

灵山岛早白垩世软沉积物变形构造触发机制 及其古环境意义探讨

葛毓柱, 钟建华

中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

内容提要:灵山岛早白垩世灵山岛组发育丰富的软沉积物变形构造。野外踏勘船厂、灯塔和千层崖三个剖面, 根据沉积外观可分为变形层段和非变形层段两个部分。软沉积物变形构造在变形层段和非变形层段均有发育。其中, 变形层段中可见褶皱变形、变形层理及大型负载构造。非变形层段可见火焰构造、同沉积布丁构造和同沉积微断层。研究发现, 变形层段软沉积物变形构造尺度大(厚度可至十多米, 长度可至数百米), 侧向连续性好; 非变形层段软沉积物变形构造尺度小(厚度仅几个厘米), 侧向连续性差。且变形层段和未变形层段厚度统计数据表明, 变形层段软沉积物变形构造与砂岩厚度无必然联系, 而非变形层段软沉积物变形构造多出现在粒序砂岩层底部或旋回砂岩层变厚过程中。沉积环境表明, 非变形层段和变形层段为一深水低角度斜坡沉积产物。软沉积物变形构造发育形态和数量受到斜坡地形的控制。结合沉积环境及沉积特征分析, 认为变形层段软沉积物变形构造触发机制为地震, 而非变形层段软沉积物变形构造触发机制为负载作用。锆石测年数据表明灵山岛组与上覆流纹岩沉积时间相近, 因此地震活动可能与岩浆侵入或早期火山喷发活动相关。此外, 汇总早白垩世重要事件, 发现灵山岛组沉积、变冷事件、恐龙迁移、海平面变化和同位素偏移具有时间一致性, 因此推断这些事件可能共同对应了早白垩世一次与火山活动相关的短期灾难性事件(如早白垩世缺氧事件)。

关键词:灵山岛; 早白垩世; 软沉积物变形构造; 触发机制; 古环境意义

软沉积物变形构造类型繁多, 包括褶皱构造、负载构造、泄水构造、火焰构造、包卷层理等(杜远生等 2007; Moretti and Sabato, 2007; Gilbert et al., 2011; Owen and Moretti, 2011; 乔秀夫等 2012; 贺静等, 2017), 可以出现在河流相(Rana et al., 2016), 湖相(Gilbert et al., 2011), 海相(Kopf et al., 2016), 冰川(Lesemann et al., 2010)等多种沉积环境中。相同的沉积环境可以发育不同的软沉积物变形构造, 相同的软沉积物变形构造也可以出现在不同的沉积环境中。软沉积物变形构造触发机制多种多样, 如陨石撞击、火山活动、地震活动、地下水波动、海啸、沉积物过度卸载等(杜远生等 2007; Moretti and Sabato, 2007; Owen et al., 2011; Alsop and Marco, 2013), 并且不同的触发机制之间还具有一定的关联性, 如陨石撞击可以引发火山和地震, 火山可以引发地震, 地震可以导致海啸等。因此, 关于软沉积物变形构造触发机制的讨论是近年来沉积学讨论的焦点和难点之一。液化和流化作用是产生软沉积物变形构造的重要因素(Moretti et al., 2001;

Moretti and Sabato, 2007; Owen and Moretti, 2011), 但是对于如何更深层次的正确判断相关触发机制, 不同的学者提出了不同的观点, 有的学者基于标准判别法, 建立了一系列触发机制判别标准(Greb and Archer, 2007), 有的学者则根据背景环境判别法, 结合沉积、构造环境对触发机制进行判别(Moretti et al., 2001; Alfaro et al., 2002), 有的学者结合前面两种方法共同应用(Jones and Omoto, 2000; Owen and Moretti, 2011)。此外, 以往许多软沉积物变形构造触发机制判别标准是不可靠的, 非成因性的或难以应用于实际(Owen and Moretti, 2011), 并且软沉积物变形构造触发机制多集中于地震方面, 而非地震触发机制的研究薄弱, 值得进一步研究和加强。软沉积物变形构造研究对于分析古构造和古地理也具有积极意义。

灵山岛早白垩世沉积地层中发育了丰富的软沉积物变形构造, 其具有多类型、多期次、多尺度的特点。针对这套软沉积变形地层, 许多学者针对变形构造类型、变形期次、触发机制、沉积环境、构造意义开展

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41572088)的成果。

投稿日期: 2017-02-26; 改回日期: 2017-04-21; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.007

作者简介: 葛毓柱, 男, 1989年生。硕士研究生, 沉积地质学专业。Email: xiannizhike@163.com。

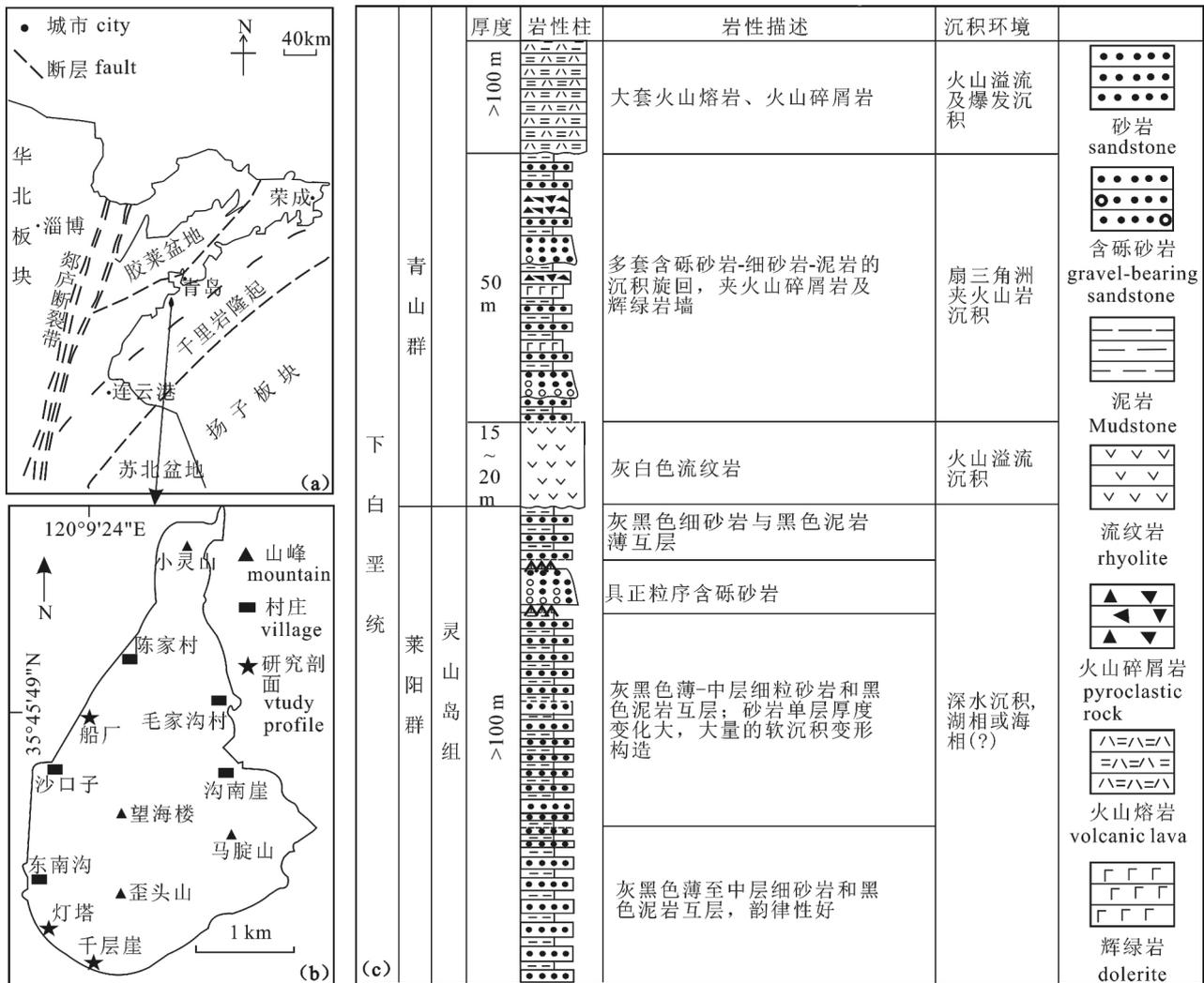


图1 青岛灵山岛地理位置及构造背景(a)、研究剖面位置(星形标记)(b)及地层柱状简图(c)

Fig. 1 Location and geological background of Lingshan Island, Qingdao (a), location of study outcrops (indicated by the star) (b) and strata profile (c)

图(a) 取自王安东等(2013), 图(b) 取自邵珠福等(2014); 图(c) 取自周瑶琪等(2015), 其中灵山岛组沉积根据野外观察进行修改, 青山群沉积根据张海春等(2013)进行修改

Fig. (a) is adapted from Wang Andong et al. (2013&); Fig. (b) is adapted from Shao Zhufu et al. (2014&); Fig. (c) is adapted from Zhou Yaoqi et al. (2015&). The data of Lingshanda Formation is modified based on field observation and the data of Qingshan Group is modified based on Zhang Haichun et al. (2013&)

了广泛深入的工作(吕洪波等 2011; 钟建华 2012; 董晓朋等 2013; 王安东等 2013; 邵珠福等 2014; 葛毓柱等 2015)。迄今为止, 软沉积物变形构造的触发机制集中在地震方面(吕洪波等, 2011; 王安东等 2013)。但是, 触发机制的研究缺乏沉积环境分析及排除非地震成因的干扰。此外, 一些新的研究成果也陆续出现。结合前人成果和自身工作, 本文首先对研究区软沉积物变形构造进行分类, 然后对不同类别的软沉积物变形构造触发机制进行判别, 并进一步探讨触发机制背后所指示的古环境意义。

1 地质背景

灵山岛基本地理信息如下: 青岛东南近岸海域, 距离胶南市大珠山约 10 km(图 1a); 岛屿呈水滴状, 北窄南宽, 南北长约 5.6 km, 东西宽大致为 3.5 km, 面积约 7.66 km², 最高点海拔 513.6 m(图 1b)。据前人研究和野外踏勘成果, 灵山岛自下而上至少发育四套地层(图 1c): 巨厚浊积岩, 未完全出露, 下部位于海水之下, 由灰黑色砂岩、粉砂岩及黑色泥页岩组成, 并形成良好韵律性; 5~20 m 厚灰白色火山

流纹岩, 出露于全岛约 2/3 海岸线, 可作为地层对比标志层, 并自南向北厚度发生尖灭; 浅黄色互层砾岩, 含砾砂岩和灰色泥岩; 多套安山质火山碎屑岩 (吕洪波等 2011; 王安东等 2013; 张海春等 2013; Wang Jun et al., 2014)。

根据区域地质资料, 锆石测年和化石资料可知, 灵山岛下部巨厚浊积岩沉积时期相当于胶莱盆地莱阳群, 而其上部三套沉积地层则相当于青山群 (王安东等 2013; 张海春等 2013; 周瑶琪等 2015; 李守军等 2017)。其中, 灵山岛下部巨厚浊积岩发育丰富的软沉积物变形构造, 为研究目的层位。关于这套沉积发育的沉积环境和构造背景颇有争议。灵山岛位于苏鲁造山带内, 而苏鲁造山带为秦岭—大别造山带北延部分, 代表扬子板块和华北板块的碰撞带 (许志琴等 2015)。吕洪波等 (2011, 2013), 张海春等 (2013), Wang Jun 等 (2014) 认为这套产物为残余洋盆深海沉积, 进而说明扬子板块和华北板块至早白垩世仍未全部焊接完毕, 其依据如下: 巨厚浊积岩中砂岩层粒序层理发育, 黑色页岩页理极度发育, 且保存较好; 发育规模巨大的软沉积滑塌变形构造, 保存较好; 虽然化石罕见且保存不好, 但是发现与海水活动有关的沟鞭藻碎片和膜状藻类片段。钟建华等 (2012, 2016), 邵珠福等 (2014) 认为至早白垩世两大板块已碰撞完毕, 这套沉积物为湖相相对浅水沉积, 依据如下: 大型滑塌变形构造连续性良好且内含大量结构保存完好的植物碎屑; 巨厚浊积岩中砂岩以及更细粒沉积岩中颗粒呈现叠瓦构造; 沉积物底部沟模构造可在浅水中形成; 在背来石剖面发现风暴岩沉积。周瑶琪等 (2015) 依据山东东部多地剖面沉积、测年成果并结合岩浆活动及区域构造背景, 认为灵山岛在早白垩位于一裂陷盆地内部, 并指出莱阳期, 此裂陷盆地为区域拉伸构造所致, 裂陷作用相对于胶莱盆地更为强烈, 发育海相深水浊积岩系。此裂陷盆地与位于苏鲁造山带另一侧的胶莱盆地构造发育背景相似但又有所不同。最近, 李守军等 (2017) 则报道灵山岛组中发现了鱼类和叶肢介化石, 认为这套地层属于陆相沉积。

虽然, 各家观点争鸣, 但是较为统一的看法是, 这套浊积层序为深水斜坡沉积产物 (董晓朋等 2014; 邵珠福等 2014; 周瑶琪等 2015), 根据重力流沉积及页岩层理保持完好判断水深应位于正常风暴浪基面之下。由于这套浊积地

层特征明显不同于同期胶莱盆地莱阳群法家莹组, 张海春等 (2013) 将之命名为灵山岛组。为了后文叙述及讨论方便, 本文将采用这个命名。

2 研究剖面概况

本文对灵山岛船厂、灯塔和千层崖三个剖面进行了野外踏勘和研究。根据沉积形态, 三个剖面中灵山岛组可直观分为未变形层段和变形层段两个部分, 两个部分基本组成均为砂页岩互层 (图 2)。其中, 砂岩层呈灰黑色、黑色, 具粒序层理和底模构造, 颗粒组分主要为石英、长石和碳酸盐岩岩屑, 颗粒分选磨圆差。此外, 砂岩具有多成因性 (将另文介绍); 页岩层为黑色, 毫米级页理发育。软沉积物变形构造在未变形层段和变形层段均有出现, 但是在变形层段, 软沉积物变形构造扭曲改变了原始地层成层性, 而未变形层段地层保持原有成层性。下面

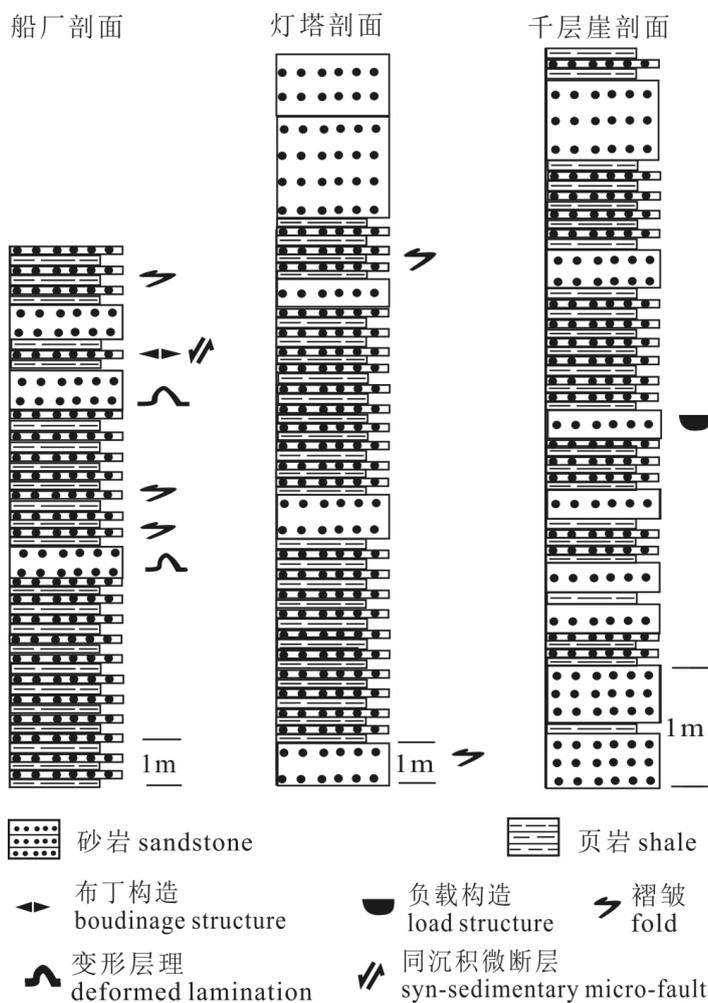


图 2 青岛灵山岛研究剖面岩性及沉积构造简图
Fig. 2 Sketch of lithology and sedimentary structures of research outcrops, Lingshan Island, Qingdao

将对两个层段变形构造类型进行介绍。

3 软沉积物变形构造

3.1 变形层段

如前文所述,变形层段整体表现为扭曲变形,内部软沉积变形构造大致分为褶皱变形、变形层理和负载构造三大类。

3.1.1 褶皱变形

三个研究剖面中均可见褶皱变形构造,在船厂剖面和灯塔剖面尤其明显。根据褶皱变形段的厚度和强度,其可以分为两类:①褶皱变形层段厚度较

大(近米级或米级以上),岩性组成为砂页岩互层,但砂泥比高,含较厚层砂岩。褶皱类型主要为斜歪和平卧。褶皱波长可至百米,幅度可至10 m。轴面向NW倾斜,枢纽呈NE—SW向延伸(图3a);②褶皱变形段厚度较薄(一般<0.5 m),岩性组成为砂页岩互层且砂泥比低。褶皱类型包括直立、斜歪和平卧。褶皱波长0.1~0.3 m,幅度为0.1~0.2 m。轴面NW向倾斜,且枢纽NE—SW向延伸(图3b)。千层崖剖面可见褶皱变形发生在两砂岩层接触处,其中,上部砂岩层泥质含量较高(图3c)。在船厂剖



图3 青岛灵山岛褶皱变形构造野外照片

Fig. 3 Field photos of folds on the Lingshan Island, Qingdao

- (a) 大型滑塌褶皱变形,含厚层砂岩,船厂剖面;(b) 小型褶皱变形,由砂页岩薄互层组成,灯塔剖面;(c) 两砂岩层接触处出现褶皱变形,其中上部砂岩层泥质含量高,呈现黑色,千层崖剖面;(d) —(e) 侧向上平卧褶皱(d) 向鞘褶皱(e) 转变,船厂剖面
(a) large-scale fold deformation, containing thick sandstone, Chuanchang; (b) small-scale fold deformation consisting of interbeddings of sandstone and shale, Dengta; (c) fold deformation at the contact of two sandstone beds, of which the upper one shows more mud content, Qiancengya; (d) —(e) laterally, recumbent fold (d) changing into sheath fold (e), Chuanchang

面,可见褶皱沿轴面倾斜方向类型发生演变,由斜歪—平卧褶皱变为鞘褶皱(图 3d,e)。鞘褶皱平行轴面倾斜方向呈平卧褶皱状,而垂直于轴面倾斜方向为同心圆状(图 3e)。

3.1.2 变形层理

变形层理出现在厚层砂岩中,且在砂岩下中上

部呈不同表现。下部,大型砂岩团块呈豆荚状或透镜状陷入下伏泥页岩层中,长度可达数米级,表现为不对称负载构造(图 4a);中部,变形层理表现为许多褶皱化砂质团块,扭曲变形现象明显,长度一般在数厘米左右。细致观察可见,砂质团块由砂岩核心和外部页岩包壳组成(图 4b);上部,变形层理表现

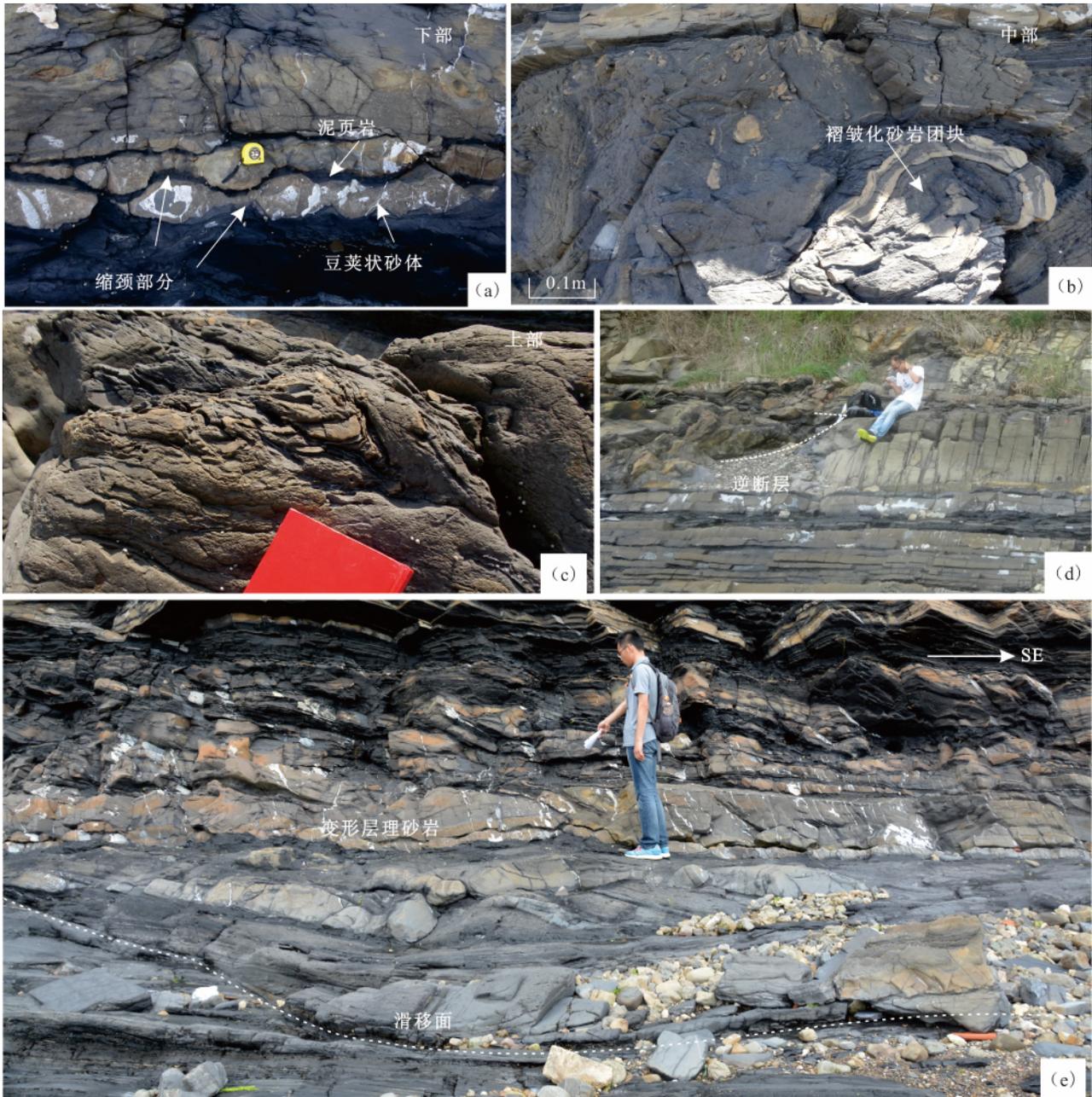


图 4 青岛灵山岛船厂剖面变形层理构造野外照片

Fig. 4 Field photos of distorted lamination, Chuanchang, Lingshan Island, Qingdao

(a) 下部豆荚状砂岩体,被下覆泥页岩所分割;(b) 中部褶皱化砂质团块,可见砂岩核心和周围泥页岩包边;(c) 上部致密褶皱;

(d) 变形层理砂岩内部逆断层;(e) 变形层理砂岩之下可见滑移面

(a) in the lower part, leguminiform sandstone body separated by shale/mudstone; (b) in the middle part, folded sandy patches with sand cores and shale cortex; (c) in the upper part, dense folds; (d) a reverse fault in the deformation sandstone; (e) a slide plane under the sandstone with distorted layers

为致密褶皱层(图4c),褶皱尺度小且紧密排列。此外,变形层理砂岩内部可见逆断层(图4d),底部可见铲状滑移面(图4e)。

3.1.3 负载构造

千层崖剖面可见大型负载构造,出现在灰黑色砂岩中(图5)。单个负载构造整体呈纺锤状,中间厚,向两端变薄,其高度相对稳定,约半米左右,但是长度变化较大,最长可达数米。负载构造之间被下伏砂泥薄互层所形成的似底辟构造所分割。负载构造形态包括对称与不对称两种。剖面中只见负载构造出现在相邻两套厚层砂岩中(图5a),其中下套砂岩厚度相对较大。侧向追踪来看,负载构造虽不见全层分布,但是延伸过百米。

3.2 未变形层段

未变形层段原始成层性良好,呈席状分布,内部软沉积物变形构造主要发育在薄砂页岩互层中,范围尺度小,主要类型为火焰构造,同沉积布丁构造及同沉积微断层(图6)。

3.2.1 火焰构造

此类构造出现在砂页岩薄互层中粒序砂岩层底部,由砂岩层底部页岩向上挤入形成(图6a)。表现出良好的对称性,高度和长度分别可达3.5 cm和5.0 cm,侧向分布不连续。

3.2.2 同沉积布丁构造

主要出现在砂页岩互层中。在垂直于层面挤压应力下,砂岩层受到上下页岩层拉伸作用,形成布丁状。布丁之间由缩颈构造相连接或被断裂所分割。在船厂剖面,布丁构造(又称为“多米勒骨牌构造”)呈现不对称性,长度3~11 cm。在灯塔剖面,布丁构造呈现对称状,且部分布丁构造向上弯曲呈月牙状,可能发生了液化泄水现象(图6b)。长度0.6~8.0 cm,高度0.1~3.0 cm。侧向上,布丁构造局部化分布,不连续,在船厂剖面,可见布丁构造沿侧向同沉积微断层转变(图6c,d)。

3.2.3 同沉积微断层

同沉积微断层表现为正断层,出现在互层中砂岩层中,断层位移只有厘米级(图6c,d)。断层面平直或铲状,切穿原始沉积层理。断层面呈NE—SW走向,平行于褶皱枢纽走向。断层面呈NW或SE两种倾向,从而局部形成类似小型地堑构造。同沉积微断层侧向上也非连续分布。

3.3 未变形层段及变形层段厚度分析

前人对灵山岛软沉积物变形构造触发机制的研究主要集中在变形层段,而对未变形层段缺乏研究。

为了探讨未变形层段对软沉积物变形构造沉积环境和触发机制的启示意义,本研究针对船厂和灯塔两个变形层段和未变形层段表现最为良好且容易测量的剖面进行了沉积厚度分析,详细测量了未变形层段中每层砂/页岩厚度,并将每个变形层段作为一层进行厚度测量。测量数据表明(图7):未变形层段,单砂层厚度变化范围大(0.1~95.0 cm);单页岩层厚度分布范围为0.1~10.5 cm;变形层段厚度变化为0.13~2.0 m。图7表示了所测两个剖面中未变形层段砂/页岩厚度和变形层段厚度的详细分布情况,图中横坐标代表页岩层累计厚度,纵坐标代表砂岩层累计厚度,斜率代表砂页岩比。

未变形层段厚度分布表现出明显的旋回性,每个旋回中,砂岩层厚度向上变厚。变形层段根据厚度分布和沉积特征可分为两类:SSD-1,厚度半米级以下,由砂页岩薄互层组成,褶皱类型为直立、斜歪和平卧;SSD-2,厚度米级或米级以上,由砂页岩互层组成,含厚层砂岩,褶皱类型为斜歪和平卧。其中,船厂剖面记录了五层变形,其中两层厚度为半米之下,其余三层达米级以及米级以上。灯塔剖面观察到六层变形层,其中三层为米级以下,另外三层为近米级或米级以上。两个剖面中,SSD-1和SSD-2间互出现,SSD-2向上厚度呈明显增加趋势,SSD-1厚度在船厂剖面向上增加,而在灯塔剖面保持相对稳定。

此外,未变形层段的页岩沉积具有时间尺度意义,可以用来衡量变形层段垂向上出现的时间间隔。Mawson和Tucker(2009)在探讨深水浊积岩沉积旋回及其频率变化的时候认为页岩中每个纹层沉积需要一年,从而利用页岩沉积厚度作为时间标尺。借用上述研究方法并结合研究区页岩单个层理厚度变化,认为1 cm的页岩代表50 a沉积时间,具体测量信息如表1所示,从而计算了变形层段出现的时间间隔(1~11 ka)和对应的未变形层段沉积速率(0.2~0.9 m/ka)。为了验证沉积速率的合理性,将未变形层段的沉积速率与邻区胶莱盆地同期沉积速率相对比(表1),二者在同一数量级,说明是合理的,但是也应指出灵山岛组沉积速率约为胶莱盆地的2~3倍,可能是因为本区为重力流沉积区,从而沉积速率较大,也可能指示了本区构造发育不同于同期胶莱盆地(Wang Jun et al., 2014; 周瑶琪等, 2015)。

4 问题讨论

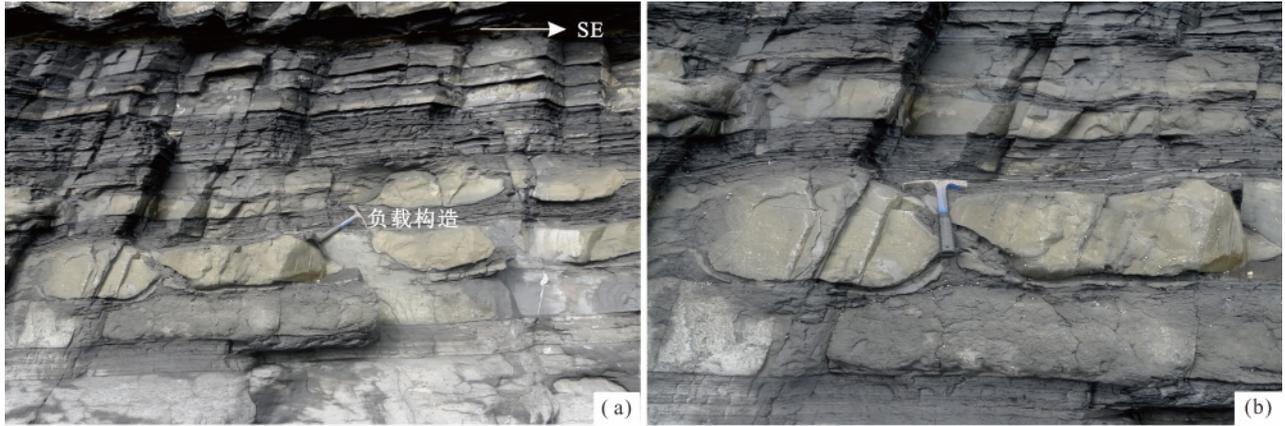


图 5 青岛灵山岛千层崖剖面负载构造野外照片 (a) 及其局部放大 (b)

Fig. 5 Field photos of load structures (a) and the detailed view (b) , Qiancengya , Lingshan Island , Qingdao

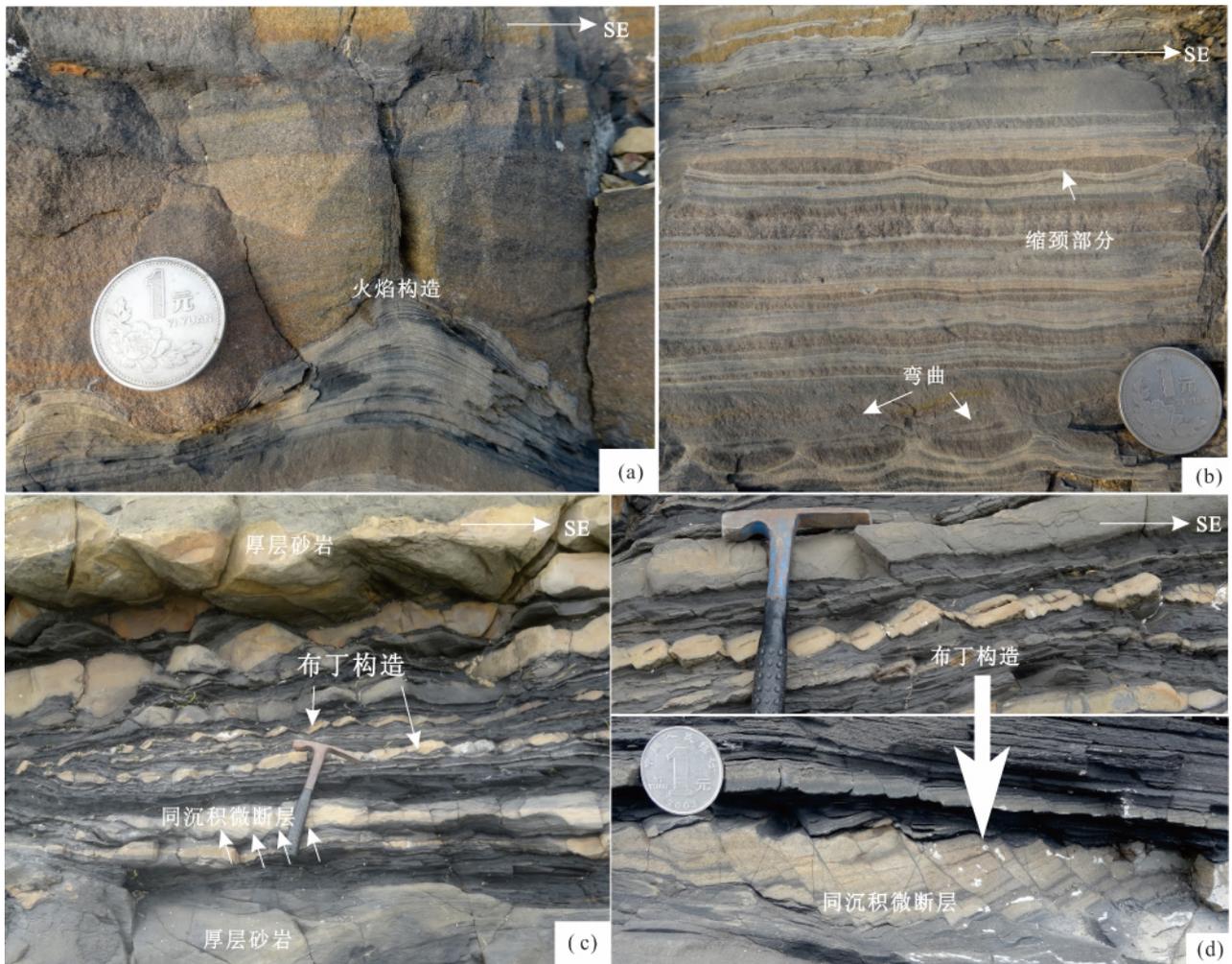


图 6 青岛灵山岛未变形层段变形构造野外照片

Fig. 6 Field photos of soft-sediment deformation structures in the undeformation intervals , Lingshan Island , Qingdao

(a) 对称状火焰构造 , 灯塔剖面; (b) 对称状布丁构造 , 可见缩颈构造和布丁弯曲现象 , 灯塔剖面;

(c) 同沉积布丁构造和微断层 , 船厂剖面; (d) 同一层段由布丁构造向同沉积微断层转化 , 船厂剖面

(a) symmetric flame structure , Dengta; (b) symmetric boudinage structures , showing necking parts and bending , Dengta; (c) syn-sedimentary boudinage and micro-normal faults , Chuanchang; (d) transition from boudinage into micro-normal faults in the same bed , Chuanchang

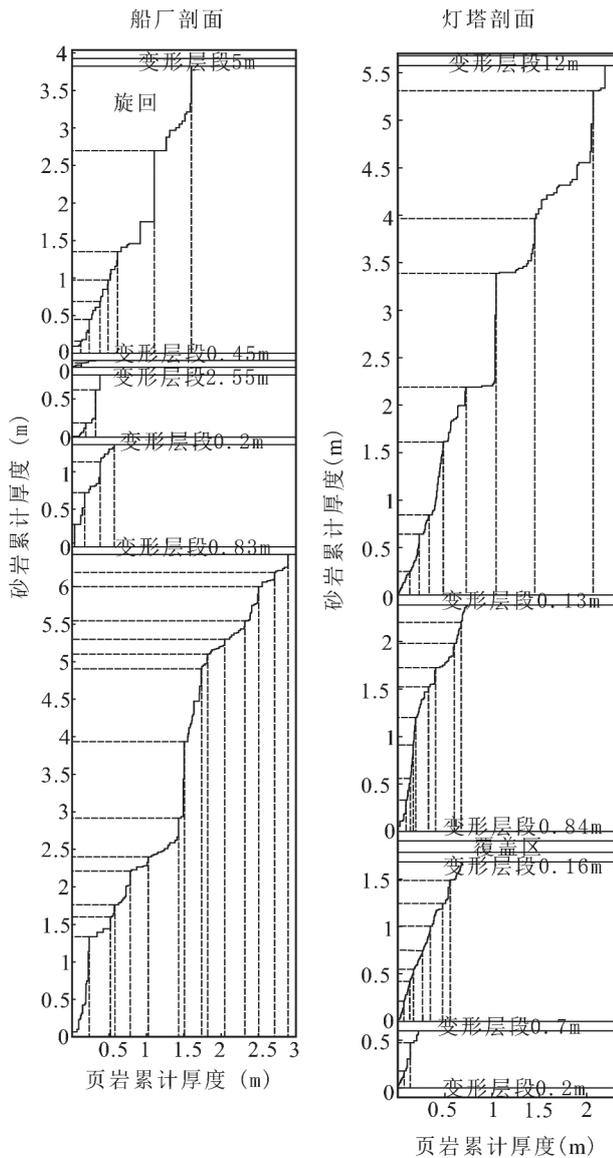


图7 青岛灵山岛船厂和灯塔剖面砂岩—页岩厚度统计

Fig. 7 Sand—shale thickness statistics of Chuanchang and Dengta, Lingshan Island, Qingdao

横坐标代表页岩累计厚度,纵坐标代表砂岩累计厚度。图中实线平行横坐标每一短线代表一页岩层,平行纵坐标每一短线代表一砂岩层。变形层段如黑框所示。单个旋回由虚线所表示

The accumulated thickness of sandstone is shown in the ordinate and the accumulated thickness of shale in the abscissa. In the solid line, a bed of sandstone or shale is represented by a short line parallel to the ordinate or the abscissa and the deformed intervals are shown with black rectangles. Cycles are shown between the dashed lines

4.1 沉积环境讨论

下面根据变形层段和未变形层段沉积组成、沉积构造、沉积组合及层厚特征对沉积环境进行相关讨论。

沉积组成方面,虽然滑塌变形层段在船厂和灯

塔剖面中占据很大比重,但是未变形层段的砂页岩薄互层为背景环境(深水,重力沉积频繁)沉积产物。且变形层段的岩性组成也以砂页岩薄互层为主,其沉积组分与未变形层段十分相似。二者组分的相似性似乎指示滑塌沉积物非远源沉积所致,因为如果这样的话,其沉积组分应与背景沉积部分产生差异。因此推断,变形层段与未变形层段沉积于相同或相近沉积环境中。至于沉积物中大量保存完好的植物碎屑,其最初可能为悬浮沉积所致,因为紊流搬运不利于其完整性保存。另外一个问题是,这个相同或相似的沉积环境其空间延伸范围有多大。野外观察可见整个灵山岛处处可见砂页岩薄互层沉积,从岛的南端到北端延伸范围近6 km,如果再考虑到水下淹没部分,可以推断滑塌沉积在这种环境中可以搬运很远的距离。

沉积构造方面,组成滑塌变形段和未变形段的砂页岩薄互层中,砂岩层中可见粒序层理及底模构造,但是很多砂岩层中粒序层理及底模构造规模很小,对应沉积厚度一般小于1 cm。沉积构造的弱显示,及所在较小的沉积厚度可能代表了重力流末端沉积状态,此时重力流由于前期卸载作用,沉积负荷及流体能量大大下降,从而产生前述沉积特征 (Mutti, 1977)。

沉积组合方面,未变形互层段显示出明显的旋回性,单个旋回中自下向上砂岩层变厚,这种旋回特征与深水扇体外端及末端朵叶体沉积特征相似,而缺乏浊流近端沉积的河道化特征及相关粗粒沉积 (Mutti, 1977)。

沉积层厚方面,组成滑塌变形段及未变形层段的砂页岩薄互层中,砂岩层厚度普遍较薄,仅有几个厘米。但是砂岩层侧向分布稳定,延伸范围广。值得注意的是,如岩性单元中介绍,一些厚层砂岩的出现,分析认为这些厚层砂岩的成因不同,其中浊流沉积厚层砂岩与薄互层砂岩同根同源,其较大的沉积厚度可能代表了规模较大的浊流活动。此外,剖面最下部砂页岩薄互层中砂页岩单层厚度为毫米—厘米级,很难区分成层性,符合深水沉积的特征。

综上所述,认为砂页岩薄互层为深水浊流末端沉积产物,滑塌变形也在这个环境里开始并沉积,并且这个沉积环境似乎覆盖了整个灵山岛地区。一些较大强度的浊流活动沉积了厚层浊积砂岩。滑塌变形构造特征指示了古斜坡地形的存在。但是在湖相还是海相均可以产生如此产物,需要来自地球化学及古生物的证据进一步研究及揭示本区的沉积环

表 1 船厂和灯塔剖面变形层段时间间隔及未变形层段沉积速率

Table 1 Time gap of the deformation intervals and sedimentary rates of the undeformation intervals

剖面	变形层段 间隔	未变形层段				对比数据
		总厚度(m)	页岩厚度(m)	沉积间隔(ka)	沉积速率(m/ka)	
船 厂 剖 面	MB - a	9.373	2.949	14.750	0.63	胶莱盆地莱阳期 沉积速率: 0.23 ~ 0.37m/ka (李金良等 2007); Roker Formation 深水斜坡浊积岩: 0.2 ~ 0.6m/ka (Mawson and Tucker , 2009)
	a - b	1.921	0.564	2.820	0.68	
	b - c	1.194	0.374	1.870	0.63	
	c - d	0.412	0.324	1.620	0.25	
	d - e	5.430	1.608	8.040	0.67	
灯 塔 剖 面	a - b	1.100	0.223	1.115	0.98	
	b - c/d	2.399	0.703	3.515	0.68	
	c/d - e	3.104	0.738	3.690	0.84	
	e - f	7.635	2.050	10.250	0.74	

注: 表中 MB 为船厂剖面测量底部; c/d 表示 c , d 之间为覆盖区无法测量。

境。野外观察可见 ,三个剖面位置自下而上为千层崖、灯塔、船厂 ,且厚层砂岩类型及薄互层砂泥比出现相应变化 ,其中千层崖剖面具砂质碎屑流成因砂岩且互层部分呈现较高泥页岩含量 ,可能代表了相对较大的水深 ,而其它两个剖面厚层砂岩主要为浊流成因且互层中砂泥比升高 ,指示所处水深变浅。根据不同剖面中软沉积物变形构造类型可进一步细化斜坡环境 ,船厂以滑塌褶皱为主兼具滑移面 ,灯塔剖面以滑塌褶皱为主 ,而千层崖剖面以负载构造为主。此外 ,据董晓朋等(2014) 报道 ,背来石剖面发现滑塌断崖及砾石沉积。结合前人认识 ,可以推断: 背来石剖面发育斜坡上部产物; 船厂兼具滑移面和滑塌褶皱 ,可能代表斜坡上、下部过渡区域产物; 灯塔以滑塌褶皱为主 ,可能表示斜坡下部产物; 千层崖

滑塌变形较少 ,推断指示斜坡底部或深水盆地。盆地演化导致的进积作用可能导致了剖面现在与古沉积位置的差异(董晓朋等 2014) 。另外根据未变形层段互层良好的成层性和延展性 ,发育的页岩层理及大量沉积物聚集 ,认为该斜坡坡度较低。

由于未变形段互层沉积呈良好的旋回性(向上砂岩层变厚) ,极其类似海底扇外扇及末端朵叶体沉积 ,且全岛均见分布(南北长约 6 km) 。为了进一步量化斜坡角度 ,借用全球海底扇沉积长度及斜坡角度数据 ,推断灵山岛组沉积斜坡角度介于 0.52° ~ 0.78°(图 8) ,介于部分沉积位于水下 ,坡度可能更小 ,需进一步验证。

4.2 触发机制探讨

如上所述 ,软沉积物变形构造在变形层段和未变形层段均有出现 ,但是沉积特征明显不同 ,认为二者触发机制存在差异(图 9) 。由于变形层段和未变形层段均为深水沉积产物 ,某些浅水及陆地触发机制可被排除 ,如波浪、冰川等活动。此外 ,沉积物中未见与陨石活动相关的组分报道。沉积负载和地震活动被认为是最可能的触发机制(王安东等 2013; 葛毓柱等 2015) 。其中 ,变形层段中软沉积物变形构造特征如下: ① 尺度较大(厚度可超 10 m ,长度可达数百米) ,分布范围广 ,且侧向连续性好 ,形成大型滑塌变形体。② 沉积坡度低(< 1°) 。这一点通过变形层段上下沉积层及页岩层理发育也可证实(图 3b) 。③ 变形层段之间垂向时间间隔短 ,远远小于常见的天文周期(离心率: 100 ka ,倾斜角: 41 ka ,岁差: 19 ~ 23 ka; Boer and Smith ,1994) 及构造周期(常见为几个百万年) 。⑤ 厚度统计数据表明 ,变形层段的出现与厚层砂岩并无一定关系。但是沉

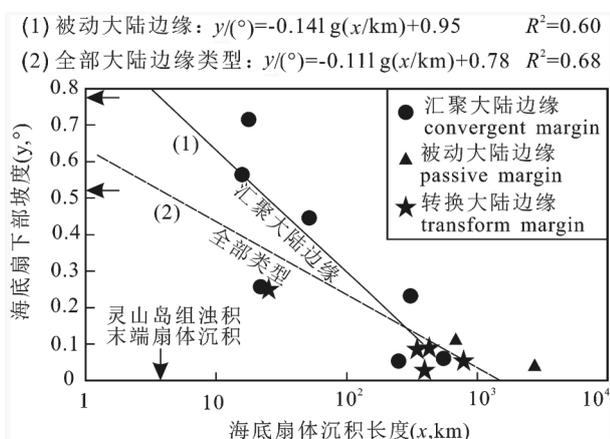


图 8 青岛灵山岛组沉积斜坡海底扇长度及其下部坡度关系(据 Fukuda et al. , 2015 修改)

Fig. 8 Relationship between submarine-fan length and lower-fan gradient , Lingshan Island , Qingdao (adapted from Fukuda et al. , 2015)

	变形层段	驱动机制	未变形层段	驱动机制
软沉积物变形构造	1m 逆断层	剪切力	砂岩 2cm 火焰构造	重力
	1m 滑移面	剪切力		
	1m 滑塌褶皱	剪切力	同沉积微断层 3cm	重力和剪切力
	0.3m 负载构造	重力和剪切力		
	不对称负载构造 20cm	重力和剪切力	不对称布丁构造 2cm	重力和剪切力
	变形层理 3cm	剪切力	对称布丁构造 1cm	重力
触发机制	地震活动		负载作用	

图9 不同软沉积物变形构造触发机制判别

Fig. 9 Triggers for different soft-sediment deformation structures

积负载作用并不一定表现为厚层砂岩,可以表现为砂岩层数增多,剖面自下而上也确实观察到这种趋势。此外,董晓朋等(2014)在背来石剖面灵山岛组发现了液化脉体,山东诸城莱阳群沉积物中也报道了古地震事件(何碧竹等,2012)。综上所述,认为触发机制最有可能为地震活动(图9),其产生的地震波增大沉积物孔隙中流体压力,导致沉积物液化,从而大大减少低角度斜坡摩擦阻力,引发斜坡滑塌变形(Alsop and Marco, 2013)。但是,必须意识到,沉积地形对软沉积物变形构造类型及空间演化的控制作用。此外,变形层段 SSD-1 与 SSD-2 间互出现,可能对应了地震活动的强弱变化,而变形层段总体厚度向上增加则可能反映了地震活动呈增强趋势。

未变形层段软沉积物变形构造,包括火焰构造、不对称/对称布丁构造等,尺度小,一般只有数厘米,且侧向分布局限,多与粒序砂岩层直接接触,或分布与粒序砂岩层向上变厚的层位,或位于大型滑塌体下方,推断此类软沉积物变形构造与负载作用有关(图9)。

4.3 触发机制古环境意义探讨

地震具有多种成因,包括人工地震和天然地震

(陈运泰等,2003),天然地震可由构造活动、火山活动、陨石撞击等导致。因此,探讨地震的成因对解释古构造及古环境具有积极意义。灵山岛组上覆一层灰白色流纹岩。这套流纹岩的出现似乎支持火山活动或者火山地震作为灵山岛组软沉积物变形构造的触发因素。问题是,灵山岛组与上覆流纹岩并非整合接触(周瑶琪等,2015)。因此,在不知道此地层间断成因类型(沉积?构造?)及时间尺度的情况下,很难判断火山活动与灵山岛组软沉积物变形构造的相关性。灵山岛组沉积中也未有火山组份相关报道。但是,根据王安东等(2013),周瑶琪等(2015)的研究成果,灵山岛组上覆流纹岩锆石测年为 119.2 ± 2.2 Ma,王俊等(2014)对灵山岛组和上覆流纹岩也进行了锆石测年,认为灵山岛组沉积时间为 $131 \sim 121$ Ma,上覆流纹岩沉积时间为 123.9 ± 1.6 Ma。考虑到锆石测年的精度及采样数量(王俊等只对流纹岩采集了单个样品),灵山岛组及上覆流纹岩之间并没有较长的时间间断,一定程度上是连续沉积的。因此,灵山岛地震似乎与火山活动或其前期岩浆侵入有关。变形层段厚度向上增加直至被流纹岩覆盖,这也与火山活动逐步增强至爆发的趋势及火山活动的间歇性相一致。

值得关注的是, Yang Wubin 等(2013)通过锆石研究,认为早白垩世中高纬度地区可能发育大规模的大陆冰川(图10a),并对“热河动物群”演化产生影响。而何碧竹等(2012)研究了山东诸城早白垩世莱阳群沉积物中古地震事件与恐龙迁移活动的相关性。资料汇总发现,灵山岛组沉积、变冷事件、恐龙活动、海平面变化和同位素偏移具有时间一致性(图10b),因此推断这些重要事件一起可能对应了早白垩世存在的一次与火山活动相关的短期灾难性事件(如早白垩世缺氧事件)。岩浆侵入或早期火山喷发引发地震活动并向大气中释放出 SO_2 、 CO 等有毒气体。 SO_2 等有毒气体可以导致气候变冷,发育冰川,致使海平面下降,并影响生物活动(Guex et al., 2004)。此外,火山活动可能引发了沉积碳库(如天然气水合物)的失稳释放,从而导致碳同位素偏移,这也可能是灵山岛组生物化石缺乏的原因之一。因此,应对灵山岛组进行必要的地球化学分析(如碳氧同位素),这对揭示早白垩世气候变化具有特殊意义。

5 结论

(1) 灵山岛早白垩世灵山岛组发育良好的软沉

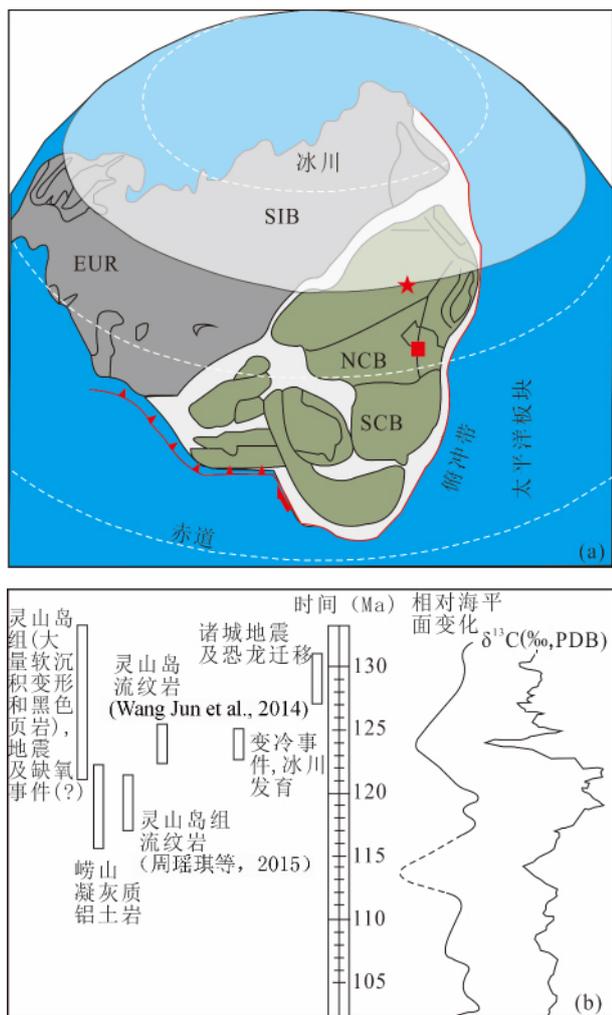


图 10 早白垩世古地理简图 (a) 及
早白垩世古事件图 (b)

Fig. 10 The sketch of paleogeography (a) and
important events (b) in the Early Cretaceous

(a) EUR, Europe; SIB, Siberian; NCB, north China; SCB, 扬子板块; 红星地区为大兴安岭地区, 红框地区为山东诸城及灵山岛地区。(b) 灵山岛组沉积, 火山活动, 变冷事件, 恐龙迁移, 海平面变化和碳同位素偏移。(图 a 源自 Yang Wubin et al., 2013; 图 b 海平面和同位素数据源自 Yang Wubin et al., 2013; 恐龙迁移源自何碧竹等, 2012; 灵山岛组及流纹岩测年源自 Wang Jun et al., 2014; 灵山岛流纹岩和崂山铝土岩测年源自周瑶琪等 2015)

(a) EUR, Europe; SIB, Siberian; NCB, north China; SCB, south China; The red star indicates Great Khingan Mountains and the red frame indicates Zhucheng and Lingshan Island in Shandong. (b) Lingshanda Formation, volcanic activity, cooling event, dragon migration, sea-level change and carbon isotope excursion. (Fig. a is from Yang Wubin et al., 2013; In Fig. b, sea-level curve and isotope curve are from Yang Wubin et al., 2013; Dragon migration is from He Bizhu et al., 2012; Dating of Lingshanda Formation and overlying rhyolite is from Wangjun et al., 2014; Dating of rhyolite and bauxite is from Zhou Yaoqi et al., 2015)

积物变形构造。船厂、灯塔和千层崖三个剖面根据沉积形态可直观分为变形层段和未变形层段。二者岩性组成基本相同, 为砂页岩互层。软沉积物变形构造在变形层段和未变形层段均有发育。

(2) 变形层段可见褶皱变形、变形层理和负载构造。褶皱变形根据发育规模可分为两大类: 一类尺度大, 以斜歪和平卧褶皱为主; 一类尺度小, 包括直立、斜歪和平卧褶皱。褶皱沿轴面倾斜方向发生类型转变。变形层理主要表现为褶皱化砂质团块, 由内部砂岩核心和外部页岩包边组成。负载构造见于厚层砂岩, 被下伏泥页岩侵入相分隔。非变形层段可见火焰构造, 同沉积布丁构造和同沉积微断层。其中, 同沉积布丁构造和同沉积微断层具同层转化现象。

(3) 变形层段和非变形层段厚度统计数据表明, 非变形层段具有明显的旋回性, 每个旋回中砂岩层厚度向上增加。变形层段软沉积物变形构造与沉积厚度无必然关联。非变形层段软沉积物变形构造常见于粒序砂岩层底部和砂岩层向上增厚旋回的上部。

(4) 沉积环境分析表明, 背来石、船厂、灯塔和千层崖剖面共同组成一个完整的低角度深水斜坡沉积体系。斜坡地形控制了软沉积物变形构造的发育场所和发育特征。

(5) 根据沉积环境和变形构造沉积特征, 推测变形层段软沉积物变形构造触发机制为地震活动, 而非变形层段软沉积物变形构造触发机制为负载作用。

(6) 结合前人研究成果, 认为灵山岛组地震可能与火山活动有关, 且与变冷事件、恐龙迁移、海平面变化、同位素偏移具有时间一致性, 可能对应了一次早白垩世短期灾难性事件(如早白垩世缺氧事件)。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 陈运泰, 吴忠良, 吕苑苑. 2003. 地震的分类. 城市与减灾, 1: 13 ~ 15.
- 董晓朋, 吕洪波, 张星, 张海春, 王俊, 张素菁. 2013. 山东灵山岛早白垩世复理石软沉积变形期次解析. 地质论评, 59(6): 1061 ~ 1066.
- 董晓朋, 吕洪波, 张星, 张海春, 王俊, 张素菁. 2014. 灵山岛北端早白垩世复理石中的滑塌断崖. 地质论评, 60(4): 772 ~ 779.
- 杜远生, G. SHI, 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 ~

- 520.
- 葛毓柱, 钟建华, 樊晓芳, 任启强, 邵珠福. 2015. 山东灵山岛滑塌体内部沉积及构造特征研究. *地质论评*, 61(3): 635~643.
- 何碧竹, 乔秀夫, 田洪水, 张艳霞. 2012. 山东诸城早白垩世莱阳期古地震事件与恐龙迁移. *地质学报*, 86(8): 1320~1330.
- 贺静, 冯胜斌. 2017. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长8段液化柱及相关软沉积物变形. *地质学报*, 91(3): 645~657.
- 李守军, 张祥玉, 赵秀丽, 孙智新, 张道云, 章磊, 徐磊, 魏宁, 刘宝梅. 2017. 山东省青岛市灵山岛下白垩统中发现鱼类和叶肢介化石. *地质论评*, 63(1): 1~6.
- 李金良, 张岳桥, 柳宗泉, 任凤楼, 袁嘉音. 2007. 泉胶莱盆地沉积—沉降史分析与构造演化. *中国地质*, 32(4): 240~250.
- 吕洪波, 王俊, 张海春. 2011. 山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探. *地质学报*, 85(6): 938~946.
- 吕洪波, 张海春, 王俊, 张素菁, 董晓朋, 张星. 2013. 灵山岛早白垩世复理石不是陆内三角洲沉积. *地质论评*, 59(1): 11~14.
- 乔秀夫, 郭宪璞, 李海兵, 苟宗海, 苏德辰, 唐哲民, 张伟, 杨光. 2012. 龙门山晚三叠世软沉积物变形与印支期构造运动. *地质学报*, 86(1): 132~156.
- 邵珠福, 钟建华, 李勇, 倪良田, 刘圣鑫, 范莉红, 陈彬. 2014. 青岛灵山岛晚中生代重力流沉积特征及环境分析. *地质论评*, 60(3): 556~566.
- 王安东, 周瑶琪, 闫华, 王瑞, 张振凯, 王子阳. 2013. 山东省灵山岛早白垩世软沉积物变形构造特征. *古地理学报*, 15(5): 718~728.
- 许志琴, 李源, 梁凤华, 裴先治. 2015. “秦岭—大别—苏鲁”造山带中“古特提斯缝合带”的连接. *地质学报*, 89(4): 671~680.
- 张海春, 吕洪波, 李建国, 王俊, 张素菁, 董晓朋, 张星, 黄振才, 舒云超, 任星民. 2013. 山东青岛早白垩世新地层单位——灵山岛组. *地层学杂志*, 37(2): 217~222.
- 钟建华. 2012. 灵山岛中生代沉积岩是深水远源浊积岩还是陆内三角洲沉积? 与吕洪波教授商榷. *地质论评*, 58(6): 1180~1182.
- 钟建华, 倪良田, 邵珠福, 李勇, 刘选, 毛霖, 刘圣鑫, 孙宁亮, 陈彬, 王凯, 罗可, 王韶洁, 刘闯, 刘宝, 熊志强. 2016. 青岛灵山岛下白垩统风暴岩与风暴沉积的发现及意义. *古地理学报*, 18(3): 382~398.
- 周瑶琪, 张振凯, 梁文栋, 李素, 岳会雯. 2015. 山东东部晚中生代构造—岩浆活动及原型盆地恢复. *地学前缘*, 22(1): 137~156.
- Alfaro P, Delgado J, Estévez A, Molina J, Moretti M, Soria J. 2002. Liquefaction and fluidization structures in messinian storm deposits (bajo segura basin, betic cordillera, southern spain). *International Journal of Earth Sciences*, 91(3): 505~513.
- Alsop G I, Marco S. 2013. Seismogenic slump folds formed by gravity-driven tectonics down a negligible subaqueous slope. *Tectonophysics*, 605: 48~69.
- Boer P L D, Smith D G. 1994. Orbital forcing and cyclic sequences. *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, 19: 1~14.
- Chen Zhigeng. 2015. Source remains of a Ms 7 cryptoexplosive earthquake occurring before 21. 8 Ma in East Qinling Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1495~1529.
- Dong Xiaopeng, Lu Hongbo, Zhang Xing, Wang Jun, Zhang Sujing. 2013. Stage analysis on the soft-sediment deformation in the Early Cretaceous Flysch, Lingshan Island, Shandong Province. *Geological Review*, 59(6): 1061~1066.
- Dong Xiaopeng, Lu Hongbo, Zhang Xing, Zhang Haichun, Wang Jun, Chang Su-Chin. 2014. Slump scarp outcrop found in Early Cretaceous Flysch, North of Lingshan Island, Qingdao, Shandong. *Geological Review*, 60(4): 772~779.
- Du Yuansheng, G. Shi, Gong Yiming, Xu Yajun. 2007. Permian Soft-sediment deformation structures related to earthquake in the southern Sydney Basin, Eastern Australia. *Acta Geologica Sinica*, 81(4): 511~520.
- Fukuda K, Suzuki M, Ito, Makoto. 2015. The origin and internal structures of submarine-slide deposits in a lower Pleistocene outer-fan succession in the Kazusa forearc basin on the Boso Peninsula of Japan. *Sedimentary Geology*, 321: 70~85.
- Ge Yuzhu, Zhong Jianhua, Fan Xiaofang, Ren Qingqiang, Shao Zhufu. 2015. Study on internal sedimentary and structural features of the slump body in Lingshan Island, Shandong. *Geological Review*, 61(3): 635~643.
- Gibert L, Alfaro P, Tortosa F J G, Scott G. 2011. Superposed deformed beds produced by single earthquakes (Tecopa Basin, California): Insights into paleoseismology. *Sedimentary Geology*, 235: 148~159.
- Guex J, Bartolini A, Atudorei V, Taylor D. 2004. High-resolution ammonite and carbon isotope stratigraphy across the Triassic—Jurassic boundary at New York Canyon (Nevada). *Earth and Planetary Science Letters*, 225: 29~41.
- Greb S F, Archer A W. 2007. Soft-sediment deformation produced by tides in a meizoseismic area, Turnagain Arm, Alaska. *Geology*, 35: 435~438.
- He Bizhu, Qiao Xiufu, Tian Hongshui, Zhang Yanxia. 2011. Paleoearthquake Events of Early Cretaceous Laiyang Stage and Dinosaur Migration in Zhucheng, Shandong Province, Eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 86(8): 1320~1330.
- He Jing, Feng Shengbin. 2017. The liquefied pillars and other SSDS of the 8th member of the Upper Triassic Yanchang formation in the Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 91(3): 645~657.
- Jones A P, Omoto K. 2000. Towards establishing criteria for identifying trigger mechanisms for soft-sediment deformation: a case study of Late Pleistocene lacustrine sands and clays, Onikobe and Nakayamadaira Basins, northeastern Japan. *Sedimentology*, 47: 1211~1226.
- Kopf A J, Stegmann S, Garziglia S, Henry P, Dennielou B, Haas S. 2016. Soft sediment deformation in the shallow submarine slope off Nice (France) as a result of a variably charged Pliocene aquifer and mass wasting processes. *Sedimentary Geology*, 344: 290~309.
- Lesemann J E, Alsop G I, Piotrowski J A. 2010. Incremental subglacial meltwater sediment deposition and deformation associated with repeated ice-bed decoupling: a case study from the Island of Funen, Denmark. *Quaternary Science Reviews*, 29: 3212~3229.
- Li Shoujun, Zhang Xiangyu, Zhao Xiuli, Sun Zhixin, Zhang Daoyuan, Zhang Lei, Xu Lei, Wei Ning, Liu Baomei. 2017. Discovery of Fish and Conchostracan Fossils in Lower Cretaceous in Lingshan Island, Qingdao, Shandong. *Geological Review*, 63(1): 1~6.
- Lin Jingliang, Zhang Yueqiao, Liu Zongquan, Ren Fenglou, Yuan Jiayin. 2007. Sedimentary—subsidence history and tectonic evolution of the Jiaolai basin, eastern China. *Geology in China*, 32(4): 240~250.
- Lü Hongbo, Wang Jun, Zhang Haichun. 2011. Discovery of the Late Mesozoic slump beds in Lingshan Island, Shandong, and a pilot research on the regional tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 938~946.
- Mawson M, Tucker M. 2009. High-frequency cyclicality (Milankovitch and millennial-scale) in slope—apron carbonates: Zechstein (Upper Permian), North-east England. *Sedimentology*, 56: 1905~1936.

- Moretti M , Sabato L. 2007. Recognition of trigger mechanisms for soft-sediment deformation in the Pleistocene lacustrine deposits of the Sant Arcangelo Basin (Southern Italy): Seismic shock vs. overloading. *Sedimentary Geology* ,196: 31 ~45.
- Moretti M , Soria J M , Alfaro P , Walsh N. 2001. Asymmetrical soft-sediment deformation structures triggered by rapid sedimentation in turbiditic deposits (Late Miocene , Guadix Basin , Southern Spain) . *Facies* ,44: 283 ~294.
- Mutti E. 1977. Distinctive thin-bedded turbidite facies and related depositional environments in the Eocene Hecho Group (South-central Pyrenees , Spain) . *Sedimentology* ,24: 107 ~131.
- Owen G , Moretti M. 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. *Sedimentary Geology* ,235: 141 ~147.
- Owen G , Moretti M , Alfaro P. 2011. Recognising triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions. *Sedimentary Geology* ,235: 133 ~140.
- Qiao Xiufu , Guo Xianpu , LI Haibin , Gou Zonghai , Su Dechen , Tang Zheming , Zhang Wei , Yang Guang. 2012&. Soft-sediment Deformations in the Late Trassic and the Indosinian Tectonic Movements in Longmenshan. *Acta Geologica Sinica* ,86(1) :132 ~156.
- Rana N , Sati S P , Sundriyal Y , Juyal N. 2016. Genesis and implication of soft-sediment deformation structures in high-energy fluvial deposits of the Alaknanda Valley , Garhwal Himalaya , India. *Sedimentary Geology* ,344: 263 ~276.
- Shao Zhufu , Zhong Jianhua , Li Yong , Ni Liangtian , Liu Shenxin , Fan Lihong , Chen Bin. 2014&. The sedimentary characteristics and environmental analysis of Late Mesozoic gravity flows in Lingshan Island. *Geological Review* ,60(3) :556 ~566.
- Wang Andong , Zhou Yaoqi , Yan Hua , Wang Rui , Zhang Zhenkai , Wang Ziyang. 2013&. Characteristics of soft-sediment deformation structures of the Early Cretaceous in Lingshan Island of Shandong Province. *Journal of Palaeogeography* ,15(5) :718 ~728.
- Wang Jun , Chang Su-Chin , Lüu Hong Bo , Zhang Haichun. 2014. Detrital zircon U-Pb age constraints on Cretaceous sedimentary rocks of Lingshan Island and implications for tectonic evolution of Eastern Shandong , North China. *Journal of Asian Earth Science* ,96: 27 ~45.
- Xu Zhiqin , Li Yuan , Liang Fenghua , Pei Xianzhi. 2015&. A connection between of the Paleo-Tethys suture zone in the Qinling—Dabie—Sulu orogenic belt. *Acta Geologica Sinica* ,89(4) : 671 ~680.
- Yang Wubin , Niu Hecai , Sun Weidong , Shan Qiang , Zheng Yongfei , Li Ningbo , Li Congying , Nicholas , T. , Arndt , Xu Xing , Jiang , Yuhang , Yu Xueyuan. 2013. Isotopic evidence for continental ice sheet in mid-latitude region in the supergreenhouse Early Cretaceous. *Scientific Reports* ,3: 1 ~6.
- Zhang Haichun , Lu Hongbo , Li Jianguo , Wang Jun , Chang Su-Chin , Dong Xiaopeng , Zhang Xing , Huang Zhencai , Sun Yunchao , Ren Xingmin. 2013&. The Lingshanda Formation: A new lithostratigraphic unit of the Early Cretaceous in Qingdao , Shandong , China. *Journal of Stratigraphy* ,37(2) :217 ~222.
- Zhong Jianhua , Ni Liangtian , Shao Zhufu , Li Yong , Liu Xuan , Mao Cui , Liu Shengxin , Sun Ningliang , Chen Bin , Wang Kai , Luo Ke , Wang Shao Jie , Liu Chuang , Liu Bao , Xiong Zhiqiang. 2016&. Tempestites and storm deposits in the Lower Cretaceous from Lingshan Island , Qingdao. *Journal of Palaeogeography* ,18(3) :382 ~398.
- Zhou Yaoqi , Zhang Zhenkai , Liang Wendong , Li Su , Yue Huiwen. 2015&. Late Mesozoic tectono-magmatic activities and prototype basin restoration in Eastern Shandong Province , China. *Earth Science Frontiers* ,22(1) : 137 ~156.

Discussion about Triggers of Early Cretaceous Soft-Sediment Deformation Structures on the Lingshan Island and the Implications for Palaeo-environment

GE Yuzhu , ZHONG Jianhua

School of Geosciences , China University of Petroleum , Qingdao , Shandong , 266580

Objective: Abundant soft-sediment deformation structures (SSDS) were found in the Lower Cretaceous Lingshanda Formation on the Lingshan Island. The study aims to discuss the triggers of different SSDS and related environmental meanings.

Methods: Field work was conducted for three sections: Chuangchang , Dengta and Qiancengya. Lithology and sedimentary structures were logged. Photos were taken for various SSDS. Thickness was also measured for both deformed and undeformed intervals.

Results: Based on field survey of Chuangchang , Dengta and Qiancengya sections , two basic subdivisions were recognized as deformation intervals and undeformation intervals respectively , in both of which SSDS are developed. Folds , deformation laminations and load structures are observed in the deformation intervals , and flame structures , syn-sedimentary boudinage structures and syn-sedimentary micro-faults are seen in the undeformation intervals. SSDS show large scale (up to >10m thick and up to a few hundred meters long) and good lateral continuity in the deformation intervals , but small scale (only few cm) and poor lateral continuity in the undeformation intervals.

Statistical relationship of thickness about undeformation and deformation intervals displays no direct relationship between SSDS of deformation intervals and sandstone thickness. However, SSDS of undeformation intervals occur at the base of graded sandstone or closely with sandstone beds with increased thickness in a thickening-upward cycle. Sedimentary environment analysis indicates a low-angle deep-water slope for the accumulation of Lingshandao Formation containing undeformation and deformation intervals. The slope topography, in a way, controls the morphology and quantity of SSDS. Based on sedimentary environment and sedimentary structures, the trigger is considered to be seismicity for the SSDS of the deformation intervals and over-loading for that of undeformation intervals. Dated age using zircon evidences approximated deposited time between the Lingshandao Formation and overlying rhyolite bed. As a result, the seismicity of the triggers may be related to volcanic activities or early magma intrusion. Besides, catastrophic events (e. g. Early Cretaceous Anoxic Events) are inferred in the Early Cretaceous based on time—consistence of Lingshandao Formation, cooling event, dinosaur activity, sea-level fluctuation and carbon isotope excursion.

Conclusions: The SSDS observed are considered to be caused by two kinds of triggers: seismicity and sediment load. Besides, the triggers imply contemporary volcanic activity. With other evidence, a catastrophic event like Early Cretaceous Anoxic Events is inferred.

Keywords: Lingshan Island; Early Cretaceous; SSDS; Trigger; Palaeo-environmental implication

Acknowledgement: The article is a research achievement of Chinese National Natural Science Foundation project (Number: 41572088).

First author: GE Yuzhu, male, born in 1989, master, mainly engaged in sedimentology. Email: xiannizhike@163.com

Manuscript received on: 2017-02-26; Accepted on: 2017-04-21; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.007