

文章编号: 1000-0550(2012)06-1021-11

地质名山馒头山及其附近早寒武世古地震沉积事件研究^①

张邦花^{1,3} 田洪水³ 张增奇² 杜圣贤²

(1. 山东师范大学 济南 250014; 2. 山东地质科学实验研究院 济南 250013; 3. 山东建筑大学 济南 250101)

摘要 蜚声中外的地质名山馒头山处在济南南部山区。通过野外调查和室内研究,从馒头山及其附近的青杨村东山、红叶谷、滚球山等地的下寒武统中鉴别出了许多地震引起的同沉积变形构造(震积岩),主要有卷曲变形(震褶岩)、粒序微断层、滑移构造、滑塌褶曲、负载构造、枕状体、混插沉积、软硅质脉、软硅质层底辟构造、硅藻叠层石变形、沉陷构造、触变楔、布丁、震裂缝、震裂角砾岩及震碎角砾岩等。本文较详细地阐述了它们的特征和形成机理。触变楔属国内首次发现。触变楔和沉陷构造发育在夹软硅质层的白云岩中,其原始沉积物是含软硅质层的白云质灰泥。受强震触动,因软硅质沉积物($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)的粘度变小,软硅质层的粘度变小而变得更软,灰泥同时发生液化;在竖向震动力作用下,软硅质层被断开,继而沉陷形成了沉陷构造;沉陷构造向下延伸,结果使断开的硅质层汇聚,形成了触变楔。根据早寒武世古构造板块与地震带的分布,认为这些地震沉积遗迹是早寒武世板内地震记录,推测由古郯庐带的构造活动的响应。这些古地震事件记录的发现,丰富了济南南部山区、尤其是馒头山的地质科学内涵。

关键词 古地震沉积事件 同沉积变形构造 早寒武世 馒头山 济南

第一作者简介 张邦花 女 1969年出生 讲师 博士研究生 地质学 E-mail: banghuazhang@163.com

中图分类号 P588.2 **文献标识码** A

0 引言

馒头山位于济南南部山区,济南南部寒武系出露广泛(图1)。华北下一中寒武统龙王庙阶—张夏阶标准(层型)剖面处在馒头山;这里不仅发育十三个三叶虫化石带,形态别致的“馒头状”山头,河流环绕、风景秀丽,而且,地质研究历史悠久,Willis B和Blackwelder E、孙云铸院士及卢衍豪院士等中外著名地质学家都曾来这里开展地层与古生物学研究^[1]。当今,到馒头山一带开展地学考察和研究的学者依然络绎不绝。所以,馒头山被誉为地质名山。笔者近年来在馒头山、青杨村东、红叶谷及滚球山等地发现了早寒武世地震沉积事件记录,并在馒头山、红叶谷和青杨村东山做了剖面研究。

1 地质背景

济南以东约200 km处为古郯庐断裂带,此断裂带形成于前震旦纪^[2,3],其分布与现在郯庐断裂带基本一致(图1)。有关研究表明,古郯庐断裂带于震旦纪—奥陶纪曾发生强构造与地震活动^[4-6]。早寒武世时期,包括济南在内的鲁西地区为滨海、萨布哈及

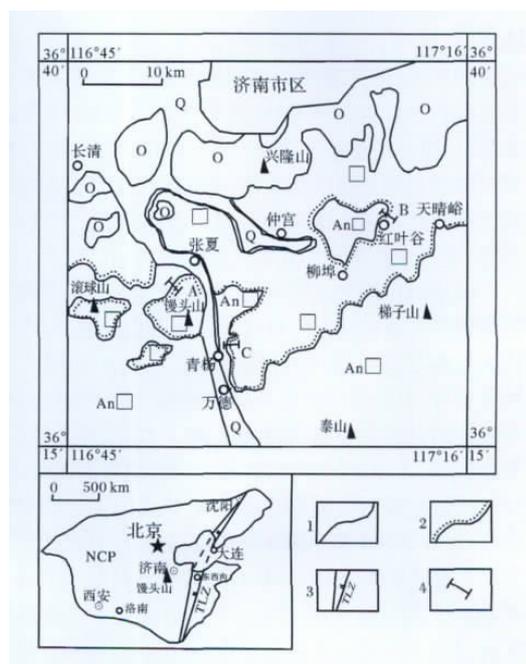


图1 研究区地质略图

1. 地质界线; 2. 地层不整合界线; 3. 郯庐断裂地震带; 4. 研究剖面:
A. 馒头山, B. 红叶谷, C. 青杨东山; NCP. 华北板块
Fig. 1 The geological sketch of the study area

^①财政部和国土资源部“中国寒武系标准剖面地质遗迹研究与保护项目”(财建[2008]660),山东省地学论坛科研项目(编号:Ldxhlt2007-10-001)资助。
收稿日期:2011-10-09; 收修改稿日期:2012-01-22

表1 研究区下—中寒武统划分对比

Table 1 Division-correlation for the Lower-middle Cambrian in the study area

年代地层		岩石地层 (组、段)	主要岩性、沉积相及厚度	三叶虫化石带	华北其它地区 岩石地层	
中寒武统	张夏阶	张夏组	上灰岩段	厚层藻灰岩夹鲕粒灰岩, 114.5 ~ 140.8 m	<i>Yabeia</i> R. Z.	张夏组
			下灰岩段	厚层鲕粒灰岩夹云斑藻灰岩, 57.18 ~ 82.27 m	<i>Amphotom</i> — <i>Taitzia</i> A. Z. <i>Crepicphalina</i> Ac. Z. <i>Lioparia</i> R. Z. <i>Bailiella</i> R. Z.	
	徐庄阶	馒头组	砂岩及上页岩段	馒头山下部发育 3.41 m 厚的厚层钙质砂岩, 浅海相, 42.6 ~ 64.2 m	<i>Poriagraulos</i> R. Z. <i>Sunaspis</i> R. Z. <i>Ruichengaspis</i> R. Z.	馒头组
	毛庄阶		下页岩段	页岩、砂质云母页岩夹鲕粒灰岩, 潮下带, 101 ~ 112.6 m	<i>Hsuchuangia</i> — <i>Ruichengela</i> A. Z. <i>Shantubaspis</i> Ac. Z. <i>Yaojiayulella</i> R. Z.	
下寒武统	龙王庙阶		石店段	纹层泥云岩、灰质白云岩夹钙质页岩, 陆表海(潮坪)相, 84.3 ~ 108.2 m	<i>Redlichia chinensis</i> R. Z.	
		朱砂洞组	丁家庄段	泥云岩, 含硅藻叠层石, 陆表海—萨布哈相, 11.8 ~ 15.6 m		昌平组、碱厂组、
	沧浪铺阶	李官组	砂岩、粉砂岩、砂质页岩夹泥云岩组成, 底部可见砂质砾岩, 滨海相, 0 ~ 4.9 m	<i>Megapalaeolenus</i> R. Z.	辛集组、猴家山组、葛屯组	

前寒武纪地层与侵入岩(与下寒武统呈不整合接触关系)

陆表海(潮坪)环境,在当时的海底沉积形成了一套陆源碎屑、泥质夹碳酸盐等的沉积物,其地层自下而上依次为李官组、朱砂洞组及馒头组石店段,下寒武统各组、段间均呈整合接触^[7,8]。济南南部下寒武统朱砂洞组和馒头组广泛发育,李官组仅发育在古地形较低洼的紅葉谷及滚球山等地。各组岩性、沉积相、厚度、化石带及与华北其它地区的对应地层见表1。

区域地质调查成果表明,鲁西地区寒武系底部朱砂洞组产有数层燧石团块或燧石条带白云岩,含半球状硅质叠层石或丘状硅藻叠层石^[8],其中的燧石团块或条带、以及硅质叠层石属硅质岩。由于朱砂洞组中的硅质岩顺层分布,有的横向彼此相连,延伸较远,分布稳定,内含藻丝体,围岩的纹层环绕燧石团块,研究证明这些硅质岩属同生生物化学成因^[9]。刘宝璋指出:在深钻井中可见到十分柔软的燧石,其最初的成分是水合硅胶体($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)。软燧石经脱水形成玉髓和石英,完全脱水成岩至少十万元以上^[10]。在研究区内,青杨村东山的朱砂洞组中发育八层硅质岩,每层厚度10~15 cm,纵向间隔5~40 cm,其中的四至五层发生了软塑性弯曲变形,它们最初是软沉积物。

2 地震沉积事件记录

地震沉积事件记录是强地震作用于深度不超过30 m的沉积盆地的软至未完全固结沉积物,使其发

生液化、底辟、卷曲、滑动、沉陷、塌落、错断、震裂及震碎等同沉积变形,从而形成具同沉积变形构造的震积岩^[11~24],它们的共同特征是层内沉积变形构造,一般尺度较小(mm级至m级),无论其规模、形态或产状如何变化,一般不改变上下围岩的产状。在济南南部山区,新近发现的多种地震成因的同沉积变形主要保存在李官组和朱砂洞组中,在馒头组中仅见混插沉积、地裂缝、微断裂和震褶曲。

2.1 震褶岩与滑移构造

震褶岩又称为卷曲变形或微褶皱纹理,是地震振动作用于软沉积物、尤其是纹层状沉积物而形成的层内褶曲,在馒头山、青杨村东山及滚球山都均发育此种变形构造(图2-4,图5A-C和图5G),其厚度10~50 cm,长度10~100 cm,褶曲轴面或变形纹层无一定产状,有的震褶层被侵蚀截切且与上覆层呈震积不整合接触(图5G),但不造成上下岩层产状的变化;可与粒序微断层及孤立岩块等伴生。

滑移构造发育在被震裂的半固结的白云岩的泥质夹层中,呈横向延长的楔形体(图5E,图6),其内层理与原始层面近垂直,是黄色钙质软泥受不均匀的地震力而滑移的结果。

根据此种变形构造中的层理与层面接近垂直(图5E),围岩为震裂岩,震裂隙充填物与滑移体均是

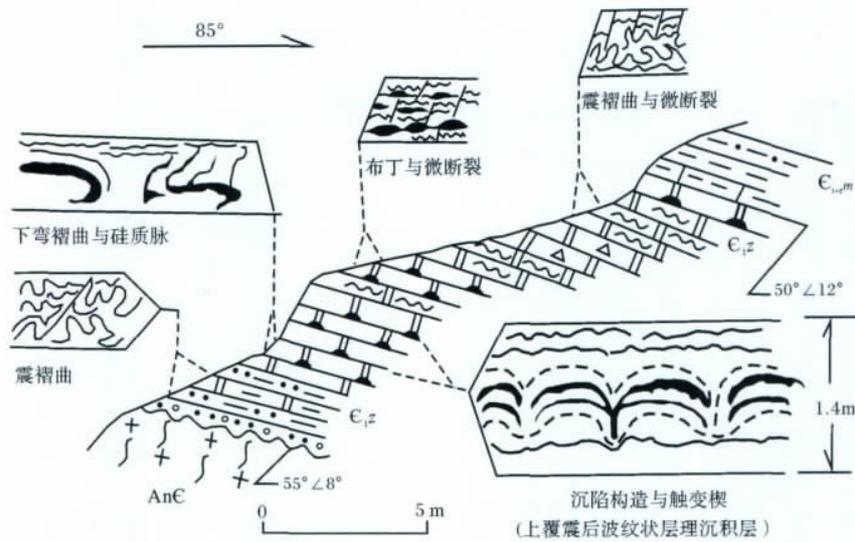


图4 青杨村东山信手剖面朱砂洞组中的地震引起的同沉积变形构造(剖面位置见图1)
 Fig.4 Syn-depositional deformation structures caused by earthquakes in the Zhushadong Formation of the free hand profile, the eastern hill to Qingyang village(see Fig.1 for the profile location)

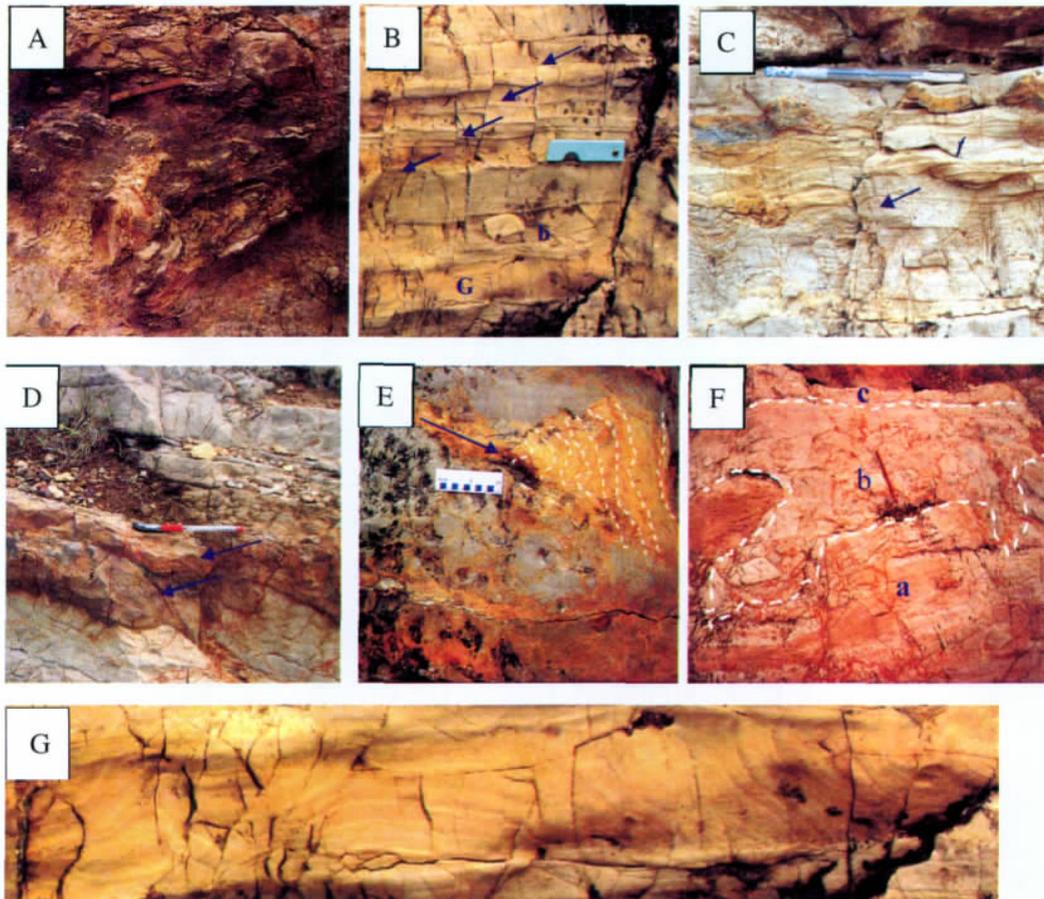


图5 馒头山剖面朱砂洞组中的地震沉积变形
 A. 震褶岩; B. 阶梯状粒序微断层(箭头)与孤立岩块(b)和震褶层(G)伴生; C. 微断裂(箭头)将震褶层(f)错断; D. 微断裂(箭头)将燧石层错断; E. 滑移构造,黄色钙质泥岩向右滑移(箭头),滑移使层理(虚线)近垂直于层面,围岩为震裂角砾岩,角砾间隙中被钙质泥充填; F. 震碎角砾岩(b)充填下伏震裂岩(a)的震裂缝,又被未震层覆盖; G. 放大B中的震褶层:其内褶曲被侵蚀截切且与上覆岩层呈震积不整合接触,震褶纹理产状虽多变,但不改变上、下岩层的产状。

Fig.5 Seismic depositional deformations in the Zhushadong Formation of the Mantoushan profile

弯矩力 M_s 作用下,软泥沉积物发生滑移(大箭头表示滑移方向),震褶曲消失,变形纹层理与层面呈大角度相交;(4)震后:在上覆沉积层自重应力 $\sigma_0 + \Delta P$ 作用下,压固成岩。震前白云岩(沉积物)呈半固结状态,而泥质沉积物夹层呈软塑状态,是因为碳酸盐沉积物比泥质沉积物固结快得多^[5]。

2.2 粒序微断层

粒序微断裂一般长 3~15 cm,断距 0.5~5 mm,剖面上呈阶梯状组合(图 2—4,图 5B、C 和 D,图 9D),也有仅发育一条的情况(图 5C),与各种地震沉积变形构造共生,分布广泛,在馒头山、青杨村东山、滚球山、红叶谷及天晴峪均有发现。它们是在地震结束后,受地震扰动、破坏的沉积物发生调整而产生的层内错断。

2.3 震裂角砾岩与震碎角砾岩

它们发育在朱砂洞组中(图 2;图 5E 和 F,图 7),是半固结状态的沉积物被地震震裂或震碎而成的脆性变形^[5,11,14,17]。震裂角砾岩(图 5E、图 5Fa)中角砾是由震裂隙分割的具拼接性的棱角状岩块,成分单一。震碎角砾岩(图 5Fb)的角砾成分复杂,角砾间不具拼接性,在重力作用下由震碎岩屑或角砾堆积而成,可充填地裂缝,横向不连续,与上覆未震层(图 4Fc)呈震积不整合接触。

2.4 震滑塌褶曲与枕状体和负载构造

震滑塌褶曲与负载构造和枕状体共生于红叶谷、滚球山和天晴峪等地的李官组泥质砂沉积层中。滑塌褶曲为轴面接近平卧的复式褶曲(图 7Af,图 7Bf),其中的褶曲轴面与次级褶曲轴面的倾向一致,符合滑塌褶曲的特征,同地点的以往研究^[25]指出,这类滑塌褶曲具同沉积特征,推测由古地震引起。枕状体(图 7Ap)伏于滑塌褶曲(图 7Af)之下,应是地震负载体

坠落的枕状、椭球状块体(球—枕构造)。负载构造内部层理发生向斜式下弯(图 7Cld,图 7D),由上覆密度较大、粒度较粗(粒径 0.1 mm)的钙质细砂层左右受地震震动和重力作用沉入下伏密度较小、粒度较细(粒径 <0.005 mm)的泥质层中而成,负载体间发育被挤入的下伏较细颗粒岩层的火焰状构造(图 7Cfm)。负载及球—枕构造已被中外地震地质学家认定为地震形成的软沉积变形构造,而且被模拟试验验证^[13,16,20,21]。

2.5 震裂缝和混插沉积

震裂缝发育在朱砂洞组(图 5F)和馒头组中(图 8A 和 B),是地震拉张力使古地表半固结的沉积层发生“V”字形裂开,属于脆性变形。震裂缝深度为 15~40 cm,被上覆沉积物充填而形成了剖面上呈楔形的充填构造。

混插沉积(Plunged sediment mixtures)是两种不同性质的沉积物,在强震作用下,上下叠置面上或在侧向上彼此之间发生的混合侵位而形成的软沉积变形构造,其概念由 Rossetti 2010 年提出^[24]。在红叶谷的馒头组中(图 8A 和 B①),受竖向震动作用影响,上部的黄色液化粉—细砂(粒度 0.01~0.1 mm)首先向下侵位于下部的红色泥质沉积物(粒度 <0.005 mm)中;然后,在横向震动作用下,黄色液化粉—细砂与红色泥质沉积物,在侧向上发生相对侵位,部分红色泥质沉积物叠于部分液化粉—细砂之上,从而造成了相互包容现象。

2.6 软硅质岩的变形构造

由于朱砂洞组中的硅质岩最初是软沉积物,此类软硅质岩受地震作用也形成了各种变形构造。主要有软硅质脉、软硅质层的布丁构造、塑性弯曲、蘑菇状底辟构造、沉陷构造与触变楔等。

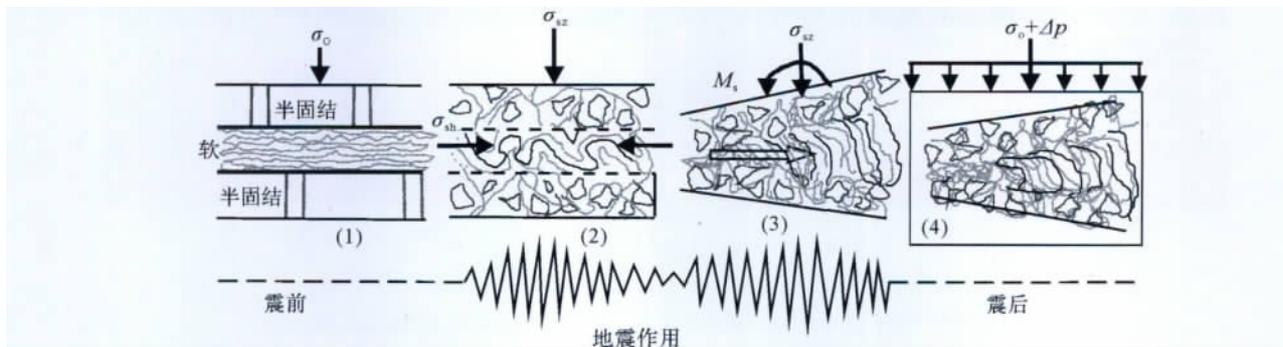


图 6 滑移构造的地震成因机理

σ_0 - 震前沉积层承受的上覆沉积层的自重应力; σ_{vz} - 地震作用于硅质白云岩的竖向附加应力; M_s - 地震弯矩力

σ_{sh} - 地震作用于岩层的水平向附加应力, ΔP - 震后上覆沉积层的自重应力增量

Fig. 6 Seismogenetic mechanism of sliding structures

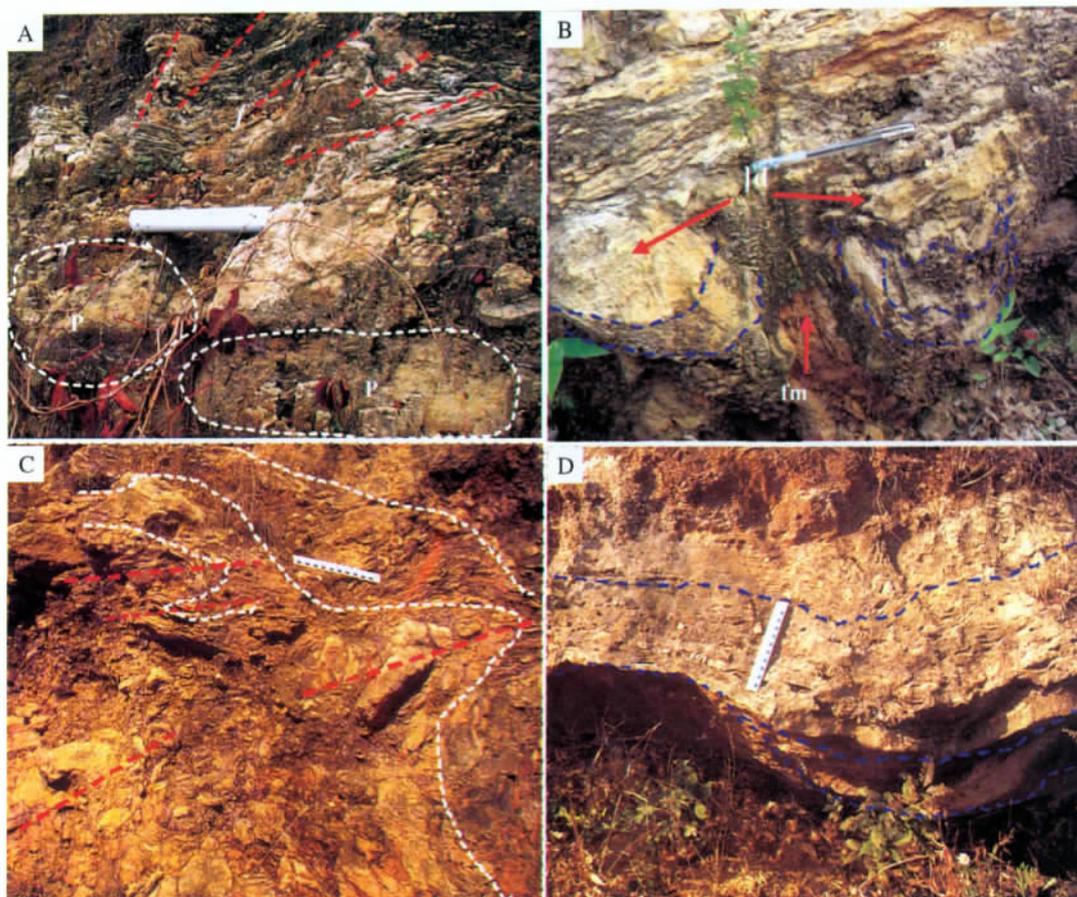


图7 红叶谷李官组地震沉积变形

A. 滑塌褶曲(f)与砂枕体(p),红色虚线为轴面迹线;B. 滑塌褶曲,红色虚线为轴面迹线;C. 负载构造,两负载体(ld)的上部相连,下缘均呈弧形,其内层理(蓝虚线)呈向斜式弯曲,负载体间为火焰构造(fm);D. 中厚层(厚度0.35~0.56m)泥质砂层负载构造。地点:A和C为红叶谷剖面,B和D为红叶谷黄金石屋北、圆红楼的南侧。

Fig. 7 Seismic depositional deformations in the Liguan Formation of the Hongyegu valley

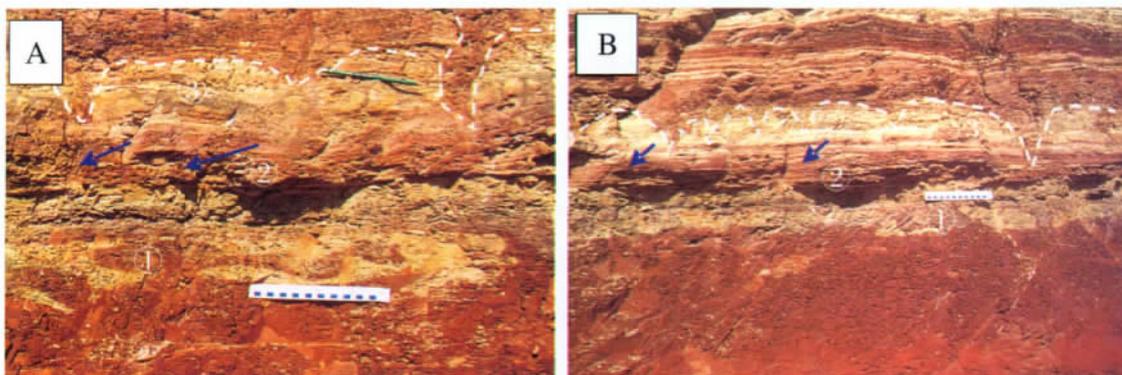


图8 红叶谷馒头组中的地震沉积变形

A和B自下而上:①混插沉积层;②粒序微断裂层;③震裂缝层

Fig. 8 Seismic depositional deformations in the Mantou Formation of Hongyegu valley

2.6.1 软硅质脉

硅质脉与燧石团块或燧石条带相连(图9A),表明硅质脉源于燧石团块或燧石条带;脉宽0.5~10

mm,长3~10cm。切割含脉的岩石样品,显示硅质脉在空间上呈不规则板状体(图9B)。硅质脉呈塑性弯曲状态(图9A、C),表明形成时发生了软塑性弯

曲。显微镜下观察,脉由玉髓、微粒石英组成,玉髓、微粒石英是同生 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 在成岩过程中经脱水作用形成。软硅质脉是软燧石团块或条带受地震力作用挤入围岩裂隙中的产物。

软硅质脉源于巨型或大型的软燧石团,其形成的机理:(1)震前,软硅质团块在较小的自重应力 σ_0 作用下保持平衡;(2)强震附加应力作用使软硅质团块的围岩产生震裂隙,同时软硅质团块中的硅胶体受振动触变,流变性增强;(3)强震附加应力继续作用,硅质团块中的硅胶被挤入围岩裂隙,形成了软硅质脉;(4)震后,随着上覆沉积层的自重应力增加,受压后脉变得更加弯曲。

2.6.2 布丁构造、下弯褶曲

软硅质岩的布丁(香肠)构造是软硅质层受地震拉伸力形成的产物。有的被拉断,有的未被拉断,它们常与粒序微断裂共生(图4,图9D)。有的软硅质层状布丁构造受地震水平挤压力作用而形成了下弯的倒转褶曲(图4),也可见到上弯的倒转褶曲。

2.6.3 蘑菇状底辟和硅质叠层石变形

蘑菇状底辟构造是软硅质层受地震挤压力形成的底辟式向上穹凸,形似蘑菇而得名,蘑菇体半径约

5 cm,下部与硅质层相连(图9E)。受震动软硅质层中的 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 粘度变小、流变性增强;然后,受水平挤压力发生自下向上的底侵(图3)而成。这种地震成因的蘑菇状底辟构造,在红叶谷和青杨村东山均可见到。

硅质叠层石变形是指受地震剪切力作用的层状硅质叠层石发生的局部小尺度错断和扭曲(图9F),即层状叠层石局部虽有错断和扭曲,但由于断距(mm级)很小,叠层石层仍大致横向延伸。

2.6.4 沉陷构造与触变楔

饱和砂土或饱和微晶碳酸盐受强震振动会发生液化。然而,饱和粘性土、软黏土及硅胶体沉积物受强震或外力扰动不能发生液化,但其粘稠度变小、抗剪强度降低、流塑性增强;当强震或外力扰动停止后,其粘稠度和强度逐渐恢复,软黏土和硅胶体等的这种“一触就变”的性质称为触变性^[26-29]。沉陷构造是地面以下饱和沉积物受震液化、触变而引发的地面下沉构造^[18],沉陷构造的主要特征是在纵剖面上,地面以下的沉积层断开且向下弯曲,造成地面沉陷。在地震区沉陷构造反映的震害称为震陷或称震沉现象^[18,28]。

青杨村东山的朱砂洞组硅质白云岩中发育多个

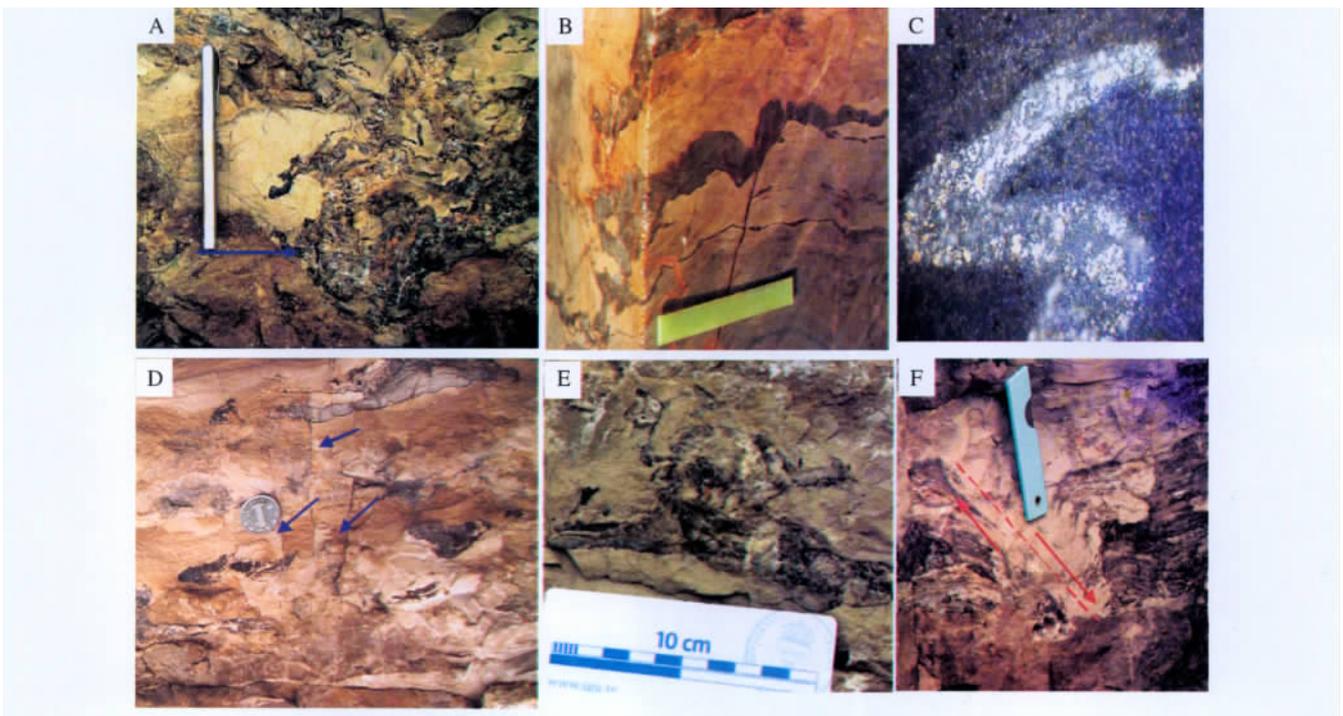


图9 红叶谷剖面朱砂洞组中的地震沉积变形

A. 源于软燧石团块(箭头处)的硅质脉; B. 硅质脉的立体形态; C. 显微镜下薄片中性弯曲的硅质脉(+)视域对角线长3.6mm,由玉髓、微粒石英组成; D. 粒序微断裂(箭头处)与黑色燧石布丁; E. 层状硅质岩的蘑菇状底辟构造; F. 被微断层错断和扭曲的硅质叠层石

Fig. 9 Seismic depositional deformations in the Zhushadong Formation of the Hongyegu profile

沉陷构造,其中,有三个相连,中间的一个已转变为触变楔(图4,图10A,B),三者间隔0.5~1.1 m。沉陷构造变形层的厚度为0.5~0.6 m,每两个沉陷中心之间的沉积层呈背斜式上弯。它们的原始沉积物是软硅质层与灰泥(经成岩形成了层状燧石与白云岩)。触变楔与地震断层崩积楔有着很大差别,后者发育在陆相发震断层中,由地震震碎或崩落碎屑岩组成^[29],属于震断层构造岩,但两者均称为地震楔。

Montenat 等研究了意大利拉布里亚区(Calabria, Italy)更新世滨海相砂屑灰岩楔(图10C,D)和西班牙阿利坎特省(Province of Alicante, Spain)的碎屑岩楔后,提出触变楔(Thixotropic wedge)是一种地震成因的软沉积物变形构造^[21]。但Montenat 等没有阐明触变的原理,他们实际上将此种变形构造归类于“浅部液化(shallow depth liquefaction)”(见文献[21] Fig. 3)。本文所阐述的触变楔(图10B)与图10C,D比较,形态特征相同,生成原理有别——灰泥受震液化的

同时,非液化的软硅质层受震发生了触变。

沉陷构造和触变楔的形成过程如下(图11): (1)震前:水平的沉积层在自重应力 σ_v 下暂时保持稳定;(2)强地震:受地震触动软硅质层变得更软,而灰泥发生了液化;在竖向地震应力 σ_{sz} 作用下,沉积层断开、下弯、沉陷,形成沉陷构造(此时, $\sigma_{sz} > \sigma_{sh}$); (3)地震应力增大,沉陷向深处发展,下伏的半固结层也发生下凹变形,两侧下弯的硅质层汇聚,形成了楔状体;同时,楔状体两侧的水平应力 σ_{sh} 增大,下弯岩层因挤压产生背斜式弯曲,背斜核部灰泥底辟上隆,轴面上部派生张应力(图11双向箭头线); (4)震后:地震应力消失,被上覆沉积层覆盖,自重应力 $\sigma_v + \Delta P$ 增大,压固成岩。

在此有必要对触变楔与震裂缝及震裂缝充填构造的差别作必要分析。三者的差别如下:(1)触变楔主要是软的非液化沉积物受地震触动使其粘度降低、流塑性变大(触变)而发生的塑性变形,由沉陷构造

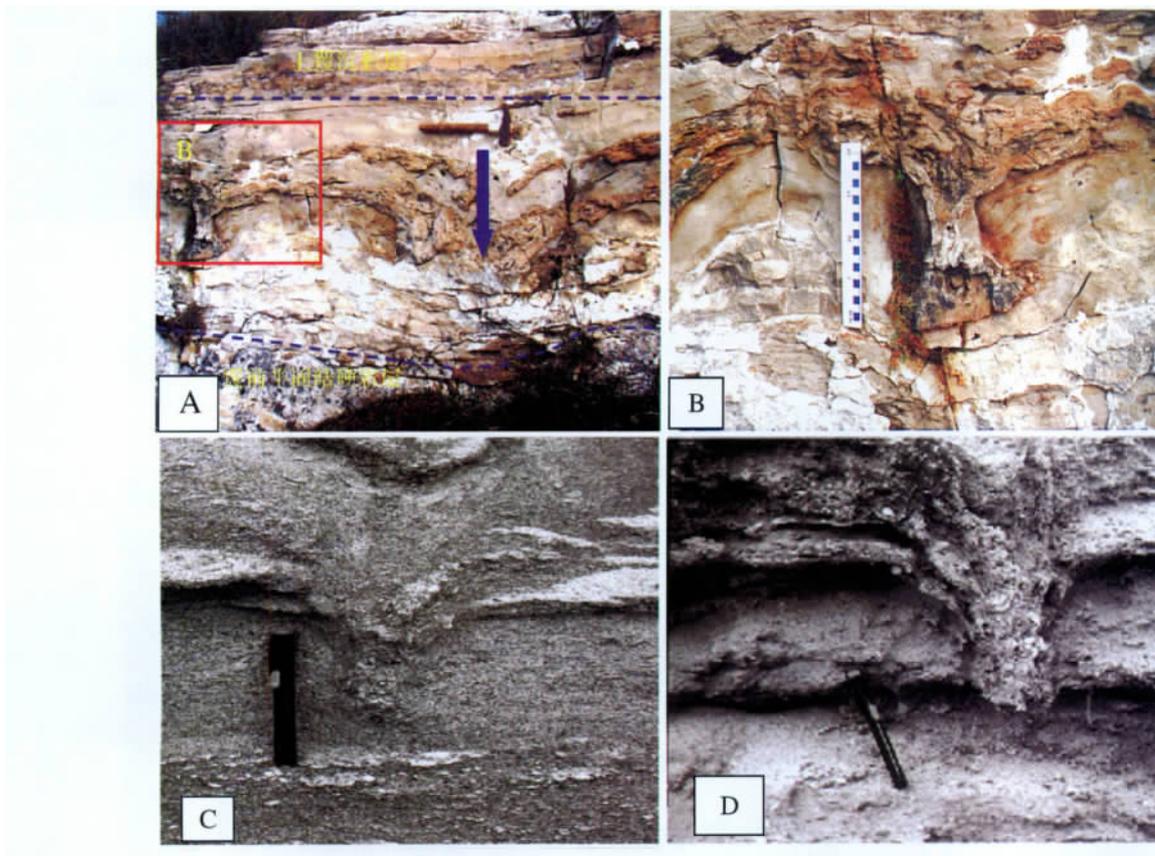


图10 青杨村东山朱砂洞组中的沉陷构造和触变楔以及与意大利触变楔(据 Montenat 等 2007)的对比

A. 沉陷构造,箭头线与沉陷中心线一致,其左侧与触变楔相连,其右侧与波状弯曲延伸硅质白云岩相连;

B. 触变楔,其左、右侧与沉陷构造相连; C 和 D. 意大利卡拉布里亚区更新世滨海砂屑灰岩触变楔

Fig. 10 The settlement structure and the thixotropic wedge in the Zhushadong Formation of the eastern hill to Qingyang village and contrasting with thixotropic wedges in Italy(after Montenat , *et al.* , 2007)

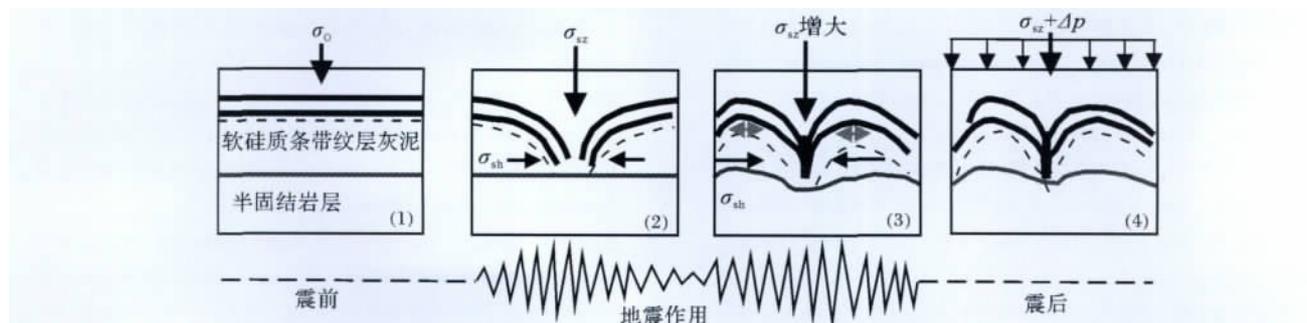


图11 沉降构造和触变楔的地震成因机理

σ_0 : 震前含硅质层沉积物承受的上覆沉积层的自重应力; σ_{sz} : 地震作用于硅质沉积层的竖向附加应力; M_s : 地震弯矩力
 σ_{sh} : 地震作用于沉积层的水平向附加应力 ΔP : 震后上覆沉积层的自重应力增量。粗黑线: 硅质层;
 中粗黑线: 半固结岩与软沉积物的界面; 虚线: 代表性微细层理; 双向箭头: 拉张应力。

Fig. 11 Seismogenetic mechanism of settlement structures and thixotropic wedges

向深处发展而成,楔体的形成与其围岩变形同步;
 (2) 震裂缝则是地震作用于半固结至未完全固结的沉积物生成的“V”形张性裂开,属于脆性变形;(3) 震裂缝充填构造也常呈楔形,但其充填物可是软沉积物,也可是脆性的震碎角砾,楔体与裂缝的形成过程一般不同步。

3 意义和结语

本文所阐述上述的地震沉积事件记录对应的地质时代为早寒武世沧浪铺—龙王庙期(约520~525 Ma)。根据山东省区域地质研究和有关文献^[1~4,7,8],当时距研究区最近的活动断裂构造为济南以东约200 km的古郯庐断裂带;也鉴于郯庐断裂地震带这类超岩石圈深大断裂地震带的实际范围不仅包括其本身,也包括其附近约150~200 km的活动地带,在此范围内发生的地震事件都直接或间接地反映了深大断裂带的构造与地震活动^[30];因此,这些地震沉积事件记录是加里东构造运动初期的华北板块内强地震记录,属古郯庐断裂带构造活动的响应,它们与古郯庐断裂带附近的辽宁下寒武统大林子组和陕西洛南朱砂洞组地震沉积事件记录^[2,31]都属于华北古板块内同一古地震活跃期的产物。

在济南南部馒头山附近发现的上述古地震沉积事件遗迹(卷曲变形、粒序微断层、滑移构造、滑塌褶曲、负载构造、枕状体、混插沉积、软硅质脉、软硅质层底辟构造、硅藻叠层石变形、沉降构造、触变楔、布丁、震裂缝、震裂角砾岩及震碎角砾岩等)是很好的地球科学研究新资料,丰富了馒头山和济南南部地区的地质科学内涵。

致谢 感谢审稿专家,为本文的完善提出的许多建设性修改意见与建议。

参考文献(References)

- 1 山东省地质矿产局. 山东省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1991:78 [Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province. Regional Geology Memoirs of Shandong Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 78]
- 2 乔秀夫,高林志,彭阳. 古郯庐带新元古界——灾变层序·生物[M]. 北京:地质出版社,2001:1-422 [Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Peng Yang. Neoproterozoic in Paleo-Tancheng-Lujiang Fault Zone—Catastrophe·Sequences·Biostratigraphy [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001:1-422]
- 3 罗志立,李景明,李小军,等. 试论郯城庐江断裂带形成、演化及问题[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2005,35(6):699-706 [Luo Zhili, Li Jingming, Li Xiaojun et al. Discussion on the formation, evolution and problems of the Tancheng-Lujiang fault zone [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(6): 699-706]
- 4 田洪水,万中杰,王华林. 鲁中寒武系馒头组震积岩的发现及初步研究[J]. 地质论评,2003,49(2):123-131 [Tian Hongshui, Wan Zhongjie, Wang Hualin. Discovery and preliminary study on seismites of the Cambrian Mantou Formation in the central Shandong area [J]. Geological Review, 2003, 49(2): 123-131]
- 5 田洪水,张增奇,张邦花,等. 山东临朐红丝石层中的古地震事件记录[J]. 中国地质,2006,33(5):1137-1143 [Tian Hongshui, Zhang Zengqi, Zhang Banghua et al. Records of paleoseismic events in the red-silk stone bed in Linqu, Shandong [J]. Geology in China, 2006, 33(5): 1137-1143]
- 6 田洪水,袁静,张邦花,等. 沂沭断裂带及其近区不同地质时期地震液化脉构造对比[J]. 沉积学报,2006,24(4):496-501 [Tian Hongshui, Yuan Jing, Zhang Banghua, et al. The correlation of liquefied vein structures caused by earthquake in different geological periods in the Yishu Fault Zone and its vicinity [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 496-501]

Paleoseismic Depositional Events of the Famous Geological Mountain-Mantoushan and Its Vicinity in the Early Cambrian

ZHANG Bang-hua^{1,3} TIAN Hong-shui³ ZHANG Zeng-qi² DU Sheng-xian²

(1. Shandong Normal University, Jinan 250014; 2. Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Jinan 250014;

3. Shandong Jianzhu University, Jinan 250014)

Abstract: The well known geological mountain-Mantoushan is located in the mountain area of southern Jinan city. The standard (stratotype) profile from the Longwangmiao Stage to the Zhangxia Stage of the Lower middle Cambrian of the North China is established here. Here, geological traces are so rich and research history is so long that Mantoushan mount is famous at home and abroad. The Jinan area lies in the west side of the Tanlu fault and seismic zone. During the early Cambrian, a set of terrigenous clastic sediments consisted of sand and mud intercalated with carbonate were deposited in the western Shandong region including Jinan city where was littoral, sabkha and epicontinental sea, which stratigraphic sequence, from bottom to top, was the Liguang Formation ($\in_1 l$), the Zhushadong Formation ($\in_1 z$) and the Mantou Formation ($\in_{1-2} m$).

By means of field observation and lab-examination, various syn-sedimentary deformation structures caused by earthquakes, namely seismites, were identified in the Lower Cambrian of Mantoushan mount, eastern hill to the Qingyang village, Hongyegu valley and Gunqiushan mount, and so on. The syn-sedimentary deformation structures discovered by the study include convolute deformation (seismic fold), graded micro-fault, gliding structure, slump fold, load structure, pillow mass, mixed insertion sediment, soft siliceous vein, diapir structures of soft siliceous layers, deformation of diatoms stromatolitic, settlement structure, thixotropic wedge, boudinage, seismic crack or fissure, shattered breccia and seismic breccia, and so on. Most of them belong to plastic deformation structures of soft-sediments, but shattered breccia, seismic breccia and seismic crack or fissure are brittle deformation structures of semi-consolidated to un-completely consolidated sediments. Their characteristics and formation mechanism are detailed in this paper.

The thixotropic wedge has been reported firstly in China. Some thixotropic wedge and settlement structures developed in dolomite with siliceous layers, and their original sediment was dolomitic lime-mud with soft siliceous layers. By triggering of strong earthquake, soft siliceous layers became more soft because viscosity of siliceous sediment ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) get diminished, meanwhile dolomitic lime-mud was liquefied. Under vertical shock force, soft siliceous layers were cut off, and subsequently sinkage of disconnected siliceous layers formed settlement structure, which extended down so that disconnected siliceous layers converged to result in the formation of thixotropic wedge.

Differences of thixotropic wedge, seismic crack and filling structure of seismic crack are as follows: (1) Thixotropic wedge are one of plastic deformations which are formed for viscosity of soft non-liquefied sediments is diminished and their rheological property is enhanced (thixotropy) by earthquake triggering. With settlement structure going on to deep, thixotropic wedge was formed. Formations of wedge body and its host rock are synchronous; (2) Seismic crack is a tensile fissure of the "V" shape, which belongs to brittle deformation of semi-consolidated or incompletely consolidated sediment formed by the earthquake action; (3) The filling structure of seismic crack is usually wedge yet, but its filling is soft sediment or brittle seismic breccia. In general, the formation process of wedge body is out of synch with that of the crack.

On the basis of the distribution of palaeo-tectonic plates and seismic zones in the early Cambrian, it is considered that these seismic sedimentary traces are records of the intra-plate ancient earthquakes during the early Cambrian, and it is can be deduced that they are response to tectonic activities of the Paleo-Tanlu fault zone. The discovery of paleo-seismic event records and the interpretation of this paper enrich the geological sciences connotation of the southern Jinan area, especially the Mantoushan mount.

Key words: paleo-seismic depositional event; synsedimentary deformation structure; the Early Cambrian; Mantoushan; Jinan