

# 安徽寿县新元古界球—枕状构造的双重成因与 古地震脉动旋回研究

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

**内容提要:**在安徽寿县新元古界四十里长山组下部粉砂—细砂岩沉积地层中, 发育一组具有双重成因的球—枕状软沉积物变形构造。对露头剖面进行实地观测研究显示, 变形构造形成于浅海陆棚边缘斜坡带的地震灾变事件层中。由于滑塌砾石落入表层粉砂质软沉积层, 在地震震颤应力作用下形成具砾石核心的球—枕状体, 又在地震脉动旋回性连续震颤作用下, 继续沉陷至下部液化砂层中, 形成了具有双重成因的球—枕状软沉积变形构造。它经受了地震、海啸、滑塌、滑褶、震颤晃动沉陷、液化泄水、软塑性紧缩变形等多项复杂的同沉积变形作用过程。显示出该地震事件具有前震阶段、主震阶段、余震阶段等多次震颤脉动旋回性地质作用的地质事件, 地震能量强度最大应超过里氏 7 级, 为研究海洋震积岩的软沉积变形及脉动旋回性过程提供了重要的实物资料。

**关键词:**地震灾变事件; 海啸; 球—枕状构造; 陆棚边缘斜坡带; 旋回

地震灾变事件引起的同沉积变形构造广泛存在于各时代古老地层中, 其中球—枕状构造是沉积岩中重要的软沉积变形构造类型(乔秀夫等, 2008, 2009), 被视为古地震灾变事件保留在沉积岩中的原始记录, 对研究古地震灾变事件的发生、发展及演化规律, 探索古地理环境条件有十分重要的地质意义, 深受地质界的关注。

近年来地质学家在对地震诱发的沉积物变形构造类型做了归纳性总结(乔秀夫等, 1994, 1996, 1997, 1999, 2001a, 2001b, 2008, 2009; 梁定益等, 1991, 1994, 1997, 2009; 宋天锐, 1988; 赵卫卫等, 2006; 杨仕维等, 2008; 杜远生等, 2000a, 2000b, 2007; 袁静, 2005; 吴勘, 2010)的同时, 探讨了地震周期、地震幕、地震节律等概念(乔秀夫等, 1997, 2009; 段吉业等, 2002), 对野外识别震积岩的宏观特征, 确定地震的幕、次组合具有重要的指导意义。笔者最近在野外工作中, 对发现的一组球—枕状同沉积变形构造进行了详细的观察与描述, 并研究分析了它的整个变形过程。笔者认为它是一组由震积作用形成的、具有双重成因的球—枕状软沉积变形构造。诱发震积作用的古地震事件具有多旋回脉动特征, 古地震震级最大超过里氏 7 级, 为研究球—枕状构造的形成环境和形成机制提供了难得的实物资料。

安徽寿县新元古界四十里长山组属安徽地层区, 淮河地层分区, 淮南地层小区。观测剖面位于淮南地区八公山区(图 1), 出露厚度约 66.36m。下段为灰色中厚层—厚层状钙质细粉砂岩和粗粉砂岩夹砾积砾岩, 含交错斜层理、软沉积变形层理等沉积构造, 厚度 11.37m。中段分为两层, 下层为褐灰色厚

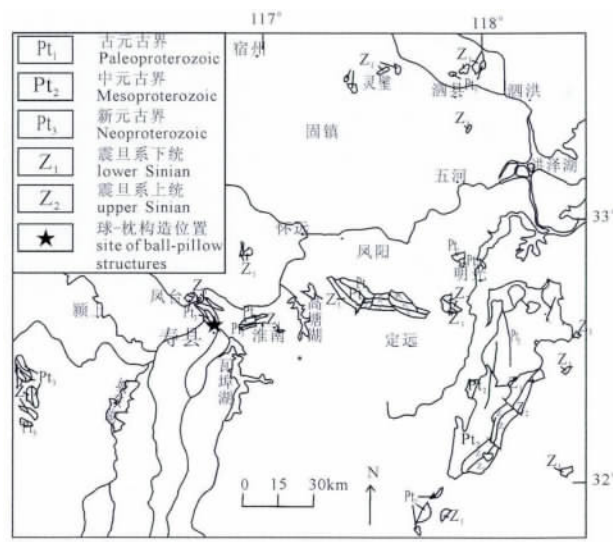


图 1 安徽寿县新元古界球—枕状构造的地理位置  
Fig. 1 Location of the Neoproterozoic ball-pillow structure in Shou County, Anhui Province

收稿日期: 2012-04-19, 改回日期: 2012-05-14, 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

作者简介: 王熙, 女, 1982 年生。博士研究生, 从事沉积学与地质事件研究。通讯地址: 266590, 山东青岛经济技术开发区前湾港路 579 号。Email: kinsoy@163.com。

层状含铁粗粉砂岩,含交错层理,厚度 16.79m;上层为灰褐色中厚层状钙质石英细砂岩,含少量海绿石颗粒成分,具波状斜层理,厚度 35.25m。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 2.95m。下伏地层为青白口系刘老碑组,为一套浅海相潮下低能环境的泥灰岩夹粉砂质泥岩、页岩和粉砂岩的沉积,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,具水平层理和波状斜层理,属潮下低能带的沉积,与四十里长山组亦为整合接触(图 2)。球—枕状软沉积变形构造发育于四十里长山组底部灰色中厚层—厚层状细粉砂岩和粗粉砂岩夹砾积砾岩中,由密集的球—枕状体叠压堆积形成,分析其沉积环境应为陆棚边缘斜坡相带(乔秀夫等,2001a,2001b)。

## 1 球—枕状软沉积变形构造的主要特征

### 1.1 观测剖面特征

观测剖面位于四十里长山组下段的粉砂岩层上

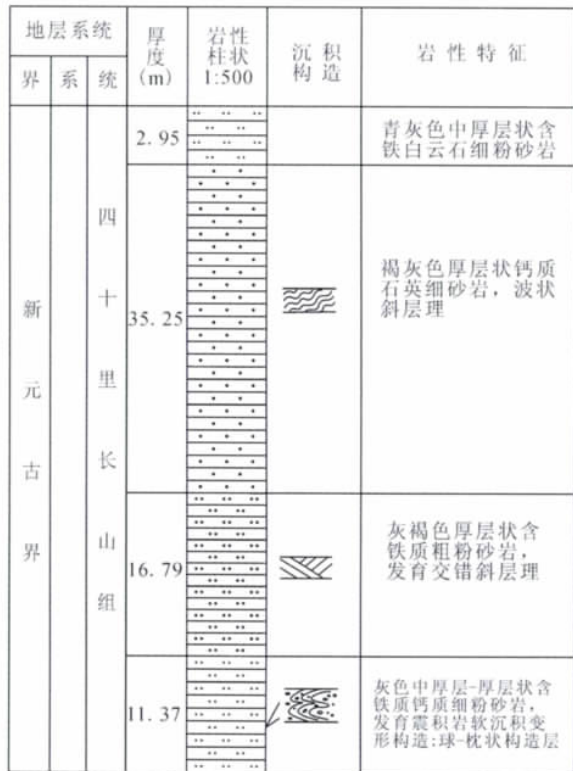


图 2 安徽寿县新元古界四十里长山组实测地层柱状图  
Fig. 2 Histogram of forty hill group of Neoproterozoic in Shouxian County, Anhui Province

部,走向方位为 5°,倾向东。变形层厚度介于 1~1.5m 之间,为青灰色中厚层状含铁质白云质细粉砂岩—粗粉砂岩夹砾积砾岩,发育楔状交错层理,向上逐渐过渡为波状起伏的变形层理。可分为 3 个分层:下分层为海啸沉积砾岩,属地震海啸沉积层,由于后期风化严重,断续出露,根据相邻剖面特征描述,岩性为黄灰色中厚层状含泥砂质砾岩,厚度 0.20~0.30m,是粉砂质沉积层未固结前受海啸冲击掀起再沉积后形成的软沉积砾屑层,砾屑具有软塑性挤压变形现象;中分层为灰色薄层状细粉砂岩—粗粉砂岩,厚度 0.50~0.60m,具波状斜层理,发育球—枕状变形构造(图 3,图 4);上分层为青灰色厚层状砾积砾岩,厚度约 0.30~0.60m。与中分层之间为震积不整合接触。根据现场描述,该变形构造分为上下两部分,下部称为底部变形层(即中分层),上部为顶部变形层(即上分层),二者之间为震积不整合界面。在走向剖面上,顶底变形层又各包含左右两个变形单元。

底部变形层:右侧单元 1(图 3a,b 锤把下方)为滑塌变形层,是软沉积层在地震应力驱动下,产生底劈滑脱—滑褶变形作用,形成的滑塌褶皱—滑塌碎裂岩块变形体。变形体由两部分组成,左端为不对称的 W 字形滑塌褶皱,褶皱轴面近于直立,由圆滑的向斜褶曲和狭窄的背斜褶曲相间排列组成 W 字形。右端为滑塌碎裂岩块及滑脱层块体,其上部有褶皱纹理交互混合现象。所谓滑脱层块体是原沉积层受震颤底劈作用出现层状破碎的块状体,随滑塌体滑脱移动变形而成。滑脱层块体位于滑塌变形层后部底层,说明软沉积层浅部固结程度差,以滑褶变形为主;底部固结程度稍好,以滑脱破碎变形为主,比较符合滑塌变形体的变形规律。观察滑塌变形层原岩为砾积砾岩,砾屑呈纺锤状、僵蚕状、扁豆荚状、颗粒状等混杂堆积,局部见砾屑顺层理面分布,是海啸掀起的碎屑物快速依次沉积形成的砾积层。左侧单元 2(图 3a2,b2 锤把左下方)为球—枕状层,它由多个球—枕状体密集叠压堆积形成,沿观测剖面的纵向和横向有规律排列。球—枕状体长轴平行于纵剖面方向,其排列的密集程度近似于枕状层。推测是滑塌体滚落碎泥块或砾块落入表层软沉积层,经震颤晃动形成初级球—枕状体后,在连续震颤晃动作用下沉陷至下部液化层,形成具有砾块塌落和负载体沉陷双重成因的球—枕状软沉积变形构造。对照左右两侧变形构造明显不同,左侧是典型的液化沉陷变形构造,右侧是典型的滑塌变形构造,二者以



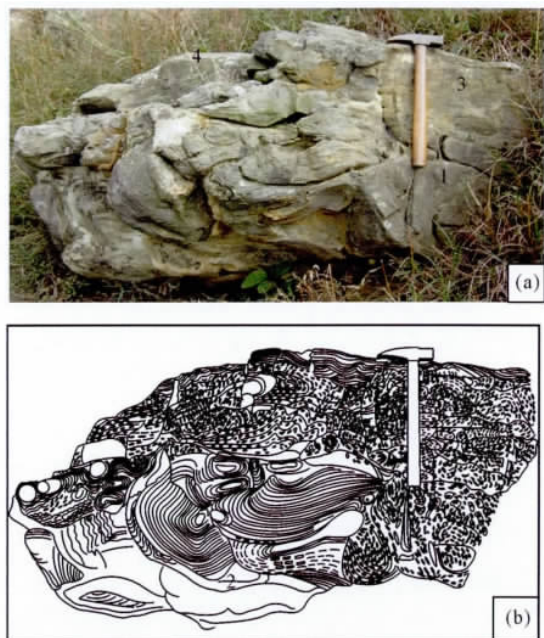


图 3 安徽寿县新元古界球—枕状软沉积变形构造(纵剖面)  
Fig. 3 Neoproterozoic ball-pillow shaped soft-sediment deformation structure in Shouxian County, Anhui Province (longitudinal section)

(a)—现场观测剖面摄影;(b)—观测剖面素描图(锤把长度 31cm)

(a)—on-site observation profile photo; (b)—observation profile sketch (Length of the hammer is 31cm)

不同的形态特征共处同一层位上,接触界线呈突变过渡,这说明二者的变形过程是完全不同的。

顶部变形层:右侧单元 3(图 3a3, b3 锤头右侧)为震碎—滑塌复合砾块层,是由原粉砂、细砂质啸积砾屑层在地震动力驱动下产生了震碎变形作用,形成了震积碎层块,又经滑塌变形作用形成了震碎—滑塌复合砾块层。砾块大小混杂,大砾块夹杂小砾石,大砾块呈砖块状、板状、椭球状,具有钝化的棱角状外形。小砾石夹在砾块之间的缝隙中,多呈团块状、椭球状,个别呈纺锤状,有明显的后期变形特征,显示出震积碎层块及小砾石沉积后,又经过地震多旋回强烈晃动,发生震颤液化及软塑性变形作用,砾块局部出现了波状弯曲和钝化现象,小砾石出现圆化变形过程。观察原岩砾屑,有二次变形形成的钩状、弧状及麻团状等变形构造,有些还具有线粒状的定向排列纹理,说明砾屑层沉积后,在未固结—弱固结的软塑性阶段,经多旋回震颤晃动作用,曾发生液化,产生了二次变形及定向排列现象。左侧单元 4(图 3a4, b4 锤头左侧)为滑褶变形层,原沉积层为啸积砾屑层,顶部过渡为含砾屑粉砂—细砂质沉积层,

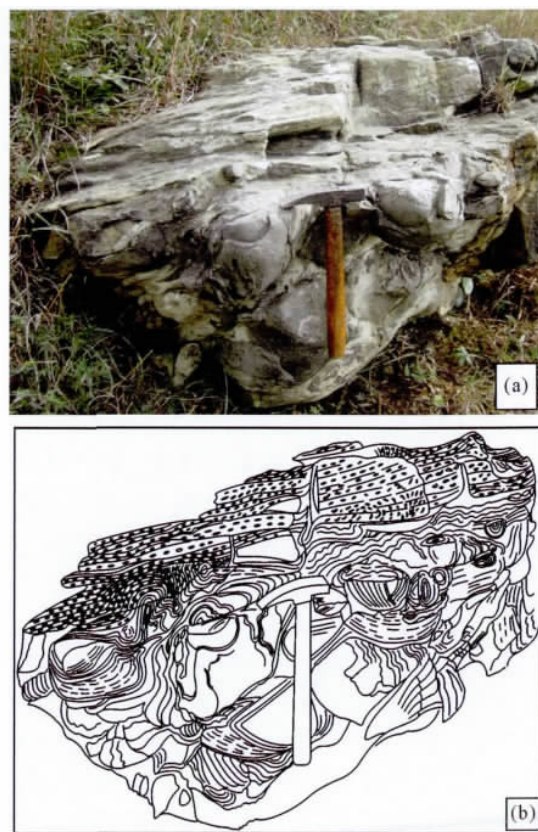


图 4 安徽寿县新元古界球—枕状软沉积变形构造(横剖面)  
Fig. 4 Neoproterozoic Ball-pillow shaped soft sediment deformation structures in Shouxian County, Anhui Province (cross sections)

(a)—现场观测剖面摄影;(b)—观测剖面素描图(锤把长度 31cm)

(a)—On-site observation profile photo; (b)—observation profile sketch (length of the hammer is 31cm)

在地震震颤动力作用下产生了滑褶变形作用,出现以复式背斜为主的滑移褶皱。同时表现出右端滑移褶皱变形强烈,背向斜褶曲排列紧密,左侧褶曲舒缓,代表滑移褶皱向右侧明显加强的趋势。观察砾屑的形态特征,发现也有明显的定向排列现象,说明砾屑层沉积后曾经受强烈的震颤摇晃作用,产生了软塑性变形过程。顶部变形层与底部变形层之间为震积不整合界面(梁定益等,1991,1994)。

## 1.2 宏观结构特征

### 1.2.1 外部形态特征

由于岩层露头风化后外层脱落,球—枕状构造层被完整地暴露在岩层露头上。其构造形态出露清晰,呈椭球状、半球状、枕状等形态横卧叠压堆积成层,并可看到因密集叠压造成的挤压变形。在纵剖面上(图 3),球—枕状体外形呈椭球状、枕状,体长 15~40cm,显示由于受到软沉积物浮力的阻挠在长

轴方向上加长的特征(乔秀夫等,2009)。在横剖面上(图4),因外层风化剥落,能看到由内向外呈现圈层状结构特征,是非常难得一见的地质现象。球—枕状体核心部分呈近圆球形,球体顶面扁平状,球体直径10~25cm,中间为一层含砾粉砂质包裹层,层厚2~10cm不等。外围是液化容陷基底层,呈均一状结构(杜远生等,2007),为泥质或泥质细粉砂质沉积物,经震颤液化后层理消失,形成液化均一层构造,是球—枕状构造陷落的基层。

### 1.2.2 内部结构特征

球—枕状软沉积变形构造的内部结构是它变形时留下的运动轨迹,能直观地反映球—枕状体复杂的演化过程及生成关系,是研究球—枕状构造变形机理的重要依据之一。观察本区球—枕状构造的内部结构主要有以下几个特点。

#### (1) 具有圈层状结构特征

球—枕状体发育明显的圈层状结构,特别在横剖面上圈层结构最为明显,由内向外可看到有核心圈层(核心球体)、中间圈层、外圈层(外围液化层)(图4)。核心圈层(核心球体)大致有两类结构类型,多数为致密的球状体,质地比较均一,属液化均一层结构;个别显示同心环状层理结构,但仔细观察发现,环状层模糊不清,是由砾屑在震颤摇晃作用下形成的弧形镶嵌状结构。在一个球—枕状体里,可见有多个核心球体堆积在一起的现象(图4锤头前方),应是滚落泥块或砾石局部密集扎堆所至。下部还见有两个核心球体上下叠压变形现象(图4锤把下方),可能是核心球体由上向下运动时,因上边核心球体下沉触碰下面核心球体,使支撑点偏向一侧,致使上方核心球体歪斜,下面的核心球体也被挤压变形。核心圈层(核心球体)是球—枕状体形成的核心部分,其来源可帮助判断球—枕状体的性质,观察核心球体成分为粉砂岩或细砂岩,多数含有砾屑,有些为啸积砾岩。与顶底围岩及右端滑塌变形层成分相似。虽然二者难确切对比,但根据与滑塌变形体之间的接触关系判断,核心球体应来源于滑塌滚落砾石或软泥块。中间圈层是包裹在核心圈层(核心球体)外的一层中间介质,成分为粗粉砂岩,见有不太清晰的纹细层理状构造,质地比较均匀。当在一个球—枕状体里堆积有多个核心球体时(图4锤头前方),中间圈层包裹在多个核心球体的外围,纹细层理在经过每个球体时均发生弯转,甚至透过两个球体之间的缝隙呈半环状包围。这说明塌落泥块或砾石落入上层软沉积层后,在震颤作用下产生同频

晃动,软沉积层发生液化,砾石被圆化包裹,形成了初级球—枕状体。在中间圈层外表面能见到明显的线性瘤状突起纹(图3 a2, b2 左上角),沿长轴方向延伸。这些纹理是液化泄水留下的泄水纹构造,说明中间圈层形成并沉陷至下部液化层后,又发生了后期泄水作用。外圈层包裹在中间圈层外围,是承载球—枕状体的底基层,成分为细粉砂质软沉积层,具有液化均一层结构。它厚度变化较大,局部见有飘带状泥流痕和沉陷纹理(落坑纹)构造,显示外圈层在液化阶段曾处于半流体状态。

上述特征说明滑塌泥块或砾石进入表层软沉积层后,在地震波震颤晃动作用下,开始以滑塌泥块或砾石为核心形成球—枕状体,又在震颤晃动与重力作用下继续负载下沉至下部液化层,最终形成具有双重成因的球—枕状构造。

#### (2) 球—枕状构造的凹形纹细层理构造

在纵剖面 and 横剖面上,球—枕状体发育凹形纹细层理构造。特别在纵剖面上,层理沿纵向延伸,呈锅状或长勺状。少数为同心环形层理,层理的核心很少位于球—枕状构造体的中心位置,多数偏向一侧,个别位于两端(图3 a2, b2 中上部)。外围层理有随核心的转移变得疏密不均的特征。在横剖面上凹形纹细层理不十分清晰,主要发育于中间圈层,以细微的弧形纹理顺层延伸(图4锤头前方)。不管纵剖面还是横剖面,球—枕状体纹细层理多呈底部下凹的弯曲状,弯曲度与核心球体的形状存在继承关系,说明中间圈层的纹理构造受核心球体重心所牵制。

#### (3) 核心球体表面发育擦痕构造

在横剖面上,有些球—枕状体核心圈层(核心球体)外表面见有明显的擦痕构造(图4a, 4b)。仔细观察擦痕多呈浅显的细划痕状,深浅不一,疏密不均,但却十分清晰地分布于核心球体外表面,具有明显的方向性。擦痕多为一组近于直立的竖向划痕(图4a, 4b锤头前方);有的球体表面擦痕向右侧发生倾斜(图4a, 4b锤把下方),倾斜角度为 $30^{\circ}$ ,是上部球体下沉运动时因碰到下方的球体被阻挡后重心偏转所致;个别球体表面擦痕模糊不清。核心圈层(核心球体)另外一个特征是顶面扁平,几乎所有的核心球体均如此,是砾石在圆化过程中因自身重力产生横向平衡作用造成的局部变形所致。

## 2 球—枕状变形构造的双重成因分析

球—枕状变形构造在震积岩系列中经常被发

现,专家们认为它的形成机理是负载体在液化砂层受地震剪切力与重力共同作用下沉陷落形成,后在震动摇晃下负载体脱离母岩完全落入下伏层中形成同心纹层的球体或椭球体。若连续下沉陷落,形成一个密集的球—枕状构造层,而原始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)。地震震动可引起软沉积物变形形成不规则枕状、球状层(Roep et al., 1992; 杜远生等, 2007)。这提供了对球—枕状软沉积物变形构造解释的基础。研究本区球—枕状软沉积物变形构造的变形特征,与负载构造陷落液化层形成的球—枕状变形构造的原理是一致的。不同的是球—枕状体中存在由塌落泥块或砾石形成的核心,又经受多旋回震颤过程,形成了界线分明的内、中、外圈层结构。

## 2.1 频发的滑塌事件是球—枕状构造双重成因的先导因素

通过对球—枕状变形构造围岩特征的观察显示,底变形层右侧(图3a1, b1)是啸积砾岩经滑脱—滑褶变形后形成的塌积堆积物,与球—枕状变形构造呈突变接触,二者界线清楚。顶变形层右侧为震碎—滑塌复合砾岩层(图3a3, b3),左侧为滑褶变形层(图3a4, b4),左右之间界线分明,亦为突变过渡,这些特征显示沉积体处在非正常条件下的突然事件中,因沉积物失稳引起的灾变沉积,说明球—枕状变形构造沉积期,周围的沉积环境正处于不稳定活动阶段,海啸、滑脱、滑塌事件连续发生。有关学者对皖北新元古代沉积事件的研究显示,四十里长山组及刘老碑组均发育有地震灾变成因的液化碳酸盐岩脉、滑塌沉积等震积岩层(乔秀夫等, 2001a, 2001b; 李双应等, 2003)。本文作者在该研究剖面下部也发现了具有复杂变形特征的,经历过滑塌、滑脱、震动液化泄水等多种变形过程形成的软沉积变形复合构造(王熙等, 2012)(图5)。这些现象都证明,本区在四十里长山组沉积期,正处于浅海陆棚边缘斜坡地带,因斜坡上方软沉积物自身重量产生势能,受到触动力作用后,产生了滑脱—滑褶—滑塌变形过程,形成滑塌堆积体。根据塌积砾岩层与液化球—枕状软沉积物变形层相邻分布、且相互过渡的组合关系,可以初步判断滑塌作用不可避免地让塌积砾石或泥块落入表层软沉积砂层中,经过地震强烈晃动形成初级球—枕状体,再继续下沉后陷落进下伏液化层形成双重成因的球—枕状构造。频发的滑塌事件是球—枕状构造双重成因的先导因素。

从球—枕状体的变形构造与成岩信息也可得到证明。

### 2.1.1 球—枕状体核心圈层(核心球体)变形构造与成岩信息

球—枕状体核心圈层(核心球体)表现为致密均一状变形特征,个别含有细密的纹细层理,仔细观察可发现,其成分主要为砂质砾岩,与周围滑塌体的成分相同。锤头下方的不规则多边形砾块(图4a, 4b 锤头下)是一个塌砾状集合体,其成分亦为砂质砾岩,与核心球体应为同时形成的事件沉积。这些现象证明核心球体与塌砾均来源于与滑塌体相同的堆积物。再者见有3个核心球体被包裹在同一个球—枕状体中的现象,中间圈层可透过两个球体之间的缝隙呈半环形包围,其纹细层理在多个核心球体的外围均发生了弯转。另外核心球体上保留有陷落擦痕,是塌落砾石落入表层软沉积层后,在震颤晃动下沉过程中,球体表面被围岩颗粒物刻划形成的垂向划痕,这也证明塌落砾石塌落时仍处于软塑性阶段,可能为塌落泥块之类的软沉积物。上述特征均说明核心球体是塌落砾石陷落进软沉积层后,经震颤晃动下沉后形成了初级球—枕状体。

### 2.1.2 中间圈层的变形构造与成岩信息

落坑纹构造:所谓落坑纹是砾石落入饱水砂层时留下的变形纹理,球体下方纹理紧密,反映为重力集中部位,受球体压力作用最强;至顶部纹理有向侧方转折散开的趋势(图4a, 4b 右上角)。很显然这是由于砾石陷落下沉时,底部应力因集中于一点,液化层被向下压缩,纹层受挤压变得细密。由于应力不断向两侧传递,顶部传递迅速并向两侧逐渐消减,纹理随之向两侧散开。只有砾石刚进入饱水砂层时,落坑纹构造才能被很好地保存下来。当砾石受震颤摇晃作用继续下沉进入深部,继而被围岩包裹形成球—枕状体,落坑纹构造会因形变转换作用形成环球体外围的环状纹理构造。

### 2.1.3 滑塌堆积物变形残余构造与成岩信息

在横剖面上可以看到滑塌堆积的变形残余构造(图4a, 4b 左上角及锤头下方),变形残余构造为滑塌体跌入液化层后,未能完全转化为枕状体,仍保留滑塌—滑褶体残余构造的状况。剖面上能见到两种残余体构造,一是滑塌砾岩残余构造(图4a, 4b 锤头下),为一不规则多边形滑塌岩块,是由滑塌砾岩组成的塌砾状集合体,成分为砂质砾岩。二是滑褶残余构造(图4a, 4b 左上角),为一个复式滑塌无根褶皱,由相间排列的一组背斜和向斜褶曲组成,向斜宽



缓,背斜狭窄,背斜两翼局部倒转。滑脱褶皱前端(左端)已沉陷至液化层,转变为球—枕状体,后端还保持滑脱褶皱状态。滑塌—滑褶皱体残余构造是球—枕状体核心球体由塌落砾石或泥块成因的极好证明。

## 2.2 软沉积物液化变形是球—枕状构造双重成因的必要条件

枕状构造、球—枕状构造是地层中很特殊的软沉积变形构造(乔秀夫等,2008)。所以软沉积层的液化变形是球—枕状构造形成必不可少的条件。本区组成球—枕状构造中间圈层及外圈层成分为细—粗粉砂岩,质地比较均匀,镜下观察显示,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  $0.027 \sim 0.09\text{mm}$  之间。根据冯先岳(1989)震动液化模拟试验结果显示,小于  $0.11\text{mm}$  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  $0.02 \sim 1\text{mm}$  之间(刘颖等,1984),对比以上指数可以看出,组成中间圈层及外圈层的细—粗粉砂岩粒径大小正处在液化沙土的最佳范围,它是产生地震液化的物质基础,能在强震颤作用下发生液化。中间圈层外表面发育泄水纹构造,外圈层见有明显的液化均一层结构,都是软沉积物液化变形的典型特征,说明软沉积层的存在为球—枕状构造双重成因创造了必要条件。

## 2.3 地震灾变事件是球—枕状变形构造形成的原动力

观测剖面下部的粉砂岩层中,发育一套滑塌—滑脱变形复合构造(图5),它厚度约为  $1 \sim 1.2\text{m}$ ,整体似一个  $\Sigma$  字形褶皱,表现为滑塌角砾岩、滑脱褶皱和碟状泄水构造三位一体的变形特征,即滑塌—滑脱—震动液化变形三位一体,这一特征说明在软沉积物的沉积过程中,不同阶段经受了不同的动力过程。初始阶段软沉积物堆积于斜坡,产生滑塌作用,形成滑塌变形体;而随后经过滑脱变形和液化泄水作用,形成滑脱褶皱和碟状泄水构造。有研究显示,饱水砂层靠颗粒之间的摩擦力和弱固结作用维持稳定,在地震波 P 波和 S 波的作用下,因重力重排促使孔隙水排出(袁静等,2006),从而可导致因泄水变形引起的底辟作用和喷水作用,引起滑塌—滑脱和液化泄水,形成滑塌—滑脱和碟状泄水构造。而地震作用具有产生这一过程的足够能量。

本观测剖面的球—枕状构造变形层,与其下部的滑塌—滑脱变形复合构造变形特征极其相似,也



图5 安徽寿县新元古界下部粉砂岩层中的滑塌—滑脱变形复合构造宏观照片

Fig. 5 The macro-photo of bottom delamination slump-slip soft-sediment deformation multilayer complex structure of Neoproterozoic in Shouxian County, Anhui Province

经受过滑塌—滑脱褶皱变形及液化泄水等一系列地质作用。它的底部为中厚层状—厚层状细—粗粉砂岩夹砾屑层,具波状斜层理和楔状交错层理,属正常的沉积层夹海啸层。顶部逐渐过渡为中厚层状—厚层状粗粉砂岩和细砂岩夹砾屑层,含交错斜层理,亦属正常的沉积层夹海啸层,顶底层之间构成一个地震—海啸序列旋回。球—枕状构造位于上下两个滑塌—滑脱变形层之间,发育有液化均一层、液化流变层及碟状泄水纹理等软沉积变形构造(图3,4),应属于古地震环境条件下的软沉积物变形构造。有关学者对华北东部新元古界沉积地层震积岩的研究也显示,在安徽淮北与淮南的新元古界地层中,如贾园组、刘老碑组、四十里长山组,辽宁的新元古界地层如南关岭组、甘井子组、营城子组等多个地层中,均发现含有多期、多幕次地震沉积层记录(乔秀夫等,1994,1996,1997,1999,2001a,2001b,李双应等,2003;彭阳等,2001;潘国强等,2000;贾志海等,2003;洪天求等,2004;李壮福等,2000)。结合本区球—枕状变形体及顶底围岩中存在着滑塌—滑脱—

滑褶变形及震动液化泄水构造等典型地质现象,特别是液化泄水构造是判断地震存在的重要标志(乔秀夫等,2009)。这说明,本区发育的球—枕状软沉积变形构造是地震灾变事件引起软沉积物的滑塌、滑脱作用,让塌落砾石或软泥块落入表层软沉积砂层,在强烈震颤晃动条件下形成初级球—枕状体,并在连续不断的震颤中,由于自身重力和下部饱水砂层液化充水,初级球—枕状体转变成成为负载体,继续下沉陷落,最终形成具有双重成因的球—枕状变形构造。所谓双重成因,是指该球—枕状变形体具有塌落砾石和负载体下沉两种成因方式而言。

2001年1月26日东昆仑山地区发生里氏8.1级破坏性强地震,富含水的砾石层在重力驱动下陷落至下伏较轻砂层中,形成负载构造及由砾石组成的球—枕状构造。由砾石组成的球—枕状构造是较少见的(乔秀夫等,2008)。本区发育的这种类型的球—枕状构造,说明在海洋环境的古地震事件中由砾石组成的球—枕状构造确实存在,但由于多数被上覆地层掩盖,很少被发现。

### 3 讨论

古地震周期是指地震发生的间隔时间,可划分地震活跃期与地震活跃幕。若干个地震变形相对密集的可理解为一个地震幕,若干个幕组成一个地震活跃期,具体表现在地层剖面中幕与幕之间有较厚的正常沉积层相间隔(乔秀夫等,2009)。而对于一个变形层出现的多次变形过程,它极有可能是一次地震事件中不同震颤旋回留下的沉积记录。因为一次地震事件所产生的内部能量的释放,往往要经过从前震阶段、主震阶段到余震阶段等过程,各阶段中间有短暂的间歇期,这个过程就是地震脉动式旋回过程。虽然时间短暂,还不能像划分地震活跃期、地震幕次那样根据沉积地层厚度被严格划分出来,但通过对本区球—枕状构造变形特征的观察和描述,并通过对这些信息的认真解析,完全可以确定这次地震事件具有从前震、主震到余震的多个脉动旋回过程。

#### 3.1 底变形层的滑塌变形是地震前震阶段引起的先期变形构造

对现代地震的研究已总结出,地震具有从前震到主震再到余震这样3个明显阶段,这个规律也适应古代地震。有学者指出,一次 $M_s7\sim8$ 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3个时期。前震阶段是地壳运动的量变阶段,时

间较长,有多次小地震,震动由弱逐渐加强;主震阶段相当于地壳运动的质变期(灾变),其特征是很短时间连续发生几次强震;余震阶段相当于地壳运动的延续阶段,是较长时间内地震运动逐渐减弱的过程(梁定益等,2009)。发震前的预备期,常常由多次密集的小震出现为代表,一般情况下因为震级小,破坏力度不大,很难从沉积层中被识别。但从本区球—枕状变形构造底变形层右侧单元存在滑塌事件层推测,滑塌变形是前震阶段存在的重要证据。

本区底变形层右侧为滑脱—滑塌复合砾屑层(图3a1,b1),与左侧球—枕状软沉积变形构造(图3a2,b2)呈突变过渡接触。根据地层沉积先后顺序及与球—枕状层之间为突变过渡关系可以推测,滑脱—滑塌复合砾屑层是本次地震事件早期,即前震阶段形成的滑塌堆积物。因为本区在四十里长山组沉积期,正处于浅海陆棚边缘斜坡地带,由于斜坡上方软沉积物自身重量产生势能,不需要太大的晃动触动力,即可产生滑塌变形过程。从滑塌堆积物基本为原地塌落堆积情况看,它应是本次地震前震期产生的晃动作用引起的。因此有理由认为在地震的主震期到来之前,有过震级约为里氏4~5级的前震发生。

#### 3.2 液化均一变形及海啸是地震主震阶段的能量释放标志

主震期是地震释放能量最大阶段,所产生的震颤作用最为强烈,引起的破坏作用也最强,在软沉积岩层中产生的变形也应是最大的。本区球—枕状变形构造的外圈层具有典型的液化均一层结构,说明它是砂层经强烈晃动后发生液化,产生了去层理化作用。通过对滑脱—滑塌复合砾屑层中的砾屑的观察也发现,本来应当是大小混积,杂乱分布状态的砾屑,出现了定向再分布现象,它是砾石经液化后在统一应力作用下原地旋转所致,也说明在强震颤作用下,砾屑层可以产生颤动变形,使每块砾石发生不同程度的定向摆动,造成多数砾屑长轴方向顺震颤摇晃方位,或平行地震面波(L波)的振动方位进行定向排列。造成粉砂层液化及砾屑定向排列现象的晃动,至少需要7级以上的强地震才有可能出现。冯先岳(1989)曾将细砂放在玻璃罐中,模拟7~9级强震区的振动频率,结果显示砂层不仅产生了明显的液化现象,而且出现了各种液化卷曲变形构造。鄢继华(2009)等利用水槽稳定水流速度和加砂速度模拟三角洲砂体在瞬间强震作用下的变形作用,成功地观察到同沉积断裂、微褶皱纹理、液化砂岩脉、液

化均一层等典型震积相标志,并证明液化均一层为较强地震作用的响应。对照本区出现的粉砂层液化及砾屑定向排列现象,说明主震阶段的地震强度应该在7级以上。

对现代海洋地震的观察也发现,6级以上的浅源地震及7级以上的大地震及特大地震常伴随有强烈的海啸发生。根据盖层变形层右侧(图3a3,b3)发育了海啸积砾屑层这一特征,大致可以推测本次地震的主震阶段曾经历过强烈的海啸过程。也证明主震阶段地震震级为不低于里氏7级的强烈地震。

### 3.3 盖层变形层滑塌、滑褶变形作用及液化泄水纹理是余震连续不断的象征

强震、主震过后往往伴随连续不断的余震。余震是大震能量释放之后,地下物质代偿平衡过程的延续,释放的能量已大大减小,震级一般小于主震震级,破坏作用也有所降低。

根据本区盖层变形层右侧单元3(图3a3,b3锤头右侧)为震碎—滑塌复合砾块层,砾屑具有钝化的棱角状外形,说明砾屑层沉积后,在未固结—弱固结的软塑性阶段,曾经历过多次旋回震颤作用过程。左侧单元4(图3a4,b4锤头左侧)为滑褶变形层,出现以复式背斜为主的滑移褶皱,说明砾屑层沉积后,在地震震颤应力作用下,又产生过明显的滑褶变形过程,形成滑移复式背斜褶皱构造。由此推测主震期后余震曾连续不断,释放的能量虽已大大减小,但仍具有相当强的震颤力,其里氏震级应不小于前震震级,估计应在里氏5~6级。在球—枕状软沉积变形构造中间圈层表面发育的线性瘤状突起纹,即碟状泄水构造(图4a4,b4左上角)。泄水纹理横向延伸,显示出该球—枕状体形成后,其外围缝隙中又一次被液化充水,并在震颤过程中,产生液化泄水作用,形成向一侧喷水的定向性液化泄水构造。这一泄水过程也说明主震过后,代表又一个脉动旋回过程的余震是确实存在的。

上述现象均说明,主震过后经短暂的间震期,又有连续不断的余震发生。余震同样带来了盖层沉积层的滑塌变形、震颤摇晃变形及滑褶变形作用。

## 4 结论

通过对观测剖面球—枕状软沉积变形构造变形机理的分析研究显示,新元古代四十里长山组沉积期,本区地处浅海陆棚边缘斜坡相带。由于陆源碎屑物的进入,形成了以粉砂和细砂质沉积物为主的软沉积层。在强地震灾变事件应力驱动下,地震波

P波、S波、L波引起强烈的震颤作用,造成沉积体滑脱—滑塌;塌落砾石滚落表层软沉积砂层,在连续不断的震颤晃动作用下、发生晃动变形及负载沉陷,形成了具有双重成因的球—枕状变形构造。同时地震还引起海啸、滑褶、软沉积物液化泄水、砾屑晃动定向排列、软塑性紧缩变形及震积不整合等多项复杂地质作用。研究还证明地震事件具有从前震、主震到余震的脉动旋回性特征,地震主震阶段的能量强度应不低于里氏7级。前震、余震阶段震级低于主震震级,也有里氏4~6级。这为研究海相震积岩及震积构造的形成与变形提供了极其宝贵的实物资料。

本文是根据球—枕状软沉积物变形构造的形变过程,核心球体的成分、组合形态及划痕特征,并根据地质专家对现代地震现场观察的成果,经比对研究得出的认识。还有一些变形特征,如球—枕状体多层结构,砾屑筛动定向排列,纹细层理的疏密变化等现象,还需要进一步深入研究与探讨,以便揭示其深层的动力学变形过程。

致谢:对专家提出的修改意见,本文进行了认真的修改补充。对专家的真诚指导表示深深的谢意。

## 参 考 文 献

- 杜远生,韩欣. 2000a. 论震积作用和震积岩. 地球科学进展, 15(4): 389~304.
- 杜远生,韩欣. 2000b. 论海啸作用与海啸岩. 地球科技情报, 19(1): 19~22.
- 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. 地质学报, 81(4): 511~518.
- 段吉业, 刘鹏举, 万传彪. 2002. 华北燕山中—新元古界震积岩系列及其地震节律. 地质学报, 76(4): 441~445.
- 冯先岳. 1989. 地震震动液化变形的研究. 内陆地震, 3(4): 209~307.
- 洪天求, 贾志海, 郑文武, 李双应. 2004. 宿州地区震旦系望山组主要沉积类型及其形成环境分析. 吉林大学学报(地球科学版), 34(1): 5~11.
- 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. 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. 合肥工业大学学报, 26(6): 1115~1120.
- 梁定益, 聂泽同, 万晓樵. 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.
- 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. 地球科学, 19(4): 443~453.
- 梁定益, 聂泽同, 宋志敏, 万晓樵. 1997. 正在萌芽段的震积地层学. 高校地质学报, 3(4): 458~461.
- 梁定益, 聂泽同, 宋志敏, 赵崇贺. 2009. 海相地层中地震遗迹宏观特征与鉴别. 自然杂志, 32(2): 101~105.



- 李壮福,郭英海. 2000. 徐州地区震旦系贾园组的风暴沉积. 古地理学报, 2(2): 19~27.
- 刘颖,谢君裴. 1984. 砂土震动液化. 北京:地震出版社, 1~327.
- 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. 高校地质学报, 6(4): 566~575.
- 彭阳,杨天南,乔秀夫,李典志,王国桢,杨中柱,杨小波. 2001. 大连上震旦统地震灾变事件研究. 地质学报, 75(2): 221~227.
- 乔秀夫,宋天锐,高林志,彭阳,李海兵,高励,宋彪,张巧大. 1994. 碳酸盐岩震动液化地震序列. 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. 北京:科学出版社, 31~53.
- 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. 地学前缘, 4(3~4): 155~160.
- 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. 科学通报, 44(16): 1753~1758.
- 乔秀夫,高林志,彭阳,李海兵. 2001a. 古庐带沧浪铺阶地震事件、层序及构造意义. 中国科学(D辑), 31(11): 911~918.
- 乔秀夫,高林志,彭阳. 2001b. 古庐带新元古界—灾变、层序、生物. 北京:地质出版社, 4. 102~125.
- 乔秀夫,李海兵. 2008. 枕、球—枕构造:地层中的古地震记录. 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. 古地理学报, 11(6): 593~609.
- 宋天锐. 1988. 北京十三陵前寒武纪碳酸盐地层中的一套可能的地震海啸序列. 科学通报, 33(8): 609~611.
- 吴勘. 2010. 震积岩、海啸岩、震浊积岩研究进展. 地质学报, 30(2): 136~139.
- 王熙,王明镇. 2012. 安徽寿县新元古界一个滑塌—滑脱软沉积物变形复合构造的发现及地质初探. 地球学报, 33(1): 49~56.
- 杨仕维,李建明. 2008. 震积岩特征综述及地质意义. 岩性油气藏, 20(1): 89~94.
- 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. 沉积学报, 27(6): 1131~1137.
- 袁静. 2005. 中国震积作用和震积岩研究进展. 石油大学学报(自然科学版), 29(1): 144~149.
- 袁静,陈鑫,田洪水. 2006. 济阳坳陷古近纪软沉积变形层中的环状层理及成因. 沉积学报, 24(5): 666~671.
- 赵卫卫,查明,杨建萍. 2006. 中国震积岩研究综述. 地层学杂志, 30(2): 171~175.
- Roep T B, Events A J. 1992. Pillow-beds a new type of seismites? An example from an Oligocene turbidite fan complex, Alicante Spai. Sedimentology, 39(5): 711~724.

## Study on Double Causes and Paleoseismic Pulse Cycle of the Neoproterozoic Ball-Pillow Structure in Shou County, Anhui Province

WANG Xi, WANG Mingzhen

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

### Abstract

The silt~fine sandstone sediments of lower Neoproterozoic Sishilichangshan Formation in Shouxian County of Anhui Province was found to host a set of ball-pillow shaped soft-sediment deformation structures with double causes. The study of outcrop profiles has shown that the soft-sediment deformation structures formed from earthquake disaster event in shallow slope of the shelf edge. As slump gravels fell into the surface of soft silty sediments, primary ball-pillow shaped bodies formed due to tremor shaking stress of earthquake. And then, under the pulsation and cycled earthquake shaking effect, the gravel continued to sink into the bottom of liquefied sand layer, forming the formation of a ball-pillow shaped deformed structure with double caused stress. Our study suggests that the deposition deformation has undergone synsedimentary deformation process, such as earthquake, tsunamis, slump, slide fold, tremors shaking subsidence, liquefaction draining, gravels screen directional aligned, and the soft plastic tighten deformation, etc. It is also revealed that the earthquake is characterized by multiple cycle geological event, which contains a fore-shock stage, the main shock stage and after-shock stage. The intensity of seismic energy should have exceeded the magnitude 7 and this provides important information for the study of sediments deformation and the pulsation and cycle process of marine seismite.

**Key words:** earthquake disaster event; tsunami; ball-pillow shaped structure; shelf marginal slope facies; cycle