

文章编号: 1000-0550(2012)05-0795-11

浙江桐村寒武系大陈岭组地震驱动的 软沉积变形构造特征分析^①

刘礼洁¹ 郭福生^{1,2} 严兆彬^{1,2}

(1. 东华理工大学地球科学学院 江西抚州 344000; 2. 核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地 南昌 330013)

摘要 软沉积变形构造是确立古地震是否发育的关键证据之一。在浙江桐村寒武系大陈岭组剖面确立的三个地震驱动的软沉积变形事件层中,主要软沉积变形有地震微断裂、微褶皱、液化构造,它们反映出沉积物遭受地震作用时,流体压力改变的程度以及发生液化的强度。其中,微褶皱构造主要包括微褶皱纹层和与液化脉有关的褶皱;液化构造包括泄水构造和液化脉构造。通过对软沉积变形构造的形态特征、产状观察和统计,与其它非地震成因的类似构造相区分,进一步确立地震是它们最有可能是驱动机制,统计出三个事件层中地震扰动层的厚度和震中距,估算事件层Ⅱ和事件层Ⅲ的震级为6~7级和6级左右,并初步认为在大陈岭组地震带以外的地层中,存在臼齿构造。从而,完善了震积岩的识别标志和岩相序列,深化了对浙西寒武系大陈岭组地震事件沉积的认识。

关键词 古地震 软沉积变形构造 驱动机制 浙西寒武系

第一作者简介 刘礼洁 女 1986年出生 硕士研究生 沉积盆地分析 E-mail: llj102510251025@yahoo.com.cn

通讯作者 郭福生 E-mail: fsguo@263.net

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

自从 Seilacher^[1]于1969年首次提出了震积岩(seismites)一词用以解释软沉积物中发育的同沉积变形构造以来,国内外学者对不同沉积环境中发育的震积岩展开了广泛的研究^[2~6]。近几十年来,软沉积变形构造成为确定古地震是否发育的关键标志^[7],Wheeler^[5]就对地震和非地震成因的软沉积变形特征进行了对比研究。

迄今,已经确立了多种类型的与地震有关的软沉积变形构造类型,包括丘槽构造^[8,9]、液化底辟构造^[10,11]、震裂构造^[12,13]、球枕构造^[14,15]、泄水构造^[16,17]、液化脉^[12,18]、水压式破裂构造^[10,19]、滑混层构造^[11,12,20]。同时,将软沉积变形构造研究应用到了不同的岩石类型、不同沉积环境、不同构造背景下,并建立了相应的事件沉积序列。主要表现在三个方面:(1)建立海相碳酸盐岩型事件沉积序列。宋天锐^[21]研究北京十三陵前寒武纪,乔秀夫等^[3]研究华北地台东部震旦系,等等;(2)建立大陆边缘震积岩事件沉积序列。孙晓猛等^[22]研究滇西北金沙江中段大陆边缘地区沉积;(3)建立陆相碎屑岩型震积岩事件沉

积序列。付文利等^[23]研究东营凹陷沙三段、沙四段震积岩,Seilacher^[1,24]研究美国加州中新世具递变断层特征的页岩,等等。

浙西寒武系大陈岭组地震事件沉积的研究正处于深入认识、确定阶段。严兆彬等^[25]对浙西寒武系碳酸盐岩做调查时,在浙西开化裴岭脚剖面、常山芳村剖面和常山白石剖面的寒武系大陈岭组中,首次识别出液化泥晶脉、微同生变形构造、角砾岩及与之伴生的浊积岩等典型的地震—海啸沉积标志(图1),提出了震积岩—海啸岩—震浊积岩的事件地震事件沉积,初步确定地震事件可能与开化—淳安大断裂活动有关。笔者等本次通过较细致的野外专项调查,选择浙西的桐村地区作为进一步详细研究的典型剖面,对桐村剖面寒武系软沉积变形构造的类型、形态与时空发育特征进行了详细的研究,分析其驱动机制,建立三个软沉积变形事件层,结合该地区地质背景估算出相应震级大小,并得出事件层Ⅱ沉积时期为开化—淳安断裂带活动强烈期,从而,进一步探索了该地区震积岩的识别标志及其岩相序列,具有重要的震积地层学^[26]和石油地质意义。

^①国家自然科学基金项目(批准号:41072077)资助。
收稿日期:2011-09-02;收修改稿日期:2011-12-12

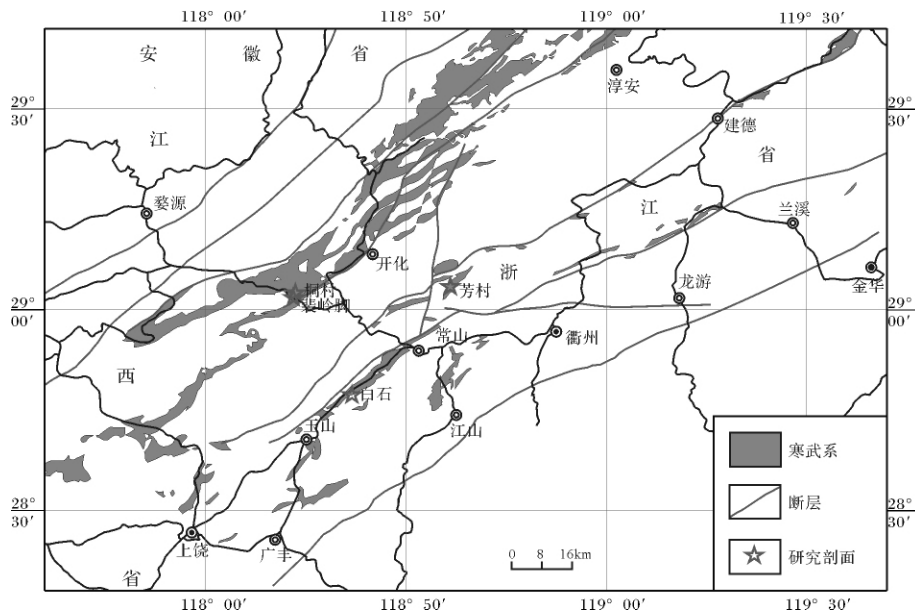


图1 浙西地区寒武系分布图

Fig. 1 The distribution of the Cambrian strata in the west of Zhejiang province

1 区域地质背景

浙西地区位于扬子地块东南缘,东邻华夏地块,在新元古代—早古生代处于浙皖裂陷盆地演化阶段^[27, 28],是早古生代浙皖海盆的东南部分。开化—淳安大断裂位于裂陷盆地中央,沿临安、淳安、开化呈北东走向,向南延至江西境内,早古生代为浙皖海盆长期持续沉降中心^[29]。研究剖面在浙江开化县桐村地区,笔者等对其寒武系地层剖面进行了野外观测(图1)。

桐村剖面可以观察到的地层从早到晚有荷塘组、大陈岭组和杨柳岗组。桐村地区的大陈岭组与上覆的杨柳岗组和下伏的荷塘组均为整合接触关系。荷塘组岩性主要是炭质页岩、硅质岩,下部可见石煤层;杨柳岗组的岩性主要是深灰色微晶灰岩、含泥含云微晶灰岩夹炭质页岩、钙质页岩;大陈岭组的岩性是深灰色中厚层微晶含云灰岩,层间夹泥质白云岩条带、薄层的炭质页岩,中部和上部还夹有硅质岩层,鸟眼构造、缝合线构造发育,属台地潮坪相,处于潮间—潮上带。剖面上已发现的软沉积变形层均发育于大陈岭组中(图2),其中,荷塘组在此剖面中未见底,杨柳岗组在此剖面中未见顶。

2 软沉积变形构造类型及特征

软沉积变形又称准同生变形,是指沉积物沉积之

后、固结之前由于差异压实、液化、滑移、滑塌等形变的变形构造^[13]。软沉积变形构造形态多样,成因多种,区分地震和其它非地震因素对松软沉积物的影响,目前公认的有四个标准:(1)与震源同期的变形;(2)从时间和地层上都受有限的层位内广泛发生的变形;(3)变形可显示出向可能的震中区变形在频率和强度上系统的增加;(4)排除其他可能因素的能力^[10, 30, 31]。

桐村剖面大陈岭组中,迄今为止已识别出3个地震驱动的软沉积变形事件层,全部发育于中上部大陈岭组碳酸盐岩中。

事件层I发育于大陈岭组的中部,其上下未震层均为白云质灰岩,下部含鸟眼构造和缝合线构造,上部是灰岩与泥灰岩互层,厚度为10~15 cm,其中有液化脉、微褶皱等软沉积变形构造。

事件层II发育于大陈岭组中上部,其上、下都是白云质灰岩。在此事件层中灰岩层存在地震微断裂;液化脉发育强烈,与岩层高角度相交;纹层受脉体挤压,发生明显被动变形。由于受到后期断裂构造影响,含弯曲纹层的灰岩层有整体断裂移位的现象。

事件层III发育于大陈岭组上部,与事件层II的垂直距离为0.96 m,其上下均为白云质灰岩,但多为薄层状,有微褶皱、少量液化脉构造等软沉积变形构造。

在这三个事件层中,可识别出的软沉积变形构造主要有地震微断裂、微褶皱、液化构造,它们反映出沉

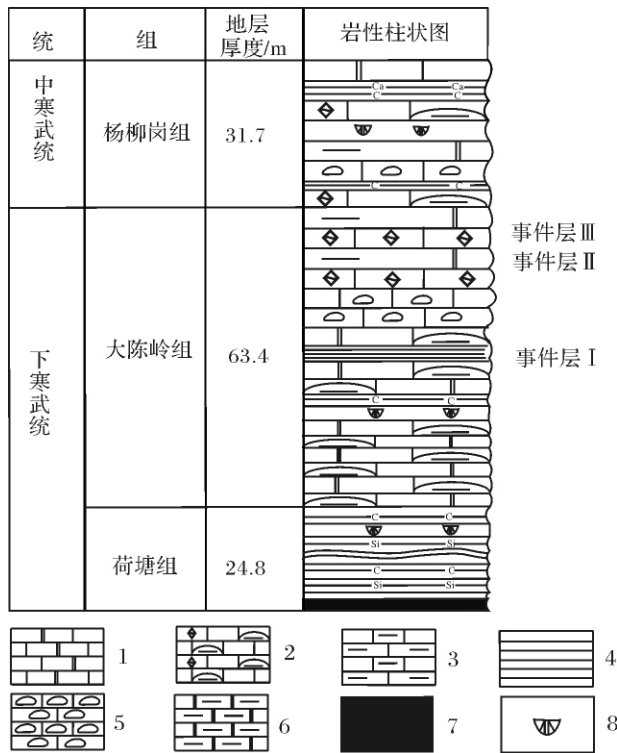


图 2 浙西寒武系大陈岭组桐村剖面地层柱状图

- 1. 白云质灰岩; 2. 泥晶灰岩; 3. 泥质灰岩; 4. 黑色页岩;
- 5. 透镜状灰岩; 6. 泥质白云岩; 7. 石煤; 8. 页虫化石

Fig. 2 Column of Cambrian Dachenling formation strata about the Tongcun section in the west of Zhejiang province

- 1. Dolomitic limestone; 2. Micrite; 3. Argillaceous limestone;
- 4. Black shale; 5. Lenticular limestone; 6. Argillaceous dolomite;
- 7. Stone coal; 8. Page gondii fossil

积物遭受地震作用时, 流体压力改变的程度以及发生液化的强度, 以上三种构造往往彼此相伴生。同时, 这些软沉积变形构造分别代表着地震活动的不同侧面。

2.1 地震微断裂及其形成机制

地震断裂构造是一种沉积物液化后流动局部压力变大而导致的破裂构造, 是一种注入能量较大的地震液化构造。地震微断裂可单独发育, 也可成组出现, 组成阶梯状微断层或其它形状。桐村剖面在事件层 II 中较典型, 断层规模小, 间距亦小, 倾角较陡, 多在 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 裂缝面较平直(图版 I-1), 是张性裂隙。由岩层底部向上逐渐变细变少或均匀分布, 限于层内发育, 均不穿越上、下层(图版 I-2), 不具共扼性, 沿断裂面充填灰泥质。

图版 I-3 是在事件层 II(图版 I-1)中, 野外取回样品的镜下照片, 从图版 I-3 观察, 纹层被错断并出现位移, 断裂缝被液化脉充填, 与液化脉接触的纹

层的两端并未出现弯曲, 微断裂呈现出的特点与野外肉眼观测的相一致。

不同于后期构造形成的断裂, 后期构造形成的断裂以张扭或压扭性断裂为多, 断裂面平直且排列规整有序, 断裂切层、具共扼性, 断裂缝多为结晶方解石充填, 后期构造断裂往往切割早期形成的地震断裂^[32]。

2.2 微褶皱及其形成机制

微褶皱通常表现为小型的层间褶皱, 同球枕构造和液化脉构造一样被认为是一种典型的地震驱动的软沉积物变形构造^[8]。在桐村剖面大陈岭组三个地震事件层中, 微褶皱是很常见的软沉积物变形构造, 成为判断事件层成因机制的一个重要因素。

微褶皱是在能量注入后, 孔隙流体压力增大, 减少了颗粒间的支撑强度而使沉积物发生塑性变形形成的^[16]。细粒沉积物处于半固结塑性状态, 在外力振动和重力作用下发生弯曲、卷曲和扭曲为主的变形, 形成小褶皱或微褶皱。

在三个事件层中均发育着半塑性—塑性微褶皱, 主要有 2 种构造形态: 微褶皱纹层(图版 I-4); 与液化脉有关的纹层(图版 I-6)。与地层相交的角度较缓, 发育程度较小, 形态不规则, 不协调, 均为层内变形, 在纵向上主要表现变形层在上、下两侧均夹持于未变形沉积层之间, 但又与构造褶皱不同, 外观较为杂乱。事件层 I 微褶皱波长在 10 cm 左右, 振幅 1 ~ 2.5 cm。事件层 II 中, 底部微褶皱以包卷、倒扣变形为主, 微褶皱的上、下部零星可见液化脉; 顶部微褶皱上下变形强烈, 下部的卷曲纹层的波长为 12 ~ 24 cm, 振幅在 5 cm 左右, 上部卷曲纹层相对较平直, 波长为 40 cm 左右, 甚至更大, 振幅约为 3 cm。事件层 III 向上见丘状层理, 变形更弱, 波长为 45 cm 左右, 甚至更大, 振幅在 2.5 cm 左右。

根据软沉积变形事件层 I 上部地层发育浊积岩, 确定存在古斜坡^[25]。然而, 滑坡机制形成的软沉积物变形有 4 个基本特征: (1) 构造要素发育优势方位, 与古坡向、断裂带大角度相交; (2) 异地沉积特征^[33], 与上、下未变形岩层岩性、岩石组合、沉积相不一致, 具有基底滑积面; (3) 大量发育不对称褶皱^[34]; (4) 无均一液化层。而桐村剖面三个事件层中的微褶皱, 其主体是原地、对称褶皱, 存在均一液化层, 明显与滑坡成因的变形构造第二、三、四条特征不符。

为进一步确定微褶皱的位态特征, 对桐村剖面的微褶皱轴面进行了随机测量, 共获得 39 组数据(表

表1 大陈岭组中水塑性皱褶轴面产状实测数据

Table 1 Data of the axial occurrence of the folds in the hydraulic plastic deformation of Dachening Formation

皱褶所处层位	地层产状	轴面				
		野外测量值	水平校正值	野外测量值	水平校正值	
事件层 I	150° ∠ 50°	21° ∠ 67°	197° ∠ 79°	26° ∠ 63°	198° ∠ 85°	
		40° ∠ 55°	21° ∠ 81°	35° ∠ 66°	206° ∠ 88°	
		27° ∠ 70°	203° ∠ 80°	0° ∠ 55°	175° ∠ 80°	
		22° ∠ 60°	193° ∠ 85°	10° ∠ 50°	180° ∠ 88°	
		36° ∠ 58°	21° ∠ 86°	26° ∠ 58°	195° ∠ 89°	
		151° ∠ 51°	344° ∠ 71°	165° ∠ 59°	346° ∠ 66°	
事件层 II	112° ∠ 40°	347° ∠ 56°	165° ∠ 75°	354° ∠ 51°	169° ∠ 81°	
		347° ∠ 51°	164° ∠ 79°	339° ∠ 60°	158° ∠ 69°	
		346° ∠ 69°	161° ∠ 86°	339° ∠ 72°	157° ∠ 80°	
		340° ∠ 73°	158° ∠ 79°	342° ∠ 64°	156° ∠ 88°	
		332° ∠ 64°	148° ∠ 84°	346° ∠ 68°	161° ∠ 86°	
		346° ∠ 72°	163° ∠ 83°	333° ∠ 62°	148° ∠ 86°	
事件层 III	105° ∠ 33°	345° ∠ 59°	335° ∠ 86°			
		342° ∠ 63°	334° ∠ 83°	340° ∠ 65°	333° ∠ 86°	
		344° ∠ 63°	335° ∠ 83°	355° ∠ 74°	350° ∠ 87°	
		347° ∠ 64°	338° ∠ 82°			
		155° ∠ 37°	205° ∠ 50°	244° ∠ 36°	200° ∠ 55°	234° ∠ 36°
		208° ∠ 55°	241° ∠ 41°	202° ∠ 49°	243° ∠ 34°	
	130° ∠ 46°	84° ∠ 19°	202° ∠ 70°	221° ∠ 49°		
	199° ∠ 56°	231° ∠ 36°	201° ∠ 46°	247° ∠ 31°		
	204° ∠ 60°	232° ∠ 42°				

1) 水平校正后统计分析表明(图3),事件层 I 中微褶皱的轴面优势方位为倾向 202°, 倾角 77°; 事件层 II 中微褶皱的轴面优势方位为 250°, 倾角 44°; 事件层 III 中的微褶皱的轴面优势方位为走向近 EW 向, 倾角 77°。根据槽模的展布方向, 判定该地区古斜坡向 NE 方向倾斜^[25]。因此排除其滑坡成因的可能性。

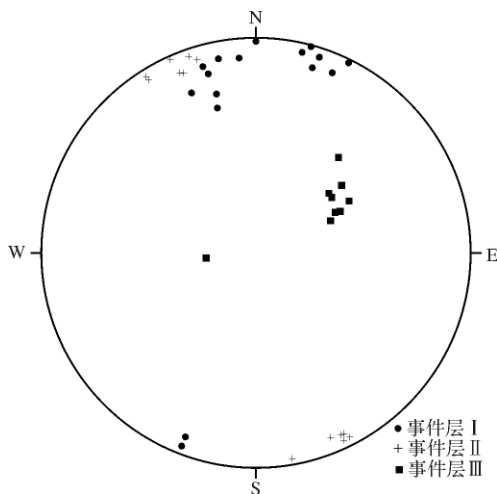


图3 三个事件层中水塑性轴面法线赤平投影图 (下半球投影)

Fig. 3 Equal-area stereonet plot of axial planes of the folds in the hydraulic plastic deformation about three sediment deformation events (lower hemisphere)

此外,微褶皱、液化构造和地震微断裂三者之间的紧密共生关系,以及它们在空间上的变化规律,也表示微褶皱为瞬时性同沉积或软沉积变形构造,其驱动机制可能为地震振动。

2.3 液化构造及其形成机制

液化构造形成是由于沙质层中因更大的能量注入,使砂泥粒滑移改变排列,应力由沙骨架转移至孔隙水,引起超孔隙水压力,当全部应力转向孔隙水,超孔隙水压力等于饱和砂所承受的总压力时,砂层的上部形成“液化均一层”。在桐村剖面大陈岭组软沉积变形事件层中,可观察到的液化构造包括泄水构造和液化脉构造。

2.3.1 液化泄水构造

泄水构造发育于灰岩中,一种表现为纹层呈碗状或倒碗状,孔隙水逃逸通道两边的碗缘纹层弯曲(图版 I-5);另一种表现为纹层较平直,孔隙水逃逸通道近垂直于纹层,通道呈现弯曲状(图版 II-1)。但是,以上两种情况均未见液化脉,说明此处泄水构造是由非地震因素产生的。

2.3.2 液化脉构造

液化脉是液化泄水产生的层内运动^[35],是液化泄水构造的集中表现。液化脉构造均有液化母岩层

或源层,但是,许多纹层灰岩在野外宏观特征为厚层状,并未显示纹层,但显微镜下纹层十分清楚。纹层灰岩中的脉体是一种物质不灭,形态转移的地质现象^[36],可液化层在地震产生后迅速开始液化,使得薄层碳酸盐沙部分或全部转化为脉,形成不同形态的脉体,显示出侵位时脉的流动构造(图版 II-2,图版 II-3),箭头所指方向为流动方向。

液化脉的形成形态由三种原因导致:(1)地震使上下岩层产生断裂,液化消失在围岩或与上部砂质岩串通,与下伏砂质沉积物相连,纹层出现双向反向变形(图4(a)),多垂直层面,是液化前期和高潮(脉体多一个方向发育)^[19,37]。(2)上下岩层已固结,未断裂,充填砂层和泥层的层间缝隙,不切穿围岩,即顺层发育,应该注意与薄层砂岩层区分;顺层发育有可能是沿当时条带状灰岩层之间的细微层液化的结果^[3],有时可完全消失转化为直立的脉体,也称为盲脉,与生物成因区分^[36],是液化开始的阶段^[19,37]。(3)上下岩层已固结,未断裂,但是层内有裂隙,出现侧向挤压,可能出现纺锤形(两个方向发育)(图4(b)),是液化中、后期^[19]。

2.3.2.1 剖面特征对比

桐村剖面大陈岭组的软沉积变形中,均发育液化亮晶脉和泥晶脉,其中,脉体立体形态为稍微弯曲的板状体(图4);岩层面上主要沿两个方向分布,部分脉体呈树枝状(图4c);断面上,脉体与层面多呈垂直或高角度相交(图4-a,b),在事件层 II 中多数脉体如此分布,极少脉体与层面平行。这也与空间中观测到的切面不一样有关。

事件层 I、III 中的脉体少,短而细。事件层 II 中,在其底部,与地裂缝伴生的 50 cm² 平面内,结晶断裂脉体有 42 条,垂直或高角度相交的脉体中,单个脉体宽度约 0.7 mm,长一般在 1.5~3 cm,最长 6 cm,在 50 cm² 平面内,脉体共有 150 条。在其顶部,脉体密度小、长、粗,在 20 cm² 平面内,共有 28 条脉体,宽大约 5 mm,多数 3 mm,甚至更粗,长 8 mm,甚至更长,最长 20 cm,向上脉体逐渐减少变短。

从三个事件层整体观察,脉体宽度 0.1~0.7 cm,脉长一般在 1.5~20 cm 之间,沿剖面从事件层 I 至事件层 III 中,脉体的数量由少到多,再到少;脉体的宽度由细到粗,再到细,其中,事件层 II 的位置最多

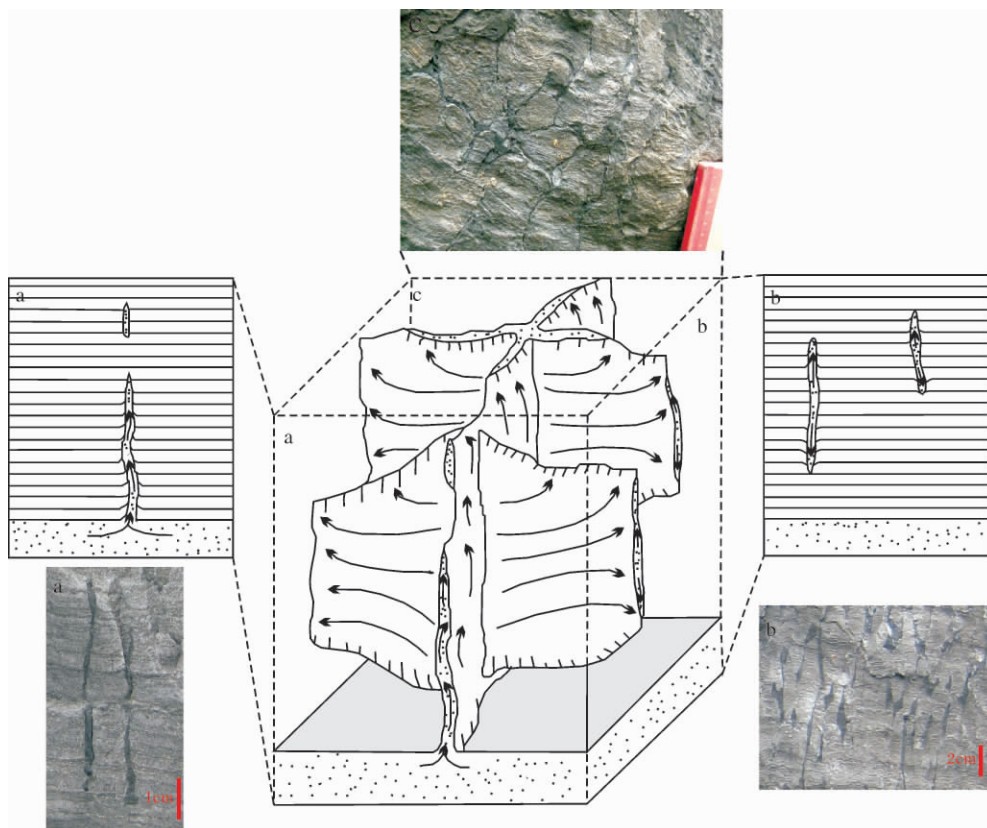


图4 桐村大陈岭组中发育的液化脉体立体模型(参照 Rodriguez-Pascua, 2000 修改)

Fig. 4 3D model of the liquefied dike developed in Dachening Formation, Tongcun area
(modified from image of M. A. Rodriguez-Pascua, 2000)

最粗,这就说明事件层 II 所受到的事件影响最大。

2.3.2.2 层面特征对比

液化脉构造在层面上微向上凸起,这是具有强动能的液化体充填地震裂缝的反映,这与岩层面上的凹下泥裂构造有显著的差别。泥裂构造表现为:干裂面,主要分布于岩层面;裂口宽,没有明显交切关系;裂缝充填物质与上覆地层相同;而液化脉构造由岩层面到岩层内部均有分布,明显交切关系,宽窄不一,延伸方向不一定,多数脉体有一定程度上的弯曲,交织成网的形态不固定(图 4c),裂隙内充填物主要是泥晶、亮晶碳酸盐。

2.3.2.3 脉与围岩对比

脉体与围岩的颜色、成分均有明显差异,因为脉体与围岩并非同源且成分不同,脉源于液化母岩层,所以脉体与液化母岩层的颜色、成分基本一致(图 4)。脉体颜色明显比围岩的要深,在显微镜下观察,脉体的炭质明显高于围岩(图版 II-4),可以看出脉体与围岩中的黑色炭质纹层相连。在桐村剖面上,液化脉的围岩是泥质岩层,根据土力学的原理^[38],一般难以液化。液化脉和母岩层是由一定粒度的沉积颗粒组成,不同于由矿物晶粒组成的非地震成因的脉体。故脉体与围岩有着明显的界限(图 4,图版 II-4)。

2.3.2.4 共生构造对比

不同时期的液化脉构造都不是孤立存在的,都有几种与其共生的震积构造,这些震积构造的组合,有些是原始记录的保存,有些则受到了后期风化等沉积条件的影响,在垂向上或生成序次上就具有一定的规律,反映了地震事件发生的序列。

桐村剖面中的三个事件层所位于的液化序列就不相同(图 5)。根据表 1,可以确定三个事件层的生成次序。事件层 I 的生成次序为:液化卷曲变形→泥亮晶液化脉→液化卷曲变形;事件层 II 的垂向序列自下而上包括:地震微断裂→泥亮晶液化脉→液化卷曲变形→泥亮晶液化脉→震裂岩→液化卷曲变形;事件层 III 的液化序列为:液化卷曲变形→卷曲变形与液化脉共生组合。

3 讨论

利用乔秀夫等^[3]、Rodriguez 等^[39]分别提供的震中距与震级、地震扰动层与震级线性关系图,估算出事件层 I 的震级小于 5 级,事件层 II 的震级为 6~7 级,事件层 III 的震级为 6 级左右。同时,进一步说明浙西大陈岭期的地震活动是开化—淳安断裂的结果。

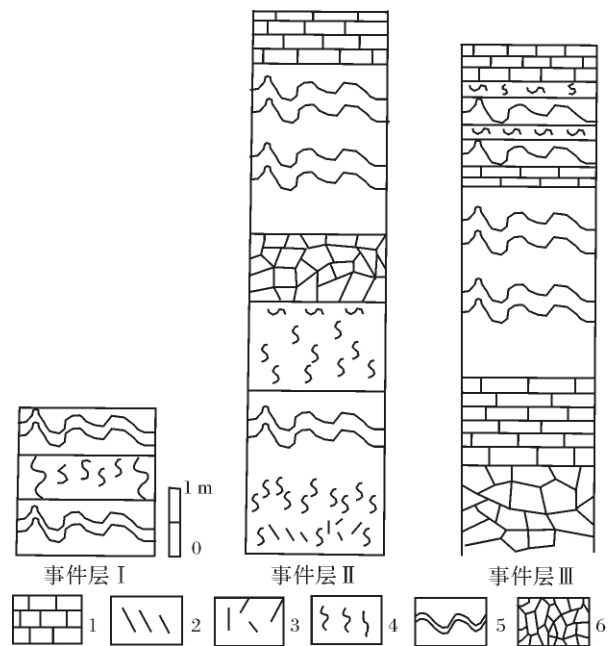


图 5 桐村剖面三个事件层震积构造组合

1. 灰岩; 2. 阶梯状微断层; 3. 地震微断裂; 4. 液化脉;
5. 液化卷曲变形; 6. 震裂岩

Fig. 5 Three horizon events composed of earthquake-driven sediment structures, Tongcun section

1. Limestone; 2. Step microfault; 3. Seismic micro-fractures;
4. Liquefied dike; 5. Liquefied convolute lamination;
6. Shattering rock

严兆彬等^[25]通过震积岩在浙西地区的区内分布,指出浙西大陈岭期的地震活动不受控江绍深断裂,可能是开化—淳安断裂活动的结果。笔者根据这个结论,按照乔秀夫等^[3]根据近 900 年间历次地震喷水冒砂资料与当时距震中距离以及震级的关系编制了线性关系图,把震中距离确定为三个事件层到开化—淳安断裂的垂直距离,确定当时地震强度。

Rodriguez 等^[39]也详细的对比了现代和近代地震作用形成的变形构造与古代的地震作用形成的变形,发现两者非常相似,并得出了震级与距震中的不同距离的地震扰动层的厚度具有很好的线性相关性(即 $M-T$ 图),并得出了震级 (M) 与地震扰动层 (T) 的厚度的经验公式 $M = T/3 + 3.83$ 。笔者统计出三个事件层所处地震扰动层的厚度,结合 $M-T$ 图,确定当时地震强度。

根据以上两种方法确定的地震强度相当,说明把震中距离确定为三个事件层到开化—淳安断裂的垂直距离,而不是江绍深断裂的垂直距离,是正确的。从侧面再次说明浙西大陈岭期的地震活动是开化—

淳安断裂的结果。

乔秀夫等^[3]、Rodriguez 等^[39]认为地震震级小于5级则不发生喷砂冒水现象,这与事件层I宏观特征中存在的液化脉相矛盾。按照乔秀夫等^[3]的方法,说明事件层I所处的位置并非是最大震中距,离开化一淳安断裂带更远处还存在着相应的软沉积变形。按照 Rodriguez 等^[39]的方法,说明事件层I中地震扰动层的厚度与大陈岭组时期相比,厚度减薄,证明受到后期地质作用影响。

此外,许多国内、外学者称这种泥晶脉或微亮晶脉为臼齿构造(Molar Tooth),认为这种构造是中一晚元古代(1700~650 Ma)的标志,在较老或较新地层中是极为罕见的^[40]。而在浙江桐村剖面,臼齿构造在大陈岭组地震带中并不发育,只是在软沉积变形事件层I和事件层II两层位之间的个别丘状层理中,可见脉体,初步认为是臼齿构造脉体。其中,脉体由亮晶方解石组成,数量较少,发育于致密灰岩中。笔者等将利用现代测试手段和方法,从地球化学角度,对其进一步探讨。

4 结论

(1) 地震事件层中发育的软沉积变形构造类型主要有地震微断裂、微褶皱和液化构造。微褶皱主要包括微褶皱纹层和与液化脉有关的褶皱;液化构造包括泄水构造和液化脉构造。同时,在三个事件层中,软沉积变形构造的产状、形态特征指示地震是它们最有可能的驱动机制。

(2) 震积岩三个事件层的发现,说明大陈岭组沉积期为古地震频发期。古地震为开化一淳安断裂带活动诱发成因,故以事件层II沉积时期为开化一淳安断裂带活动强烈期。

(3) 完善了对地震驱动软沉积变形构造特征的研究,为建立更高精度的地层对比框架提供了重要线索。在空间上,以地震事件分布在大陈岭组为线,在浙西寒武系大陈岭组地区寻找新的震积岩,提供了参照物;在时间上,了解与开化一淳安大断裂活动和盆地构造活跃期关系后,以浙西大断裂为线,在盆地构造活跃期形成的其它地层中寻找地震事件沉积,有助于查清控盘断裂活动历程,丰富浙皖海盆裂陷史。

参考文献(References)

1 Seilacher A. Fault-graded beds interpreted as seismites[J]. *Sedimentology*, 1969, 13: 155-159

2 Cita M B, Ricci Lucchi F. Seismicity and sedimentation [J]. *Marine Geology*, 1984, 55(1-2): 1-161

3 乔秀夫,宋天锐,高林志,等. 碳酸盐岩振动液化地震序列[J]. *地质学报*, 1994, 68(1): 16-34 [Qiao Xiufu, Song Tianrui, Gao Linzhi, et al. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(1): 16-34]

4 Shiki T, Cita M B, Gorsline D S. Seismoturbidites, seismites and tsunamites [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 135: 1-326

5 Wheeler R L. Distinguishing Seismic from Nonseismic Soft-Sediment Structures: Criteria from Seismic-Hazard Analysis [C] // Ertensohn F R, Rast N, Brett C E, ed. *Ancient Seismites*, Geological Society of America Special Paper, 2002, 359: 1-11

6 Fabrizio Storti, Paola Vannucchi. Seismoturbidites, seismites and tsunamites [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 196: 1-268

7 Allen J R L. Earthquake magnitude-frequency, epicentral distance, and soft-sediment deformation in sedimentary basins [J]. *Sedimentary Geology*, 1982, 46: 67-75

8 Rossetti D F, Goes A M. Deciphering the sedimentological imprint of paleoseismic events: an example from the Aptian Codo Formation, Northern Brazil [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 135(1-4): 137-156

9 张传恒,武振杰,高林志,等. 华北中元古界雾迷山组地震驱动的软沉积物变形构造及地质意义[J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(3): 336-343 [Zhang Chuanheng, Wu Zhenjie, Gao Linzhi, et al. Earthquake-induced soft-sediment deformation structures in the Mesoproterozoic Wumishan Formation, North China, and their geologic implications [J]. *Science in China: Series D*, 2007, 37(3): 336-343]

10 Obermeier S F, Pond E C. Issues in using liquefaction features for paleoseismic analysis: Seismological Research letters, 1999, 70: 34-58

11 乔秀夫,李海兵. 沉积物的地震及古地震效应[J]. *古地理学报*, 2009, 11(6): 593-610 [Qiao Xiufu, Li Haibin. Effect of earthquake and ancient earthquake on sediments [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(6): 593-610]

12 Rodriguez-Pascua M A, Calvo J P, Vicente G D, et al. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the late Miocene [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 135: 117-135

13 吴贤涛,尹国勋. 四川峨眉晚侏罗世湖泊沉积中震积岩的发现及其意义[J]. *沉积学报*, 1992, 10(1): 19-26 [Wu Xiantao, Yin Guoxun. Features and significance of seismites from upper Jurassic lacustrine deposits of Emei, Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(1): 19-26]

14 Potter P E, Pettijohn F J. *Palaeocurrents and Basin Analysis* [M]. Berlin: Springer, 1963: 1-296

15 宋天锐,刘燕. 古地震记录与岩相古地理[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 872-879 [Song Tianrui, Liu Yan. Ancient earthquake records and litho-paleogeography [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 872-879]

16 Lowe D R. Water escape structures in coarse-grained sediments [J]. *Sedimentology*, 1975, 22: 157-204

17 杨剑萍,聂玲玲,张琳璞,等. 柴达木盆地西南缘乌南油田新近

- 系古地震纪录及储集性能研究[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 805-812 [Yang Jianping, Nie Lingling, Zhang Linpu, *et al.* Reservoir characters and paleoseismic records in Neogene Wunan Oilfield, Southwestern margin of the Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 805-812]
- 18 王化爱, 刘广春, 杨玉平, 等. 蒙古国南贝尔凹陷泥质软沉积变形构造特征及沉积序列[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(6): 43-46 [Wang Huaai, Liu Guangchun, Yang Yuping, *et al.* Mud soft sedimentary deformation created by seismic of Cretaceous in South Bell sag, Mongolia [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(6): 43-46]
- 19 武振杰, 张传恒, 姚建新. 滇中元古界大龙口组地震灾变事件及地质意义[J]. 地球学报, 2009, 30(3): 375-386 [Wu Zhenjie, Zhang Chuanheng, Yao Jianxin. Neoproterozoic Seismic catastrophic events in Dalongkou formation of central Yunnan and their geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2009, 30(3): 375-386]
- 20 Marco S, Agnon A. Prehistoric earthquake deformations near Masada, Dead Sea graben[J]. *Geology*, 1995, 23: 695-698
- 21 宋天锐. 北京十三陵前寒武纪碳酸盐岩地层中的一套可能的地震—海啸序列[J]. 科学通报, 1988, 33(8): 609-611 [Song Tianrui. A probable earthquake tsunami sequence in precambrian Carbonate strata of the Ming Tombs District, Beijing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1988, 33(8): 609-611]
- 22 孙晓猛, 梁定益, 聂泽同. 大陆边缘震积岩序列——以金沙江中段震积岩为例[J]. 现代地质, 1995, 9(3): 271-278 [Sun Xiaomeng, Liang Dingyi, Nie Zetong. Seismite sequence in continental margin: Take seismite in middle region of Jinsha River as an example [J]. *Geoscience*, 1995, 9(3): 271-278]
- 23 付文利, 王艳琴, 杨光, 等. 东营凹陷沙三段、沙四段震积岩研究[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(2): 6-8 [Fu Wenli, Wang Yanqin, Yang Guang, *et al.* Study on seismite of Sha 3 and Sha 4 member in Dongying sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2004, 11(2): 6-8]
- 24 Seilacher A. Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events[J]. *Marine Geology*, 1984, 55(1-2): 1-12
- 25 严兆彬, 郭福生, 彭花明, 等. 浙西寒武系大陈岭组地震事件沉积的初步研究[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 730-738 [Yan Zhao-bin, Guo Fusheng, Peng Huaming, *et al.* Pilot study on sedimentation of Cambrian Dachenling formation resulting from seismic events in the West of Zhejiang Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 730-738]
- 26 梁定益, 聂泽同, 宋志敏, 等. 正在萌芽阶段的震积地层学[J]. 高校地质学报, 1997, 3(4): 458-461 [Liang Dingyi, Nie Zetong, Song Zhimin, *et al.* Seismostratigraphy at its germination stage: a brief history of research on seismites and its prospect [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1997, 3(4): 458-461]
- 27 王剑. 华南新元古代裂谷盆地演化[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 129-131 [Wang Jian. Evolution of Rift Basin in New-Proterozoic in South China [M]. Beijing: Science Press, 2000: 129-131]
- 28 Guo Fusheng, Peng Huaming, Zeng Aihua. Palaeozoic tectonic palaeogeography of Cathaysia in eastern Zhejiang and northern Fujian, China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(1): 24-32
- 29 郭福生. 浙江江山古生代沉积演化及其构造控制[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-99 [Guo Fusheng. Evolution of Paleozoic Deposit in the City of Jiangshan in Zhejiang Province and Its Tectonic Controls [M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-99]
- 30 Ettensohn F R, Rast N, Kulp M A. Locating possible epicentral areas for paleoearthquakes, Middle Ordovician Lexington limestone, central Kentucky [J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 2000, 32: A215
- 31 McAlpin J P, Nelson A R. Introduction to paleoseismology // [C] McAlpin J P, ed. *Paleoseismology*. San Diego: Academic Press, 1996: 1-32
- 32 杜远生, 张传恒, 韩欣, 等. 滇中元古代昆阳群的地震事件沉积及其地质意义[J]. 中国科学: D辑, 2001, 31(4): 283-289 [Du Yuansheng, Zhang Chuanheng, Han Xin. Earthquake events deposition and geologic significance of Kunyang group in Mid-Proterozoic in Dianxi [J]. *Science in China: Series D*, 2001, 31(4): 283-289]
- 33 Lowes D R. Subaqueous liquefied and fluidized flows and their deposits [J]. *Sedimentology*, 1976, 23(3): 285-308
- 34 Elliott C G, Williams P F. Sediment slump structures: A review of diagnostic criteria and application to an example from Newfoundland [J]. *Journal of Structure Geology*, 1988, 10(2): 171-182
- 35 江胜国, 钟建华, 李旭平, 等. 松辽盆地三肇凹陷姚家组震积岩岩心识别[J]. 特种油气藏, 2010, 17(2): 39-45 [Jiang Shengguo, Zhong Jianhua, Li Xuping, *et al.* Core identification of seismite in Yaojia Formation of Sanzhao depression in Songliao Basin [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2010, 17(2): 39-45]
- 36 乔秀夫, 高林志. 燕辽裂陷槽中元古代古地震与古地理[J]. 古地理学报, 2007, 9(4): 337-352 [Qiao Xiufu, Gao Linzhi. Mesoproterozoic palaeoearthquake and palaeogeography in Yan-Liao Aulacogen [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(4): 337-352]
- 37 刘鹏举. 河北平泉中元古代高于庄组震积岩及地震节律[J]. 现代地质, 2001, 15(3): 266-269 [Liu Pengju. Seismite and its rhythm in Gaoyuzhuang Formation of Mesoproterozoic in Pingquan county, Hebei province [J]. *Geoscience*, 2001, 15(3): 266-269]
- 38 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 161-162, 517 [Chen Xizhe. *Soil Mechanics, Foundation Soil and Foundation Engineering* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 161-162, 517]
- 39 Rodriguez-Pascua M A, Vicente G D, Calvo J P, *et al.* Similarities between recent seismic activity and paleoseismites during the late miocene in the external Betic Chain (Spain): relationship by b-value and the fractal dimension [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25: 749-763
- 40 旷红伟, 金广春, 刘燕学, 等. 从地球化学角度看微亮晶白齿碳酸盐岩形成的环境条件——以吉辽地区新元古代微亮晶碳酸盐岩为例[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(2): 150-155 [Kuang Hongwei, Jin Guangchun, Liu Yanxue, *et al.* The environmental conditions of the microsparite (Molar Tooth) Carbonates opened out by geochemistry: An example from the microsparite carbonates of Neo-

proterozoic in Ji-Liao region , China [J]. Natural Gas Geoscience ,

2004 , 15(2) : 150-155]

Analysis on Earthquake-Induced Soft-Sediment Deformation Structures in the Cambrian Dachenling Formation in the Tongcun Village , Zhejiang Province

LIU Li-jie¹ GUO Fu-sheng^{1 2} YAN Zhao-bin^{1 2}

(1. East China Institute of Technology , Fuzhou Jiangxi 344000; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment , East China Institute of Technology , Nanchang 330013)

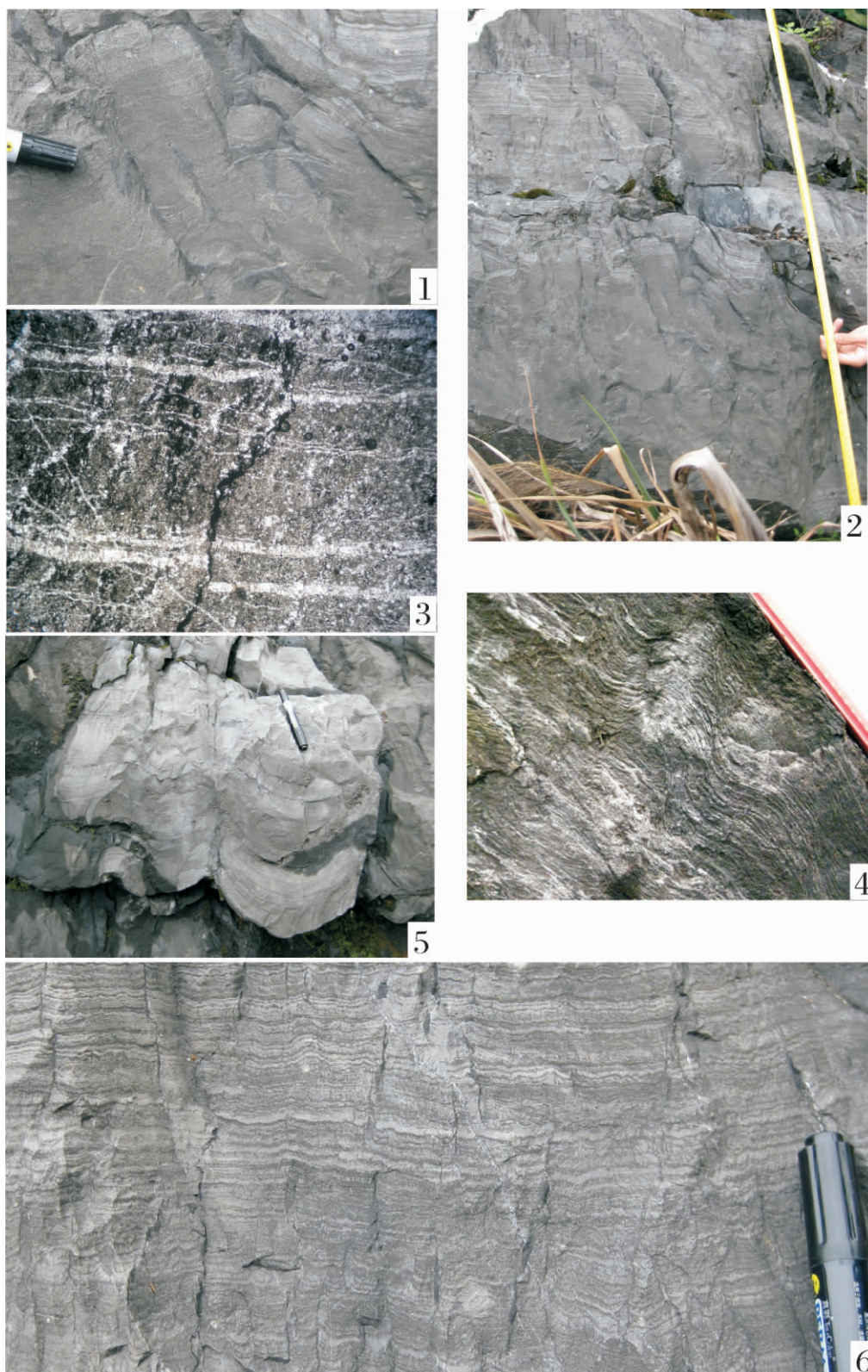
Abstract: Soft sediment deformation is one of the key indicators identifying the existence of paleo-earthquake. Based on the standard as the sediments suffer the earthquake fluid pressure changing degree and the strength of the liquefied. Through three horizons of soft sediment deformation events with earthquake-driven on the Cambrian Dachenling Formation in the Tongcun village in Zhejiang province , the abundant soft sediment deformation are seismic micro-fractures , micro-folding and liquefied structures. They reflect the extent of the fluid pressure changing and the strength of the liquefaction , when the sediments suffer from the earthquake.

The micro-foldings in the profile of Tongcun village always place there , and are symmetrical folds and uniform liquid layer. Its tectonic features do not match significantly to the landslide deformation , and the author and other measure the micro-folding axial plane randomly in the profile of Tongcun village , and get total of 39 sets of data , and then correct in level for statistical analysis. After all the work , the author rules out the possibility of landslide.

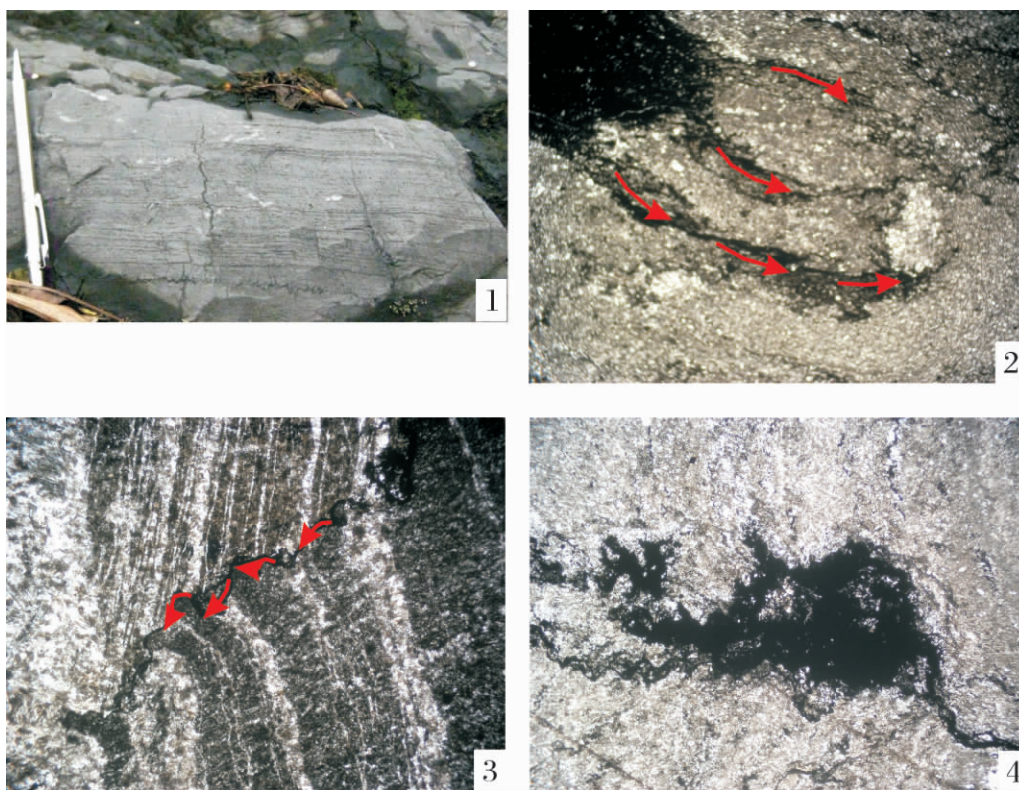
Liquefied structure is a kind of the geological phenomenon of conservation of matter and transfer of form , and it shows the flow structure when liquefaction invades. The formation of liquefied form caused by three reasons , which represent the different stages of devolatilization. The author researches by contrasting among the liquefied structures by means of four aspects of section characteristics , surface features , contrasting with surrounding rock , and symbiotic construction.

By observing and counting about special characteristics and properties of event horizons of the soft sediment deformation , and distinguishing the similar structures without earthquake-driven , these indicate that earthquake was the driven force. The discovery of three seismic events layers indicated that the deposition period of Dachenling formation is the period of paleoseismic occurring frequently. Paleoseismic induces the formation of Kaihua-Chun'an major deslocation , so the author and other consider deposition time of the event layer II is the strong activating period of the formation of Kaihua-Chun'an major deslocation. Counting the seismic disturbance and epicentral distance in the three events layer estimate the layer II and layer III magnitude are 6-7 level and about 6 level , and the author and other preliminary view that the layers without the earthquake zone maybe exist molan tooth. So , the identification mark and lithological sequence of seismic events get perfect , the understanding get deepening about the sedimentation of cambrian Dachenling formation resulting from seismic events in the west of Zhejiang province.

Key words: paleoseismic; soft sediment deformation; driving mechanism; Cambrian in the west of Zhejiang province



图版 I 说明 1. 地震微断裂 (Earthquake fissure)。可见阶梯状微断层,说明当时沉积物处于半固结状态下;2. 层内错断 (Intraformational fissure)。所有的微断裂都是发生在层内,不穿越上下层面;3. 镜下微断裂 (Seismo-cracks under the microscope)。纹层被错断并出现位移,断裂缝被液化脉充填,与液化脉接触的纹层的两端并未出现弯曲。镜下照片 $\times 20$;4. 微褶皱纹层 (Micro-folding laminae);5. 泄水构造 (Escaping structure)。纹层呈碗状或倒碗状,孔隙水逃逸通道两边的碗缘纹层弯曲;6. 与液化脉有关的纹层 (Deformed laminae related to liquefied dike)



图版 II 说明 1. 泄水构造(Escaping structure)。纹层较平直, 孔隙水逃逸通道近垂直于纹层, 通道呈现弯曲状; 2. 镜下液化脉的流动构造(Liquefied dike flowing structure under the microscope)。很清楚的看到液化脉使围岩出现侧向型水压破裂构造, 脉体逐渐歼灭。镜下照片 $\times 20$; 3. 镜下液化脉的流动构造(Liquefied dike flowing structure under the microscope)。纹层被错断, 与液化脉接触的纹层的两端出现弯曲, 说明是液化脉流动导致纹层出现变形。镜下照片 $\times 20$; 4. 镜下液化脉(Liquefied dike under the microscope)。脉体中炭质明显高于围岩, 并且与围岩有着明显的界限。镜下照片 $\times 20$ 。