

滇中中元古界大龙口组地震灾变事件及地质意义

武振杰¹⁾, 张传恒²⁾, 姚建新¹⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘 要: 软沉积物变形构造是确定古地震存在的关键证据之一。笔者在云南易门地区进行野外露头剖面调查时, 在滇中新元古代大龙口组中识别出了 3 个地震事件层, 其中发现大量的水塑性褶皱、液化构造等变形构造, 主要类型包括微褶皱纹层、与液化脉有关的褶皱、与液化层有关的褶皱和受侧向挤压而成的顺层滑动、碟状泄水构造、液化脉、液化沙侵、水压破裂等构造。此外, 臼齿构造与水塑性褶皱、液化构造等地震成因变形构造伴生发育, 并且其脉体形态、大小、优势方位等与后者的分布、变形样式、强度等有一定的对应关系。软沉积物变形构造及臼齿构造的形态、位态及发育层位特征表明, 它们的驱动机制是地震活动。迄今为止, 已发现的滇中地区大龙口组震积岩均分布于罗茨-甘庄断裂的东侧, 指示软沉积物变形、臼齿构造与西缘控盆断裂间存在密切的成因联系。

关键词: 中元古界; 大龙口组; 软沉积物变形构造; 臼齿构造; 震积岩; 昆阳裂谷

中图分类号: P534.3; P316; P694 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)03-375-12

Neoproterozoic Seismic Catastrophic Events in Dalongkou Formation of Central Yunnan and Their Geological Significance

WU Zhen-jie¹⁾, ZHANG Chuan-heng²⁾, YAO Jian-xin¹⁾

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

2) *School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083*

Abstract: Soft sediment deformation is one of the key indicators identifying the existence of paleo-earthquake. Based on detailed section researches on the Dalongkou Formation in central Yunnan Province, the authors recognized three horizons of earthquake-driven events with abundant soft sediment deformation and liquefied structures such as micro-rumple laminae, soft sediment folding related to liquefied dikes, soft sediment folding related to liquefied beds, interbedded slumping caused by lateral stress, dish/escape structures, liquefied dikes, mushroom-like liquefied beds and hydraulic shattering structures. Besides, molar-tooth structures, whose change in shape, size and dominated orientation of distribution shows similarity with the change of distribution, style of folding and intensity in the above structures, were also found in the three event horizons. Evidence in the modality, special characteristics and properties of event horizons of the soft sediment deformation and molar-tooth structures indicates that earthquake was the driven force. All the seismites found were distributed on the east side of the Luoci-Ganzhuang fault, suggesting a close relationship between the basin-controlling fault and some certain deformation, such as soft-sediment deformation and molar-tooth structure.

Key words: Mesoproterozoic; Dalongkou Formation; soft sediment deformation; molar-tooth structure; seismite; Kunyang rift valley

震积岩 (Seismite) 一词为 Seilacher (1969) 提出, 用以解释软沉积物中发育的同沉积物变形构造以来,

本文由中国地质调查局地质调查项目“中国大陆及边缘关键地史阶段地震事件研究” (编号: 200313000055) 资助。

收稿日期: 2008-09-03; 改回日期: 2009-05-17。

第一作者简介: 武振杰, 男, 1979 年生。博士研究生。层序地层学与沉积学专业。通讯地址: 100037, 北京西城区百万庄大街 26 号。E-mail:

wuzhenjie@cags.net.cn。

国内外研究者对于不同时代、不同岩性和不同构造环境中的震积岩进行了大量的研究,取得了丰硕的成果(Potter et al., 1963; 宋天锐, 1988; Rast et al., 1990; Schumacher, 1992; 乔秀夫等, 1994; Pope et al., 1997; Rossetti, 2000; 杜远生等, 2000; 张传恒等, 2006, 2007)。当前,识别史前沉积物和地史时期古地震的发生并评估其地震振动效果已经成为一门新型的独立学科——古地震学(Serva et al., 1995; Yeats et al., 1997)。

扬子古大陆的震积岩研究正处于认识、确定阶段,但缺乏系统的研究。杜远生等(2001)首次在云南易门县大龙口组碳酸盐岩中识别出了地震断裂层、泥晶脉(Molar-tooth 构造)等典型地震-海啸沉积标志,提出了震积岩-海啸岩的事件沉积序列,初步确定了地震事件层在滇中大龙口组中的发育。笔者与张传恒教授对易门地区大龙口组碳酸盐岩中发育的地震事件层做了进一步研究,通过研究它们的类型、形态与时空发育特征,分析其驱动机制,并进一步探讨了它们的地质意义。

1 区域地质背景与地震事件层的时空分布

研究区位于中、上元古界广泛分布的滇中地区(图 1(a)),中元古界昆阳群自下而上分别为下昆阳群因民组、落雪组、鹅头厂组、绿汁江组,上昆阳群大营盘组、黑山头组、大龙口组和美党组。区内已发现的地震事件层均发育于大龙口组中。

易门地区的大龙口组与上覆的美党组和下伏的黑山头组均为整合接触关系(图 1(b))。地层主要由厚达 2000 m 以上的灰岩组成,自下而上可分为两个岩性段:三元宫段岩性为一套灰黑、深灰色碳酸盐岩,夹绢云板岩、粉砂质绢云板岩和泥质灰岩,层内以水平层理或均质层理为主,代表浪基面以下的浅海深积;毛家山段为浅灰色中厚层状藻屑灰岩夹厚层-块状藻灰岩及叠层石礁灰岩,属潮坪-潮下带沉积环境(邢裕盛等, 1989; 杜远生等, 2001)。

易门地区的大龙口组至今未获可靠的年龄数据,但是,根据我们在距离研究区约 50 km 的峨山县塔甸村大龙口组底界黑山头组富良棚段斑脱岩中获得

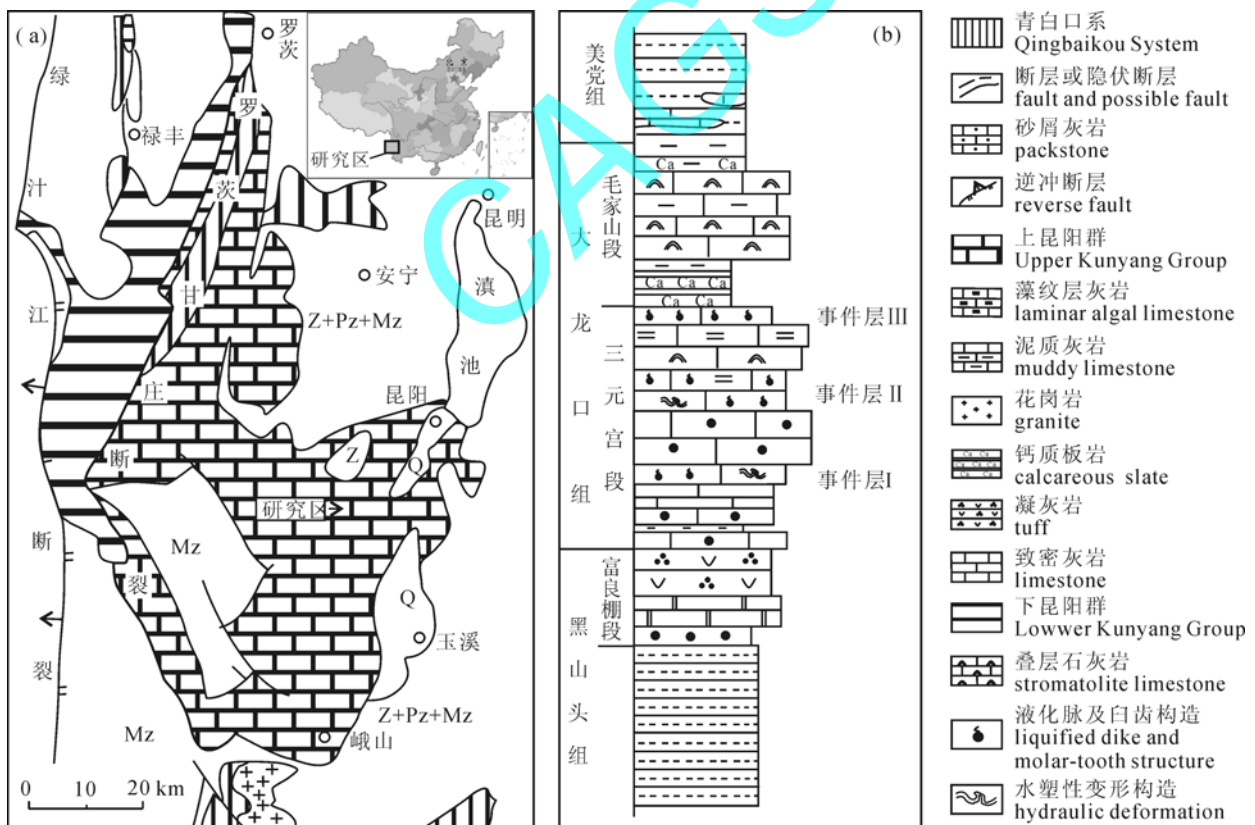


图 1 显示地震事件层时空位置的研究区地质简图(a)及大龙口组柱状图(b),

Fig. 1 Geological sketch map of the study area(a) and column of the Dalongkou Formation(b) for showing stratigraphic and spatial positions of the event horizons

Z-震旦系; Pz-古生界; Mz-中生界; Q-第四系

Z-Sinian; Pz-Paleozoic; Mz-Mesozoic; Q-Quaternary

的(1032±9) Ma 年龄 (张传恒等, 2007), 推断大龙口组时代应为 1000 Ma 左右。

滇中大龙口组中, 迄今为止已识别出 3 个地震事件层(图 1b), 全部发育于其下部三元宫段碳酸盐中, 分别位于三元宫段的底部、中部和顶部。

事件层 分布最为广泛, 发育于三元宫下部砂屑灰岩中, 其上下均为大套致密灰岩, 其中大量白齿构造和液化脉、各种类型水塑性变形构造、液化沙等软沉积物变形构造。

事件层 发育于三元宫中部的藻纹层灰岩中, 其上下都是大套致密灰岩。在此事件层中紫红色薄层藻纹层灰岩中液化脉发育强烈, 脉体一般来自互层的砂屑灰岩层, 与岩层高角度相交; 纹层受脉体挤压, 发生明显被动变形。顺层追索发现藻纹层灰岩厚度不均一, 其与上覆和下伏的砂屑灰岩之间常被液化层侵蚀而不规则, 横向上有尖灭现象。

地震事件层 发育于紧挨毛家山段钙质板岩下部的砂屑灰岩与藻纹层灰岩中, 在地层柱状图上位于大龙口组毛家山段与三元宫段交界处三元宫段上部。事件层 中大量白齿构造、各种类型水塑性变形构造、液化脉构造和水压破裂构造。

在这三个事件层中大量发育的软沉积物变形构造和大量的白齿构造, 分别代表了地震活动的不同不同时期。

2 水塑性变形构造及其形成机制分析

水塑性变形构造通常表现为小型的层间皱褶, 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(Rossetti, 2000)。在大龙口组三个地震事件层中, 水塑性变形构造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。

2.1 水塑性变形构造形态特征

根据水塑性变形构造形态和伴生物, 将水塑性

变形构造分成四种: 微皱褶纹层(图 2(a))、与液化脉有关的纹层(图 2(b))、与液化层有关的褶皱(图 2(d))和夹于未变形层间的塑性褶皱(图 2(c))。

水塑性变形构造在 3 个事件层中均可发现, 在纹层状灰岩中最常见。这种构造一般发育程序较小, 形态不规则、不协调, 无优势方位, 和后期构造形成的褶皱变形区别较大。大龙口组的微褶皱在大春树剖面地震事件层 II 中发育最好, 其纹层单个褶皱曲长 1~20 cm 大小, 以 1~5 cm 居多, 褶曲层厚度多小于 1 m, 常见 20 cm 左右(图 2(a), 图版 -1)。与液化脉有关的纹层变形在三个地震事件层的剖面中均有出现, 纹层与液化脉体共生, 在距脉体尖端最远处的纹层处于原始层理, 随着距脉体距离的减少, 纹层开始显示上凸或下凹, 脉体尖端处纹层的曲率变大; 再下部的纹层则被脉体切开。与液化层有关的水塑性褶皱主要见于地震事件层 中, 表现为夹持于砂屑灰岩液化层中厘米级厚度的单层局部呈等厚褶皱状。易门地区典型的顺层滑动出现在易门大春树地震事件层 中, 表现为在薄层纹层状白云岩形成不对称褶皱, 其上覆的粒屑白云岩厚度随之发生改变。

2.2 水塑性变形形成机制分析

水塑性变形构造是在能量注入后, 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(Lowe, 1975)。这时的沉积物并未液化, 变形更多的是由于沉积物强度降低所致(Lowe, 1976; 梁定益等, 1994)。

横向追索滇中易门地区不同剖面, 发现在其中发育的水塑性变形构造均为层内变形, 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。且形态不规则、不协调, 定向性差, 尺度较小。为了进一步确定水塑性变形(特别是皱褶)的位态特征, 对于大春树剖面的水塑性褶皱构造轴面进行了随机测量, 共获得 12 组数据(表 1), 水平校正后统计

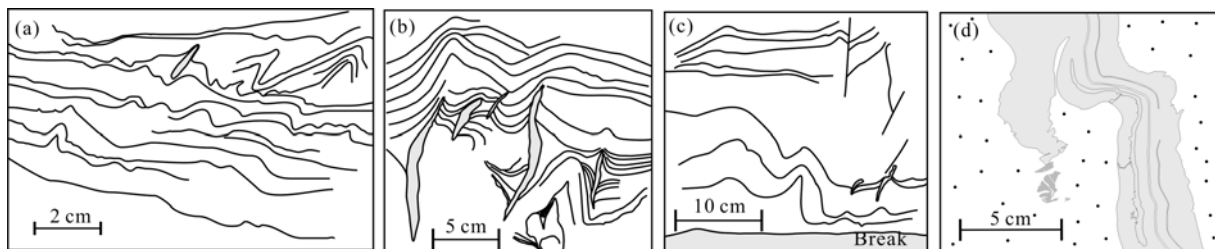


图 2 易门大龙口组中发育的水塑性变形构造

Fig. 2 Hydraulic soft sediment deformation developed in Dalongkou Formation, Yimen County

(a) 微皱褶纹层(大春树剖面); (b) 与液化脉有关的纹层变形(大春树剖面); (c) 夹于未变形层间的塑性褶皱(大春树剖面); (d) 与液化层有关的水塑性褶皱(1729 高地剖面)

(a) micro-folding laminae, Dachunshu section; (b) deformed laminae related to liquefied dike, Dachunshu section; (c) Plastic fold defined between unchanged layers, Dachunshu section; (d) Hydraulic plastic fold related to liquefied layer, Highland 1729 section

表 1 大龙口组中水塑性褶皱轴面位态实测数据表

Table 1 Data of the axial planes of the folds in the hydraulic plastic deformation of Dalongkou Formation

野外测量值	水平校正值	野外测量值	水平校正值	野外测量值	水平校正值
90 °/70 °	87 °/60 °	245 °/75 °	244 °/82 °	260 °/81 °	261 °/88 °
235 °/50 °	246 °/58 °	267 °/64 °	270 °/74 °	262 °/61 °	266 °/72 °
200 °/75 °	204 °/70 °	209 °/76 °	212 °/84 °	258 °/73 °	260 °/82 °
250 °/73 °	254 °/82 °	222 °/83 °	225 °/85 °	300 °/74 °	302 °/87 °

注：测点位置：易门县北大春树剖面；层面产状：125 °/15 °。

分析表明(图 3)，事件层中水塑性褶皱的轴面优势方位为倾向 257 °，倾角 82 °，走向为 167 °–347 °。显然，水塑性褶皱与罗茨–甘庄北北西–南南东向的断裂带大角度相交，因此排除其滑坡成因的可能性。

此外，水塑性变形构造、液化构造和白齿构造三者之间的紧密共生关系，以及他们在空间上变化规律的相似性，也表示水塑性变形构造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。

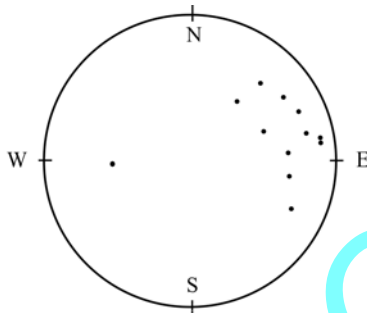


图 3 水塑性褶皱轴面法线赤平投影图(下半球投影)

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

3 液化构造及其形成机制分析

液化构造形成是由于沙质层中因更大的能量注入，从而使孔隙流体完全克服了颗粒重量而使自身强度完全丧失，外在表现为沙质层的原始沉积构造逐渐被破坏并最终形成块层状或沉积沿裂隙向上侵位形成沙脉、沙侵蘑菇等构造(张传恒等, 2006)。

在大龙口组地震事件层中，与水塑性变形构造相伴生的液化构造主要有 4 类：液化泄水构造、液化脉构造、液化砂侵构造和液化层流动增加形成的水压破碎构造(伴生流化砾岩)。

3.1 液化泄水构造

泄水构造主要见于韩所剖面的地震事件层 III 中，发育于藻纹层灰岩中，表现为纹层弯曲呈碟状，孔隙水逃逸通道两边的碟缘纹层向上弯曲，显示软

沉积物变形特征(图版 I-5)。

3.2 液化脉构造

液化脉主要发育于沙屑灰岩之上的藻纹层灰岩或泥质灰岩中，通常为密集分布的泥晶碳酸盐岩，野外露头上呈浅灰色或灰白色。脉体宽度 0.1~1.0 cm，脉长一般在 3~30 cm 之间。脉体立体形态为稍微弯曲的板状体。在岩层面上液化脉体主要沿两个方向分布，也有部分液化脉体呈不规则的弯曲状、树枝状或豆荚状。而在断面上，脉体则与层面多呈垂直或高角度相交关系，极少数脉体与层面呈平行关系(图版 -6)。

液化脉在易门地区出露广泛，按液化脉体与被它刺穿的纹层的关系可分为两种类型：I 型脉体：一端与下部的液化层相连，而在脉体另一端常变细并尖灭，脉体沿一个方向发育，受其影响，被其刺穿的纹层状藻纹层灰岩或泥质灰岩同时发生被动变形(图 4(b)，图 5(a)，图版 -7，图版 -7)；II 型脉体：形态常为中间粗、两端尖的纺锤型，脉体同时向两个方向发育，同时，被其穿过的纹层也被被动地向两个方向发生弯曲变形(图 4(a)，图 5(b)，图版 -8，图版 -8)。

液化泥晶脉的产生是强地震振动使沉积物液化泄水的结果，其中平行层面脉体可能是液化开始阶段的产物(刘鹏举, 2001)，垂直层面的 I 型脉体为液化前期和高潮期产物，II 型脉体则为液化中、后期产物。此种类型的震积岩在易门大龙口组 3 个地震事件层中均有发育。

3.3 液化砂侵构造

液化砂侵构造出露于铜厂西山 1729 高地中，厚层团块状砂屑灰岩和灰黑色薄层纹层状泥质灰岩中，表现为下部的砂屑灰岩液化后向上侵位(图版 -1)，使上覆纹层状泥质灰岩发生被动变形，形成水塑性褶皱(图 2(c)，图版 -3 右)，局部地方纹层状灰岩被挤断而形成漂浮于液化层中的砾石(图 2(c)，图版 -3 中部)。液化砂屑灰岩在向上侵位的同时，还沿上覆纹层状灰岩层间的薄弱面挤入其中，形成细

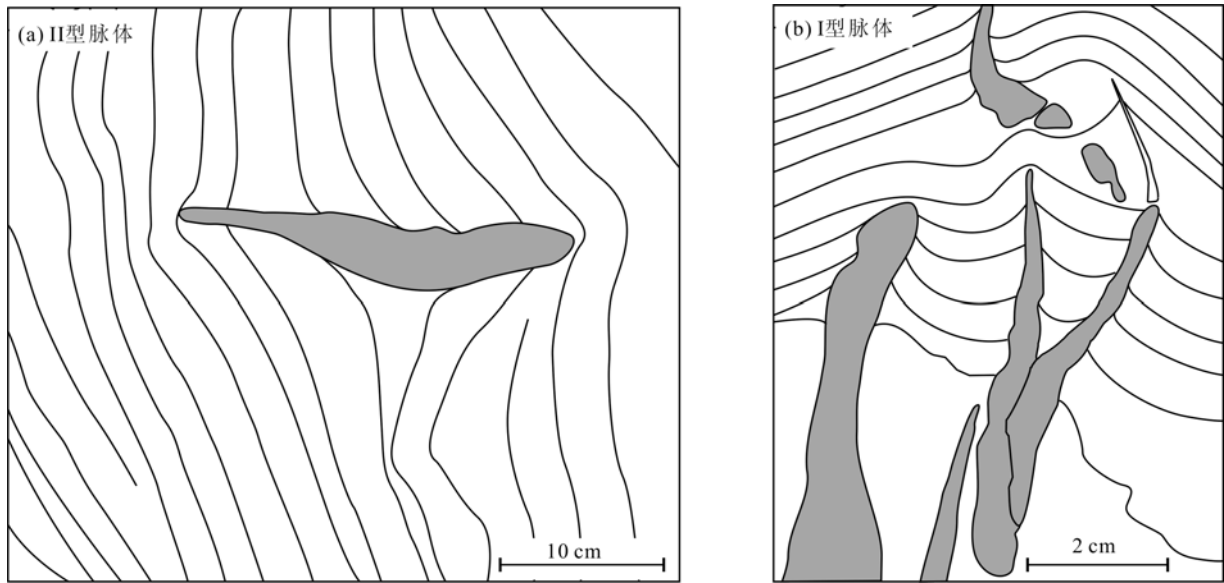


图 4 易门地区大龙口组中发育两种液化脉体
 Fig. 4 Two types of liquefied dike developed in Dalongkou Formation, Yimen area

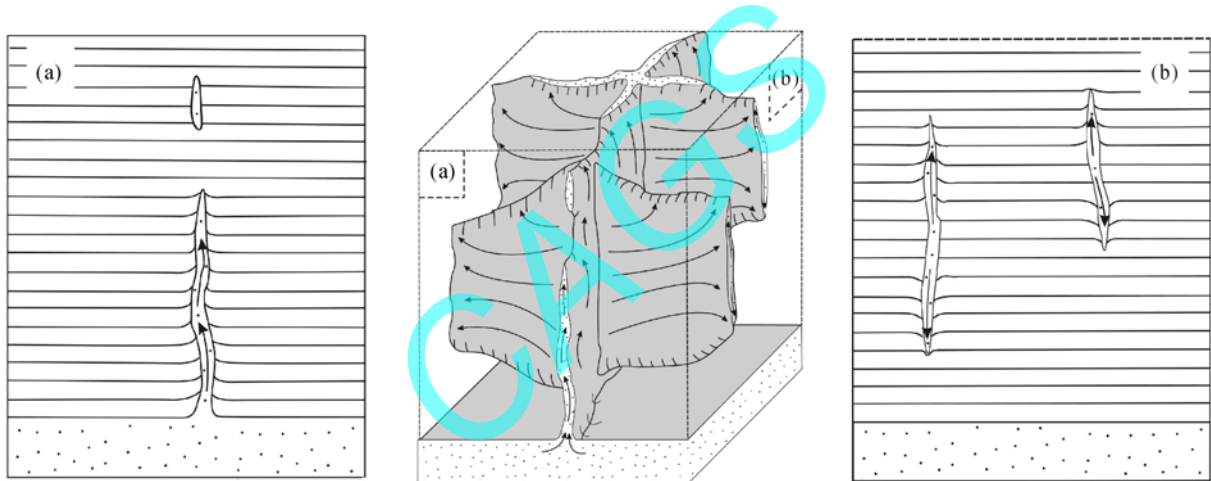


图 5 易门地区大龙口组中发育的液化脉体立体模型(据 Rodriguez-Pascua, 2000 修改)
 Fig. 5 3D model of the liquefied dike developed in Dalongkou Formation, Yimen area (modified from image of M.A. Rodriguez-Pascua, 2000)

长的楔形侵入体(图 5(a), 图版 -3)。液化砂屑灰岩对其下伏纹层状灰岩的影响较小, 主要表现为液化体与下伏沉积层之间层面不平坦, 类似侵蚀间断面(图版 -4)。

这套厚度约 30 m 的地震事件层发育以液化沙侵袭与其共生的塑性变形构造为特征, 只分布在剖面中部含灰黑色泥质灰岩的中、厚层团块状砂屑灰岩中, 其上覆的大套砂屑灰岩层以及下伏的团块状致密灰岩中原始层理均十分发育, 而没有发现有液化、水塑褶皱或其他任何一种软沉积物变形构造。在垂向上液化沙侵袭层在非变形层中呈夹层出现, 显示同沉积变形特征。

4 水压破裂构造及其形成机制分析

水压破裂构造是围岩因受沉积物液化、流动而爆裂形成的构造(Obermeier, 1998)。在大龙口组中, 水压破裂构造形成于砂屑灰岩/纹层状泥质灰岩岩系和叠层石灰岩/藻纹层灰岩岩系中, 与液化构造和水塑性变形构造共生。水压破裂构造中通常有液化层流动迹象, 显示底辟特征, 局部发育流化砾岩(图版 -2, -3)。

图 6 描述了 2 种类型的水压破裂构造: 侧向型水压破裂构造和垂向型水压破裂构造。图 6(a)中液化层有两个流动方向, 一共形成了五个水压破裂带:

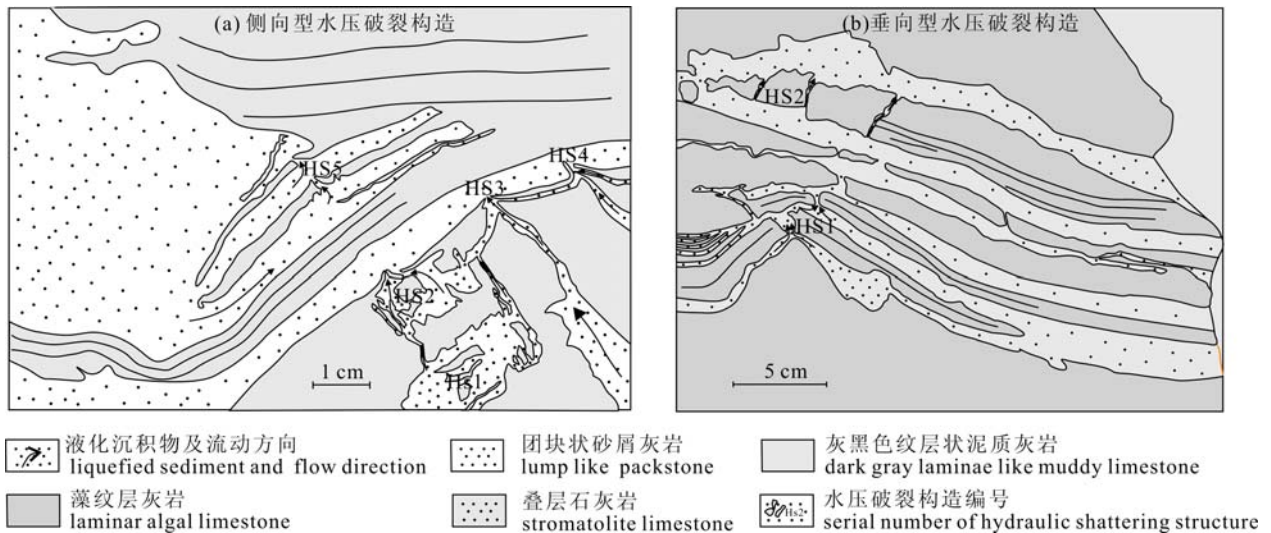


图6 水压破裂构造典型实例照片素描图

Fig. 6 Sketch on photographs of the hydraulic shattering developed in Event Horizon &

HS1 和 HS2 位于图右下方, 表现为液化的沉积物使灰黑色薄层纹层状泥质灰岩破裂成碎块, 并卷入到液化层中, 而后一起向上侵位形成流化砾岩; HS3、HS4、HS5 位于图的上方, 表现为液化层上涌、底辟使围岩变形、破裂。虽然从本图看共有两套液化层, 并且有两个流动方向, 但从更大范围看它们均属一套向上流动的液化层, 并且形成水压破碎构造的流动方向均为向左上方流动。

图 6(b) 中液化层流动方向自下而上, 形成了两个水压破裂带: 一个位于图中部(HS1), 表现为液化的沉积物上涌、底辟, 使上部的藻纹层灰岩变形、上拱并破裂; 另一个(HS2)位于图的左上部, 表现为液化层穿越上部的藻纹层灰岩, 使原本连为一体的围岩断裂为几块, 其中有一块有明显位移, 形成了小型阶梯状伸展断裂系。可能与围岩破裂、液化层减压形成塌陷有关。

综上所述, 水压破裂构造是一种沉积物液化后流动使局部压力变大而导致的破裂构造, 它一方面表现为液化层因流动而破坏其原生沉积构造, 另一方面表现为围岩破裂形成角砾, 并与液化沉积物混合形成流化砾岩, 这些流化砾岩侵位形成流化砾岩坨。因此, 水压破裂构造是一种注入能量更大的地震液化构造。

5 臼齿构造发育特征及其时空分布

臼齿构造又称 Molar-tooth 构造, 指的是前寒武纪灰岩或白云岩中水平或近垂直产出并具臼齿形态的微亮晶方解石(或白云石)脉状、层状、席状或构造

(柳永清等, 2005)。臼齿构造的成因至今尚无定论, 对于这种构造百余年来研究形成了众多不同的解释, 如收缩现象(Calver, 1990)、充填的裂缝(Cowan, 1992)、气泡成因(Furniss et al., 1998)、生物成因(James, 1998)、微生物成因(旷红伟等, 2006)、生物地球化学沉积(Shields, 2002; 葛铭等, 2003)等。也有学者认为臼齿构造的成因是地震作用(Pratt, 1994, 1998, 2001; Fairchild et al., 1997; Frank et al., 1998)。国内乔秀夫等(1994, 1997, 1999, 2001, 2006)认为臼齿构造为地震成因的液化脉, 并称之为震积岩。

大龙口组中发育的臼齿构造形态多样, 主要有直柱状和不规则状两种臼齿构造脉体。直柱状脉体多近于平直, 和层面高角度相交, 整体上有一定的优势方位, 在其中部或一侧也有分叉现象(图版 II-6); 而不规则状脉体则随机排列, 呈飘带状、飞鸟状等各种复杂的形态。

易门地区大龙口组中发育的臼齿构造有一个典型特征, 就是与软沉积物变形构造相伴生。在横向追索地震事件层时, 我们发现在不同地点臼齿构造脉体形态、大小、优势方位等方面有着规律性的变化: 在最南部的栗园剖面, 事件层中的臼齿构造以垂直层面为主, 脉体相对稀疏, 呈线状或棒状; 栗园北的大春树剖面, 同一事件层中的臼齿构造中主要以垂直层面为主, 此外在臼齿构造层中发育有硬底构造; 在更北部的铜厂后山剖面 and 桃园剖面事件层中, 臼齿则以不规则脉体为主, 且脉体密度变大、形态复杂(图 7(c), (d))。与之对应, 事件层中的水塑性褶皱的变形样式和强度、液化脉体的发育

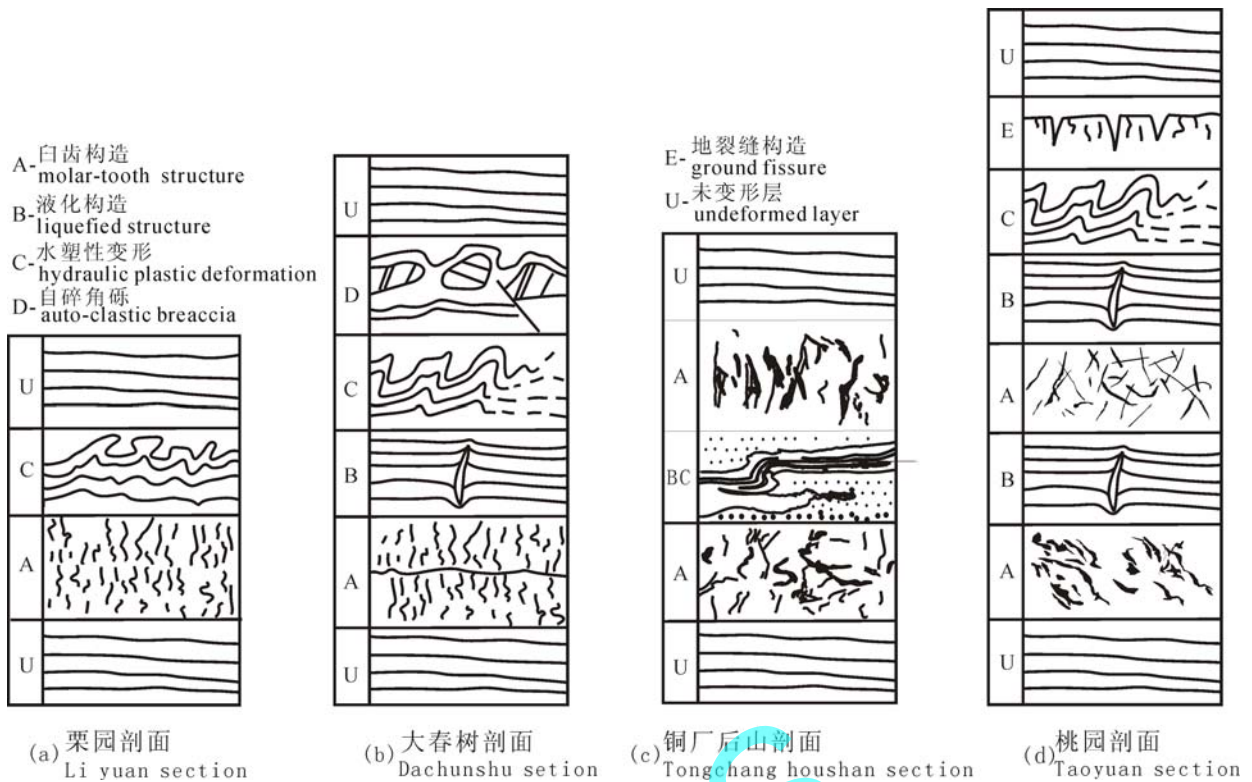


图 7 大龙口组碳酸盐地震事件层 I 序列(部分图例据乔秀夫等, 1994)

Fig. 7 Seismic event sequence of Event Horizon I in carbonate rocks of Dalongkou Formation (part of legends from “Vibration Liquefaction Seismic Sequence in Carbonate Rock” by Qiao Xiufu)

强度、分布样式等也呈有规律的变形, 并且三者的空间变化规律间有着一些相似之处, 暗示它们很可能是受同一地质因素触发的。

6 大龙口组震积岩序列及特征

古地震发生后, 残留于地层中的各种地震成因变形沉积层、沉积构造组合可以作为鉴定古地震发生的重要依据。根据前人的研究, 发育震积岩地层在垂向上一般可分为震前正常沉积层、震积岩层、海啸岩层或震浊积岩层和震后正常沉积层。

关于地震事件沉积序列, 一些研究者已经总结出了地震事件(Seilacher, 1984)、地震-海啸-重力流(宋天锐, 1988; 乔秀夫, 1994)、地震-重力流(Mutti et al., 1984; 梁定益等, 1991)等模式。杜远生等(2000)在对大龙口组震积岩的先期研究中, 总结出了 3 种地震事件沉积序列: 震积岩-海啸岩-背景沉积序列; 震积岩-背景沉积; 海啸岩-背景沉积。

经我们进一步研究, 发现海啸岩在滇中地区发育较少, 几个主要的剖面均只显示震积岩(图 7 中 BCD 单元)和背景沉积(图 7 中 U 单元)。

A 单元: 白齿构造层。多发育于致密灰岩中, 位于序列底部, 在序列中部也可能多次出现。泥晶脉

体与层面之间可以是平行、斜交或垂直关系; 本单元中也可能有硬底构造发育(图 7 中 A 单元)。推测其形态特征及分布密度和距古地震震中距离之间有密切关系。可能是地震发生初期能量较高时的产物(乔秀夫, 1994)。

B 单元: 液化脉构造或液化砂侵构造层。常发育于砂屑灰岩和纹层状泥质灰岩互层中, 液化脉体形态、类型、密度及液化层发育程度可以指示其形成时注入的外来能量高低。为地震能量最高时期的产物。

C 单元: 水塑性变形构造层。常形成于纹层状灰岩中, 通常是地震后期产物。

D 单元: 自碎角砾岩层。地震振动破坏原生沉积层形成, 常发育于固结程度较高沉积物中。

E 单元: 地裂缝层。液化作用停止后, 地面(沉积物表面)正常所致(乔秀夫, 1994)。

U 单元: 震前或震后正常沉积层。

滇中大龙口组碳酸盐岩地震事件层 I 振动序列有以下几个特点: 多发生在成岩之前, 还处于软沉积物状态的浅水碳酸盐岩地层之中; 古地震的震级可能要大于 6 级; 序列中的各种地震成因变形沉积层、沉积构造组合均在原地形成; 序列最底部均为白齿构造, 但不同剖面的白齿构造显示不

同特征:自南向北,脉体分布密度变大,由垂直层面的单向脉变为杂乱无章、无明显优势方向的复杂脉体,形态由单一线状脉体逐渐过渡为柱状脉、分叉状脉、豆荚状脉体等;同时,在北部剖面,臼齿构造多次出现,表明此序列的形成可能受到多期地震振动的影响所致;自南向北,依次出现水塑性褶皱、液化脉构造、液化砂侵构造、地裂缝构造等。地震成因变形构造种类变多,变形强度变大,暗示地史时期诱发这些变形构造的古地震震中在这些剖面的北部。

7 地震灾变事件的地质意义

大龙口组是补偿型多旋回裂谷盆地(昆阳裂谷)构造背景下的产物(冉崇英等,1994;杜远生等,1999)。当时的滇中地区位于西部的罗茨-甘庄断裂和东部的小江断裂之间,应属构造活动强烈区(图1)。该地区大龙口组软沉积物变形构造和臼齿构造的研究以及地震驱动机制的确定具有重要的意义,主要表现在以下两个方面:

(1) 为建立更高精度的地层对比框架提供了重要线索:传统的以岩石地层特征为基础的区域地层对比常受到诸多限制,而以软沉积物变形构造为基本组成单元的地震事件层作为受同一条断裂活动控制的产物,能够作为标志层对相邻的地层进行对比,并建立起较高的等时对比格架。大龙口组震积岩除了分布在易门地区外,在峨山地区也有发现;同时,大龙口组震积岩的发现也为在因民组、鹤头厂组、黑山头组上部等盆地构造活跃期形成的地层中寻找地震事件沉积提供了一个新的线索(杜远生等,2001)。

(2) 有助于查清控盆断裂活动历程,丰富裂谷地质作用的内涵:已有研究证明断裂活动与地震事件层之间存在着因果关系,那么一旦确定地震事件层发育的时空位置,就可以为确定断裂活动时间特征提供重要依据(乔秀夫,高林志,1999;乔秀夫,2002)。

滇中地区大龙口组地震事件沉积发育最好的易门和峨山地区,两者均位于罗茨-甘庄断裂附近,表明地震事件的分布与其密切相关,而罗茨-甘庄断裂是继承中元古代裂谷盆地的控盆断裂;故大龙口组地震事件沉积从侧面说明了元古代滇中裂谷盆地的存在,有助于恢复裂谷盆地的空间格架(杜远生等,2001)。

8 结论

通过上述对大龙口组地震灾变事件的研究,可

以得出以下主要结论:

(1) 大龙口组中发育三个地震事件层,分别位于大龙口组下部三元宫段底部、中部和顶部。

(2) 地震事件层中发育的软沉积物变形构造类型主要有水塑性变形构造、液化构造和水压破裂构造。水塑性变形构造包括微褶皱纹层、与液化脉有关的褶皱、与液化层有关的褶皱和受侧向挤压而成的顺层滑动构造;液化构造包括碟状泄水构造、液化脉构造和液化砂侵构造;水压破裂构造伴生流化砾岩坨、底辟构造和小型阶梯状断裂构造。

(3) 滇中易门地区地震事件沉积序列由震积岩和背景沉积组成,序列底部为臼齿构造,向上依次出现液化脉构造(或液化砂侵构造)、水塑性变形构造、自碎角砾、地裂缝等构造。

(4) 滇中易门地区大龙口组软沉积物变形构造的位态、形态特征指示地震是它们最有可能的驱动机制,事件层本质上就是震积岩。

(5) 基于滇中易门地区大龙口组地震灾变事件研究成果,结合前人资料分析,证实大龙口组震积岩的形成、分布与裂谷西缘控盆断裂密切相关。它们之间密切的时空联系为研究西缘断裂活动历史,建立不同构造部位地震沉积序列提供了重要线索。

致谢:野外工作期间得到了中国地质科学院高林志研究员和中国地质大学王自强教授的帮助和指导,在此一并表示感谢!

参考文献:

- 杜远生,韩欣. 2000. 论海啸作用与海啸岩[J]. 地质科技情报, 15(4): 389-394.
- 杜远生,韩欣. 1999. 滇中地区元古代沉积盆地演化及动力学初探. 现代地质, 13(2): 232-234.
- 杜远生,张传恒,韩欣,顾松竹,林文娇. 2001. 滇中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, 31(4): 283-289.
- 葛铭,孟祥化,旷红伟,蔡国印,刘燕学,刘学付. 2003. 微亮晶(臼齿)碳酸盐岩: 21世纪全球地学研究的新热点[J]. 沉积学报, 21(1): 81-89.
- 旷红伟,孟祥化,葛铭. 2006. 臼齿碳酸盐岩成因探讨—以吉林-辽宁地区新元古界为例. 古地理学报, 8(1): 63-74.
- 梁定益,聂泽同,宋志敏. 1994. 再论震积岩及震积不整合: 以川西、滇西地区为例[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 19(6): 845-851.
- 梁定益,聂泽同,万晓樵,陈国民. 1991. 试论震积岩及震积不整合—以川西、滇西地区为例. 现代地质, 5(2): 138-147.
- 刘鹏举. 2001. 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, 15(3): 266-269.
- 柳永清,高林志,刘燕学. 2005. 华北地块东缘新元古代碳酸盐岩中的 Molar-Tooth 构造[J]. 现代地质, 38(3): 413-424.
- 乔秀夫,高林志,彭阳. 2001. 古庐庐带新元古界—灾变·层序·生

物[M].北京:地质出版社,8-121.

- 乔秀夫,高林志.1999.华北中新元古代及早古生代地震灾变事件及与Rodinia的关系[J].科学通报,44(16):1753-1757.
- 乔秀夫,李海兵,高林志.1997.华北地震旦纪—早古生代地震节律[J].地学前缘,4(3-4):155-160.
- 乔秀夫,宋天锐,高林志,彭阳,李海兵,高劭,宋彪,张巧大.1994.碳酸盐岩振动液化地震序列[J].地质学报,68(1):16-34.
- 乔秀夫,宋天锐,高林志.2006.地层中地震记录(古地震)[M].北京:地质出版社,1-263.
- 冉崇英,张智筠,刘卫华,何明勤,陈好寿.1994.康滇裂谷旋回与铜矿层楼结构及其地球化学演化[J].中国科学(B辑),24(3):294-315.
- 宋天锐.1988.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,33(8):1121-1124.
- 邢裕盛.1989.中国的上前寒武系.中国地层3[M].北京:地质出版社,1-15.
- 张传恒,高林志,武振杰,王晓颖,闫全人,李大建.2007.滇中昆阳群凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb年龄:华南格林威尔期造山的证据[J].科学通报,52(7):818-824.
- 张传恒,刘典波,张传林,王自强.2006.新疆博格达地区早二叠世软沉积物变形构造:弧后碰撞前陆盆地地震记录[J].地学前缘,13(4):255-266.
- 张传恒,武振杰,高林志.2007.华北中元古界雾迷山组地震驱动的软沉积物变形构造及其地质意义[J].中国科学,37(3):336-343.

References:

- CALVER C R, BAILIE P W. 1990. Early diagenetic concretions associated with intrastratal shrinkage cracks in an Upper Proterozoic dolomite, Tasmania, Australia. *J. Sediment. Petrol.*, 60: 293-305.
- COWAN C A, JAMES N P. 1992. Disastases cracks: Mechanically Generated syaeresis-like cracks in upper Cambrian shallow water oolite and ribbon carbonates[J]. *Sedimentology*, 39(5): 1101-1118.
- DU Yuan-sheng, Han Xin. 1999. Research on sedimentary basin evolution and dynamics in central Yunan area [J]. *Geoscience*, 13(2): 232-234(in Chinese with English abstract).
- DU Yuan-sheng, Han Xin. 2000. Tsunami and tsunamites[J]. *Geological Science and Technology Information*, 15(4):389-394(in Chinese with English abstract).
- DU Yuan-sheng, ZHANG Chuan-heng, HAN Xin, GU Song-zhu, LIN Wen-jiao. 2001. Mesoproterozoic Seismic event deposit and its geological significance in Kunyang group, Central Yunnan[J]. *Science in China(Series D)*, 31(4) : 283-289(in Chinese).
- FAIRCHILD I J, EINSELE G, SONG T R. 1997. Possible seismic origin of molar-tooth structures in Neoproterozoic carbonate ramp deposits, north China[J]. *Sedimentology*, 44: 611-636.
- FRANK T D, LYONS T W. 1998. "Molar-Tooth" structures: a geochemical perspective on a Proterozoic enigma[J]. *Geology*, 26: 683-686.
- FURNISS G, RITTLE, J F, WINSTON, D. 1998. Gas bubble and expansion crack origin of molar tooth calcite structures in the Middle Proterozoic Belt Supergroup, Western Montana[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 68(1): 104-114.
- GE Ming, MENG Xiang-hua, KUANG Hong-wei, CAI Guo-yin, LIU Yan-xue, LIU Xue-fu. 2003. Molar-Tooth Carbonates: Carbonate Research Highlight of the world in the 21th Century[J]. *ACTA SEDIMENTOLOGY SINICA*, 21(1): 81-89(in Chinese with English abstract).
- JAMES N P, NARBONNE G M, SHERMAN A G. 1998. Molar-tooth carbonates: shallow subtidal facies of the Mid- to Late Neoproterozoic[J]. *J. Sediment. Res.*, 68: 716-722.
- KUANG Hong-wei, MENG Xiang-hua, GE Ming. 2003. Discussion on origin for Molar Tooth carbonate rocks: An example from the Neoproterozoic in Jilin-Liaoning area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 8(1): 63-74.
- LIANG Ding-yi, NIE Ze-tong, SONG Zhimin. 1991. On the seismite and seismodisconformity-take the W.Hunan and W. Yunnan regions as a example. *Geoscience*, 5(2): 138-147.
- LIANG Ding-yi, NIE Ze-tong, SONG Zhi-min. 1994. A re-study on seismite and seismo-unconformity: taking western Sichuan and western Yunnan as an example[J]. *Earth Science*. 19(6): 845-850(in Chinese).
- LIU Peng-ju. 2001. Seimite and its rhythm in the gaoyuzhuang formation of meso-proterzoic in Pingquan county, hebei province[J]. *Geoscience*, 15(3): 266-269.
- LIU Yong-qing, GAO Lin-zhi, LIU Yan-xue. 2005. Molar-tooth structure in the neo-proterozoic carbonate, east margin of the North China block. *Geoscience*, 38(3): 413-424.
- LOWE D R. 1975. Water escape structures in coarse-grained sediments[J]. *Sedimentology*, 22: 157-204.
- LOWE D R. 1976. Subaqueous liquefied and fluidized deposits [J]. *Sedimentology*. 23: 285-308.
- MUTTI E, RICCI L F, SEGURET M, ZANZUCCHI, G. 1984. Seismoturbidites: a new group of resedimented deposits[J]. *Mar Geol*, 55: 103-116.
- OBERMEIER S F. 1998. Liquefaction evidence for strong earthquake of Holocene and latest Pleistocene ages in the states of Indiana and Illinois, USA. *Eng Geol*, 1998, 50(3-4): 227-254.
- POPE M C, READ F, BAMBACH R. 1997. Late Middle to Late Ordovician seismites of Kentucky, southwest Ohio and Virginia: Sedimentary recorders of earthquakes in the Appalachian basin[J]. *GAS Bulletin*, 109(4): 489-503.
- POTTER P E, PETTIJOHN F J. 1963. Paleocurrents and basin analysis[M]. Berlin: Springer, 1-296.
- PRATT B R. 1994. Seismites in the Mesoproterozoic Atlyn Formation (Belt Supergroup). Montana: a test for tectonic control of peritidal carbonate cyclicity[J]. *Geology*, 22: 1091-1094.
- PRATT B R. 1998b. Gas bubble and expansion crack origin of molar-tooth calcite structures in the middle Proterozoic belt supergroup, western Montana—Discussion[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 69(5): 1136-1140.
- PRATT B R. 2001. Oceanography, bathymetry and syndepositional tectonics of a Precambrian intracratonic basin: integrating sediments, storms, earthquakes and tsunamis in the Belt (Helena Formation, c. 1.45Ga), western North America[J]. *Sedimentary Geology*, 141-142: 371-394.
- QIAO Xiu-fu, GAO Lin-zhi. 1999. Neoproterozoic and early Paleozoic seismic event and its relationship with Rodinia super-

- continent[J]. Chinese Science Bulletin, 44(16) : 1753-1757.
- QIAO Xiu-fu, GAO Lin-zhi, PENG Yang. 2001 Neoproterozoic in paleo-tanlu fault zone--catastrophe-sequence-biology. Beijing: Geological Publish House, 8-121(in Chinese).
- QIAO Xiu-fu, LI Hai-bing, GAO Lin-zhi. 1997. Sinian and early roterozoic seismite and its rhythm in north China platform [J]. Earth Science Frontiers, 4(3~4): 155-160 .
- QIAO Xiu-fu, SONG Tian-rui, GAO Lin-zhi, PENG Yang, LI Hai-bing, GAO Mai, SONG Biao, ZHANG Qiao-da. 1994. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction[J]. Acta Geologica Sinica, 68(1): 16-34(in Chinese with English abstract)
- QIAO Xiu-fu, SONG Tian-rui, GAO Lin-zhi. 2006. Seismic record in the stratum (paleoeqrthquake) [M]. Beijing: Geological Publish House, 1-263(in Chinese).
- RAN Chong-ying, ZHANG Zhi-jun, LIU Wei-hua, HE Ming-qin, CHENG Hao-shou. 1994. Kangdian rift cycle, bed-floor structure of copper mine and geochemical evolvement.[J]. Science in China (Series B), 24(3): 294-315(in Chinese).
- RAST N, MOSHIER S O. 1990. Convoluteds beds in the Lexington limestone seismites (talk and unpublished abstract). Transactions of the Kentucky Academy of Sciences, 51-91.
- ROSSETTI D F, GOES A M. 2000. Deciphering the sedimentological imprint of paleoseismic events: an example from the Aptian Code Formation, Northern Brazil. Sedimentary Geology, 135: 137-156.
- SCHUMACHER G A. 1992. Lithostratigraphy, cyclic sedimentation, and event stratigraphy of the Maysville, Kentucky area[R]. In: Ethensohn F R, eds. Changing interpretations of Kentucky geology-layer-cake, facies, flexure, and eustasy. State of Ohio: Department of Natural Resources Miscellaneous Report 5, 165-172.
- SEILACHER A, 1969. Fault-graded beds interpreted as seismites. Sedimentology, 13 (1-2): 155-159.
- SEILACHER A. 1984. Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events. Mar Geol, 55: 1-12
- SERVA L, SLEMMONS D B, (Eds). 1995. Perspectives in Plaeoseismology Association of Engineering Geologist. Special Publication No.6, 133pp.
- SHIELDS A G. 2002. Molar-tooth microspar: a chemical explanation for its disappearance -700Ma[J]. Terra Nova, 14(2): 108-113.
- SONG Tian-rui. 1988. A set of possible earthquake-tsunami sequence in precambrian carbonate, Shisanling, Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 33(8): 1121-1124(in Chinese).
- XING Yu-sheng. 1989. Chinese early Cambrian. Chinese Strata3[M]. Beijing: Geological Publish House, 1-15(in Chinese).
- YEATS R S, SIEH K, ALLEN C R. 1997. The Geology of Earthquakes. New York: Oxford University Press, 568pp.
- ZHANG Chuan-heng, GAO Lin-zhi, WU Zhen-jie, SHI Xiao-ying, YAN Quan-ren, LI Da-jian. 2007. SHRIMP U-Pb zircon age of tuff from the kunyang group in central Yunnan: evidence for Grenvillian orogeny in South China [J]. Chinese Science Bulletin, 52(7): 818-824(in Chinese).
- ZHANG Chuan-heng, LIU Dian-bo, ZHANG Chuan-lin, WANG Zi-qiang. 2006. Early permian seismically induced soft-sediment deformational structures in Bogda area, Xinjiang: seismic record of collision between back-arc basin and foreland basin[J]. Earth Science Frontiers, 13(4): 255-266.
- ZHANG Chuan-heng, WU Zhen-jie, GAO Lin-zhi. 2007. Meso-proterozoic earthquake induced soft-sediment deformation and its geological significance in Wumishan formation, north China[J]. Science in China (Series D), 37(3): 336-343(in Chinese).

图版说明

图版 I Plate I

- 1、微褶皱纹层, 大春树剖面
Micro folding laminae, Dachunshu section
- 2、液化脉体及纹层变形, 大春树剖面
Liquefied dikes and deformed laminae, Dachunshu section
- 3、液化沙侵构造及其对软沉积的改造, 1729 高地
Liquefied sand protruding structure and its influence on soft-sediment, Hill 1729
- 4、塑性褶皱及顺层滑动, 大春树大采石场东
Plastic fold and along-bedding sliding, east of Dachunshu quarry
- 5、泄水构造, 韩所剖面
Escaping structure, Hansuo section
- 6、液化脉体平面特征, 大春树剖面
Planar features of liquefied dikes, Dachunshu section
- 7、I 型脉体, 大春树剖面
Type I dike, Dachunshu section
- 8、II 型脉体, 栗园剖面
Type II dike, Dachunshu section

图版 II Plate II

- 1、液化砂屑灰岩挤入上覆泥质灰岩, 1729 高地
Liquefied packstone tucked into overlying muddy limestone, Hill 1729
- 2、液化砂屑灰岩使上伏泥质灰岩发生塑性变形, 1729 高地
Liquefied pakestone deformed overlying muddy limestone, Hill 1729
- 3、液化沙侵对上覆泥质灰岩的顺层改造, 1729 高地
Liquefaction triggered along-bedding deformation in overlying muddy limestone, Hill 1729
- 4、液化砂屑灰岩对下伏泥质灰岩的改造, 1729 高地
Liquefaction packstone Influenced underlying muddy limestone, Hill 1729
- 5、地裂缝构造, 桃园剖面
Ground fissure structure, Taoyuan section
- 6、柱状白齿构造, 桃园剖面
Columnar molar-tooth structure, Taoyuan section
- 7、末端分叉的柱状白齿构造, 大尖山东
Columnar molar-tooth structure with biforked ends, Taoyuan section
- 8、不规则状白齿构造脉体, 铜厂西山
Irregular molar-tooth structure, Tongchangxishan section

图版 I Plate I



图版 II Plate II

