

皖北新元古界软沉积物液化变形-塌落叠合构造的古地震成因研究

王 熙, 王明镇*

山东科技大学地质科学与工程学院, 山东青岛 266590

摘 要: 在皖北新元古界四十里长山组下部粉砂岩层中, 发育有一个软沉积物液化变形-塌落叠合构造。观测剖面共分为三部分: 下部为海啸砾岩未变形层, 中部为液化均一层、球枕状层和塌落叠合层, 上部为震积不整合面, 不整合面之上为海啸砾岩未变形层。共同构成一个完整的地震-海啸震积岩序列。中部的液化均一层、球枕状层和塌落叠合层是震积事件的主旋回层。对剖面特征及成因机理研究分析后发现, 该剖面位于浅海陆棚边缘斜坡相带。在古地震多旋回脉动震颤作用下, 经液化均一变形, 负载体下沉滑覆及盖层塌落多重叠合, 最终形成具有软沉积物变形特征的叠合构造。四十里长山组沉积期, 位于浅海陆棚边缘斜坡地带的粉砂质软沉积物, 为震颤变形的能量转化提供了物质基础。而强地震的多旋回脉动作用, 给软沉积物液化均一变形、负载体下沉滑覆、盖层塌落叠合等提供了原动力。

关键词: 叠合构造; 球枕状层; 震积岩; 多旋回脉动; 液化均一层

中图分类号: P534.3; P315.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.03.07

A Study of Paleoseismic Causes of Neoproterozoic Soft-sediments Liquefaction Deformation and Slump Composite Structures in Northern Anhui Province

WANG Xi, WANG Ming-zhen*

Geological Science and Engineering College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590

Abstract: Liquefaction deformation-slump composite structures of soft-sediments are developed in the bottom siltstone layer of Neoproterozoic Sishilichangshan Formation in northern Anhui Province. Detailed observation reveals that this section can be divided into three parts. The lower part is a tsunamite layer with no deformation, the middle part is a composite structure which includes liquefaction homogeneous layer, ball-pillow-like layer and slump composite layer, and the upper part is a seismic unconformity layer covered with tsunamite undeformed layer. These parts form a complete earthquake-tsunami seismites sequence, with the middle composite structure being the main cycle layer in this seismites event. Based on an analysis of section characteristics and formation mechanism, the authors found that the section is located in the shallow continental shelf margin of the slope facies. In the paleoseismic multicycle and pulsed tremor, the liquefied homogeneous deformation, load stem subsidence and caprock collapse experienced multiple superimposition, and all these factors ultimately formed a composite structure with soft-sediment deformation features. The powder sandy soft sediments in the shallow continental shelf margin of the slope zone provided the material foundation for tremor deformation energy conversion in Sishilichangshan Formation sediment period. The multicycle pulse of a strong earthquake provided the driving

收稿日期: 2012-06-11; 改回日期: 2012-11-14。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 王熙, 女, 1982年生。博士研究生。主要从事沉积学与地质事件研究。通讯地址: 266510, 山东青岛经济技术开发区前湾港路579号。E-mail: kinsoy@163.com。

*通讯作者: 王明镇, 男, 1945年生。教授, 博士生导师。从事古生物地层及层序地层研究。

force for the soft sediment liquefaction uniform deformation, load stem subsidence, caprock collapse and superimposition.

Key words: slump composite structures; ball-pillow-like layer; seismite; multicycle pulse; homogeneous layer

地震是地球灾变事件的表现形式之一, 研究古地震保留在地层中的原始记录, 破解震积岩的形成过程及地质作用, 备受地质界关注。自 1969 年 Seilacher 研究美国加州地区中新世蒙特利页岩提出了“震积岩”(seismites)概念, 并将其定义为水下沉积物受地震作用的再沉积层(Seilacher, 1969)。1984 年 Seilacher 又进一步将微褶皱纹理、断裂递变层、均一层作为震积岩的同沉积构造标志(Seilacher, 1984), 将震积岩的研究引入高潮。与此同时, 我国的地震学家、地质学家也掀起了震积岩研究的小高潮, 先后开展了地震与沙土液化的研究和试验, 证明浊积岩中常见的重荷构造与枕状构造是不断震动造成的(刘颖等, 1984; 冯先岳, 1989; 梁定益等, 1997)。宋天锐 1988 年研究并建立了北京十三陵前寒武纪雾迷山组碳酸盐岩地震-海啸序列(宋天锐, 1988), 吴贤涛、尹国勋 1992 年描述了四川峨嵋晚侏罗世湖泊沉积中的碎屑岩原地系统地震液化序列, 对液化均一层给予了足够重视(吴贤涛等, 1992)。梁定益在扬子西缘、及藏东、滇西冈瓦纳北缘相继识别出奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系不同规模的震积岩, 发现了多旋回的震积岩序列(梁定益等, 1991, 1994a, b, 1997)。乔秀夫等在华北地台东部建立了碳酸盐岩震动液化地震序列, 萨布哈震积岩序列(乔秀夫, 1996; 乔秀夫等, 1994, 1996, 1997, 2001b)。近期又提出了震积岩的三分方案, 特别强调准确识别软沉积物变形是古地震研究中的关键环节, 对软沉积物的液化变形应给予更多关注(乔秀夫等, 2009)。作者近期在皖北新元古界地

层剖面观测中, 对一组软沉积变形构造进行了详细的观察与描述, 发现这是一组由软沉积物液化均一变形、球-枕状体沉陷滑覆变形及盖层塌落叠合变形形成的多重变形构造, 它是在浅海陆棚边缘斜坡相带, 在古地震多旋回震颤驱动下, 负载体下沉陷落进入液化层后又发生微距离滑覆披盖, 引起盖层垮塌叠合形成的。分析研究它的变形过程, 对认识在地震多旋回条件下软沉积物变形构造的形成有积极作用。

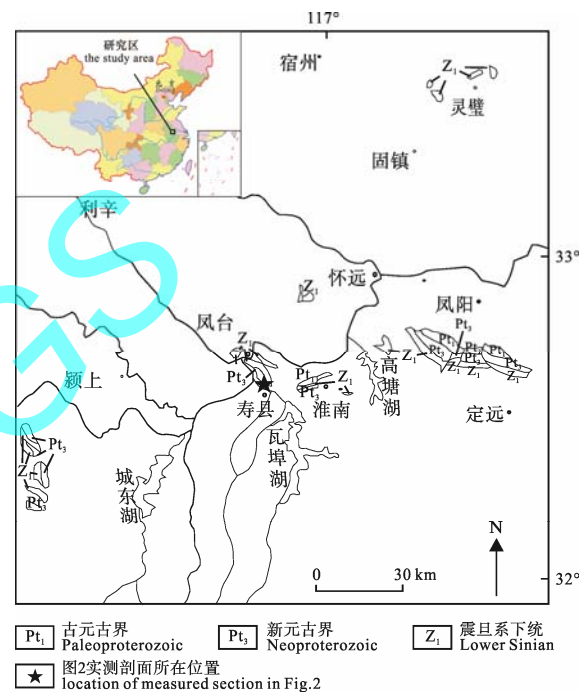


图 1 研究区区域地质图
Fig. 1 Location of the study area

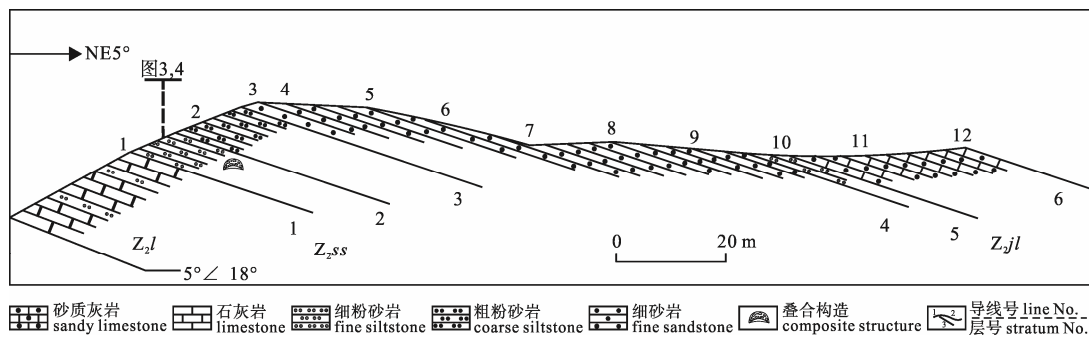


图 2 狮子山新元古界实测剖面图
Fig. 2 Measured geological cross section of Neoproterozoic strata in Shizishan, northern Anhui Province
Z₂l-新元古界刘老碑组; Z₂ss-新元古界四十里长山组; Z₂jl-新元古界九里桥组

Z₂l-Neoproterozoic Liulaobei Formation; Z₂ss-Neoproterozoic Sishilichangshan Formation; Z₂jl-Neoproterozoic Jiuliqiao Formation

皖北新元古界四十里长山组出露广泛,观测剖面位于寿县八公山区(图 1),属安徽地层区,淮南地层小区。下伏地层刘老碑组,为一套浅海相潮下低能环境的泥灰岩夹粉砂质泥岩和粉砂岩的沉积,二者为整合接触。上覆地层为九里桥组褐灰色厚层状泥质灰岩夹青灰色薄层状泥质灰岩和薄层石灰岩,具水平层理和斜波状层理,属潮下低能带的沉积,二者亦为整合接触。四十里长山组出露厚度约

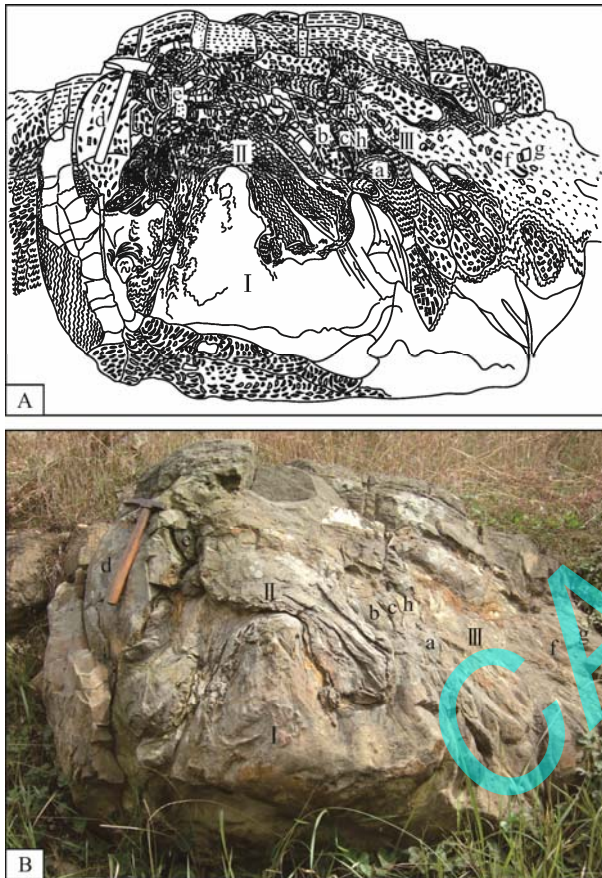


图 3 新元古界四十里长山组液化变形-塌落叠合层野外露头观测剖面图

Fig. 3 Outcrop observation profiles of liquefaction deformation-slump composite structures in Neoproterozoic Sishilichangshan Formation

A-液化均一层、球枕状层和塌落叠合层野外观测剖面素描图;
B-液化均一层、球枕状层和塌落叠合层野外观测剖面照片;
I-液化均一层; II-球枕状层; III-塌落叠合层(锤把长度 31 cm);
a-椭圆球状球枕状体; b-枕状球枕状体; c, h-纺锤状球枕状体; d-不规则层块状碎层块; e-碎块状碎层块; f-砾状砾屑; g-颗粒状砾屑
A-section sketch of the homogeneous layer, ball-pillow-like layer and slump superimposed layer in Neoproterozoic Sishilichangshan Formation; B-photograph of the homogeneous layer, ball-pillow-like layer and slump composite layer in Neoproterozoic Sishilichangshan Formation; I-liquefaction homogeneous layer; II-ball-pillow-like layer; III-slump composite layer(length of the hammer: 31 cm); a-the ellipsoidal ball-pillow-like structure; b-the pillow ball-pillow-like structure; c, h-the Spindle-shaped ball-pillow-like structure; d-the irregular bedded broken layer structure; e-the chunky broken layer structure; f-gravel-like psephitic structure; g-granular psephitic structure

60余 m,分为三段,下段为灰色中厚层-厚层状钙质细粉砂岩,具斜波状层理及交错层理,厚度 11.37 m;中段分为两层,下层为灰褐色厚层状含铁粗粉砂岩,发育交错层理,厚 16.79 m;上层为褐灰色中厚层状钙质石英细砂岩,含少量海绿石颗粒成分,具斜波状层理,厚度总计 35.25 m。上段为青灰色中厚层含铁白云石细粉砂岩,含海绿石颗粒及少量暗色矿物,块状构造,厚度 2.95 m(图 2)。软沉积物液化变形-塌落叠合构造发育于四十里长山组下段,分析其沉积环境为陆棚边缘斜坡相(乔秀夫等, 2001a)。

1 液化变形与塌落叠合构造特征及变形机理

观察剖面岩层走向 95°,倾向 5°,倾角 18°,由老到新可分为三部分,下部为啸积砾岩未变形层,厚度约 0.30 m。中部为液化变形-塌落叠合层,厚度 0.90 m。上部为后续沉积的啸积砾岩、含砾屑的泥质细砂岩未变形层,厚度 0.30 m,细砂岩具正序层理或平行层理,局部为斜波状层理和交错层理,与液化变形层-塌落叠合层为震积不整合接触。组成完整的震积岩-啸积岩旋回(图 3)。

1.1 液化均一层特征

液化均一层位于液化变形层-塌落叠合层的底部(图 3A-I、3B-I),厚约 0.60 m,岩性为厚层块状钙质粉砂岩,局部含砾屑。它是砂质软沉积物在未固结或弱固结阶段,受地震震颤摇晃作用,产生了去层理化作用,因此不显层理,属质地细腻的液化均一变形构造(吴贤涛等, 1992; 鄢继华等, 2009)。可见粉砂质颗粒有定向排列组合现象,表现为前后衔接的豆荚状或线粒状微褶皱纹理。是在震颤摇晃作用下,软沉积物液化后颗粒水塑性变形,重新排列组合形成的微结构纹理,局部可见竖向微裂纹间隔分布。液化均一层顶面呈马鞍状,是由于受不断的震颤晃动作用,颗粒重新排列组合,密度增大,体积



图 4 新元古界四十里长山组观测剖面宏观照片(锤把长度 31 cm)

Fig. 4 Macro photograph of the Neoproterozoic Sishilichangshan Formation observation section (length of the hammer: 31 cm)

收缩;也有可能受P波、S波的颠簸作用,产生过微距离的滑脱变形,导致不均匀沉降,但滑脱变形是很轻微的。

1.2 液化披盖层、球枕状层与塌落叠合构造特征

液化披盖层、球枕状层与塌落叠合构造位于液化均一层上部,是由液化层、球枕状层与塌落碎屑层叠合形成的变形层,厚度变化大,呈不规则状分布,按构造成因可分成三类变形构造。

一是软沉积物液化披盖层:为位于液化均一层之上的饱水砂层,受震颤摇晃作用发生液化,并在连续的震颤作用下,随底盘液化均一层的变形发生微距离滑覆和不均匀沉降,形成液化披盖变形构造。该构造紧贴马鞍形液化均一层上,两侧呈被状下披(图 3A-II, 3B-II),垂至凹处成足状收敛,它显示液化流淌纹理,由流状泥条和流状砾屑组成,原始成分单一,为粉砂质。虽有滑覆过程,但仍完整成层。

二是球枕状层:位于液化披盖层内,是负载体连续下沉陷落,形成一个密集的球枕状构造层,而原始的产生负载构造的岩层已消失或大部消失,它是经液化与重力作用下的一种岩层转换形式(乔秀夫等, 2008; 杜远生等, 2007),球枕状体形状有椭球状(图 3A-IIa, 3B-IIa),枕状(图 3A-IIb, 3B-IIb),纺锤状(图 3A-IIc, h, 3B-IIc, h),岩性为粗粉砂岩,个别为嘯积砾岩,与盖层岩性相近。由于随液化层微距离滑覆披盖变形,球枕状体原始个体形态发生改变,多向右倾斜或直立。

三是塌落叠合构造:位于枕状层之上,是随着液化层与球枕状层滑覆披盖变形,盖层破碎塌落,盖在液化变形层与球枕状层之上,形成塌落叠合构造。它由塌落碎层块和塌落砾屑组成,碎层块呈不规则层块状(图 3A-II d, 3B-II d),碎块状(图 3A-II e, 3B-II e);直径大小悬殊、大者直径几十厘米,甚至更大,小的几厘米;塌落砾屑呈砾状(图 3A-II f, 3B-II f)、颗粒状(图 3A-II g, 3B-II g)。塌落构造在剖面上呈不均匀分布,以马鞍顶为界分左右两部分,左半部分主要为塌落碎层块,因体积和重量均大,陷进液化层较深处,呈近乎直立状。右半部分主要为塌落砾屑,产状较平缓。岩性组成有粉砂-细砂岩,嘯积砾岩。粉砂-细砂岩磨圆度、分选性一般,局部含泥质;嘯积砾岩砾屑呈板状,柱状、竹叶状等,部分有棱角,分选性差。与上覆盖层岩性相符,说明塌落碎层块和塌落砾屑来自液化层顶部盖层,属近原地塌落类型。

1.3 液化变形-塌落叠合构造的变形机理

液化变形-塌落叠合构造是软沉积层受地震震颤作用,出现液化均一变形、滑覆披盖变形与盖层负载垮塌叠合等一系列的同沉积变形作用形成的。底部液化均一层:是软沉积层受地震震颤作用,砂质颗粒产生滑移,改变原来的排列状态,应力由砂骨架转移至水,引起超孔隙水压力,产生液化作用(乔秀夫等, 1994),并出现去层理化作用,形成液化均一层构造。后受连续不断的震颤晃动作用,密度逐渐增大,并产生近距离滑脱变形,横向伸展,纵向不均匀收缩,出现纵向微裂纹,形成马鞍形构造。中间的液化披盖层和球枕状构造:液化层最大特点是承载力下降,盖层粗颗粒沉积物因自身重力原因,在震颤摇晃作用下产生负载下沉,以致陷落形成球枕状层。球枕状体在剖面上表现为负载体被液化层包裹形成沉陷包裹体,呈椭球状、枕状、纺锤状(图 3Aa, b, c, h, 3Ba, b, c, h),液化层受微距离滑覆披盖变形作用,形成马鞍形被状披盖构造。塌落叠合层:是盖层随液化层滑覆披盖变形作用而快速垮落形成的破碎变形构造,破碎体呈层块状,碎块状及砾屑状,形状多不规则,块度大小悬殊,棱角明显,显示快速破碎垮落特征。在液化变形-塌落叠合层中,由于液化层因受重力研激作用而四溢充渗,注入薄弱缝隙带形成溢注构造,后期可能经历泄水过程,形成溢注-泄水构造:包括塌落层块缝隙中的溢注-泄水构造,这些构造发育有液化变形纹理,显示受塌落体快速坠落而产生的研激特征。

2 液化变形-塌落叠合构造的地质成因

2.1 弱固结或未固结粉砂质软沉积物是液化变形-塌落叠合构造形成的物质基础

四十里长山组沉积期,本区正位于浅海陆棚边缘的斜坡地带(乔秀夫等, 2001a),沉积了一套细粉砂-粗粉砂质软沉积物,粉砂质沉积物境下观察显示石英碎屑含量 80%~85%,填隙物含量 10%左右,主要为铁白云石,并含少量方解石,黑褐色铁质矿物呈块状、点状分布,含 5%,偶见海绿石及片状白云母。石英碎屑呈颗粒结构,接触式胶结,磨圆度差,多为棱角状、次棱角状,分选度一般,粒度在 0.027~0.09 mm 之间。冯先岳震动液化模拟试验结果显示,小于 0.11 mm 粒径的细砂质更容易液化(冯先岳, 1989),刘颖给出的可以液化土的平均粒径在 0.02~1 mm 之间(刘颖等, 1984)。对比以上指数可以看出,本区粉砂岩粒径大小及均匀指数正处在液化沙土的最佳范围,具有产生地震液化的物质条件。

即弱固结或未固结粉砂质或细砂质软沉积物,为震颤变形的能量转化提供了物质基础。

2.2 古地震事件是软沉积物液化变形的原动力

皖北地处华北板块东南缘,东接古郟庐带(乔秀夫等, 1999),南邻秦岭—大别山东西向板块缝合带,新元古代时期(特别是晋宁运动时期),曾发生过洋壳向华北板块南缘的俯冲(Wang et al., 1984; 刘波等, 1999)。中朝板块从震旦纪开始裂解为华北块体和胶辽朝块体,两个块体的界线即为古郟庐断裂(乔秀夫等, 1999, 2002)。郟庐带是长期活动的断裂地震带,地震成因岩石是强地震事件的记录,强地震事件是剧烈构造活动的反应(田洪水等, 2007)。皖北地区紧邻板块构造活动边缘地区,事件地层资料显示,新元古界沉积地层中,存在多期、多幕次的地震沉积层记录,如苏北的贾园组,淮南的刘老碑组,四十里长山组等(乔秀夫等, 2002; 贾志海等, 2003; 李双应等, 2003)。地层中的液化碳酸盐岩脉,液化卷曲变形构造等震积岩均十分发育,乔秀夫先生共识别出五个地震活跃期(乔秀夫等, 1994, 1997, 2001a, b)。徐宿地区震旦纪基性岩浆侵入体的同位素年龄值为 738.6~604 Ma 之间(潘国强等, 2000)。强地震灾变震积岩的发育和基性岩浆侵入等事件层与 Rodinia 超大陆在震旦纪的裂解时间是十分一致的(乔秀夫等, 1997, 2002; 潘国强等, 2000)。本观测剖面的液化变形-塌落叠合构造,是新元古界四十里长山期本区受板块地震活动带影响的真实反映。

对现代地震的研究已总结出,地震具有明显阶段性特征。一次 $M_s7\sim 8$ 强震的“活动周期”通常可以分为前震阶段,主震阶段和余震阶段三个时期(梁定益等, 2010)。在此过程中,会产生与之相对应的软沉积物变形构造,在垂向上形成了具有规律组合特征的震积岩序列。正如本观测剖面垂向序列包括 A 段:是前一个地震旋回与本地震旋回之间的过渡沉积层,岩性为前一个地震旋回引起的海啸沉积砾岩。B 段:液化均一层,是较强地震引起的,推测地震震级应不低于里氏 6 级(乔秀夫等, 1994)。C 段:液化变形层及球枕状层,是地震脉动高潮期,释放能量达到最大,震颤作用最强烈,弱固结软沉积层在较强的晃动条件下,产生液化作用(乔秀夫等, 1994)。由于承载力减弱,无法承载上覆沉积物重量,盖层负载下沉形成球枕状层。D 段:塌落叠合层,是主震过后,有余震发生,地下物质代偿平衡过程仍在延续,出现盖层负载垮落的重力沉积事件,形成塌落叠合构造。E 段:是本次地震脉动旋回结束后,形成的正常沉积层。

依据地质专家对震级大于里氏 6 级的软沉积物能发生液化的推论(乔秀夫等, 2006),结合本区观测剖面震积岩垂向组合特征,可以推测新元古界四十里长山组沉积期,引起软沉积物液化变形-塌落叠合多重变形的强地震震级应大于 6 级。且经历了从前震、主震到余震的多旋回震颤过程,为变形构造的形成提供了原动力。

3 结论

根据球-枕状体、层块体及砾屑成分来自直接盖层的粉砂-细砂岩及啸积砾岩,液化均一层,液化滑覆披盖层及球枕状层分层完整,层次有序,剖面上滑脱和滑覆变形特征不突出,推测滑脱或滑覆是很轻微的微距离变形,由此可以认定,整个液化变形-塌落叠合构造是以原地负载沉陷塌落为主,微距离滑覆变形为辅的软沉积物变形构造,它们组成了震积岩-啸积岩地震旋回的主体。

从底部的啸积砾岩到粉砂岩再到顶部啸积砾岩,说明沉积环境经历过强烈动荡环境,到稳定的浅海陆棚边缘沉积环境,再到强烈动荡的海啸沉积环境。而粉砂质沉积层沉积过程中,又有多次震颤灾变发生。在震颤过程中,形成了液化均一层、液化滑覆披盖层、球枕状层与塌落叠合层多重叠合作用的软沉积物变形构造。显示本区当时的沉积环境,曾经历过一个多次的强弱震荡时期,即经历了从前震、主震到余震的多旋回震颤过程。粉砂质软沉积层提供了液化变形的物质基础,强地震灾变是变形构造形成的原动力。

震积岩在垂向上的组合特征是地震脉动旋回过程的直接响应,单一剖面上的完整的震积岩垂向序列是很少见的,它更能揭示古地震的震颤过程及旋回特征,这是因为相同剖面上的沉积岩性具有共同的震源距离和受震环境,更容易区别震颤作用的强度及影响程度。分析剖面上下不同的震积构造类型,对认识古代地震的旋回周期及相应的软沉积物变形过程具有积极意义。

致谢:审稿人和专家对本文做了细心的审稿并提出了宝贵的修改意见,非常感谢!

参考文献:

- 杜远生, SHI G, 龚一鸣, 徐亚军. 2007. 东澳大利亚南悉尼盆地二叠系与地震沉积有关的软沉积变形构造[J]. 地质学报, 81(4): 511-518.
- 冯先岳. 1989. 地震振动液化形变的研究[J]. 内陆地震, 3(4): 209-307.

- 贾志海, 洪天求, 郑文武, 李双应. 2003. 皖北新元古代望山组震积岩的基本特征及其形成环境分析[J]. 地层学杂志, 27(2): 146-158.
- 李双应, 洪天求, 郑文武, 贾志海. 2003. 皖北新元古代刘老碑组滑塌沉积及其地质意义[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 26(6): 1115-1120.
- 梁定益, 聂泽同, 宋志敏, 万晓樵. 1997. 正在萌芽段的震积地层学[J]. 高校地质学报, 3(4): 458-461.
- 梁定益, 聂泽同, 宋志敏, 赵崇贺. 2010. 海相地层中地震遗迹宏观特征与鉴别[J]. 自然杂志, 32(2): 101-105.
- 梁定益, 聂泽同, 宋志敏. 1994a. 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, 19(6): 845-850.
- 梁定益, 聂泽同, 宋志敏. 1994b. 扬子西缘东吴伸展运动[J]. 地球科学, 19(4): 443-453.
- 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[J]. 现代地质, 5(2): 138-147.
- 刘波, 钱祥麟, 王英华. 1999. 华北板块早古生代构造-沉积演化[J]. 地质科学, 34(3): 347-356.
- 刘颖, 谢君裴. 1984. 砂土震动液化[M]. 北京: 地震出版社.
- 潘国强, 刘家润, 孔庆友, 吴俊奇, 张庆龙, 曾家湖, 刘道忠. 2000. 徐宿地区震旦纪地质事件及其成因讨论[J]. 高校地质学报, 6(4): 566-575.
- 乔秀夫, 高林志, 彭阳, 李海兵. 2001b. 古庐带沧浪铺阶地震事件、层序及构造意义[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 31(11): 911-918.
- 乔秀夫, 高林志, 彭阳. 2001a. 古庐带新元古界—灾变、层序、生物[M]. 北京: 地质出版社.
- 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): 1753-1758.
- 乔秀夫, 李海兵, 高林志. 1997. 华北地台震旦纪—早古生代地震节律[J]. 地学前缘, 4(3-4): 155-160.
- 乔秀夫, 李海兵. 2008. 枕-球-枕构造: 地层中的古地震记录[J]. 地质论评, 54(6): 721-730.
- 乔秀夫, 李海兵. 2009. 沉积物的地震及古地震效应[J]. 古地理学报, 11(6): 593-609.
- 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 李海兵, 彭阳, 张传恒, 章雨旭. 2006. 地层中地震记录(古地震)[M]. 北京: 地质出版社.
- 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): 16-33.
- 乔秀夫, 宋天锐, 李海兵, 高林志. 1996. 辽东半岛南部震旦系—下寒武统成因地层[M]. 北京: 科学出版社.
- 乔秀夫, 张安棣. 2002. 华北块体、胶辽朝块体与郯庐断裂[J]. 中国地质, 29(4): 337-344.
- 乔秀夫. 1996. 中国震积岩的研究与展望[J]. 地质论评, 42(4): 317-320.
- 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): 609-611.
- 田洪水, 李洪奎, 王金光, 郭广军, 张增奇. 2007. 沂沭断裂带及其近区的地震成因岩石新认识[J]. 地球学报, 28(5): 496-505.
- 吴贤涛, 尹国勋. 1992. 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, 10(1): 19-24.
- 鄢继华, 崔永北, 陈世悦. 2009. 几种常见震积岩相标志在模拟实验中的识别[J]. 沉积学报, 27(6): 1131-1137.

References:

- DU Yuan-sheng, SHI G, GONG Yi-ming, XU Ya-jun. 2007. Permian Soft-Sediment Deformation Structures Related to Earthquake in the Southern Sydney Basin, Eastern Australia[J]. Acta Geologica Sinica, 81(4): 511-518(in Chinese with English abstract).
- FENG Xian-yue. 1989. Study on the deformation caused by seismic vibrational liquefaction[J]. Inland Earthquake, 3(4): 209-307(in Chinese with English abstract).
- JIA Zhi-hai, HONG Tian-qiu, ZHENG Wen-wu, LI Shuang-ying. 2003. The characters and environments of the seismites of the neoproterozoic Wangshan Formation in North Anhui[J]. Journal of Stratigraphy, 27(2): 146-158(in Chinese with English abstract).
- LI Shuang-ying, HONG Tian-qiu, ZHENG Wen-wu, JIA Zhi-hai. 2003. Neoproterozoic slumping deposit in the Liulaobei Formation in the north of Anhui and its implication[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 26(6): 1115-1120(in Chinese with English abstract).
- LIANG Ding-yi, NIE Ze-tong, SONG Zhi-min, WAN Xiao-qiao. 1997. Seismostratigraphy at its Germination Stage -A brief history of research on seimite and its prospect[J]. Geological Journal of China Universities, 3(4): 458-461(in Chinese with English abstract).
- LIANG Ding-yi, NIE Ze-tong, SONG Zhi-min, ZHAO Chong-he. 2010. The Macro-characteristics and Distinguish of Seismic Traces on the Marine Strata[J]. Chinese Journal of Nature, 32(2): 101-105(in Chinese with English abstract).
- LIANG Ding-yi, NIE Ze-tong, SONG Zhi-min. 1994a. A Re-study on Seimite and Seismo-Unconformity: Taking Western Sichuan and Western Yunnan as an Example[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 19(6): 845-850(in Chinese with English abstract).
- LIANG Ding-yi, NIE Ze-tong, SONG Zhi-min. 1994b. Extensional Dongwu Movement in Western Margin of Yangtze Region[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 19(4): 443-453(in Chinese with English abstract).
- LIANG Ding-yi, NIE Ze-tong, WAN Xiao-qiao, CHEN Guo-min. 1991. On the seimite and seismodisconformity——Take the W. Hunan and W. Yunnan regions as an example[J]. Geoscience, 5(2): 138-147(in Chinese with English abstract).
- LIU Bo, QIAN Xiang-lin, WANG Ying-hua. 1999. Tectono\Sedimentary Evolution of North China Plate in early Pa-

- leozoic[J]. Chinese Journal of Geology, 34(3): 347-356(in Chinese with English abstract).
- LIU Ying, XIE Jun-pei. 1984. Sand Soil Seismic Vibrational Liquefaction[M]. Beijing: Seismology Publishing House: 1-327(in Chinese).
- PAN Guo-qiang, LIU Jia-run, SUN Qing-you, WU Jun-qi, ZHANG Qing-long, ZENG Jia-hu, LIU Dao-zhong. 2000. Study on Sinian Geologic Events in Xuzhou Suzhou Area and Discussion on their Origin[J]. Geological Journal of China Universities, 6(4): 566-575(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xiu-fu, GAO Lin-zhi, PENG Yang, LI Hai-bing. 2002. Seismic event, sequence and tectonic significance in Canglangpu Stage in paleo-tanlu fault zone[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences), 45(9): 781-791(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xiu-fu, GAO Lin-zhi, PENG Yang. 2001a. Neoproterozoic in Paleo-Tanlu fault zone – Catastrophe-Sequence Biostratigraphy[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- QIAO Xiu-fu, GAO Lin-zhi. 2000. Earthquake events in Neoproterozoic and Early Paleozoic and its relationship with supercontinental Rodinia in North China[J]. Chinese Science Bulletin, 45(10): 931-935(in Chinese).
- QIAO Xiu-fu, LI Hai-bing, GAO Lin-zhi. 1997. Sinian--Early Paleozoic Seismic Rhythms on the North China Platform[J]. Earth Science Frontiers, 4(3-4): 155-160(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xiu-fu, LI Hai-bing. 2008. Pillow, Ball-and-pillow Structures: Paleo-seismic Records within Strata[J]. Geological Review, 54(6): 721-730(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xiu-fu, LI Hai-bing. 2009. Effect of earthquake and ancient earthquake on sediments[J]. Journal of Palaeogeography, 11(6): 593-609(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xiu-fu, SONG Tian-rui, GAO Lin-zhi, LI Hai-bing, PENG Yang, ZHANG Chuan-heng, ZHANG Yu-xu. 2006. Seismic Records in Strata (Ancient Earthquakes)[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- 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, 7(3): 243-265(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xiu-fu, SONG Tian-rui, LI Hai-bing, GAO Lin-zhi. 1996. Genetic stratigraphy of the Sinian and Lower Cambrian strata in South Liaoning province—Guidebook of the National Scenic Area of Jinshitan Beach[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- QIAO Xiu-fu, ZHANG An-di. 2002. North China block, Jiao-Liao-Korea block and Tanlu fault[J]. Chinese Geology, 29(4): 337-344(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xiu-fu. 1996. Study of Seismites of China and its Prospects[J]. Geological Review, 42(4): 317-320(in Chinese with English abstract).
- SEILACHER A. 1969. Fault-graded bed interpreted as seismites[J]. Sedimentology, 13(1-2): 155-159.
- SEILACHER A. 1984. Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events[J]. Marine Geology, 55(1-2): 1-12.
- SONG Tian-rui. 1988. A possible seismites-sunami sequence in Precambrian carbonate stratigraphy in Shisanling area, Beijing[J]. Chinese Science Bulletin, 33(8): 609-611(in Chinese).
- TIAN Hong-shui, LI Hong-kui, WANG Jin-guang, GUO Guang-jun, ZHANG Zeng-qi. 2007. New Recognition of Seismogenic Rocks in the Yishu Fault Zone and Its Periphery[J]. Acta Geoscientica Sinica, 28(5): 496-505(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong-zhen, QIAO Xiu-fu. 1984. Proterozoic stratigraphy and tectonic framework of China[J]. Geological Magazine, 121(6): 599-614.
- WU Xian-tao, YIN Guo-xun. 1992. Features and Significance of Seismites From Upper Jurassic Lacustrine Deposites of Emei, Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 10(1): 19-24(in Chinese with English abstract).
- YAN Ji-hua, CUI Yong-bei, CHEN Shi-yue. 2009. Identification of Common Facies Indicators of Seismites in Simulated Experiments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27(6): 1131-1137(in Chinese with English abstract).