂岩夹多层灰白色细砂 岩。小溪峪组沉积时期,前陆盆地完全消亡,物源 区隆起区全部夷平,北部洋盆海水侵入,在湖南保 靖地区形成滨海沉积环境,发育滨岸相碎屑岩。

从沉积序列上分析,湖南保靖地区下志留统— 中志留统为一个完整的二级海平面变化沉积旋回, 反映出前陆盆地形成、发展、萎缩与消亡的过程。 早志留世早期沉积深水滞留盆地黑色炭质泥岩、黑 色硅质岩、黑色泥岩、黑色粉砂质泥岩等,笔石化石 丰富,黄铁矿富集;晚期沉积浅水环境深灰色—灰 色细砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,笔石化石、黄 铁矿逐渐减少<sup>[21-22]</sup>。中志留世沉积泻湖—滨岸碎屑 岩。从早志留世到中志留世,发育多期次进积型沉 积序列,反映海平面持续性下降;且早期海平面下 降缓慢,沉积序列变化频率较低,晚期海平面下降 迅速,沉积序列变化频率较高,海平面的变化主要 受控于影响盆地演化的构造运动<sup>[23]</sup>。

### 3 重力流沉积类型及特征

重力流又称沉积物流、惯性流、高密度悬浮液, 是沉积物和液体混合流的总称<sup>[24]</sup>。根据颗粒支撑 机理,一般可以划分出4种重力流沉积类型,分别为 碎屑流(颗粒由杂基支撑)、颗粒流(颗粒间的相互 作用分散压力支撑)、液化流(由排泄孔隙流体造 成)和浊流(由流体紊流造成)<sup>[25-27]</sup>。湖南保靖地区 下志留统发育最广、沉积最多的是浊流和碎屑流, 其次为液化流,而颗粒流则很少发现。

#### 3.1 浊流

浊流是含大量悬移物质的海水顺海底运移形 成的密度流。在浊流运移过程中,持续对海底侵 蚀,形成海底峡谷。浊流停止流动后,所含悬移物 质沉积形成特定的粒序级沉积序列,成岩后称为浊 积岩<sup>[28-30]</sup>。一般浊积岩在纵剖面上均可用鲍马序列 来描述:A段为粗粒部分,具粒序层理砂岩,B段为 具平行层理砂岩,C段为具流水沙纹层理和包卷层 理粉砂岩,D段为具水平纹层粉砂质泥岩或泥质粉 砂岩,E段为无层理泥岩。底部常见各种印模,如槽 模、沟模、锥模、重荷模等,也可见虫孔和叠瓦状构 造,大部分浊积岩都具有复理石建造或类复理石建 造[25-26]。正递变层理是浊积岩识别的可靠标志,反 映出悬浮搬运和递变沉积的特点,其他的识别标志 有底痕、岩层层序、砂体产状、岩层界面等。突变界 面一般位于底部,顶部为渐变界面,底部界面可见 冲刷痕、重荷构造等,砂体呈席状。浊积岩具有完 全或部分鲍马序列,但不会出现相反的顺序。

湖南保靖地区的浊流主要发育于下志留统龙 马溪组和新滩组,小河坝组下部及马脚冲组也有局 部发育(图2)。研究区未见完整的鲍马序列,龙马 溪组发育E段或D—E段,新滩组发育C—D—E段, 小河坝组发育C—D—E段、D—E段和C—D段。

研究区龙马溪组底部发育厚度为5m黑色块状 炭质泥岩,夹多层斑脱岩(图3a),全区分布稳定,为 E段。向上发育厚度为9m黑色炭质粉砂岩(图 3b),发育水平纹层,全区稳定分布,为D段。再向上 发育厚度为6m黑色块状炭质泥岩,发育大量笔石 化石,全区分布稳定,为E段,这2段组成D—E段。

研究区新滩组下部发育厚度为18 m的灰色含 钙粉砂岩(图3c),发育低振幅、高频率脉状层理,全 区分布稳定,为C段;向上过渡为厚度为3 m的深灰 色泥质粉砂岩,发育平行层理,为D段;再向上发育 厚度为3 m的水平黑色块状炭质泥岩,笔石化石丰 富,为E段,这3段组成C—D—E段。新滩组上部发 育厚度为87 m的灰白色脉状层理粉砂岩—灰黑色 水平纹层含粉砂泥岩—黑色块状炭质泥岩多个韵 律结构的砂、泥岩互层沉积序列,单个岩层厚度从 数毫米至数十厘米不等,最大不超过30 cm,且其厚 度变化频繁,侧向延伸稳定(图3d),为多期次高频

奥	X	445	41	厚度/	<i>GR</i> /API	。 密 亩 / m	当 牌 刘 五	$RT/(\Omega \bullet \mathbf{m})$	浊积岩	重力流	沉积相		相	构造
21	ᅏ	571	511	m	0 300	1本/文/ Ш		20 2 000	- <u></u> 抗枳 序列	类型	微相	亚相	相	阶段
				Ş	930 -	••		D段 C段	浊流					
					Mar Mar Landren	940 -	···		D段 C段	. 浊流	前缘 席状砂 辫	- 扇中	远岸 水下扇	前陆地发展期
						950 -	c - c -	M	E段 D段	浊流				
			小河切	458		960 -			C段	碎屑流				
			组			970 -	с — с — •• — —		E段 D段	· 浊流 碎唇流	水道 侧缘 辫状			
							с — с — •• — —	Sal a	E段 D段	<u>水道</u> 浊流 水道 侧缘				
下	志	下			June	990 -		- And	C段	碎屑流	辫状 水道			
古	留	志			Mandalan	1 000 -	с— с— •• — —	hart	E段 D段	浊流	前缘席状砂	扇中	海底扇	前陆地期
生	E	留				1 010 -	·· ≈ ·· c - c - ··	Mar	E段 D段	. 浊流				
	系	统	新			1 020 -	·· ≈ ··		C段 E段					
齐			滩	74.6		1 030 -	$ \begin{array}{c} \cdots & \sim & \cdots \\ \hline & \cdots & \sim & \cdots \\ \hline & c - & c - \end{array} $		D段 C段 E段	· 浊 沇				
			组			1 040 -	$\begin{array}{c} \cdots & \sim & \cdots \\ \hline \\$		D段 C段 E段					
						1 050 -	••		D段		小 侧缘 ———————————————————————————————————			
		-			- And	1 060 -	•• >=== ••		C段	浊流				
			龙马溪组	29.4	7~~~~	1 070 - 1 080 - 1 090 -	c – c –		E段		扇端泥           油积砂         扇端			
							с •• с ••		D段	浊流				
		纽		$\left  \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	1 100 -	с— с—		E段	浊流	扇端泥				

图 2 湖南保靖地区保参 3 井下志留统下部综合柱状图 Fig.2 Comprehensive stratigraphic histogram of the lower early Silurian drilled by Well Baocan 3 in Baojing area of Hunan Province



Fig.3 Sedimentary characteristics of turbidite current deposits in Baojing area of Hunan Province

率正粒序结构的C—D—E段;向上韵律结构出现的 频率减小,且韵律结构中粉砂岩厚度增大,黑色炭 质泥岩厚度减小;粉砂岩中发育槽状、楔状、透镜状 层理,底部界面发育槽模、冲刷面及底模构造。

研究区小河坝组下部发育7段厚度为1~11 m 的灰白色脉状层理粉砂岩一灰黑色水平纹层含粉 砂泥岩—黑色块状炭质泥岩组成的多个韵律结构, 单个岩层厚度从数厘米至数十厘米不等,最大不超 过50 cm,厚度变化较小,侧向延伸稳定,为C—D— E段。黑色炭质泥岩中发育笔石化石,粉砂岩底部 发育重荷模。浊积岩中自下向上粉砂岩脉状层理 的振幅逐渐减小,灰黑色纹层状泥岩厚度增大,黑 色炭质泥岩厚度明显减小直至消失,笔石化石逐渐 消失,由C—D—E段过渡为C—D段(图3e,3f)。小 河坝组底部块状细砂岩上部发育1—2个灰黑色水 平纹层含粉砂泥岩—黑色块状炭质泥岩韵律结构, 也是浊流沉积,组成D—E段,与其底部细砂岩组成 C—D—E段。

从浊积岩沉积序列来看,早志留世早期海水较 深,海平面变化较小,物源供给较少,为欠补偿沉积 环境,浊流沉积频率较低。单个浊积岩沉积序列厚 度较大,且以E段或D—E段为主;早志留世晚期海 平面下降,物源供给充分,浊流沉积频率增大,单个 浊积岩沉积序列厚度较小,呈多期次组合模式,以 D—E段为主,向上过渡为C—D段。

#### 3.2 碎屑流

碎屑流是沉积物碎屑颗粒由基质支撑,在水动 力作用下运移的一种流体,其基质由粒间流体和细 粒沉积物混合而成<sup>[29-30]</sup>。从流体运移方式来看,碎 屑流为碎屑物质入水后以水下泥石流方式深切水 下地表运移,从而在低洼地形表面形成下切深水沟 道。碎屑流在下切深水沟道中流动,遇到地势稳定 区域即快速充填,沉积块状—厚层状细砂岩。

研究区碎屑流主要发育于小河坝组下部(图 2),岩性主要为灰白色厚层—块状细砂岩(图3g), 厚度为0.2~10.5 m,共发育4—11层,其上、下地层 均为韵律结构的D—E段,块状细砂岩可以识别为C 段,与上覆地层中D—E段组成C—D—E段。细砂 岩颗粒的主要成分为岩屑、石英,颗粒粒径为0.1~ 2 mm,分选、磨圆一般,硅质胶结,局部地区发育明 显的泥岩撕裂屑(图3h),砂岩内部偶见零散分布的 泥岩碎片泥砾,直径为2~6 cm,呈悬浮状,且有拖 长变形现象,岩石坚硬,破裂面为尖棱状。由于下 切深水沟道宽度的差异或下切深水沟道的横向摆 动,致使研究区碎屑流沉积的细砂岩在平面上分布 不稳定,在各井中发育的层位及厚度的差异也较 大。在细砂岩底部界面上可以见到明显的槽模和 沟模构造(图3i),为下切深水沟道运移、侵蚀、冲刷 下伏未固结沉积物形成的明显痕迹,其底部界面常 与海相泥岩、粉砂岩呈突变接触,目接触面极为不

### 3.3 液化流

规则。

液化流是由超孔隙压力支撑沉积颗粒漂浮的 流体。在漫长的沉积盆地充填过程中,沉积物不均 匀沉积,在盆地边缘形成不平坦的斜坡地形,之后 随着构造作用的减缓,沉积物源的供给逐渐稳定, 在斜坡处沉积未固结的不稳定沉积物。由于突发 性的地表震动,导致未固结的沉积物孔隙压力(即 孔隙内流体的静压力)突然增大,形成超孔隙压力, 流体进入未固结的沉积物粒间孔隙内,使原本形成 的沉积物像流沙般液化,沉积物被孔隙间逸出的向 上流动的粒间流支撑,并沿着重力势能较小的区域 移动,从而堆积形成液化流。液化流的沉积特征表 现为粒序性差,地层中多发育碟状构造、泄水构造、 泥火山构造、火焰构造、包卷层理、变形层理等<sup>[26-28]</sup>。

研究区液化流主要发育于小河坝组上部及马 脚冲组。其分布范围较广、地层厚度巨大,岩性以 灰色厚层块状--沙纹层理泥质粉砂岩、粉砂质泥岩 为主,笔石化石消失,未见黄铁矿;沉积构造丰富, 砂、泥混杂目变形强烈,厚度变化较大,最大可达2 m,最小为0.01 m,常见包卷构造、滑塌褶皱以及扭 曲层理等多种变形层理,有学者将这种岩石类型笼 统划归为滑塌浊积岩<sup>[28]</sup>。研究区液化流形成于盆 地萎缩期,该时期的物源区接近准平原化,与盆地 中心高差缩小,盆地面积显著缩小;盆地长期充填 后,其内部高差缩小,地形坡度降低,在盆地边缘的 斜坡区原已沉积厚层的粉砂质泥或泥质粉砂,还未 固结成岩,由于间隙性小规模突发性构造运动,使 地表受到强烈震动,驱使沉积物之上缓慢流动的水 流进入尚未固结的岩石碎屑颗粒间隙,形成液化 流。液化流在重力作用下向低势能区移动,在弱动 力水流的牵引下近距离滑动,形成沙纹层理、断阶 型沙纹层理、砂丘枕构造和泄水沙斑构造(图4a, 4b);在强动力水流的搬运下远距离运移、滑塌,形 成包卷层理、旋卷层理、倒转层理和变形层理(图  $4c-4f)_{0}$ 



Fig.4 Sedimentary characteristics of liquid flow deposits of Well Baocan3 in Baojing area of Hunan Province

# 4 重力流沉积模式

自中一晚奥陶世开始,扬子板块东南缘与华夏 板块汇聚挤压造山。早志留世,在中扬子地区形成 川中隆起、黔中隆起、江南雪峰隆起等三山夹一盆的局限浅海还原环境。湖南保靖地区位于江南雪峰 隆起西北侧的前陆盆地,由于隆起区的风化、剥蚀、 搬运,向盆地内部提供物源,形成重力流沉积<sup>[23]</sup>。 湖南保靖地区下志留统主要发育海底扇、远岸水下 扇和滑移-滑塌扇3种重力流沉积模式,且由海底 扇、远岸水下扇至滑移-滑塌扇沉积模式的转变,反 映出在前陆盆地形成、发展、萎缩过程中重力流沉 积模式的演化,其主要控制因素为构造运动、海平 面变化以及物源区的地形特征等。

#### 4.1 海底扇沉积模式

研究区海底扇沉积模式主要发育于龙马溪组 和新滩组沉积时期,重力流沉积类型为浊流。在前 陆盆地形成时期,构造活动缓慢且经历时间较长, 江南雪峰隆起还未露出水面,物源区风化剥蚀缓 慢,碎屑颗粒较小,由于多发性、间歇性、季节性洪 流等影响,在深水区海底形成海底扇沉积(图5)。 此时海底坡度较小,海流携带碎屑物长距离搬运, 在平静的滞水环境中沉积,形成厚度较大的黑色炭 质泥岩、粉砂岩或韵律结构的浊积岩,笔石化石丰 富,沉积范围较大。研究区发育的海底扇自下而上 可以划分出扇端和扇中亚相,其中扇端亚相可以划 分出扇端泥和浊积砂微相,扇中亚相可以划分出网 状水道、水道侧缘、前缘席状砂微相。在海底扇形 成早期,构造作用较弱,海水较深,物源供给稀少, 且为远距离搬运,浊积事件发生频率较低、持续时 间较长,因此浊流沉积形成的单段浊积岩的厚度较 大,在研究区龙马溪组底部发育的E段为扇端泥微 相,D--E段为浊积砂、扇端泥微相。在海底扇形成 晚期,随着构造作用的加剧,形成多期次的C-D-E段加积型沉积序列。研究区新滩组下部发育厚度 为15m的灰色高频脉状层理粉砂岩,脉状或透镜状层理极其发育,为网状水道微相的典型标志,其上覆多期浊积岩叠加的加积-进积型沉积序列则为水道侧缘和前缘席状砂微相的典型特征。

### 4.2 远岸水下扇沉积模式

远岸水下扇沉积模式发育的重力流沉积类型 为碎屑流和浊流。在小河坝组沉积早期,前陆盆地 已经由早期的初始形成期过渡为发展期。此时构 造作用加剧,江南雪峰隆起快速隆升,盆地向陆一 侧形成陡峭的悬崖,物源区剥蚀量急剧增加。由于 地形高差悬殊,势能极大的水流携带碎屑物向盆地 内部倾倒,在海底形成强大动能的水下碎屑流,搬 运碎屑物侵蚀海底地表形成下切深水沟道;碎屑流 沿下切深水沟道长距离运移后,在较平缓区堆积, 形成远离物源区的远岸水下扇。研究区仅发育远 岸水下扇扇中亚相,可识别出辫状水道、水道侧缘 和前缘席状砂微相。辫状水道微相发育厚度巨大 的块状细砂岩,呈带状展布,目难以全区对比;水道 侧缘及前缘席状砂微相则形成浊流,发育浊积岩沉 积序列,以砂、泥互层结构为特点,自下而上岩石颗 粒粒度逐渐减小。研究区小河坝组碎屑流形成的C 段为辫状水道微相,浊流形成的C-D-E段、D-E 段和C---D段则为水道侧缘和前缘席状砂微相。

#### 4.3 滑移-滑塌扇沉积模式

滑移-滑塌扇沉积模式发育的重力流沉积类型 主要为液化流。在小河坝组沉积晚期,随着构造运



图 5 湖南保靖地区海底扇沉积模式 Fig.5 Sedimentary model of submarine fan in Baojing area of Hunan Province

动的减缓,湘西前陆盆地已进入萎缩阶段,其物源 区由于长期的风化、剥蚀、搬运,隆起已接近准平原 化,且海底的大规模沉积充填导致海平面降低,盆 地面积缩小,边缘大部分露出水面,陆上河流入海 后,形成三角洲沉积。在海底斜坡地形区沉积的三 角洲前缘或前三角洲粉砂质泥、泥质粉砂尚未固结 成岩。当突然出现山洪、地震、火山等地质事件时, 在海底斜坡地形区形成液化流,在重力势能下随水 体运移,遇平稳地形后沉积,形成滑移-滑塌扇;研 究区主要发育滑移-滑塌扇扇中亚相滑移-滑塌水 道、水道间湾微相,滑移-滑塌水道微相以泥质粉砂 岩、粉砂质泥岩为主,发育各种变形层理;水道间湾 微相以粉砂质泥岩、泥岩为主,常见水平纹层或块 状层理,变形层理不发育。研究区滑移-滑塌扇规 模较小、分布局限,但具有丰富的沉积构造,如滑塌 变形层理、旋卷层理、砂球枕构造、断阶状层理、脉 状层理及波状层理等。此外,研究区滑移-滑塌扇 在小河坝组沉积晚期及马脚冲组沉积时期多次间 隔发育,可在多口井之间进行良好对比。

## 5 结论

湖南保靖地区下志留统发育浊流、碎屑流和液 化流3种重力流沉积类型,具有海底扇、远岸水下扇 和滑移-滑塌扇3种重力流沉积模式。其中,浊流主 要形成于海底扇及远岸水下扇沉积模式,碎屑流形 成于远岸水下扇沉积模式,液化流形成于滑移-滑 塌扇沉积模式。浊流与液化流沉积稳定,可以在全 区进行对比,而碎屑流沉积不稳定,难以在全区进 行对比。在海底扇形成时期,海水较深,物源供应 缓慢,浊流持续时间较长,单层浊积岩厚度较大,其 浊积岩组合多为E段或D—E段,具有较好的页岩气 勘探前景。重力流沉积类型及沉积模式的确定,解 决了研究区目前存在的储层对比困难的问题,且已 在5口探井中得到了实践验证。今后需进一步明确 远岸水下扇的形成规模及发生频率,以期可以对碎 屑流进行区域地层对比。

### 参考文献:

- Shanmugam G.50 years of the turbidite paradigm(1950s-1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective [J].Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2):285-342.
- [2] Navarre J C, Claude D, Liberelle E, et al.Deepwater turbidite system analysis, West Africa: Sedimentary model and implications for reservoir model construction [J].The Leading Edge, 2002, 21 (11):1 132-1 139.

- [3] Shanmugam G, Moiola R J.Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma: Reply[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(3):476-491.
- [4] 庞雄,陈长民,朱明,等.深水沉积研究前缘问题[J].地质论评, 2007,53(1):1-9.
   Pang Xiong, Chen Changmin, Zhu Ming, et al.Frontier of the deep-water deposition study[J].Geological Review, 2007, 53(1): 1-9.
- [5] 侯冠群,周文,王永诗.车镇凹陷北部陡坡带深水浊积扇发育特征及控制因素——以车66井区沙三段下亚段为例[J].油气地质与采收率,2016,23(4):27-33.
  Hou Guanqun, Zhou Wen, Wang Yongshi.Development features and controlling factors of deep-water turbidite fans in north slope of Chezhen sag-A case study of the block Che66 in the lower third member of Shahejie Formation [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2016,23(4):27-33.
- [6] 张廷山,彭志,杨巍,等.美国页岩油研究对我国的启示[J].岩 性油气藏,2015,27(3):1-10.
  Zhang Tingshan, Peng Zhi, Yang Wei, et al.Enlightenments of American shale oil research towards China [J].Lithologic Reservoirs,2015,27(3):1-10.
- [7] 朱彤,曹艳,张快.美国典型页岩气藏类型及勘探开发启示[J]. 石油实验地质,2014,36(6):718-724.
   Zhu Tong, Cao Yan, Zhang Kuai.Typical shale gas reservoirs in USA and enlightenment to exploration and development[J].Petroleum Geology & Experiment,2014,36(6):718-724.
- [8] 刘江涛,刘双莲,李永杰,等.焦石坝地区奥陶系五峰组一志留 系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义[J].油气地质与采 收率,2016,23(3):53-57.

Liu Jiangtao, Liu Shuanglian, Li Yongjie, et al.Geochemistry characteristics and its geological significance of shale in the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation, Jiaoshiba area[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23 (3):53–57.

[9] 徐二社,李志明,杨振恒.彭水地区五峰—龙马溪组页岩热演化 史及生烃史研究——以PY1井为例[J].石油实验地质,2015, 37(4):494-499.

Xu Ershe, Li Zhiming, Yang Zhenheng.Thermal and hydrocarbon generation history of Wufeng and Longmaxi shales in Pengshui area, eastern Sichuan Basin: A well PY1 case study [J].Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4):494–499.

[10] 张志平,程礼军,刘俊峰,等.湖南保靖下志留统龙马溪组页岩 气成藏地质条件评价[J].天然气勘探与开发,2013,36(3):1-6.

Zhang Zhiping, Cheng Lijun, Liu Junfeng, et al.Reservoir-forming conditions of shale-gas reservoir in Lower Silurian on Longmaxi Formation, Baojing area, Hunan province [J].Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(3):1-6.

 [11] 范二平,唐书恒,张成龙,等,湘西北下古生界黑色页岩扫描电 镜孔隙特征[J].古地理学报,2014,16(1):133-142.
 Fan Erping, Tang Shuheng, Zhang Chenglong, et al.Scanningelectron-nicroscopic micropore characteristics of the Lower Paleozoic black shale in northwestern Hunan Province[J].Journal of Palaeogeography,2014,16(1):133-142.

- [12] 李聪,陈世悦,张鹏飞,等.雪峰陆内多期复合造山带震旦一三叠纪沉积演化特征[J].中国地质,2011,38(1):43-51.
  Li Cong, Chen Shiyue, Zhang Pengfei, et al.Palaeozoic-Mesozoic sedimentary evolution characteristics of the Xuefeng mountain intracontinental orogenic belt[J].Geology in China, 2011, 38(1): 43-51.
- [13] 陈世悦,李聪,张鹏飞,等.江南一雪峰地区加里东期和印支期 不整合分布规律[J].中国地质,2011,38(5):1212-1219. Chen Shiyue, Li Cong, Zhang Pengfei, et al.The unconformable distribution of Caledonian and Indosinian strata in Jiangnan-Xuefeng area[J].Geology in China,2011,38(5):1212-1219.
- [14] 赵宗举,朱琰,李大成,等.中国南方构造形变对油气藏的控制 作用[J].石油与天然气地质,2002,23(1):19-25.
   Zhao Zongju, Zhu Yan, Li Dacheng, et al.Control affect of tectonic deformation to oil-gas pools in southern China [J].Oil & Gas Geology,2002,23(1):19-25.
- [15] 金宠,李三忠,王岳军,等.雪峰山陆内复合构造系统印支一燕 山期构造穿时递进特征[J].石油与天然气地质,2009,30(5): 598-607.

Jin Chong, Li Sanzhong, Wang Yuejun, et al.Diachronous and progressive deformation during the Indosinian– Yanshanian movements of the Xuefeng mountain intracontinental composite tectonic system[J].Oil & Gas Geology, 2009, 30(5):598–607.

- [16] 尹福光,许效松,万方,等.华南地区加里东期前陆盆地演化过程中的沉积响应[J].地球学报,2001,22(5):425-428.
  Yin Fuguang, Xu Xiaosong, Wan Fang, et al.The sedimentary response to the evolutionary process of Caledonian foreland basin system in south China[J].Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(5): 425-428.
- [17] 陈懋弘,梁金城,张桂林,等.加里东期扬子板块与华夏板块西 南段分界线的岩相古地理制约[J].高校地质学报,2006,12 (1):111-122.

Chen Maohong, Liang Jincheng, Zhang Guilin, et al.Lithofacies paleogeographic constraints of southwestern boundary between Yangtze and Cathaysian plates in Caledonian [J].Geological Journal of China Universities, 2006, 12(1):111-122.

- [18] 丘元禧,张渝昌,马文璞.雪峰山陆内造山带的构造特征与演化
  [J].高校地质学报,1998,4(4):432-442.
  Qiu Yuanxi, Zhang Yuchang, Ma Wenpu.Tectonics and geological evolution of Xuefeng intra continental orogene, South China
  [J].Geological Journal of China Universities, 1998, 4(4): 432-442.
- [19] 孙肇才,邱蕴玉,郭正吾.板内形变与晚期次生成藏——扬子区 海相油气总体形成规律的探讨[J].石油实验地质,1991,13
   (2):107-142.

Sun Zhaocai, Qiu Yunyu, Guo Zhengwu.On the relationship of the intraplate deformation and the secondary formation of oil/gas pools—the general regularities of the oil/gas formation in marine environment of the Yangtze area [J].Experimental Petroleum Geology, 1991, 13(2): 107–142.

[20] 吉让寿,秦德余,高长林.古东秦岭洋关闭和华北与扬子两地块

拼合[J].石油实验地质,1990,12(4):353-365.

Ji Rangshou, Qin Deyu, Gao Changlin.Closing of eastern Qinling palaeoocean and collaging between the north China and Yangtze blocks [J].Experimental Petroleum Geology, 1990, 12(4):353-365.

[21] 吉让寿,高长林,秦德余.华北与扬子两板块的拼贴方式与扬子 北缘古生代盆地应变特征[J].石油实验地质,2004,26(2): 143-153.

Ji Rangshou, Gao Changlin, Qin Deyu.Matching mode of North China and Yangtze plates and strain characteristics of the Paleozoic basin in the north edge of the Yangtze plate[J].Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(2):143–153.

- [22] 王剑,段太忠,谢渊,等.扬子地块东南缘大地构造演化及其油 气地质意义[J].地质通报,2012,31(11):1739-1749.
  Wang Jian, Duan Taizhong, Xie Yuan, et al.The tectonic evolution and its oil and gas prospect of southeast margin of Yangtze Block [J].Geological Bulletin of China, 2012, 31 (11):1739-1749.
- [23] 李斌,胡博文,石小虎,等.湘西地区志留纪沉积体系及典型前 陆盆地的形成模式研究[J].地学前缘,2015,22(6):167-176. Li Bin, Hu Bowen, Shi Xiaohu, et al.Study on the Silurian sedimentary system of Western Hunan and the formation mode of typical foreland basin[J].Earth Science Frontiers,2015,22(6):167-176.
- [24] Shanmugam G.Ten turbidite myths [J].Earth-Science Reviews, 2002,58(3/4):311-341.
- [25] Shanmugam G.The Bouma sequence and the turbidite mind set [J].Earth-Science Reviews, 1997, 42(4):201-229.
- [26] 刘鑫金,刘惠民,宋国奇,等.东营凹陷洼陷斜坡带坡移扇沉积 特征及展布模式[J].油气地质与采收率,2016,23(4):1-10. Liu Xinjin,Liu Huimin,Song Guoqi, et al.Sedimentary characteristics and distribution pattern of the slope-shifting fan in the lowlying slope zone of Dongying sag[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2016,23(4):1-10.
- [27] Haughton P, Davis C, Mccaffrey W, et al.Hybrid sediment gravity flow deposits classification, origin and significance[J].Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(10):1 900–1 918.
- [28] 李相博,卫平生,刘化清,等.浅谈沉积物重力流分类与深水沉积模式[J].地质论评,2013,59(4):607-614.
  Li Xiangbo, Wei Pingsheng, Liu Huaqing, et al.Discussion on the classification of sediment gravity flow and the deep-water sedimentary model[J].Geological Review,2013,59(4):607-614.
- [29] 方爱民,李继亮,侯泉林.浊流及相关重力流沉积研究综述[J]. 地质论评,1998,44(3):270-280.
   Fang Aimin, Li Jiliang, Hou Quanlin.Sedimentation of turbidity currents and relative gravity flows: A review [J].Geological Review,1998,44(3):270-280.
- [30] 李云,郑荣才,朱国金,等.沉积物重力流研究进展综述[J].地 球科学进展,2011,26(2):157-165.

Li Yun, Zheng Rongcai, Zhu Guojin, et al.Reviews on sediment gravity flow [J].Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 157– 165.