

文章编号: 1000-0550(2012)06-1032-10

湖南慈利溪口震旦系陡山沱组震积岩的发现及其地质意义^①

赵 灿¹ 李旭兵¹ 李志宏¹ 于玉帅¹ 张 华² 刘 安¹

(1. 武汉地质研究所 武汉 430223; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所 北京 100037)

摘 要 湘西慈利溪口地区震旦系陡山沱组地层中首次发现碳酸盐岩原地震积岩。笔者通过剖面实测,详细观察和描述,结合构造背景,识别出阶梯状层内断层、液化碳酸盐岩脉、液化角砾岩、负荷构造以及微褶皱纹理等典型的震积软沉积变形构造的地质记录;震积序列在剖面结构上显示自下而上由下伏未震动层—阶梯状层内断层—微褶皱层—液化碳酸盐岩层—液化角砾岩层—上覆未震动层的渐变过程及震积作用逐渐衰减的趋势。震积岩发育的层位在时空上显示良好的可对比性,反映陡山沱期晚期构造活动强烈,并具备多旋回、多周期的特点。构造的活跃加速了有机碳库的氧化,为该时期多细胞生物的繁盛和大规模的成磷成矿作用奠定了基础;同时保存完好的震积地层记录对推断研究区的古沉积环境也具有重要意义。

关键词 震积岩 震积构造 震积序列 地质意义 陡山沱组 震旦系

第一作者简介 赵 灿 男 1985年出生 硕士 沉积学 E-mail: zhaocan1985216@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 前言

震积岩是灾变性事件岩的典型代表,它是具有震积构造和震积岩序列有一定成因联系的一组岩石^[1]。自20世纪60年代 Seilacher 研究美国加州地区中新世梦特里页岩时首次提出“震积岩”(seismites)一词以来^[2],国外有许多沉积学家就对地震作用与震积岩进行了研究。我国对震积岩的研究始于20世纪80年代^[3],近20年来,我国学者对不同地区和不同时代地层中的震积岩进行了广泛的研究,时代涉及华北地台元古代^[4-7]、滇中元古代昆阳群^[8]、皖北新元古代^[9]、南盘江盆地中三叠统^[10]、四川盆地上三叠统^[11]和下侏罗统^[12]、酒西盆地青西凹陷下白垩统^[13,14]、济阳拗陷古近系^[15]等,并建立了诸如地震—海啸序列、碳酸盐岩震动液化序列^[5,7]、震积岩与震积不整合序列^[16,17]、萨布哈震积岩序列^[7]等震积序列,同时还总结了包括断裂递变层、断裂均一层、地裂缝、微同沉积断裂(包括层内阶梯断裂)、重力断层、微褶皱纹理在内的震积作用构造标志^[18-20]。

地震这种常见的灾害性地质作用,在现代仍然频繁发生,且同时伴随着一系列可供地质学家观察的现象,这为“将今论古”这一地质学研究方法提供了极

佳的途径。如汶川8.0级大地震导致龙门山断裂带上就广泛地发育有震裂缝、微褶皱、断层和山体滑坡、地层滑塌等与地震作用直接有关的产物。

震旦纪陡山沱期处于南沱冰期之后,气候转暖,海水温度升高的大背景下,是多细胞生物起源和发展的重要转折时期和磷质聚集时期,是化学、气候和环境变化的剧烈时期,同时也是 Rodinia 超大陆裂解的重要地质时期。陡山沱组的生物地层、岩石地层以及年代地层等方面已有许多成果,如:前人在陡山沱组二段和三段的燧石结核和条带中发现有具刺疑源类、多细胞藻类、蓝细菌等化石^[21-23],在四段中发现大量保存很好的被称为庙河动物群的宏观藻和疑似后生动物化石^[24,25],而对于陡山沱组中的“震积岩”报道却极少。笔者在对湘西慈利溪口地区震旦纪陡山沱组地层进行沉积相、层序地层研究过程中,结合扬子陆块在震旦纪的构造演化背景并通过野外实测剖面和室内分析,发现陡山沱组上部许多非正常沉积作用条件下形成的软沉积变形构造,诸如阶梯状层内断层、液化碳酸盐岩脉、液化角砾岩、负荷构造以及微褶皱纹理等,这些沉积特征都是震积岩的标志性沉积构造,该时期震积岩的发现不仅是国内震积岩研究的又一例证,而且对研究震旦纪陡山沱期扬子陆块构造活

^①中国地质调查局. 桑植—石门及邻区油气地质综合调查及地层对比研究(编号:121201120968)资助。
收稿日期:2011-11-10; 收修改稿日期:2012-02-29

动期次和强度也具有重要意义。

1 地质背景

震旦纪是全球构造、环境发生重大变化的地史阶段。伴随全球气候和环境的巨大变化,震旦纪成为生物辐射演化的重要时期,陡山沱组是南沱冰期冰川消融后引发的广泛海侵初期的产物,广泛分布于扬子地层区,扬子地区大规模的海侵构成了上扬子(云贵川)台地、鄂西—湘北台地和下扬子的开(化)临(安)台地以及巢(湖)宁(南京)碳酸盐缓坡^[26]北东—南西向展布的古地理构造格局(图 1)。湘西慈利溪口实测剖面(图 2)陡山沱组底部为南华系冰碛岩之上的“盖帽白云岩”;中下部为黑色—深灰色薄层泥质灰岩、碳泥质白云岩和黑色碳质页岩组成;上部以砂质灰岩(白云岩)、(含磷)泥晶灰岩(白云岩)为主;顶部见有含硅质条带或结核的泥质白云岩、炭质页岩及含云灰岩。整个陡山沱组构成一个完整的二级层序“盖帽白云岩”构成该层序的海侵体系域(TST)，“盖帽白云岩”之上富有机质的灰黑色碳泥质白云岩和硅质泥岩,自下而上所夹的增多变厚的白云岩层,分别构成二级层序的凝缩段(CS)与高水位体系域(HST)。研究区陡山沱组内部陡 1~陡 4 段又细分为 3 个三级层序(SQ1~SQ3)。震积岩发育层位见于实测剖面陡山沱组顶部, GPS 点位为: 29°14'14.465" N、110°47'28.919"E、高程为 566 m,地层岩性以碳酸盐岩为主,震积层仅在厚度约 1.45 m 范围内出现,上下地层均为未受地震作用改造的砂质云岩与含

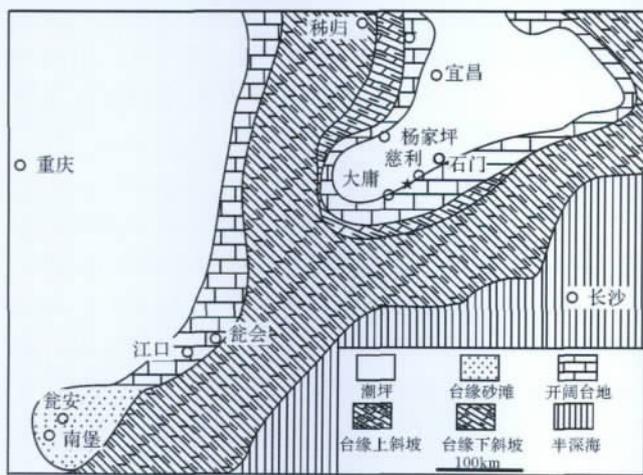


图 1 研究区陡山沱组岩相古地理及剖面位置图
(据 Liu, 1994; 王约, 等, 2010 略有修改)

Fig. 1 Outlinemap showing the lithofacies and paleogeography of the Doushantuo Formation in the study area

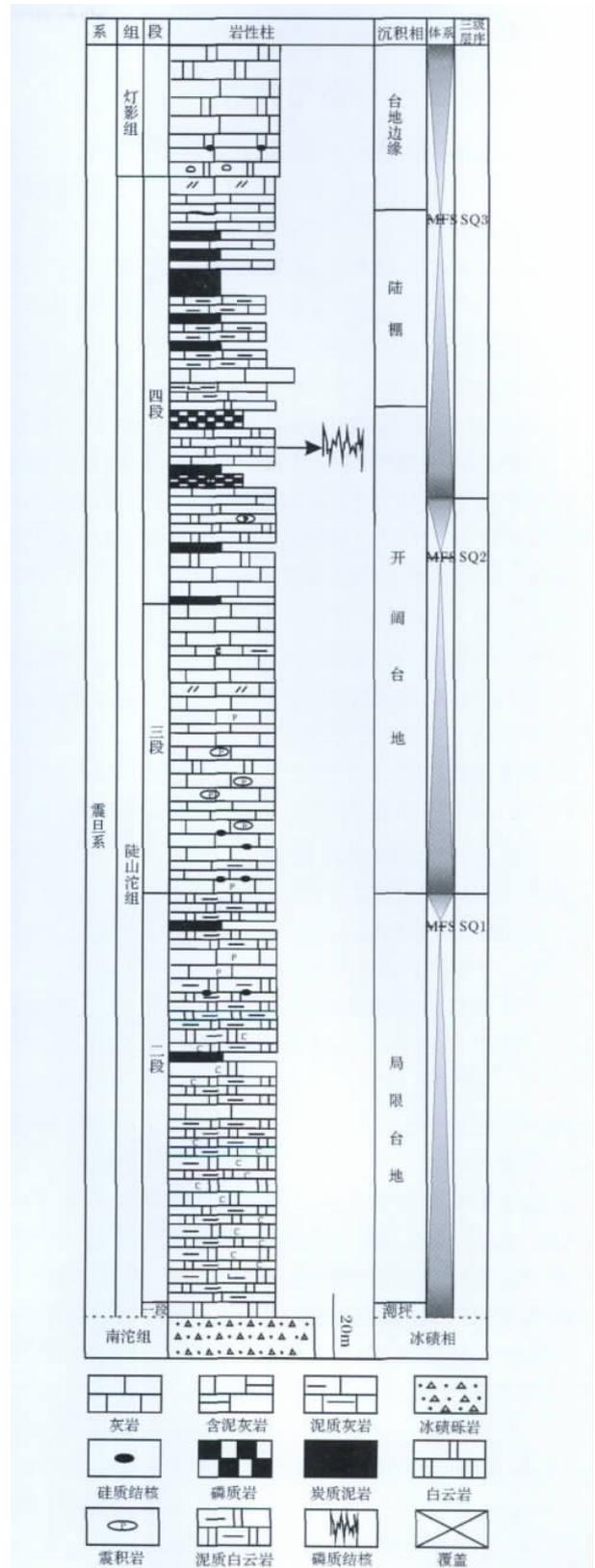


图 2 溪口剖面陡山沱组综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column of sedimentary facies and and sequence stratigraphy in the study area

磷质泥—微晶云岩薄互层为特征的正常沉积。

2 震积岩成因类型和垂向序列

地震诱发沉积物变形,特别是软沉积物变形是十分丰富的,地震作为一种自然灾害事件,对沉积作用主要有两种影响:其一是直接作用于沉积物,在沉积物中留下典型的震积记录,如震裂缝、沉积断裂、和震积角砾岩等;其二是作为触发机制,诱使海啸、山体滑坡、地层滑塌,甚至引起沉积物重力流滑塌和长距离的搬运与沉积,留下滑塌变形构造和重力流沉积^[11]。总体说来,研究区陡山沱组震积岩具备如下特征:(1)该地区发育的震积岩属于地震引起的对先成沉积物的原地改造成因,缺乏地震触发的海啸岩以及震浊积岩的识别标志,为原地震积岩。(2)阶梯状层内断层、液化碳酸盐岩脉、液化角砾岩、负荷构造以及微褶纹理等,是该地区震积岩的标志性沉积构造。(3)最常见的震积构造是阶梯状小断层,在剖面结构上至下而上阶梯状断层断距变短,规模变小,直至消失,与液化碳酸盐岩脉、液化角砾岩、负荷构造以及微褶纹理等震积构造是一系列成因上有联系的地震作用的产物。(4)震积序列总体上显示由阶梯状层内断层—微褶皱层—液化碳酸盐层—液化角砾岩层—未震动层的渐变过程。详细的描述如下。

2.1 震积构造特征

2.1.1 阶梯状层内断层

阶梯状层内断层也可以称为粒序断层,是限制在一个岩层内部的一组断距很小的小型或微型正断层^[27]。研究区所见层内断层属于震积作用形成的而非后期构造,其主要原因:①所见层内断层以张性正断裂为特点(图3-a,b),断裂面不具共轭性;而后期构造形成的断裂常以张扭或压扭性断裂为多,断裂面平直,断裂缝为结晶方解石充填(图3-f)②该剖面震积岩软沉积物变形构造发育的同时,也有后期构造断裂形成的构造裂缝产出,但是后期的构造缝的产状与震积作用形成的层内断层大为不同,且切割早期形成的地震断裂(图3-f)。

研究区阶梯状断层规模不大,但局部可以密集发育,断层间距小,一般在0.5~4 cm之间,断距在0.2~2 cm之间,断距向下逐渐增加,断层产状大多近似:倾向均在165°~169°之间,倾角在26°~35°之间,都限于层内发育,以张性正断裂为特点,微断层明显截断具沙纹层理的粗颗粒砂质白云岩(图3-a),上盘发生褶皱,下盘则具撕裂状,微断层在剖面上大都

呈上盘依次下降排列的“阶梯状”或“锯齿状”(图3-a、3-b),仅少数微断层呈孤立产出。其下伏碳酸盐岩层常有液化现象,同时许多阶梯状断层与卷曲变形及液化泄水脉共生,表明它们在成因上的联系。阶梯状层内断层是震积岩中最典型的构造类型,阶梯状层内断层被认为是重要的古地震证据^[2]。

2.1.2 微褶纹理

微褶纹理亦是研究区震积岩中的构造变形现象,与后期构造形成的褶皱变形不同,震积微褶皱属于层内变形,即地震微褶皱纹理局限于地震扰动层之内,形态不规则、定向性差、尺度较小(图3-c、3-d)。模拟试验证明,发生液化的颗粒主要集中在0.01~0.3 mm之间,而粒度>0.3 mm的颗粒基本不发生液化现象^[28]。研究区常见的地震微褶皱纹理单个褶曲大小在1~6 cm之间,尤以1~3 cm之间者为多,呈小型褶曲(图3-d),有与阶梯状断层伴随产出的特点。

2.1.3 震积角砾岩(液化角砾岩)

研究区所见的震积角砾岩相当于杜远生等提出的“自碎屑角砾岩”,是指地震震动破坏原沉积层形成的初始断裂角砾岩,这种角砾岩完全是原地原位的。前人通过对原地震积岩观测,发现存在两种不同角砾组成的角砾岩:一种是塑性角砾岩,另一种为脆性角砾岩^[18]。本文的震积角砾岩呈软沉积变形特征,角砾直径大小在1~7 mm之间,角砾呈拉长状或断续相连的痕迹(图3-e),或近似于砾级内碎屑碳酸盐颗粒的特点,属于塑性角砾岩。这些角砾表面特征显示没有经过搬运的特征,而系粗颗粒的液化碳酸盐岩脉穿刺围岩(含磷质泥晶碳酸盐岩)产生的岩石角砾岩化,同时与液化碳酸盐岩脉共生(图3-g),且同一层内完成的。

2.1.4 液化碳酸盐岩脉

研究区见到的液化碳酸盐岩脉主要是液化的灰泥穿插软沉积物层或充填地震微断裂形成的,以液化的相对较粗的砂质碳酸盐岩脉常见(图3-gC)。脉体产状主要为水平沿层的侵位,形成层状液化岩脉。脉体在剖面上多呈不规则弯曲可以水平、低角度斜向穿插围岩,脉体宽度在0.5~15 mm之间,长度1 cm至数十厘米不等。脉体的结构及成分特征基本相似,岩性为砂质云岩,与深色含磷泥晶云岩围岩在成分、结构上差异明显。液化的碳酸盐脉体穿切围岩时可见纹层发生弯曲,围绕脉端形成上拱或者下凹状弯曲(图3-g)。

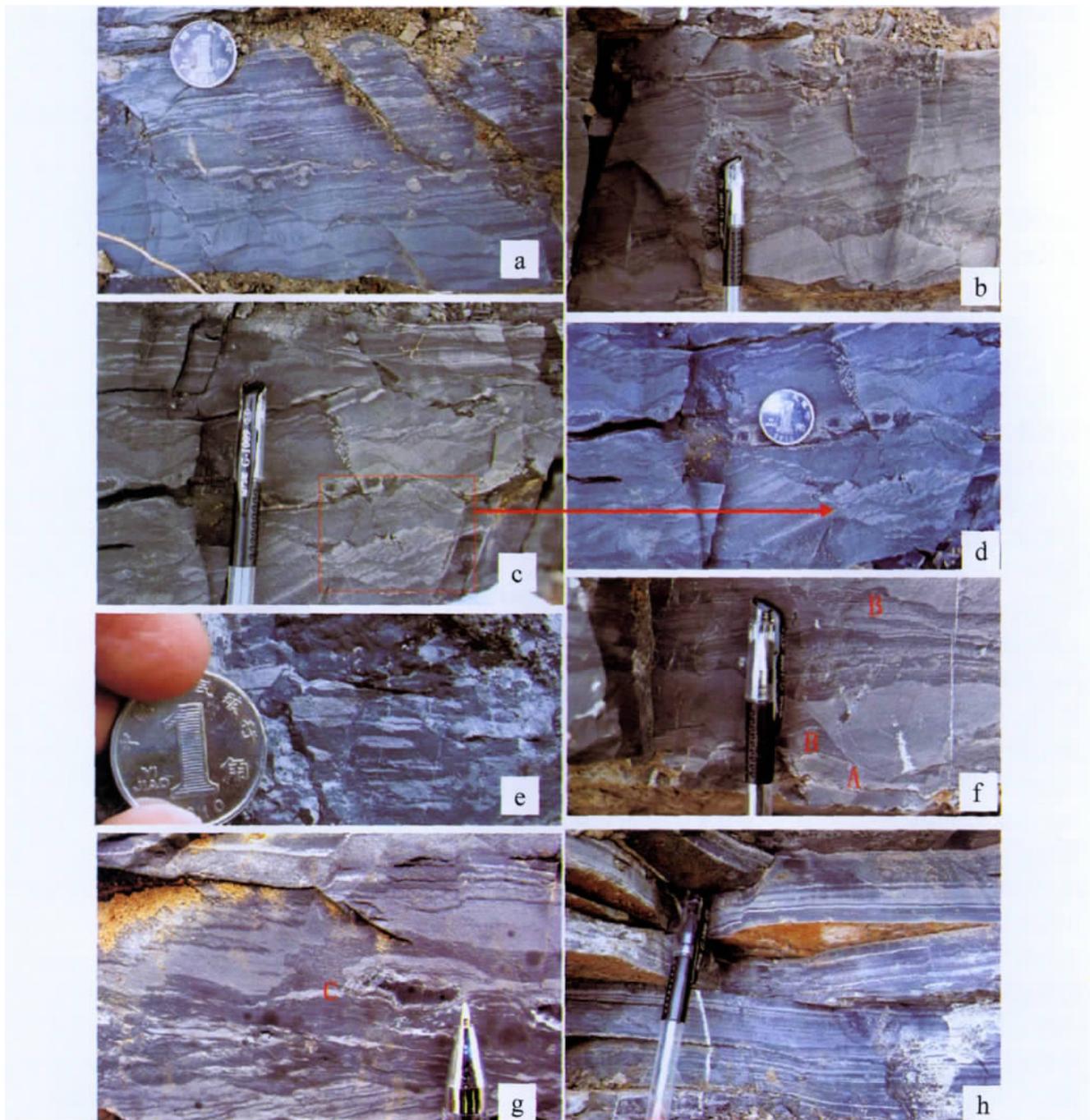


图 3 湘西慈利溪口地区陡山沱组常见的震积构造类型

a. 阶梯状断层截断具原生连续的碳酸盐岩细层, 及上部未错断层; b. 阶梯状断层; c. 微褶纹理及液化碳酸盐岩脉(C); d. 3 的局部放大; e. 液化角砾岩(E); f. 重荷构造(A) 及其与之相伴生的火焰构造(B); g. 液化碳酸盐岩脉(C); h. 上部未震动层, 水平纹层发育

Fig. 3 Common seismic structure of Doushantuo Formation in the study area

液化碳酸盐岩脉的成因源于地震事件发生, 富含水份、未固结的砂质碳酸盐岩系发生液化, 粗颗粒沉积物在地震活动中由于受到上部及四周压力, 向压力小的方向移动, 导致在向岩层内上方及下方两个相反方向液化, 挤入泥质沉积物。该类碳酸盐岩细脉与其

他震积构造同时产出, 常也是被认为是地震成因的。

2.1.5 负荷构造

负荷构造系上覆粗颗粒的沉积物下陷落入下伏相对细粒层中的一种在沉积物沉积之后固结之前的变形构造构造。此类构造在研究区亦为常见, 以相对

较粗的碳酸盐颗粒组成的细层向下弯曲的向斜状形态产出,宏观上有类似于刻蚀、冲刷下伏泥晶碳酸盐岩的特点(图3-fA)。与其相伴生的是发育在负载构造之间的泥晶碳酸盐构成的火焰构造(图3-fB)。

上述负载构造的宏观产状说明与负载体相连的母岩与下伏赋存负载体的岩层一定是发生液化的软沉积物,否则上覆沉积物无法陷入下伏层内。负载构造虽然不完全排除非地震成因,但这些构造在地震过程中是可以形成的^[18-29]。

2.2 震积岩垂向组合

沉积序列是沉积单元有规律的组合,它反映沉积环境的规律变化(环境)或沉积作用过程(事件相)。震积作用的沉积序列是在地震及其触发的海啸、重力流事件作用过程中形成的沉积单元的规律组合^[18]。前文已经述及,研究区的震积岩成因主要是地震作用对先成沉积物的原地改造,受地震改造后的沉积物在剖面结构上体现出不同原岩成分对地震振动过程的不同反应类型,也反映了地震作用活跃、减弱直至停止的过程。实测剖面发育震积岩的位置自下而上可以观察到有如下几种序列,各序列的震积构造组合有: I. 下伏未震层—阶梯状层内断层—微褶皱层—液化碳酸盐层—上覆未震层(图4 I); II. 下伏未震层—阶梯状层内断层—液化碳酸盐层—液化角砾岩层—上覆未震层(图4 II); III. 下伏未震层—液化碳酸盐层(及微褶皱层)—上覆未震层(图4 III);三个序列层厚分别为46 cm、37.5 cm、72 cm,其中以序列 I 最为常见, I 序列和 II 序列中以阶梯状层内断层为最典型的震积构造。总体上体现出剖面自下而上由阶梯状层内断层—微褶皱层—液化碳酸盐岩层—液化角砾岩层—未震动层的渐变过程,反映震积作用由强至弱的活动过程,而阶梯状层内断层、液化层在研究区尤为发育,反映出地震规模、震级较大的特点。因为一般来说,震积角砾岩是微固结或半固结岩石表层部分发生振动破碎,与母岩分离的结果,微褶皱层的形成是半固结岩石下部(岩石基本上已整体化,但上部为可活动的弱自由面)在地震振动下整体塑性变形的结果,而微型递变层是半固结或一部分已固结岩石在振动下呈刚性破裂变形的结果,是具备一定规模的地震作用的结果。与其它事件沉积序列一样,很难在单一剖面上见到完整的震积岩垂向序列,这既与所观察剖面的位置有关,也与地震震级和地震发生处的岩性有关^[19],以本文的研究为例,最典型的序列为

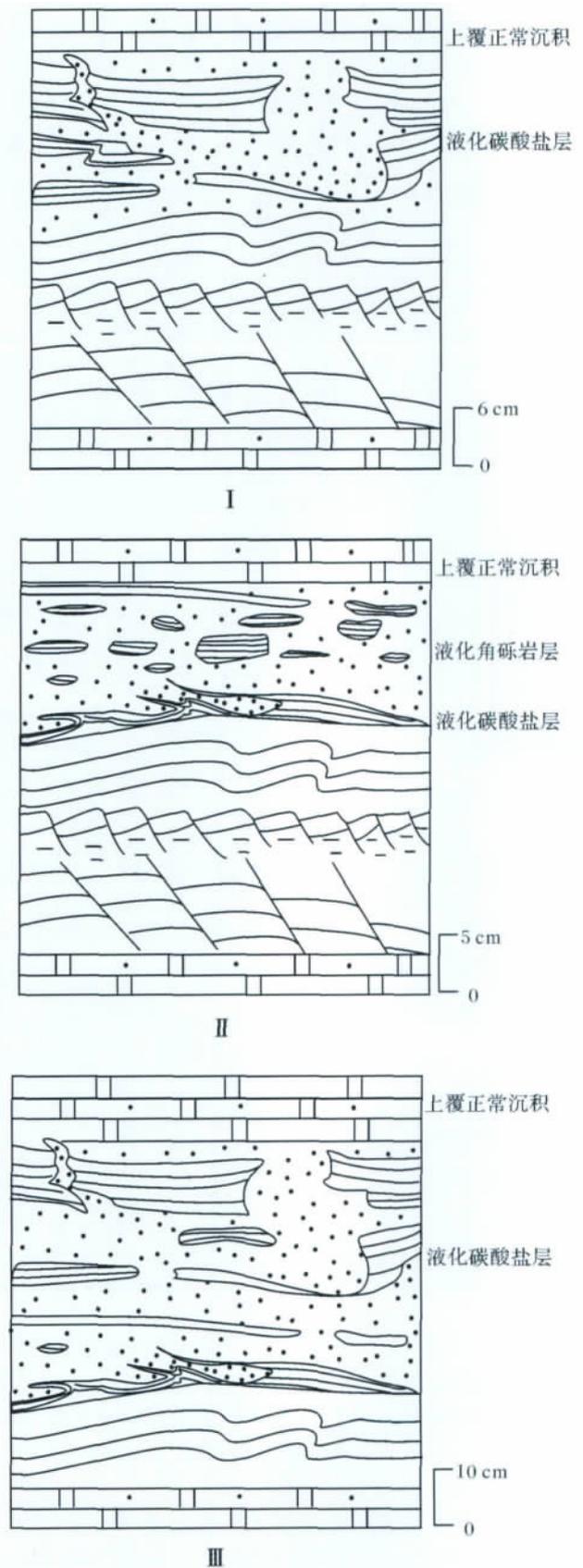


图4 研究区陡山沱组震积岩垂向序列特征

Fig.4 Vertical sequence features of the seismites of the Doushantuo Formation in the study area

I型震积序列,震积构造以呈阶梯状排列、上盘下降、下盘上升的阶梯状断层为最常见,阶梯状断层在震积层下部—中部频繁出现,而向上部层位逐渐消失,如在震积序列Ⅲ中并未见到层内小断层。次常见的震积构造为液化沉积物脉,在各震积序列中均能识别出来。而呈拉长状或断续相连的震积角砾岩在溪口剖面出现的概率最小,仅在震积序列Ⅲ中常见。

3 陡山沱组震积岩的地质意义

震积岩的研究有助于重新恢复古构造活动性,解决古构造、古断裂、古环境以及同一个构造带中地层等时对比与构造作用等时对比的问题^[1]。地史时期的震积岩主要见于活动的构造带,所以,可以通过震积岩的研究恢复古构造的活动性,帮助认识沉积盆地的大地构造背景。另外,从沉积环境来看,一方面要求沉积环境相对稳定,才能保留下地震信息;另一方面要求地层表现出构造活动的特点。显然,震积作用及其产物是古地震作用和与之对应的沉积环境叠合的产物。

3.1 构造意义

如前文所述,地震主要发生在活动的大地构造背景下,依将今论古的原则,地史时期的地震同样发生在大地活动的构造背景下,构造活动的阶段性和非同步性,往往震积岩的软变形构造中可以得到充分反映。为研究陡山沱期研究区的古构造特征,本文将华南震旦系陡山沱组已发现震积岩的另外两处剖面进行了对比(图5),认为该时期震积岩层的发育反映出以下几方面的特点:

(1) 包括研究区慈利溪口、石门杨家坪以及黔中瓮安南堡在内的三处震积岩剖面岩性虽有所差别,但震积岩发育的层位均为陡山沱组上部,记录在震积岩中的液化碳酸盐岩脉、液化磷质岩脉、液化角砾岩、以及层内断层等震积构造在三个地方均被观察到,同时层内断层和液化碳酸盐岩脉同为三处剖面最典型和常见的震积构造。

(2) 缺乏震浊积岩和滑塌沉积代表的异地系统,震积构造主要是同生—准同生期的软沉积物变形构造,表明陡山沱期晚期黔中、湘西一带碳酸盐岩台地内部地形平缓(与陆表海环境吻合),盆地呈现大范围的沉降,处于饥饿沉积状态。同时以黔中南堡剖面的磷质震积岩发育的多期的特点来看(图4),陡山沱期晚期,扬子地区至少有过2次以上的地震高峰期^[30]。

(3) 慈利溪口、石门杨家坪以及黔中瓮安南堡等地同时期震积岩的发现表明:陡山沱期晚期震积岩的发育也表明这一时期的扬子地区处于较为强烈的地震构造活动,也是震旦纪始的华南古大陆裂谷系不断扩大,雪峰山以西地区的扬子陆块的向被动陆缘(并基本上延续至海西期)演化的大地构造演化背景响应。发生于该时期的地震,也应该与断裂等构造活动有关,并对其沉积作用和沉积物产生影响。

3.2 地层对比意义

从目前的研究现状看,在某些缺少可用于精细生物地层对比的古生物化石的新元古代地层中,作为陡山沱期晚期强烈的构造活动的响应,震积岩的出现无疑具有较好的等时对比意义,这对于震旦系陡山沱组地层在区域上的对比具有一定的参考价值,也不失为进行地层划分的一种有效手段。但由于沉积物与震源距离的差异、震积岩记录在地层中保存程度的不一,以及调查范围的限制,用震积岩在进行华南陡山沱组地层对比时还需要做进一步的工作。

3.3 沉积环境的指示意义

“雪球事件”之后的震旦纪早期(陡山沱期),扬子板块的气候转暖,海平面上升,环境发生了剧烈变化。在南华纪剥蚀夷平作用的基础上,大规模的海侵由东而西侵入,除扬子板块西南缘的中滇古陆外,大部均被淹没于海水之下,在其西缘形成滨浅海环境,上、中扬子地区发育成碳酸盐台地的陆表海环境,黔东—湘西—鄂中一线以及以其东南地区成为大陆斜坡的半深海和深海海盆环境,从而构成大陆架呈北东—南西向的古地理格局^[26]。图1显示研究区该时期主要为潮坪—开阔台地沉积,然而,与宜昌天柱山、鄂西秭归等地有所不同,陡山沱组上部泥晶白云岩、鲕粒、藻砂屑亮晶白云岩、结晶白云岩和白云质角砾岩等代表潮坪相的岩相在慈利溪口地区不常见,取而代之的是以泥质灰岩、泥—微晶白云岩和深黑色泥岩为主的岩石类型,水平层理常见,反映震积岩发育的沉积环境主要为开阔台地相—滩间海、潮下静水泥微相等低能静水环境中。这种相对安静的沉积环境无疑为地震信息在沉积物中的保存起到了不可或缺的作用。

3.4 与生物辐射、成磷事件的耦合

值得一提的是,在石门杨家坪以及黔中瓮安南堡保存有震积岩记录的相同层位,发育有以庙河生物群为代表的宏体多细胞藻类,以碳质压膜形式保存的

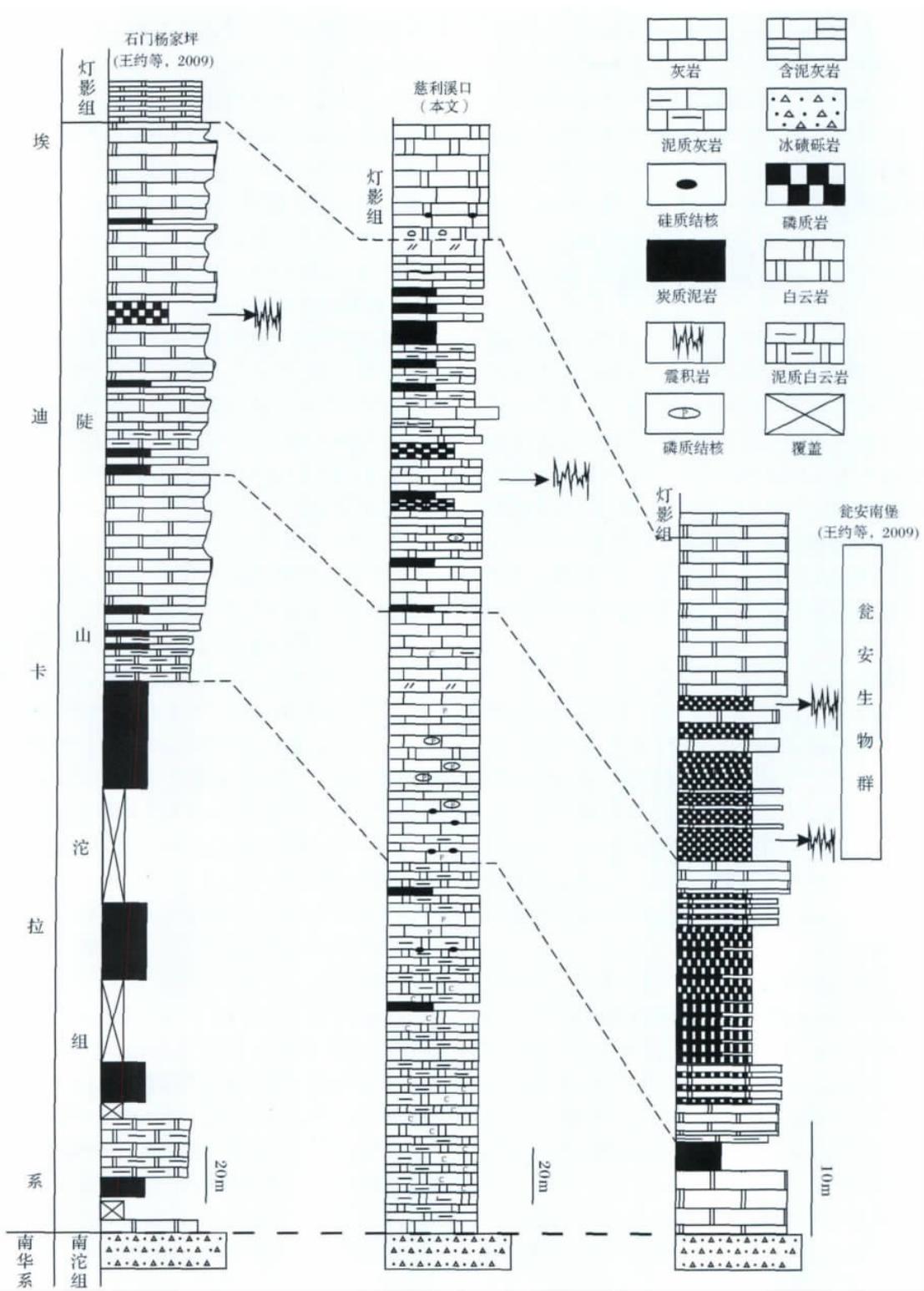


图5 华南震旦系陡山沱期剖面震积岩地层分布对比

Fig.5 Stratigraphic section through the Doushantuo Formation in South China showing occurrences of seismites

宏体后生动物，如 *Eoandromeda octobrachiata*^[31-33]，以及可能的蠕虫类化石 *Wenghuiia jiangkouensis*^[31]

等。此外瓮安生物群、皖南的蓝田植物群、以及黔东南的瓮会生物群等多细胞宏体生物群被发现于陡山

沱期晚期的地层中,表明这一时期是多细胞生物起源、演化和发展的重要时期。同时,陡山沱期也是扬子地区首次重要的磷质成矿时期,前人的研究大多认为磷质成矿物质的主要为地幔,并有海底热水成矿的特征^[34~36]。同时,瓮安地区陡山沱期磷块岩形成于浅海低等水生生物繁盛的含磷沉积环境。近期越来越多的研究证实,陡山沱组疑源类、多细胞藻类、宏体藻类及埃迪卡拉动物群的演化,可能同埃迪卡拉纪海洋的含氧量密切相关,而埃迪卡拉纪海洋有机碳库氧化,为该时期碳同位素的漂移和生物的辐射提供了很好的解释^[37~41]。根据这些特征文本做出这样推测:一方面,活跃的地震构造运动形成的断层,震裂缝可以为磷质来源和热水活动提供通道,而成为必要的疏导体系;另一方面,根据陈寿铭等2009年对峡东地区陡山沱组的碳同位素与世界相关地区对比研究,陡山沱组的第三次负偏移事件出现在陡山沱组上部一顶部,且对应生物多样性的发展。那么活跃的地震构造运动可以促进海水升温、加速有机碳库的氧化,丰富水体中的磷等无机营养盐,提供为多细胞生命的繁盛创造有利的环境,也有益于磷质矿物的生物富集作用,而石门、瓮安剖面报道的震积岩更是直接出现在磷质岩中,且与瓮安生物群的产出层位相当^[30]。所以地震活动与该时期的生物辐射和成磷或许存在一定的关系,对生物的繁盛起到一定的促进作用。而生物变化、磷质富集与震积作用之间的具体关系有待于通过更全面系统的研究来加以系统阐释。

4 结论

(1) 阶梯状层内断层、液化碳酸盐岩脉、液化角砾岩、负荷构造以及微褶纹理是研究区典型的震积软沉积物变形构造的地质记录,震积序列在剖面结构上显示自下而上由下伏未震动层—阶梯状层内断层—微褶皱层—液化碳酸盐岩层—液化角砾岩层—上覆未震动层的渐变过程。

(2) 与华南目前已发现的另外两处震积岩地层剖面进行对比研究,结果显示:震积岩发育的层位在时、空上有良好的可比性,是陡山沱期晚期相对活跃的构造运动的沉积响应。

(3) 震积岩发育的沉积环境主要为开阔台地相—滩间海、潮下静水微相等低能静水环境中。这种相对安静的沉积环境无疑为地震信息在沉积物中的保存起到了不可或缺的作用。地震构造运动在一定程度上为促进海水升温、有机碳的氧化、多细胞生

命的繁盛、以及磷质矿物的富集创造了条件。

参考文献(References)

- 1 吴堪. 震积岩、海啸岩、震浊积岩研究进展[J]. 地质学报, 2010, 30(2): 136-139 [Wu Kan. Advances in research for seismite, tsunamiite and seismoturbidite [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 30(2): 136-139]
- 2 Seilacher A. Fault-graded bed interpreted as seismites [J]. Sedimentology, 1969, 13(1-2): 155-159
- 3 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, 38(8): 609-611 [Song Tianrui. A possible seismite-tsunami sequence in Precambrian carbonate stratigraphy in Shisanling area, Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 1988, 38(8): 609-611]
- 4 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): 16-32 [Qiao Xiufu, Song Tianrui, Gao Linzhi, et al. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction [J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(1): 16-32]
- 5 乔秀夫, 李海兵, 高林志. 华北地台震旦纪—早古生代地震节律[J]. 地学前缘, 1997, 4(3-4): 155-160 [Qiao Xiufu, Li Haibing, Gao Linzhi. Sinian-Early Paleozoic seismic rhythms on the north China platform [J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(3-4): 155-160]
- 6 乔秀夫, 高林志. 华北中新元古代及早中生代地震灾变事件及与Rodinia的关系[J]. 科学通报, 1999, 44(16): 1753-1758 [Qiao Xiufu, Gao Linzhi. Earth quake events in Neoproterozoic and Early Paleozoic and its relationship with super continental Rodinia in North China [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(16): 1753-1758]
- 7 乔秀夫, 高林志, 彭阳, 等. 古郯庐带沧浪铺阶段地震事件、层序及构造意义[J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31(11): 911-918 [Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Peng Yang, et al. Seismic event, sequence and tectonic significance in Canglangpu Stage in paleo-tanlu fault zone [J]. Science in China: Series D, 2001, 31(11): 911-918]
- 8 杜远生, 张传恒, 韩欣, 等. 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: D 辑, 2001, 31(4): 283-289 [Du Yuansheng, 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]
- 9 贾志海, 洪天求, 郑文武, 等. 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, 2003, 27(2): 146-149 [Jia Zhihai, Hong Tianqiu, Zheng Wenwu, et al. The characters and environments of the seismites of the Neoproterozoic Wangshan Formation in north Anhui [J]. Journal of Stratigraphy, 2003, 27(2): 146-149]
- 10 吕洪波, 章雨旭, 夏邦栋, 等. 南盘江盆地中三叠统复理石中的同沉积挤压构造——一类新的沉积构造的归类、命名和构造意义探讨[J]. 地质论评, 2003, 49(5): 449-456 [Lü Hongbo, Zhang Yuxu, Xiao Guowang, et al. Earthquake slump blocks discovered in lower part of the Sailinhudong Group, Heinaobao, Southeast Bayan Obo, Inner Mongolia [J]. Geological Review, 2006, 52(2): 163-169]
- 11 戴朝成, 郑荣才, 朱如凯. 四川类前陆盆地须家河组震积岩的发现及其研究意义[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 618-630 [Dai

- Chaocheng, Zheng Rongcai, Zhu Rukai. The discovery and significance of seismites from Xujiahe Formation in Sichuan Analogous Foreland Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(2): 618-630]
- 12 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(3): 19-24 [Wu Xiantao, Yin Guoxun. Discovery of seimite and its significance of the Late Jurassic lacustrine deposit in Emei, Sichuan Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(3): 19-24]
- 13 张琴,朱筱敏,张建军,等. 酒西盆地青南凹陷柳沟庄—窟窿山地区下白垩统震积岩的发现及意义[J]. *地质学报*, 2003, 77(2): 158-162 [Zhang Qin, Zhu Xiaomin, Zhang Jianjun, et al. The discovery of seimite and its significance in Lower Cretaceous in Liugouzhuan and Kulongshan region, Qingnan Sag, Jiuxi Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(2): 158-162]
- 14 郑荣才,文华国,范铭涛,等. 酒西盆地地下沟组湖相白烟型喷流岩岩石学特征[J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 3027-3038 [Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Fan Mingtao, et al. Lithological characteristics of sublacustrine white smoke type exhalative rock of the Xigou Formation in Jiuxi Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(12): 3027-3038]
- 15 陈世悦,袁文芳,鄢继华. 济阳拗陷早第三纪震积岩的发现及其意义[J]. *地质科学*, 2003, 38(3): 413-424 [Chen Shiyue, Yuan Wenfang, Yan Jihua. Discovery and significance of earthquake event deposits of Early Tertiary in the Jiyang depression [J]. *Earth Science*, 2003, 38(3): 413-424]
- 16 梁定益,聂泽同,宋志敏. 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*, 1994, 19(6): 845-850 [Liang Dingyi, Nie Zetong, Song Zhimin. A re-study on seimite and seismo-unconformity: Taking western Sichuan and western Yunnan as an example [J]. *Earth Science*, 1994, 19(6): 845-850]
- 17 梁定益,聂泽同,万晓樵,等. 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*, 1991, 5(2): 138-147 [Liang Dingyi, Nie Zetong, Wan Xiaoqiao, et al. On the seimite and seismodisconformity: Taking western Sichuan and western Yunnan as an example [J]. *Geoscience*, 1991, 5(2): 138-147]
- 18 杜远生,韩欣. 论震积作用和震积岩[J]. *地球科学进展*, 2000, (4): 389-394 [Du Yuansheng, Han Xin. Seismo-deposition and Seismites [J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 31(4): 389-394]
- 19 夏青松,田景春,黄昌武. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组震积岩识别标志研究[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2007, 34(3): 312-317 [Xia Qingsong, Tian Jingchun, Huang Changwu. Study on the recognition marks of seismites in Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2007, 34(3): 312-317]
- 20 袁静. 山东惠民凹陷古近纪震积岩特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 41-46 [Yuan Jing. The property and geological significance of seismites of Paleogene in Huimin Sag, Shandong Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 41-46]
- 21 Zhang Y, Yin L, Xiao S, et al. Permineralized fossils from the terminal Proterozoic Doushantuo Formation, South China [J]. *Palaeontological Society Memoires*, 1998, 50: 1-52
- 22 Yin C. Microfossils from the Upper Sinian (Late Neoproterozoic) Doushantuo Formation in Changyang, western Hubei, China [J]. *Continental Dynamics*, 1999, 4: 1-18
- 23 Xiao S. New multicellular algal fossils and acritarchs in Doushantuo chert nodules (Neoproterozoic; Yangtze Gorges area, South China) [J]. *Journal of Palaeontology*, 2004, 78: 393-401
- 24 Xiao S, Yuan X, Steiner M, et al. Macroscopic carbonaceous compressions in a terminal Proterozoic shale: a systematic reassessment of the Miaohé biota, South China [J]. *Journal of Palaeontology*, 2002, 76: 347-376
- 25 Yin L, Zhu M, Knoll A H, et al. Doushantuo embryos preserved inside diapause egg cysts [J]. *Nature*, 2007, 446: 661-663
- 26 夏文杰,杜森官,徐新煌,等. 中国南方震旦纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 50-62 [Xia Wenjie, Du Senguan, Xu Xinhuang. Sinian lithofacies paleogeography and mineralization in South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 50-62]
- 27 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): 593-607 [Qiao Xiufu, Li Haibing. Effect of earthquake and ancient earthquake on sediments [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(6): 593-607]
- 28 朱海之. 砂土震动液化与液化结构指数[J]. *科学通报*, 1971, 24: 1127-1131 [Zhu Haizhi. Liquefaction of sandy soil during earthquakes and structural index of liquefaction [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1971, 24: 1127-1131]
- 29 乔秀夫,李海兵. 枕-球-枕构造: 地层中的古地震记录[J]. *地质论评*, 2008, 54(6): 721-730 [Qiao Xiufu, Li Haibing. Pillow, ball-and-pillow structures: Paleoseismic records within strata [J]. *Geological Review*, 2008, 54(6): 721-730]
- 30 王约,楚靖岩,王训练,等. 华南震旦系陡山沱组磷质震积岩及其与多细胞生物群相关性初探[J]. *地质论评*, 2009, 55(5): 673-680 [Wang Yue, Chu Jingyan, Wang Xunlian, et al. Preliminary discussion on phosphorus seismites from the Ediacaran Doushantuo Formation in South China, and its relationship with metabiota [J]. *Geological Review*, 2009, 55(5): 673-680]
- 31 Wang Y, Wang X L, Huang Y M. Megascopic symmetrical metazoans from the Ediacaran Doushantuo Formation in the northeastern Guizhou, South China [J]. *Journal of China University Geosciences*, 2008, 19: 200-206
- 32 Tang F, Yin C Y, Bengtson S, et al. Octoradiate spiral organisms in the Ediacaran of South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82: 27-34
- 33 Zhu M Y, Gehling J G, Xiao S H, et al. Eight-armed Ediacara fossil preserved in contrasting taphonomic windows from China and Australia [J]. *Geology*, 2008, 36: 867-870
- 34 陈多福,陈光谦,陈先沛. 贵州瓮福新元古代陡山沱期磷矿床铅同位素特征及来源探讨[J]. *地球化学*, 2002, 41(4): 49-54 [Chen Duofu, Chen Guangqian, Chen Xianpei. Lead isotope geochemistry of Wengfu phosphorite deposits of Doushantuo Age of Neoproterozoic and its application [J]. *Geochimica*, 2002, 41(4): 49-54]
- 35 郭庆军,杨卫东,刘丛强,等. 贵州瓮安生物群和磷矿形成的沉积

- 地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(3): 202-208 [Guo Qingjun, Yang Weidong, Liu Congxiao. Sedimentary geochemistry research on the radiation of Weng'an Biota and the Formation of the phosphorite ore deposit, Guizhou[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(3): 202-208]
- 36 牟南, 吴朝东. 上扬子地区震旦—寒武纪磷块岩岩石学特征及成因分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(4): 551-562 [Mou Nan, Wu Chaodong. Characteristics and genesis of phosphorite of the Sinian-Cambrian, West Yangtze Area[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, 41(4): 551-562]
- 37 Fike D A, Sumons R E. Oxidation of the ediacaran ocean[J]. Nature 2006, 444(7120): 744-747
- 38 Rothman D H, Hayes J M and Sumons R E. Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2003, 100(141): 8124-8129
- 39 McFadden K A, Huang Jing, Chu Xuelei *et al.* Pulsed oxidation and biological evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2008, 105(9): 3197-3202
- 40 陈寿铭, 尹崇玉, 刘鹏举, 等. 峡东地区埃迪卡拉系陡山沱组碳同位素特征研究进展与国内外对比[J]. 地球学报, 2009, 30(4): 475-486 [Chen Shoumin, Yin Congyu, Liu Pengju, *et al.* Research advances and correlations of carbon isotopic compositions in the Ediacaran Doushantuo Formation, East Yangtze Gorges, South China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2009, 30(4): 475-486]
- 41 刘鹏举, 尹崇玉, 高林志, 等. 湖北宜昌樟村坪埃迪卡拉系陡山沱组微体化石新材料及锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 科学通报, 2009, 54(6): 774-780 [Liu Pengju, Yin Chongyu, Gao Linzhi, *et al.* New material of microfossils from the Ediacaran Doushantuo Formation in the Zhangcunping area, Yichang, Hubei Province and its Zircon SHRIMP U-Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 774-780]

Characteristics and Geological Significance of Seismites of the Doushantuo Formation in Xikou, Hunan Province

ZHAO Can¹ LI Xu-bing¹ LI Zhi-hong¹ YU Yu-shuai¹ ZHANG Hua² LIU An¹

(1. Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430223;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Abstract: Autochthonous seismites of the Doushantuo Formation have been discovered for the first time in Xikou, Cili County in Hunan Province. Based on the profile measurement, detailed observations and description, combined with the analysis of the tectonic background, many typical seismites soft sedimentary deformation structures have been recognized, such as: fault-graded, liquefied carbonate vein, liquefied breccias, convolute deformation structure, water-escape structure and seismo-folds, and so on. The vertical sequence of the seismites is underlying unshocked layer, syn-sedimentary microstructure (fault-graded), micro-corrugated layer, vibrational liquefaction layer, liquefied breccias layer, liquefied homogenization layer and overlying unshocked layer from down to up. The horizon of the seismites shows a good contradistinctive relation in time and space. It suggests that in the Doushantuo Period, strong and frequency seismic activity occurred in study area, the nature and activity of earthquake fault varied with different phases. Tectonic activity which accelerates the organic carbon the oxidation is beneficial to development of organisms and also helpful to the phosphate accumulation. In addition, well-kept paleoseismic records are of great significance to deduce the sedimentary environment.

Key words: seismites; seismic structure; seismic sequence; geological significance; Doushantuo Formation; Ediacaran