

# 米仓山前缘早志留世软沉积物变形构造及其触发机制

张廷山<sup>1,2</sup>, 杜翔<sup>1,2</sup>, 杨巍<sup>1,2</sup>, 陈晓慧<sup>1,2</sup>

1. 西南石油大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 成都 610500

2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

**摘要** 地质历史时期软沉积物变形构造在不同时空沉积岩中均有分布,然而学术界对其变形过程、作用力及触发机制等仍存在许多争议。通过对米仓山前缘野外露头观测,早志留世砂岩、粉砂岩、页岩地层中,发育有多套软沉积物变形构造,其层位分布稳定,但不同层位的形态特征差异较大,包括波浪状变形层构造、包卷层理、枕状(椭球状)构造、火焰构造等,多与丘状交错层理相伴生,可分为三种组合类型,均发育于中陆棚沉积环境中。基于该区软沉积物变形构造特征,结合碳同位素分析、古气候、古板块资料,并与现代飓风研究成果对比,认为研究区早志留世时大体上处于风暴频繁的炎热环境,区内软沉积物变形构造多为风暴作用的结果,较强的风暴触及海底,使未固结成岩的沉积物的孔隙压力增加,切变强度降低,使之液化,进而发生变形。米仓山前缘早志留世软沉积物变形构造的发现及其触发机制的探讨对区内古地理、古气候的恢复,以及古扬子板块的演化具有重要的意义。

**关键词** 软沉积物变形构造; 风暴作用; 早志留世; 米仓山前缘

**第一作者简介** 张廷山,男,1961年出生,教授,沉积学与古生态学, E-mail: zts\_3@126.com

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 引言

软沉积物变形是指由多种沉积条件形成并且具有众多的形态特征<sup>[1]</sup>,而且,在地质历史时期,不同沉积环境和具不同岩性的地层中都有分布<sup>[1-10]</sup>。但是,对于软沉积物变形的变形过程、作用力以及触发机制有多种解释,如地震、风暴浪作用的压力变化,海啸、破混、涌浪、重力流、沉积物的快速载荷、海平面变化等,其中,地震触发机制被认为是主要原因之一,并将变形构造与地震事件相联系起来,认为变形构造大都发育在地震带附近,且具有可以液化的沉积物。通过模拟实验,认识到变形构造与沉积物液化作用关系密切,在地层分布上,变形构造层位稳定,可以进行大范围对比<sup>[3,9,11-12]</sup>。但是,除变形构造外,地震常常还会引发其他的一些地质事件,如海啸、重力流等<sup>[13]</sup>,所以,确定软沉积物变形机理很有意义。

米仓山前缘早志留世砂岩—粉砂岩、页岩地层中,发育有多套软沉积物变形构造,而且其不同层位的形态特征不同,层位分布稳定,可作较大范围对比。

## 1 区域地质背景

研究区位于四川盆地西北部的广元、旺苍一带,大地构造上属上扬子区北缘的米仓山隆起区(图1)。

早古生代该区构造稳定,主要受古隆起控制。早志留世时,上扬子区为一宽缓的陆表海,而在川西北地区西部(旺苍以西)发育一向板块内部倾斜的陆源碎屑—碳酸盐岩沉积匀斜缓坡—盆地沉积环境<sup>[14-15]</sup>,而其东部(旺苍以东)碳酸盐岩沉积不发育,总体上为陆棚环境。该区志留纪地层沿后龙门山大断裂东侧呈北东、南西向条带状分布,除局部地区可能有晚志留世地层外,主要出露早志留世地层,最大厚度达1328 m。其底部除局部地区为整合接触外,大部分地区超覆于中、上奥陶统的不同层位上,其上与二叠系呈假整合或低角度的不整合接触。

研究区下志留统地层自下向上可划分为龙马溪组、小河坝组。早志留世龙马溪期上扬子北缘地区呈现出相对海平面上升,周缘隆起带范围缩小,总体为局限的宽缓陆架环境,沉积了一套厚度较大、含丰富笔石生物的黑色碳质页岩<sup>[16]</sup>,往上逐渐变为粉砂质泥岩及泥质粉砂岩,颜色由灰色逐渐变为灰绿色,另可见包卷变形层理及丘状交错层理等沉积构造;早志留世小河坝期,以充填作用为主,由于沉积物加积,海平面出现相对下降,沉积环境逐渐变浅,先期的陆棚环境逐步被近滨环境所取代,自下而上由浅水陆棚、远滨向近滨过渡,沉积一套以粉—细砂岩、粉砂岩为主夹粉砂质泥岩地层,向上砂质含量增多,在其底部

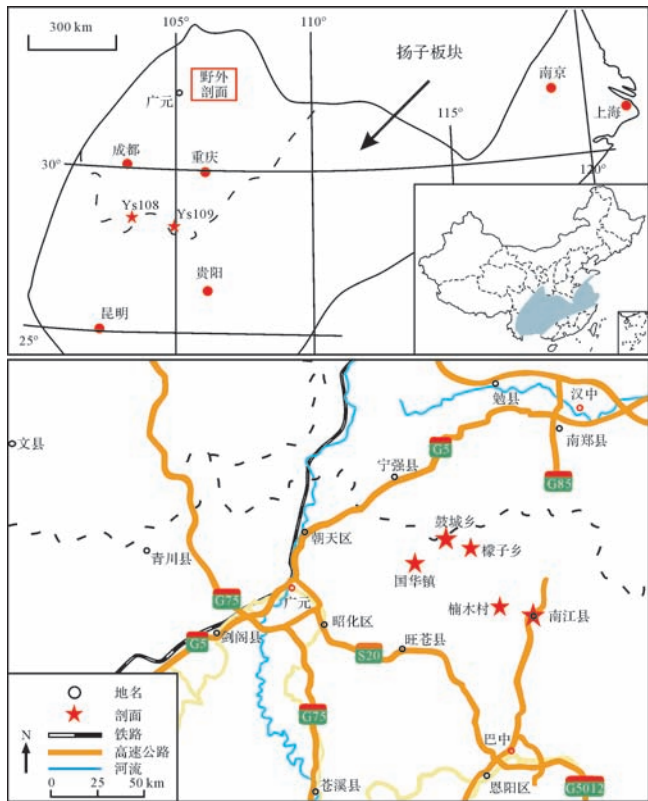


图1 研究区地理位置图

Fig.1 The geographical location map of the study area

可见大量枕状(椭球状)构造、火焰构造等软沉积变形构造(图2),总体来说,自下向上砂质含量增多,泥质含量减少,表现为水体变浅的过程。

## 2 变形构造类型及分布

米仓山前缘软沉积物变形构造纵向上分布于Llandovery阶龙马溪组中上部及小河坝组底部,类型多样。根据其形态特征及地层分布,主要可划分出波浪状变形层构造、包卷层理、枕状(椭球状)构造、火焰构造等。它们大小不一,并多与丘状交错层理相伴生(表1)。变形构造的岩石类型主要为黄灰色、灰绿色粉砂岩、细砂岩及粉砂质页岩或泥岩。

### (1) 波浪状变形层构造

波浪状变形层构造主要分布于龙马溪组中上部,由黄灰色泥质粉砂岩、粉砂岩组成,上、下岩层为中—薄层黄灰色粉砂岩、细砂岩。形态呈波浪状弯曲变形,波峰和波谷都比较平缓。波浪状变形层通常位于平行的上下岩层之间,上下岩层产状不变,保持水平。研究区波浪状变形层构造一般厚约20 cm,长约90 cm,有的可厚达50 cm,长度超过2 m(图3f1、f2)。这

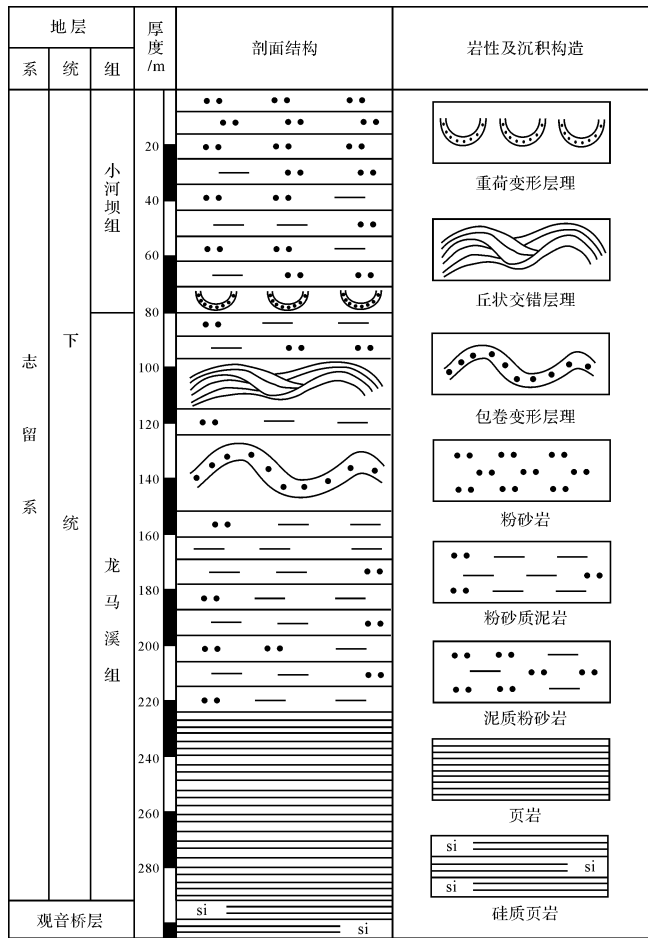


图2 研究区下志留统地层柱状图

Fig.2 The stratigraphic column in Lower Silurian of the study area

种变形构造可能多为风暴、波浪作用的结果。

表1 研究区变形构造类型及地层分布

Table 1 The soft sediment deformation structures and stratigraphic distribution in the study area

变形构造类型	岩性特征	分布层位
火焰构造	灰绿色粉砂质泥岩、泥岩	小河坝组底部
枕状(椭球状)构造	灰—灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩	小河坝组底部
包卷层理	黄灰色粉砂质页岩、粉砂岩	龙马溪组中、上部
波浪状变形层构造	黄灰色粉砂质页岩、粉砂岩	龙马溪组中、上部

### (2) 包卷层理

包卷层理又称卷曲层理,是指在一个岩层内所发生的沉积纹层包卷和扭曲现象<sup>[17]</sup>。该变形构造主要分布在龙马溪组中上部,岩性为黄灰色粉砂质泥岩和黄灰色粉砂岩互层。其主要是由细粒沉积物在未固结或半固结而呈塑性状态时,由于风暴波浪振荡致沉

积物液化引起原生层理的弯曲变形。研究区包卷层理一般限于一个层内连续分布,它与上下岩层呈突变接触,但岩性一致,并向顶部或底部消失,岩层产状基本保持不变。包卷层理的大小不一,但普遍规模较大,形态不规则,小的只有 10 cm 左右,大的长达 290 cm,宽 70 cm(图 3a,b)。

(3) 枕状(椭球状)构造

枕状(椭球状)构造是指砂岩层断开并陷入泥岩中形成的许多紧密或稀疏排列的椭球状或枕状块体<sup>[17]</sup>。该构造主要分布在小河坝组底部,由灰—灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩组成。它是由上覆粉砂岩、泥质粉砂岩层断开并陷入粉砂质泥岩中形成的椭球状或球状块体,一般不具内部构造,部分团块可见清晰的圈层结构。研究区小河坝底部大致可见 3 套枕状(椭球状)构造,它们规模大小不一,团

块直径 10~30 cm(图 3c1、c2,d1、d2,e1、e2)。

(4) 火焰构造

火焰构造一般与枕状—椭球状构造相伴生,位于相应的枕状—椭球状构造之间。由于下伏的粉砂质泥岩、泥岩发生液化后,由于上覆形成枕状—椭球状构造的细粉砂岩的不均匀负载压力,使得之下液化呈塑性状态的粉砂质泥岩挤入负载瘤体之间形成的,常呈薄的舌状体(图 3c1、c2,d1、d2,e1、e2)。研究区火焰构造主要分布在小河坝组底部,由灰绿色粉砂质泥岩、泥岩组成。

另外,通过对研究区野外剖面系统的观测,笔者发现在下志留统龙马溪组和小河坝组地层中,软沉积变形构造多与丘状交错层理相伴生,其表现为在软沉积变形构造下部多为较大型的丘状交错层理,其上部相对而言发育小型的丘状交错层理(图 4)。

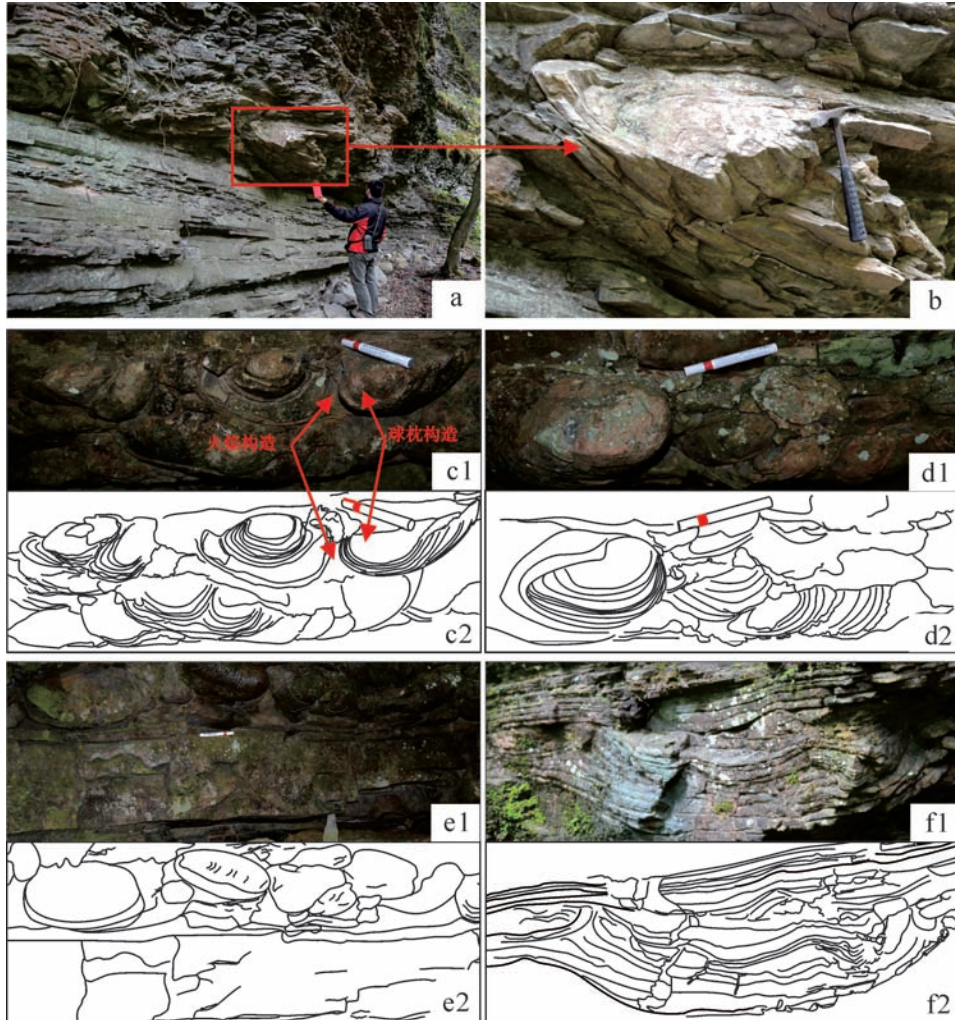


图3 研究区软沉积变形构造野外特征

a, b. 龙马溪组上部包卷层理;c1、c2,d1、d2,e1、e2. 小河坝组底部球—枕构造;f1、f2. 龙马溪中上部波浪状变形构造。

Fig.3 The outcrop characteristics of soft sediment deformation structures in the study area

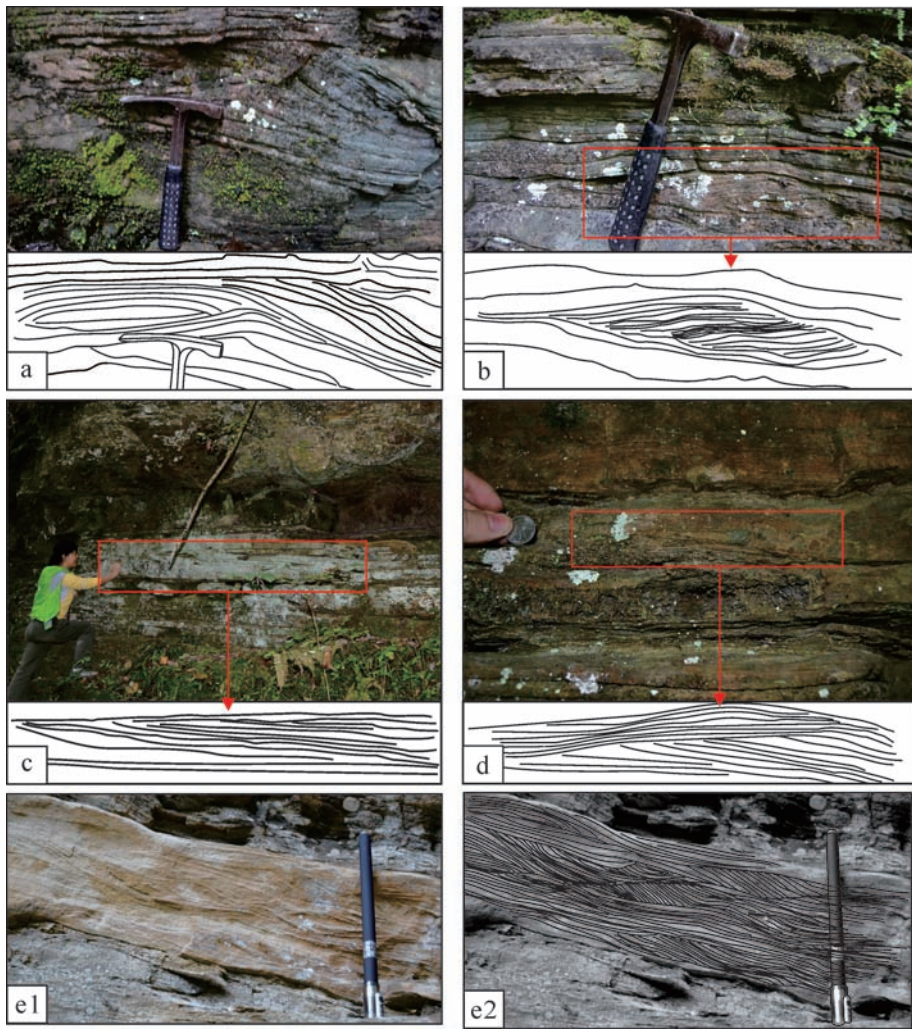


图4 研究区丘状交错层理野外特征

a.龙马溪组波浪状变形构造下部丘状交错层理;b.龙马溪组波浪状变形构造上部丘状交错层理;c.小河坝组球枕构造下部丘状交错层理;d.小河坝组球枕构造上部丘状交错层理;e1,e2.龙马溪组包卷层理下部丘状交错层理。

Fig.4 The outcrop characteristics of hummocky cross bedding of the study area

根据本区软沉积物变形构造从下至上的纵向岩性特征及剖面结构组合,总体上可分为三种类型(图

5、表2):1)具丘状交错层理的细粉砂岩、粉砂岩层,向上变为具火焰构造的粉砂质泥岩、泥岩,具枕状—

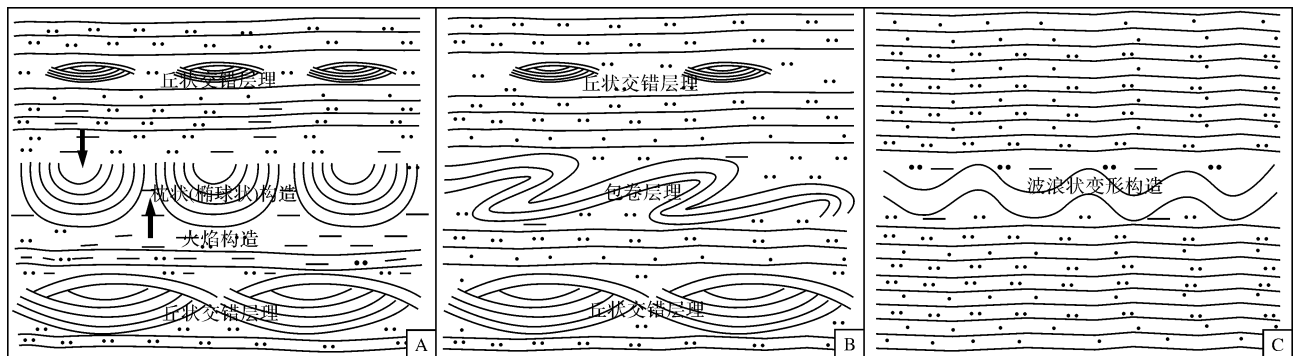


图5 研究区早志留世软沉积变形构造剖面组合示意图

Fig.5 The schematic diagram soft sediment deformation structures in Early Silurian of the study area

椭球状构造的细粉砂岩、粉砂岩层,顶部为有时具小型丘状交错层理的细粉砂岩层;2)具丘状交错层理的细粉砂岩、粉砂岩层,具包卷层理的细粉砂岩、粉砂岩层,顶部为粉砂岩层,具水平层理或小型丘状交错层理;3)具波浪状变形层构造的黄灰色泥质粉砂岩、粉砂岩组成,其上、下层为中薄层黄灰色粉砂岩、细砂岩层。

结合前人研究资料,四川盆地西北部(米仓山前

缘)大部分地区都可见这类软沉积物变形构造,如旺苍县鼓城乡、檬子乡、国华镇、楠木村,南江县等。通过对比研究发现,下志留统小河坝组底部均发育这种椭球状、枕状构造,并且可大致作为划分龙马溪组与小河坝组的标志。另外,在龙马溪组中上部均可见其他类型软沉积物变形构造(图6)。研究区软沉积物变形构造在区域上具普遍性,并且层位分布稳定,具有一定的可对比性。

表2 研究区早志留世变形构造剖面组合特征

Table 2 The characteristics of soft sediment deformation structures of the study area

类型	岩性及剖面结构组合特征	分布层位	沉积环境
A	4、中—薄层细粉砂岩层,有时发育小型丘状交错层理; 3、细粉砂岩、粉砂岩层,具枕状—椭球状构造; 2、粉砂质泥岩、泥岩层,火焰构造; 1、细粉砂岩、粉砂岩层,丘状交错层理。	小河坝组底部	中陆棚下部
B	3、中—薄层粉砂岩,具水平层理或小型丘状交错层理; 2、细粉砂岩、粉砂岩层,具包卷层理; 1、细粉砂岩、粉砂岩层,具丘状交错层理。	龙马溪组中上部	中陆棚下部
C	3、中薄层黄灰色粉砂岩、细砂岩; 2、黄灰色泥质粉砂岩、粉砂岩,具波浪状变形层构造; 1、中—薄层黄灰色粉砂岩、细砂岩。	龙马溪组中上部	中陆棚上部

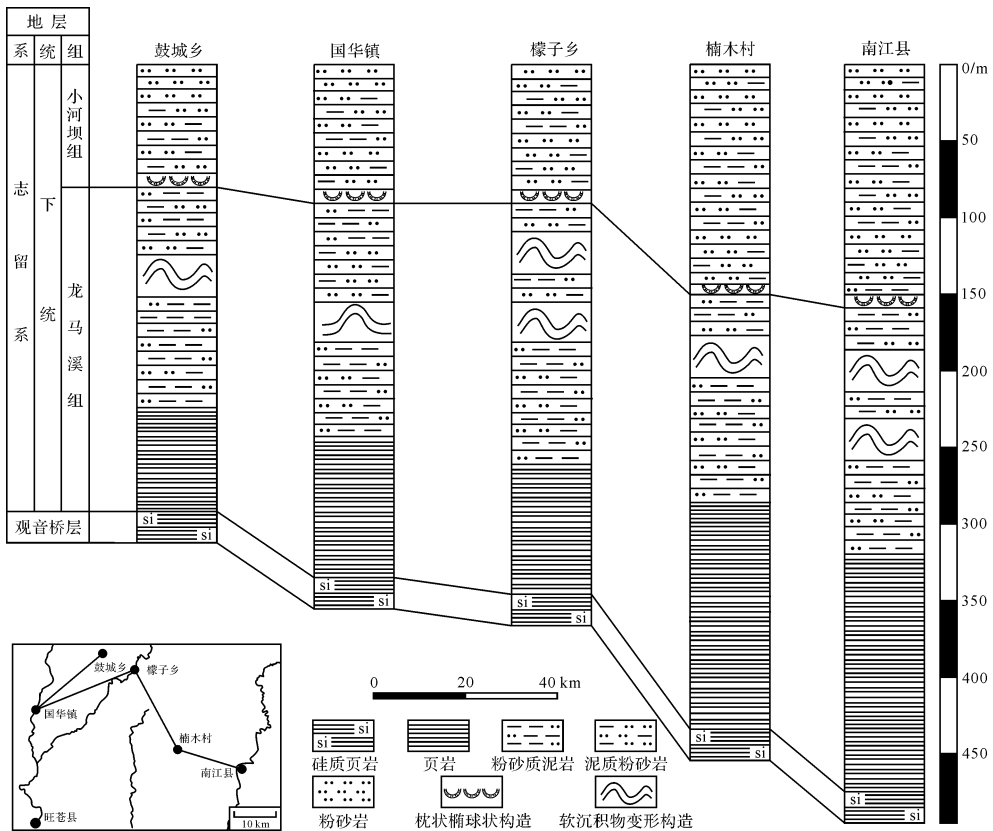


图6 研究区下志留统地层对比简图

Fig.6 The stratigraphic correlation diagram in Lower Silurian of the study area

### 3 沉积环境及触发机理讨论

研究区晚奥陶世—早志留世整体上为局限陆棚沉积环境。早志留世龙马溪期构造运动强烈,上扬子板块北缘呈现相对海平面上升,总体为局限的宽缓陆架环境。早志留世小河坝期以充填作用为主,海平面出现相对下降,沉积环境逐渐变浅,自下而上由陆棚、远滨向近滨过渡<sup>[15]</sup>。一般来说,在一个剖面上,风暴岩垂向层序往往发育不全。风暴作用随水体深度的增加而减小,从内陆棚到外陆棚,风暴作用的影响逐渐减小。近源性风暴岩相对较厚,粒粗,底部侵蚀构造发育,形成于水体相对较浅的陆棚区;远源性风暴岩则相反,厚度小,以细粒沉积为主,侵蚀构造等不发育,常形成于相对较深的陆棚区。从本区软沉积物变形构造的岩性特征、发育规模等来看,在软沉积物变形构造组合的底部,风暴侵蚀不明显,顶底界面都较平缓,丘状层理规模不大,地层沉积厚度较薄,岩性以灰色、灰绿色泥质粉砂岩、粉砂岩为主,间夹泥岩,表明当这套岩层沉积时,沉积水体相对较深,可能处于风暴浪基面之下的中陆棚环境,只有当较强的风暴发生时,才会作用到该区域,因此该区域风暴作用的强度较小,并表现出具有不定期性。根据本区软沉积物变形构造剖面组合的岩性特征、剖面组合、发育规模等分析,软沉积物变形构造 A、B 组合的岩性以泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩为主,发育规模不是很大,推测其沉积时水体相对较深,可能为中陆棚下部环境,而 C 组合的岩性以粉砂岩、细砂岩为主,推测其可能发育

在中陆棚上部环境中(图7)。

软沉积物变形构造的触发机理前人已做过较为系统的研究<sup>[9]</sup>,不外乎有如下几种机理:1)具有软沉积物变形潜在可能的沉积物;2)驱动力及边界条件,如反向密度梯度和重力剪切应力;3)沉积物液化、黏性流动等。这些触发机理,主要包括地震活动、滑坡、海啸、风暴浪等。但是,不同地区和不同时代的软沉积物变形构造的成因,一直争论不断<sup>[9,18-19]</sup>。实验证明,软沉积物变形构造的最终形态取决于沉积层的密度差、沉积物黏滞力大小、液化状况及液化后的流动过程<sup>[8,20-21]</sup>,而这些参数又取决于沉积物沉积时的理化条件及其沉积后受变形时的物理条件。现代滨、浅海因风浪而引起粉砂层液化变形的现象非常普遍。在风暴浪作用下,水动力因素与粉砂沉积物相互作用过程中,沉积物孔隙水压力扮演着重要的角色,波浪动水压力的作用在海底沉积物内会产生相应的应力和孔隙水压力。较强的动水压力在中等密度到疏松的沉积物内将产生和累积超孔隙水压力。在风浪加载的周期之间,孔隙水压力又会部分消散。随着风暴作用的周期性发生,孔隙水压力将不断地累加,直至超过上覆沉积物的自重应力而破坏,或者也会在较强风暴浪作用后由于孔隙水压力较快的消散而停止累加<sup>[22]</sup>。杨少丽等<sup>[23]</sup>通过实验模拟了在风暴作用下水下沉积物液化变形的过程,风暴开始作用时,粉砂沉积物没有液化,但当风暴达到 600 s 时 0.9 m 左右以上时,粉砂沉积物已开始液化变形,随着波浪的持续作用,粉砂沉积物液化深度渐增,若五十年一遇的

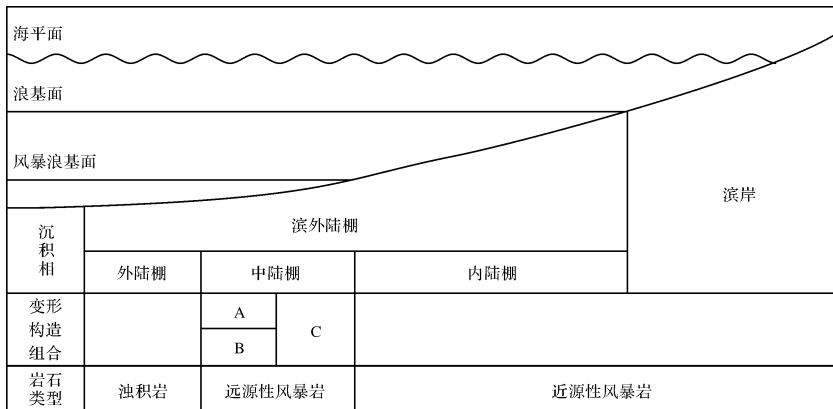


图7 研究区沉积环境及变形构造组合模式图

A.具丘状交错层理的细粉砂岩、粉砂岩层,向上变为具火焰构造的粉砂质泥岩、泥岩,具枕状—椭球状构造的细粉砂岩、粉砂岩层,顶部为有时具小型丘状交错层理的细粉砂岩层;B.具丘状交错层理的细粉砂岩、粉砂岩层,具包卷层理的细粉砂岩、粉砂岩层,顶部为粉砂岩层,具水平层理或小型丘状交错层理;C.具波浪状变形层构造的黄灰色泥质粉砂岩、粉砂岩组成,其上、下层为中薄层黄灰色粉砂岩、细砂岩层。

Fig.7 The mode pattern of sedimentary environment and soft sediment deformation structures of the study area

强风暴连续作用 1h,则大约 4 m 以上的粉砂沉积物均有可能被液化破坏。许国辉等<sup>[24]</sup>对黄河三角洲黏质粉砂土体底床进行波浪水槽试验研究证实,孔隙水压力对波浪作用下沉积物的变形有重要影响,同时波浪对底床的周期性剪切力应是沉积物变形以及使变形发展的主要因素之一。

对古代风暴浪作用引起的砂质沉积物的液化,特别是针对软沉积物变形构造与风暴浪形成的循环作用之间关系的研究不多。Martel *et al.*<sup>[25]</sup>指出,加拿大泥盆纪—石炭纪湖相泥质沉积物中粗碎屑墙的形成与风暴作用的循环载荷、微震动以及超荷有关。Molina *et al.*<sup>[26]</sup>研究了由风暴浪所形成的浅海软沉积物变形构造。Okusa<sup>[27]</sup>认为,沉积物中有效应力及孔隙压力受控于沉积物特征(密度、孔隙度、渗透率以及压缩率)和波浪特征(周期、波长、波高)。风暴的循环效应作用于海床,导致了海床沉积物的孔隙压力增加,切变强度降低,使之液化发生变形。在风暴循环应力作用下,海床砂质沉积物的液化作用是一个普遍过程<sup>[28-30]</sup>,最易液化的条件是水深 10~20 m,风暴浪高大于 6 m<sup>[31]</sup>。一般,枕状—椭球状重荷变形构造多分布于碎屑岩中<sup>[31-32]</sup>。风暴浪循环作用对海床沉积物的影响在现代海洋工程实践及海洋地质研究中受到广泛的重视<sup>[27,33-36]</sup>。研究区早志留世发现各种软沉积变形构造,虽然目前有学者将其归为由于地震因素的影响而形成,然而,通过研究区野外调查,该区并没有发现震积岩等与地震作用相关的直接证据,因此可以排除地震作用的影响。由于丘状交错层理是典型的风暴成因层理,因此风暴作用导致该区软沉积变形构造发育的可能性更大。

Boucot *et al.*<sup>[37]</sup>根据显生宙各时期敏感沉积物的数十万个资料点,再现了气候敏感沉积物的分布规律,重建了自寒武纪至中新世共 27 幅全球古气候带分布图(图 8),其中华南板块晚奥陶世—早志留世位于赤道附近,属于热带—干旱带古气候。晚奥陶世(460~450 Ma)(桑比期—凯迪期)华南板块向北偏移,并且在早凯迪阶横跨赤道<sup>[37-39]</sup>。詹仁斌等<sup>[40]</sup>在研究华南地区宝塔组灰岩时也证实了晚奥陶世华南板块位于赤道附近,早志留世基本上与晚奥陶世大致相同。

现代赤道带是世界生物多样性的中心,如印尼的珊瑚礁(赤道附近 10°)就明显比澳大利亚大堡礁或者加勒比海珊瑚礁多样化,也是强台风集中发育的区域<sup>[41-43]</sup>。现代赤道带的若干特点,如缺乏季节性和飓风可能会在岩石和化石中被记录。美国国家海洋和大气管理局对过去 160 年大西洋和东太平洋区域的飓风记录表明,在赤道南北附近 10° 区域,由于相当弱的地球自转偏向力,通常缺乏热带风暴和飓风,相反,在赤道附近 10°~30° 区域有强烈飓风发生<sup>[44]</sup>(图 9)。杜远生等<sup>[45]</sup>,杨宝忠等<sup>[46]</sup>也证实现代风暴作用主要形成于赤道附近 5°~20° 的区域,影响范围多在纬度 5°~30° 之间,少数达纬度 40°。这说明研究区在早志留世为风暴多发区。另外,研究区软沉积变形构造多与丘状交错层理相伴生,而丘状交错层理是风暴浪作用形成的典型沉积构造,间接地说明风暴作用对本区软沉积变形构造的形成具有重要的贡献。

通过对四川盆地南缘晚奥陶世—早志留世地层有机碳同位素研究,其观音桥层有机碳同位素出现正漂移,主要因为当时处于冰期气候变冷,大气二氧化碳减少,这与奥陶纪末期生物灭绝事件相吻合。然

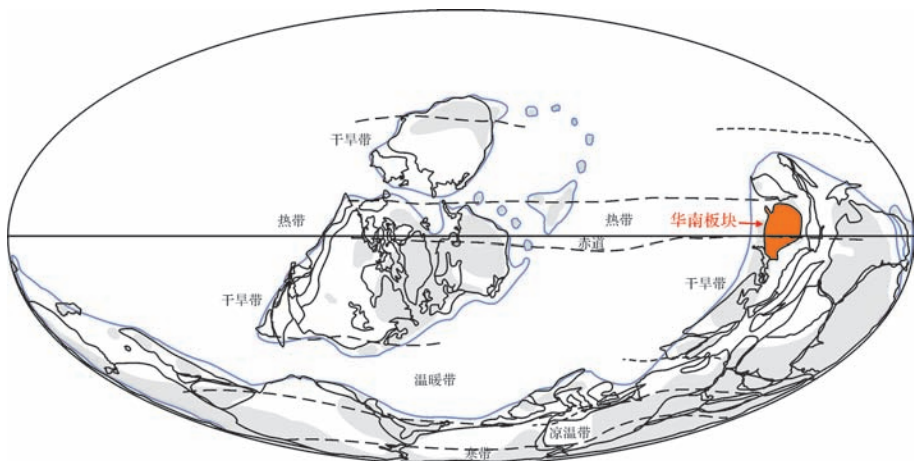


图 8 晚奥陶世—早志留世华南板块位置图(据 Boucot *et al.*<sup>[37]</sup>)

Fig.8 The south China plate location in Late Ordovician—Early Silurian(modified from Boucot, *et al.*<sup>[37]</sup>)

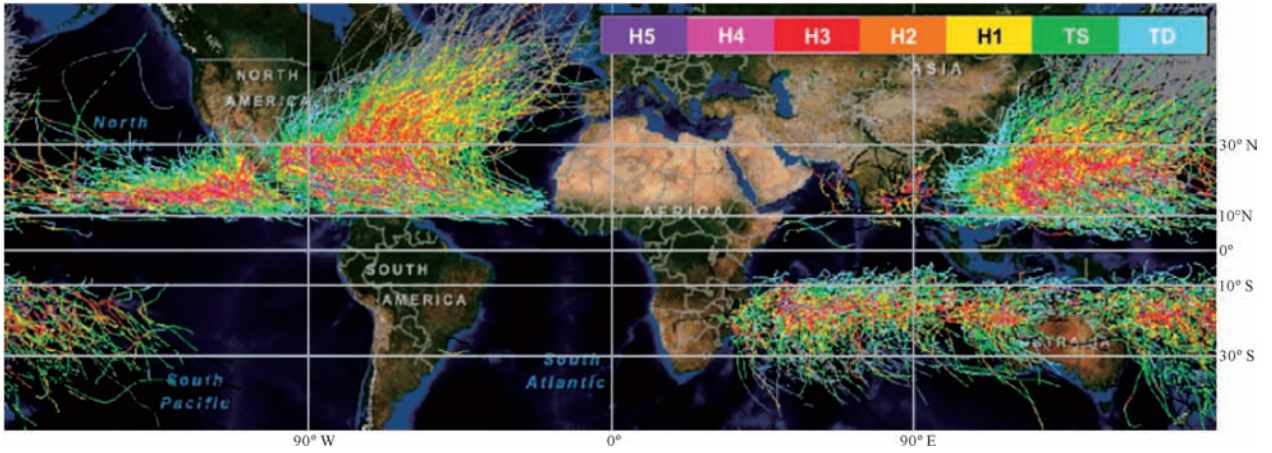


图 9 现代飓风频率和强度图(据靳吉锁等<sup>[44]</sup>)

H1~H5. 飓风等级;TS.热带风暴;TD.热带气旋

Fig.9 The frequency and intensity map of modern hurricane(modified from Jin *et al.*<sup>[44]</sup>)

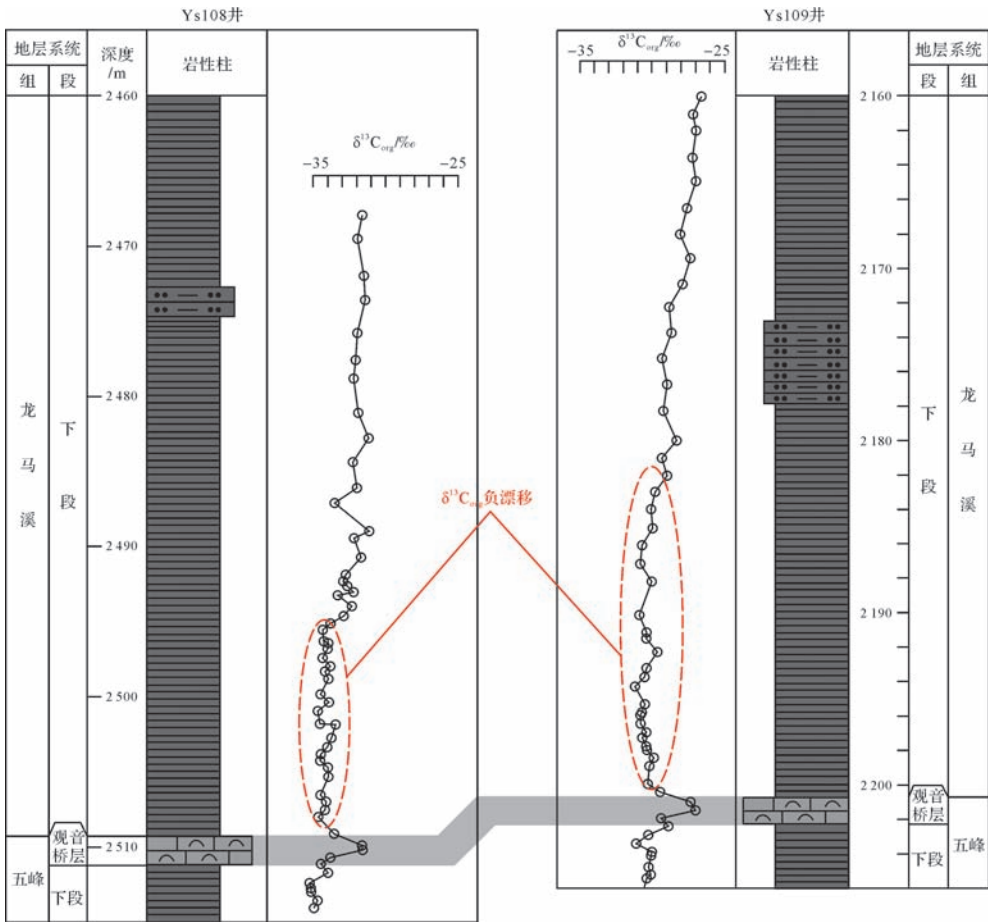


图 10 四川盆地南缘晚奥陶世—早志留世有机碳同位素特征

Fig.10 The characteristics of the organic carbon isotopes on the southern margin of Sichuan Basin in Late Ordovician–Early Silurian

而,其下志留统龙马溪组下部地层中有机碳同位素存在明显负漂移(图 10)。目前,显生宙以来有机碳同位素的研究比较深入,通过  $\delta^{13}C$  变化可以指示地质

历史过程中大气  $CO_2$  的变化<sup>[47-50]</sup>。四川盆地南缘早志留世有机碳同位素的负漂移表明当时大气二氧化碳含量增多,温度升高,风暴、干旱等极端气候事件在



赤道附近的地区时有发生,这为本区风暴沉积及软沉积变形构造的发育提供可能性。另外,张廷山等<sup>[51]</sup>在川西北地区早志留世地层中发现了风暴岩并讨论了风暴岩的类型及其发育的沉积环境;白志强等<sup>[52]</sup>在米仓山南缘中志留世罗惹坪组顶部也发现了多套风暴沉积。这也为研究区早志留世风暴作用的存在提供了佐证。

## 4 结论

(1) 米仓山前缘软沉积物变形构造纵向上分布于龙马溪组中上部及小河坝组底部,类型多样。根据其形态特征及地层分布,主要可划分出波浪状变形层构造、包卷层理、枕状(椭球状)构造、火焰构造等。它们大小不一,并多与丘状交错层理相伴。根据软沉积物变形构造自下至上的纵向岩性及剖面结构组合将其分为三种类型:A.具丘状交错层理的细粉砂岩、粉砂岩层,向上变为具火焰构造的粉砂质泥岩、泥岩,具枕状—椭球状构造的细粉砂岩、粉砂岩层,顶部为有时具小型丘状交错层理的细粉砂岩层;B.具丘状交错层理的细粉砂岩、粉砂岩层,具包卷层理的细粉砂岩、粉砂岩层,顶部为粉砂岩层,具水平层理或小型丘状交错层理;C.具波浪状变形层构造的黄灰色泥质粉砂岩、粉砂岩组成,其上、下层为中薄层黄灰色粉砂岩、细砂岩层。根据软沉积物变形构造岩性特征,结合区域沉积背景推测当时的沉积环境属于中陆棚,其中A、B组合位于中陆棚下部环境,C组合位于中陆棚上部环境。

(2) 根据研究区古气候、古板块资料以及现代风暴研究成果,结合四川盆地南缘晚奥陶世—早志留世地层有机碳同位素研究,说明了当时研究区处于风暴频发的热带、干旱带地区,米仓山前缘软沉积物变形构造为风暴作用所影响。另外,该区软沉积物变形构造的发现对早志留世古地理、古气候的恢复,古扬子板块的演化提供了材料。

## 参考文献 (References)

- [1] Maltman A. On the term "soft-sediment deformation" [J]. *Journal of Structural Geology*, 1984, 6(5): 589-592.
- [2] Goodman R E, Appuhn R A. Model experiments on the earthquake response of soil-filled basins [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1966, 77(11): 1315-1326.
- [3] John D S. Determining earthquake recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments [J]. *Tectonophysics*, 1975, 29(1/2/3/4): 141-152.
- [4] Lowe D R. Water escape structures in coarse-grained sediments [J]. *Sedimentology*, 1975, 22(2): 157-204.
- [5] Allen J R L. *Sedimentary Structures, Their Character and Physical Basis* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1982: 1-515.
- [6] Maltman A. Deformation structures preserved in rocks [M] // Maltman A. *The Geological Deformation of Sediments*. Netherlands: Springer, 1994: 261-307.
- [7] Owen G. Soft-sediment deformation in upper Proterozoic Torridonian sandstones (Applecross Formation) at Torridon, northwest Scotland [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65(3a): 495-504.
- [8] Owen G. Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples [J]. *Sedimentology*, 1996, 43(2): 279-293.
- [9] Owen G, Moretti M, Alfaro P. Recognising triggers for soft-sediment deformation: current understanding and future directions [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235(3/4): 133-140.
- [10] Vanneste K, Meghraoui M, Camelbeeck T. Late Quaternary earthquake-related soft-sediment deformation along the Belgian portion of the Feldbiss Fault, Lower Rhine Graben system [J]. *Tectonophysics*, 1999, 309(1/2/3/4): 57-79.
- [11] Seilacher A. Fault-graded beds interpreted as seismites [J]. *Sedimentology*, 1969, 13(1/2): 155-159.
- [12] Hempton M R, Dewey J F. Earthquake-induced deformational structures in young lacustrine sediments, East Anatolian Fault, southeast Turkey [J]. *Tectonophysics*, 1983, 98(3/4): T7-T14.
- [13] Shiki T, Yamazaki T. Tsunami-induced conglomerates in Miocene upper bathyal deposits, Chita Peninsula, central Japan [J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 104(1/2/3/4): 175-188.
- [14] 陶洪祥,何恢亚,王全庆,等. 扬子板块北缘构造演化史 [M]. 西安:西北大学出版社,1993:1-78. [Tao Hongxiang, He Huiya, Wang Quanqing, et al. *Historical Evolution of Tectonics in North Rim of Yangzi Plate* [M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1993: 1-78.]
- [15] 余谦,牟传龙,张海全,等. 上扬子北缘震旦纪—早古生代沉积演化与储层分布特征 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 672-680. [Yu Qian, Mu Chuanlong, Zhang Haiquan, et al. *Sedimentary evolution and reservoir distribution of northern Upper Yangtze plate in Sinian-Early Paleozoic* [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 672-680.]
- [16] 张海全,许效松,余谦,等. 扬子板块西北缘晚奥陶—早志留世岩相古地理演化与烃源岩的关系 [J]. *石油天然气学报:江汉石油学院学报*, 2010, 32(2): 43-47. [Zhang Haiquan, Xu Xiaosong, Yu Qian, et al. *Relationship between lithofacies paleogeographic evolution and source rocks of the Late Ordovician-Early Silurian in northwestern Yangtze Plate* [J]. *Journal of Oil and Gas Technology: Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2010, 32(2): 43-47.]
- [17] 朱筱敏. *沉积岩石学* [M]. 4版. 北京:石油工业出版社,2008: 94-98. [Zhu Xiaomin. *Sedimentary Petrology* [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 94-98.]
- [18] Jones A P, Omoto K. Towards establishing criteria for identifying

- trigger mechanisms for soft-sediment deformation: a case study of Late Pleistocene lacustrine sands and clays, Onikobe and Nakayamadaira Basins, northeastern Japan[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(6): 1211-1226.
- [19] Owen G, Moretti M. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235(3/4): 141-147.
- [20] Owen G. Load structures: gravity-driven sediment mobilization in the shallow subsurface [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 216(1): 21-34.
- [21] Moretti M, Alfaro P, Caselles O, et al. Modelling seismites with a digital shaking table [J]. *Tectonophysics*, 1999, 304(4): 369-383.
- [22] 李安龙, 杨荣民, 林霖, 等. 波浪加载下海底土质特性变化的研究 [J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(1): 101-106. [Li Anlong, Yang Rongmin, Lin Lin, et al. Study on the geotechnical behavior of seabottom sediments under wave-loading [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(1): 101-106.]
- [23] 杨少丽, 沈渭铨, 杨作升. 波浪作用下海底粉砂液化的机理分析 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17(4): 28-37. [Yang Shaoli, Shen Wei-quan, Yang Zuosheng. The mechanism analysis of seafloor silt liquefaction under wave loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(4): 28-37.]
- [24] 许国辉, 常瑞芳, 李安龙, 等. 波浪作用下粘质粉砂底床性态变化的试验研究 [J]. 黄渤海海洋, 2000, 18(1): 19-26. [Xu Guohui, Chang Ruifang, Li Anlong, et al. Experimental studies on behavior variation of clay-silt bed under wave-loading [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2000, 18(1): 19-26.]
- [25] Martel A T, Gibling M R. Clastic dykes of the Devonian-Carboniferous Horton Bluff Formation, Nova Scotia: storm-related structures in shallow lakes [J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 87(1/2): 103-119.
- [26] Molina J M, Alfaro P, Moretti M, et al. Soft-sediment deformation structures induced by cyclic stress of storm waves in tempestites (Miocene, Guadalquivir Basin, Spain) [J]. *Terra Nova*, 1998, 10(3): 145-150.
- [27] Okusa S. Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments [J]. *Géotechnique*, 1985, 35(4): 517-532.
- [28] Massari F, Parea G C. Progradational gravel beach sequences in a moderate-to high-energy, microtidal marine environment [J]. *Sedimentology*, 1988, 35(6): 881-913.
- [29] Kerr M, Eyles N. Storm-deposited sandstones (tempestites) and related ichnofossils of the Late Ordovician Georgian Bay Formation, southern Ontario, Canada [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1991, 28(2): 266-282.
- [30] Molina J M, Ruiz-Ortiz P A, Vera J A. Calcareous tempestites in pelagic facies (Jurassic, Betic Cordilleras, southern Spain) [J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 109(1/2): 95-109.
- [31] Alfaro P, Delgado J, Estévez A, et al. Liquefaction and fluidization structures in Messinian storm deposits (Bajo Segura Basin, Betic Cordillera, southern Spain) [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91(3): 505-513.
- [32] Moretti M, Soria J M, Alfaro P, et al. Asymmetrical soft-sediment deformation structures triggered by rapid sedimentation in turbiditic deposits (Late Miocene, Guadix Basin, southern Spain) [J]. *Facies*, 2001, 44(1): 283-294.
- [33] Madsen O S. Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed [J]. *Géotechnique*, 1978, 28(4): 377-393.
- [34] Liam Finn W D, Siddharthan R, Martin G R. Response of seafloor to ocean waves [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109(4): 556-572.
- [35] Lee F H, Foo S L. Undrained cyclic loading on a saturated dense sand stratum [J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3): 451-465.
- [36] Foda M A. Sea floor dynamics [J]. *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, 1995, 1: 77-123.
- [37] Boucot A J, 陈旭, Scotese C R, 等. 显生宙全球古气候重建 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-173. [Boucot A J, Chen Xu, Scotese C R, et al. *Phanerozoic Global Paleoclimate Reconstruction* [M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-173.]
- [38] Cocks L R M, Torsvik T H. The dynamic evolution of the Palaeozoic geography of eastern Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 117: 40-79.
- [39] Torsvik T H, Cocks L R M. New global palaeogeographical reconstructions for the Early Palaeozoic and their generation [J]. *Geological Society, London, Memoirs*, 2013, 38(1): 5-24.
- [40] Zhan Renbin, Jin Jisuo, Liu Jianbo, et al. Meganodular limestone of the Pagoda Formation: a time-specific carbonate facies in the Upper Ordovician of South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 448: 349-362.
- [41] Roberts C M, McClean C J, Veron J E N, et al. Marine biodiversity hotspots and conservation priorities for tropical reefs [J]. *Science*, 2002, 295(5558): 1280-1284.
- [42] Marshall C R. Fossil record reveals tropics as cradle and museum [J]. *Science*, 2006, 314(5796): 66-67.
- [43] Kiessling W, Simpson C, Foote M. Reefs as cradles of evolution and sources of biodiversity in the Phanerozoic [J]. *Science*, 2010, 327(5962): 196-198.
- [44] Jin J, Harper D A T, Cocks L R M, et al. Precisely locating the Ordovician equator in Laurentia [J]. *Geology*, 2013, 41(2): 107-110.
- [45] 杜远生, 韩欣. 滇中元古代昆阳群因基因组碎屑风暴岩及其意义 [J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 259-262. [Du Yuansheng, Han Xin. Clastic tempestite and its significance in Yinmin Formation, Kunyang Group (Mesoproterozoic) in central Yunnan province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(2): 259-262.]
- [46] 杨宝忠, 杨坤光, 夏文臣. 鄂东黄石地区中上寒武统风暴岩的发现及意义 [J]. 地质科技情报, 2007, 26(3): 33-36. [Yang Baozhong, Yang Kunguang, Xia Wenchen. Discovery of Middle-Upper Cambrian tempestites and its significance in Huangshi, Eastern Hubei province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(3): 33-36.]
- [47] Dean E D, Arthur M A, Claypool G E. Depletion of  $^{13}\text{C}$  Creta-

- ceous marine organic matter; source, diagenetic, or environmental signal? [J]. *Marine Geology*, 1986, 70(1/2): 119-157.
- [48] Freeman K H, Hayes J M. Fractionation of carbon isotopes by phytoplankton and estimates of ancient CO<sub>2</sub> levels[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6(2): 185-198.
- [49] Jasper J P, Hayes J M. A carbon isotope record of CO<sub>2</sub> levels during the Late Quaternary[J]. *Nature*, 1990, 347(6292): 462-464.
- [50] Hollander D J, McKenzie J A. CO<sub>2</sub> control on carbon isotope fractionation during aqueous photosynthesis: a paleo-pCO<sub>2</sub> barometer [J]. *Geology*, 1991, 19(9): 929-932.
- [51] 张廷山,侯方浩,高卫东,等. 川西北地区早志留世风暴岩及其环境与古生态意义[J]. *沉积学报*, 1993, 11(2): 66-74. [Zhang Tingshan, Hou Fanghao, Gao Weidong, et al. Tempestites and the environmental paleoecological significance of Early Silurian, Nw Sichuan area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1993, 11(2): 66-74.]
- [52] 白志强,刘树根,宋金民,等. 米仓山南缘中志留统罗惹坪组风暴岩沉积特征及其意义[J]. *沉积学报*, 2015, 33(2): 226-231. [Bai Zhiqiang, Liu Shugen, Song Jinmin, et al. Sedimentary characteristics and geological implications of tempestite, Luoreping Formation, Middle Silurian in southern Micangshan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(2): 226-231.]

## A Discussion on Deformation Structures of Early Silurian Soft Sediment and Its Trigger Mechanism in the front of Micangshan Mountain

ZHANG TingShan<sup>1,2</sup>, DU Xiang<sup>1,2</sup>, YANG Wei<sup>1,2</sup>, CHEN XiaoHui<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

**Abstract:** As we know, soft sediment deformation structures in the geological history can be found in different space-time sedimentary rocks, however, its deformation process, active force and trigger mechanism are still in dispute in academia. Through the observation on the field outcrops in the front of Micangshan, there develop multiple sets of soft sediment deformation structures in the sandstone, siltstone and shale strata in Early Silurian. The distribution of the layer is stable, and each stratum has different morphological characters. According to its morphological characteristics and stratigraphic distribution, it can be divided into wavy deformation structure, convolute bedding, pillow structure and flamy structure. What's more, they always accompany with hummocky cross-beddings. On the basis of the lithologic character and profile structure combination of the soft sediment deformation structures, they can be divided into three types, which all belong to the continental shelf sedimentary environments. Based on the characteristics of the soft sediment deformation structures and combined with the paleoclimate and paleo-plate materials, carbon isotope data, and modern hurricane research results, the study area is located in the north of the equator. There is hot and arid, and the storm occurs frequently. The soft sediment deformation structures of the research area are mainly the consequence of the storm. Unconsolidated sediments are oscillated and liquefied when the strong storm hit the bottom of the sea. The discovery and the trigger mechanism of the soft sediment deformation structures in the front of Micangshan has a great significance for studying the recovery of the paleoclimate and paleo-plate, and the evolution of ancient Yangtze plate.

**Key words:** soft sediment deformation structures; storm action; Early Silurian; the front of Micangshan